



HAL
open science

Comment prélever les sédiments en suspension dans les cours d'eau ?

Guillaume Dramais, Jérôme Le Coz, Benoît Camenen, Thierry Fretaud, Gilles Pierrefeu

► **To cite this version:**

Guillaume Dramais, Jérôme Le Coz, Benoît Camenen, Thierry Fretaud, Gilles Pierrefeu. Comment prélever les sédiments en suspension dans les cours d'eau ?. LHB Hydrosience Journal, 2022, 108 (1), pp.2072783. 10.1080/27678490.2022.2072783 . hal-04044890

HAL Id: hal-04044890

<https://hal.inrae.fr/hal-04044890>

Submitted on 24 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



Comment prélever les sédiments en suspension dans les cours d'eau ?

Guillaume Dramais, Jérôme Le Coz, Benoît Camenen, Thierry Fretaud & Gilles Pierrefeu

To cite this article: Guillaume Dramais, Jérôme Le Coz, Benoît Camenen, Thierry Fretaud & Gilles Pierrefeu (2022) Comment prélever les sédiments en suspension dans les cours d'eau ?, LHB, 108:1, 2072783, DOI: [10.1080/27678490.2022.2072783](https://doi.org/10.1080/27678490.2022.2072783)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/27678490.2022.2072783>



© 2022 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group.



Published online: 13 Jun 2022.



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



Article views: 445



View related articles [↗](#)

Comment prélever les sédiments en suspension dans les cours d'eau ?

Guillaume Dramais^a, Jérôme Le Coz^a, Benoît Camenen^a, Thierry Fretaud^b and Gilles Pierrefeu^b

^aINRAE, Unité de recherche RiverLy, Centre Lyon-Grenoble Auvergne-Rhône-Alpes, Villeurbanne, France ; ^bCNR, Centre d'Analyse Comportementale des Ouvrages Hydrauliques, Lyon, France

RÉSUMÉ

La mesure des flux particulaires transportés en suspension constitue un enjeu important pour la gestion des cours d'eau. Les particules en suspension peuvent être de nature minérale ou organique et d'origine naturelle ou artificielle. Elles ont différentes tailles que l'on décrit souvent par un diamètre médian. Pour déterminer les quantités de particules en suspension ou leur composition, on effectue des prélèvements en un ou plusieurs points de la section en travers. Ces prélèvements peuvent être soit instantanés, soit moyennés dans le temps, en un seul point, ou intégrés dans l'espace. Le choix de la technique de prélèvement est à adapter à la taille du cours d'eau, aux moyens de déploiement disponibles et aux objectifs recherchés. Cet article présente quelques caractéristiques des préleveurs actuellement utilisés sur le bassin du Rhône notamment et pose la question de l'harmonisation des pratiques dans le domaine du prélèvement des matières en suspension en cours d'eau. Cette harmonisation est certainement nécessaire pour pouvoir comparer et critiquer les flux de matières calculés qui transitent dans nos cours d'eau pour mieux les comprendre et les gérer.

MOTS CLÉS

prélèvement ; échantillon ; suspension ; sédiment

KEYWORDS

sampling; sample; suspension; sediment

How to sample suspended sediment in rivers?

ABSTRACT

Measurement of suspended sediment is an important issue for river management. Suspended particles can be mineral or organic and of natural or artificial origin. They have different sizes that are often described by a median diameter. To quantify the concentrations of suspended particles or their composition, samples are taken at one or more points of the cross section. These samples can be either instantaneous or averaged over time, at a single point, or integrated over depth. The choice of sampling technique should be adapted to the size of the river, the purpose of the study and the available samplers. This article presents some characteristics of the samplers currently used in the Rhône watershed and raises the question of the harmonisation of practices for suspended solids sampling in rivers. This harmonisation is necessary in order to be able to compare and discuss the calculated suspended sediment fluxes in order to understand and manage them.

1. Introduction

La question de la mesure des sédiments en suspension dans les cours d'eau intéresse pour différentes raisons. La principale est une question de qualité, une eau trop chargée est impropre pour de nombreux usages et peut être dangereuse pour les communautés piscicoles notamment. De plus, les polluants se fixent aux sédiments les plus fins contribuant ainsi à leur transfert dans les bassins versants. Par ailleurs, les ingénieurs et gestionnaires en charge de l'exploitation ou de la surveillance de tronçons de rivières ou de leurs aménagements s'intéressent aux mouvements des sédiments pour veiller à la sécurité des riverains et des ouvrages, notamment dans le cadre de la prévention des inondations qui reste le risque majeur actuellement dans de nombreux territoires (Lang & Cœur, 2014).

