



HAL
open science

Expérience de terrain lors de la chasse de l’Arc (9 juin 2015) pour l’estimation de la dynamique sédimentaire pour des conditions proches du seuil de mise en mouvement des galets

B. Camenen, E. Perret, F. Thollet, A. Buffet, Guillaume Dramais, A. Herrero, Céline Berni, C. Le Bescond, M. Lagouy

► To cite this version:

B. Camenen, E. Perret, F. Thollet, A. Buffet, Guillaume Dramais, et al.. Expérience de terrain lors de la chasse de l’Arc (9 juin 2015) pour l’estimation de la dynamique sédimentaire pour des conditions proches du seuil de mise en mouvement des galets. [Rapport de recherche] irstea. 2015, pp.57. hal-02602332

HAL Id: hal-02602332

<https://hal.inrae.fr/hal-02602332>

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.



Expérience de terrain lors de la chasse de l'Arc (9 juin 2015) pour l'estimation de la dynamique sédimentaire pour des conditions proches du seuil de mise en mouvement des galets

**Benoît Camenen, Emeline Perret, Fabien Thollet, Alexis Buffet,
Guillaume Dramais, Albert Herrero, Céline Berni, Chloé Le Bescond, et
Mickaël Lagouy**

Irstea Lyon-Villeurbanne

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

Août 2015

Table des matières

1.Introduction.....	3
1.1.Site d'étude.....	3
1.2.Principe des essais.....	4
1.3.Mesures réalisées pendant l'événement.....	6
1.4.Protocole de travail.....	8
1.4.1.Jour avant la chasse.....	8
1.4.2.Jour de la chasse.....	8
1.4.3.Jour après la chasse.....	8
1.4.4.Post-traitement des données.....	9
2.Flux de Matière en Suspension (MES) dans l'Arc.....	10
2.1.Débit.....	10
2.2.Concentrations.....	10
2.3.Flux.....	11
2.4.Granulométrie des MES.....	13
3.Hydrodynamique du chenal secondaire.....	15
3.1.Évolution du niveau d'eau et de la pente de la surface libre.....	15
3.2.Traitement LSPIV.....	16
3.3.Débit dans le chenal secondaire.....	18
3.4.Contraintes moyennes sur la section.....	19
4.Dynamique des sédiments grossiers.....	22
4.1.Hydrodynamique autour des placettes.....	22
4.2.Déplacement des traceurs.....	23
4.3.Lien avec le diagramme de Shields.....	30
5.Dynamique des sédiments fins.....	32
5.1.Mesures réalisées au niveau de la tranchée.....	32
5.2.Hydrodynamique autour de la tranchée.....	35
5.3.Infiltration.....	37
5.4.Évolution de la plage de dépôt.....	40
5.4.1.Estimation de la surface du dépôt.....	40
5.4.2.Estimation de l'épaisseur et du volume du dépôt.....	43
5.5.Modélisation de l'infiltration et du dépôt.....	43
5.5.1.Décomposition de la courbe granulométrique.....	43
5.5.2.Estimations des concentrations en sable.....	45
5.5.3.Application au flux de chute pour l'infiltration.....	47
5.5.4.Application au flux de chute pour le dépôt.....	49
6.Conclusions et perspectives.....	52
6.1.Charriage et suspension graduée.....	52
6.2.Dépôts.....	53
6.3.Infiltration.....	54
7.Références.....	56

1. Introduction

L'objectif de cette expérience de terrain est de mieux comprendre la dynamique sédimentaire in situ dans le cas d'une rivière alpine avec une granulométrie très étendue (l'Arc en Maurienne) et pour des conditions proches de la mise en mouvement des galets. En particulier, nous cherchons à mieux comprendre la dynamique d'infiltration et de dépôt des matériaux fins (limons, sables) et l'impact du degré de colmatage de la matrice grossière sur le début de mise en mouvement des galets.

Ce document décrit les moyens mis en œuvre, les méthodologies utilisées, ainsi que les résultats de l'expérience réalisée au cours de la chasse de l'Arc du 9 juin 2015. Il reprend ainsi partiellement de premiers travaux réalisés lors de la chasse du 17 juin 2014 (Camenen et al., 2015a et b).

1.1. Site d'étude

L'expérience a été réalisée sur un banc situé en rive gauche de l'Arc sur la commune de Ste-Marie-de-Cuines à environ 2 km en amont du pont de la Madeleine. Ce dernier est facilement accessible par un chemin longeant la rivière en haut de digue. Les données de la station hydro-sédimentaire de Pontamafrey (débit, turbidité et concentration en MES) située juste en aval de St-Jean-de-Maurienne (1Km en aval de la confluence entre l'Arvan et l'Arc) seront aussi largement utilisées pour cette étude avec un décalage temporel d'environ 45 mn.

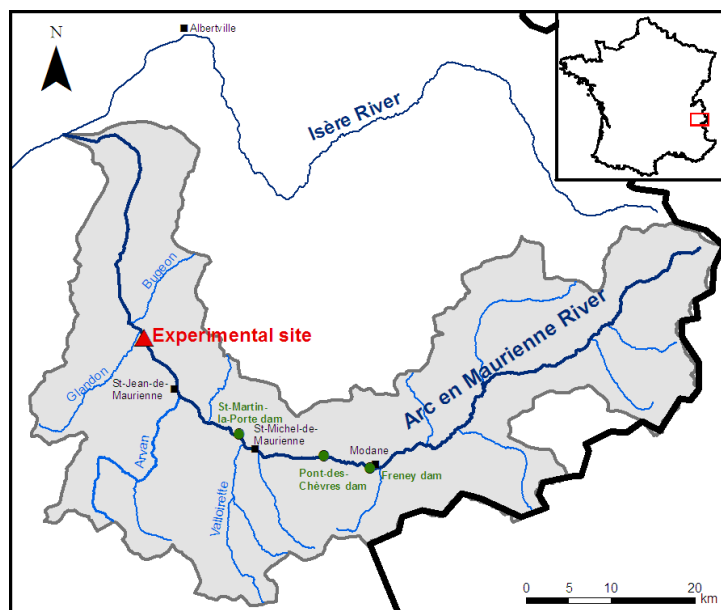


Figure 1 : Localisation du site d'étude.

Le choix du site est lié aux nombreuses études réalisées sur ce tronçon depuis 2005 (Jodeau, 2007 ; Jaballah, 2013, Jaballah et al., 2015) du fait de l'intérêt du système de bancs alternés et de l'accès relativement simple au lit depuis le chemin existant entre la rivière et l'autoroute. La figure 2 donne une vue générale du banc étudié et des expériences réalisées.



Figure 2 : Photo du banc de galet étudié depuis la digue.

1.2. Principe des essais

Deux essais sont proposés pour appréhender la dynamique sédimentaire sur le banc de galets pour des contraintes de cisailment proches de la contrainte critique de mise en mouvement des particules les plus grossières (galets), i.e. pour des conditions hydrauliques où un transport partiel existe (fines uniquement), voire où les particules les plus grossières (graviers et galets) commencent à bouger légèrement. Le dispositif expérimental ainsi que le principe des deux essais sont schématisés Fig. 3 (voir aussi photo Fig. 2).

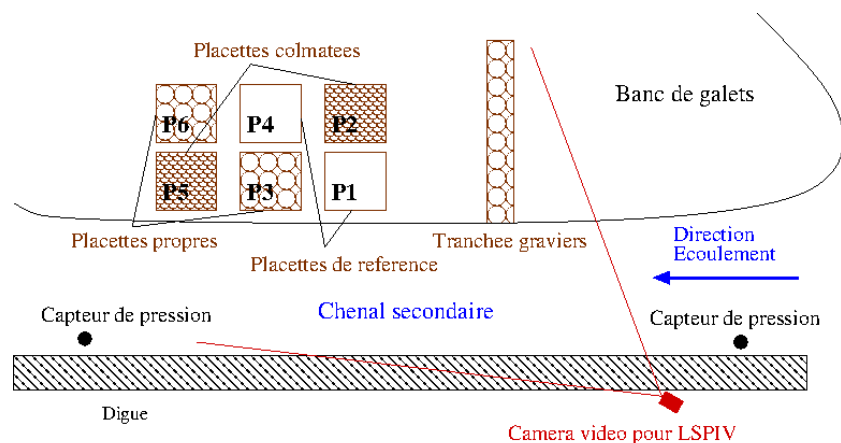


Figure 3 : Vue schématique du dispositif expérimental.

Le premier essai consiste à réaliser des placettes d'environ 1 m² avec différents degrés de colmatage sur un banc de galets (Camenen et al, 2015a). Sur chacune de ces placettes sont disposés un certain

nombre de galets traceurs (Pit-tags) selon un quadrillage régulier (Figure 4). Ces galets ont un diamètre similaire au diamètre moyen de la rivière, soit $d \approx 6 \text{ cm}$ et sont idéalement posés à la place d'un galet existant (placette de référence).

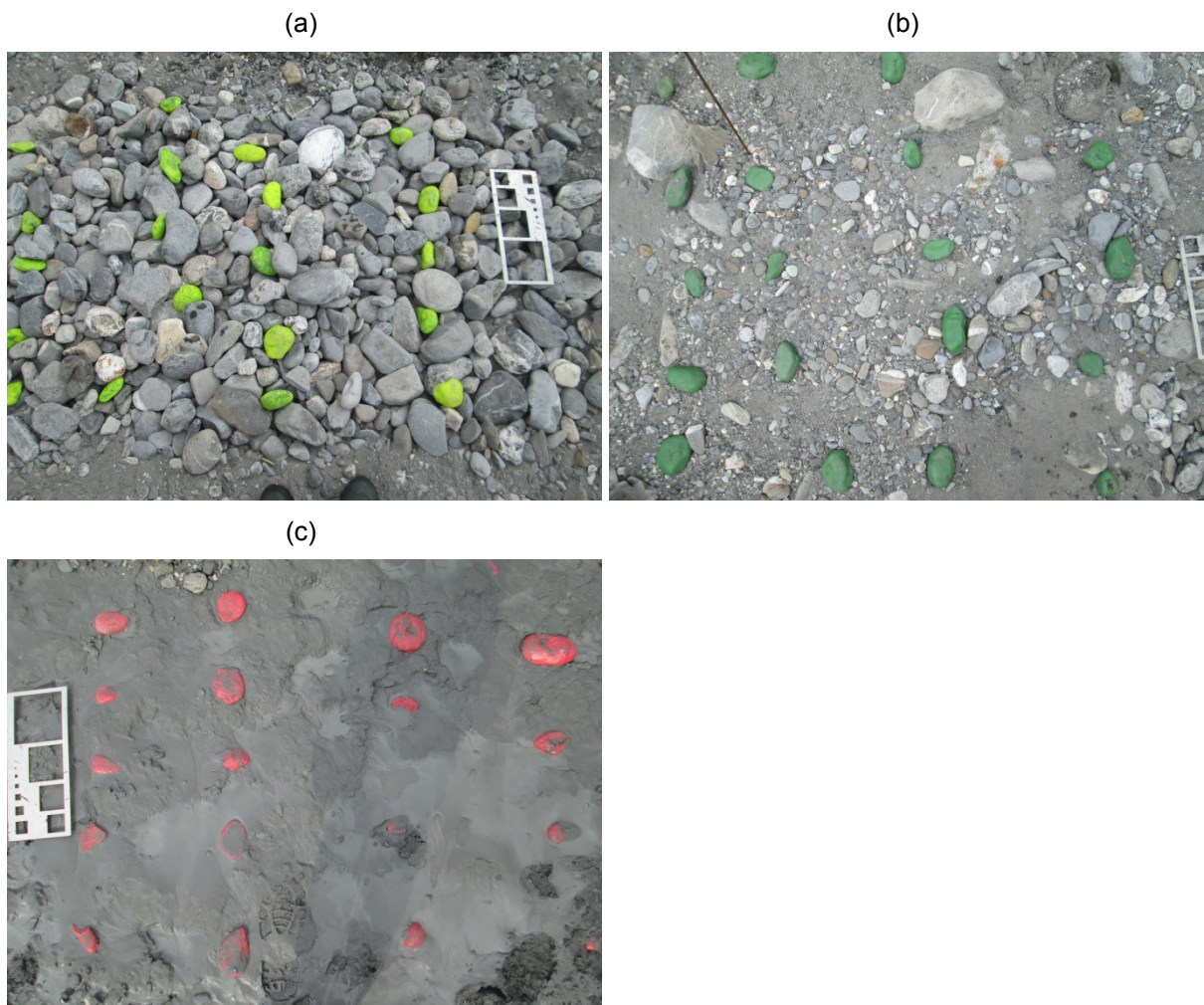


Figure 4 : Photos des différentes types de placettes : (a) placette propre (matrice formée de galets), (b) placette de référence (naturelle), (c) placette colmatée (matrice formée de fines). Les galets peints sont instrumentés de Pit-tags.

Trois types de placettes sont réalisées (cf. Figures 3 et 4a):

- des placettes « propres », initialement excavées et remplies de matériaux grossiers (>20mm). Les traceurs « Pit-tag » sont placés en surface en évitant toute émergence excessive par rapport à la surface du lit ;
- des placettes « colmatées » initialement excavées et remplies de matériaux fins (<1mm). Les traceurs « Pit-tag » sont enfoncés dans la matrice de sédiments fins jusqu'à environ 50 % de leur diamètre ;
- des placettes de référence correspondant à un état non modifié du site (matrice de granulométrie étendue). Les traceurs « Pit-tag » y sont placés de manière à remplacer un galet en place.

Le suivi du déplacement des différents galets traceurs suite à un événement de chasse permettra d'estimer l'impact du degré de colmatage sur le début de mouvement des galets. Pour cela, il est nécessaire que ces placettes soient inondées et subissent des contraintes suffisantes pour initier un mouvement lors de la chasse. Cependant, il est aussi nécessaire que l'écoulement ne soit pas trop élevé pour éviter un déplacement trop important des galets traceurs et risquer de ne pas les retrouver (Camenen et al., 2010).

Un second essai proposé est de creuser une tranchée remplie de galets uniquement avec un géotextile déposé initialement au fond afin de récupérer la totalité des sédiments éventuellement infiltrés dans la matrice suite à l'événement. Cette tranchée est creusée en travers du banc (sur le flanc gauche, côté chenal secondaire (cf. Fig. 3), permettant ainsi d'avoir une estimation du taux d'infiltration à différentes positions transversales, soit à différentes positions verticales du fait de la pente (Figure 3b). La quantité de sédiments fins infiltrée pourra ainsi être quantifiée (masse/surface/temps d'immersion) et qualifiée (granulométrie de surface et de fond) selon le niveau et la variabilité des écoulements observés au-dessus de la tranchée (Camenen et al, 2015b).

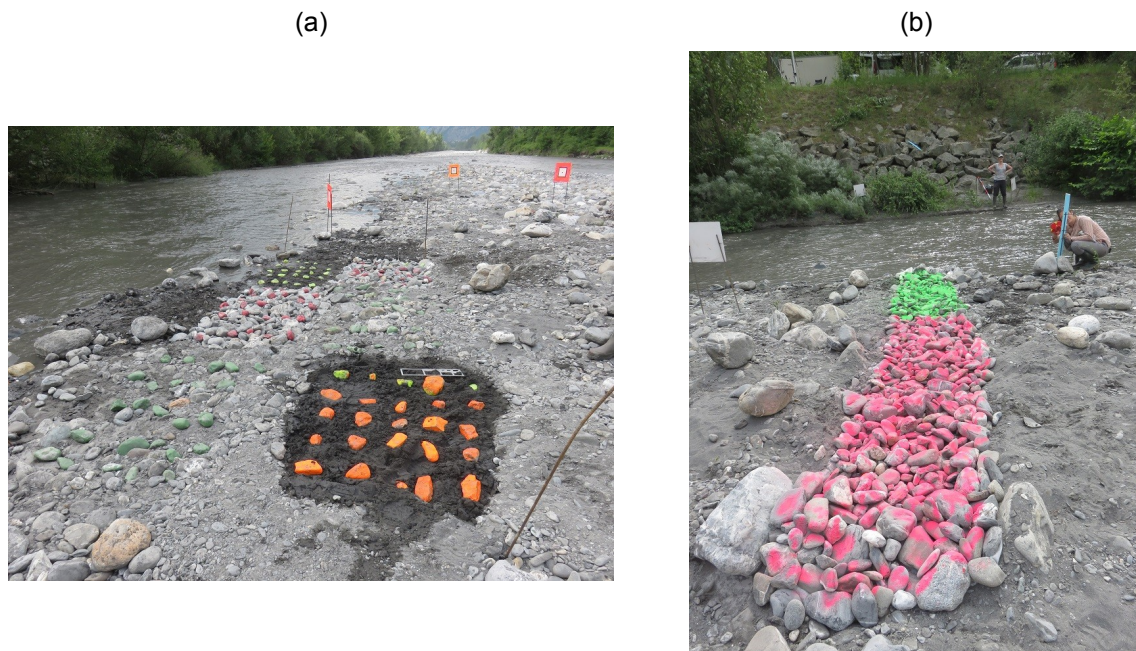


Figure 5 : Photos des placettes (a) et de la tranchée réalisée lors de la chasse du 9 juin 2015.

1.3. Mesures réalisées pendant l'événement

Afin d'étudier les contraintes hydrauliques et sédimentaires pendant la chasse, une série de mesures a été réalisée (cf. Figs. 6 et 22):

- Les vitesses de surface de l'écoulement sont estimées à partir d'un traitement vidéo de films pris à partir d'un mat positionné en haut de berge (cf. Fig. 6). L'orthorectification des images est possible grâce à une dizaine de cibles visibles sur les images et dont on connaît les

coordonnées réelles (mesures topographique réalisées à l'aide d'un tachéomètre et d'un DGPS) ;

- La pente moyenne du cours d'eau (chenal secondaire plus précisément) est estimée à partir de deux capteurs de pression positionnés à l'amont et l'aval du banc (en rive gauche, cf. Fig. 22a). Ceux-ci permettent d'avoir une idée des niveaux d'eau sur le banc (avec les mesures topographiques complémentaires) et de la contrainte moyenne dans le chenal (Camenen et al, 2015a) ;
- Enfin des prélèvements manuels en surface en rive gauche de l'Arc au niveau du banc et au centre de l'écoulement de l'Arc au niveau du pont de la Madeleine situé environ 2 km en aval (cf. Fig. 22b pour le dispositif de prélèvement) permettent d'estimer l'évolution de la concentration en MES dans l'écoulement au cours de la chasse et éventuellement l'évolution de la granulométrie des MES (Camenen et al., 2015a). Ces mesures peuvent être aisément comparées avec les mesures de débit total de l'Arc et concentrations en MES à la station de Pontamafrey située 9 km en amont du site (simple décalage temporel d'environ 45 mn). Ce décalage de 45 mn correspond au temps de propagation moyen du fluide (et donc des MES en faisant l'hypothèse qu'elles se propagent à la vitesse du fluide) estimé à partir de la comparaison des hydrogrammes mesurés à Pontamafrey et à Ste-Marie-de-Cuines (Jodeau, 2007).



Figure 6 : Photo du dispositif pour l'analyse vidéo LSPIV (en encart la photo du mat sur lequel est positionnée la caméra).

