



HAL
open science

Estimation du transport solide par charriage : calage méthodologique sur plusieurs rivières alpines et application au suivi d'une opération de restauration

Marie Courtel, B. Camenen

► To cite this version:

Marie Courtel, B. Camenen. Estimation du transport solide par charriage : calage méthodologique sur plusieurs rivières alpines et application au suivi d'une opération de restauration. [Rapport de recherche] irstea. 2012, pp.19. hal-02597874

HAL Id: hal-02597874

<https://hal.inrae.fr/hal-02597874>

Submitted on 15 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.



**Estimation du transport solide par charriage :
calage méthodologique sur plusieurs rivières
alpines et application au suivi d'une opération de
restauration.**

**Marie Courtel & Benoît Camenen
Irstea Lyon**

décembre 2012

**Rapport intermédiaire projet Agence de L'Eau Rhône,
Méditerranée, Corse.**

Table des matières

1	Introduction.....	3
2	Techniques existantes pour la mesure du charriage et suspension de fond.....	3
2.1	Préleveurs de charriage.....	3
2.1.1	Helley Smith ouverture 152 mm ou 75 mm.....	3
2.1.2	Ehrenberger (modifié par le VUVH).....	4
2.1.3	BTMA.....	5
2.1.4	Fosses et trappes.....	5
2.2	Préleveurs de suspension de fond.....	6
2.2.1	Bouteille de Delft.....	6
2.2.2	Préleveurs FISP.....	6
2.3	Techniques alternatives.....	6
2.3.1	Transpondeurs passifs intégrés.....	6
2.3.2	Géophones et hydrophones.....	7
2.3.3	ADCP.....	7
3	Sites étudiés.....	7
3.1	Rivière torrentielle Arc en Maurienne.....	7
3.2	Fleuve Rhône à l'amont et l'aval du barrage de Génissiat.....	8
3.3	Torrent du Bouinenc.....	9
3.4	Ruisseau le Bozançon en Loire.....	10
4	Protocoles de mesures.....	12
4.1	Mesure du charriage pendant la chasse de l'Arc.....	12
4.2	Mesure du charriage pendant la chasse du Haut Rhône.....	13
4.2.1	Amont du barrage de Génissiat : Pont Carnot.....	13
4.2.2	Aval du barrage de Génissiat : station hydrométrique de Bognes.....	13
4.3	Mesure du charriage sur le Bozançon.....	14
5	Résultats de nos expérimentations.....	14
5.1	Charriage pendant la chasse de l'Arc.....	14
5.2	Charriage pendant la chasse du Haut Rhône.....	16
5.3	Charriage sur le Bozançon.....	17
6	Références.....	18

1 Introduction

Les flux de sédiments sablo-graveleux, transportés par charriage au fond des cours d'eau, déterminent des évolutions morphologiques aux enjeux souvent très forts. Des mesures des flux transitant lors des crues (ou chasses simulant des crues) en différents endroits du réseau hydrographique sont très précieuses pour évaluer la dynamique des flux instantanés, évaluer et caler des formules semi-empiriques de transport solide adaptées, permettant ensuite de prédire plus fidèlement les évolutions morphologiques à l'aide de modèles numériques.

Dans le cadre de ce projet, plusieurs mesures de transport solide par charriage ont été réalisées sur différents sites ayant chacun des particularités propres afin de préparer des méthodologies adaptées aux différents types de rivières. Plusieurs techniques de mesures ont aussi été testées selon les possibilités qu'offraient les sites étudiés.

2 Techniques existantes pour la mesure du charriage et suspension de fond

Le charriage est défini comme l'ensemble des sédiments se déplaçant sur le fond du lit de la rivière par glissement, roulement, ou petit sauts (saltation). La suspension de fond désigne l'ensemble des sédiments se déplaçant sur la colonne d'eau avec une vitesse proche de la vitesse de l'eau et en équilibre direct avec l'hydrodynamique locale. Une distinction est ainsi faite avec la suspension de lessivage (« wash load »), qui ne dépend pas de la capacité de transport locale de l'écoulement mais des apports amont. Couramment, on parle de matière en suspension (MES) pour la suspension de lessivage. Nous discuterons dans ce document uniquement de la mesure de charge de fond (charriage et suspension).

2.1 Préleveurs de charriage

Le moyen le plus simple conceptuellement pour estimer le charriage est de prélever un échantillon de fond pendant un temps donné. Le débit solide peut ainsi être exprimé par l'équation suivante :

$$q_{s,exp} = k \frac{M}{\rho_s b T} \quad \text{Eq. 1}$$

où $q_{s,exp}$ est le débit solide exprimé en $m^3/s/m$ linéaire, k l'efficacité de la méthode de prélèvement, M la masse prélevée (en kg), ρ_s la masse volumique du sédiment, b la largeur du système de prélèvement et T le temps de prélèvement.

Les préleveurs sont des échantillonneurs de charge de fond. Ils sont placés dans le lit du cours d'eau face au courant. La mise en œuvre de ces échantillonneurs ne peut s'effectuer que sur des vitesses et/ou débits relativement modérés. En effet, il devient difficile et dangereux de les utiliser lors de crues incluant de forts débits (risque de perte ou casse du préleveur).

2.1.1 Helley Smith ouverture 152 mm ou 75 mm

Le Helley Smith est un échantillonneur à différence de pression. Il est largement utilisé aux États-Unis. Il s'agit d'un échantillonneur mécanique que l'on place face au courant dans le lit du cours d'eau. Il est composé d'une buse d'entrée, d'un sac en filet ou d'un panier rigide (collectant l'échantillon de charriage) et d'éléments de structure assurant sa stabilité dans l'eau.

Un Helley Smith d'ouverture 152 mm pèse environ 75 kg et celui d'ouverture 75 mm, 30 kg. Seuls la buse et le sac sont réellement fondamentaux. En effet, la buse a une forme divergente afin d'assurer une chute de pression locale lorsque le fluide passe à travers. Cette chute de pression aspire littéralement le sédiment qui se trouve piégé dans le sac ou panier.

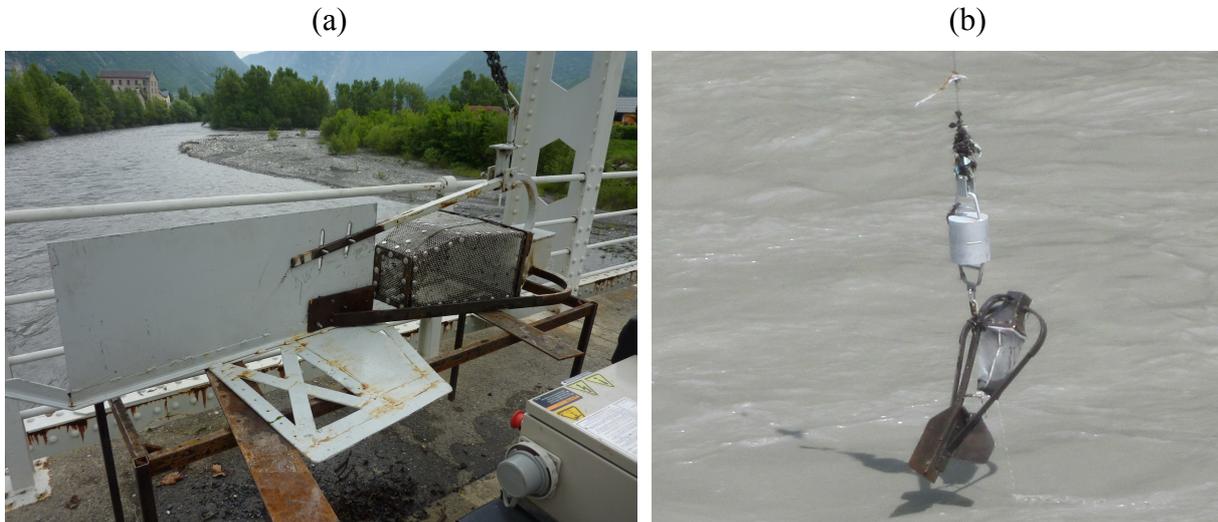


Figure 1 : Préleveurs Helley Smith d'ouverture 152 mm (a) et 75 mm (b)

