



**HAL**  
open science

## Interactions entre flux en suspension et lit d'une riviere alluviale alpine – cas de La Séveraisse

Clément Misset, Alain Recking, Cédric Legout, Sébastien Zanker, Alain Poirel

### ► To cite this version:

Clément Misset, Alain Recking, Cédric Legout, Sébastien Zanker, Alain Poirel. Interactions entre flux en suspension et lit d'une riviere alluviale alpine – cas de La Séveraisse. LHB Hydroscience Journal, 2021, 107 (1), pp.1914467. 10.1080/00186368.2021.1914467 . hal-04051677

**HAL Id: hal-04051677**

**<https://hal.inrae.fr/hal-04051677>**

Submitted on 30 Mar 2023

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



## Interactions entre flux en suspension et lit d'une rivière alluviale alpine – cas de La Séveraisse

Clément Misset, Alain Recking, Cédric Legout, Sébastien Zanker & Alain Poirel

To cite this article: Clément Misset, Alain Recking, Cédric Legout, Sébastien Zanker & Alain Poirel (2021) Interactions entre flux en suspension et lit d'une rivière alluviale alpine – cas de La Séveraisse, LHB, 107:1, 1-9, DOI: [10.1080/00186368.2021.1914467](https://doi.org/10.1080/00186368.2021.1914467)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/00186368.2021.1914467>



© 2021 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group.



Published online: 20 May 2021.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 734



View related articles [↗](#)

# Interactions entre flux en suspension et lit d'une rivière alluviale alpine – cas de La Séveraisse

Clément Misset<sup>a</sup>, Alain Recking<sup>a</sup>, Cédric Legout<sup>b</sup>, Sébastien Zanker<sup>c</sup> and Alain Poiriel<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Université Grenoble Alpes, INRAE, ETNA Grenoble, France ; <sup>b</sup>Université Grenoble Alpes, IGE, Grenoble, France ; <sup>c</sup>EDF, DTG, Grenoble, France

## RESUME

Le transport solide par suspension représente une part importante des flux solides transportés dans la plupart des cours d'eau. Cependant, le transfert de ces particules fines reste mal connu en contexte alpin, malgré de forts enjeux environnementaux (transfert de polluants, colmatage interstitiel, végétalisation des cours d'eau) ou industriels liés à la gestion sédimentaire des retenues (sûreté et production d'énergie). L'objectif de cette étude était de quantifier les interactions entre les flux en suspension et le lit d'un cours d'eau alpin typique, à savoir la Séveraisse dans le Massif des Ecrins. Un bilan sédimentaire à court terme a été appliqué sur un tronçon de 3.5 km en utilisant des mesures à haute fréquence de flux en suspension. Parallèlement, une quantification exhaustive du transport par charriage a été réalisée. Les données révèlent un effet tampon significatif du tronçon sur les flux en suspension durant les deux mois de mesure. Elles indiquent aussi que les conditions d'initiation du transport par charriage ont évolué conjointement avec les conditions de remobilisation des sédiments fins. L'ensemble de ces observations ont d'importantes implications sur notre compréhension du transfert de particules fines en rivières alpines et notre capacité à le modéliser.

## MOTS CLES

Transport solide ;  
suspension ; charriage ;  
érosion ; dépôt ; rivières  
alpines

## KEYWORDS

Sediment transport;  
suspended load; bedload;  
erosion; deposition; alpine  
rivers

## Interactions between suspended load and the riverbed of an Alpine river – La Séveraisse

### ABSTRACT

Suspended load often represents the most significant fraction of sediment load in rivers. The transfer of these fine particles produced on hillslopes and transported through the river system is poorly understood in Alpine rivers. However, fine particles transport is associated with social, economic, and ecological issues such as pollutant transfer, riverbed clogging, vegetation growth, or reservoir siltation. In this context, the objective of this study is to characterize the interactions between suspended load and the riverbed of La Séveraisse (Ecrins Massif), a typical Alpine river. To this aim, we applied a short-term sediment budget approach based on high frequency suspended load measurements on a 3.5-km reach. In addition, we measured bedload transport through direct sampling. The results indicate that suspended load is significantly buffered in the studied reach during the two-month campaign. Moreover, conditions leading to the mobility of coarse particles were found to evolve concomitantly with conditions leading to fine particle mobilization. These observations bring new insights in understanding the transfer of suspended material in Alpine rivers.

## 1. Introduction

Les rivières alpines, caractérisées par des pentes élevées, une granulométrie grossière et une forte connectivité des sources de versants, transportent de grandes quantités de sédiments fins en suspension dans l'écoulement (Mano et al., 2009 ; Vanmaercke et al., 2011). Ces flux sont associés à des enjeux socio-économiques et environnementaux importants (Owens et al., 2005). Les particules fines sont des vecteurs d'éléments chimiques comme de la matière organique ou des nutriments, essentiels pour les écosystèmes marins et estuariens (Le Pape et al., 2013) ainsi que des polluants tels que des métaux lourds ou des polychlorobiphényles (PCBs) générant

des problèmes importants de ressource en eau et de gestion des dépôts contaminés (Walling et al., 2003). Les sédiments fins transportés par suspension peuvent colmater le lit des rivières, dégradant ainsi le milieu aquatique, en particulier les zones de frayères (Armstrong et al., 2003). Cette sédimentation est problématique pour les gestionnaires d'ouvrages hydroélectriques qui sont confrontés à la perte de capacité de leurs retenues, à des problématiques environnementales ainsi qu'à des questions de sûreté des aménagements. Les dépôts successifs de sédiments fins favorisant la fixation des bancs de galets peuvent également avoir un impact sur le risque d'inondation. Dans ce contexte, prévoir les flux en suspension et la manière dont les sédiments fins sont transportés dans

le lit des cours d'eau est un besoin essentiel pour tout gestionnaire de rivière, en particulier dans les Alpes. Une des difficultés rencontrées est de déterminer à quel point les particules en suspension interagissent (dépôt/érosion) avec le lit de rivière au cours de leur transfert.