Il est bien évident que ces mesures pendant la chasse doivent être complétées par des mesures réalisées avant et après l'événement.

- Des mesures topographiques avant et après événement permettent d'avoir des sections de références pour estimer le débit (avec le traitement LSPIV), d'avoir une pente de ligne d'eau pour le chenal secondaire, voire d'estimer d'éventuelles variations topographiques dues à la chasse ;

- Des prélèvements de sédiments fins après l'événement sont utiles pour qualifier les classes granulométriques principales qui se sont déposées/infiltrées selon les conditions hydrodynamiques locales ;
- Enfin, des photos avant et après événement ainsi que l'utilisation de l'antenne de recherche Pit-tag permettent de qualifier et quantifier le transport solide des particules les plus grossières.

1.4. Protocole de travail

L'étude expérimentale proposée se déroule sur trois jours, un jour de préparation, le jour de la chasse, et un jour pour la collecte des galets traceurs et échantillons de sédiments infiltrés et le rangement du matériel.

1.4.1. Jour avant la chasse

- Délimitation des placettes (fer à béton) et préparation des placettes (creusement sur 10 cm environ et mise en place d'une matrice grossière ou fine);
- Estimation de la granulométrie du banc et des placettes (méthode de Wolman, granulométrie volumétrique, analyse photo)
- Mise en place des galets traceurs (peinture + Pit-tags) sur les placettes selon un quadrillage régulier, repérage de chacun des traceurs;
- Creusement de la tranchée, mise en place d'un geotextile et comblement de la tranchée avec des matériaux grossiers;
- Mise en place du mat pour la LSPIV, essartage de la végétation pour la visibilité du banc, mise en place de mires et géolocalisation, tests de vidéo;
- Topographie du banc selon une série de sections en travers (tachéomètre, DGPS);
- Mise en place des capteurs de pression.

1.4.2. Jour de la chasse

- Prélèvements d'échantillons de surface en rive gauche du chenal secondaire toutes les 30 mn;
- Prises de vidéos depuis le mat (sur la digue) toutes les 30 mn (vidéos de 30 à 60 s)
- Jaugeages de l'Arc à l'aide de mesures radar au niveau du pont de la Madeleine (2 km en aval du site);
- Prélèvements d'échantillons de surface depuis le pont de la Madeline afin de comparer les possibles différences liées au site et aux possibles biais sur une mesure réalisée depuis la berge.

1.4.3. Jour après la chasse

- Recherche des galets traceurs (Pit-tags) et mesure de leur positionnement afin d'estimer leur distance parcourue;
- Prélèvement d'échantillons de sédiments fins infiltrés sur des surfaces bien définies afin d'estimer les dépôts et colmatages;
- Topographie complémentaire du banc en cas d'évolution (dépôt ou érosion localisés);
- Rangement du matériel.

1.4.4. Post-traitement des données

- Traitement des mesures topographiques;
- Traitement des vidéos par la méthode LSPIV afin d'avoir des champs de vitesse de surface à différents moments de la chasse;
- Calage des mesures limnimétriques (capteur de pression)
- Mesure des concentrations et granulométrie des différents échantillons prélevés;
- Mesure de la masse sèche et granulométrie des échantillons déposés/infiltrés;
- Collecte des données hydro-sédimentaires des stations de référence (Pontamafrey, Arvan aval).

2. Flux de Matière en Suspension (MES) dans l'Arc

2.1. Débit

La mesure de débit est issue de la station de Pontamafrey située environ 9 km en amont du site expérimental. Nous y avons associé un décalage de 45 mn, correspondant au temps de propagation moyen. Le débit de base variait cette année entre 20 et 30 m³/s (Fig. 7). La durée de la chasse était d'environ 12 heures (entre la montée de débit vers le premier palier et la descente de débit vers le régime de base). L'hydrogramme de la chasse 2015 (Fig. 7) reste cependant atypique avec un premier palier à 80 m³/s très court (environ une heure) et un second palier très long (environ 7 heures) mais avec un débit plus faible qu'habituellement (plateau à environ 105 m³/s avec une pointe à 120 m³/s).

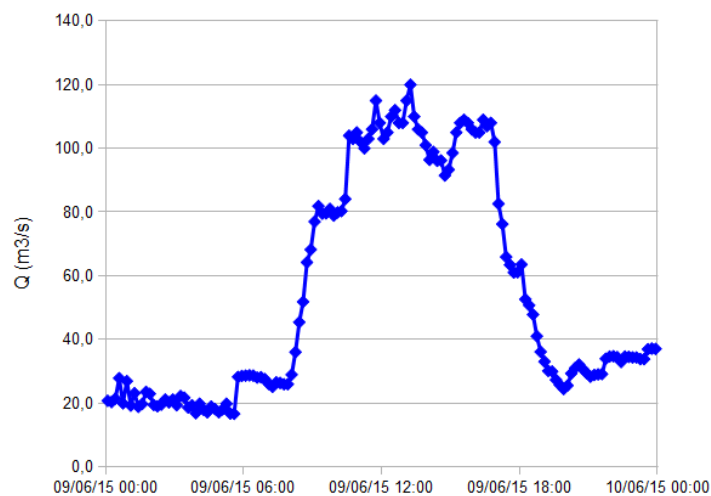


Figure 7 : Débit de l'Arc mesuré à la station de Pontamafrey (avec un décalage de +45 mn pour Ste-Marie-de-Cuines, TU+2).

2.2. Concentrations

Les concentrations ont été mesurées à la station de Pontamafrey à l'aide d'une sonde de turbidimétrie calée à partir de prélèvements issus d'un préleveur automatique (24 prélèvements réalisés au cours de la chasse) ainsi que sur site. 14 prélèvements ont été réalisés en surface au milieu de l'Arc à partir du pont de la Madeleine environ 2 km en aval du banc (utilisation d'un système permettant de remplir directement le flacon sans sous-échantillonnage). 24 échantillons ont été réalisées à partir de la berge en surface du chenal secondaire.

Les résultats de concentration sont présentés Fig. 8, affichés avec le débit de l'Arc. On observe bien la montée des concentrations avec le débit. Cependant, les concentrations sont restées relativement faibles au cours de la chasse avec un pic à 13 g/l uniquement, ce qui correspond à la plus faible valeur

observée pendant une chasse depuis 2006. Le signal de turbidité montre toutefois qu'un événement important (orage localisé, lave torrentielle?) a eu lieu la veille avec de fortes concentrations.

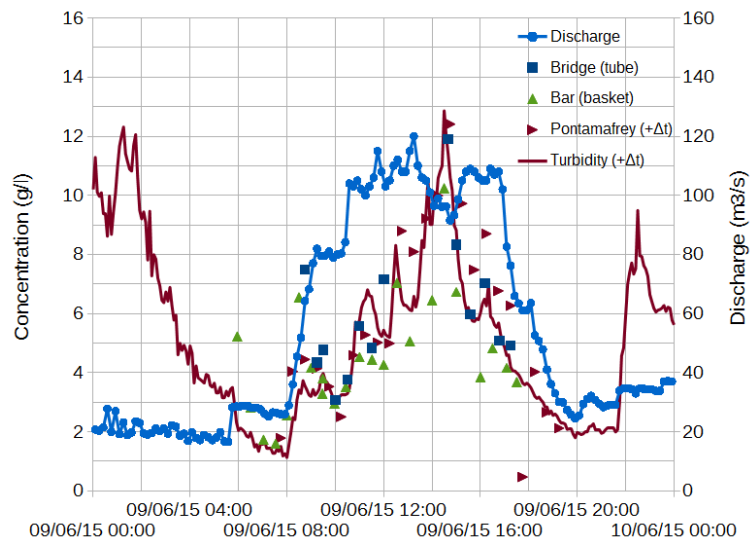


Figure 8 : Débit et concentrations dans l'Arc mesurés à la station de Pontamafrey et au niveau du site expérimental (soit de la berge, soit du pont de la Madeleine situé 2 km en aval).

2.3. Flux

La Fig. 9a présente les chroniques de débit et concentration mesurées à Pontamafrey du 8 au 10 juin. Cela confirme qu'un événement important a eu lieu la veille au soir de la chasse avec un pic de concentration à 32 g/l pour des débits variant de 20 à 40 m³/s. Un petit événement a aussi eu lieu le lendemain de la chasse avec des concentrations allant jusqu'à 8 g/l et des débits autour de 30 m³/s.

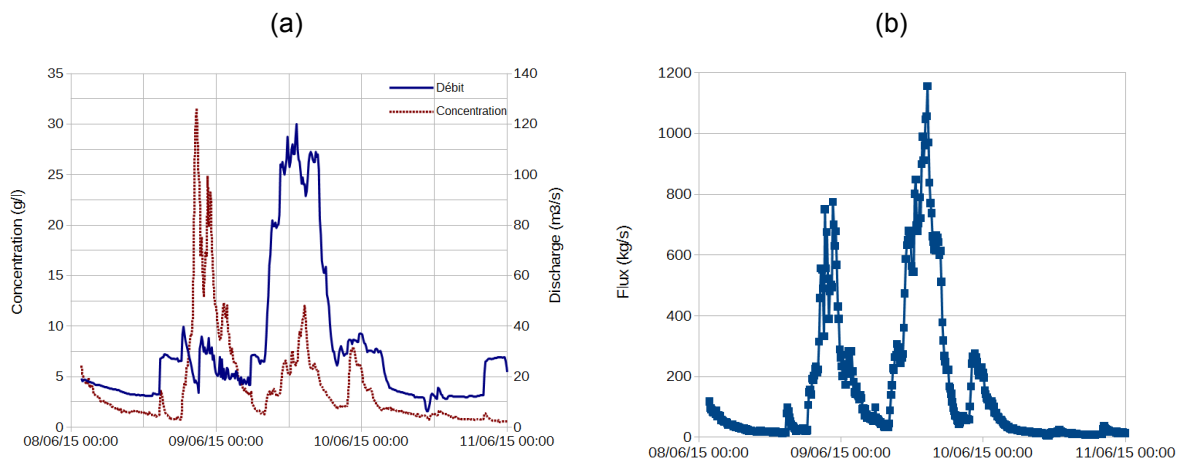


Figure 9 : Débit, concentration, (a) et flux en MES (b) mesurés à la station de Pontamafrey sur la période encadrant la chasse de l'Arc, soit du lundi 8 au mercredi 10 juin (date en TU+2 avec décalage temporel pour Ste-Marie-de-Cuines inclus).

Le calcul des flux $\Phi = QC$ et de la masse transportée pour chacun de ces événements permet de mettre en exergue l'importance de chacun de ces événements (cf. Tab. 1, voir aussi Antoine et al., 2013). Dans le Tab. 1, nous avons indiqué pour chacun des événements observés sur l'Arc (cf. Fig. 9) et sur l'Arvan (cf. Fig. 10) les dates encadrant l'événement et définissant précisément la période (globalement située entre le 6 et le 10 juin 2015), les valeurs max de débit, concentration et flux sur cette période, ainsi que la masse totale de matières en suspension (MES) transportée sur cette période définie telle que :

$$M_{tot} = \int_{t_{initial}}^{t_{fin}} \Phi(t) dt = \int_{t_{initial}}^{t_{fin}} Q(t)C(t) dt \quad Eq. 1$$

Ainsi, la chasse de l'Arc a transporté environ 20 000 t de sédiments, ce qui correspond d'après Antoine (2013) à une valeur similaire aux chasses de 2007, 2009 et 2011 mais est très inférieure aux chasses de 2006 ($\approx 40\,000$ t), 2010 ($\approx 30\,000$ t), et 2012 ($\approx 50\,000$ t). A titre comparatif, les deux événements encadrant le jour de la chasse (événements A et C) ont apportés respectivement près de 12 000 t et 4 000 t (cf. Tab. 1), ce qui relativise les apports liés à cette chasse.

Tableau 1 : Valeurs caractéristiques des flux de MES mesurés à Pontamafrey (Arc) et St-Jean-de-Maurienne (Arvan) pour les événements observés sur la période de la chasse du 9 juin 2015 (A : événement pré-chasse, B : chasse, C : événement post-chasse).

Site (événement)	Dates événement (j/h:mn-j/h:mn)	Q_{max} [m ³ /s]	C_{max} [kg/m ³]	Φ_{max} [kg/s]	M_{tot} [t]
Arc (A)	08/18:30 - 09/07:30	40	32	775	$1,16 \times 10^4$
Arc (B)	09/07:30 - 09/20:00	120	12	1150	$2,07 \times 10^4$
Arc (C)	09/20:00 - 10/06:30	37	8	275	$0,38 \times 10^4$
Arvan	06/20:00 - 07/11:30	25	79	1770	$1,64 \times 10^4$
Arvan (A)	08/17:50 - 09/06:40	18	38	595	$0,72 \times 10^4$
Arvan (B)	09/06:40 - 09/19:20	10	6	57	$0,07 \times 10^4$
Arvan (C)	09/19:20 - 10/05:50	21	14	211	$0,25 \times 10^4$

Le tableau 2 confirme la valeur relativement faible de flux lors de la chasse de 2015. Elle reste cependant supérieure aux chasses de 2011 et 2014. Cette dernière avait cependant été fortement perturbée (arrêtée après le premier palier) suite à un incident. Le flux de MES lié à une chasse représente de 5 à 10 % du flux annuel (Tab. 2).

Tableau 2 : Masse de MES mesurée à Pontamafrey (Arc) transitant annuellement et lors de l'événement majeur de l'année en question depuis 2011 (tirée de la base de données BDOH, <http://dx.doi.org/10.17180/OBS.ARC-ISERE>).

Année	Flux annuel M_{annuel} [t]	Événement majeur	Flux lié à l'événement M_{tot} [t]
2011	$6,5 \times 10^5$	Chasse juin 2011	$1,7 \times 10^4$
2012	$5,1 \times 10^5$	Chasse juin 2012	$4,9 \times 10^4$
2013	$12,8 \times 10^5$	Crue juin 2013	$54,0 \times 10^4$
2014	$5,3 \times 10^5$	Chasse juin 2014	$1,4 \times 10^4$

Concernant plus particulièrement la chasse de 2015, les événements encadrant la chasse semblent être très liés à l'Arvan (affluent de l'Arc dont la confluence est localisée environ 1 km en amont de la station de Pontamafrey). Les chroniques de débit, concentration et flux de l'Arvan à la station de St-Jean-de-Maurienne sont présentées Fig. 10. Même si les incertitudes restent plus élevées pour cette station, en particulier pour le débit car le fond de la rivière est très instable, on aperçoit très nettement deux événements, avant et après la chasse. Les flux estimés en sortie de l'Arvan pour chacun de ces événements représentent environ 60 % des flux mesurés sur l'Arc à Pontamafrey (cf. Tab. 1, événements A et C). En particulier, la veille au soir de la chasse, un pic à près de 80 g/l a pu être observé avec un débit supérieur à 20 m³/s.

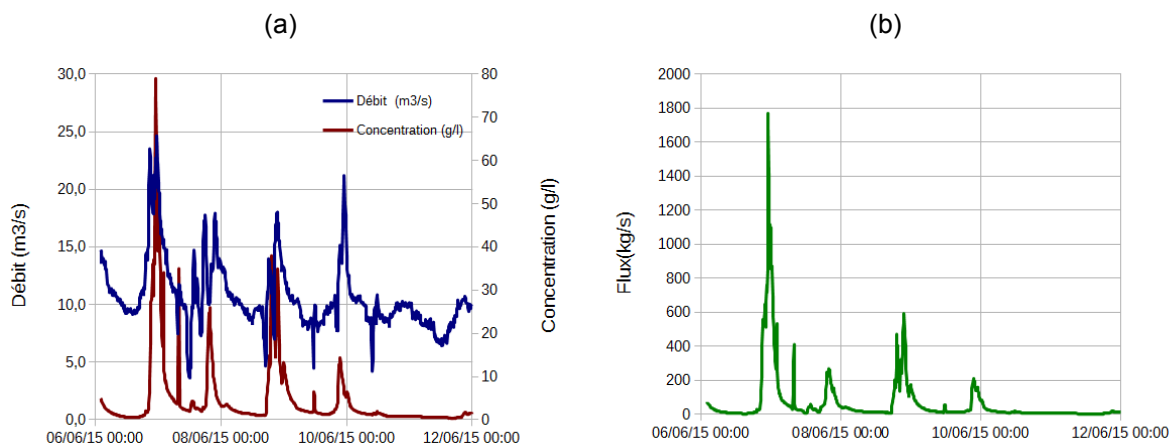


Figure 10 : Débit, concentration, (a) et flux en MES (b) mesurés à la station de St-Jean-de-Maurienne (Arvan) sur la période encadrant la chasse de l'Arc, soit du samedi 6 au jeudi 11 juin (date en TU+2).

2.4. Granulométrie des MES

Des mesures de granulométrie des échantillons de MES ont été faites à l'aide d'un granulomètre laser de type Cilas. La Fig. 11 présente les résultats pour une sélection d'échantillons pris au niveau du

banc et du pont de la Madeleine. Les différences entre les échantillons restent minimales. Les caractéristiques sédimentaires sont ainsi : $d_{10} \approx 4 \mu\text{m}$, $d_{50} \approx 18 \mu\text{m}$, $d_{90} \approx 49 \mu\text{m}$. Cependant, si l'on regarde la courbe granulométrique par classe (Fig. 11a), deux modes prédominants apparaissent : un premier mode avec $d_{m1} \approx 15 \mu\text{m}$ et un second mode avec $d_{m2} \approx 40 \mu\text{m}$.

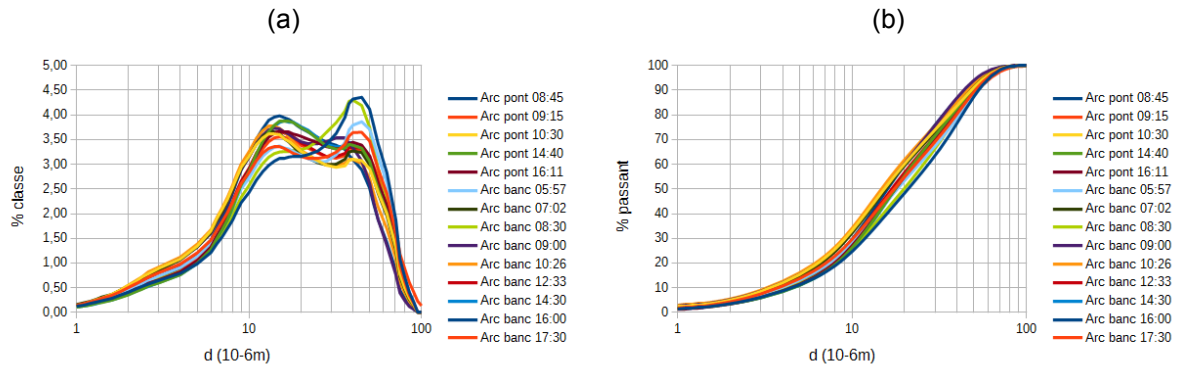


Figure 11 : Courbes granulométriques (en volume) des MES par classe de sédiments (a) et en cumulé (b).

