

CFA/VISHNO 2016

**Vitesse du son et absorption dans les sédiments sableux :
analyse de mesures réalisées sur plages**

M. Durafour^a, X. Demoulin^b, T. Garlan^c, L. Guillon^a et P. Guyomard^c

^aEcole Navale / Irenav, BCRM Brest CC600, 29240 Brest Cedex 9, France

^bMAREE, 15 rue Galilée, 56270 Ploemeur, France

^cSHOM, 13 Rue de Châtellier BP 30316, 29603 Brest, France

marine.durafour@ecole-navale.fr



LE MANS

Dans le cadre d'un projet de trois ans débuté en 2014 et financé par la DGA (Direction Générale de l'Armement), un instrument novateur, le célérimètre INSEA, a été déployé *in-situ* dans le but de caractériser une couverture sédimentaire par ses paramètres acoustiques (célérité, atténuation). Un nombre conséquent de données a ainsi été recueilli au sein d'environnements hautement variés du littoral français (sédiments vaseux, sablonneux et/ou graveleux, coquilliers et/ou lithoclastiques, etc.). Pour exploiter ces données, une procédure spécifique d'acquisition, puis de traitement, a été élaborée pour éliminer les erreurs de mesures, inhérentes à des manipulations *in-situ*, et fournir à l'utilisateur un jeu de données fiable. Des liens forts entre les grandeurs acoustiques et sédimentologiques calculées ont pu être constatés, et les éléments obtenus amènent des perspectives d'intérêt pour le développement de potentielles nouvelles relations géoacoustiques.

1 Introduction

En géoacoustique, l'un des enjeux majeurs consiste à caractériser les fonds marins grâce à des méthodes acoustiques. Pour cela, de nombreux auteurs [5] ont tenté d'établir des liens entre des paramètres physiques liés aux sédiments et leurs propriétés acoustiques (vitesse des ondes de pression et/ou des ondes de cisaillement, coefficient d'absorption).

Or, deux problématiques ont émergé au fur et à mesure des différentes études menées. Premièrement, les formulations proposées ne sont souvent valables que pour un milieu bien spécifique, ce qui les rend impossible à généraliser. Ensuite, les paramètres sédimentologiques utilisés dans ces modèles sont souvent beaucoup trop nombreux (jusqu'à 13 paramètres), et/ou inadéquats car trop complexes à mesurer ou à interpréter.

A partir de ces considérations, le projet MICAS (Modélisation et Instrumentation pour la Caractérisation Acoustique des Sédiments) a été initié en 2014 pour tenter d'apporter des solutions à ces interrogations. Le projet fait ainsi collaborer industriels (MAREE et RTSYS) et institutions académiques (IRENav et SHOM) autour de trois axes d'étude : 1) développement instrumental pour répondre à la nécessité croissante de disposer de mesures conjointes des paramètres acoustiques et sédimentologiques *in-situ*, 2) constitution d'une base de données centralisant l'ensemble des mesures effectuées, et 3) étude des relations géoacoustiques en développant de nouvelles relations tout en testant les formulations existantes.

Le présent article s'attache plus particulièrement à ce troisième point en présentant les premiers résultats issus de ce projet.

2 Matériels et méthodes

Dans le cadre du projet MICAS, 78 analyses de plages (ou « campagnes ») ont été menées le long des côtes françaises en 2015. Au sein de ces dernières, un « lot » est défini par : une série de mesures acoustiques au célérimètre et un prélèvement sédimentaire. Au total, ce sont donc 159 lots de mesures qui ont été réalisés, à raison de 2 à 3 lots espacés d'une dizaine de mètres pour chaque plage. Les équipements déployés *in-situ* pour cette étude ainsi que les méthodes de traitements utilisées sont présentés dans cette section.

2.1 Célérimètre INSEA

Pour acquérir des données acoustiques *in-situ* au sein d'environnements sédimentaires variés, un nouveau célérimètre portable nommé INSEA (INvestigation des SEdiments par l'Acoustique) a été développé à partir d'un premier prototype élaboré en 2011 [4].

L'INSEA est composé de quatre piquets réglables en distances et en profondeur, nommés A-B-C-D. Chacun dispose d'un transducteur en céramique, imprégné dans une résine, dont l'orientation peut également être changée par l'utilisateur. Au cours d'une mesure sur plage, l'instrument (Fig. 1) est totalement immergé par moins d'un mètre de fond et enfoncé manuellement dans le sédiment sur 10 cm de profondeur.

