

Surveillance acoustique passive du transport sédimentaire par charriage : Application à la rivière Drac

Passive Acoustic Monitoring of Sediment Transport by Bedload: Application on the Drac River

Mohamad NASR (GINGER BURGEAP, Grenoble, France) [m.nasr@groupeginger.com]

Frédéric LAVAL (GINGER BURGEAP, Grenoble, France) [f.laval@groupeginger.com]

Sébastien ZANKER (EDF Hydro-DTG, Saint-Martin-le-Vinoux, France) [sebastien.zanker@edf.fr]

Claire GODAYER (SYMBHI, Grenoble, France) [claire.godayer@symbhi.fr]

RÉSUMÉ

La connaissance des flux de charriage en rivière est un enjeu pour les gestionnaires qui sont impliqués dans la maîtrise de l'équilibre hydrosédimentaire des cours d'eau, sous l'influence d'aménagements anthropiques (barrages, retenues, seuils, endiguements, plage de dépôt) ou dans le cadre d'opérations de restauration hydromorphologique. La mesure du charriage par acoustique passive permet de répondre à cet enjeu en utilisant des hydrophones calibrés qui vont permettre la surveillance continue du transport sédimentaire par charriage. Le travail de R&D qui est présenté s'applique à la rivière Drac, près de Grenoble, en France. À l'aide d'un hydrophone fixé sur la berge et couplé à une calibration basée sur des cartographies acoustiques, des chroniques détaillées des flux sédimentaires ont été obtenues de 2019 à 2023. Les volumes de sédiments estimés par cette méthode ont été comparés et validés en utilisant des approches conventionnelles, telles que les relevés bathymétriques et la modélisation 1D. De plus, le flux solide mesuré dans cette étude a démontré que les mesures acoustiques passives peuvent être utilisées pour détecter les changements dans la dynamique du transport sédimentaire, qu'ils soient d'origine naturelle ou dus à des interventions humaines. Cette étude souligne que les hydrophones pourraient constituer un outil opérationnel pour les gestionnaires de cours d'eau, fournissant des données essentielles pour les plans de gestion sédimentaire et l'optimisation des infrastructures hydrauliques.

ABSTRACT

Understanding bedload transport in rivers is a key challenge for river managers tasked with maintaining the hydrosedimentary balance. This balance is often influenced by anthropogenic factors such as dams, impoundments, weirs, embankments, and bedload regulation, or by interventions aimed at hydromorphological restoration. This research addresses these challenges by applying passive acoustic methods for continuous monitoring of bedload sediment transport. Focused on the Drac River near Grenoble, hydrophone measurements from 2019 to 2023, calibrated with acoustic mapping, provided detailed sediment transport records. Sediment volumes estimated by this method were compared using conventional approaches, such as bathymetric surveys and 1D modeling. Additionally, the measured bedload flux in this study demonstrated that the passive acoustic measurements can be used to detect changes in sediment transport dynamics, whether occurring naturally or as a result of human interventions. This study highlights that hydrophones could serve as an operational tool for river managers, providing essential data for sediment management plans and the optimization of hydraulic infrastructures.

MOTS CLÉS

Calibration du flux sédimentaire, gestion des cours d'eau, hydrophones, outils de gestion fluviale, surveillance acoustique passive

Bedload sediment transport, hydrophones, passive acoustic monitoring, river management tools, sediment flux calibration

1 INTRODUCTION

La rivière Drac, un système hydrologique important dans la plaine de Grenoble, a subi d'importantes transformations morphologiques et sédimentaires au fil des siècles, en raison de processus naturels et d'interventions humaines intensives. Historiquement, la rivière a causé des dommages considérables par ses inondations et ses dépôts de sédiments, ce qui a conduit, dès le XIV^e siècle, à la mise en œuvre de mesures de protection et d'ingénierie variées. Ces interventions, telles que la construction de digues, de canaux et l'aménagement de zones industrielles, ont profondément modifié la dynamique sédimentaire et l'hydrologie de la rivière, en particulier dans le secteur urbain de Grenoble.

Dans ce secteur, les processus sédimentaires et hydrauliques du Drac demeurent préoccupants. Les ajustements sédimentaires et morphologiques dans cette zone ont des implications majeures pour la gestion des risques d'inondation, le transport des sédiments et la santé écologique de la rivière.

