



ELEMENTS DE GEOMORPHOLOGIE FLUVIALE

Cahier 3 : La mesure du charriage en rivière



CONTENU

1	CONTENU.....	3
2	RESUME.....	5
3	INTRODUCTION	7
4	LES DISPOSITIFS	8
4.1	Les bassins et fosses de sédimentation.....	8
4.2	Les trappes à sédiments.....	9
4.3	Les échantillonneurs à pression différentielle	11
4.3.1	Le principe	11
4.3.2	Le Helley-Smith et ses variantes.....	12
4.3.3	Préleveurs spécifiques aux sables	13
4.4	Les ouvrages fixes construits en travers du cours d'eau.....	16
4.4.1	Le préleveur à tapis roulant.....	17
4.4.2	Les préleveurs à vortex.....	17
4.4.3	Les fosses de mesure (ou « trappe bickbeck »).....	21
4.5	Autres méthodes	22
4.5.1	Méthodes de caractérisation de la mobilité sédimentaire	22
4.5.2	Les méthodes indirectes (nouvelles technologies)	24
5	EFFICACITÉ DES PRÉLEVEURS	26
5.1	Efficacité des échantillonneurs.....	26
5.1.1	Valeurs d'efficacité relevées dans la littérature.....	26
5.1.2	Efficacité relative	29
5.2	Efficacité des ouvrages fixes construits en travers du cours d'eau.....	30



5.3	Efficacité des nouvelles technologies.....	34
6	MISE EN OEUVRE.....	35
6.1	Quel matériel ?.....	35
6.1.1	Préleveur	35
6.1.2	Maille des filets.....	36
6.2	Installation et mise en eau	37
6.3	Protocole d'échantillonnage	41
6.3.1	Choix du site	41
6.3.2	Nombre et répartition des verticales sur la section	41
6.3.3	Durée des prélèvements	45
6.3.4	Calcul du débit solide	46
6.3.5	Combien de mesures par section ?	47
6.3.6	Quelques exemples de protocoles utilisés dans la littérature	47
7	CONCLUSION	49
8	ANNEXES.....	50
8.1	Informations à récolter sur le terrain.....	50
8.2	Plans du préleveur Elwha	51
9	REFERENCES	55

1 RESUME

Ce guide présente les différents outils qui ont été développés et utilisés à ce jour pour échantillonner le transport solide par charriage en rivières. Ces outils sont nombreux, et reposent sur des principes très différents :

- Les bassins et fosses de sédimentation (barrages, plages de dépôts, anciennes zones d'extraction) restent des outils très efficaces de piégeage des sédiments. C'est une mesure intégratrice à l'échelle de la crue, et la capture du transport en suspension peut être très importante dans certains cas (barrages).
- Les préleveurs fixes construits en travers du cours d'eau: Ils ne nécessitent pas la présence d'un opérateur dans le cours d'eau pendant la crue, et permettent une mesure en continu, ce qui est un avantage dans les cours d'eau où la variabilité temporelle du charriage est forte. Par contre ils nécessitent un génie civil en travers du cours d'eau et leur coût limite leur utilisation à des petits cours d'eau.
- Les trappes à sédiment: ces dispositifs, mobiles, sont constitués d'un cadre métallique (d'assez grande dimension) et équipé d'un compartiment filtrant de piégeage des sédiments (filet ou treillis soudé métallique). Leur grande dimension permet un déploiement sur des durées assez longues, favorables en cas de forte variabilité temporelle. Cependant une mesure longue implique de travailler avec des mailles de grande taille (>4mm) pour éviter le colmatage, ce qui prive la mesure de la fraction fine du charriage (sables et petits graviers) qui peut ne pas être négligeable.
- Les préleveurs à pression différentielle : Ces préleveurs ont une forme censée optimiser leur efficacité hydraulique, afin d'éviter que leur présence au sein de l'écoulement ne perturbe les champs de vitesse et donc le transport. De petite taille ils présentent l'avantage d'être peu coûteux, et d'être facilement déployables au cours des crues, soit directement à la main par l'opérateur (dans le cours d'eau ou depuis un pont), soit via un dispositif de câbles depuis la berge, un pont ou un bateau. En contre-partie, la petite taille ne permet que des mesures sur durées courtes, ce qui nécessite des stratégies bien adaptées lorsque la variabilité spatiale ou temporelle du charriage est importante.

L'efficacité de ces différents outils, et en particulier des préleveurs à pression différentielle, est très difficile à évaluer, car elle nécessite par définition de comparer ce qui est prélevé par l'instrument à ce qui serait effectivement passé en l'absence de l'instrument (inconnu). Une analyse des valeurs proposées dans la littérature permet par ailleurs de conclure que l'efficacité d'un instrument est variable et directement liée aux conditions d'écoulements pour lesquelles elle a été établie.

Les différents protocoles de mise en œuvre et d'échantillonnage sont présentés et discutés. On peut en conclure qu'il n'y a pas une méthode unique. Chaque situation est à considérer pour ses spécificités et ce sont les objectifs de l'étude, les contraintes locales, et la variabilité spatiale et temporelle supposée du charriage qui vont décider du site de mesure, de l'instrumentation, des conditions de mise en œuvre et du protocole d'échantillonnage (discrétisation spatiale et temporelle de la mesure).



2 INTRODUCTION

Le transport solide par charriage façonne nos rivières et est indispensable au développement de nombreux écosystèmes fluviaux. Depuis plus d'un siècle l'homme a essayé de quantifier et prévoir les flux transportés lors des crues. Cela s'est fait par la mesure directe, ou encore, par le calcul avec des lois semi-empiriques. Dans les deux cas l'exercice reste très difficile, et de toutes façons conditionné à la mesure, car les lois ne peuvent être plus précises que les données à partir desquelles elles ont été établies.

De nombreuses techniques ont été mises en œuvre depuis le début du XXe siècle pour mesurer le charriage. Ces mesures sont en général intrusives, et nécessitent le déploiement d'instruments au sein de l'écoulement. Comme le charriage ne se produit essentiellement que pendant les épisodes de crues, on comprend aisément la difficulté de l'exercice. Une autre difficulté majeure consiste à définir l'efficacité de l'instrument de mesure, qui est le rapport entre ce qui est prélevé et ce qui aurait dû être prélevé en l'absence de l'instrument (de fait, inconnu). Parmi les autres difficultés de mesurer le charriage in situ on citera la difficulté de définir ce qu'est le charriage (limite charriage/suspension), et la très grande variabilité spatiale et temporelle du phénomène de transport : cela implique de trouver des stratégies d'échantillonnage adaptées et un compromis entre le coût de l'installation et la représentativité de cet échantillonnage (surtout pour les cours d'eau larges).

Pour pallier à ces difficultés, la tentation a été grande de travailler en canal de laboratoire, où les conditions d'écoulement et de transport sont parfaitement maîtrisées. Cependant les données produites dans ces conditions sont loin de refléter toute la complexité du milieu naturel, et ne peuvent être utilisées pour construire et valider des lois de transport [Recking, 2010; 2013].

Malgré les nombreux efforts de développement techniques, la mesure du charriage reste donc un exercice très difficile et un sujet de recherche très actif. Des techniques nouvelles (géophones, hydrophones, sismique..), non intrusives, sont aujourd'hui en plein développement et permettront peut-être dans un avenir proche d'accéder à une information encore non accessible aujourd'hui. Par exemple, il n'existe pratiquement pas à ce jour de données de terrain décrivant le transport de sédiments très grossiers pendant les crues extrêmes (la plupart des instruments traditionnels, intrusifs, ne pouvant être déployés que pendant les crues faibles à moyennes). Cependant, malgré ces promesses, on a plus que jamais besoin de l'instrumentation traditionnelle, ne serait-ce que pour la validation des nouveaux outils [Gray et al., 2010].

Sur la base d'une analyse bibliographique détaillée, ce document présente l'ensemble des techniques traditionnelles de mesure du charriage, discute leur efficacité, les difficultés de mise en œuvre, et essaye de faire le point sur les protocoles de mesure adaptés.

3 LES DISPOSITIFS

On rencontre classiquement trois grandes familles d'instruments utilisés pour mesurer le charriage:

- Les trappes : dispositifs de type boîtes ou paniers, posés sur le lit, équipés ou non d'un filet.
- Les échantillonneurs à pression différentielle : conçus de telle sorte que la vitesse d'entrée d'un échantillonneur est sensiblement la même que celle du courant ambiant
- Les tranchées ou fosses à sédiment, installées dans un ouvrage de génie civil dans le lit du cours d'eau

Une quatrième famille regroupe tout ce qui permet d'estimer l'épaisseur de la couche active et son déplacement au cours de la crue (chaines, traceurs, Lidar, ADCP). Une cinquième famille, brièvement présentée ici, regroupe toutes les techniques modernes non intrusives : géophones, hydrophones, sismique. Ce document décrit les principaux outils disponibles. Pour une revue très exhaustive des développements successifs ayant conduit aux outils modernes, se référer à Hubbell [1964].

3.1 Les bassins et fosses de sédimentation

On peut classer dans cette catégorie les aménagements mettant à profit (souvent à l'aide d'un ouvrage de génie civil) la capacité de sédimentation du cours d'eau, sur tout où une partie de sa section. Le mécanisme de dépôt, efficace, résulte en général de l'élargissement du lit (étalement de la lame d'eau) et d'une rupture de la pente d'énergie. On retrouvera dans cette catégorie les fosses d'extractions, les barrages, et les plages de dépôts.

Des exemples d'utilisation de ce type de données sont illustrés avec une le remplissage d'une ancienne fosse d'extraction sur l'Esconavette [Liebault and Laronne, 2008], le barrage de la Galaure à la confluence avec le Rhône [Recking et al., 2012], la plage de dépôt de la Roize à Voreppe [Piton and Recking, 2017].



Figure 1: Remplissage d'une ancienne fosse d'extraction sur l'Esconavette River (Liebault and Laronne, 2008).



Figure 2: Plage de dépôt de la Roize

Ce type de mesure est intégrateur dans le sens où on va mesurer un volume déposé pour un événement donné, et on perd donc l'information instantanée. Par contre étant donné la grande capacité de stockage, c'est probablement ce qu'il y a de plus efficace pour mesurer le charriage (granulométrie transportée et volume), à condition de pouvoir distinguer les dépôts de fin de crue par suspension [Ryan and Troendle, 1997].

Ce dernier point ne doit pas être négligé car les études montrent que la part en suspension peut représenter jusqu'à 80% de la charge totale transportée [Turowski et al., 2010]. Le dépôt dû à la suspension pourra être limité pour les ouvrages maintenant un écoulement suffisant pendant toute la crue et où l'eau ne stagne jamais (comme par exemple les plages de dépôt à barrage à fente qui se vident intégralement en fin de crue), mais il devra être sérieusement considéré pour les zones de dépôt à eau morte, où le phénomène de sédimentation des fines pourra être très efficace en fin de crue.

3.2 Les trappes à sédiments

On classe dans cette catégorie tous les dispositifs de type caisses ou paniers posés sur le lit ou manipulés depuis un génie civil ou un bateau. Ils comportent typiquement un dispositif de capture des sédiments (ou « surface d'entrée », de conception et géométrie plus ou moins complexes allant du simple cadre métallique au dispositif équipé d'aile de guidage dans l'écoulement) associé à un volume aux parois filtrantes (filet, grillage, treillis soudé...) destiné à stocker les sédiments collectés.

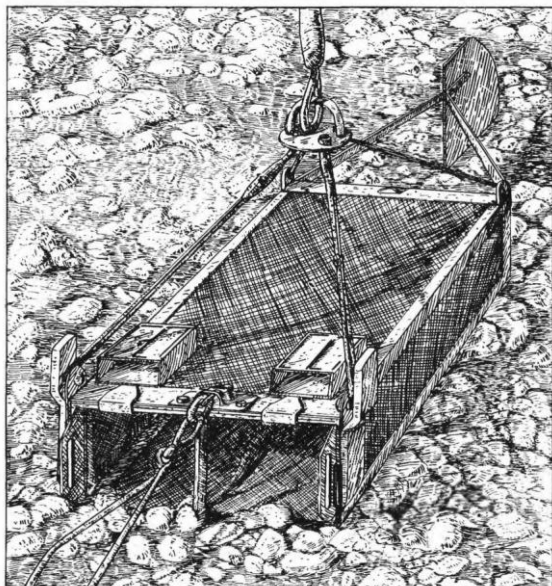


Figure 3: trappe Nesper, Einstein 1937 (source [Hubbell, 1964])



Figure 4: Trappe installée sur un seuil sur l'Erlenbach (WSL)

Les trappes ont en général des ouvertures assez larges (plusieurs dizaines de centimètres), souvent bien supérieures à la taille des sédiments présents sur le lit, ce qui les rend particulièrement efficaces pour capturer les plus gros éléments en transit. Par contre, ces (relativement) grandes dimensions empêchent une manutention facile et rapide, et imposent des durées d'échantillonnages généralement assez longues (plusieurs dizaines de minutes). Une longue durée d'échantillonnage est intéressante car elle permet de mieux capturer la variabilité temporelle du transport solide, en particulier lorsque l'on est proche des conditions de début de transport, où la fraction grossière se déplace de façon sporadique [Bunte *et al.*, 2008]. L'inconvénient d'une durée de mesure longue est la nécessité de travailler avec des mailles de filet grossières afin de d'éviter le colmatage du dispositif. Cela a pour conséquence une large sous-estimation de la fraction fine transportée. Par exemple Whitaker et Potts [2007] ont utilisé une trappe avec une maille de 32 mm et ont fait une estimation séparée du transport de la fraction 0-32mm, qu'ils ont évalué à au moins 50% du transport par charriage total.

Des conceptions très variées ont été proposées [Einstein, 1944; Nanson, 1974; Mclean *et al.*, 1999]. Aujourd'hui on tend vers une standardisation du type de dispositif fréquemment déployé, avec notamment les trappes dites « Bunte ». Ces trappes sont constituées d'un cadre de dimension de 0.2 x 0.3 m fixé sur deux barres solidaires du lit, et posé sur une rampe (plaque) en aluminium effaçant les aspérités locales du lit. Elle est équipée d'un filet de 0.9-1.6m de long à maille 3.5-4 mm (particules retenues >4mm). Cette grande dimension de filet associée à une maille grossière facilite le passage de

l'eau, limite les colmatages, et est supposée minimiser l'impact de l'installation sur l'hydraulique locale. La durée d'échantillonnage est généralement d'une heure (mais elle peut descendre à 30 voire 10 min selon les conditions). Leur utilisation nécessite une intervention de l'opérateur dans l'écoulement, et est donc limitée aux petites crues.

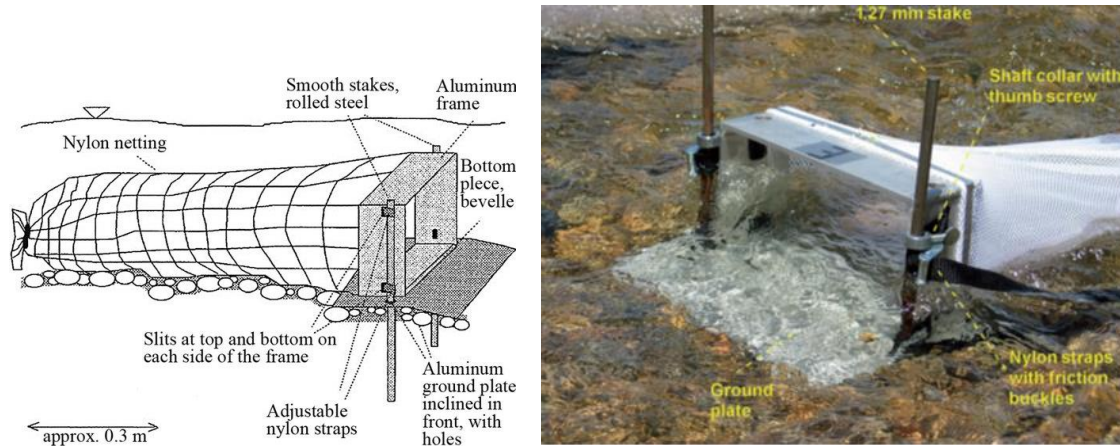


Figure 5: Trappe de type « Bunte » [Bunte et al., 2008]

3.3 Les échantillonneurs à pression différentielle

3.3.1 Le principe

Du fait des pertes de charges développées à l'intérieur du préleveur (surtout en cas de colmatage), les trappes peuvent exercer une résistance non négligeable à l'écoulement, ce qui se traduit par une réduction de vitesse à l'entrée du dispositif et l'export d'une partie du charriage de part et d'autre de l'aire de prélèvement. C'est pourquoi, des solutions ont très tôt été recherchées pour essayer de compenser cet effet, avec le développement des échantillonneurs à pression différentielle. Le principe est relativement simple et consiste à donner à la structure une forme divergente (dans le sens de l'écoulement), qui en déviant les lignes d'eau, crée une dépression sur la face arrière du préleveur, venant compenser la perte de charge précédemment décrite. L'objectif recherché est bien sûr d'obtenir une vitesse en entrée de dispositif égale à la vitesse du fluide ambiant. Le rapport entre ces deux vitesses définit l'efficacité hydraulique du préleveur (un aspect discuté plus loin).

De nombreux modèles ont été développés (voir [Hubbell, 1964] pour une revue exhaustive), avec des structures plus ou moins complexes, avec ou sans filet. Par exemple la Figure 6a présente l'échantillonneur de type VUV (taille 22.5*11.5 cm [Mclean et al., 1999] ou 45 * 12 cm [Hayward and Sutherland, 1974]). Ce préleveur capture le charriage dans une chambre interne d'où l'écoulement (et la charge en suspension) peut s'échapper par huit petites fenêtres.