Le transducteur A émet dans un premier temps 23 signaux harmoniques sur la bande de fréquence 50-270 kHz, par pas de 10 kHz, et la réception s'effectue sur les trois autres piquets. Puis, les transducteurs B, C et D effectuent la même opération l'un après l'autre.

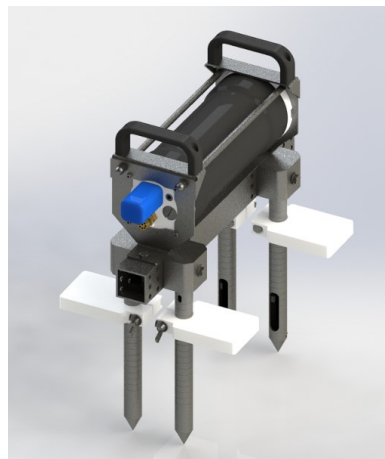


Figure 1: Visuel de l'INSEA.

Un « enfoncement » fournit donc 12 chemins de propagations différents au sein du sédiment (A→B, A→C, A→D, B→A, etc.). Les temps de vols et les amplitudes des signaux reçus sont ensuite calculés pour chaque trajet. Les résultats obtenus permettent d'estimer le coefficient d'absorption et la vitesse de propagation de l'onde dans le sédiment, mais aussi de suivre l'évolution de ces deux grandeurs en fonction de la fréquence [1]. Pour un lot, trois enfoncements sont réalisés, procurant 36 courbes de célérités et d'atténuations.

Grâce à cette procédure, trois échelles distinctes sont par conséquent disponibles pour un même site : décimétrique entre deux lots, métrique entre deux enfoncements, et décimétrique entre deux trajets. Cet éventail d'échelles spatiales conduit à une meilleure appréhension des phénomènes affectant la propagation des ondes acoustiques dans les sédiments.

Une procédure de post-traitement des données acoustiques recueillies a également été mise en place. Conçue pour vérifier la stabilité des mesures, celle-ci autorise le retrait d'éventuels chemins incohérents (mouvements de l'utilisateur durant l'acquisition, galet au

milieu d'un chemin de propagation, etc.). Pour chaque lot, les trajets validés sont ensuite moyennés afin d'obtenir une seule courbe de célérité et d'atténuation en fonction de la fréquence, qui sera statistiquement représentative de la réalité du milieu testé.

Enfin, une calibration dans l'eau est également pratiquée. Une sonde CTD (Conductivity, Temperature, Depth), couplée à l'instrument, fournit les paramètres physiques nécessaires au calcul de la vitesse du son dans l'eau C_0 pour le lot considéré. Cet étalonnage a deux objectifs principaux : 1) vérifier les distances acoustiques inter-piquets grâce aux valeurs des temps de vol et de C_0 , 2) travailler sur des célérités normalisées par C_0 pour s'affranchir des conditions expérimentales entre les différents sites.

2.2 Prélèvements sédimentaires

En complément des mesures acoustiques, un échantillonnage de la couverture sédimentaire superficielle est effectué sur chaque plage manuellement à l'aide d'un mini-carottier d'interface.

La première moitié d'un prélèvement est tout d'abord pesée, lavée sur un tamis à 50 microns, séchée puis repesée. Deux méthodes de tamisages (impulsionnel de 10 minutes sur colonne et microgranulométrie laser) sont ensuite combinées en fonction du type de sédiments collectés (graviers, sables et/ou vases). Ceci permet d'obtenir plusieurs paramètres caractérisant la granulométrie du matériau: le diamètre moyen M_z en unité Φ (Eq. 1), les percentiles granulométriques du D_5 au D_{95} par pas de 5%, l'indice de tri S_0 (Eq. 2), et le coefficient d'asymétrie de la distribution S_k (Eq. 3), non exhaustivement.

