

AcouSed : un logiciel pour l'estimation de concentration de matières en suspension dans les rivières à partir de l'inversion de données acoustiques.

AcouSed: a software for acoustic inversion to compute concentrations of suspended-sediments in rivers.

B. Moudjed¹, C. Berni¹, J. Le Coz¹, G. Dramais¹, G. Pierrefeu², S. Fischer³, B. Camenen¹

¹INRAE - UR RiverLy, Lyon Villeurbanne, France, celine.berni@inrae.fr

²CNR, G.Pierrefeu@cnr.tm.fr

³Ubertone, stephane.fischer@ubertone.fr

RÉSUMÉ

Des systèmes de rétrodiffusion acoustique multifréquence (ABS) orientés vers le bas sont déployés à la surface des rivières depuis plusieurs années, afin de mesurer les solides en suspension dans toute la colonne d'eau. Le signal de rétrodiffusion acoustique est traité à l'aide d'une méthode d'inversion multifréquence pour calculer les concentrations de sédiments en suspension. Cette méthode implique à la fois des modèles acoustiques et une calibration à partir de l'analyse d'échantillons pour déterminer les propriétés acoustiques des particules en suspension. Ce document présente un logiciel libre, nommé *AcouSed*, développé pour rendre accessibles des méthodes théoriques complexes d'inversion acoustique. Le signal de rétrodiffusion acoustique est visualisé et prétraité dans le logiciel. La concentration et la distribution granulométrique des échantillons d'eau sont également représentées et utilisées pour calibrer le signal acoustique. *AcouSed* a été conçu pour que l'utilisateur puisse contrôler les options de la méthode d'inversion et visualiser les résultats.

ABSTRACT

Down-looking multi-frequency Acoustic Backscattering Systems (ABS) have been deployed at the surface of rivers for several years, to measure the suspended solids throughout the water column. The acoustic backscatter signal is processed using multi-frequency inversion method to compute suspended sediments concentrations. This method involves both water sample calibration and models to determine the acoustic properties of suspended particles. This document presents a software, named *AcouSed*, developed to make complex theoretical acoustic inversion methods accessible. Acoustic backscatter signal is visualized and preprocessed in the software. Both, concentration and particle size distribution of water sampling are also plotted and used to calibrate the acoustic signal. *AcouSed* was designed so that the user can control inversion method options and plot results.

MOTS CLÉS

Acoustique, limons, rivière, sables, suspension

Acoustic, river, sand, silt, suspension

1 INTRODUCTION

L'étude et la compréhension de la suspension de sédiments dans les rivières sont essentielles pour la gestion des rivières (installations hydroélectriques, biodiversité, qualité de l'eau, etc.). L'utilisation d'échantillonneurs pour mesurer les flux de sédiments reste la référence, bien qu'elle prenne du temps, soit souvent difficile à déployer pendant les crues et fournisse une description très limitée et discrète de la concentration sur l'ensemble de la section transversale. Au cours des dernières décennies, des profileurs de courant à effet Doppler (ADCP) et des systèmes de rétrodiffusion acoustique (ABS) ont été déployés dans les rivières pour extraire des informations sur la concentration de sédiments en suspension (SSC) à partir du signal de rétrodiffusion acoustique (Topping et al., 2007, Moore et al., 2012, Landers et al., 2016, Haught et al., 2017). Ces instruments fournissent des mesures à une résolution spatiale et temporelle beaucoup plus élevée qu'un échantillonnage traditionnel. Cependant, la mesure est indirecte car elle nécessite une inversion complexe et incertaine du signal de rétrodiffusion en concentration.

Les distributions granulométriques observées dans les rivières sont souvent bimodales (Wright et al., 2010). Le premier mode est généralement composé de particules fines (limons et argiles), de concentration relativement homogène sur l'ensemble de la section transversale de la rivière. Le second mode est composé de particules de sable fin à grossier et présente généralement de forts gradients latéraux et verticaux, la concentration augmentant vers le lit. La technologie sonar (ADCP et ABS) pourrait potentiellement fournir des informations à haute résolution spatio-temporelle sur ces deux modes.