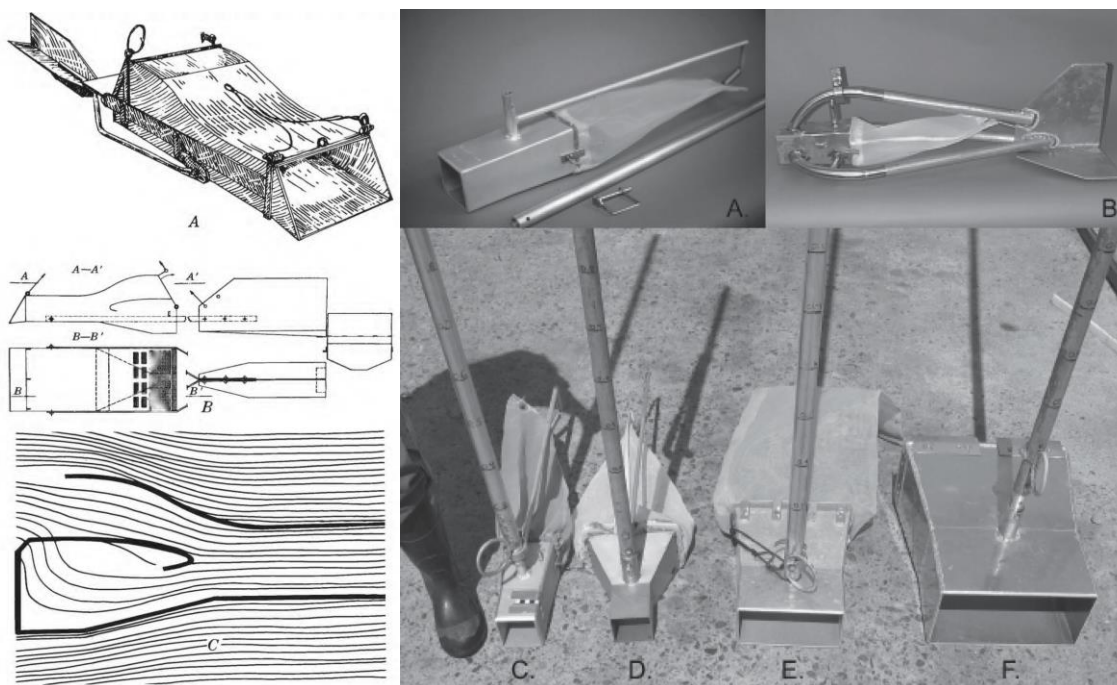


Figure 6: (a) VUV sampler (Novak 1957) d'après Hubbell [1964] (b) A et C, US BLH-84 portable; B, US BL-84 pour support cable; D, Helley-Smith portable; E, Elwha portable; and F, TR-2 portable (d'après [Gray et al., 2010])

3.3.2 Le Helley-Smith et ses variantes

De nombreux modèles de préleveurs à pression différentielle ont été développés, mais avec le temps on a vu apparaître une standardisation des outils utilisés (et commercialisés pour certains), tels que ceux présentés sur la Figure 6b.

Le Helley-Smith [Helley and Smith, 1971] est probablement le plus connu et le plus utilisé (Edwards and Glysson, [1999] avaient recensé plus de 3000 utilisations en 1999) car il est très facilement maniable et est commercialisé. Il a initialement été développé pour mesurer le charriage sur les petits cours d'eau de la côte Californienne, que les auteurs caractérisent par des pentes fortes, des écoulements rapides, un transport intense de granulométries « grossières » (gravier et petits cailloux) et une forte variabilité. Cependant la petite taille de sa fenêtre de prélèvement 76 x 76 mm le rend inefficace pour capturer les granulométries très grossières, et plus particulièrement près des conditions de début de mouvement où les déplacements de cailloux sont rares et sporadiques. C'est pourquoi des modèles à fenêtre plus large ont été proposés, comme par exemple les préleveurs « Elwha » d'ouverture 102 x 203 mm (plans fournis en annexe) ou « Toutle » (Version 1 puis 2) d'ouverture 305 x 152 mm.

Plus on élargit la fenêtre du préleveur, plus on augmente son efficacité à prélever des granulométries grossières, mais plus on augmente en même temps sa difficulté de mise en œuvre à la main, particulièrement pour les écoulements à forte énergie capables de mettre en mouvement les granulométries grossières en question. C'est pourquoi tous ces préleveurs « à main » ont également leur

version pour câble, généralement équipée d'une armature supportant des ailettes de guidage dans l'écoulement, et manipulés depuis un pont, une berge ou un bateau [Erwin and Schmidt, 2006].



Figure 7: a) Le Helley-Smith, b) HS déployé depuis un camion (mesure EDF-Irstea sur l'Arve) c) le Toutle River 2 déployé depuis un pont sur l'Isère (Mesure EDF opérée par Hydrogéosphère sur l'Isère)

La très grande majorité des données publiées à ce jour ont été produites à partir de préleveurs à pression différentielle, et en particulier le Helley-Smith. En rivières à graviers et cailloux, elles concernent essentiellement des écoulements à faible énergie, avec un transport de la fraction fine des matériaux du lit.

3.3.3 Préleveurs spécifiques aux sables

Echantillonner les lits à sables est difficile car :

- Il faut utiliser des mailles étroites pour capturer les matériaux inférieurs à 2mm
- Le charriage du sable est généralement accompagné par un transport important de fines en suspension immédiatement au-dessus de la couche charriée, propice au colmatage des filets à mailles étroites
- la limite charriage / suspension est très mal définie
- Il s'agit en général de lits très larges (donc à grande variabilité)
- Le transport est souvent accompagné du passage de « bedforms » (rides, dunes) qui accentuent la variabilité spatiale et temporelle.

Les deux derniers aspects sont discutés dans une autre partie à la fin de ce rapport.

Le Arnhem BTMA est souvent utilisé pour les lits à sable. Son profilé et sa petite taille (8.5 cm x 5 cm) permettent un bon positionnement dans l'écoulement et un prélèvement sur les petites formes du lit (rides). Il mesure sur une hauteur de 5 cm et est prévu pour des sédiments dans la gamme 300 µm (taille des mailles du filet) à 5 mm.

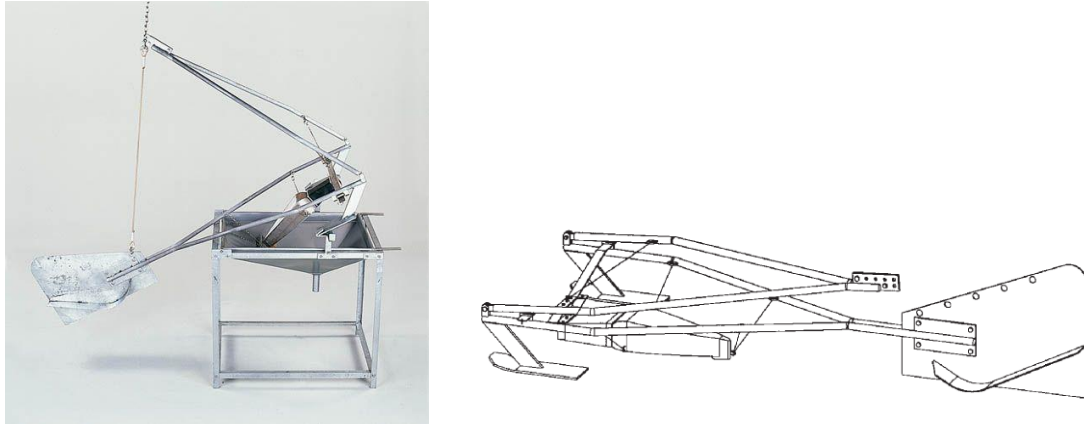


Figure 8: Le BTAM Arnhem (<https://en.eijkkamp.com/products/water-bottom-sampling-equipment/bed-load-transport-meter-arnhem-type.html>)

Pour pallier au problème de colmatage du filet, [Van Rijn and Gaweesh, 1992] ont développé le préleveur « Nile ». Ce préleveur de petite taille (55*96mm) est adapté à une mesure sur des petites dunes.

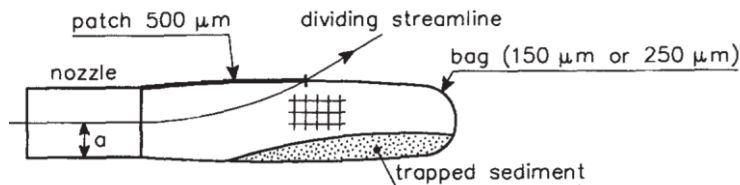


Figure 9: Le préleveur « Nile » de Delft [Van Rijn and Gaweesh, 1992]

Le dispositif capture le charriage dans un filet (mailles 150 ou 250 μm), mais est équipé dans sa partie supérieure, d'une fenêtre à mailles plus grossières (500 μm) destinée à laisser s'échapper la suspension (Figure 9). La ligne de partage entre le charriage et la suspension est estimée à la hauteur $a=3$ cm, ce qui correspond aux petites rides. Mais les auteurs reconnaissent qu'au régime de transport intense les rides disparaissent, l'épaisseur de la couche de charriage est moindre (de l'ordre de 1cm) et il devient alors difficile de définir le charriage de la suspension. Ce préleveur a été utilisé sur le Nil [Gaweesh and Van Rijn, 1994].

Quelle que soit l'ingéniosité du dispositif de piégeage, les développeurs (du BTMA, du Nile) reconnaissent que la mesure du charriage en rivières à sables se heurte à un problème de définition : où situer la limite de ce qu'on désigne « charriage » dans la mesure où une continuité existe sur la concentration du transport depuis le lit jusqu'à l'intérieur de la colonne d'eau. C'est pourquoi en général, la mesure de la charge de fond est couplée avec une mesure de la charge dans la colonne d'eau, au moins proche du lit. Cependant la mesure en un point précis de la colonne d'eau avec un échantillonneur classique (par exemple le Helley-Smith) n'est pas aisée car le remplissage de l'échantillonneur lors de sa descente peut ne pas être négligeable (où alors prévoir une trappe de fermeture). Plusieurs dispositifs

ont spécifiquement été développés, comme par exemple la bouteille de Delft ou le P72 de l'USGS (Figure 10). Ces deux dispositifs sont profilés pour ne pas perturber l'écoulement et sont équipés d'un réservoir échantillonneur, pouvant pour le P72 être actionnée à la profondeur souhaitée. Ils peuvent être utilisés dans des cours d'eau à forte énergie, mais à condition de mettre en place d'un système compliqué de câblages en travers du cours d'eau (voir partie suivante) permettant le contrôle de leur maintien dans l'écoulement (sans cela il est impossible de les positionner dans l'écoulement, comme on a pu le constater pour le P72 sur une chasse de l'Arc en 2016, malgré un poids de l'ordre de 100kg).



Figure 10: La bouteille de Delft et le P72 (Irstea)

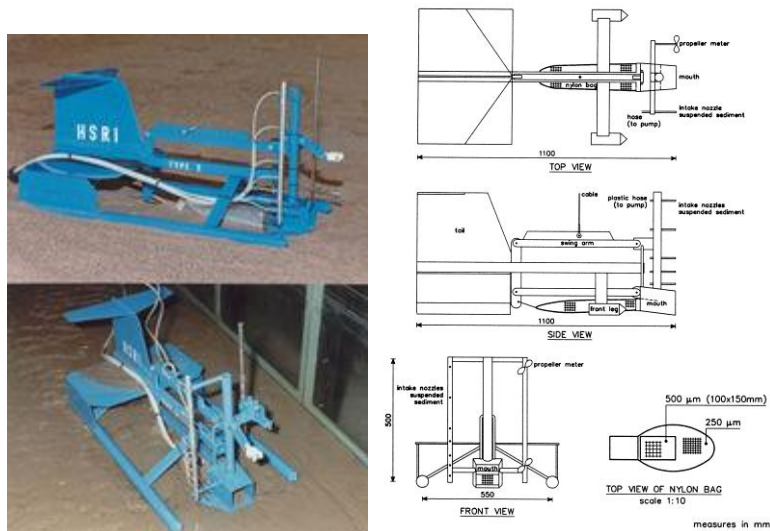


Figure 11: Version moderne du préleveur « Nile » de Delft (photo : <http://www.marinespecies.org>)

Une alternative pour mesurer dans la colonne d'eau a été proposée sur la version moderne du « Nile » (Figure 11) qui combine le préleveur de fond avec un préleveur de suspension, constitué de 7 buses d'admission (diamètre intérieur = 0,003 m) placées sur l'axe support, reliées à des tubes plastique et actionnées par des pompes. Un tel dispositif avait déjà été présenté par Hubbell [1964], qui préconisait d'associer des capteurs de pressions à chaque buse, afin d'adapter le pompage à chaque instant de telle sorte que la vitesse en entrée de la buse soit égale à la vitesse ambiante de l'écoulement [Hiranandani, 1943]. Ce type de préleveurs montés sur un support (canne) rigide serait particulièrement adapté pour les petits cours d'eau à forte énergie accessibles depuis des ponts (éventuellement avec un câble de rappel comme présenté au chapitre dédié à la mise en œuvre). Un schéma de principe est présenté sur la Figure 12.

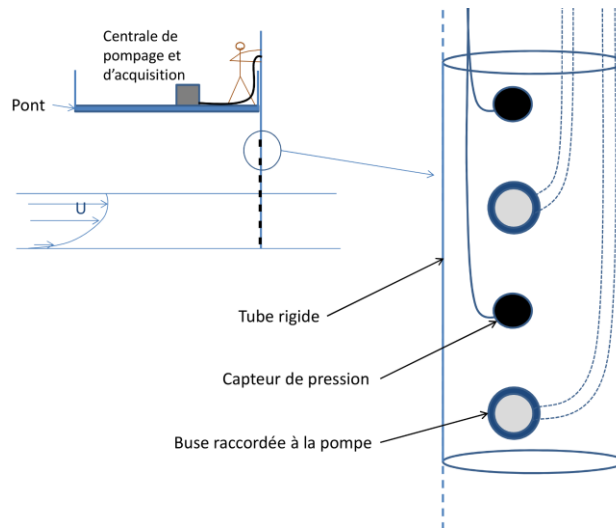


Figure 12: Schéma de principe du préleveur par aspiration pour de la mesure de sable sur la colonne d'eau

3.4 Les ouvrages fixes construits en travers du cours d'eau

On classera dans cette catégorie les ouvrages en génie civil permanents construits en travers du cours d'eau (Figure 13). Il s'agit soit de trappes équipées d'une fente de collecte, soit de rigoles placées au travers du cours d'eau. Ce type de préleveur est supposé être le plus efficace pour la mesure du charriage, par contre contrairement aux préleveurs à filets, ils ne peuvent mesurer la suspension [Gray *et al.*, 2010]. Le principal inconvénient de ce type de dispositif est son coût, ce qui le limite à des cours d'eau de petite taille.



Figure 13: Préleveur à sédiment sur un canal de dérivation de l'Arveyron à Chamonix

3.4.1 Le préleveur à tapis roulant

Ce dispositif a été construit sur la rivière East Fork aux Etats Unis [Leopold and Emmett, 1976]. Il est composé d'un seuil béton équipé d'une rigole de collecte disposé sur toute la largeur du cours d'eau (15 m). La surface supérieure de la rigole est équipée d'une fente de largeur 0.2 m (dimensionné en laboratoire), qui peut être fermée par 8 trappes (1.83m chacune). Un tapis roulant est disposé sous la fente à l'intérieur du seuil et récolte les sédiments qui sont conduits jusqu'à un puits de sédimentation en berge, d'où ils sont repris par un charriot élévateur jusqu'aux systèmes de pesée, avant d'être rejetés au cours d'eau.

Largeur (m)	Pente (m/m)	D16 (mm)	D50 (mm)	D84 (mm)	D90 (mm)	Q (m3/s)	Qs (g/s/m)
15	0.0007	0.3	1.3	13	25	2-41	0.3-312

Tableau 1: Méta données de la East Fork River

Ce dispositif a fonctionné dans les années 70, et plusieurs jeux de données ont été publiés entre 1973 et 1979 [Leopold and Emmett, 1976; 1977; 1997]

3.4.2 Les préleveurs à vortex

Les préleveurs à vortex comportent une rigole transversale insérée dans un seuil béton. La différence avec le préleveur précédent, est que la récupération en berge de ce qui tombe dans la rigole n'est pas assurée par un tapis roulant mais par l'écoulement. Lorsque les vannes latérales situées au droit de la rigole sont ouvertes, une partie de l'écoulement passant au-dessus du seuil est dévié latéralement, vers un by-pass. Un vortex se développe alors dans la rigole avec une capacité d'entraînement suffisamment forte pour évacuer les sédiments en présence.

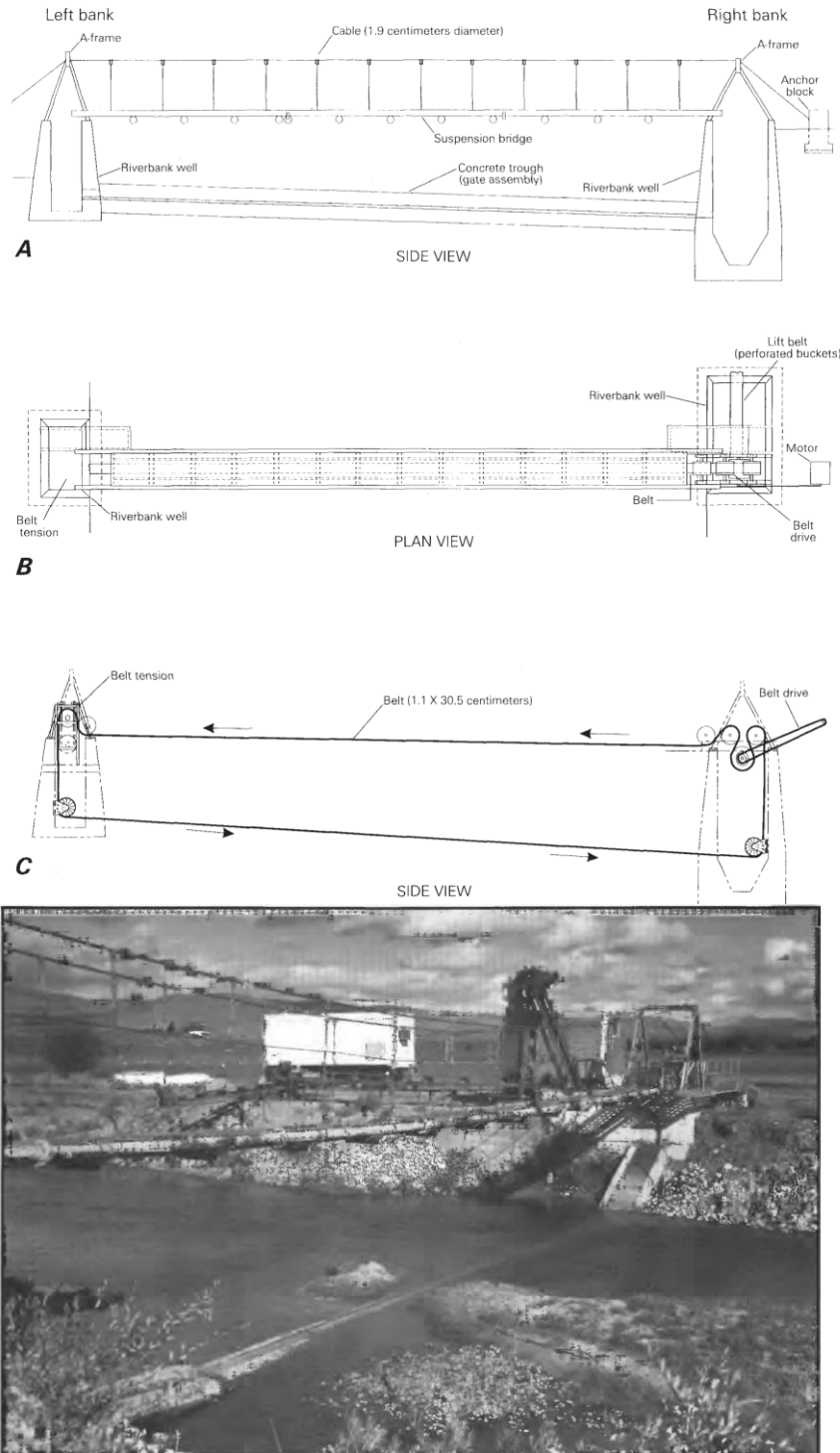


Figure 14: Plans simplifiés du préleveur à Sédiment sur la East Fork River. A, Vue aval de l'ouvrage, avec le pont suspendu, les puits en béton sur chaque rive, et le seuil béton équipé d'une rigole dans le lit; B, Vue en plan, montrant le tapis roulant et son moteur, ainsi le charriot élévateur en rive droite C, Schéma du tapis roulant passant dans le seuil béton sous la rigole de collecte, et au-dessus du lit sur le pont suspendu. En bas, photo du dispositif.

