



HAL
open science

Retour d'expérience sur le prélèvement et l'analyse des sédiments en suspension en rivière : enseignements d'un séjour au GCMRC (USGS)

Guillaume Dramais

► To cite this version:

Guillaume Dramais. Retour d'expérience sur le prélèvement et l'analyse des sédiments en suspension en rivière : enseignements d'un séjour au GCMRC (USGS). [Rapport de recherche] Irstea. 2020, pp.20. hal-02609681

HAL Id: hal-02609681

<https://hal.inrae.fr/hal-02609681>

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.



RiverLy / Equipe HYR

Retour d'expérience sur le prélèvement et l'analyse des sédiments en suspension en rivière : enseignements d'un séjour au GCMRC (USGS)



Août 2019
DRAMAIS Guillaume

Contrat N° 4200098317

Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture



Table des matières

Introduction	2
L'USGS et le GCMRC.....	2
Procédures de terrain	2
Généralités.....	2
Mise en œuvre des préleveurs	2
Mesures acoustiques in-situ	7
Procédures de laboratoire	7
Généralités.....	7
Filtration.....	8
Granulométrie.....	10
Edition des résultats.....	11
Granulométrie sèche au tamis.....	11
Logiciels de post-traitement de l'USGS.....	11
GCLAS	11
STA	12
SAID.....	14
DGS.....	14
Conclusion et perspectives	15
Bibliographie.....	16

Introduction

Ce document est un aperçu des différentes techniques utilisées à l'USGS (United States Geological Survey) et au GCMRC (Grand Canyon Monitoring and Research Center) en particulier, pour la mesure et l'analyse des sédiments dans les cours d'eau. L'USGS et le GCMRC ont une longue expérience sur le prélèvement, l'analyse et l'étude des sédiments dans les rivières. Ce compte rendu donne des pistes d'amélioration pour nos pratiques en France pour mieux prélever et mesurer les sédiments des rivières. Il renvoie régulièrement à des sites internet ou des rapports de l'USGS qui permettront au lecteur d'approfondir les sujets abordés. Ce travail est l'un des livrables d'une collaboration scientifique entre IRSTEA, l'USGS et la CNR (Compagnie Nationale du Rhône) dans le cadre de la préparation de la thèse « Observation et modélisation des flux sableux des grands fleuves ». Il est soutenu par l'OSR (Observatoire des Sédiments du Rhône) et financé par IRSTEA, la CNR, l'USGS et l'Université de Lyon, qu'ils en soient remerciés.

L'USGS et le GCMRC

L'USGS est une agence gouvernementale américaine de recherche finalisée qui se consacre aux sciences de la Terre, ses ressources naturelles et ses risques. Le GCMRC https://www.gcmrc.gov/about/about_default.aspx basé à Flagstaff en Arizona, est un laboratoire de l'USGS associé au programme de gestion du "Glen Canyon Dam", l'un des plus hauts barrages des Etats-Unis. L'équipe du GCMRC mène des recherches notamment sur les flux d'eau et de sédiments, les impacts du barrage sur la morphologie du cours d'eau mais aussi ses effets sur l'écosystème. Le groupe « River Sediment Dynamics » est à la pointe de la mesure hydro sédimentaire. Notamment sur les techniques de mesure du sable et en particulier sur les protocoles acoustiques et les suivis long terme des flux sur divers cours d'eau.

Procédures de terrain

Généralités

Les prélèvements en rivière sont effectués à l'aide de préleveurs automatiques en berge et de préleveurs isocinétiques lors des jaugeages solides. Les préleveurs isocinétiques sont développés et validés depuis de nombreuses années par les équipes du FISP (Federal Interagency Sedimentation Project). Ils sont disponibles dans le commerce auprès de <https://rickly.com/>. Leur fonctionnement et leur déploiement ont été largement documentés par l'USGS, on peut citer Edwards et Glysson (1999) par exemple. Le site du FISP <https://water.usgs.gov/fisp/> est une mine d'information au sujet des préleveurs, des techniques de mesure et des projets de développements en cours. La nomenclature et les limites d'utilisation des préleveurs isocinétiques sont expliquées dans Broderick (2005). Exemple pour le DH96 (D: signifie « Depth integrative », H: signifie « Hand held or hand line » et 96 correspond à 1996, date de début de développement de l'instrument).

Mise en œuvre des préleveurs

- Les chaînes de mesure par préleveur automatique ISCO (Figure 1) sont associées à des centrales d'acquisition Campbell et déclenchées sur seuil de hauteur, ou programmées sur des pas de

temps réguliers. Lors des tournées de maintenance, le tube d'écrasement des pompes péristaltiques est régulièrement changé ainsi que les batteries.



Figure 1 : Etiquetage des flacons de préleveur automatique

- DH96 (Figure 2) : Préleveur intégratif avec sac de prélèvement (adapté pour les profondeurs importantes), utilisé depuis des embarcations ou une nacelle téléphérique (Figure 5) c'est le préleveur phare du GCMRC pour la mesure des sédiments en suspension. La procédure de rinçage du sac de prélèvement est très rigoureuse, chaque sac est stocké avec l'échantillon liquide.