Cette question est devenue centrale pour les hydrologues et les géomorphologues travaillant sur les flux en suspension, notamment depuis les travaux pionniers d'Einstein et al. (1940) sur la rivière Enoree. Ils furent parmi les premiers à proposer une distinction des flux sédimentaires selon la provenance des sédiments et leur « degré d'interaction avec le lit ». Ils proposèrent ainsi de différencier la charge en suspension ayant des interactions fortes avec le lit « Suspended bed-material load » de la charge en suspension transitant dans la rivière sans véritablement interagir avec le fond du lit « Wash load ». Cette classification fut par la suite reprise par de nombreux auteurs (Partheniades, 1977 ; Wang and Ditttrich, 1992). Cependant, la question reste complexe en contexte alpin où les sources de versants peuvent être proches et bien connectées au réseau hydrographique et où certains cours d'eau ont des morphologies alluviales propices aux processus de stockage/déstockage des matières en suspension. Des études récentes sur le terrain (Navratil et al., 2010 ; Park and Hunt, 2017) et en laboratoire (Hill et al., 2017 ; Mooneyham and Strom, 2018) suggèrent que des processus d'infiltration et de resuspension ont lieu dans le lit de ces cours d'eau alpins et que ces processus peuvent être significatifs à l'échelle du bassin versant. Bien que mal connus, ces échanges avec le lit sont souvent représentés conceptuellement par un réservoir de stockage/déstockage (Mano, 2008 ; Park et al., 2019 ; Park and Hunt, 2018). La prise en compte des échanges avec le lit permet d'améliorer significativement la prédiction des modèles conceptuels calibrés sur des mesures.

Les observations directes des processus de stockage/reprise de sédiments fins existent mais sont relativement rares en contexte alpin. Certaines se sont focalisées sur des zones proglaciaires (Guillon et al., 2018 ; Orwin and Smart, 2004), d'autres sur de grands linéaires de rivières aménagées (Antoine et al., 2020). La présente étude apporte de nouvelles observations à de courtes échelles temporelles et spatiales de ces processus de dépôt/reprise de sédiments fins dans un cours d'eau alpin alluvial non anthropisé. La finesse de ces échelles d'analyses permet d'identifier l'influence des différentes grandeurs hydrosédimentaires sur les processus de stockage/reprise, ce qui constitue une avancée par rapport aux études antérieures. Les observations conjointes sur la mobilité des sédiments grossiers améliorent également notre compréhension des interactions entre les flux en suspension et le lit des rivières alpines.

Cet article présente en premier lieu le site d'étude et les méthodes employées. Les observations réalisées (dynamique des flux, bilan sédimentaire, etc.) sont ensuite décrites dans une seconde partie puis discutées par rapport à l'état de l'art. Une réflexion sur la modélisation des flux en suspension est finalement proposée avant de conclure.

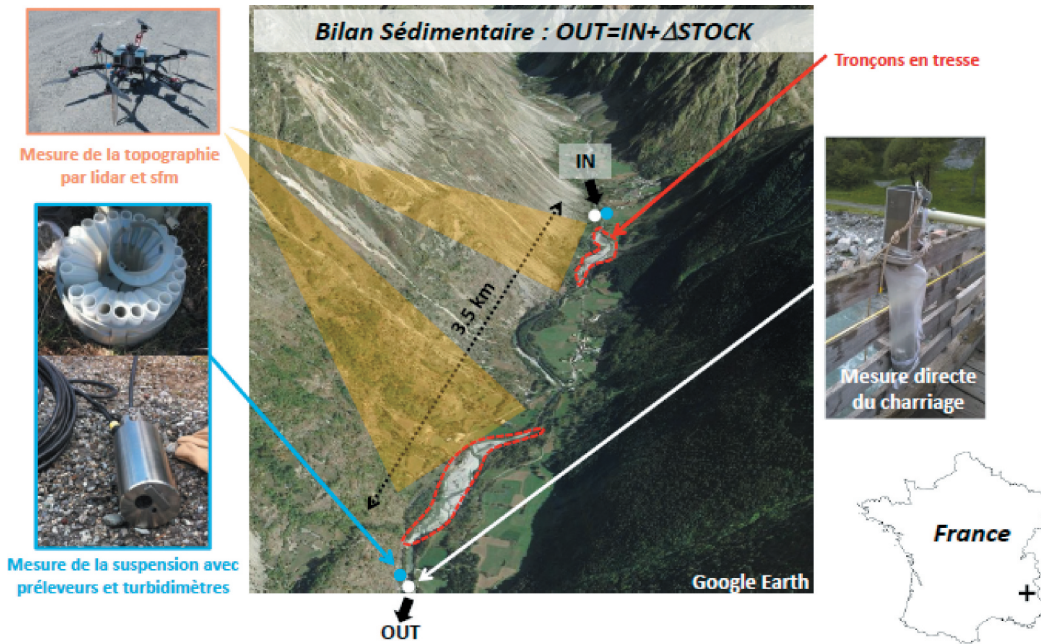
## 2. Méthode

### 2.1. Présentation du site

Le site choisi est un tronçon de 3,5 km de la Séveraisse situé dans les Ecrins, qui englobe une succession de zones contraintes latéralement (10 à 20m de large) et de zones de tressage (50 à 90m de large, Figure 1). La pente du tronçon varie entre 1 à 2%, avec une moyenne de 1,5%. Le lit est composé de graviers en surface (le diamètre médian ( $D_{50}$ ) et le 84<sup>ième</sup> percentile ( $D_{84}$ ) sont de 50 mm et 100 mm, respectivement, dans les zones non contraintes latéralement et de 110mm et 300mm dans les zones contraintes) tandis que les sédiments en suspension ont une taille médiane de l'ordre de 0.180 mm. A la station aval, le bassin versant a une surface de 130km<sup>2</sup> et draine de nombreuses zones en érosion. L'hydrologie du cours d'eau est fortement influencée par la neige (altitude maximum de 3579m NGF). On observe généralement une période de hautes eaux durant la fonte (fin avril à fin juin). Cette période a été choisie pour réaliser cette campagne de mesure afin de garantir l'observation d'une gamme de débit étendue. Cette période présente également l'intérêt de mieux comprendre le transfert de sédiments fins durant les évènements de fonte qui représentent pour ce type de bassin alpin une fraction significative (de l'ordre de 30 à 40%) des flux annuels (Mano et al., 2009). Enfin, le tronçon étudié de la Séveraisse peut être considéré comme représentatif de nombreuses rivières alpines non anthropisées avec alternances entre un lit alluvial large et des secteurs contraints latéralement. D'un point de vue de la taille des sédiments en suspension, les limons et les sables sont les fractions majoritaires tandis que les très fines particules (argiles, limons fins) sont moins représentées.