Ce tronçon montre des traces évidentes d'incision historique, d'ajustements morphologiques en cours, et de défis liés à la continuité du transport des sédiments. Ces transformations, provoquées par l'extraction de sédiments, la construction de barrages et les opérations hydroélectriques, ont créé un équilibre complexe entre érosion localisée, approfondissement du chenal et dépôt de sédiments. La stabilisation des bancs végétalisés et la simplification de la morphologie des chenaux compliquent davantage la dynamique sédimentaire et réduisent la résilience du système face aux crues.

Des efforts récents ont été intensifiés pour mieux caractériser les risques et définir des scénarios d'aménagement adaptés. La mesure du transport solide (charriage) est un élément fondamental pour comprendre le fonctionnement morphodynamique des rivières. Si les méthodes directes (par exemple, les échantillonneurs de sédiments) ne fournissent que des données ponctuelles, limitées spatialement et temporellement en raison de contraintes logistiques et financières, la prédiction du charriage peut également être réalisée à l'aide de formules empiriques. Ces équations, qui estiment la capacité de transport solide, sont accompagnées d'une forte incertitude, en particulier dans un contexte comme celui du Drac, où les processus sédimentaires sont naturellement dynamiques et peuvent être influencés par les activités humaines sur la rivière.

Cette étude se concentre sur l'application des techniques de mesure acoustique passive pour surveiller le transport solide dans la rivière Drac, à proximité de Grenoble. Les approches indirectes offrent la possibilité d'un suivi continu du transport solide. Les résultats du suivi continu du charriage sur une période de 4 années sont présentés dans ce travail.

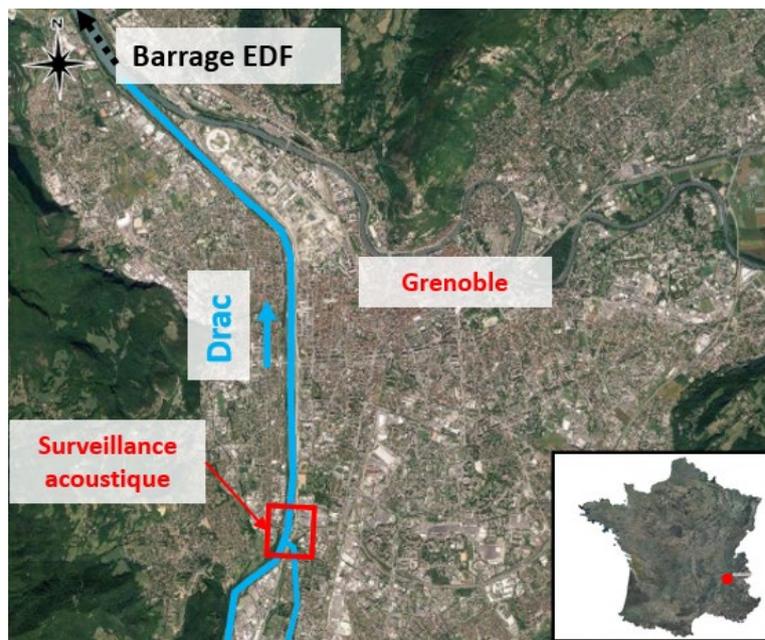


Figure 1 Zone d'étude sur la rivière Drac à proximité de la ville de Grenoble

2 METHODE

2.1 Mesure acoustique en berge

Une mesure acoustique en continu a été mise en place en 2019 sur le Drac, aux portes de l'agglomération grenobloise. Pour cette station, un hydrophone HTI-96 (High Tech Inc.), installé en berge, mesure les entrechocs émis par les particules lors du charriage. Ces hydrophones sont raccordés à des enregistreurs (Wildlife Acoustics) permettant d'échantillonner les données acoustiques à une fréquence de 192 kHz. L'acquisition de données a été paramétrée pour enregistrer 30 secondes de bruit toutes les 10 minutes. La puissance acoustique mesurée (P_{bank}) a été intégrée entre 2 kHz et 30 kHz, gamme de fréquences où les bruits de charriage sont captés.

Cette mesure continue permet uniquement de caractériser la dynamique du transport sédimentaire. Cependant, elle doit être calibrée afin d'estimer les volumes de sédiments transportés.