Figure 2 : DH96 déployé depuis un nacelle téléphérique sur le Colorado

- DH74 (Figure 3) : Préleveur intégratif avec bouteilles rigides (Figure 4), parfois opéré depuis un pont sur verticale unique représentative de la section de mesure.



Figure 3: DH74 déployé depuis un pont sur la Paria River (verticale unique). Le matériel reste en place dans une caisse fixée sur la rambarde en amont du pont.

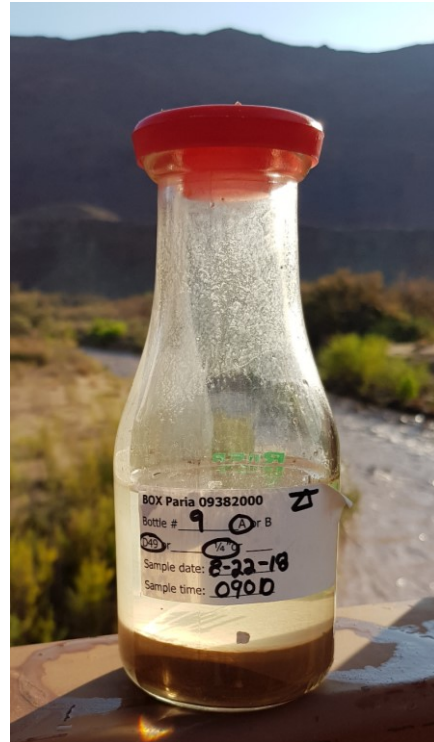


Figure 4: Flacon récolté avec le DH74, après étiquetage

- Protocole et manipulation du treuil (Figure 3) : pour la mesure intégrative sur la profondeur, les deux points essentiels sont d'observer un rythme régulier pour la vitesse verticale de montée et de descente et un remplissage suffisant du flacon. Pour régler la rotation de la manivelle, un métronome est utilisé (réglé 50 bpm/min par exemple). Il faut que la vitesse de montée et de descente soit identique, la zone explorée s'arrête à 1 pied (30,48 cm) au-dessus du fond (chaque verticale est sondée avant la mesure pour mesurer la profondeur). Le rythme va être adapté au taux de remplissage donc à la vitesse de l'eau. Pour le protocole avec verticales indépendantes régulières, chaque échantillon est constitué de deux aller-retours sur la verticale. Il existe aussi un protocole pour lequel on effectue un échantillon combiné de toutes les verticales. Le choix du protocole est fonction de la connaissance de la section, de l'intérêt de l'événement et du temps et matériel disponibles.



Figure 5 : Nacelle téléphérique de Diamond Creek sur le Colorado

- Les moyens de déploiement des préleveurs dépendent du site et de l'accessibilité. Les nacelles sur câble téléphérique sont encore largement utilisées en combinaison avec un bateau. Les déploiements en bateau sont plus courants. Des bateaux aluminium de type Osprey sont utilisés avec un treuil à la proue (figure de couverture) ou des bateaux pneumatiques type catamaran, (Figure 6) très stables. Le B56 « Sounding reel » <https://rickly.com/usgs-b-56-sounding-reel-english/> (Figure de couverture) est le câble porteur utilisé en routine pour déployer les préleveurs, depuis les nacelles, les bateaux ou les ponts.
- BMH60 et BM54 (Figure 6) : Préleveurs à trappe rotative pour prélever des échantillons de fond, ils sont un peu lourds à manipuler mais très efficaces. Le BM54 peut est très efficace malgré les fortes vitesses.



Figure 6: Préleveurs BMH60 (blanc) et BM54 (suspendu au treuil) pour prélèvement d'échantillons de fond, sur catamaran pneumatique utilisé en crue sur le Colorado à Potash.

- P61 : Préleveur ponctuel, il va permettre de réaliser des échantillons à la profondeur souhaitée pendant le temps d'intégration souhaité, il est utilisé moins souvent car les jaugeages solides sont plus coûteux en temps sur le terrain et en analyses au laboratoire.



Figure 7 : P61 déployé depuis une nacelle téléphérique sur le Colorado

- Les protocoles utilisés pour le jaugeage solide, notamment pour la répartition des verticales de mesure EWI (Equal Width Increments) et EDI (Equal Discharge Increments) sont décrits très précisément dans plusieurs rapports de l'USGS depuis Porterfield (1972) et plus récemment Gray et Landers (2014). Dans Dramais et al. (2019) les méthodes de calcul du jaugeage solide dans la section sont comparées et une nouvelle méthode est proposée dans le cadre du projet de recherche à l'origine de ce travail.