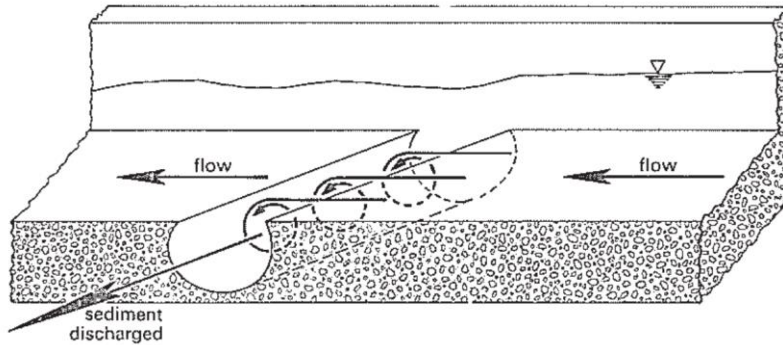


Figure 15: Principe du préleveur vortex [Hayward and Sutherland, 1974]

Au moins trois équipements de ce type ont été construits (Figure 16 à Figure 17): sur Oak creek [Milhous, 1973; Klingeman, 1979], sur Virginio Creek [Tacconi and Billi, 1987; Cencetti et al., 1994] et sur Torlesse [Hayward and Sutherland, 1974].

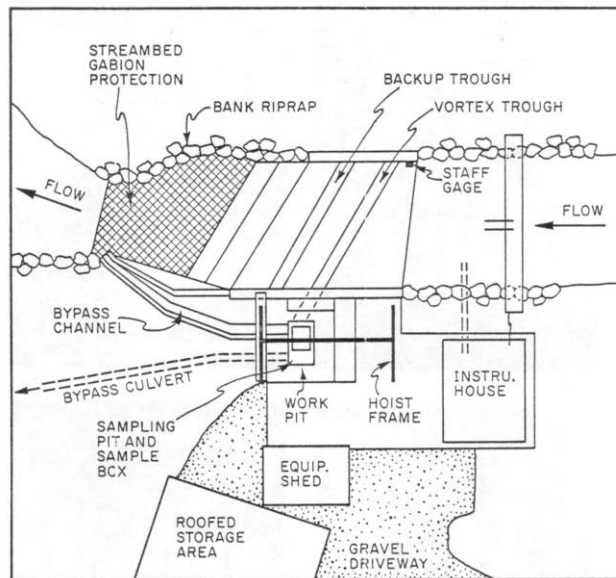


Figure 16: Vue en plan de la station Vortex sur Oak Creek [Klingeman, 1979]

Largeur (m)	Pente (m/m)	D16 (mm)	D50 (mm)	D84 (mm)	D90 (mm)	Q (m ³ /s)	Qs (g/s/m)
3.7	0.01	19	54	80	86	0.02-3.4	0-111

Tableau 2: Meta données pour Oak Creek

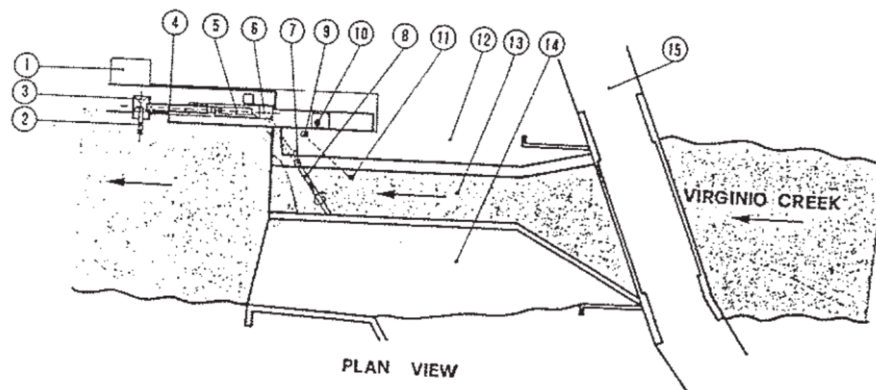


Figure 17: Vue en plan de la station Vortex sur Virginio Creek (le canal vortex est repéré par la flèche n°8) [Tacconi and Billi, 1987].

Largeur (m)	Pente (m/m)	D16 (mm)	D50 (mm)	D84 (mm)	D90 (mm)	Q (m ³ /s)	Qs (g/s/m)
12	0.008		27	55		0.67-7.5	0.5-154

Tableau 3: Meta données pour la Virginio Creek

Largeur (m)	Pente (m/m)	D16 (mm)	D50 (mm)	D84 (mm)	D90 (mm)	Q (m ³ /s)	Qs (g/s/m)
3	0.057		60	126		0.28-2.7	0.1-0.7

Tableau 4: Meta données pour Torelesse

Le dispositif a bien été décrit pour Oak creek. Le canal vortex (« vortex trough » sur la Figure 16) forme un angle de 60° par rapport à l'axe de l'écoulement (choisi en référence à l'orientation des racines d'arbres dans la berge), avec une pente nulle. Son fond est plat, sa hauteur est de 30.5cm, ses parois ont une forme incurvée avec une largeur de 30.5 cm à la base et au sommet, et une largeur maximum de 45.7 cm au centre. La longueur totale du canal vortex est de 5.94 m, pour une longueur ouverte à l'écoulement de 4.42m [Milhous, 1973]. Un vortex se développe facilement dès la mise en eau et quel que soit le débit. Une seconde rigole située juste en aval de la première (« backup trough » sur la Figure 16) récolte les particules plus grossières qui n'auraient éventuellement pas été captées par le vortex.

Un jeu de données a été produit à Oak Creek entre 1969 et 1971. Il semblerait que, en ce qui concerne les rivières à granulométrie grossière (cailloux), ce soit à ce jour le seul jeu de données vraiment « complet », dans le sens où toutes les granulométries en place dans le lit ont été transportées et

mesurées (la majorité des autres jeux de données publiés concernant des rivières à sables/graviers, ou alors ne concernent que la fraction très fine du matériau en place).

3.4.3 Les fosses de mesure (ou « trappe bickbeck »)

Ce type de dispositif construit en génie civil, collecte le charriage non plus dans une rigole, mais dans des fosses insérées à l'intérieur du lit [Reid and Frostick, 1986; Lewis, 1991; Laronne and Reid, 1993; Garcia et al., 2000; Habersack et al., 2001; Sterling and Church, 2002; Vericat and Batalla, 2010; Lucía et al., 2013; Liébault et al., 2016]. Contrairement aux rigoles assurant une collecte sur l'intégralité de la largeur du lit, la collecte est ici ponctuelle et se fait par des fentes situées au droit de chaque fosse. Une autre différence avec les dispositifs précédents, conçus pour évacuer les sédiments hors de la zone de piégeage au fur et à mesure de son alimentation (via le vortex ou le tapis roulant), les fosses se remplissent progressivement jusqu'à être pleines et la mesure s'arrête.

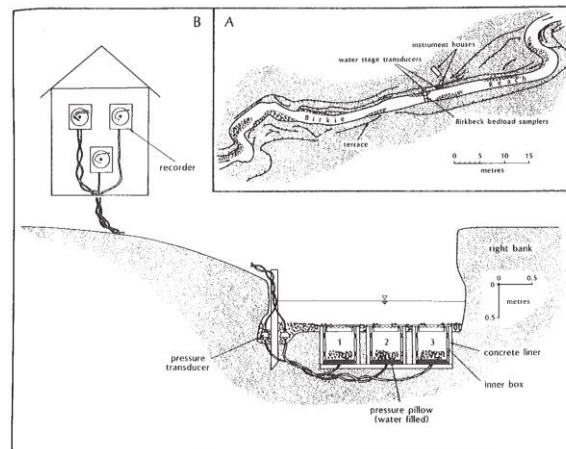


Figure 18: Trappe Birkbeck sur Turkey Brook [Reid and Frostick, 1986]

Ce type d'installation est connu sous le nom « trappe Birkbeck ». La version moderne de ce type d'installation [Reid and Frostick, 1986], comporte des capteurs de pression permettant de mesurer en temps réel à la fois la charge hydraulique et l'accumulation en sédiments à l'intérieur de la trappe (Figure 18).



Figure 19: Trappe Birkbeck, capteurs de pression et portique de levage, sur le Moulin à Draix, France (Iristea, Photo F. Liébault).

Ce type de préleveur permet une mesure instantanée du charriage et de l'hydraulique associée. Il présente cependant l'inconvénient de mesurer sur une durée finie qui correspond au temps de remplissage des fosses. Par exemple les gros événements très transportant ne peuvent être suivis qu'en début de crue. Une autre difficulté réside dans le fait que les fentes de prélèvement sont en nombre réduits et fixes, ce qui peut être un problème compte tenu de la forte variabilité spatiale du charriage. On serait tenté de dire que ce dispositif est adapté à des lits où la zone de transport est unidirectionnelle et stable dans le temps (lit stable, avec grand tirant d'eau). Pour des cours d'eau à très forte variabilité morphodynamique (faibles tirants d'eau avec morphologie active) la capture du charriage par chaque fente peut se faire de façon chaotique selon la direction du transport (voir paragraphe suivant).

3.5 Autres méthodes

Ces méthodes sont rappelées ici succinctement pour mémoire.

3.5.1 Méthodes de caractérisation de la mobilité sédimentaire

La méthode des chaînes permet mesurer l'épaisseur de lit mis en mouvement lors d'une crue. Elle consiste à mettre en place une chaîne verticalement dans le lit, et de venir mesurer sa verticalité après la crue (Figure 20). Un déplacement d'une partie de la chaîne dans la direction horizontale informe sur le remaniement du matériau en place. Si le principe est simple en théorie, la mise en œuvre peut être compliquée pour enfoncer la chaîne dans des lits à charge grossière (grâce à une tige à frapper). Retrouver la chaîne enterrée après la crue peut également être compliqué.

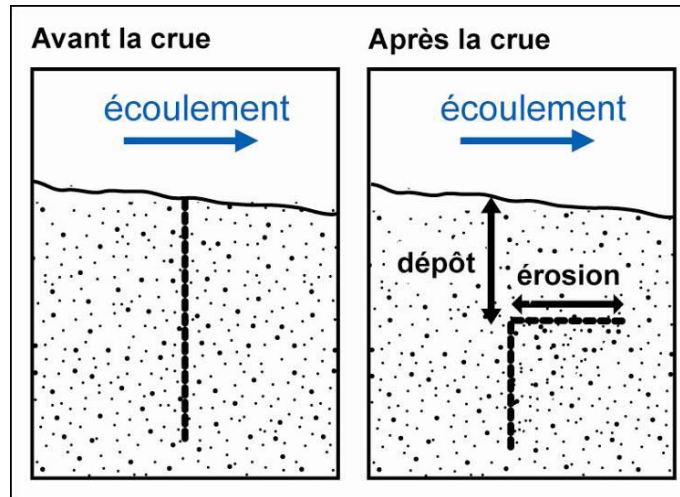


Figure 20: Méthode des chaînes [Liebault and Laronne, 2008]

Une alternative à la méthode des chaînes consiste à utiliser des données diachroniques issues de la mesure topographique ou Lidar (Figure 21). Les épaisseurs des érosions et dépôts ainsi calculées renseignent sur l'épaisseur de la couche de lit mobilisée. Cette approche permet également un bilan sédimentaire pour la section étudiée.

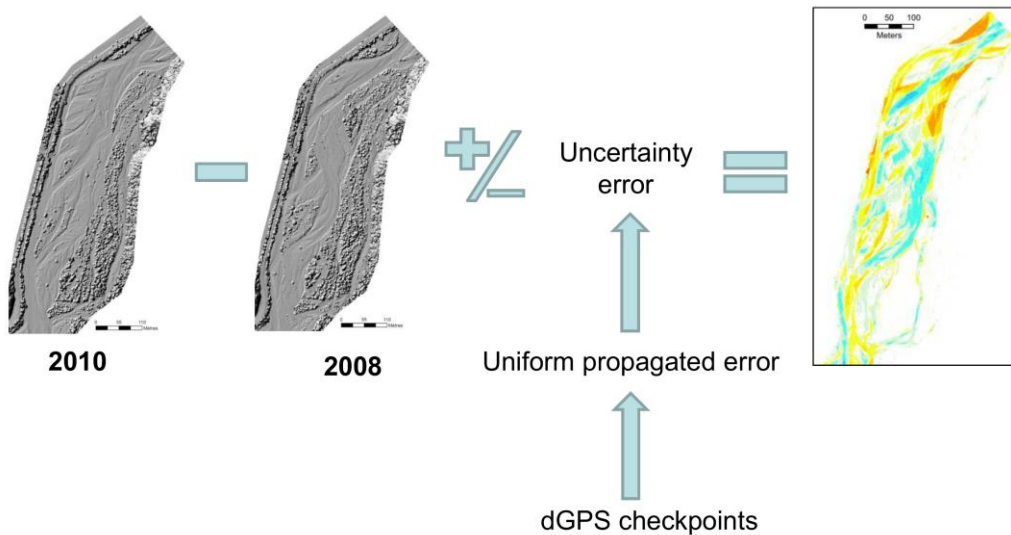


Figure 21: Mesure diachronique à partir de relevés Lidar (Tacon, Liébault)

Pour finir on citera le traçage des sédiments qui permet de mesurer la mobilité des grains (seuil de mise en mouvement), voire leur distance de déplacement, lors des crues successives. La méthode la plus simple consiste à peindre des cailloux individuels ou des groupes de cailloux sur des placettes. Les technologies récentes permettent d'utiliser des puces radio-fréquences (RFID), insérées dans le caillou, où sont enregistrées un certain nombre d'informations (référence, date de mise en eau). Les puces passives (sans batterie) sont souvent utilisées pour leur petite taille et leur faible coût. Cependant l'énergie d'activation de ces puces est assurée par la proximité avec le champ électro-magnétique généré par l'antenne de détection, ce qui suppose au préalable de retrouver la puce. De nouveaux tests avec des tags actifs semblent prometteurs.

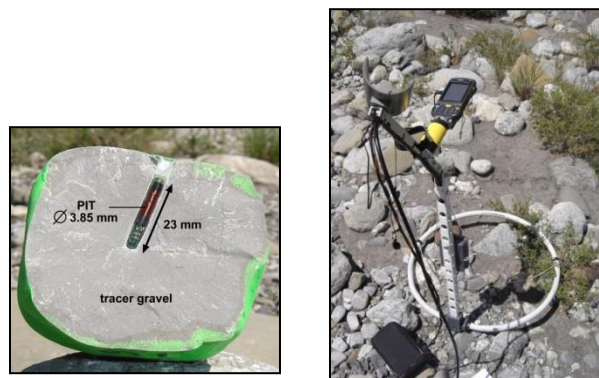


Figure 22: Puce insérée dans un caillou et l'antenne de détection (Iristea, photo Liébault)

Lorsqu'une épaisseur de lit mobilisée est associée à un déplacement, il est possible de calculer un flux : c'est le cas avec bilan diachronique appliqué à la propagation de dunes [Simons *et al.*, 1965; Holmes, 2010], la méthode des chaînes couplée au traçage particulière [Liébault and Laronne, 2008], où à une échelle plus fine le suivi de la vitesse du fond par mesure ADCP [Rennie *et al.*, 2002].

3.5.2 Les méthodes indirectes (nouvelles technologies)

Ces technologies ont en commun d'être non intrusives, et utilisent les propriétés physiques du signal émis par les cailloux qui s'entrechoquent où qui frappent le lit, pour essayer de remonter au transport solide. On distingue trois catégories :

- Les géophones : ces capteurs sont placés soit en berge, où idéalement sous des plaques insérées dans un seuil traversant le cours d'eau (Figure 4) [Habersack *et al.*, 2001; Rickenmann and Mcardell, 2007; Rickenmann and Fritschi, 2010]. L'impact des cailloux sur les plaques émet un signal interprété comme le passage d'un caillou. Etant donné la nécessité d'une énergie minimale d'impact, ce type de mesure est plutôt réservé aux tailles assez grossières (> 2cm)
- Les hydrophones [Geay *et al.*, in review]: cette fois on ne mesure pas les bruits des impacts sur des capteurs, mais les bruits ambiants émis par les cailloux qui s'entrechoquent dans la zone de

transport. La mesure est réalisée avec un micro placé dans l'écoulement, soit en berge soit au bout d'une canne mobile, soit sur un radeau dérivant (Figure 23).

- Les sismographes [Govi *et al.*, 1993; Burtin *et al.*, 2008; Burtin *et al.*, 2010; Hsu *et al.*, 2011; Rotha *et al.*, 2014; Barrière *et al.*, 2015; Chao *et al.*, 2015; Roth *et al.*, 2016]: cette technique utilise la propriété sismiques des cailloux qui s'entrechoquent ou frappent le lit. Les capteurs sont placés en berge, parfois assez loin du lit car le signal se propagent sur de longues distances.



Figure 23: Ecoute du charriage avec l'hydrophone sur canne mobile, et sur radeau (EDF, Gipsalab)

La grande difficulté de ces méthodes consiste à :

- 1) distinguer le signal qui est propre au charriage, du reste des signaux ambiants [Gimbert *et al.*, 2014]: turbulence de l'écoulement, bruits anthropiques....
- 2) Une fois que ce signal est bien identifié, faire la correspondance avec les flux transportés. Pour le moment une calibration est nécessaire au cas par cas.

4 EFFICACITÉ DES PRÉLEVEURS

La notion d'efficacité d'une mesure de charriage nécessite de s'interroger sur:

- L'efficacité du préleveur utilisé: c'est le ratio entre la masse échantillonnée et la masse qui serait réellement passée en l'absence du préleveur
- L'efficacité de la stratégie d'échantillonnage : pour un préleveur donné, à efficacité connue, comment tenir compte de la variabilité spatiale et temporelle du charriage au sein de l'écoulement ?

L'efficacité d'un préleveur dépend du comportement de ce dernier lorsqu'on le plonge dans l'écoulement, près du lit : modifie-t-il l'hydrodynamique locale ? Perturbe-t-il le lit et donc la mobilité sédimentaire lors de sa mise en place ? Est-il apte à capturer les sédiments en transits ?... autant de questions auxquelles il est très difficile de répondre. Si on considère la définition même de l'efficacité rappelée ci-dessus, on peut déjà conclure que son évaluation est quasiment impossible in situ car elle nécessite de connaître a priori la « masse qui serait réellement passée en l'absence du préleveur », qui est justement ce qu'on cherche à connaître. Les mesures d'efficacité ont donc essentiellement été réalisées au laboratoire, avec toutes les limites que l'on peut apporter à ce type d'approche, le laboratoire réduisant très fortement la complexité du milieu naturel. In situ, les différentes approches ont principalement consisté à comparer différents préleveurs entre eux.