2.2 Jaugeage solide par cartographie acoustique

Avec la calibration par cartographie acoustique, la puissance acoustique P_{bank} est convertie en flux solide. Cette calibration s'effectue en deux étapes. Dans un premier temps, des cartographies acoustiques sont réalisées à partir d'un radeau équipé d'un hydrophone et manœuvré depuis un pont afin d'écouter l'ensemble de la section de rivière (Geay et al., 2020; Le Guern et al., 2021; Nasr et al., 2023a). En utilisant la cartographie acoustique, la puissance acoustique moyenne de la source de bruit de charriage sur la section (\bar{P}^*) est calculée selon la méthode d'inversion proposée par Nasr et al. (2023b). Ensuite \bar{P}^* est reliée au débit solide unitaire moyen (\bar{q}_s en g/s/m) par une équation de calibration globale ($\bar{q}_s = f(\bar{P}^*)$), proposée par Nasr et al. (2023b). Le flux total de charriage (Q_s en g/s) est ensuite calculé en utilisant \bar{q}_s et la largeur de la section de la rivière.

Dans un second temps, P_{bank} est corrélé à Q_s afin d'établir une courbe de calibration du transport solide pour la station hydrophone en berge, qui peut être appliquée à la chronique complète de P_{bank} . Cette chronique permet, in fine, d'estimer les flux sédimentaires sur l'ensemble de la période étudiée (2019-2023).

Au total, près de 20 cartographies acoustiques ont été réalisées sur le Drac.

3 RESULTATS

3.1 Volume de sédiments transportés

À partir de la chronique du Q_s , le volume cumulé mensuel de sédiments transportés (en m^3) est calculé sur toute la période d'étude (Figure 2). La figure met en évidence des périodes de transport principalement durant la saison de fonte de chaque année (avril à juillet), avec quelques épisodes de transport pendant les crues automnales. On peut observer sur cette figure des intensités et des durées de flux solides variables, principalement liées aux différentes conditions hydrologiques de la rivière Drac selon les années.

Le volume annuel transporté pour chaque année hydrologique (d'avril de l'année n à fin mars de l'année $n+1$) est présenté dans la Figure 2. Nous pouvons calculer un volume annuel moyen de charriage d'environ $30\,000\ m^3$. Cette valeur est comparable au volume de charriage calculé à partir des données bathymétriques, qui estiment un volume annuel moyen compris entre $11\,000$ et $24\,000\ m^3$ (moyenne sur la période 1993-2019). De plus, les volumes calculés par la méthode acoustique sont également cohérents avec les résultats de la modélisation 1D (BedloadWeb, formule de Recking), qui estime $27\,000\ m^3/an$ [$14\,000 - 43\,000$] sur la période 2014-2021.

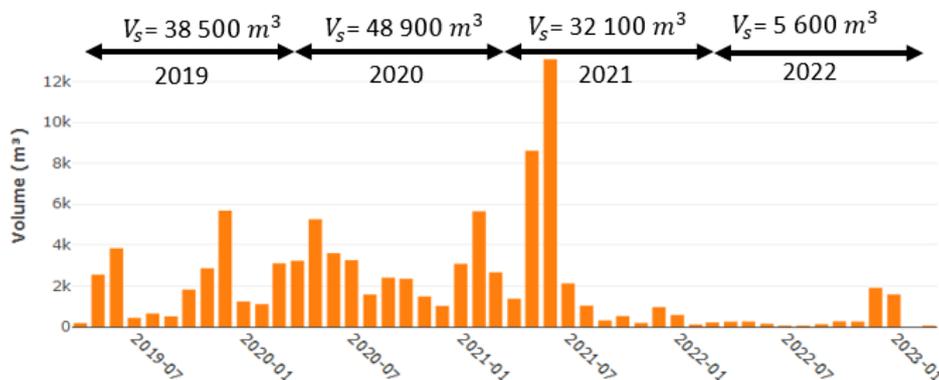


Figure 2 : bilan sédimentaire calculés à partir du signal acoustique mesuré en berge sur le Drac

3.2 Dynamique sédimentaire

La Figure 3 représente la variation du flux solide en fonction du débit. Le flux solide augmente généralement avec le débit, ce qui est cohérent avec le fonctionnement du charriage. On peut noter sur cette figure une variation du flux solide d'environ un ordre de grandeur pour un même débit. Par exemple, pour un débit 150 m³/s, les valeurs de Q_s varient entre 1 000 et 10 000 g/s. La dynamique sédimentaire mesurée avec les hydrophones peut être interprétée plus en détail chaque année en tenant compte des épisodes de crues survenus sur le Drac. Les données obtenues par le suivi hydrophone mettent ainsi en évidence l'avantage de cette méthode par rapport aux méthodes basées sur les mesures de débit (e.g., la modélisation), qui ne permettent pas de détecter les phénomènes d'hystérésis.

