



HAL
open science

Mesures et modélisation des flux de sable dans les cours d'eau : application à une chasse de barrages

Elvire Henry

► **To cite this version:**

Elvire Henry. Mesures et modélisation des flux de sable dans les cours d'eau : application à une chasse de barrages. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2016. dumas-02474511

HAL Id: dumas-02474511

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02474511v1>

Submitted on 11 Feb 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.



TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES

Organisme d'accueil : **IRSTEA**



Sujet :

Mesures et modélisation des flux de sable dans les cours d'eau Application à une chasse de barrages

Auteur : **HENRY Elvire**

Promotion 61
VA : Environnement
Année 2015-2016

Président de Jury : Francis NEZONDET
Tuteur entreprise : Guillaume DRAMAIS
Expert : Erwan LE BARBU
Date de soutenance : 4 juillet 2016

NOTICE ANALYTIQUE

| | | | |
|---------------------------------|---|--|----------------------------|
| | NOM | PRENOM | |
| AUTEUR | HENRY | Elvire | |
| TITRE DU TFE | Mesures et modélisation des flux de sable dans les cours d'eau, Application à une chasse de barrage | | |
| | ORGANISME D'AFFILIATION ET LOCALISATION | NOM PRENOM | |
| MAITRE DE TFE | IRSTEA Lyon-Villeurbanne 5 rue de la Doua - CS70077 69626 VILLEURBANNE Cedex | DRAMAIS Guillaume Unité de recherche Hydrologie- Hydraulique Responsable de l'équipe métrologie | |
| COLLATION | Nbre de pages du rapport 88 | Nbre d'annexes 3 | Nbre de réf. biblio. 23 |
| MOTS CLES | Flux sédimentaires, Suspension de fond, Chasses de barrage, Sable | | |
| TERMES GEOGRAPHIQUES | Rhône, Génissiat, Ain, Suisse | | |
| RESUME | <p>La mesure des flux de sable dans les cours d'eau est une question qui intéresse les scientifiques et les gestionnaires des cours d'eau, notamment par rapport à la gestion des barrages. En effet, cette mesure reste très difficile car les sables sont transportés sur l'ensemble de la colonne d'eau mais de façon non-homogène avec des concentrations très fortes près du fond. La connaissance des flux de sable reste encore très limitée bien que ces derniers soient non-négligeables et puissent avoir des impacts majeurs sur la morphodynamique des rivières. Une chasse des barrages du Rhône a eu lieu en mai 2016. Cet événement a été l'occasion de déployer différents instruments de mesure des flux de sable dans des conditions contrôlées. Les travaux menés lors de ce mémoire de fin d'études permettent de faire un état des lieux bibliographique sur la mesure des flux de sable. Ils ont permis d'établir un protocole expérimental adapté pour mettre en évidence la répartition du sable transporté dans le cours d'eau et de tester différentes approches pour la modélisation de flux de sable.</p> | | |
| ABSTRACT | <p>Measurement of sand flow in rivers is an issue for scientists and managers of watercourses, particularly in relation to the management of dams. Indeed, this measurement is very difficult because sands are transported over the entire water column but non-homogeneously with very high concentrations near the bottom. Knowledge of sand flow is still very limited though these are non-negligible and can have major impacts on river morphodynamics. A flush Rhone dams held in May 2016. This event was an opportunity to display various measuring instruments for sand flow under controlled conditions. The work done during this graduation report allow for a state of bibliographic knowledge on the measurement of sand flow. It has established an experimental protocol adapted to highlight the distribution of the transported sand in rivers and improved different approaches for the sand flow modeling.</p> | | |

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Guillaume DRAMAIS qui m'a proposé ce sujet de stage très intéressant et m'a intégrée à l'unité Hydraulique-Hydrologie de l'IRSTEA de Villeurbanne. Je le remercie également pour l'aide qu'il m'a apportée tout au long de mon travail de fin d'études. Je remercie également Benoît CAMENEN qui a répondu à bon nombre de mes questions et m'a épaulée notamment sur la partie modélisation.

Je remercie l'ensemble des personnes du service métrologie : Fabien THOLLET, Alexis BUFFET, Mickaël LAGOUY, Chloé LE BESCOND, Robert KENNEL pour leur soutien et leur accompagnement dans le service. Ils m'ont, en particulier permis de découvrir et de mieux me former au terrain. Merci à toutes les personnes qui ont tourné la manivelle de la trille à Bognes pendant les jours de chasse. Enfin, je remercie les équipes d'hydraulique et d'hydrologie pour leur aide et leur gentillesse qui m'ont permis de mieux appréhender mon sujet de travail.

Merci à Francis NEZONDET de présider ce jury, ainsi qu'à Erwan LE BARBU d'avoir accepté d'être expert pour ce travail de fin d'étude.

SOMMAIRE

| | |
|--|-----------|
| Remerciements..... | 5 |
| Liste des illustrations | 8 |
| Liste des tableaux..... | 10 |
| Liste des annexes | 10 |
| Introduction | 11 |
| Partie I : Éléments de contexte | 12 |
| 1 Transport solide fluvial..... | 12 |
| 1.1 Les enjeux liés au transport solide | 12 |
| 1.2 Éléments de définition..... | 13 |
| 1.3 Variabilité de la répartition des sédiments..... | 14 |
| 2. Les chasses du Rhône | 16 |
| 2.1 Le Rhône et ses barrages..... | 16 |
| 2.2 Le principe des chasses..... | 17 |
| 2.3 Acteurs et chasses du Rhône | 18 |
| 2.4 Intérêt et objectifs des chasses pour la recherche | 19 |
| Partie II : L'estimation de flux sédimentaires..... | 21 |
| 1 Un peu de théorie..... | 21 |
| 1.1 Contrainte et concentration | 21 |
| 1.2 Approche du calcul de flux..... | 25 |
| 1.3 Choix des formules de transport solide | 27 |
| 2 Conversion des données | 31 |
| 2.1 Calcul de charge sableuse | 31 |
| 2.2 Modélisation du transport solide | 32 |
| 2.3 Sensibilité des modèles | 34 |
| Partie III : Mise en place d'un protocole de suivi de la charge sableuse..... | 36 |
| 1 Appareils de mesures | 36 |
| 1.1 Les différentes techniques existantes pour la mesure de flux sédimentaire | 36 |
| 1.2 Méthode d'échantillonnage..... | 38 |
| 1.3 Les appareils d'échantillonnages | 41 |
| 1.4 Dispositifs complémentaires..... | 43 |
| 2 Traitement des données | 45 |

| | | |
|---|---|-----------|
| 2.1 | Analyses granulométriques..... | 45 |
| 2.2 | Prétraitement des données brutes..... | 45 |
| 2.3 | Incertitudes de mesures..... | 47 |
| Partie IV : Applications sur des jeux de données existants..... | | 49 |
| 1 | Calcul de flux sédimentaire sur le Mékong..... | 49 |
| 1.1 | Présentation des données..... | 49 |
| 1.2 | Site de Luang Prabang..... | 50 |
| 1.3 | Site de Xayaburi..... | 51 |
| 2 | Calcul de flux sédimentaire lors des crues de Barcarin..... | 51 |
| 2.1 | Présentation des données..... | 51 |
| 2.2 | Les concentrations relevées lors des crues à Barcarin..... | 53 |
| 2.3 | Crue du 12 novembre 2012..... | 55 |
| 2.4 | Crue du 29 novembre 2012..... | 58 |
| 3 | Bilan des différents essais..... | 59 |
| Partie V : Mesures et modélisation des flux sableux lors des chasses du Rhône..... | | 61 |
| 1 | Protocole de mesures et mise en place..... | 61 |
| 2 | Site de Bognes..... | 63 |
| 2.1 | Les concentrations relevées à Bognes..... | 63 |
| 2.2 | Les flux sédimentaires à Bognes..... | 65 |
| 2.3 | Modélisation de la dynamique sédimentaire à Bognes..... | 65 |
| 3 | Site de Chancy aux Ripess..... | 66 |
| 3.1 | Les concentrations relevées aux Ripes..... | 66 |
| 3.2 | Les flux sédimentaires aux Ripes..... | 68 |
| 3.3 | Modélisation de la dynamique sédimentaire aux Ripes..... | 69 |
| 4 | Site de Champagneux..... | 70 |
| 4.1 | Les concentrations relevées à Champagneux..... | 71 |
| 4.2 | Les flux sédimentaires à Champagneux..... | 72 |
| 5 | Bilan et limites des résultats des chasses..... | 73 |
| Conclusion..... | | 75 |
| Bibliographie..... | | 76 |
| Annexes..... | | 79 |

LISTE DES ILLUSTRATIONS

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Les différents modes de transports des sédiments dans les cours d'eau [Henry E.] | 14 |
| Figure 2 : Profils de concentration de matière en suspension datant du 28.7.2010 et du 29.6.2012 à la station Rhein-Diepoldsau en Suisse [Grasso A. & al, OFEV (2014)] | 15 |
| Figure 3 : Localisation des aménagements hydro-électriques sur le Haut-Rhône côté français [Compagnie Nationale du Rhône (2012)] | 17 |
| Figure 4 : Schéma montrant les modifications et l'alluvionnement couramment induits par un barrage sur un cours d'eau [[Peteuil et al., 2013, Bravard et al., 2014]..... | 18 |
| Figure 5 : Sortie de la vanne de demi-fond du barrage de Génissiat lors des chasses du Rhône [Henry E.]..... | 19 |
| Figure 6 : Estimation du transport solide sur l'Arc en Maurienne à Sainte-Marie-de-Cuines (Mt : million de tonnes) [Camenen B. (2015)]..... | 20 |
| Figure 7 : Schéma d'un transect du Rhône illustrant les repères utilisés pour caractériser la concentration lors d'un prélèvement ponctuel [Henry E.]..... | 21 |
| Figure 8 : Variabilité des concentrations en sédiments dans des cours d'eau aux Etats-Unis [USGS] | 22 |
| Figure 9 : Représentation schématique du transport de sédiments en suspension [Camenen B. (2015)] | 25 |
| Figure 10 : Points de prélèvement dans une section du Mékong [Dramais G. (2013)] | 31 |
| Figure 11 : Profil bathymétrique d'une section du Mékong [Camenen B.]..... | 33 |
| Figure 12 : Distribution verticale de la matière en suspension par rapport à la taille des grains des matières en suspension [Grasso A., Bérod D, Hodel H. (2012)] | 39 |
| Figure 13 : L'US P-72 déployé lors des chasses du Rhône le 19 mai 2016 à Bognes [HENRY E.] | 41 |
| Figure 14 : Préleveur iso-cinétique de l'OFEV déployé lors des chasses du Rhône le 25 mai 2016 à la station hydrométrique de Chancy [HENRY E.]..... | 42 |
| Figure 15 : Préleveur instantané de Van Dorn lors des chasses du Rhône le 24 mai 2016 à Champagneux [HENRY E.]..... | 43 |
| Figure 16 : ADCP déployé lors des chasses du Rhône le 24 mai 2016 à Chancy [Henry E.] | 44 |
| Figure 17 : Profil de vitesse d'un transect à Luang Prabang sur le Mékong le 05/08/2013, visualisation WinRiver, [Henry E.] | 46 |
| Figure 18 : Effet du taux d'échantillonnage sur les concentrations de sédiments en suspension mesurées pour quatre distributions de taille de sédiments. [Gray, J. R., Glysson, G. D. et Edwards, T. E. (2008)] | 47 |
| Figure 19 : Modélisation du transport de sable à Luang Prabang le 05/08/2013 [Camenen B., Henry E.] | 50 |
| Figure 20 : Modélisation du transport de sable à Xayaburi le 09/08/2013 [Camenen B., Henry E.] | 51 |
| Figure 21 : Le Rhône à Barcarin concentration en MES le 12 novembre | 54 |
| Figure 22 : Le Rhône à Barcarin concentration en sable le 12 novembre..... | 54 |
| Figure 23 : Le Rhône à Barcarin concentration en MES le 29 novembre | 54 |
| Figure 24 : Le Rhône à Barcarin concentration en sable le 29 novembre..... | 54 |
| Figure 25 : Le Rhône à Barcarin concentration en MES le 13 novembre | 55 |
| Figure 26 : Le Rhône à Barcarin concentration en MES le 30 novembre | 55 |

| | |
|--|----|
| Figure 27 : Evolution du flux de sable et du débit du Rhône lors de la crue du 12 novembre à Barcarin [Henry E.]..... | 55 |
| Figure 28 : Évolution du flux de MES et du débit du Rhône lors de la crue de 12 novembre à Barcarin [Henry E.]..... | 56 |
| Figure 29 : Modélisation du transport de sable à Barcarin lors de la crue du 12/11/2012 [Henry E.]..... | 56 |
| Figure 30 : Modélisation du transport de sable grossier à Barcarin lors de la crue du 12/11/2012 [Henry E.]..... | 57 |
| Figure 31 : Évolution du flux de sable et du débit du Rhône lors de la crue du 29 novembre à Barcarin [Henry E.]..... | 58 |
| Figure 32 : Évolution du flux de MES et du débit du Rhône lors de la crue du 29 novembre à Barcarin [Henry E.]..... | 58 |
| Figure 33 : Modélisation du transport de sable à Barcarin lors de la crue du 29/11/2012 [Henry E.]..... | 59 |
| Figure 34 : Localisation des sites de mesures sélectionnés pour l'échantillonnage de matière en suspension lors de la chasse du Rhône 2016 [IRSTEA]..... | 61 |
| Figure 35 : Illustration de la méthode de prélèvement Equal Discharge Increment [Gray].R., Landers M.N. (2014)]..... | 62 |
| Figure 36 : Les installations sur le site de Bognes (traille mécanique manuelle, préleveur USGS) [Henry E.]..... | 63 |
| Figure 37 : Le Rhône à Bognes concentration en MES le 20 mai..... | 64 |
| Figure 38 : Le Rhône à Bognes concentration en sable le 20 mai..... | 64 |
| Figure 39 : Le Rhône à Bognes concentration en MES le 27 mai..... | 64 |
| Figure 40 : Le Rhône à Bognes concentration en sable le 27 mai..... | 64 |
| Figure 41 : Le Rhône à Bognes concentration en MES le 30 mai..... | 64 |
| Figure 42 : Le Rhône à Bognes concentration en sable le 30 mai..... | 64 |
| Figure 43 : Modélisation du transport de sable à Bognes dans le Rhône les 20, 27 et 30 mai 2016 [Henry E.]..... | 66 |
| Figure 44 : Le Rhône à Chancy concentration en MES le 24 mai..... | 67 |
| Figure 45 : Le Rhône à Chancy concentration en sable le 24 mai..... | 67 |
| Figure 46 : Le Rhône à Chancy concentration en MES le 25 mai..... | 67 |
| Figure 47 : Le Rhône à Chancy concentration en sable le 25 mai..... | 67 |
| Figure 48 : Le Rhône à Chancy concentration en MES le 26 mai..... | 67 |
| Figure 49 : Le Rhône à Chancy concentration en sable le 26 mai..... | 67 |
| Figure 50 : Barrage de Verbois lors des chasses et échantillonnage à Chancy aux Ripes (préleveur de POFEV) [Henry E.]..... | 68 |
| Figure 51 : Modélisation du transport de sable à Chancy dans le Rhône les 24, 25 et 26 mai 2016 [Henry E.]..... | 69 |
| Figure 52 : Modélisation en échelle arithmétique du transport de sable à Chancy dans le Rhône les 24, 25 et 26 mai 2016 [Henry E.]..... | 70 |
| Figure 53 : Projection des vitesses moyennes ADCP sur les transects de mesure à Champagneux [Dramais G., Buffet A., Naudet G.]..... | 71 |
| Figure 54 : Le Rhône à Champagneux, concentration en MES le 23 mai [Dramais G, Henry E.]..... | 71 |
| Figure 55 : Le Rhône à Champagneux, concentration en MES le 25 mai [Dramais G, Henry E.]..... | 72 |
| Figure 56 : Sources d'incertitudes et pistes d'amélioration déduites des mesures et modélisations réalisées lors des chasses du Rhône [Henry E.]..... | 74 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|----|
| Tableau 1 : Résumé des différents modèles développés utilisable pour le transport de sable en cours d'eau [Henry E.]..... | 27 |
| Tableau 2 : Récapitulatif des différentes méthodes de mesures de la charge de fond en fonction de leur facilité de mise en œuvre et de traitement et des coûts d'installation et de mesures [Camenen B. (2015)]...... | 37 |
| Tableau 3 : Table regroupant les informations de concentration et de granulométrie des prélèvements de matière en suspension réalisés le 5 août 2013 à Luang Prabang. [Dramais G., Camenen B., Le Coz J. (2013)]..... | 49 |
| Tableau 4 : Données d'échantillonnages recueillis à Barcarin le 12/11/2012 [CEREGE (2012)] | 52 |
| Tableau 5 : Exemple de séries de données granulométriques transmises pas le CEREGE sur les prélèvements réalisés le 12/11/2012 à Barcarin.. | 53 |
| Tableau 6 : Résumé des différents flux liquides et solides mesurés à Bognes [Henry E.]..... | 65 |
| Tableau 7 : Résumé des différents flux liquides et solides mesurés à Chancy aux Ripes [Henry E.] | 68 |
| Tableau 8 : Résumé des différents flux liquides et solides mesurés à Champagneux [Henry E.]..... | 72 |

LISTE DES ANNEXES

| | |
|--|----|
| Annexe 1 : Récapitulatif des différentes méthodes de mesure de la charge de fond et de leurs intérêts..... | 79 |
| Annexe 3 : Le Rhône a Barcarin, concentration de matières en suspension..... | 79 |
| Annexe 2 : Routine de modélisation sous Matlab commentée..... | 87 |

INTRODUCTION

J'ai réalisé mon travail de fin d'étude au sein de l'équipe métrologie de l'unité de recherche hydrologie-hydraulique de l'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture Lyon Villeurbanne (IRSTEA). Cet organisme est un établissement public à caractère scientifique et technologique français de recherche dans le domaine de l'environnement et de l'agriculture. Il travaille depuis plus de 30 ans, sur les enjeux majeurs d'une agriculture responsable et de l'aménagement durable des territoires, la gestion de l'eau et les risques associés (sécheresse, crues, inondations), l'étude des écosystèmes complexes et de la biodiversité dans leurs interrelations avec les activités humaines.

En collaboration avec les chercheurs et les ingénieurs de l'Unité de Recherche Hydrologie Hydraulique, l'équipe métrologie oriente, définit et met en œuvre les moyens techniques nécessaires pour réaliser les différents projets de recherche. Le transport solide est une des problématiques sur laquelle il reste encore de nombreux progrès à réaliser. L'unité de recherche Hydrologie Hydraulique profite donc de la variété des nombreux cours d'eau de la région Rhône-Alpes pour faire de la recherche appliquée dans ce domaine. Ce travail de fin d'étude s'inscrit dans cette logique d'acquérir des connaissances sur le transport solide en rivière et plus spécifiquement sur le transport de sable.

Les chasses de barrage réalisées sur le Rhône en mai 2016 sont une occasion particulièrement intéressante pour réaliser un suivi de transport solide. En effet, les nombreux barrages perturbent et bloquent le déplacement des sédiments dans l'eau. L'ouverture de ces barrages permet de remobiliser une partie importante de ces sédiments et d'étudier la manière dont ils sont portés par l'eau en temps normal. Il s'agit donc d'obtenir des informations sur la distribution granulométrique du Rhône, sur les concentrations en sable, sur la répartition des flux de sables dans la section du cours d'eau ou sur une verticale...

La compréhension de la dynamique sédimentaire du sable en est encore à ses débuts. Même si la recherche sur le transport solide a fait ses preuves depuis plusieurs dizaines d'années maintenant, les modèles existants sont principalement des modèles s'appliquant soit aux sédiments très grossiers, soit à l'ensemble des matières en suspension. Le sable correspond à une classe de taille granulométrique plus précise et son comportement se situe en limite de ces deux catégories. Les incertitudes sur les mesures de flux se sont pas encore maîtrisées et sont difficiles à quantifier.

Mon TFE comprend les objectifs suivants :

- L'identification de protocoles et méthodes employés par des équipes qui ont effectué ou publié sur ce type de campagnes de mesure. L'identification des stratégies de mesure et la manière dont seront estimés les flux en fonction des sites possibles sur le Haut-Rhône.
- La participation à l'élaboration d'un protocole expérimental : Définir un ou plusieurs protocoles de mesure selon les sites choisis qui permettent de mettre en évidence l'évolution spatiale et temporelle du flux de sable dans la section choisie.
- La participation aux mesures pendant la chasse : mettre en œuvre le protocole pendant la chasse du Haut-Rhône
- Le travail sur les calculs de flux de sable et les différentes méthodes de calcul dans le but d'obtenir une première analyse des données de la chasse.

PARTIE I : ÉLÉMENTS DE CONTEXTE

1 Transport solide fluvial

1.1 Les enjeux liés au transport solide

En conditions naturelles, les cours d'eau présentent un écoulement d'eau mais aussi transportent de la matière solide. Ils établissent une combinaison entre des variables de contrôle : la puissance (pente et débit) ou flux d'eau et la charge solide (volume, taille des sédiments) ou flux de sédiment et des variables de réponse : morphologie, variation des profils en long et en travers, sinuosités, faciès... Il s'agit du principe de la balance de Lane¹.

Le transport des sédiments et les processus de dépôt et d'érosion permettent au cours d'eau d'ajuster sa morphologie par rapport aux variables de contrôle. L'écoulement, via son débit liquide et la pente du cours d'eau, dispose d'une puissance permettant de transporter un certain débit solide. Si le débit liquide augmente, l'équilibre sera retrouvé via une augmentation du débit solide et/ou de la pente suite à de l'érosion. Inversement, si on réduit le débit solide, comme par exemple à l'aval d'un barrage, la pente du fond est réduite.

On peut appeler sédiment² tout matériau fragmenté qui est transporté, suspendu dans ou déposé par des agents naturels, tels que l'eau, l'air ou la glace. Dans le cadre de cette étude pour les chasses du Rhône, seuls ceux transportés par l'eau vont être étudiés. La quantité totale de matériel érodé qui est acheminé de la source à un point de contrôle du cours d'eau en aval s'appelle la production de sédiment à celle-ci s'ajoute les sédiments provenant de l'érosion brute (volume brut de sédiments détachés par l'impact des gouttes de pluie et/ou arrachés par le ruissellement).

La perturbation du transport sédimentaire peut créer de nombreux problèmes comme l'érosion des sols, l'érosion locale, la dégradation et l'alluvionnement des cours d'eau, l'envasement des canaux d'irrigation, de canaux de navigation, la perte de capacité de réservoirs d'eau, de méandres des cours d'eau, et des dommages aux aménagements hydrauliques.

Les sédiments en suspension peuvent s'accumuler au fond des rivières et des bassins augmentant le risque d'inondation et réduisant la vie des bassins pour des concentrations élevées de sédiments fins dans la colonne d'eau (Clark et al., 1985)³. Les sédiments flottants augmentent considérablement les coûts dans le traitement de l'eau potable industrielle.

Ces sédiments ont divers effets sur l'eau, y compris au niveau de la transmission de polluants (Tessier, 1992⁴) et des substances organiques toxiques. La présence de matière en suspension peut également conduire à une réduction de l'activité photosynthétique et donc la production primaire (Ward, 1992; Persaud & Jaagumagi, 1995)⁵.

¹ Lane, E. W. (1955). The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering. In Proceedings (American Society of Civil Engineers), volume 745, page 1 :17.

² Wigham John M. (1972), Transport des sédiments, Chapitre XI, Editeur-en-chef Donald M. GRAY, Université de la Saskatchewan, Saskatoon, Canada

³ Clark, E. H., Haverkamp, J. A., Chapman, W.

1985. Eroding Soils. The Off-Farm Impacts. The Conservation Foundation, Washington D.C., 252 pp.

⁴ Tessier, A. 1992. Sorption of Trace Elements on Natural Particles in Oxidic Environments. In: Environmental Particles, Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, pp. 425–453.

⁵ Ward, N. 1992. The problem of sediment in water for fish. Technical Note 21, Northwestern Ontario Boreal Forest Management, Ontario Ministry of Natural Resources, Thunder Bay, Ontario. 8 p

En raison de la répartition spatiale et temporelle inégale de concentration et des flux sédimentaires dans les rivières, leur surveillance est un processus complexe. C'est pourquoi, l'Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR) a été créé en 2009 à la suite de questions qui ont émergé dans le cadre du Plan Rhône. Il a été mis en place par des équipes de recherche dont celles de l'IRSTEA réparties sur l'ensemble du linéaire du fleuve. Pour améliorer le suivi en continu, les scientifiques français ont développé des méthodes d'échantillonnage s'appuyant notamment sur un appareil de mesure acoustique – l'ADCP (acoustic doppler current profiler) –, qui permet de déterminer la vitesse d'écoulement ainsi que de se faire une idée de la répartition et de la concentration des matières en suspension. Grâce à un réseau de mesures, ils travaillent à quantifier les flux de sédiments fins le long du Rhône et les apports des différents bassins versants, et suivre chaque classe de sédiments mais aussi les contaminants qui leur sont associés et ce, du Lac Léman jusqu'à la mer... Des travaux récents ont d'ailleurs permis de déterminer précisément le devenir de contaminants particulièrement nocifs pour l'homme et l'environnement comme le mercure et les polychlorobiphényles (PCB).

La concentration des sédiments en suspension dans les rivières Suisses est également mesurée depuis les années 1960 par la division Hydrologie de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV)⁶. Le réseau de surveillance a été mis en place pour surveiller l'érosion, le transport et le dépôt de sédiments dans les rivières et les lacs. Les séries de données de ces concentrations sont utilisées pour estimer les charges sédimentaires quotidiennes, mensuelles et annuelles; pour analyser les caractéristiques statistiques telles que les tendances saisonnières, les tendances à long terme, la répartition des fréquences; pour étudier la corrélation avec les débits et les caractéristiques des bassins versants, etc.

1.2 Éléments de définition

Le transport des sédiments en rivière est un processus complexe. La façon d'obtenir les meilleurs résultats pour estimer la production des sédiments consiste encore à mesurer le taux de transport des sédiments. Dans les cours d'eau on distingue plusieurs modes de transport des sédiments, dépendant de la taille des particules, des conditions hydrauliques et des apports provenant de l'amont. Ces différentes formes de transport de matériaux se produisent simultanément dans les cours d'eau naturels et il n'y a pas de délimitation bien nette entre elles.

En premier lieu, par commodité, on distingue deux catégories de transport solide : la suspension de lessivage (washload) et le transport de la charge de fond. La charge solide en suspension de lessivage correspond aux sédiments qui ne séjournent en aucun temps sur le lit du canal : elle diffère de la charge de ruissellement avec des particules très fines qui se déposent lorsque l'eau n'est pas agitée.

La charge de fond qui concerne des flux sablo-graveleux dans l'eau est transportée selon deux modes de progression qui sont le charriage (appelé aussi bedload; les matériaux peuvent se mouvoir soit par saltation, soit par roulage, soit par glissement près du fond) et la suspension de fond aussi

⁶ Grasso A., Bérod D., Hodel H., Jakob A., Lalk P. et Spreafico M. (2014), Représentativité des échantillons par rapport aux matières solides en suspension, Expériences d'échantillonnage du Département d'hydrologie de l'OFEV, 7p.

appelée suspension graduée de sables. Les sédiments transportés par suspension de fond se déplacent sur la colonne d'eau avec une vitesse proche de celle de l'eau du à un équilibre hydrodynamique local.

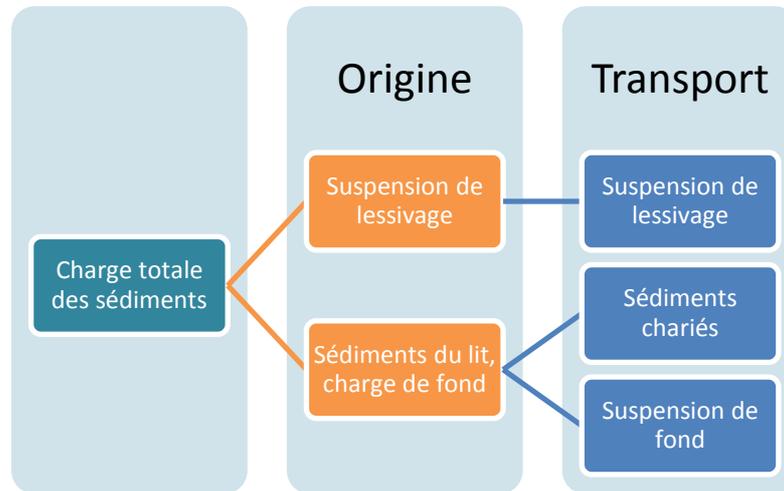


Figure 1 : Les différents modes de transports des sédiments dans les cours d'eau [Henry E.]

Usuellement, on englobe sous les termes « matière en suspension (MES) » toutes les particules non dissoutes maintenues en suspension dans le liquide par effet d'agitation⁷. On regroupe la matière dite colloïdale et la matière en suspension à proprement parler. Ici on s'intéresse, uniquement à la matière en suspension sédimentaire. Il s'agit donc de matériaux allant du micromètre au millimètre. Les sédiments en suspension transportés (par suspension de lessivage et suspension graduée de sable) dans les courants sont du sable fin, du limon et de l'argile.

L'érosion du bassin est la principale source de matières en suspension. Ce phénomène est très influencé par l'activité humaine comme l'agriculture ou la déforestation. Il existe différentes natures de MES. Il s'agit de particules minérales issues de la dégradation et de la fragmentation d'une roche mère ou de précipités naturels. Il peut également y avoir de la matière organique.