Ce qu'on entend par « efficacité de la stratégie d'échantillonnage » c'est comment à partir d'une mesure ponctuelle réalisée avec un préleveur à efficacité connue, proposer une valeur de charriage qui tienne compte de la variabilité spatiale et temporelle du charriage. Un préleveur captant sur la largeur totale du cours d'eau peut prétendre répondre sur l'aspect spatial, mais la plupart des mesures sont réalisées à des points fixes, sur une largeur courte, avant d'être extrapolées à la largeur totale.

4.1 Efficacité des échantillonneurs

4.1.1 Valeurs d'efficacité relevées dans la littérature

L'efficacité dépend de nombreux facteurs comme par exemple les propriétés hydrodynamiques du préleveur, les perturbations du lit à sa mise en place, les effets induits par le colmatage du filet lors de l'échantillonnage. Par conséquent il est très difficile de se faire une idée sur l'efficacité des préleveurs à la lecture des différents travaux, étant donné que les résultats sont très variables et souvent contradictoires.

Il y a peu de travaux sur l'efficacité des trappes. Hubell [1964] mentionne une efficacité moyenne de 0.45 pour la trappe Nesper de Einstein, variant de 0.2 à 0.9 en fonction des conditions d'écoulement. La relativement grande dimension des trappes réduit a priori leur impact hydraulique. Cependant les mailles grossières généralement utilisées réduisent leur efficacité à zéro pour les sables et graviers fins. C'est une contrainte forte pour beaucoup de rivières où la charge transportée est souvent fine tant que l'armure de surface ne soit déstabilisée par des crues d'intensité moyenne à forte. Par exemple la Figure

24 présente la taille des sédiments mesurées au Helley-Smith sur 31 rivières de l'Idaho [King et al., 2004; Recking, 2010]. Ce type de mesures n'aurait pas été possible à la trappe.

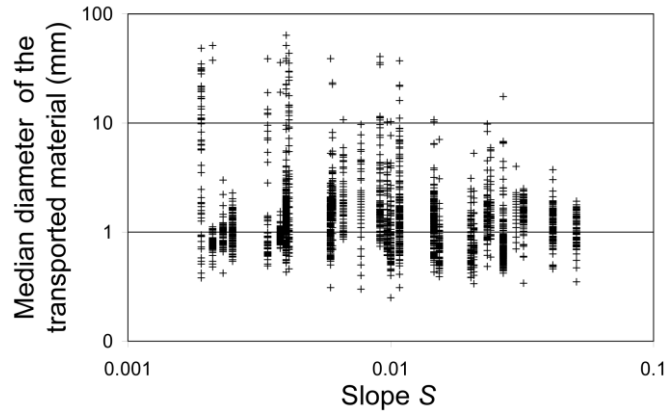


Figure 24: Taille des sédiments transportés sur les rivières de l'Idaho (>3000 valeurs)

Le Helley-Smith standard 76mm (HS 76mm) est certainement l'échantillonneur qui a été le plus étudié. Les premiers tests [Helley and Smith, 1971] ont été réalisés en canal de laboratoire avec du sable de diamètre $D=1.15$ mm, et ont montré une surestimation du charriage de 50%, qui a été expliqué par une efficacité hydraulique > 1 (ratio entre la vitesse entrant dans le préleveur et la vitesse hydraulique ambiante) et par la mise en mouvement des grains du lit lors de l'opération. Emmett [1980] a évalué le Helley-Smith 76mm in-situ par comparaison avec les mesures réalisées avec le préleveur fixe de la East Fork river (dispositif à tapis roulant présenté plus haut, Figure 14). Il a conclu à une efficacité de 1 pour des particules de diamètres compris entre 0.5 et 16 mm (ce qui correspond approximativement à la gamme pour laquelle le préleveur a été développé) et une réduction à 0.7 pour de particules dans la gamme 16 à 32 mm. Le Helley-Smith 76mm a également été testé par Sterling et Church [2002] sur Harris Creek, qui l'ont comparé avec des mesures en trappes fixes de type Birkbeck (Figure 19). Ces mesures indiquent une efficacité supérieure à 1 pour les matériaux plus fins que 0.5 mm (attribué à une partie transportée en suspension), et une diminution de l'efficacité lorsque la taille augmente, jusqu'à atteindre une efficacité nulle pour les diamètres supérieurs à 8mm (alors que des diamètres de 45mm étaient collectés à la trappe), des résultats très différents de ceux obtenus par Emmett [1980]. Sur la Drau, une rivière autrichienne à granulométrie grossière ($D_{50}=65$ mm), Habersack et al. [2001] ont estimé une efficacité de 1 pour le HS 152 mm par comparaison avec des mesures réalisées à la trappe Birkbeck.

Des valeurs d'efficacité ont également été proposées pour les autres échantillonneurs. Pour le préleveur à sable, [Gaweesh and Van Rijn, 1994] proposent à partir de mesures de laboratoire, une efficacité comprise entre 0.8 et 1 (jusqu'à un remplissage du filet à 50%) pour le modèle « Nile » de Delft, et une efficacité de 0.7 à 0.75 a été estimée pour le BTMA Arnhem [Hubbell, 1964; Mclean et al., 1999]. McLean et al [1999] sur la Fraser River ($D_{50}=42$ mm) ont estimé l'efficacité du VuV (Figure 6a) entre 0.3 et 0.6, valeurs moindres que celles initialement proposées [Novak, 1957].

Les exemples précédents indiquent de fortes disparités de l'efficacité, autour de 1, avec une tendance au sur-échantillonnage pour les matériaux sableux ($e > 1$), et une efficacité qui décroît pour les matériaux plus grossiers ($e < 1$). Il paraît assez intuitif que l'efficacité d'un dispositif ne soit pas la même en fonction des conditions hydrauliques et de la taille des sédiments transportés.

Le problème d'utilisation des préleveurs à pression différentielle en présence de matériaux riches en sables a été soulevé par plusieurs auteurs, notamment par *Childers* [1999] qui a comparé 6 préleveurs à pression différentielle. Il considère que l'efficacité hydraulique serait > 1 pour la plupart des préleveurs (avec $1.35 < e < 1.55$), ce qui augmente considérablement la captation des sables. Mais d'un autre côté, il décrit aussi des accélérations des écoulements au contact extérieur de la paroi du préleveur (quel que soit le type utilisé), créant sur les lits sableux des affouillements le long des bordures et une possible déconnexion du charriage avec l'entrée du préleveur. Les instruments mobiles ont également souvent été accusés de déloger des grains du lit lors de leur mise en place (un problème qui n'existe pas a priori avec les trappes fixées au lit avant l'évènement de crue). Ce phénomène est accentué lorsqu'on manipule le préleveur au bout d'un câble, depuis un pont ou un bateau, car une mauvaise maîtrise de sa trajectoire près du lit peut créer un véritable effet de « dragage » du lit [*Hubbell*, 1964]. On verra plus loin comment en pratique remédier à ces effets.

Lorsque le matériau est riche en sable, il est par ailleurs difficile de faire le distinguo entre ce qui relève du charriage et ce qui relève de la suspension, ce qui peut être une autre source d'incertitude dans l'évaluation de l'efficacité [*Hubbell*, 1964]. Cela conduit à des définitions subjectives. Par exemple *Kleinhans et Brinke* [2001] ont considéré comme du charriage tout ce qui est transporté entre le lit et le bord supérieur de l'échantillonneur, la suspension étant ce qui passe au-dessus.

En présence de matériaux grossiers *Vericat et al.* [2006] pointent quant à eux deux sources majeures de dysfonctionnement pouvant expliquer le sous-échantillonnage : le blocage de l'entrée du préleveur par un gros élément (relation entre les dimensions du préleveur et des matériaux transportés) ou un mauvais positionnement au fond sur une surface irrégulière (relation entre les dimensions du préleveur et des matériaux du lit). Pour arriver à ces conclusions ils se sont basés sur les travaux de Emmett [1980] et Sterling et Church [2002], rappelés ci-dessus, la différence majeure entre ces deux cas d'études résidant dans la taille des matériaux du lit : pour Harris Creek le diamètre médian est 75mm (plus de la moitié des matériaux du lit a un diamètre supérieur à la taille de l'entrée du préleveur) alors que sur East Fork, la taille maximale des matériaux du lit est 64 mm ($<$ à la taille du préleveur).

L'efficacité dépend aussi du degré de remplissage du filet (*McLean et al.* mentionnent par exemple les travaux de Meyer-Peter [1937] faisant apparaître une réduction d'efficacité du Arnhem 0.9 à 0.5 en fonction du taux de remplissage). Il faut donc trouver un compromis entre la durée d'échantillonnage suffisante pour capter la variabilité temporelle du charriage, et un remplissage minimum du filet afin de limiter le colmatage. Cela ne peut se faire qu'au cas par cas en fonction de la taille de la maille du filet, de la granulométrie des sédiments transportés (notamment le % de fins) et l'intensité du transport. Ce problème de colmatage impose de travailler avec des mailles grossières lorsqu'on utilise des trappes fixes (Figure 5) qui doivent rester longtemps dans l'eau.

Pour conclure, on peut retenir de ces études que :

- l'utilisation de préleveurs mobiles est délicate pour des lits sableux car le transport de sable est très impacté par l'efficacité hydraulique de l'instrument et les sables sont facilement remis en mouvement lors des manipulations près du lit. L'efficacité des préleveurs pour ces matériaux serait >1 ;
- Pour les matériaux grossiers, l'efficacité serait en général <1 et dépend du ratio entre la taille de l'axe b des sédiments du lit et la plus petite dimension de l'entrée du préleveur ;
- L'efficacité change avec les conditions hydrauliques, l'intensité du transport et le degré de colmatage du filet.

Par contre, toutes les valeurs d'efficacité données dans ce paragraphe ne sont données qu'à titre indicatif et doivent être utilisées avec une extrême précaution puisque, il faut le rappeler, on ne connaît pas les débits solides de référence à partir desquels ces valeurs auraient dû être calculées. Par exemple, si on reconsidère les conclusions de Vericat et al, qui ont comparé l'efficacité du HS76mm sur East Fork et Harris Creek, les calculs ont réalisés dans les deux cas avec des débits solides de référence obtenus par des méthodes différentes (préleveur intégral sur la section pour East Fork et ponctuels sur Harris Creek). C'est pourquoi plusieurs travaux ont d'ailleurs abandonné l'idée de définir avec exactitude ces efficacités, mais ont trouvé plus judicieux de comparer les préleveurs entre eux.

4.1.2 Efficacité relative

Toutes les études indiquent que deux échantillonneurs -même sensiblement- différents ne prélèvent pas la même chose. Par exemple *Gray et al* [1991] ont mesuré une divergence notable (qui sont de l'ordre de grandeur de la mesure) entre des mesures réalisées sur la rivière Colorado avec le HS 76mm et une de ses variante de type BLH84 (dimensions similaires, mais divergent différent, Figure 6), lorsque le débit solide augmente. Childers [1999] a quant à lui comparé 6 échantillonneurs à pression différentielle (2 HS 76*76mm avec des divergents différents, 1 HS 152*152mm, 1 *Toutle River* 1 152*152 mm, 1 *Toutle River* 2 305*152 mm et 1 *Hubell* 5 305*305 mm). Il a échantillonné aux mêmes endroits de la section, successivement, avec chaque instrument. En l'absence de débit solide de référence, il a calculé des ratios à partir des échantillons produits par chaque instrument, qui vont de 0.4 à 5.73. Vericat et al [2006] ont comparé des mesures réalisées simultanément sur la rivière Ebro, avec les HS 76mm et 152 mm. Ils concluent que les deux jeux de données partagent la même enveloppe supérieure, mais que pour un débit donné, jusqu'à un ordre de grandeur pouvait séparer les deux mesures, le HS76mm mesurant des débits moindres et des taille maximum inférieures.

Les différences s'expriment surtout avec l'intensité du transport. Cela a été bien montré par Bunte et al [2008] qui ont comparé les mesures au Helley-Smith 76 mm avec des mesures à la trappe de type « Bunte » (Figure 5). Aux écoulements faibles ils ont mesuré avec le Helley-Smith des tailles de graviers et des flux supérieurs que ceux mesurés à la trappe. Ils l'ont expliqué par une possible déstabilisation des matériaux du lit lors de la mise en place de l'instrument. Ils ont mesuré une convergence des débits solides mesurés par les 2 systèmes aux écoulements les plus forts, mais avec une sous-représentation (de l'ordre de 0.5 à 1 phi) pour les diamètres maximums collectés au Helley-Smith (interprété par la faible taille de l'échantillonneur et la durée courte des prélèvements). Ils concluent de ces mesures que, par comparaison aux préleveurs à pression différentielle standards, les échantillonneurs à ouverture

large, grande capacité de stockage, large taille de maille de filet, longue durée d'échantillonnage, et peu enclins à déstabiliser le lit en place, mesureraient des transports plus faibles aux conditions hydrauliques faibles, et des transports plus importants aux fortes conditions hydrauliques, conduisant à des courbes de tarage $Q_s(Q)$ plus pentues avec les trappes.

S'il semble moins hasardeux de s'intéresser à l'efficacité relative plutôt qu'à l'efficacité effective des préleveurs, l'exercice n'en reste pas moins délicat. Par exemple, *Bunte et al* [2008] ont comparé le HS 76mm équipé d'un filet à maille très fines (0.25 à 1mm) et la trappe *Bunte* équipée de mailles 4mm (pour éviter le colmatage). La comparaison n'a été donc possible qu'en tronquant toutes les mesures et ne conservant que les diamètres supérieurs à 4mm. Cela ne pose pas de problème tant que la fraction fine est négligeable, mais l'opération reste délicate pour les crues faibles, où une majorité des transports concernent des diamètres $< 2\text{mm}$ [Recking, 2010].

4.2 Efficacité des ouvrages fixes construits en travers du cours d'eau

Ces ouvrages sont supposés être les plus efficaces car ils sont fixes dans le lit, ne déstabilisent pas les sédiments en place en début d'opération, et sont a priori transparents du point de vue des écoulements (pas de perturbation de l'hydraulique).

D'après *Milhous* [1973], le Vortex mis en place sur Oak Creek s'est montré efficace pour mesurer des débits solides jusqu'à 150 kg/h (avec des erreurs estimées considérables par contre pour des valeurs inférieures à 5g/h). *Hayward and Sutherland* [1974], qui ont mis au point leur système vortex au laboratoire, estiment une efficacité de piégeage de 90%. Cette efficacité est accrue avec la mise en place du canal secondaire de piégeage en aval du vortex (que *Hayward and Sutherland* recommandent de forme rectangulaire pour une plus grande efficacité).

Milhous [1973] observe cependant qu'une attention particulière devait être portée aux fins de crues, où les écoulements vortex n'étaient pas suffisamment forts pour évacuer les sédiments en place (nécessité d'une intervention « au pied » dans le canal vortex). De la même façon lors des gros événements très transportant, l'efficacité du vortex était maintenue par des actions « au pied » (en marchant dans le canal). L'auteur reconnaît la difficulté de cette intervention en crue, et cela pourrait-être une limitation à l'utilisation de ce dispositif dans des cours d'eau à forte énergie et très forte charge de transport.

Il n'existe pas d'évaluation propre aux fosses Birkbeck. Comme elles ne permettent que des mesures ponctuelles au niveau de chaque fente et sur une durée limitée (au remplissage de la fosse), on peut supposer que, en comparaison avec les ouvrages capturant sur l'intégralité de la largeur avec une évacuation continue des sédiments (vortex, tapis roulant), elles seront moins aptes à capter la variabilité spatiale et temporelle du transport.

Référence	Formule	Commentaire
[Poreh et al., 1970]	$\frac{\lambda}{D_{50}} = 5 \text{ à } 40$	En labo avec $D_{50}=1.9\mu\text{m}$
[Van Rijn, 1984]	$\frac{\lambda}{D} = 3D_*^{0.6}T^{0.9}$ <p>Avec :</p> $D_* = D_{50} \left[\frac{(s-1)g}{v^2} \right]^{1/3}$ $T = \frac{(u^*)^2 - (u_c^*)^2}{(u_c^*)^2}$	Etabli au labo pour des sables $D < 2\mu\text{m}$.
[Luque and Van Beek, 1976]	$\frac{\lambda}{D_{50}} = 16$	Conduite en charge avec $D = 0.9, 1.8 \text{ et } 3.3 \text{ mm}$
[Sekine and Kikkawa, 1992]	$\frac{\lambda}{D} = 3000\tau^{*1/4}(\sqrt{\tau^*} - \sqrt{\tau_c^*})$	Labo billes de verre $D=5\text{mm}$
[Nino and Garcia, 1994; Nino et al., 1994]	$\frac{\lambda}{D} = 2.3\tau^*/\tau_c^*$	Labo, $D= 15 \text{ et } 31 \text{ mm}$
[Lee and Hsu, 1994]	$\frac{\lambda}{D} = 196.3(\tau^* - \tau_c^*)^{0.788}$	Labo, $D=1.36\text{mm et } 2.47 \text{ mm}$
[Hu and Hui, 1996]	$\frac{\lambda}{D} = 27.5 \left(\frac{\rho_s}{\rho} \right)^{0.94} \tau^{*0.9}$	Labo, $D=1.34 \text{ à } 7.6 \text{ mm}$
[Garcia et al., 2000]	$\frac{\lambda}{D} = 9$	
[Wong and Parker, 2006]	$\frac{\lambda}{D} = 44.33(\tau^* - 0.0549)^{-0.47}$	From the MPM flume data
[Einstein, 1950]	$\frac{\lambda}{D} = 100$	Labo

Tableau 5: Différentes formules pour calculer la distance de saltation des grains charriés

Mais quel que soit le dispositif (vortex, fosses à fente) son efficacité sera étroitement dépendante du dimensionnement de la largeur de la zone de piégeage (largeur de la rigole pour le vortex et longueur de la fente pour les fosses). Une partie des grains, et en particuliers les plus grossiers, se déplaçant à forte vitesse par saltations, il faut que la longueur de la zone de capture soit toujours supérieures aux longueurs maximales de saltation.

Parfois cette longueur a été estimée au laboratoire pour le matériau considéré [Milhous, 1973; Leopold and Emmett, 1976]. Par exemple, pour East Fork River, les concepteurs se sont basés sur des expérimentations en laboratoire [Poreh et al., 1970]. Plusieurs formules empiriques ont également été proposées (Tableau 5).

