

ZABR-OSR - Livrable action I.1 : Quantification de la charge sableuse

M. Launay, Guillaume Dramais, A. Vergne, Céline Berni, A. Buffet, E. Henry, M. Lagouy, F. Thollet, Jérôme Le Coz, B. Camenen, et al.

▶ **To cite this version:**

M. Launay, Guillaume Dramais, A. Vergne, Céline Berni, A. Buffet, et al.. ZABR-OSR - Livrable action I.1 : Quantification de la charge sableuse. [Rapport de recherche] irstea. 2017, pp.37. hal-02607083

HAL Id: hal-02607083
https://hal.inrae.fr/hal-02607083

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.

OSR4 2015-2017

Quantification de la charge sableuse

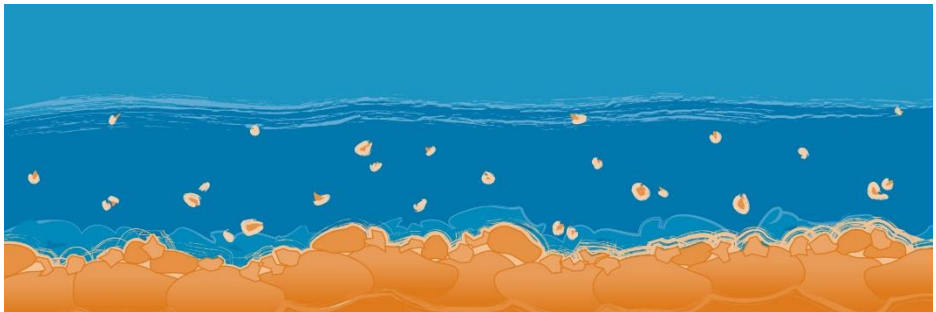
Action I.1

Version finale décembre 2017

Observatoire des Sédiments du Rhône



2015 - 2020 RHÔNE Donnons un avenir à notre fleuve



Personnes impliquées	Equipe de recherche
Marina LAUNAY, Guillaume DRAMAIS, Adrien VERGNE, Céline BERNI, Alexis BUFFET, Elvire HENRY, Mickaël LAGOUY, Fabien THOLLET, Jérôme LE COZ, Benoît CAMENEN	Irstea – Centre de Lyon-Villeurbanne
Philippe DUSSOUILLEZ, Abdeslam BENGHOUBA, Doriane DELANGHE, Daniel VAZQUEZ TARRIO, Michal TAL, François SABATIER	CEREGE
Thomas GEAY	GIPSA-Lab

Quantification de la charge sableuse dans le Rhône

Résumé

Ce rapport présente les résultats obtenus suite aux campagnes de mesures de 2015 à 2017. Ils incluent des développements méthodologiques et expérimentaux ainsi que les premiers jeux de données sur les sites pilotes de l'OSR : à Chancy-les-Ripes et Bognes autour de la retenue de Génissiat, à Champagneux, et au niveau de la confluence avec l'Isère pour le secteur nord, et enfin en Arles et au niveau du bac de Barcarin pour le secteur sud. Une discussion est proposée sur l'application de courbes de tarage sédimentaire sur ces différents sites. Enfin, un paragraphe est plus particulièrement proposé sur le développement de la mesure des flux de sables en suspension par une méthode acoustique.

Mots-clés

Charge sableuse, charriage, suspension graduée, mesures *in-situ*, acoustique, courbe de tarage sédimentaire

Table des matières

1 Introduction 4

2 Méthodes de mesure de la charge sableuse 4

2.1 Mesure du charriage 4

2.2 Mesure de la suspension graduée de sable 6

2.3 La question du sous-échantillonnage 8

3 Méthodes d'estimation de la charge sableuse 10

3.1 Courbes de tarages sédimentaires 10

3.2 Utilisation du signal acoustique 11

3.2.1 Principe 11

3.2.2 Relation entre la pente d'atténuation et la concentration en suspension 12

3.2.3 Correction de l'atténuation et identification des sables 13

3.2.4 Inversion du signal acoustique 13

4 Bilan des campagnes de mesures et des données disponibles 14

4.1 Mesures réalisées dans le secteur nord (Génissiat, Champagneux et confluence Isère) 14

4.2 Mesures réalisées à Barcarin 15

5 Applications 17

5.1 Les chasses du Haut-Rhône (APAVER, 2016) 17

5.1.1 Mesure du charriage 17

5.1.2 Mesure de la suspension de sable 19

5.1.3 Mesures acoustiques pendant l'APAVER 2016 21

5.1.4 Courbes de tarage sédimentaire à Chancy et Bognes 24

5.2 Barcarin 25

5.2.1 Courbe de tarage sédimentaire à Barcarin 25

5.2.2 Relation entre les pentes d'intensités rétrodiffusées et les concentrations en MES de surface 26

5.2.3 Identification du sable en suspension 30

6 Conclusions et perspectives 31

7 Références 32

1 Introduction

Si les relevés et analyses du transport des matières en suspension (MES) sont bien documentés maintenant grâce aux réseaux de suivi pérennes et à des mesures ponctuelles, la connaissance du déplacement de la charge de fond (charriage et suspension graduée des sables) demeure encore un champ de recherche important. Le sable en suspension dans les rivières a d'importants impacts morphologiques tels que le dépôt derrière les barrages ou le développement du delta, mais il reste difficile à mesurer en raison des fortes variations spatiales et temporelles. La distribution granulométrique des sédiments en suspension échantillonnés dans les grandes rivières montre souvent deux modes gaussiens pour le limon (diamètre = 10 - 20µm) et le sable (diamètre = 100 - 200µm). Les deux modes gaussiens montrent généralement une déviation moyenne et un écart type relativement constants dans toute la section transversale. Alors que la variabilité de la concentration en limon est souvent modérée, la concentration en sable peut varier de quelques mg/L à plusieurs g/L entre la surface et le fond d'une coupe transversale, et entre le débit de base et les périodes de crue. Le transport de sable suspendu dépend de la disponibilité locale de sable et de fortes fluctuations se produisent en peu de temps. Cela conduit à des difficultés à prédire le transport de sable en suspension et à estimer les flux.

Il y a encore un manque critique de mesures du flux charrié et de sa granulométrie pour pouvoir évaluer le transport de charge de fond sur le Rhône. Ce rapport un bilan des campagnes de mesures effectuées entre 2015 et 2017 sur les sites pilotes de l'OSR : à Chancy-les-Ripes et Bognes autour de la retenue de Génissiat, à Champagneux et au niveau de la confluence avec l'Isère pour le secteur nord, et enfin à Arles et au niveau du bac de Barcarin pour le secteur sud. Il inclut des développements méthodologiques portant sur les mesures de terrain et l'utilisation des données acoustiques pour l'étude des flux de sables en suspension. Une discussion est proposée sur l'application de courbes de tarage sédimentaire sur ces différents sites.

2 Méthodes de mesure de la charge sableuse

2.1 Mesure du charriage

La mesure du charriage lors des campagnes de mesure consiste en la mesure sur plusieurs verticales du flux charrié en sable. Il existe différents types de préleveurs, et celui utilisé à Irstea Lyon est un Helley-Smith (***Figure 1***a et b) avec une ouverture de 7,6 cm adaptée pour une granulométrie fine (sables et graviers fins). Des échantillons prélevés, on tire directement le flux charrié local :

$$\Phi_{si} = k_i M_i / (\rho_s B_i T_i) \qquad \text{Eq. 1}$$

où k_i est l'efficacité du préleveur, M_i la masse de l'échantillon pendant le temps T_i, $B_i = 0.076\ \mathrm{m}$ la largeur d'ouverture du préleveur et $\rho_s = 2650\ \mathrm{kg/m^3}$ la masse volumique du sédiment. Le flux de sable charrié Φ_{sb} (en $m^3/s/m$ linéaire) est alors estimé selon l'équation suivante :

$$\Phi_{sb} = \sum_{i=1}^{n} L_i \Phi_{si} \qquad \text{Eq. 2}$$

où L_i est la largeur active attribuée à chaque verticale de mesure.

La distribution granulométrique des échantillons est également mesurée, soit par tamisage, soit à l'aide d'un granulomètre laser.

En parallèle de certaines campagnes de mesure, Thomas Geay (GIPSA-Lab) a réalisé quelques enregistrements avec un hydrophone (***Figure 1***c).

(a)



(b)



(c)



Figure 1 : Photos du Helley-Smith (7,6cm d'ouverture) adapté à la traille de Bognes (a) et à la traille de Chancy-les-Ripes (b) ; photo du système mobile pour l'hydrophone (c) (Photos F. Thollet).

2.2 Mesure de la suspension graduée de sable

Les campagnes de mesure du sable en suspension consistent en la mesure de la concentration en sable et de la vitesse du courant sur plusieurs verticales et à différentes profondeurs. Les mesures de vitesse de l'écoulement sont effectuées avec un ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler, ***Figure 2***d) en fixe sur les mêmes verticales. Lors du suivi des chasses de barrage du Haut-Rhône (APAVER - opérations d'Abaissement PArtiel de la retenue suisse de VERbois), trois types de préleveurs pour les matières en suspension (MES) ont été utilisés (***Figure 2***) :

- ***Figure 2***a : L'échantillonneur isocinétique US P-72 de l'USGS
- ***Figure 2***b : L'échantillonneur isocinétique de l'OFEV
- ***Figure 2***c : La bouteille Van Dorn ou Niskin

La bouteille de Delft ne pouvait pas être utilisée dans le cas des chasses du Rhône car les vitesses étaient trop importantes (V> 3m/s). Les trois échantillonneurs permettent d'avoir un volume d'eau et de sédiments (argiles, limons et sables). Afin de déterminer la concentration en sable dans les échantillons, une granulométrie des échantillons a été réalisée et seule la part de sédiments >65µm a été conservée. Cette estimation pourrait être améliorée en se basant sur une démodulation et en ne conservant que les modes sableux. Il est à noter que Elisa Armijos (2015) utilisait une méthode légèrement différente pour des échantillons d'une dizaine de litres réalisés sur l'Amazone. En effet, la masse de sable était directement estimée par pesée après tamisage à 63µm de l'échantillon prélevé. Un travail sur l'échantillonnage et l'estimation de la granulométrie a permis de plus de discuter et critiquer les méthodes de mesure utilisées actuellement (Dramais et al., soumis).

Des échantillons prélevés, on tire la concentration totale et la granulométrie. Il est ainsi possible de déduire la concentration en sable en ne considérant que les modes sableux ou que les classes de sédiments supérieures à 63µm. Le flux de sable Φ_{ss} est alors estimé selon l'équation :

$$\Phi_{ss} = \sum_{i=1}^{n} L_i \sum_{j=1}^{m} C_{ij} V_{ij} \Delta z_{ij} \qquad \text{Eq. 3}$$

où *n* est le nombre de verticales de mesure, *m* le nombre de points de mesure sur chacune des verticale, L_i la largeur active attribuée à chaque verticale de mesure, Δz_{ij} la demi-différence des hauteurs de mesure, C_{ij} la concentration mesurée, V_{ij} la vitesse moyenne au point de mesure (composante normale à la section de mesure).

(a) (b)





(c) (d)





Figure 2 : Photos des préleveurs utilisés (a : US P-72, b : préleveur OFEV, c : bouteille Van Dorn) et du trimaran ADCP (Photos E. Henry).

Depuis une trentaine d'années, des travaux menés en océanographie ont montré l'intérêt de l'utilisation des technologies hydroacoustiques (sonar) pour mesurer des flux de sédiments en suspension. Ces techniques sont maintenant bien établies pour le milieu océanique (Thorne et Hurther, 2014), et quelques solutions opérationnelles sont maintenant commercialisées. Les deux avantages principaux de cette méthode sont une très bonne résolution temporelle et spatiale, et une mesure non-intrusive. Dans le cadre des recherches menées par Irstea-Lyon sur l'utilisation des données acoustiques, deux types d'appareils acoustiques ont été déployés sur le terrain lors de campagnes de mesure :

- Des ADCP (*Figure 2*d)
- Un système de rétrodiffusion acoustique – Aquascat.

Les campagnes de mesure ont été réalisées à la fois en périodes de crue et en l'absence d'événements. Elles consistent en la mesure de l'intensité acoustique dans la section, en effectuant des traversées avec un bateau sur lequel sont fixés les appareils, et au niveau de plusieurs verticales, en maintenant le bateau en fixe pendant plusieurs minutes. Parallèlement à ces mesures acoustiques, des prélèvements sont effectués le long des verticales à différentes profondeurs à l'aide d'une bouteille Niskin (*Figure 2*c).