Mesures acoustiques in-situ

Les stations de mesure hydro-acoustiques (Figure 8) utilisées pour les suivis en continu des flux et de la granulométrie des sédiments sont décrites dans plusieurs rapports extrêmement bien documentés, Griffiths et al. (2012) et Topping et Whright (2016) notamment. Les profileurs SLD de OTT (2- MHz), EasyQ (1 et 2 MHz) et Aquadopp (600 kHz) de Nortek à visée horizontale sont utilisés et régulièrement vérifiés. Des techniques de mesure sont également développées pour la mesure du charriage par dune tracking avec des dispositifs acoustiques embarqués.



Figure 8: Maintenance d'un ADV à la station de Diamond Creek sur le Colorado

Procédures de laboratoire

Généralités

La traçabilité est un élément important de l'organisation des suivis du GCMRC. Sur ce point-là, les procédures sont assez similaires aux pratiques françaises. Les protocoles sont écrits et connus, les gens formés, les mesures sont saisies sur papier sur le terrain et saisies sur base de données ensuite. Les données sont pour la plupart disponibles en ligne sur une base de données spatialisée performante https://www.gcmrc.gov/discharge_qw_sediment/. L'étiquetage systématisé de tous les flacons qui entrent au laboratoire est pratiqué. L'étiquette est placée de telle façon que le niveau d'eau soit identifié sur chaque étiquette/flacon. Chaque flacon une fois fermé est scellé par du scotch de façon assez ferme pour empêcher toute évaporation jusqu'à l'analyse. Cet étiquetage est généralisé sur tous les flacons qui

viennent du terrain (automatiques compris). Les filtres chargés et refus de tamis sont archivés dans des mini flacons et conservés.

Les échantillons sont stockés à l'abri de la lumière, ils sont en général analysés en fonction des besoins de données, sans limite fixée de conservation. Les analyses de sédiments en suspension sont basées sur la séparation des fines et du sable par tamisage à 63 μm (Dramais et al. 2018). Pour éviter toute contamination, les opérateurs sont munis de gants pour manipuler tous les objets et échantillons susceptibles d'être pesés ou contaminés. Le laboratoire n'a pas de certification mais participe 2 fois par an à une intercomparaison dans le cadre d'une procédure qualité interne.

L'ordre de grandeur du temps d'analyse pour 60 échantillons est de 7 jours avec 3 agents travaillant 40h/semaine.

Filtration

Cette partie est un résumé des différentes phases de travail pour le traitement d'un échantillon pour la mesure de la concentration en sable et en fines dans le laboratoire du GCMRC.

Le flacon 1 ouvert avec l'échantillon est pesé sans son bouchon, si des sédiments sont visibles sur le bouchon, ils sont ajoutés par rinçage à l'échantillon après la pesée. (0.1g).

Rinçage du tamis à 63 μm , (le tamis en inox est siliconé à la limite de la partie tamis et de la structure du tamis pour éviter aux grains de se coincer dans cette partie)

Le flacon 1 vide sera pesé après une nuit de séchage à 105° à l'étuve.



Figure 9 : Tamis placé dans un entonnoir de récupération



Figure 10: Dispositif de rinçage du tamis

L'échantillon est passé en totalité au travers du tamis de 63 µm dans un plus grand flacon 2 étiqueté via un grand entonnoir qui contient le tamis (Figure 9 et Figure 10). Le tamis est rincé plusieurs fois et tout le liquide de rinçage est collecté dans le flacon 2 étiqueté.

Le refus du tamis est isolé dans un mini flacon 3 type pilulier.

Le tamis est ensuite rincé et passé dans un bain d'ultrasons (Figure 11) pour retirer les particules éventuellement coincées dans le tamis.



Figure 11 : Cuve à ultrasons utilisée pour nettoyer les tamis

Pour éliminer la matière organique, du Peroxyde d'hydrogène concentré 30% (H₂O₂) est utilisé (1ml par flacon 3), pendant 12 heures.

Le sable est ensuite séché et pesé dans un bécher taré ou une coupelle aluminium suivant la quantité.

Le sable sera ensuite rincé avant analyse granulométrique.

Le flacon 2 est fermé et placé dans une armoire fermée pour décantation des fines pendant 3 jours, parfois plus. Si le temps de décantation dépasse une semaine, de l'alun de potassium est utilisé pour accélérer le dépôt sous forme de poudre, qui est retiré ensuite (ils évitent de le faire au maximum).

L'eau du flacon 2 est ensuite siphonnée au maximum, le décantât et le reste d'eau est passé sur une colonne de filtration.

La colonne de filtration utilisée est une colonne classique, les filtres utilisés sont des filtres 0.45 µm Millipore. Ils ne sont jamais manipulés à la main sans gant.

Deux filtres sont empilés (un pour estimer la perte de poids en cellulose, l'autre pour la mesure de poids de sédiment retenu).

Avant filtration si une différence de poids est notée, le filtre le plus léger est placé au-dessus.

S'il y a trop de matière (> 2g estimé visuellement) dans l'échantillon, la technique de l'évaporation totale est utilisée à l'aide d'un bécher pesé au préalable.