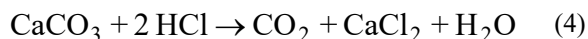
$$M_z = \frac{1}{100} \int_0^{100} D_i dy \quad (1)$$

$$S_0 = \left(\frac{1}{100} \int_0^{100} (D_i - M_z)^2 dy \right)^{1/2} \quad (2)$$

$$S_k = \left(\frac{1}{100} \int_0^{100} (D_i - M_z)^3 dy \right) / S_0^3 \quad (3)$$

avec D_i , le diamètre du refus de tamis considéré en unité Φ , et dy le pourcentage représenté par la masse retenue à cette taille de grain par rapport à la masse totale de l'échantillon.

La deuxième moitié du prélèvement est quant à elle séchée et conservée brute. Une attaque acide est ensuite réalisée à l'aide d'un calcimètre Bernard pour déterminer le pourcentage de bioclastes au sein de l'échantillon. Le carbonate de calcium (CaCO_3) étant le constituant principal des débris coquilliers, quelques centilitres d'acide chlorhydrique à 37% sont ainsi déposés sur une faible quantité de sédiments bruts préalablement broyés. La réaction chimique qui en découle dégage un volume de CO_2 directement dépendant de la proportion de CaCO_3 initialement présent dans le sédiment testé (Eq. 4).



Enfin, quelques grammes de sédiments bruts (non broyés) sont positionnés au sein d'un pycnomètre à hélium. L'instrument effectue alors une succession de montées en

pression et de détentes adiabatiques entre une chambre contenant le prélèvement et une chambre d'expansion. La mesure indique le volume de l'échantillon, menant à une estimation de sa porosité et de sa densité.

3 Résultats

3.1 Données acoustiques INSEA

Une analyse préliminaire des données souligne une relation entre la nature des sédiments et le type d'évolution constatée sur les paramètres acoustiques. Ainsi, les résultats de 18 lots représentatifs des grandes tendances observées jusqu'à présent sont représentés sur la Figure 2 et la Figure 3.

Dans ces graphiques, la vitesse du son s'avère quasiment constante dans toute la bande de fréquence pour des granulométries homogènes (Fig. 2b). Toutefois, la valeur de cette constante varie selon le type de particules en présence, une vase ayant par exemple un comportement différent d'un sédiment sableux. A l'inverse, une loi de dispersion négative est régulièrement observable en milieu hétérogène (Fig. 3b).

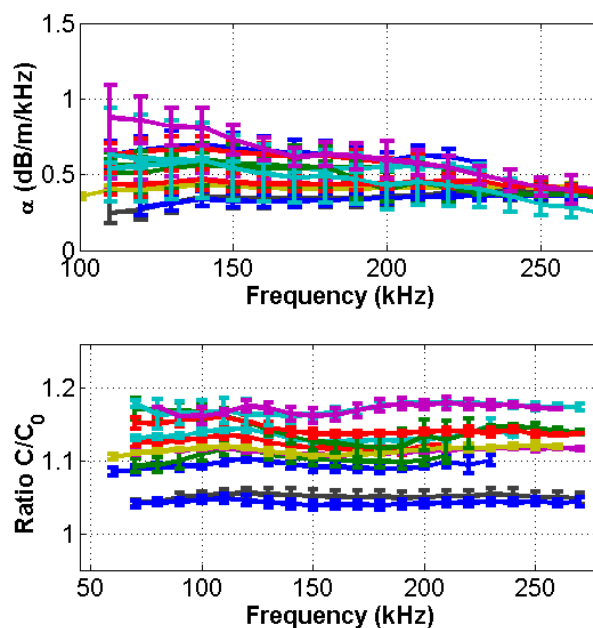


Figure 2. Evolution, en fonction de la fréquence, du coefficient d'atténuation noté α (a) et de la célérité normalisée par la vitesse de l'onde dans l'eau C_0 (b) pour 11 lots de granulométries homogènes.

Les valeurs d'atténuations (Fig. 2a et Fig. 3a) se révèlent également plus élevées en environnements non-uniformes.

