



**HAL**  
open science

# Mesure in situ de la dynamique sédimentaire des cours d'eau outils et méthodes

B. Camenen

► **To cite this version:**

B. Camenen. Mesure in situ de la dynamique sédimentaire des cours d'eau outils et méthodes. [Rapport de recherche] irstea. 2014, pp.72. hal-02600886

**HAL Id: hal-02600886**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02600886>**

Submitted on 16 May 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



# MESURE IN SITU DE LA DYNAMIQUE SÉDIMENTAIRE DES COURS D'EAU OUTILS ET MÉTHODES

---

Benoît CAMENEN  
Irstea Lyon  
Unité de recherche Hydrologie-Hydraulique

avec la collaboration de :

Philippe Belleudy (LTHE, Grenoble), David Cheminet (EDF-DTG), Marie Courtel (Irstea Lyon), Alain Crave (Université de Rennes), Guillaume Dramais (Irstea Lyon), Philippe Dusouillez (Cerege, Aix en Provence), Kamal El Kadi Abderrezak (EDF-R&D, Chatou), Thomas Geay (Floralis), Jean-Noël Gautier (AELB, Orléans), Jérôme Le Coz (Irstea Lyon), Frédéric Liébault (Irstea Grenoble), Jean-René Malavoi (EDF-DPIH, Lyon), François Métivier (IPG, Paris), Christophe Peteuil (CNR, Lyon), Hervé Piégay (Université de Lyon, UMR5600), Alain Recking (Irstea Grenoble), Anne-Julia Rollet (Université de Caen), Stéphane Rodrigues (Université de Tours), Michal Tal (Cerege, Aix en Provence), Benoît Terrier (AERMC, Lyon)

# Table des matières

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introduction</b>   | <b>4</b>  |
| 1.1      | Charge de fond . . . . .  | 4         |
| 1.2      | Choix d'une section de mesure et fréquence des campagnes de mesure . . . . .          | 5         |
| 1.3      | Besoins opérationnels . . . . .   | 7         |
| <b>2</b> | <b>Mesure des flux sédimentaires</b>  | <b>10</b> |
| 2.1      | Mesure du charriage . . . . .   | 10        |
| 2.1.1    | Préleveurs de charriage . . . . .   | 10        |
| 2.1.2    | Méthodologie pour la mesure du charriage sur une section de cours d'eau . . . . .     | 14        |
| 2.1.3    | Piège à sédiments . . . . .   | 17        |
| 2.1.4    | Trappe à sédiments . . . . .  | 19        |
| 2.1.5    | Suivi de dune . . . . .   | 21        |
| 2.1.6    | Hydrophone et géophone . . . . .  | 21        |
| 2.1.7    | Suivi de fond ADCP . . . . .  | 23        |
| 2.2      | Mesure de la suspension graduée . . . . .   | 24        |
| 2.2.1    | Préleveurs de suspension . . . . .  | 24        |
| 2.2.2    | Méthodologie pour la mesure de la suspension sur une section de cours d'eau . . . . . | 31        |
| 2.2.3    | Méthodes d'échantillonnage optiques et acoustiques . . . . .                          | 34        |
| <b>3</b> | <b>Etablissement d'une courbe de tarage sédimentaire</b>                              | <b>37</b> |
| 3.1      | Estimation des caractéristiques hydrauliques . . . . .                                | 37        |
| 3.2      | Calcul du transport solide par charriage . . . . .                                    | 39        |
| 3.2.1    | Formulation du charriage . . . . .  | 39        |
| 3.2.2    | Contrainte de cisaillement . . . . .  | 39        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 3.2.3    | Contrainte de cisaillement critique de mise en mouve-<br>ment des sédiments . . . . . | 40        |
| 3.2.4    | Application du modèle . . . . .   | 41        |
| 3.3      | Calcul du transport solide en suspension . . . . .                                    | 42        |
| 3.4      | Intérêts d'une courbe de tarage sédimentaire . . . . .                                | 43        |
| 3.4.1    | Bilans de flux solide . . . . .   | 43        |
| 3.4.2    | Extrapolation . . . . .   | 44        |
| <b>4</b> | <b>Mesure de la dynamique particulaire</b>  | <b>46</b> |
| 4.1      | Outils de mesure de la dynamique particulaire . . . . .                               | 46        |
| 4.1.1    | Marquage colorimétrique, magnétique ou radioactif . . . . .                           | 46        |
| 4.1.2    | Transpondeur actif . . . . .  | 47        |
| 4.1.3    | Transpondeur passif . . . . .   | 47        |
| 4.2      | Intérêt d'un suivi particulaire . . . . .   | 48        |
| 4.2.1    | Début d'entraînement des particules . . . . .   | 49        |
| 4.2.2    | Suivi de forme sédimentaire . . . . .   | 49        |
| 4.2.3    | Etude de la nature stochastique du charriage . . . . .                                | 50        |
| <b>5</b> | <b>Mesure de la respiration d'un cours d'eau</b>                                      | <b>53</b> |
| 5.1      | Outils de mesure de la respiration d'un cours d'eau . . . . .                         | 53        |
| 5.1.1    | Mesures topographiques/bathymétriques . . . . .                                       | 53        |
| 5.1.2    | Chaînes d'érosion . . . . .   | 54        |
| 5.2      | Intérêt des mesures de la respiration d'un cours d'eau . . . . .                      | 56        |
| 5.2.1    | Bilans sédimentaires . . . . .  | 56        |
| 5.2.2    | Flux globaux . . . . .  | 56        |
| <b>6</b> | <b>Conclusion</b>   | <b>58</b> |

# Chapitre 1

## Introduction

### 1.1 Charge de fond

Les flux de sédiments sablo-graveleux, transportés au fond des cours d'eau, déterminent des évolutions morphologiques aux enjeux souvent très forts. En effet, la dynamique fluviale peut être représentée comme une fluctuation permanente autour d'un équilibre entre les variables de contrôle (débit liquide  $Q$  et débit solide  $Q_s$ ) et les variables d'ajustement (diamètre des sédiments  $d$  et pente moyenne du fond du cours d'eau  $I$ ) (Malavoi et al. 2011). Cet équilibre est plus connu sous le nom de balance de Lane (1955). Des mesures des flux transitant lors des crues en différents endroits du réseau hydrographique sont donc très précieuses pour évaluer la dynamique des flux instantanés, et ainsi l'état d'équilibre du cours d'eau. Elles permettent aussi d'évaluer et caler des formules semi-empiriques de transport solide, permettant ensuite de prédire plus fidèlement les évolutions morphologiques à l'aide de modèles numériques.

Le charriage ("bedload") est défini comme l'ensemble des sédiments se déplaçant sur le fond du lit de la rivière par glissement, roulement, ou petits sauts (saltation). A contrario, la suspension de fond désigne l'ensemble des sédiments se déplaçant sur la colonne d'eau avec une vitesse proche de la vitesse de l'eau et en équilibre direct avec l'hydrodynamique locale (Malavoi et al. 2011, Rodrigues et al. 2013). Cette suspension correspond généralement à une suspension graduée de sables car les concentrations diminuent très rapidement dans la colonne d'eau (Fig. 1.1). Une distinction est ainsi faite avec la suspension de lessivage ("wash load"), qui dépend moins de la

capacité de transport locale de l'écoulement que des apports amont, et dont la concentration peut être généralement considérée homogène sur la section du cours d'eau. Couramment, on parle de Matières en Suspension (MES) pour la suspension de lessivage. Il demeure cependant une ambiguïté sur l'inclusion ou non de la suspension graduée dans les MES. Nous discuterons dans ce document uniquement de la mesure de charge de fond (charriage et suspension graduée).

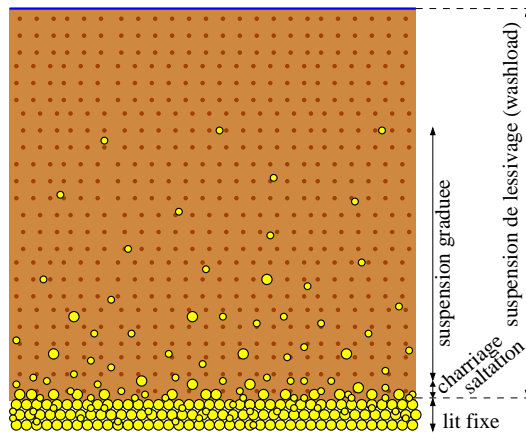


FIGURE 1.1 – Schématisation des différents modes de transport solide en rivière.

Le diagramme de Hjulström-Sundborg (Fig. 1.2) donne une vision plus claire de cette limite : nous ne nous intéressons ici qu'aux sédiments n'étant pas affectés par une possible consolidation, soit pour un diamètre  $d \simeq 70 \mu\text{m}$ . Dans la littérature (Migniot 1982, Van Rijn 1993, par ex :), on trouve une limite pour les sédiments cohésifs variant entre  $d = 40 \mu\text{m}$  et  $d = 100 \mu\text{m}$ .

## 1.2 Choix d'une section de mesure et fréquence des campagnes de mesure

La mesure de la charge de fond ne peut pas se faire n'importe où. L'objectif étant d'établir une relation entre le débit liquide et le débit solide (charge de fond) d'un cours d'eau, la mesure se fera donc sur une section totale du cours d'eau. Le choix de cette section de mesure devra alors se faire en fonction de la dynamique sédimentaire et des contraintes techniques de mesure.

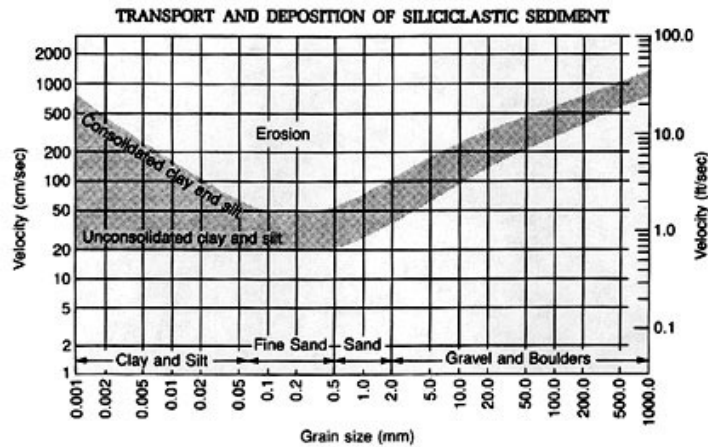


FIGURE 1.2 – Diagramme de Hulström-Sundborg (Sundborg 1967).

Idéalement, il faut donc privilégier une section se situant sur un tronçon rectiligne (éviter une composante transversale du transport solide), non influencé (éviter la présence d'un seuil ou d'une confluence à l'amont, d'une pile de pont proche de la section de mesure ou d'un barrage à l'aval), avec un profil transversal le plus uniforme possible (éviter une trop forte variabilité transversale du transport solide et une forte variabilité de la bande active avec le débit) et peu rugueux (éviter la présence de zones de forte turbulence, les fonds peu homogènes rendant aussi difficile la pose d'un préleveur). A cela, il faut bien sûr rajouter les contraintes techniques liées à chacune des méthodes de mesure. Dans le cas par exemple d'un cours d'eau non navigable ni guéable, la mesure par préleveur ne peut se faire qu'à partir d'un pont, d'une traille de mesure, voire d'une grue en bord de rivière si cette dernière n'est pas trop large. Or, la fermeture d'un pont même partielle peut être difficile (d'un point de vue administratif). De même, pour les torrents de montagne, la mise en place d'une mesure à l'aide de trappes ou de géophone nécessite la présence d'un seuil. Ces contraintes peuvent ainsi fortement limiter le choix d'une section de mesure.

Une fois le choix de la section fait, les campagnes de mesure doivent aussi de faire de manière raisonnée. Il est nécessaire de faire des jaugeages solides pour différents débits représentatifs de la dynamique du cours d'eau étudié. Bakke et al. (1999) proposent d'étudier des débits se situant entre 30 % (transport solide faible) et 120 % du débit de pleins bords (transport

solide important). Les campagnes de mesure en crue nécessitent une réactivité optimale des équipes techniques pour la mise en place des campagnes (cf. vigicrue) et une attention particulière face aux risques encourus.

### 1.3 Besoins opérationnels

Dans le cadre d'un projet avec l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, plusieurs mesures de transport solide par charriage ont été réalisées sur différents sites ayant chacun des particularités propres afin de préparer des méthodologies adaptées aux différents types de cours d'eau. Une difficulté supplémentaire demeure la variabilité spatio-temporelle de la charge de fond y compris pour des conditions hydro-sédimentaires stables (Recking et al. 2008). Les objectifs de cette note se limiteront cependant à l'estimation du débit solide moyen pour des conditions hydrauliques données.

Cette note permet aussi de faire le bilan des compétences et expériences disponibles au niveau français. Il apparaît en effet que ces mesures restent que très peu pratiquées en France en particulier d'un point de vue opérationnel. Il existe de nombreuses procédures généralement introduites aux États-Unis (USGS) ayant abouties à quelques procédures ISO (ISO/DTR 9212 2006, ISO/TS 3716 2006, ISO 4363 2002). L'apport de l'expérience de collègues scientifiques français a donc permis de compléter ce travail.

Les besoins opérationnels au niveau de l'Agence de l'Eau se font principalement en terme d'études de la dynamique sédimentaire et d'opérations de redynamisation de rivière. En termes d'études, on peut trouver :

- des études de diagnostic pour la détermination de début de mise en mouvement du charriage, l'estimation du flux charrié annuel et/ou du flux de sable en suspension annuel ;
- des suivis de migration de macroformes (étude de risque ou de dynamique fluviale) ;
- des études de l'évolution de profils en long et définition éventuelle de profils d'équilibre, incluant la sédimentation de barrages et réservoirs.

En termes d'opérations, on peut trouver :

- des rétablissements de la continuité sédimentaire par effacement d'ouvrage transversal (ex : Bléone, Verdon) ou chasse de barrages ;
- des réinjections de sédiments (matériaux pris en amont de retenue et réinjectés à l'aval des ouvrages, ex : Fontaulière) ;
- des reconstitutions de matelas alluvial avec reprofilage du profil en



travers (sur un lit incisé avec recréation d'un lit moyen, ex : Drac, Ouvèze);

- des travaux sur l'espace de mobilité (suivi d'érosion de berges et d'évolution de macroformes, ex : Ain)

Le tableau 1.1 fait un listing des mesures adaptées pour ces différents type d'étude et opération. Pour chacune de ces mesures, le tableau 1.1 fait référence au(x) paragraphe(s) du document où la mesure et la méthodologie associée sont explicitées, ainsi que le nom de quelques scientifiques français (ou francophone) référents sur cette mesure. Il est tout de même à noter que pour toute opération de redynamisation de rivière, il peut être très utile d'estimer les flux charriés (s'ils existent) avant et après l'opération.

TABLE 1.1 – Mesures possibles du transport solide et méthodologies associées pour différents types d'études et opérations.

| Étude / Opération                               | Type de mesure adapté   | Références au document   | Références scientifiques  |
|---|---|--|---|
| Début de mise en mouvement du charriage         | Transpondeur passif<br>Hydrophone<br>Marquage   | §4.1.3, §4.2.1<br>§2.1.6<br>§4.1.3, §4.2.1                           | H. Piégay, F. Liébault, B. Camenen, A.-J. Rollet<br>T. Geay, P. Belleudy<br>A.-J. Rollet  |
| Estimation du flux charrié annuel               | Préleveurs charriage<br>Pièges<br>Trappe<br>Suivi dune<br>Geophone<br>Suivi fond ADCP | §2.1.1, §2.1.2, §3<br>§2.1.3<br>§2.1.4<br>§2.1.5<br>§2.1.6<br>§2.1.7 | B. Camenen, F. Métivier, S. Rodrigues, C. Peteuil<br>J.-R. Malavoi, C. Peteuil<br>F. Liébault<br>S. Rodrigues, B. Camenen<br>D. Rickenman, T. Geay<br>J. Le Coz |
| Estimation du flux annuel en suspension graduée | Préleveurs suspension<br>Retrodifusion  | §2.2.1, §2.2.2, §3<br>§2.2.3   | B. Camenen, S. Rodrigues, C. Peteuil, A. Crave<br>J. Le Coz, G. Dramais, A. Crave   |
| Evolution de profils en long                    | Mesures topographiques / bathymétriques   | §5.1.1   | J.-R. Malavoi, C. Peteuil   |
| Effacement d'ouvrage transversal                | Transpondeur passif<br>Mesures topographiques   | §4.1.3, §4.2.1<br>§5.1.1   | H. Piégay, F. Liébault, B. Camenen, A.-J. Rollet<br>H. Piégay, F. Liébault, J.-R. Malavoi   |
| Réinjection de sédiments                        | Transpondeur passif<br>Mesures topographiques   | §4.1.3, §4.2.2<br>§5.1.1   | H. Piégay, F. Liébault, B. Camenen, A.-J. Rollet<br>H. Piégay, F. Liébault, J.-R. Malavoi   |
| Reprofilage                                     | Mesures topographiques<br>Chaînes érosion   | §5.1.1<br>§5.1.2 §5.2.2  | H. Piégay, F. Liébault, J.-R. Malavoi<br>J.-R. Malavoi, F. Liébault   |
| Suivi d'érosion de berge                        | Transpondeur passif<br>Mesures topographiques   | §4.1.3, §4.2.2<br>§5.1.1   | H. Piégay, F. Liébault, B. Camenen, A.-J. Rollet<br>H. Piégay, F. Liébault, J.-R. Malavoi   |
| Suivi de macroformes                            | Transpondeur passif<br>Chaînes érosion<br>Mesures topographiques                      | §4.1.3, §4.2.2<br>§5.1.2 §5.2.2<br>§5.1.1                            | H. Piégay, F. Liébault, B. Camenen, A.-J. Rollet<br>J.-R. Malavoi, F. Liébault<br>H. Piégay, F. Liébault, J.-R. Malavoi   |

# Chapitre 2

## Mesure des flux sédimentaires

La mesure des flux sédimentaires consiste en l'estimation de la quantité de sédiments (en volume ou masse) se déplaçant au travers d'une section d'un cours d'eau pendant un temps donné.