On voit que de nombreuses formulations existent, mais toutes établies en laboratoire à partir de matériaux très fins. Si on applique ces formules au cas d'une rivière à matériaux grossiers, comme par exemple l'Arve, avec un diamètre médian $D_{50} = 6.5$ cm, on obtient des résultats très contrastés quel que soit le débit:

Q (m ³ /s)	5.0	10.0	15.0	20.0
Poreh	2.6	2.6	2.6	2.6
Van Rijn	59.4	152.5	218.7	272.4
Luque & Van Beck	1.0	1.0	1.0	1.0
Sekine & Kikkawa	2.8	8.0	11.9	15.1
Nino Garcia	0.2	0.3	0.3	0.4
Lee and Hsu	0.4	1.0	1.4	1.7
Hu and Sui	0.4	0.5	0.7	0.7
Garcia et al	0.6	0.6	0.6	0.6
Wong Parker 2006	25.0	13.8	11.2	10.0
Einstein	6.5	6.5	6.5	6.5

Tableau 6: Calcul de la distance de saltation λ (m) pour l'Arve ($D_{50}=0.065$ m), pour différents débits

On voit avec cet exemple qu'on ne peut se fier aux formules et qu'un dimensionnement spécifique doit être étudié au cas par cas. Cette question est fondamentale car elle conditionne d'une part l'efficacité de l'outil et d'autre part le coût de l'installation (car plus la fente de réception est longue et plus le génie civil est important). Pour les cours d'eau à sable on peut facilement se permettre de surestimer les distances de saltations tout en restant dans des ouvrages de taille acceptable. Par contre, pour les cours d'eau à granulométrie grossière et forte énergie, les distances de saltations en crue peuvent être très importantes et sont encore très méconnues.

Dans le cas de Oak Creek la seconde rigole intégrée au seuil en aval du seuil vortex, pour piéger les cailloux qui auraient éventuellement « sauté » le canal vortex (« backup trough » sur la Figure 16) aurait

permis de capturer l'intégralité de la charge transportée. Mais d'une façon générale, pour ces préleveurs fixes, la distance de saltation en crue reste un élément d'incertitude important pour les cours d'eau à charge grossière et forte énergie.

D'autres sources d'incertitude existent pour les trappes Birkbeck. On considère que l'essentiel du transport va pénétrer dans la fosse en suivant la direction principale de la fente, et les calculs du transport solide sont rapportés à la largeur de cette dernière. Cela est probablement vrai, en moyenne, pour un cours d'eau à écoulement bien contraint et unidirectionnel. Ce ne sera pas le cas dans les écoulements instables, par exemple dans les morphologies très actives où le lit et la zone de transport évolue en permanence sous l'effet du transport. Dans ce cas l'existence d'un angle (variable) entre la direction de transport et la direction de la fente va directement impacter la zone active de la fente comme indiqué sur la Figure 25a.

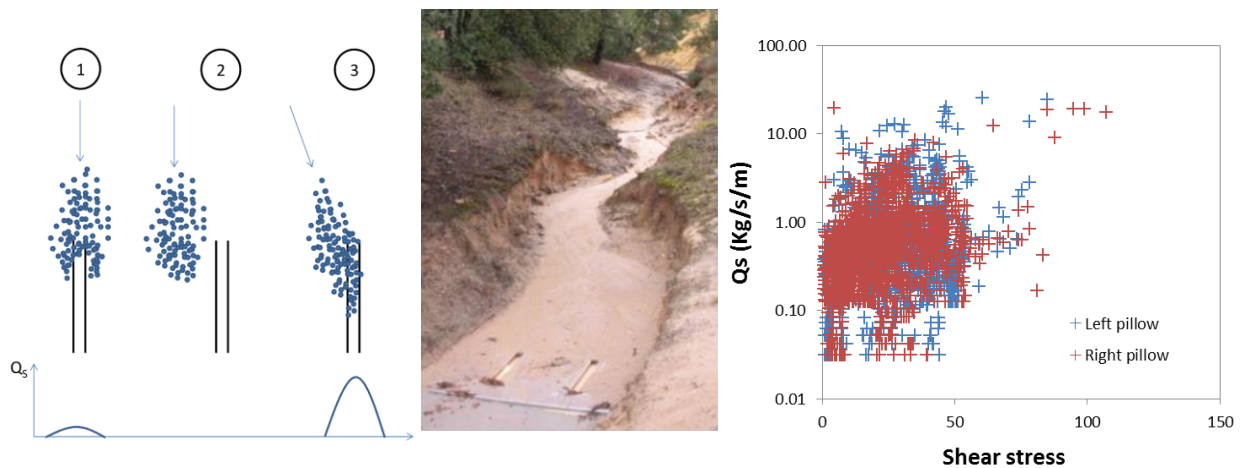


Figure 25: a) Effets d'une variation de l'angle entre la direction de transport et la direction de la fente, b) Trappe sur le Barranca de los Pinos, Espagne et c) la mesure associée à cette trappe

Les Figure 25b montre une trappe installée sur le Barranca de los Pinos, en Espagne [Lucía et al., 2013]. Ce petit cours d'eau à sable et pente forte (de l'ordre de 6%) transporte sous de très faibles hauteurs d'eau et développe des chenaux très instables, ressemblant à de tresses. La forte instabilité des chenaux et son impact au niveau des fentes étaient bien visibles sur les vidéos, et peut expliquer la très forte variabilité du transport solide qui avait alors été mesuré (Figure 25c).

Ce phénomène a également très bien été observé et mesuré par Liébault et al [2016] sur la trappe du Moulin, un petit ruisseau Alpin à pente forte pente sur le site expérimental de Draix. Une amélioration de la mesure avait alors été obtenue en équipant la fente de petites ailettes empêchant les sédiments de pénétrer latéralement.

4.3 Efficacité des nouvelles technologies

Si l'évaluation de l'efficacité des outils standards reste un exercice hautement spéculatif (vu qu'on ne connaît pas le débit de référence qui existe en l'absence du préleveur), l'exercice est encore plus délicat pour les nouvelles techniques de mesures non intrusives, puisqu'elles n'ont pour base de comparaison que les mesures réalisées avec les outils standards [Gray *et al.*, 2010].

5 MISE EN OEUVRE

Cette partie concerne surtout les préleveurs mobiles. Pour les préleveurs fixes, l'importance de l'investissement et son caractère « irréversible » méritent que chaque cas fasse l'objet d'une étude détaillée au cas par cas, en tenant compte des limitations déjà rappelées dans les paragraphes précédents.

5.1 Quel matériel ?

5.1.1 Préleveur

Il ressort de tout ce qui a été rappelé ci-dessus que chaque échantillonneur doit être adapté au type de cours d'eau. Pour les lits à matériaux très fins (sables et inférieurs), le Helley-Smith 76 mm standard peut être utilisé, mais d'autres outils spécifiques à ce type de matériaux sont disponibles. Le Helley-Smith standard 76 mm serait plutôt à réserver aux mélanges sable-graviers- petits cailloux. Pour les rivières à charge grossière, il vaut mieux utiliser le préleveur « Elwha » d'ouverture 102 x 203 mm ou « Toutle » (Version TR1 puis TR2) d'ouverture 305 x 152 mm.

Les travaux de *Vericat et al.* [2006] nous rappellent que plus la taille de l'entrée d'un préleveur est grande et plus son aptitude à échantillonner les sédiments grossiers est grande, mais il en va de même de l'erreur associée à sa mise en place sur une surface irrégulière en cas de forte rugosité. Le choix du préleveur résulte donc d'un compromis prenant en compte :

- la taille (a priori) des sédiments transportés : compatibilité de l'entrée du préleveur avec la capture des diamètres maximums transportés (la taille maximum de l'axe b des sédiments prélevés ne pourra pas dépasser la plus petite dimension de l'entrée du préleveur). La Figure 26 illustre le fait que le préleveur Elwha (ici manipulé à la main depuis un pont) permet de capturer des cailloux de taille centimétrique, mais que son efficacité est limitée à la taille maximum des matériaux transportés. Pour des conditions de transport supérieures, il faudrait utiliser le TR2.
- la taille des sédiments du lit : compatibilité de la largeur de l'entrée du préleveur avec sa mise en place sur le lit. Un dispositif large n'est pas compatible avec un bon placage sur le lit si la rugosité est forte.

Le compromis concerne aussi la mise en œuvre. **Par exemple dans les cours d'eau à forte énergie, les HS de type Elwha manipulés au bout d'une canne peuvent être facilement plaqués au fond, comme discuté au paragraphe suivant. Utiliser un HS TR2 manipulé par câble nécessite qu'il soit équipé d'ailettes (comparer les photos A et B sur la Figure 6) et qu'il soit suffisamment lesté pour se plaquer au fond, ce qui suppose un dispositif lourd et encombrant (Figure 7c).**



Figure 26: Cailloux mesurés au Elwha (monté sur canne et opéré à la main depuis un pont), et exemple de blocage du dispositif

Contrairement aux préleveurs mobiles, qui ne sont maintenus dans l'eau que quelques minutes, les préleveurs fixes mesurent sur de longues durées (jusqu'à 1h). Ils sont donc a priori plus aptes à mesurer les éléments grossiers, qui se déplacent de façon rare et sporadique surtout lorsque l'écoulement est proche des conditions de début de mouvement de cette fraction. Cependant **la manipulation des trappes fixes (type Bunte) impose de pouvoir opérer dans le courant ce qui restreint leur utilisation aux petites crues**. Il n'y a pas vraiment de dispositif à ce jour (à part les fosses de sédimentation naturelles) qui permette de mesurer le transport de sédiment très grossiers lors des fortes crues. Le développement des nouvelles technologies offre des perspectives intéressantes de ce point de vue, à condition de pouvoir les valider.

5.1.2 Maille des filets

La taille des mailles du filet doit également être adaptée à chaque cas. Dans sa comparaison des préleveurs, Childers [1999] a testé plusieurs mailles et a conclu que les mailles de 0.25 mm sont trop sensibles au colmatage. Il n'a pas observé de colmatage avec du 0.5 mm, mais ce problème ayant été rencontré sur d'autres sites par d'autres opérateurs, il a finalement opté pour des mailles de 1 mm.

L'effet de la taille de la maille de filet est bien illustré sur la photo de la Figure 27, où sont représentées les granulométries récoltées au préleveur Toutle2 sur une section de la rivière Isère, avec des mailles de 0.2 et 1.8 mm. Les mesures avec 0.2 mm indiquent une prédominance de fins, ce qui pourrait s'expliquer par un colmatage. A noter sur ces photos, que le prélèvement à 44 m en rive gauche correspond à des matériaux grossiers transportés en direction de la tête de banc située immédiatement en aval de la section de mesure (cet aspect important est rediscuté au paragraphe 6.3 sur le protocole d'échantillonnage).

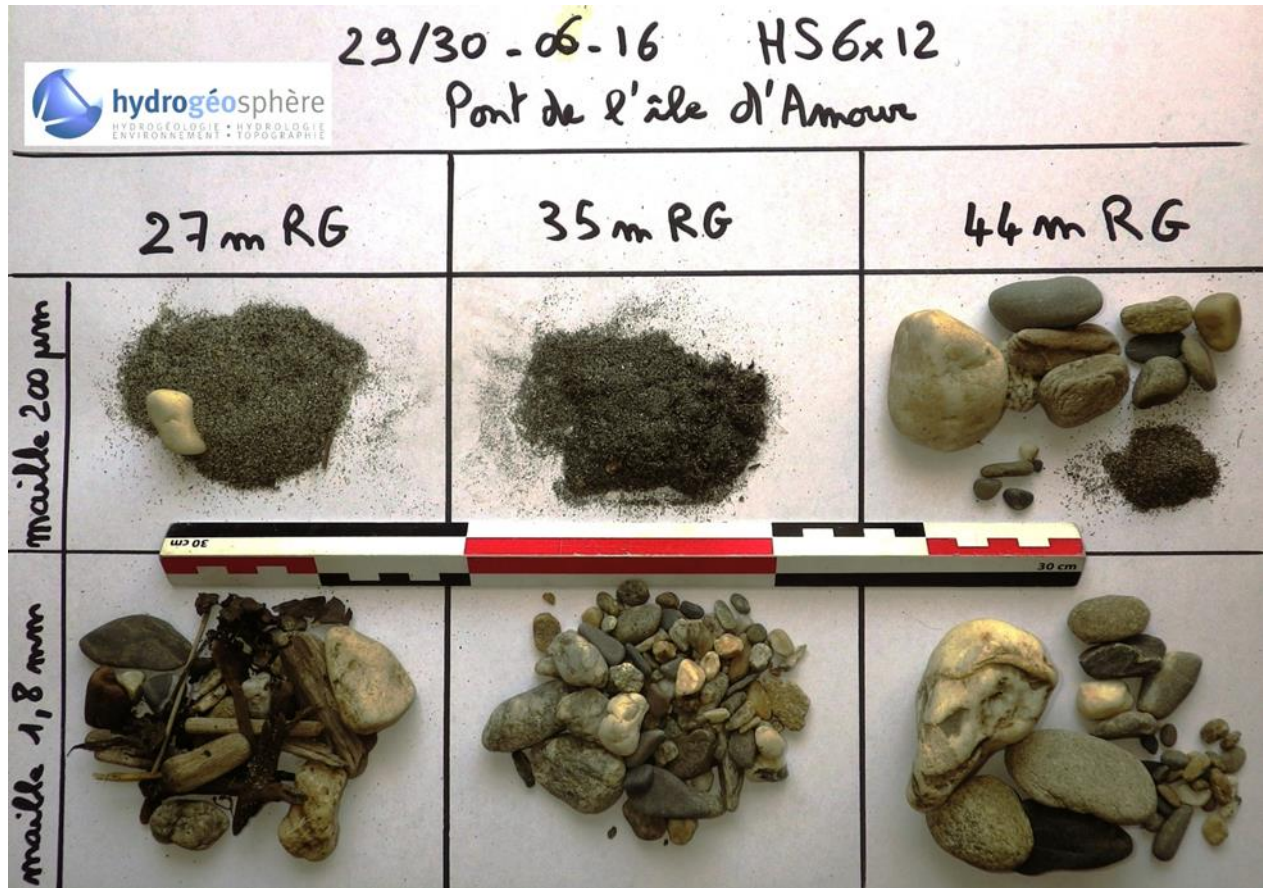


Figure 27: Mesures du charriage sur l'Isère (EDF DTG, Hydrogéosphère, 2016), granulométries récoltées en plusieurs points de la section avec des mailles de 0.2 et 1.8 mm

La taille des mailles de filet ne doit cependant pas être trop grosse car on risquerait alors de manquer une part non négligeable des matériaux transportés lors des crues courantes (Figure 24). Le choix de la taille des mailles du filet résulte donc également d'un compromis (entre le risque de colmatage et de perte d'information sur le transport réel). Il s'agit d'ailleurs là d'une autre limitation des trappes fixes : la contrepartie d'une longue durée de prélèvement est que le filet doit nécessairement avoir des mailles grossières (4 mm pour la trappe « Bunte »), pour éviter le colmatage. On peut pallier à ce problème en doublant la mesure à la trappe par une mesure au Helley-Smith [Bunte et al., 2008].

5.2 Installation et mise en eau

Lorsque le préleveur est disposé au bout d'un câble Hubbell [1964] mentionne le risque de dragage du fond. En effet, lorsque le dispositif descend dans la colonne d'eau, il est soumis à des forces de traînée importantes qui ont tendance à tendre le fortement câble de rappel dans le sens de l'écoulement. A l'approche du fond les champs de vitesse diminuent, et l'échantillonneur aura tendance à remonter le

courant sous l'effet de son propre poids et de l'élasticité du câble. Hubbell considère également que les fluctuations de la turbulence peuvent générer des fluctuations des forces de traînées et des mouvements de va et vient de l'échantillonneur au fond, potentiellement sources de dragages additionnels.

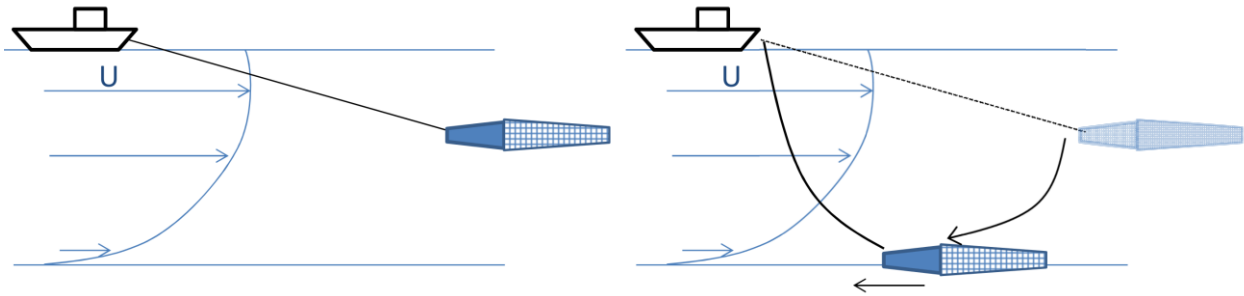


Figure 28: Effet de dragage du fond par l'échantillonneur

La seule solution pour s'affranchir de ces problèmes est de mettre en place un système de câbles de rappels (Figure 29) destinés à maîtriser la trajectoire de l'échantillonneur et sa position au fond pendant la mesure [Childers, 1999]. Idéalement le préleveur doit être posé au fond, horizontal et dans l'axe de l'écoulement (les ailerons étant censés favoriser ce positionnement). Lors de sa comparaison des différents dispositifs, Childers [1999] a conclu que seul le modèle « Toutle » se comportait de façon satisfaisante au sein de l'écoulement même en l'absence de câbles de contrôle.

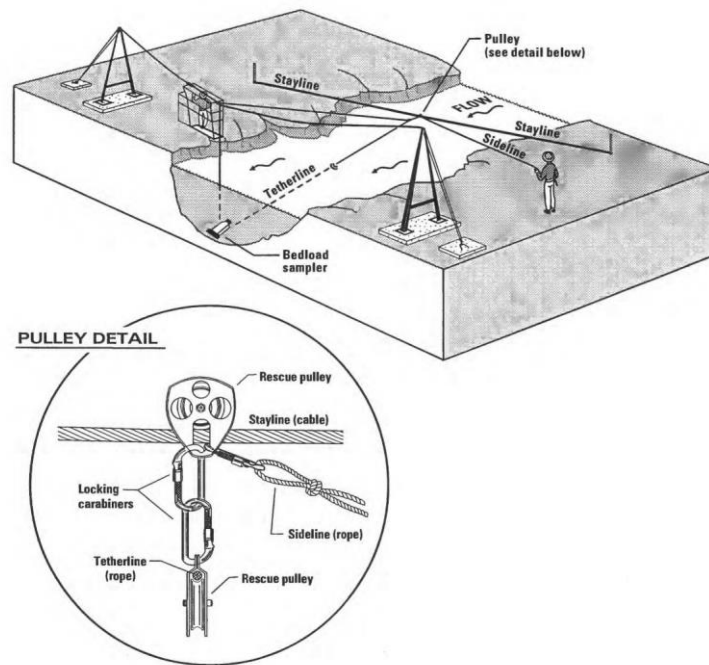


Figure 29: Système de câble de contrôle [Childers, 1999]

L'impact des forces de traînées ne doit pas être négligé également lorsqu'on manipule l'échantillonneur à la main au bout d'une canne rigide, dans un cours d'eau à forte énergie. La canne peut être entraînée hors de sa verticale avant que le préleveur ne touche le fond (Figure 30).