Malgré son utilisation depuis de nombreuses années, des dérives ont été constatées sur la mesure via un Helley Smith. Afin d'assurer une bonne qualité de mesure (surtout au niveau de sa répétabilité), plusieurs précautions doivent être prises (Emmett, 1980 ; Childers, 1999) :

- le diamètre de la buse d'entrée doit être plusieurs fois plus grand que le plus gros diamètre des grains du lit à échantillonner ;
- le design de l'échantillonneur doit assurer une bonne cohésion avec le fond du lit afin d'éviter que des particules échantillonnables passent dessous à cause des formes du fond (dunes) ;
- le sac de réception doit être suffisamment grand afin de permettre un échantillonnage de qualité pour les forts taux de transport et d'avoir une distribution granulométrique précise ;
- la taille de la maille du sac doit être suffisante afin d'éviter que le sac soit colmaté par les particules les plus fines qui transitent en suspension.

Les performances et l'efficacité d'échantillonnage doivent être stables et proche de 1 (risque de surévaluation du transport solide) en fonction de la position de l'échantillonneur.

2.1.2 Ehrenberger (modifié par le VUVH)

Le préleveur Ehrenberger (ou préleveur suisse) est, comme le Helley-Smith, un échantillonneur mécanique que l'on place dans le lit du cours d'eau face au courant. Il est utilisé, notamment, sur le Danube en Slovaquie. Nous utilisons d'ailleurs une version modifiée par le VUVH (Bratislava, Slovaquie).

L'ouverture de ce préleveur est large et fine (100 x 20 cm) et le panier récepteur des sédiments est continu à l'ouverture ayant les mêmes dimensions.

Ce préleveur est plutôt utilisé pour les sédiments grossiers, les mailles du panier étant grossières. Ce préleveur est très encombrant et s'est avéré peu stable dans un écoulement très turbulent.



Figure 2 : Ehrenberger suspendu avant mise à l'eau

2.1.3 BTMA

Un autre préleveur est le Bedload Transport Meter Arnhem (BTMA) développé antérieurement à Arnhem, Pays-Bas. Ce modèle de structure plus complexe permet un atterrissage sur le fond du lit mieux maîtrisé. En effet, sa conception permet que la queue de l'appareil se pose en premier ce qui évite les phénomènes d'enfournement. Ensuite le corps de l'appareil se pose et enfin, par un jeu de lamelles métalliques, la « bouche » du préleveur se pose en douceur sur le fond pour éviter un brassage avec mise en suspension de sédiment qui pourrait perturber la mesure. Lors de la remontée de l'appareil, le processus s'inverse évitant à nouveau l'entrée intempestive de matériau dans l'appareil. L'entrée du préleveur de 8 cm de large par 5 cm de haut en fait un appareil destiné aux échantillons sablo-graveleux. Il est utilisé sur la Loire par l'université de Tours (S. Rodriguez).



Figure 3 : Préleveurs BTMA (Photos J.N Gautier)

2.1.4 Fosses et trappes

Il s'agit de fosses que l'on creuse dans le lit du cours d'eau, et dans lesquelles les sédiments charriés sont récoltés. Le volume de cette fosse est de l'ordre d'une à deux années d'apports solides. La fosse est curée régulièrement (notamment après chaque crue) et l'on effectue des mesures topographiques et granulométriques. Ces fosses laissent cependant passer une partie de la charge de fond et ne permet pas d'obtenir tout le volume transporté. De plus, cela ne donne que des valeurs grossières et intégrées du transport solide

Il existe aujourd'hui des trappes de plus faible capacité mais permettant de mesurer en continu la masse déposée. Il est ainsi d'estimer le transport solide instantané lors d'un événement. Cette méthode est cependant très coûteuse et ne permet de suivre que quelques événements. Elle est actuellement utilisée par l'Irstea Grenoble (F. Liebault) sur le site de Draix.

2.2 Préleveurs de suspension de fond

2.2.1 Bouteille de Delft

La bouteille de Delft permet d'échantillonner sur toute la colonne d'eau à partir de 5 cm du fond. Elle ne piège que les sables à partir de 50 μm mais permet d'en récupérer une grande quantité car la forme du préleveur laisse décanter les sables (chambre profilée avec un effet venturi).

Ce préleveur est très intéressant mais ne peut être utilisé qu'à des concentrations inférieures à 10 mg/L et à des vitesses inférieures à 2,5 m/s. Il est de plus d'une conception relativement fragile (embout en laiton). Il ne peut donc pas être employé en cas de crue et difficilement sur des rivières torrentielles.



Figure 4 : Bouteille de Delft suspendue avant mise à l'eau

2.2.2 Préleveurs FISP

Suite à une collaboration avec l'USGS, nous devrions avoir la possibilité de tester un préleveur de suspension (US-P-72, http://water.usgs.gov/fisp/catalog_index.html). Ce préleveur est doté d'un système iso-cinétique comme la bouteille de Delft. S'il n'est pas adapté pour mesurer très près du fond, il a l'avantage d'être plus solide et robuste.

2.3 Techniques alternatives

2.3.1 Transpondeurs passifs intégrés

Les transpondeurs passifs intégrés ou PIT tags sont des puces RFID (Radio Frequency Identification) implantées dans des sédiments grossiers (galets, blocs). Ils sont utilisés pour un suivi du transport solide sur le long terme. Une fois le transpondeur implanté, le sédiment est placé dans

le cours d'eau ou sur des bancs. Leurs emplacements initiaux sont localisés par DGPS. Après un événement majeur (crue, chasse) ils sont recherchés à l'aide d'une antenne réceptrice. On peut ainsi mesurer la distance parcourue par ces sédiments. Malheureusement, si le cours d'eau est large et a un fort transport solide, il est très difficile de retrouver les éléments avec transpondeurs. Le taux de recouvrement peut être très faible et induit ainsi un fort biais dans la compréhension de la dynamique car on ne sait si les traceurs non retrouvés sont enfouis ou ont parcourus de plus longues distances. Deux principales stratégies sont utilisées pour cette technique :

- mesure du charriage par l'étude statistique d'un grand nombre de particules ayant a priori subi les mêmes contraintes d'écoulement ;
- mesure spatiale du début d'entraînement des particules.

2.3.2 Géophones et hydrophones

D'autres techniques sont actuellement en développement mais nécessitent une calibration avec d'autres méthodes de mesures. Des expérimentations sont en cours notamment sur la question des prélèvements.

On peut également citer les capteurs passifs comme des plaques, colonnes ou tuyaux d'impacts. Le bruit des impacts des sédiments charriés est enregistré par des hydrophones ou géophones.

L'hydrophone peut être utilisé seul et enregistrer l'énergie acoustique des particules mobiles s'impactant entre elles. Cette méthodologie plus difficile à traiter du fait de la complexité du signal (variabilité des fréquences de chocs, bruits) est actuellement en développement au LTHE (Grenoble, thèse de Thomas Geais)

Il existe aussi des capteurs de vibrations piézo-électriques toujours alliés à des systèmes d'impacts. Des traceurs magnétiques utilisant les fragments naturellement magnétiques ou incrustés d'aimants pour étudier la trajectoire des particules charriées sont en développement.