Sur la base d'études acoustiques à la fois en océanographie (réponse acoustique d'une suspension de particules de sable) et sur les rivières, Vergne et al. (2020) ont étudié la question de la réponse acoustique des sédiments en suspension dans les rivières. Une méthode d'inversion acoustique a été développée avec succès pour évaluer la concentration des fines et du sable dans la section transversale de la rivière. Ce travail a confirmé la capacité de la technologie hydroacoustique à fournir des informations spatiales sur les suspensions dans les rivières. Un logiciel libre, nommé *AcouSed* a été développé pour appliquer cette méthode plus facilement afin de la partager avec un large public. Plus généralement, *AcouSed* vise à faciliter l'utilisation de ces méthodes pour ceux qui ne sont pas des experts en acoustique, dans le cadre d'études et de recherches sur les sédiments dans les rivières, les estuaires et les zones côtières. Il permet de lire et de visualiser les données brutes provenant de différents instruments ABS, de prétraiter le signal acoustique et les données de l'échantillon (granulométrie et concentration) et d'appliquer d'une manière simple une méthode d'inversion adaptée aux conditions de mesure.

2 METHODE D'INVERSION ACOUSTIQUE

La méthode proposée requiert un signal acoustique enregistré par l'ABS dans la section transversale de la rivière et quelques échantillons d'eau prélevés simultanément sur une verticale afin de calibrer le signal rétrodiffusé.

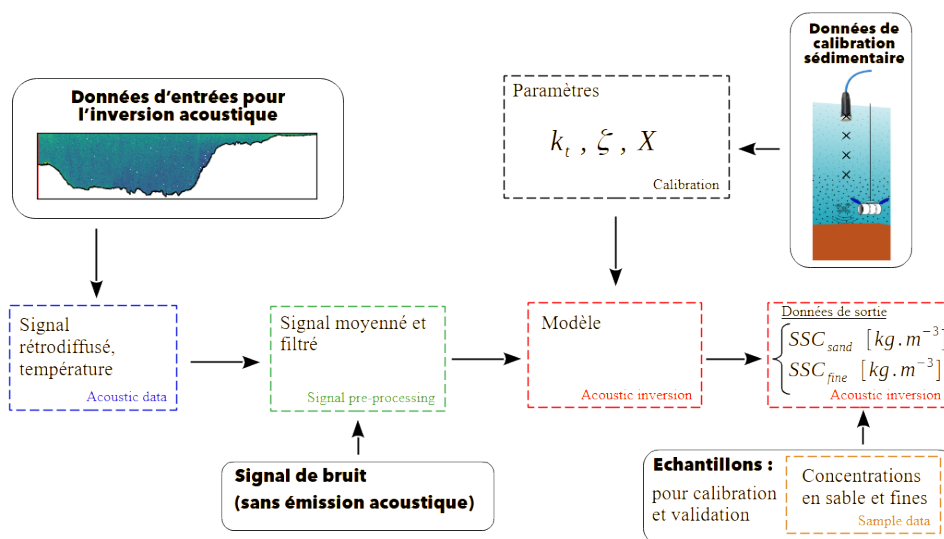


Figure 1. Méthode d'inversion acoustique selon Vergne et al. (2020). Chaque encadré pointillé représente un onglet du logiciel *AcouSed*, alimenté par les données qui figurent dans les encadrés noirs. SSC_{sand} est SSC_{fine} sont les concentrations en sables et en fines calculées par l'inversion dans toute la section en travers.

Pour les fréquences utilisées, on peut supposer que la rétrodiffusion du signal est principalement due aux sables et que l'atténuation acoustique est dominée par les sédiments fins. La calibration sédimentaire consiste à estimer l'atténuation due aux sédiments fins car la théorie acoustique n'est pas fiable pour les particules aplaties que l'on trouve dans les rivières (Vergne et al., 2021). Un échantillon concentré en sable est pris comme « échantillon cible », dont la concentration et la distribution granulométrique sont connues. L'atténuation acoustique des sédiments fins est calculée le long du trajet du signal rétrodiffusé, depuis l'échantillon cible jusqu'au capteur acoustique. On en déduit, à partir du profil de concentration des sédiments fins sur cette même verticale, le pouvoir d'atténuation acoustique des sédiments fins ζ (voir figure 1).

La constante d'étalonnage, k_t , dépend de l'appareil utilisé et peut être déterminée indépendamment des conditions spécifiques le jour du déploiement. Le paramètre sans dimension de rétrodiffusion, X , est directement calculé à partir de la concentration et de la granulométrie de l'échantillon de sable cible. Le signal acoustique de rétrodiffusion est inversé pour calculer les concentrations en sable et en sédiments fins dans toute la section. Les détails de la méthode sont fournis dans Vergne et al. (2020), section 4.3 : Inversion acoustique sur le site 2 (méthode « concentration élevée »). Cette méthode peut être appliquée soit pour extrapoler la concentration sur toute une section à partir d'une verticale, soit pour obtenir le suivi temporel de la concentration le long d'une verticale à partir d'une mesure à un instant donné.