Si l'on regarde les résultats en fonction du temps, on s'aperçoit que les caractéristiques sédimentaires des échantillons en MES sont, identiquement à la chasse de 2014 (Camenen et al., 2015ab), quasi constantes au cours du temps. Un léger pic apparaît vers 9h00 du matin correspondant à la première montée de débit de la chasse jusqu'au premier palier. Des sédiments légèrement plus grossiers à ceux provenant des retenues chassées ont ainsi pu être mis en suspension lors de cette phase.

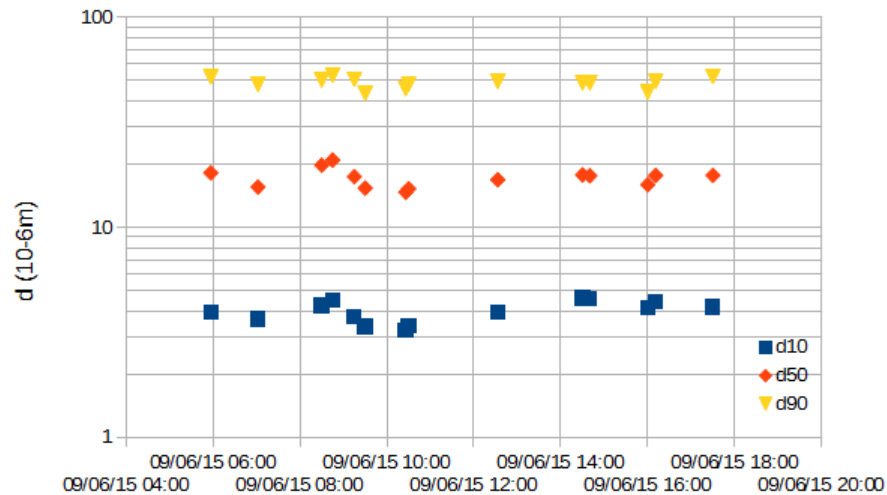


Figure 12 : Caractéristiques sédimentaires des échantillons de MES en fonction du moment de prélèvement lors de la chasse de juin 2015.

3. Hydrodynamique du chenal secondaire

3.1. 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 deux capteurs de pression positionnés en amont et en aval du site expérimental au niveau de la berge (voir Fig. 22a) corrigés pour la pression atmosphérique à l'aide d'un troisième capteur utilisé comme baromètre. La Fig. 13a présente ainsi les évolutions du niveau d'eau pour chacun des deux capteurs par rapport à un niveau de référence H_0 (position exacte du capteur). On observe bien la symétrie des deux signaux. Il semble cependant qu'un problème ait eu lieu en toute fin de chasse pour le capteur situé à l'aval. Le dysfonctionnement est sans doute dû au colmatage de la membrane du capteur par les sédiments fins. La mesure à l'amont a donc été utilisée pour estimer l'évolution de la hauteur d'eau dans le chenal au niveau du site expérimental (Fig. 22b).

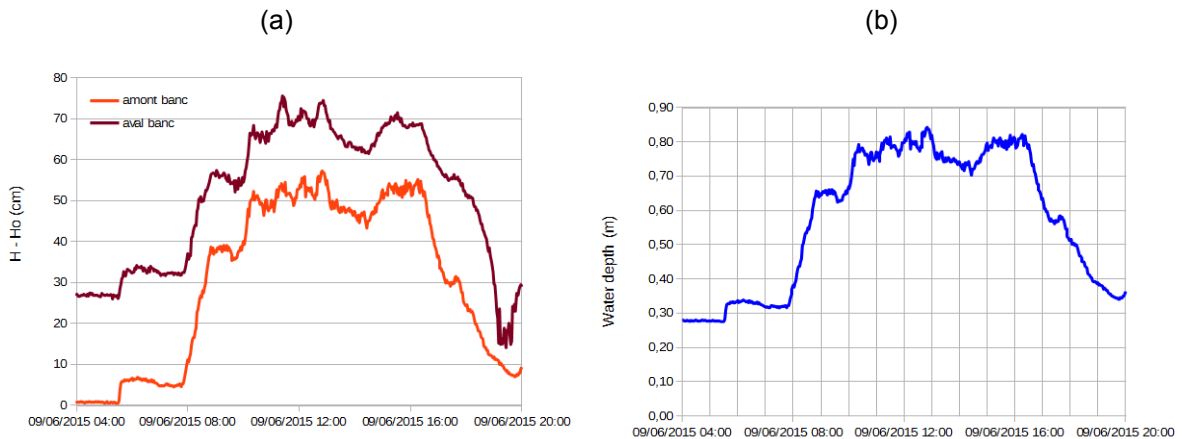


Figure 13 : Niveaux d'eau le long du chenal secondaire en amont et aval du site expérimental (a) et en hauteur d'eau dans le chenal secondaire près du site expérimental (b).

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. Après ce calage, il est possible d'estimer la pente moyenne du tronçon (Fig. 14a). Cette dernière varie très peu dans le temps. Elle passe ainsi de 0,60 % à faible débit à 0,67 % à fort débit. Le pic observé en fin de chasse correspond à un dysfonctionnement du capteur de pression positionné à l'aval comme indiqué précédemment.

Cependant, cette pente moyenne correspond à la pente entre les deux capteurs de pression situés à près de 140 m l'un de l'autre. Une mesure de ligne d'eau dans le chenal secondaire réalisée à faible débit (Fig. 14b) montre que la pente n'est pas du tout uniforme entre les deux capteurs de pression. On observe ainsi un premier seuil juste en aval du capteur amont et un second juste en amont du capteur aval. Une pente bien plus faible est observée le long du site expérimental. Cette dernière est très grossièrement estimée à 0,2 %.

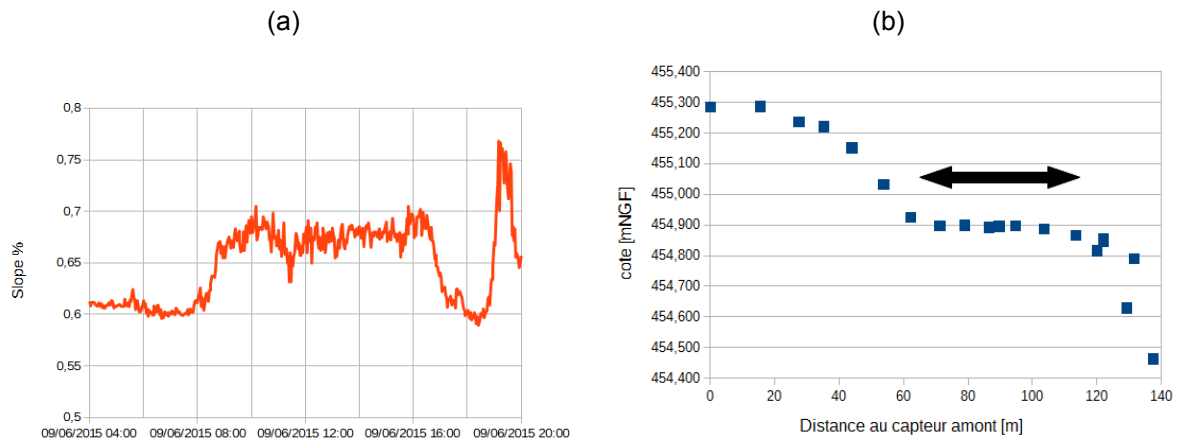


Figure 14 : Évolution temporelle de la pente moyenne du tronçon (a) et profil en long de la surface libre (ligne d'eau) le long du chenal secondaire (la flèche noire indique la zone de mesure LSPIV) (b).

3.2. Traitement LSPIV

La figure 15 présente trois exemples de champ de vitesse de surface issus du traitement LSPIV ainsi que le calcul des vitesses moyennes au travers de trois transects disponibles pour le champs de vision de la caméra permettant ainsi l'estimation du débit sur le chenal secondaire sur ces trois transects. On retrouve nettement les maxima de vitesse dans le chenal et des vitesses relativement plus faibles sur le banc. Les maxima de vitesse observés dans le chenal vont de 0,5 m/s pour le débit de base à près de 1,5 m/s au maximum de débit de la chasse.

Le traitement des films a été réalisé typiquement sur une série de 50 images avec $\Delta t = 0,04$ s, soit sur 2 s de film (séquence prise au milieu du film d'une durée approximative de 60s). La définition de l'image orthorectifiée est de 0,01 (1 cm=1 pixel). Ceci implique une incertitude de 25 cm/s pour le traitement de deux images consécutives. Cependant, cette incertitude est largement réduite du fait du traitement de 50 images consécutives. Les principales difficultés pour estimer la vitesse avec la méthode LSPIV sont liées à la présence de végétation en rive gauche et les ombres des arbres qui ont pu apparaître dans l'après-midi.

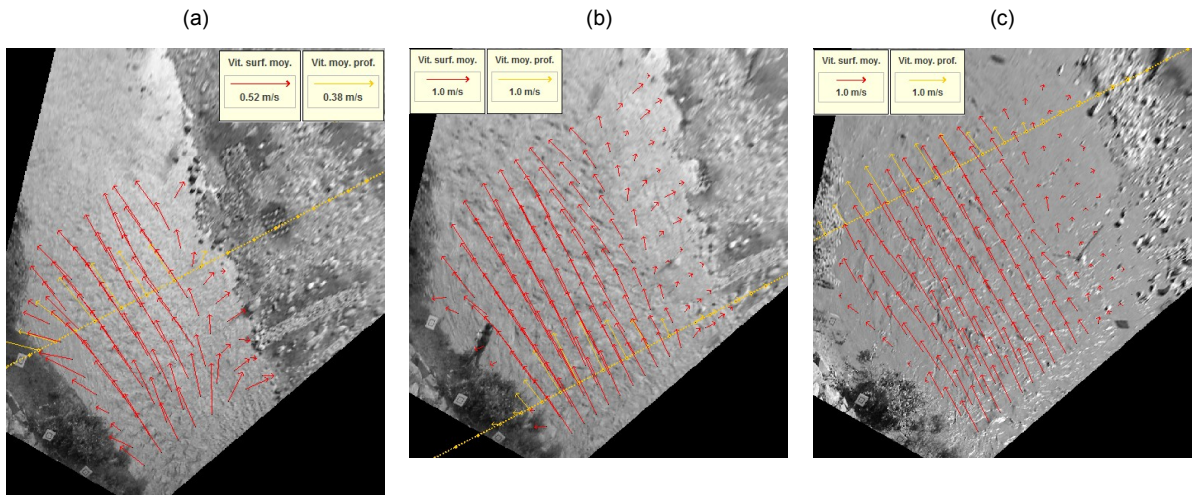


Figure 15 : Champs de vitesse issus du traitement LSPIV pour le film de 06:40 avec le transect 2 (a), le film de 08:30 avec le transect 3 (b), et le film de 09:33 avec le transect 1 (c)

Les trois sections ayant servies à l'estimation du débit avec le logiciel Fudaa-LSPIV sont présentées Fig. 16. On peut ainsi s'apercevoir que le tronçon où sont mesurées les vitesses de surface présente une bathymétrie homogène. On fera l'hypothèse que l'écoulement est uniforme sur ce tronçon. Le haut du banc ainsi que la marche au niveau de la berge se situent approximativement à 60 cm au dessus du fond du chenal secondaire (Il est à noter que la berge se situe sur la partie droite du graphique). Le banc a ainsi été totalement submergé pour un débit total de l'Arc supérieur à environ 90-100 m³/s, soit entre 10h30 et 17h00.

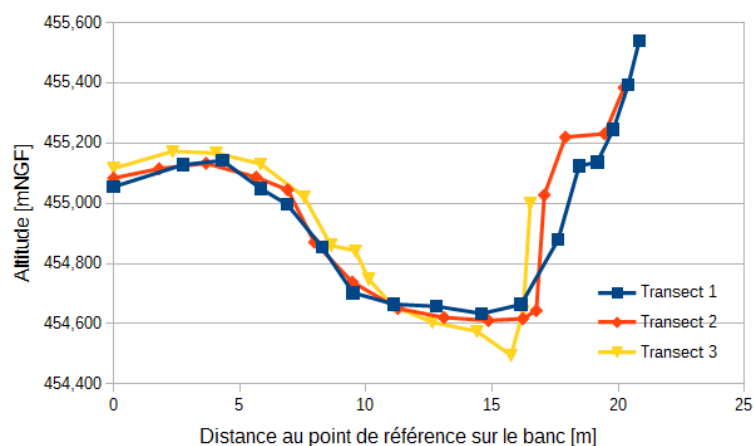


Figure 16 : Sections du chenal secondaire au niveau du site de mesure.

Le tableau 3 donne les caractéristiques des films traités et des résultats correspondants. L'aire de la section, la vitesse moyenne, et le débit dans le chenal secondaire ont été estimés en faisant la moyenne des résultats obtenus à l'aide de Fudaa-LSPIV sur les trois sections présentées en Fig. 16.

Tableau 3 : Caractéristiques des films traités à l'aide de Fudaa-LSPIV et résultats sur la dynamique générale du chenal secondaire.

Heure film	Niveau de la surface libre Z_w [m NGF]	Section mouillée A_w [m ²]	Vitesse moyenne sur la section V_m [m ² /s]	Débit chenal secondaire Q_{chenal} [m ³ /s]
06h40	454,91	2,12	0,20	0,43
08h15	455,01	3,09	0,43	1,33
08h30	455,07	3,74	0,61	2,27
08h50	455,13	4,53	0,80	3,63
09h33	455,12	4,41	0,73	3,20
10h09	455,17	5,22	0,91	4,76
10h56	455,23	6,34	0,84	5,35
11h53	455,26	6,91	1,02	7,02
13h08	455,25	6,72	0,90	6,10
14h00	455,20	5,78	0,86	5,03
16h00	455,26	6,91	0,98	6,79
17h04	455,15	4,87	0,60	2,95
17h46	455,12	4,41	0,53	2,35

3.3. Débit dans le chenal secondaire

La figure 17 présente les résultats de mesure de débit dans le chenal secondaire à l'aide de la méthode LSPIV. On s'aperçoit que le débit dans le chenal est directement proportionnel au débit dans l'Arc et peut s'exprimer à l'aide d'une fonction simple (Fig. 17b) :

$$Q_{chenal} = a_Q (Q_{Arc} - Q_{cr}) \quad \text{Eq. 2}$$

où $Q_{cr} = 20 \text{ m}^3/\text{s}$ est le débit de mise en eau du chenal secondaire et $a_Q = 0,08$ un coefficient. Au delà de ce seuil de débit, environ 8% du débit de l'Arc transite dans le chenal secondaire. Le débit dans le chenal est très bien corrélé au débit total de l'Arc ; on peut s'apercevoir cependant que le comportement en montée de crue diffère légèrement du comportement en descente de crue. Ceci peut être lié à la vitesse de propagation des hauteurs (vitesse d'une onde) légèrement plus rapide que celle des vitesses.

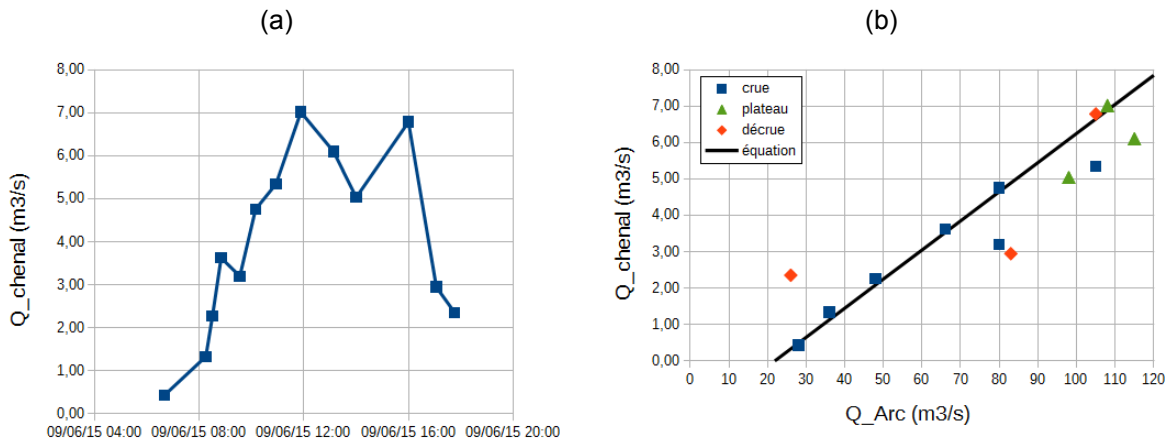


Figure 17 : Débit dans le chenal secondaire en fonction du temps (a) et en fonction du débit total dans l'Arc (b).

3.4. Contraintes moyennes sur la section

Il existe plusieurs méthodes pour mesurer la contrainte au fond moyennée sur une section τ_m . La plus commune est d'utiliser la pente d'énergie :

$$\tau_{m,S} = \rho g R_h S \quad \text{Eq. 3}$$

où $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ est la masse volumique de l'eau, $g = 9,81 \text{ m}^2$ est l'accélération de la gravité, et $R_h = A_w / P_w$ est le rayon hydraulique (A_w et P_w correspondent à la section et au périmètre mouillé, respectivement). La principale difficulté consiste ici à estimer la pente d'écoulement. Comme discuté au paragraphe 3.1, le pente moyenne mesurée à l'aide des deux capteurs de pression inclut deux petits seuils et n'est pas pas représentative de la section étudiée. On observe ainsi dans la Fig. 18a un rapport 3 entre la contrainte calculée avec la pente mesurée entre les deux capteurs et la contrainte calculée avec l'estimation de la pente locale supposée constante ($S_0 = 0,2 \%$).

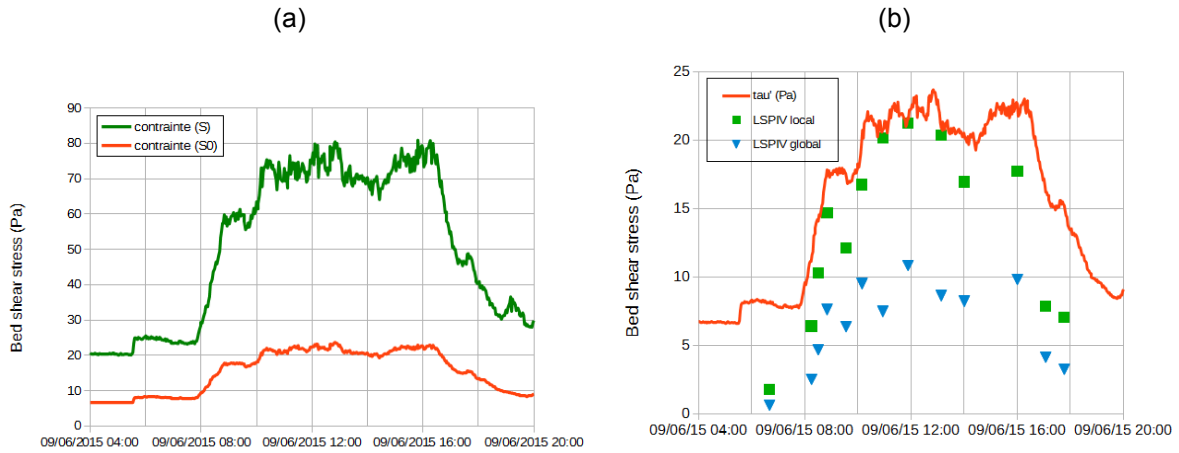


Figure 18 : Contrainte moyenne sur la section du chenal secondaire estimée à partir de la pente d'écoulement (a) et à partir des mesures de vitesse LSPIV (b).