2.3.3 ADCP

L'ADCP est un appareil couramment utilisé pour la mesure de vitesse (effet Doppler). Couplé à un GPS, ce dernier peut aussi permettre d'estimer le mouvement du fond et donc le charriage (Rennie et al., 2002). Cette méthode reste cependant encore en développement car il est difficile de connaître exactement à quel niveau exactement cette vitesse de fond est estimée (suspension de fond ou charriage) selon la fréquence de l'appareil et les concentrations de sédiments au fond.

3 Sites étudiés

3.1 Rivière torrentielle Arc en Maurienne

L'Arc est une rivière torrentielle de la vallée de la Maurienne en Savoie. Elle prend sa source à la frontière franco-italienne et est un affluent de l'Isère. La rivière est très contrainte par la vallée étroite et ses nombreux aménagements (autoroute, voie de chemin de fer, nationale). Elle est endiguée sur une grande partie de son écoulement.

De plus, il existe un réseau très complexe de la ressource en eau dans le cadre d'un usage hydro-électrique. On dénombre ainsi neuf installations hydro-électriques sur l'Arc, incluant trois barrages au fil de l'eau (Freney, Chèvres et Saint-Martin-la-Porte), de simples retenues et des conduites d'aménées souterraines. Il existe de plus une importante dérivation au niveau de Saint-Jean-de-

Maurienne (vers l'usine du Cheylas) ainsi qu'une importante restitution provenant de l'Isère (Randens).

Régulièrement, au mois de juin, a lieu la chasse de l'Arc. Il s'agit de l'ouverture des vannes des trois barrages au fil de l'eau qui permettent l'expulsion des sédiments accumulés dans les retenues et la vérification du bon état des « vannes ».

Cette chasse annuelle est similaire à une crue annuelle d'une dizaine d'heure et à date connue. Elle permet donc l'organisation de campagne de mesures comme la mesure du transport solide à fort débit.

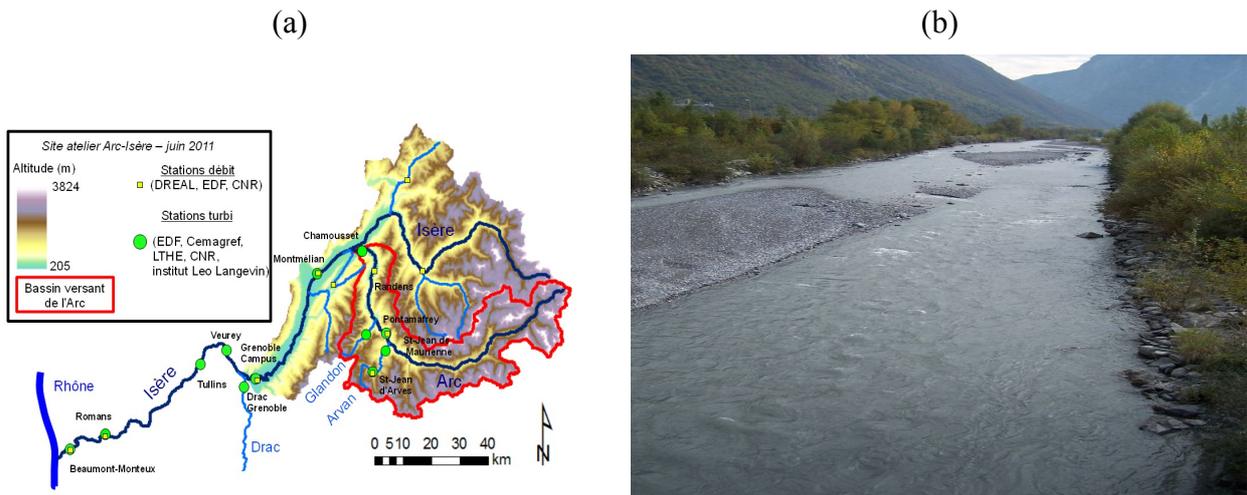


Figure 5 : Localisation du site d'étude (a) et photo de la rivière Arc à l'étiage (b).

3.2 Fleuve Rhône à l'amont et l'aval du barrage de Génissiat

Le barrage de Génissiat est le barrage français le plus en amont sur le Rhône.

En 2012, a eu lieu la chasse du Haut Rhône. Le barrage de Génissiat a été vidé puis rempli par l'eau venant du barrage de Verbois (suisse). Cette chasse permet au barrage de Verbois de vider les sédiments présents dans sa retenue.

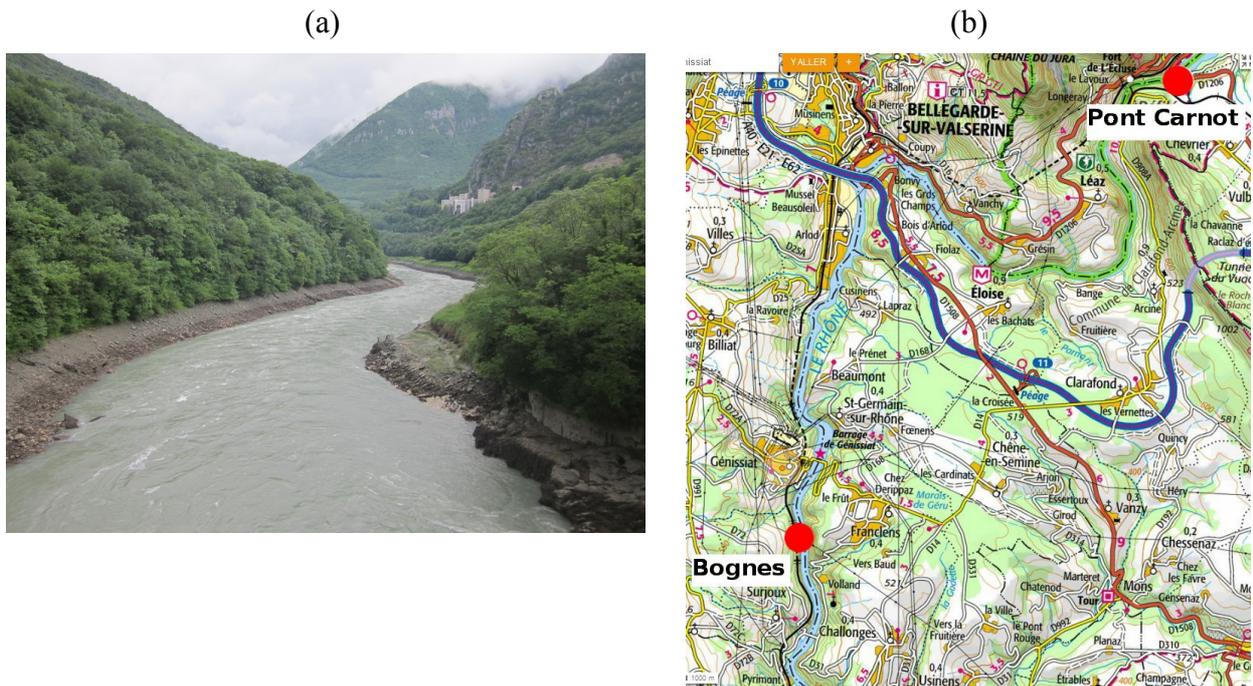


Figure 6 : Fleuve Rhône à l'aval du pont Carnot (a) et localisation des deux sites d'étude autour de la retenue de Génissiat (b)

Les mesures de charriage ont eu lieu à l'amont du barrage de Génissiat (Pont Carnot) pour qualifier les sédiments entrant dans celui-ci et à l'aval de Génissiat (station hydrométrique de Bognes) pour comprendre ce qui en ressort. Cette chasse augmente le débit du fleuve et fait varier son niveau d'eau, permettant d'avoir des mouvements de sédiments qui n'ont pas lieu en régime de base.