3 EXEMPLE D'APPLICATION

AcouSed est divisé en six onglets : données acoustiques, prétraitement du signal, données sédimentaires, calibration, inversion acoustique et notes. Le logiciel prend en charge les données de deux modèles d'ABS disponibles dans le commerce : l'AQUAscet (d'Aquatec) et l'UBSediFlow (d'Ubertone).

L'onglet « Données acoustiques » permet de télécharger et visualiser les données acoustiques. Un algorithme permet de détecter l'altitude du lit de la rivière à partir du maximum de rétrodiffusion.

L'onglet « Signal pre-processing » permet de prétraiter le signal acoustique, à l'aide d'une moyenne glissante et de valeurs de bruit de référence.

Les données sédimentaires obtenues à partir des échantillons sur le site sont téléchargées dans l'onglet « Sample data » dans deux fichiers séparés : un pour le sable et un pour les sédiments fins. Ils contiennent tous les deux les mêmes informations : temps, distance à la berge, profondeur, concentration totale, diamètre médian, granulométrie. Cet onglet permet de tracer et de visualiser la position, la concentration totale et la granulométrie des échantillons. *AcouSed* peut ainsi être utilisé comme outil de visualisation des granulométries.

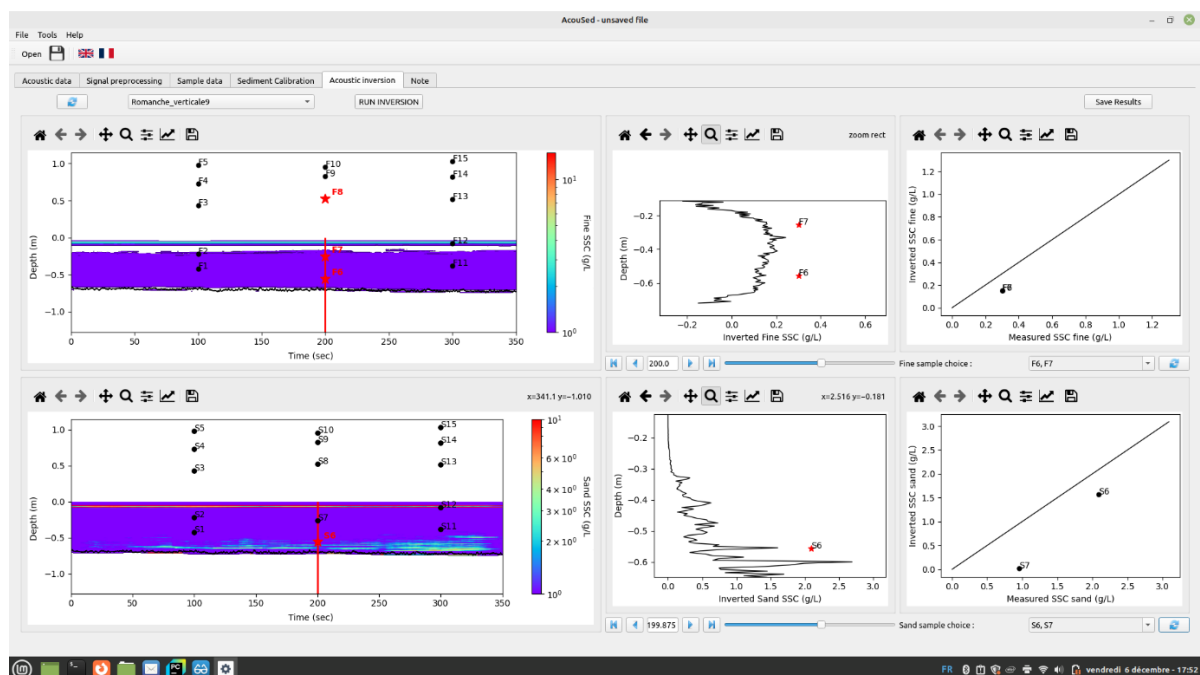


Figure 2. Résultat d'inversion du logiciel *AcouSed*, données sur la Romanche, juillet 2024.