Une seconde possibilité d'estimer les contraintes de cisaillement au fond est de se baser sur la mesure des vitesses de surface par la méthode LSPIV. En supposant la rugosité de fond connue ($k_s = 2d_{90} \approx 0,16$ m où d_{90} est le diamètre correspondant à 90 % de passant) et un profil de vitesse vertical de forme logarithmique, la contrainte locale au fond peut s'écrire :

$$\tau_v = \rho C_D V^2 \quad \text{Eq. 4}$$

où V est la vitesse moyenne sur la verticale et C_D un coefficient de frottement ou de traînée :

$$C_D = \left[\frac{\kappa}{1 + \ln \{d_{90} / (15h)\}} \right]^2 \quad \text{Eq. 5}$$

avec $\kappa = 0,41$ la constante de Von Karman et h la hauteur d'eau locale. Dans le cas particulier des mesures de vitesse de surface v_{surf} , un rapport $V/v_{surf} = 0,85$ a été choisi (fond rugueux, cf. Le Coz et al., 2010).

La figure 19 présente les profils transversaux de contraintes de cisaillement estimés à partir des mesures de vitesse de surface issues du traitement LSPIV des vidéos sur le transect 2 (cf. Fig. 16). Les valeurs maximales estimées restent inférieures aux valeurs estimées à partir de l'équation 3 avec la pente mesurée entre les deux capteurs ($\tau_{max} = 35$ Pa alors que $\tau_{m,S,max} = 90$ Pa, respectivement). Cela confirme que la pente d'écoulement locale est beaucoup plus faible que celle mesurée par les capteurs de pression. Ces valeurs sont quoi qu'il en soit bien plus faibles que celles mesurées lors de la chasse du 17 juin 2014 où l'on retrouvait des contraintes similaires avec les deux méthodes autour de 80 Pa. Il est aussi à noter aussi que des contraintes non nulles sont observées sur le banc au moment du pic de débit. Pour rappel, le débit total de l'Arc est supérieur à 100 m³/s entre 10h30 et 17h. On observe bien les profils de contraintes avec les valeurs les plus élevées sur cette période avec un pic variant entre 25 et 30 Pa.

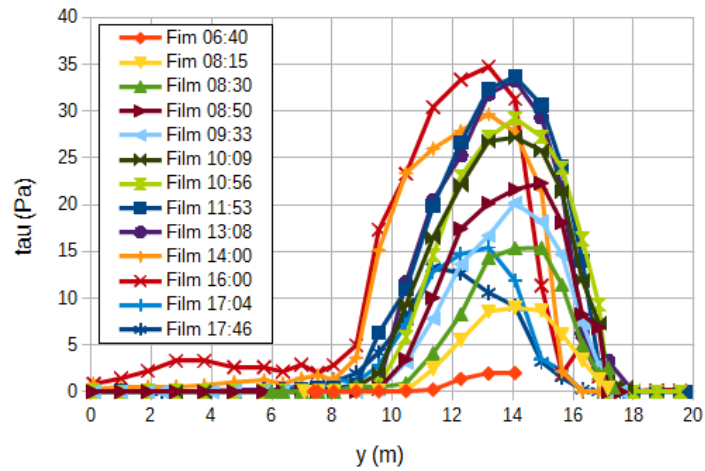


Figure 19 : Estimations des contraintes de cisaillement au fond au travers du chenal à partir des mesures de vitesse de surface au niveau du transect 3 (cf. Figs.15 et 16 ; rive gauche du chenal sur la partie droite du graphique).

Il est possible d'estimer la contrainte au fond moyennée sur une section, soit en faisant la moyenne des valeurs locales, soit en appliquant l'équation 4 avec les valeurs moyenne sur la section :

$$\tau_{m,v} = \rho C_{D,R} V_m^2 \quad \text{Eq. 6}$$

où $C_{D,R}$ est le coefficient de frottement calculé pour la section (i.e. Eq. 5 Appliquée avec h remplacé par R_h) et V_m la vitesse moyenne sur la section.

Les résultats sont présentés en Fig. 18b avec l'estimation issue de la pente d'écoulement (en prenant $S_0=0,2 \%$). Si les résultats issus de la LSPV sont globalement en accord avec l'estimation de la contrainte issue de la pente supposée constante $S_0=0,2 \%$, ils donnent des valeurs inférieures pour les plus faibles débits. Cela pourrait s'expliquer par une pente d'écoulement plus faible pour ces faibles débits (cf. Fig. 14b où la pente est mesurée pour un débit de l'Arc d'environ $20 \text{ m}^3/\text{s}$).

Il est aussi à noter que l'estimation des contraintes de cisaillement au fond à partir des valeurs moyennes sur la section (Eq. 6) implique une sous-estimation de la contrainte d'un facteur 2. Ceci est en lien avec la non-linéarité de l'équation ($(\bar{V})^2 \neq \overline{V^2}$).

4. Dynamique des sédiments grossiers

4.1. Hydrodynamique autour des placettes

La figure 20 donne l'évolution de la hauteur d'eau au dessus des placettes pendant la chasse. Il apparaît que les placettes sont en eau rapidement (vers 8h du matin) et se retrouvent sous environ 40 cm d'eau pendant plus de 6 heures. Les hauteurs d'eau estimées à partir des traitements LSPIV sont données pour comparaison. Les valeurs les plus faibles apparaissent légèrement sur-estimées.

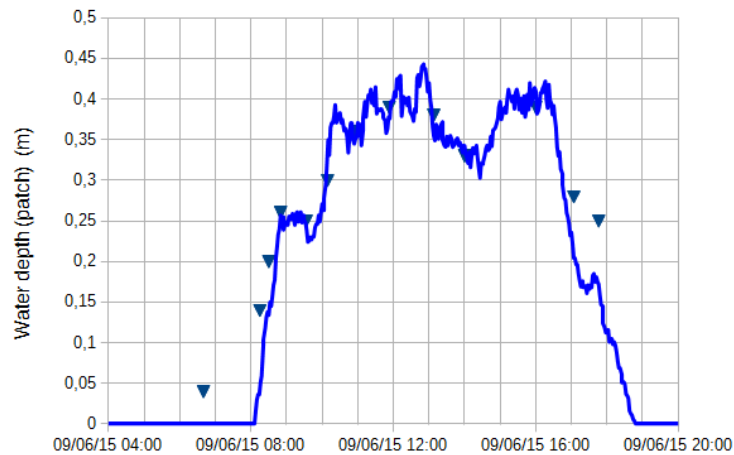


Figure 20 : Hauteur d'eau moyenne au niveau des placettes.

A partir des traitements LSPIV, nous avons pu obtenir des valeurs locales de la vitesse au niveau des placettes (cf. paragraphe 3.4). Le calcul des contraintes de cisaillement au fond se fait ainsi simplement à partir de Eq. 4. Du fait des vitesses mesurées plus fortes lors de la seconde partie de la chasse, le pic de contrainte observé sur la Fig. 21 apparaît vers 14h-15h. Ceci peut s'expliquer par le retard des vitesses de l'écoulement par rapport à l'onde de crue (hauteur) conjugué avec l'effet local du chenal secondaire pour lequel les vitesses sont plus sensibles à une variation de hauteur que le chenal principal.

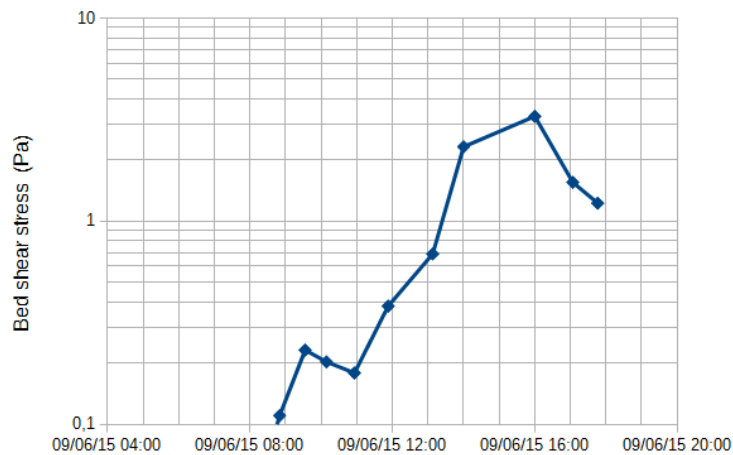


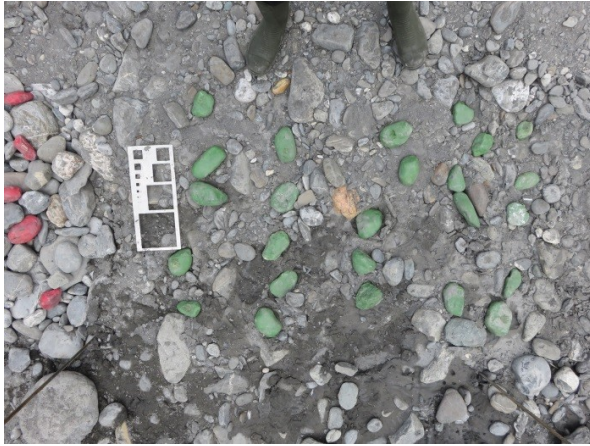
Figure 21 : Estimation des contraintes de cisaillement au fond au niveau des placettes à l'aide de la mesure LSPIV (cf. paragraphe 3.4).

4.2. Déplacement des traceurs

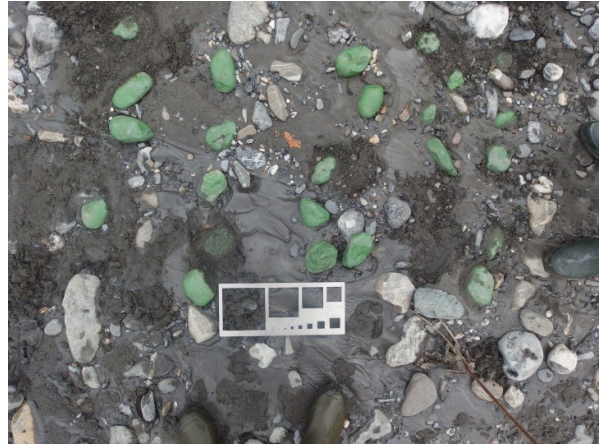
Durant la chasse, peu de traceurs se sont déplacés. L'écoulement sur le banc était trop faible pour leur mise en mouvement. De plus, les vitesses sur les placettes sont restées relativement faibles au cours de l'événement. Ceci a rendu propice l'infiltration de sédiments fins initialement en suspension au cours de la montée de crue. Le dépôt ainsi créé a sans doute contribué à limiter encore un peu plus la mise en mouvement des sédiments grossiers au pic de crue (cf. Fig. 22a et 23b et c).

Les Figs. 22 et 23 présentent les photos des six placettes avant et après l'événement de chasse. On peut s'apercevoir que globalement, les galets n'ont quasi pas bougé.

(a1)



(a2)



(b1)



(b2)



(c1)



(c2)



Figure 22 : Photos des placettes P1 (a) P2 (b), et P3 (c) avant (1) et après (2) la chasse.

(a1)



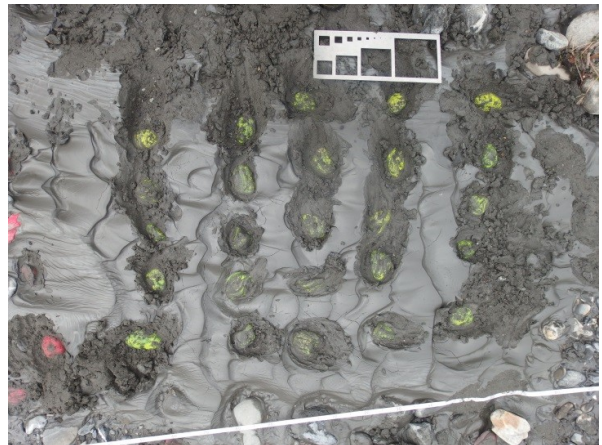
(a2)



(b1)



(b2)



(c1)



(c2)



Figure 23 : Photos des placettes P4 (a) P5 (b), et P6 (c) avant (1) et après (2) la chasse.

L'évaluation de la distance parcourue par les traceurs durant la chasse a été réalisée à partir des photographies de chaque placette prises avant et après la chasse (Figs. 22 et 23). Afin de repérer les déplacements, il a été nécessaire de superposer les couples d'images avant et après chasse. Cependant, ces photographies ont été prises avec des angles de prise de vue et des distances au sol différents et surtout sans points de repère fixes. La boîte à outils « Image Processing » de Matlab a ainsi été utilisée pour réaliser un recalage d'une image par rapport à l'autre. La photographie prise avant le début de la chasse est considérée comme la photographie de référence par rapport à laquelle l'image après chasse est recalée. La première étape a consisté à repérer manuellement les contours des traceurs sur la photographie d'après chasse. Ceux-ci sont en effet difficilement détectables de manière automatique à cause de la quantité de sédiments fins qui s'est déposée sur leurs surfaces. Ensuite, une étape de recherche de point fixes (qui n'ont pas bougés durant la chasse) est effectuée. Les coordonnées en pixel de ces points sont sauvegardées pour ensuite calculer et appliquer une transformation géométrique qui va permettre de recalibrer l'image après chasse par rapport à l'image avant chasse. Les deux images sont ensuite superposées ; l'image transparente correspond à l'image recalée. (cf. Figs. 24, 25, 26, 27, 28, et 29). Pour finir, grâce à la règle de Wolman placée sur la photo de référence en guise d'échelle, la distance parcourue par les traceurs peut être estimée.

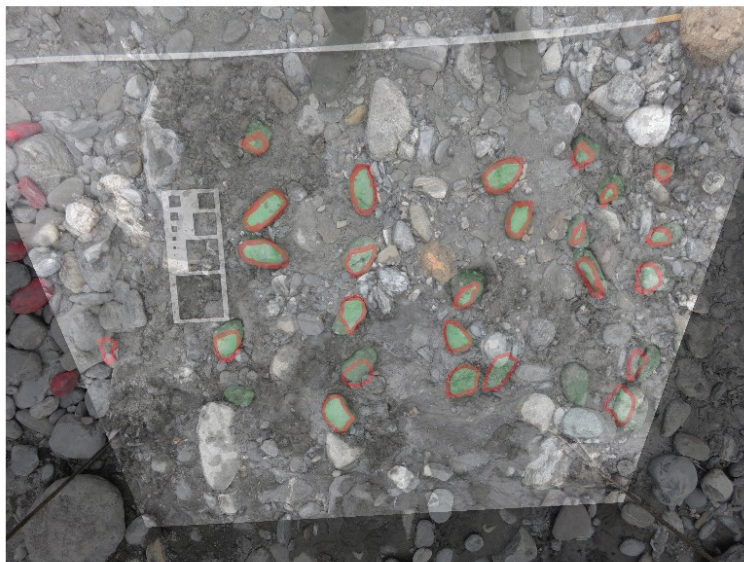


Figure 24 : Superposition des images avant et après la chasse pour la placette P1.



Figure 25 : Superposition des images avant et après la chasse pour la placette P2.



Figure 26 : Superposition des images avant et après la chasse pour la placette P3.



Figure 27 : Superposition des images avant et après la chasse pour la placette P4.

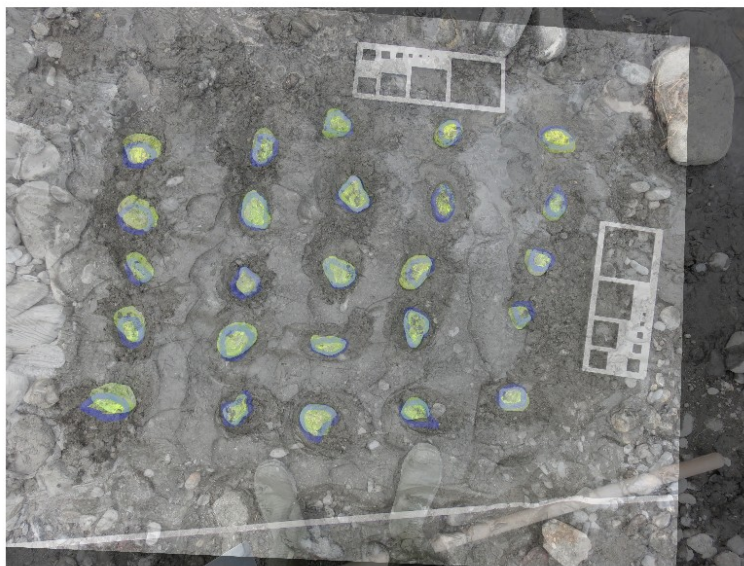


Figure 28 : Superposition des images avant et après la chasse pour la placette P5.



Figure 29 : Superposition des images avant et après la chasse pour la placette P6.

Cette étude montre tout de même un potentiel impact du taux de colmatage du lit sur le début de mouvement des particules grossières. En effet, dans le cas des placettes colmatées P2 et P5 (Figs. 25 et 28), aucun galet n'a été mobilisé. Les placettes propres P3 et P6 ne montrent quasi aucun mouvement. Deux galets de la placette P3 ont bougé de moins de 10 cm, correspondant sans doute à un réarrangement (Fig. 26) ; aucun galet de la placette P6 n'a été mobilisé (Fig. 29). Enfin, aux deux placettes de référence correspondent les plus longs déplacements observés, soit un déplacement de 20 à 30 cm pour deux galets de la placettes P1 (Fig. 24) et un déplacement d'un galet sur environ 10 cm pour la placette P4 (Fig. 27). Les placettes situées plus au bord du chenal (P1, P3 et P5) ont a priori subi des contraintes légèrement supérieures aux placettes situées un peu plus haut (P2, P4 et P6) pouvant ainsi expliquer une dynamique légèrement plus forte pour les placettes P1 et P3 par rapport aux placettes P4 et P6, respectivement de même forme.

Encore une fois, les dépôts recouvrant une partie non négligeable de certaines de ces placettes (cf. Figs. 22 et 23, colonne de droite) ont sûrement fortement limité le déplacement des galets. Ces mesures ont toutefois montré que les placettes de référence sont celles où les galets sont a priori le plus facilement mobilisables. Dans le cas des placettes propres, les galets sont plus difficilement mobilisés sans doute du fait d'une meilleure imbrication. En effet, les galets sont tous au contact d'autres galets de taille similaire pour ce type de placette alors que pour les placettes de référence, les galets sont un peu plus émergents (entourés de sédiments plus fins). Enfin, les placettes colmatées montrent que les galets colmatés dans un mélange limoneux-vaseux sont encore plus difficilement remobilisables. On peut cependant imaginer que pour des contraintes un peu plus élevées, les sédiments fins pouvant être facilement remobilisables et entraîner les galets. On aurait ainsi un seuil de mise en mouvement plus net avec un départ des particules potentiellement en masse. Une différence peut cependant être observée entre un colmatage de limon (cf. placette P5 Fig. 23b) et un colmatage d'argile plus cohésive (cf. placette P2 Fig. 22b).