La quantification des sédiments en suspension permet de mieux comprendre les processus de transport solide pour améliorer la gestion et le transit des sédiments vers l'aval. De nombreux travaux de recherche sont menés pour comprendre, mesurer en temps réel et modéliser la mobilité des sédiments dans les rivières. Les méthodes de mesure des concentrations et des flux en continu dans le réseau hydrographique sont encore incertaines et parfois peu généralisables.

L'objectif de cet article est de présenter brièvement les principes et les limites des moyens de prélèvement des sédiments en suspension disponibles actuellement pour aider l'utilisateur à choisir une méthode de prélèvement plutôt qu'une autre.

2. Représentativité des prélèvements

2.1. Généralités

Avant de choisir un préleveur dans la gamme disponible, il est important de bien définir l'objectif du prélèvement, les paramètres d'intérêt que l'on souhaite analyser et d'avoir conscience de l'incertitude sur la représentativité d'un échantillon par rapport au cours d'eau étudié. De plus, les préleveurs de sédiments en suspension sont parfois complexes à déployer du fait de leur poids ou de la configuration de la rivière.

Lors d'un prélèvement de sédiments en suspension, on procède au remplissage d'un récipient (flacon, seau, sac de prélèvement) avec l'eau de la rivière et les sédiments en suspension. Ces prélèvements ont pour objectif de déterminer une concentration en MES en kg/m^3 , c'est-à-dire en g/l , ou parfois directement un flux de particules solides en kg/s ou un flux par unité de surface en kg/s/m^2 . Par ailleurs, les particules solides en suspension sont entraînées naturellement par le fluide et lorsqu'on va exposer le préleveur, on va perturber l'écoulement. Cette perturbation modifie les trajectoires des particules (les plus grosses du fait de leur inertie) et influe sur la concentration en MES captée par le préleveur. Pour remédier à ce problème, des préleveurs isocinétiques ont été développés afin de limiter cet effet grâce à leur forme hydrodynamique et à la position de la buse d'entrée (Figure 1). En effet, les préleveurs isocinétiques permettent d'assurer que vitesse d'approche et vitesse d'entrée dans la buse sont similaires, relativement aux lignes de courant de l'eau (Gray & Landers, 2014). Si le préleveur n'est pas isocinétique, l'inertie des particules les plus grosses (le sable) a tendance à les orienter vers la buse d'entrée du préleveur en cas de vitesse d'entrée inférieure à la vitesse ambiante et à l'inverse leur faire éviter la buse en cas de vitesse d'entrée supérieure à la vitesse d'approche (Gray & Landers, 2014).

2.2. Sédiments en suspension dans la section

Les sédiments en suspension dans le cours d'eau sont des particules relativement petites, on différencie classiquement les argiles et limons qui sont d'un diamètre médian inférieur à $63 \mu\text{m}$ et les sables qui sont compris entre $63 \mu\text{m}$ et 2mm .

La concentration en MES fines (inférieure à $63 \mu\text{m}$) est considérée homogène dans la section dans de nombreux cas, même si plusieurs auteurs ont observé des gradients en profondeur, en particulier dans les grands fleuves (Curtis et al., 1979 ; Martin et al., 1992). Le mélange à l'aval de confluences peut également entraîner une hétérogénéité latérale des concentrations en MES sur des distances importantes (Pouchoulin et al., 2020) et dans le cas particulier des courants de turbidité donnant lieu à des écoulements chargés en sédiments cohésifs très fins.

La mobilité du sable en suspension est intermittente et va dépendre des conditions hydrauliques. La concentration en sable est rarement homogène dans la section, des gradients importants sont observés sur plusieurs cours d'eau (Horowitz, 2008). Le sable en suspension est parfois considéré comme négligeable du fait de la difficulté de le prélever et de l'analyser correctement. Lors de crues, l'observation de mélanges de MES et de sable est courante et les analyses doivent être effectuées avec un grand soin pour limiter les incertitudes sur les données de concentration (Dramais et al., 2018).