(a) (b)

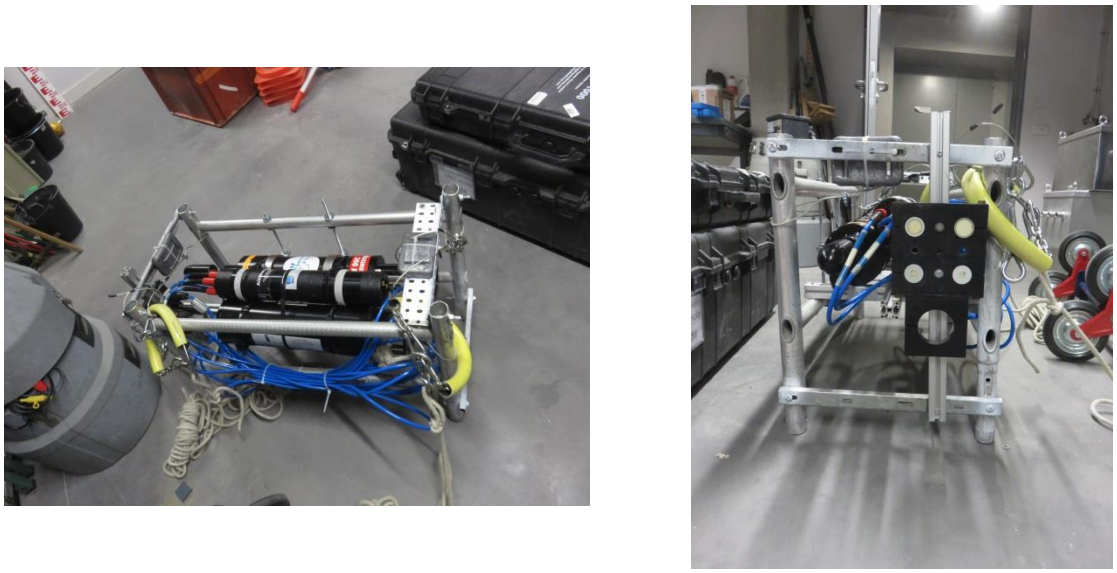


Figure 3 : Photos a) de l'Aquascat et b) détail des capteurs (Photos A. Vergne).

2.3 La question du sous-échantillonnage

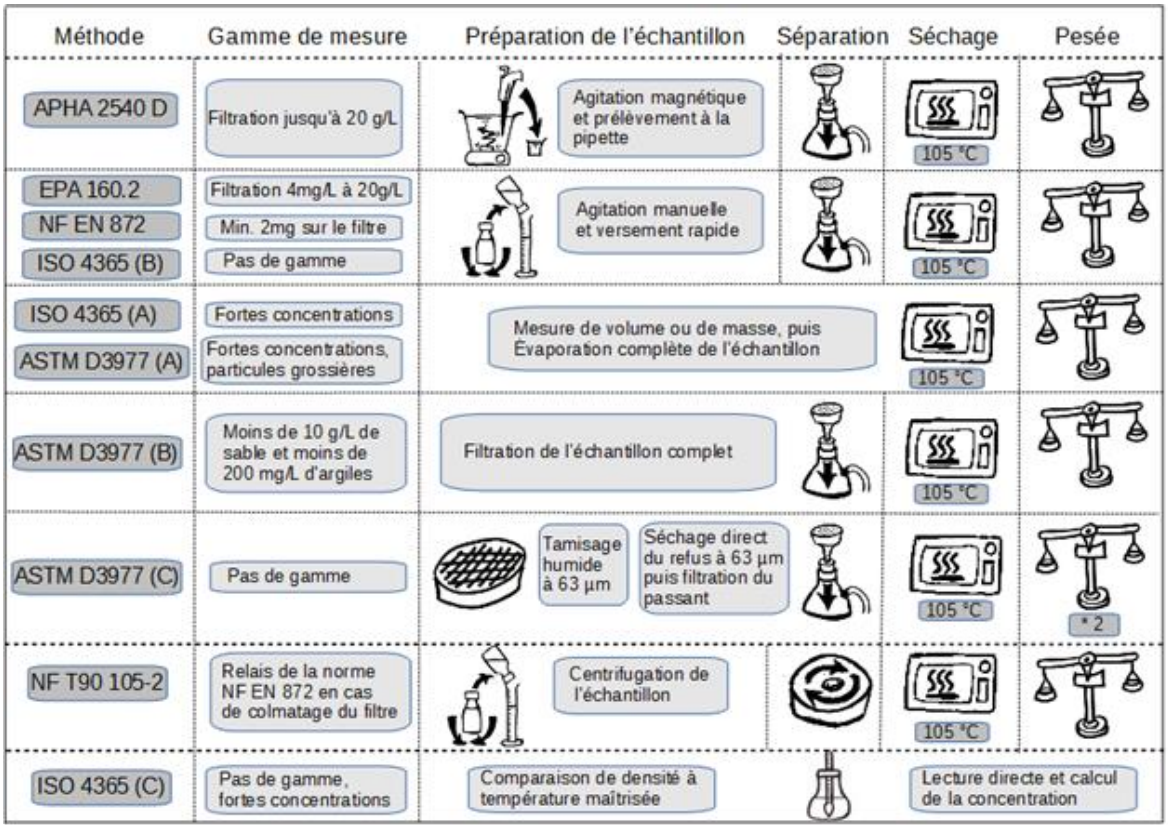
Plusieurs méthodes de dosage en laboratoire pour la mesure des MES existent, dont la norme NF EN 872 préconisée pour la mesure des concentrations en MES dans la plupart des types d'eau en France et en Europe. Cependant, cette méthode présente des limites importantes en cas de présence de particules de diamètre supérieur à 63µm (sables). Le problème du sous-échantillonnage en présence de sable a été testé via différentes méthodes utilisées en France et ailleurs sur une centaine d'échantillons de concentrations variées prélevés dans une rivière alpine (Dramais et al., soumis). Ces travaux montrent que la méthode ASTM D3977 est plus précise que les autres méthodes testées pour mesurer les concentrations en MES en présence de sable dans l'échantillon.

La mesure directe de la concentration massique en MES dans un échantillon liquide est décrite par plusieurs normes (cf. ***Tableau 1***). Plusieurs points sont communs ou singuliers aux différentes méthodes :

- Ces méthodes diffèrent surtout dans la préparation des échantillons analysés. Deux choix sont possibles : utiliser la totalité de l'échantillon prélevé ou considérer un sous échantillon comme représentatif.
- Après la sélection de l'échantillon, il convient de déterminer un volume à analyser. Toutes ces méthodes (excepté celle de l'hydromètre) sont basées sur la séparation des phases solides et liquides de l'échantillon : par filtration, évaporation ou centrifugation.
- Après séparation on retrouve dans chaque protocole des phases de séchage et de pesée qui vont permettre de déterminer la masse sèche de sédiments présente dans le volume d'analyse.

Le *Tableau 1* récapitule les différentes normes, leurs gammes de validité théoriques, et quelques étapes clefs des protocoles. Ne sont pas citées dans ce tableau, les étapes importantes de conservation des échantillons, de qualité et de préparation des filtres avant analyse, de refroidissement au dessiccateur, qui sont communes aux différentes approches.

Tableau 1 : Représentation schématique des protocoles de mesure normalisés des concentrations massiques en MES. Les méthodes alternatives proposées dans la norme ISO 11657 [ISO, 2014] ne sont pas représentées. (Dramais et al., soumis).



Ce travail mené sur un jeu d'échantillons de l'Arc-en-Maurienne prélevés en juin 2017 dans une gamme de concentration étendue (de 0,2 à 35 g/L) et une gamme de taux de sable dans l'échantillon élevée (de 10 à 90%) confirme les études précédentes sur les limites du sous-échantillonnage des prélèvements de rivières en présence de particules grossières. Les principales conclusions de ces essais menés durant l'été 2017 sont :

1. La méthode de la norme américaine ASTM D3977 [2007] a été utilisée dans cette étude comme référence car elle permet de prendre en compte la totalité des particules les plus grosses en tamisant à 63µm la totalité de l'échantillon avant l'analyse des fines. Elle a l'inconvénient d'être plus coûteuse en temps mais est mieux adaptée à l'analyse des eaux de rivière en particulier en présence de sable.
2. La présence de sable (> 63µm) dans des échantillons met en défaut les méthodes de sous-échantillonnage par déversement rapide du prélèvement. Cela a des conséquences directes (de 10% à 60% d'erreur) sur les résultats d'analyse en concentration mais aussi sur d'autres mesures. Par exemple si ce type de sous-échantillonnage est réalisé pour effectuer une granulométrie, on sous-estimera la présence des particules les plus grosses, restées au fond du

flacon. Les variantes de méthodes de sous-échantillonnage par pipettage, ne réduisent pas significativement les erreurs, qui restent importantes et très variables.

3. Concernant la métrologie et la normalisation : auprès des laboratoires contactés en France, on trouve une variété de méthodes de sous-échantillonnage et d'analyses pour déterminer la concentration en MES. Le seul fait que certains laboratoires, par choix méthodologique ne suivent pas la norme NF EN 872 [2005] permet d'émettre des doutes sur son domaine d'application. Le constat sur ces pratiques pose la question de la cohérence des données entre elles. Comment arbitrer entre une limite réglementaire et une mesure issue d'une analyse non normalisée, ou normalisée mais très incertaine ?

Ce travail sur les échantillons de l'Arc-en-Maurienne fortement chargés en sable est généralisable à d'autres cours d'eau et fleuves, notamment en crue. En effet, d'autres jeux d'échantillons du Rhône prélevés dans le cadre de l'OSR à Port Saint Louis (crue de novembre 2016), aux Rippes et à l'aval du barrage de Génissiat (APAVER mai 2016), ont été analysés et confirment les conclusions ci-dessus. Il est important de prendre en compte ce problème du sous-échantillonnage dans la suite de nos programmes de suivi des sédiments, en particulier pour une meilleure quantification des flux.

3 Méthodes d'estimation de la charge sableuse

3.1 Courbes de tarages sédimentaires

L'approche traditionnelle pour calculer le transport solide par suspension est de déterminer la distribution verticale des concentrations et des vitesses et d'intégrer le produit de ces deux quantités entre le sommet de la couche de charriage et la surface ou hauteur du prélèvement (Van Rijn 1993). Une simplification possible est de prendre la concentration moyenne et la vitesse moyenne sur la hauteur d'eau même si le résultat n'est a priori pas le même.

De nombreux hydrauliciens ont cherché à établir des relations permettant d'estimer le débit solide d'un cours d'eau, à partir de nombreuses mesures en modèle réduit ou sur des fleuves. Ces différentes formules donnent rarement des résultats comparables, car elles ont été établies dans des conditions différentes. Il n'y a pas de formule universelle pour le transport solide et encore moins pour le sable. Il est important d'avoir en tête qu'une formule de capacité peut être appliquée uniquement si le site est à l'équilibre, écoulement quasi permanent et uniforme avec des apports sédimentaires suffisants.

Camenen et al. (2014) ont proposé d'établir des courbes de tarage sédimentaire, à l'instar des courbes de tarage pour déterminer les débits à partir des hauteurs d'eau. Il s'agit donc d'établir une relation entre le débit solide et le débit liquide pour un site donné. Pour réaliser ce type de courbe de tarage, plusieurs campagnes de mesure doivent être réalisées sur le site étudié dans différentes conditions hydrauliques. Le débit solide est déterminé en intégrant les concentrations en sédiment et les vitesses mesurées en différent point de la section.

Plusieurs tentatives d'établissement de courbes de tarage sédimentaires sont présentées dans le chapitre 5.

3.2 Utilisation du signal acoustique

3.2.1 Principe

Les sonars hydroacoustiques (ADCP ou Aquascat) émettent une onde sonore qui se réfléchit sur les particules en suspension dans l'eau. L'écho des particules renvoyé vers le sonar est appelé rétrodiffusion. Plus la masse d'eau est chargée en particules, plus la rétrodiffusion est importante. C'est également le cas lorsque les particules présentes dans le cours d'eau sont plus grosses.

Par ailleurs lorsque l'onde sonore émise par le sonar voyage dans la masse d'eau, elle est atténuée de plusieurs manières. La viscosité de l'eau, qui dépend notamment de la température de l'eau, mais aussi une divergence géométrique simplement fonction de l'éloignement au capteur sont responsables d'une partie de cette atténuation. La présence de particules dans l'écoulement est également source d'atténuation. En effet lorsque l'onde rencontre des particules, une partie du signal est rétrodiffusée dans toutes les directions, une partie est absorbée par les particules. Plus les particules sont nombreuses dans la colonne d'eau, plus cette atténuation est importante. Thorne et Cambpell (1992) ont ainsi établi que plus la concentration en particules en suspension augmente, plus la rétrodiffusion et l'atténuation augmentent. La relation entre l'atténuation et la taille des particules est en revanche moins claire.

L'intensité acoustique rétrodiffusée *I* enregistrée par le sonar est proportionnelle au carré de la tension rétrodiffusée moyenne quadratique, V_{rms},et peut être écrite comme (Hay, 1991 ; Thorne et Hanes, 2002) :

$$I \sim V_{rms}^2 = \frac{k_s^2 k_t^2}{\Psi^2 \mathrm{r}^2} M \mathrm{e}^{-4r(\alpha_w + \alpha_q)} \qquad \text{Eq. 4}$$

où $k_s^2 = \frac{f_0^\infty \mathrm{a}^2 f_\infty^2 n(a) da}{\rho_s f_0^\infty a^3 n(a) da}$, f_∞ est la fonction de forme de rétrodiffusion, ρ_s est la densité des particules, a est le rayon des particules et *n(a)* est la fonction de densité de probabilité de la distribution de taille par nombre de particules. Le terme k_t est la constante de l'appareil, *r* est la distance du transducteur au volume de mesure, Ψ est le facteur de correction du champ proche (Downing et al., 1995), *M* est la concentration massique des particules, α_w est l'atténuation due à l'eau et α_s est l'atténuation due aux sédiments en suspension.

L'atténuation due à l'eau peut s'exprimer comme (Fisher et Simmons, 1977) :

$$\alpha_w[m^{-1}] = (55.9 - 2.37T + 4.77 \times 10^{-2}T^2 - 3.48 \times 10^{-4}T^3)10^{-15}f^2 \qquad \text{Eq. 5}$$

où *T* est la température de l'eau en degrés Celsius et *f* est la fréquence en Hz.