### 2.1 Mesure du charriage

#### 2.1.1 Préleveurs de charriage

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

$$q_{sb,exp} = k \frac{M}{\rho_s b T} \quad (2.1)$$

où  $q_{sb,exp}$  est le débit solide par charriage exprimé en  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ,  $k$  l'efficacité de la méthode de prélèvement,  $M$  la masse sèche prélevée (en kg),  $\rho_s$  la masse volumique du sédiment (en général  $\rho_s = 2650 \text{ kg}/\text{m}^3$ ),  $b$  la largeur du système de prélèvement et  $T$  le temps de prélèvement. Les préleveurs sont des échantillonneurs de charge de fond sous la forme de panier ou grille avec ou sans divergent pour atténuer la perte de charge engendrée par le préleveur. Ils sont placés dans le lit du cours d'eau face au courant. La mise en oeuvre de ces échantillonneurs ne peut s'effectuer que sur des vitesses et/ou débits relativement modérés, c'est à dire généralement pour des vitesses inférieures à 2-3 m/s. En effet, il devient difficile voire dangereux de les utiliser lors

de crues incluant de forts débits (risque de perte ou casse du préleveur). Et les valeurs proposées pour l'efficacité  $k$  n'ont en général été validées que une gamme restreinte de conditions hydro-sédimentaires. celles-ci seront discutées dans la suite de ce rapport.

Afin d'assurer une bonne qualité de mesure avec les préleveur de charriage (surtout au niveau de sa répétabilité), plusieurs précautions doivent être prises (Emmett 1980, Childers 1999) :

- le diamètre de la buse d'entrée doit être plusieurs fois plus grand que le plus gros diamètre des grains du lit à échantillonner ;
- le design de l'échantillonneur doit assurer un bon positionnement sur le fond du lit afin d'éviter que des particules échantillonnables passent sous l'échantillonneur à cause des formes du fond (dunes, hétérogénéité des particules de fond) ;
- le sac ou panier de réception doit être suffisamment grand afin de permettre un échantillonnage de qualité pour les forts taux de transport et d'avoir une distribution granulométrique précise ;
- la taille de la maille du sac ou panier doit être suffisamment grande afin d'éviter que le sac soit colmaté par les particules les plus fines qui transitent en suspension tout en étant bien inférieure à la taille des sédiments potentiellement transportée ;
- les mouvements du préleveur sur le fond peuvent induire des biais sur la mesure : sur-échantillonnage à la pose (en mettant des particules en suspension) ou à la levée (en grattant sur le fond par un mouvement vers l'amont).

Les préleveurs ont le double avantage de permettre une mesure directe du charriage (même si cette dernière est intrusive et entachée d'incertitude) et une estimation de la granulométrie transportée, qui peut être différente de la granulométrie de fond (transport partiel).

Le coût d'un préleveur de charriage est de l'ordre de quelques milliers d'euros. Il peut être réduit en le faisant fabriquer sur plan car ces derniers sont de conception relativement simple.

### **Préleveur de type Helley-Smith**

Le préleveur Helley-Smith (Helley & Smith 1971, Emmett 1980) est un échantillonneur à différence de pression. Il est largement utilisé au États-Unis. Il est composé d'une buse d'entrée avec un divergent (permettant de compenser la perte de charge liée à l'appareil), d'un sac en filet ou d'un

panier rigide (collectant l'échantillon de charriage) et d'éléments de structure assurant sa stabilité dans l'eau. Un préleveur Helley-Smith d'ouverture 152 mm pèse environ 75 kg et celui d'ouverture 76 mm, 30 kg. La buse et le sac sont les parties du préleveur ayant un effet direct sur la mesure. En effet, la buse a une forme divergente afin d'assurer une chute de pression locale lorsque le fluide passe à travers le préleveur. Cette chute de pression aspire le sédiment qui se trouve piégé dans le sac ou panier selon la maille de ce dernier. Les préleveurs Helley-Smith ( $b = 76$  mm et  $b = 152$  mm) ont été testés sur l'Arc en Maurienne (1 957 km<sup>2</sup>) par l'équipe de B. Camenen (Irstea Lyon), de même que sur le Rhône à Génomme (10 910 km<sup>2</sup>) et le Mékong à Luang Prabang (268 000 km<sup>2</sup>) par les équipes de B. Camenen (Irstea Lyon) et C. Peteuil (CNR). La plage d'utilisation de cet échantillonneur qui va des rivières torrentielles aux grands fleuves tropicaux est donc remarquablement étendue.

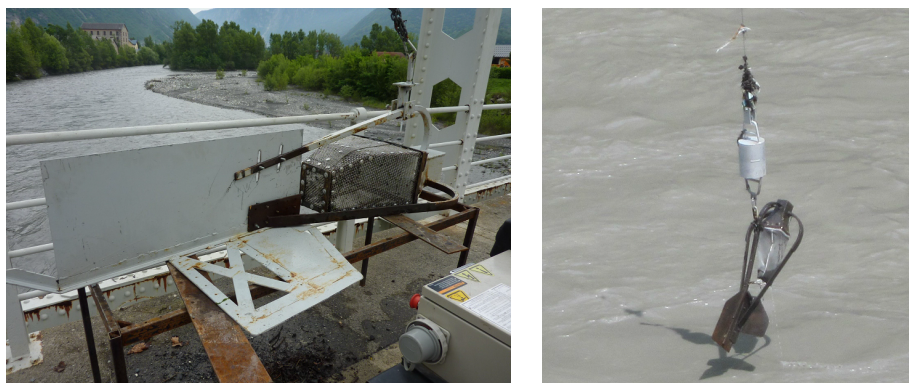


FIGURE 2.1 – Préleveurs Helley-Smith d'ouverture 152 mm (a) et 76 mm (b) (Photos Camenen).

Emmett (1980) a conclu que le préleveur Helley-Smith avait une efficacité de 100% (soit  $k = 1$ ) pour des particules entre 0.5 et 16 mm. Pour des particules plus fines (entre 0.25 et 0.5 mm), cette efficacité augmente jusqu'à 175%. (soit  $k = 0.5$ ) du fait que le prélèvement inclut des particules en suspension. Pour des particules plus grossières (16 à 32 mm), l'efficacité chute à 70% (soit  $k = 1.5$ ) a priori du fait de la présence plus faible de ces particules dans un mélange et de leur mise en mouvement plus difficile. De plus, Bunte & Apt (2005) ont montré que le préleveur Helley-Smith tend à surestimer le transport solide pour des contraintes proches de la contrainte limite de mise

en mouvement des sédiments. Il faut donc bien avoir en tête qu'une forte incertitude existe pour ce coefficient  $k$ .

### Préleveur de type Ehrenberger

Le préleveur Ehrenberger (Ehrenberger 1931) ou préleveur suisse, est, comme le Helley-Smith, un échantillonneur que l'on place sur le lit du cours d'eau face au courant. Il a été utilisé, notamment, sur le Danube en Slovaquie (VUVH, Bratislava, voir Holubová et al. 2004). L'ouverture de ce préleveur est très large (70 cm) et sans divergent (Fig. 2.2). Ce préleveur est plutôt utilisé pour les sédiments grossiers, en lien avec la taille des mailles du panier souvent grossière. Ce préleveur s'est avéré peu stable dans un écoulement très turbulent mais efficace en écoulement peu turbulent car il permet de récolter de gros échantillons. Il a été utilisé sur le Rhône par l'équipe de B. Camenen (Irstea Lyon).



FIGURE 2.2 – Préleveur Ehrenberger (Photo Camenen).

### Préleveur de type BTMA

Un préleveur plus adapté aux fonds sableux est le Bedload Transport Meter Arnhem (BTMA) développé à Arnhem, Pays-Bas. Ce modèle de structure plus complexe permet un atterrissage sur le fond du lit mieux maîtrisé (Fig. 2.3). En effet, sa conception permet que la queue de l'appareil se pose en premier ce qui évite les phénomènes d'enfournement. Ensuite le corps de l'appareil se pose et enfin, par un jeu de lamelles métalliques, la bouche du préleveur se pose en douceur sur le fond pour éviter un brassage avec mise en

suspension de sédiment qui pourrait perturber la mesure. Lors de la remontée de l'appareil, le processus s'inverse évitant à nouveau l'entrée intempestive de matériau dans l'appareil. L'utilisation d'une caméra submersible fixée sur les patins peut de plus permettre de vérifier le placement de l'appareil. L'entrée du préleveur de 8 cm de large par 5 cm de haut en fait un appareil destiné aux échantillons sablo-graveleux. Son utilisation reste cependant limitée à des vitesses du courant inférieures à 2.5 m/s (Eijkelkamp 2003). Il est utilisé sur la Loire par l'équipe de S. Rodrigues à l'université de Tours (Gautier et al. 2008, Claude et al. 2012).



FIGURE 2.3 – Préleveur BTMA (a) avant immersion (b) avec le dispositif caméra (Photos S. Rodrigues).

### 2.1.2 Méthodologie pour la mesure du charriage sur une section de cours d'eau

La méthodologie pour la mesure du charriage ainsi que les incertitudes liées aux mesures sont très dépendantes du cours d'eau étudié. Les incertitudes dans la mesure du charriage dépendent de l'incertitude sur le coefficient d'efficacité de la méthode utilisée, du nombre de mesures effectuées sur une section et de la procédure d'échantillonnage (compétence du manipulateur). En supposant un échantillonnage idéal, de Vries (1973) a montré qu'un moins 20 échantillons devraient être collectés sur une position pour obtenir une incertitude de 20% sur la mesure du charriage. En pratique, il est très difficile

de collecter autant d'échantillons ; le prélèvement de 3 à 5 échantillons par verticale reste préconisé dans un cas général. Les incertitudes de mesure peuvent ainsi être bien supérieure (au moins 50%) en particulier du fait de la procédure de mesure (Hubbell et al. 1985) et des possibles variations spatio-temporelles de l'écoulement. Camenen et al. (2012) ont ainsi montré que sur une rivière alpine lors d'une crue rapide, il était difficile de réaliser deux échantillons consécutifs dans les mêmes conditions d'écoulement.

De ce fait, trois principales méthodes de mesure par prélèvement sont utilisées selon le type de cours d'eau :

- si le cours d'eau est accessible à pied sans danger, il est possible de faire un jaugeage solide à l'aide d'appareils de mesure légers ou en utilisant un trépied. Il faut cependant faire attention à la variabilité de l'écoulement et des apports solides (Pitlick 1988) ;
- pour une rivière torrentielle non navigable, l'unique solution possible est de faire la mesure à partir d'un pont ou d'une traille téléphérique. La construction d'une traille téléphérique est cependant très coûteuse et ne peut être justifiée que pour des mesures régulières (soit donc avec une justification économique). Dans quelques rares cas, il est cependant possible de réhabiliter d'anciennes trilles de mesure mises en place pour faire des jaugeages liquides. Si la mesure est réalisée à partir d'un pont, il faut alors bien veiller à ce que la hauteur du pont ne soit pas trop élevée (afin d'éviter une dérive du préleveur et des dommages lors de la remontée, le préleveur pouvant frapper violemment la surface de l'eau), ni la circulation trop importante (difficultés liées à la fermeture même partielle du pont et danger lié à la circulation) ;
- dans le cas d'un cours d'eau navigable, il est souvent plus aisé de réaliser les mesures à partir d'un bateau muni d'une potence. Si cela est possible, il est conseillé d'ancrer l'embarcation avant chaque mesure afin de stabiliser au mieux cette dernière (cf. Fig. 2.5), voir même avec un ancrage multiples (deux ancres à l'avant et une à l'arrière du bateau) associé à une localisation GPS. Si cela n'est pas possible (danger trop important dus aux vitesses élevées, la présence de bois flottants etc.), il est alors important que le préleveur soit suffisamment lourd pour s'auto-stabiliser ; le manipulateur devra aussi veiller à laisser suffisamment de longueur de câblage pour qu'un mouvement de l'embarcation ne perturbe pas la mesure. Il est également recommandé de relever la position du bateau par GPS au début, en cours et à la fin de la manipulation afin d'apprécier la dérive possible de l'embarcation.



Le nombre de verticales et d'échantillons par verticale est aussi à définir en fonction du type de cours d'eau étudiée (Fig. 2.4). Pour chacune des verticales, une mesure de la profondeur et de la vitesse du courant est nécessaire ainsi que l'estimation d'une largeur active où l'on supposera que le transport solide est homogène. Pour la mesure de la vitesse du courant, il est fortement conseillé de réaliser un profil des vitesses sur la verticale permettant ainsi une meilleure estimation de la rugosité de fond (Gautier & Peters 2005).

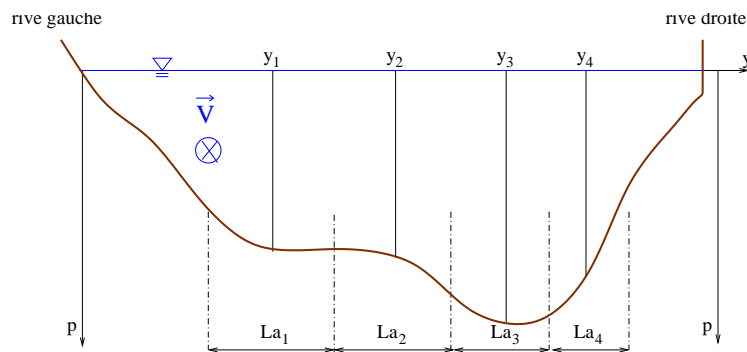


FIGURE 2.4 – Méthodologie de mesure du charriage (exemple à quatre verticales avec les largeurs actives associées).

- Pour un torrent ou une rivière alpine, si le chenal principal est relativement homogène en profondeur, une seule verticale peut suffire permettant ainsi de multiplier les échantillons sachant que le débit du cours d'eau peut évoluer très rapidement ;
- pour une rivière de plaine, les variations de l'écoulement sont généralement beaucoup plus lentes, permettant ainsi de multiplier la collecte d'échantillons. Par contre, la variabilité des fonds et de la courantologie sur une section implique la mise en place de plusieurs verticales. En pratique, 3 à 6 verticales (selon la largeur et la variabilité des fonds du cours d'eau) peuvent être réalisées avec 3 à 8 échantillons par verticale selon le temps de prélèvement et la difficulté de mesure (ISO/DTR 9212 2006). Un jaugeage par ADCP préalable à la mesure s'avère souvent très utile pour apprécier la forme du profil d'écoulement, mais aussi pour avoir une idée des profils de vitesse et de concentration dans la section, permettant ainsi de mieux sélectionner les verticales de mesures.

Ainsi, l'estimation du transport solide par charriage sur la section pourra

être estimé selon :

$$Q_{sb,exp} \approx \sum_{i=1}^m \overline{q_{sb,exp,i}} L_{ab,i} \quad (2.2)$$

avec  $m$  le nombre de verticale de mesure,  $\overline{q_{sb,exp,i}}$  la valeur moyenne du transport solide par charriage estimée sur cette verticale, et  $L_{ab,i}$  la largeur active du charriage associée à cette verticale.

Il a été démontré que le charriage peut fluctuer temporellement et spatialement (Gomez et al. 1989, Hoey 1992, Cudden & Hoey 2003, Recking et al. 2009, Humphries et al. 2012), il faut donc veiller à ce que l'ensemble des mesures réalisées couvrent bien l'ensemble des situations possibles sur le site étudié. Un exemple évident est celui des formes de fond se propageant dans le cas de fond sableux (Fig. 2.5) où le transport instantané varie très fortement selon qu'on se trouve sur le flanc ou le creux de la dune. Si la longueur d'onde des formes de fond est trop élevée par rapport au temps de mesure et la propagation des formes de fond (Fig. 2.5b), il sera alors nécessaire de bien répéter les mesures afin que la moyenne inclue toutes les situations. Un exemple de protocole d'échantillonnage est présenté dans Malavoi et al. (2011, p.36) sur la Loire à Bréhémont.

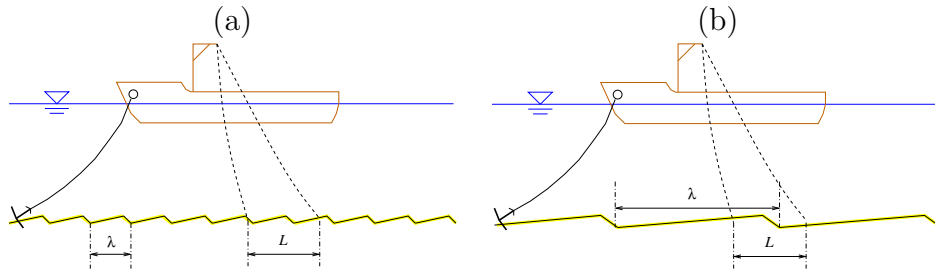


FIGURE 2.5 – Impact de la présence de dunes sur la mesure du charriage (d'après Eijkelkamp 2003).

### 2.1.3 Piège à sédiments

Le principe consiste à mesurer les dépôts sédimentaires dans un secteur dont on sait qu'il piège totalement la charge de fond. Ce piégeage permet de connaître les apports solides globaux en un point, leur volume, leur granulométrie. On distingue trois types de pièges à sédiments :

- les barrages de haute chute ;

- les anciennes fosses d’extraction larges et profondes en lit mineur ;
- les plages de dépôt à vocation de piégeage de la charge de fond dans un objectif de gestion.

Une fosse ou une plage de dépôt correspond à une zone où le dépôt des sédiments est forcé soit par l’élargissement du chenal, soit par l’approfondissement du lit, soit par une réduction significative de la pente, voire par une combinaison de ces 3 situations. Sur les torrents, les plages de dépôt sont typiquement fermées à l’aval par un barrage semi-perméable (voir exemple de la plage de dépôt RTM du Manival en Isère, Fig. 2.6). Le volume donné à la plage de dépôt est alors dimensionné en fonction des objectifs de protection et/ou de gestion mais aussi des contraintes foncières, topographiques et surtout budgétaires. Sur les torrents à laves torrentielles, le volume est si possible définit de manière à arrêter la quasi-totalité des apports solides amenés par une crue d’occurrence rare. Sur les torrents ou les rivières où le processus de charriage prédomine, la plage de dépôt aura plus souvent vocation à réguler les excès d’apports solides, d’une part en provoquant le dépôt d’une partie des sédiments en période de fort transport, d’autre part en érodant ces dépôts lorsque la fourniture en matériaux est sensiblement plus modeste.



FIGURE 2.6 – Evolution de la plage de dépôt du Manival en Isère entre le 7 juin 2010 après curage (a) et le 6 juillet 2010 après crue (b) (Photos C. Peteuil).

Ces aménagements doivent donc être curés régulièrement (notamment après chaque crue) et l’on effectue des mesures topographiques et granulométriques permettant ainsi d’évaluer la charge solide globale après un certain nombre d’événements. C’est donc une méthode intégrative ne permettant pas d’estimer un flux instantané. De plus, les fosses peuvent laisser passer

une partie de la charge de fond et ne permettent donc pas nécessairement d'obtenir tout le volume transporté. Elle donne néanmoins un bon ordre de grandeur de la charge moyenne annuelle et/ou événementielle, particulièrement dans les cas où une très faible partie de la charge de fond transite en aval de l'ouvrage. Récemment, l'exploitation d'un jeu de données relatif à 72 torrents et rivières torrentielles des Alpes françaises équipés d'une plage de dépôt a permis de calibrer plusieurs modèles simples mais robustes permettant de prédire la production sédimentaire d'un bassin versant torrentiel en fonction de ses caractéristiques physiques (Peteuil et al. 2012).