Les filtres sont séchés en une nuit à 105°C à l'étuve dans des boîtes de Pétri.



Figure 12: Poste de pesée

Granulométrie

Seul les sables de diamètre compris entre $63\mu\text{m}$ et 1mm sont analysés au granulomètre laser.

Le GCMRC utilise un [Beckman Coulter LS13-320](#) (Figure 13) avec deux modules d'analyse pour les « petits et les grands » volumes d'analyse. Une procédure longue de rinçage est effectuée chaque début de journée. Il y a deux catégories d'échantillons (Grands et petits). Le seuil pour les petits échantillons est de 0.2g à 0.4g de matière. Les petits échantillons sont analysés en premier.

L'obscurité minimale tolérée est de $10\% \pm 1$



Figure 13: Granulomètre Beckman Coulter utilisé pour les sables en suspension

Le sable rincé est remis en suspension dans un mini bûcher avec agitateur magnétique. Des sous-échantillons seront prélevés avec une pipette pasteur calibrée pour ne pas capturer les particules de diamètre supérieur à 1mm .

Le résultat d'une analyse granulométrique sera la moyenne de 6 runs avec 6 sous-échantillons différents pour les « grands » échantillons. Les petits échantillons ne subiront qu'un run.

Pendant l'analyse de la granulométrie des particules, 3 courbes sont tracées en faisant varier le e-factor, c'est un facteur qui simule différentes formes de particules. La théorie Fraunhofer est choisie systématiquement.

Edition des résultats

Les résultats de concentration sont combinés avec les résultats de granulométrie. Les granulométries tamisées sont considérées comme fausses. La granulométrie laser (associées aux ultrasons) donne une information supplémentaire sur les particules fines « oubliées » sur le tamis ou pendant l'analyse. La masse équivalente de queue de distribution (<63µm) issue de la granulométrie laser est ajoutée à la concentration en fines et soustraite de la concentration en sable.

Granulométrie sèche au tamis

Elle est réalisée sur des colonnes de tamis pour les échantillons de fond.

Logiciels de post-traitement de l'USGS

Généralités : De nombreux logiciels sont développés par l'USGS. Certains sont libres d'accès et d'autres sont des codes « maison » utilisés pour préparer les données et les valider avant la mise à disposition. Voici une sélection de logiciels potentiellement utiles pour les problématiques de mesures sédimentaires.

GCLAS

GCLAS (Graphical Constituent Loading Analysis System) <https://water.usgs.gov/software/GCLAS/> (Figure 14) peut être intéressant pour le calcul des chroniques et bilans sédimentaires, à partir d'échantillons analysés et de chroniques de débit. Il a été développé par Koltun (2006) et est un outil largement utilisé par l'USGS.

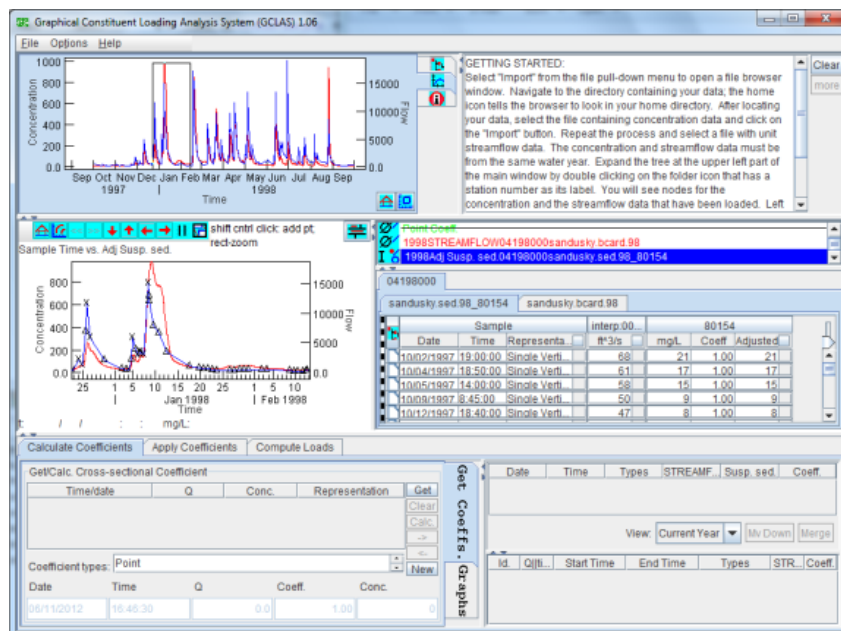


Figure 14 : Capture d'écran du logiciel GCLAS

STA

Le logiciel STA (Sediment Transect Acoustics) est basé sur l'idée d'une inversion acoustique du backscatter de l'ADCP (Figure 12) pour estimer les flux de sédiments dans la section, comme les logiciels commerciaux PDT toolbox (Aardoom 2006) et Sediview (Land et al. 1997). L'interface est intuitive et rapide. Un manuel d'utilisation est en cours de rédaction en même temps que les développements du logiciel.

