

Développement de la mesure acoustique passive du charriage en rivière

Development of an acoustic method for bedload transport measurement in rivers

(Thèse en co-financement EDF DTG)

Résumé

Cette thèse a pour objectif de consolider et valider la mesure acoustique passive du charriage en rivière, par hydrophone. Elle s'inscrit dans une dynamique engagée depuis plusieurs années entre différents acteurs de la place grenobloise : EDF-DTG, IGE, Gipsa-Lab, Irstea. Cette recherche commence aujourd'hui à produire des résultats très encourageants laissant entrevoir une utilisation opérationnelle prochaine. Des travaux sont néanmoins encore nécessaires, et les objectifs de la thèse seront de (1) valider un modèle de transformation du bruit acoustique en flux transporté (2) mieux comprendre la contribution des différentes fractions transportées et en particulier du sable, (3) proposer une méthodologie d'utilisation de cet outil en berge pour une mesure en continu.

Abstract

This thesis aims to consolidate and validate passive acoustic measurement of bedload transport in rivers, by hydrophone. It is part of a dynamic initiated for several years between different actors in the Grenoble area: EDF DTG, Ige, Gipsa-Lab, Irstea. This research is now starting to produce very encouraging results, suggesting a future operational use. However, work is still needed, and the objectives of the thesis will be to (1) validate a model of acoustic noise transformation in transport rate (2) better understand the contribution of the different fractions transported and in particular sand, (3) propose a methodology for using this tool in banks for continuous measurement.

Contexte et enjeux

La mesure du charriage en rivière est un exercice complexe qui fait encore aujourd'hui l'objet de nombreuses recherches. Alors que des techniques de prélèvement direct par échantillonneur ont été développées depuis plus d'un siècle, elles atteignent aujourd'hui des limites qui pourront difficilement être dépassées (lourdeur technique et coût de mise en œuvre, biais de mesure non quantifiables liés au caractère très intrusif de la méthode, incapacité à mesurer aux gros débits). En parallèle, on a vu se développer ces dernières années de nouvelles méthodes tirant profit des avancées technologiques et de la grande variété des matériels disponibles dans le commerce ; parmi ces méthodes, trois méritent une attention particulière si on se réfère au nombre croissant de publications qui en font référence (environ 30 publications de rang A ces cinq dernières années): la mesure par géophones ; la mesure par hydrophone ; et la mesure sismique.

Ces méthodes ont en commun qu'elles cherchent à relier les ondes émises par des cailloux qui s'entrechoquent dans la couche charriée et les flux transportés. La méthode par géophone mesure les ondes acoustiques qui se propagent lorsque les cailloux heurtent une plaque préalablement disposée sur le lit du cours d'eau. La méthode sismique mesure les ondes émises dans le sol. La méthode hydrophone mesure les ondes qui se propagent dans l'eau ; on parlera de mesure acoustique passive pour la différencier des géophones. Les méthodes par sismique et acoustique passive sont peu coûteuses (contrairement aux géophones qui nécessitent le plus souvent la construction d'un génie civil en travers du cours d'eau), facilement mises en œuvre, non intrusives,

sans limitation de débit, et peuvent être déployées sur site pendant de longues durées. Cette thèse s'intéresse plus particulièrement à la méthode acoustique par hydrophone.

Les enjeux sont importants. Ils concernent la validation des nombreux modèles que notre communauté développe par ailleurs. La technique hydrophone offre aussi de belles perspectives pour le suivi des crues, la gestion du risque et des aménagements hydrauliques. On envisage également des perspectives industrielles, car ces outils, facile à mettre en œuvre pourront intéresser de nombreux acteurs de la gestion des cours d'eau.