Le coût du suivi d'une fosse ou plage de dépôt reste abordable car il correspond à une description topographique avant et après événement pouvant se faire en quelques heures (sous-traitance à un géomètre ou réalisation par l'équipe si le matériel topographique est disponible).

#### 2.1.4 Trappe à sédiments

Il existe aujourd'hui des systèmes de trappe à sédiments permettant de mesurer en continu la masse déposée à l'aide de capteurs de pression disposés au fond de la trappe (Reid et al. 1980, 1995, Habersack et al. 2001). Il est ainsi possible d'estimer en continu le transport solide instantané du fait de la mesure instantanée du poids cumulé. Le calcul se fait aisément en utilisant l'Eq. 2.1 avec  $b$  l'ouverture de la trappe. Cette méthode reste cependant très coûteuse car sa mise en oeuvre est lourde (travaux de génie civil) y compris la mise en place d'un système pour retirer la trappe. Elle nécessite aussi une position stable du fond pour ne pas biaiser la mesure, idéalement sur un seuil. Habersack et al. (2001) ont montré sur la rivière Drau qu'il était de plus nécessaire de vider régulièrement les trappes du fait de leur remplissage rapide. Elle est donc plus adaptée aux torrents de montagne équipés de seuils de correction transversaux, même si dans ce cas, les apports correspondent souvent à une charge grossière et abondante capable de saturer très rapidement la trappe. Elle est actuellement utilisée par Irstea Grenoble (F. Liébault) sur le site de Draix où les apports solides correspondent à des sédiments marneux peu grossiers (Fig. 2.7).

Combinées à une mesure de la hauteur d'eau et du débit, les trappes à sédiments permettent une meilleure compréhension du flux charrié instantané en fonction des conditions hydrauliques sur l'ensemble d'un événement dans la limite de la capacité de la trappe (cf. Fig. 2.8). Une telle méthode peut ainsi donner des indications sur les potentielles différences dans la dynamique



FIGURE 2.7 – Trappe à sédiment sur le torrent du Moulin (Photos F. Liébault).

du charriage en montée et en descente de crue (Sear et al. 2000).

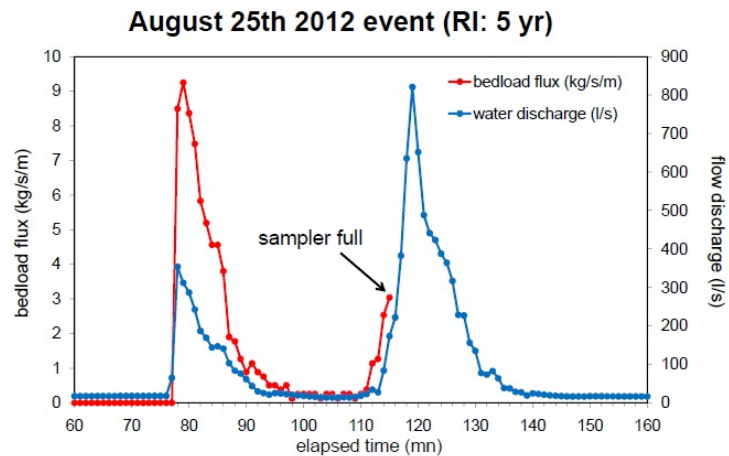


FIGURE 2.8 – Exemple de résultat de flux charriés instantanés mesurés par une trappe sur le torrent du Moulin (Liébault et al. 2013).

Le coût de la mise en place d'un tel système reste très élevé du fait des travaux de génie civil. Il varie de quelques dizaines de milliers d'euros à une centaine de milliers d'euros selon la largeur de la rivière. A cela, il faut aussi rajouter les coûts de maintenance.

### 2.1.5 Suivi de dune

Dans le cas d'un fond sableux où des dunes se sont formées, il est possible d'estimer le charriage par l'intermédiaire de deux mesures bathymétriques successives. En supposant que la migration de la dune est constante, sans déformation de la dune et exclusivement due au charriage, l'application de l'équation de continuité permet de lier le charriage à la célérité de la dune (Simons et al. 1965) :

$$q_{sb,exp} = \beta(1 - p) \frac{H_d \Delta x_d}{\Delta T} = \beta(1 - p) H_d C_d \quad (2.3)$$

avec  $\beta$  un coefficient prenant en compte le fait que l'ensemble du charriage ne contribue pas à la migration de la dune (fonction de la forme de la dune et du taux de suspension,  $\beta$  souvent pris égal à 0,5),  $p$  la porosité du sédiment déposé,  $H_d$  la hauteur de la dune,  $C_d$  sa célérité,  $x_d$  la position de la crête de la dune et  $\Delta T$  le temps entre les deux périodes de mesure (cf. Fig. 2.9). Claude et al. (2012) ont utilisé cette méthode sur la Loire avec succès à partir d'une description fine du fond du cours d'eau en utilisant un sonar multi-faisceaux. Des essais menés par Irstea et la CNR sur le Mékong ont montré que les mesures obtenues à l'aide d'un écho-sondeur mono-faisceau étaient souvent plus difficiles à exploiter.

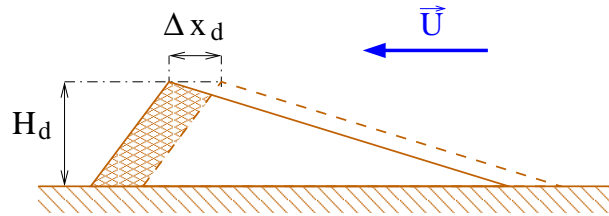


FIGURE 2.9 – Principe de la méthode de suivi des dunes (“dune tracking”).

Le suivi de dune est réalisable idéalement avec un sonar multi-faisceaux impliquant un investissement d'environ 50k€. Il ne faut pas oublier non plus les coûts pour la mise en oeuvre d'un tel suivi (bateau, personnel sur terrain et pour le traitement des données).

### 2.1.6 Hydrophone et géophone

Une technique alternative de la mesure du charriage est de mesurer le bruit dû aux chocs des sédiments charriés à l'aide d'un microphone. On dis-

tingue alors deux méthodes :

- La première consiste à mesurer le nombre de chocs des particules sur une plaque métallique (Rickenmann & McArdell 2007, Rickenmann et al. 2012) ou des colonnes ou tuyaux d’impacts (Mizuyama et al. 2010) : on parle alors de géophone. La mesure des chocs peut se faire soit avec un microphone soit à l’aide de capteurs de vibrations piézo-électriques. Cette méthode donne de très bons résultats mais nécessite donc un gros génie civil (avec idéalement la présence d’un seuil sans pelle) et n’est généralement applicable que pour les torrents de montagne équipés de seuils de correction. Il apparaît de plus une difficulté lors d’un fort transport où le système peut saturer, les particules ne touchant plus la plaque.
- La seconde méthode consiste en l’enregistrement de l’énergie acoustique des particules mobiles s’impactant entre elles. Cette technique passive est beaucoup moins coûteuse que la précédente (pas de génie civil) mais est encore au stade de recherche même si elle donne des résultats encourageant (cf. Fig. 2.10). Elle est en effet plus difficile à traiter du fait de la complexité du signal (variabilité des fréquences de chocs, bruits) est actuellement en développement au LTHE (Grenoble Geay 2013).

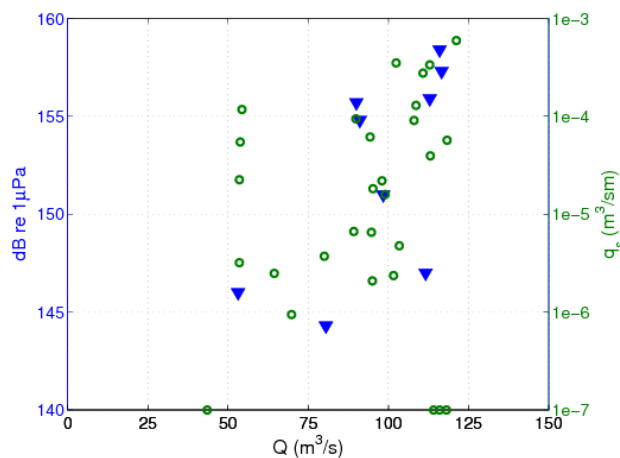


FIGURE 2.10 – Exemple de résultat à l’aide d’un hydrophone calé sur des mesures par prélèvement (chasse de l’Arc de 2011) (Camenen et al. 2010).

Le coût de la mise en place d’une station acoustique (matériels, installation, centrale d’acquisition etc.) peut être élevé du fait des travaux de génie

civil. Il varie d'environ 5000 € pour un hydrophone à quelques dizaines de milliers d'euros pour des géophones (fonction de la largeur de la rivière pour ce dernier système).

### 2.1.7 Suivi de fond ADCP

L'ADCP est un appareil couramment utilisé pour la mesure de vitesse (effet Doppler). Couplé à un GPS (ou utilisé en position fixe), ce dernier peut aussi permettre d'estimer le mouvement du fond et donc le charriage (Rennie et al. 2002, Rennie & Millar 2004). La méthode de suivi de fond ADCP ("bottom tracking") reste cependant encore en développement car il est difficile de connaître exactement à quel niveau cette vitesse de fond  $V_{bt}$  est estimée (suspension de fond ou charriage) selon la fréquence de l'appareil et les concentrations de sédiments au fond (Fig. 2.11).

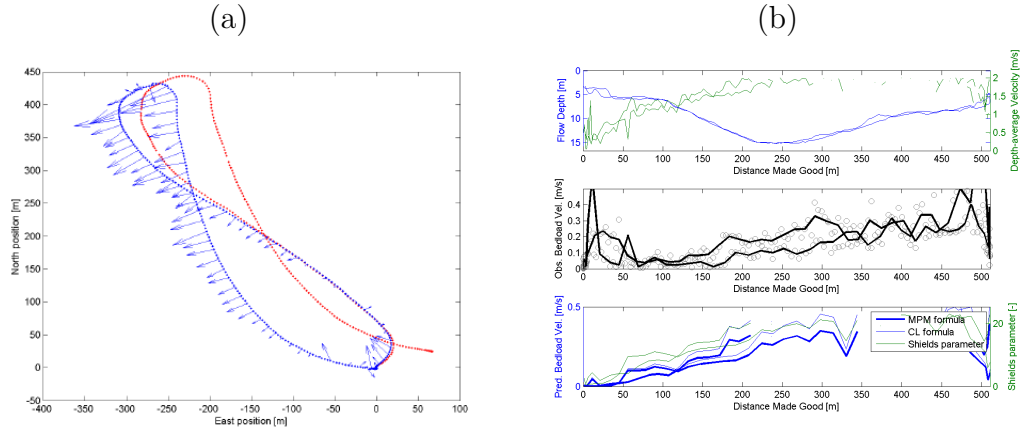


FIGURE 2.11 – Trajectoires du suivi de fond ("bottom-tracking") (bleu) et GPS avec vitesses du fond (rouge) (a) et estimation du charriage sur la section de mesure (b).

De plus, il existe une inconnue qui est l'épaisseur de la couche en mouvement (en supposant que cette dernière bouge de façon homogène). Une première approximation est de supposer que cette couche a une épaisseur  $\delta_s$  égale à la rugosité de fond (Pitlick et al. 2009), soit :

$$q_{sb,bt} = \delta_s V_s \approx 2d_{90} V_{bt} \quad (2.4)$$



avec  $q_{sb, bt}$  l'estimation du charriage par la méthode "bottom-tracking",  $V_s$  la vitesse de la couche de charriage que l'on suppose égale à la vitesse mesurée  $V_{bt}$  par la méthode de suivi de fond. Il existe donc une forte incertitude sur l'estimation quantitative du charriage en particulier selon la fréquence de l'ADCP. Par contre, cette méthode permet d'avoir une bonne vision qualitative des variations dans l'espace du charriage (cf. Fig. 2.11) et ainsi aider à l'intégration transversale du flux.

Les appareils ADCP sont aujourd'hui couramment utilisés en hydrométrie. Leur coût reste cependant de quelques dizaines de milliers d'euros.

## 2.2 Mesure de la suspension graduée

### 2.2.1 Préleveurs de suspension

Le transport solide en suspension correspond à un flux de sédiments sur la colonne d'eau transporté selon la vitesse de l'écoulement (Fig. 2.12). Son estimation nécessite donc une exploration des flux (ou concentrations et vitesses) sur la colonne d'eau.

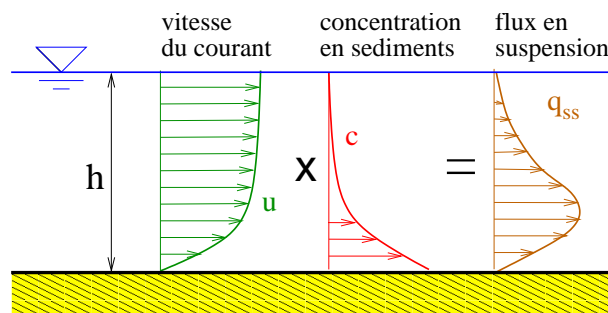


FIGURE 2.12 – Schématisation du transport solide par suspension.

Il existe ainsi plusieurs types d'appareil de mesure du transport solide en suspension :

- les échantillonneurs (bouteille Niskin) sont utilisés pour prélever un volume d'eau permettant une mesure de concentration et de granulométrie. Combiné à une mesure de vitesse du fluide, ils permettent une mesure de flux ponctuel. Ces échantillonneurs sont plus adaptés à la mesure de la suspension de lessivage (washload) ;

- les préleveur iso-cinétiques (bouteille de Delft, US-P-72 et dérivés) permettent une mesure directe du flux en suspension. Ces préleveurs sont conçus afin que la vitesse d'entrée dans le préleveur soit la même que celle de l'écoulement. Ils peuvent être utilisés soit pour une mesure ponctuelle, soit en intégrant le flux sur la verticale de mesure. Ces échantillonneurs sont plus adaptés à la mesure de la suspension sableuse.

### Bouteille Niskin ou Van Dorn

La bouteille Niskin, 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 (cf. Fig. 2.13). Ce système permet ainsi d'échantillonner un volume d'eau et de sédiment à une profondeur donnée. 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).



FIGURE 2.13 – Bouteille Niskin (Photo Le Coz).

Une première difficulté liée à la bouteille Niskin est de correctement estimer la profondeur de mesure. Il est bien sûr possible (et très fortement recommandé) de mettre un capteur de pression sur le système afin d'obtenir cette profondeur a posteriori. Cependant, une méthode existe pour réaliser des mesures à profondeur voulue (cf. Fig. 2.14). Cette mesure ne peut se

faire correctement qu'à partir d'une embarcation, soit sur un cours d'eau navigable.

- Avant de jeter la bouteille à l'eau, il faut mettre le moteur du bateau au point mort et se laisser dériver.
- Ensuite, après avoir mesuré la longueur de corde correspondant à la profondeur de mesure voulue (de la surface de l'eau au centre de la bouteille), la bouteille est mise à l'eau lorsque la vitesse du bateau est équivalente à la vitesse du courant, de préférence à l'amont du bateau.
- Juste avant que la corde devienne tendue et verticale, il faut lancer le messenger afin de fermer la bouteille (procédure en Fig. 2.14a).

Si le bateau a une vitesse relative par rapport à la surface du cours d'eau différente de zéro (ou si l'on tente de faire une mesure d'un pont), un angle  $\alpha$  plus ou moins important entre la corde et la verticale va apparaître, biaisant fortement le choix de la profondeur (Fig. 2.14b) et rendant très difficile la fermeture de la bouteille à l'aide du messenger.

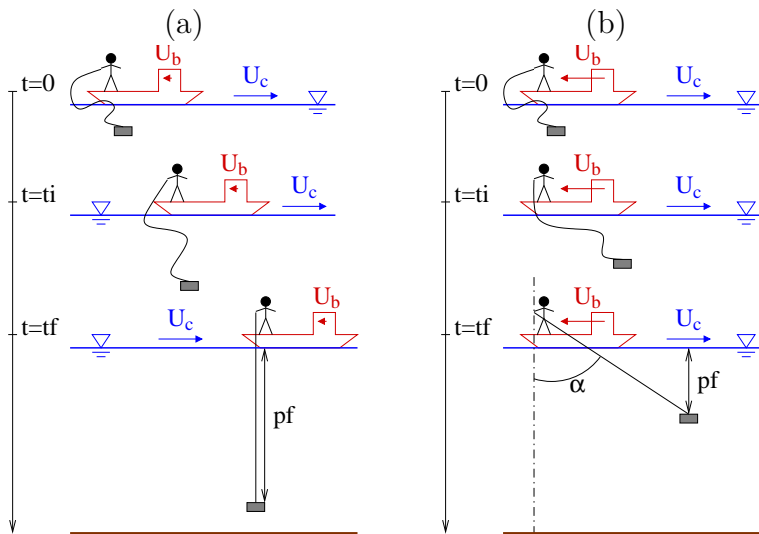


FIGURE 2.14 – Protocole de prélèvement avec une bouteille Niskin (a : correct ; b : incorrect).

Une seconde difficulté liée à la bouteille Niskin est la représentativité de l'échantillon récupéré. L'objectif étant ici d'estimer la concentration en sédiments sableux, il est d'autant plus important d'avoir un volume de prélèvement important (soit une bouteille Niskin de plusieurs litres idéalement) et

surtout de bien récupérer les particules sableuses sans biais. Une procédure de sous-échantillonnage est donc proposée (cf. équipe de l'ORE Hybam) :

- verser le contenu de l'échantillonneur (Niskin ou équivalent) dans un récipient propre (seau) ; rincer l'échantillonneur avec de l'eau prise en surface du seau afin de récupérer toutes les particules grossières ;
- homogénéiser le mélange dans le seau (8 aléatoires) à l'aide d'un récipient ouvert (coupelle, cruche...) qui servira lui-même à faire le sous-prélèvement (ne pas laisser de dépôt, ni centrifuger les grossières) ;
- verser le contenu dans le flacon (ou récipient de mesure) pour poste à filtration (éprouvette graduée ou fiole jaugée) ou granulo en minimisant le dépôt de sable dans la coupelle/cruche ; dans le cas d'une filtration : rincer la coupelle dans le poste à filtration pour reprendre les sables déposés sur la coupelle.

Une bouteille Niskin (ou Van Dorn) coûte de 500 à 1000 euros selon la taille.

