

Mesure du charriage en rivière par acoustique et sismique passive

Mots-clés : charge de fond, hydrophone, géophone, jaugeage solide, flux sédimentaires

Type d'outil	Milieux étudiés	Disciplines mobilisées	Destinataires
Instruments de mesure Logiciel d'interprétation	Cours d'eau à charriage (sables grossiers, graviers, galets)	Hydrologie-Hydraulique Transport solide Traitement du signal	Scientifiques, gestionnaires, collectivités, bureaux d'études

OBJECTIFS

Caractériser la dynamique du charriage dans les cours d'eau et quantifier les flux sédimentaires de la charge de fond à l'aide de techniques indirectes acoustiques (hydrophone) ou sismiques (géophone ou sismomètre).

CONTEXTE ET CONTENU DE L'OUTIL

Le transport des sédiments grossiers joue un rôle majeur dans le fonctionnement des cours d'eau en influant sur la morphologie du lit, en lien avec les enjeux écologiques, de sûreté-sécurité et les usages socio-économiques. Ainsi, la caractérisation du transport de la charge de fond (charriage) est particulièrement importante pour les scientifiques, les gestionnaires d'infrastructures ou les collectivités ayant la compétence GEMAPI.

Des méthodes de mesures directes par prélèvements peuvent être utilisées, à l'aide d'échantillonneurs de charge de fond comme le « Helley-Smith sampler ». Néanmoins, ces techniques sont coûteuses en temps, en énergie, et complexes à déployer en période de crue. Par ailleurs, elles ne permettent pas d'accéder à une mesure en continu du charriage.

Les méthodes de mesures indirectes, qui font l'objet de la présente fiche, présentent un attrait majeur pour accéder à un flux continu tout en réduisant les coûts. La **mesure acoustique** consiste à enregistrer les bruits de la rivière avec un hydrophone immergé, à isoler les puissances acoustiques générées par les sédiments lorsqu'ils s'entrechoquent et à analyser les caractéristiques de ce signal pour en déduire le flux de charriage. La mesure acoustique, dont les prémices datent des années 1950, a pu être développée ces dernières années dans divers projets de R&D (IGE 2000-2013, EDF-IGE 2014-2018, puis EDF-BURGEAP-INRAE 2019-2024, Eau du Grand Lyon 2020-2026, SYMBHI 2024-2026) grâce aux progrès des techniques (capteurs, enregistrements, télécommunication), des méthodes de traitement du signal et des outils de programmation numérique. La **mesure sismique** utilise le même principe avec les ondes sismiques générées par les chocs entre les cailloux qui sont enregistrées via un géophone – ou sismomètre installé en haut de berge. En France, elle a été développée en parallèle de la mesure acoustique (Gimbert et al., 2019 ; Bakker et al, 2020 ; Misset et al., 2020).

Ainsi, une station installée en berge, entretenue dans la durée, permet d'enregistrer un signal proportionnel au charriage grâce à un hydrophone ou un géophone. Une calibration par jaugeages solides de ce signal est nécessaire pour le convertir en flux sédimentaire. Cette calibration peut se faire soit avec la méthode directe par prélèvement vue précédemment, soit par cartographie acoustique, une méthode de mesure indirecte, plus simple, rapide et légère (Geay et al., 2020 ; Nasr et al., 2023a). Le logiciel Riversound© (2026) a été développé par les partenaires EDF, GINGER-BURGEAP, INRAE et l'Université de Tours pour accompagner l'utilisateur dans la mise en œuvre, le traitement et l'interprétation des mesures de charriage réalisées.

L'ESSENTIEL

La caractérisation et la quantification des flux de charriage des cours d'eau est possible par des mesures indirectes passives (acoustiques ou sismiques) qui présentent des avantages par rapport aux mesures directes (prélèvements d'échantillons). Une station de suivi continu en berge peut être calibrée par des cartographies acoustiques pour quantifier les flux qui transitent dans la section.