L'atténuation liée aux sédiments est due à deux mécanismes principaux qui interviennent dans l'absorption d'énergie, l'un est lié à la diffusion (atténuation diffusive), et l'autre au mouvement des particules induit par le champ acoustique (atténuation visqueuse).

En passant l'Eq. 4 en logarithme décimal, on obtient :

$$\log_{10}(M) = 0.10 I_{dB,FC} + \frac{4}{\ln 10}\alpha_s r - 2\log_{10}(k_t) - 2\log_{10}(k_s) \quad \text{Eq. 6}$$

$$\text{avec } I_{dB,FC} = I_{dB} + 20\log_{10}(\Psi r) + \frac{40}{\ln 10}\alpha_w r$$

$I_{dB,FC}$ est donc l'intensité rétrodiffusée corrigée de l'atténuation liée à l'eau et à la distance au capteur. I_{dB}est dérivé de la puissance rétrodiffusée (*E*, en counts dans le cas de l'ADCP) basée sur l'équation simplifiée :

$$I_{dB} = k_c E \qquad \text{avec} \qquad k_c = \frac{127.3}{T+273} \quad \text{Eq. 7}$$

Dans l'Eq. 4, les paramètres *C*, α_s et k_s dépendent de la concentration et de la distribution granulométrique des particules. Dans le cas d'une suspension homogène de particules de même taille, ces termes sont constants. La distribution granulométrique des sédiments en suspension échantillonnés dans les grandes rivières montre souvent deux modes gaussiens, un pour le limon (d ≈ 10 - 20µm) et l'autre pour le sable (d ≈ 100 - 200µm). Alors que la variabilité de la concentration de limon est souvent modérée, les gradients de concentration du sable peuvent facilement couvrir plusieurs ordres de grandeur entre la surface et le lit de la rivière.

Dans ce cas l'hypothèse d'un diamètre représentatif unique n'est pas appropriée pour les calculs acoustiques. Nous proposons de considérer que la suspension dans tous les points de la rivière est une combinaison variable des populations de limon et de sable, chacune avec des paramètres constants. En supposant que la densité des particules de limon soit égale à celle des particules de sable, la distribution volumique de la taille des grains est :

$$v(a) = \frac{M_f}{M} v_f(a) + \frac{M_c}{M} v_c(a) \quad \text{Eq. 8}$$

avec $v_f(a)$ et $v_c(a)$ les distributions granulométriques volumiques des populations fines et grossières, M_f et M_c leurs concentrations massiques respectives, $M = M_f + M_c$ la concentration massique totale du mélange.

En utilisant ce mélange, l'Eq. 6 devient alors :

$$\log_{10}(M_f + M_c) = 0.10 I_{dB,FC} + \frac{4}{\ln 10}(\alpha_{s,f} + \alpha_{s,c}) r - 2\log_{10}(k_t) - 2\log_{10}\left(\frac{M_f k_{s,f} + M_c k_{s,c}}{M_f + M_c}\right) \quad \text{Eq. 9}$$

3.2.2 Relation entre la pente d'atténuation et la concentration en suspension

Dans la partie supérieure des profils verticaux, nous observons habituellement que $M_c \approx 0$. L'atténuation du signal $I_{dB,FC}$ le long du profil est alors uniquement due à la présence des particules

fines. En considérant que M_f est constante sur tout le profil vertical, le paramètre $k_{s,f}$ est alors également constant sur toute la verticale. La pente du profil d'intensité rétrodiffusée dans la partie supérieure du profil vertical nous donne donc la valeur de l'atténuation due aux particules fines :

$$\frac{dI_{dB,FC}}{dr} = -\frac{40}{ln10}\alpha_{s,f} \qquad \text{Eq. 10}$$

En étudiant plusieurs événements de crue couvrant une large gamme de concentrations en MES mesurées en surface, il est possible d'établir une relation entre la pente du profil d'intensité dans la partie supérieure du profil et la concentration en MES. Dans le cas des installations du bac de Barcarin, l'intérêt de cette relation est de pouvoir connaitre la concentration en MES lors des périodes sans prélèvements, à partir des données acoustiques. Cela permet également d'étudier la répartition des concentrations en particules fines dans la section. Ces travaux sont présentés dans la section 5.2.2.

3.2.3 Correction de l'atténuation et identification des sables

Une fois l'atténuation par les particules fines estimée dans la partie supérieure du profil vertical, on peut corriger le profil d'intensité de cette atténuation par les particules fines. L'intensité ainsi corrigée est appelée $I_{dB,FWC}$ pour « Fluid and Washload Corrected ». Elle est corrigée pour l'atténuation liée à l'eau, à l'éloignement au capteur et à la présence de sédiments fins (« washload »). Les variations de $I_{dB,FSC}$ le long du profil sont alors dues à la présence de particules grossières, mais aussi à la présence de bulles, flocs, etc. Il faut donc appliquer une nouvelle correction pour tenir compte de ce que nous appellerons la rétrodiffusion ambiante (bulles, microflocs, etc.). Pour ce faire, nous repartons du $I_{dB,FSC}$. Dans la partie supérieure du profil vertical, l'atténuation due aux particules fines ayant été corrigée, et les sables étant supposés absents, il ne reste plus que la rétrodiffusion ambiante. Il est alors possible de la calculer et de la soustraire au profil d'intensité. On obtient ainsi le $I_{dB,FSBC}$. En théorie, les variations le long du profil vertical de ce $I_{dB,FSBC}$ sont alors uniquement dues à la présence de particules grossières.

L'objectif est d'évaluer la capacité de cette méthode à détecter la présence de sable et à déterminer l'altitude au-dessus du fond de la couche de sable en suspension, pour pouvoir ensuite l'appliquer de manière systématique sur les données mesurées en continu à Barcarin.

Cette méthode a été appliquée aux données d'ABS mesurées dans le Rhône à Barcarin lors de la crue de novembre 2016. Le même traitement a été appliqué aux données ADCP de Barcarin pour détecter la présence d'une suspension de sable au cours de quatre crues en 2014. Ces résultats sont présentés dans la section 5.2.3.

3.2.4 Inversion du signal acoustique

La méthode d'inversion du signal acoustique consiste à établir, à partir des intensités acoustiques mesurées, les concentrations en sable en tout point de la section. Théoriquement, ce calcul est possible en utilisant l'Eq. 9.

En connaissant la concentration en limon M_f dans la partie supérieure des profils verticaux, et en supposant que cette valeur est constante le long du profil vertical, nous pouvons alors calculer

expérimentalement la valeur constante de k_t. Dans les profils où un fort gradient de sable est observé, l'Eq. 9 peut être résolue itérativement entre l'ADCP et le lit de la rivière, en calculant toutes les constantes théoriques à partir des distributions granulométriques du sable et du limon, afin de calculer la concentration en sable M_c.

En pratique ce calcul se heurte à de nombreux problèmes. La présence d'autres agents de rétrodiffusion que les particules sédimentaires (bulles d'air, micro-organismes, etc.) est étudiée par Adrien Vergne dans sa thèse. La mauvaise connaissance des caractéristiques des particules sédimentaires, et notamment de la distribution granulométrique des sables, constitue également un obstacle à la mise en œuvre de la méthode. Enfin, le manque de données fiables de concentrations en sable, lié notamment aux problèmes de sous-échantillonnage évoqués dans la partie 2.3, limite la validation de cette méthode pour le moment.

4 Bilan des campagnes de mesures et des données disponibles

4.1 Mesures réalisées dans le secteur nord (Génissiat, Champagneux et confluence Isère)

Le ***Tableau 2*** présente les principales expériences correspondant à la mesure de la charge sableuse réalisées dans le cadre de l'OSR sur les années 2015 et 2016. Concernant les mesures sur l'Isère, les expérimentations étaient partiellement financées par la CNR et par le projet annexe à l'OSR sur la confluence Isère (financement CNR-EDF).

Tableau 2 : Synthèse des expériences réalisées par Irstea Lyon en 2015 et 2016

Sites	Période	Nombre campagnes	Mesures réalisées
Confluence Rhône-Isère	Crue/chasse en mai 2015	2	Mesures ADCP, prélèvements suspension Niskin, mesures bathymétriques
Isère aval (station CNR de Beaumont-Monteux)	Chasse de mai, juin 2015	3	Mesures ADCP, prélèvements charriage Helley-Smith
Champagneux	Printemps 2016 et chasse du Haut-Rhône en mai 2016	3	Mesures ADCP, prélèvements suspension Niskin
Chancy-les-Ripes (station OFEV)	Chasse du Haut-Rhône en mai 2016	3	Mesures ADCP (M9), Aquascat, prélèvements suspension OFEV, prélèvements charriage Helley-Smith
Bognes (station CNR)	Chasse du Haut-Rhône en mai 2016	3	Mesures ADCP (RG12), prélèvements suspension USGS P72, prélèvements charriage Helley-Smith

4.2 Mesures réalisées à Barcarin

Le bac de Barcarin (***Figure 4***) qui assure la liaison entre Port-St-Louis et Salins de Giraud à quelques kilomètres de l'embouchure du Rhône a été équipé en 2011 d'un ADCP de 600 kHz qui enregistre en continu. L'ADCP est monté sur le flanc amont du bac et les capteurs sont placés à environ 40 cm sous la ligne de flottaison du bac. Le bac est opéré par le SMTDR et effectue en moyenne une centaine de traversées par jour lorsqu'il est en fonctionnement. Pour des raisons de sécurité, il est arrêté en cas de crue lorsque le débit du Rhône à Beaucaire atteint 6000 m^3/s, et il ne fonctionne pas entre 2h et 4h du matin. L'acquisition de données est parfois interrompue à cause des opérations de carénage programmées ou non du bateau, et des pannes principalement liées au PC d'acquisition (panne disque de l'ordinateur ou saturation de l'espace), ce qui donne lieu à des périodes sans mesures plus ou moins longues. En moyenne, l'acquisition de données a lieu entre 160 et 170 jours par an.

En 2015, une sonde de mesure multiparamètres pour l'acquisition des données de turbidité, température et salinité a été installée en rive droite du Rhône à Barcarin.



Figure 4 : Bac de Barcarin [A. Benghouba, 2017]

En complément de ces mesures en continu, des campagnes ponctuelles de mesure ont été effectuées pour prélever des échantillons pour analyser les concentrations en MES et la granulométrie des particules. En routine, ces prélèvements sont effectués en surface et éventuellement à 2 ou 3 points sur la verticale, depuis la rive gauche du Rhône à Barcarin. Plusieurs campagnes de mesure ont permis de faire des prélèvements distribués dans la section, soit directement à partir du bac, soit à l'aide d'un bateau mis à l'eau. Ces prélèvements étaient alors effectués à la bouteille de Niskin.

En 2016-2017, des prélèvements ont été effectués tous les mois en rive gauche, et la crue de novembre 2016 a fait l'objet d'une campagne de prélèvements distribués et de mesures ADCP et Aquascat. Au total, depuis 2012, près de 300 prélèvements ont été effectués, au cours de périodes de régime de base et de crues. Ces données sont bancarisées. La ***Figure 5*** montre les données de concentrations en MES mesurées à Barcarin depuis 2012, et la ***Figure 6*** quelques exemples de granulométries des échantillons mesurées au granulomètre laser. Ces prélèvements font parfois apparaître la présence de sables, mais il faut toutefois rester prudents, étant données les considérations soulignées au paragraphe 2.3 sur le sous-échantillonnage et la mesure des sables.

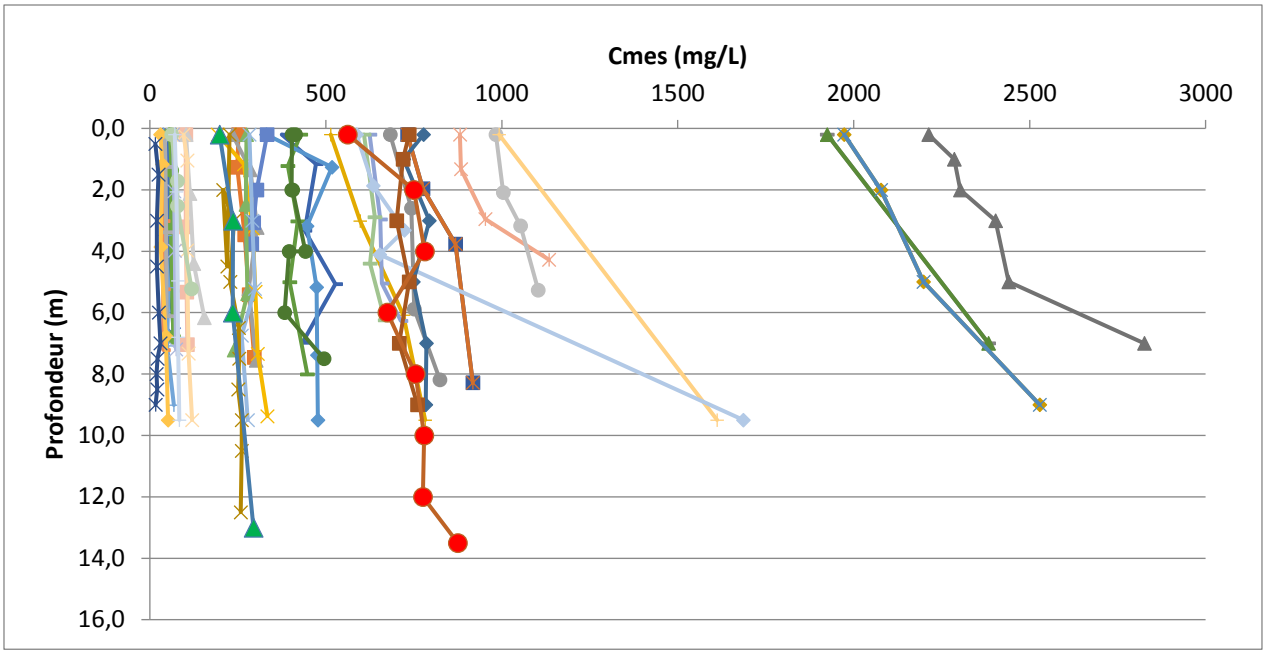


Figure 5 : Concentrations en MES mesurées dans la section du bac de Barcarin depuis 2012.