Cette thèse est l'aboutissement d'un processus collaboratif engagé il y a plusieurs années entre Irstea, GIPSA-Lab, IGE et EDF, et qui a déjà produit des résultats plus qu'encourageants (Geay et al 2018, Zanker et al 2018)

Cohérence du sujet de thèse avec les documents directeurs de département (ADD) et les DSS :

Ce sujet est cohérent avec les objectifs affichés dans les documents directeurs Irstea (Axe directeur « Hydrosystèmes et risques naturels » du département Eaux et DSS « Risques naturels, sanitaires et environnementaux ») qui encouragent le développement d'approches et d'outils innovants pour faire face au défi de l'accroissement de l'aléa dans un contexte du changement global. La mesure sera au cœur des stratégies futures d'adaptation, que ce soit pour une compréhension de la dynamique des changements ou pour tout simplement la mise en place de systèmes de surveillance et d'alerte en temps réel. Le projet hydrophone s'inscrit pleinement dans cette dynamique.

Etat de l'art

Les premières traces de la mesure acoustique dans la littérature scientifique remontent à 1936 (Reitz, 1936) et Grenoble déjà n'était pas en reste puisque un hydrophone y a été construit dès 1942 (Braudeau, 1951). Plus tard on retrouve quelques tentatives de relier la puissance acoustique à la masse de sédiments transportée (Bedeus et Ivicsics, 1963; Jonys, 1976). Dans les années 1980, des mesures en laboratoire (Thorne, 1985, 1986) et des études théoriques (Thorne, 1988) ont posé quelques bases théoriques encore utilisées aujourd'hui. Il faudra attendre néanmoins les années 2000 pour voir resurgir un intérêt pour la mesure hydrophone (Belleudy 2001), avec notamment la thèse de Thomas Geay (2013). Il est aujourd'hui établi que l'acoustique est un bon proxy de la mesure du flux charrié (Geay et al 2017).

D'un point de vue théorique, les travaux de Thorne (1985, 1986, 1988), ont montré que le spectre du signal acoustique est relié à la taille des grains transportés. Deux paramètres ont été utilisés: (1) le pic de fréquence f_{peak} et (2) le pic central f_c , exprimés en Hz. f_{peak} correspond au maximum de la densité spectrale de puissance (PSD en $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$). f_c représente le centre des fréquences de la PSD. Pour des sédiments uniformes il a été montré que ces fréquences significatives sont presque inversement proportionnelles à la taille des grains D:

$$f_{peak} = \frac{224}{D^{0.9}} \quad (1)$$

$$f_c = \frac{209}{D^{0.88}} \quad (2)$$

Ces équations ont été utilisées dans plusieurs études pour essayer d'estimer la taille des particules transportées à partir de mesures acoustiques passives (Bassett et al., 2013; Marineau et al., 2016;

Mason et al., 2007). Mais si la détection du charriage dans le signal acoustique a bien été démontrée par tous ces travaux, la capacité à remonter à des flux transportés restait un challenge. C'est pourquoi nous avons engagé depuis 2015, dans le cadre d'une collaboration EDF/Irstea/GIPSA-Lab/IGE, une vaste campagne de validation consistant à confronter la mesure acoustique à des mesures directes au préleveur (Elwha ou Toutle). Une dizaine de cours d'eau ont été échantillonnés dans les Alpes et les Pyrénées et les premiers résultats présentés sur la figure suivante montrent une relation nette entre le flux et le signal acoustique (Geay et al 2018, Zanker et al 2018).

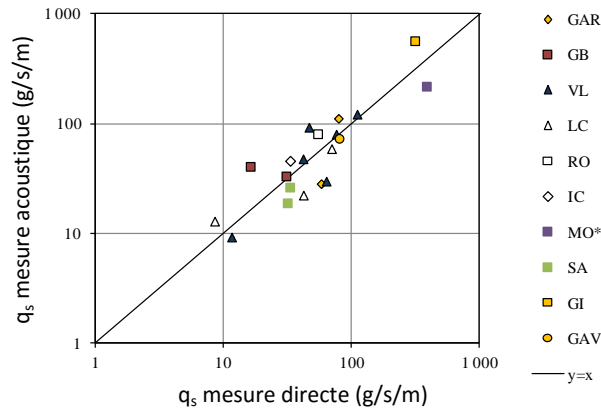


Figure 1 : Résultats des premiers tests de validation de la mesure acoustique par comparaison avec la mesure directe du charriage

Descriptif des travaux :

Cette thèse aura pour objectifs :

- De consolider les résultats actuels par de nouvelles mesures
- De mieux comprendre la contribution des différentes fractions du mélange sédimentaire, et en particulier de la fraction sableuse
- De valider la mesure continue en berge (ne nécessitant pas la présence d'un opérateur)

Chacun de ces objectifs donnera lieu à une publication scientifique.