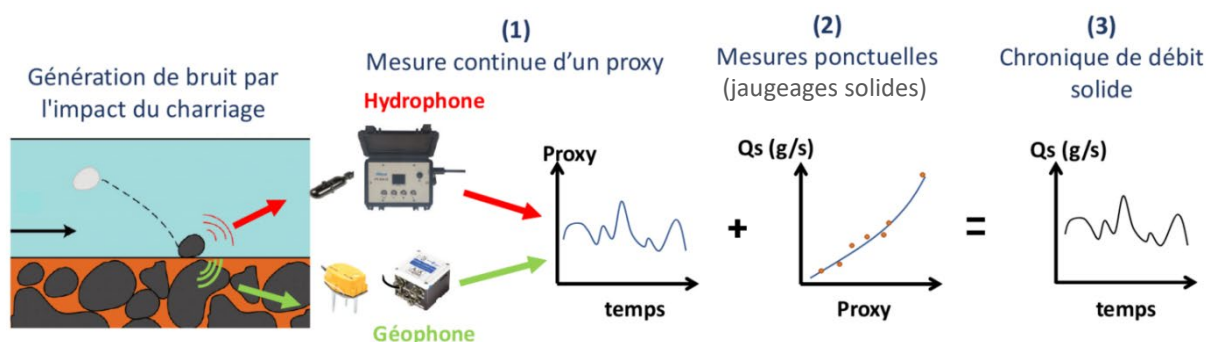
AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> + Les méthodes sont passives et ne perturbent pas l'écoulement ni le transport solide + Les méthodes sont adaptées à une large gamme de rivières de plaine et de piémont (sables grossiers, graviers, cailloux, galets) + Les méthodes permettent de quantifier les flux après calibration + Les résultats peuvent être interprétés en termes de flux de charriage instantané et de bilan sédimentaire sur une période donnée + Les données peuvent être télétransmises 	<ul style="list-style-type: none"> - La calibration d'une station doit être actualisée si la morphologie du lit évolue ou en cas de modification des conditions d'apports sédimentaires - La mesure acoustique peut être sensible en cas de turbulences hydrauliques - La mesure sismique est sensible à l'environnement et est moins précise pour détecter le début du charriage

MISE EN ŒUVRE

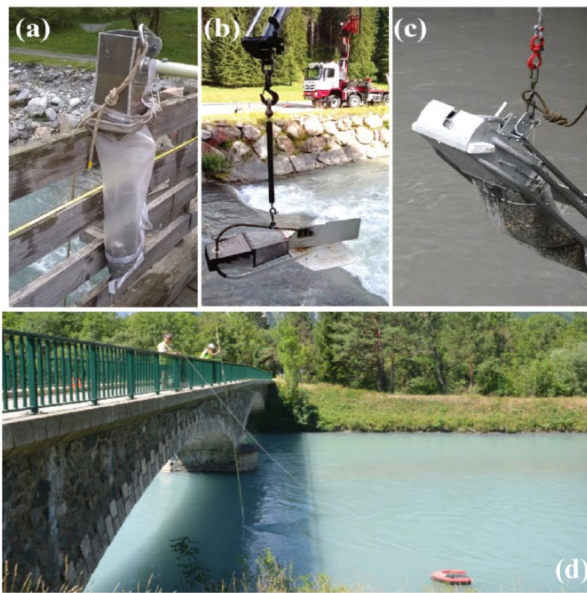
Tâche	Temps	Moyens humains	Compétences	Matériel	Coût
Installation station en berge	1 j	2 pers.	Contexte hydrologique, hydraulique et morphodynamique	Capteur (hydrophone ou géophone), enregistreur, alimentation, télécom	5 à 20 k€, hors génie civil
Maintenance, calibration et interprétation	Total 5 à 20 j/an	2 pers.	Maintenance matériel Protocole de calibration Logiciel Riversound© (formation nécessaire : 4-5 jours protocole et logiciel)	Matériel de maintenance, matériel de cartographie acoustique	15 à 30 k€/an

PRINCIPES

Les matériaux transportés par les cours d'eau génèrent à la fois des ondes acoustiques (bruits) et sismiques (vibrations) au cours de leur déplacement. Ces signaux sont enregistrés (1) puis analysés. Associées à des mesures ponctuelles de calibration de la station (2), ces données permettent l'établissement de chroniques de débit solide et des bilans sédimentaires (3).



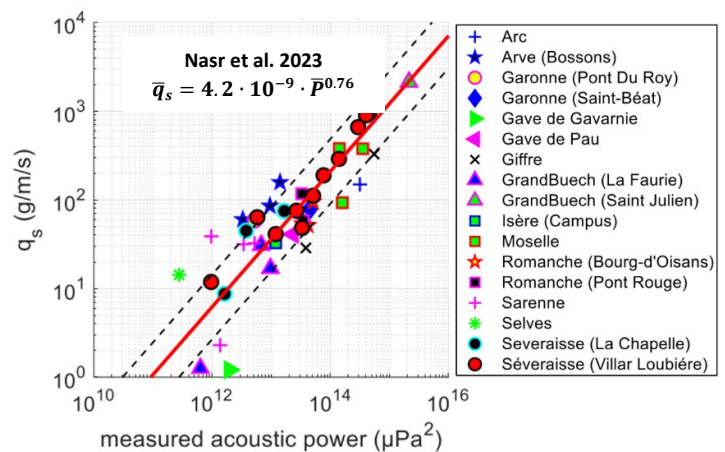
Une station de mesure par **hydrophone** est généralement installée en berge, avec ou sans génie civil. Elle se compose d'une sonde hydrophone installée dans le cours d'eau, fixée afin de rester stable durant les périodes de mesure, et reliée à un enregistreur via un tube rigide installé dans le talus de berge. Pour une station de mesure par **géophone**, l'ensemble du système est installé en haut de berge, hors du lit. Des données hydrométriques pour le site ou une estimation des chroniques hydrologiques sont utiles pour analyser la variabilité du charriage en fonction du débit liquide.