3.3 Torrent du Bouinenc

Le torrent du Bouinenc se situe dans le bassin de Draix. Il est étudié par l'Irstea Grenoble (Liebault et al., 2011). Des mesures à l'aide de Pit-tags ont déjà été réalisées (Liebault et al., 2011). Dans le cadre de ce projet sont proposés des mesures à l'aide de préleveurs afin de comparer ces méthodes.

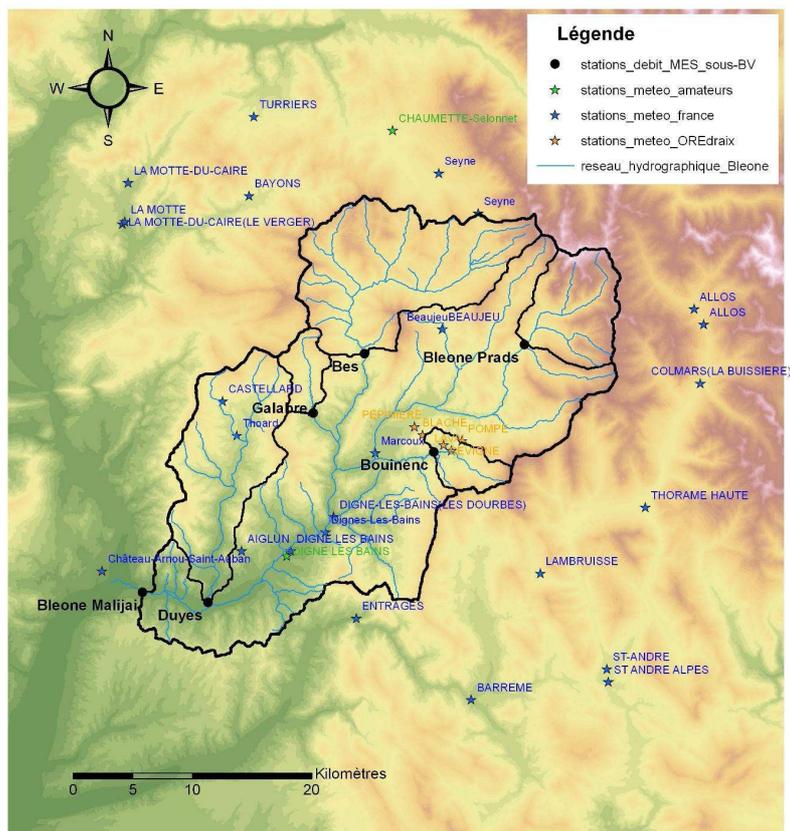


Figure 7 : Réseau hydrographique de l'ORE Draix où se situe le Bouinenc

3.4 Ruisseau le Bozançon en Loire

Le ruisseau le Bozançon est un affluent du Gier. Il est doté de plusieurs retenues et seuils, qui étaient initialement conçus pour créer des réservoir d'eau pour l'agriculture. Deux d'entre eux ne sont plus utiles. Au contraire, ils sont un réel obstacle au transport solide, où y passe seulement un faible écoulement. Les travaux ont débuté au début du mois de novembre 2012 et devraient se terminer en janvier 2013. A ce moment là, nous pourrions procéder à des mesures de charriage afin de mieux comprendre et quantifier le réel impact de ces ouvrages sur le transport solide.

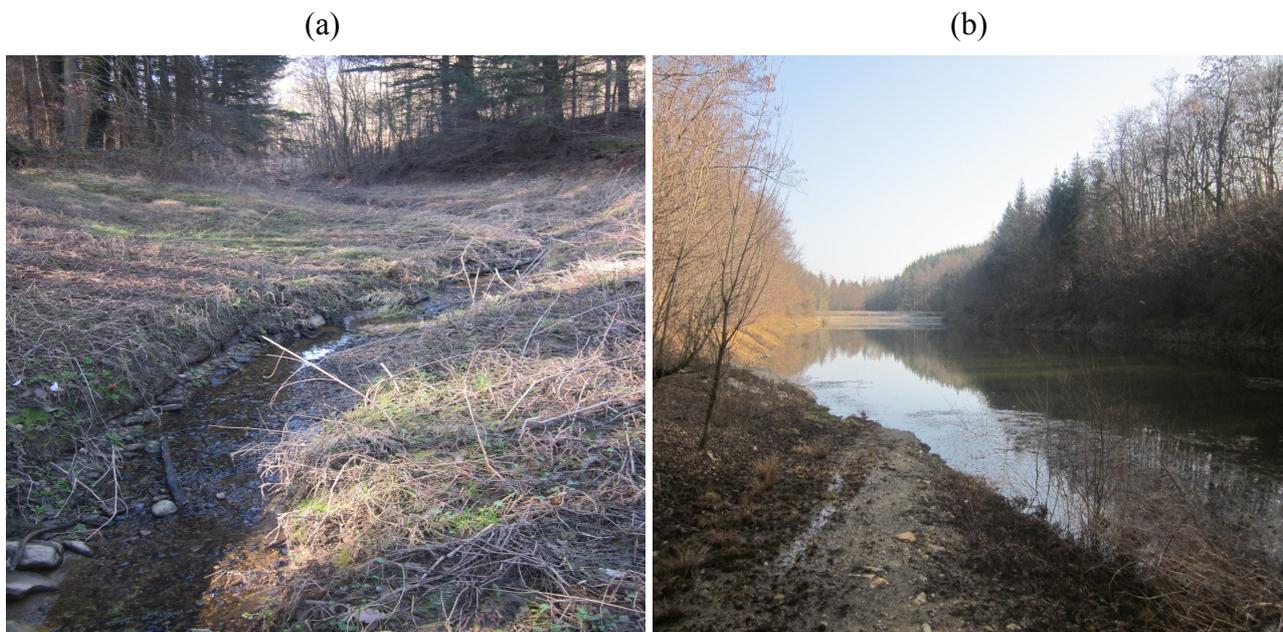


Figure 8 : Le Bozançon à l'aval (a) et à l'amont (b) de la première retenue devant être détruite