L'onglet calibration permet de sélectionner les échantillons qui seront utilisés pour la calibration de la mesure : un échantillon cible de sable et une verticale pour les sédiments fins. Le pouvoir d'atténuation des sédiments fins est calculé. Il sera ensuite utilisé pour l'inversion dans le cinquième onglet. Dans ce dernier, il est possible de visualiser les champs de concentration en sable et en sédiments fins. Les concentrations calculées sont également comparées aux données de validation. Un exemple de résultat à partir de données acoustiques et sédimentaires sur la Romanche est présenté Figure 2.

4 CONCLUSION

Nous présentons un nouveau logiciel libre nommé *AcouSed* qui vise à rendre les méthodes d'inversion acoustique complexes accessibles aux non-experts en acoustique pour quantifier les flux sédimentaires. Il est destiné à être partagé avec un large public par le biais d'un simple fichier exécutable compatible avec Windows, MacOS et Linux. Il est conçu de manière que les données acoustiques pour la calibration et l'inversion puissent être différentes. Ainsi, nous prévoyons d'utiliser cet outil pour extrapoler les mesures de concentration en sédiment dans l'espace (avec des prélèvements sur une verticale pour la calibration et l'application de celle-ci sur une ou plusieurs sections en travers lors de l'APAVER 2025 notamment). Cet outil nous permettra également un suivi dans le temps des concentrations (installation d'une station de mesure à Perrache).

Un certain nombre de développements futurs sont prévus tels que, à court terme, la mise en œuvre d'une nouvelle méthode d'inversion (pour les faibles concentrations) ou, à plus long terme, l'inclusion d'autres instruments ABS et du positionnement GPS pour le géoréférencement et la spatialisation des résultats. Cependant, il s'agit d'abord de valider sur plusieurs jeux de données avec une large gamme de conditions (et notamment de granulométries) l'utilisation de cet outil avec la méthode d'inversion choisie.

Remerciements

Ce travail a été mené grâce à l'Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR), programme de recherche pluri-partenaires financé dans le cadre du Plan Rhône-Saône par le Fond Européen de Développement Economique et Régional (FEDER), l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, CNR, EDF et les Régions Auvergne-Rhône-Alpes, Sud et Occitanie. L'OSR fait partie du réseau scientifique de l'Observatoire Hommes Milieux (OHM) Vallée du Rhône et de la Zone Atelier Bassin du Rhône (ZABR). Il est également le fruit d'une collaboration spécifique entre CNR, Ubertone et INRAE.

BIBLIOGRAPHIE

- Haught, D., Venditti, J. G., and Wright, S. A., 2017. Calculation of in situ acoustic sediment attenuation using off-the-shelf horizontal ADCPs in low concentration settings. *Water Resour. Res.*, 53:5017-5037.
- Landers, M. N., Straub, T. D., Wood, M. S. & Domanski, M. M., 2016. Sediment acoustic index method for computing continuous suspended-sediment concentrations. *USGS Techniques and Methods*, book 3, chap. C5. URL <http://dx.doi.org/10.3133/tm3C5>.
- Moore, A., Le Coz, J., Hurther, D., & Paquier, A., 2012. On the application of horizontal ADCPs to suspended sediment transport surveys in rivers. *Cont. Shelf Res.*, 46:50-63.
- Topping, J., Wright, S. A., Melis, T. S., & Rubin, D. M., 2007. High-resolution measurements of suspended-sediment concentration and grain size in the Colorado River in Grand Canyon using a multi-frequency acoustic system. *Proceedings of the 10th International Symposium on River Sedimentation*, Russia, Moscow.
- Vergne, A., Le Coz, J., Berni, C., & Pierrefeu, G., 2020. Using a Down-Looking Multifrequency ABS for Measuring Suspended Sediments in Rivers. *Water Resources Research*, 56(2).
- Vergne, A., Berni, C., Le Coz, J., & Tencé, F., 2021. Acoustic Backscatter and Attenuation Due to River Fine Sediments: Experimental Evaluation of Models and Inversion Methods. *Water Resources Research*, 57(9).
- Wright, S. A., Topping, D. J. & Williams, C. A., 2010. Discriminating silt-and-clay from suspended-sand in rivers using side-looking acoustic profilers. *Proceedings of the 2nd Joint Federal Interagency Sedimentation Conference*, USA, Las Vegas.