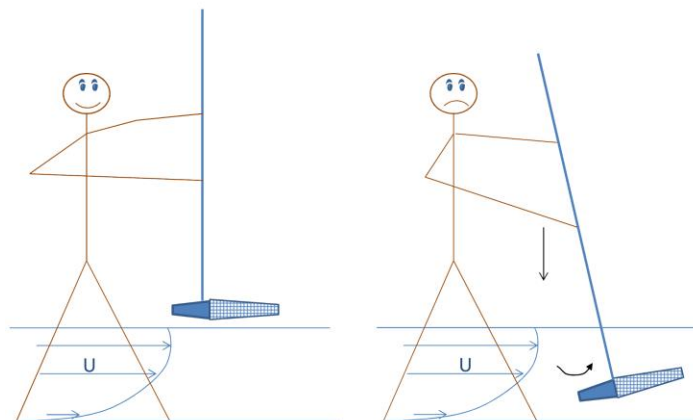


Figure 30: Prélèvement manuel au bout d'une canne rigide

De la même façon que pour les échantillonneurs sur câble, il faut mettre en place un rappel (Figure 31 [Mueller and Pitlick, 2014]) qui permet de maintenir la position de l'échantillonneur sur l'axe vertical, lors des 2 moments cruciaux de la manipulation : la mise en eau et la mise hors d'eau. Le rappel n'est pas nécessaire pendant la mesure, car la force de traînée exercée sur l'échantillonneur plaqué au fond par l'opérateur est faible.



Figure 31: Système de rappel sur câble pour des prélèvements manuels: pendant qu'un opérateur descend le HS dans l'eau, le second opérateur tend un câble relié au HS via une poulie placée sur un autre câble tendu en travers de la rivière ; à l'arrière se trouve un mètre ruban également tendu en travers du cours d'eau pour le repérage de la verticale de mesure (photo John Pitlick).

Ce problème est particulièrement important lorsqu'on opère à la main avec une longue canne depuis un pont, car la recherche d'un poids raisonnable conduit souvent à choisir des cannes en fibre, très souples. Dans ce cas le câble de rappel peut être judicieusement manipulé depuis l'amont du pont (Figure 32).

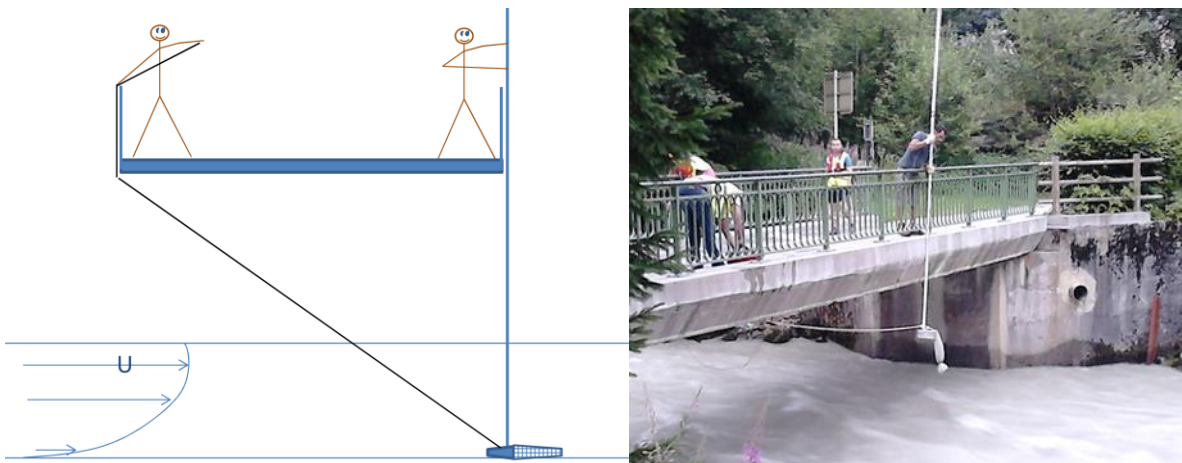


Figure 32: Système de rappel depuis un pont

5.3 Protocole d'échantillonnage

Mettre en place un protocole d'échantillonnage revient à répondre à la question suivante : sur combien de verticales faut-il mesurer, et combien de temps doit durer chaque mesure, pour intégrer la variabilité spatiale et temporelle du charriage?

Ces aspects ont été discutés par *Edwards and Glysson* [1999] (souvent utilisés comme référence) qui commencent par rappeler que « *le type d'échantillonneur utilisé, la méthode d'intégration sur la profondeur, le lieu où les échantillons sont recueillis, et le nombre de verticales nécessaires dépendent des conditions d'écoulement au moment de la mesure, des caractéristiques des sédiments transportés, de la précision recherchée, et des objectifs du programme de mesures* ».

5.3.1 Choix du site

Edwards and Glysson, [1999] rappellent quelques grands principes pour le choix du site.

Le site idéal devrait présenter des caractéristiques hydrologiques et morphologiques stables pour une large gamme de débits. Cependant le choix du site sera le plus souvent imposé par des aspects pratiques (par exemple présence d'un pont pour faire la mesure).

La présence d'autres équipements de mesures peut aussi être un atout à ne pas négliger, et en particulier la présence à proximité d'une station hydrométrique. Lorsque la station hydro est distante du point de mesures du transport solide il peut être intéressant d'installer un limnimètre qui permettra de corriger les débits mesurés à la station.

Les sites sous influence d'un contrôle hydraulique aval sont à éviter, car la loi hauteur débit en serait affectée, et il serait difficile de rattacher une hydraulique à chaque mesure de débit solide.

De la même façon, les sites situés immédiatement en aval d'une confluence peuvent être problématiques, pour l'analyse ultérieure des mesures.

5.3.2 Nombre et répartition des verticales sur la section

Edwards et Glysson, [1999] résument la variabilité du transport sur la section aux quatre situations illustrées schématiquement sur la Figure 33 : répartition A) uniforme, B) constante, C) quasi-périodique, D) aléatoire.

Ce type de variabilité peut facilement se concevoir avec les exemples de La Figure 34, où sont représentés deux cours d'eau à morphologie différente : la figure de gauche correspond à une morphologie de « lit plat » et la figure de droite à une morphologie de « banc alternés ». On peut aisément imaginer que le transport solide ne va pas suivre le même cheminement dans les deux cas, en particulier pour les bancs alternés où le transport sera concentré sur le chenal principal, au moins pour les crues faibles à moyennes.

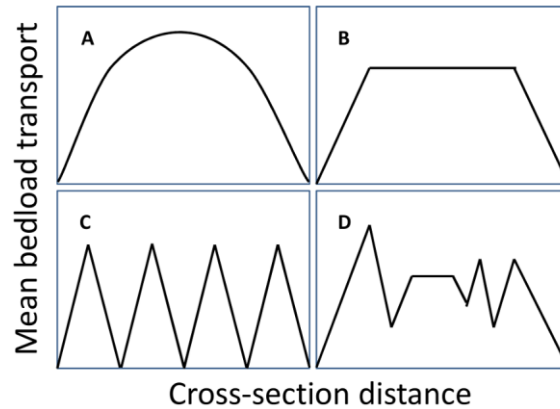


Figure 33: Représentation schématique de 4 exemples de variation du transport sur la section (d'après Edwards et Glysson, [1999])

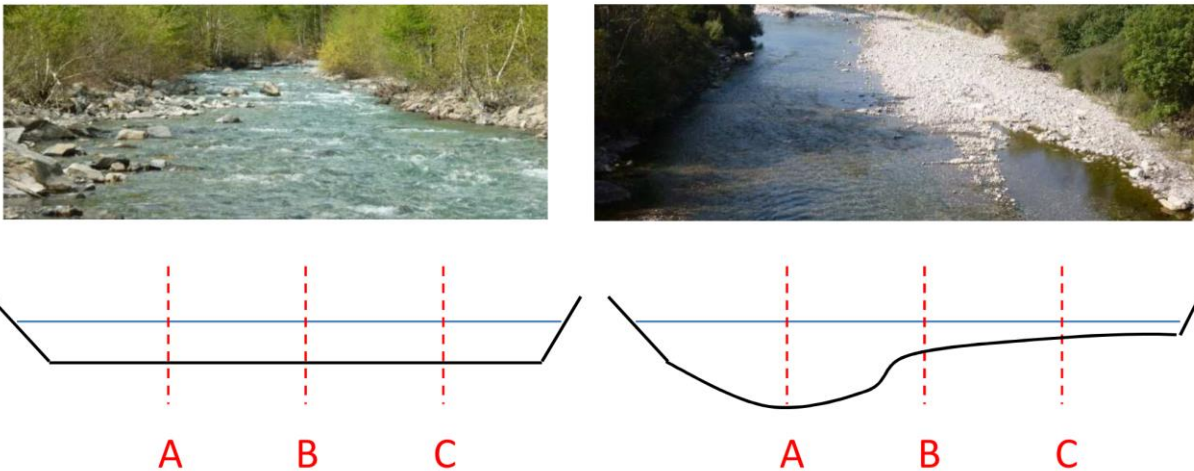


Figure 34: Deux rivières à morphologie différente: a) une morphologie de « lit plat » et b) une morphologie de « bancs alternés » (Photos A Recking)

Pour capturer cette variabilité spatiale (à laquelle il faut ajouter une variabilité temporelle) Edwards et Glysson, [1999] proposent trois méthodes :

- La méthode SEWI (single equal-width-increment) : cette méthode [Emmett, 1980] consiste à découper la section en 20 segments de même longueur et à effectuer 2 passages (40 verticales au total). On effectue un premier passage, d'une berge à l'autre, puis on retourne sur la berge du départ et on effectue le second passage (Figure 35).

- La méthode MEWI (multiple equal-width-increment) : elle consiste à diviser la section en 4 segments (au minimum) de même longueur et à effectuer des mesures sur les verticales d'une berge à l'autre, en répétant l'opération (depuis la même berge) jusqu'à obtenir 40 échantillons.
- La méthode UWI (unequal-width-increment) : elle est identique à la méthode MEWI, mais le découpage de la section correspond à des segments de longueur différente. Dans ce cas, le découpage nécessite une bonne connaissance préalable de la section et de son fonctionnement.

La durée de prélèvement sur chaque verticale doit être maintenue constante pour chaque traversée (mais elle peut être adaptée d'une traversée à l'autre, au cours des 40 prélèvements).

La méthode SEWI porte plus d'attention à la variabilité spatiale sur la section, alors que les méthodes MEWI et UWI portent plus d'attention à la variabilité temporelle. Quelle méthode choisir ? Erhenberger avait conclu que mesurer sur un nombre restreint de verticales mais plus longtemps, produisait des données de meilleure qualité que des mesures sur de nombreuses verticales mais pour des durées courtes [Hubbell, 1964], ce qui militerait pour les méthode MEWI ou UWI. Mais est-ce bien adapté à chaque situation ? Comme on ne sait pas par avance a priori comment se comporte le charriage, Edwards et Glysson, [1999] préconisent, lorsqu'on aborde un site pour la première fois, d'effectuer au moins un SEWI et (au choix) un MEWI ou un UWI, et d'apater ensuite la méthode retenue pour la campagne de mesures au type de variabilité en présence.

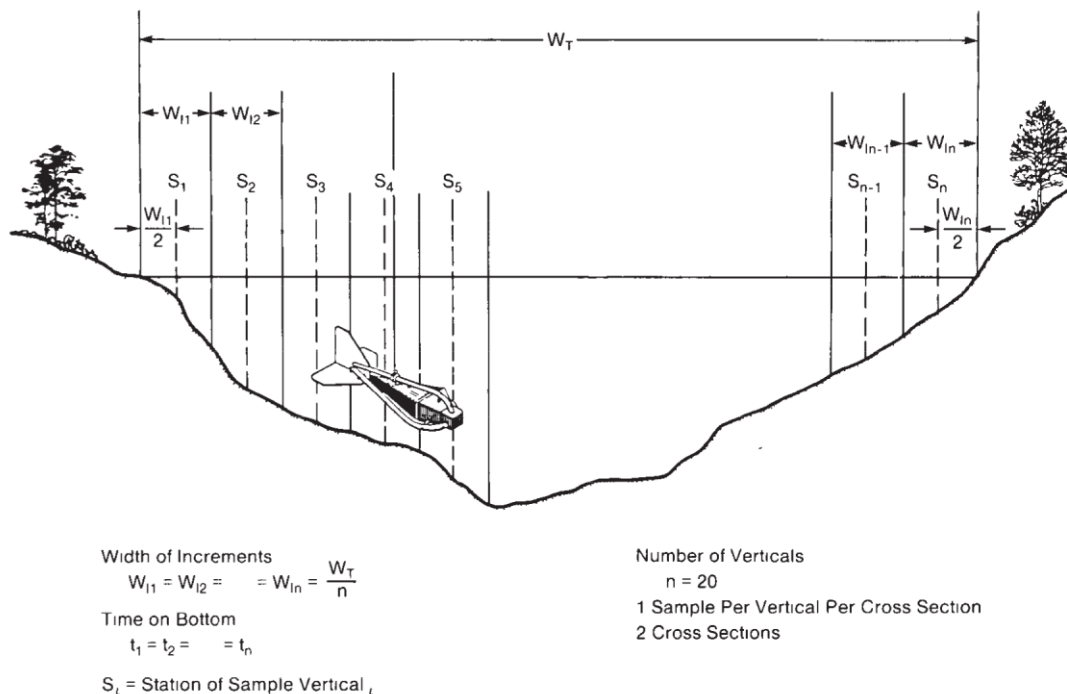


Figure 35: La méthode SEWI (single equal-width-increment) [Edwards and Glysson, 1999]

Cependant multiplier les mesures coûte cher et il est rare de pouvoir mettre en œuvre différents protocoles. C'est pourquoi, le plus souvent un choix doit être fait a priori.

Lorsque les caractéristiques locales sont telles que la veine de transport est bien localisée et restreinte à une petite portion de la section, on peut envisager de restreindre la mesure à quelques verticales (à condition de bien expliquer la procédure de calcul du débit solide total lorsqu'on ramène cette mesure à la section). Cependant le choix d'une mesure locale n'est pas sans risques. Si on reprend l'exemple des bancs alternés sur la Figure 34, une mesure focalisée sur la zone de transport (en A) peut conduire à une perte d'information sur la granulométrie transportée. En effet du fait de la sinuosité, les sédiments les plus grossiers sont transportés à forte vitesse dans la direction de la verticale C (par effet d'inertie) pour aller se déposer sur la tête de banc (Figure 36).

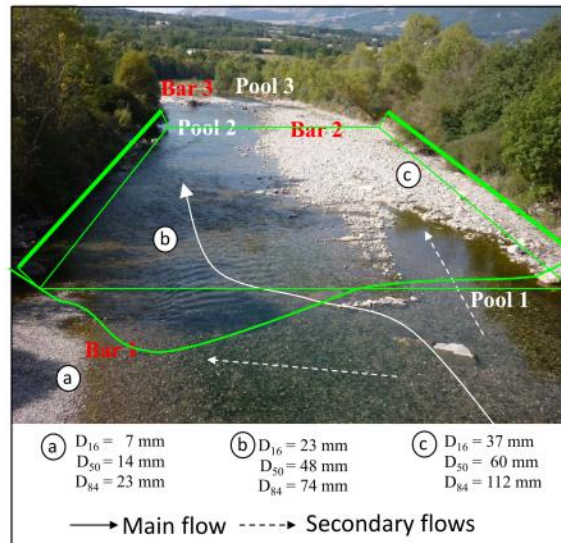


Figure 36: Granulométries mesurées sur les différentes unités morphologiques (le Drac)

Ce phénomène a été bien observé au laboratoire et aussi sur le terrain, par exemple avec les mesures sur l'Isère présentées sur la Figure 27 : l'essentiel du transport localisé dans le chenal principal (photos du milieu) est constitué de matériaux beaucoup plus fins que les matériaux de tête de bancs (photos de droite).

Par ailleurs, des mesures locales impliquent de porter un jugement préalable sur la variabilité spatiale, ce qui est finalement assez subjectif, et peut introduire un biais (entre deux opérateurs, ou d'une section à une autre). **Dans des rivières où le transport est très actif et le lit est très mobile, la veine de transport peut se déplacer latéralement dans la section, et seul un maillage systématique permet de ne pas la manquer. Donc, dans le doute sur la variabilité locale, il est fortement recommandé de rester sur un maillage régulier.**

On peut s'interroger par contre sur le nombre de 40 verticales préconisé pour ces différentes méthodes. *Edwards et Glysson*, [1999] le justifient juste par « l'expérience acquise sur le terrain » sans plus de précision. Il semblerait qu'il soit fait référence aux travaux de Emmet sur la East Fork ; mais on peut concevoir que ce nombre devrait plutôt être adapté à chaque largeur de cours d'eau, et c'est en général des adaptations de la méthode SEWI (nombre de traversées par section et nombre de verticales par traversées) qui sont utilisées [*Ryan et al.*, 2005].

L'adaptation du protocole est vrai pour les petits cours d'eau, mais il est d'autant plus important pour les cours d'eau très larges, où la variabilité est grande [*Powell et al.*, 1995] et où la multiplication des verticales peut vite devenir laborieuse et coûteuse. Par exemple si on considère la méthode SEWI, que valent 40 mesures au HS 76mm sur une rivière de plusieurs centaines de mètre de large (d'autant plus que ces cours d'eau sont souvent des rivières à sables et graviers, où la propagation de dunes augmente la variabilité spatiale et temporelle) ? C'est une question que se sont posés *Kleinhaus et Brinke* [2001] qui ont proposé un protocole d'analyse de l'erreur de mesure et l'ont appliqué à la rivière Waal (largeur 240m). Ils ont finalement conclu que pour les cours d'eau larges la variabilité étant étroitement liée aux conditions hydrodynamiques, la stratégie de mesure (nombre de verticales et leur position) devait être adaptée à chaque situation d'écoulement.

Le protocole de mesures doit donc être adapté à chaque situation. Par contre, quel que soit le protocole retenu, il doit toujours être bien expliqué, et il est également important de toujours bien décrire la section de mesure (largeur en eau, présence d'ouvrages, courbure du tronçon...) et la morphologie du cours d'eau sur la zone d'étude.

5.3.3 Durée des prélèvements

La durée d'échantillonnage est souvent imposée par les conditions locales d'écoulement : propension au colmatage du filet, intensité du charriage et vitesse de remplissage du filet. Par exemple les durées de prélèvement au HS76mm sont en général courtes (0.5 à 2 min). Il est recommandé de respecter un taux de remplissage maximum du filet de 40% afin de ne pas affecter l'efficacité hydraulique [*Edwards and Glysson*, 1999].