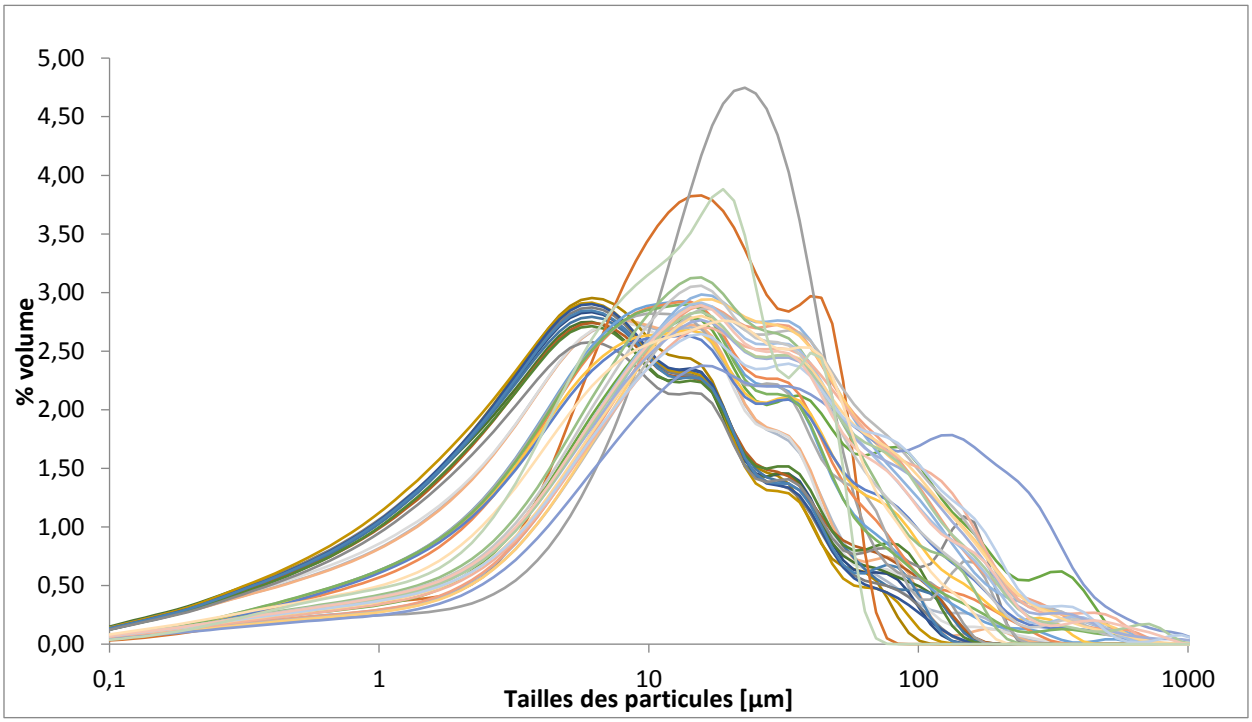


Figure 6 : Exemples de granulométries des échantillons de Barcarin mesurées au granulomètre laser.

5 Applications

5.1 Les chasses du Haut-Rhône (APAVER, 2016)

5.1.1 Mesure du charriage

Lors de l'APAVER du Haut-Rhône de mai 2016, plusieurs mesures du charriage ont pu être réalisées sur les sites de Chancy-aux-Ripes (station gérée par l'OFEV, amont du barrage de Génissiat) et Bognes (station CNR, aval du barrage de Génissiat) (***Figure 7***).

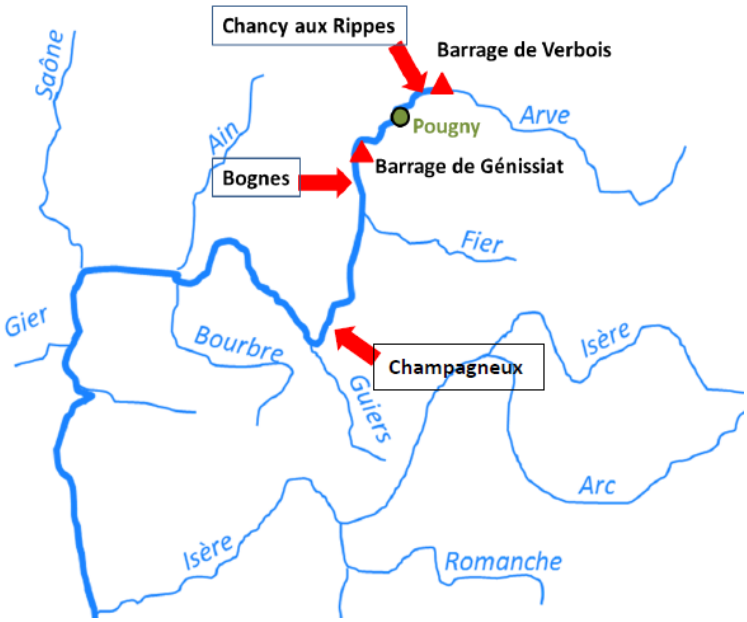


Figure 7 Carte de situation des mesures réalisées lors de l'APAVER du Haut-Rhône.

En appliquant la méthodologie proposée par Camenen et al. (2014) aux stations de Chancy-aux-Ripes et Bognes, il est ainsi possible de comparer les données expérimentales à une courbe de tarage théorique (***Figure 8*** et ***Figure 9***).

Pour Bognes, les mesures par charriage (et suspension) sont bien inférieures aux courbes théoriques (***Figure 8***). Il est à noter que le diamètre médian des échantillons récoltés variait de $d_{50} = 0.4$ à 1.5 mm et qu'une forte proportion de matériau organique (jusqu'à 50%). Ceci laisse à croire que la capacité de charriage n'était pas atteinte du fait d'un apport du barrage de Génissiat pas assez important. Ceci pourrait s'expliquer du fait d'une gestion du barrage différente pendant la chasse de 2016 avec une cote plus élevée et donc des contraintes de cisaillement plus faibles à l'amont de la vanne de fond (dans le cas du premier point à Q= 490 m^3/s, la vanne de fond n'était pas encore ouverte). En effet, lors de la chasse de 2012, les mesures par charriage étaient plus proches de la courbe théorique.

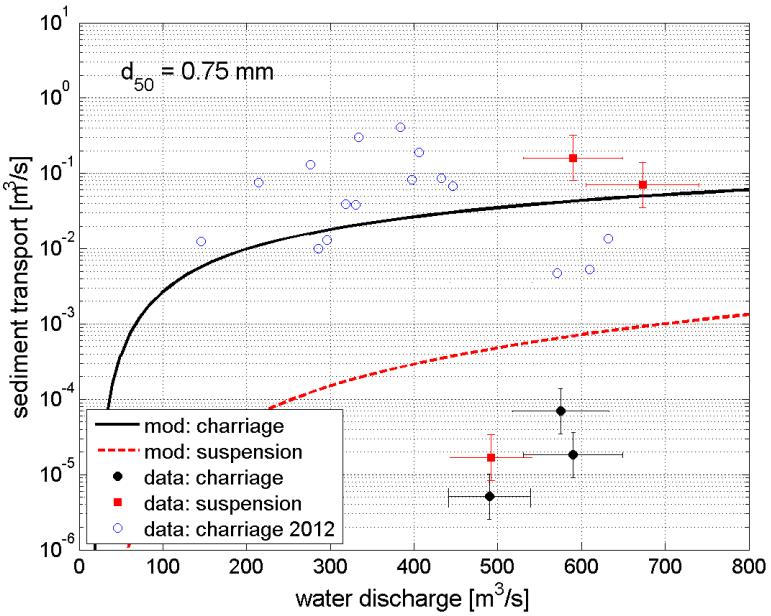


Figure 8 Courbe de tarage sédimentaire estimée à Bognes avec les mesures expérimentales faites lors des chasses de 2012 et 2016 (modèle estimé pour un diamètre d_50=0.75 mm correspond à la moyenne des échantillons par charriage, le diamètre médian des échantillons en suspension était beaucoup plus fin, i.e. d_50=0.08 mm).

Pour Chancy-aux-Ripes, les mesures par charriage (et suspension) sont inférieures aux courbes théoriques d'un ordre de grandeur (***Figure 9***). On peut donc penser que la capacité de transport n'était pas atteinte du fait d'un apport du barrage de Chancy-Pougny pas assez important et du pavage globalement observé sur le secteur (Guertault, 2015). La taille des sédiments collectés était très fine avec un diamètre médian d'environ $\mathrm{d}_{50} = 0.1\ \mathrm{mm}$.

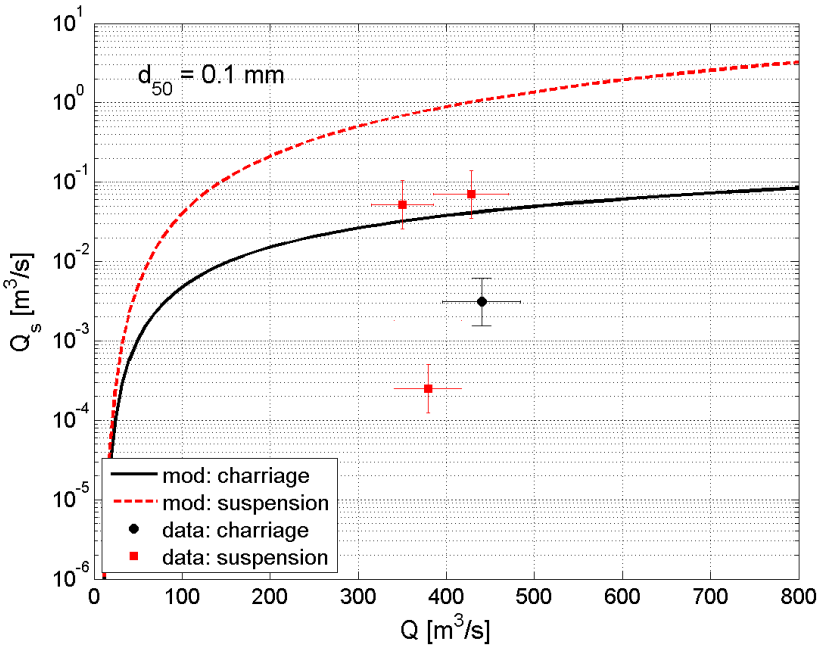


Figure 9 : Courbe de tarage sédimentaire estimée à Chancy-aux-Ripes avec les mesures expérimentales faites lors de l'APAVER 2016 (modèle calculé avec un diamètre d_50=0.1 mm correspondant à une estimation faites à partir des échantillons par charriage et suspension.

Thomas Geay (GIPSA-Lab) a participé à une campagne de mesure par charriage à Chancy-les-Rippes le 26 mai 2016. Il a réalisé des enregistrements avec un hydrophone au niveau de la station hydrométrique (en berge). Les chocs sont énergétiques dans une bande de 300 Hz-10 kHz. Il n'y a pas beaucoup de hautes fréquences dans le signal (probablement dû à la présence de nombreuses MES et feuilles dans le Rhône). Ces résultats indiqueraient qu'il y a mouvement de particules plus grossières, ce qui n'a pas été vérifié par les prélèvements réalisés avec le préleveur Helley-Smith car les échantillons ne contenaient que du sable. Quelques hypothèses peuvent ainsi être émises sur un potentiel biais des prélèvements avec le Helley-Smith :

- Le chenal du Rhône en aval du barrage de Chancy-Pougny est pavé avec une granulométrie très grossière (diamètre médian de l'ordre de 10cm). Même si certains de ces galets ont bougé comme semble l'indiqué l'hydrophone, le préleveur utilisé n'était pas adapté pour la taille des matériaux du lit ;
- Il est de plus possible que la maille du filet était trop fine, ce qui pouvait affecter l'évacuation de l'eau (filet gonflé) et ainsi réduire l'efficacité du préleveur ;
- Le positionnement du préleveur pas toujours très stable dans la veine d'écoulement peut avoir affecté les mesures d'autant plus qu'il était relativement difficile de savoir si le préleveur était bien positionné au fond.

5.1.2 Mesure de la suspension de sable

Lors de la chasse du Haut-Rhône de mai 2016, de nombreux tests et mesures ont pu être réalisés sur les sites de Chancy-aux-Ripes (station gérée par l'OFEV, amont du barrage de Génissiat), Bognes (station CNR, aval du barrage de Génissiat) et Champagneux (***Figure 7***). A Bognes, le préleveur de l'USGS P72 a été utilisé à partir de la traille manuelle alors qu'à Chancy-aux-Ripes, un préleveur « maison » (OFEV) a été adapté à la traille automatisée. A Champagneux, les mesures ayant été faites depuis une embarcation, seule la bouteille de Niskin (ou Van Dorn) a pu être utilisée.