La quantification des flux de charriage d’une station de suivi continu en berge nécessite une courbe de tarage spécifique, établie à partir de **mesures ponctuelles** du transport solide (jaugeages solides). Cette calibration peut être réalisée par des prélèvements (a, b, c) dont la mise en œuvre est contraignante. Les développements R&D réalisés depuis 2010 permettent de s’en affranchir en réalisant une **cartographie acoustique passive** (d) comme alternative au prélèvement direct.

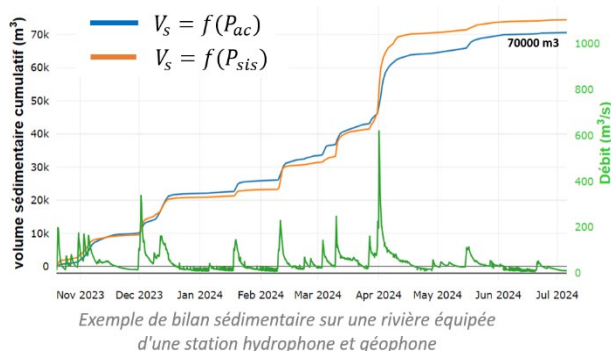
La cartographie acoustique consiste à laisser dériver un radeau (ou un drone aquatique, voire un bateau dans les rivières navigables, en l’absence de pont) pour enregistrer le signal acoustique sans perturbations hydrauliques, à différentes positions permettant de balayer la section d’écoulement du cours d’eau.

La **calibration** est possible grâce à plusieurs années de mesures de terrain (Geay et al., 2020 ; Nasr et al., 2023a) : 42 séries de mesures conjointes par prélèvements et par cartographie acoustique ont été réalisées sur 18 tronçons de rivière différents répartis dans les Alpes, les Pyrénées et le Massif Central, avec une forte diversité de configuration (pentes de 0.05 à 2.5%, D50 de 1 à 54 mm). Ces travaux ont permis de démontrer une corrélation entre la puissance acoustique moyenne sur la section mesurée par cartographie acoustique et les flux de charriage.



Des mesures de terrain similaires sur un fleuve sableux, tel que la Loire (pente de 0,02 %, D50 de 1 mm), montrent une loi de calibration très proche (Le Guern et al., 2021). Par ailleurs, une méthode d’inversion acoustique a récemment été développée pour réduire les incertitudes liées à la calibration globale, en fonction des conditions de propagation du signal (Nasr et al., 2023b).

La calibration d’une station en berge nécessite plusieurs jaugeages par cartographie acoustique (au minimum 3 à 5), qui doivent être actualisés en cas d’évolution de la morphologie de la section. Le logiciel RiverSound©, développé par les partenaires (EDF, GINGER-BURGEAP, INRAE), accompagne l’utilisateur dans toutes les étapes de calibration et d’analyse des données acoustiques.



Exemple de bilan sédimentaire sur une rivière équipée d’une station hydrophone et géophone

Les **résultats** issus de l’interprétation sont nombreux et variés : courbe de tarage sédimentaire (relation débit liquide/transport solide) ; quantification des flux (instantané ou en cumulé par périodes) ; identification des débits de début de charriage ; analyse de la dynamique du transport solide (avant / pendant / après crue), constat de la variabilité du transport solide pour un même débit (hystérésis), etc. Par ailleurs, les résultats peuvent être utiles pour calibrer un modèle hydrosédimentaire numérique ou pour suivre les impacts d’une action de gestion sédimentaire ou de restauration hydromorphologique.

PERSPECTIVES ET PRECONISATIONS

Les outils poursuivent globalement leur développement. Des améliorations du logiciel Riversound© sont en projet, telles que l'exploitation des données sismiques ou l'interprétation de la granulométrie du charriage. Les réseaux de mesure se développent sur plusieurs rivières en France (Rhône, Loire, Drac, Isère, Romanche, Buëch, Gave de Pau, Allier, etc.) et à l'international (Paraná, Danube), avec hydrophones et/ou géophones.