### 2.2. Approches et protocoles utilisés

Afin de caractériser le transfert des sédiments en suspension dans ce tronçon et leurs potentielles interactions avec le lit de la rivière, le protocole présenté en Figure 1 a été appliqué. Les flux entrant et sortant du tronçon ont été mesurés par une combinaison de prélèvements ponctuels directs et de mesures indirectes continues durant la période de



**Figure 1.** Tronçon étudié et instrumentation utilisée. Note : « Out » correspond à la masse sortant du système, « In » correspond à la masse entrant dans le système, «  $\Delta$ Stock » correspond à un changement de stock dans le système sur la durée considérée.

fonte de mai à juin 2018: préleveurs automatiques et turbidimètres pour la suspension, préleveur à pression différentielle pour le charriage. Combinées aux séries temporelles de débits liquides, ces mesures ont permis de faire la différence des masses entrantes ( $M_{entrant}$ ) et sortantes ( $M_{sortant}$ ) pour une durée donnée, de quantifier les changements de stocks ( $\Delta stock$ ) sur cette même durée et donc de quantifier les interactions ayant lieu dans le tronçon entre le flux en suspension et le lit:

$$M_{entrant} - M_{sortant} = \Delta stock \quad (1)$$

À noter que cette approche par bilan sédimentaire nécessite la prise en compte du temps de transfert entre les deux stations. Une différence positive indique un processus de stockage à l'échelle du tronçon tandis qu'une différence négative indique un déstockage. Le protocole utilisé permet également d'étudier l'effet de la mobilité du lit sur ces processus à l'aide des mesures de charriage. A noter que la relation entre turbidité et concentration a été évaluée tout au long de la campagne (plus d'une centaine de prélèvements). Celle-ci étant restée stable sur la période, les variations granulométriques des particules en suspension ont été considérées faibles (Landers and Sturm, 2013).

### 2.2.1. Mesure des flux en suspension

Une approche couramment utilisée (Esteves et al., 2019 ; Mano et al., 2009 ; Navratil et al., 2011) a été mise en place. Pour chaque station, un turbidimètre (Hach Lange Solitax) a été installé à environ 50cm du fond du lit et à environ 2m de la berge. Cet appareil enregistre la turbidité moyenne sur une minute (fréquence d'acquisition 1Hz) toutes les dix minutes. Un préleveur

automatique (ISCO 3700W, même positionnement du point de prélèvement) a été utilisé pour calibrer la relation turbidité/concentration à l'aide de plus d'une centaine de prélèvements couvrant la gamme de concentrations étudiée.

Une mesure des débits est également utilisée pour calculer le flux en suspension en considérant le point de mesure de concentration représentatif de la concentration moyenne dans la section (vérifié sur quelques prélèvements). Sur la station aval gérée par Electricité de France (EDF), une courbe de tarage entre niveau (mesure de pression continue) et débit est entretenue à l'aide de jaugeages réguliers (dilution, micromoulinet, aDcp, etc.). Sur la station amont, la relation débit/niveau d'eau a été établie par mesure continue avec un capteur de pression et jaugeages répétés en mai et juin 2018 (micromoulinets et LSPIV). Le flux massique de sédiment en suspension ( $Q_s$ , kg/s) est le produit du débit ( $Q$ , m<sup>3</sup>/s) et de la concentration ( $C$ , g/l). Une propagation des incertitudes de mesures similaire à l'approche développée par Navratil et al. (2011) via des simulations de type Monte-Carlo a été utilisée pour déterminer si les différences des masses observées entre les stations amont et aval étaient significatives. L'objectif était d'évaluer si les processus de dépôt/reprise pouvaient être détectés (voir le détail dans Misset et al., 2019a). L'incertitude à 95% obtenue sur les flux en suspension mesurés à l'échelle de l'évènement varie de 20% pour les évènements transportant les flux les plus faibles à 8% pour les évènements avec les flux les plus importants. A noter également qu'un temps de transfert variable d'un évènement à l'autre a été



déterminé par une méthode automatique de détection de maximum validée manuellement pour chaque évènement.

### 2.2.2. Mesure des flux par charriage

Des mesures de flux par charriage (fréquence journalière en moyenne) ont été réalisées sur la station aval à l'aide d'un préleveur à pression différentielle (modèle Elwah de dimensions 20,7×12 cm, mailles de 0.5mm). Huit mesures du flux par charriage local ( $Q_{bei}$ ) espacées de 1.5m en moyennes ont été utilisées pour déterminer le flux par charriage sur la section ( $Q_b$ ) selon la méthode « Single Equal-Width-Increment » (SEWI) (Edwards and Glysson, 1999):