Consolidation des résultats actuels

L'ajustement obtenu pour le moment (Figure 1) est le suivant :

$$q_s = 1.5 \cdot 10^{-7} P^{0.65} \quad (3)$$

Les résultats avec cette équation, présentés sur la figure 1, indiquent une prédiction du flux dans une enveloppe d'erreur de 2 à 3, ce qui de très loin est bien meilleur que ce que donne la plupart des équations de transport dont l'erreur peut atteindre plusieurs ordres de grandeur. Il est également intéressant de rappeler que cette relation a été construite à partir de 16 échantillons couvrant une large gamme de pente (0.05 à 1.5%), de granulométrie (D_{84} entre 5 et 300 mm), de largeur (8 à 100 m), et de hauteur d'eau (0.4 à 2.8m).

Ce côté « universel » de la relation, a été une bonne surprise et fait apparaître de belles perspectives pour la mesure acoustique. Mais la méthode doit encore être validée, et ces résultats nécessitent

d'être confortés, d'un point de vue théorique, par une meilleure prise en compte de la physique de la propagation des ondes acoustiques en rivière.

De nouveaux points par échantillonnage seront produits dans les cours d'eau déjà étudiés, mais également dans de nouveaux cours d'eau à définir. La mesure directe du charriage sera réalisée au préleveur Helley-Smith de type Elwha (Figure 2). L'avantage de ce type de préleveur est qu'il peut être manipulé par deux opérateurs, sans machinerie, depuis un pont. Par conséquent il permet des interventions rapides sur site en cas de crue (une difficulté majeure de la mesure étant de pouvoir intervenir lors des crues qui parfois surviennent sur un laps de temps court, en particulier dans les alpes). On pourra réaliser, plus occasionnellement, des mesures au préleveur Toutle, plus gros et manipulé depuis un camion grue.

Suivant la procédure établie et déjà bien rodée par les équipes Edf/ Irstea, des mesure conjointes et simultanées HS/ Hydrophone seront produites en divers points de la section puis moyennées. Chaque point sera associé à une condition hydraulique (hauteur d'eau mesuré par sondage local, vitesse mesurée par radar ou LSPIV, débit lorsqu'un jaugeage existe). Ces campagnes de mesures bénéficieront de synergies avec d'autres projets en cours (voir plus loin), ce qui en assurera à la fois la faisabilité et la qualité de la donnée collectée.



Figure 2 : a) Le préleveur Elwha b) l'hydrophone monté sur un radeau

Contribution des différentes fractions transportées au signal acoustique

Améliorer la qualité de la mesure nécessitera de mieux comprendre la contribution de chaque taille en présence dans le mélange transporté. En particulier des doutes existent sur la réelle contribution de la fraction sableuse, qui pourrait contribuer à la variabilité de la mesure (le sable peut être une source de bruit, mais en même temps pourrait être une source d'atténuation de la propagation dans le milieu). Cette question est d'autant plus importante que dans certains cours d'eau cette fraction est loin d'être négligeable, et de ce fait intéresse beaucoup les gestionnaires d'ouvrages.

Plusieurs actions seront envisagées pour étudier cette question. Premièrement une attention particulière sera apportée à la mesure du sable lors de campagnes de terrain. Des stratégies d'échantillonnage adaptées seront mises en place sur la colonne d'eau (le sable pouvant être transporté par suspension et sur le fond). Des échantillonneurs spécifiques au sable seront utilisés (P72, Bouteille de Delft ou Nile), mais nous essayerons également d'innover avec des techniques mieux adaptées aux rivières alpines, comme par exemple en utilisant une colonne de préleveurs par pompage associés à des capteurs de pression différentielle, disposés sur une canne manipulée depuis un pont selon le protocole établi et validé pour le préleveur Elwa.