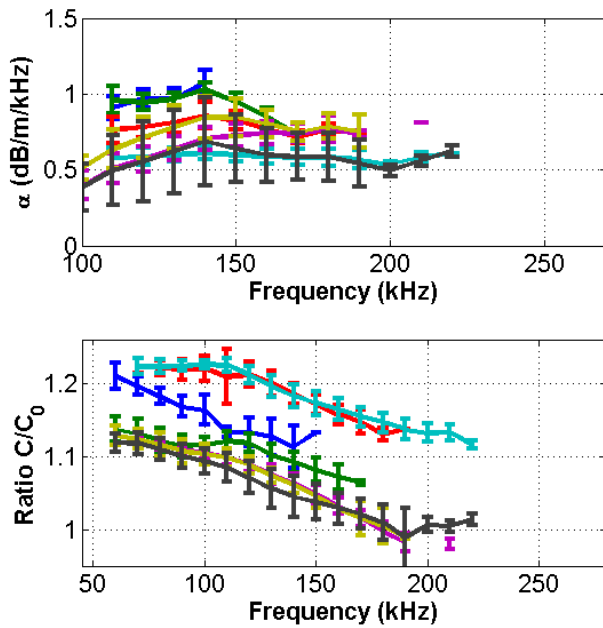


Figure 3. Evolution, en fonction de la fréquence, du coefficient d'atténuation α (a) et de la célérité normalisée par la vitesse de l'onde dans l'eau C_0 (b) pour 7 lots de granulométries hétérogènes.

3.2 Correction du biais instrumental

L'analyse de l'ensemble des courbes obtenues met également en évidence l'existence d'un biais instrumental. En effet, le confinement des transducteurs dans les piquets, leur extension spatiale ainsi que l'impédance du milieu sont autant de paramètres qui engendrent des déphasages sur l'onde transmise. Ces déphasages, variables selon la fréquence, sont en partie quantifiés et intégrés aux résultats grâce à la mesure de calibration dans l'eau décrite dans la section 2.1. Toutefois, les impédances des sables sont sensiblement différentes de celle de l'eau, et ce décalage engendre le biais observé. Une quantification de ce dernier a donc été exécutée.

Pour cela, les environnements possédant les granulométries les plus homogènes dans les sables fins (avec $S_0 < 0,6$) ont été sélectionnés parmi les échantillons récoltés. Ces milieux uniformes constituent des domaines de référence dans lesquels l'estimation d'un biais « pur », c'est-à-dire non mélangé à d'autres éventuels phénomènes inhérents à l'hétérogénéité du fond, est la plus fiable.

Une valeur moyenne des courbes de célérités et d'atténuations est donc calculée pour les 13 lots choisis. La visualisation des écarts à cette moyenne en fonction de la fréquence démontre une allure commune des tracés (Fig. 4), et conduit à une appréciation pertinente d'un biais instrumental moyen pour chaque paramètre acoustique.

Ce biais moyen se présente donc sous la forme d'une légère oscillation d'amplitude égale à 0,02 environ pour la célérité normalisée et d'approximativement 0,1 dB/m/kHz pour les coefficients d'absorption.

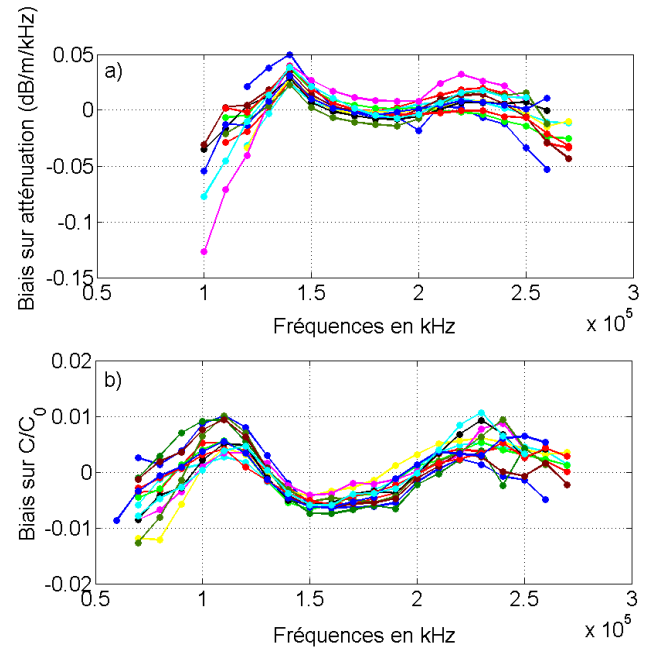


Figure 4. Evolution, en fonction de la fréquence, du biais instrumental estimé pour l'atténuation en dB/m/kHz (a) et pour la célérité normalisée par la vitesse dans l'eau C_0 (b).