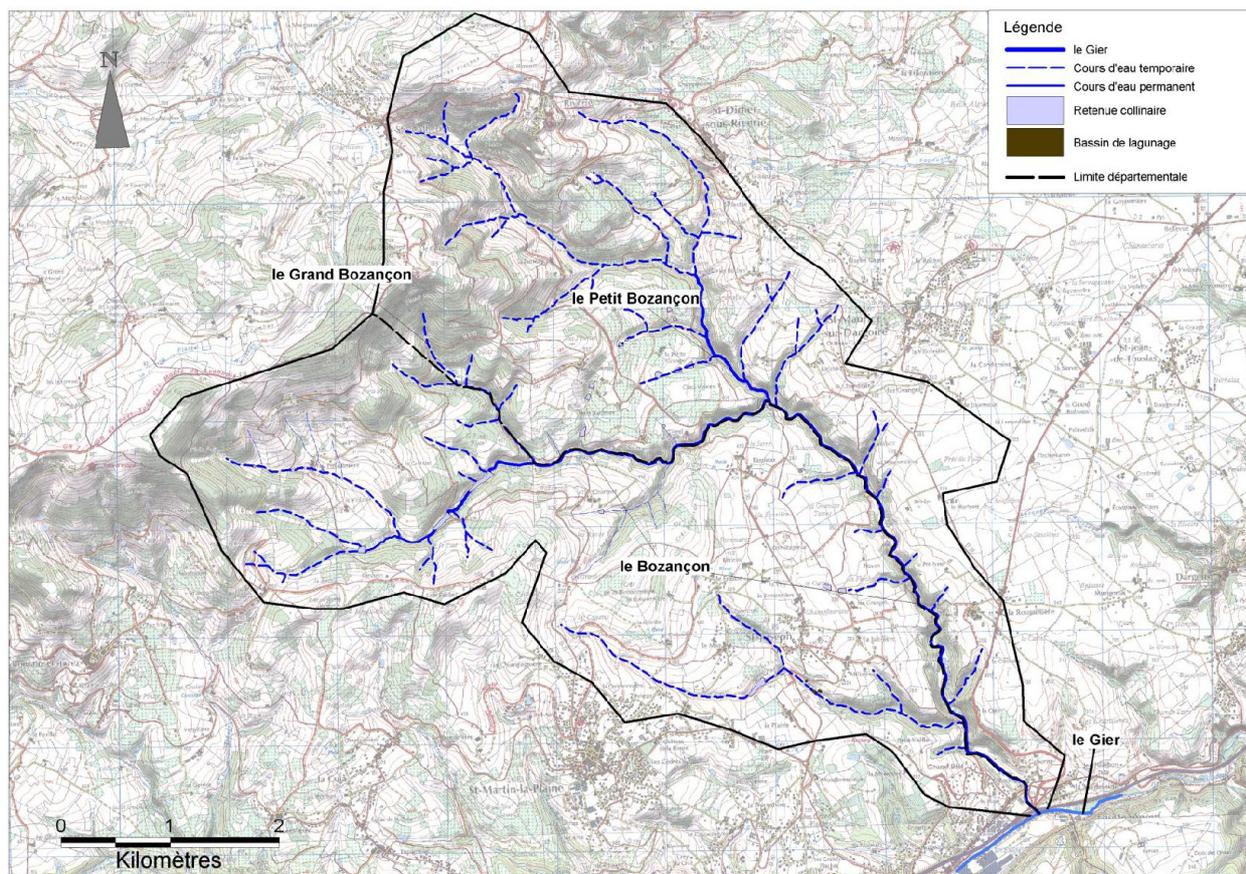


Figure 9 : Réseau hydrographique du bassin versant du Bozançon (source IGN)

4 Protocoles de mesures

4.1 Mesure du charriage pendant la chasse de l'Arc

Le préleveur utilisé, un Helley-Smith 152 mm, était descendu dans le cours d'eau à l'aide d'une grue araignée. Celle-ci était positionnée sur un pont, la plaçant à une hauteur de 5 mètres environ au-dessus de la surface de l'eau.

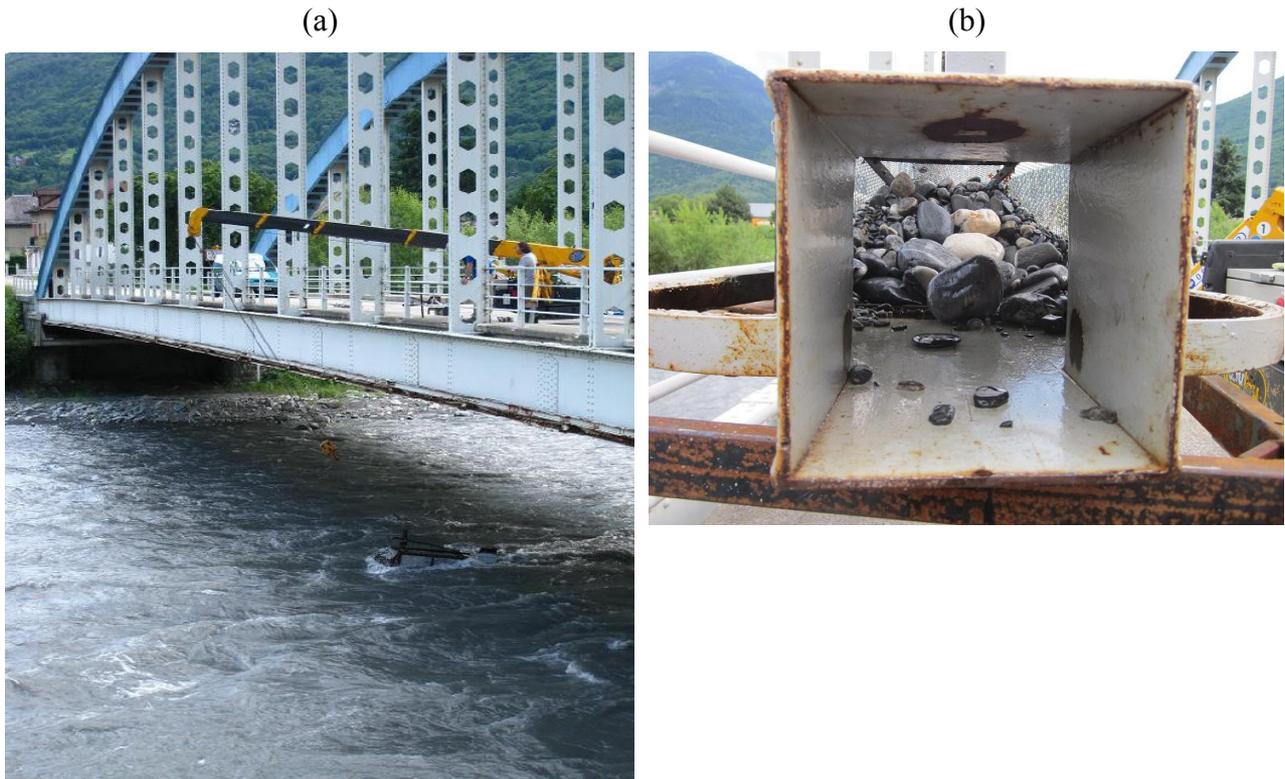


Figure 10 : Descente du préleveur Erhenberger pendant la chasse de l'Arc de 2011 (a) et échantillon typique recueilli à l'aide du préleveur Helley-Smith (b)

Les échantillonnages se sont fait à trois emplacements : en rive droite, dans la veine d'eau où il semblait y avoir le plus fort débit ; puis en deux points plus eu centre du cours d'eau.

Une fois le préleveur posé au fond du lit (câble de la grue détendu), le temps de prélèvement était compris entre 5 et 10 minutes.

Le préleveur était ensuite remonté sur le pont. L'échantillon était vidé, pesé et la granulométrie faite sur place, manuellement à l'aide de gabarits et de tamis.

La descente et la remontée des préleveurs étaient délicates à cause du fort débit provoquant des balancements et des à coups à la surface de l'eau.

Avant la chasse, des PIT tags ont été remis à l'eau dans le chenal principal afin d'estimer la distance de parcours lié à cet événement. Ils seront recherchés à l'étiage à l'aide de l'antenne réceptrice.

4.2 Mesure du charriage pendant la chasse du Haut Rhône

4.2.1 Amont du barrage de Génissiat : Pont Carnot

Les mesures de charriage à cet emplacement ont été réalisées à l'aide d'une grue télescopique de 10 tonnes. Les préleveurs utilisés ont été le Helley-Smith 152 mm et le Ehrenberger.