Des mesures de débit sont réalisées sur les 3 sites avec les profileurs de courant à effet Doppler (ADCP, RDI Rio Grande 600 kHz et Sontek M9 double fréquence). A Chancy-aux-Ripes et à Bognes les ADCP sont déployés sur des petites embarcations tractées depuis les trailles (cf. ***Figure 2***d). A Champagneux, l'ADCP est déployé depuis une barque de mesure avec un montage sur potence. De grandes quantités de matières en suspension ont transité pendant les chasses et cela influe sur les signaux acoustiques émis par les capteurs ADCP. Cependant après post-traitement, les mesures de débit ont pu être réalisées pour chaque campagne de prélèvement.

Les concentrations en sables estimées au travers de chacune des sections de mesure sont présentées ***Figure 10*** pour les sites de Chancy-aux-Ripes et Bognes. Globalement, les concentrations de sable mesurées restent très faibles (inférieures au g/l alors que les concentrations totales (incluant argiles et limons : MES) variaient de 1.5 à 5g/l) et le gradient vertical de concentration attendu n'est pas toujours observé. Cependant, ces mesures permettent de donner une estimation du flux de sable. A Rippes, un flux de 55 000 à 180 000 tonnes/jour a eté mesuré pour des débits variant de 380 à 430 m^3/s alors qu'à Bognes, un flux de 12 000 à 240 000 tonnes/jour a eté mesuré pour des débits variant de 490 à 675 m^3/s.

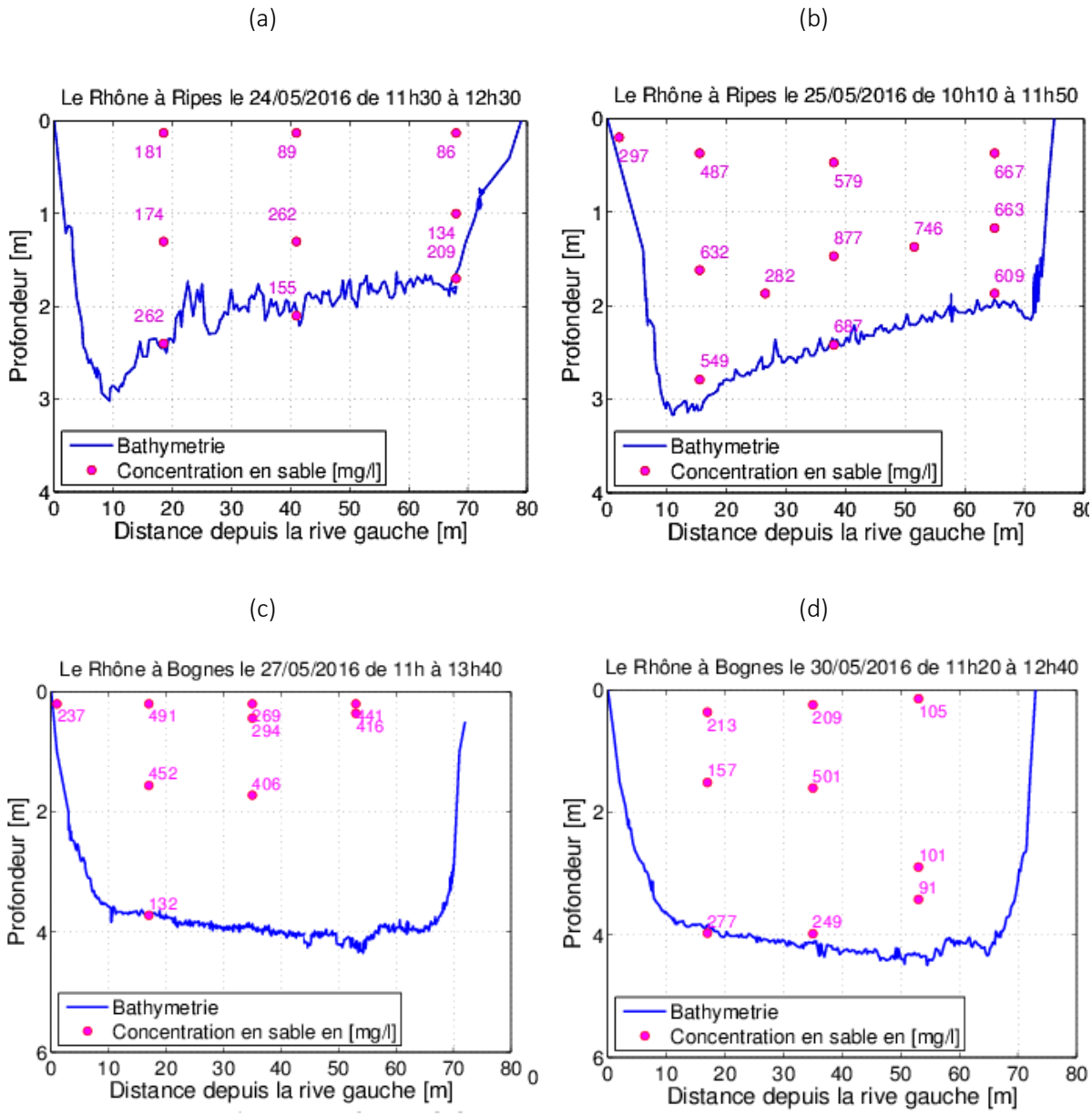


Figure 10 : Mesures de la distribution des concentrations en sable sur une section lors de l'APAVER du Haut-Rhône à Chancy-aux-Ripes les 24 (a) et 25(b) mai 2016 et à Bognes les 27 (c) et 30 (d) mai 2016.

A Champagneux, aucun des prélèvements relevés les 23 et 25 mai 2016 ne contenait de sable mais seulement des argiles et limons. La ***Figure 11*** présente un exemple de projection des mesures de vitesse ADCP permettant de mieux visuliser la courantologie au niveau du barrage.

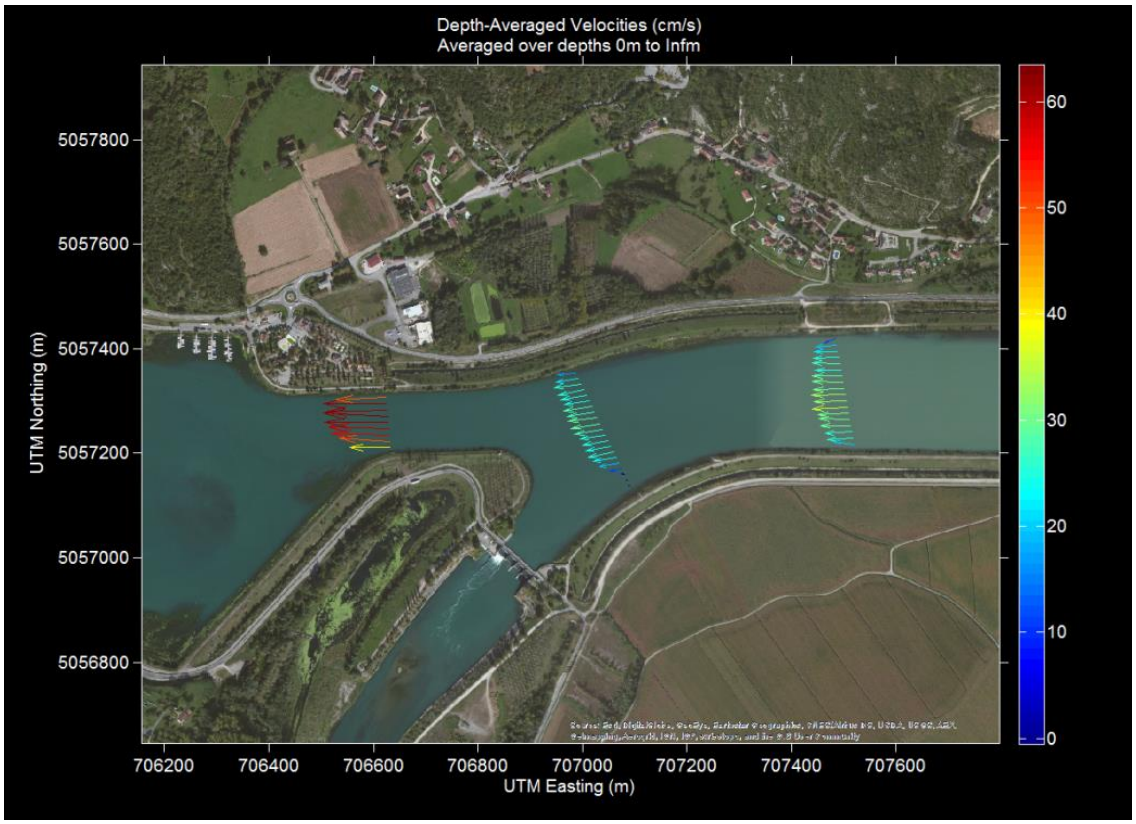


Figure 11 : Exemple de profil de vitesse obtenus par mesure ADCP au niveau de Champagneux.

5.1.3 Mesures acoustiques pendant l'APAVER 2016

Un profileur acoustique multifréquence Aquascat spécialement conçu pour mesurer des sédiments en suspension a récemment été acquis par l'Irstea (crédits OSR) et déployé pendant deux jours à Champagneux (23 et 25 mai, ***Figure 12***). Une tentative de déploiement a aussi été effectuée sur la traille de l'OFEV à Chancy-les-Rippes (Suisse) mais le support a été détruit lors de cette tentative et aucune donnée exploitable n'a pu être recueillie.

Pendant les deux jours de manip à Champagneux, l'Aquascat a été déployé à partir d'un bateau pour mesurer des points fixes (verticales) au niveau des PK 103.2, 103.8 et 107.2. Des prélèvements ont été effectués en même temps à la bouteille Niskin, et analysés ultérieurement au laboratoire (concentration et granulométrie).

(a) (b)



(c) (d)



Figure 12 : Déploiement de l'Aquascat à Champagneux ; a), b) dispositif hors d'eau ; c) dispositif déployé ; d) prélèvement à la bouteille Niskin.

Globalement, ces opérations ont été un succès. Les données recueillies (signal acoustique + prélèvements) sont cohérentes et paraissent exploitables. Le déploiement de ce type d'appareil sur un fleuve à partir d'un bateau était en soi une première (le constructeur britannique de l'Aquascat s'est d'ailleurs déplacé pour l'occasion). Il ressort de ces manips qu'un tel déploiement est tout à fait possible, ainsi que des pistes d'améliorations (notamment sur le dispositif support de l'instrument). Les données recueillies sont présentées *Figure 13*.

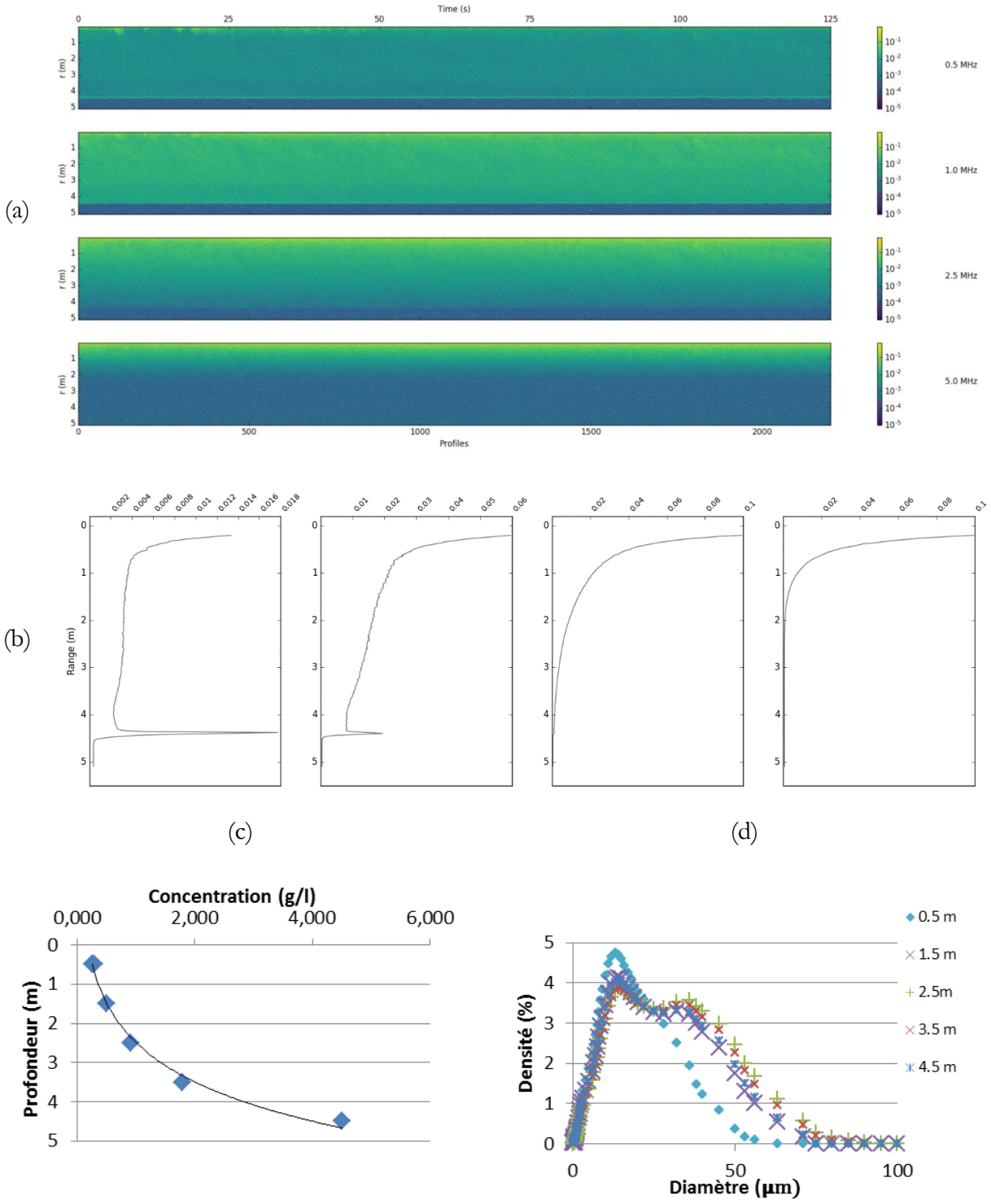
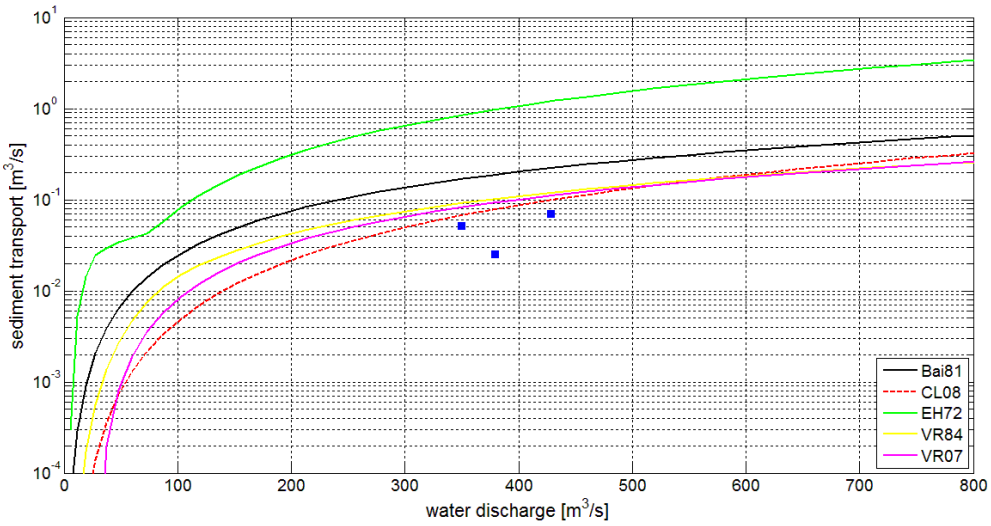