STA n'est pas développé par le GCMRC et pas encore disponible officiellement (en août 2019). La version Beta 4.0 du logiciel a été testée pour ce travail. Les tests sont en cours et le développement est effectué par Justin Boldt du Water Science Center Ohio-Kentucky-Indiana (OKI) à Louisville dans le Kentucky.

Le logiciel vient compléter la panoplie des moyens de mesure des flux de sédiments de l'USGS, pour traiter les mesures ADCP mobiles réalisées en même temps que les jaugeages solides intégratifs en y ajoutant des prélèvements ponctuels pour effectuer la calibration du signal acoustique (Figure 16, Figure 17, Figure 18).

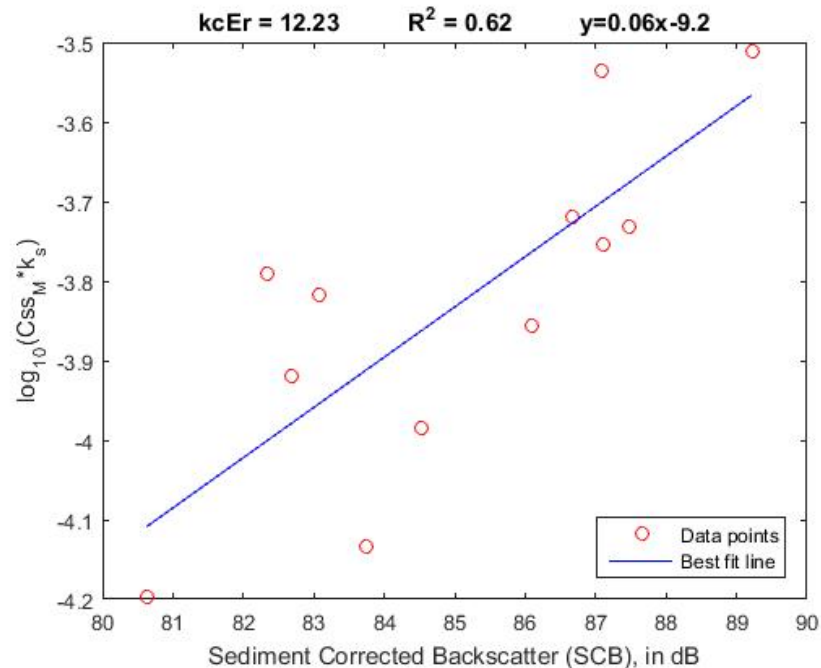


Figure 15 : Exemple de calibration du Backscatter pour un exemple de la crue du Rhône à Perrache le 22 janvier 2018 (STA. Version 4.0)

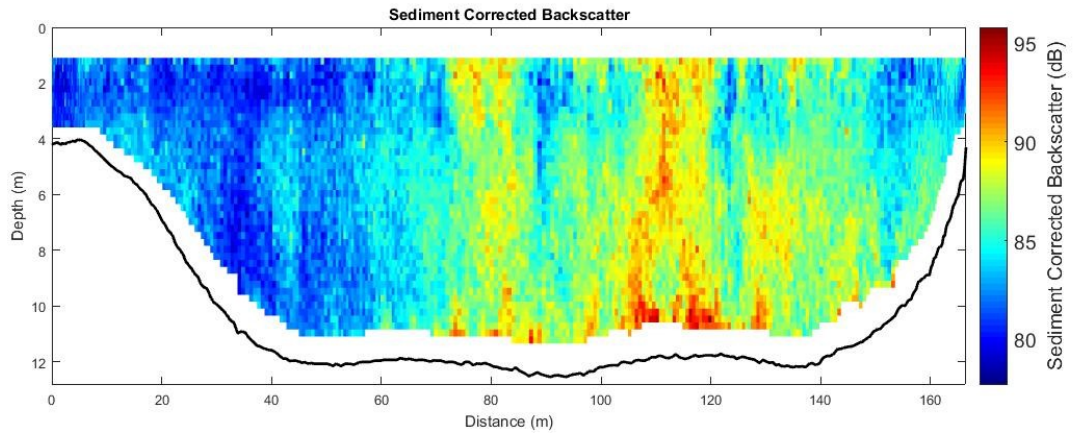


Figure 16 : Exemple de représentation du Sediment corrected Backscatter pour un exemple de la crue du Rhône à Perrache le 22 janvier 2018 (STA. Version 4.0)