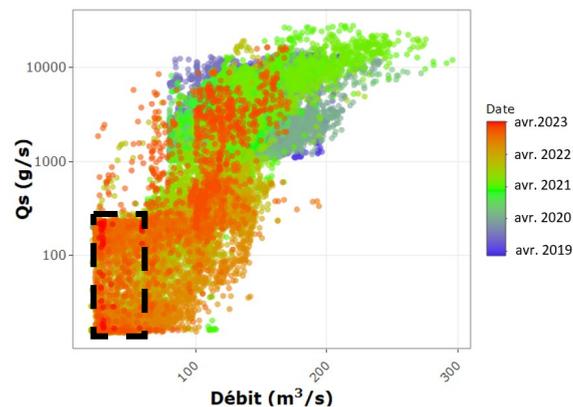


Figure 3 Relation entre le flux total de charriage Q_s mesuré par méthode acoustique et le débit entre 2019 et 2023 (valeurs horaires moyennes). Les valeurs à faible débit (encadrées en noir) correspondent au bruit électronique du matériel d'acquisition et ne sont pas incluses dans le volume calculé.

4 CONCLUSION

Cette étude présente la méthode acoustique passive utilisant des hydrophones pour surveiller en continu le transport solide par charriage. Cette méthode a été mise en œuvre sur la rivière Drac, à proximité de la ville de Grenoble. Les hydrophones installés en berge, combinés à une calibration par cartographie acoustique, ont permis d'établir des chroniques détaillées des flux sédimentaires sur une période de plusieurs années (2019-2023). Les volumes de sédiments estimés grâce à cette méthode ont été validés en les comparant à ceux obtenus par des approches plus classiques, telles que les bilans bathymétriques et les modélisations 1D. De plus, cette étude illustre comment les mesures par hydrophone peuvent être utilisées pour caractériser la dynamique sédimentaire spécifique à la rivière Drac.

Les résultats obtenus mettent en évidence la pertinence des hydrophones comme outil opérationnel pour l'estimation des flux sédimentaires. Cette technologie peut être appliquée par les gestionnaires de cours d'eau pour le suivi des plans de gestion sédimentaire ou l'optimisation du fonctionnement des ouvrages hydrauliques. Cependant, comme pour toute méthode de mesure, et particulièrement dans le domaine du transport solide, certaines limites et incertitudes subsistent, nécessitant des précautions dans leur interprétation et utilisation.

BIBLIOGRAPHIE

Geay, T., Zanker, S., Misset, C., and Recking, A.: Passive Acoustic Measurement of Bedload Transport: Toward a Global Calibration Curve?, *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 125, 2020.

Le Guern, J., Rodrigues, S., Geay, T., Zanker, S., Hauet, A., Tassi, P., Claude, N., Jugé, P., Duperray, A., and Vervynck, L.: Relevance of acoustic methods to quantify bedload transport and bedform dynamics in a large sandy-gravel-bed river, *Earth Surf. Dyn.*, 9, 423–444, 2021

Nasr, M.: Development of a passive acoustic method for bedload monitoring in rivers, PhD. Thesis, University of Grenoble Alpes, 222 p., 2023.

Nasr, M., Johannot, A., Geay, T., Zanker, S., Le Guern, J., and Recking, A.: Passive Acoustic Monitoring of Bedload with Drifted Hydrophone, *J. Hydraul. Eng.* [accepted], 2023b.

Nasr, M., Johannot, A., Geay, T., Zanker, S., Le Guern, J., and Recking, A.: Optimization of passive acoustic bedload

monitoring in rivers by signal inversion, Earth Surf. Dyn. [preprint], 2023a.