Figure 13 : Mesures acoustiques multifréquences avec le profileur Aquascat à Champagneux, PK 103.8 a) séries temporelles ; b) profils acoustiques moyens pour les 4 fréquences. Prélèvements associés c) concentration ; d) distribution sédimentaire à différentes profondeurs.

5.1.4 Courbes de tarage sédimentaire à Chancy et Bognes

Elvire Henry (2016) a appliqué la méthodologie proposée par Camenen et al. (2014) aux stations de Chancy-aux-Ripes et Bognes en utilisant les campagnes de mesures réalisées lors de l'APAVER présentées précédemment (Figure 14). Des écarts importants peuvent être observés entre le modèle et les mesures avec en particulier l'utilisation des formules de transport total d'Engelund & Hansen (1972, EH72) ou Bailard (1981, Bai81). Les résultats sont un peu meilleurs avec les formules de Camenen & Larson (2008, CL08), Van Rijn (1984, VR84) et surtout avec la dernière formule proposée par Van Rijn (2007, VR07) même si cette dernière diverge étonnamment des autres (transport beaucoup plus faible) dans de nombreux cas. Nous nous situons en effet sans doute dans des cas particuliers où l'apport en sable reste sans doute insuffisant du fait des barrages et donc où la capacité de transport a de forts risques de ne pas être atteinte.

(a)



(b)

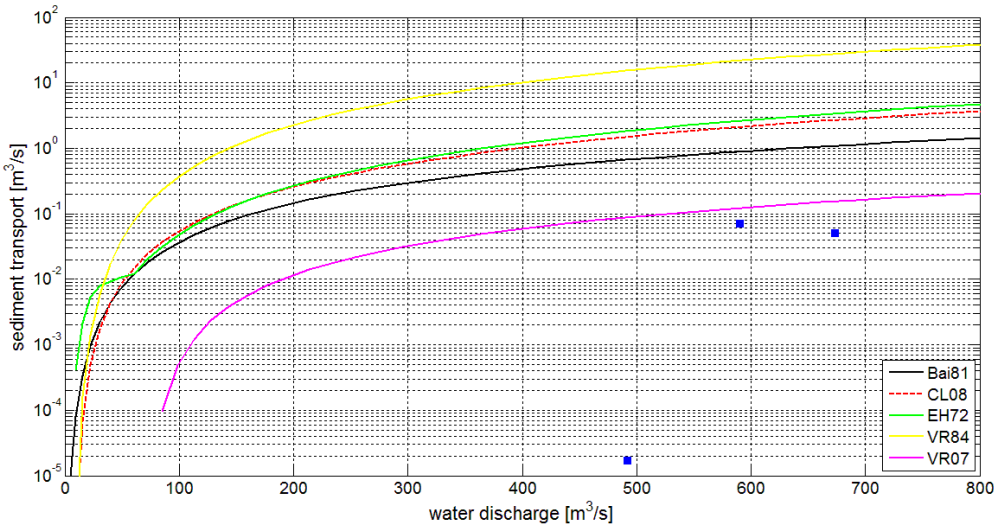


Figure 14 : Courbes de tarage sédimentaire pour les stations de Chancy-aux-Ripes (a) et Bognes (b).

5.2 Barcarin

5.2.1 Courbe de tarage sédimentaire à Barcarin

Dans le cadre de son stage à Irstea, Elvire Henry (2016) a appliqué une courbe de tarage sédimentaire sur la station de Barcarin à partir de la méthodologie proposée par Camenen et al. (2014). Les données utilisées pour ce travail sont les données ADCP du bac de Barcarin qui ont permis d'établir une courbe de tarage hydraulique ($Q = f(z)$), et des données de concentrations et granulométrie issues de deux campagnes de mesure réalisées à Barcarin pendant les crues de novembre 2012 (***Figure 15***).

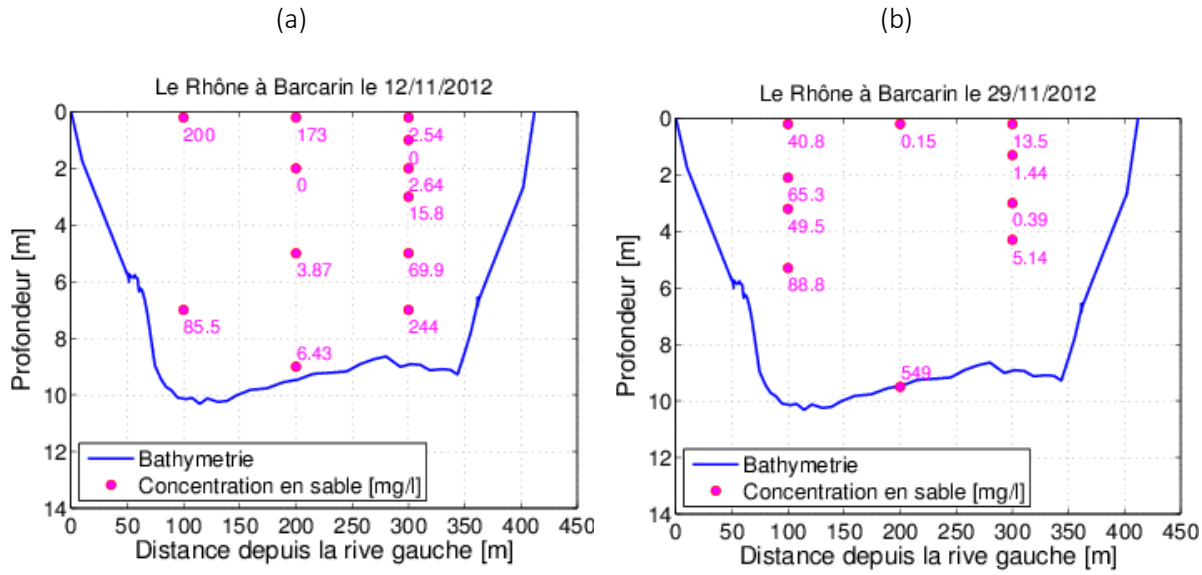


Figure 15 : Mesures de la distribution des concentrations en sable sur une section à Barcarin lors de la crue de novembre 2012 (a : 12/11/12, b :29/11/12).

Une analyse de sensibilité à la formule de transport utilisée montre des variations très fortes en termes de prédiction du transport solide total pour le sable (***Figure 16***) ; les mesures expérimentales sont globalement encadrées par les courbes théoriques. Il est à noter aussi que les résultats sont aussi très sensibles au choix du diamètre médian pour des sables fins comme rencontrés à Barcarin ($d_{50} \approx 0.1$ mm).

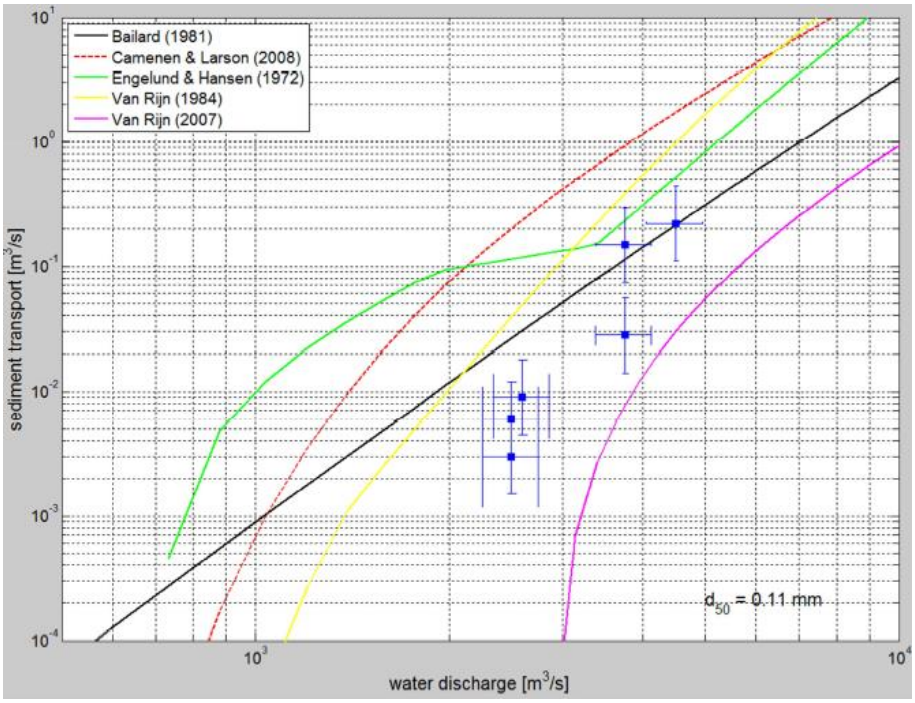


Figure 16 : Courbe de tarage sédimentaire pour la station de Barcarin.

Sur la ***Figure 16***, nous avons tenté d'encadrer les incertitudes de mesure pour chacun des échantillons (10% pour le débit, un facteur 2 pour le transport solide). Dans le cadre de la thèse de Guillaume Dramais (2016-2020), il est envisagé de déterminer de manière plus rigoureuse les incertitudes de mesure et surtout, via l'utilisation de BaRatin (Le Coz et al., 2013), d'estimer les incertitudes issues de la courbe de tarage.

5.2.2 Relation entre les pentes d'intensités rétrodiffusées et les concentrations en MES de surface

Dans le cadre de son stage au Cerege Abdeslam Benghouba (2017) a exploité la base de données des mesures ADCP de Barcarin pour tenter d'estimer des profils de concentration en matière en suspension. Son travail a couvert deux périodes de crues (novembre 2016 et novembre 2012).

Pour la crue de novembre 2016, son travail cherchait à établir une relation entre la pente des profils d'intensité rétrodiffusée et le mesures de turbidité en surface enregistrées à Barcarin. Pour cela, les pentes ont été calculées à partir des profils d'intensité rétrodiffusée corrigée de l'atténuation due à l'eau et à l'éloignement au capteur (backscatter calculé par WinRIver II) moyennés sur 50 ensembles à un endroit fixe sur la rive gauche du chenal (le point le plus profond de la section).

La ***Figure 17*** indique une bonne corrélation entre les valeurs de pentes dans la partie supérieure du profil de rétrodiffusé avec les mesures de turbidité (R^2 = 0.86). La turbidité peut être utilisée comme un proxi de la concentration en MES fines à condition d'établir une relation d'étalonnage entre les deux grandeurs, et en vérifiant que la granulométrie des particules évoluant dans le volume de mesure du turbidimètre ne varie pas au cours des événements de crue.