Deux journées de prélèvements ont été organisées sur le Pont Carnot, lorsque les débits et niveaux d'eau étaient relativement stables. La première journée a eu lieu lorsque le barrage de Génissiat était vidé et que le barrage de Verbois ne chassait pas ; contrairement à la deuxième journée où Génissiat était en eau et recevait les sédiments de Verbois.

Les essais ont surtout eu lieu au centre du cours d'eau. Prélever en rive était compliqué à cause d'un débit assez élevé et de la hauteur du pont trop grande (distance entre la surface de l'eau et le pont de l'ordre de 30 mètres).

Les prélèvements étaient très courts, de l'ordre de la minute, mais les masses charriées étaient très importantes. Une fois les prélèvements remontés, ils étaient pesés et emballés pour une analyse granulométrique ultérieure.

4.2.2 Aval du barrage de Génissiat : station hydrométrique de Bognes

Un seul échantillonneur a été utilisé à cet emplacement ; le Helley Smith 75 mm.

Les prélèvements ont été réalisés à l'aide d'une trille manuelle, en trois points d'un transect : à 30, 45 et 60 mètres de la rive droite. Les mesures de charriage sur ce site ont eu lieu pendant 6 jours quand les niveaux et débits étaient relativement stables, à différentes périodes de la chasse.

Les sédiments prélevés étaient également pesés et emballés pour une analyse granulométrique ultérieure.

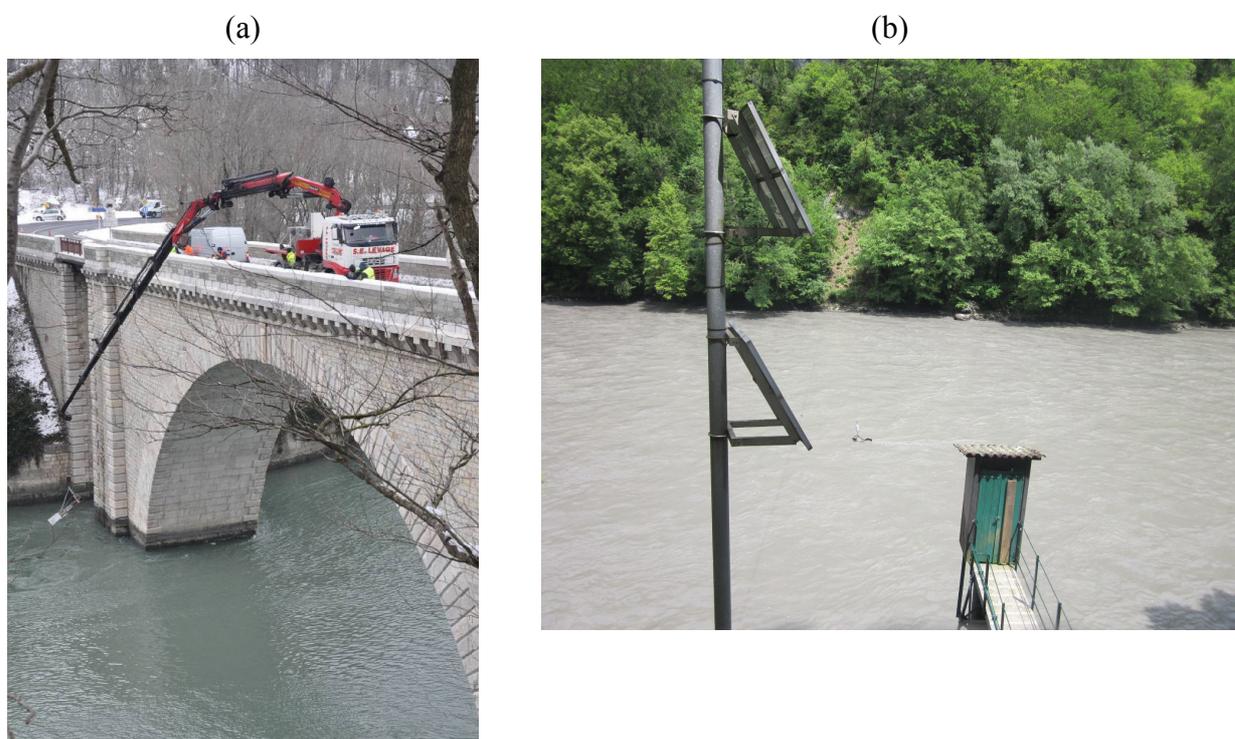


Figure 11 : Mesures de charriage au pont Carnot à l'amont (a) et à Bognes à l'aval (b) du barrage de Génissiat

4.3 Mesure du charriage sur le Bozançon

En cette fin d'année 2012, aucune mesure de charriage n'a été réalisée sur ce cours d'eau. Il est clairement apparu qu'aucun transport de matériau (grossier ou fin) n'était présent dans les conditions d'avant effacement des barrages.

Deux capteurs de pressions ont été installés à l'aval de la deuxième retenue devant être détruite pour mesurer la hauteur d'eau et par la suite évaluer le débit. Le relevé de ces capteurs s'est fait tous les mois, de septembre à décembre (déplacement sur site obligatoire) et continuera en 2013.

Des essais de prélèvements à l'aide d'un Helley-Smith 75 mm seront réalisés une fois les travaux terminés et en cas de crue de la rivière.

Des mesures de charriage seront également réalisées à l'aide de PIT tags. Il s'agira de suivre la répartition dans le temps et dans l'espace d'éléments marqués pour déterminer la vitesse et l'importance de leurs mouvements. Une centaine de cailloux pités seront placés dans la rivière à l'amont de la première retenue détruite, (un cailloux tous les 30 cm) et repérés à l'aide d'un DGPS. Les volumes des éléments seront connus et permettront de qualifier la taille à partir de laquelle le charriage débute. Il ne s'agit en aucun cas de mesurer le charriage de manière statistique.

A l'heure actuelle des galets ont été prélevés dans la rivière pour leur insérer des puces RFID. Il faut attendre la fin des travaux de démolition des retenues pour remettre à l'eau ces galets.

5 Résultats de nos expérimentations

5.1 Charriage pendant la chasse de l'Arc

Suite aux premiers essais au cours de la chasse de 2011, il était apparu que de très fortes variabilités de la mesure du transport solide étaient principalement dus à un positionnement du préleveur non stabilisé (Camenen et al., 2012). Lors de la chasse de juin 2012, une amélioration du protocole de mesure (consistant simplement à descendre très rapidement le préleveur, puis remonter légèrement une fois ce dernier sur le fond afin de le stabiliser, voire à annuler des essais si le préleveur devenait instable lors de l'essai). Sur la figure Erreur : source de la référence non trouvée, une dispersion des résultats bien moins forte peut ainsi être observée pour les mesures au cours de la chasse de 2012. Un point important à noter est que la granulométrie des échantillons est aussi plus cohérente en 2011 : pour des débits supérieurs à 50m³/s, on observe ainsi un diamètre médian d'environ 8cm, ce qui correspond approximativement à diamètre médian du lit. On peut donc déduire qu'un transport total existe pour ces débits. Par contre les échantillons étaient beaucoup plus fins pour des débits plus faibles, en particulier pour les mesures réalisées à l'étiage où seules des particules sableuses étaient transportées. On observe donc un transport partiel pour ces débits.