### **Bouteille de Delft**

La bouteille de Delft est un préleveur-décanteur iso-cinétique (Dijkman 1981). Elle permet d'échantillonner sur toute la colonne d'eau ainsi que proche du fond (à partir de 5 cm du fond) grâce à sa structure de soutien (cf. Fig. 2.15) et ses embouts recourbés. L'embout de diamètre 15.5 mm ( $1.9 \text{ cm}^2$ ) est à utiliser pour des vitesses inférieures à 1,0 m/s ; l'embout de 22.0 mm ( $3.8 \text{ cm}^2$ ) est préconisé pour des vitesses de 1,0 à 2,5 m/s. Pour les vitesses les plus fortes, Peters (2002) recommande de fermer deux des quatre sorties de la bouteilles à l'arrière à l'aide des bouchons mis à disposition. L'intérieur de la bouteille de Delft est constitué de trois chambres (dont une chambre de décantation profilée avec un effet venturi) permettant un ralentissement des vitesses et la décantation des sables. Elle ne piège que les sables à partir de  $50 \mu\text{m}$  (chambre de décantation profilée avec un effet venturi) mais permet d'en récupérer une grande quantité, permettant ainsi de limiter les incertitudes de mesure et de réaliser des mesures granulométriques sur l'échantillon prélevé. Ce préleveur est très intéressant mais ne peut être utilisé a priori qu'à des concentrations inférieures à 10 mg/L et à des vitesses inférieures à 2,5 m/s (conditions où l'appareil a été testé et validé). Il est de plus d'une conception relativement fragile (embouts en laiton). Il ne peut donc pas être employé en cas d'écoulements très turbulents en particulier avec la structure. Même si la bouteille de Delft mesure directement un flux solide (en kg/s),

il peut être utile de mesurer la vitesse du courant à la même profondeur de mesure afin de vérifier si la concentration estimée est cohérente.



FIGURE 2.15 – Bouteille de Delft avec sa structure, (a) suspendue avant mise à l'eau (Photo M. Courtel) et (b) sur le bateau pour la récupération des sédiments (Photo S. Rodrigues).

Dijkman & Milisic (1982) ont effectué des recherches sur la validité des mesures obtenues avec la bouteille de Delft, l'US-P61 (piège à sédiment à clapet développé par l'USGS, cf. Fig. 2.16) et des préleveurs de type pompage filtration (van Rijn 2006). Ces tests ont été effectués en laboratoire et en Yougoslavie sur le Danube. Les résultats sont résumés par Van Rijn (2006). L'efficacité  $k$  de la bouteille de Delft (cf. Eq. 2.7) varie entre 0,7 et 2,5 selon l'embout utilisé, la vitesse de l'écoulement ( $k$  décroît avec la vitesse  $u$ ) et la taille des sédiments en suspension ( $k$  décroît avec le diamètre  $d$ ). La qualité de la mesure est fonction de temps de prélèvement, un prélèvement de 5 min minimum est préconisé afin de limiter les erreurs liées au temps de descente et remontée de l'appareil (la bouteille de Delft n'est pas munie d'une fermeture automatisée de l'échantillonnage). Les mesures de terrain ont indiqué une incertitude de l'ordre de 50% pour une unique mesure.

La bouteille de Delft doit donc être mise en place différemment selon la profondeur de mesure :

- pour des mesures proches du fond (jusqu'à 50cm au dessus du fond), la structure de soutien doit être utilisée et donc posée sur le fond du cours d'eau avec la bouteille de Delft fixée dessus (embouts recourbés) ; le protocole de mesure est alors similaire à celui des préleveurs de fond

(autant que possible, stabiliser l'embarcation pour ne pas déplacer la structure lors du prélèvement) ;

- pour des mesures sur la colonne d'eau, la bouteille de Delft est utilisée sans structure (avec son aileron) ; il est alors indispensable de l'associer à un capteur de pression car il est difficile d'estimer la profondeur de mesure. Même si la bouteille est profilée, l'angle  $\alpha$  entre le câble et la verticale peut ne pas être négligeable (cf. Fig. 2.14b).

Une difficulté de l'utilisation de la bouteille de Delft est la récupération des sédiments déposés dans la chambre de décantation. Nous proposons pour cela de refermer des ouvertures aval du système à l'aide des bouchons fournis avec la bouteille, de remplir la bouteille d'eau sans sédiment, d'agiter la bouteille pour faire circuler l'eau dans la chambre, puis de la vidanger et récolter les sédiments à l'aide d'un tamis à  $70\mu\text{m}$ . Il ne faut pas hésiter à réitérer l'opération plusieurs fois (au minimum 3 à 4 fois) tant que l'on récupère une quantité non négligeable de sédiments. La bouteille de Delft est utilisée par les équipes d'Irstea Lyon (B. Camenen) sur l'Arc, le Rhône et le Mékong (en collaboration avec la CNR et le Cerege) et de Tours (S. Rodrigues) sur la Loire.

Une bouteille de Delft complète avec sa structure porteuse coûte environ 15 k€.

## Echantillonneurs FISP

L'USGS a conçu et testé plusieurs échantillonneurs permettant la mesure ponctuelle (ou par intégration) du transport solide en suspension : [http://water.usgs.gov/fisp/catalog\\_index.html](http://water.usgs.gov/fisp/catalog_index.html)

Ces préleveurs (US-P61 et dérivés, remplacé aujourd'hui par le préleveur US-P6) sont dotés d'un système iso-cinétique comme la bouteille de Delft, et pour certains d'une fermeture automatisée permettant de réaliser un échantillon à une profondeur donnée. S'ils ne sont pas adaptés pour une mesure proche du fond (pas de structure) et souvent limités à des échantillons de petit volume (1 à 3 litres), ils ont l'avantage d'être plus solide et robuste (cf. Fig. 2.16).

Ces échantillonneurs ont un coût correspondant généralement à plusieurs milliers d'euros.

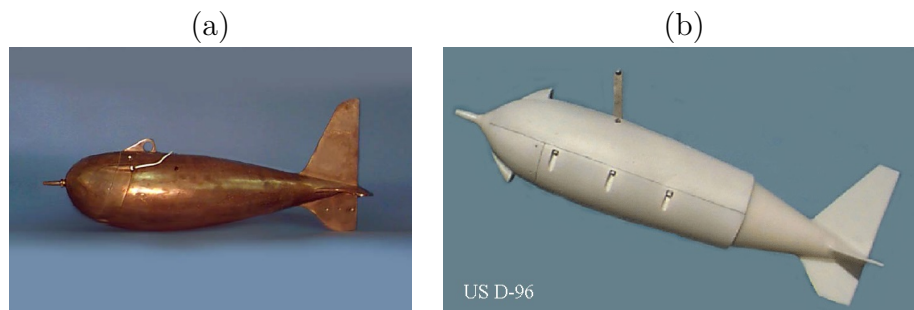


FIGURE 2.16 – Exemples de préleveurs proposés par l’USGS pour une mesure ponctuelle, US-P61 (a) ou intégrée, US-D96 (b) (Photos USGS).

### Echantillonneur ANX3-50

Un autre préleveur iso-cinétique de conception robuste est le préleveur chinois ANRX-50. Les sédiments sont récoltés dans un sac poreux en caoutchouc permettant d’équilibrer la pression entre l’entrée et la sortie de l’embout (Fig. 2.17a). Ce préleveur a un système d’ouverture pouvant être commandé à distance permettant échantillonnage à une profondeur voulue. Il peut être aussi couplé à un courantomètre. Ce dernier a été utilisé par J.J. Peters sur les rivières Balsas (Mexique) et Padma (Bangladesh).



FIGURE 2.17 – Préleveurs chinois ANX3-50 (a) et Nile-Delft (b) (Photos J.J. Peters).

## Echantillonneur Nile-Delft

L'échantillonneur Nile-Delft a été conçu par Delft Hydraulics pour la mesure de transport sableux sur le Nil (Van Rijn & Gaweesh 1992). Il consiste en un préleveur par charriage (d'ouverture 9.6 cm) associé à 7 embouts (de diamètre 3 mm) permettant la mesure de la suspension à 7 hauteurs différentes (Fig. 2.17b). La mesure de suspension est opérée par un système de pompes. Il apparaît cependant que la mesure de la suspension avec cet échantillonneur n'a pas été totalement validée.

### 2.2.2 Méthodologie pour la mesure de la suspension sur une section de cours d'eau

#### Stratégie globale pour la mesure des flux en suspension

De la même manière que pour le charriage, la méthodologie pour la mesure de la suspension ainsi que les incertitudes liées aux mesures sont très dépendantes du cours d'eau étudié. Cependant, les incertitudes liées au coefficient d'efficacité de la méthode utilisée sont généralement plus faibles.

Le nombre de verticales pourra être pris identique à celui des mesures de charriage (Fig. 2.4). Le nombre d'échantillons par verticale devra être optimisé selon le temps de mesure disponible, la constance de l'écoulement et la profondeur d'eau. Sachant que le transport solide sableux peut être concentré sur la partie basse de la colonne d'eau, on conseille de faire au moins deux mesures près du fond, une à mi-hauteur et une près de la surface. Pour chacune des verticales, une mesure de la profondeur est évidemment nécessaire mais aussi une mesure de la vitesse du courant au moins pour chaque profondeur de mesure de la suspension. L'utilisation d'un ADCP en position verticale fixe est sans doute la solution actuellement la plus efficace. Il faudra aussi évaluer la largeur active où l'on supposera que le transport solide en suspension est homogène. Cette largeur active peut être différente (plus large) que celle attribuée au transport solide par charriage si les sédiments en suspension graduée sont plus fins que les sédiments charriés.

Ainsi, l'estimation du transport solide en suspension sur la section pourra être estimé selon :

$$Q_{ss,exp} \approx \sum_{i=1}^m q_{ss,exp,i} L_{as,i} \quad (2.5)$$

avec  $m$  le nombre de verticales de mesure,  $q_{ss,exp,i}$  la valeur du transport solide



en suspension estimée sur cette verticale selon l'Eq. 2.8, et  $L_{as,i}$  la largeur active de la suspension associée à cette verticale.

### Estimation des flux en suspension sur une verticale de mesure

Il existe ainsi trois principales méthodologies pour l'estimation des flux en suspension sur une verticale de mesure :

- mesurer conjointement la concentration volumique ( $c = C/\rho_s$ ) par un prélèvement et la vitesse de l'écoulement à différentes profondeurs, le débit solide par unité de largeur peut ainsi s'écrire :

$$q_{ss,exp} = \int_0^h cvdz \approx \sum_{i=1}^n c_i u_i \Delta z_i \quad (2.6)$$

avec  $q_{ss,exp}$  est le débit solide volumique en suspension exprimé en  $m^3/s/m$ ,  $h$  la hauteur d'eau,  $c(z)$  la concentration volumique et  $u$  la vitesse horizontale de l'écoulement à la hauteur  $z$  au dessus du fond,  $n$  le nombre de mesures sur la verticale, et  $\Delta z_i$  la hauteur représentative d'un point de mesure (par exemple  $\Delta z_i = (z_{i+1} - z_i)/2$ ). Dans le cas d'un nombre insuffisant de points de mesures et pour une extrapolation au fond, il peut être judicieux de caler des profils théoriques de vitesses et concentrations sur les points de mesure ;

- mesurer directement le flux de sédiments en suspension à l'aide d'un préleveur iso-cinétique. Dans ce cas, le débit solide par unité de surface s'écrit :

$$q_{ss,exp,i} = k \frac{M}{\rho_s S T} \quad (2.7)$$

où  $q_{ss,exp,i}$  est le débit solide en suspension exprimé en  $m^3/s/m^2$  mesuré à la hauteur  $z_i$ ,  $k$  l'efficacité de la méthode de prélèvement,  $M$  la masse sèche prélevée (en kg),  $\rho_s$  la masse volumique du sédiment,  $S$  la section d'entrée du système de prélèvement et  $T$  le temps de prélèvement. Dans ce second cas, il est possible d'estimer le transport solide en suspension sur une verticale de mesure :

$$q_{ss,exp} \approx \sum_{i=1}^n q_{ss,exp,i} \Delta z_i \quad (2.8)$$

- faire une mesure intégrée du débit solide en suspension sur la verticale.

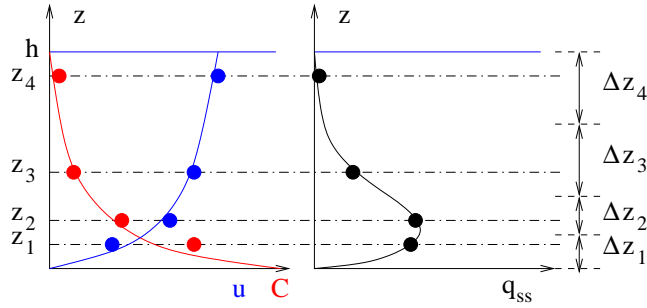


FIGURE 2.18 – Exemple de mesure du transport solide en suspension à quatre points sur la verticale.

La Fig. 2.18 présente un exemple d'application des Eqs. 2.6 et 2.8 pour  $n = 4$ .

La mesure par intégration a été proposée et utilisée en routine à partir années 40 aux Etats-Unis (Witzigman 1963). Si cette méthode a l'intérêt de donner rapidement une valeur globale du flux en suspension (sable et limons) sur une verticale, elle demande cependant une méthodologie rigoureuse. En effet, pour éviter tout biais dans la mesure, il faut remplir l'échantillonneur soit sur la durée exacte de la descente, soit sur la durée correspondant à la descente plus remontée. L'estimation de cette durée  $D_r$  (pour une descente et une remontée), et donc de la vitesse de descente/remontée du préleveur, peut se faire in situ en remplissant la bouteille en surface mais aussi par un simple calcul à partir de la hauteur  $h$  et vitesse moyenne du courant  $U$ , de la vitesse de descente et remontée du préleveur  $W_p$ , ainsi que l'aire d'ouverture de l'embout du préleveur  $S_p$  et son volume  $V_p$  :

$$D_r = 2 \frac{h V_p}{S_p} \left( \int_0^h u(z) dz \right)^{-1} \approx \frac{2(m-1)}{(m+1)} \frac{V_p}{U S_p} \quad (2.9)$$

où  $m$  est un coefficient empirique dépendant de la rugosité et du coefficient de Reynold pour un profil de vitesse loi puissance ( $m = 6$  pour le cas courant en rivière). En prenant l'exemple de l'US D-96,  $V_p = 3 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  (3 L),  $S_p = 5 \times 10^{-5} \text{ m}^2$  (diamètre d'ouverture de 8mm), et une vitesse moyenne du courant de 1 m/s, on obtient ainsi une durée de 86 s. Si la hauteur d'eau est de 10 m, il faut donc une vitesse de descente/remontée du préleveur égale à  $W_p = 0.25 \text{ m/s}$ .

### 2.2.3 Méthodes d'échantillonnage optiques et acoustiques

Il existe aujourd'hui des technologies permettant une mesure indirecte de la concentration et de la granulométrie. Bien que basées sur des phénomènes physiques différents, les méthodes d'échantillonnage optiques et acoustiques restent similaires au sens macroscopique. Les principes des deux méthodes sont en effet liés à la transmission et la retro-diffusion d'un signal.

#### Turbidimètre

Les turbidimètres ou OBS (Optical backscatter point sensor) sont des appareils optiques permettant de mesurer la concentration en sédiments. Il existe en effet une relation entre l'intensité du signal optique diffusé et la concentration. Ces appareils sont cependant très sensibles à la taille des sédiments. S'ils sont aujourd'hui très utilisés pour la mesure en continu des sédiments fins (washload), ils restent peu utilisés en rivière pour la mesure des concentrations en sable du fait de la sensibilité plus forte au sédiments fins aussi présents dans la suspension. L'équipe Hybam a utilisé un turbidimètre sur l'Amazone pour mieux décrire les profils de concentration sur la verticale en supposant deux classes de sédiments de diamètre connu (sables et limons) et en séparant les signaux reçus (propriété additive de la turbidité).

Le coût de ces appareils est de quelques milliers d'euros.

#### Diffraction laser

Plusieurs instruments in-situ à diffraction laser ou LISST (Laser In-Situ Scattering and Transmissometry) sont aujourd'hui disponibles sur le marché. Principalement produits par l'entreprise Sequoia<sup>1</sup>, ils permettent généralement de mesurer la concentration et/ou la granulométrie d'un échantillon. Ces appareils restent encore fragiles en particulier à cause des sables qui peuvent bloquer la pompe. Le LISST-SL<sup>2</sup> combine le prélèvement isocinétique et la mesure directe de la concentration et granulométrie et de la vitesse du courant (Fig. 2.19). L'utilisation d'un tel appareil peut ainsi se faire selon la même méthodologie que les préleveurs de suspension mécaniques (cf. paragraphe 2.2.2). Le coût de plusieurs dizaines de milliers d'euros

---

1. <http://www.sequoiasci.com>

2. <http://www.sequoiasci.com/product/lisst-sl>

reste cependant encore prohibitif.

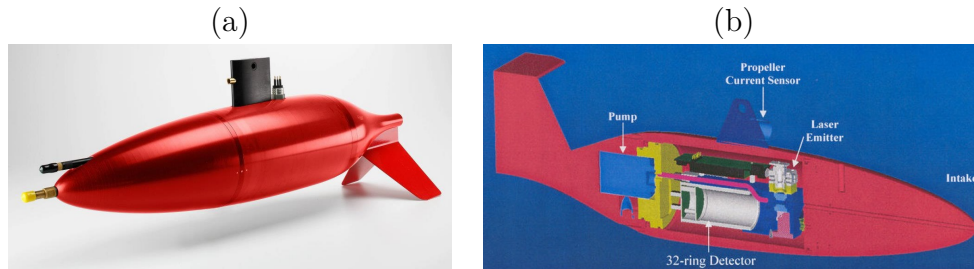


FIGURE 2.19 – Photo (a) et schéma de conception (b) du LISST-SL (Sequoia).

D’autres instruments acoustiques permettant la mesure ponctuelles sont disponibles sur le marché (Acoustic Dopple Volocimeter : ADV, Acoustic Sand Transport Monitor : ASTM) mais restent plus adaptés pour la mesure en laboratoire.