2.3. Sources d'incertitudes lors des prélèvements de sédiments en suspension

Cette répartition des MES et du sable en suspension dans la section renvoie à la question de la représentativité spatiale d'un échantillon pris en berge ou en surface vis-à-vis du flux moyen de particules dans la section. On peut ici faire l'analogie avec l'hydrométrie



Figure 1. Préleveurs isocinétiques : (a) US-P-06 sur l'Isère à Grenoble campus en juin 2021 ; et (b) Bouteille de Delft déployée en janvier 2021 sur l'Isère à Beaumont-Montoux (France).

où un point de vitesse de l'eau isolé de la section ne représente pas directement la vitesse moyenne dans la section. Pour cette raison et pour s'assurer de la bonne représentativité d'un point de mesure, il est nécessaire d'étudier la répartition spatiale des sédiments en suspension lors de l'installation de stations de suivi sédimentaire en suspension notamment.

En hydrométrie, lorsqu'on effectue une exploration des vitesses au courantomètre ou moulinet on expose le capteur pendant un temps donné en différents points de la section. La même procédure est préconisée pour les prélèvements de sédiments en suspension, un échantillon intégré dans le temps permet de moyenniser les fluctuations naturelles de concentration pendant le temps d'exposition du préleveur (Topping et al., 2011). L'exposition du préleveur en plusieurs points répartis dans la section permet également une meilleure connaissance de la répartition des concentrations et un calcul plus juste du flux moyen.

D'autres sources d'incertitudes s'expriment dans ce processus de prélèvement. Le caractère isocinétique ou non du préleveur est une source d'incertitude (Dramais et al., 2020b). Les turbulences rendent parfois difficiles les prélèvements distribués, tout comme la présence de débris végétaux ou organiques qui bouchent parfois les buses des préleveurs. Le transfert par des flacons intermédiaires engendre également une perte d'une partie d'échantillon. Enfin la méthode d'analyse en laboratoire et son application sont également une source d'incertitude (Dramais et al., 2018).

3. Choix des préleveurs

3.1. Mesure indirecte ou prélèvement *in-situ*

Pour estimer les concentrations puis les flux de sédiment en suspension dans les cours d'eau plusieurs solutions existent :

- Les méthodes de mesure indirectes qui étudient par exemple l'atténuation et/ou la rétrodiffusion du signal d'un capteur optique ou laser immergé (turbidimètre, LISST) ou acoustique (ABS, ADCP horizontaux) permettent d'estimer les concentrations ou flux de particules (Gray & Gartner, 2010). Des mesures optiques sans contact (satellite, drone) par analyse de réflectance sont aussi développées dans différentes équipes (Martinez et al., 2009). Ces mesures nécessitent la plupart du temps d'être calibrées par des mesures par prélèvement *in-situ*. Les post-traitements de données sont assez complexes et pas toujours généralisables. Ces méthodes

ont des sensibilités différentes en fonction de l'étendue granulométrique des sédiments présents en suspension, ce qui pose un certain nombre de questions sur les données résultantes (Laible et al., 2021).

- La mesure de concentration en sédiments en suspension peut aussi être effectuée par l'analyse en laboratoire d'un prélèvement d'eau de la rivière. Pour prélever, de nombreux préleveurs existent, on peut les classer en différentes familles même si certains préleveurs ont des caractéristiques de plusieurs d'entre elles.
- Les préleveurs ponctuels instantanés, de type trappe (Van Dorn, Niskin, Kemmerer), seau ou remplissage direct d'un flacon. Ils vont capturer un volume d'eau de la rivière de manière simple et quasi-instantanée.
- Les échantillonneurs par pompage, automatiques (ISCO, Sigma . . .) ou non (pompes péristaltiques, ou immergées . . .) qui permettent différentes combinaisons de prélèvement suivant des programmes d'échantillonnage définis. Ils font tous une intégration temporelle et pour certains (ceux dont la prise d'eau de pompage est mobile dans la section) une intégration spatiale de la concentration.
- Les préleveurs intégratifs suspendu ponctuels ou sur la verticale qui sont exposés pendant des temps relativement courts (de l'ordre de la minute). Ils permettent des échantillons intégrés spatialement ou dans le temps. Pour la plupart, ils sont conçus pour prélever de manière isocinétique.
- Les décanteurs (pièges à sédiment, bouteille de Delft) sont exposés sur des temps plus longs (supérieurs à la minute et jusqu'à plusieurs jours/semaines). Ils permettent d'obtenir un échantillon intégré dans le temps.
- Le calcul de flux peut être effectué également de différentes façons selon les instruments utilisés. Les échantillons distribués dans la section (ponctuels, pondérés ou pas par la vitesse) sont utilisés pour déterminer des concentrations. Ces concentrations sont ensuite multipliées par les vitesses locales (ponctuelles ou par sous-section) pour calculer les flux puis d'intégrer ceux-ci sur la section pour obtenir le flux total. En l'absence de jaugeage liquide simultané aux prélèvements, une alternative pratique est aussi de calculer une concentration moyenne dans la section puis de la multiplier par le débit liquide déduit d'une courbe de tarage. Plusieurs méthodes de calcul existent (Gray & Landers, 2014 ; ISO 4363, 2002). Une connaissance fine de la bathymétrie de la section est nécessaire dans tous les cas.