$$Q_b = \sum Q_{bei}/L_e \times L_i \quad (3)$$

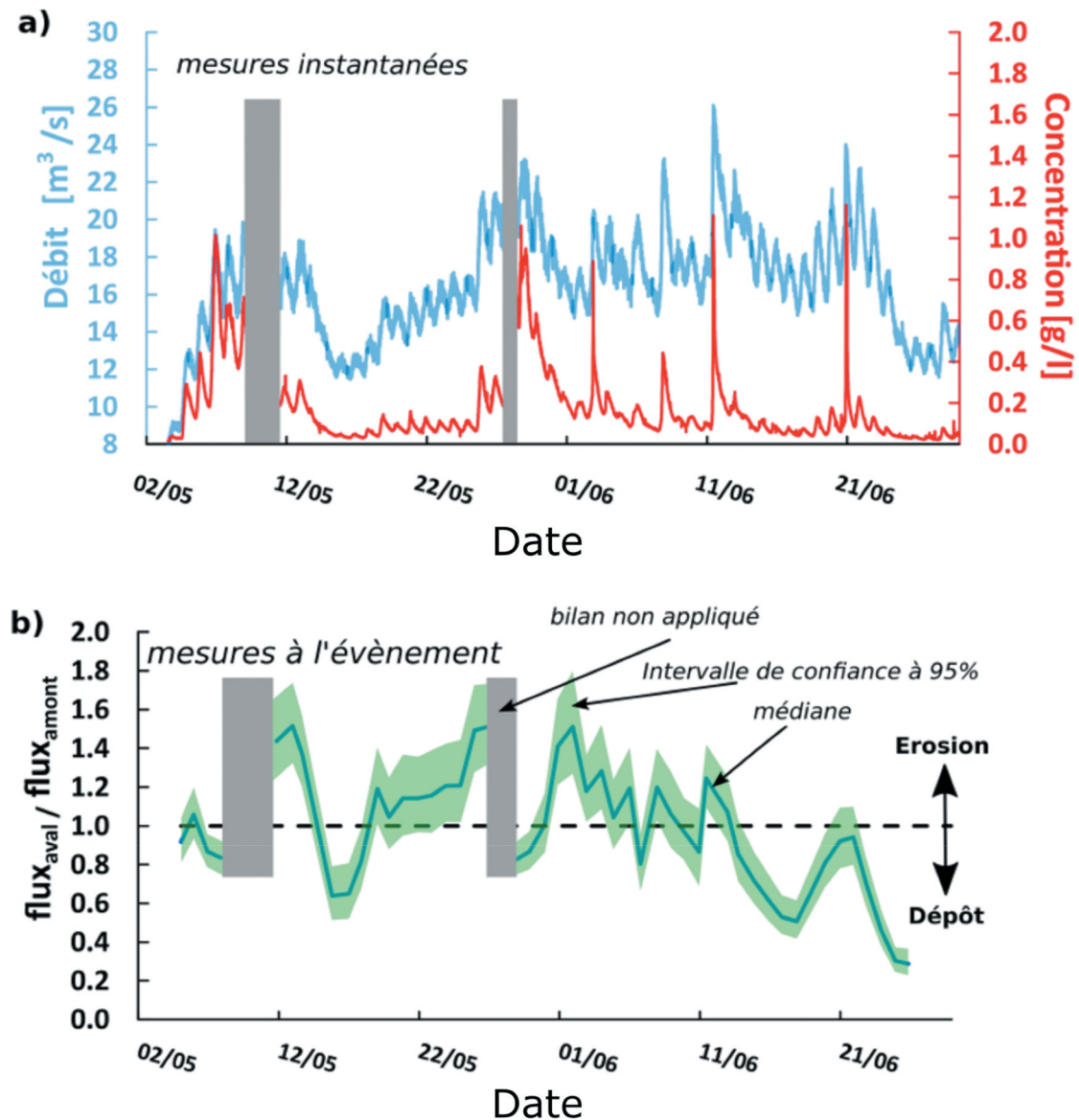
Avec  $L_e$  la largeur du préleveur et  $L_i$  la largeur représentative de la mesure locale. Au total, soixante

prélèvements ont été réalisés sur la période mai-juin 2018 permettant ainsi de caractériser les évolutions potentielles.

## 3. Résultats

### 3.1. Dynamique des flux en suspension durant la période de fonte

Les mesures durant la période de fonte montrent des variations significatives des grandeurs hydrosédimentaires (débit et concentration en suspension). En effet, quarante-huit évènements ont été identifiés durant la période de mesure (Figure 2a). Une forte variabilité est observée pour le bilan sédimentaire à l'évènement (Eq. 1), pouvant aller d'un dépôt équivalent à 71% de la masse entrant dans le tronçon à une remobilisation équivalente à 74% (Figure 2b). Il faut noter



**Figure 2.** (a) Chroniques temporelles du débit et de la concentration à la station aval, et (b) bilan sédimentaire à l'échelle de l'évènement. L'intervalle de confiance à 95% en vert est déterminé à l'aide de simulations Monte Carlo propageant les incertitudes de mesure. Plus de détails sur ces simulations sont disponibles dans (Misset et al., 2019a).

que ces différences sont significatives par rapport aux incertitudes, démontrant ainsi l'existence d'interactions entre le flux en suspension et le lit de la rivière.

### 3.2. Mise en évidence de l'effet « tampon » du lit

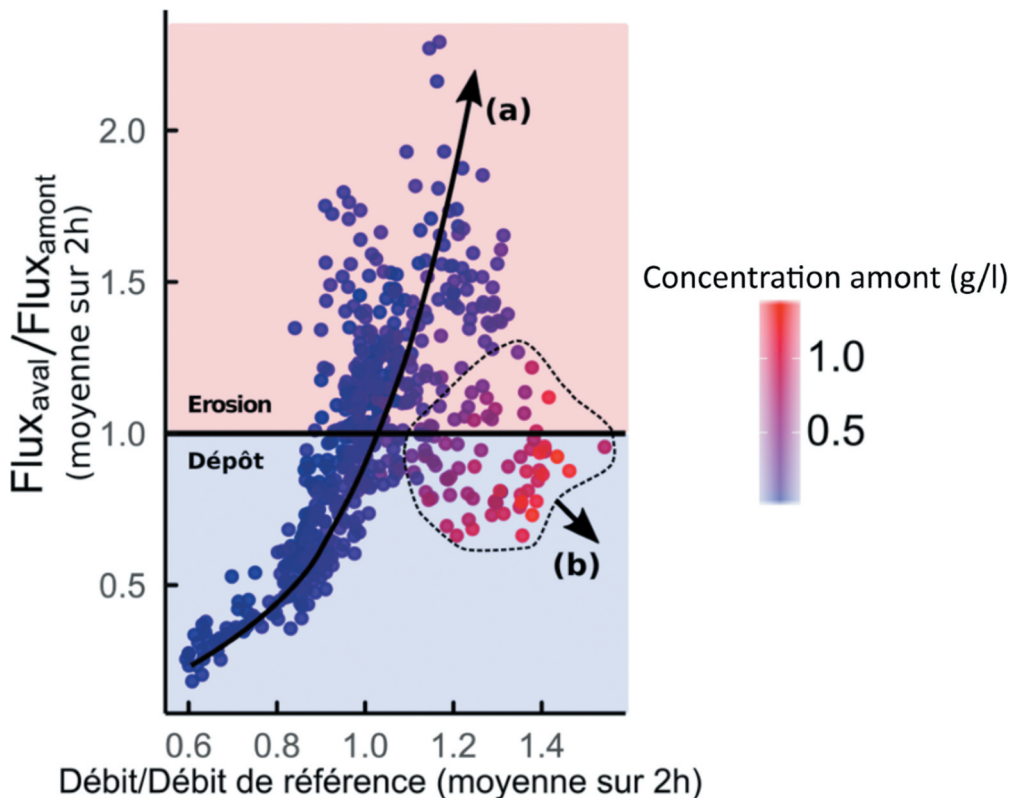
A l'échelle du tronçon, les interactions entre suspension et lit de la rivière sont contrôlées de manière antagoniste par la concentration et le débit. La Figure 3 présente à une échelle temporelle quasi-instantanée (sur 2h, après prise en compte d'un temps de transfert calculé à l'évènement via deux méthodes différentes, cf. partie méthode) l'évolution du bilan sédimentaire du tronçon (flux sortant/flux entrant) en fonction du débit et de la concentration entrant dans le tronçon. On observe que pour de faibles concentrations en amont (inférieures à 0,2 g/l), l'érosion nette (flux sortant/flux entrant) augmente lorsque le débit augmente ((a) sur la Figure 3). A l'inverse, pour des concentrations en amont du tronçon plus élevées (supérieures à 0,2 g/l), le dépôt net augmente indépendamment du débit lorsque la concentration augmente ((b) sur la Figure 3). Ceci peut être interprété comme un effet « tampon » du tronçon sur le signal de suspension.