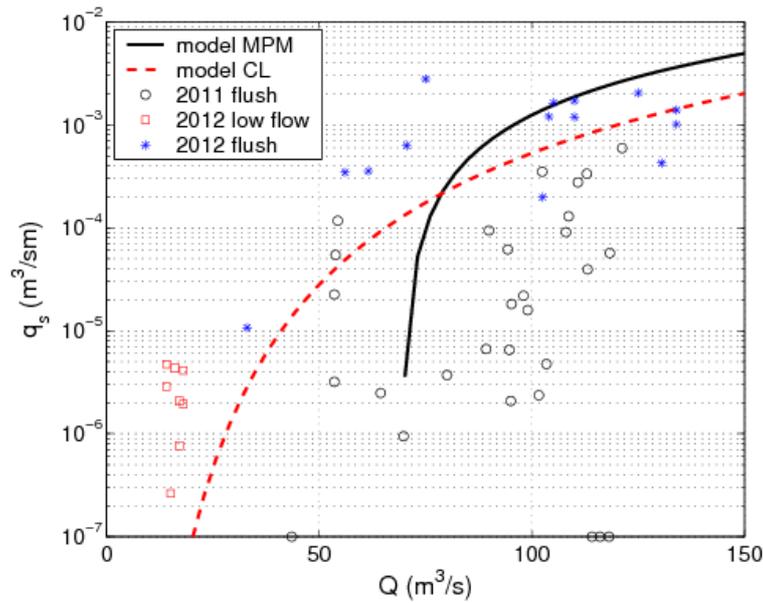


Figure 12 : Résultats des mesures de charriage au cours des chasses de 2011 et 2012 en comparaison avec les modèles simplifiés.

A partir de la courbe étalonnage de la station située près de Sainte-Marie-de-Cuines, il est possible d'établir un modèle simple permettant l'estimation du transport solide en fonction du débit de la rivière.

$$H = z_1 + \left(\frac{Q}{a}\right)^{1/b} \quad \text{Eq. 2}$$

avec H la hauteur moyenne, z_1 une hauteur de référence, a et b , des coefficients, et $Q=HVW$ le débit (V : vitesse moyenne de l'écoulement et W largeur de la rivière). Cette relation a été recalée à l'aide de mesures locales de hauteur d'eau et vitesse à différents débits. A partir de là, il est possible d'estimer la contrainte de cisaillement adimensionnelle ou paramètre de Shields s' exerçant sur le fond de la rivière :

$$\theta = \frac{C_d V^2}{(s-1)g d_{50}} \quad \text{Eq. 3}$$

avec $s=2,65$ la densité du sédiment, $g=9,81$ l'accélération de la pesanteur, d_{50} le diamètre médian des particules charriées, et C_d le coefficient de frottement défini comme suit :

$$C_d = \left[\frac{0.41}{1 + \ln(z_0/H)} \right]^2 \quad \text{Eq. 4}$$

avec $z_0=d_{50}/15$ la longueur de rugosité.

Une fois la contrainte de cisaillement adimensionnelle calculée, différentes formules de transport par charriage peuvent être appliquées. Sont présentées à suivre les formules de Meyer-Peter & Müller (1948) et Camenen & Larson (2005) :

$$\Phi_{MPM} = \frac{q_{s,MPM}}{\sqrt{(s-1)gd_{50}^3}} = 8(\theta - \theta_{cr})^{3/2} \quad \text{Eq. 5}$$

$$\Phi_{CL} = \frac{q_{s,CL}}{\sqrt{(s-1)gd_{50}^3}} = 12\theta^{3/2} \exp\left(-4.5 \frac{\theta_{cr}}{\theta}\right) \quad \text{Eq. 6}$$

avec Φ correspond au transport solide adimensionalisé, q_s le transport solide en $m^3/s/m$ ètre linéaire, et θ_{cr} le paramètre de Shields critique de mise en mouvement des particules. La principale différence entre ces deux formulations du charriage est la prise en compte de la limite de mouvement des particules. La formule de MPM est une formule à seuil (transport nul si $\theta < \theta_{cr}$) alors que la formule CL permet un transport en dessous de ce seuil selon une vision probabiliste introduite par Einstein. Les résultats avec les deux formules de transport sont présentés dans la figure 12. un intérêt de ce modèle est de pouvoir estimer les quantités de sédiments transportés lors d'événement caractéristiques. Le tableau montre ainsi que le charriage représente 5 à 10 % du transport total (incluant le transport solide par suspension) pour des événement relativement courant mais pourrait représenter plus de 30 % pour des événement extrême comme la crue de mai 2008.

Tableau 1: Résultats granulométriques de prélèvements pendant la chasse du Haut Rhône

Evènement	Durée	Charriage	Suspension
Chasse ($\approx Q1$) $Q_{max} \approx 130 m^3/s$	12 heures	$\approx 3,000 t.$	de 15,000 à 50 000 t.
Crue juin 2010 ($\approx Q2$) $Q_{max} \approx 200 m^3/s$	38 heures	$\approx 20,000 t.$	-
Crue mai 2008 ($\approx Q10$) $Q_{max} \approx 500 m^3/s$	8 jours	$\approx 500,000 t.$	$\approx 900,000 t$
Année typique sans événement majeur	1 année	de 15,000 t à 50 000 t.	de 400,000 t à 800 000 t.

5.2 Charriage pendant la chasse du Haut Rhône

Au cours de la chasse du Haut-Rhône, la mise en œuvre des prélèvements sur le pont Carnot à partir de la grue s'est avérée très difficile du fait des fortes vitesses (près de 3 m/s) et de la hauteur du pont. La descente des préleveurs (Helley-Smith avec une ouverture de 152 mm et Ehrenberger) posait des difficultés car la vitesse de déroulement du câble était juste suffisante et le préleveur était rapidement déporté au milieu de la veine rapide à environ 50 m à l'aval. Lors de la remontée, les préleveurs se retrouvaient très rapidement à la surface et étaient ensuite traînés sur quelques dizaines de mètres à la surface induisant de nombreux chocs et la détérioration du matériel (perte d'un panier, torsion de la queue d'un préleveur, ...). Suite à ces mesures, il a été décidé de réaliser les prochains prélèvements plus à l'amont au niveau du pont de Pougny qui semble plus adéquat à de telles mesures (hauteur plus faible, Rhône rectiligne).

Les mesures au niveau de Bognes ont pu être réalisées sans trop de difficultés. La trille utilisée est cependant haute et le préleveur est plongé très en aval de celle-ci. La longueur de fil plongée doit donc être recalculée avec l'angle de plongée. La réalisation d'un prélèvement dure environ 30 minutes car le déplacement du préleveur se fait manuellement.

Actuellement, la granulométrie d'une dizaine d'échantillons seulement a pu être analysée, le tableau 2 présente les résultats de ces premières analyses. Cette étude de la chasse du Haut Rhône est

réalisée en partenariat avec la CNR qui se charge de l'analyse des échantillons manquants.