3.2. Comparaison et incertitudes des préleveurs

Le FISP (Federal Inter-Agency Sedimentation Project) rassemble les agences gouvernementales et les acteurs de la mesure des sédiments dans les cours d'eau depuis 1939 aux États-Unis. Le FISP recensait en 1940 pas moins de 65 échantillonneurs pour le prélèvement d'eau et de sédiments en suspension (FISP, 1940). A l'heure actuelle dans la spécification technique ISO 3716 TS (2006) on trouve encore une grande variété de préleveurs de par le monde.

En métrologie pour estimer les incertitudes ou étalonner un instrument on va essayer de comparer la mesure obtenue par celui-ci à une mesure de référence délivrée par un étalon raccordé aux étalons internationaux. Pour la mesure des concentrations *in-situ* il n'existe pas encore d'étalon, on peut s'appuyer sur des travaux de comparaison entre instruments pour déterminer les incertitudes de mesure. Plusieurs évaluations ont été effectuées sur le terrain et en laboratoire. Etant donné l'importance des erreurs environnementales, ces essais sont indispensables pour garantir la fiabilité des données. De plus, ils peuvent permettre de fournir une valeur consensuelle d'incertitude par comparaison avec des méthodes de mesures reconnues et usuellement déployées par la communauté, même si elles ne peuvent pas être raccordées à des étalons. Ces méthodes consensuelles font bien souvent références non pas par leur fiabilité, mais parce qu'on ne sait pas mieux faire avec l'état de l'art actuel. Une étude bibliographique (Dramais, 2020) recense quelques-unes des comparaisons citées dans la littérature. Nous retiendrons par exemple une incertitude type de 15% pour les concentrations en sable mesurées avec le préleveur

P-61 (Préleveur ponctuel isocinétique ; Topping et al., 2011). Pour les bouteilles horizontales de type trappe (Niskin, Van Dorn, Kemmerer), si les valeurs de la littérature semblent plutôt favorables (10% pour Long (1989) et 4% pour Filizola and Guyot (2004)), une valeur supérieure devrait être envisagée pour les concentrations en sable (Dramais et al., 2020b). Les limites des préleveurs de type bouteille horizontale sont connues depuis longtemps. Il s'agit principalement du caractère instantané du prélèvement qui ne permet pas une moyenne temporelle des fluctuations naturelles de concentration mais aussi de la possible accumulation de particules dans le préleveur du fait qu'il n'est pas isocinétique, phénomène qui a été observé en laboratoire (FISP, 1941). L'exemple des Figures 2a et 2b présente une comparaison de deux profils verticaux de concentration en sable en suspension successifs au même endroit à Diamond Creek sur le Colorado (USA) pour deux campagnes différentes. Cette comparaison met en évidence un écart de concentrations en sable dans les échantillons issus de prélèvements par une bouteille horizontale de type trappe par rapport à ceux issus des échantillons d'un préleveur isocinétique P-61. En l'absence de la vérification d'un apport constant de particules pendant les essais et en l'absence de mesure de référence de la concentration, on ne peut pas dire avec certitude quel préleveur est le plus proche de la valeur vraie. Cependant on peut faire l'hypothèse que le caractère isocinétique et intégratif du préleveur P-61 lui confère un avantage théorique sur la bouteille horizontale et son prélèvement instantané. Lors de cet essai chaque mesure a été répétée 3 fois (sauf Figure 2a), les intervalles représentent la