3.3 Corrélations entre les paramètres acoustiques et sédimentologiques

Les biais instrumentaux moyens déterminés dans la section 3.2 sont tout d'abord soustraits aux données acoustiques de chacun des 159 lots. Cela a pour effet de lisser la majorité des courbes (diminution des oscillations, élimination de certains paliers repérables Fig. 3b en environnements hétérogènes).

Afin d'établir des relations entre les paramètres acoustiques sur toute la gamme de fréquences f testées et les paramètres sédimentologiques, chaque courbe est ajustée par une fonction linéaire de type $y = ax + b$ telle que :

$$C = a_c * F + b_c \quad (5)$$

$$\alpha = a_{At} * F + b_{At} \quad (6)$$

A cette fin, les fréquences f sont normalisées telles que $F = (f - f_0) / f_0$, avec $f_0 = 50$ kHz. Une distorsion de l'échelle des ordonnées est également opérée (multiplication des valeurs par 4), pour accentuer les variations des données et faciliter leur visualisation.

La méthode des moindres carrés est ensuite employée pour minimiser les écarts entre chaque courbe de données et l'ajustement associé. En fin de processus, on obtient donc 159 couples (a_c, b_c) pour la vitesse, et autant pour l'atténuation (a_{At}, b_{At}) . Chacun de ces 4 coefficients acoustiques est ensuite confronté aux paramètres sédimentologiques préalablement calculés pour évaluer l'existence d'une éventuelle corrélation simple.

Si les comparaisons expérimentées n'ont pas été concluantes pour les coefficients a_c, a_{At} et b_{At} , la Figure 5 atteste cependant d'un lien fort entre b_C et la porosité des sédiments.

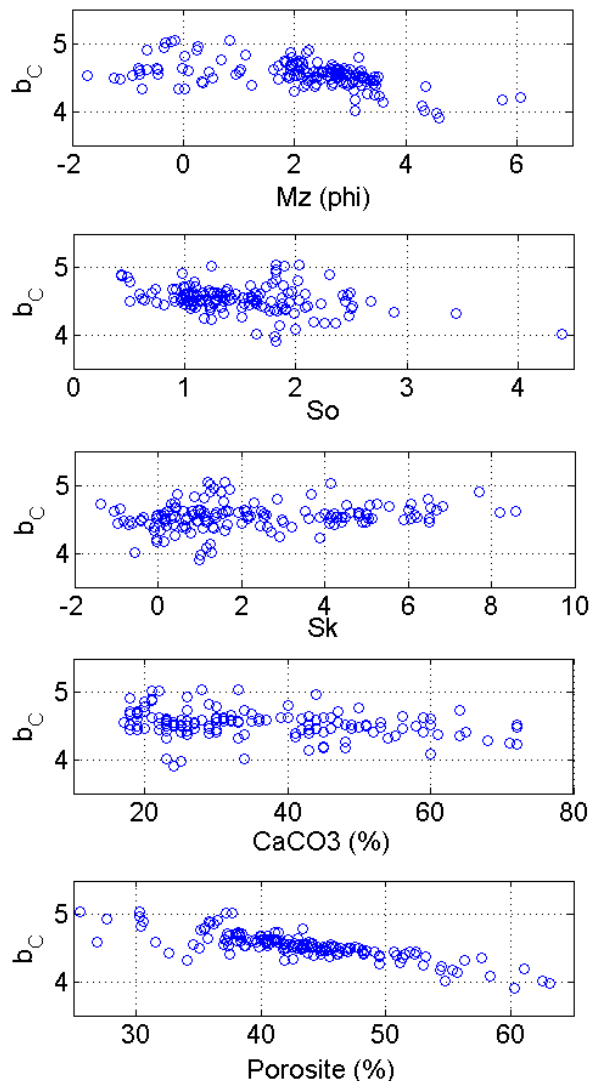


Figure 5 : Coefficient b_C en fonction de quelques-uns des paramètres sédimentologiques calculés.

Une régression linéaire sur les données du paramètre b_C en fonction de la porosité conduit alors à la formulation de l'équation explicitée Figure 6.