### Rétro-diffusion ADCP

Il est aussi possible d’utiliser le résultat d’un jaugeage ADCP pour estimer les concentrations en sédiments au travers d’une section. En effet, la puissance de rétro-diffusion (“backscatter”) du signal acoustique (en dB) est proportionnelle à la concentration en sédiments en suspension. Cependant, cette propriété est entre autre très sensible à la taille des particules et à la fréquence d’émission de l’appareil (Moore 2011, Moore et al. 2013). Dans le cas d’une granulométrie étendue de la suspension, il est ainsi très difficile d’estimer théoriquement cette rétro-diffusion. Une méthode usuelle est de caler empiriquement les paramètres acoustiques et sédimentaires à partir de mesures directes par prélèvement (cf. Bouteille Niskin, paragraphe 2.2.1). Cette dernière reste cependant assez approximative et ne permet de distinguer que des variations élevées de concentration (cf. confluence Saône/Rhône Fig. 2.20). En supposant une suspension bimodale (limon + sable) avec une concentration en limon supposée homogène dans la section, il devrait être possible de décrire la suspension graduée en sable sans calage empirique.

Un autre intérêt de la mesure ADCP est que l’on peut obtenir directement les flux transportés car la vitesse de l’écoulement et la concentration peuvent être estimés simultanément sur une grande partie de la section mouillée.

De manière similaire, l’appareil “Aquascap”, qui utilise plusieurs fréquences

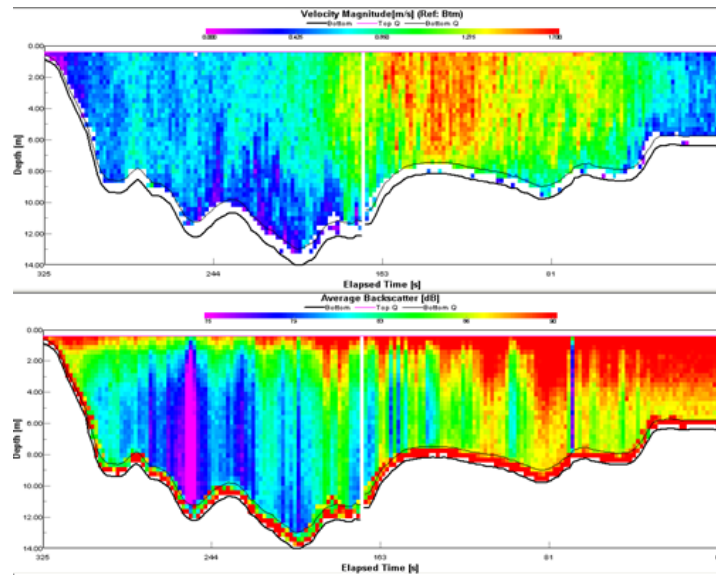


FIGURE 2.20 – Exemple de mesure de vitesse et rétro-diffusion sur la confluence Saône-Rhône.

d'émission, permet une mesure des concentrations ponctuelle plus précise que l'ADCP. Par contre, il ne mesure pas les vitesses de l'écoulement.

Les ADCP et Aquascat coûtent approximativement 20 k€.

# Chapitre 3

## Etablissement d'une courbe de tarage sédimentaire

Afin d'estimer le transport solide annuel d'un cours d'eau et surtout le transport solide lors d'événements majeurs, il semble fondamental de pouvoir établir des chroniques par l'intermédiaire de mesures continues comme celle de la hauteur d'eau. De la même manière que des courbes de tarage sont proposées en hydraulique pour associer un débit à une hauteur d'eau mesurée à l'aide de jaugeages liquides multiples, il semble logique d'appliquer une méthode similaire pour estimer une chronique de débit solide. Camenen et al. (2012) ont proposé une méthode relativement simple pour estimer une courbe de tarage sédimentaire décrite ici. Il est bien entendu qu'une courbe de tarage sédimentaire est entachée de très fortes incertitudes, cumulant les incertitudes sur la mesure de débit et celles sur l'estimation de la charge de fond. Une telle courbe fait l'hypothèse d'un état d'équilibre permanent alors que les fluctuations temporelles de l'écoulement et surtout la disponibilité en sédiments peuvent induire de fortes variations. Cependant, une telle courbe permet l'obtention d'ordres de grandeur pouvant être très utile à la compréhension de la dynamique d'un cours d'eau.

### 3.1 Estimation des caractéristiques hydrauliques

Le modèle se base sur la courbe de tarage de la station hydrométrique où les mesures de transport solide sont supposées être réalisées. En supposant

une relation puissance entre le débit et la hauteur d'eau mesurée à la station, la profondeur d'eau moyenne sur la section peut ainsi être estimée :

$$H = z_1 + \left(\frac{Q}{a}\right)^{1/b} \quad (3.1)$$

avec  $a$  et  $b$  les coefficients de calage de la station hydrométrique,  $z_1$  le niveau de référence permettant d'obtenir un calage de la hauteur d'eau moyenne et vitesse moyenne sur la section :

$$V = \frac{Q}{S_m} = \frac{Q}{HW} \quad (3.2)$$

avec  $S_m$  la section mouillée et  $W$  la largeur de la section du cours d'eau.

La Figure 3.1 indique les résultats obtenus dans le cas de mesures sur l'Arc en Maurienne. Une comparaison avec des mesures du niveau d'eau indique que les résultats obtenus avec le modèle sont en accord avec les mesures (Fig. 3.1a), de même pour les vitesses moyennes (Fig. 3.1b) comparées à des mesures de vitesse de surface obtenues à l'aide d'un radar de vitesse de surface SVR (Surface Velocity Radar). Le rapport entre la vitesse moyenne et la vitesse de surface a été pris égal à 0.80 pour ce type d'écoulement très rugueux (Jodeau et al. 2008, Dramais et al. 2011).

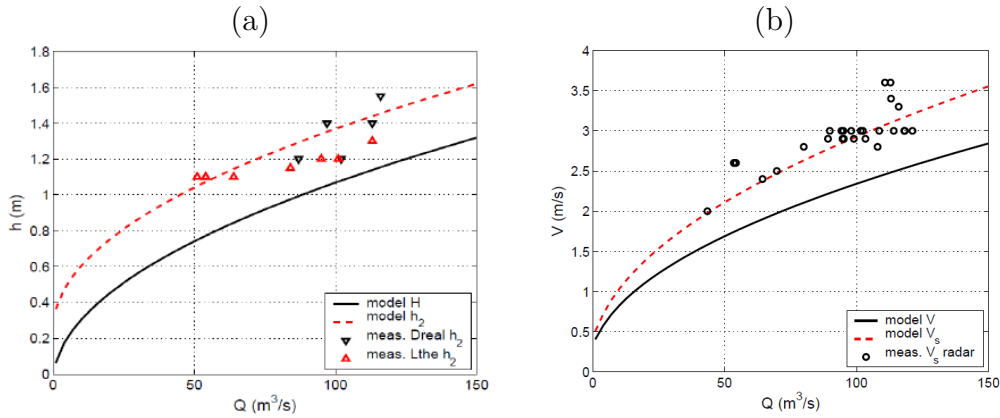


FIGURE 3.1 – Profondeurs d'eau (moyennes  $H$  et locales  $h_2$ ) (a) et vitesses (moyennées sur la hauteur d'eau  $V$  et en surface  $V_s$ ) (b) estimées en fonction du débit de l'Arc (Camenen et al. 2012).

## 3.2 Calcul du transport solide par charriage

### 3.2.1 Formulation du charriage

Il existe de nombreuses formules semi-empiriques pour l'estimation du charriage. Par exemple, Barry et al. (2008), Pitlick et al. (2009), Recking et al. (2012) décrivent un certain nombre de formules de transport par charriage adaptées aux rivières à graviers. Les formules de Meyer-Peter & Müller (1948, MPM) et Camenen & Larson (2005, CL) sont présentées ici :

$$\Phi_{MPM} = \frac{q_{sb,MPM}}{\sqrt{(s-1)gd_{50}^3}} = 8(\theta - \theta_{cr})^{3/2} \quad (3.3)$$

$$\Phi_{CL} = \frac{q_{sb,CL}}{\sqrt{(s-1)gd_{50}^3}} = 12\theta^{3/2} \exp\left(-4,5\frac{\theta_{cr}}{\theta}\right) \quad (3.4)$$

où  $\Phi$  est le flux charrié adimensionnel,  $q_{sb}$  (en  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ) le flux charrié volumique par unité de largeur,  $s = \rho_s/\rho = 2,65$  la densité du sédiment,  $g$  l'accélération de la pesanteur,  $d_{50} = 0,06$  m le diamètre médian,  $\theta$  la contrainte de cisaillement au fond adimensionnelle ou paramètre de Shields,  $\theta_{cr}$  le paramètre de Shields critique pour la mise en mouvement des sédiments (peut être estimé à partir de la courbe de Yalin-Shields,  $\theta_{cr} \approx 0,05$  en première approximation pour les sédiments grossiers). La principale différence entre ces deux formulations du charriage est la prise en compte de la limite de mise en mouvement des particules. La formule de MPM est une formule à seuil (transport nul si  $\theta < \theta_{cr}$ ) alors que la formule CL permet un transport en dessous de ce seuil selon une vision probabiliste introduite par Einstein (1942).

### 3.2.2 Contrainte de cisaillement

Le paramètre de Shields s'appliquant sur le fond du cours d'eau peut être estimé en utilisant les relations classiques de frottement :

$$\theta = \frac{C_d V^2}{(s-1)gd_{50}} = \frac{V^2}{K_s^2 R_h^{1/3} (s-1)d_{50}} \quad (3.5)$$

où  $V$  est la vitesse moyennée sur la hauteur d'eau (que l'on supposera ici égale à la vitesse moyenne sur la section du cours d'eau),  $C_d$  le coefficient



de frottement adimensionnel,  $K_s$  le coefficient de Strickler et  $R_h$  le rayon hydraulique. Le coefficient  $C_d$  peut être obtenu par l'intermédiaire de la loi de paroi logarithmique :

$$C_d = \left[ \frac{\kappa}{1 + \ln(k_s/30h)} \right]^2 \quad (3.6)$$

avec  $\kappa = 0,41$  la constante de Von Kármán,  $k_s = 2d_{90}$  la hauteur de rugosité, et  $h$  la hauteur d'eau locale. Encore une fois,  $h$  peut être remplacée par  $R_h$  si l'on raisonne sur l'ensemble de la section. De manière équivalente, le coefficient de Strickler (1923) peut être estimé en fonction de la granulométrie :

$$K_s = \frac{21}{d_{50}^{1/6}} \approx \frac{26}{d_{90}^{1/6}} \quad (3.7)$$

Le paramètre de Shields pourrait aussi être calculé à partir de la pente d'énergie  $J$  :

$$\theta = \frac{R_h J}{(s-1)gd_{50}} \quad (3.8)$$

L'estimation de la pente en fonction du débit reste cependant très approximative sans modèle. L'utilisation de la pente moyenne de la surface libre, voire du fond (pente  $I$ ) est souvent utilisée en première approximation mais elle reste une très forte approximation. En utilisant la relation de Manning-Strickler, l'équation 3.8 se simplifie en l'équation 3.5.

### 3.2.3 Contrainte de cisaillement critique de mise en mouvement des sédiments

Le choix ou calcul de la valeur de  $\theta_{cr}$  est un point sensible pour l'estimation du charriage car dans de nombreux cas, la contrainte de cisaillement reste proche de cette contrainte critique (Ryan et al. 2002, Camenen et al. 2011). La formule de Soulsby & Whitehouse (1997) donne une bonne approximation du diagramme de Shields :

$$\theta_{cr} = \frac{0,24}{d_*} + 0,055 [1 - \exp(-0,02d_*)] \quad (3.9)$$

avec  $d_* = [g(s-1)/\nu^2]^{1/3}d$  le diamètre sédimentologique. Recking (2009) a proposé une formule plus adaptée pour les cours d'eau à forte pente :

$$\theta_{cr} = (1,32J + 0,037) \left( \frac{d_{84}}{d_{50}} \right)^{-0,93} \quad (3.10)$$

où  $J$  est la pente d'énergie souvent assimilée à la pente du fond et  $d_{84}$  le diamètre représentatif d'une population pour lequel 84 % en masse des sédiments sont plus petits.

Il est conseillé de prendre les caractéristiques granulométriques de la couche de surface de lit afin de tenir compte d'un potentiel armurage (Bathurst 2007). La couche d'armurage correspond à une couche de surface plus grossière que la couche sous-jacente du fait d'un transport solide partiel ayant transporté les sédiments les plus fins (Chin et al. 1994). A contrario, l'application des formules de transport solide (calcul du paramètre de Shields) se fait généralement à partir des caractéristiques de la couche sous-jacente (Bakke et al. 1999, Malavoi et al. 2011). Du fait de la variabilité spatiale de la granulométrie dans les cours d'eau (Mosley & Tindale 1985), il est conseillé de prendre pour référence la granulométrie représentative du chenal principal ou en bord de banc si ce dernier est difficile d'accès. La méthode de Wolman (1954) est bien adaptée pour les rivières à graviers.

### 3.2.4 Application du modèle

La figure 3.2 indique le type de graphique que l'on peut obtenir pour une rivière alpine où les incertitudes de mesure sont très fortes (en particulier pour les mesures au cours de la chasse des barrages de 2011 où la méthodologie de mesure n'était pas encore bien établie).

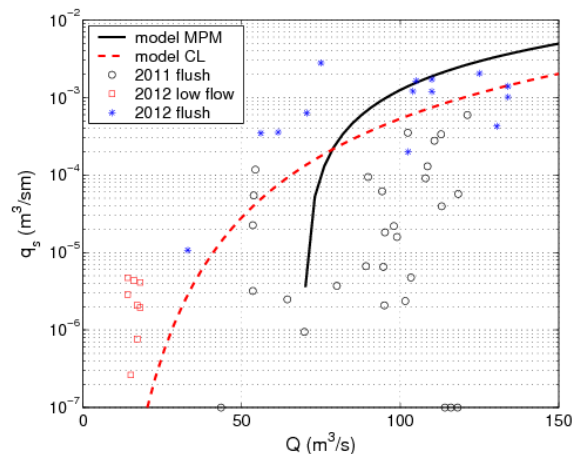


FIGURE 3.2 – Estimation du transport solide par charriage en fonction du débit liquide sur la rivière Arc en Maurienne au niveau de Ste-Marie-de-Cuines.

Dans le cas de rivières larges avec une bathymétrie variant sur la section (présence d'un banc submergé), il est important de ne pas faire de calcul à partir de valeurs moyennes sur la section mais de revenir aux calculs locaux pour le transport solide puis d'intégrer sur la section (Exemple du Danube en Slovaquie, Camenen et al. 2011).

### 3.3 Calcul du transport solide en suspension

De la même manière que pour l'estimation du charriage, il existe de nombreuses formules semi-empiriques pour l'estimation d'une suspension graduée de sable. En supposant un profil de concentration en sédiments de forme exponentielle et faisant l'hypothèse d'une vitesse constante sur la verticale, Camenen & Larson (2008) ont proposé :

$$q_{ss} = V c_R \frac{\epsilon}{W_s} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{W_s h}{\epsilon}\right) \right] \quad (3.11)$$

avec  $q_{ss}$  (en  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ) le flux volumique en suspension graduée par unité de largeur,  $V$  la vitesse moyennée sur la hauteur d'eau,  $h$  la hauteur d'eau,  $c_R$  la concentration de référence au fond et  $\epsilon$  le coefficient de diffusion verticale (supposé constant sur la verticale, hypothèse liée au profil exponentiel) et  $W_s$  la vitesse de chute du sédiment. Le coefficient de diffusion verticale est obtenu par l'équation :

$$\epsilon = \frac{\sigma}{6} \kappa u_* h \quad (3.12)$$

où  $\sigma$  est le nombre de Schmidt ( $\sigma \approx 1$  en première approximation),  $\kappa = 0,41$  la constante de von Kármán, et  $u_* = \sqrt{\tau/\rho}$  la vitesse de frottement. L'estimation de la concentration de référence est supposée directement liée au flux solide au fond (en se basant sur la formule de Camenen & Larson (2005)) :

$$c_R = 1,5 \times 10^{-3} \exp(-0,2d_*) \theta \exp\left(-4,5 \frac{\theta}{\theta_{cr}}\right) \quad (3.13)$$

avec  $d_* = [(s-1)g/\nu^2]^{1/3}d$  le diamètre sédimentologique,  $s = 2,65$  la densité du sédiment,  $\nu = 10^{-6}$   $\text{m}^2/\text{s}$  la viscosité cinématique de l'eau (à 20°C), et  $d$  le diamètre des particules. La concentration au fond est le terme qui induit le plus d'incertitude pour le calcul du flux en suspension graduée, tout en étant très sensible au diamètre  $d$ . Il est donc important de bien estimer la taille

des sédiments en suspension, qui est a priori différente de celle des sédiments charriés. Si possible, pour l'estimation du transport solide en suspension, il est préférable d'utiliser des paramètres hydrauliques locaux (cf. Eq. 2.5). Il est cependant possible d'utiliser les paramètres hydrauliques moyennés sur la section en considérant pour largeur active la largeur du cours d'eau.

L'hypothèse d'une vitesse constante sur la verticale peut sembler très grossière même si elle induit une erreur relativement faible (Camenen & Larson 2008). Il est possible de revenir à l'Eq. 2.6, et ainsi d'intégrer numériquement l'équation suivante :

$$q_{ss} = \int_0^h cudz = \int_0^h \frac{u_* c_R}{\kappa} \log\left(\frac{z}{z_0}\right) \exp\left(\frac{W_s}{\epsilon} z\right) dz \quad (3.14)$$

où  $z_0 = k_s/30$  la longueur de rugosité.

## 3.4 Intérêts d'une courbe de tarage sédimentaire

### 3.4.1 Bilans de flux solide

A partir d'une courbe de tarage sédimentaire, il est donc possible de faire des estimations cohérentes du transport solide au travers une section sur des événements ou périodes plus ou moins longues. A partir d'une courbe des débits classés, l'application de la courbe de tarage sédimentaire peut par exemple permettre d'estimer le transport solide annuel moyen, ce qui très utile pour les études géomorphologiques (Tab. 3.1).

Le tableau 3.1 montre ainsi que pour l'Arc en Maurienne à Ste-Marie-de-Cuines, le charriage représente 5 à 10% du transport total (incluant le transport solide par suspension de lessivage) pour des événements relativement courants mais pourrait représenter plus de 30% pour des événements extrêmes comme la crue décennale de mai 2008. Il faut tout de même noter ici qu'aucune mesure du transport de sable en suspension n'est prise en compte dans ces estimations.

A titre de comparaison Marnézy (1999) avait estimé des débits solides annuels de 225 à 500 millions de tonnes en se basant sur une méthodologie similaire (Etude du LNH-EDF des années 50). La méthodologie présentée ici montre bien l'impact prédominant des crues ; ce qui implique globalement une prédiction de 50% à 100% plus élevée que celle de Marnézy (1999).