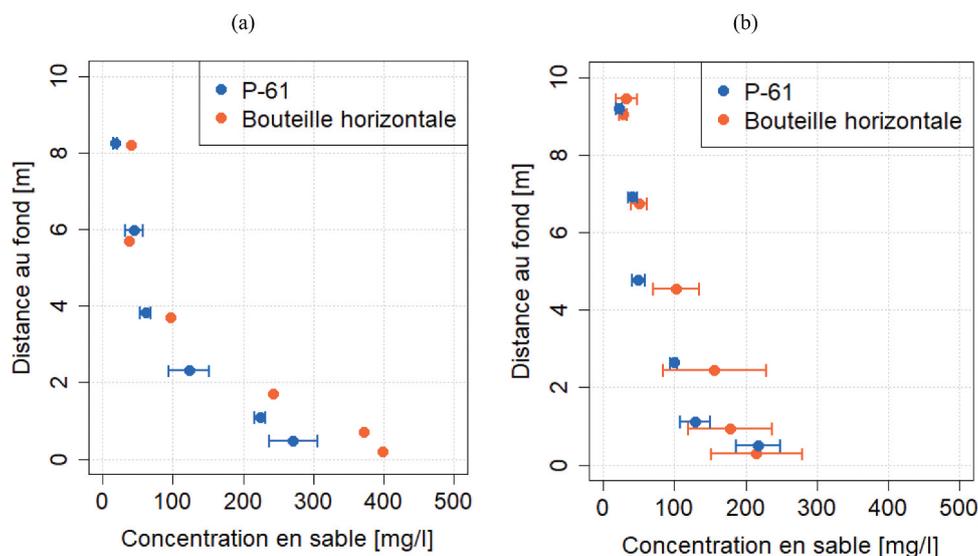


Figure 2. Concentrations en sables mesurées sur la verticale centrale de la station de mesure de Diamond Creek sur le Colorado, en décembre 2018 (a), puis en avril 2019 (b). Les intervalles représentent l'écart type de répétabilité en concentration. En décembre (a), les prélèvements à la bouteille horizontale n'ont pas été répétés d'où l'absence d'écart-type de répétabilité.

Mode de prélèvement	Préleveur	Iso cinétique	Particules prélevées	Volume d'échantillon	Temps d'exposition Pour un échantillon	Déploiement	Type de cours d'eau	Coût	Avantage	Références **
Prélèvement ponctuel instantané	Seau / Flacon	non	MES	1 à 10 litres	~ seconde	Manuel, corde (surface uniquement)	Tous	€	Rapidité	Camenen et al. 2008
	Trappe (Nikin...)	non	MES et sable	1 à 10 litres	~ seconde	Corde et messenger, cyclopotence	Fleuve	€	Rapidité	Dramais, 2021
Prélèvement par pompage	Pompage mobile	Peut l'être*	MES et sable	0,5 à 50 litres ou plus	~ min	Buse lestée sur cyclopotence	Tous	€€	Grands volumes	Frings et al. 2014
	Pompage fixe	Peut l'être*	MES et sable	0,5 à 50 litres ou plus	~ min	Fixation en berge ou sur un ouvrage	Tous	€€€	Peut être automatique et asservi à une consigne	Camenen et al. 2021
Prélèvement intégratif type FISP	Intégratif sur la hauteur	oui	MES et sable	0,4 à 1 litre	< 1 min	Traille, cyclopotence, perche	Tous	€€€	Rapidité intégration spatiale	Topping et al. 2011
	Intégratif ponctuel	oui	MES et sable	0,4 à 1 litre	< 1 min	Traille, cyclopotence, perche	Tous	€€€	Souvent considéré comme référence	Hicks et al. 1997
Décanteur	Bouteille de Delft	oui	sable	quelques grammes	~10 minutes	Traille, cyclopotence,	Fleuve	€€€	Intégration temporelle du sable	Dijkman et al. 1982
	Pièges à sédiment	non	MES	quelques grammes	1 mois	Posé en fond de cours d'eau ou berge	Tous	€€	Facilité de déploiement	Masson et al. 2018

* Moyennant l'utilisation d'une pompe à débit variable asservie à une mesure de vitesse ** Liste indicative

Figure 3. Critères de choix des solutions de prélèvements de sédiments en suspension dans les rivières.

dispersion des 3 mesures de concentration. Si la bouteille horizontale donne des résultats plus dispersés et légèrement supérieurs en termes de concentration en sable que le P-61, les résultats sont cohérents. On observe un net gradient de concentration en sable sur la verticale.