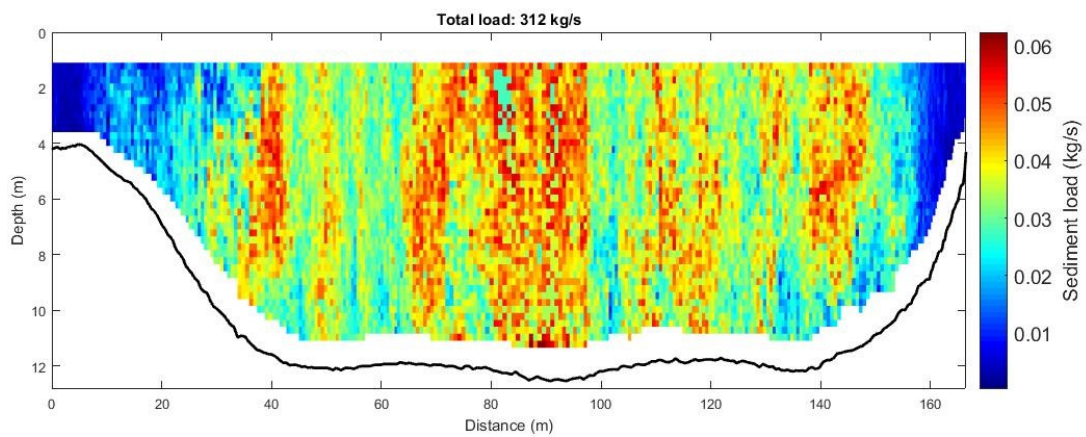


Figure 17 : Exemple de représentation du flux de sédiment total dans la section pour un exemple de la crue du Rhône à Perrache le 22 janvier 2018 (STA. Version 4.0)

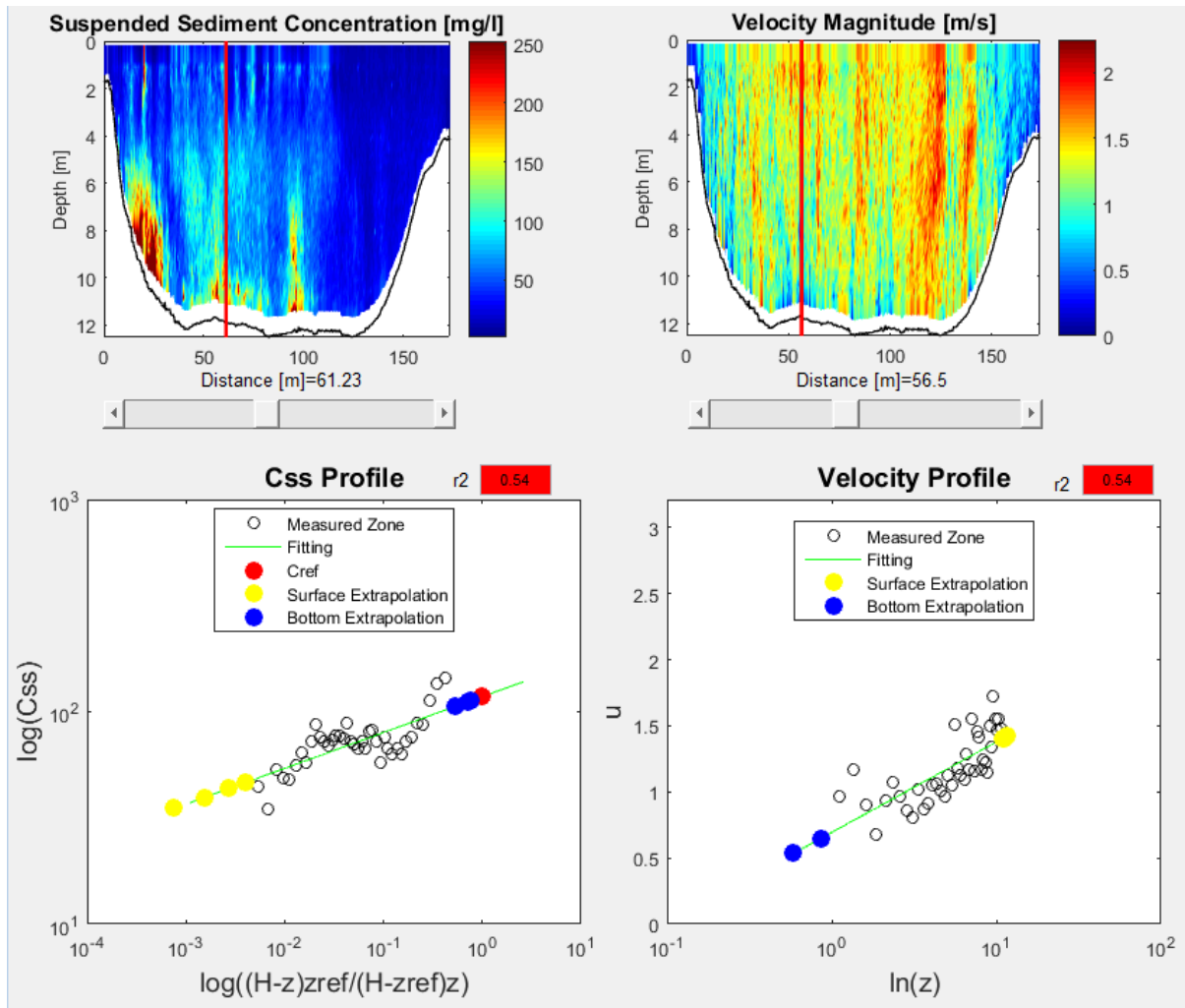


Figure 18 : Exemple d'extrapolation des zones non mesurées pour un exemple de la crue du Rhône à Perrache le 22 janvier 2018 (STA. Version 4.0)