On considère que le sable a un diamètre granulométrique tel que $62 \mu\text{m} < d < 2 \text{ mm}$ selon la classification de Wentworth⁸. Bien qu'il fasse partie des matières en suspension, il est nécessaire d'avoir des vitesses d'eau plus importantes que pour l'argile et le limon pour qu'il se mette en suspension. C'est pour cela qu'il est transporté le plus souvent en suspension de fond.

1.3 Variabilité de la répartition des sédiments

La mesure des flux sédimentaires est la mesure de la quantité de sédiments (volume ou masse) se déplaçant au travers d'une section pendant un temps donné. Elle est cependant soumise à un problème de variabilité spatio temporelle sur la charge de fond notamment parce que la section

⁷ Blum, A., Rouzeau, O., Guiraud, K., Bourdaa, S., & Joseph, B. (2014). Suivi de la turbidité des eaux en Guyane. Etat des lieux et recommandations. Approche par télédétection. BRGM

⁸ Wentworth, C. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, 30:377–392.

d'un cours d'eau évolue. Les données actuelles montrent que sans prise en compte du transport de sable par suspension, le charriage peut représenter entre 5 et 10% du transport total pour des événements courants mais plus de 30% en cas de grande crue.⁹

D'après Edward et Glysson¹⁰ (1999), lorsque le flux de sédiment en suspension se déplace à une vitesse de moins de 0,6 m/s alors on considère que seuls les limons et argiles sont transportés. A partir de 0,6 m/s les sables peuvent également être pris en considération avec les argiles et les limons. Lorsque la vitesse d'écoulement dépasse 3,7 m/s, la forte turbulence mélange les particules en suspension. Dans ce cas, la distribution des sédiments en suspension est considérée comme uniforme. Si le débit est compris entre 0,6 et 3,7 m / le sable est également mobilisé, puis transporté en suspension. Cependant, la distribution de la concentration de sable n'est pas uniforme. La plus haute concentration de matière en suspension peut être trouvée dans les couches les plus profondes du cours d'eau. Les effets de gravité et de turbulence permettent l'échange vertical dans la colonne d'eau des matières en suspension. Il existe une corrélation entre le débit et la concentration des solides en suspension.

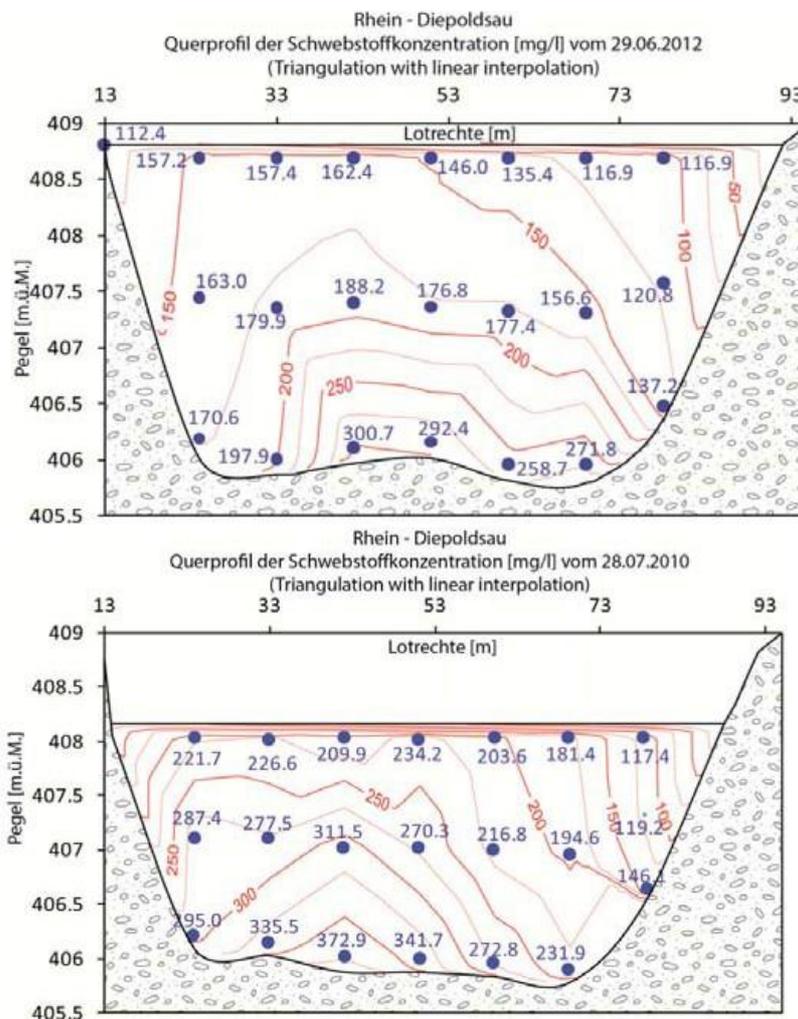


Figure 2 : Profils de concentration de matière en suspension datant du 28.7.2010 et du 29.6.2012 à la station Rhein-Diepoldsau en Suisse [Grasso A. & al, OFEV (2014)]

Les concentrations augmentent avec la profondeur de l'eau et diminuent sur les bords de la rivière

⁹ Camenen, B. (2015), Mesure in situ de la dynamique sédimentaire des cours d'eau, Outils et méthode, IRSTEA, UR HHLY, centre de Lyon-Villeurbanne, Agence de l'eau Rhône méditerranée, 72p

¹⁰ Edwards, T.K., Glysson, G.D. 1999, Field methods for measurement of fluvial sediment: Techniques of Water-Resources Investigations of the U.S. Geological Survey, Book 3, Chapter C2, 89 p.

Les flux de sables dépendent énormément des contraintes locales. Or, il y a généralement moins de contraintes locales en milieu de cours d'eau ce qui explique que les points les plus représentatifs soient souvent en milieu de cours d'eau.

Les plus grandes quantités de matières solides en suspension sont transportées lors des crues. La concentration des sédiments n'est pas uniformément distribuée généralement dans la section du cours d'eau. Le profil de concentration est un outil essentiel pour la détermination du point d'échantillonnage le plus représentatif et pour vérifier la représentativité de l'échantillon. L'expérience du Département d'hydrologie OFEV¹¹ montre que malgré ces échantillonnages les mesures prises en bords de cours d'eau sous-estiment la concentration de la matière en suspension .

Le lit d'un cours d'eau est soumis à des changements. Les lignes de courant et la vitesse de l'eau varient avec le temps et font évoluer le profil du lit et par conséquent la répartition des sédiments en suspension. Etant donné que la concentration de matière en suspension n'est pas répartie uniformément le long du profil transversal du cours d'eau, le contrôle de la représentativité de l'échantillon par rapport à la concentration du cours d'eau est un élément important du suivi des sédiments en suspension. Pour vérifier la représentativité des échantillonnages, l'idéal est donc d'exécuter régulièrement des profils de concentration dans les cours d'eau surveillés.

2. Les chasses du Rhône

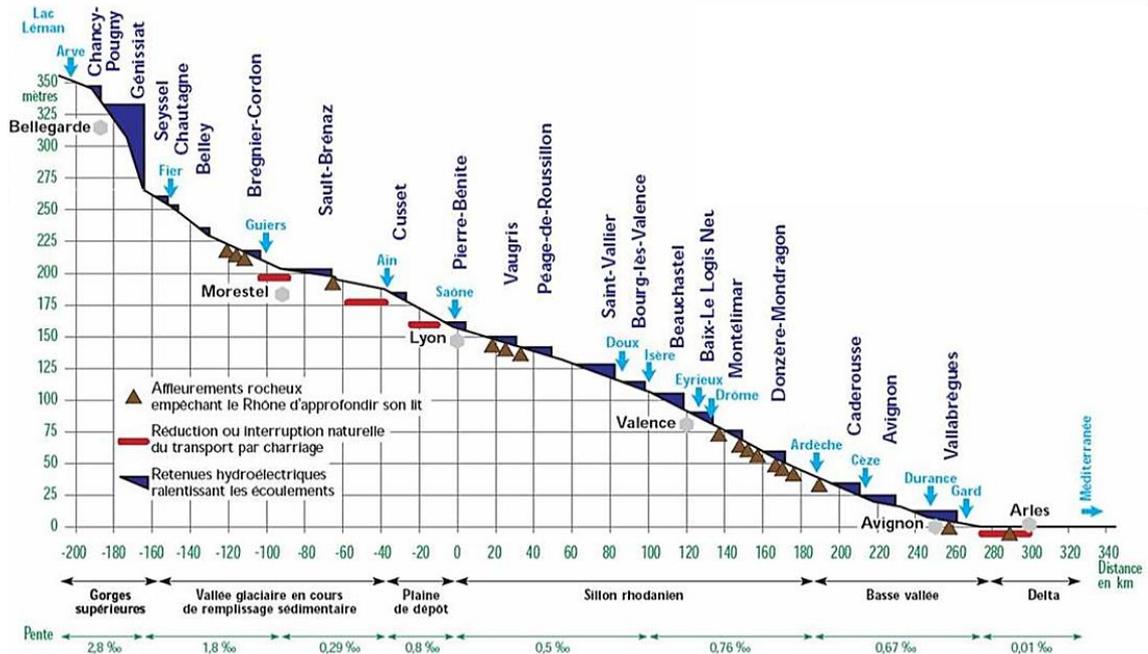
2.1 Le Rhône et ses barrages

Avec un débit moyen de 1700 m³/s et un bassin versant de 95500 km², le Rhône est l'un des principaux fleuves européens. Il prend sa source en Suisse, dans le massif du Saint Gothard, et parcourt 810 km, dont 522 km en France avant de se jeter dans la mer Méditerranée. Le Rhône constitue l'apport principal de matières solides à la Méditerranée. D'après le rapport¹² United Nations Environment Programme dans le cadre du Plan d'Action Méditerranéen les apports spécifiques annuels de sédiments du Rhône à la Méditerranée sont de 324 t/km²/an, ce qui est près de deux fois supérieur aux valeurs obtenues pour les autres fleuves méditerranéens, pourtant déjà caractérisés par des taux d'érosion très élevés. Néanmoins, avec une concentration moyenne en matière en suspension de 120 mg/L (Pont, 1997; Ollivier et al., 2010), le Rhône reste parmi les fleuves du monde pour lesquelles les concentrations en MES sont faibles, par comparaison avec la moyenne mondiale de 535 mg/L établie par Berner (2012). Le cours du Rhône est divisé en cinq entités hydrographiques : le Rhône Alpestre est le tronçon de la source au Lac Léman ; le Haut-Rhône est situé de l'embouchure du Lac Léman au confluent de la Saône à Lyon et en aval le Rhône moyen, aval et le Delta. Les chasses de mai 2016 ont lieu sur le Haut-Rhône.

¹¹ Grasso A., Bérold D., Hodel H., Jakob A., Lalk P. et Spreafico M. (2014), Représentativité des échantillons par rapport aux matières solides en suspension, Expériences d'échantillonnage du Département d'hydrologie de l'OFEV, 7p.

¹² UNEP/MAP/MED (2003). Pol : Riverine transport of water, sediments and pollutants to the Mediterranean sea. MAP Technical Reports Series No. 141, UNEP/MAP, Athens. 121 p.

L'aménagement hydro-électrique du Haut-Rhône a débuté dès la fin du XIX^e siècle avec la mise en opération en 1871 du barrage de Bellegarde en France. Au total, 10 barrages de taille importante sont situés sur le Haut-Rhône.



2.2 Le principe des chasses

En stockant l'eau, les barrages accumulent aussi les sédiments que la rivière transporte. Plus le volume d'eau du barrage est grand, plus les dépôts sédimentaires le sont avec pour conséquences une réduction des capacités de stockage en eau du barrage et une détérioration possible de la qualité de l'eau stockée. À terme, ces dépôts peuvent nuire au bon fonctionnement de l'ouvrage et notamment, augmenter le risque d'inondation.

Pour faire face à l'encombrement provoqué par ces sédiments au fil du temps, la solution est d'ouvrir certaines vannes des barrages lors des crues ou bien lors d'opérations spécifiques appelées "chasse" ou "abaissement contrôlé de la retenue". Dans les deux cas, il s'agit d'abaisser le niveau d'eau de la retenue pour accélérer l'écoulement de l'eau et entraîner une grande partie des sédiments déposés. Les sédiments grossiers qui sont transportés par charriage au fond de la rivière, s'accumulent au fond de la retenue et ne peuvent être évacués que par la vidange de fond du barrage. Les sédiments fins qui sont en suspension sur toute la hauteur d'eau, peuvent se déposer sur les zones de faible vitesse d'écoulement de l'eau en amont du barrage. Ils sont évacués lors des abaissements du niveau d'eau par les différents organes d'évacuation du barrage.

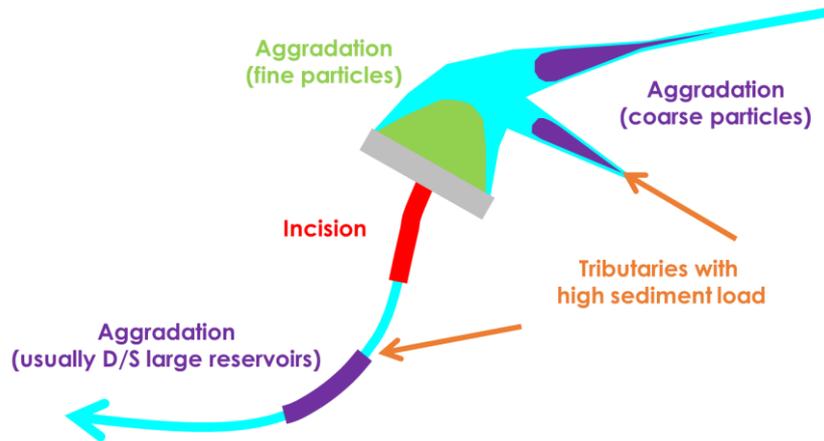


Figure 4 : Schéma montrant les modifications et l'alluvionnement couramment induits par un barrage sur un cours d'eau [Peteuil et al., 2013, Bravard et al., 2014]

Cette chasse du Haut-Rhône est une opération de déstockage des sédiments des barrages suisses de Verbois et Chancy-Pougny sur le Rhône. L'objectif est d'évacuer près de 1,5 millions de m³ de sédiments de chacune de ces retenues pour restaurer leur capacité de stockage et éviter les inondations dans le canton de Genève. Libérer de telles quantités de matières n'est pas sans conséquence. L'accompagnement est ici obligatoire sous peine d'avoir une accumulation de matière devant les ouvrages de l'aménageur français du Rhône. Cela induirait des risques majeurs sur la sûreté hydraulique. On assiste alors à une translation des problèmes liés à l'exhaussement des fonds en amont des retenues et aux forts taux de matières en suspension. Si l'accumulation nuit à la production d'électricité et à la pérennité des structures, le transport sédimentaire peut nuire à la vie faunistique, floristique et diminuer la concentration en dioxygène dans l'eau. Il est donc question d'assurer le bon acheminement de cet important flux de matière en respectant les seuils réglementaires de concentrations à ne pas dépasser.

2.3 Acteurs et chasses du Rhône

Si des opérations de chasses existent bien en France sur différents cours d'eau, celles qui sont réalisées sur le Rhône sont principalement à l'initiative des suisses. C'est pour cette raison que l'on parle d'accompagnement des chasses Suisses sur le Haut-Rhône. Il s'agit d'une opération Suisse, suivie par le gestionnaire Français qui se voit dans l'obligation de réguler la matière remise en suspension dans le Rhône. Néanmoins sans les barrages Suisses le gestionnaire Français serait également obligé de prévoir des chasses.

Les responsabilités de ces opérations sont partagées entre trois exploitants, les Services Industriels Suisses (SIG) pour la retenue de Verbois, le SFMCP (Société des Forces Motrices de Chancy-Pougny) pour la retenue de Chancy-Pougny, et la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) pour le barrage de Génissiat et le Haut Rhône français.

Les chasses précédentes ayant montré que les conséquences écologiques sont importantes, la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) contrôle les mesures qui sont effectuées par CNR à la station de Seyssel. Ce site, situé à quelques kilomètres à l'aval du barrage de Génissiat, constitue le point de mesure réglementaire français. Le taux de matières en suspension mesuré au pont de Seyssel ne doit pas excéder :

- 5 g/litre en moyenne cumulée sur la période pendant laquelle la cote du plan d'eau à l'amont du barrage de Génissiat est inférieure à 325,00 m NGF,
- 10 g/litre pendant plus de 6 heures consécutives,
- 15 g/litre pendant plus de 30 minutes consécutives.

Doté de ses compétences en hydraulique des rivières et transport des sédiments, Irstea participe au suivi de cette délicate opération le long du Rhône (de Suisse en France) et travaille sur des solutions qui permettent d'en optimiser les manœuvres et le suivi.



Figure 5 : Sortie de la vanne de demi-fond du barrage de Génissiat lors des chasses du Rhône [Henry E.]

2.4 Intérêt et objectifs des chasses pour la recherche

Depuis plusieurs années déjà, les scientifiques d'Irstea travaillent, dans le cadre de l'observatoire des sédiments du Rhône, sur le suivi des sédiments du fleuve et de ses affluents. Ils assurent un suivi indépendant et approfondi, en continu et lors des opérations de déstockage des sédiments des barrages qui le ponctuent, comme celle qui a lieu actuellement.

Récemment, des travaux ont été menés sur le plus haut de ces barrages : le barrage hydroélectrique de Génissiat. L'enjeu est de comprendre les mécanismes de dépôts dans cette retenue caractérisée par sa forme allongée et son volume de 56 millions de m³ et définir les meilleures modalités d'évacuation des sédiments pendant les opérations de déstockage et tout au

long de l'année. Pour cela, il a fallu prendre en compte le fait que Génissiat fait partie d'une chaîne de plus de 10 barrages d'où une nécessaire coordination globale le long du fleuve pour entraîner les sédiments le plus loin possible, voire jusqu'à la mer.

Les chasses sont une opportunité particulièrement intéressante car elle rétablissent temporairement le transport sédimentaire et permettent ainsi d'étudier en condition réelle la dynamique sédimentaire qui se rapproche des conditions naturelles.

| Evènement | Q_{max} | Durée | Charriage | Suspension de lessivage |
|-------------------------------------|------------------------------------|-----------|--------------------------|--------------------------|
| Chasse ($\approx Q_1$) | $\approx 130 \text{ m}^3/\text{s}$ | 12 heures | $\approx 3 \text{ Mt}$ | de 15 à 50 Mt |
| Crue juin 2010 ($\approx Q_2$) | $\approx 200 \text{ m}^3/\text{s}$ | 38 heures | $\approx 20 \text{ Mt}$ | – |
| Crue mai 2008 ($\approx Q_{10}$) | $\approx 500 \text{ m}^3/\text{s}$ | 8 jours | $\approx 500 \text{ Mt}$ | $\approx 900 \text{ Mt}$ |
| Année typique sans événement majeur | $\approx 150 \text{ m}^3/\text{s}$ | 1 année | de 15 à 50 Mt | de 400 à 800 Mt |

Figure 6 : Estimation du transport solide sur l'Arc en Maurienne à Sainte-Marie-de-Cuines (Mt : million de tonnes) [Camenen B. (2015)]

PARTIE II : L'ESTIMATION DE FLUX SEDIMENTAIRES

1 Un peu de théorie

1.1 Contrainte et concentration

Idéalement, la meilleure méthode pour échantillonner sur un cours d'eau et déterminer la concentration en sédiments en suspension serait de recueillir la totalité du flux du courant sur une période de temps donnée, puis d'extraire, de sécher et de peser les sédiments. Cette méthode n'est en pratique pas réalisable. Au lieu de cela, on collecte des échantillons de sédiments en suspension pour définir la moyenne de la concentration des sédiments en suspension sur une verticale et on réalise suffisamment de verticales pour pouvoir représenter la section.

$$C_i = \frac{\int_{Bi+UZ}^{Di} c_i(s) v_i(s) ds}{\int_{Bi+UZ}^{Di} v_i(s) ds}$$

avec C_i la concentration en sédiment en suspension à la verticale i , B_i la hauteur du prélèvement sur la verticale i , UZ la distance du lit à la buse d'un échantillonneur lorsqu'il est posé au fond du lit (zone non échantillonnée), D_i la hauteur maximale en surface de l'eau sur la verticale i , $c_i(s)$ la concentration moyenne du prélèvement à la profondeur s sur la verticale i , et $v_i(s)$ la vitesse de l'eau à la profondeur s sur la verticale i .¹³

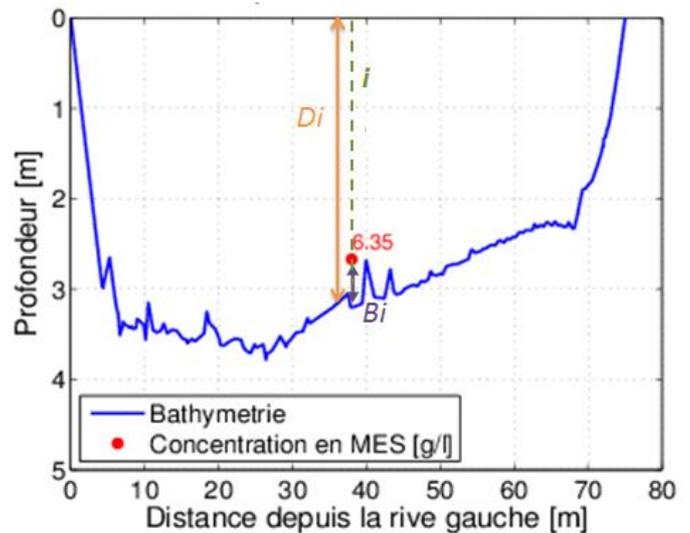


Figure 7 : Schéma d'un transect du Rhône illustrant les repères utilisés pour caractériser la concentration lors d'un prélèvement ponctuel [Henry E.]

Le but des mesures est d'arriver à collecter un échantillon représentatif pour caractériser à la fois la concentration, le temps et la section, sachant que le flux de sédiments n'est uniforme ni dans le temps ni dans l'espace (grande variabilité spatio-temporelle comme le montre les photos ci-dessous). De plus, ces variations spatio-temporelles peuvent être de long termes et/ou de court termes.

¹³ Gray J.R., and Landers M.N. (2014) Measuring Suspended Sediment. In: Ahuja S. (ed.) Comprehensive Water Quality and Purification, vol. 1, pp. 157-204. United States of America: Elsevier



Figure 8 : Variabilité des concentrations en sédiments dans des cours d'eau aux Etats-Unis [USGS¹⁴]

Détermination du profil de concentration de la suspension

On peut repartir de l'équation de conservation de la masse appliqué à la concentration c :

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \text{div} \vec{F} = 0$$

où c est la concentration volumique en sédiments et F le flux total de sédiments :

$$\vec{F} = \overrightarrow{F_{advection}} + \overrightarrow{F_{chute}} + \overrightarrow{F_{diffusion}} = c\vec{u} + cw\vec{e}_z - cW_s\vec{e}_z - \varepsilon_h \overrightarrow{\text{grad}}_h(c) - \varepsilon_v \frac{\partial c}{\partial z} \vec{e}_z$$

avec

- \vec{u} le vecteur vitesse horizontal,
- w la vitesse verticale,
- W_s la vitesse de chute verticale des particules solides
- $\overrightarrow{\text{grad}}_h$ le gradient de vitesse horizontal,
- ε_h et ε_v les diffusions turbulentes des particules horizontale et verticale.

Différentes formules peuvent être utiliser pour calculer W_s (Loi de Stokes 1851 s'appliquant à des sédiments très fins assimilés à une sphère : $W_s = \frac{g(\rho_s - \rho)D_{50}^2}{18\nu\rho}$...).

Pour des particules quelconques on utilise une formule du type :

$$W_s = \frac{v}{D_{50}} \left[\sqrt{0,25 \left(\frac{A}{B}\right)^{\frac{2}{m}} + \left(\frac{4d_*^3}{3B}\right)^{\frac{1}{m}} - 0,5 \left(\frac{A}{B}\right)^{\frac{1}{m}}} \right]^m$$

où A , B et m sont des coefficients d'ajustement

- Avec d_* diamètre sédimentologique $d_* = \left(\frac{(\rho_s - 1)g}{\nu^2}\right)^{\frac{1}{3}} D_{50}$

¹⁴ Nolan K.M. Gray J.R. et Glyssen G.D., U.S. Geological Survey, Introduction to Suspended-Sediment Sampling, Scientific Inverstigations Report 2005-5077

- $\nu = 1.10^{-6}$ viscosité cinématique de l'eau
- D_{50} (m) diamètre médian des particules

Soulsby (1997) a proposé une formule ajustée fonctionnant en cours d'eau pouvant prendre en compte la concentration:

$$W_s = \frac{\nu}{D_{50}} \left[\sqrt{10,36^2 + 1,049d_*^3} - 10,36 \right]$$

En conditions permanente l'équation de conservation de la masse se simplifie en :

$$\frac{\partial c(z)}{\partial z} + \frac{W_s}{\varepsilon_v} c(z) = 0$$

Le profil de concentration peut ainsi être estimé. Deux paramètres essentiels restent à évaluer afin de résoudre l'équation :

- La diffusion turbulente verticale ε_v
- La concentration de référence c_a au-dessus de la couche de charriage pour $z = z_a$ hauteur d'eau

$$c(z) = c_a \exp\left(-\int_{z_a}^z \frac{W_s}{\varepsilon_v} dz\right)$$

Le terme de diffusion turbulente

On utilise le nombre de Schmidt pour caractériser les écoulements de fluides dans lesquels interviennent simultanément viscosité et transfert de matière. Il est défini par la formule suivante :

$$\sigma = \frac{\varepsilon_v}{\nu_v}$$

avec ε_v diffusion turbulente verticale et ν_v viscosité turbulente verticale

Van Rijn (1984) a proposé une formulation simplifiée pour calculer ce nombre.

Si le paramètre de suspension $\frac{W_s}{U_*}$ est compris entre 0,1 et 1 alors :

$$\sigma = 1 + 2\left(\frac{W_s}{U_*}\right)^2$$

Avec U_* vitesse de frottement au fond $U_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$

Ce nombre de Schmidt traduit physiquement un échange d'énergie créé par la turbulence. Beaucoup de formulations ont été développées avec des études en canal ou en côtier par exemple (un certain nombre des ces formules sont présentées dans l'ouvrage de Camenen et Larson [2007]¹⁵). En pratique il s'agit aussi bien d'un nombre physique que d'un moyen de calibration. On le fait

¹⁵ Camenen B., Larson M. (2007) US Army Corps A Unified Sediment Transport Formulation for coastal inlet application, US Army Corps of Engineers, Coastal and Hydraulics Laboratory, ERDC/CHL CR-07-1, 231 p.

généralement varier entre 0,5 et 2 mais pour des grandes rivières comme le Rhône on peut le prendre égal à 1.

Profil de suspension

Le paramètre de Rouse $Pr = \frac{W_s}{U_* k}$ avec $k = 0,41$ (Constante de Von Kármán) permet de déterminer la forme du profil de suspension :

- $Pr > 5$: suspension proche du fond ($h/10$)
- $2 < Pr < 5$: suspension sur la première moitié de la couche limite
- $1 < Pr < 2$: suspension sur l'ensemble de la couche limite
- $Pr < 1$: suspension uniforme sur la couche limite

En 1938, Rouse a également proposé plusieurs loi de résolution à l'équation de conservation comme ce profil puissance :

$$\varepsilon_v = \sigma_p k U_* z$$

$$c(z) = c_a \left(\frac{z}{z_a} \right)^{\frac{W_s}{\sigma_p U_* k}}$$

Contrainte moyenne

On définit la contrainte moyenne appelée contrainte tangentielle au fond τ_0 (kg.m.s²) qui correspond à la force de frottement par unité de surface.

- En régime uniforme elle est fonction de la pente de fond I

$$\tau_0 = \rho \times g \times R_h \times I = \gamma \times R_h \times I$$

Avec R_h (m) rayon hydraulique (surface mouillée/périmètre mouillé) et γ ($= 10 \text{ kN/m}^3$) poids volumique de l'eau, ρ masse volumique de l'eau ($= 1000 \text{ kg/m}^3$)

- En régime non-uniforme elle est fonction de la pente d'énergie $J = \frac{dH}{dx}$ (H charge hydraulique)

$$\tau_0 = \rho \times g \times R_h \times J = \gamma \times R_h \times J$$

Souvent pour une rivière large comme le Rhône on peut considérer que $R_h = h$ (hauteur d'eau du fleuve).

Shields en 1936 a défini un paramètre permettant de savoir quel type de mouvements suivent les sédiments pour des sédiments compris entre 0,4 mm et 30 mm (Rappelons que les sables ont un diamètre compris entre 0,05 mm et 2 mm). Ce paramètre adimensionnel noté τ^* dépend de la contrainte moyenne τ_0 :

$$\tau^* = \frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho)gD_{50}} = \frac{\gamma R_h I}{(\gamma_s - \gamma)D_{50}} \text{ avec}$$

- D_{50} (m) diamètre médian des particules,
- γ_s (≈ 26 à 27 kN/m^3) poids volumique spécifique des grains solides,
- γ ($= 10 \text{ kN/m}^3$) poids volumique de l'eau,
- R_h (m) rayon hydraulique,
- I pente de fond

Voici les deux cas qui nous intéressent dans le cadre de cette étude sur les sables :

Si $0.25 < \tau^* < 2.5$: présence de charriage et de suspension, avec possibilité d'apparition de dunes sur le fond de la rivière.

Si $\tau^* > 2.5$: suspension intense, sans dunes.