TABLE 3.1 – Estimation du transport solide sur l’Arc en Maurienne à Sainte-Marie-de-Cuines (Mt : million de tonnes)

| 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 évènement majeur | $\approx 150 \text{ m}^3/\text{s}$ | 1 année   | de 15 à 50 Mt            | de 400 à 800 Mt          |

### 3.4.2 Extrapolation

Dans de nombreux cas, les mesures réalisées seront peu nombreuses et ne permettront pas une vue complète de la dynamique. Une courbe de tarage sédimentaire peut alors permettre de faire une extrapolation plus intelligente qu’une simple régression car elle prend en compte la physique du système. Cependant, il existera toujours de fortes incertitudes liées aux hypothèses du modèle, en particulier par rapport aux apports amont. La figure 3.3 montre la courbe de tarage sédimentaire pour le Mékong à Luang Prabang (Laos) alors même que peu de mesures sont disponibles (Dramais et al. 2013, Camenen et al. 2014). Les mesures de charriage ont été estimées à partir de prélèvements Helley-Smith 76mm (rond noirs) alors que l’unique estimation de la suspension sableuse a été réalisée à partir de prélèvement avec la bouteille de Niskin. L’éloignement de la courbe théorique peut être expliqué par la probable sous-estimation de la mesure. En effet, les concentrations en sable étant faibles, la capacité bouteille Niskin utilisée (1l) s’est avérée insuffisante pour limiter les incertitudes de mesures (cf. paragraphe 2.2.1).

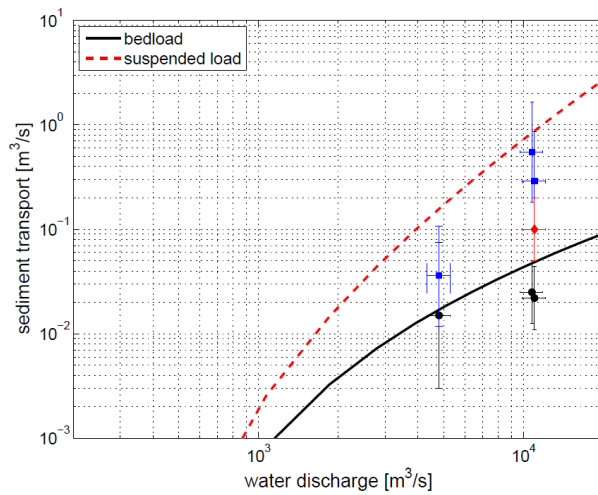


FIGURE 3.3 – Estimation du transport solide par charriage et suspension en fonction du débit liquide sur la rivière Mékong à Luang-Prabang (Laos) (Dramais et al. 2013, Camenen et al. 2014). Les cercles noirs correspondent à des mesures charriage avec un préleveur Helley-Smith, les carrés bleus à des mesures avec une bouteille Niskin, et le diamant rouge à une mesure avec une bouteille de Delft

# Chapitre 4

## Mesure de la dynamique particulaire

### 4.1 Outils de mesure de la dynamique particulaire

#### 4.1.1 Marquage colorimétrique, magnétique ou radioactif

Le marquage colorimétrique peut être utile pour déterminer des débits seuils de mise en mouvement de particules (Rollet 2008). Il consiste à peindre une parcelle de  $1 \text{ m}^2$  et repérer au DGPS la position de la parcelle, puis de repérer la quantité de sédiments ayant bougé après un événement. Pour une mobilisation partielle d'une parcelle, il est possible d'estimer le diamètre critique de mise en mouvement des particules. Cependant, cette méthode nécessite un traitement granulométrique a posteriori (qui peut tout de même être évité en faisant un traitement d'une photographie de la parcelle ou un comptage de type Wolman) et a un taux de récupération très faible.

De la même manière, le marquage peut se faire à partir d'éléments magnétiques ou radioactifs naturels avec les limites d'utilisation de chacun de ces marqueurs.

### 4.1.2 Transpondeur actif

Des transpondeurs actifs ou radio-émetteurs ont été utilisés pour mesurer la dynamique de saltation des particules (Habersack 2001), et en particulier pour vérifier l'approche probabiliste d'Einstein (1942). Le coût d'une telle expérimentation reste cependant très élevé et ne permet de suivre qu'un nombre très limité de particules sur une courte durée (en lien avec la durée de vie des batteries) avec un besoin de plusieurs récepteurs pour réaliser le positionnement par triangulation. Il existe actuellement de nombreux développements de transpondeurs actifs mais cela reste dans le domaine de la recherche pour un suivi détaillé de la dynamique des particules.

### 4.1.3 Transpondeur passif

Les transpondeurs passifs intégrés ou PIT tags sont des puces RFID (Radio Frequency IDentification) implantées dans des sédiments grossiers (galets, blocs). Ils sont utilisés pour un suivi du transport solide sur le long terme (Fig. 4.1). Une fois le transpondeur implanté, le sédiment est placé dans le cours d'eau ou sur des bancs. Leurs emplacements initiaux sont localisés par DGPS. Après un événement majeur (crue, chasse) ils sont recherchés à l'aide d'une antenne réceptrice. On peut ainsi mesurer la distance parcourue par ces sédiments. Malheureusement, si le cours d'eau est large et a un fort transport solide, il peut être très difficile de retrouver les particules marquées. Le taux de récupération peut être très faible et induit ainsi un fort biais dans la compréhension de la dynamique car on ne sait si les traceurs non retrouvés sont enfouis (la limite de détection de l'antenne est d'environ 30 cm mais peut fortement varier selon la position de l'antenne par rapport au transpondeur) ou ont parcouru de plus longues distances. une limite des transpondeurs passifs reste aussi leur tailles ( $0,4 \times 2,5$  cm) limitant ainsi l'étude aux sédiments grossiers. A noter aussi un problème technique lié à cette technologie, si deux galets marqués sont très proches l'un de l'autre, ils peuvent ne pas être repérables. Il faut compter une bonne journée de terrain pour une recherche de traceurs sur une distance de 1 km pour une rivière de 50 m de large. Les équipes françaises utilisant cette technique sont principalement celle d'H. Piégay (URM5600, Lyon) sur l'Ain et le Vieux-Rhin mais aussi les équipes de B. Camenen (Irstea Lyon) sur l'Arc, F. Liebault (Irstea Grenoble) sur le Bouinenc, ou J.-L. Peiry (UMR 6042, Clermont Ferrand) sur l'Allier (barrage du Poutès).



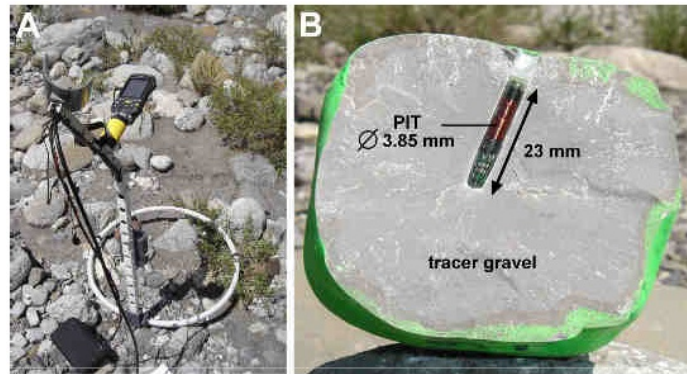


FIGURE 4.1 – Antenne pour transpondeur PIT (a) et principe d’insertion des transpondeurs dans un galet (b) (Photos Liébault).

Il est possible de positionner des antennes en fixe (sur un seuil), permettant ainsi de repérer le passage d’un galet marqué. Dans ce cas, ce n’est plus une distance de parcours mais un temps de parcours qui est estimé par rapport à la position initiale.

Si le coût d’un transpondeur reste peu élevé (quelques euros pièce), il faut généralement rajouter la même somme pour insérer les Pit-tags dans les galets. Le budget pour 500 galets marqués avoisinera donc les 3000 €. De plus, le coût en personnel pour rechercher les traceurs peut vite monter. Il faut en effet souvent compter plusieurs jours de recherche par campagne de mesure à deux techniciens pour un suivi de quelques centaines de traceurs.

## 4.2 Intérêt d’un suivi particulaire

Trois principales stratégies existent pour l’utilisation d’un suivi particulaire :

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

### 4.2.1 Début d'entraînement des particules

Le début d'entraînement des particules peut être obtenu à l'aide d'un marquage colorimétrique ou de transpondeurs passifs. La stratégie est de positionner un certain nombre de particules (ou placettes constituées d'un ensemble de particules) dans le cours d'eau afin d'obtenir une bonne représentativité spatiale des principaux faciès sédimentaires du cours d'eau (chenal principal, chenal secondaire, banc, berge etc.). Il est important de noter que le début d'entraînement des particules est sensible à la taille des sédiments. Idéalement, un minimum de particules par placette (une cinquantaine) représentant la granulométrie de surface semble nécessaire. Cependant, il faut veiller à ce que les particules soient suffisamment éloignées les unes des autres afin d'éviter le masquage des Pit-tags. Liébault et al. (2009) ont ainsi pu mettre en évidence les différentes mobilités des sédiments sur un torrent (Bouinenc, affluent de la Bléone) d'une largeur active d'environ 30 m (Fig. 4.2) suite à quelques crues.

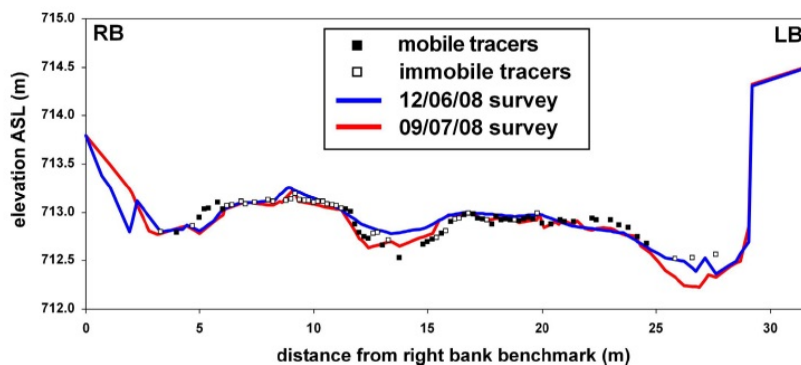


FIGURE 4.2 – Distribution de la mobilité des particules sur le torrent du Bouinenc (Liébault et al. 2009).

### 4.2.2 Suivi de forme sédimentaire

Les traceurs PIT tags peuvent aussi être utilisés pour suivre une forme sédimentaire particulière suite à une injection sédimentaire dans le cadre de projet de redynamisation d'un cours d'eau comme l'Ain (Rollet 2008, Alber 2012) ou le Vieux Rhin (Béraud 2012, Arnaud 2012), ou d'effacement de barrage (cf. Poutès). De la même manière que pour le suivi du début

d'entraînement des particules, la stratégie est de disposer d'un certain nombre de placettes permettant une bonne représentativité de la forme sédimentaire étudiée (tête, queue, flancs etc.) mais aussi du cours d'eau afin d'avoir un état de référence (cf. Fig. 4.3). Le suivi des traceurs permettra par la suite de suivre la dynamique globale de la forme sédimentaire tout en donnant des précisions sur sa déformation et la dynamique plus locale liée à cette forme. Une compréhension du système peut être possible même avec des taux de récupération relativement faibles ( $< 50\%$ ) si des topographies-bathymétries complémentaires et une granulométrie des particules non retrouvées similaire à la granulométrie de départ confortent les résultats des traceurs (cf. Fig. 4.3 sur le Vieux-Rhin où la bathymétrie a montré que les particules n'ont pas été plus loin que le front observé).

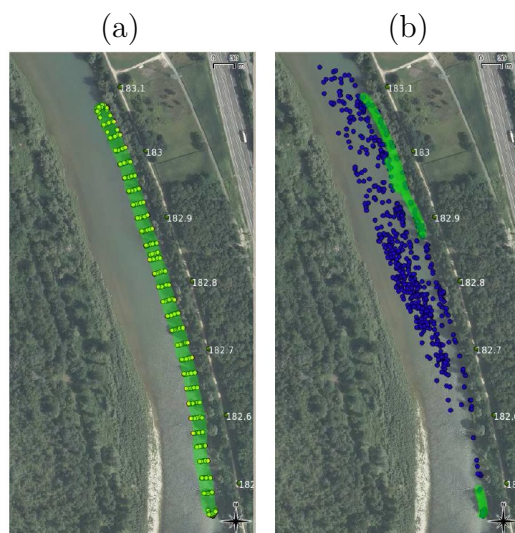


FIGURE 4.3 – Mobilité d’une injection sédimentaire sur le Vieux Rhin (projet Interreg “Redynamisation du Vieux-Rhin”) avant (a) et après (b) la crue de décembre 2010 (position des Pit-tags en jaune/bleu et surface émergée du banc artificiel en vert).

### 4.2.3 Etude de la nature stochastique du charriage

Pour le cas d’un système avec une hydrodynamique à peu près homogène, il est possible d’étudier plus précisément la dynamique des particules

avec en particulier la nature stochastique du charriage, i.e. un ensemble de particules identiques soumises aux mêmes contraintes hydrauliques ne se déplacera pas de façon uniforme. Un minimum de particules par placette (une cinquantaine) représentant la granulométrie de surface est indispensable afin de mieux représenter la sensibilité à la taille des particules. Ainsi Camenen et al. (2010) sur l’Arc en Maurienne et Liébault et al. (2012) sur le torrent du Bouinenc ont étudié la dynamique du charriage sur ces systèmes spécifiques à l’aide de transpondeurs PIT tags (Fig. 4.4). La limite de telles études est qu’elles nécessitent un taux de récupération important (idéalement  $>80\%$ ) pour pouvoir réellement conclure quant à cet aspect du charriage (Rollet et al. 2008, Camenen et al. 2010).

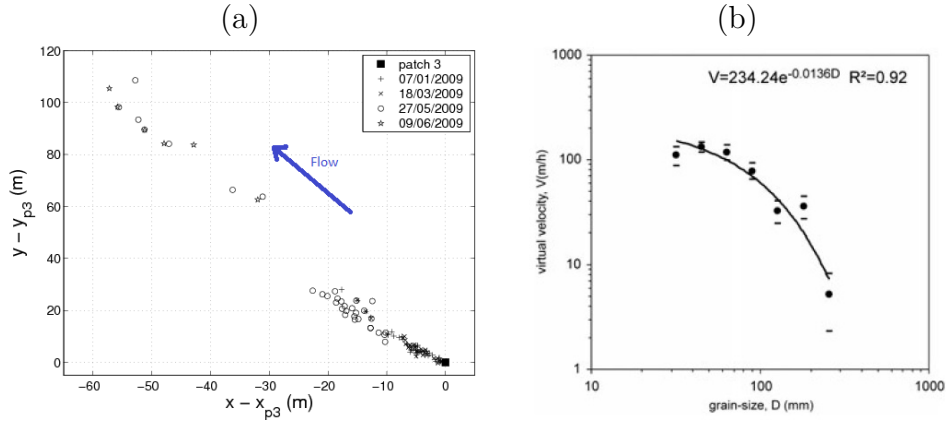


FIGURE 4.4 – Distance de parcours des traceurs sur un chenal secondaire de l’Arc par rapport à leur position d’origine  $(x_{p3}, y_{p3})$  (Camenen et al. 2010) (a) et vitesses virtuelles des particules sur le Bouinenc en fonction de la taille (Liébault et al. 2012) (b).

Comme le transport par charriage n’est pas une fonction linéaire des conditions hydrodynamiques, Camenen et al. (2010) ont proposé de calculer la distance de parcours moyenne  $D_{tm}$  comme une moyenne logarithmique :

$$D_{tm} = \exp \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln (d_{t,i}) \right] \quad (4.1)$$

où  $n$  est le nombre de traceurs retrouvés et  $d_{t,i}$  la distance parcourue par chacun de ces traceurs. Parallèlement, en supposant l’épaisseur de charriage égale à la hauteur de rugosité ( $\delta_s = k_s \approx 2d_{90}$ ) (Van Rijn 1993, Camenen

et al. 2006), il est possible d'estimer ces distances de parcours à partir d'une modélisation numérique de l'événement :

$$D_{t,num} = \int_0^T \frac{q_s(t)}{2d_{90}} dt \quad (4.2)$$

où  $T$  est la durée de l'événement et  $q_s(t)$  le transport par charriage instantané (en  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ) estimé à l'aide de formule semi-empirique et les résultats du modèle numérique. La contrainte critique de mise en mouvement des particules  $\tau_{cr}$  apparaît comme le paramètre critique sur la dispersion des distances de parcours dans le cas d'une granulométrie étendue où cette valeur peut varier très largement selon la position de la particule (effet de masquage ou sur-exposition). Liébault et al. (2012) ont aussi pu montrer que le diamètre des particules  $d$  et donc  $\tau_{cr}$  influence aussi les distances parcourues (cf. Fig. 4.4b). Ceci n'a cependant pas été observé sur l'Arc (Camenen et al. 2010).

# Chapitre 5

## Mesure de la respiration d'un cours d'eau

Il faut bien distinguer flux et évolution des fonds. Un système peut être à l'équilibre (sans modification des fonds) tout en étant parcourus par des flux sédimentaires importants. On parle de respiration d'un cours d'eau lorsque des modifications sont observées autour d'un équilibre global. Cette définition est donc fonction de l'échelle spatiale (forme sédimentaire, tronçon, etc.) et temporelle (crue, année, etc.). Les méthodes présentées dans ce paragraphe sont plus classiquement utilisées en géomorphologie (Malavoi et al. 2011). Elles permettent une vision plus globale et intégrée de la dynamique d'un cours d'eau.

### 5.1 Outils de mesure de la respiration d'un cours d'eau

#### 5.1.1 Mesures topographiques/bathymétriques

Certains auteurs (Ham & Church 2000, Fuller et al. 2003) ont tenté d'estimer la dynamique de cours d'eau à partir de mesures topographiques et bathymétriques. S'il est possible en effet de repérer les zones d'érosion et de dépôt à partir de la différence de deux modèles numériques de terrain (MNT), l'interprétation de ce résultat en terme de dynamique sédimentaire reste très difficile. Une différence de MNT intègre en effet beaucoup de choses entre les deux dates de mesure in situ. Dans beaucoup de cas, et en particulier pour

les rivières de montagne, on peut cependant supposer que les évolutions sont dues uniquement aux crues ayant eu lieu dans la période d'étude. Pour un point donné  $(x,y)$ , la variation de hauteur  $\Delta z$  correspond à ce qui s'est déposé moins ce qui s'est érodé mais exclut la quantité de sédiments (et donc le flux) qui s'est déplacé au dessus de ce point.