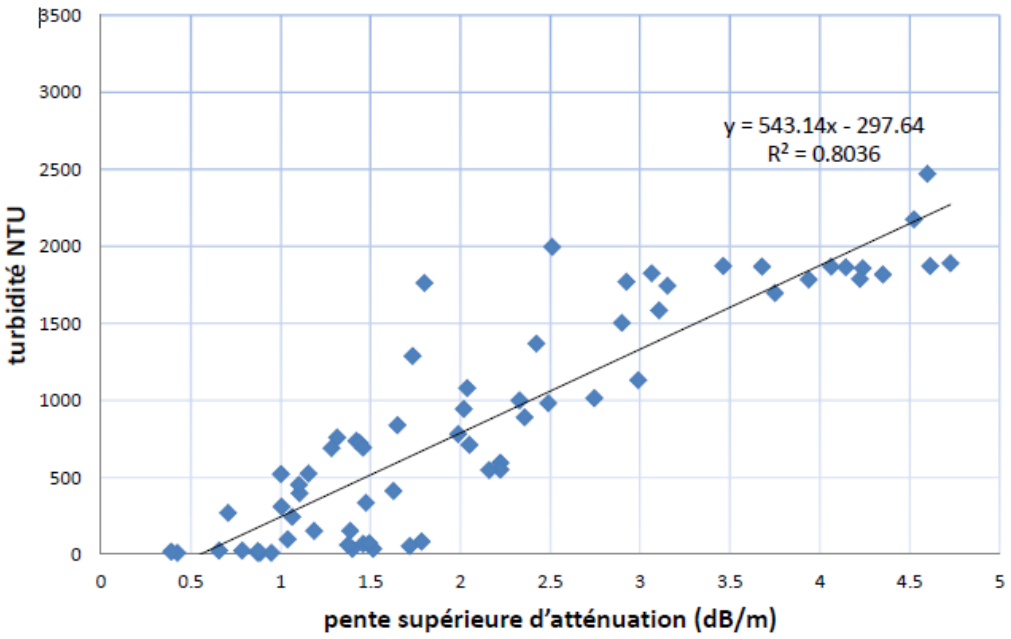


Figure 17 : Relation entre les pentes des intensités rétrodiffusées et les mesures de turbidité en surface [A. Benghouba, 2017].

Le même travail a été effectué par Marina Launay sur les crues échantillonnées en 2014, en utilisant les concentrations en MES mesurées sur les verticales. En 2014, 5 crues et une période sans crue ont fait l'objet de campagnes de mesure au cours desquelles des prélèvements ont été réalisés sur des verticales, généralement en rive gauche (*Figure 18*). La crue du 21 janvier n'a pas été étudiée dans ce travail car le bac de Barcarin n'était pas en fonctionnement et la mesure ADCP n'est pas disponible. Sur la *Figure 19* montrant les granulométries des échantillons de la crue du 13 octobre 2014, on voit apparaître la présence de sable dans l'échantillon le plus profond. Notons que ce n'est toutefois pas le cas pour les autres crues, mais que les modes de prélèvements et d'analyse des échantillons ne permettent pas forcément d'observer les sables, indépendamment de leur présence ou non.

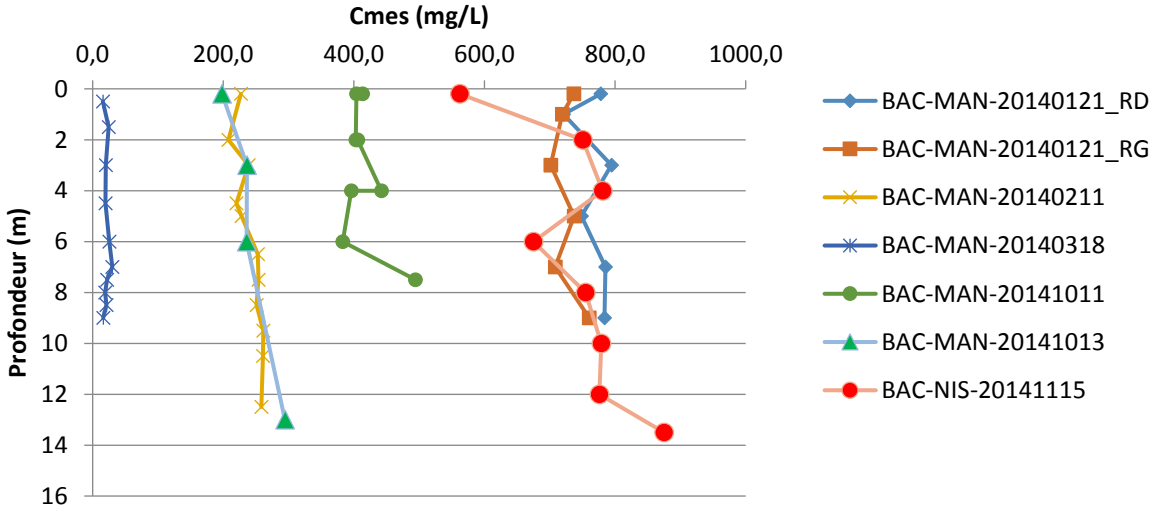


Figure 18 : Profils de concentrations en MES mesurés lors des crues de 2014.

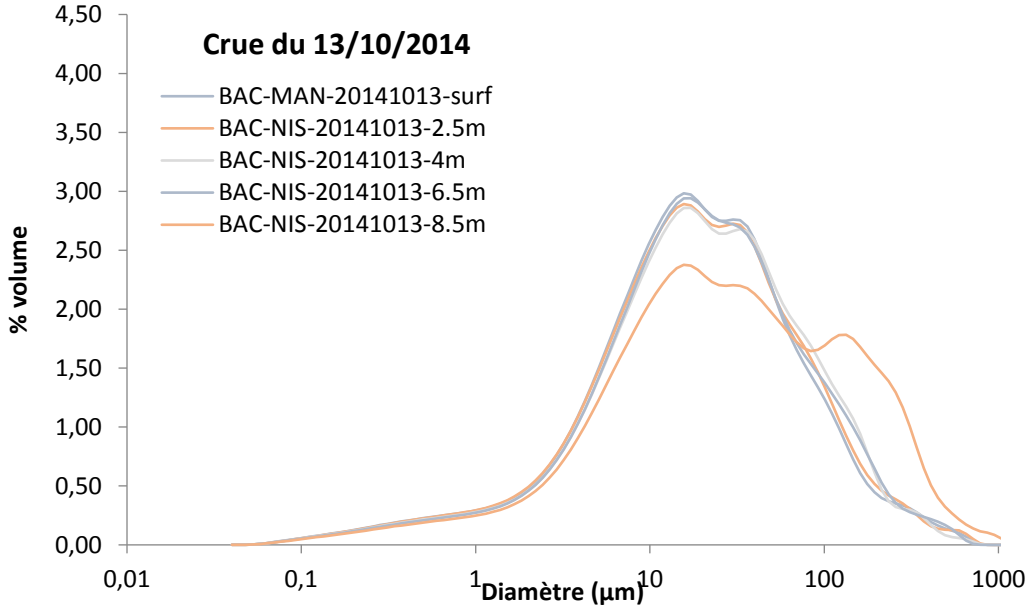


Figure 19 : Granulométries des échantillons de la crue du 13/10/2014.

Les données brutes d'intensité rétrodiffusées enregistrées par l'ADCP au cours des différentes crues ont été corrigées de l'atténuation due à l'eau et à la distance au capteur, puis on a recherché la pente du profil d'intensité dans la partie supérieure du profil. Ce traitement a été réalisé sur les ensembles mesurés du côté gauche de la section, en moyennant une dizaine d'ensembles se situant autour de la zone des prélèvements. Les ensembles mesurés en berge lors de l'arrêt du bac pour charger des véhicules ont également été utilisés pour rechercher les pentes d'atténuation (cf. ***Figure 20***). L'hypothèse est que dans cette zone, seules les MES fines sont présentes, les sables se situant plutôt dans le chenal principal d'écoulement où les vitesses sont plus fortes. Le séjour en berge permet plus d'étudier l'atténuation due aux fines sur un plus grand nombre d'ensembles, la concentration en MES fines étant supposée constante dans la section.

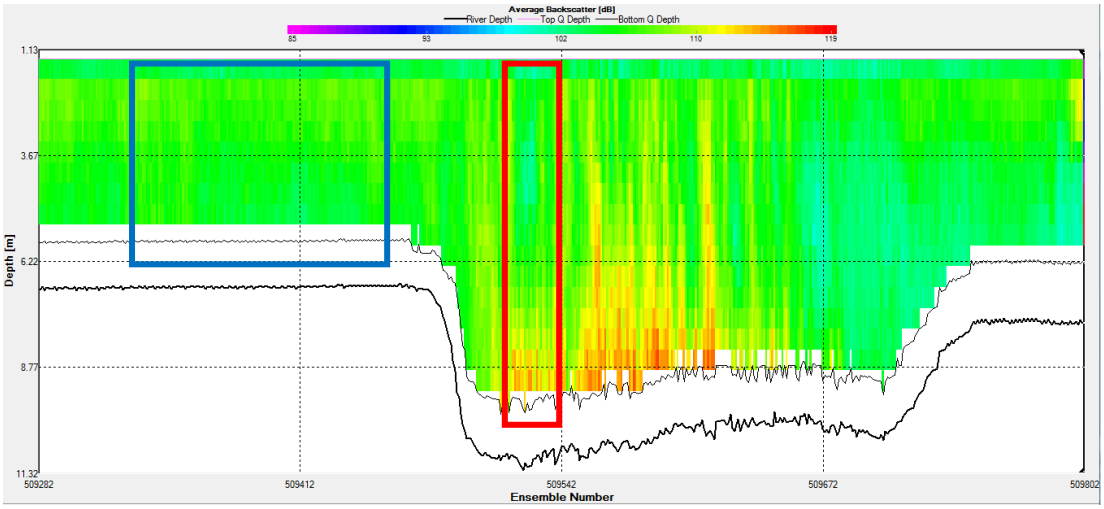


Figure 20 : Backscatter mesuré pendant la crue du 11/02/2014. La zone bleue montre les ensembles en berge utilisés pour déterminer la pente d'atténuation. La zone rouge montre les ensembles correspondant à la zone des prélèvements.

Les profils d'atténuation obtenus pour les quatre crues sont présentés sur la ***Figure 21***. La référence sans crue (« Clear water ») correspond aux échantillons mesurés le 18/03/2014, alors que le Rhône n'était pas en crue et que les concentrations étaient très faibles (cf. ***Figure 18***). On observe que chaque crue présente bien des intensités rétrodiffusées plus fortes que la période sans crue, ce qui indique la présence d'un plus grand nombre de diffuseurs (particules) pendant ces crues. Par ailleurs, la courbe « Flood-SPM », qui correspond aux profils en berge, présente toujours une pente comparable à celle de la partie supérieure des profils mesurés dans la section (en bleu) sauf pour la crue du 15/11/2014. Le cas de cette crue ne fonctionne pas car les concentrations en MES observées dans les prélèvements (***Figure 18***) sont très hétérogènes dans la partie supérieure du profil.

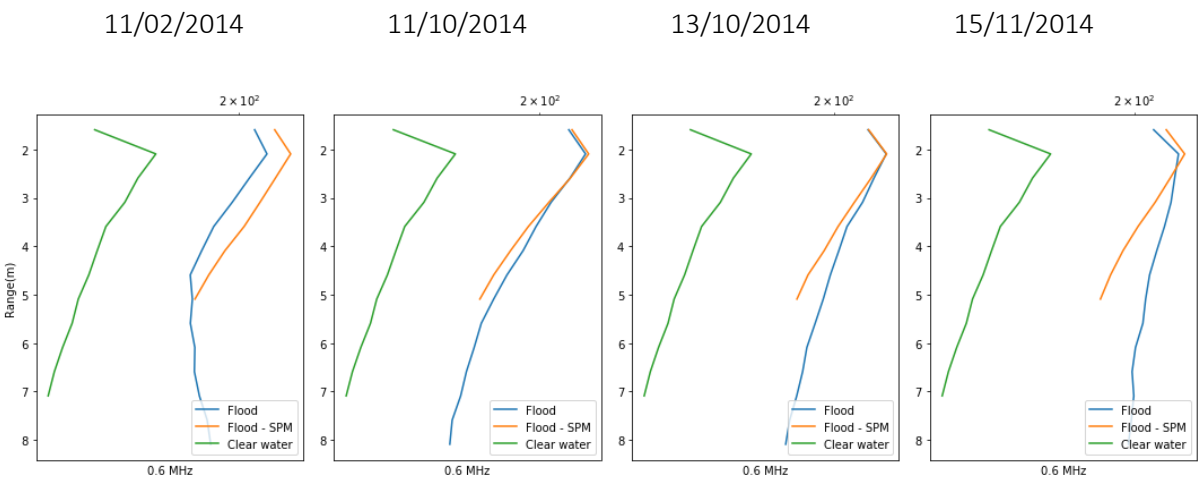


Figure 21 : Profils d'intensité rétrodiffusée pour les quatre crues de 2014. Clear water correspond à la référence sans crue mesurée le 18/03/2014. Flood SPM correspond aux profils mesurés en berge.

Sur ces événements, nous avons donc pu établir la pente du profil d'intensité dans la partie supérieure du profil, et la comparer avec la concentration en MES mesurée (***Tableau 3***). Cependant le nombre d'événements étudiés est trop faible pour pouvoir établir une relation entre ces deux grandeurs. Ce travail doit être étendu aux autres événements de crue mesurés notamment en 2015 et 2016, mais les ordres de grandeur des pentes d'atténuation sont les mêmes que ceux obtenus par A. Benghouba (2017).

Tableau 3 : Concentrations en MES et pentes d'atténuation dans la partie supérieure des profils pour les crues de 2014.

	C_MES _0-5m (mg/L)	Pentes (dB/m)
11/02/2014	224.2	0.65
11/10/2014	410.6	1.10
13/10/2014	223.4	0.51

5.2.3 Identification du sable en suspension

Marina Launay et Adrien Vergne ont utilisé les données ADCP (0.6 MHz) des crues de 2014 et Aquascat (multifréquences) de la crue de novembre 2016 pour tester la méthode d'identification des sables détaillée au paragraphe 3.2.3.