1.2 Approche du calcul de flux

L'approche traditionnelle pour calculer le transport solide par suspension est de déterminer la distribution verticale des concentrations c et des vitesses u et d'intégrer le produit de ces deux quantités entre le sommet de la couche de charriage z_a et la surface ou hauteur du prélèvement (Van Rijn 1993).

$$q_{ss} = \int_{z_a}^h c(z)u(z)dz$$

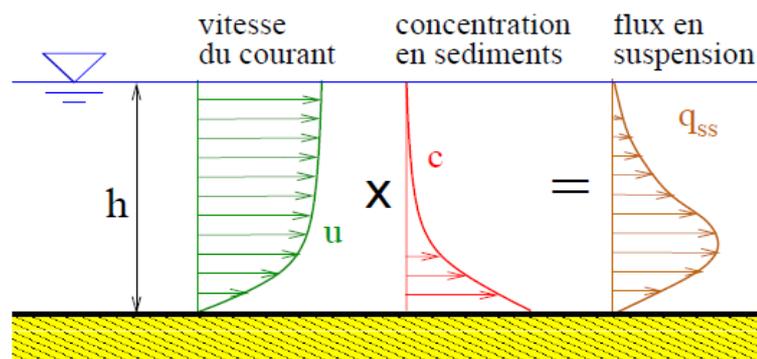


Figure 9 : Représentation schématique du transport de sédiments en suspension [Camenen B. (2015)]

La difficulté dans le calcul du transport solide en suspension est d'éviter le calcul de l'intégrale sur la hauteur d'eau qui est difficilement applicable d'un point de vue numérique car coûteux en temps.

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.

$$q_s = \bar{c}q = \frac{1}{h} \int_{z_a}^h c(z) dz \times q$$

Avec q le débit liquide par unité de largeur (qui correspond à la vitesse moyennée sur la hauteur d'eau au point de mesure).

Pour calculer le débit liquide ou solide on peut appliquer la méthode de la section médiane. Le débit de chaque secteur est calculé en multipliant $V_i \times Z_i$ (vitesse moyenne adjacente pour la verticale $i \times$ profondeur totale de la verticale i) pour chaque verticale par une largeur (distance horizontale $B_i + B_{i+1}$) qui est en fait la demi-somme des distances entre deux verticales adjacentes. La valeur de z_i pour les deux demi-largeurs voisines des berges peut être estimée. On peut calculer le débit total Q de la façon suivante (Norme ISO 748):

$$Q = V_1 Z_1 \left(\frac{B_1 + B_2}{2} \right) + V_2 Z_2 \left(\frac{B_2 + B_3}{2} \right) + \dots + V_n Z_n \left(\frac{B_n + B_{n+1}}{2} \right)$$

Le débit journalier des matières en suspension Q_s peut s'exprimer comme suit :

$$Q_s = 86,4 \bar{c}_s Q$$

où Q_s est exprimé en tonnes/jour et Q est le débit liquide du cours d'eau en m^3/s et le coefficient 86,4 correspond à la conversion en journalière.

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. Le tableau 1 (non exhaustif) résume des formules de différentes approches potentiellement utilisables dans le cadre des matières en suspension étudiées:

| | | |
|--|--|--|
| Einstein et Brown 1950 | Proposée par Brown à partir d'un lissage des abaques d'Einstein | Utilisation en laboratoire pour les sables et graviers $0,3 < S < 29$ mm |
| Formule d'Engelund et Hansen 1967 | Relation mettant en œuvre la contrainte à travers le paramètre de Shields, équation déduite du concept de puissance de l'écoulement de Bagnold (1966) et du principe de similarité | Transport total charriage et suspension, laboratoire, lit à sable, transport important, lits plats et dunes, $0,1 < D < 5$ mm pentes faibles |

| | | |
|--|---|--|
| Bijker 1967 | Relation définit à partir des abaques d'intégrales d'Einstein | Hypothèse de proportionnalité entre le transport solide en suspension et celui par charriage |
| Ackers et White 1973 | Relation prenant en compte la contrainte | Transport total en régime fluvial $Fr < 0,8$ |
| Bailard 1981 | Relation supposant qu'il existe une proportionnalité directe entre le flux solide et le flux d'énergie | Transport de sable, initialement développée pour le cotier |
| Van Rijn 1984 | Relation semi-empirique | Validée pour les sables |
| Formule de Lefort¹⁶ 2007 | Relation empirique donnant directement le débit solide Q_s en fonction du débit total Q ou spécifique $q=Q/L$ | Transport par charriage et suspension, ajustement de données de laboratoire et de terrain $0.1 < D < 55\text{mm}$ $S < 20\%$ |
| Van Rijn 2007 | Ne prend pas en compte la rugosité de forme | Validée pour les sables |
| Formule de Camenen et Larson 2008 | Relation semi-empirique avec l'hypothèse d'une vitesse constante sur la verticale de mesure | Estimation d'une suspension graduées de sable supposant un profil de concentration en sédiments de forme exponentielle |

Tableau 1 : Résumé des différents modèles développés utilisable pour le transport de sable en cours d'eau [Henry E.]

1.3 Choix des formules de transport solide

Formule de transport total

❖ Engelund et Hansen 1967

On parle de formule de transport total lorsque la formule intègre le transport solide par charriage et le transport solide en suspension dans le cas de suspension faible (matériaux sableux). La formule empirique d'Engelund et Hansen (1967)¹⁷ donne le transport solide total en volume à

¹⁶ RECKING A., LIÉBAULT F., PETEUIL C. et JOLIMET T. (2008) Programme de recherche nationale - Evaluation des formules de transport solide en rivière avec prise en compte de l'échelle temporelle - Rapport Final, Cemagref, RTM

¹⁷ Engelund, F., and E. Hansen. 1972. A Monograph on sediment transport in alluvial streams. Copenhagen: Technical Press Education.

grains à saturation par unité de largeur pour des sédiments non cohésifs q_s en $m^3/s/m$. Cette dernière est issue d'une approche empirique.¹⁸ Elle est valable pour $0,15 \text{ mm} < D < 5 \text{ mm}$.

$$q_s = 0,05 \times \sqrt{\frac{(\gamma_s/\gamma)-1}{g}} \times K^2 \times R_h^{\frac{1}{3}} \times D_{50}^{\frac{3}{2}} \times \tau^{\frac{5}{2}} \quad \text{avec}$$

- K est le coefficient de Strickler global du lit mineur incluant la rugosité des berges, celles des grains constituant le fond. On peut prendre l'expression $K = \frac{21}{D_{50}^{\frac{1}{6}}}$
- g ($=9,81 \text{ m/s}^2$) accélération de la pesanteur,
- D_{50} (m) diamètre médian des particules,
- γ_s ($\approx 26 \text{ à } 27 \text{ kN/m}^3$) poids volumique spécifique des grains solides,
- γ ($= 10 \text{ kN/m}^3$) poids volumique de l'eau,
- R_h (m) rayon hydraulique

τ varie en fonction de la concentration selon quatre classes :

- Si $\tau^* \leq 0,06$ alors $\tau = 0$
- Si $0,06 < \tau^* \leq 0,384$ alors $\tau = 2,5 (\tau^* - 0,06)^{0,5}$
- Si $0,384 < \tau^* \leq 1,08$ alors $\tau = 1,065 \tau^{*0,178}$
- Si $1,08 < \tau^*$ alors $\tau = \tau^*$

Formules de transport solide propre à la suspension

On définit le paramètre de Shields critique noté τ_{cr} qui permet de déterminer la mise en mouvement des particules si $\tau^* > \tau_{cr}$: La formule de Soulsby en donne une expression littérale simplifiée

$$\tau_{cr} = \frac{0,3}{1 + 1,2 d_*} + 0,055[1 - \exp(-0,02d_*)]$$

- Avec d_* diamètre sédimentologique $d_* = \left(\frac{(\rho_s-1)g}{\rho v^2}\right)^{\frac{1}{3}} D_{50}$
- $\nu = 1.10^{-6}$ viscosité cinématique de l'eau

❖ Van Rijn 1984

¹⁸ Degoutte G. (2001) Hydraulique et dynamique fluviale - Transport solide en hydraulique fluviale, Cours de l'École nationale du génie rural, des eaux et des forêts, 125 p.

La formule développée par Van Rijn aboutit à une résolution complète de la suspension sur la verticale (moyennée en temps) en intégrant de nombreux paramètres physiques. Une version simplifiée de ses résultats est donnée par l'équation suivante (Van Rijn donne une incertitude de 25% par rapport à la résolution complète si $0,3 < \frac{W_s}{\sigma U_* k} < 3$ et $0,01 < \frac{z_a}{h} < 0,1$).

On définit d'abord :

$$c_a = 0,015 c_{max} \frac{D_{50} \left(\frac{\tau^*}{\tau_{cr}} - 1 \right)^{1,5}}{z_a d_*^{0,3}} \quad \text{et} \quad f_{cs} = \frac{\left[\left(\frac{z_a}{h} \right)^{\sigma U_* k} - \left(\frac{z_a}{h} \right)^{1,2} \right]}{\left[\left(1 - \frac{z_a}{h} \right)^{\sigma U_* k} \left(1,2 - \frac{W_s}{\sigma U_* k} \right) \right]}$$

Avec :

- $z_a = \max(k_s, \frac{1}{2} H_r)$
- k_s hauteur de rugosité (mesure de rugosité dite de peau) telle que $k_s = 2D_{90} = 2,5D_{50}$
- D_{90} est dans ce cadre-là le diamètre à 10% de passant pour les sédiments du fond
- H_r hauteur de rides (mesure de rugosité dite de fond)
- d_* diamètre sédimentologique $d_* = \left(\frac{(\rho_s - 1)g}{\rho v^2} \right)^{\frac{1}{3}} d$
- U_* vitesse de frottement au fond $U_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = \sqrt{R_h g I}$
- $k = 0,41$ Constante de Von Kármán
- U vitesse moyenne de l'écoulement définit par la loi de Manning-Strickler $U = KR \frac{5}{h} \sqrt{I}$
- c_{max} concentration en volume maximum généralement égale à 0,65 car assimilé à la concentration du lit

On a alors

$$q_{ss} = f_{cs} U h c_a$$

❖ Van Rijn 2007

En 2007 Van Rijn a proposé une nouvelle formule¹⁹ pour le transport des sédiments en suspension :

$$q_{ss} = 0,015 \rho_s U D_{50} \left(\frac{U - U_{Cr Susp}}{\sqrt{g(\rho_s - 1) D_{50}}} \right)^2 d_*^{-0,6}$$

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

Avec

$$U_{Cr\ susp} = \frac{0,19 \times D_{50}^{0,1} (si\ D_{50} \leq 5e - 4)}{8,5 \times D_{50}^{0,6} (si\ D_{50} > 5e - 4)} \times \left(\log \left(12 \times \frac{Rh}{3 \times d_{84}} \right) \right)$$

Il propose également cette formule modifiée du paramètre de Shields plus spécifique aux sédiments en suspension :

$$\tau_{cr\ susp} = \frac{0,3}{1 + d_*} + 0,1[1 - \exp(-0,05d_*)]$$

❖ Camenen & Larson 2008

En se basant sur leur formulation en transport solide par charriage et en supposant que le transport solide par charriage est tel que $q_{sc} = c_R U_s$ avec $U_s \propto \tau^*$, que le profil de concentration est de type exponentiel et en reprenant l'approche simplifiée de Madsen et al. (2003) qui sépare la concentration moyenne dans l'écoulement et la vitesse moyenne sur la verticale de l'écoulement, Camenen & Larson (2008)²⁰ ont proposé :

$$q_{ss} = U c_R \frac{\varepsilon}{W_s} \left[1 - \exp\left(-\frac{W_s h}{\varepsilon}\right) \right]$$

Avec

- c_R concentration de référence $c_R = 3,5 \cdot 10^{-3} \exp(-0,3d_*) \tau^* \exp\left(-4,5 \frac{\tau_{cr}}{\tau^*}\right)$
- $\varepsilon = \frac{\sigma}{6} k U_* h$ le coefficient de diffusion verticale turbulente supposé constant sur la verticale, hypothèse liée au profil exponentiel

Formule de transport issue des études côtières

❖ Bailard 1981

En utilisant des hypothèses similaires à la formule de charriage de Bailard & Inman notamment en travaillant sur la proportionnalité entre les flux d'énergie (taux local de dissipation d'énergie²¹) et les flux solides, Bailard a proposé une formule pour le transport solide en suspension. Cette formule a été initialement établie pour le côtier avec des sédiments fins (sables).

$$q_{ss} = \frac{0,5 f_c U^4 \varepsilon_s}{g \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) W_s} \text{ avec}$$

²⁰ Camenen, B. (2015), Mesure in situ de la dynamique sédimentaire des cours d'eau, Outils et méthode, IRSTEA, UR HHLY, centre de Lyon-Villeurbanne, Agence de l'eau Rhône méditerranée, 72p

²¹ 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.

- $\varepsilon_s = 0,02$ facteur d'efficacité pour la suspension
- $fc = 2 \left(\frac{u_*}{U} \right)^2$

2 Conversion des données

2.1 Calcul de charge sableuse

Traitement des données sous excel :

Dans un premier temps l'objectif est d'estimer le flux solide de sable par un calcul de flux classique prenant en compte la concentration et le débit liquide. Les prélèvements se font en un point précis sur une verticale dans la rivière. La méthode de prélèvement sera détaillée dans la partie protocole (III 1.1 & 1.2).

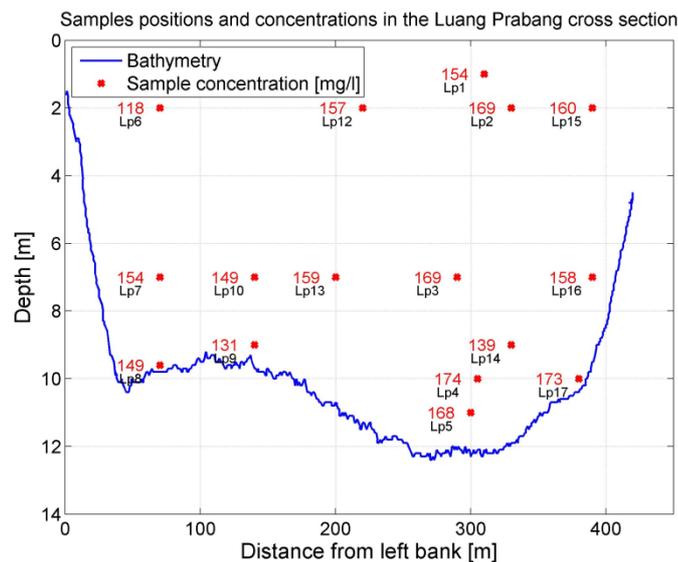


Figure 10 : Points de prélèvement dans une section du Mékong [Dramais G. (2013)]

Deux approches sont possibles pour appliquer les formules :

- Soit on les applique à l'ensemble de la section de la rivière
- Soit on décompose la section en sous sections autour des échantillonnages et on applique les formules puis on moyenne les résultats sur la section entière.

La seconde méthode étant plus fine, elle a été retenue pour la suite du travail.

Pour le calcul on utilise donc les paramètres suivants :

- Le débit moyenné Q sur la section en m^3/s
- La position sur la largeur L_a de la section en m
- La profondeur du prélèvement P et du cours d'eau h sur la verticale de mesure en m
- La concentration en sable C ou en matière en suspension dans l'échantillon prélevé en g/l

- Les mesures de vitesses V réparties dans la section autour des points de prélèvement (III 2.2) en m/s

On peut en déduire z la hauteur du prélèvement et en déduire les sous surfaces locales autour du point de prélèvement notées SS .

On définit :

- Le débit d'eau de chaque sous section autour du point de prélèvement

$$Q_n = SS_n \times V_n \text{ en m}^3/\text{s}$$

- Le débit solide total de chaque sous section

$$Q_{sn} = Q_n \times C \text{ en kg/s}$$

On peut obtenir une première valeur de flux de sable en moyennant l'ensemble des Q_{sn} :

$$Q_{ssm} = \frac{\text{Moyenne } (Q_{sn})}{\text{rhos}}$$

Où rhos est la masse volumique des sédiments : $\text{rhos} = 2650 \text{ kg/m}^3$

Q_{ssm} exprimé en m^3/s est une première approximation du flux de sable, mais de manière à être davantage précis on peut affiner la détermination du flux de sable de la manière suivante. Pour toute verticale $i \in [1; n]$ et pour tout prélèvement j associé à une verticale $i, j \in [1; m]$ on calcule :

$$C_{moy,i} = \sum_{j=1}^m \frac{C_j \times dz_j}{h_i}$$

$$\text{Puis } C_{total} = \sum_{i=1}^n \frac{C_{moy,i} \times h_i \times L_{a_i}}{\text{rhos}}$$

Ce qui permet d'obtenir la valeur du flux de sable ou de matières en suspension noté Q_{ssm} en m^3/s :

$$Q_{ssm} = \frac{C_{total} \times Q}{Stot}$$

2.2 Modélisation du transport solide

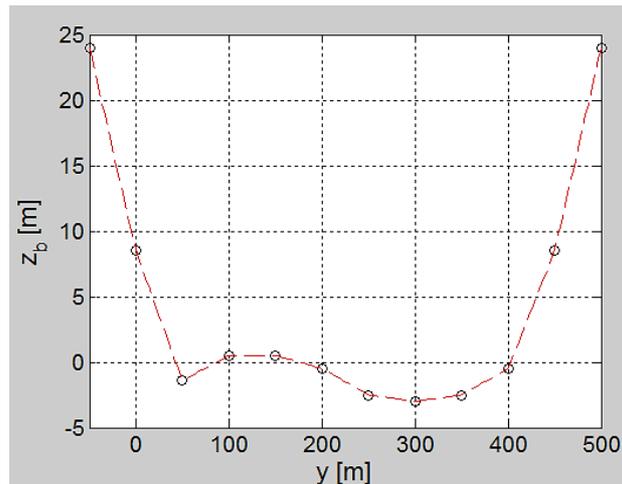
Comme vu précédemment, différentes formules peuvent être utilisées pour faire un suivi de la charge sableuse. Il est donc intéressant de tester ces différents modèles dans le but de les comparer au calcul de charge sédimentaire directement obtenue des analyses d'échantillon de la chasse. Ce travail de modélisation s'inscrit dans la continuité des travaux de l'équipe. Le code est écrit en langage Matlab et est présenté en Annexe 2. Il s'articule de la manière suivante :

Définition des paramètres d'entrée

a) LA BATHYMETRIE

La première étape est de définir la bathymétrie de la section du cours d'eau. On insère donc un fichier transect comprenant des points de coordonnées de la bathymétrie $(y ; z)=(\text{position latérale sur la section ; profondeur de la section})$. On interpole ces valeurs pour avoir un tracé complet de la section. On définit également la largeur active L_a .

Figure 11: Profil bathymétrique d'une section du Mékong [Camenen B.]



b) CALAGE DU DEBIT LIQUIDE EN FONCTION DE LA PROFONDEUR

On définit d'abord le périmètre mouillé et le rayon hydraulique $R_h H$. Puis selon une loi de type Strickler on calcule QH le débit et HH la profondeur. Cette loi nécessite la calibration de trois paramètres a_Q , p_Q (coefficient puissance) et dz (qui permet d'affiner la courbe de tarage pour qu'il n'y ait pas $Q=0$ pour $h=0$). On rentre alors les données de jaugeage Q_{gs} et z_{gs} , et on fait varier les trois paramètres jusqu'à ce que les courbes $QH=f(HH)$ et $Q_{gs}=f(z_{gs}+Deltaz_{gs})$ coïncident. ($Deltaz_{gs}$ correspond au décalage entre le zéro de l'échelle pour les mesures de jaugeages et le niveau du fond)

c) MESURES ET DEFINITION DE PARAMETRES DE CALCULS

On définit les paramètres précédemment calculés sous excel. On effectue un calage granulométrique à partir du D_{50} défini on calcule D_{16} et D_{84} .

$$\sigma = 2; \quad d_{16} = d_{50}/\sigma; \quad d_{84} = \sigma*d_{50}$$

On calcule le paramètre de Shields et le coefficient de Strickler.

Test des différentes formules de transport

On calcule les différents paramètres nécessaires aux formules sélectionnées en partie II 1.3, puis on en déduit q_{ssm} (m³/s/m) le débit solide en suspension en volume de grains à saturation.

On peut également en déduire Q_s en multipliant par l (largeur des bras vifs appelée largeur active dans la routine)

$$Q_s = l \times q_s$$

Puis le débit solide total apparent

$$\overline{Q_s} = \frac{Q_s}{1 - n}$$

Avec n la porosité (on peut considérer que $\gamma = (1 - n)\gamma_s$)

2.3 Sensibilité des calculs et modèles

Les variations spatiales des concentrations de sédiments peuvent être dues à de nombreux facteurs : notamment aux caractéristiques dynamiques du site, aux apports sédimentaires relatifs aux affluents, aux caractéristiques de rugosité du lit, au rayon hydraulique, au flux d'énergie, à la turbulence, à l'envasement des berges, et aux caractéristiques sédimentaires : densité, forme, et taille des particules. Même pour une section transversale où les sédiments seraient bien mélangés et où le débit serait uniforme, des variations dans la concentration en suspension apparaîtraient en raison de la propulsion des particules plus grosses à tomber à un rythme plus rapide que les petites particules comme décrit par la loi de Stokes²².

Il est intéressant de comparer les valeurs de calculs de flux à une valeur de flux total.

Pour cela Gray et Landers proposent de calculer la concentration en sédiments en suspension sur la section transversale avec cette formule²³ :

$$C_{xs} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\sum_{d=1}^{D_i} Vol_{id} C_{id}}{\sum_{d=1}^{D_i} Vol_{id}} \right\}$$

On pourra plutôt appliquer une formule pondérée en surface qu'en volume, et multiplier cette concentration avec la valeur totale du débit pour obtenir un flux moyen total sur la section :

$$Q_{sstot} = \frac{Q_{tot}}{rhos} \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\sum_{d=1}^{D_i} S_{id} C_{id}}{\sum_{d=1}^{D_i} S_{id}} \right\}$$

²² American Society of Civil Engineers (2006). Sedimentation engineering. In Vanoni, V. (ed.) ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 54, 418 pp. New York, NY, ISBN: 0-7844-0823-8.

²³ Gray J.R., and Landers M.N. (2014) Measuring Suspended Sediment. In: Ahuja S. (ed.) Comprehensive Water Quality and Purification, vol. 1, pp. 157-204. United States of America: Elsevier

La concentration des matériaux en suspension varie à l'intérieur de la section droite du cours d'eau. Elle est relativement élevée dans la partie basse et peut également ne pas avoir une répartition latérale uniforme de sorte qu'il est souvent nécessaire, pour obtenir sa valeur moyenne, de prélever des échantillons en plusieurs points ou le long de plusieurs verticales. Cette valeur moyenne permet d'évaluer le poids total de matériaux transportés par unité de temps en la multipliant par le débit liquide. Le graphique des matériaux en suspension en fonction du temps présente une pointe qui ne coïncide pas nécessairement avec le débit maximal. Le déphasage résulte de conditions particulières relatives à un bassin donné et on n'a pas encore trouvé de formulation générale permettant de l'évaluer.

La concentration au fond du lit induit beaucoup d'incertitudes d'où l'importance de rassembler d'abord des données locales sur la granulométrie, diamètre des sédiments. Cela est d'autant plus important que les modèles sont particulièrement sensibles au D50 qui intervient soit directement dans les formules de transport solide, soit au travers de paramètres comme le nombre de Strickler ou le diamètre sédimentologique.

PARTIE III : MISE EN PLACE D'UN PROTOCOLE DE SUIVI DE LA CHARGE SABLEUSE

1 Appareils de mesures

1.1 Les différentes techniques existantes pour la mesure de flux sédimentaire

De la même manière que l'on différencie en plusieurs catégories les différents modes de transport sédimentaire, différents outils de mesures ont été développés pour chaque mode de transport permettant de mieux s'adapter aux sédiments que l'on souhaite étudier. Deux principaux types de mesure existent actuellement : par échantillonnage direct de la concentration, voire du flux en sable ou par une mesure indirecte.

Les méthodes d'échantillonnage sont des méthodes de prélèvement des sédiments dans l'eau. Par exemple pour la mesure de charriage on utilise des échantillonneurs de charge de fond (panier ou grille avec ou sans divergent), des préleveurs Helley-Smith ou préleveurs d'Ehrenberger... Ces différents instruments d'échantillonnages ont été développés en fonction des contraintes locales et des objectifs des études, et souvent pour optimiser le temps de mesure. Les méthodes indirectes (Moore et al., 2013; Latosinski et al., 2014) se basent sur un traitement de données acoustiques issues de mesure par ADCP (l'Acoustic Doppler Current Profiler permettrait d'obtenir une bonne représentation spatiale des flux en suspension et charriés mais cette technique est encore en cours de développement) ou de mesures par hydrophone et géophone ou transducteur acoustique. Les turbidimètres sont des appareils de une mesure optique. Ils font également partie des outils de mesure indirecte. En effet, la turbidité n'est pas une mesure directe des matières en suspension dans l'eau mais plutôt une mesure générale de leur effet de diffusion et d'absorption de la lumière dans l'eau. Cette technique ne permet donc pas d'estimer les flux de sables en continu du fait de la variabilité spatiale des concentrations en sable et la forte sensibilité de l'appareil aux sédiments fins.

Dans la suite de ce rapport on ne s'intéressera qu'aux préleveurs de matières suspension.

Il existe plusieurs types d'échantillonneurs : la bouteille de Delft (Dramais et al., 2015), la bouteille de Van Dorn ou de Niskin (Dramais et al., 2013), les préleveurs intégratifs de l'US Geological Survey (USGS, Edwards and Glysson, 1999) ou radiocommandés de l'Office Fédéral de l'Environnement (OFEV, Grasso et al., 2012). Ces préleveurs, mise à part la bouteille de Delft, ne différencient pas les sables du reste de la suspension et constitue un échantillon d'eau et de matière. Les échantillons doivent être analysés au granulomètre et/ou au tamis pour déterminer la quantité de sable présente dans le volume échantillonné. Il n'existe pas d'outil universel qui définisse la mesure du sable en suspension.

La méthodologie de mesure est à adapter selon le cours d'eau et ses caractéristiques : vitesses, largeur, aménagements, navigation... Le nombre de verticales et de mesures est à prendre en compte pour limiter les incertitudes notamment près du fond. Les méthodes de calcul différent également suivant les méthodes de prélèvement utilisées.

| Méthode | Type de cours d'eau | | | Fac. Oeuvre | Fac. Trait. | Coût Inst. | Coût Mes. |
|--|---------------------|----------------|-------------------|-------------|-------------|------------|-----------|
| | torrent | rivière alpine | rivière de plaine | | | | |
| Préleveur Helley-Smith | - | ++ | ++ | + | ++ | +/- | + |
| Préleveur Helley-Smith portable | ++ | - | - | ++ | ++ | - | + |
| Préleveur Erlenberger | -- | + | ++ | + | ++ | +/- | + |
| Préleveur BTMA | - | + | ++ | + | ++ | +/- | + |
| Piège à sédiments | ++ | +/- | -- | ++ | + | +/- | +/- |
| Trappe à sédiments | ++ | - | -- | + | + | ++ | +/- |
| Suivi de dune | -- | - | ++ | - | -- | +/- | + |
| Géophone | ++ | +/- | -- | - | - | ++ | - |
| Hydrophone | + | + | + | +/- | -- | - | - |
| Suivi de fond ADCP | -- | - | + | +/- | -- | ++ | +/- |
| Bouteille Niskin | - | +/- | ++ | ++ | + | - | + |
| Bouteille de Delft | -- | +/- | ++ | + | + | + | + |
| Préleveur iso-cinétique ponctuel | -- | +/- | ++ | + | + | + | + |
| Préleveur iso-cinétique intégrateur | -- | +/- | ++ | + | + | + | + |
| Rétro-diffusion ADCP | -- | - | ++ | + | -- | ++ | +/- |
| Echantillonneurs optiques et acoustiques | +/- | +/- | + | +/- | - | ++ | + |
| Marquage colorimétrique | ++ | +/- | -- | ++ | ++ | -- | + |
| Tranpondeurs actifs | + | +/- | +/- | - | - | ++ | ++ |
| Tranpondeurs passifs | ++ | +/- | + | +/- | + | + | ++ |
| Mesures topographiques | ++ | +/- | + | + | +/- | +/- | ++ |
| Chaînes d'érosion | ++ | +/- | +/- | +/- | + | - | ++ |

Tableau 2 : Récapitulatif des différentes méthodes de mesures de la charge de fond en fonction de leur facilité de mise en œuvre et de traitement et des coûts d'installation et de mesures [Camenen B. (2015)]

On distingue trois grandes catégories de méthodes auxquels on associe des types de préleveurs particuliers.

Mesure par intégration du débit solide en suspension sur la verticale

Pour cela on utilise un échantillonneur intégrateur sur toute la colonne d'eau. L'échantillonneur est abaissé à vitesse constante à partir de la surface de l'eau jusqu'au fond du canal puis il est relevé à la même vitesse jusqu'à la surface. La concentration en sédiments est alors la concentration moyenne sur toute la hauteur d'eau.²⁴

L'échantillonneur intégrateur se compose d'un saumon creux métallique muni de dérives pour l'orienter dans le courant. L'échantillon est recueilli à l'intérieur du saumon. Un ajutage d'entrée de diamètre variable sort du nez du saumon, face au courant. Un tuyau d'évacuation, dirigé vers l'aval, permet à l'air de s'échapper du récipient. L'opérateur manœuvre des valves à commande électrique situées à l'amont du saumon pour démarrer et arrêter l'opération de prélèvement.

²⁴ Wigham John M. (1972), Transport des sédiments, Chapitre XI, Editeur-en-chef Donald M. GRAY, Université de la Saskatchewan, Saskatoon, Canada

Mesure directe grâce à des échantillonnages iso-cinétiques

Parmis tous les échantillonneurs de matériaux en suspension seuls quelques-uns d'entre eux sont conçus de façon à ce que la vitesse d'entrée dans la prise d'eau de l'échantillonneur soit égale à la vitesse naturelle du courant. Ils sont dotés d'une buse permettant de récupérer une concentration égale à celle qui se trouve à l'extérieur de la buse. Ceci est essentiel pour que les échantillons obtenus soient vraiment représentatifs de la charge en suspension du cours d'eau au point de mesure. Un échantillonneur bien conçu se place face au courant et son ajutage se trouve bien en amont de la zone de remous créée par la présence de l'échantillonneur.