4.3. Lien avec le diagramme de Shields

La figure 30 présente différentes formulations empiriques (Van Rijn, 1993 ; Soulsby & Whitehouse, 1997, Soulsby, 1997) de la contrainte de mise en mouvement des particules en fonction de leur taille, basée essentiellement sur la courbe de Shields (1936). Il existe de fortes incertitudes pour les sédiments très fins ($d < 0,1$ mm), principalement du fait de l'influence de la cohésion et de la consolidation du matériau. Pour un matériau sans cohésion et non consolidé, une valeur constante $\tau_{cr} = 0,15$ Pa est utilisée (Fig. 30). Pour les sédiments grossiers, la contrainte critique de mise en mouvement est directement proportionnelle à la taille des particules. Ainsi, $\tau_{cr} = 0,55$ Pa si $d = 1$ mm, $\tau_{cr} = 9$ Pa si $d = 1$ cm, et $\tau_{cr} = 90$ Pa si $d = 10$ cm.

Van Rijn (1993) a aussi proposé une valeur de contrainte critique de mise en suspension des sédiments : pour les sédiments fins, elle est égale à la contrainte critique de mise en mouvement (sédiment transporté directement en suspension) ; pour les sédiments plus grossiers, elle est de 3 à 4 fois supérieure.

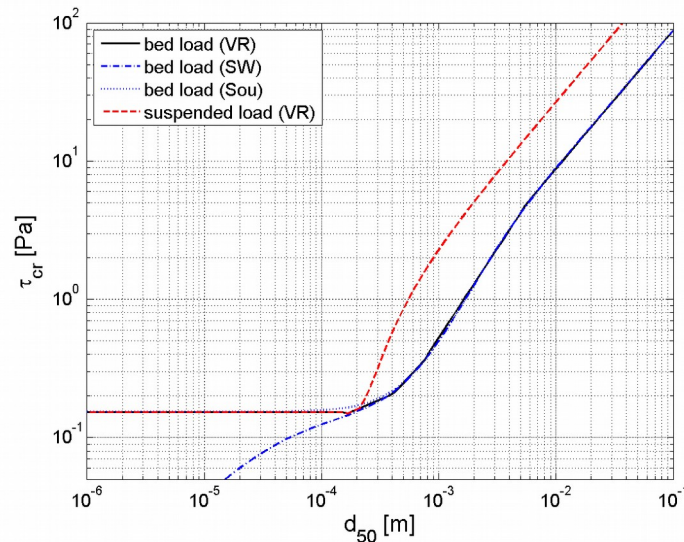


Figure 30 : Contraintes critiques de mise en mouvement et de mise en suspension.

Sur la Figure 31, nous avons comparé les valeurs de contraintes de cisaillement estimées au niveau des placettes avec les valeurs typiques seuils issues de la courbe de Shields. Il apparaît que les contraintes ont été suffisantes pour transporter les sables et les petits graviers. Si nous regardons la Fig. 30, nous pouvons même confirmer que les sables (y compris les sables grossiers jusqu'à une taille de $d = 1$ mm) pouvaient être transportés en suspension lors du pic. Cette suspension devait a priori être graduée avec de plus fortes concentrations au fond du fait des contraintes de cisaillement relativement faibles par rapport aux valeurs seuils.

Ces contraintes de cisaillement n'étaient ainsi pas suffisantes pour transporter les galets, ce qui explique la relative non-mobilité de ces derniers. Il faut néanmoins avoir en tête les larges incertitudes sur l'estimation de ces contraintes d'autant plus qu'une partie des placettes était soumise à des vitesses plus élevées. L'estimation réalisée ici se base sur une vitesse moyenne sur la zone.

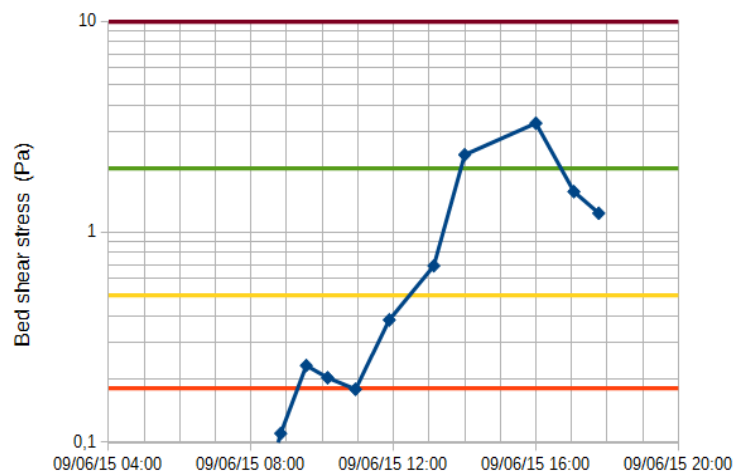


Figure 31 : Contraintes de cisaillement au fond estimées au niveau des placettes à l'aide de la méthode LSPIV – comparaison avec les valeurs critiques de mise en mouvement théoriques pour des particules de taille $d=0,3$ mm (courbe rouge), $d=1$ mm (courbe jaune), $d=3$ mm (courbe verte) et $d=10$ mm (courbe marron).

5. Dynamique des sédiments fins

5.1. Mesures réalisées au niveau de la tranchée

La Figure 32 présente une vue générale de la tranchée après la chasse (chenal secondaire sur la droite de la photo). On aperçoit ainsi un gros dépôt sableux sur la partie médiane d'une largeur allant de 50 à 70 cm (la tranchée fait environ 5,5 m de longueur pour une largeur de 70 cm). Sur la partie proche du chenal secondaire, on peut aussi apercevoir une quantité non-négligeable de petits graviers.

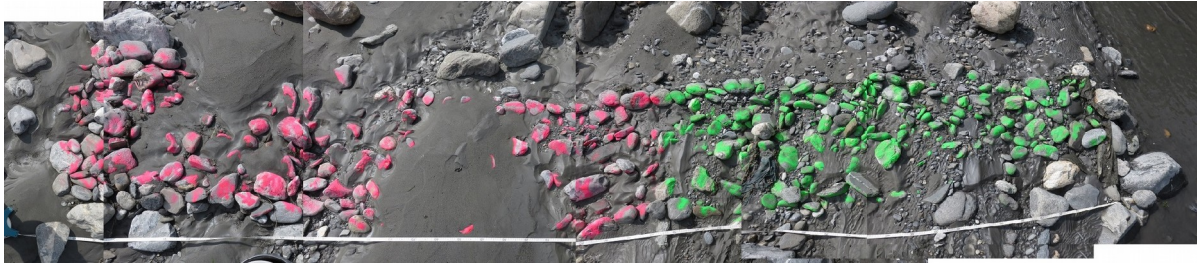


Figure 32 : Reconstitution photographique de la tranchée après la chasse.

Suite à l'événement de chasse, quatre placettes T_1 , T_2 , T_3 , et T_4 de surface au sol identique (0,2x0,7 m) de la tranchée ont été échantillonnées afin d'estimer la dynamique des sédiments fins pour différentes contraintes hydrodynamiques. Ces quatre placettes sont en effet situées à des distances et donc des hauteurs croissantes du chenal secondaire. Quelques échantillons ont aussi été réalisés sur les placettes P_1 , P_4 , P_5 , et P_6 . Deux à trois échantillons ont ainsi été prélevés sur chacune de ces placettes (cf. Figs. 33 et 34) :

- Si des dépôts étaient observés sur la placette, ils étaient entièrement prélevés sur la surface de la placette ;
- Un premier échantillon de sédiments infiltrés entre les galets était ensuite prélevé en subsurface, soit sur une épaisseur d'environ 10 cm;
- Enfin, un second échantillon de sédiments infiltrés entre les galets au fond était prélevé jusqu'au géotextile.

Tous les échantillons ont ensuite été pesés et des granulométries par tamis ($d > 0,2$ mm) et laser ($d < 1$ mm) ont été réalisées sur chacun d'eux.

La Figure 33 présente des photos de surface des 4 placettes T1 (d) située proche du chenal secondaire à T4 (a) située le plus haut sur le banc. Ces 4 placettes sont positionnées régulièrement tous les mètres. La placette T3 (c) est ainsi localisée sur le dépôt observé précédemment.

(a) placette T4



(b) placette T3



(c) placette T2



(d) placette T1



Figure 33 : Photos de surface des 4 placettes de la tranchée après la chasse.

La Figure 34 indique la procédure utilisée pour extraire les sédiments de la placette. Deux fers à béton sont d'abord positionnés afin de délimiter la largeur (25 cm) de la placette. Si une couche de dépôt est observée (Fig. 34b), elle est d'abord récupérée et échantillonnée. Ensuite, les sédiments fins de la couche de sub-surface (prise à une épaisseur de 10 cm) sont récupérés en nettoyant l'ensemble des galets extraits. La même procédure est utilisée pour la couche de fond.

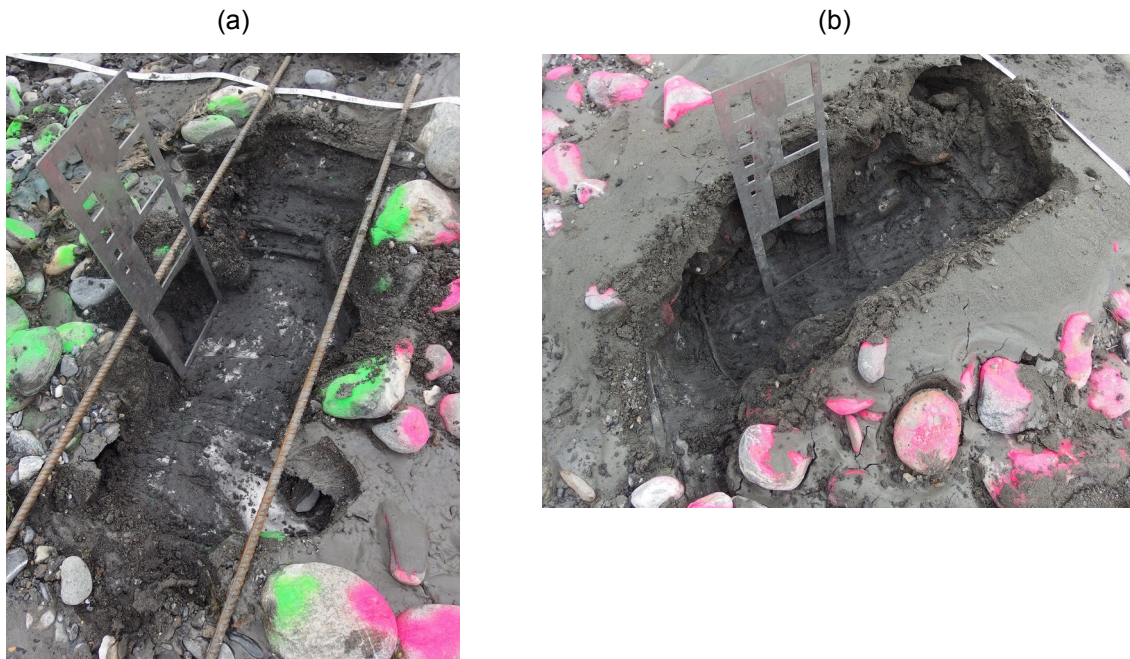


Figure 34 : Photos des des placettes 2 (a) et 3 (b) de la tranchée après creusement et extraction des sédiments fins.

Le Tab. 4 résume l'ensemble des caractéristiques géométriques des quatre placettes de la tranchée. Il est à noter que ces dernières restent approximatives compte tenu de la difficulté à fixer nettement les limites du fait de la présence de gros galets.

Tableau 4 : Caractéristiques géométriques de chacune des placettes de la tranchée.

N° placette		T_1	T_2	T_3	T_4
Caractéristiques de surface	Distance au bord (limite côté chenal)	1,00 m	2,25 m	3,50 m	4,75 m
	Distance au bord (limite côté banc)	1,25 m	2,50 m	3,75 m	5,00 m
	Distance référence banc (Fig. 16)	9,25 m	8,00 m	6,75 m	5,50 m
	Largeur	0,25 m	0,25 m	0,25 m	0,25 m
	Longueur	0,70 m	0,70 m	0,70 m	0,70 m
Caractéristiques verticales	Altitude surface [m NGF]	454,85 m	455,00 m	455,10 m	455,15 m
	Épaisseur dépôt de surface	0,00 m	0,00 m	0,08 m	0,00 m
	Épaisseur couche sub-surface	0,10 m	0,10 m	0,10 m	0,10 m
	Épaisseur couche fond	0,10 m	0,10 m	0,10 m	0,10 m

5.2. Hydrodynamique autour de la tranchée

La Figure 35 présente une estimation de la variation temporelle des hauteurs d'eau au niveau des quatre placettes de la tranchée basée sur la mesure de hauteur d'eau des capteurs de pression et des mesures topographiques de la tranchée. Il y avait ainsi a priori une différence de plus de 20 cm entre la placette T1 et la placette T4. Par contre, le temps de submersion des différentes placettes est à peu près similaire à l'exception de la placette T1 qui a été mise en eau dès le début de la chasse.

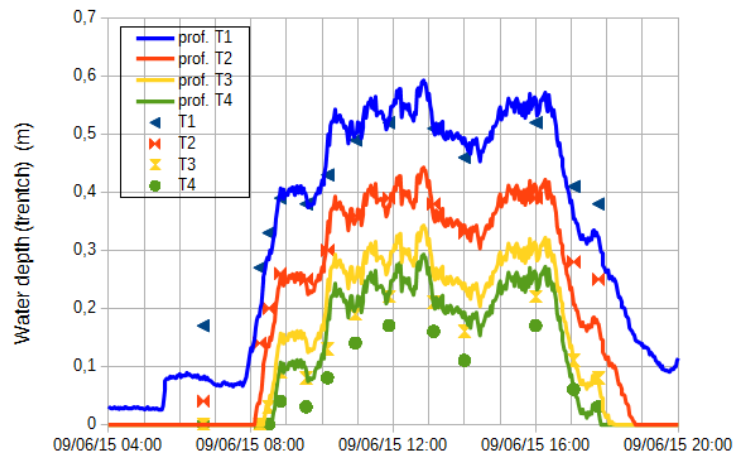


Figure 35 : Hauteur d'eau estimée au niveau de chacune des 4 placettes de la tranchée.

Sur la Fig. 36, les vitesses de l'écoulement mesurées à l'aide de la méthode LSPIV sont tracées en fonction du temps pour chacune des quatre placettes. Il apparaît que les vitesses augmentent entre 8h et 15h alors même que les hauteurs n'évoluent que très peu sur cette période. On observe ainsi un fort décalage entre l'onde de crue et les vitesses de l'écoulement. Ce phénomène est peut-être amplifié du fait du chenal secondaire.

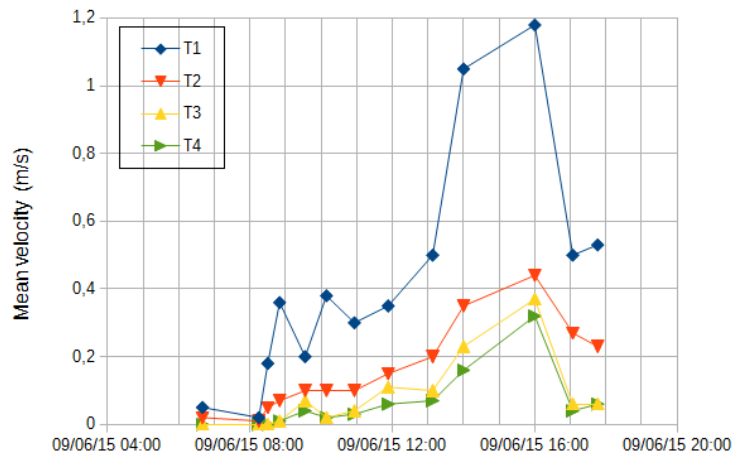


Figure 36 : Vitesse d'écoulement estimée au niveau de chacune des 4 placettes de la tranchée à l'aide de la méthode LSPIV (cf. paragraphe 3.4).

Les valeurs des contraintes de cisaillement sur chacune des placettes sont présentés en Fig. 37. La placette T1 se distingue nettement des trois autres placettes qui ont subi globalement des contraintes assez similaires, ceci du fait de la proximité de cette placette du chenal secondaire. Concernant la variation temporelle des contraintes, elle est directement liées à la variation temporelle des vitesses.

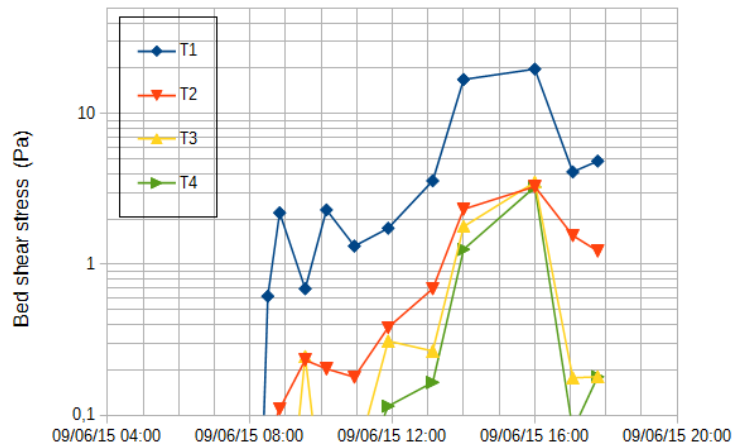


Figure 37 : Contrainte de cisaillement au fond estimée au niveau de chacune des 4 placettes de la tranchée à l'aide de la méthode LSPIV (cf. paragraphe 3.4).

Une discussion similaire à celle proposée au paragraphe 4.3 pour la mobilité des sédiments peut être faite ici. L'ensemble des classes sableuses a pu être mobilisé et transporté par charriage voire par

suspension graduée au cours de la chasse du fait du pic de contrainte supérieur à 1 Pa. Sur la placette T1, les contraintes de cisaillement au fond ont atteint des valeurs supérieures à 10 Pa impliquant un potentiel transport de graviers centimétriques. Ceci est clairement confirmé par les observations de dépôts de graviers de cette taille (cf. photo Fig. 33d).

5.3. Infiltration

Les masses des différents échantillons prélevés sont listées dans le tableau 5. Il apparaît que les teneurs en eau sont d'environ 15 % en surface et montent à 20 % au fond.