### 3.3. Interactions entre les différents modes de transport en rivière alluviale alpine

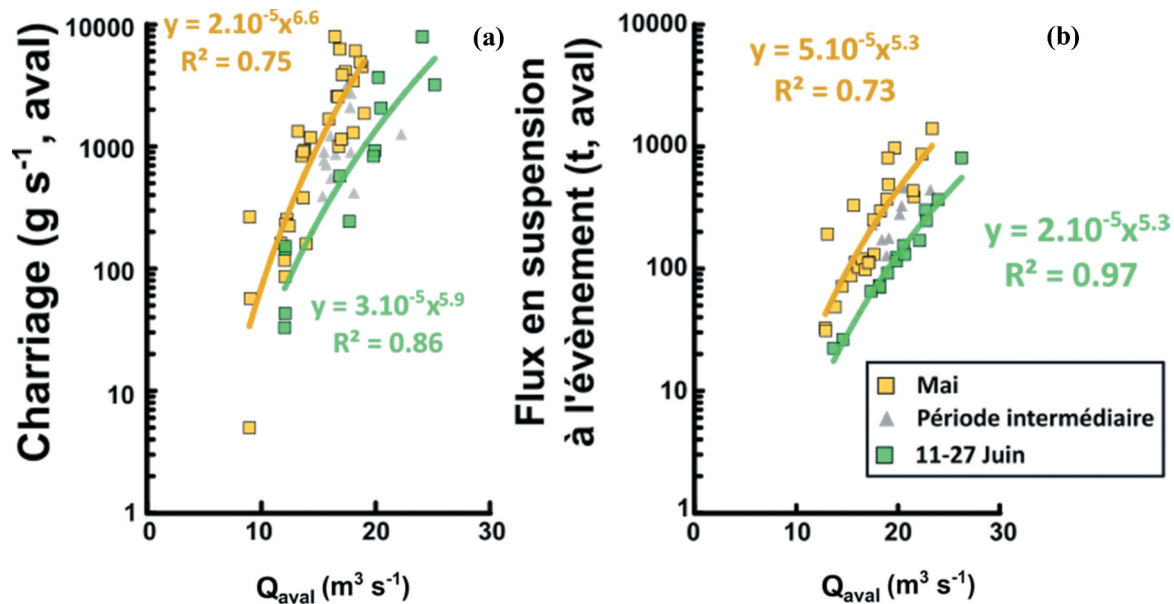
La dynamique des flux en suspension semble également être dépendante de l'activité du charriage et de la mobilité du lit. En effet, les prélèvements directs indiquent une diminution très nette et concomitante (entre -70% à -80% pour un même débit au cours de la saison) du flux par charriage et du flux en suspension à l'évènement (Figure 4). Étant donné les interactions significatives entre la suspension et le lit présentées précédemment, cette diminution concomitante des flux peut s'interpréter comme un contrôle de la disponibilité des sédiments fins par la mobilité du lit de la rivière (charriage). Ce lien fort entre transport par charriage et par suspension est cohérent avec les observations réalisées sur d'autres rivières (Meunier et al., 2006 ; Missset et al., 2019b ; Turowski et al., 2010) ou celles obtenues plus récemment à haute fréquence montrant une forte corrélation entre mesures sismiques (~charriage) et turbidité (~suspension) sur la Séveraisse (Missset et al., 2021).

## 4. Discussion

Ces observations permettent de tester les hypothèses à l'origine des modèles développés pour prédire les



**Figure 3.** Contrôle du bilan sédimentaire du tronçon par le débit et la concentration. Le ratio entre flux sortant et flux entrant est tracé en fonction du débit normalisé par un débit de référence correspondant à l'état d'équilibre (flux entrant = flux sortant). La couleur des points est variable en fonction de la concentration entrant dans le tronçon. Les points tendant vers le rouge ont les concentrations les plus élevées tandis que les points tendant vers le bleu ont les concentrations les plus faibles.