Les prélèvements instantanés

On utilise des échantillonneurs instantanés²⁵ lorsqu'on ne peut utiliser un échantillonneur iso-cinétique. Cependant, lorsque dans des eaux peu profondes les mesures iso-cinétique ne sont pas concevables et à faibles vitesses, seuls du limon et des argiles subsistent. Si ces conditions sont réunis alors l'échantillonnage instantané en un point ou sur une verticale est une bonne alternative. Les prélèvements instantanés se font en général à l'aide d'un cylindre horizontal, équipé à ses deux extrémités de clapets dont la fermeture très rapide permet de prélever un échantillon à n'importe quel instant et n'importe quelle profondeur. La bouteille de prélèvement, très simple, est bouchée ou munie d'une embouchure de diamètre variable, jusqu'à pleine ouverture. Dès que la bouteille est ouverte et que l'air en est refoulé par l'eau, un bouillonnement se produit à l'entrée, ralentissant le remplissage. Par conséquent, le prélèvement à la bouteille n'est pas vraiment instantané. Il est donc nécessaire de faire une mesure conjointe d'échantillons pour la concentration et de la vitesse de l'écoulement à plusieurs profondeurs

Ces échantillonnages sont particulièrement intéressants quand les sédiments sont fins mais il est difficile de savoir s'ils sont appropriés au moment de faire les mesures. Les préleveurs iso-cinétiques restent généralement donc plus fiables.

1.2 Méthode d'échantillonnage

Le but de l'échantillonnage est d'obtenir une courbe de tarage sédimentaire qui va permettre de déterminer des chroniques de débit solide comme pour l'eau. Pour cela on fait l'hypothèse d'un état d'équilibre permanent alors qu'il y a des effets instationnaires et que la disponibilité en sédiments varie fortement.

En effet, les méthodes directes d'échantillonnage se basent sur un calcul de concentration à partir du rapport entre la masse des particules en suspension et la suspension (mélange de particules d'eau et sédiments). Le poids de la matière en suspension est déterminé par filtration et séchage du matériau non dissous. Les mesures de concentration sont ponctuelles et il peut être intéressant de

²⁵ Gray J.R., and Landers M.N. (2014) Measuring Suspended Sediment. In: Ahuja S. (ed.) Comprehensive Water Quality and Purification, vol. 1, pp. 157-204. United States of America: Elsevier

trouver une concentration représentative de la concentration moyenne dans toute la section transversale du cours d'eau

Cependant, les matières en suspension sont soumises d'une part à la force gravitationnelle en continu (qui entraîne le dépôt des particules) et à la force de flottabilité (turbulence dans de l'eau). En conséquence du phénomène de turbulence, des couches de fortes concentrations en matières en suspension sont déplacées dans la colonne d'eau vers le haut.

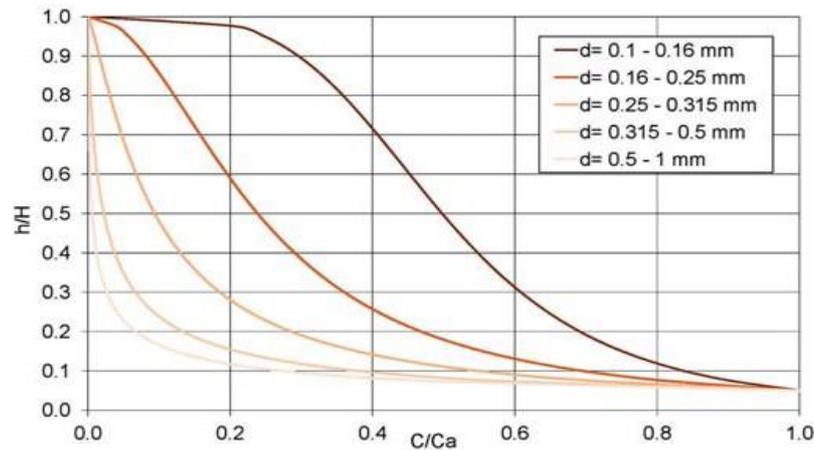


Figure 12 : Distribution verticale de la matière en suspension par rapport à la taille des grains des matières en suspension [Grasso A., BéroD D, Hodel H. (2012)]

En chaque point de mesure, les lignes de courants des turbulences et la concentration en sédiments s'affectent mutuellement et sont corrélés. La distribution verticale de la concentration de sédiments peut être décrite avec des modèles mathématiques comme le montre la figure 12 ci-dessus construite avec le modèle de Rouse-Vanoni²⁶. En revanche, la répartition des matières en suspension dans la section transversale ne peut pas être a priori prévisible. Ces incertitudes découlent des variations des profils transversaux de la rivière, les changements de direction des cours d'eau, les obstacles dans le profil de flux et des entrées latérales de sédiments par confluence des affluents, etc.

Pour obtenir la concentration moyenne sur une verticale qui dépend à la fois du flux et de la distribution des sédiments l'USGS²⁷ préconise de distinguer quatre types de situations :

- Faible vitesse $\bar{v} < 0,6 \text{ m/s}$ lorsque peu de sable est transporté en suspension ou qu'il n'y en a pas. Le taux d'erreur est faible et il n'est pas nécessaire d'utiliser un échantillonneur iso-cinétique. Il est acceptable de remplir l'échantillon manuellement.

²⁶ Grasso A., BéroD D., Hodel H. (2012), Mesurer et analyser la répartition des matières en suspension dans le profil transversal des cours d'eau, Expériences d'échantillonnage du Département d'hydrologie de l'OFEV «Wasser Energie Luft», 5 p.

²⁷ Edwards, T. E. and Glysson, G. D. (1999). Field methods for measurement of fluvial sediment. U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, Book 3, ch. C2, 89 p.

- Haute vitesse $4,6 > \bar{v} > 0,6 \text{ m/s}$ et la profondeur est inférieure à 4,6 m. Il est préférable d'utiliser un échantillonneur intégrateur notamment si on se situe dans la partie basse de cette fourchette de vitesse.
- Haute vitesse $4,6 > \bar{v} > 0,6 \text{ m/s}$ et la profondeur est supérieure à 4,6 m. Il est préférable d'utiliser un échantillonneur isocinétique ponctuel.
- Très grande vitesse $\bar{v} > 4,6 \text{ m/s}$. La vitesse est alors trop forte pour mettre en place un échantillonneur car le matériel ne peut pas résister à de telles vitesses car l'eau transporte trop de sédiments lourds et débris.

L'échantillonnage se fait toujours sur un intervalle de temps précis et la détermination de la position des verticales doit suivre une certaine logique. Deux méthodes sont possibles pour déterminer des positions de verticales de prélèvement²⁸ :

- Soit la section transversale choisie est divisée en trois à dix secteurs de débits à peu près égaux. Les échantillons sont prélevés sur les verticales passant par le centre de chaque secteur, en descendant l'échantillonneur de la surface au fond, puis en le remontant à la surface à une vitesse de déplacement constante. En moyennant les échantillonnages par verticales on peut obtenir une valeur moyenne pondérée pour chaque section;

La concentration moyenne pondérée \bar{C}_s en kg/m^3 pour la section entière est calculée de la façon suivante :

$$\forall n \in [3; 10] \quad \bar{C}_s = \frac{\sum_{p=1}^n c_p q_p}{\sum_{p=1}^n q_p}$$

dans laquelle q_p est le débit partiel du secteur en m^3/s et c_p est la concentration moyenne pondérée par le débit de la verticale au centre du secteur en kg/m^3 .

- Soit on répartit dans la largeur du courant, à des distances égales, six à 10 verticales et les échantillons sont prélevés à chaque verticale avec une même vitesse de déplacement. De cette façon, tous les échantillons peuvent être réunis en un seul échantillon représentatif pondéré par le débit.

La concentration de l'échantillon composé \bar{C}_s en kg/m^3 est la concentration moyenne pondérée de la section entière :

$$\forall n \in [6; 10] \quad \bar{C}_s = \frac{\sum_{p=1}^n c_p S_p}{\sum_{p=1}^n S_p}$$

Avec un échantillonneur ponctuel, les échantillons sont prélevés en des points espacés régulièrement sur chacune des verticales définies ci-dessus, et les concentrations mesurées sont pondérées par les rapports des vitesses aux points de prélèvement à la vitesse moyenne à la verticale. Cette méthode peut être combinée en pratique avec les jaugeages par la méthode de la section médiane parce que les verticales de mesure des vitesses et de prélèvement coïncident.

²⁸ Organisation Météorologique Mondiale (1994), Guide des pratiques hydrologiques, Cinquième édition, Acquisition et traitement données, analyses, prévision et autres applications, réf. WMO-N 168, 829 p.

1.3 Les appareils d'échantillonnages

Lors des chasses trois types de préleveurs pour les matières en suspension ont été utilisés. La bouteille de Delft ne pouvait pas être utilisée dans le cas des chasses du Rhône car les vitesses étaient trop importantes ($V > 3\text{m/s}$).

L'échantillonneur US P-72 de l'USGS

Développé par le Federal Interagency Sedimentation Project en 1972, l'échantillonneur US P-72²⁹ est un échantillonneur ponctuel. Les échantillonneurs ponctuels sont plus polyvalents que les échantillonneurs intégrateurs de profondeur. Ils sont mieux conçus pour les flux profonds ou rapides. Ils sont équipés d'une vanne (solénoïde alimenté par une batterie non submersible) à commande électrique qui permet à l'opérateur de démarrer et d'arrêter la collecte d'échantillons lorsqu'il le souhaite, et donc de prélever des points d'échantillons sur toute la verticale à des positions précises. L'égalisateur automatique de pression en profondeur empêche de compromettre l'échantillon lorsque la vanne est ouverte (compensation de la différence de charge statique). Les échantillonneurs à câble ou bobine comme le US P72 sont fait pour obtenir des prélèvements de sédiments jusqu'à 4,6 m de profondeur.



Figure 13 : L'US P-72 déployé lors des chasses du Rhône le 19 mai 2016 à Bognes [HENRY E.]

L'échantillonneur est abaissé jusqu'à la profondeur désirée dans la colonne d'eau, la vanne s'ouvre et se ferme, puis l'échantillonneur est ramené à la surface pour récupérer l'échantillon. L'échantillonneur a un corps en fonte d'aluminium profilé en long qui pèse 19kg. Il dispose d'ailerons pour orienter l'échantillonneur de telle sorte que la buse d'aspiration soit positionnée directement face à l'écoulement. La tête de prélèvement est articulée pour permettre l'accès à la

²⁹ Davis, B. E. (2005). A guide to the proper selection and use of federally approved sediment and water-quality samplers. U.S. Geological Survey Open-File Report 2005-1087, 20 pp. (<http://pubs.usgs.gov/of/2005/1087/>)

bouteille d'échantillonnage située dans une cavité dans le corps de l'échantillonneur. Un orifice d'évacuation orienté vers l'aval sur le côté de la tête de prélèvement permet à l'air de s'évacuer de la bouteille durant le prélèvement. L'échantillonneur utilise une buse de 0,48 mm en diamètre intérieur et s'utilise plutôt pour des vitesses allant de 0,3 à 1,6 m/s. Il peut être utilisé à une profondeur de 22m. Le taux de transit maximal de la bouteille ne doit pas dépasser 0,4 fois la vitesse moyenne de l'eau. Pour éviter une entrée massive et soudaine d'eau lorsqu'on réalise un échantillonnage notamment en profondeur, on peut utiliser une cloche de plongée pour équilibrer la pression d'air dans la bouteille avec la pression hydrostatique à la buse avant l'ouverture de la vanne au début de l'échantillonnage.

L'échantillonneur de l'OFEV

Le département d'hydrologie de l'OFEV surveille les matières en suspension dans les rivières Suisse deux fois par semaines au niveau de stations hydrométriques. Le prélèvement d'échantillons deux fois par semaine est réalisé à partir d'un pont au-dessus des cours d'eau, ou avec un système de câble grue d'une station hydrométrique. La technique consiste à créer des profils de concentration. Pour cela, la division a développé son propre échantillonneur intégrateur qui permet de faire des mesures ponctuelles en un point précis.

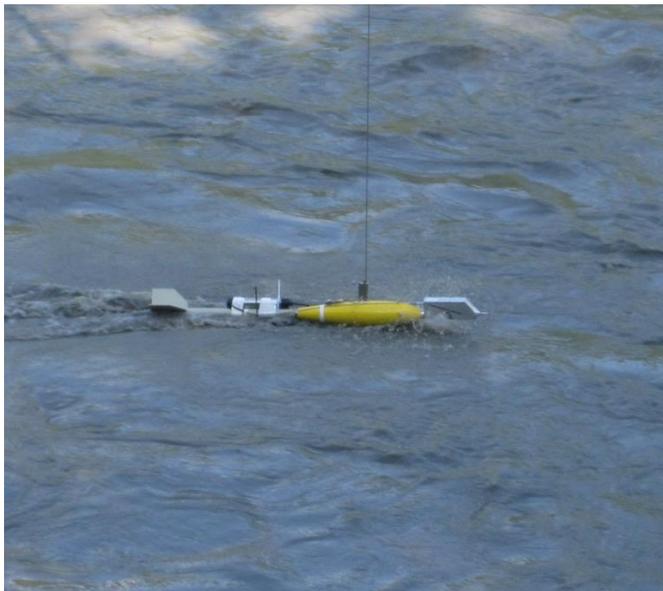


Figure 14 : Préleveur iso-cinétique de l'OFEV déployé lors des chasses du Rhône le 25 mai 2016 à la station hydrométrique de Chancy [HENRY E.]

Sur la base de profils de concentration peut être mesurée la verticale et la profondeur de mesure pour obtenir un échantillonnage représentatif. Comme pour l'US P-72, la buse d'entrée est iso-cinétique et une bouteille dans laquelle est recueillie l'échantillon est vissée au collecteur. Le

collecteur est équipé d'une vanne télécommandée pour ouvrir et fermer l'ouverture du système. Les échantillons sont pris à différentes profondeurs puis ils sont retirés des collecteurs de matières.

Bouteille Niskin

La bouteille Niskin,³⁰ aussi nommée bouteille Van Dorn, consiste simplement en un tube de préférence d'axe horizontal avec deux bouchons pouvant se refermer hermétiquement et instantanément à l'aide d'un messenger que l'on fait glisser le long de la corde soutenant le matériel. Ce système permet ainsi d'échantillonner un volume d'eau et de sédiments à une profondeur donnée. Il est nécessaire d'être particulièrement méticuleux lors de la récupération de l'échantillon dans les flacons car le sable a tendance à se déposer très facilement sur les parois de l'échantillonneur. A partir de ce volume, il est possible d'estimer en laboratoire la concentration (avec la méthode de filtration par exemple) et la granulométrie (à l'aide de tamis ou d'un granulomètre laser). Cet échantillonneur est souvent déployé à partir d'une embarcation car elle est légère et donc facilement manipulable. De plus, en laissant l'embarcation dériver on évite un angle entre la corde et la verticale due au courant qui emporte la bouteille et donc il est plus facile de réaliser une mesure à une profondeur voulu.



Figure 15 : Préleveur instantané de Van Dorn lors des chasses du Rhône le 24 mai 2016 à Champagneux [HENRY E.]

1.4 Dispositifs complémentaires

L'ADCP

Pour connaître les flux en suspension il est nécessaire de coupler à la fois les variations de vitesse du courant sur la colonne d'eau et les concentrations en sédiments sur cette même colonne.

Le développement des techniques de mesures acoustiques facilite désormais la connaissance des vitesses en quasiment tout point de la section. L'utilisation d'un ADCP (Acoustic Doppler Current Profilers) monté sur une embarcation est extrêmement efficace pour mesurer les débits, notamment

³⁰ Camenen, B. (2015), Mesure in situ de la dynamique sédimentaire des cours d'eau, Outils et méthode, IRSTEA, UR HHLY, centre de Lyon-Villeurbanne, Agence de l'eau Rhône méditerranée, 72p

grâce à sa fiabilité et sa rapidité. Cette technique, basée sur l'enregistrement de la rétrodiffusion acoustique renvoyée par les particules transportées par le cours d'eau, permet d'obtenir le champ de vitesses à travers la section de mesure.



Figure 16 : ADCP déployé lors des chasses du Rhône le 24 mai 2016 à Chancy [Henry E.]

Sonde de pression

Les échantillonneurs étant entraînés par le courant, ils ne descendent pas verticalement dans l'eau ce qui rend difficile le suivi des profondeurs précises des mesures. Selon la norme internationale ISO 4363 :2002³¹, pour une verticale de trois points où la profondeur est h , il faudrait faire les prélèvements à $0,2h$, $0,6h$ et $0,8h$ de la surface. Pour connaître la position verticale à laquelle se fait la mesure on utilise des sondes de pression en l'occurrence des sondes DIVER.

Les sondes DIVER sont des appareils de suivi de niveau d'eau dans les milieux naturels. Elles sont munies d'un capteur de pression avec enregistreur intégré. Le principe de fonctionnement du capteur de pression est la transformation en grandeur électrique de la déformation d'une membrane sous l'effet de la pression extérieure.

Turbidimètre

Les mesures de turbidité peuvent être également utilisées pour faire de la représentation spatiale mais ne permettent pas de faire de calcul de flux solide précis pour le sable. Contrairement aux matières en suspension tel que le limon et l'argile on ne peut pas utiliser toutes les techniques disponibles pour mesurer des flux sableux. Néanmoins, le turbidimètre apporte des informations intéressantes sur la concentration globale de particules dans l'eau.

³¹ ISO (2002). 10694 : Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts – Méthodes de mesurage des caractéristiques de sédiments en suspension. 27 p.

2 Traitement des données

2.1 Analyses granulométriques

Les échantillons prélevés par l'USGS P72, la bouteille Niskin et le préleveur de l'OFEV sont analysés de deux manières différentes une fois rapporté au laboratoire :

La filtration des sédiments

On commence tout d'abord par laver les filtres sur la colonne de filtrage (méthodes préconisées par les normes EN ISO 872 (AFNOR, 2005)). Les filtres sont des disques en fibre de verre avec deux faces différentes. On numérote le filtre puis on le dépose sur la colonne de filtrage. On actionne la pompe à vide reliée à la colonne de filtrage et on verse de l'eau déminéralisée dans l'entonnoir de la colonne. Ensuite, on récupère le filtre et on le dépose dans une étuve à 100°C pendant une heure. Ce filtre alors séché peut être mis dans un dessiccateur pour être conservé. Lors de la phase de filtration on commence d'abord par peser le filtre propre sur une balance haute précision. Une fois le filtre pesé on le replace sur la colonne de filtrage. On mélange l'échantillon en le remuant ou en le passant aux ultra-sons puis on filtre l'échantillon, on étuve et on le pèse ce qui permet d'accéder à la concentration massique de l'échantillon. Il est important de bien faire attention lors des manipulations de l'échantillon que le sable n'ait pas le temps de se déposer avant que l'échantillon ne soit versé car cela fausserait les résultats. L'incertitude de mesure sur cette méthode est estimée à de 1 à 2 % et peut atteindre 10 % si des sables sont présents dans les échantillons.

La granulométrie laser

Le granulomètre laser utilisé à IRSTEA pour les analyses est un CILAS 1190. L'appareil dispose de deux lasers permettant par diffraction de différencier les tailles des particules pour des diamètres compris entre 0,02 μm et 2 mm. Plus la diffraction est importante et plus la particule est petite. Il y a deux pompes péristatiques qui font circuler l'échantillon. Pendant la mesure, il est possible ou non d'utiliser des ultrasons qui permettent d'éviter la floculation des particules. L'utilisation des ultrasons donne une mesure plus représentative des particules élémentaires. Cette technique s'appuie sur la diffraction de la lumière. L'échantillon étudiée circule dans une cellule de mesure, et un rayon laser est envoyé. Les particules en suspension diffractent et atténuent le faisceau incident. Des capteurs reçoivent le rayonnement diffracté permettant la mesure de la distribution angulaire de l'intensité lumineuse diffractée. Un modèle théorique est utilisé pour convertir le spectre de répartition en distribution de fréquence de taille des particules. La mesure par granulométrie laser est une mesure surfacique, et la conversion en volume s'effectue en supposant des particules sphériques.

2.2 Prétraitement des données brutes

Les mesures faites avec l'ADCP sont récupérées en temps réel sur l'ordinateur et sont traitées par le logiciel Win River. Cela permet de suivre l'évolution des données bathymétriques et

hydrauliques (débit, vitesses...). L'appareil ADCP peut mesurer la distance qu'il parcourt sur sa trajectoire et son sens de déplacement par rapport au fond de la rivière. Il l'associe directement à ses mesures. Cependant le fond de la rivière peut être mobile et d'autant plus lors d'une chasse ou d'une crue. Il peut y avoir un décalage entre la position donnée par l'ADCP et la position réelle. C'est pourquoi des coordonnées GPS sont également enregistrées grâce à un GPS installé sur l'embarcation. Le logiciel Win River peut alors recalculer le décalage entre les données brutes de l'ADCP et les données GPS et ainsi réajuster l'ensemble des données pour avoir un suivi de fond mais aussi des données de vitesse associées à une position précise. On peut alors extraire les données suivantes : numéros d'ensemble, date et heure, profondeur du cours d'eau, profondeur des mesures de vitesses (m), vitesse de l'eau mesurée (m/s) et distance parcourue sur le transect (m). Avec ces données on calcule une vitesse moyenne autour du point d'échantillonnage réalisé. En effet, le logiciel Win River est capable de moyennner les données sur un transect de manière plus au moins large (c.f. graphe du bas figure 17) mais il ne permet pas de moyennner les vitesses autour de points précis. Pour cela on effectue un découpage de la section centré sur les points d'échantillonnage à partir des données extraites. Puis on moyenne les valeurs par section découpée.

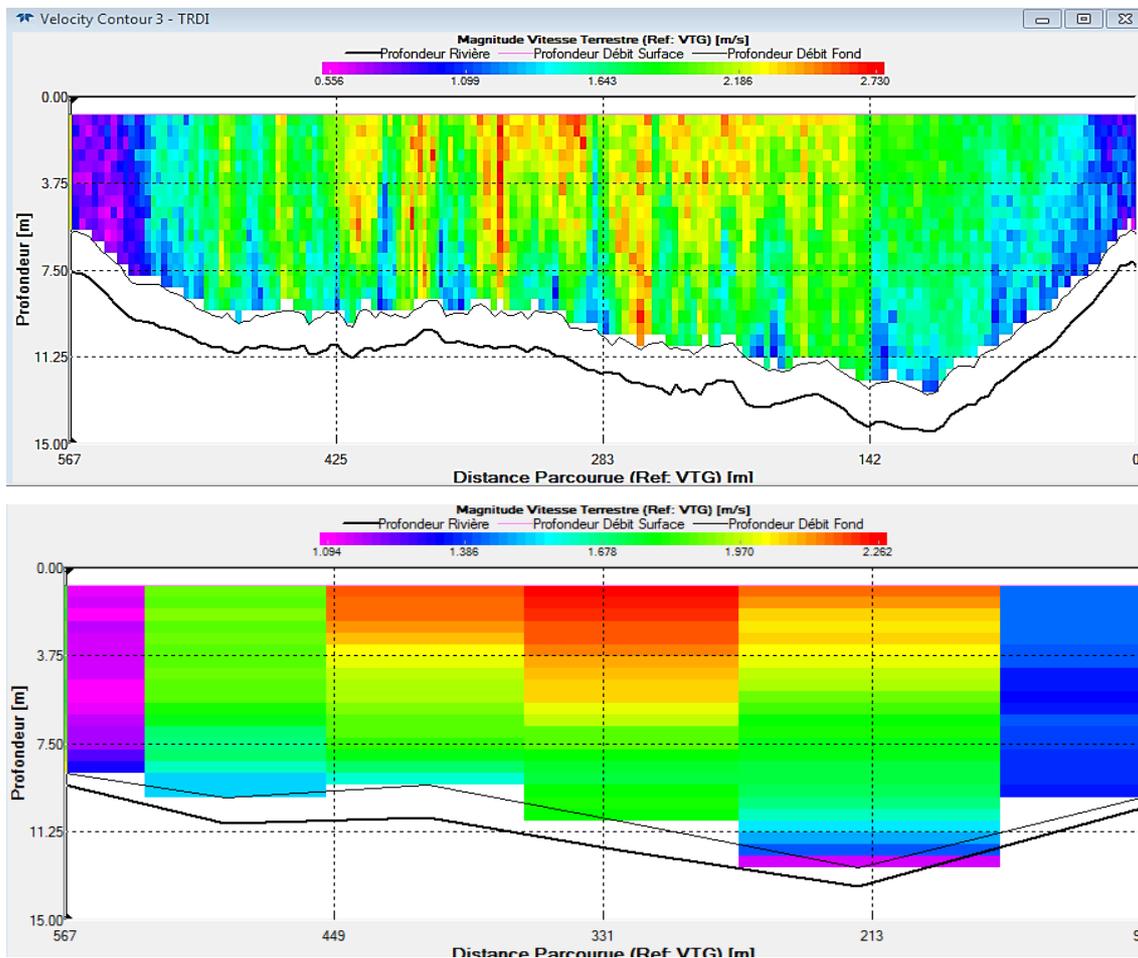


Figure 17 : Profil de vitesse d'un transect à Luang Prabang sur le Mékong le 05/08/2013, visualisation WinRiver, [Henry E.]

2.3 Incertitudes de mesures

Les erreurs de mesures qui interviennent dans l'utilisation des échantillonneurs iso cinétiques sont dues à la combinaison du facteur taille des sédiments prélevés et à leur taux d'échantillonnage (partie perdue des sédiments). Les différents chercheurs ayant mis en place les préleveurs vus précédemment ont également testé la fiabilité des mesures faites par ces appareils. Ainsi, par exemple, les chercheurs de l'USGS estiment que pour une densité comprise entre 0,75 et 1,3 de sédiments de diamètre 0,45 mm, la marge d'erreur peut ne pas dépasser 10%. En revanche pour un taux d'échantillonnage de moins de 0,25 l'erreur pourrait facilement dépasser les 100%.³² Ces chercheurs ont réalisé des abaques pour estimer la marge d'erreur des mesures.

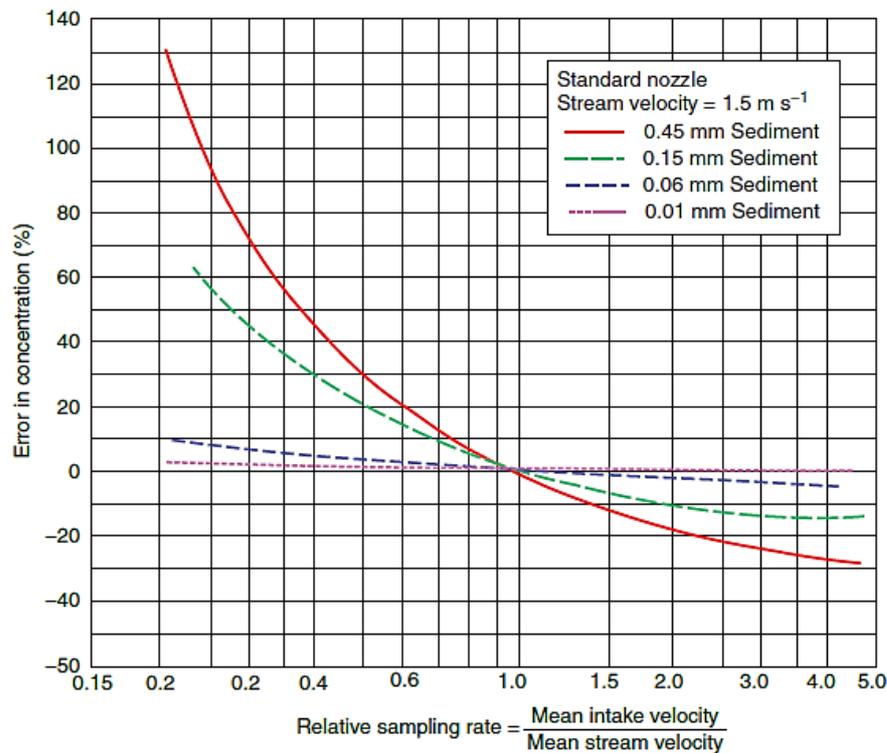


Figure 18 : Effet du taux d'échantillonnage sur les concentrations de sédiments en suspension mesurées pour quatre distributions de taille de sédiments. [Gray, J. R., Glysson, G. D. et Edwards, T. E. (2008)]

Cette estimation d'erreur étant délicate il est conseillé dans la mesure du possible de doubler les mesures au cas où il y ait un problème sur les échantillons.

L'équipe de Grasso et al. (2012) qui a mis en place le préleveur de l'OFEV s'intéresse à la représentativité de l'échantillon sur la section c'est-à-dire aux points de mesures sur la section du cours d'eau où la mesure sera la moins incertaine. Les échantillonnages réalisés régulièrement à différents points fixes dans le cadre du réseau de surveillance sont de bons indicateurs pour les cours d'eau mais il y a toujours un risque dans le cadre des mesures de suspension que celles-ci ne soient pas représentatives. En effet, l'emplacement de l'échantillonnage a un énorme impact et peut

³² Gray J.R., and Landers M.N. (2014) Measuring Suspended Sediment. In: Ahuja S. (ed.) Comprehensive Water Quality and Purification, vol. 1, pp. 157-204. United States of America: Elsevier

entraîner des erreurs de plus de 100% dans l'estimation des matières en suspension. Les difficultés lors des prélèvements d'échantillons représentatifs pour la concentration en suspension se multiplient avec la présence d'irrégularités dans l'eau : obstacles, à proximité des entrées latérales de sédiments, etc. Dans les grandes rivières où la vitesse d'écoulement varie dans une gamme de 0,6 à 3,7 m/s la concentration varie beaucoup ce qui explique pourquoi il est crucial de bien définir des points précis de prélèvement. Le prélèvement d'un plus grand nombre d'échantillons le long de la rivière permet bien sûr une plus grande représentativité.