Tableau 5 : Masse des échantillons prélevés sur chacune des placettes de la tranchée.					
N° placette		T_1	T_2	T_3	T_4
Dépôt de surface	Masse humide [g] M_{surf}	-	-	8445	
	Taux humidité	-	-	0,14	
	Masse sèche [g] M_{surf}	-	-	7268	
sédiments infiltrés en sub-surface	Masse humide [g] $M_{subsurf}$	6870	5017	7197	1593
	Taux humidité	0,07	0,16	0,17	0,17
	Masse sèche [g] $M_{subsurf}$	6400	4233	5989	1350
sédiments infiltrés au fond	Masse humide [g] M_{fond}	6339	3041	5378	3773
	Taux humidité	0,21	0,23	0,22	0,17
	Masse sèche [g] M_{fond}	5008	2346	4184	3148

L'ensemble des échantillons ont été analysés par granulométrie laser et par tamisage pour la partie grossière. Les résultats sont présentés Fig. 38. Une plus grande dispersion est observée par rapport aux échantillons de MES (cf. paragraphe 2.4) indiquant un transport par charriage ou suspension graduée de sédiments plus grossiers non mesurés par les prélèvements de surface (MES). Ainsi, le diamètre médian des échantillons tamisés à $d < 1$ mm (granulométrie laser, cf. Fig. 38) varie entre $30 < d_{50} < 70 \mu\text{m}$ alors que pour les MES : $d_{50} \approx 18 \mu\text{m}$. Cependant, si l'on regarde la courbe granulométrique par classe (Fig. 38 a1), on retrouve bien le premier mode avec $d_{m1} \approx 15 \mu\text{m}$. Le second mode ($d_{m2} \approx 40 \mu\text{m}$) est moins visible car masqué par un troisième mode qui apparaît pour ces dépôts avec $d_{m3} \approx 70 \mu\text{m}$. On observe aussi sur de nombreux échantillons (surface et sub-surface) un quatrième mode à $d_{m4} \approx 200 \mu\text{m}$, voire même un cinquième mode à $d_{m5} \approx 400 \mu\text{m}$. Il est beaucoup plus difficile d'analyser les résultats obtenus avec le tamisage. Ils confirment cependant que des particules très grossières ont été retrouvées en surface de certaines placettes (T_1 , T_2 et P_4) avec une part non-négligeable de particules centimétriques (graviers). Ces placettes situées le plus au bord du chenal secondaire ont ainsi subi des contraintes suffisamment élevées lors de l'événement pour qu'un transport (a priori par charriage) des graviers ait été possible. Pour toutes les autres placettes, la quantité de particules de taille supérieure à $400 \mu\text{m}$ reste globalement

négligeable. En plus des MES, seuls les limons grossiers (mode 3) et les sables (modes 4 et 5) ont été transportés, déposés et éventuellement infiltrés dans la matrice de sédiments grossiers.

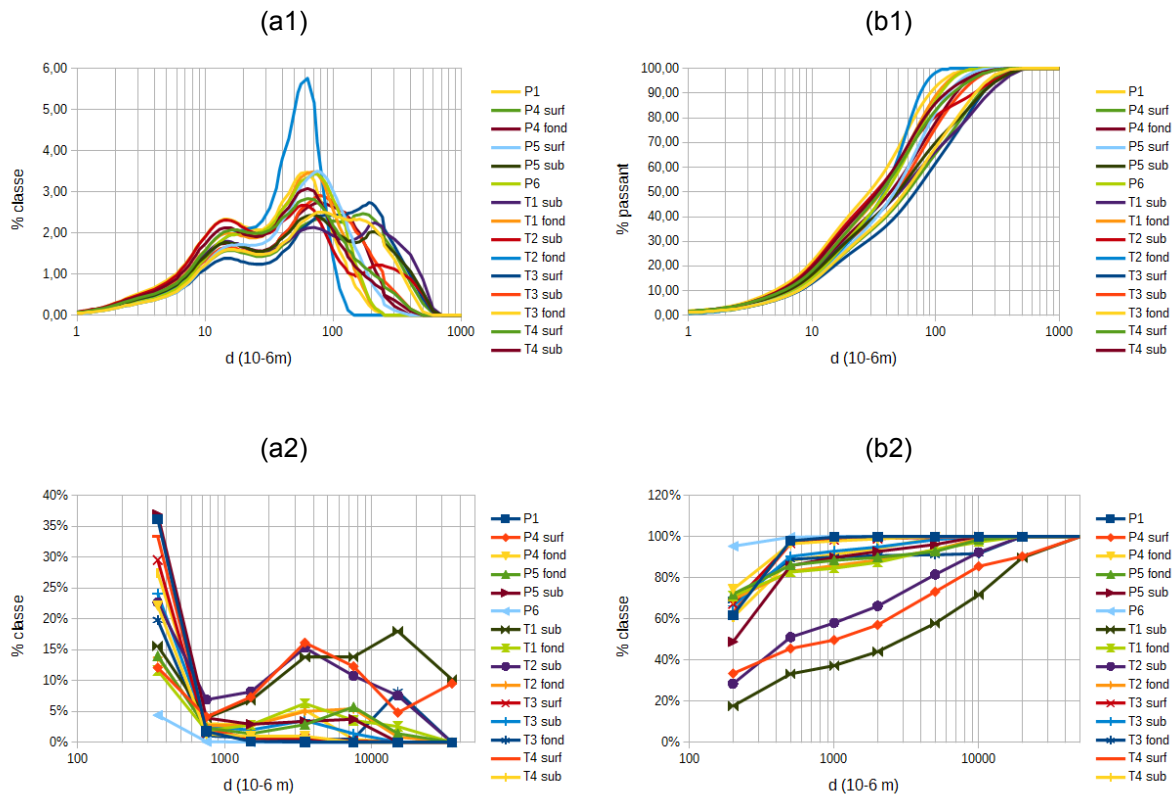


Figure 38 : Courbes granulométriques (en volume) de l'ensemble des échantillons de dépôt et d'infiltration par classe de sédiments (a) et en cumulé (b) pour les mesures par laser après tamisage à $d < 1$ mm (1) et les mesures par tamis avec $d > 0,2$ mm (2).

Une analyse verticale peut être réalisée pour les échantillons de la tranchée (Fig. 39). Il est à noter la difficulté à lier les courbes granulométriques réalisées par analyse laser et par tamisage du fait d'un sous-échantillonnage différent (cf. échantillons $T_{3, fond}$ où un gravier a été retrouvé dans l'analyse granulométrique alors qu'aucun grossier n'apparaissait pour l'échantillon laser, Fig. 39a3 et b3) mais surtout du fait du nombre de classes très supérieur pour l'analyse laser mais ne respectant pas nécessairement une croissance logarithmique. Le pourcentage en volume par classe dépendant directement du nombre de classe, il faut trouver un équivalent entre les deux mesures. Un facteur 7 a ainsi été utilisé (i.e. une classe par analyse avec tamis englobe en moyenne 7 classes par analyse laser). On observe ainsi un net décalage entre la courbe granulométrique issue de l'analyse laser après tamisage à $d < 1$ mm et les points de mesure par tamis avec $d > 0,2$ mm sur cette zone de recoupement ($0,2 < d < 1$ mm). Les valeurs moyennes de granulométrie laser par classe pour les MES ont été rajoutées pour comparaison (courbe grise sur les graphiques en colonne a). Les résultats Fig. 39 confirment la discussion précédente.

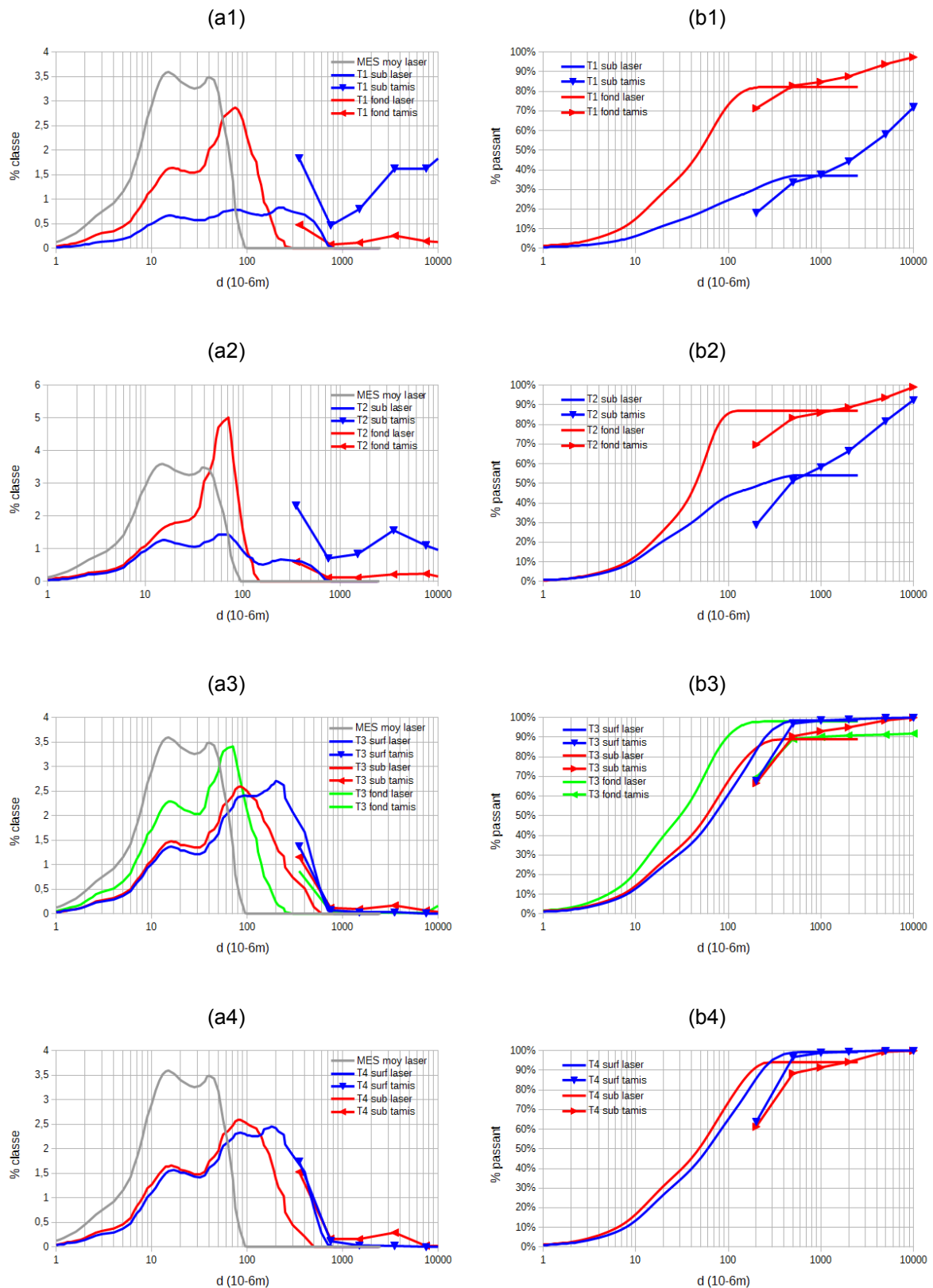


Figure 39 : Courbes granulométriques globales incluant les résultats de l'analyse laser (en volume) et par tamis des échantillons de dépôt et d'infiltration par classe de sédiments (a) et en cumulé (b) pour les placettes T_1 (1), T_2 (2), T_3 (3), et T_4 (4).

Pour les échantillons de fond, une granulométrie similaire à celle des MES est observée avec le rajout d'une classe de limons grossiers ($d_{m3} \approx 70 \mu\text{m}$) qui prédomine. Les couches de sub-surface et de surface font apparaître de nouveaux modes sableux ($d_{m4} \approx 200 \mu\text{m}$ et $d_{m5} \approx 400 \mu\text{m}$), voire même des graviers pour les placettes T_1 et T_2 qui ont été soumises à de plus fortes contraintes lors du pic de débit de la chasse.

5.4. Évolution de la plage de dépôt

Une importante plage de dépôt s'est formée sur le banc pendant la chasse de l'Arc (Fig. 40). Une partie des dépôts a été remobilisée lors de la phase de décrue jusqu'à la surface du banc (plus grossière), indiquant des épaisseurs de dépôt de 10 à 20 cm. Comme pour les dépôts de surface observés au niveau de la tranchée, ces dépôts sont principalement sableux.

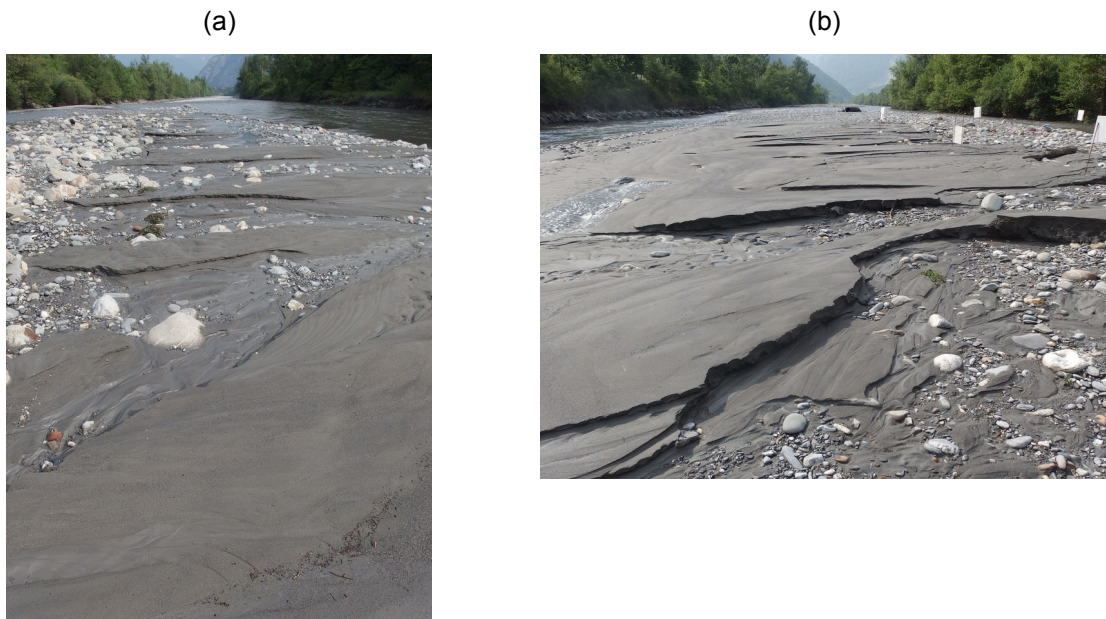


Figure 40 : Photos de la plage de dépôt vers l'aval (a) et vers l'amont (b).

5.4.1. Estimation de la surface du dépôt

La figure 41 présente un montage de deux photos du banc prise de la digue, orthorectifiées à l'aide des mires. On aperçoit nettement l'importance du dépôt sur le banc s'étendant sur l'ensemble de la partie droite de la seconde moitié du banc (aval).

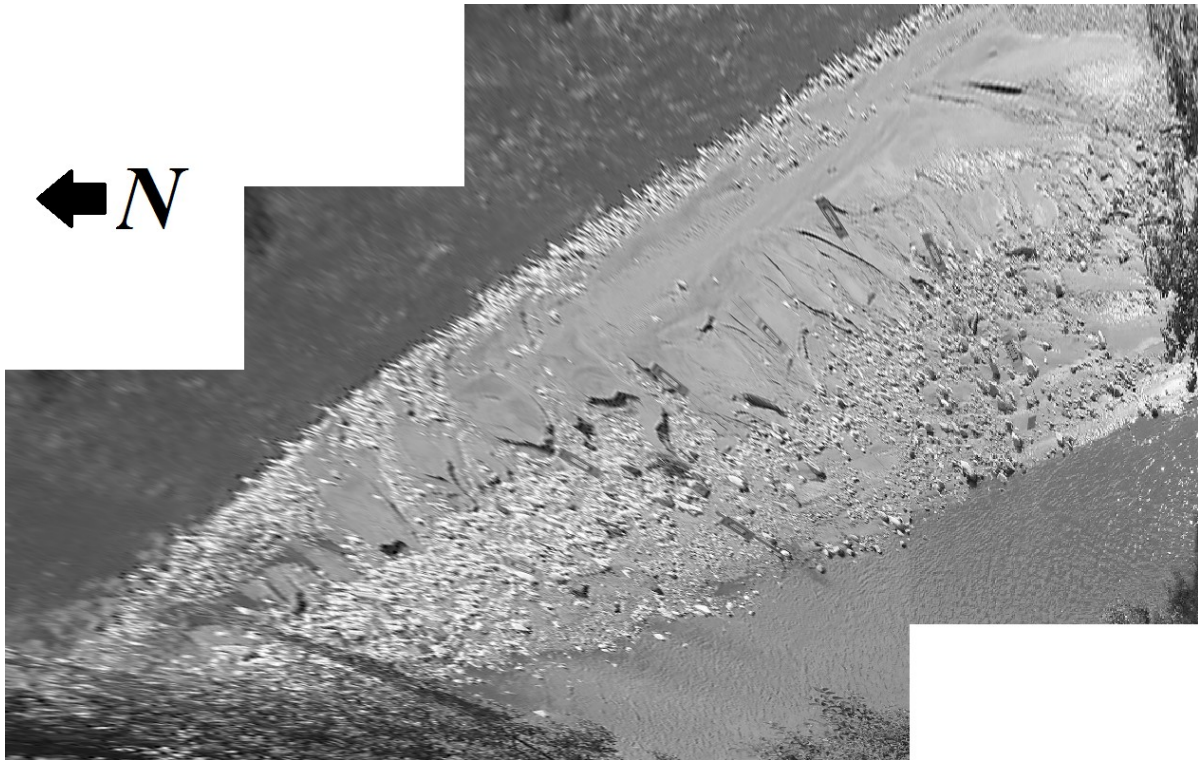


Figure 41 : Photo orthorectifiée du banc de galets après la chasse du 9 juin 2015.

Afin d'estimer le volume de sédiments fins déposé, une première étape a été de déterminer la surface de l'étendue du dépôt à partir de la photo orthorectifiée (Fig. 41). Cette dernière a ensuite été obtenue en créant manuellement un contour du dépôt global maximum directement à partir de l'image (Fig. 43a, polygone rouge). La surface estimée est ainsi de 595 m² (incertitude estimée à environ 50 m²). L'étendue des dépôts réels (après chasse) a aussi été estimée manuellement en créant des polygones (cf. Fig. 43a, polygones verts) : une surface de 330 m² (incertitude estimée à environ 50 m²) a été obtenue. L'estimation de l'étendue des dépôts réels (après chasse) a été réalisée à l'aide d'une seconde méthode, en utilisant un traitement d'images comme proposé dans Camenen et al. (2013). Une analyse statistique de l'histogramme des niveaux de gris sur une fenêtre de 30x30 pixels permet ainsi de repérer automatiquement les zones de dépôt (Figs. 42 et 43b). Cette méthode consiste en la détermination de deux paramètres décrivant l'histogramme obtenu sur la fenêtre d'étude : la valeur de pic ph (indication du niveau de gris dominant) et une valeur moyenne de l'histogramme filtré à des valeurs supérieures à 1 % du nombre de pixel mh (indication de la texture de l'image dans la fenêtre d'étude). Les conditions retenues pour caractériser les dépôts sont :

$$ph > 145 \text{ et } mh > 0,025 \qquad \text{Eq. 7}$$

Ceci correspond donc à une couleur relativement claire et homogène. La surface estimée de l'étendue des dépôts à l'aide de cette méthode est ainsi de 395 m² (incertitude estimée à environ 25 m²).

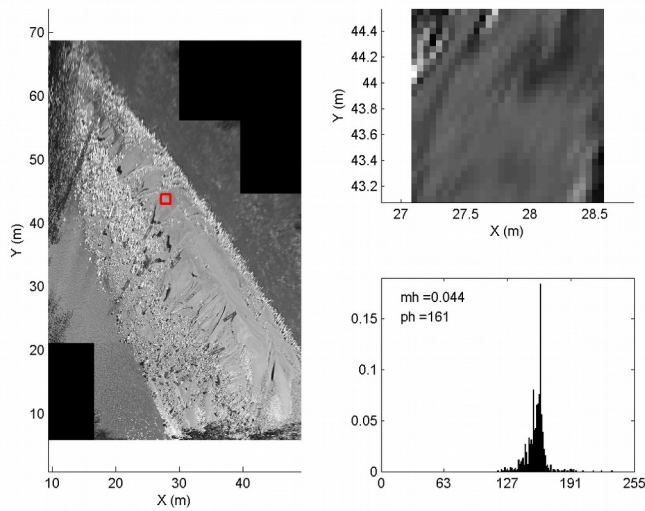


Figure 42 : Méthode automatique de détection des dépôts.