Nous envisageons également des mesures de terrain en conditions maîtrisées. Cela consistera à réaliser des lâchers de mélanges sédimentaires, de composition connue, en amont de la section de mesure. Cela nécessitera de trouver des sections de lit stables (pavé), où le bruit généré par les sédiments injectés ne sera pas noyé dans le bruit généré par la charge naturellement transportée par le cours d'eau (nous avons déjà plusieurs cours d'eau candidats).

Ces mesures de terrain seront couplées avec des mesures au laboratoire. Des expériences simples consisteront à mesurer des lâchers de mélanges de composition variée, sans eau. Des expériences en eau seront réalisées à Irstea, dans la mesure de la capacité d'écoute des micros dans un environnement fermé et en présence de pompes. Une alternative consistera à faire des tests dans un laboratoire extérieur (par exemple une thèse en cours avec Dieter Rickenmann au WSL consiste à tester les géophones sur un canal de plusieurs dizaines de mètres en extérieur ; on pourrait sans difficulté associer une mesure acoustique à ces expériences).

Ces approches expérimentales seront bien entendu menées de front avec une analyse théorique. Différents développements ont récemment été proposés, notamment dans le cadre de la thèse de Teodor Petrut (Petrut et al 2018, Geay et al 2018a). Ces méthodes pourront être testées et améliorées.

Mesure continue en berge

Pour le moment les données acoustiques « exploitables » ont été mesurées avec un micro attaché à un radeau et piloté par un opérateur depuis un pont (Figure 3a). Le principe consiste à mesurer en laissant dériver le radeau, ce qui minimise les effets de turbulence (interactions du radeau avec les vagues) en surface. Il s'agit d'une mesure « locale » qui a priori, capte les bruits générés au plus près, c'est-à-dire au droit du point de mesure. L'avantage est qu'on réduit considérablement les effets de propagation dans le milieu et le signal est facilement exploitable. L'inconvénient est que cela nécessite un opérateur et ne permet pas un suivi en continu.

La seconde option consiste à installer un hydrophone fixe en berge (Figure 3b). Cette solution permet une mesure en continu, sans la présence d'un opérateur, et est par conséquent un enjeu essentiel d'un point de vue de l'opérationnel.



Figure 3 : a) Hydrophone mobile sur radeau (mesure locale) et b) Hydrophone fixe en berge (mesure intégrée)

Plusieurs hydrophones en berge ont été installés par EDF (Vénéon...) et des chroniques sont déjà disponibles. Les données produites sont encourageantes (Figure 4) mais ont cependant été peu exploitées à ce jour. L'objectif de la thèse sera d'établir les conditions d'utilisation des signaux acquis en berge.

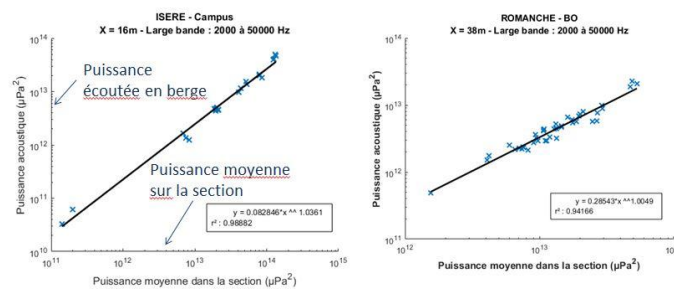


Figure 4 : comparaison de mesures acoustiques en berge et ponctuelles moyennées sur la section, pour l'Isère et la Romanche

Le suivi de station hydrophonique en berge consistera à établir une courbe de jaugeage solide sur un site de prédilection. La construction de cette courbe est comparable à l'établissement de courbes de tarages pour le suivi continu du débit des cours d'eau. Des jaugeages solides réguliers devront être réalisés (par hydrophone mobile et/ou prélèvement) afin de montrer la faisabilité de tarer une mesure du flux solide en berge et ainsi d'apporter une première estimation du flux de transport solide continu par hydrophone.