Les résultats de profils de concentration relevés en 2012 et pris à une profondeur d'environ 15-20 cm montrent que la sous-estimation de la concentration des sédiments en suspension pour l'échantillon le plus représentatif varie de plus ou moins 5% alors que cette sous-estimation de la concentration pour les échantillons pris en bordure de cours d'eau varie de -18% à -85%.

Les études sur le Danube (A) (Haimann et al., 2012) et dans le bassin versant de la rivière Humber (Royaume-Uni) (Wass et Poireaux, 1999) montrent que la concentration en sédiments en suspension moyenne d'une rivière peut être jusqu'à 2,5 fois plus élevée que sur le rivage. Cependant, la sous-estimation dépend également de la vitesse d'écoulement et de la turbulence de l'eau et donc varie selon les échantillonnages.

L'équipe de l'OFEV³³ travaille encore sur les positions d'échantillonnages les plus représentatives (verticale d'échantillonnage / largeur du cours d'eau).

³³ Grasso A., Bérod D., Hodel H., Jakob A., Lalk P. et Spreafico M. (2014), Représentativité des échantillons par rapport aux matières solides en suspension, Expériences d'échantillonnage du Département d'hydrologie de l'OFEV, 7p.

PARTIE IV : APPLICATIONS SUR DES JEUX DE DONNÉES EXISTANTS

En anticipation aux calculs de flux réalisés sur les données de la chasse, les différentes méthodes de calculs de flux ont été testées au préalable sur plusieurs jeux de données. Les premières données étudiées sont celles recueillies par les équipes de l'unité Hydraulique Hydrologie de l'IRSTEA lors d'une mission sur le Mékong. Les secondes sont des données recueillies par le CEREGE (Centre de Recherche et d'Enseignement de Géosciences de l'Environnement) sur le Rhône.

1 Calcul de flux sédimentaire sur le Mékong

1.1 Présentation des données

Lors de la campagne de mesure réalisée sur le Mékong, deux sites de mesures ont fait l'objet de prélèvements de matière en suspension : l'un à Luang Prabang, l'autre à Xayaburi. Les prélèvements ont été réalisés avec une bouteille Niskin. Des données ADCP ont également été récoltés en même temps. Les échantillons ont été analysés au granulomètre laser. Les sables ont été distingués des matières en suspension avec une méthode numérique de démodulation statistique sur une partie des données récoltées. Le Mékong est un fleuve très large avec des débits très importants et donc le transport de sable par le fleuve est important. Ces jeux de données vont nous permettre de calculer des flux de matières en suspension et de sable dans la section. Nous comparons par la suite ces résultats au modèles de transport.

| Sample N° | Time | Sample depth | TSS concentration | Silt concentration < 67µm | Sand concentration > 67µm | Mode 1 | Mode 2 | Sand in sample |
|-----------|--------|--------------|-------------------|---------------------------|---------------------------|--------|--------|----------------|
| | [TU+5] | [m] | [g/L] | [g/L] | [g/L] | [µm] | [µm] | % |
| VRD1 | 11:02 | 7 | 0,68 | 0,64 | 0,06 | 8,8 | 27,2 | 9 |
| VRD2 | 11:05 | 9 | 0,75 | 0,68 | 0,08 | 9,3 | 33,9 | 11 |
| VRD3 | 11:10 | 11 | 0,82 | 0,70 | 0,12 | 10,4 | 86,3 | 15 |
| VRD4 | 11:14 | 13 | 0,94 | 0,82 | 0,11 | 10,8 | 67,5 | 12 |
| VRD5 | 11:17 | 0 | 0,38 | 0,34 | 0,09 | 10,3 | 92,4 | 24 |
| VCE1 | 11:21 | 6 | 0,82 | 0,64 | 0,17 | 13,6 | 105,1 | 21 |
| VCE2 | 11:30 | 9 | 0,84 | 0,72 | 0,13 | 18,5 | 18,5 | 15 |
| VCE3 | | 10,5 | 0,85 | 0,54 | 0,23 | 14,2 | 208,3 | 27 |
| VCE4 | 11:50 | 0 | 0,59 | 0,56 | 0,05 | 8,9 | 34,4 | 8 |
| VGC1 | 14:55 | 5 | 0,93 | 0,83 | 0,09 | 9,0 | 39,6 | 10 |
| VGC2 | 15:01 | 8 | 0,95 | 0,85 | 0,10 | 9,3 | 49,3 | 10 |
| VGC3 | 15:12 | 10,5 | 1,12 | 0,91 | 0,15 | 12,2 | 135,0 | 13 |
| VGC4 | 15:13 | 0 | 0,91 | 0,79 | 0,11 | 8,6 | 44,1 | 13 |
| VRG1 | 14:35 | 5 | 0,97 | 0,84 | 0,11 | 9,8 | 51,5 | 12 |
| VRG2 | 14:40 | 8 | 0,90 | 0,74 | 0,14 | 12,4 | 136,5 | 16 |
| VRG3 | 14:45 | 10,5 | 1,07 | 0,77 | 0,20 | 20,7 | 141,1 | 19 |
| VRG4 | 14:52 | 0 | 0,99 | 0,91 | 0,07 | 11,7 | 93,3 | 7 |

Tableau 3: Table regroupant les informations de concentration et de granulométrie des prélèvements de matière en suspension réalisés le 5 août 2013 à Luang Prabang. [Dramais G., Camenen B., Le Coz J. et al. (2013)]

1.2 Site de Luang Prabang

La section du Mékong a Luang Prabang fait environ 550 mètres de large. Les échantillons de sables mesurés à Luang Prabang ont une granulométrie comprise entre 0,06 et 1,1 mm. Les débits sont élevés. Pour la journée du 5 août 2013 le débit mesuré dans la section est de 11 000 m³/s et le flux de sable est de 108 000 tonnes par jour en extrapolant les valeurs pour un débit liquide et solide constant sur une journée.

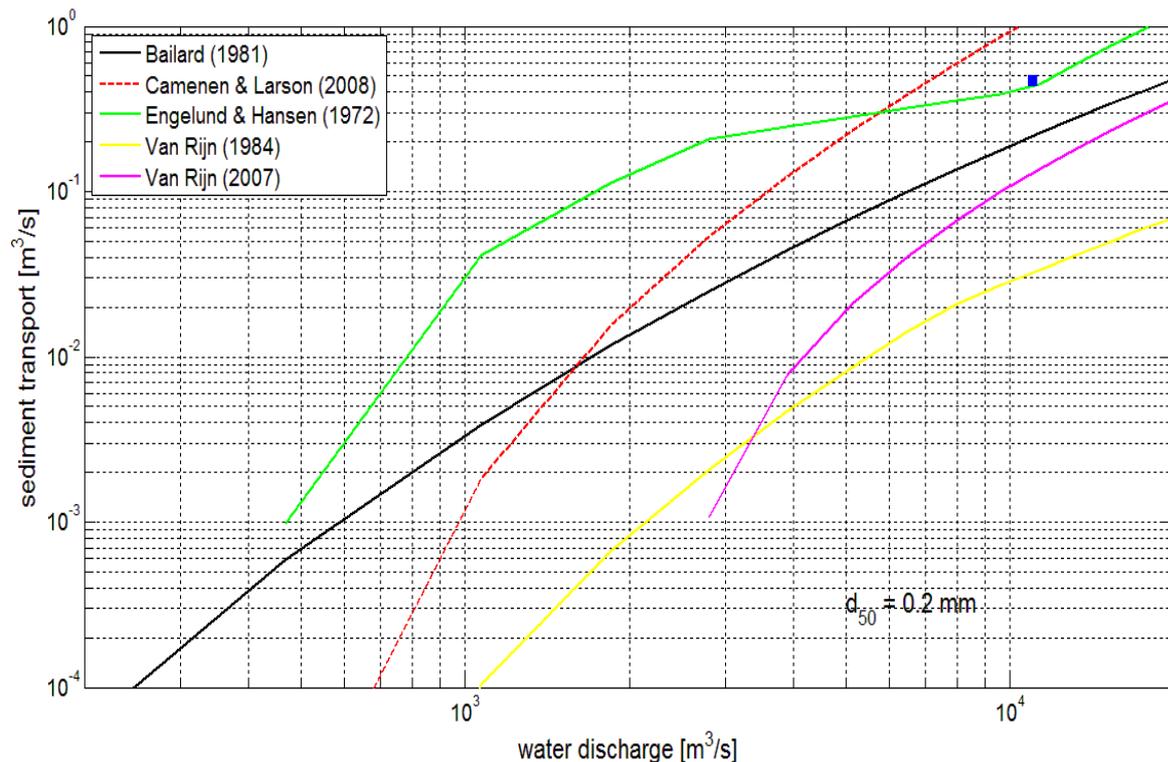


Figure 19 : Modélisation du transport de sable à Luang Prabang le 05/08/2013 [Camenen B., Henry E.]

Les résultats présentés figure 19 représentent l'application des différentes formules de transport décrites dans la partie II.2, pour le cas du Mekong à Luang Prabang. Ils sont représentés avec une échelle logarithmique car la pente des courbes est trop raide pour être représenté en arithmétique. Le point bleu correspond au calcul de flux réalisé à partir des concentrations d'échantillonnages du 5 août 2013 sur ce site.

La modélisation aboutit à des résultats satisfaisants pour le site. Les modèles d'Engelund et Hansen, de Camenen et Larson et de Bailard permettent de s'approcher du point d'échantillonnage. Les modèles de Van Rijn en sont plus éloignés. Néanmoins, il n'est pas possible de savoir si un modèle est plus adapté qu'un autre car avec un seul échantillon on ne peut avoir d'information sur la pente ou forme de courbe qui correspondrait le mieux à la caractérisation du flux de sable en fonction du débit du Mékong.

1.3 Site de Xayaburi

La province de Xayaburi est située plus en aval que celle de Luang Prabang sur le Mékong. A Xayaburi, la section est plus profonde et atteint les 25 mètres de profondeur mais le débit moyen mesuré le 9 août 2013 est de 10 600 m³/s avec un flux de sable de 247 000 tonnes par jour, en extrapolant les valeurs pour un débit liquide et solide constant sur une journée.

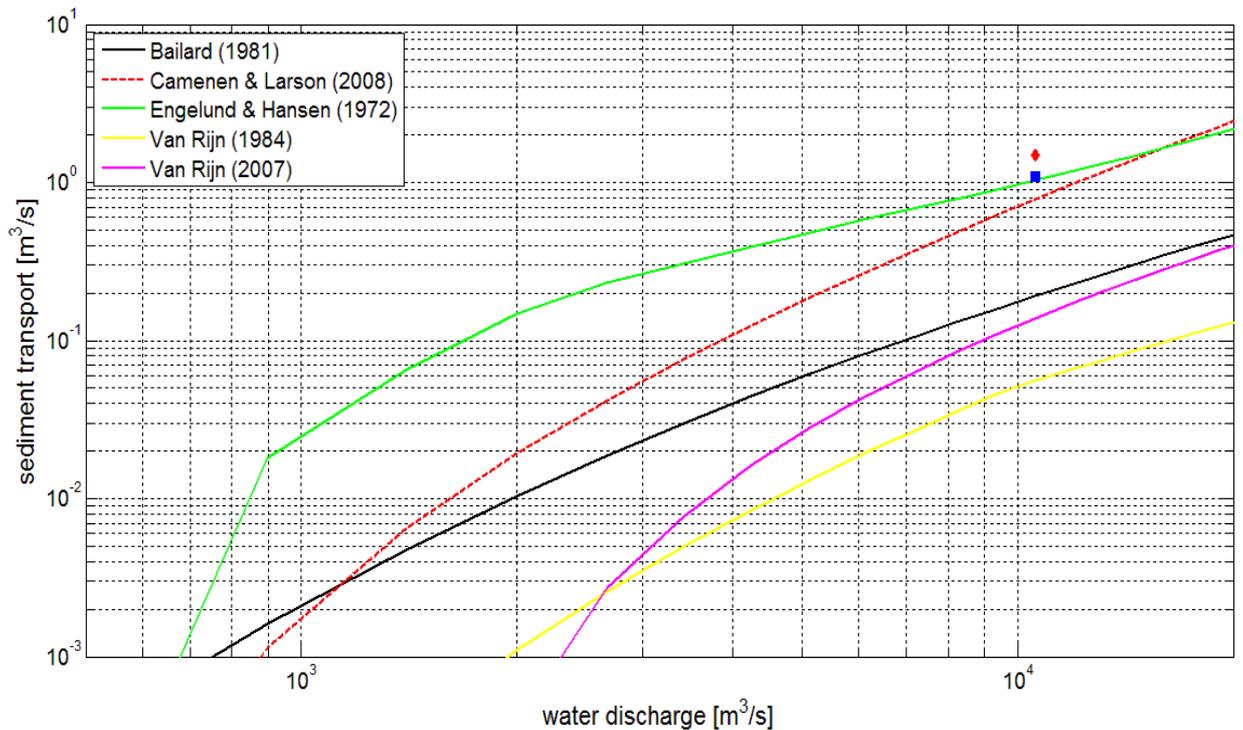


Figure 20 : Modélisation du transport de sable à Xayaburi le 09/08/2013 [Camenen B., Henry E.]

Là encore la modélisation rejoint les échantillonnages expérimentaux réalisés. Le point bleu correspond au flux de sable mesuré pour la journée du 9 août 2013 et le point rouge correspond au flux de sable mesuré à la même date avec un échantillonneur différent : une bouteille de Delft. Les formules d'Engelund et Hansen s'approche le mieux des points de mesure mais on ne dispose pas d'assez d'échantillons pour savoir si les modèles sont vraiment adaptés. Néanmoins les formes de courbe des différents modèles diffèrent moins entre elles que sur la modélisation réalisée à Luang Prabang ce qui laisse supposer une meilleure modélisation.

2 Calcul de flux sédimentaire lors des crues de Barcarin

2.1 Présentation des données

Le bac de Barcarin est un bac qui relie les deux rives du Grand-Rhône, en Camargue. Il est situé sur la commune d'Arles. Le CEREGE (Centre de Recherche et d'Enseignement de Géosciences de l'Environnement) en a fait une station de mesure hydro-sédimentaire dans le cadre de l'OSR

(Observatoire des Sédiments du Rhône). La présence du bac permet d'avoir des données sur le transect en continu. En effet, le CEREGE a équipé ce bac d'un ADCP, mais également d'autres appareils comme un turbidimètre et un capteur de pression. Ces appareils permettent d'acquérir des données en continu sur la station. Des prélèvements de matières en suspension ont été faits à Arles lors de deux crues annuelles en novembre 2012. Ces données sont intéressantes car elles sont effectuées sur le Rhône tout près de l'embouchure, sur trois verticales de mesures et avec plusieurs points de mesure par verticale. De plus, les mesures ont été faites pendant plusieurs jours de suite, ce qui permet d'avoir une variation de débit importante liée aux crues.

Les données transmises par le CEREGE sont les données ADCP qui donnent des informations sur les débits, la bathymétrie. N'ayant pas disposés des vitesses moyennes autour de chaque point de prélèvement au premier abord, celle-ci ont été calculés de la manière suivantes :

- Utilisation d'une loi logarithmique en fonction de la profondeur : $V(z) = A \ln(z) + B$
- Calage des coefficients A et B sous excel tels que la moyenne des vitesses coïncide avec la moyenne journalière de la vitesse sur la section et que la répartition des vitesses dans la section soit cohérente avec les variations observées sur les transects journaliers (type figure x)

Les données granulométriques sont les suivantes : Concentration en matière en suspension associée à une date, une profondeur et à une position de verticale pour chaque prélèvement, et analyse granulométrique pour la date du pic de crue comme le montre les extraits de fichiers suivants.

| CRUE du 12112012_bac de Barcarin | | |
|---|-----------------|------------------|
| 100 | Prof (m) | MES (g/l) |
| 12/11/2012 | 7 | 2,83 |
| RD | 5 | 2,44 |
| | 3 | 2,40 |
| | 2 | 2,30 |
| | 1 | 2,29 |
| | 0,2 | 2,21 |
| RG | 7 | 2,38 |
| | 0,2 | 1,92 |
| MC | 9 | 2,53 |
| | 5 | 2,20 |
| | 2 | 2,08 |
| | 0,2 | 1,97 |

Tableau 4 : Données d'échantillonnages recueillis à Barcarin le 12/11/2012 [CEREGE (2012)]

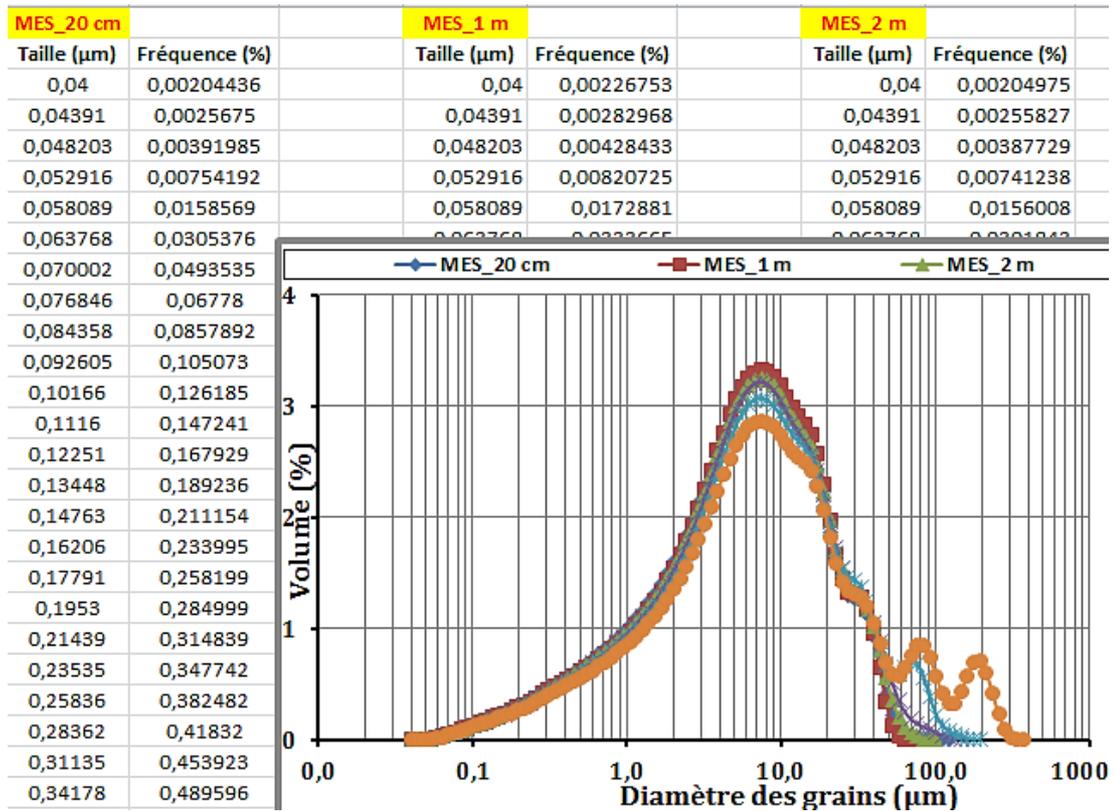


Tableau 5: Exemple de séries de données granulométriques transmises pas le CEREGE sur les prélèvements réalisés le 12/11/2012 à Barcarin

A partir de ces données granulométriques, il est possible de déduire une proportion de sable dans l'échantillon. Pour cela, on sépare les sables, des limons et argiles : couples (tailles ; fréquences) pour toute taille inférieure à 67 µm puis on somme les valeurs de fréquence pour les sables. La fréquence cumulée obtenu donne la proportion de sable dans l'échantillon pour une profondeur et une position donnée. On applique ensuite ce pourcentage aux valeurs de concentration en matières en suspension. L'hypothèse est faite que pour une même crue ces proportions au pic de crue étaient représentatives pour les différentes journées de crue et décrue et que les positions de prélèvement étaient bien les mêmes pour chaque journées.

A partir du découpage sable/limon+argile du fichier granulométrique, on recalcule une valeur de passant à 50% (D_{50}) pour chaque série associé à un point de prélèvement pour obtenir un D_{50} moyen par transect.

2.2 Les concentrations relevées lors des crues à Barcarin

Dans les figures suivantes, sont présentés les résultats en concentration de MES totale (g/l) à gauche et sable (mg/l) à droite. Chaque couple de figures correspond à une campagne de prélèvement. La bathymétrie de la section est issue des données ADCP.

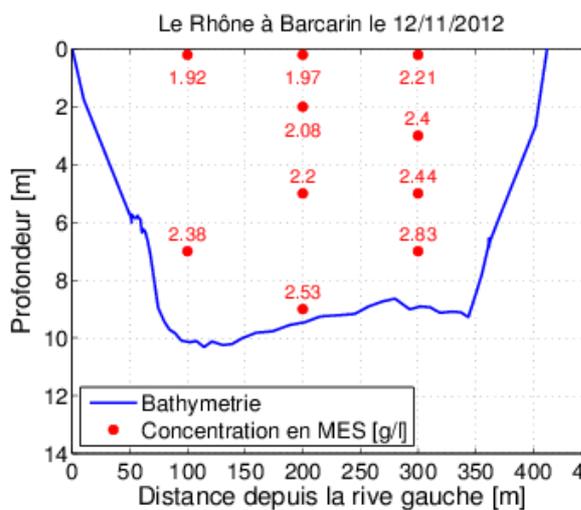


Figure 21 : Le Rhône à Barcarin concentration en MES le 12 novembre

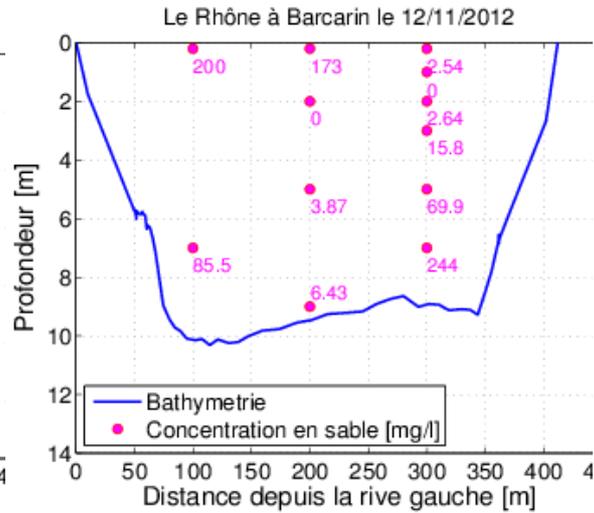


Figure 22 : Le Rhône à Barcarin concentration en sable le 12 novembre

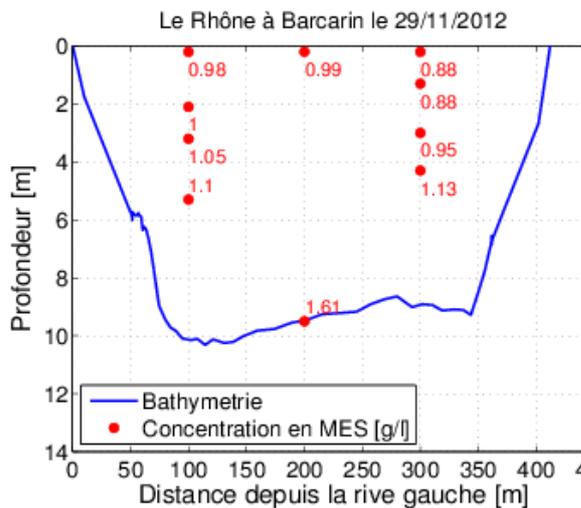


Figure 23 : Le Rhône à Barcarin concentration en MES le 29 novembre

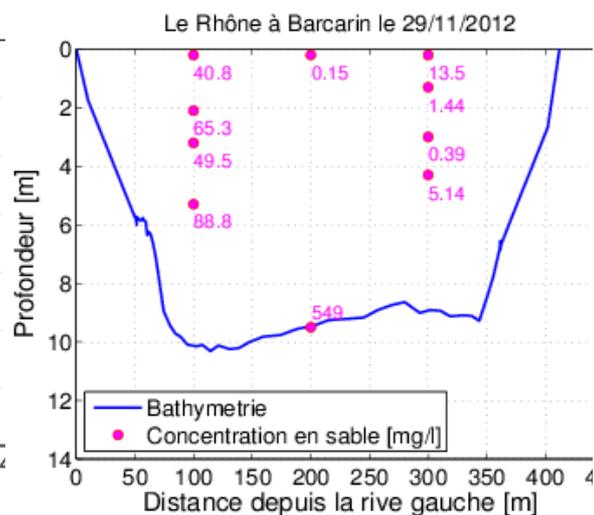


Figure 24 : Le Rhône à Barcarin concentration en sable le 29 novembre

Pour les journées du 12 ($4000 \text{ m}^3/\text{s}$) et du 29 ($4500 \text{ m}^3/\text{s}$) novembre 2012, On remarque sur les figures 21 et 23 qu'en terme de MES les gradients verticaux sont cohérents, avec des concentrations plus fortes en profondeur. Les granulométries ont été analysées et séparées à $67 \mu\text{m}$ et les résultats ne sont pas très homogènes.

On peut dire qu'une certaine logique est respectée en rive droite le 12 puis en rive gauche le 29, cependant l'incertitude de mesure sur la granulométrie peut avoir un impact très fort sur les résultats. La présence de sable est bien mise en évidence mais la difficulté du sous échantillonnage et de sa représentativité l'est aussi.

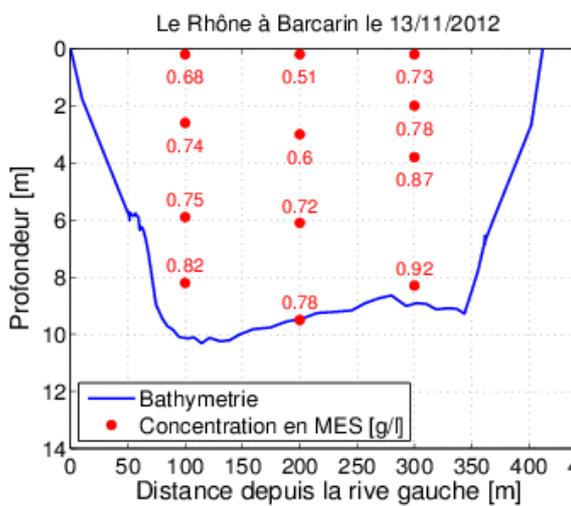


Figure 25 : Le Rhône à Barcarin concentration en MES le 13 novembre

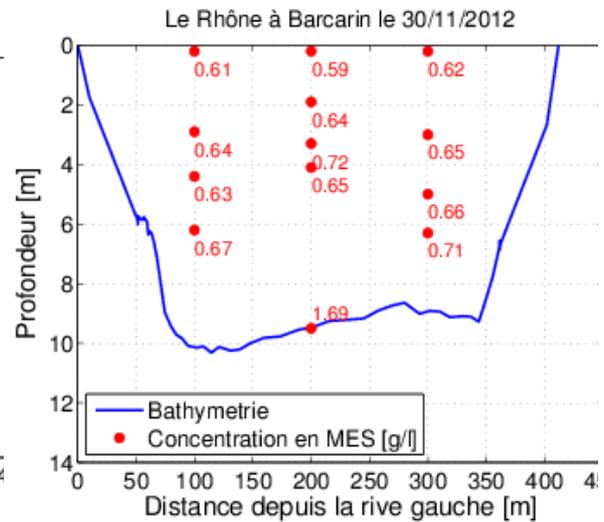


Figure 26 : Le Rhône à Barcarin concentration en MES le 30 novembre

Pour d'autres dates (figures 25 et 25) les mesures réalisées viennent confirmer les gradients verticaux de concentration.

A partir de ces données expérimentales et des données ADCP du bac, vont pouvoir être calculé des flux de sable (Partie IV 2.3 et 2.4) et comparer ces flux aux modèles de transport.

2.3 Crue du 12 novembre 2012

Pour la crue du 12 novembre, les données disponibles sont celles allant du pic de crue le 12/11/2012 à la fin de la décrue le 19/11/2012.