3.3. Choix du mode de prélèvement

Les principaux critères qui doivent guider le choix d'un mode de prélèvement de sédiments en suspension sont tout d'abord l'objectif de la mesure (connaissance de la concentration en MES, en sable, mesure de flux total . . .). Ensuite la configuration du ou des sites choisis va permettre, ou pas, de déployer des solutions techniques. Les moyens de déploiement (bateau, traile téléphérique, équipe de terrain, financement) sont à réfléchir. En effet comme pour d'autres mesures en rivière les contraintes de sécurité, de disponibilité sont importantes lors de la mise en place de campagnes de prélèvements.

Un point important qui peut guider le choix de la technique est également la dynamique des événements hydro-sédimentaires que l'on observe. Le temps de mesure doit en effet permettre d'observer le phénomène sans qu'il ne varie de manière significative dans le temps. Si l'objectif initial de la mesure est l'estimation du flux de particules, on adaptera l'instrument et le protocole de prélèvement à la taille du cours d'eau. Il

peut être utile de suivre la stabilité du flux via la mesure d'un proxy de type turbidité ou mesure acoustique durant le temps du jaugeage solide.

Au-delà du prélèvement, l'analyse des échantillons a aussi un coût non négligeable. Le tableau ci-dessus (Figure 3) donne des indications pour guider le lecteur dans son choix d'un mode de prélèvement des sédiments en suspension. La liste de préleveurs recensés et de critères dans ce tableau n'est pas exhaustive. Il n'est malheureusement pas encore possible de déterminer un unique préleveur qui serait idéal pour des conditions de mesure données.

4. Conclusion

Il n'existe pas encore d'instrument universel pour le prélèvement des sédiments en suspension dans les cours d'eau. Le document ISO 3716 TS (2006) sur les caractéristiques des préleveurs recense de nombreux préleveurs opérationnels et préconise l'utilisation de préleveurs isocinétiques pour le prélèvement des sédiments en suspension en rivière. Cependant dans certains cas une mesure plus incertaine mais moins chère ou plus rapide peut suffire à répondre au besoin. Un compromis est à trouver entre l'objectif de la mesure et l'investissement nécessaire pour mettre en place la solution de prélèvement.

En France, comme ailleurs, il n'y a pas de consensus sur le choix des méthodes de prélèvement de sédiments en suspension dans les cours d'eau. Pourtant, des normes existent pour le prélèvement en rivière mais au lieu de s'imposer, elles font l'objet d'adaptations aux contextes et à l'histoire de la mesure sur les cours d'eau. Le besoin d'harmoniser les méthodes par la normalisation (Belleville & Delamarre Pobanz, 2021) ou d'autres groupes de travail est nécessaire pour pouvoir évaluer et comparer les flux de sédiments en suspension qui transitent pour mieux les comprendre et faciliter l'équilibre des cours d'eau.

Remerciements

Cet article est largement inspiré des travaux de thèse de Dramais (2020) qui ont été financés par INRAE la CNR, l'USGS et l'école doctorale MEGA de l'Université de Lyon.

Déclaration de divulgation

L'auteur ne déclare aucun intérêt concurrent.

Déclaration de disponibilité des données

Les données associées à cet article sont disponibles sur demande par message électronique auprès des auteurs.