**Figure 4.** Evolution concomitante du flux (a) par charriage, et (b) par suspension en fonction du débit au cours de la saison. Note : les mesures de charriage en (a) sont des mesures instantanées. En (b), le débit maximum est considéré pour chaque évènement.

flux en suspension. Ceux-ci sont en majorité basés sur le principe de capacité de l'écoulement à maintenir une certaine concentration de sédiment en suspension (Bagnold, 1966 ; Celik and Rodi, 1991). Ces modèles sont donc a priori valables dans le cas où seule la capacité de l'écoulement à maintenir en suspension des sédiments est limitante, autrement dit lorsque les sédiments transportables sont disponibles « à l'infini ». De nombreuses études suggèrent que cette condition n'est pas vérifiée en permanence sur le terrain, en particulier dans le contexte alpin (Guillon et al., 2018 ; Navratil et al., 2012 ; Navratil et al., 2010). On observe ainsi de très grandes variations de la relation concentration/débit dans ces contextes (Esteves et al., 2019 ; Mano et al., 2009). L'activation de différentes sources de sédiment devient alors un élément central qui, en plus de la capacité de transport de l'écoulement, contrôle les flux en suspension véritablement transportés.

Ainsi, de précédentes études suggèrent que la mobilité des rivières à galets (et le relargage de sédiments fins associé) contrôle de manière significative la disponibilité des sédiments fins transportés en suspension (Meunier et al., 2006 ; Misset et al., 2021 ; Misset et al., 2019b ; Park and Hunt, 2017 ; Turowski et al., 2010). Cette hypothèse est cohérente avec les fortes interactions suspension/lit et les évolutions concomitantes des flux par suspension et par charriage observées sur la Séveraisse. Sur la base de cette réflexion, une relation entre charriage et suspension a été proposée par Misset et al. (2019b). Cette relation qui caractérise l'apport en sédiments fins liés à la mobilisation du lit est comparée sur la Figure 5 à deux relations (Bagnold 1966 ; Celik et Rodi 1991) caractérisant la capacité de l'écoulement à maintenir

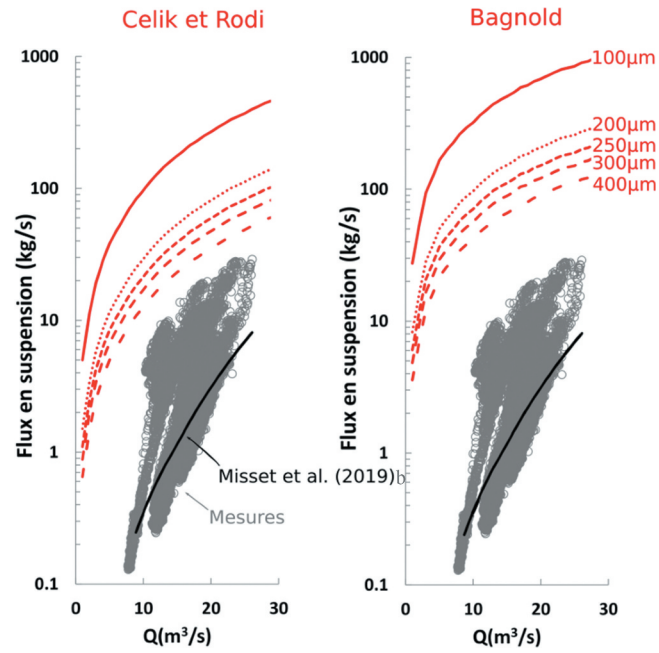
une certaine concentration en suspension, pour la période de mesure de mai-juin 2018 (Figure 5). Cette analyse suggère que durant cette période, la disponibilité en sédiment n'a pas permis d'atteindre la capacité maximum de transport par l'écoulement, alors que le modèle de relargage basé sur la relation établie avec le charriage (sédiments stockés dans le lit de la rivière) semble en cohérence avec le flux en suspension observés. Il n'est pas exclu que durant d'autres périodes, d'autres types d'évènements (par exemple lors de l'activation des sources de versants) ou sur d'autres sites présentant des flux amont plus concentrés avec des tailles de particules différentes, la capacité de l'écoulement soit atteinte, si bien que les mesures soient bien décrites par les relations de Bagnold ou de Celik et Rodi (cela doit encore être confirmé par la mesure).

Ainsi, de nouvelles approches de modélisation pourraient combiner les deux types d'équations. Il serait ainsi possible de « borner » en partie supérieure la relation suspension/débit par une équation déterminant la capacité de l'écoulement à maintenir en suspension (type Bagnold ou Celik et Rodi) et en partie inférieure par une relation caractérisant l'apport minimum des sources (type Misset et al. 2019b). Ce genre d'approche permettrait d'établir des scénarios selon l'activation ou l'inactivation de différentes sources sédimentaires.

## 5. Conclusion

Les mesures obtenues sur le tronçon de rivière alpine de « La Séveraisse » montrent que les particules en suspension interagissent fortement avec les lits à graviers. Des différences de flux significatives ont en effet





**Figure 5.** Comparaison entre les mesures de flux en suspension obtenus sur la Séveraisse durant la période de fonte (mai–juin 2018) et deux formules estimant la capacité de l’écoulement à transporter un certain flux en suspension (Celik et Rodi 1991, et Bagnold 1966). Une approche reliant mobilité du lit (charriage) et disponibilité en sédiment en suspension est également indiquée (Misset et al. 2019b). À noter que les sédiments transportés en suspension durant cette période ont une taille médiane de l’ordre de 180µm.

été observées entre l’entrée et la sortie du système, bien que celui-ci soit relativement court par rapport à la surface drainée en amont (130km<sup>2</sup>). Ce comportement « tampon » du tronçon est régi de manière antagoniste par le débit et la concentration en amont. La dynamique des flux en suspension est fortement influencée par la mobilité du lit lors des épisodes de fonte. Ces observations ont d’importantes implications concernant notre compréhension du transfert des particules en suspension. Suivant la saison, les flux de particules en suspension ne sont donc pas uniquement gouvernés par des processus de versant (érosion par la pluie et le ruissellement, mouvement de terrain, etc.), les lits alluviaux pouvant constituer, en fonction de leur capacité à stocker du sédiment fin, une source intermédiaire non négligeable. Il semble que la contribution de cette source intermédiaire soit fortement liée à l’activité morphologique et au charriage ouvrant ainsi des opportunités pour la modélisation des flux en suspension et pour la gestion des colmatages des lits à graviers.