Tableau 2: Résultats granulométriques de prélèvements pendant la chasse du Haut Rhône

Tests C : pont Carnot B : Bognes	Date	Temps (s)	Masse (kg)	d_{50} (mm)	q_s (m ³ /s/m)
C17	11/06/12	60	21,999	23,51	$2,0 \times 10^{-4}$
C20	11/06/12	60	63,695	31,08	$5,7 \times 10^{-4}$
B6	07/06/12	600	3,360	0,440	$2,8 \times 10^{-4}$
B7	07/06/12	600	1,620	0,31	$1,4 \times 10^{-4}$
B8	08/06/12	600	6,960	0,69	$5,8 \times 10^{-4}$
B9	08/06/12	120	8,760	0,71	$3,7 \times 10^{-4}$
B51	10/06/12	600	1,400	0,95	$1,2 \times 10^{-4}$
B65	11/06/12	1200	7,040	1,05	$2,9 \times 10^{-5}$
B84	13/06/12	1200	1,180	5,35	$4,9 \times 10^{-6}$
B87	14/06/12	1200	1,280	4,23	$5,4 \times 10^{-6}$

Le tableau 2 montre clairement que les échantillons du pont Carnot étaient très volumineux avec des masses dépassant les 20 kg, alors que le temps de prélèvement était très faible, de l'ordre de la minute. Le charriage à l'amont du barrage de Génissiat paraît donc très important mais il ne faut pas oublier que le préleveur utilisé était le préleveur Ehrenberger avec une ouverture de 70 cm. Quant à la granulométrie de ces échantillons, elle est élevée avec des diamètres médians supérieurs à 2 cm. Il s'agit d'éléments très grossiers comme des galets et des pierres.

Pour les mesures réalisées à Bognes, on note qu'il y a eu une évolution de la granulométrie au fil de la chasse. Le diamètre médian était au début de la chasse inférieur au cm et à la fin atteignait environ 5 cm. La composition des échantillons est passée d'un mélange de sables et limons à un mélange de sables et coquillages. Quant au transport, il était relativement fort au début de la chasse avec des valeurs du même ordre de grandeur qu'au Pont Carnot. Il a largement diminué après la fermeture de la vanne de fond. Le temps de prélèvement a été multiplié par deux les derniers jours de prélèvements alors que les masses prélevées sont restées stables ou ont diminuées.

La différence de granulométrie et de masses transportées entre les deux sites étudiés est flagrante. En amont du barrage, beaucoup de sédiments très grossiers sont transportés et en aval, il ne reste que quelques sédiments fins. On peut en conclure que le barrage de Génissiat n'est pas transparent au charriage dans son ensemble et induit un très fort tri granulométrique. Mais le transport de sables est loin d'être négligeable à l'aval lorsque la vanne de fond est ouverte.

5.3 Charriage sur le Bozançon

Aucune mesure de charriage n'a été réalisée cette année. Il était apparent qu'il n'y avait aucun transport solide dans cette rivière. Les visites faites à l'aval des retenues ont permis de constater que seul un faible goutte à goutte représentait le débit du Bozançon.

Les capteurs de pression posés au mois de septembre ont d'ailleurs dû être installés hors d'eau, du fait d'une hauteur d'eau très faible. En décembre, bien que le niveau ait augmenté grâce à la

destruction de la première retenue, les capteurs ne sont toujours pas dans l'eau.

Les travaux devant finir fin janvier 2013, nous allons installer les PIT tags dans la rivière courant février et procéder à quelques mesures de charriage avec le Helley Smith 75 mm si le débit stationnaire est assez élevé et lors d'épisode pluvieux entraînant des crues.

6 Références

- Bunte, K. & Abt, S.R. (2005). Effect of sampling time on measured gravel bed load transport rates in a coarse-bedded stream. *Water Resources Research*, 41 (W11405):1-12.
- Camenen B., Le Coz J., Paquier A. & Lagouy M. (2010). An estimation of gravel mobility over an alpine river gravel bar (Arc en Maurienne, France) using PIT-tag tracers. *Proc. River Flow*, Braunschweig, Allemagne, Sept. 2010. pp. 953-960
- Camenen, B. (2011). Short report on the tentative measurements of the bedload transport using bedload samplers on the Arc en Maurienne River, communication interne, Irstea, 20 p.
- 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. *Proc. River Flow*, San Jose, Costa Rica, Sept. 2012. pp. 379-386
- Camenen, B. & M. Larson (2005). A bedload sediment transport formula for the nearshore. *Estuarine, Coastal & Shelf Science* 63, 249–260.
- Camenen, B. & Peteuil, C. (2012). Protocole de mesure du charriage au cours de l'accompagnement des chasses suisses de juin 2012, communication interne, Irstea, 10 p.
- Childers, D. (1999). Field comparisons of six pressure-difference bedload samplers in high-energy flow. *USGS Water-Resources Investigations Report*: 92-4068
- Druffel, L., Emmett, W.W., Schneider, V.R., & Skinner, J.V. (1976). Laboratory hydraulic calibration of the Helley-Smith bedload sediment sampler: U.S. Geological Survey Open-File Report 76-752,63 p.
- Edwards, T.K. & Glysson, G.D. (1999). Field methods for measurement of fluvial sediment. *Techniques of Water-Resources Investigations of the U.S. Geological Survey, Book 3 : Applications of Hydraulics, Chapter 2*. ISBN 0-607-89738-4, 97 p.
- Einstein, H. A. (1950). The bed-load function for sediment transportation in open channel flows U. S. Dept. of Agriculture, Techn. Bulletin.
- Emmet, W.W. (1980a). A field calibration of the sediment-trapping characteristics of the Helley-Smith bed-load sampler: U.S. Geological Survey Professional Paper 1139. 44 p.
- Emmet, W.W. (1980b). Bedload sampling in rivers: *Proc. International Symposium on River Sedimentation*, Beijing, China, pp. 991-1017
- Gaweesh, M.T.K. & Van Rijn, L.C. (1994). Bedload sampling in sand-bed rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120 (12) : 1364-1384.
- Gray, J.R., Laronne, J.B. & Marr J.D.G (2010). Bedload-Surrogate Monitoring Technologies. *USGS Scientific Investigations Report 2010–5091*, 48 p.
- Helley, E.J.. & Smith, W. (1971). Development and calibration of a pressure-difference bedload sampler: U.S. Geological Survey Open-File Report 73-108. 38 p.
- Hubbell, D.W., Stevens, H.H., Skinner, J.V., & Beverage, J.P. (1985)., New approach to calibrating bedload samplers, *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(4) : 677-694.
- Liébault, F., Bellot, H., Chapuis, M., Klotz, S., & Deschâtres, M. (2011) Bedload tracing in a high-

- sediment-load mountain stream. *Earth Surf. Process. Landforms* 37, 385–399.
- Liu, Y., Métivier, F., Lajeunesse, E., Lancien, P., Narteau, C., Ye, B. & Meunier, P. (2008). Measuring bedload in gravel-bed mountain rivers: averaging methods and sampling strategies. *Geodynamica Acta*, 21(1-2) : 81-92.
- Malavoi, J.-R., Garnier, C.C., Landon, N., Recking, A. & Baran Ph. (2011). Eléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière. Rapport Onema. Collection Comprendre pour Agir.
- Meyer-Peter, E., & Müller, R., (1948). Formulas for bed-load transport. In IInd IAHR Congress. Stockholm, Sweden, pp. 39–64.
- Peteuil C. (2012). CR de mission : test de faisabilité pour la mesure de la charge de fond du Rhône à l'aide d'un préleveur Helley-Smith, communication interne, CNR, 6 p.
- Rennie, C.D., Miller, R.G. & Church, M.A., 2002, Measurement of Bed Load using an Acoustic Doppler Current Profiler; *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 128(4) : 473-483.
- Ryan, S.E. & Porth, L.S. (1999). A field comparison of three pressure-difference bedload samplers. *Geomorphology* 30:307-322.
- Van Rijn, L.C. & Gaweesh, M.T.K. (1992). new total load sediment sampler *Journal of Hydraulic Engineering*, 118 (12) : 1686-1691
- Vericat, D., Church, M. & Batalla, R.I. (2006). Bed load bias: Comparison of measurements obtained using two (76 and 152 mm) Helley-Smith samplers in a gravel bed river. *Water Resources Research* ; 42(W01402) : 1-13.