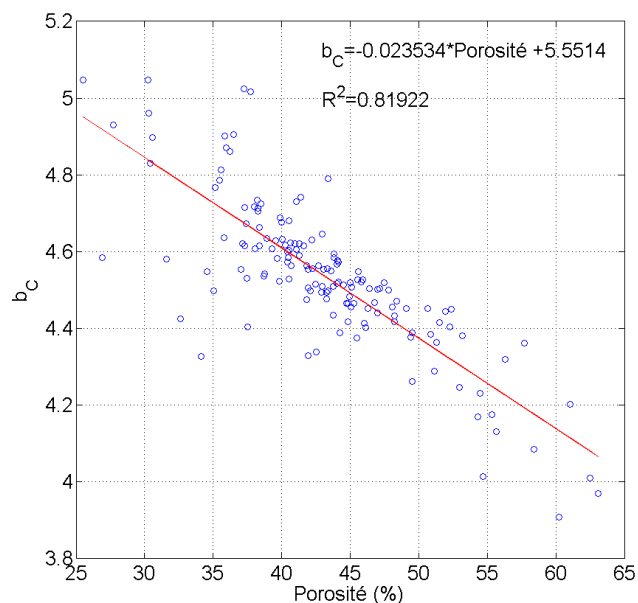


Figure 6: Régression linéaire du coefficient b_C en fonction de la porosité.

Avec un coefficient de corrélation supérieur à 0,8 entre l'approximation trouvée et les données, il semble possible de décrire le coefficient b_C en fonction du seul paramètre de porosité. Toutefois, les résultats obtenus pour les trois autres coefficients n'ont pas démontré de liens linéaires simples avec un unique paramètre sédimentologique. Des corrélations plus faibles (R^2 de l'ordre de 0,3-0,4) ont malgré tout été observées, amenant à considérer qu'une combinaison de paramètres sédimentologiques doit potentiellement intervenir pour décrire correctement le coefficient acoustique testé.

4 Conclusion

Les résultats présentés dans ce papier démontrent l'existence de liens forts entre paramètres acoustiques et sédimentologiques. La technique utilisée de régression linéaire simple, bien que pertinente, n'est toutefois pas suffisante pour obtenir des relations géoacoustiques pleinement satisfaisantes. En effet, afin de vérifier l'hypothèse d'une influence conjointe de plusieurs paramètres sédimentologiques, d'autres techniques de traitements, comme une analyse par composantes principales, doivent être expérimentées sur le jeu de données décrit ici.

L'ensemble de ce travail confirme également l'intérêt de poursuivre l'acquisition de données *in-situ*, via l'INSEA et les prélèvements de sédiments associés, afin d'aboutir à des équations géoacoustiques décrivant la plus large gamme d'environnements marins possible.

Enfin, l'ensemble des données récoltées a été centralisé au sein d'une base de données [2,3], dédiée à l'archivage de tous les paramètres acoustiques et sédimentologiques calculés au cours des différentes campagnes. Son exploitation permettra un repérage plus aisé de liens potentiels.

Remerciements

Le projet MICAS est financé par la DGA (Délégation Générale de l'Armement) sous contrat RAPID 142906018.

Références

- [1] X. Demoulin, T. Garlan, L. Guillon, P. Guyomard, *In-situ acoustic measurements of water saturated beach sands*. Seabed and Sediment Acoustics Conference, I. of Acoustics, Ed., Bath, UK (2015).
- [2] X. Demoulin, A. Boudraa, R. Bourdon, M. Durafour, T. Garlan, L. Guillon, P. Guyomard, R. Jan, C. Ray, I. Touazi, *Instrumentation and Data Management for Geoacoustic Characterization of Shallow Water Sediments*. Oceans'16 MTS/IEEE Shanghai conference, China (2016).
- [3] M. Durafour, X. Demoulin, T. Garlan, L. Guillon, P. Guyomard, *Mesures in-situ des propriétés acoustiques de zones littorales françaises et corrélation avec les paramètres sédimentologiques*, Journées Nationales de Génie Côtier-Génie Civil, Toulon, France (2016).
- [4] L. Guillon, X. Demoulin, B.T. Hefner, D. Zou, *High-frequency sediment sound speed and attenuation*

measurements during trex13 (target and reverberation experiment 2013) with a new portable velocimeter. 166th meeting of the Acoustical Society of America, San Francisco, CA, USA (2013).

- [5] D. Jackson, M. Richardson, *High-frequency seafloor acoustics*, Springer, (2007).