Planning :

Dès cette année (**année 0**), nous allons recruter un étudiant en master qui travaillera sur la modélisation acoustique en rivière. L'objectif sera de reprendre des modèles existants (Petruț 2017, Geay et al 2018) et d'en tester les limites dans différentes configurations. Dans l'idéal cet étudiant pourrait continuer en thèse.

La thèse commencera en **année 1** par une étude bibliographique couplée avec des campagnes de terrain pour compléter le jeu de données existant. L'étude bibliographique permettra à l'étudiant de s'appropriier les concepts, en particulier sur la physique de propagation des ondes et les applications de l'acoustique en rivière. Cette année sera également mise à profit pour des premiers essais simples de lâcher au laboratoire et pour tester différentes méthodes de prélèvement des sables (protocole, matériel). Le doctorant devra également réfléchir aux protocoles expérimentaux de l'année 2.

L'**année 2** sera dédiée à des expérimentations spécifiques (labo ou terrain) pour l'étude de la contribution des composantes granulométriques et pour la mesure en berge. L'approche expérimentale sera couplée à une analyse théorique de ces signaux (modèles de bruit généré par le charriage et des effets de propagation ; algorithmes d'inversions permettant d'estimer les paramètres du charriage -granulométries, flux- à partir des observations acoustiques.). Cette seconde année devra également être consacrée à la rédaction d'un premier article sur la validation de la méthode acoustique.

L'**année 3** sera une année dédiée à la finalisation de la thèse, avec l'analyse des données produites, la production d'articles, et la rédaction du manuscrit (qui pourra être sur articles).

Collaborations externes :

La thèse bénéficiera d'une forte synergie avec d'autres projets en cours, notamment avec le projet **SEISMORIV** (dans lequel Irstea est engagé avec l'IGE) qui partage les mêmes objectifs que la thèse, puisqu'il ambitionne de valider la mesure sismique du charriage. Ce projet bénéficie déjà d'un post-

doc en cours (avec Maarten Bakker qui a rejoint Irstea Grenoble en septembre 2018) et une thèse débutera dans les prochains mois (recrutement en cours). Une synergie se fera également de façon naturelle avec les travaux menés par Alexandre Hauet à EDF DTG sur l'**adcp fond mobile** (l'idée étant d'essayer de calculer le flux charrié à partir du signal adcp du lit). Enfin, une synergie est également attendue avec l'**ANR DEAR** piloté par Irstea Lyon, qui prévoit de nombreuses campagnes de mesures sur différents cours d'eau. D'autres coopérations sont également en cours avec les Universités de Tours (mesures sur la Loire) et de Strasbourg (mesures sur la Moselle), et également avec le Cerege qui a récemment lancé des actions de recherche sur la mesure acoustique passive du charriage.

Valorisation :

Au moins trois publications sont prévues dans des revues de rang A (Water Resources R., Journal of Geophysical R., J of Hydr Eng...).

Edf, qui co-finance la thèse, est depuis longtemps investi dans le développement de cet outil pour ses besoins internes ; des partenariats sont également à l'étude avec des bureaux d'études qui pourraient contribuer à la diffusion de cet outil en opérationnel. C'est en particulier le cas avec le Burgeap, qui sera impliqué dans le suivi de la thèse via Thomas Geay (bientôt en poste à Burgeap)

Organisation :

L'encadrement de la thèse sera assuré par une équipe déjà investie depuis plusieurs années sur ce sujet : Sébastien Zanker (EDF), Thomas Geay (Gipsa-Lab/Burgeap), Alain Recking (Irstea)

Le doctorant sera accueilli dans l'équipe STRIM de Irstea, sous la Direction de Alain RECKING (HDR). Le financement sera assuré à 50% par EDF qui prendra également en charge les missions (10k€/an) et mettre à disposition le parc de matériel nécessaire aux mesures.