Quoi qu'il en soit, cette méthode nécessite une très bonne qualité de MNT qui peut être obtenue soit par des mesures de type LiDAR (Lallias-Tacon et al. 2012), stéréo-photogrammétrie, scanner 3D, ou sonar multi-faisceaux soit à partir de mesures topographiques plus classiques (tachéomètre, DGPS) avec une méthodologie adaptée limitant les incertitudes (Jaballah et al. 2011). Les appareils topographiques impliquent généralement un investissement de plusieurs dizaines de milliers d'euros. Concernant les campagnes Lidar, il faut encore aujourd'hui compter sur un coût proche de 1000€par kilomètre.

Des mesures ponctuelles en continue peuvent aussi être réalisées en utilisant des capteurs à ultrason (type Altus). Ces appareils sont utilisés en côtier et permettent de mesurer finement les taux d'érosion et de dépôt. Très intrusifs, ils sont difficile à mettre en place dans des écoulements très turbulents.

Il est aussi possible d'avoir une vision qualitative de la respiration d'une rivière par l'intermédiaire de prises de photographie régulières d'un ou plusieurs points de vue (permettant ainsi une estimation du volume à l'aide de la stéréo-photogrammétrie).

### 5.1.2 Chaînes d'érosion

Le principe des chaînes d'érosion est relativement simple et permet d'estimer localement l'érosion maximum ainsi que le dépôt suite à une crue (Laronne et al. 1994). Cette méthode se base sur le fait que la montée de crue tend à éroder l'ensemble du fond d'un cours d'eau (lié à l'augmentation des contraintes au fond) alors qu'un dépôt plus ou moins général s'observe sur la descente de crue (diminution des contraintes au fond). La méthode consiste donc à (cf. Fig. 5.1) :

- faire pénétrer dans le plancher alluvial une chaîne de longueur  $L = na$  (avec  $n$  le nombre de maillons et  $a$  la taille d'un maillon à prendre plus ou moins fin selon la taille des sédiments en place) suffisamment grande pour éviter tout arrachement. D'un point de vue pratique, selon le matériau en place, l'utilisation d'un marteau piqueur peut être utile...
- mesurer la longueur libre  $L_1$  ;
- repérer la position de la chaîne en  $x,y,z$  (par exemple au moyen d'un

GPS différentiel, les tentatives de recherche au détecteur de métaux se sont avérées très délicates) ;

- relever la chaîne après un événement de crue et mesurer la profondeur d'enfouissement de la chaîne ( $L_{2d}$ ) ainsi que sa longueur horizontale ( $L_{2e}$ ) ;
- calculer les hauteurs d'érosion et de dépôt :

$$\Delta z_{erosion} = L_1 - L_{2e} \quad (5.1)$$

$$\Delta z_{depot} = L_{2d} \quad (5.2)$$

La méthodologie de la chaîne d'érosion nécessite des mesures avant et après événement, ce qui n'est malheureusement pas toujours possible sur certains cours d'eau (Rollet 2008). De plus, l'unique information donnée par cette mesure est l'érosion maximale suite à un événement et le dépôt qui a suivi. Elle ne permet donc pas de suivre une crue avec plusieurs pics de débit, ce qui est pourtant courant en nature. Elle apporte cependant des informations très intéressantes quant au suivi de la propagation des dunes sableuses (Malavoi 2003).

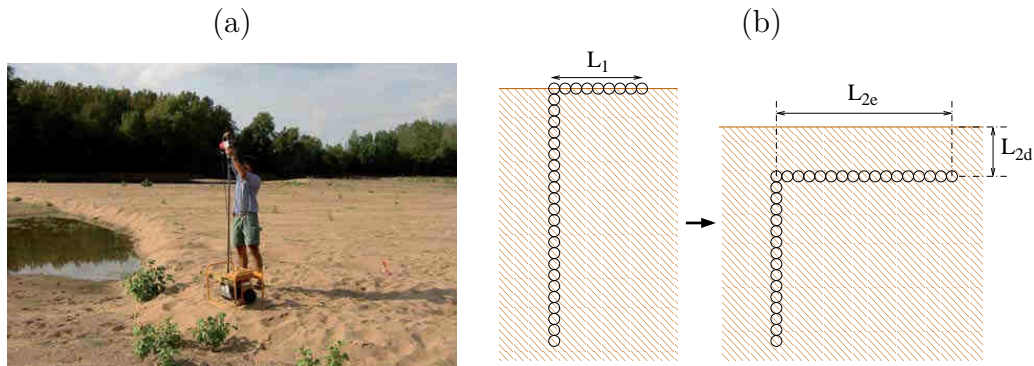


FIGURE 5.1 – Principe des chaînes d'érosion : (a) Mise en place (Photo Malavoi) (b) Mesures à réaliser avant et après crue.

Le coût de cette mesure est principalement lié au coût humain pour mettre en place les campagnes de mesure.



## 5.2 Intérêt des mesures de la respiration d'un cours d'eau

### 5.2.1 Bilans sédimentaires

L'utilisation de mesures topographiques et/ou bathymétriques permet donc principalement de faire des bilans sédimentaires, soit de repérer les zones stables, en accrétion ou en érosion, et d'en estimer les volumes sur des périodes données correspondant à un ou plusieurs événements morphogènes. L'utilisation des chaînes d'érosion permettent de plus d'estimer l'érosion maximum au cours d'une crue en un point donné. Une telle mesure est fondamentale pour le dimensionnement de pile de pont ou la compréhension d'un potentiel détarage d'une station hydrométrique.

Il est aussi possible d'évaluer à partir de différence de MNT la dynamique du charriage par l'observation de migration de formes de fond transverses à l'écoulement principal, que ce soit des dunes (cf. "dune tracking", paragraphe 2.1.5) ou des fosses ou chenaux.

Les mesures réalisées par l'équipe de F. Liébault (Irstea Grenoble) sur le torrent du Moulin (chaînes d'érosion) ont permis de mieux appréhender les réponses du torrent aux fluctuations des apports du bassin versant (cf. Fig. 5.2). L'intensité des mesures sur ce site a ainsi permis de repérer trois échelles sur la dynamique de stockage :

- à long terme, un stockage croissant ;
- à moyen terme, l'impact des crues sur les fluctuations de ce stockage ;
- à court terme, la respiration de ce stockage au cours des crues estimée à l'aide des chaînes d'érosion.

L'utilisation de la technique des chaînes d'érosion est très pertinente quand on l'associe à une topographie/bathymétrie fréquente (événementielle) et surtout à l'analyse stratigraphique des dépôts (Rodrigues et al. 2012). Ces trois outils rassemblés permettent de reconstruire la dynamique des sédiments en crue de façon assez précise et de mieux comprendre la mise en place de macroformes comme les barres sableuses (modalités, célérité).

### 5.2.2 Flux globaux

Les pièges à sédiments permettent une mesure globale et intégrée des flux charriés. Ils permettent ainsi d'estimer des flux événementiels ou des flux

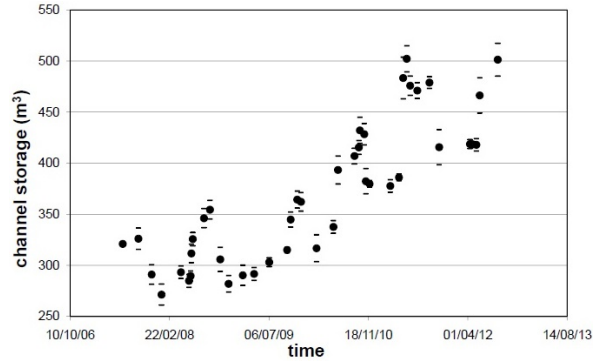


FIGURE 5.2 – Dynamique du stockage de sédiments sur le torrent du Moulin (site de Draix) (Liébault et al. 2013).

moyens annuels :

$$Q_s = \frac{(1-p)V}{T} \quad (5.3)$$

avec  $p$  la porosité des sédiments ( $p \approx 0,3$  dans le cas d'une granulométrie étendue),  $V$  le volume de sédiments récupéré dans la fosse sur la période de temps  $T$ .

L'étude de la morphologie du lit peut aussi donner des indices quant à certaines dynamiques. En particulier, pour les systèmes de seuils-mouilles, Church & Hassan (1992) ont montré que sous certaines conditions (événement hydrologique moyen), les particules se déplacent d'une zone d'érosion à la zone de dépôt la plus proche, soit d'un seuil à la mouille ou le banc de galets qui suit. Cependant, une telle étude demande une bonne expertise et reste approximative. Malavoi et al. (2011, p.24) donnent quelques indications de distance de propagation de la charge de fond pour quelques exemples de cours d'eau.

Une quantification de la charge de fond intégrée sur une période de mesure peut aussi être envisagée en combinant des mesures de chaîne d'érosion (indication de l'épaisseur déplacée), des mesures topographiques (indication des surfaces mobilisée) et l'utilisation de traceurs (indication de la distance de parcours des sédiments) (Laronne et al. 1994, Liébault & Laronne 2008) :

$$Q_{sb} \approx \frac{|\Delta z_{depot}| + |\Delta z_{erosion}|}{2} \times A \times L \quad (5.4)$$

avec  $A$  la surface solide mobilisée et  $L$  la distance moyenne parcourue par les particules.

# Chapitre 6

## Conclusion

Si l'on veut pouvoir répondre aujourd'hui à la circulaire du 18 janvier 2013 relative à l'application des classements de cours d'eau en vue de leur préservation ou de la restauration de la continuité écologique (Article L.214-17 du code de l'environnement), il semble fondamental de pouvoir quantifier le transport sédimentaire dans les cours d'eau de France, ne serait-ce pour établir une définition du "transfert suffisant des sédiments".

Actuellement, les estimations se font souvent très grossièrement à la limite du qualitatif (à dire d'expert) en appliquant des lois de transport solide à partir d'hypothèses très fortes (pente d'écoulement constante quel que soit le débit et égale à la pente du fond, application de la formule de Manning-Strickler sur une section simplifiée du cours d'eau pour établir une relation  $H(Q)$ , où  $H$  est la hauteur d'eau moyenne dans le cours d'eau) et en absence de données pour valider les résultats (données de transport solide mais aussi de taille des sédiments en place et des sédiments transportés). Ceci implique des incertitudes de plusieurs ordres de grandeurs sur les estimations du transport solide. A cela se rajoute les incertitudes liées aux apports solides, à la variabilité de la granulométrie sur un cours d'eau et au potentiel armurage, voire pavage de la couche de fond modifiant la contrainte critique de mise en mouvement des sédiments (cf. paragraphe 3.2). Si l'armurage est à peu près connu (Chin et al. 1994), le pavage est un phénomène complexe de stabilisation et accroissement de la granulométrie à long terme de la couche de surface du lit suite à une incision de ce dernier du fait d'une quasi-absence d'apport sédimentaire mais aussi d'une relative réduction de la puissance de l'écoulement (Bray & Church 1980, Malavoi et al. 2011). Dans le cas d'un phénomène de pavage, la contrainte critique de mise en mouvement des sédiments peut

être telle que seule une crue décennale peut induire une dynamique sédimentaire. Si l'on omet les cas exceptionnels d'une couche pavée colmatée (voire cimentée), seules des mesures in-situ du transport solide peuvent permettre de confirmer la présence d'un pavage plutôt qu'un simple armurage, et donc de mieux estimer la contrainte critique de mise en mouvement des sédiments sur le tronçon étudié. Si l'utilisation d'un modèle semble indispensable pour quantifier le transport sédimentaire dans un cours d'eau, il est cependant nécessaire de réaliser un minimum de mesures afin de valider le modèle proposé (cf. paragraphe 3.4). Un modèle pour l'estimation du charriage et de la suspension graduée est proposé dans cette note. S'il existe des variantes ne serait-ce pour la calcul des contraintes au fond ou le choix des formules de transport, la démarche à adopter pour le calcul et la validation doit rester similaire. La description granulométrique des sédiments charriés (et donc de la couche de surface) est aussi importante. Recking (2010) a montré l'importance des grossiers dans l'estimation du transport solide et a ainsi proposé une formulation du charriage principalement fonction du  $d_{84}$ .

Différentes méthodes de mesures in-situ de la charge de fond et plus généralement de la dynamique d'une rivière ont été présentées dans cette note. Les Tableaux 6.1 et 6.2 font un récapitulatif des différentes mesures possibles de la charges de fond, de leur applicabilité pour différents types de rivière, leurs intérêts et limites, ainsi qu'un ordre de grandeur de la facilité de mise en oeuvre et traitement de la donnée et du coût de la mise en place de la mesure. L'objectif est ici d'aider à faire un choix de méthode(s) de mesure de la charge de fond en fonction du cours d'eau, des objectifs, et du budget à disposition. En terme de vision spatiale, on peut distinguer les mesures locales voire ponctuelles pour la suspension, les mesures moyennées (sur une section, une verticale, une ligne de courant), et les mesures permettant une vision spatialisée (ADCP). En terme de vision temporelle, on peut distinguer les mesures instantanées, les mesures moyennées sur des périodes plus ou moins longues, et les méthodes permettant d'établir des chroniques de mesure (relativement courte dans le cas de la trappe à sédiment, sur l'échelle d'une crue selon la capacité de la trappe).

Dans le tableau 6.2, nous considérons trois grands types de rivière, qui se distinguent par leur accès expérimental :

- les torrents et rivières de montagnes accessibles à gué hors événement de crue ;
- les rivières alpines et de piedmont, généralement difficilement accessibles à gué et non-navigables

TABLE 6.1 – Récapitulatif des différentes méthodes de mesure de la charge de fond et leurs intérêts (Éch. : échantillon, instant. : instantané).

| 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  | punctuel          | instantané           | concentration |
| Bouteille de Delft                       | sable        | oui  | punctuel          | moyenne/mn           | flux          |
| Préleveur iso-cinétique punctuel         | limon, sable | oui  | punctuel          | moyenne/mn           | flux          |
| Préleveur iso-cinétique intégrateur      | limon, sable | oui  | verticale         | moyenne/mn           | flux          |
| Rétro-diffusion ADCP                     | sable        | non  | section, punctuel | instantané           | flux          |
| Echantillonneurs optiques et acoustiques | limon, sable | non  | punctuel          | instant              | flux          |
| Marquage colorimétrique                  | sable, galet | oui  | local             | moyenne/événement    | $\tau_{cr}$   |
| Tranpondeurs actifs                      | galet        | –    | local             | instant.             | déplacement   |
| Tranpondeurs passifs                     | galet        | –    | local             | moyenne/événement    | déplacement   |
| Mesures topographiques                   | –            | non  | trouçon           | moyenne/événement.   | évolution     |
| Chaînes d'érosion                        | sable, galet | non  | local             | moyenne/événement    | respiration   |

- les rivières de plaine et fleuves, a priori navigables

Les estimations des coûts des matériels données dans ce document restent approximatives du fait de la forte variabilité liée aux différentes marques et travaux de génie civil induit. Pour le matériel américain, l'entreprise Ricky donne un listing exhaustif des coûts du matériel ([http://www.rickly.com/ss/sediment\\_sampling.htm](http://www.rickly.com/ss/sediment_sampling.htm)). Il faut cependant bien avoir en tête que le coût humain peut aussi monter très vite en particulier pour les campagnes topographiques, de prélèvements, ou de suivi de traceurs.

Quelle que soit la méthode, la mesure de la charge de fond in situ demeure difficile, souvent coûteuse en temps et en argent. Même si certaines techniques émergentes comme le traitement ADCP ou les LISST sont prometteuses, elles nécessitent un calage avec des mesures plus classiques par prélèvement ainsi que des développements méthodologiques. Il faut cependant relativiser ces coûts par rapport aux coûts des restaurations de digues, reprofilages de rivières, essartements de bancs végétalisés, dragages etc. Une meilleure compréhension de la dynamique sédimentaire d'un cours d'eau doit permettre au final d'améliorer voire d'optimiser économiquement sa gestion.

La mise en place de programmes de mesure semble donc importante car elle permettrait le passage d'une vision qualitative à une vision quantitative de la dynamique sédimentaire. De plus, la création d'une base de données sur les mesures de charge de fond pourra alimenter les études locales et la démocratisation de ce type de mesures permettra ainsi une relative baisse des coûts.

## Remerciements

L'équipe métrologie d'Irstea (Marie Courtel, Guillaume Dramais, Mickaël Lagouy, Chloé Le Bescond et Fabien Thollet) ont grandement aidé pour la mise en place et le traitement des mesures hydro-sédimentaires. Je tiens aussi à remercier tous les collaborateurs ayant participé à la rédaction de cette note.

TABLE 6.2 – Récapitulatif des différentes méthodes de mesure de la charge de fond et leur applicabilité (Fac. Oeuvre : facilité de mise en oeuvre, Fac. Trait. : facilité de traitement (besoin de compétences techniques), Coût Inst. : coût des instruments et de l'installation, Coût Mes. : coût en personnel des campagnes de mesures).

| 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 Ehrenberger                    | --                  | +              | ++                | +           | ++          | +/-        | +         |
| 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                        | ++                  | +/-            | +/-               | +/-         | +           | -          | ++        |

# Bibliographie

- Alber, A. (2012), L'espace de mobilité des cours d'eau à l'épreuve de la pratique : proposition de développements méthodologiques à l'interface de la géomorphologie fluviale et de l'ingénierie hydraulique., PhD thesis, Université Lumière Lyon 2.
- Arnaud, F. (2012), Approches géomorphologiques historique et expérimentale pour la restauration de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial aménagé : le cas du Vieux Rhin entre Kembs et Breisach (France, Allemagne), PhD thesis, Université Lumière Lyon 2. 280p.
- Bakke, P. D., Basdekas, P. O., Dawdy, D. R. & Klingeman, P. C. (1999), 'Calibrated parker/klingeman model for gravel transport', *J. Hydraulic Eng.* **125**, 657–660.
- Barry, J. J., Buffington, J. M., Goodwin, P., King, J. G. & Emmett, W. W. (2008), 'Performance of bedload transport equations relative to geomorphic significance : predicting discharge and its transport rate', *J. Hydraulic Eng.* **134**, 601–615.
- Bathurst, J. C. (2007), 'Effect of coarse surface layer on bed-load transport', *J. Hydraulic Eng.* **133**, 1192–1205.
- Béraud, C. (2012), Modélisation numérique des impacts de recharges sédimentaires en rivière aménagée. Cas du Vieux-Rhin entre Kembs et Breisach, PhD thesis, Université Claude Bernard, Lyon 1. 280p.
- Bray, D. I. & Church, M. (1980), 'Armored versus paved gravel beds', *J. Hydraulic Division* **106**, 1937–1940.