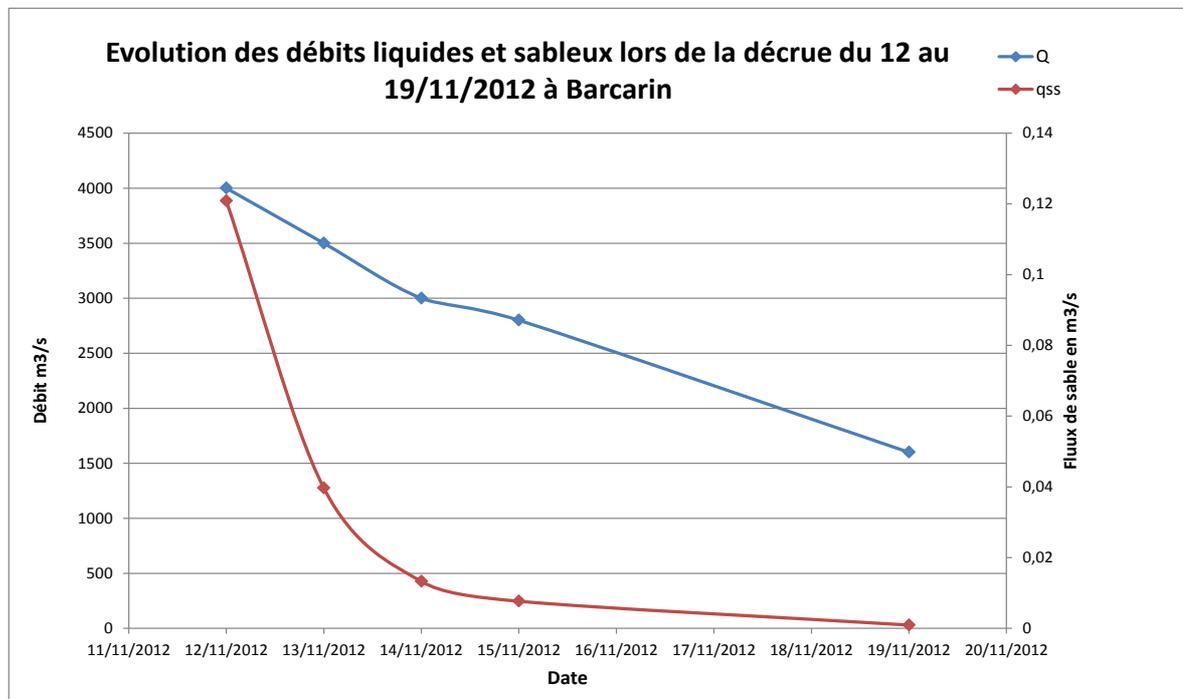


Figure 27 : Évolution du flux de sable et du débit du Rhône lors de la crue de 12 novembre à Barcarin [Henry E.]

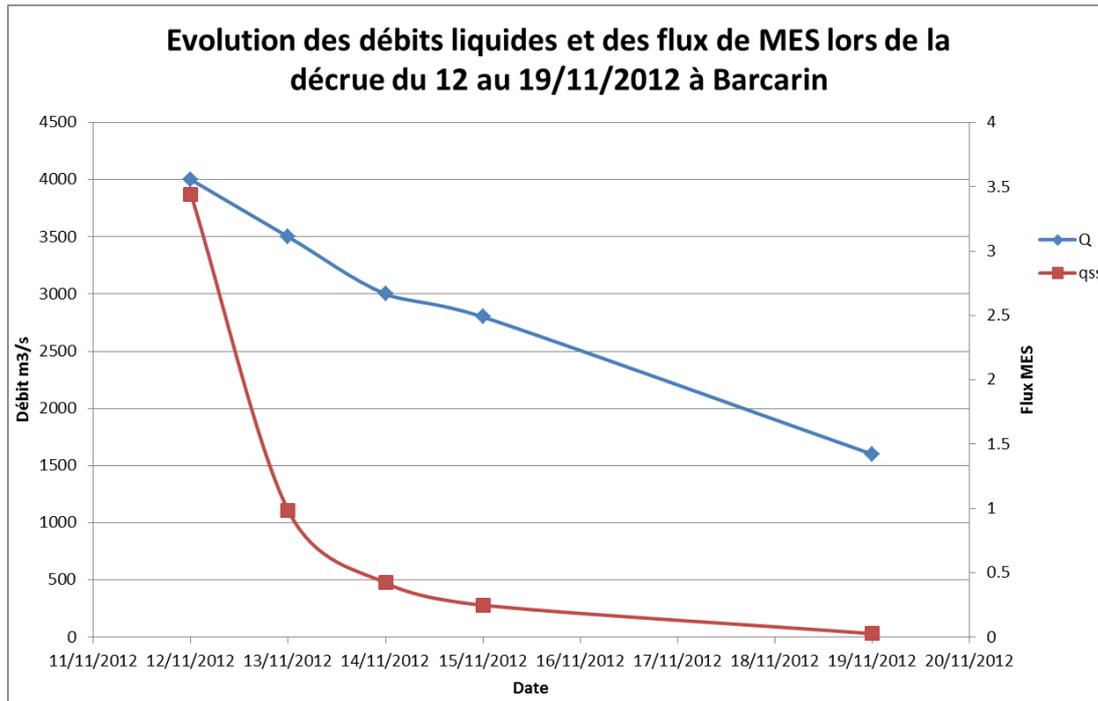


Figure 28 : Évolution du flux de MES en m^3/s et du débit du Rhône lors de la crue de 12 novembre à Barcarin [Henry E.]

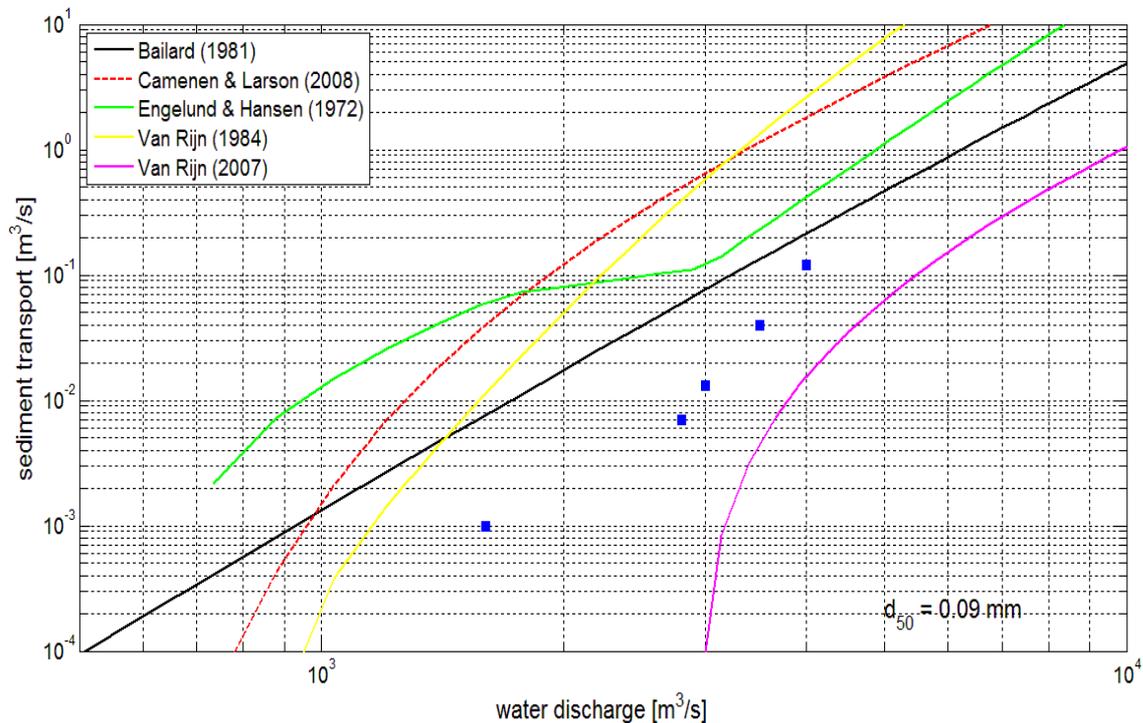


Figure 29 : Modélisation du transport de sable à Barcarin lors de la crue du 12/11/2012 [Henry E.]

Les résultats de la modélisation sont intéressants car la variabilité des débits (dû au phénomène de crue) permet d'avoir plusieurs points de flux de sable correspondants espacés et de faire des comparaisons sur les formes des différents modèles. On remarque que le modèle de Bailard semble

être le plus approprié si on regarde l'ensemble des données. Cependant, pour un débit supérieur à $2500 \text{ m}^3/\text{s}$, l'allure de la courbe donnée par les points d'échantillonnages ressemble davantage au modèle de Van Rijn 2007 ou encore Van Rijn 1984.

On peut se demander quelle est l'influence de la taille des sables recueillis sur les résultats obtenus. En effet, concernant les formules de transport, elles ne sont valables que pour des sédiments relativement grossiers (bien souvent des sables avec un diamètre $d > 0,1\text{mm}$) y compris la formule de Engelund & Hansen. Cette dernière estime que le transport total soit le groupement du charriage et de la suspension; elle a été validée pour des sables. En refaisant un tri granulométrique et en ne conservant que les sables de diamètre $d > 0,08\text{mm}$ on obtient la modélisation suivante.

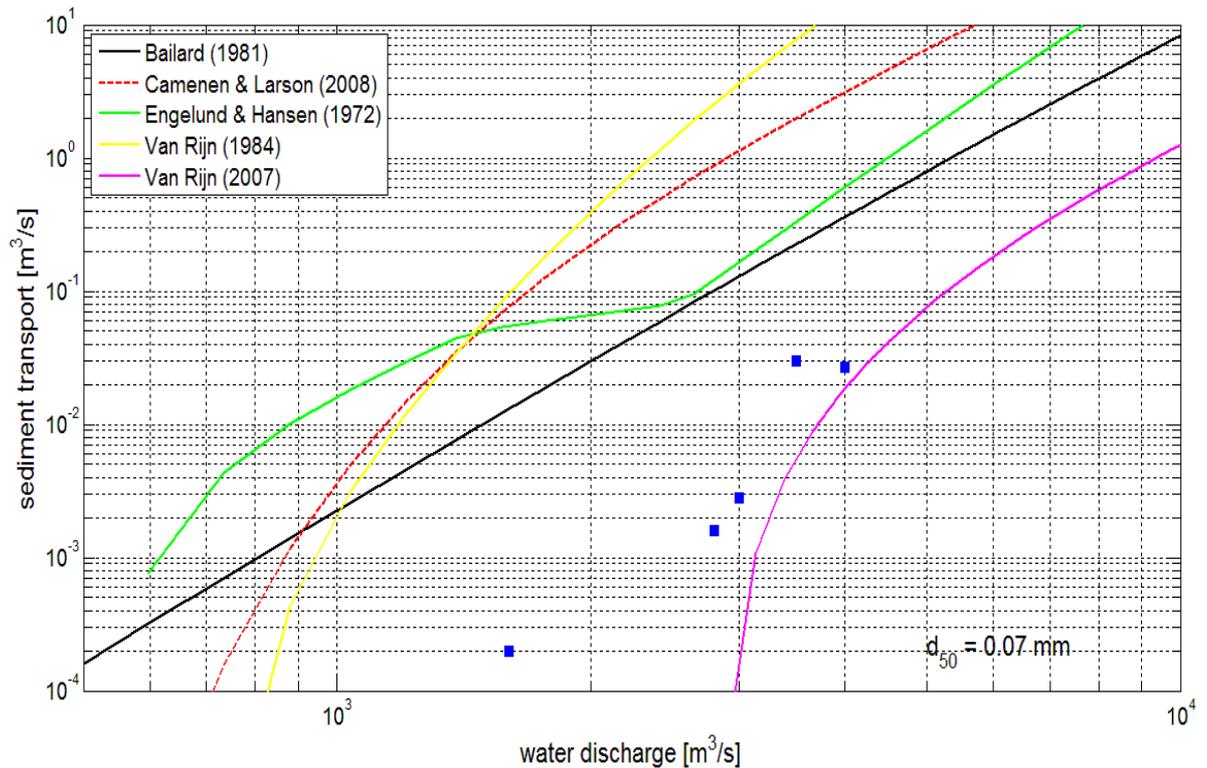


Figure 30 : Modélisation du transport de sable grossier à Barcarin lors de la crue du 12/11/2012 [Henry E.]

Sur ce graphique on peut voir que les modèles à l'exception de celui de Van Rijn 2007 surestiment largement les flux calculés expérimentalement. En revanche, les points de flux sont plus proches de la courbe de Van Rijn 2007 ce qui conforte les résultats précédents.

Cette nouvelle modélisation ne permet pas de conclure sur l'influence de la taille des sables dans l'efficacité des différents modèles.

Plusieurs explications peuvent argumenter le fait que les mesures de suspension donnent des valeurs plus faibles que les différentes formules de transport :

- les formules de transport n'ont pas nécessairement été validées pour des diamètres de sédiments aussi fins. Elles sont sensibles au diamètre et peuvent "diverger" pour ces valeurs très faibles;
- les concentrations en sédiments mesurées ne correspondent pas à un équilibre du fait d'un manque de sédiments au fond;
- les mesures sont incertaines en particulier pour le fond où l'on trouve les sables car échantillonner au fond du cours d'eau est plus difficile.

2.4 Crue du 29 novembre 2012

Pour la crue du 29 novembre, les données disponibles de prélèvements s'étendent sur la période du 27 novembre au 4 décembre 2012. Elles permettent de voir à la fois la crue et la décrue du Rhône.

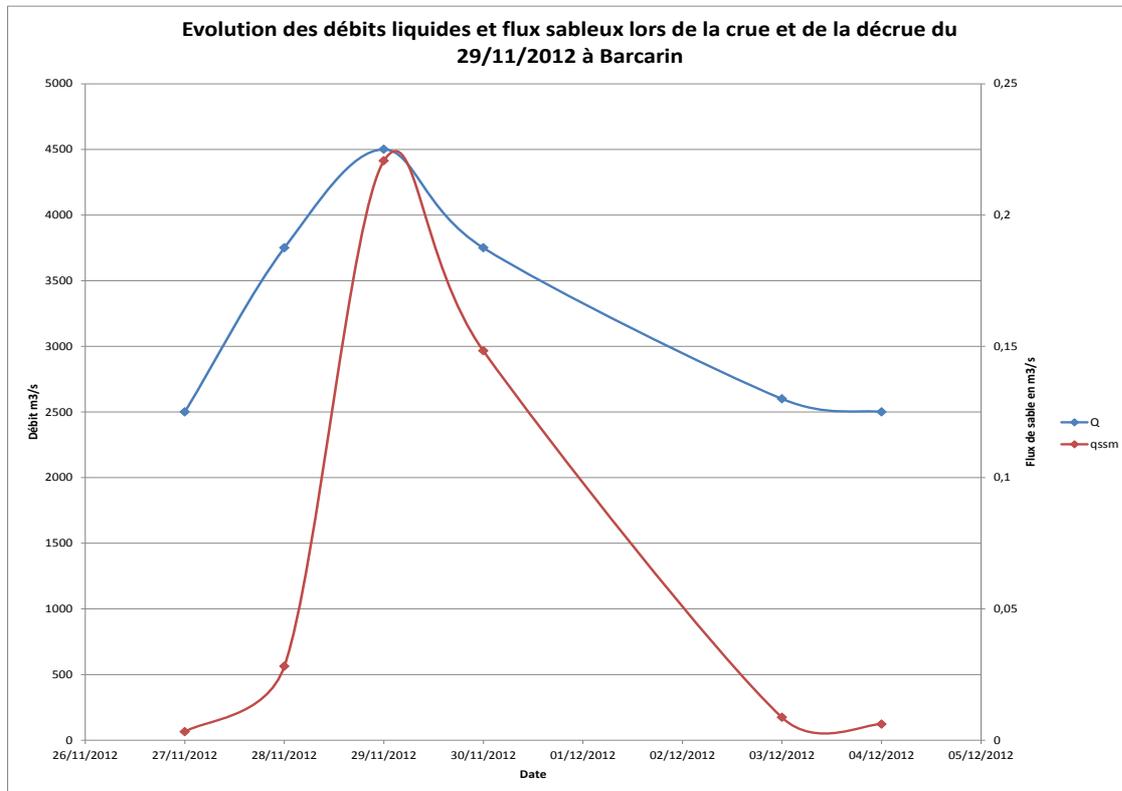


Figure 31 : Évolution du flux de sable et du débit du Rhône lors de la crue du 29 novembre à Barcarin [Henry E.]

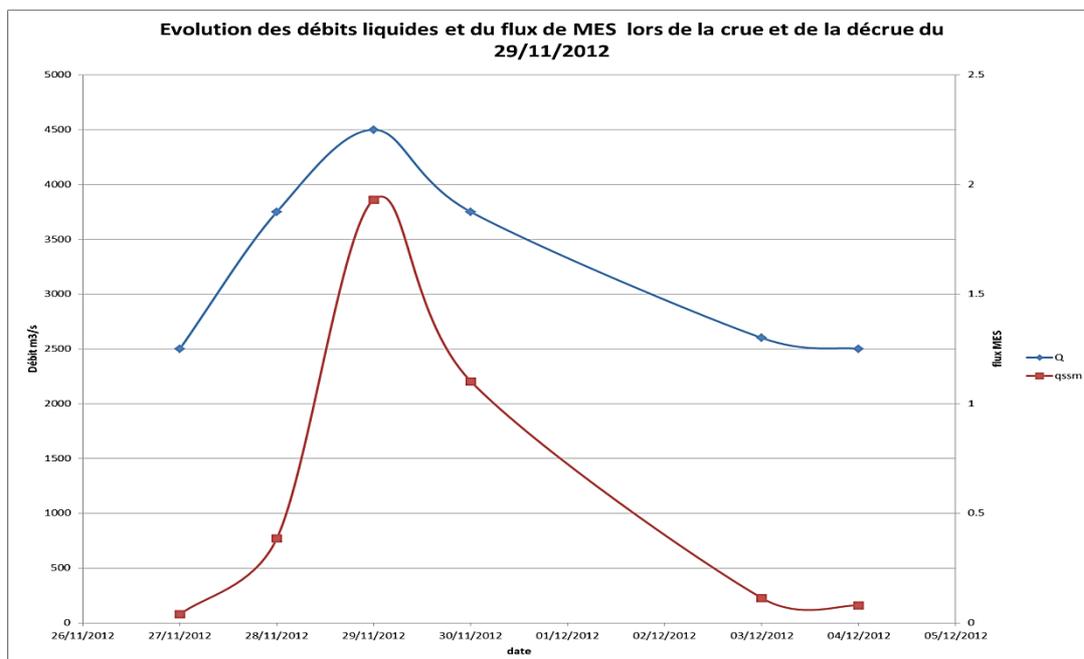


Figure 32 : Évolution du flux de MES en m³/s et du débit du Rhône lors de la crue de 29 novembre à Barcarin [Henry E.]

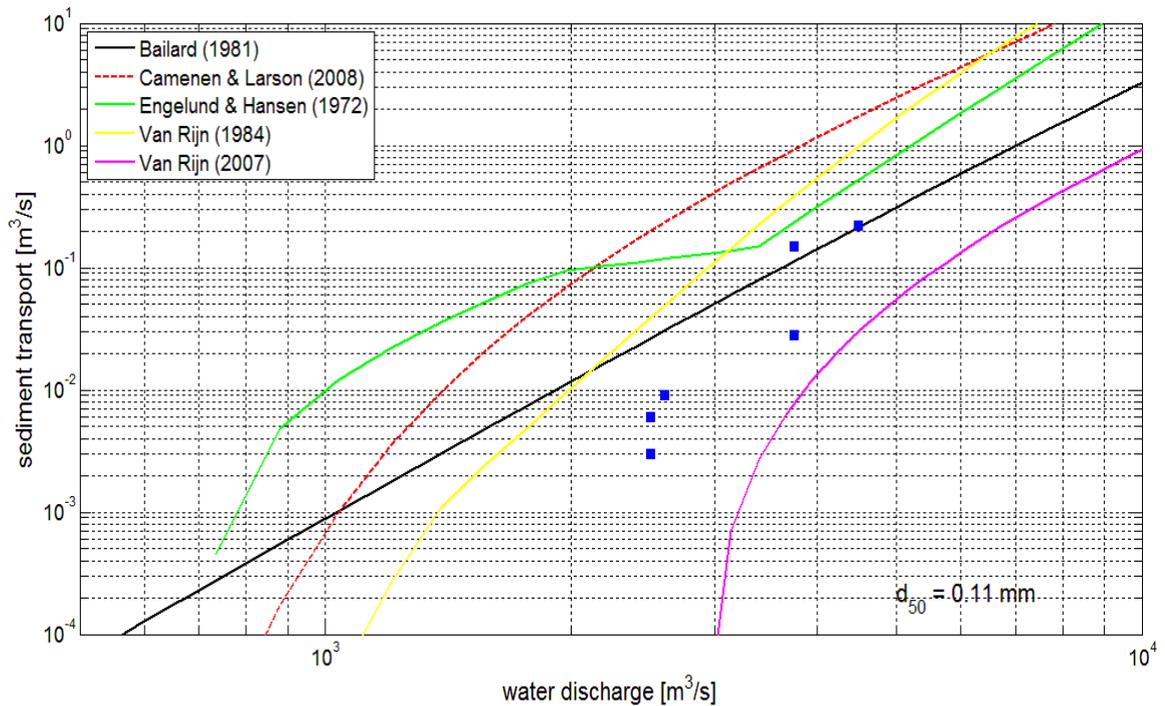


Figure 33 : Modélisation du transport de sable à Barcarin lors de la crue du 29/11/2012 [Henry E.]

Le résultat de la modélisation du transport de sable lors de la crue du 29 novembre 2012 est plus aboutit car les valeurs de flux de sable sont beaucoup plus proche des modèles. La forme de la courbe de tendance formés par les points des échantillonnages est plus irrégulière que pour la crue du 12 novembre ce qui ne permet pas de conclure sur les modèles les plus adaptés. Néanmoins, les points de flux de sable sont encadrés par les courbes de Van Rijn 1984 et 2007 comme lors de la crue du 12 novembre.

3 Bilan des différents essais

Les essais réalisés mettent en avant plusieurs éléments intéressants.

Tout d'abord, au niveau du site de Barcarin on peut voir que la concentration en matière en suspension augmente avec la profondeur de manière significative, ce qui corrobore la partie théorique (Figure 9).

En revanche pour ce qui est du sable, les résultats ne permettent pas de conclure sur leur répartition dans la section. En effet, l'hypothèse faite lors du tri granulométrique qui consiste à dire que les proportions de sables dans la section aux dates des pics de crue sont représentatives pour l'ensemble des journées de crues paraît est largement discutable. Cependant, même pour les deux journées de pic de crue où le tri granulométrique a été fait plus précisément, on ne distingue pas de logique de répartition du sable dans la section.

L'étude des données a donc mis en évidence la présence de sable en suspension sans pouvoir expliquer sa répartition spatiale. Il serait nécessaire de refaire des campagnes de prélèvement plus détaillées en période de crue.

Les résultats permettent de mettre en avant une corrélation directe entre le débit de la rivière et le flux de matières en suspension. Cette corrélation est également valable pour le sable. Ceci respecte une certaine logique car les sables relevés à Barcarin ne dépassent pas 0,4 mm de diamètre pour les journées du 12 et du 29 novembre. Il s'agit donc de sable fin et leur comportement se rapproche davantage de celui des matières en suspension que de celui du charriage.

On peut noter que l'influence des marées au niveau du site de Barcarin a des conséquences sur le niveau d'eau et peut également en avoir sur la dynamique sédimentaire du site. Ce paramètre doit être pris en compte pour aller plus loin dans l'exploitation des données.

Que ce soit sur le Mékong ou sur le Rhône à Barcarin, les écarts entre les différents modèles et les points d'échantillonnage sont importants. Les incertitudes sont très fortes. On ne peut pas conclure sur l'efficacité des modèles de manière globale. Au niveau de la modélisation des données du Mékong, les modèles de Camenen et Larson et, d'Engelund et Hansen s'approchent le plus des mesures effectuées. Au niveau de la modélisation des données de Barcarin les modèles de Van Rijn ont les variations les plus proches que celles des flux mesurés. La modélisation permet d'obtenir un intervalle d'estimation du flux sableux pour une valeur de débit donnée. Malgré cela, cet intervalle reste imprécis. En effet, pour la même valeur de débit, le transport de sable estimé peut généralement varier de 10^2 m³/s entre différents modèles.

PARTIE V : MESURES ET MODÉLISATION DES FLUX SABLEUX LORS DES CHASSES DU RHONE

1 Protocole de mesures et mise en place

Les chasses du Rhône ont eu lieu du 20 au 30 mai 2016. Trois sites de mesures ont été retenus pour effectuer des mesures de flux sédimentaire :

- Le site de Chancy aux Rippes
- Le site de Bognes
- Le site de Champagneux

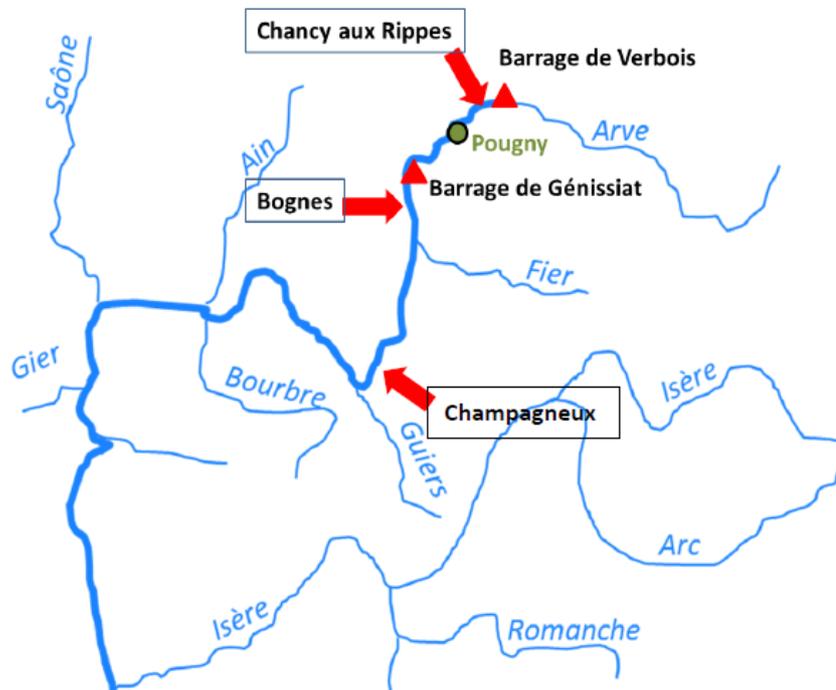


Figure 34 : Localisation des sites de mesures sélectionnés pour l'échantillonnage de matière en suspension lors de la chasse du Rhône 2016 [IRSTEA]

Trois méthodes de prélèvement et d'exploitation des données sont possibles:

- la Equal Width Increment Method qui nécessite de faire des verticales à espacement régulier et fixe. Avec cette technique il est possible de garder les mêmes bouteilles que l'on remplace quand elles sont pleines Elle a l'avantage de ne pas nécessiter de connaissance accrue sur la section à étudier. Si les concentrations sur la verticale varient beaucoup mieux vaut utiliser cette méthode.

$$\text{EWI: } C_{xs} = \frac{\sum_{j=1}^J \text{Vol}_j C_j}{\sum_{j=1}^J \text{Vol}_j} \text{ }^{34}$$

- la Equal Discharge Increment Method³⁵ qui consiste à découper la section en parts de flux égale et à remplir une bouteille pour chaque verticale. On prend généralement moins de mesures de verticales avec cette méthode.

$$\text{EDI: } C_{xs} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i$$

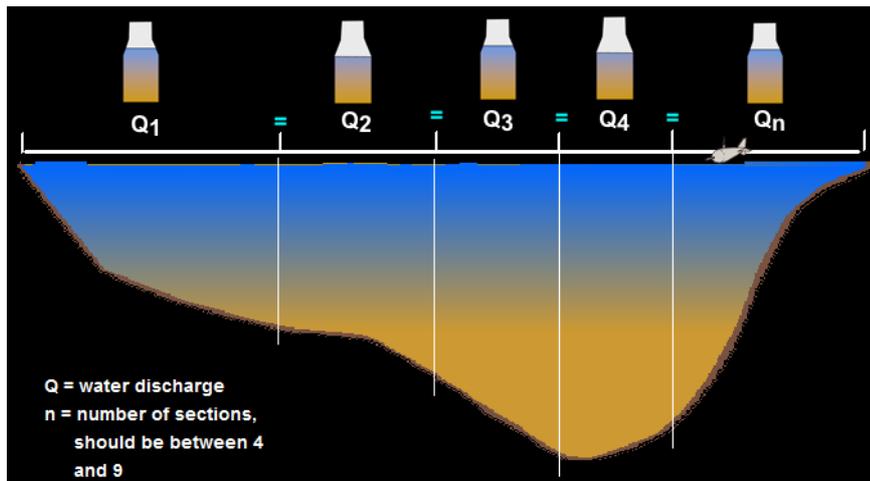


Figure 35 : Illustration de la méthode de prélèvement Equal Discharge Increment [Gray].R., Landers M.N. (2014)]

- la Equal Area Increment méthode³⁶ qui consiste à diviser la section en parts d'aire égales

Dans le cadre des chasses, n'ayant pas une connaissance parfaite des sections et les variations de débits et de bathymétrie n'étant pas négligeable, c'est la méthode Equal Width Increment qui a été retenue. Les bouteilles étaient changées entre chaque prélèvement ponctuel.

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). Aux Ripes et à Bognes les ADCP sont déployés sur des petites embarcations tractées depuis les trilles. 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 avant chaque campagne de prélèvement. Les couplages ADCP-GPS ont bien

³⁴ avec les notations utilisées en Partie II

³⁵ Gray J.R., and Landers M.N. (2014) Measuring Suspended Sediment. In: Ahuja S. (ed.) Comprehensive Water Quality and Purification, vol. 1, pp. 157-204. United States of America: Elsevier

³⁶ ISO (2002). 10694 : Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts – Méthodes de mesurage des caractéristiques de sédiments en suspension. 27 p.

fonctionné aux Ripes et à Champagneux, à Bognes la liaison sans fil avec le GPS embarqué n'a pas permis un couplage efficace. De ces mesures ADCP on peut extraire la bathymétrie et les champs de vitesse qui seront exploités par la suite.

La distinction sables / fines est également effectuée en isolant le pourcentage de particules supérieures à $67 \mu\text{m}$ des résultats du granulomètre comme sur les mesures de Barcarin. Cependant, le tri granulométrique des sables est ici plus précis car il est effectué sur chaque échantillon.

2 Site de Bognes

La station de Bognes, est située quelques centaines de mètres en aval du barrage usine de Génissiat exploité par la CNR³⁷. Cette station hydrométrique est équipée d'une traîle manuelle permettant de déployer des instruments de mesure variés.

Les mesures à Bognes ont été effectuées pendant trois journées lors des chasses : les 20, 27 et 30 mai 2016. Le préleveur utilisé pour relever des échantillons de sable est l'USGS P72.