SAID

L'outil SAID (Surrogate Analysis and Index Developer) est un logiciel qui aide à la création de modèles de régression des moindres carrés ordinaires (MCO) en fournissant des diagnostics visuels et quantitatifs à l'utilisateur. L'outil traite également des paramètres acoustiques pour estimer les flux de sédiments à partir des données de vélocimètres Doppler acoustiques fixes (ADVM). Ce logiciel n'est pas utilisé par le GCMRC qui utilise des codes plus complexes. Le logiciel et une formation sont disponibles en ligne. <https://water.usgs.gov/osw/SALT/SAID/index.html>. Landers et al. (2016) décrivent la méthode précisément.

DGS

Le logiciel DGS (Digital Grain Size project) est un logiciel écrit en Python (Figure 19) pour la mesure de la distribution des tailles de particules sur une photo de sédiments. Le logiciel permet de charger une ou

plusieurs images (Figure 20), de définir la région d'intérêt et la résolution des pixels, et facilite le filtrage de base des images. Il peut traiter chaque image et créer un fichier texte et un graphique contenant la distribution granulométrique estimée et quelques statistiques (Buscombe, 2013). Le logiciel et un exemple de jeu de données sont téléchargeables sur https://dbuscombe-usgs.github.io/DGS_Project/.

```
Invite de commandes - python
Microsoft Windows [version 10.0.17134.829]
(c) 2018 Microsoft Corporation. Tous droits réservés.

C:\Users\guillaume.dramais>python
Python 3.7.3 (v3.7.3:efdc6ed12, Mar 25 2019, 22:22:05) [MSC v.1916 64 bit (AMD64)] on win32
Type "help", "copyright", "credits" or "license()" for more information.
>>> import DGS
>>>
>>> image_file='C:/Users/guillaume.dramais/Desktop/Bureau/softs/DGS_data/image/test_img.jpg'
>>> density=10
>>> resolution=0.0635
>>> dofilter=1
>>> notes=8
>>> maxscale=8
>>> verbose=1
>>> x=-0.5
>>> dgs_stats = DGS.dgs(image_file, density, resolution, dofilter, maxscale, notes, verbose, x)
=====
-DIGITAL GRAIN SIZE: WAVELET=====
-CALCULATE GRAIN SIZE-DISTRIBUTION FROM AN-
-IMAGE OF SEDIMENT/GRANULAR MATERIAL=====
-A PROGRAM BY DANIEL BUSCOMBE=====
-NAU, FLAGSTAFF, ARIZONA=====
-REVISION 3.0.12, OCT 2018=====
=====
Input image is C:/Users/guillaume.dramais/Desktop/Bureau/softs/DGS_data/image/test_img.jpg
Every 10 rows will be processed
Resolution is 0.0635
Image will be filtered
Max scale as inverse fraction of data length: 8
Analysis of %s sub-octaves per octave: 8
Area to volume conversion constant = -0.5
-----
Processing image C:/Users/guillaume.dramais/Desktop/Bureau/softs/DGS_data/image/test_img.jpg
mean size = 2.8309705755699284
stdev = 2.095965190495169
skewness = 0.017127479064851212
kurtosis = 0.07397570487269274
>>>
```

Figure 19: Exemple de résultat obtenu par ligne de commande avec la version Python de DGS



Figure 20: Exemple d'image traitée par DGS.

Pour aller plus loin, voir les publications de Daniel Buscombe (NAU) sur le sujet et ses codes en accès libre à partir du site <https://www.danielbuscombe.com/>. Paul Grams (GCMRC) et Matt Kaplinski (Northern Arizona University) développent également des techniques pour le sondage acoustique par échosondeur mono et multi faisceaux pour la mesure du charriage, du déplacement des dunes et pour la caractérisation du substrat.

Conclusion et perspectives

La collaboration avec le GCMRC et l'USGS peut permettre aux équipes françaises de progresser à plusieurs niveaux sur la mesure du transport solide dans nos cours d'eau. Quatre perspectives principales sont à retenir.

- L'analyse des sédiments en suspension en rivière ne peut être correctement réalisée sans effectuer une coupure à 63 μ m comme préconisée par l'USGS, l'ISO (Organisation Internationale de Normalisation) et l'ASTM (American Society for Testing Material) et les chercheurs du Service d'observation Hybam (Contrôles géodynamique, hydrologique et biogéochimique de

l'érosion/altération et des transferts de matière dans les bassins de l'Amazone, de l'Orénoque et du Congo) de l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) par exemple.