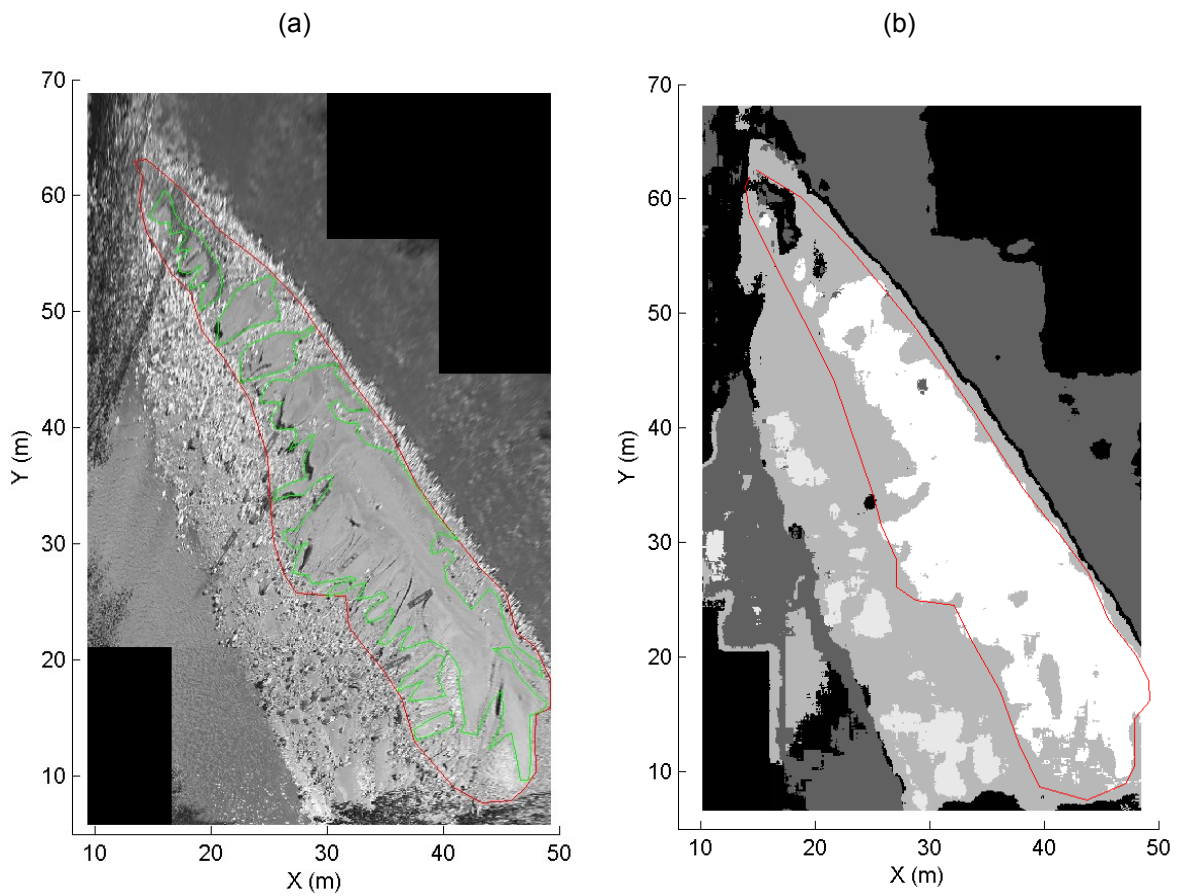


Figure 43 : Traitement de la photo du dépôt : estimation du contour maximum (a) et analyse d'image permettant d'avoir l'étendue du dépôt après chasse (b) (les axes x et y ont été artificiellement modifiés pour une meilleure lisibilité).

5.4.2. Estimation de l'épaisseur et du volume du dépôt

Des mesures de l'épaisseur du dépôt ont été réalisées au niveau des rigoles où les sédiments ont été remobilisés jusqu'au banc de gravier (cf. Fig. 40). Il en résulte un nuage de points à peu près bien répartis sur l'ensemble du dépôt. Il faut cependant noter que la partie amont côté chenal principal où le dépôt n'a que peu été repris reste mal décrite (Fig. 44). Quelques incohérences peuvent aussi être observées quant à la délimitation du dépôt obtenue à partir de l'image orthorectifiée et les mesures d'épaisseur de dépôt. Nous les attribuons aux incertitudes liées à l'orthorectification mais aussi potentiellement aux petits dépôts que nous avons exclus car considérés comme locaux.

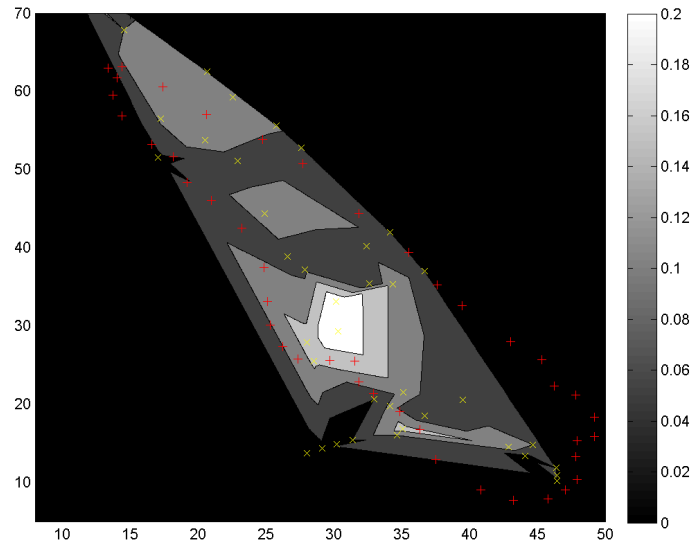


Figure 44 : Estimation des épaisseurs des dépôts (+rouge les points correspondant au polygone formant le contour du dépôt, x jaune : points de mesure de l'épaisseur du dépôt).

En combinant l'estimation de l'emprise du dépôt au pic et à la fin de la chasse et la mesure des épaisseurs de dépôt, nous avons ainsi estimé le **volume de sédiments déposés au pic de la chasse à 51 m³ ($\pm 20\%$)**, et le **volume de sédiments déposés après la chasse à 31 m³ ($\pm 20\%$)**.

5.5. Modélisation de l'infiltration et du dépôt

5.5.1. Décomposition de la courbe granulométrique

Une courbe granulométrique peut être assimilée à la somme de plusieurs classes de sédiments pouvant être décrite par une loi log-normale :

$$f_d = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)\log(\sigma)}} \exp\left[\frac{-\{\log(d) - \log(d_{50})\}^2}{2\log(\sigma)^2}\right] \quad \text{Eq. 8}$$

où f_d est la courbe de fréquence d'une classe de sédiments de diamètre médian d_{50} et d'étendue granulométrique σ . La description d'une courbe granulométrique selon n classes peut donc s'écrire selon l'équation suivante :

$$f = \sum_{i=1}^n \alpha_i f_{di} = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{\sqrt{(2\pi)\log(\sigma_i)}} \exp\left[\frac{-\{\log(d) - \log(d_{50i})\}^2}{2\log(\sigma_i)^2}\right] \quad \text{Eq. 9}$$

avec α_i le pourcentage représentatif en masse de la classe i ($\sum_1^n \alpha_i = 1$).

La Figure 45 présente une décomposition manuelle de la courbe granulométrique représentative des MES échantillonnées en surface lors de la chasse de l'Arc de juin 2015 avec quatre classes (cf. Tab. 6). Une routine R permettant d'optimiser la recherche des modes principaux a été développée par Marina Launay (Launay, 2014).

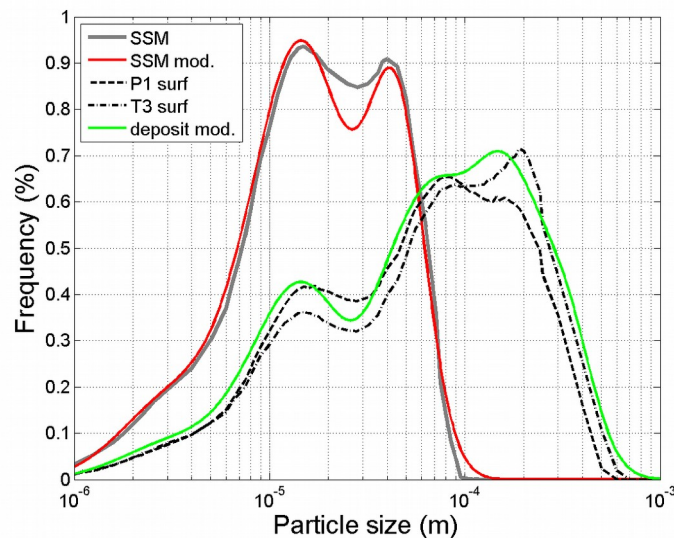


Figure 45 : Décomposition en quatre classes de la courbe granulométrique représentative des MES échantillonnée en surface, et en huit classes de la courbe granulométrique des dépôts sableux lors de la chasse de l'Arc de juin 2015.

Dans le Tableau 6 est décrite la décomposition en quatre classes de la courbe granulométrique moyenne des échantillons de surface prélevés lors de la chasse de l'Arc de juin 2015 près du banc de galets étudié (chenal secondaire) ou au niveau du pont de la Madeleine situé environ 2 km en aval. Comme discuté au paragraphe 5.1, les dépôts et sédiments infiltrés indiquent que des classes de sables étaient a priori aussi en suspension (suspension graduée). Les caractéristiques des dépôts sont ainsi représentées dans le Tab. 6 en intégrant dans la décomposition quatre classes de sables de diamètre médian respectif : $d_{50} = 60\mu\text{m}$, $120\mu\text{m}$, $200\mu\text{m}$ et $350\mu\text{m}$.

Tableau 6 : Caractéristiques des classes de sédiments représentant la décomposition des sédiments en suspension de l'Arc et déposés sur le banc lors de la chasse de juin 2015.

classes	MES de surface (échantillonnées)			Dépôts (échantillons P1 surf et T3 surf)		
	d_{50} [μm]	σ	α	d_{50} [μm]	σ	α
F1	3	1,80	0,10	3	1,80	0,05
F2	7	1,70	0,06	7	1,70	0,03
F3	15	1,75	0,55	15	1,75	0,25
F4	45	1,40	0,27	45	1,40	0,12
S1				65	1,35	0,08
S2				120	1,60	0,21
S3				200	1,60	0,20
S4				350	1,35	0,06

5.5.2. Estimations des concentrations en sable

La répartition des sables en suspension est a priori non seulement fonction de la qualité des sédiments en place mais aussi des contraintes de cisaillement : elle est donc a priori variable en temps. En première approximation, nous allons supposer une répartition fonction de la taille, soit 50 % pour la classe à $65\mu\text{m}$, 25 % pour la classe à $120\mu\text{m}$, 15 % pour la classe à $200\mu\text{m}$ et 10 % pour la classe à $400\mu\text{m}$. Ensuite, en considérant que la quantité de sable en suspension est directement proportionnelle à la quantité de MES mesurée (limons) avec un coefficient α_s , les pourcentages représentatifs en masse des MES (limons) et sables (valeurs données ci-dessus) sont modifiés par les coefficients $1/(1+\alpha_s)$ et $\alpha_s/(1+\alpha_s)$, respectivement. La Fig. 46 donne un exemple de recomposition de la courbe granulométrique des MES totales en prenant $\alpha_s=0,2$. Cette courbe reste cependant totalement hypothétique car nous n'avons aucune mesure ni du coefficient α_s , ni de la répartition des quatre classes de sable.

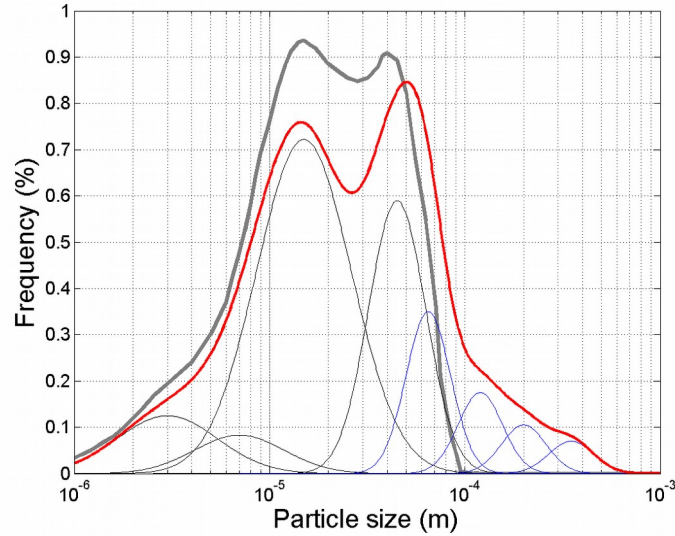


Figure 46 : Recomposition en huit classes de la courbe granulométrique représentative des MES totales lors de la chasse de l'Arc de juin 2015 ($\alpha_s=0,2$).

Une possibilité pour estimer les concentrations en sable pour chacune des quatre classes est de se baser sur une formulation semi-empirique du transport de sable en suspension. En utilisant la formule de Camenen & Larson (2008), on obtient ainsi la concentration moyenne sur la hauteur d'eau :

$$C_s = 0,0015 \rho_s \frac{\exp(-0,2 D_*)}{W_s} \epsilon_s \theta \exp\left(-4,5 \frac{\theta_{cr}}{\theta}\right) \quad \text{Eq. 10}$$

avec ρ_s la masse volumique du sédiment, $D_* = ((s-1)g/v^2)^{1/3} d$ le diamètre sédimentologique, W_s est la vitesse de chute du sédiment de diamètre d estimé selon la formule de Camenen (2007), $\epsilon_s = \kappa/6 u_* h$ la diffusion verticale pour le sédiment, $u_* = \sqrt{\tau/\rho}$ la vitesse de frottement, $\theta = \tau/(\rho(s-1)gd)$ le paramètre de Shields, et θ_{cr} sa valeur critique pour la mise en mouvement des particules estimée à l'aide de la formule de Soulsby & Whitehouse (1997).

A partir de la Fig. 14, les contraintes au niveau des placettes T2, T3 et T4 peuvent être assimilées comme constantes et égales à 2 Pa lors de la période du pic de crue. En prenant une profondeur d'eau moyenne $h=0,3$ m, il est ainsi possible d'estimer les concentrations des quatre classes de sable à l'aide de l'Eq. 10 : $C_{s,s1}=0,79$ g/l, $C_{s,s2}=0,13$ g/l, $C_{s,s3}=0,02$ g/l, et $C_{s,s4}=0,003$ g/l. Ces résultats indiquent une sensibilité très élevée au diamètre du sédiment, qui ne semble pas en accord avec la granulométrie des dépôts. La concentration en MES étant d'environ 8 g/l au pic de crue (cf. Fig. 9), on obtient ainsi $\alpha_s \approx 0,1$.

5.5.3. Application au flux de chute pour l'infiltration

Il est possible d'estimer la quantité de sédiments infiltrés au niveau des placettes à partir du temps de submersion et des concentrations en MES (Camenen et al., 2015a) :

$$M_{infiltr.} = \sum_{i=1}^8 C_i W_{si} T_{patch} A_{patch} \quad Eq. 11$$

où W_{si} est la vitesse de chute représentative de la classe i , T_{patch} et A_{patch} le temps de submersion et la surface de la placette. Les vitesses de chute ont été estimées pour chacune des classes en utilisant la formule de Camenen (2007). Il est difficile de prendre une placette de référence parmi les quatre mesurées. En effet, il y a eu du charriage de surface sur les placettes T1 et T2 induisant une granulométrie plus grossière de l'échantillon de sub-surface (cf. Fig. 39), un dépôt relativement important sur la placette T3 et un temps de submersion moins important pour la placette T4. Le calcul a donc été réalisé en prenant comme référence la granulométrie des sédiments infiltrés des placettes T3 et T4 mais avec une masse infiltrée moyenne sur les quatre placettes, soit environ 8 kg (Tab. 8). La surface $A_{patch} = 0,7 \times 0,25 = 0,175 \text{ m}^2$. Les paramètres de calcul utilisés pour l'estimation de la masse infiltrée sont donnés Tab. 7. Ils ont été estimés à partir des Figs. 8 Et 35. Il est à noter que l'Eq. 10 prédit des concentrations en sable quasi nulles pour des contraintes inférieures à 0,5 Pa.

Période	T_{patch}	C_F	τ	h	$C_{s,S1}$	$C_{s,S2}$	$C_{s,S3}$	$C_{s,S4}$
1	4 h.	5 g/l	0,2 Pa	0,2 m	0,007 g/l	0,001 g/l	≈0 g/l	≈0 g/l
2	4 h.	8 g/l	2 Pa	0,3 m	0,79 g/l	0,13 g/l	0,02 g/l	0,003 g/l
3	2 h.	2 g/l	0,2 Pa	0,2 m	0,007 g/l	0,001 g/l	≈0 g/l	≈0 g/l

L'estimation de l'infiltration moyenne sur une placette à partir du calcul des concentrations en sables avec l'Eq. 10 (paramètres du Tab. 7) est indiquée dans le Tab. 8 (modèle M1). Le taux d'infiltration total est très surestimé (27 kg au lieu des 8 kg mesurés) en particulier pour le limon grossier (F4) et les sables (S1, S2 et S3).

En supposant une porosité Initiale de la tranchée $p_t = 0,40$ (granulométrie peu étendue) et une porosité des sédiments infiltrés $p_i = 0,25$ (granulométrie étendue), il est possible d'estimer la quantité maximum de sédiments fins pouvant s'infiltrer dans la matrice de la tranchée :

$$M_{dep,max} = \rho_s p_t (1 - p_i) \delta_{patch} A_{patch} \quad Eq. 12$$

où $\delta_{patch} = \delta_{fd} + \delta_{sb} = 0,2 \text{ m}$ est l'épaisseur totale (fond+sub-surface) de la matrice (tranchée). On obtient ainsi $M_{dep,max} = 27,8 \text{ kg}$.

Une seconde possibilité pour estimer les concentrations en sable est de supposer que la concentration en sable est globalement proportionnelle à celle des sédiments fins, soit $C_{si} = \alpha_s C_F \alpha_{si}$. En prenant $\alpha_s = 0,01$ et $\alpha_{si} = 65,25,8$ et 2 %, respectivement, les résultats de flux de sables sont sensiblement améliorés (cf. Tab. 8, modèle M2). On peut noter que les concentrations en sable (et donc la part des sables dans la concentration totale) sont négligeables

devant les concentrations en fines alors même que ces classes représentent une part importante de l'infiltration.