Cependant au-delà de ces contraintes pratiques, la durée d'échantillonnage peut influencer la mesure, en particulier pour les cours d'eau à charge grossière où le charriage se produit sous forme de pics, peu fréquents mais apportant l'essentiel du transport (forte variabilité temporelle). Cet effet a été montré par *Bunte et al* [2005] qui ont comparé les résultats de mesures réalisées à la trappe « Bunte » sur une rivière à charge grossière pour des durées 2, 10 et 60 min. Ils montrent que pour les écoulements modérés (50% du débit de plein bord) les mesures sur 2 min sous-estiment le transport mesuré sur les durées 10 et 60 min, dans des rapports 2 et 3 respectivement. Le rapport entre les mesures sur 2 min et 10min passe à 5 pour les mesures au débit de plein bord (la comparaison n'a pas été possible avec la mesure 60 min car l'échantillonneur était plein avant d'atteindre cette durée).

On peut déduire de ces travaux que les effets induits par la variabilité temporelle peuvent être importants (au moins pour certains cours d'eau). Lorsqu'on ne peut échantillonner sur de longues durées, il faut donc répéter la mesure à haute fréquence sur des durées courtes.

La durée d'échantillonnage résulte donc d'un compromis (entre le taux de remplissage maximum et la durée minimum pour capturer le passage des grossiers) et doit donc être adaptée pour chaque situation (par des tests préalables). Cependant, il est recommandé de conserver la même durée pour chaque échantillon prélevé sur une traversée de section [Edwards and Glysson, 1999].

Il est bon de rappeler que mesurer sur une section complète peut prendre du temps, et que par conséquent le temps la mesure doit aussi être compatible avec le maintien de conditions de débit stables. Dans les régimes très transitoires il faudra échantillonner sur des durées courtes.

5.3.4 Calcul du débit solide

Les échantillons collectés doivent être séchés, pesés et tamisés. Lorsque la méthode SEWI est utilisée (où une de ses variantes respectant une égale distance entre les verticales) le débit solide total peut être calculé selon le schéma suivant :

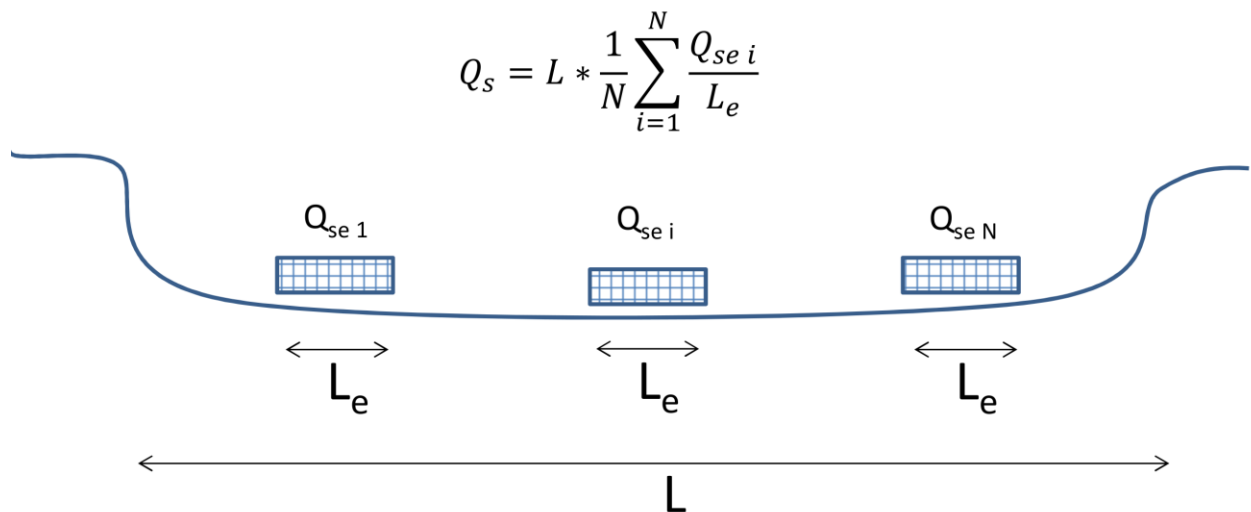


Figure 37: Principe de reconstruction du débit solide sur la section à partir de prélèvements ponctuels

Pour chaque échantillon n° i (i= 1 à N) la mesure locale Qse i en Kg/s est dans un premier temps ramenée à une mesure unitaire qse i en Kg/s/m en divisant la valeur de flux Qse i par la largeur de l'échantillonneur Le. Toutes ces mesures unitaires sont ensuite moyennées pour produire un débit unitaire moyen qs, qui est multiplié par la largeur du cours d'eau L pour donner le débit solide total Qs. La valeur obtenue Qs, dépend de la qualité des échantillons Qse (la durée d'échantillonnage conditionne la représentativité temporelle, le charriage en un point donné pouvant être très fluctuant), mais également des

emplacements des échantillons (si le charriage était principalement localisé entre deux points de prélèvement on rate la mesure).

Si on met à part l'efficacité propre au préleveur (discutée aux paragraphes précédents), l'erreur associée à ce type de mesure (protocole d'échantillonnage et d'extrapolation sur la section) est très difficile à estimer. Des valeurs allant de 35 à 120% ont été simulées par *Edwards et Glysson*, [1999] sur la base d'une modélisation de la variabilité temporelle avec une loi de distribution (de type « Himamori ») et différentes répartitions de la variabilité spatiale sur la section (de uniforme à fortement dissymétrique). Cependant il est très difficile de généraliser ces chiffres car l'erreur est à estimer au cas par cas et met forcément en balance les fréquences (spatiales et temporelles) d'échantillonnage et la variabilité (spatiale et temporelle) naturelle du charriage.

5.3.5 Combien de mesures par section ?

On a largement décrit jusqu'à maintenant la procédure pour faire une mesure de débit solide sur la section. Combien faut-il de mesures pour une section donnée ? Tout dépendra de l'objectif de l'étude. Par exemple *Ryan et Troendle* [1997] estiment que pour les cours d'eau de montagne à charge grossière, il faut au moins 25 couples (Q, QS) pour décrire correctement la relation transport solide sur une section donnée. Au-delà de 25, ils estiment que l'ajout de nouveaux points n'impacte que faiblement la relation.

5.3.6 Quelques exemples de protocoles utilisés dans la littérature



La mesure du charriage en rivière

Rivière	Instrument	D ₅₀	D ₈₄	L (m)	Nombre de verticales	Nombre de traverses	Maillage	Durée /Mesure	Morpho	Référence
Nil	Nile			100	7	25			Rivière à sable	[Gaweesh and Van Rijn, 1994]
East Fork	HS76			15		20	Régulier		Seuil-mouille	[Emmett, 1980]
Sunlight Cr1	Elwha	36	79	18	7 à 9	1	Régulier (2m)	2 à 5 min, constant pour un relevé de section	Seuil-mouille	[Mueller and Pitlick, 2014]
Sunlight Cr4	Elwha	43	95	35	7 à 19	1 à 2	Régulier (2m)	1 à 5 min	Tresse	[Mueller and Pitlick, 2014]
Fall river	HS76	11	20	9	14 à 18	1	Régulier		Seuil-mouille	[Pitlick, 1993]
Little Granite	HS76 , 0.25mm	28	340	9	20	2	Régulier (1ft=30cm)	30 à 60 sec	Lit plat	[Ryan and Emmet, 2002]
Rivières de montagne Colorado	HS 76mm Et Elwha	31 à 218		2 à 17				19 stations mesurées avec la méthode SEWI	Varié	[Ryan et al., 2005]
31 Rivières de l'Idaho	HS76mm HS 152mm M :0.25mm	22 à 210	62 à 550	1 à 100	20	2	Régulier	31 stations mesurées avec la méthode SEWI (mais nb de verticales adapté à la largeur)	Varié	[King et al., 2004]

6 CONCLUSION

On a vu qu'il existe une grande variété de préleveurs. Chacun présente des avantages et inconvénients, et le choix d'un instrument résultera d'un compromis entre les moyens disponibles, les contraintes de site, et les objectifs de l'étude.

Il restera toujours une forte incertitude sur la mesure. On a vu que l'efficacité de ces différents outils, et en particulier des préleveurs à pression différentielle, est très difficile (voire impossible) à évaluer, et qu'au mieux l'efficacité d'un instrument ne sera valable que pour les conditions d'écoulements pour lesquelles elle a été établie.

C'est pourquoi chaque mesure doit être critiquée et utilisée avec prudence. Il sera toujours intéressant de l'inclure dans une stratégie plus globale de compréhension de la mobilité sédimentaire : croisement de différentes méthodes de mesures, analyse historique, analyse géomorphologique.

Les différents protocoles de mise en œuvre et d'échantillonnage ont été présentés et discutés. On peut en conclure qu'il n'y a pas une méthode unique. Chaque situation est à considérer pour ses spécificités et ce sont les objectifs de l'étude, les contraintes locales, et la variabilité spatiale et temporelle supposée du charriage qui vont décider du site de mesure, de l'instrumentation, des conditions de mise en œuvre, du protocole d'échantillonnage (discrétisation spatiale et temporelle de la mesure).

Pour finir, il est très important de garder à l'esprit qu'une mesure de charriage seule ne sert pas à grand-chose, à part à montrer que le charriage existe dans le cours d'eau considéré. Si on veut analyser la dynamique des flux, il faut considérer avec une attention tout aussi grande la mesure des granulométries du lit et de l'hydraulique associée au transport.

7 ANNEXES

7.1 Informations à récolter sur le terrain

Informations générales :

- Référence de la mesure (selon codification à choisir)
- Nom du cours d'eau
- Emplacement (Commune, lieu-dit, Coordonnées...)
- Date
- Nom des opérateurs
- Données collectées en plus du charriage (suspension, hydraulique..)
- Rappel succinct des autres données disponibles (Hydrologie, hydraulique, Granulométrie du lit)

La section de mesure :

- Largeur
- Pente
- Morphologie
- Plan de situation
- Particularités locales (ouvrages, blocs, végétation...)

Protocole de mesure :

- Instrument de mesure
- Modalités de mise en œuvre (dessin si possible)
- Nombre de traversées
- Nombre de verticales par traversée
- Position des verticales
- Durée totale de la mesure (heure début-fin)

Pour chaque verticale :

- Référence (à noter sur le sac échantillon)
- Heure exacte et durée de mesure
- Observation éventuelle sur les conditions de mesure
-

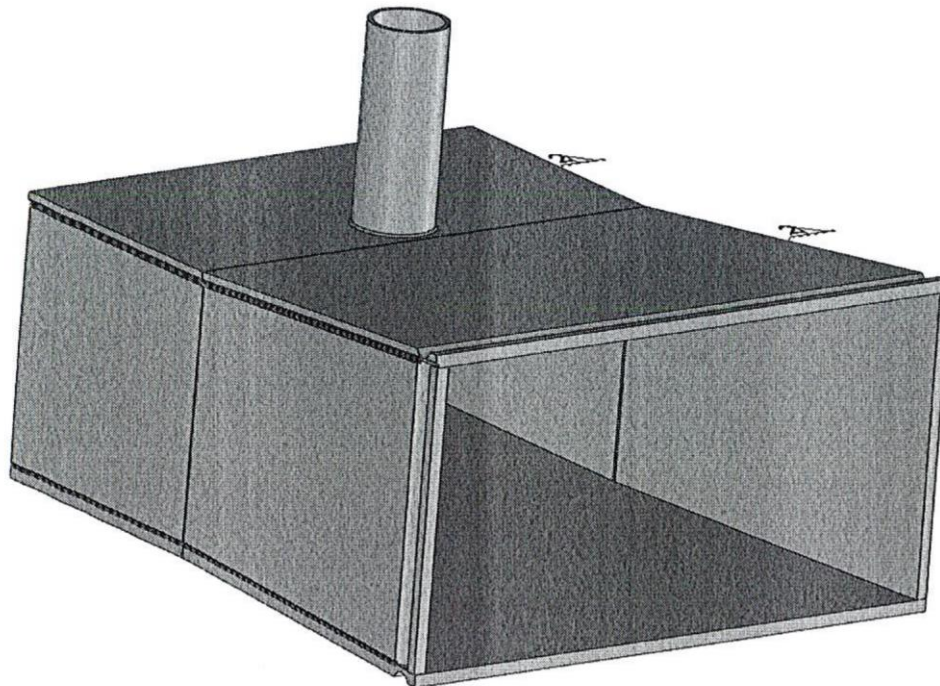
Rappeler ce qui est prévu pour :

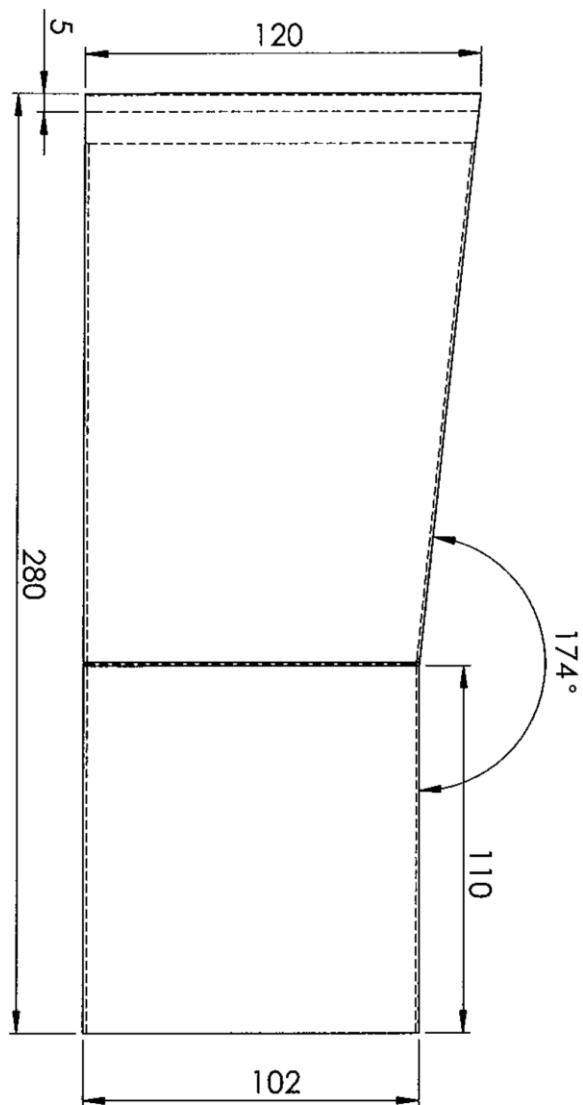
- la granulométrie du lit
- L'hydraulique associée à la mesure du charriage



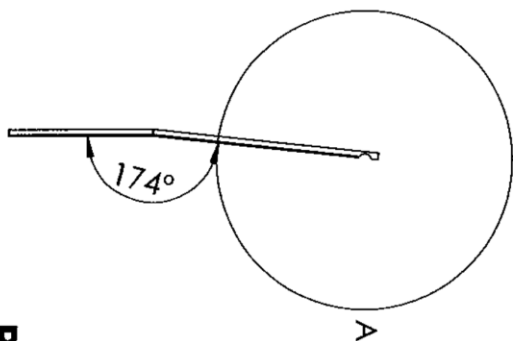
Ne peuvent être dissociés de la mesure du charriage

7.2 Plans du préleveur Elwha

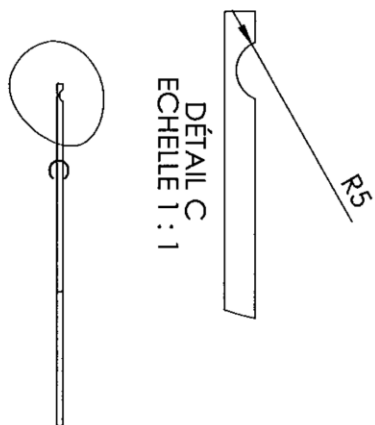
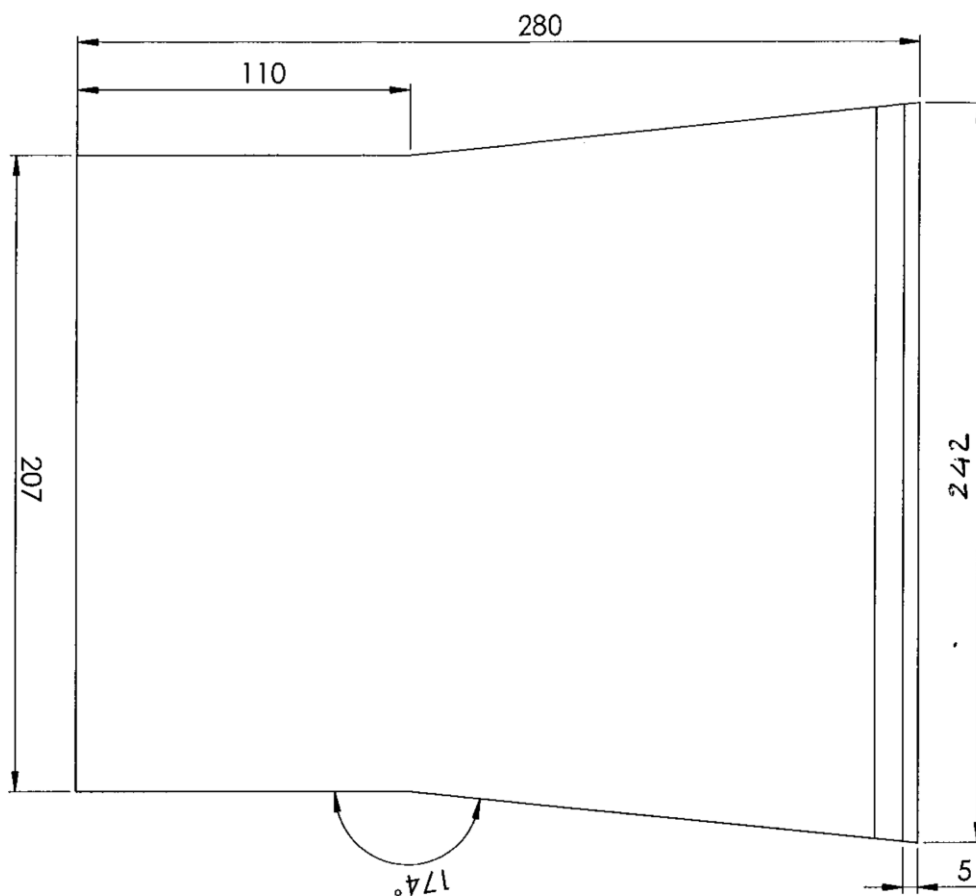