Figure 36 : Les installations sur le site de Bognes (traîle mécanique manuelle, préleveur USGS) [Henry E.]

2.1 Les concentrations relevées à Bognes

³⁷ <http://www.rdbmrc.com/hydroreel2/station.php?codestation=687>

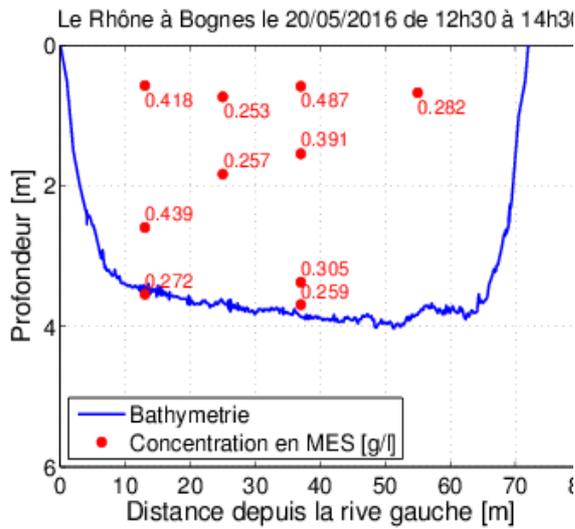


Figure 37 : Le Rhône à Bognes concentration en MES le 20 mai

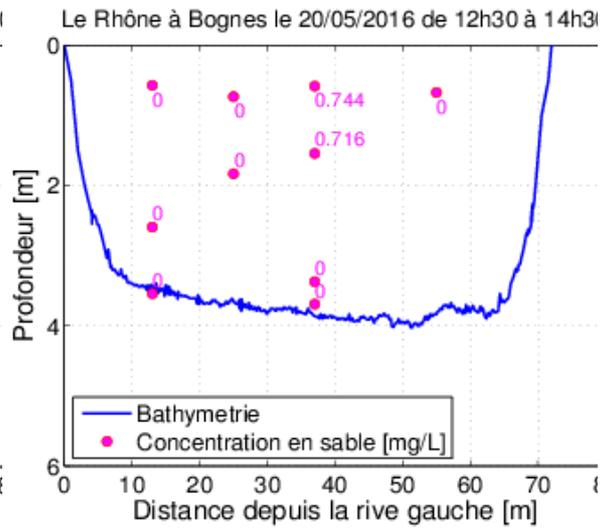


Figure 38 : Le Rhône à Bognes concentration en sable le 20 mai

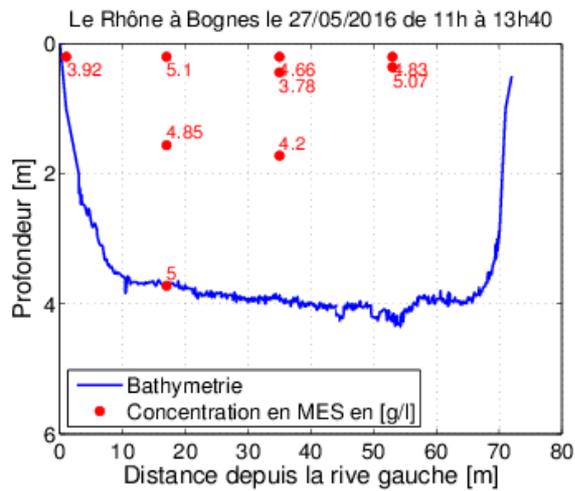


Figure 39 : Le Rhône à Bognes concentration en MES le 27 mai

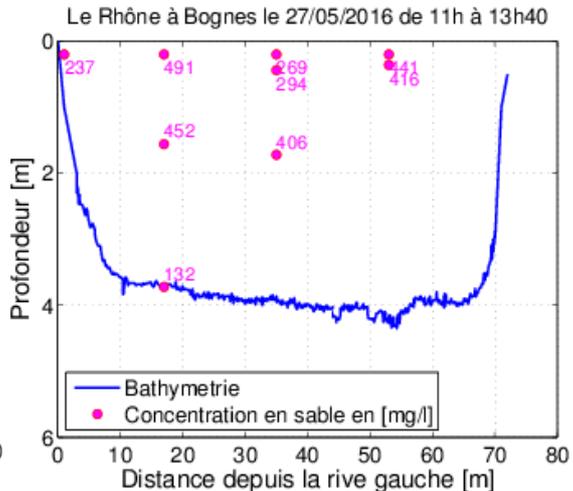


Figure 40 : Le Rhône à Bognes concentration en sable le 27 mai

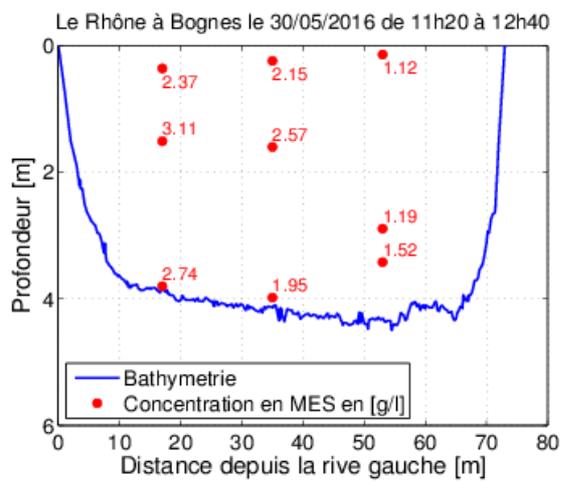


Figure 41 : Le Rhône à Bognes concentration en MES le 30 mai

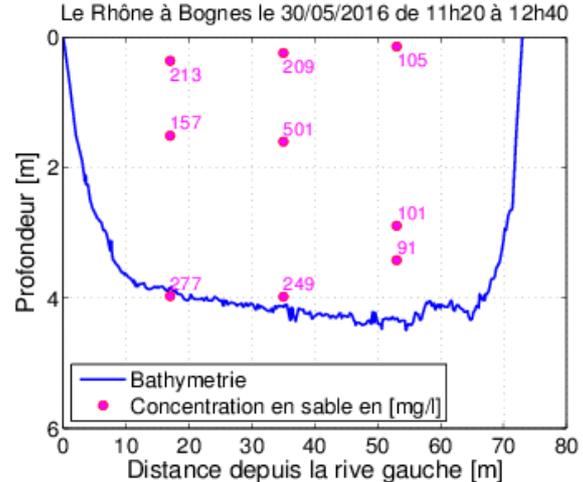


Figure 42 : Le Rhône à Bognes concentration en sable le 20 mai

La répartition des MES totale dans la section est assez surprenante. On retrouve pour certaines verticales des concentrations plus fortes en profondeur, mais ce n'est pas le cas pour toutes les verticales et les gradient sont parfois inversés par rapport à la théorie. La proximité du barrage à quelques centaines de mètres et les écoulements très forts engendrent encore une fois de fortes turbulences. On peut supposer comme pour la station de Ripes que le transit des sédiments est perturbé par ces écoulements forts.

Ici aussi la présence de sable est mise en évidence dans des proportions non négligeables, sauf pour la campagne de mesure du 20 mai qui correspond au tout début de l'évènement.

2.2 Les flux sédimentaires à Bognes

| Date | 20/05/2016 | 27/05/2016 | 30/05/2016 |
|---|-------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Débit m ³ /s | 492 | 590 | 673 |
| Flux de matière en suspension m ³ /s | 5,03.10 ⁻² | 104.10 ⁻² | 50,5.10 ⁻² |
| Flux de matière en suspension tonnes/jour | 12000 | 238000 | 116000 |
| Flux de sable m ³ /s | 0,0168.10 ⁻² | 7,32.10 ⁻² | 5,42.10 ⁻² |
| Flux de sable tonnes/jour | 4 | 16800 | 12000 |

Tableau 6 : Résumé des différents flux liquides et solides mesurés à Bognes [Henry E.]

Comme le résume le tableau 6, lors du premier jour de chasse (le 20 mai) la concentration en matière en suspension était faible et il n'y avait quasiment pas de sable dans les échantillons. Néanmoins on retrouve un flux important de sédiments fin en suspension sur les trois journées de mesures ce qui confirme la différence importante de comportement de dynamique sédimentaire entre les sables et les autres sédiments fin. Les deux journées suivantes de prélèvements sont donc plus fructueuses en termes de prélèvement pour notre étude. Les mesures de flux en tonnes par jour sont calculées en extrapolant les valeurs pour un débit liquide et solide constant sur une journée. Elles ne sont donc qu'indicatives et ne prennent pas en compte les variations de débit et d'apport sédimentaire réelles.

2.3 Modélisation de la dynamique sédimentaire à Bognes

Les variations de débits n'étant pas aussi importantes qu'à Barcarin ou que sur le Mékong, les résultats sont présentés en échelle semi-logarithmique. Pour l'analyse suivante on ne tiendra pas compte de la mesure du 20 mai (point le plus bas du graphique : Figure 43) car il n'y avait pas de sable ce jour-là.

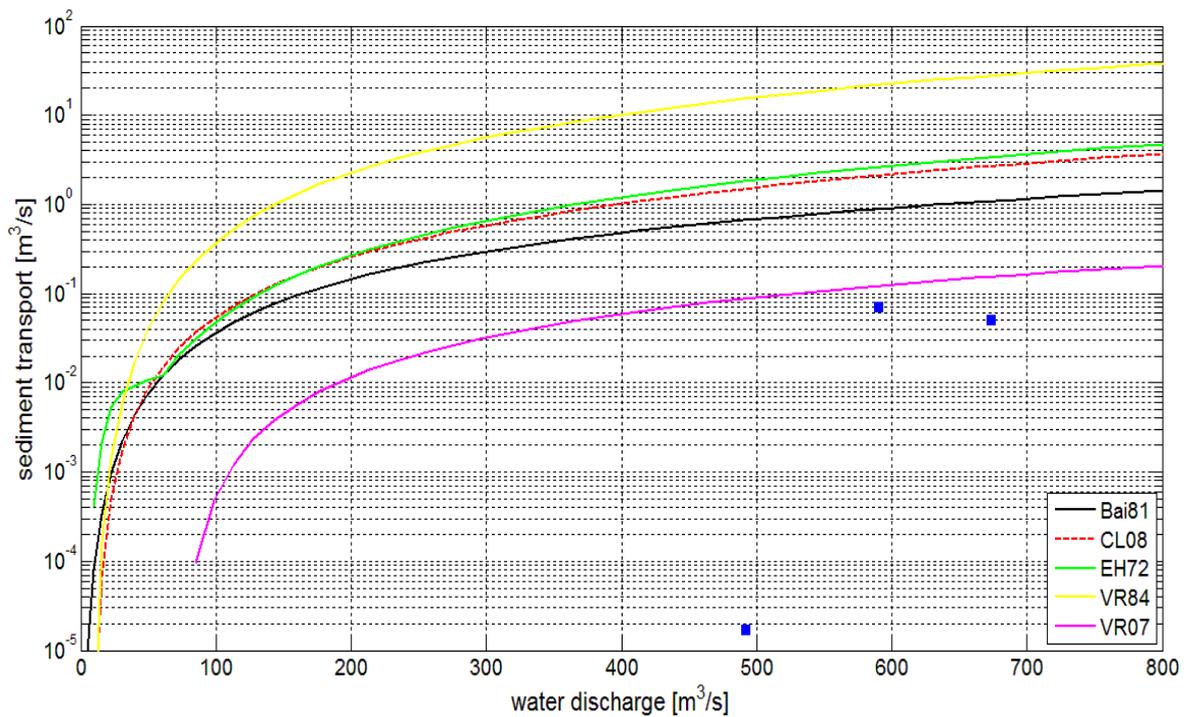


Figure 43 : Modélisation du transport de sable à Bognes dans le Rhône les 20, 27 et 30 mai 2016 [Henry E.]

On observe de nouveau que les modèles estiment un transport sédimentaire plus important que celui obtenu directement à partir des données d'échantillonnages. Le modèle de Van Rijn de 2007 est celui qui se rapproche le plus des données expérimentales. Les modèles de Camenen et Larson, d'Engelund et Hansen et de Bailard sont assez proches. En revanche, le modèle développé par Van Rijn en 1984 donne des résultats particulièrement éloignés avec une différence de l'ordre de 10³ m³/s.

3 Site de Chancy aux Ripes

La station des Ripes, est située côté suisse du Rhône quelques centaines de mètres en aval du barrage usine de Chancy-Pougny. Le barrage hydro-électrique franco-suisse de Chancy-Pougny est situé à cheval sur la frontière, il est exploité par les Services industriels de Genève (SIG) et la compagnie nationale du Rhône (CNR). La station hydrométrique est exploitée par l'office fédéral de l'environnement (OFEV),³⁸ elle est équipée d'une trille motorisée permettant de déployer des moulinets hydrométriques sur saumon ou autres instruments de prélèvement ou de mesure.

3.1 Les concentrations relevées aux Ripes

³⁸ <http://www.hydrodaten.admin.ch/fr/2174.html>

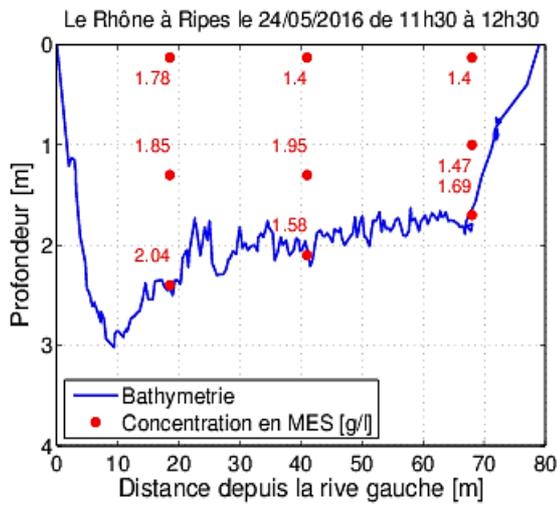


Figure 44 : Le Rhône à Chancy concentration en MES le 24 mai

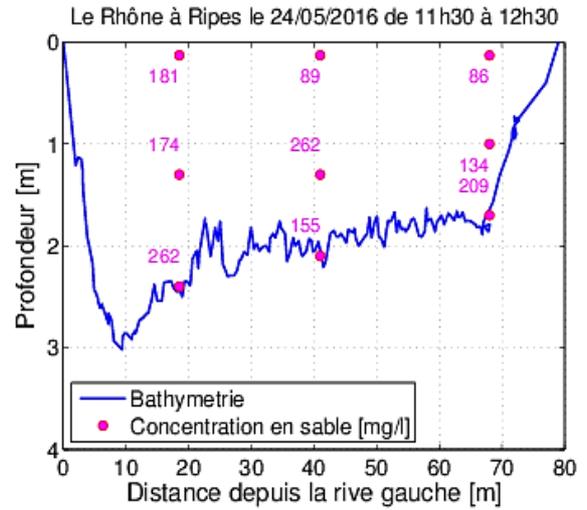


Figure 45 : Le Rhône à Chancy concentration en sable le 24 mai

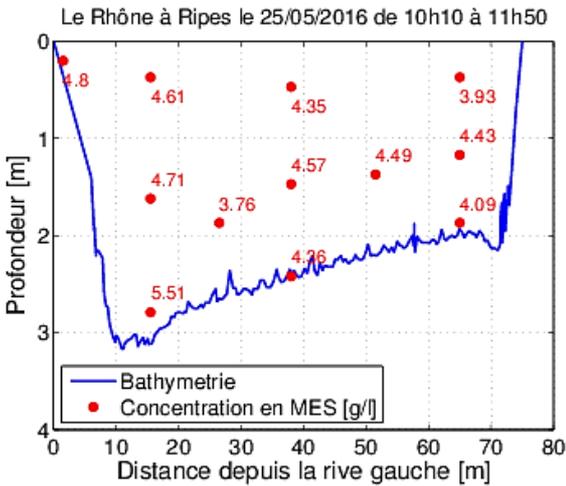


Figure 46 : Le Rhône à Chancy concentration en MES le 25 mai

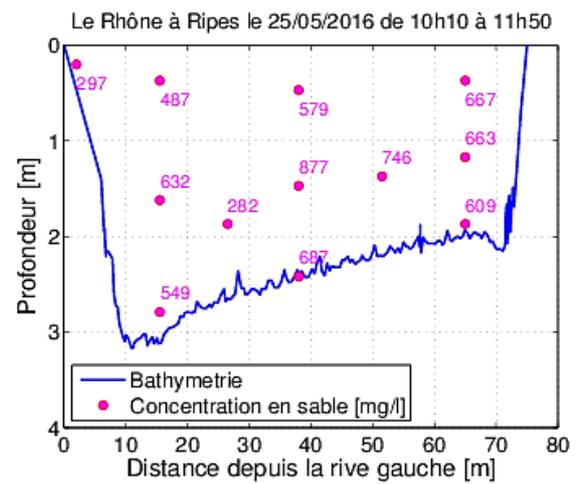


Figure 47 : Le Rhône à Chancy concentration en sable le 25 mai

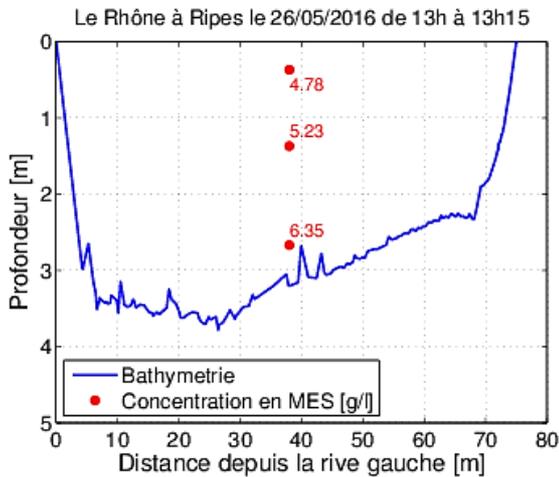


Figure 48 : Le Rhône à Chancy concentration en MES le 26 mai

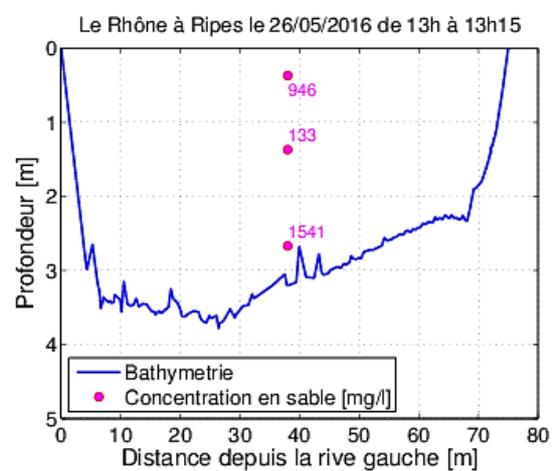


Figure 49 : Le Rhône à Chancy concentration en sable le 26 mai

La répartition des MES totale dans la section est assez cohérente. On retrouve pour certaines verticales (Figure 48) une suspension graduée caractéristique avec des concentrations plus fortes en profondeur. Ce n'est pas le cas pour toutes les verticales. La proximité du barrage à quelques centaines de mètres et les écoulements très violents (parfois plus de 5 m/s) engendrent des turbulences fortes. On peut supposer que le transit des sédiments est perturbé par ces écoulements forts.

Une conclusion intéressante est la mise en évidence de la présence de sable dans des proportions non négligeables, comme pour la MES totale la répartition spatiale ne respecte pas toujours la théorie, on retrouve globalement une certaine logique mais certains échantillons donnent des résultats surprenants (Figure 49 : échantillon à mi profondeur ou Figure 45 échantillon de fond au centre du transect).

3.2 Les flux sédimentaires aux Ripes

| Date | 24/05/2016 | 25/05/2016 | 26/05/2016 |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Débit m ³ /s | 379 | 350 | 428 |
| Flux de matière en suspension m ³ /s | 24,1.10 ⁻² | 37,9.10 ⁻² | 77,5.10 ⁻² |
| Flux de matière en suspension tonnes/jour | 55000 | 87000 | 178000 |
| Flux de sable m ³ /s | 2,54.10 ⁻² | 5,19.10 ⁻² | 7,04.10 ⁻² |
| Flux de sable tonnes/jour | 5800 | 12000 | 16000 |

Tableau 7 : Résumé des différents flux liquides et solides mesurés à Chancy aux Ripes [Henry E.]

On observe que le 24 mai 2016 le flux de matière en suspension en proportion par rapport au débit est en dessous des autres jours. Cela peut être dû aux régulations qui sont mises en œuvre sur les barrages en amont. Les mesures de flux en tonnes par jour sont calculées en extrapolant les valeurs pour un débit liquide et solide constant sur une journée.



Figure 50 : Barrage de Verbois lors des chasses et échantillonnage à Chancy aux Ripes (préleveur de l'OFEV) [Henry E.]

3.3 Modélisation de la dynamique sédimentaire aux Ripes

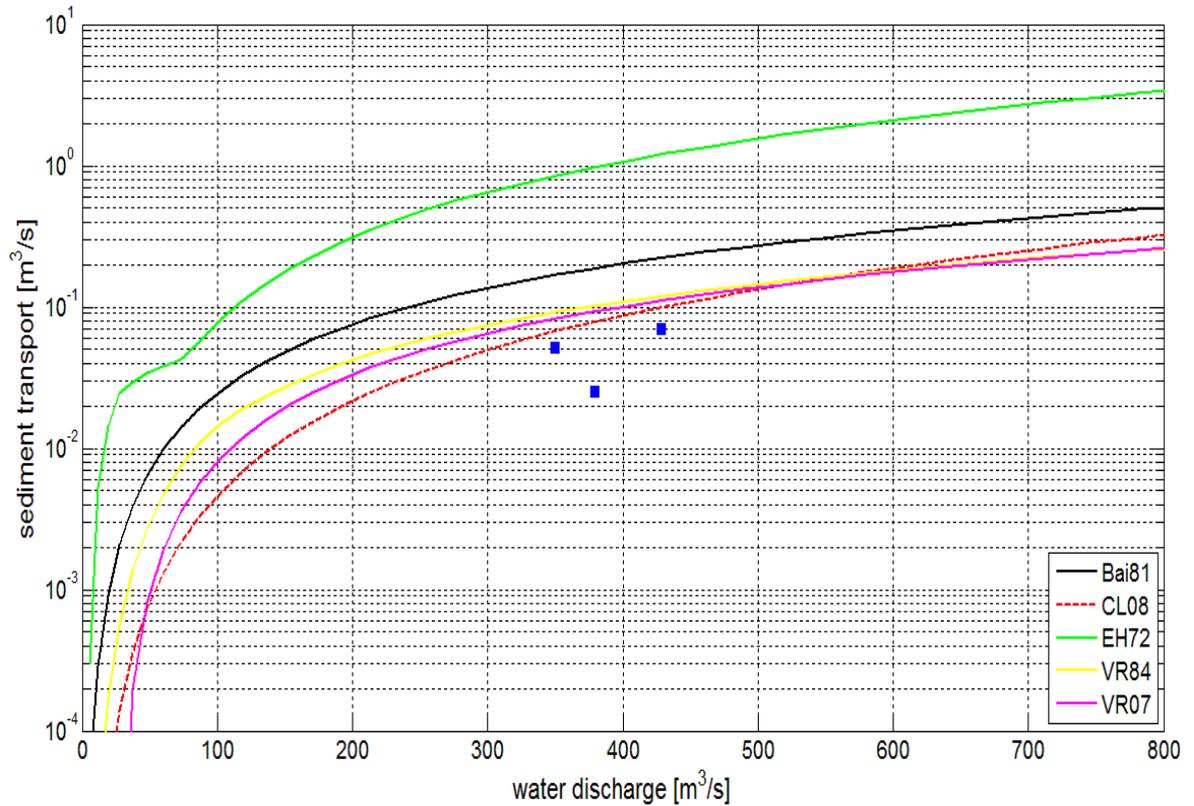


Figure 51 : Modélisation du transport de sable à Chancy dans le Rhône les 24, 25 et 26 mai 2016 [Henry E.]

Les résultats obtenus aux Ripes pour la modélisation sont plus satisfaisants car les modèles de Camenen et Larson et de Van Rijn de 2007 et de 1984 donnent des résultats du même ordre de grandeur que ceux obtenus directement avec les échantillonnages. La figure suivante présente les mêmes résultats exprimé en échelle arithmétique et montrent les grands écarts entre les modèles de Bailard et d'Engelund et Hansen avec les valeurs d'échantillonnage expérimentales.

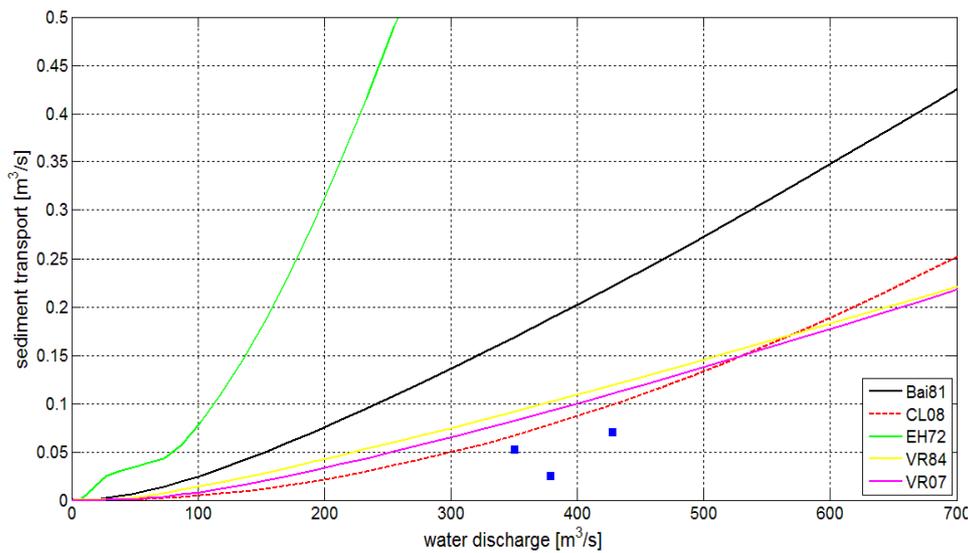


Figure 52 : Modélisation en échelle arithmétique du transport de sable à Chancy dans le Rhône les 24, 25 et 26 mai 2016 [Henry E.]

4 Site de Champagneux

Le secteur de Champagneux est situé en amont du barrage de Brenier-Cordon exploité par la CNR. Ce tronçon est étudié précisément par les équipes d'ingénierie de la CNR qui ont établi un modèle hydro-sédimentaire du secteur. Une station provisoire de la CNR a été installée pendant la chasse. Les échantillonnages d'IRSTEA sont réalisés depuis des barques de mesure.

Contrairement aux précédents sites, les échantillonnages réalisés avec la bouteille Niskin ont été récupérés sur différents transects à Champagneux. Aucun des prélèvements relevés les 23 et 25 mai 2016 ne contient du sable mais seulement des argiles et limons. La modélisation n'est donc pas testée pour ce site.

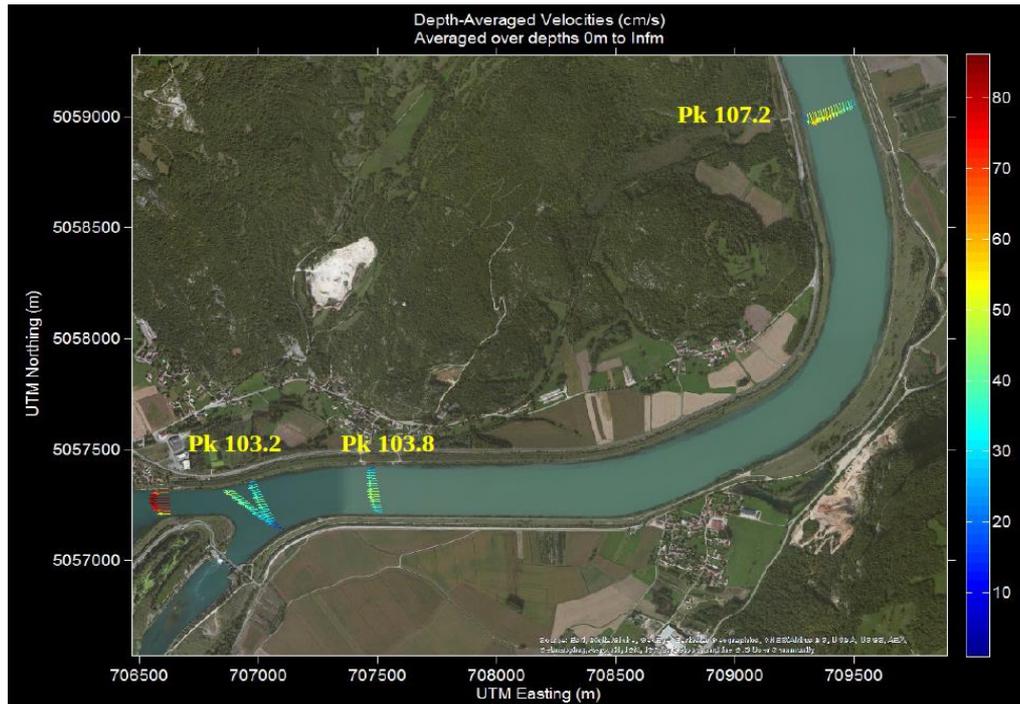


Figure 53 : Projection des vitesses moyennes ADCP sur les transects de mesure à Champagneux [Dramais G., Buffet A., Naudet G.]