Il reste que le taux d'infiltration pour les limons, en particulier les limons grossiers, est très sur-estimé alors que le taux d'infiltration pour les argiles et limons fins est sous-estimé. La surestimation de l'infiltration d'un facteur 2 est ainsi principalement liée à la surestimation pour la classe F4. Comme discuté dans Camenen et al. (2015a), l'Eq. 11 semble trop sensible à la vitesse de chute. Ceci indique que les vitesses de chute dans un mélange relativement concentré pourraient être influencés par les autres classes de sédiments, les particules les plus grossières entraînant les plus petites et les plus petites ralentissant les plus grossières. Les effets de turbulence au fond peuvent aussi avoir un impact sur le flux de chute (Cellino & Lemmin, 2004 ; Herrero et al., 2015). La vitesse de chute réelle des sédiments fins pourrait en effet être influencée par la turbulence au fond (balayages et éjections) liée à la matrice grossière. Il faut en particulier pouvoir prendre en compte qu'une partie de ces sédiments peut être remis en suspension avant même de pouvoir s'infiltrer du fait des contraintes faibles mais non-négligeables observées pendant la chasse au dessus du banc de galets (Hamm et al., 2011). En prenant $W_s = 2 \times 10^{-4}$ m/s, les résultats sont sensiblement améliorés pour les classes F1 à F4 (cf. Tab. 8, modèle M2m).

Tableau 8 : Estimation de la masse déposée sur une placette classe par classe.

Classes	d_{50} [μm]	W_s [m/s]	$M_{infiltr.,exp.}$ [kg]	$M_{infiltr.,M1}$ [kg]	$M_{infiltr.,M2}$ [kg]	α_i ($\alpha_s=0,01$)	$M_{infiltr.,M2m}$ [kg]
F1	3	5×10^{-6}	0,44	0,02	0,02	0,10	0,71
F2	7	3×10^{-5}	0,87	0,06	0,06	0,06	0,42
F3	15	$1,3 \times 10^{-4}$	1,04	2,5	2,5	0,55	3,9
F4	45	$1,1 \times 10^{-3}$	2,43	10,9	10,9	0,27	1,9
S1	65	$3,5 \times 10^{-3}$	1,22	8,0	0,92	0,0064	0,92
S2	120	$1,0 \times 10^{-2}$	1,22	3,6	0,93	0,0025	0,93
S3	200	$2,3 \times 10^{-2}$	0,52	1,4	0,62	0,0008	0,62
S4	350	$4,5 \times 10^{-2}$	0,26	0,35	0,32	0,0002	0,32
Total			8,0	26,7	16,2	1	9,7

Sur la Fig. 47, nous avons représenté les courbes granulométriques des sédiments infiltrés dans la tranchée en comparant les valeurs expérimentales (trait gris clair épais) aux résultats des modèles M1 et M2 présentés précédemment. Nous retrouvons bien que les deux modèles induisent une fortes sur-représentation de la classe F4 et un sous-représentation des classes F1 et F2. La modification de la valeur de la vitesse de chute pour les classes F1 à F4 (modèle M2m) améliore sensiblement les résultats.

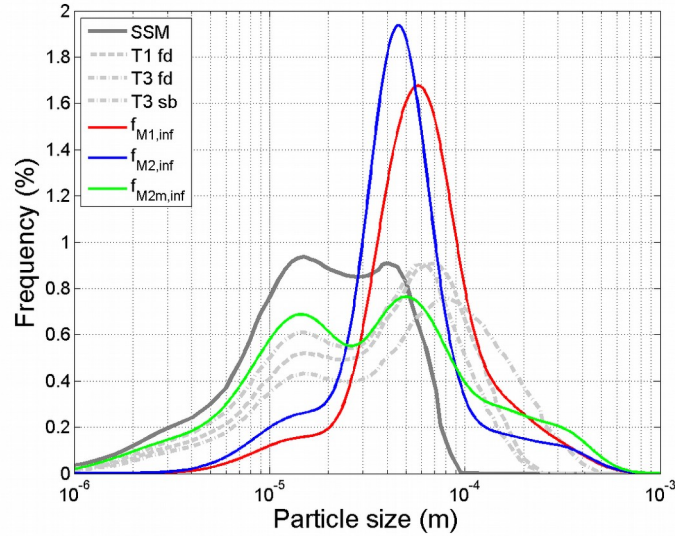


Figure 47 : Recomposition en huit classes de la courbe granulométrique représentative des sédiments infiltrés dans la tranchée lors de la chasse de l'Arc de juin 2015 ($\alpha_s=0,2$).

5.5.4. Application au flux de chute pour le dépôt

Il est possible de faire un calcul similaire pour le dépôt limoneux-sableux sur le banc de galets. A titre de comparaison, nous avons les courbes granulométriques des dépôts de surface (échantillons P1surf et T3surf présentés en Fig. 48). En reprenant la même méthodologie que pour les sédiments infiltrés, nous avons pu estimer les dépôts sur le banc de galets à partir des méthodes M1 et M2. Les résultats sont présentés Tab. 9. La surface $A_{depot}=600\text{m}^2$. Le produit CT_{depot} a été estimé à partir des Figs. 8 et 35 pour le pic de crue uniquement, soit 4h à 8 g/l.

Le modèle M1 donne un dépôt de plus de 72 tonnes. En volume, cela donne :

$$V_{dep.} = \frac{M_{dep.}}{\rho_s(1-p)} \quad \text{Eq. 13}$$

avec $\rho_s=2650\text{kg/m}^3$ la masse volumique du sédiment et $p=0,25$ la porosité des dépôts. On obtient ainsi $V_{dep.}=36\text{m}^3$; ce qui est relativement proche de l'estimation faite à partir des mesures topographiques et traitement photographique (cf. paragraphe 5.4.1) avec $V_{dep.}=51\pm 10\text{m}^3$. Cependant, il apparaît que la granulométrie du dépôt ne correspond pas du tout aux mesures (cf. Tab. 9 et Fig. 48).

Le modèle M2 a été appliqué en utilisant des coefficients différents de ceux obtenus pour l'infiltration: $\alpha_s=0,05$ (au lieu de $\alpha_s=0,01$) et $\alpha_{si}=15,39,36$ et 10 % (au lieu de $\alpha_{si}=65,25,8$ et 2 %). Ceci peut s'expliquer du fait que le dépôt inclut sans doute une part non-négligeable de sédiments transportés par charriage, impliquant une plus forte part des particules grossières sur les taux de dépôts. La part des sables sur la concentration totale reste très faible mais plus aussi négligeable que précédemment; par contre, la granulométrie des dépôts sableux est plus proche des observations (cf. Tab. 9).

De la même manière, la vitesse de chute finalement retenue pour les sédiments fins (classes F1 à F4) est $W_s=5\times 10^{-4}$ m/s, ce qui est deux fois supérieur au calage obtenu pour l'infiltration. Cependant, les masses déposées pour chacune des classes sont en correspondance avec la courbe granulométrique des dépôts (cf. Tab. 9 et Fig. 48). On obtient ainsi $V_{dep.}=37\text{ m}^3$.

Tableau 9 : Estimation de la masse et granulométrie des sédiments déposée sur le banc lors de la chasse de juin 2015 (α_{dep} estimé à partir des échantillons P1surf et T3surf).

Classes	d_{50} [μm]	W_s [m/s]	α_{dep}	$M_{dep.,M1}$ [kg]	$M_{dep.,M2}$ [kg]	α_i ($\alpha_s=0,05$)	$M_{dep.,M2m}$ [kg]
F1	3	5×10^{-6}	0,04	35	35	0,095	3460
F2	7	3×10^{-5}	0,03	115	115	0,057	2070
F3	15	$1,3\times 10^{-4}$	0,24	4860	4860	0,524	19000
F4	45	$1,1\times 10^{-3}$	0,12	21300	21300	0,257	9300
S1	65	$3,5\times 10^{-3}$	0,08	27500	5560	0,007	5560
S2	120	$1,0\times 10^{-2}$	0,22	12300	12000	0,019	12000
S3	200	$2,3\times 10^{-2}$	0,20	4800	18000	0,017	18000
S4	350	$4,5\times 10^{-2}$	0,06	1200	3100	0,005	3100
Total			1	72100	66700	1	74300

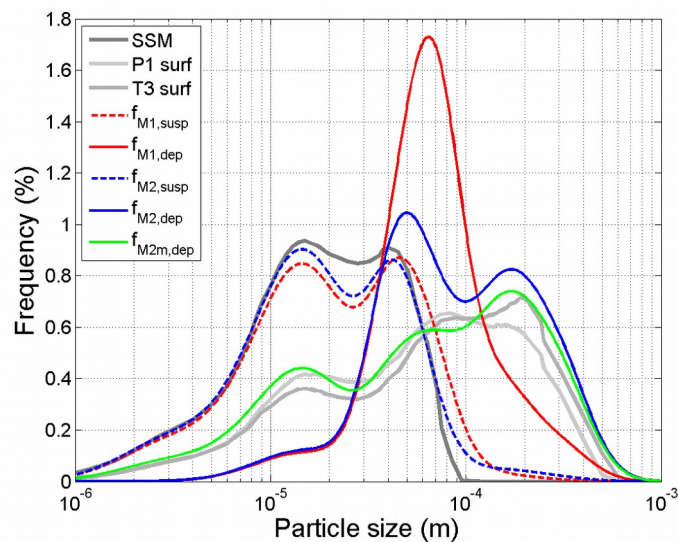


Figure 48 : Recomposition en huit classes de la courbe granulométrique représentative des sédiments déposés sur le banc lors de la chasse de l'Arc de juin 2015 ($\alpha_s=0,2$).

6. Conclusions et perspectives

6.1. Charriage et suspension graduée

Les mesures réalisées sur le banc de galets ont confirmé que pour un débit de 110 m³/s, les contraintes de cisaillement sur le banc sont très proches de la contrainte critique de mise en mouvement des galets mais restent globalement inférieures. En effet, seuls quelques galets ont été mobilisés lors de cette chasse. Il est vrai que les dépôts de sédiments fins (sables et limons) ont certainement limités les possibilités de mobilisation de ces galets. Cependant, des différences entre les types de placette peuvent nous permettent quelques conclusions :

- les galets des placettes de références sont a priori les plus mobiles (3 galets sur 50 se sont déplacés)
- les placettes propres sont peu mobiles (2 galets sur 50 ont légèrement bougé, réarrangement)
- les placettes colmatées sont très peu mobiles (aucun galet ne s'est déplacé pendant la chasse).

On peut donc conclure que $\tau_{cr, référence} < \tau_{cr, propre} < \tau_{cr, colmatée}$.

Les très larges dépôts de limons grossiers et sables observés après la chasse indiquent qu'il y avait une suspension graduée non-négligeable. Les modèles présentés au paragraphe 5.5 ont de plus montré que les concentrations en limons grossiers et sables étaient a priori faibles par rapport aux concentrations en MES de type « suspension de lessivage » (argile et limons fins) du fait de leur forte capacité de sédimentation (vitesse de chute des sédiments très élevées).

Des mesures complémentaires semblent donc indispensables pour mieux comprendre la dynamique des sédiments grossiers (galets) pour des contraintes plus élevées. La même expérience pour des débits atteignant 130 m³/s devrait permettre de valider le protocole proposé en espérant des distances de déplacement des galets justifiant l'utilisation des transpondeurs passifs. Lors de la chasse de 2009, les galets avaient parcouru plusieurs dizaines de mètre en bord du chenal secondaire d'un banc de galets situé plus en aval (Camenen et al., 2010).

Il semble important de réfléchir aussi à une expérience permettant d'estimer les flux de sables et leurs profils de concentration. Pour cela, il faudrait pouvoir prélever à différentes profondeurs. Une solution serait d'imaginer une expérience avec un préleveur du type Delft-Nile-Sampler (DNS, Fig. 49) permettant à la fois une mesure du charriage et de la suspension par un système de pompage. La difficulté principale reste la possibilité de faire un pompage iso-cinétique pour pouvoir estimer le flux de sables en suspension à différentes profondeur. Enfin, une problématique non-négligeable est la mise en place d'une telle expérimentation sur le banc de galets...



Figure 49 : Photo du Deft-Nile-Sampler (DNS).

6.2. Dépôts

Au cours de la chasse de juin 2015, nous avons pu observer un dépôt de sédiments fins (limons et sables) d'une très grande étendue sur le banc de galets étudié (près de 50 m³ de dépôt estimé au pic de crue, cf. paragraphe 5.4). Les mesures et la modélisation ont en effet montré qu'un transport de limons grossiers et sables par charriage et suspension graduée était très important au cours de cette chasse. Le volume déposé peut s'expliquer d'une part par la capacité de dépôt des sables et limons grossiers (vitesse de chute élevée) mais surtout par la durée à un niveau et un débit à peu près constant particulièrement longue pour la chasse de 2015 (près de 10 heures). Il apparaît qu'il existe un niveau d'eau critique au dessus d'un banc de galets non végétalisé propice aux dépôts (profondeur d'eau entre 20 et 50 cm comme observée lors de la chasse de juin 2015). Ainsi, les dépôts peuvent être limités par une durée d'exposition plus courte. Pour des profondeurs d'eau plus faibles, les dépôts restent limités car les apports sont plus faibles ; pour des profondeurs plus élevées, les vitesses deviennent suffisamment importantes pour remobiliser les sédiments fins en empêchant ainsi tout dépôt. De plus, il est apparu que lors de la descente de crue, une quantité non-négligeable de ces dépôts était reprise sans doute du fait de pentes locales plus élevées.

L'impact d'un tel dépôt sur la dynamique d'un banc de galets peut-être critique. En effet, les dépôts de fines sont propices au développement d'une végétation pionnière pouvant par la suite fortement limiter la mobilité du banc de galets. Les photos Fig. 50 indiquent les tendances d'évolution du dépôt après 75 jours hors eau. Comme déjà observé par Camenen et al. (2013), il y a une importante dispersion des sédiments fins sur le banc du fait du transport éolien. Ceci est confirmé par la présence de rides avec une longueur de d'onde de 25cm environ. En se basant sur la revue de Duran et al. (2011), cette longueur peut être écrite en fonction de la vitesse de frottement :

$$\lambda_r = 0,1 \left(\frac{u_{*v}}{u_d} - 1 \right) \quad \text{Eq. 14}$$

avec $u_{*v} \approx U_{10}/35$ la vitesse de frottement liée au vent, U_{10} la vitesse du vent à 10 m au dessus du sol, et $u_d \approx 0,2$ m/s la vitesse critique dynamique de mise en mouvement des particules par le vent (pour des sables fins). A partir de l'Eq. 14, on peut déduire que les rides ont été créées par un vent tel que $U_{10} \approx 25$ m/s, soit près de 90 km/h. Cette estimation semble cependant un peu élevée car la brise de vallée connue pour être forte en Maurienne en début d'après-midi reste généralement inférieure à 50 km/h.



Figure 50 : Photos du banc de galet étudié le 26 août 2015.

Une conséquence directe de ces dépôts est de faciliter la pousse d'une végétation pionnière. Plusieurs pousses de saules et d'herbacées peuvent déjà être observées sur les photos Fig. 50. Bien sûr, cela n'implique pas une nécessaire colonisation du banc par la végétation. Une crue tout comme une longue période de basses-eaux (en particulier dans le cas de bancs perchés comme celui étudié par M. Jodeau, 2007 et M. Jaballah, 2013) peuvent éliminer cette végétation pionnière. Cependant, si l'on veut limiter les risques de végétalisation des bancs de galets, il semble donc important de limiter les dépôts de sédiments sur ces derniers. Dans le cadre des événements de chasse, **la chronique de débit de projet ne doit donc pas induire de longue période à débit constant où une partie des bancs de galets de l'Arc serait inondée avec des profondeurs et surtout des vitesses d'écoulement très faibles.**

6.3. Infiltration

Les mesures réalisées au cours de la chasse ont permis de montrer le potentiel d'infiltration d'un tel événement. Des taux d'infiltration très élevés ont pu être estimés sur des placettes composées de matériau grossier, avec donc une porosité relativement élevée (estimée à 0,4). Ces taux sont donc à relativiser du fait de la porosité élevée et la différence de taille entre les sédiments formant la matrice et les sédiments en suspension permettant une infiltration non entravée (Unimpeded Static Percolation, cf. Herrero et al., 2015). Cependant, ces mesures permettent d'expliquer les fortes quantités de sédiments fins dans le lit des bancs de graviers comme mesurés par Camenen et al (2009) après la crue de 2008.

Les modèles présentés pour reproduire quantitativement et qualitativement les taux d'infiltration et les dépôts donnent des résultats intéressants. Si quantitativement, les valeurs estimées à partir d'un modèle de flux de chute sont cohérentes avec les mesures, qualitativement on observe une forte sous-estimation pour les sédiments les plus fins (argiles, limons fins) et une surestimation des limons grossiers et sables très fins. De plus, des différences significatives sont observées entre la qualité des sédiments infiltrés et celle des dépôts pouvant être expliqué d'une part par un transport par charriage non-négligeable, d'autre part par un possible colmatage de surface lié à la granulométrie plus grossière transportée.

Des améliorations restent à faire quant à la modélisation de ces dépôts/infiltrations. En effet, il semblerait qu'il y ait une interaction entre les différentes classes de sédiments limitant les différences de vitesses de chute entre les plus fins et les plus grossiers. Il serait de plus très intéressant de réaliser des mesures de turbulences proches du fond afin de mieux comprendre le potentiel impact de la turbulence sur les flux de chute et l'infiltration.

7. 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 particles in suspension*. J. Hydraulic Eng. 133(2), 229–233.
- Camenen, B., Dugué, V., Proust, S., Le Coz, J. & Paquier, A. (2009). *Formation of standing waves in a mountain river and its consequences on gravel bar morphodynamics*. Proc. 6th IAHR symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, vol. I, pp.65-72.
- Camenen, B., Herrero, A., Dramais, G., Thollet, F., Le Bescond, C., Perret, E., & Berni, C. (2015). *Field experiment on the dynamics of fine sediments over a gravel bar in a alpine gravel-bed river*. Proc. RCEM conference, Iquitos, Pérou, 4p.
- Camenen B., Jodeau M. & Jaballah M. (2013). *Estimate of fine sediment deposit dynamics over a gravel bar using photography analysis*. Int. J. of Sediment Res. 28(2): 220-233.
- Camenen, B. and M. Larson (2008). *A general formula for noncohesive suspended sediment transport*. J. Coastal Res. 24(3), 615–627.
- Camenen, B., Le Coz, J., Paquier, A. & Lagouy, (2010). *An estimation of gravel mobility over an alpine river gravel bar (Arc en Maurienne, France) using PIT-tag tracers*. River Flow, Proc. 5th Int. Conf. on Fluvial Hydraulics, M. Dittrich, A.; Koll, K.; Aberle, J. & Geisenhainer, P. (Eds.), pp.953-960.
- 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.
- Durán, O., Claudin, P. & Andreotti, B. (2011). *On aeolian transport: Grain-scale interactions, dynamical mechanisms and scaling laws*. Aeolian Research 3:243-270.
- Hamm, N. T.; Dade, W. B. & Renshaw, C. E. (2011) *Fine particle deposition to porous beds*. Water Resources Res., 47(W11508) :1-13.
- Herrero, A., Berni, C. & Camenen, B. (2015). *Laboratory analysis on silt infiltration into a gravel bed*. Proc. 36th IAHR World Congress, La Haye, Pays Bas, 8p.
- 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.
- Launay, M. (2014). *Flux de contaminants particuliers 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.

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