Le candidat recherché devra avoir une formation en mécanique des milieux continus (Ingénieur ou Master), disposer d'un bon niveau d'anglais, avoir des dispositions à la programmation informatique, et être motivé pour le travail de terrain.

Un comité de thèse sera mis en place. On associera au groupe d'encadrement : Florent Gimbert (IGE) qui travaille sur la mesure sismique du charriage, Benoit Camenen (Irstea Lyon) qui est impliqué dans la mesure des sables sur différentes rivières, Oldrich Navratil (Lyon2).

Références bibliographiques

Bassett C, Thomson J, Polagye B. 2013. Sediment-generated noise and bed stress in a tidal channel. Journal of Geophysical Research: Oceans 118: 2249–2265. DOI: 10.1002/jgrc.20169

Bedeus K, Ivicsics L. 1963. Observation of the noise of bed load. General Assembly, Commission on Hydrometry, International Association of Hydrological Sciences, Berkeley, CA, USA : 19–31.

Belleudy Ph 2001 Mesure acoustique passive du transport par charriage dans les rivières, rapport HDR

Braudeau, G., 1951, Quelques techniques pour l'étude et la mesure du débit solide [A few techniques used for the study and measurement of the discharge of solids]: La Houille Blanche, spec. no. A, p. 243-252. Translation no. 54-4, U. S. Waterways Expt. Sta., Vicksburg, Miss.

Geay T 2013 Mesure acoustique passive du transport par charriage dans les rivières, Thèse UGA, 164p

Geay T, Belleudy P, Gervaise C, Habersack H, Aigner J, Kreisler A, Seitz H, Laronne JB. 2017. Passive acoustic monitoring of bed load discharge in a large gravel bed river. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* **122**: 528–545. DOI: 10.1002/2016JF004112

Geay, Zanker, Petrut, Recking, 2018, Measuring bedload grain size distributions with passive acoustic measurements, Proceedings of the RiverFlow conference

Zanker S, Geay T, Recking, A, Hauet A, Misset C, 2018, An estimate of bedload discharge in rivers with passive acoustic measurements: towards a generalized calibration curve? Proceedings of the RiverFlow conference

Jonys CK. 1976. Acoustic measurement of sediment transport. Scientific Series : 64.

Marineau MD, Wright SA, Gaeuman D. 2016. Calibration of sediment-generated noise measured using hydrophones to bedload transport in the Trinity River, California, USA. In Proc. of River Flow conference : 1519–1526.

Mason T, Priestley D, Reeve DE. 2007. Monitoring near-shore shingle transport under waves using a passive acoustic technique. *The Journal of the Acoustical Society of America* **122**: 737–746. DOI: 10.1121/1.2747196

T. Petrut, T. Geay, C. Gervaise, P. Belleudy, S. Zanker, Passive Acoustic Measurement of Bedload Grain Size Distribution using the Self-Generated Noise. *Hydrol. Earth Syst. Sc.* **22**: 767–787 (2018)

Reitz, Wilhelm, 1936, On movement of sediment: *Wasserwirtschaft und Technik*, v. 3, no. 28-30, p. 276-278. Translation no. 37-11, U.S. Waterways Expt. Sta., Vicksburg, Miss

Thorne PD. 1985. The measurement of acoustic noise generated by moving artificial sediments. *Journal of Acoustical Society of America* **78**: 1013–1023.

Thorne PD. 1986. Laboratory and marine measurements on the acoustic detection of sediment transport. *The Journal of the Acoustical Society of America* **80**: 899. DOI: 10.1121/1.393913

Thorne PD. 1988. Generation of underwater sound by colliding spheres. *The Journal of the Acoustical Society of America* **84**: 2144. DOI: 10.1121/1.397060

Zanker S, Geay T, Recking A, Misset C, 2018 Mesure par acoustique passive du transport solide par charriage, proceedings of the IS River conference