- Bunte, K. & Apt, S. R. (2005), 'Effect of sampling time on measured gravel bed load transport rates in a coarse-bedded stream', *Water Resources Res.* **41**(W11405), 1–12.
- Camenen, B., Bayram, A. & Larson, M. (2006), 'Equivalent roughness height for plane bed under steady flow', *J. Hydraulic Eng.* **132**(11), 1146–1158.
- Camenen, B., Holubová, K., Lukač, M., Le Coz, J. & Paquier, A. (2011), 'Assessment of methods used in 1d models for computing bedload transport in a large river : the danube river in slovakia', *J. Hydraulic Eng.* **sous presse**.
- Camenen, B., Jaballah, M., Geay, T., Belleudy, P., Laronne, J. B. & Laskowski, J. P. (2012), Tentative measurements of bedload transport in an energetic alpine gravel bed river, *in* R. E. Murillo Muñoz, ed., 'River Flow, Proc. 6th Int. Conf. on Fluvial Hydraulics', Sept. 2012, San Jose, Costa Rica, pp. 379–386.
- Camenen, B. & Larson, M. (2005), 'A bedload sediment transport formula for the nearshore', *Estuarine, Coastal & Shelf Science* **63**, 249–260.
- Camenen, B. & Larson, M. (2008), 'A general formula for noncohesive suspended sediment transport', *J. Coastal Res.* **24**(3), 615–627.
- Camenen, B., Le Coz, J., Dramais, G., Peteuil, C., Fretaud, T., Falgon, A., Dussouillez, P. & Moore, S. A. (2014), A simple physically-based model for predicting sand transport dynamics in the Lower Mekong River, *in* 'River Flow, Proc. 6th Int. Conf. on Fluvial Hydraulics', Lausanne, Suisse.
- Camenen, B., Le Coz, J., Paquier, A. & Lagouy, M. (2010), An estimation of gravel mobility over an alpine river gravel bar (Arc en Maurienne, France) using PIT-tag tracers, *in* A. Dittrich, K. Koll, J. Aberle & P. Geisenhainer, eds, 'River Flow, Proc. 5th Int. Conf. on Fluvial Hydraulics', Sept. 2010, Braunschweig, Allemagne, pp. 953–960.
- Childers, D. (1999), Field comparisons of six pressure-difference bedload samplers in high-energy flow., Technical Report 92-4068, U. S. Geological Survey, Water-Resources Investigations.
- Chin, C. O., Melville, B. W. & Raudkivi, A. J. (1994), 'Streambed armouring', *J. Hydraulic Eng.* **120**, 899–918.

- Church, M. & Hassan, M. A. (1992), ‘Size and distance of travel of unconstrained clasts on a streambed’, *Water Resources Res.* **28**, 299–303.
- Claude, N., Rodrigues, S., Bustillo, V., Br  h  ret, J.-G., Macaire, J.-J. & Jugé, P. (2012), ‘Estimating bedload transport in a large sand-gravel bed river from direct sampling, dune tracking and empirical formulas’, *Geomorphology* **179**, 40–57.
- Cudden, J. R. & Hoey, T. B. (2003), ‘The causes of bedload pulses in a gravel channel : the implications of bedload grain-size distributions’, *Earth Surface Proc. & Landforms* **28**, 1411–1428.
- de Vries, M. (1973), On measuring discharge and sediment transport in river flow., Technical Report 106, Delft Hydraulics Lab., The Netherlands.
- Dijkman, J. (1981), Investigation of characteristic parameters of delft bottle, Technical Report S362, Delft Hydraulics Lab., The Netherlands.
- Dijkman, J. & Milisic, V. (1982), Investigations on suspended sediment samplers, Technical Report S410, Delft Hydraulics Laboratory and Jaroslav Cerni Institute, The Netherlands.
- Dramais, G., Le Coz, J., Hauet, A. & Camenen, B. (2011), ‘Advantages of a mobile LSPIV method for measuring flood discharges and improving stage-discharge curves.’, *J. Hydro-environment Research* **5**(4), 301–312.
- Dramais, G., Dussouillez, P., Moore, S., Le Coz, J. & Camenen, B. (2013), Study of the sediment fluxes of the lower mekong river (2012 september 25 to october 6th field mission), Technical report, World Wildlife Fund (WWF) / Mekong River Commission (MRC). 73p.
- Ehrenberger, R. (1931), ‘Direct bedload measurements on the Danube at Vienna, and their results to date [Direkte geschiebemessungen an der Donau bei Wien und deren bisherige ergebnisse]’, *Die Wasserwirtschaft* **34**, 1–19. (In German).
- Eijkelkamp (2003), Bedload transport meter type arnhem : Operating instructions, Technical Report 4.32, Eijkelkamp, Giesbeek, Netherlands.
- Einstein, H. A. (1942), ‘Formulas for bed-load transportation’, *Trans. American Soc. Civil Eng.* **107**, 575–577.

- Emmett, W. W. (1980), A field calibration of the sediment trapping characteristics of the helley-smith bed load sampler, Professional Paper 1139, U. S. Geological Survey, Washington, USA.
- Fuller, I. C., Large, A. R. G., Charlton, M. E., Heritage, L. & Milan, D. J. (2003), 'Reach-scale sediment transfers : an evaluation of two morphological budgeting approaches', *Earth Surface Proc. & Landforms* **28**, 889–903.
- Gautier, J.-N. & Peters, J.-J. (2005), Bedload transport surveys to improve morphological understandings, in '3rd International Symposium on Flood Defence', Nijmegen, The Netherlands, pp. 1–7.
- Gautier, J.-N., Rodrigues, S., Peters, J.-J., Peeters, P. & Jugé, P. (2008), 'Transport solide en loire moyenne lors des crues justification des mesures in situ et quantification', *La Houille Blanche* **5**, 71–78.
- Geay, T. (2013), Mesure acoustique passive du transport par charriage dans les rivières, PhD thesis, Ecole doctorale Terre, Univers, Environnement, Université de Grenoble. 163 p.
- Gomez, B., Naff, R. L. & Hubbell, D. W. (1989), 'Temporal variations in bedload transport rates associated with the migration of bedforms', *Earth Surface Proc. & Landforms* **14**, 135–156.
- Habersack, H. M. (2001), 'Radio-tracking gravel particles in a large braided river in new zealand : a field test of the stochastic theory of bed load transport proposed by einstein', *Hydrological Processes* **15**, 377–391.
- Habersack, H. M., Nachtnebel, H. P. & Laronne, J. B. (2001), 'The continuous measurement of bedload discharge in a large alpine gravel bed river', *J. Hydraulic Res.* **39**(2), 125–133.
- Ham, D. G. & Church, M. (2000), 'Bed-material transport estimated from channel morphodynamics : Chilliwack River, British Columbia', *Earth Surface Proc. & Landforms* **25**, 1123–1142.
- Helley, E. J. & Smith, W. (1971), Development and calibration of a pressure-difference bed load sampler, Technical report, U. S. Geological Survey. 18 pp.

- Hoey, T. (1992), ‘Temporal variations in bedload transport rates and sediment storage in gravel-bed rivers.’, *Progress in Phys. Geography* **16**, 319–338.
- Holubová, K., Capeková, Z. & Szolgay, J. (2004), Impact of hydropower schemes at bedload regime and channel morphology of the Danube River, *in* M. Greco, A. Carravetta & R. Della Morte, eds, ‘River Flow, Proc. 2nd Int. Conf. on Fluvial Hydraulics’, June 2004, Napoli, Italy, pp. 135–141.
- Hubbell, D. W., Stevens, H. H., Skinner, J. V. & Beverage, J. P. (1985), ‘New approach to calibrating bed load samplers’, *J. Hydraulic Eng.* **111**(4), 677–694.
- Humphries, R., Venditti, J. G., Sklar, L. S. & Wooster, J. K. (2012), ‘Experimental evidence for the effect of hydrographs on sediment pulse dynamics in gravel-bedded rivers’, *Water Resources Res.* **48**(W01533), 1–5.
- ISO 4363 (2002), Measurement of liquid flow in open channels - methods for measurement of characteristics of suspended sediment, Technical report, International Organization for Standardization.
- ISO/DTR 9212 (2006), Hydrometry - methods of measurement of bedload discharge, Technical report, International Organization for Standardization.
- ISO/TS 3716 (2006), Hydrometry - functional requirements and characteristics of suspended-sediment samplers, Technical report, International Organization for Standardization.
- Jaballah, M., Camenen, B., Paquier, A. & Jodeau, M. (2011), Field investigations on bar morphodynamics in an engineered alpine gravel-bed river : Arc en Maurienne, France, *in* ‘7th IAHR symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics’, Beijing, Chine, pp. 1–12. CD Rom.
- Jodeau, M., Hauet, A., Paquier, A., Le Coz, J. & Dramais, G. (2008), ‘Application and evaluation of ls-piv technique for the monitoring of river surface velocities in high flow conditions.’, *Flow Measurement & Instrumentation* **19**, 117–127.
- Lallias-Tacon, S., Liébault, F. & Piégay, H. (2012), Braided channel morphological changes derived from a combined analysis of multirate airborne

- lidar and archive aerial photographs, *in* R. E. Murillo Muñoz, ed., ‘River Flow, Proc. 6th Int. Conf. on Fluvial Hydraulics’, Sept. 2012, San Jose, Costa Rica, pp. 715–719.
- Lane, E. W. (1955), The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering, *in* ‘Proceedings American Society of Civil Engineers’, number 81-745.
- Laronne, J. B., Outhet, D. N., Carlin, P. A. & McCabe, T. J. (1994), ‘Scour chain employment in gravel bed rivers’, *Catena* **22**, 299–306.
- Liébault, F., Bellot, H., Chapuis, M., Klotz, S. & Deschâtres, M. (2012), ‘Bedload tracing in a high-sediment-load mountain stream’, *Earth Surface Proc. & Landforms* **37**, 385–399.
- Liébault, F., Chapuis, M., Bellot, H. & Deschatres, M. (2009), A radio-frequency tracing experiment of bedload transport in a small braided mountain stream, *in* ‘European Geosciences Union General Assembly’, Vienna, Austria.
- Liébault, F. & Laronne, J. B. (2008), ‘Evaluation of bedload yield in gravel-bed rivers using scour chains and painted tracers : the case of the esconavette torrent (southern french prealps)’, *Geodinamica Acta* **21**(1-2), 23–24.
- Liébault, F., Laronne, J. B., Klotz, S., Jantzi, H., Ravanat, X. & Favario, J. (2013), Bedload transport monitoring in a small upland catchment, *in* ‘8th IAG International Conference on Geomorphology’, Paris,.
- Malavoi, J.-R. (2003), Compte rendu du suivi de chaînes d’érosion sur le site d’ingrandes, Technical report, Agence de l’Eau Loire Bretagne.
- Malavoi, J.-R., Garnier, C. C., Landon, N., Recking, A. & Baran, P. (2011), Eléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière, Collection “comprendre pour agir”, Onema. 219 p.
- Marnézy, A. (1999), L’Arc et sa vallée, Anthropisation et géodynamique d’une rivière alpine dans son bassin versant, PhD thesis, Université Joseph Fourier, Grenoble I, France. 682 p.
- Meyer-Peter, E. & Müller, R. (1948), Formulas for bed-load transport, *in* ‘Rep. 2nd Meet. Int. Assoc. Hydraul. Struc. Res.’, Stockholm, Sweden, pp. 39–64.

- Migniot, C. (1982), Etude de la dynamique sédimentaire marine, fluviale et estuarienne, PhD thesis, Université de Paris - Sud. Thèse d'Etat Es - Sciences Naturelles.
- Mizuyama, T., Oda, A., Laronne, J. B., Nonaka, M. & Matsuoka, M. (2010), Laboratory tests of a Japanese pipe hydrophone for continuous monitoring of coarse bedload, *in* J. R. Gray, J. B. Laronne & J. D. G. Marr, eds, 'Bedload surrogate Monitoring Technologies', number 2010-5091 *in* 'USGS Scientific Investigations', U. S. Geological Survey, Reston, VA., pp. 319–335.
- Moore, S. A. (2011), Monitoring flow and fluxes of suspended sediment in rivers using side-looking acoustic Doppler current profilers, PhD thesis, Ecole doctorale Terre, Univers, Environnement, Université de Grenoble. 188p.
- Moore, S. A., Le Coz, J., Hurther., D. & Paquier, A. (2013), 'Using multi-frequency acoustic attenuation to monitor grain size and concentration of suspended sediment in rivers', *J. Acoustical Society of America* **133**, (accepted for publication).
- Mosley, M. P. & Tindale, D. S. (1985), 'Sediment variability and bed material sampling in gravel-bed rivers', *Earth Surface Proc. & Landforms* **10**, 465–482.
- Peters, J.-J. (2002), Appui ponctuel à la restauration de la ligne d'eau en Basse Loire par expertise des mesures bathymétriques réalisées au printemps 2001 et adaptation du protocole du suivi à la Fresne sur Loire / Ingrandes, Technical report, Agence de l'eau Loire Bretagne.
- Peteuil, C., Liébault, F. & Marco, O. (2012), ECSTReM : une approche pratique pour prédire la production sédimentaire des torrents des Alpes françaises, *in* 'Proc. 12th Congress Interpreavent', Grenoble, France.
- Pitlick, J. (1988), 'Variability of bed load measurement', *Water Resources Res.* **24**(1), 173–177.
- Pitlick, J., Cui, Y. & Wilcock, P. (2009), Manual for computing bed load transport using BAGS (Bedload Assessment for Gravel-bed Streams) software, Technical Report RMRS-GTR-223, United States Department of Agriculture.

- Recking, A. (2009), ‘Theoretical development on the effects of changing flow hydraulics on incipient bedload motion’, *Water Resources Res.* **45**, 1–16.
- Recking, A. (2010), ‘A comparison between flume and field bedload transport data and consequences for surface based bedload transport prediction’, *Water Resources Res.* **46**(W03518), 1–16.
- Recking, A., Frey, P., Paquier, A. & Belleudy, P. (2009), ‘An experimental investigation of mechanisms involved in bedload sheet production and migration’, *J. Geophysical Res.* **114**(9).
- Recking, A., Frey, P., Paquier, A., Belleudy, P. & Champagne, J. Y. (2008), ‘Bedload transport flume experiments on steep slopes’, *J. Hydraulic Eng.* **134**(9), 1302–1310.
- Recking, A., Liébault, F., Peteuil, C. & Jolimet, T. (2012), ‘Testing bedload transport equations with consideration of time scales’, *Earth Surface Proc. & Landforms* **37**, 774–789.
- Reid, I., Laronne, J. B. & Powell, D. M. (1995), ‘The nahal yatir bedload database : sediment dynamics in a gravel-bed ephemeral stream’, *Earth Surface Proc. & Landforms* **20**(3), 845–857.
- Reid, I., Layman, J. T. & Frostick, L. E. (1980), ‘The continuous measurement of bedload discharge’, *J. Hydraulic Res.* **18**(3), 243–249.
- Rennie, C. D. & Millar, R. G. (2004), ‘Measurement of the spatial distribution of fluvial bedload transport velocity in both sand and gravel’, *Earth Surface Proc. & Landforms* **29**(4), 1173–1193.
- Rennie, C. D., Millar, R. G. & Church, M. A. (2002), ‘Measurement of bed load using an acoustic doppler current profiler’, *J. Hydraulic Eng.* **128**(4), 473–483.
- Rickenmann, D. & McArdell, B. W. (2007), ‘Continuous measurement of sediment transport in the erlenbach stream using piezoelectric bedload impact sensors’, *Earth Surface Proc. & Landforms* **32**(9), 1362–1378.
- Rickenmann, D., Turowski, J. M., Fritschi, B., Klaiber, A. & Ludwig, A. (2012), ‘Bedload transport measurements at the erlenbach stream with geophones and automated basket samplers’, *Earth Surface Proc. & Landforms* **37**(9), 1000–1011.

- Rodrigues, S., Br  h  ret, J. G., Macaire, J. J., Moatar, F., Nistoran, D. & Jugé, P. (2012), ‘An opportunity to connect the morphodynamics of alternate bars with their sedimentary products’, *Earth Surface Proc. & Landforms* **37**, 240–248.
- Rodrigues, S., Calude, N. & Moatar, F. (2013), Sediment transport, *in* A.-H. El-Shaarawi & W. Piegorsch, eds, ‘Encyclopedia of Environmetrics’, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK, pp. 2398–2413. Second Edition.
- Rollet, A.-J. (2008), Etude et gestion de la dynamique sédimentaire d’un tronçon fluvial    l’aval d’un barrage : le cas de la basse vallée de l’Ain, PhD thesis, Université Jean Moulin - Lyon 3. 305 p.
- Rollet, A.-J., McVicar, B., Piégay, H. & Roy, A. (2008), ‘L’utilisation de transpondeurs passifs pour l’estimation du transport sédimentaire : premiers retours d’ex  rience’, *La Houille Blanche* **4**, 110–116.
- Ryan, S. E., Porth, L. S. & Troendle, C. A. (2002), ‘Defining phase of bedload transport using piecewise regression’, *Earth Surface Proc. & Landforms* **27**, 971–990.
- Sear, D. A., Damon, W., Damon, D. J. & Anderson, D. G. (2000), ‘A load cell based continuous recording bedload trap’, *Earth Surface Proc. & Landforms* **25**(6), 659–672.
- Simons, D. B., Richardson, E. V. & Nordin, C. F. (1965), Bedload equation for ripples and dunes, Professional Paper 462-H, U. S. Geological Survey.
- Soulsby, R. & Whitehouse, R. (1997), Threshold of sediment motion in coastal environment, *in* ‘Proc. Pacific Coasts and Ports’97 Conf.’, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, pp. 149–154.
- Strickler, A. (1923), Beiträge zur frage der geschwindigkeitsformel und der rauhigkeitszahlen für str  me, kan  le und geschlossene leitungen [Contributions aux questions de formulations des vitesses et de la rugosité pour les rivières, canaux et conduites], Mitteilung 16, Amt für Wasserwirtschaft, Bern, Suisse. (en allemand).



- Sundborg, A. (1967), 'Some aspects of fluvial sediments and fluvial morphology, 1. general views and graphic methods', *Geografiska Annaler A* **49**, 333–343.
- Van Rijn, L. (1993), *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*, Aqua Publications, The Netherlands.
- van Rijn, L. C. (2006), *Manual sediment transport measurements*, Aqua publication, Blokhuisdijk, The Netherlands.
- Van Rijn, L. C. & Gaweesh, M. (1992), 'A new total load sampler', *J. Hydraulic Eng.* **118**(2), 1686–1691.
- Witzigman, F. S. (1963), A study of methods used in measurement and analysis of sediment load in streams, Technical report, Subcommittee on Sedimentation of the Inter-Agency Committee on Water Resources.
- Wolman, M. G. (1954), 'A method of sampling coarse river-bed material', *Trans. American Geophysical Union* **35**(6), 951–956.