ORCID

Guillaume Dramais  <http://orcid.org/0000-0002-2703-9314>

Jérôme Le Coz  <http://orcid.org/0000-0003-1243-6955>

Benoît Camenen  <http://orcid.org/0000-0003-1677-5225>

Références

- Belleville, A., & Delamarre Pobanz, K. (2021). Actualités sur la normalisation en hydrométrie. Conférence SHF Hydrométrie 2021 – “De la mesure à la prise de décision” 23 et 24 Novembre 2021.
- Curtis, W. F., Meade, R. H., Nordin, C. F., Price, N. B., & Sholkovitz, E. R. (1979). Nonuniform vertical distribution of fine sediment in the Amazon River. *Nature*, 280(5721), 381. <https://doi.org/10.1038/280381a0>
- Dramais, G., Camenen, B., & Le Coz, J. (2018). Comparaison de méthodes pour la mesure des matières en suspension dans les cours d'eau, en présence de sable. *La Houille Blanche*, 104(5–6), 96–105. <https://doi.org/10.1051/lhb/2018056>
- Dramais, G., (2020). Observation et modélisation des flux de sable dans les grands cours d'eau. Thèse de doctorat. Université de Lyon. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03188258>
- Dramais, G., Le Coz, J., Camenen, B., & Pierrefeu, G. (2020b). Sampling suspended sand in rivers using instantaneous horizontal bottle samplers: A comparison against other techniques. *River Flow 2020: 10th International Conference on Fluvial Hydraulics*, juillet 2020, Delft, Pays-Bas (Online).
- Filizola, N., & Guyot, J. (2004). The use of Doppler technology for suspended sediment discharge determination in the River Amazon. *Hydrological Sciences Journal*, 49(1), 143–154. <https://doi.org/10.1623/hysj.49.1.143.53990>
- FISP. (1940). *Measurements and analysis of sediment loads in streams. field practice and equipment used in sampling suspended sediment*. Rapport technique Report N°1, Federal Interagency Sedimentation Project, St. Paul Engineer District Sub-office Hydraulic Laboratory, University of Iowa.
- FISP. (1941). *Laboratory investigation of suspended-sediment samplers*. Rapport technique Report No. 5, Federal Interagency Sedimentation Project.
- Frings, R. M., Gehres, N., Promny, M., Middelkoop, H., Schüttrumpf, H., & Vollmer, S. (2014). Today's sediment budget of the Rhine River channel, focusing on the Upper Rhine Graben and Rhenish Massif. *Geomorphology*, 204, 573–587. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.08.035>
- Gray, J., & Gartner, J. (2010). Overview of selected surrogate technologies for high-temporal resolution suspended sediment monitoring. In *Proceedings of the 2nd Joint Federal Interagency Conference* (juin 27–juillet 1). Las Vegas, NV, USA.
- Gray, J., & Landers, M. (2014). Measuring suspended sediment. *Comprehensive Water Quality and Purification*, 1, 157–204.
- Horowitz, A. J. (2008). Determining annual suspended sediment and sediment-associated trace element and nutrient fluxes. *Science of the Total Environment*, 400(1–3), 315–343. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.04.022>
- ISO 3716 TS. (2006). *Hydrométrie – Spécifications de fonctionnement et caractéristiques des appareils d'échantillonnage pour la détermination des charges sédimentaires en suspension*. Organisation internationale de normalisation.
- ISO 4363. (2002). *Measurement of liquid flow in open channels – Methods for measurement of characteristics of suspended sediment*. Genève.
- Laible, J., Camenen, B., Le Coz, J., Dramais, G., Pierrefeu, G., & Lauters, F. (2021). Développement d'une station de mesure en continu des flux de sable dans l'Isère à Grenoble. Conférence SHF Hydrométrie 2021 – “De la mesure à la prise de décision” 23 et 24 Novembre 485 bre 2021, Montpellier, France.
- Lang, M., & Cœur, D. (2014). *Les inondations remarquables au XXe siècle : Inventaire 2011 pour la directive Inondation*. Editions Quae.
- Long, Y., (1989). Manual on operational methods for the measurement of sediment transport. *World Meteorological Organization Manual*, (686).
- Martin, G. R., Smoot, J. L., & White, K. D. (1992). A comparison of surface-grab and cross sectionally integrated stream-water-quality sampling methods. *Water Environment Research*, 64(7), 866–876. <https://doi.org/10.2175/WER.64.7.4>
- Martinez, J. M., Guyot, J. L., Filizola, N., & Sondag, F. (2009). Increase in suspended sediment discharge of the Amazon River assessed by monitoring network and satellite data. *Catena*, 79(3), 257–264. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.05.011>

- Pouchoulin, S., Le Coz, J., Mignot, E., Gond, L., & Riviere, N. (2020). Predicting transverse mixing efficiency downstream of a river confluence. *Water Resources Research*, 56(10), e2019WR026367. <https://doi.org/10.1029/2019WR026367>
- Topping, D. J., Rubin, D. M., Wright, S. A., & Melis, T. S. (2011). Field evaluation of the error arising from inadequate time averaging in the standard use of depth-integrating suspended sediment samplers. *US Geological Survey professional paper 1774*. USGS.