- Au niveau du prélèvement et de l'analyse des sédiments en suspension, de nombreux travaux ont été effectués à l'USGS sur le terrain et en laboratoire. Les rapports et « Professional papers » présentant les méthodes et leur validation sont pour la plupart disponibles en ligne, une partie de ces documents sont listés dans ce rapport. Sur les sites de terrain où nous souhaitons connaître les flux de sédiment en suspension, il semble indispensable de mettre en œuvre une politique de jaugeages solides réguliers, ce qui nécessitera un investissement en matériel et en ressources humaines. L'expérience de l'USGS montre que l'utilisation de préleveurs suspendus depuis des bateaux, ponts ou nacelles téléphériques est possible en maîtrisant les conditions de sécurité.
- Au niveau des stations de mesure : depuis 2002 l'équipe du GCMRC développe des stations de mesure acoustiques basées sur l'analyse de signaux d'ADCP horizontaux sur deux fréquences. Ils ont développé des codes de traitement du signal qui leur permettent d'estimer la granulométrie des particules (du sable en particulier) qui transitent et d'estimer ensuite les flux. De telles stations sont envisageables sur nos rivières en particulier sur les affluents pourvoyeurs de sédiments en suspension.
- D'autres techniques intéressantes sont développées au GCMRC notamment pour la granulométrie par image *in-situ* pour l'étude et la cartographie du substrat des rivières.

Bibliographie

AARDOOM, J., H. (2006) Quantification of sediment concentrations and fluxes from adcp measurements IXth National Engineering Days - Coastal Engineering, 12th-14th September, Brest, France.

BRODERICK, C. K. (2005). A Guide to the Proper Selection and Use of Federally Approved Sediment and Water-Quality Samplers. US Geological Survey Open File Report 2005-1087. <https://pubs.usgs.gov/of/2005/1087/>

BUSCOMBE, D. (2013). Transferable wavelet method for grain-size distribution from images of sediment surfaces and thin sections, and other natural granular patterns, *Sedimentology*, vol. 60, N°7, pp 1709-1732.

DRAMAIS, G., CAMENEN, B., LE COZ, J. (2018). Comparaison de méthodes pour la mesure des matières en suspension dans les cours d'eau, en présence de sable. *La Houille Blanche*, no 5-6, p. 96-105.

DRAMAIS, G., CAMENEN, B., LE COZ, J., TOPPING, D., PETEUIL, C., PIERREFEU, G. (2019) A physically based method of combining adcp velocity data with point samples to compute suspended-sand discharge – application to the Rhone River, France. SEDHYD Conference 24/06/2019-28/06/2019, Reno, USA. 13 p. 3ème prix du meilleur article.

EDWARDS, T., K., GLYSSON, G., D., GUY, H., P., et al. (1999). Field methods for measurement of fluvial sediment. Denver, CO : US Geological Survey. <https://pubs.usgs.gov/twri/twri3-c2/>

- GRAY J., R., and LANDERS M., N., (2014). Measuring Suspended Sediment. In: Ahuja S. (ed.) Comprehensive Water Quality and Purification: United States of America, Elsevier, vol. 1, p. 157-204 https://www.researchgate.net/publication/281611496_Measuring_Suspended_Sediment
- GRIFFITHS, R., E., TOPPING, D., J., ANDREWS, T., et al. (2012) Design and maintenance of a network for collecting high-resolution suspended-sediment data at remote locations on rivers, with examples from the Colorado River. US Geological Survey Techniques and Methods, Book, vol. 8. <https://pubs.usgs.gov/tm/tm8c2/>
- KOLTUN, G., F., EBERLE, M., GRAY, J., R., , and GLYSSON G.D. (2006) User's Manual for the Graphical Constituent Loading Analysis System (GCLAS). Techniques and Methods 4-C1, USGS. <https://pubs.usgs.gov/tm/2006/tm4C1/>
- LAND, J., M., Kirby, R., and Massey, J.,B. (1997). Development in the combined use of acoustic Doppler current profilers and profiling siltmeters for suspended solids monitoring. In: N. Burt, R. Parker and J. Watts, (eds.), Cohesive Sediments – Proceedings of INTERCOH Conference (Wallingford, England), John Wiley & Son.
- LANDERS, M., N., STRAUB, T., D., WOOD, M., S., et al. (2016) Sediment acoustic index method for computing continuous suspended-sediment concentrations. US Geological Survey, (No. 3-C5). <https://pubs.er.usgs.gov/publication/tm3C5>
- PORTERFIELD, G. (1972). Computation of fluvial-sediment discharge. Techniques of water-resources investigations 03-c3. USGS. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/twri03C3>
- TOPPING, D., J. et WRIGHT, S., A. (2016). Long-term continuous acoustical suspended-sediment measurements in Rivers-Theory, application, bias, and error. US Geological Survey. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/pp1823>



Iristea – Lyon Villeurbanne
BP 32108, 69616,
5 Rue de la Doua,
69100 Villeurbanne
www.irstea.fr