4.1 Les concentrations relevées à Champagneux

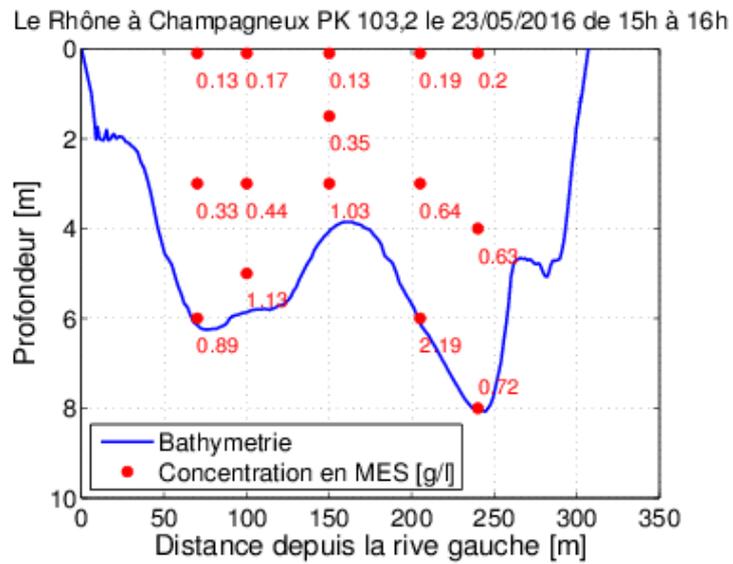


Figure 54 : Le Rhône à Champagneux, concentration en MES le 23 mai [Dramais G, Henry E.]

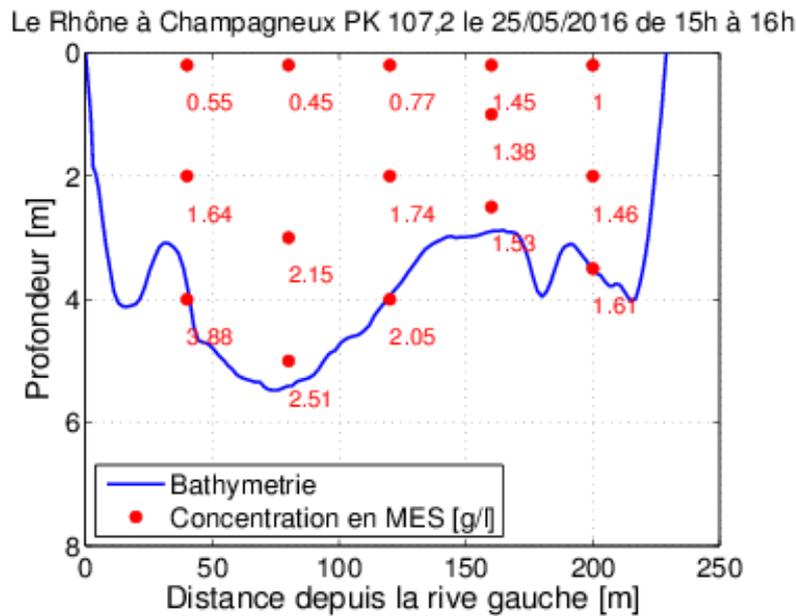


Figure 55 : Le Rhône à Champagneux, concentration en MES le 25 mai [Dramais G., Henry E.]

Pour ces deux campagnes de mesures réalisées en bateau avec comme préleveur la bouteille de Niskin on obtient des gradients de concentration très cohérents avec les concentrations qui augmentent avec la profondeur. Au niveau de ce tronçon les vitesses sont moins élevées que sur les sites de Ripes et Bognes, ce qui explique sans doute que l'écoulement et le transport de sédiment sont mieux organisés. On ne retrouve pas de sable dans les échantillons prélevés durant ces deux journées.

On peut noter que ces campagnes d'échantillonnages sont beaucoup plus rapidement exécutées que les campagnes avec la traîle de mesure. On réduit ici l'incertitude sur la représentativité temporelle de l'échantillon.

4.2 Les flux sédimentaires à Champagneux

| Date | 23/05/2016 | 25/05/2016 PK 103,2 | 25/05/2016 PK 107,2 |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Débit m ³ /s | 588 | 673 | 673 |
| Flux de matière en suspension m ³ /s | 15,1.10 ⁻² | 49,9.10 ⁻² | 37,7.10 ⁻² |
| Flux de matière en suspension tonnes/jour | 35000 | 114000 | 86000 |

Tableau 8 : Résumé des différents flux liquides et solides mesurés à Champagneux [Henry E.]

Malgré les débits élevés comparés aux autres sites et un transport de matière en suspension également important, les sédiments transportés sont fins. Les résultats présentés dans le tableau 8 montrent que pour un même débit, la dynamique sédimentaire peut varier. En effet les mesures effectuées le 25 mai sur deux sections différentes avec un débit comparable donnent des flux de matière en suspension différents. Les caractéristiques bathymétriques d'une section influent donc

sur le transport solide. Les mesures de flux en tonnes par jour sont calculées en extrapolant les valeurs pour un débit liquide et solide constant sur une journée.

5 Bilan et limites des résultats des chasses

Le protocole de mesure mis en place lors des chasses a permis de prélever et d'analyser des échantillons relevés sur plusieurs verticales pendant trois journées sur chaque site avec succès. Les trois types de préleveurs déployés : Bouteille Niskin, préleveur iso-cinétique de l'OFEV et préleveur iso-cinétique USGS P72 ont fonctionnés aux différentes profondeurs variant entre 0 et 8 mètres de fond pour des débits moyens variant entre 300 et 700 m³/s. Les différents modèles ont généralement tendance à surestimer les flux de sable mesurés

Globalement, les incertitudes sur les mesures sont élevées car le nombre de prélèvements n'est pas suffisant et il n'y avait pas beaucoup de sable. De plus, plusieurs sources d'incertitude se combinent lors de ces mesures, on peut en citer certaines :

- La représentativité temporelle de l'échantillon : il se passe une heure, parfois plus, entre le premier et le dernier échantillon de la campagne de mesure. Lors d'un événement comme la chasse du Haut-Rhône les concentrations et leur gradient peuvent changer très rapidement au gré de la reprise du sédiment en amont en fonction de l'avancement des manœuvres sur les organes de barrages. Ces incertitudes ont pu principalement toucher les sites de Bognes et de Chancy.
- La représentativité du sous-échantillon utilisé pour la granulométrie laser : Effectivement on connaît la difficulté de mettre en suspension des particules de sable, et lors du sous-échantillonnage de quelques ml nécessaire pour l'analyse granulométrique on peut perdre une partie de la fraction grossière ou la sur-évaluer. Il est nécessaire de répéter la mesure sur plusieurs sous-échantillons.
- Il est possible que certains échantillons aient été sur-échantillonnés car il est difficile de trouver le bon temps de remplissage des bouteilles. En effet à Chancy sur certains échantillons la bouteille se remplissait lentement peut être à cause des fortes concentrations. Sur Bognes certains échantillons se remplissaient très vite et la bouteille était pleine rapidement. Si on attend trop longtemps pour fermer la vanne du préleveur et que celui-ci est déjà plein alors l'échantillonnage ne peut plus être considéré comme iso-cinétique et la concentration est alors sur-évaluée.
- De la même manière qu'à Barcarin on peut remettre en question le tri granulométrique effectué à 67 µm car les limites de validité des modèles préconisent d'utiliser des sables plus grossiers. Pour les sédiments plus fins (tels que ceux prélevés lors de la chasse) il n'y a pas d'équilibre entre les conditions hydrauliques locales et le transport solide. Le potentiel de transport est en effet trop élevé pour ces sables. Il s'en suit que les concentrations dépendent plus de ce qu'il arrive de l'amont que des conditions hydrauliques locales.

Ces résultats malgré leurs incertitudes sont très riches d'enseignement par rapport au transport du sable en suspension et ont permis d'effectuer une première modélisation dans le but de vérifier les prédictions des modèles théoriques de transport.



Figure 56 : Sources d'incertitudes et pistes d'amélioration déduites des mesures et modélisations réalisées lors des chasses du Rhône [Henry E.]

CONCLUSION

Le sable est une ressource précieuse par nos sociétés, pour d'innombrables utilisations et en particulier la construction. Il est exploité dans de nombreux grands cours d'eau à travers le monde. La mesure des flux de sables transportés par les grandes rivières est aussi un enjeu pour les gestionnaires de cours d'eau et d'ouvrages, qui font face par exemple à une importante perte de volume dans les réservoirs du fait des dépôts sableux, à l'érosion des fondations de digues ou de ponts, des arrêts de navigation liés à l'envasement, ou des entrées d'eau salée qui perturbent le milieu. A l'heure actuelle plusieurs questions scientifiques demeurent sur la compréhension du transport de sable, notamment sa dynamique temporelle et spatiale, les conditions de sa mise en mouvement, son interaction avec les formes de fond sa proportion dans les bilans événementiels et annuels.

Néanmoins le transport solide fluvial étant perturbé par de nombreuses infrastructures, il est difficile de répondre à ces questions en temps normal. Les événements tels que les crues et les chasses de barrage permettent de rétablir une partie importante de la dynamique sédimentaire des cours d'eau. Ils constituent une opportunité pour effectuer des études sur le transport de sable qui permettront d'établir des bilans sédimentaires sur des périodes données. La chasse du Haut Rhône de mai 2016 est l'occasion de conduire une étude sur la mesure et la modélisation de flux de sable.

Une première approche pour calculer le flux de sable est de croiser le débit du cours d'eau avec la concentration en sable mesurée. Plusieurs scientifiques ont également développés des modèles numériques pour modéliser le transport solide. Dans cette étude, cinq modèles ont été retenus et testés. Certains ayant été développés pour caractériser le transport de sable en milieu côtier, ou le transport de matière en suspension ou encore le transport total fluvial.

Concernant la chasse du Rhône, un protocole de mesure a été développé et a permis d'échantillonner des matières en suspension sur trois sites différents à l'aide de trois préleveurs différents. Les prélèvements ont été réalisés en des points précis des sections du Rhône. Couplés, avec d'autres mesures de débits, ils ont permis d'obtenir des jeux de données particulièrement intéressants.

Parallèlement à ce travail, les modèles retenus ont été testés sur d'autres données que sont : des prélèvements réalisés sur le Mékong par l'IRSTEA en 2013 et des prélèvements réalisés par le CEREGE lors des crues de novembre 2012 à Barcarin sur le Rhône. Puis ils ont pu être testés sur les données mesurées lors de la chasse.

Ce travail a donc abouti à des mesures ponctuelles de flux sur le Mékong, sur le Rhône à Barcarin et sur trois sites du Haut-Rhône. Si les méthodes utilisées sont encore entachées d'incertitudes aujourd'hui, ces données pourront dans le futur être utilisées pour obtenir des courbes de tarage sédimentaires et des bilans sédimentaires plus précis que les estimations actuellement disponibles grâce à la mesure de turbidité.

BIBLIOGRAPHIE

- 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.
- Blum, A., Rouzeau, O., Guiraud, K., Bourdaa, S., & Joseph, B. (2014). Suivi de la turbidité des eaux en Guyane. Etat des lieux et recommandations. Approche par télédétection. BRGM
- Camenen B., Larson M. (2007) US Army Corps A Unified Sediment Transport Formulation for coastal inlet application, US Army Corps of Engineers, Coastal and Hydraulics Laboratory, ERDC/CHL CR-07-1, 231 p.
- Camenen, B. (2015), Mesure in situ de la dynamique sédimentaire des cours d'eau, Outils et méthode, IRSTEA, UR HHLY, centre de Lyon-Villeurbanne, Agence de l'eau Rhône méditerranée, 72p
- Camenen B., Proust S. et Le Coz J., (2009) Transport solide dans le lit des cours d'eau, Cours de l'École Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg, 62 p.
- Clark, E. H., Haverkamp, J. A., Chapman, W. (1985) *Eroding Soils. The Off-Farm Impacts.* The Conservation Foundation, Washington D.C., 252 pp.
- Davis, B. E. (2005). A guide to the proper selection and use of federally approved sediment and water-quality samplers. U.S. Geological Survey Open-File Report 2005-1087, 20 pp. (<http://pubs.usgs.gov/of/2005/1087/>)
- Degoutte G. (2001) *Hydraulique et dynamique fluviale - Transport solide en hydraulique fluviale*, Cours de l'École nationale du génie rural, des eaux et des forêts, 125 p.
- Dramais G., Camenen B., Le coz J., Peteuil C., Fretaud T. (2015) Discharge and sediment measurements in the Middle Mekong River in August 2013, Field measurement between Luang Prabang and Xayaburi, IRSTEA Lyon et CNR, 56p.
- Edwards, T.K., Glysson, G.D. (1999) Field methods for measurement of fluvial sediment: Techniques of Water-Resources Investigations of the U.S. Geological Survey, Book 3, Chapter C2, 89 p.
- Grasso A., BéroD D., Hodel H., Jakob A., Lalk P. et Spreafico M. (2014), Représentativité des échantillons par rapport aux matières solides en suspension, Expériences d'échantillonnage du Département d'hydrologie de l'OFEV, 7p.

- Grasso A., Béroed D., Hodel H. (2012), Mesurer et analyser la répartition des matières en suspension dans le profil transversal des cours d'eau, Expériences d'échantillonnage du Département d'hydrologie de l'OFEV «Wasser Energie Luft», 5 p.
- Gray J.R., and Landers M.N. (2014) Measuring Suspended Sediment. In: Ahuja S. (ed.) Comprehensive Water Quality and Purification, vol. 1, pp. 157-204. United States of America: Elsevier
- ISO (2002). 10694 : Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts – Méthodes de mesurage des caractéristiques de sédiments en suspension. 27 p.
- ISO (2009). 13320 :2009 Analyse granulométrique, Méthodes par diffraction laser, Principes généraux, tirage 2 (2009-12-01) 51 p.
- Le-Barbu E. (2011) Méthodologie de mesure du transport solide en Loire. Normandie centre: Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Blois, CETMEF, 38 p
- Lane, E. W. (1955). The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering. In Proceedings (American Society of Civil Engineers), volume 745, page 1 :17.
- Nolan K.M. Gray J.R. et Glyssen G.D., U.S. Geological Survey, Introduction to Suspended-Sediment Sampling, Scientific Investigations Report 2005-5077
- Organisation Météorologique Mondiale (1994), Guide des pratiques hydrologiques, Cinquième édition, Acquisition et traitement données, analyses, prévision et autres applications, réf. WMO-N 168, 829 p.
- Recking A., Liébault F., Peteuil C. et Jolimet T. (2008) Programme de recherche nationale - Evaluation des formules de transport solide en rivière avec prise en compte de l'échelle temporelle - Rapport Final, Cemagref, RTM
- Tessier, A. (1992) Sorption of Trace Elements on Natural Particles in Oxidic Environments, Environmental Particles, Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, pp. 425–453.
- UNEP/MAP/MED (2003). Riverine transport of water, sediments and pollutants to the Mediterranean sea. MAP Technical Reports Series No. 141, UNEP/MAP, Athens. 121 p.
- Van Rijn L.C. (2007), Simple general formulae for sand transport in rivers, estuaries and coastal waters, www.leovanrijn-sediment.com, 19p.
- Ward, N. (1992) The problem of sediment in water for fish. Technical Note 21, Northwestern Ontario Boreal Forest Management, Ontario Ministry of Natural Resources, Thunder Bay, Ontario. 8 p

- Wentworth, C. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, 30:377–392.
- Wigham John M. (1972), *Transport des sédiments*, Chapitre XI, Editeur-en-chef Donald M. GRAY, Université de la Saskatchewan, Saskatoon, Canada

ANNEXE 1 : Récapitulatif des différentes méthodes de mesure de la charge de fond et de leurs intérêts

| Méthode | Sédiments | Éch. | Vision spatiale | Vision temporelle | Mesure |
|--|--------------|------|-------------------|----------------------|---------------|
| Préleveur Helley-Smith | sable, galet | oui | local | instantané | flux |
| Préleveur Helley-Smith portable | sable | oui | local | instantané | flux |
| Préleveur Ehrenberger | sable, galet | oui | local | instantané | flux |
| Préleveur BTMA | sable | oui | local | local | flux |
| Piège à sédiments | sable, galet | oui | section, global | moyenne/mois | flux |
| Trappe à sédiments | sable, galet | oui | local | instantané + crue | flux |
| Suivi de dune | sable | non | ligne courant | moyenne/heure | flux |
| Géophone | galets | non | local | instant. + chronique | flux |
| Hydrophone | galets | non | 10 m | instant. + chronique | flux |
| Suivi de fond ADCP | sable, galet | non | section | instantané | flux |
| Bouteille Niskin | limon, sable | oui | ponctuel | instantané | concentration |
| Bouteille de Delft | sable | oui | ponctuel | moyenne/mn | flux |
| Préleveur iso-cinétique ponctuel | limon, sable | oui | ponctuel | moyenne/mn | flux |
| Préleveur iso-cinétique intégrateur | limon, sable | oui | verticale | moyenne/mn | flux |
| Rétro-diffusion ADCP | sable | non | section, ponctuel | instantané | flux |
| Echantillonneurs optiques et acoustiques | limon, sable | non | ponctuel | instant | flux |
| Marquage colorimétrique | sable, galet | oui | local | moyenne/événement | τ_{cr} |
| Tranpondeurs actifs | galet | - | local | instant. | déplacement |
| Tranpondeurs passifs | galet | - | local | moyenne/événement | déplacement |
| Mesures topographiques | - | non | tronçon | moyenne/événement. | évolution |
| Chaînes d'érosion | sable, galet | non | local | moyenne/événement | respiration |

Camenen, B. (2015), Mesure in situ de la dynamique sédimentaire des cours d'eau, Outils et méthode, IRSTEA, UR HHLY, centre de Lyon-Villeurbanne, Agence de l'eau Rhône méditerranée, 72p

ANNEXE 2 : Routine de modélisation sous Matlab commentée

```
%
% Section of the Rhone where sediment transport was measured
% Barcarin crue du 12/11/2012
%

clear
clf

graph = 6;
% 1: bathymetry
% 2: wet section as a function of water depth
% 3: water discharge as a function of water depth
% 4: mean velocity as a function of water depth
% 5: Shields parameter as a function of water depth
% 6: sediment transport as a function of water discharge
```

Définition des paramètres d'entrée

a) LA BATHYMETRIE

La première étape est de définir la bathymétrie de la section du cours d'eau. On insère donc un fichier transect comprenant des points de coordonnées de la bathymétrie (y ; z)=(position latérale

sur la section ; profondeur de la section). On interpole ces valeurs pour avoir un tracé complet de la section. On définit également la largeur active La .

```

%=====
====
% topo, hydraulics

%-----
----
% section of the Rhone River at Barcarin

load .\data\transect_Barcarin.dat

yLP = transect_Barcarin(:,1);
% abscisse at the section

zbLP = transect_Barcarin(:,2);
% bottom elevation

La = 250;
% active width

%-----
----
% estimation of the wet section as a function of the water depth

ny = 200;
y = linspace(-25,325,ny);
% abscisse at the section

ny = 200;
y = linspace(-25,325,ny);
% abscisse at the section

zbexp = interp1(yLP,zbLP,y);
% interpolate topo from experimental data

```

b) CALAGE DU DEBIT LIQUIDE EN FONCTION DE LA PROFONDEUR

On définit d'abord le périmètre mouillé et le rayon hydraulique RhH . Puis selon une loi de type Strickler on calcule QH le débit et VH la profondeur. Cette loi nécessite la calibration de trois paramètres aQ , pQ (coefficient puissance) et dz (qui permet d'affiner la courbe de tarage pour qu'il n'y ait pas $Q=0$ pour $h = 0$). On rentre alors les données de jaugeage Qgs et zgs , et on fait varier les trois paramètres jusqu'à ce que les courbes $QH=f(HH)$ et $Qgs=f(zgs+Deltazgs)$ coïncident. ($Deltazgs$ correspond au décalage entre le zéro de l'échelle pour les mesures de jaugeages et le niveau du fond)

```

nH = 200;
HH = linspace(0,15,nH);
% varying water depth

zbmin = min(zbexp);

```

```

for i = 1:nH
    Hwb = (HH(i)+zbmin-zbexp) .* (HH(i)+zbmin>=zbexp);
    SH(i) = trapz(y,Hwb);
    PmH(i) = sum((diff(zbexp).^2+diff(y).^2).^0.5);
end

RhH = SH./PmH;
% hydraulic radius

aQ = 1500; pQ = 1.67; dz = 9.6;
QH = aQ*((HH-dz) .* (HH>dz)).^pQ;
VH = QH./(SH+1e-6);
% water flux estimated from the rating curve
% mean velocity estimated from the rating curve and topography

%-----
%----
% gauging

load .\data\jaugeages_Barcarin.dat

zgs = jaugeages_Barcarin(:,1);
% water level for the ADCP measurement

Qgs = jaugeages_Barcarin(:,2);
% measured discharge (ADCP)

Deltazgs = 3.6;
% water depth for the zero value zqs = 0;

```

c) MESURES ET DEFINITION DE PARAMETRES DE CALCULS

On définit les paramètres précédemment calculés sous excel. On effectue un calage granulométrique à partir du D50 défini on calcule D16 et D84.

```

%-----
%----
% sediment gauging

hm = [11 11 11 11 11];
Qm = [4000 3500 3000 2800 1600];
EQ = [0.1].*Qm;
Sm = [2850 2850 2850 2850 2850];
Vm = Qm./Sm;
% qssm = [0.12 0.04 0.013 0.007 0.001];
% % valeurs totales
qssm = [0.027 0.03 0.0028 0.0016 0.0002];
% max à 0.08mm

% suspended load measurements from concentration

%=====
%----
% bed shear stress, sediment transport

```

```

%-----
% constants, sediment characteristics

nu = 1e-6;
% kinematic viscosity of water

g = 9.81;
% acceleration of the gravity

kappa = 0.41;
% Von Karman constant

s = 2.65;
rho = 1000;
rhos = s*rho;
% water and sediment density

% d50 = 92e-6;
% % valeur tout type de sable
d50 = 70e-6;
% valeur pour des sables de diamètre inférieur à 0.08 mm
sigma = 4;
d16 = d50/sigma;    d84 = sigma*d50;
% d16=1.4e-6 d84 varie entre 15 et 30e-6
% grain sizes distribution of the bed material


```

Définition du paramètre de Shields

```

D = (g*(s-1)./nu.^2).^^(1/3).*d50;
% sedimentologic diameter

% thetacr = 0.24./D + 0.055*(1-exp(-0.05*D));
% critical Shields parameter for inception of movement

thetacr = 0.30./(1+D) + 0.1*(1-exp(-0.05*D));
% critical Shields parameter for inception of suspension
% thetacrs = 0.30./(1+D) + 0.1*(1-exp(-0.05*D))

Ws = (nu./d50).*((10.36^2+1.049*(s-1)*g/nu^2.*d50.^3).^0.5-10.36);
% settling velocity

ks = 2*d84;
kst = 0.01;
%kst = ks;
% grain related roughness height

z0t = kst/30;
% roughness length

K = 21/d50^(1/6);
% Strickler parameter

```

Test des différentes formules de transport

On calcule les différents paramètres nécessaires aux formules sélectionnées en partie II 1.3, puis on en déduit q_{ssm} (m³/s/m) le débit solide en suspension en volume de grains à saturation.

```

%-----
----
% bed shear stress, bedload and suspended-load transport

fcH = 2*(kappa./(1+log(z0t./(RhH+1e-6))))).^2;
% current related friction estimated from the mean velocity

thetaH = 0.5*fcH.*VH.^2./((s-1).*d50*g);
% Shields parameter

ustH = VH.*sqrt(fcH/2);
% shear velocity

cRCL = 1.5e-3*exp(-0.2*D)*thetaH.*exp(-4.5*thetacr./thetaH);
% reference concentration (Camenen & Larson, 2008)

Bc1 = 0.4; Bc2 = 3.5; Bc3 = 1;
% sigmaCL = 1;
sigmaCL = (Bc1+Bc2*sin(pi/2.*(Ws./ustH)).^Bc3).*(Ws./ustH<=1) + ...
          (1+(Bc2-1+Bc1)*sin(pi/2.*(ustH./Ws)).^Bc3).*(Ws./ustH>1);
epsisCL = 1/6*sigmaCL.*(kappa.*ustH.*RhH);
% current related diffusivity (Camenen & Larson, 2008)

qssCL = VH.*cRCL.*epsisCL./Ws.*(1-exp(-Ws./epsisCL.*RhH));
% estimated suspended sediment load

qssLaH = qssCL*La;
% estimation of the total sediment transport within the active width

%-----
----
% Bailard formula (1981)

epss = 0.025;
% suspended load efficiency

qssBail = 0.5*epss.*fcH./(Ws.*g*(s-1)).*VH.^4;
% estimated suspended sediment load

qssLaBail = qssBail.*La;
% estimation of the total sediment transport within the active width

%-----
----
% Engelund Hansen formula (1972)
%
```

```

c1 = 0.06; c2 = 0.384; c3 = 1.08;
thetaEH = (2.5*(thetaH-c1).*(c1<=thetaH).*(c2>thetaH)).^0.5 + ...
          1.065*thetaH.^0.176.*(c2 <= thetaH).*(c3 > thetaH) + ...
          thetaH.*(c3<=thetaH);
% Shields parameter following EH
% modified by Chollet & Cunge (1980)

qssEH = 0.05*((s-
1)/g).^ (1/2). *K.^2.*RhH.^ (1/3). *d50.^ (3/2). *thetaEH.^ (5/2);

qssLaEH = qssEH*La;
% estimation of the total sediment transport within the active width

%-----
%-----
% formule de Van Rijn (1984)
%

c0 = 0.65;
% maximum concentration at the bottom

T = thetaH/thetacr-1;
% excess bed shear parameter

za = min(ks,RhH/5);
% reference level

ca = 0.015*d50./za.*T.^1.5./D.^0.3;
% reference concentration

betas = min(1.5,1+2*(Ws./ustH).^2);
% Schmidt number

zzca = Ws./(kappa*betas.*ustH);
zzcb = 2.5*(Ws./ustH).^0.8.*(ca/c0).^0.4;
zzc = zzca + zzcb;
%zzc = zzca;
% minimal slope

fccs = ((za./RhH).^zzc-(za./RhH).^1.2) ./ ((1-za./RhH).^zzc.*(1.2-
zzc));
% coefficient for suspension

qssVR = fccs.*VH.*RhH.*ca;

qssLaVR = qssVR*La;
% estimation of the total sediment transport within the active width

%-----
%-----
% formule de Van Rijn (2007)
%

Ucr = (0.19*d50^0.1.*(d50<=5e-4)+8.5*d50^0.6.*(d50>5e-
4))* (log(12*RhH./(3*d84)));
% critical depth-averaged velocity for initiation

```

```

Me = (VH-Ucr)./((s-1)*g*d50).^0.5.*(VH>Ucr);
% mobility parameter

%qssVR07 = 0.012*VH.*d50.*Me.^2.4*D.^-0.6;
qssVR07 = 0.015*VH.*d50.*Me.^2*D.^-0.6;
% estimated suspended sediment load

qssLaVR07 = qssVR07*La;
% estimation of the total sediment transport within the active width

%=====
====
% graphics

%-----
----
if graph == 1

subplot(1,1,1)
plot(yLP,zbLP,'ko'), hold on
plot(y,zbexp,'r--'), hold on
set(gca,'FontSize',14)
axis([-50 350 -11 -4]);
grid on
xlabel('y [m]','FontSize',16);
ylabel('z_b [m]','FontSize',16);

%-----
----
elseif graph == 2

subplot(1,1,1)
plot(HH,SH,'k-', 'LineWidth',2), hold on
plot(zgs+Deltazgs,Ags,'ko')
set(gca,'FontSize',14)
axis([0 15 0 5000]);
grid on
xlabel('water depth [m]','FontSize',16);
ylabel('wet section [m^2]','FontSize',16);

%-----
----
elseif graph == 3

subplot(1,1,1)
plot(HH,QH,'k-', 'LineWidth',2), hold on
plot(zgs+Deltazgs,Qgs,'ko')
set(gca,'FontSize',14)
axis([8 12 0 5000]);
grid on
xlabel('water depth [m]','FontSize',16);
ylabel('water discharge [m^3/s]','FontSize',16);

%-----
----
elseif graph == 4

```

```

subplot(1,1,1)
plot(HH,VH,'k-', 'LineWidth',2), hold on
plot(zgs+Deltazgs,Vgs,'ko')
set(gca, 'FontSize',14)
axis([8 12 0 1.5]);
grid on
xlabel('water depth [m]', 'FontSize',16);
ylabel('mean velocity [m/s]', 'FontSize',16);

%-----
----
elseif graph == 5

subplot(1,1,1)
plot(HH,thetaH,'k-', 'LineWidth',2), hold on
set(gca, 'FontSize',14)
axis([8 12 0 1]);
grid on
xlabel('water depth [m]', 'FontSize',16);
ylabel('Shields parameter [-]', 'FontSize',16);
text(1,0.9, ['d_{50} = ', num2str(round(d50*1e5)/100), '
mm'], 'FontSize',16)

%-----
----
elseif graph == 6

subplot(1,1,1)
loglog(QH, qssLaBail, 'k-', QH, qssLaH, 'r--', QH, qssLaEH, 'g-
', QH, qssLaVR, 'y-', QH, qssLaVR07, 'm', 'LineWidth',2), hold on
loglog(Qm, qssm, 'bs', 'MarkerFaceColor', 'b')
set(gca, 'FontSize',14)
axis([500 1e4 1e-4 10]);
grid on
xlabel('water discharge [m^3/s]', 'FontSize',16);
ylabel('sediment transport [m^3/s]', 'FontSize',16);
legend('Bailard (1981)', 'Camenen & Larson (2008)', 'Engelund & Hansen
(1972)', ...
'Van Rijn (1984)', 'Van Rijn (2007)',2)
text(5000,2e-4, ['d_{50} = ', num2str(round(d50*1e5)/100), '
mm'], 'FontSize',16)

%-----
----
end

```

ANNEXE 3 : Le Rhône à Barcarin, concentration de matières en suspension