## 6. Annexe

### 6.1. Capacité de transport par suspension, formule de Bagnold (1966)

L’équation de la capacité de transport en suspension par unité de largeur ( $q_s$ , en m<sup>2</sup>/s) proposée par Bagnold (1966) s’écrit sous la forme suivante :

$$q_s = \frac{\tau U e_s (1 - e_b)}{g(\rho_s - \rho) w_s}$$

Avec  $\tau$  la contrainte hydraulique  $\tau = \rho g h S$  (N/m<sup>2</sup>),  $\rho$  la masse volumique de l’eau (kg/m<sup>3</sup>),  $g$  l’accélération de la pesanteur (m<sup>2</sup>/s),  $h$  la hauteur d’eau moyenne ou le rayon hydraulique (m) et  $S$  la pente (m/m).  $U$  la vitesse moyenne de l’écoulement (m/s),  $w_s$  la vitesse de chute des sédiments (m/s),  $e_s$  et  $e_b$  des coefficients d’efficacité de transport pour la suspension et le charriage respectivement (-). À l’aide d’expériences en canal de laboratoire pour des sables fins (0.03 à 1mm) et des taux de transports élevés, Bagnolds propose que le produit  $e_s(1 - e_b)$  soit égal à 0.01.

### 6.2. Capacité de transport par suspension, formule de Celik et Rodi (1991)

Celik et Rodi (1991) proposent la formule suivante :

$$q_s = q C_T$$

Avec  $q$  le débit liquide par unité de largeur (m<sup>2</sup>/s), et  $C_T$  la concentration adimensionnelle moyenne dans la section (-) :

$$C_T = 0.034 \left[ 1 - \left( \frac{k_s}{d} \right)^{0.06} \right] \frac{u_*^2}{g(s-1)d} \frac{U}{w_s}$$

Et  $k_s$  la hauteur de rugosité prise égale au  $D_{84}$  du lit (m),  $u_*$  la vitesse de frottement (m/s),  $s$  la densité relative (-).

Tableau 1.

	$a_1 (\times 10^{-5})$	$a_2 (\times 10^{-2})$	$b_1 (\times 10^{-1})$	$b_2 (\times 10^{-1})$	$b_p (\times 10^{-6})$
2.5% percentile	3.32	7.00	1.75	8.21	7.26
50% percentile	4.04	9.12	1.87	8.49	8.49
97.5% percentile	4.92	11.73	2.01	8.76	10.02

Cette approche est fondée sur l'hypothèse que le travail des forces de portance sur les sédiments est proportionnel à l'énergie cinétique turbulente de l'écoulement et que les matériaux transportables sont disponibles. Cette formulation est obtenue à partir d'un bilan énergétique puis en calibrant les constantes sur des données de terrain.

### 6.3. Charge en suspension liée à la mobilisation du lit, formule de Misset et al. (2019b)

L'approche proposée par Misset et al. (2019b) relie la disponibilité en sédiments transportés par suspension avec la mobilisation du lit pour les rivières à graviers. En analysant la relation entre transport par charriage et pas suspension à partir des mesures de terrain obtenues sur 63 rivières à travers le monde, ils proposent :

$$SSC^* = \begin{cases} a_1 \times 10^{-5} q_b^{*b_1} & \text{si } q_b^* < b_p \\ a_2 \times q_b^{*b_2} & \text{sinon} \end{cases}$$

Avec  $SSC^*$  la concentration adimensionnelle moyenne dans la section (-) et  $q_b^*$  le transport par charriage adimensionnel (-) défini par :

$$q_b^* = \frac{q_b}{\rho_s \sqrt{g(s-1)} D_{84}^3}$$

Où  $q_b$  est le débit par charriage par unité de largeur (kg/s/m) et  $\rho_s$  la masse volumique des sédiments (kg/m<sup>3</sup>).  $q_b^*$  est calculé dans notre cas avec l'équation de transport par charriage de Recking (2016). Le paramètre  $b_p$  correspond à un point de rupture dans la relation  $SSC^* = f(q_b^*)$  et est assimilé à la rupture de la couche d'armure des lits à graviers car correspondant à la mise en mouvement de cette couche d'après l'analyse réalisée sur les 63 rivières. Les paramètres  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$  et  $b_2$  des lois puissances reliant  $SSC^*$  et  $q_b^*$  ont été calibrés sur les mesures de terrain des 63 rivières (plus de 2400 mesures). Ils sont donnés en Tableau 1 avec leur gamme d'incertitude.