DÉTAIL A
ECHELLE 2 : 5

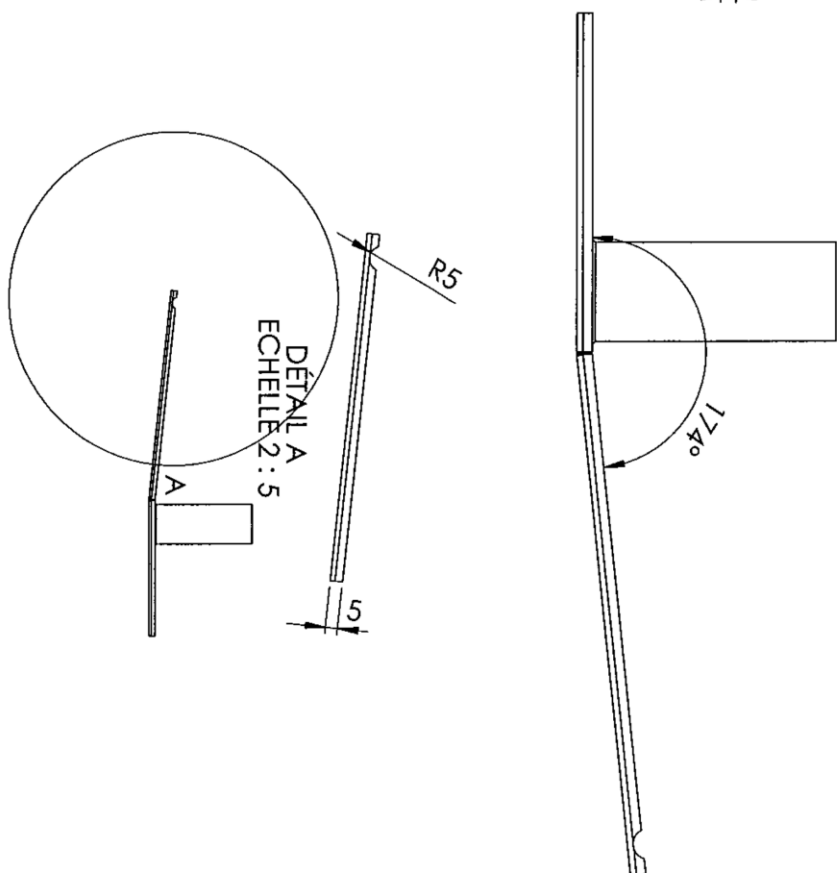
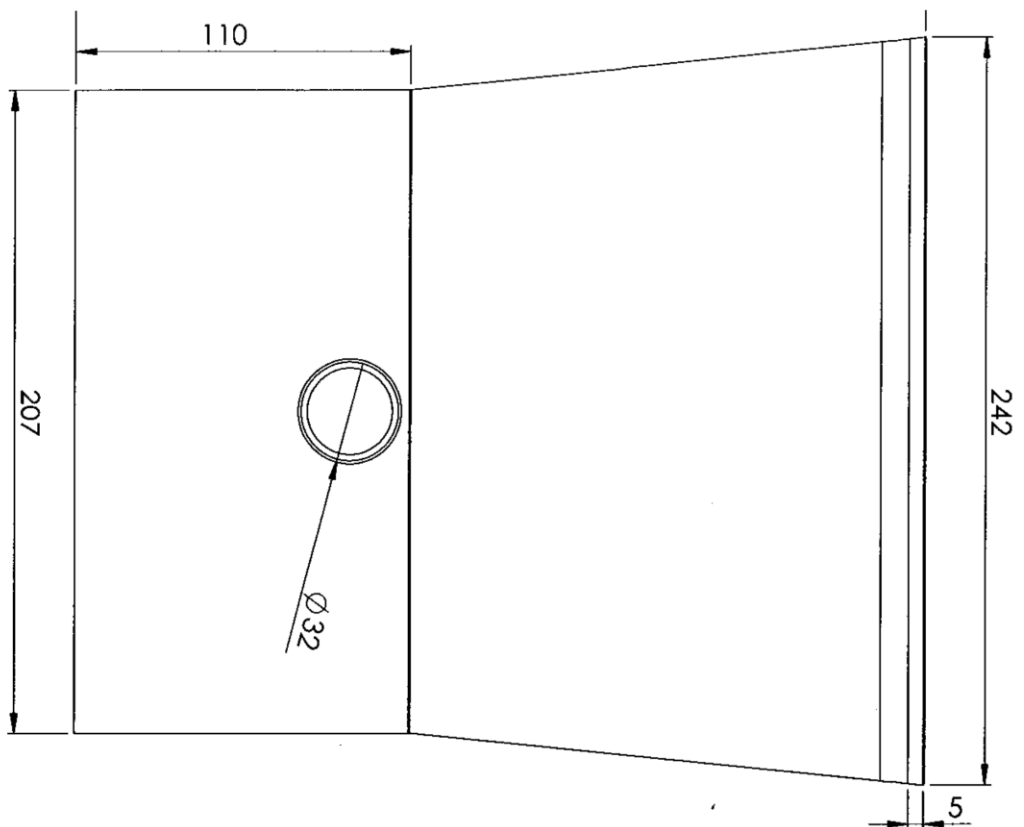


**PLAQUE LATÉRALE
(droite)**



DÉTAIL C
ECHELLE 1 : 1

PLAQUE INFÉRIEURE



PLAQUE SUPERIEURE

8 REFERENCES

- Barrière, J., A. Oth, R. Hostache, and A. Krein (2015), Bed load transport monitoring using seismic observations in a low-gradient rural gravel bed stream, *Geophys. Res. Lett.*, *42*, doi:doi:10.1002/2015GL063630.
- Bunte, K., and S. R. Abt (2005), Effect of sampling time on measured gravel bed load transport rates in a coarse-bedded stream, *Water Resources Research*, *41*(W11405), 12 pp.
- Bunte, K., S. R. Abt, J. P. Potyondy, and K. W. Swingle (2008), A comparison of coarse bedload transport measured with bedload traps and Helley-Smith samplers, *Geodinamica Acta.*, *21*(1-2), 53-66.
- Burtin, A., L. Bollinger, J. Vergne, R. Cattin, and J. L. Nabelek (2008), Spectral analysis of seismic noise induced by rivers: A new tool to monitor spatio-temporal changes in stream hydrodynamics, *Journal of Geophysical Research*, *in press*, 1-15.
- Burtin, A., J. Vergne, L. Rivera, and P. Dubernet (2010), Location of river-induced seismic signal from noise correlation functions, *Geophys. J. Int.*, *182*, 1161–1173.
- Cencetti, C., P. Tacconi, M. Del Prete, and M. Rinaldi (1994), Variability of gravel movement on the Virginio gravel-bed stream (central Italy) during some floods, paper presented at Variability in Stream Erosion and Sediment Transport (Proceedings of the Canberra Symposium December 1994). IAHS Publ. no. 224.
- Chao, W.-A., Y.-M. Wu, L. Zhao, V. C. Tsai, and C.-H. Chen (2015), Seismologically determined bedload flux during the typhoon season, *Scientific Reports*, *5*, 8261, doi:10.1038/srep08261
<http://www.nature.com/articles/srep08261#supplementary-information>.
- Childers, D. (1999), Field Comparisons of six pressure-difference bedload samplers in high-energy flow, *Report*, 59 pp, USGS report N°92-4068.
- Edwards, T. K., and G. D. Glysson (1999), Field methods for measurement of fluvial sediment, in Techniques of Water-Resources Investigations of the U.S. Geological Survey, *Report*, 89 pp, U.S. Geol. Surv., Reston, Va.
- Einstein, H. A. (1944), Bed Load Transportation in Mountain Creek," U.S. Soil Conservation Service, SCS-TP-55, 50pp.
- Einstein, H. A. (1950), The bed-load function for sediment transportation in open channel flows, *Report*, 71 pp, United States Department of Agriculture - Soil Conservation Service, Washington.

Emmett, W. W., R. M. Myrick, and R. H. Meade (1980), Field data describing the movement and storage of sediment in the East Fork River, Wyoming. part 1: River Hydraulics and Sediment Transport, 1979, Denver, Colorado, *Report*, 43 pp, USGS Report N°80-1189.

Erwin, S. O., and J. C. Schmidt (2006), Measurements of Bed Load Transport on Pacific Creek, Buffalo Fork and The Snake River in Grand Teton National Park, Wyoming (Available at: http://repository.uwyo.edu/uwnpsrc_reports/vol30/iss1/5), *Report*, 41 pp, University of Wyoming National Park Service Research Center Annual Report.

Garcia, C., J. B. Laronne, and M. Sala (2000), Continuous monitoring of bedload flux in a mountain gravel-bed river, *Geomorphology*, 34, 23-31.

Gaweesh, M. T. K., and L. C. Van Rijn (1994), Bed-load sampling in sand-bed rivers, *Journal of Hydraulics Engineering*, 120(12), 1364-1384.

Geay, T., P. Belleudy, H. Habersack, J. Aigner, A. Kreisler, H. Seitz, C. Gervaise, and J. Laronne (in review), Passive acoustic monitoring of bedload discharge in a large gravel bed river, *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*.

Gimbert, F., V. C. Tsai, and M. P. Lamb (2014), A physical model for seismic noise generation by turbulent flow in rivers, *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 119, 2209–2238, doi:doi:10.1002/2014JF003201.

GOVI, M., F. MARAGA, and F. MOIA (1993), Seismic detectors for continuous bed load monitoring in a gravel stream, *Hydrological Sciences -Journal- des Sciences Hydrologiques*, 38(2,4), 123-132.

Gray, J. R., J. B. Laronne, and J. D. G. Marr (2010), Bedload-surrogate monitoring technologies: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5091, *Report*, 37 pp, USGS.

Gray, J. R., R. H. Webb, and D. W. Hyndman (1991), Low-flow sediment transport in the Colorado River, paper presented at Fifth Federal Interagency Sedimentation Conference: Las Vegas, Nevada, Interagency Advisory Committee on Water Data, Subcommittee on Sedimentation, accessed March 19, 2010 at http://pubs.usgs.gov/misc/FISC_1947-2006/pdf/1st-7thFISCs-CD/5thFISC/5Fisc-V1/5Fisc1-4.PDF.

Habersack, H., H. P. Nachtnebel, and J. B. Laronne (2001), The continuous measurement of bedload discharge in a large alpine gravel bed river, *Journal of Hydraulic Research*, 39(2), 125-133.

Hayward, J. A., and A. J. Sutherland (1974), The Torelesse stream vortex-tube sediment trap, *Journal of hydrology (NZ)*, 13, 41-53.

Helley, E. J., and W. Smith (1971), development and calibration of a pressure-difference bedload sampler, *Report 8037-01*, 18 pp, USGS, Menlo Park, California.

Hiranandani, M. G. (1943), A method of collection and determination of bed load, *Report*, 114-116. pp, Ann. Rept., Central Board of Irrig., India, pub.



Holmes, R. R. (2010), Measurement of Bedload Transport in Sand-Bed Rivers: A Look at Two Indirect Sampling Methods, *Report*, 236-252 pp, U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5091.

Hsu, L., N. J. Finnegan, and E. E. Brodsky (2011), A seismic signature of river bedload transport during storm events, *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, 38(L13407), doi:doi:10.1029/2011GL047759.

Hu, C., and Y. Hui (1996), Bed-load transport. I: Mechanical characteristics, *Journal of Hydraulic Engineering*, 122(5), 245-254.

Hubbell, D. W. (1964), Apparatus and Techniques for measuring bedload, *Report*, 74 pp, USGS Report N°1748.

King, J. G., W. W. Emmett, P. Whiting, S. T. Kenworthy, and J. J. Barry (2004), Sediment transport data and related information for selected coarse-bed streams and rivers in Idaho, *Report*, 26 pp, (<http://www.fs.fed.us/rm/boise/research/watershed/BAT/>).

Kleinhans, M., and T. Brinke (2001), Accuracy of cross-channel sampled sediment transport in large sand-gravel bed rivers, *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(4), 258-269.

Klingeman, P. C. (1979), Sediment transport research facilities, oak Creek, Oregon, *Report*, USGS.

Laronne, J. B., and I. Reid (1993), Very high rates of bedload sediment transport by ephemeral desert rivers, *Nature*, 366(6451), 148-150.

Lee, H., and I. Hsu (1994), Investigation saltating particle motions, *Journal of Hydraulic Engineering*, 120(7), 831-845.

Leopold, L. B., and W. W. Emmett (1976), Bedload measurements, East Fork River, Wyoming, *Proc. Nat. Acad. Sct. USA*, 73(4), 1000-1004.

Leopold, L. B., and W. W. Emmett (1977), 1976 Bedload measurements, East Fork River, Wyoming, *Proc. Nat. Acad. Sct. USA*, 73(4), 2644 - 2648.

Leopold, L. B., and W. W. Emmett (1997), Bedload and River Hydraulics - Inferences from the East Fork River, Wyoming, USGS Professional Paper 1583, *Report*, 52 pp.

Lewis, W. M. (1991), AN IMPROVED BEDLOAD SAMPLER
<https://www.r5.fs.fed.us/psw/.../lewis/Lewis91.pdf>.

Liébault, F., H. Jantzi, S. Klotz, J. B. Laronne, and A. Recking (2016), Bedload monitoring under conditions of ultra-high suspended sediment concentrations, *Journal of hydrology*, 540, 947-958, doi:doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.07.014.

Liebault, F., and J. B. Laronne (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), 23-34.

Lucía, A., A. Recking, J. F. Martin-Duque, Y. Storz-Peretz, and J. B. Laronne (2013), Continuous monitoring of bedload discharge in a small steep sandy channel, *Journal of Hydrology*.

Luque, R. F., and R. Van Beek (1976), Erosion and transport of bed-load sediment, *Journal of Hydraulic Research*, 14(2), 127-144.

McLean, D. G., M. Church, and B. Tassone (1999), Sediment transport along lower Fraser River, 1, Measurements and hydraulic computations, *Water Resources Research*, 35(8), 2533-2548.

Milhaus, R. T. (1973), Sediment transport in a gravel-bottomed stream, 232 pp, PhD thesis, Oregon State University, Corvallis.

Mueller, E. R., and J. Pitlick (2014), Sediment supply and channel morphology in mountain river systems: 2. Single thread to braided transition, *Journal of Geophysical Research*, 119, 1516-1554.

Nanson, G. C. (1974), Bedload and suspended-load transport in a small, steep, mountain stream, *Am. J. Sci*, 274, 471-486.

Nino, Y., and M. H. Garcia (1994), Gravel saltation, 2, Modeling, *Water Resources Research*, 30(6), 1915-1924.

Nino, Y., M. H. Garcia, and L. Ayala (1994), Gravel saltation, 1, Experiments, *Water Resources Research*, 30(6), 1907-1914.

Pitlick, J. (1993), Response and recovery of a subalpine stream following a catastrophic flood, *Geological Society of America Bulletin*, 105, 657-670.

Piton, G., and A. Recking (2017), The concept of “travelling bedload” and its consequences for bedload computation in mountain streams, *Geomorphology*.

Poreh, M., A. Sagiv, and I. Seginer (1970), Sediment sampling efficiency of slots, *American Society of Civil Engineers, Journal of the Hydraulics Division*, 96(HY5), 2065-2078.

Powell, D. M., I. Reid, J. B. Laronne, and L. E. Frostick (1995), Crossstream variability of bed-load flux in narrow and wider ephemeral channels during desert flash floods, paper presented at Proc., 4th Int. Workshop on Gravel-Bed Rivers.

Recking, A. (2010), A comparison between flume and field bedload transport data and consequences for surface based bedload transport prediction, *Water Resources Research*, 46, 1-16.

Recking, A. (2013), An analysis of non-linearity effects on bedload transport prediction, *Journal of Geophysical Research - Earth Surface*, 118, 1-18.

Recking, A., F. Liébault, C. Peteuil, and T. Jolimet (2012), Testing several bed load transport equations with consideration of time scales, *Earth Surface Processes and Landforms*.

Reid, I., and L. E. Frostick (1986), Dynamics of bedload transport in Turkey Brook, a coarse-grained alluvial channel, *Earth Surface Processes and Landforms*, 11, 143-155.

Rennie, C. D., R. G. Millar, and M. A. Church (2002), Measurement of bedload velocity using an acoustic Doppler current profiler, *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(5), 473-483.

Rickenmann, D., and B. Fritschi (2010), Bedload transport measurements using piezoelectric impact sensors and geophones, *Report*, 407-423 pp, USGS Report 2010-5091 (on-line).

Rickenmann, D., and B. W. McCardell (2007), Continuous measurement of sediment transport in the Erlenbach stream using piezoelectric bedload impact sensors, *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 1362–1378.

Roth, D. L., E. E. Brodsky, N. J. Finnegan, D. Rickenmann, J. M. Turowski, and A. Badoux (2016), Bed load sediment transport inferred from seismic signals near a river, *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 121, 725–747 doi:doi:10.1002/2015JF003782.

Roth, D. L., N. J. Finnegan, E. E. Brodsky, K. L. Cook, C. P. Stark, and H. W. Wang (2014), Migration of a coarse fluvial sediment pulse detected by hysteresis in bedload generated seismic waves, *Earth and Planetary Science Letters*, 404, 144–153.

Ryan, S. E., and W. W. Emmet (2002), The Nature of Flow and Sediment Movement in Little Granite Creek Near Bondurant, Wyoming, *Report*, 48 pp, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

Ryan, S. E., L. Porth, and C. Troendle (2005), Coarse sediment transport in mountain streams in Colorado and Wyoming, USA., *Earth Surface Processes and Landforms*, 30, 269-288.

Ryan, S. E., and C. A. Troendle (1997), Measuring bedload in coarse-grained mountain channels: procedures, problems, and recommendations, *American Water Resources Association*, 949-958.

Sekine, M., and H. Kikkawa (1992), Mechanics of saltating grains, *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(4).

Simons, D. B., E. V. Richardson, and C. F. Nordin (1965), Bedload equation for ripples and dunes, *Report*, 9 pp, Geological Survey Professional paper 462-H.

Sterling, M. S., and M. Church (2002), Sediment trapping characteristics of a pit trap and the Helley-Smith sampler in a cobble gravel bed river, *Water Resour. Res.*, 38(1144), 1-19.

Tacconi, P., and P. Billi (1987), Bedload transport measurements by the vortex-tube trap on Virginio Creek, Italy, in *Sediment transport in gravel bed rivers*, edited by C. R. Thorne, Bathurst, J.C., Hey, R.D., pp. 583-606, John Wiley & Sons Ltd, Chichester.

Turowski, J. M., D. Rickenmann, and S. J. Dadson (2010), The partitioning of the total sediment load of a river into suspended load and bedload: a review of empirical data, *Sedimentology*, 1-21.

Van Rijn, L. C. (1984), Sediment transport, Part I: Bedload transport, *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(10), 1431-1457.

Van Rijn, L. C., and M. Gaweesh (1992), A New Total Load Sampler, *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(12).

Vericat, D., and R. Batalla (2010), Sediment transport from continuous monitoring in a perennial Mediterranean stream, *Catena*, 82, 77-86.

Vericat, D., M. Church, and R. J. Batalla (2006), Bedload bias: comparison of measurements obtained using two (76 and 152 mm) helley-Smith samplers in a gravel bed river, *Water Resour. Res.*, 42(W01402), 1-13.

Whitaker, A. C., and D. Potts (2007), Coarse bed load transport in an alluvial gravel bed stream, Dupuyer Creek, Montana, *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(13), 1984-2004.

Wong, M., and G. Parker (2006), Re-analysis and correction of bed load relation of Meyer-Peter and Muller using their own database, *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(11), 1159-1168.