Les profils verticaux d'intensité rétrodiffusée $I_{dB,FSBC}$, corrigée de l'atténuation due à l'eau, de l'éloignement au capteur, des particules fines et de la rétrodiffusion ambiante (bulles d'air, microflocs), sont présentés sur les ***Figure 22*** et ***Figure 23***. Sur ces graphiques, la rupture de pente dans les profils obtenus indique le début de la présence de sables en suspension. Dans le cas de la crue du 13/10/2014, il ne semble pas y avoir de sable dans le profil. Pour les crues du 11/02/2014, du 11/10/2014 et du 24/11/2016, les profondeurs d'apparition de la suspension graduée varient entre 4 et 6.5 m. Ces premiers résultats sont prometteurs et doivent être généralisés aux autres crues pour confirmer que cette méthode permet bien d'identifier la présence de la suspension graduée et sa hauteur au-dessus du fond.

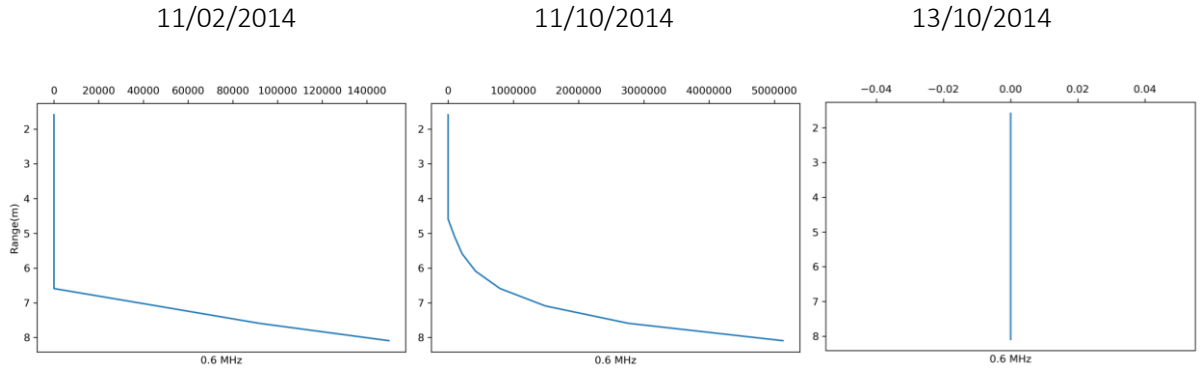


Figure 22 : Profils verticaux d'intensité rétrodiffusée corrigée $I_{dB,FSBC}$ pour les trois crues de 2014, mesurées avec l'ADCP à 0.6 MHz.

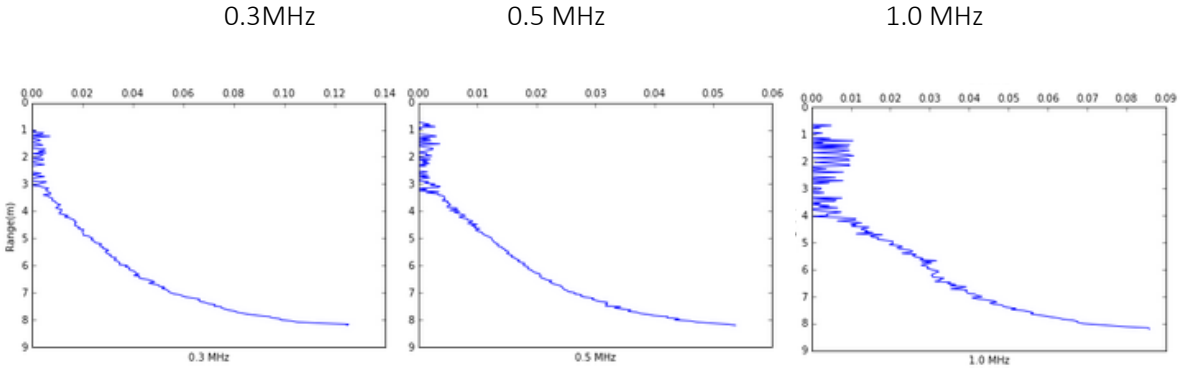


Figure 23 : Profils verticaux d'intensité rétrodiffusée corrigée $I_{dB,FSBC}$ pour trois fréquences de l'Aquascat lors de la crue du 24/11/2016.

6 Conclusions et perspectives

De nombreuses mesures de flux de sable ont été collectées dans le cadre de l'OSR en particulier aux cours de la chasse du Haut-Rhône de 2016. Pour les mesures du charriage, l'utilisation d'une traille mécanisée (station de Chancy-aux-Ripes) s'est avérée très utile et efficace pour réaliser une campagne de mesure de qualité (nombre d'échantillons suffisant sur une période assez courte). Cette remarque est aussi valable pour les mesures de la suspension de sable. Cependant, si le tronçon est navigable, une campagne de mesure avec une bouteille Niskin permet aussi de réaliser des mesures de qualité. L'utilisation d'un hydrophone pour la mesure du charriage est très complémentaire aux campagnes de prélèvement ne serait-ce que qualitativement. En effet, dans le cas de la station de Chancy-aux-Ripes, l'hydrophone a permis de montrer qu'il existait un transport de matériaux grossier (couche grossière pavée du site) alors que le préleveur ne pouvait le mesurer du fait de sa taille trop petite. Les travaux récents sur cette méthode sont de plus très encourageants pour l'estimation des flux (Geay et al., 2017) et la granulométrie des sédiments transportés (Petrut et al., 2017). Enfin, de premiers éléments de recherche sur l'utilisation de l'acoustique pour la mesure de la suspension de sable ont été présentés. La question de la mesure des concentrations en sable et en MES en laboratoire à partir d'échantillons prélevés, a été abordée et des problèmes liés au sous-échantillonnage ont été mis en évidence.

Concernant la modélisation, l'application d'un modèle simple de courbe de tarage sédimentaire a été réalisée sur plusieurs des sites étudiés permettant de discuter le jeu de données expérimentales. Des améliorations seront proposées dans le cadre de la thèse de Guillaume Dramais (2016-2020).

L'hydroacoustique est aujourd'hui largement utilisée en rivière pour mesurer des débits (technologie ADCP), mais il n'existe pas encore de méthode suffisamment robuste pour obtenir un flux sédimentaire à partir de ces mesures. La présence de particules fines en suspension (argile, limon) et éventuellement de microbulles d'air compliquent l'inversion du signal par rapport à l'océanographie. De récentes avancées ont cependant ouvert la voie à l'étude des suspensions bimodales (argile + sable) typiquement rencontrées dans les grands fleuves en réussissant à séparer la réponse acoustique des particules fines de celle des particules plus grossières (Topping et al., 2007 ; Moore et al., 2013).

Irstea Lyon-Villeurbanne poursuit des recherches dans ce domaine depuis plusieurs années avec une thèse déjà soutenue en 2011 (S. A. Moore) et une autre actuellement en cours (A. Vergne). Dans le cadre de l'OSR plusieurs stagiaires et post-doctorants au Cerege et à Irstea se sont également penchés sur la question. Les premiers résultats permettent d'établir une relation entre la pente d'atténuation de l'intensité acoustique et les concentrations en MES fines dans la partie supérieure du profil vertical. La correction des profils d'intensité de cette atténuation due aux particules fines permet ensuite d'évaluer la part de la rétrodiffusion ambiante (bulles, microflocs, etc.) et de corriger une nouvelle fois les profils d'intensité. Les variations alors observées sur la verticale trahissent la présence de sable en suspension. Cette méthode a montré des résultats encourageants pour les crues de 2014 et de novembre 2016 à Barcarin. Elle doit toutefois être confirmée sur d'autres événements.

Le développement de ces méthodes fait l'objet de la thèse d'Adrien Vergne dont l'un des objectifs est de mettre au point des techniques d'inversion du signal acoustique pour obtenir des informations sur les sédiments en suspension, et in fine de pouvoir mesurer un flux sédimentaire à partir de données

ADCP ou en utilisant un instrument acoustique dédié (profileur acoustique multifréquence). Pour cela, il est nécessaire d'adapter la base théorique développée en océanographie au cas spécifique des cours d'eau ; et de mener des expériences en conditions contrôlées (laboratoire) ou réelles (fleuve) afin d'affiner la compréhension physique des phénomènes.

7 Références

Antonelli, C. (2002). *Flux sédimentaires et morphogénèse récente dans le chenal du Rhône aval.* Thèse de doctorat, université Aix-Marseille, 2002

Armijos Cardenas E. N. (2015). Propagation des flux en suspension sur l'Amazone de Tamshiyacu (Pérou) à Obidos (Brésil) – Variabilité spatio-temporelle. Thèse de doctorat, université de Toulouse.

Bailard, J. A. (1981) *An energetic total load sediment transport model for a plane sloping beach*. Journal of Geophysical Research 86(C11):10 938-10 954.

Camenen, B. & Larson, M. (2008). *A General Formula for Noncohesive Suspended Sediment Transport*. J. Coastal Res., 24:615-627

Camenen, B., Le Coz, J., Dramais, G., Peteuil, C., Fretaud, T., Falgon, A., Dussouillez, P., Moore, S. A. (2014). *A simple physically-based model for predicting sand transport dynamics in the Lower Mekong River*. Proc. River Flow conference, Lausanne, Switzerland, 8p.

Dramais, G., Camenen, B., Le Coz, J. Comparaison de méthodes pour la mesure des matières en suspension dans les cours d'eau, en présence de sable. 14p. (Soumis à la Houille Blanche en novembre 2017)

Engelund, F. & Hansen, E. (1972). *A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams*. Technical Press, Copenhague, Danemark.

Geay, T., Belleudy, P., Gervaise, C., Habersack, H., Aigner, J., Kreisler, A., Seitz, H., & Laronne, J. B. (2017). Passive acoustic monitoring of bedload discharge in a large gravel bed river, J. Geophys. Res. Earth Surf., 122 : 528–545.

Guertault, L. (2015). *Évaluation des processus hydro-sédimentaires d'une retenue de forme allongé : application à la retenue de Génissiat sur le Haut-Rhône*. Université Claude Bernard, Lyon 1, 262 p.

Henry, E. (2016). *Mesures et modélisation des flux de sable dans les cours d'eau : Application à une chasse de barrages*. Rapport fin d'étude ENTPE, Irstea, 88 p.

Le Coz, J., Chaléon, C., Bonnifait, L., Le Boursicaud, R., Renard, B., Branger, F., Diribarne, J. & Valente, M. (2013). *Analyse bayésienne des courbes de tarage et de leurs incertitudes : la méthode BaRatin*. La Houille Blanche, 6 : 31-41.

Moore, S. A., Le Coz, J., Paquier, A., & Hurther D. (2013). *Using multi-frequency acoustic attenuation to monitor grain size and concentration of suspended sediment in rivers*. Journal of the Acoustical Society of America, 133:1959-1970.

Petrut, T.I., Geay, T., Cédric Gervaise, C., Belleudy, P., & Zanker, S. (2017). Passive Acoustic Measurement of Bedload Grain Size Distribution using the Self-Generated Noise. Hydrology and Earth System Sciences (accepté).

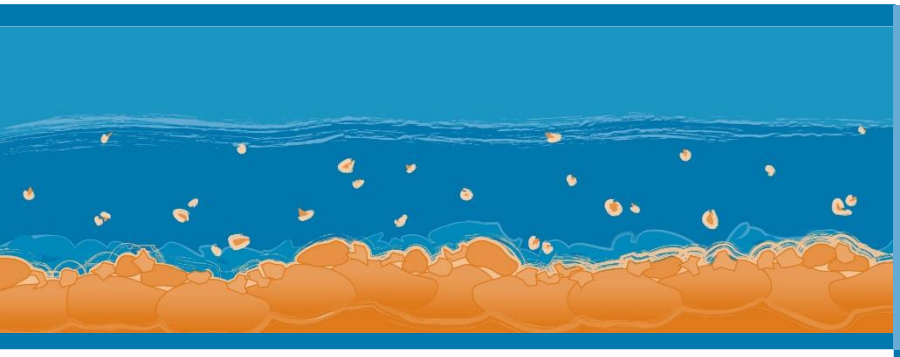
Sakho, I., Dussoulliez, P., Delanghe-Sabatier, D., Hanot, B. Raccasi, G.,Tal, M. Sabatier, F., Provansal M. & Radakovith, O. (2016). Suspended sediment flux at the Rhône River mouth (France) based on ADCP measurements during flood events. Submitted to Hydrological Sciences Journal.

Thorne, P. D. & Hurther D. (2014). *An overview on the use of backscattered sound for measuring suspended particle size and concentration profiles in non-cohesive inorganic sediment transport studies.* Continental Shelf Research, 73:97-118.

Topping, D. J., Wright, S. A., Melis, T. S., & Rubin D. M. (2007). *High-resolution measurements of suspended-sediment concentration and grain size in the Colorado River in Grand Canyon using a multi-frequency acoustic system*. Proceedings of the 10th International Symposium on River Sedimentation (ISRS), Moscou, Russie, août 2007, pages 330-339.

van Rijn, L. C. (1984). *Sediment transport, part II: suspended load transport*. J. Hydraulic Division, 110:1613-1641

Van Rijn L.C. (2007), *Simple general formulae for sand transport in rivers, estuaries and coastal waters*, www.leovanrijn-sediment.com, 19p.



Observatoire des Sédiments du Rhône

Observatoire des Sédiments du Rhône
GRAIE – OHM Vallée du Rhône
66 bd Niels Bohr – CS 52132
69603 Villeurbanne Cedex
www.graie.org/osr/

Contact : dad.roux@graie.org