## Références

- Antoine, G., Camenen, B., Jodeau, M., Némery J., & Esteves M. (2020). Downstream erosion and deposition dynamics of fine suspended sediments due to dam flushing. *Journal of Hydrology*, 585. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124763>
- Armstrong, J. D., Kemp, P. S., Kennedy, G. J. A., Ladle, M., & Milner, N. J. (2003). Habitat requirements of Atlantic salmon and brown trout in rivers and streams, *Fisheries Research*, 62(2), 143–170. [https://doi.org/10.1016/s0165-7836\(02\)00160-1](https://doi.org/10.1016/s0165-7836(02)00160-1)
- Bagnold. (1966). *An approach to the sediment transport problem from general physics* (Geological survey professional paper 422 – I).
- Celik, I. & Rodi, W. (1991). Suspended sediment – transport capacity for open channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(2).
- Edwards, T. K. & Glysson, G. D. (1999). *Field Methods for Measurement of Fluvial Sediment* (Book 3, Applications of Hydraulics, techniques of Water-Resources Investigations of the U.S. Geological Survey, Chapter C2).
- Einstein, H. A., Anderson, A. G., & Johnson J. W. (1940). A distinction between bed-load and suspended load in natural streams. *Transactions American Geophysical Union*, 21(2), 628–633. <https://doi.org/10.1029/TR021i002p00628>
- Esteves, M., Legout, C., Navratil, O., & Evrard, O. (2019). Medium term high frequency observation of discharges and suspended sediment in a Mediterranean mountainous catchment. *Journal of Hydrology*, 568, 562–574. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.066>
- Guillon, H., Mugnier, J.-L., & Buoncristiani, J.-F. (2018). Proglacial sediment dynamics from daily to seasonal scales in a glaciated Alpine catchment (Bossos glacier, Mont Blanc massif, France). *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(7), 1478–1495. <https://doi.org/10.1002/esp.4333>
- Hill, K. M., Gaffney, J., Baumgardner, S., Wilcock, P., & Paola, C. (2017). Experimental study of the effect of grain sizes in a bimodal mixture on bed slope, bed texture, and the transition to washload. *Water Resources Research*, 53(1), 923–941. <https://doi.org/10.1002/2016wr019172>
- Landers, M. N. & Sturm, T. W. (2013). Hysteresis in suspended sediment to turbidity relations due to changing particle size distributions. *Water Resources Research*, 49(9), 5487–5500. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20394>
- Le Pape, O. (2013). Sources of organic matter for flatfish juveniles in coastal and estuarine nursery grounds: A meta-analysis for the common sole (*Solea solea*) in contrasted systems of Western Europe. *Journal of Sea Research*, 75, 85–95. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2012.05.003>
- Mano, V. (2008). *PhD thesis: Processus fondamentaux conditionnant les apports de sédiments fins dans les retenues* (Optimisation de méthodes de mesure et modélisation statistique). Université Joseph-Fourier -Grenoble I.
- Mano, V., Nemery, J., Belleudy, P., & Poirer, A. (2009). Assessment of suspended sediment transport in four Alpine watersheds (France): influence of the climatic regime. *Hydrological Processes*, 23(5), 777–792. <https://doi.org/10.1002/hyp.7178>
- Meunier, P., Métivier, F., Lajeunesse, E., Mériaux, A. S., & Faure, J. (2006). Flow pattern and sediment transport in a braided river: The “torrent de St Pierre” (French Alps). *Journal of Hydrology*, 330(3–4), 496–505. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.04.009>
- Misset, C., Recking, A., Legout, C., Bakker, M., Gimbert, F., Geay, T., & Zanker, S. (2021). Using continuous turbidity and seismic measurements to unravel sediment

- provenance and interaction between suspended and bedload transport in an alpine catchment. *Geophysical Research Letters*, 48(4). <https://doi.org/10.1029/2020g1090696>
- Misset, C., Recking, A., Legout, C., Valsangkar, N., Bodereau, N., Zanker, S., Poirrel, A., & Borgniet, L. (2019a). The dynamics of suspended sediment in a typical alpine alluvial river reach: insight from a seasonal survey. *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1029/2019wr025222>
- Misset, C., Recking, A., Navratil, O., Legout, C., Poirrel, A., Cazilhac, M., Briguet, V., & Esteves, M. (2019b). Quantifying bed-related suspended load in gravel bed rivers through an analysis of the bedload-suspended load relationship. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(9), 1722–1733. <https://doi.org/10.1002/esp.4606>
- Mooneyham, C. & Strom, K. (2018). Deposition of suspended clay to open and sand-filled framework gravel beds in a laboratory flume. *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1002/2017wr020748>
- Navratil, O., Esteves, M., Legout, C., Gratiot, N., Nemery, J., Willmore, S., & Grangeon, T. (2011). Global uncertainty analysis of suspended sediment monitoring using turbidimeter in a small mountainous river catchment. *Journal of Hydrology*, 398(3–4), 246–259. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.12.025>
- Navratil, O. (2012). Temporal variability of suspended sediment sources in an Alpine catchment combining river/rainfall monitoring and sediment fingerprinting. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(8), 828–846. <https://doi.org/10.1002/esp.3201>
- Navratil, O., Legout, C., Gateuille, D., Esteves, M., & Liebault, F. (2010). Assessment of intermediate fine sediment storage in a braided river reach (southern French Prealps). *Hydrological Processes*, 24(10), 1318–1332. <https://doi.org/10.1002/hyp.7594>
- Orwin, J. F. & Smart, C. C. (2004). The evidence for paraglacial sedimentation and its temporal scale in the deglaciating basin of Small River Glacier, Canada. *Geomorphology*, 58(1–4), 175–202. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2003.07.005>
- Owens, P. N. (2005). Fine-grained sediment in river systems: Environmental significance and management issues. *River Research and Applications*, 21(7), 693–717. <https://doi.org/10.1002/rra.878>
- Park, B., Birgand, E., Gentile, H., Navratil, T. L., & Vericat (2019). Influences of catchment and river channel characteristics on the magnitude and dynamics of storage and re-suspension of fine sediments in river beds. *Water*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/w11050878>
- Park, J. & Hunt, J. R. (2017). Coupling fine particle and bedload transport in gravel-bedded streams. *Journal of Hydrology*, 552, 532–543. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.07.023>
- Park, J. & Hunt, J. R. (2018). Modeling fine particle dynamics in gravel-bedded streams: Storage and re-suspension of fine particles. *Science of Total Environmental*, 634, 1042–1053. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.034>
- Partheniades, E. (1977). Unified view of wash load and bed material load. *Journal of the Hydraulics Division*, 103(9), 1037–1057.
- Recking, A., Piton, G., Vazquez-Tarrio, D., & Parker, G. (2016). Quantifying the morphological print of bedload transport. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(6), 809–822. <https://doi.org/10.1002/esp.3869>
- Turowski, J. M., Rickenmann, D., & Dadson, S. J. (2010). The partitioning of the total sediment load of a river into suspended load and bedload: a review of empirical data. *Sedimentology*, 57(4), 1126–1146. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2009.01140.x>
- Vanmaercke, M., Poesen, J., Verstraeten, G., de Vente, J., & Ocakoglu, F. (2011). Sediment yield in Europe: spatial patterns and scale dependency. *Geomorphology*, 130(3–4), 142–161. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.03.010>
- Walling, D. E., Owens, P. N., Carter, J., Leeks, G. J. L., Lewis, S., Meharg, A. A., and Wright, J. (2003). Storage of sediment-associated nutrients and contaminants in river channel and floodplain systems. *Applied Geochemistry*, 18(2), 195–220. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00121-X](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00121-X)
- Wang, Z. Y. & Dittrich, A. (1992). A study on problems in suspended sediment transportation. In *Proceedings, 2nd International Conference on Hydraulics and Environmental Modelling of Coastal, Estuarine and River Waters*, (pp 467–478). Burlington. Vt: Ashgate.