PERSONNES RESSOURCES

Mohamad NASR

GINGER BURGEAP
m.nasr@groupeginger.com
 Tel : 06 58 15 10 61

Frédéric LAVAL

GINGER BURGEAP
f.laval@groupeginger.com
 Tel : 06 07 05 38 93

Sébastien ZANKER

EDF-DTG
sebastien.zanker@edf.fr
 Tel : 06 74 93 80 39

Alain RECKING

INRAE
alain.recking@inrae.fr
 Tel : 06 04 19 48 31

Jules LE GUERN

Université de Tours :
leguern@univ-tours.fr
 Tel : 06 18 21 04 47

Anne PERRISSIN

Eau du Grand Lyon
 Anne PERRISSIN
anne.perrissin@eaudugrandlyon.com
 Tel : 06 68 63 20 69

DOCUMENT(S) SOURCE

Exemple d'échantillons sonores sur divers cours d'eau : [publication LinkedIn](#) (M.Nasr, 2022)
 Guide des protocoles de terrain et d'utilisation du logiciel Riversound©

AUTEUR(S)

Auteurs initiaux : Philippe BELLEUDY (UGA-IGE), Thomas GEAY (UGA-IGE), Alain RECKING (INRAE-IGE), Sébastien ZANKER (EDF-DTG)

Auteurs actuels : Mohamad NASR (GINGER BURGEAP), Sébastien ZANKER (EDF-DTG), Alain RECKING (INRAE), Jules LE GUERN (Université de Tours), Anne PERRISSIN (Eau du Grand Lyon), Frédéric LAVAL (GINGER BURGEAP).

STRUCTURE(S) PORTEUSE(S) DU PROJET

Structures porteuses actuelles : EDF-DTG Grenoble ; GINGER BURGEAP (Grenoble, Lyon) ; INRAE Grenoble ; Eau du Grand Lyon ; SYMBHI
 Structures associées : Université de Tours, Université de Grenoble (IGE), Agence de l'Eau RMC (financier)

SITES ET OBSERVATOIRES DE LA ZABR MOBILISES

Le site « Arc-Isère »
 L'observatoire OHM Vallée du Rhône, dont l'OSR

THEMATIQUES ZABR ABORDEES

Flux – Formes – Habitats – Biocénoses (FFHB)

PROJETS

Premiers travaux IGE (2000-2010) ; thèse Geay (2010-2013)
 Convention EDF-DTG / IGE 2014-2018
 Convention EDF-DTG / BURGEAP 2019-2023, dont thèse Nasr (2023) ; convention INRAE / BURGEAP 2024
 R&D GINGER BURGEAP 2025
 Thèse Le Guern (2022) et projet SSESAR Université de Tours (2023-2025)
 Programmes R&D sur le Rhône (Eau du Grand Lyon, 2020-2026) et sur le Drac (SYMBHI, 2024-2026)

BIBLIOGRAPHIE

- Bakker, M., Gimbert, F., Geay, T., Misset, C., Zanker, S., & Recking, A. (2020). Field Application and Validation of a Seismic Bedload Transport Model. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, e2019JF005416. <https://doi.org/10.1029/2019JF005416>
- Geay, T., S. Zanker, C. Misset, and A. Recking (2020), Passive acoustic measurement of bedload transport: towards a global calibration curve, *J. Geophys. Res. Earth Surf.*
- Gimbert, F., Fuller, B. M., Lamb, M. P., Tsai, V. C., & Johnson, J. P. L. (2019). Particle transport mechanics and induced seismic noise in steep flume experiments with accelerometer-embedded tracers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(1), 219–241. <https://doi.org/10.1002/esp.4495>
- Le Guern, J., Rodrigues S., Geay, T., Zanker, S., Hauet, A., Tassi, P., Claude, N., Jugé, P., Duperray, A., Vervynck, L. (2021). Relevance of acoustic methods to quantify bedload transport and bedform dynamics in a large sandy-gravel-bed river. *Earth Surf. Dynam.*, 9, 423–444, 2021. <https://doi.org/10.5194/esurf-9-423-2021>
- Misset, C., Recking, A., Legout, C., Bakker, M., Bodereau, N., Borgniet, L., et al. (2020). Combining multi-physical measurements to quantify bedload transport and morphodynamics interactions in an Alpine braiding river reach. *Geomorphology*, 351, 106877. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106877>
- Nasr, M., Johannot, A., Geay, T., Zanker, S., le Guern, Jules., & Recking, A. (2023a). Passive Acoustic Monitoring of Bedload with Drifted Hydrophone. *Journal of Hydraulic Engineering*. <https://doi.org/10.1061/JHEND8/HYENG-13438>
- Nasr, M., Johannot, A., Geay, T., Zanker, S., le Guern, J., & Recking, A. (2023b). Optimization of passive acoustic bedload monitoring in rivers by signal inversion. *Earth Surface Dynamics*.



Liberté
Égalité
Fraternité