



## Mesures *in situ* des propriétés acoustiques de zones littorales françaises et corrélation avec les paramètres sédimentologiques

Marine DURAFOUR<sup>1</sup>, Xavier DEMOULIN<sup>2</sup>, Thierry GARLAN<sup>3</sup>,  
Laurent GUILLON<sup>1</sup>, Patrick GUYOMARD<sup>3</sup>

1. Institut de recherche de l'École Navale (IRENav), BCRM Brest  
École navale, CC 600, 29240 Brest Cedex 9, France.  
[marine.durafour@ecole-navale.fr](mailto:marine.durafour@ecole-navale.fr) ; [laurent.guillon@ecole-navale.fr](mailto:laurent.guillon@ecole-navale.fr)
2. MAREE, 15 rue Galilée, 56270 Ploemeur, France.  
[xdemoulin@maree.fr](mailto:xdemoulin@maree.fr)
3. SHOM, 13 Rue du Châtellier, CS 92803, 29228 Brest Cedex 2, France.  
[thierry.garlan@shom.fr](mailto:thierry.garlan@shom.fr) ; [patrick.guyomard@shom.fr](mailto:patrick.guyomard@shom.fr)

### Résumé :

Dans le cadre du projet MICAS 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 la couverture sédimentaire superficielle 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.).

La constitution d'une nouvelle base de données, unique en France, a ainsi été initiée afin 1) d'archiver les paramètres acoustiques et sédimentologiques de chacun des sites étudiés et 2) de faciliter la visualisation et l'exploitation des mesures.

Les corrélations effectuées entre variables acoustiques et sédimentologiques grâce à ce système de gestion de données constituent un point de départ à l'établissement de nouvelles relations géoacoustiques.

**Mots-clés :** Sédiments, Propagation d'ondes acoustiques, Mesures *in situ*, Base de données, Zone littorale.

### 1. Introduction

En génie du littoral, la nature de la couverture sédimentaire présente sur le fond marin est une information primordiale dans divers domaines d'études : extraction de granulats marins, positionnement d'éoliennes offshore ou d'hydroliennes, estimation du transport sédimentaire, définition des habitats marins. Une bonne connaissance des propriétés intrinsèques aux sédiments de la zone d'étude considérée est donc de première importance, mais nécessite souvent le déploiement *in-situ* d'une instrumentation conséquente (benne, carottiers), puis des traitements requérant un matériel de laboratoire spécifique (banc d'ouverture de carottes, microgranulomètre laser, etc.).

Une alternative à ces techniques repose sur l'utilisation de méthodes acoustiques, pour caractériser le sédiment via l'utilisation de relations géoacoustiques. Toutefois, les formulations existantes (JACKSON & RICHARDSON, 2007) parviennent difficilement à retranscrire la variabilité des fonds, en raison notamment d'un degré d'hétérogénéité particulièrement complexe à modéliser. La définition de nouveaux modèles géoacoustiques ou l'amélioration de ceux existants est par conséquent indispensable.

Le projet MICAS (Modélisation et Instrumentation pour la Caractérisation Acoustique des Sédiments), a ainsi démarré en 2014 pour une durée de trois ans, et rassemble laboratoires publics (l'IRENav et le SHOM) et partenaires industriels (MAREE et RTSYS) autour de trois principaux objectifs:

- a) la finalisation d'une instrumentation adaptée à l'acquisition d'un large panel de données, aussi bien acoustiques que sédimentologiques,
- b) la centralisation de l'ensemble de ces mesures au sein d'une base de données,
- c) l'utilisation de cette base pour l'établissement de nouvelles relations géoacoustiques.

Ce papier est donc dédié à la présentation des travaux menés durant la première moitié du projet. Les mesures effectuées et les méthodes de traitements utilisées sont décrites dans la section 2. Une synthèse des premiers résultats obtenus est proposée en section 3.

## **2. Mesures *in situ* et méthodes de traitements**

En 2015, 78 campagnes ont été menées *in-situ* le long des côtes françaises. Chacune d'elles représente une plage de localisation géographique différente et est composée de 2 à 3 lots de mesures, séparés de 20 m sur site. Au total, ce sont donc 159 lots de mesures qui ont été recueillis.

### **2.1 Célérimètre INSEA**

Dans le cadre du projet MICAS, un nouveau célérimètre nommé INSEA (INvestigation des SÉdiments par l'Acoustique) a été développé à partir d'un premier prototype élaboré en 2011 (GUILLON *et al.*, 2013). Celui-ci est composé de quatre piquets, nommés A-B-C-D pour faciliter les traitements, contenant chacun un transducteur en céramique fixé par une résine. Pour une utilisation sur plages, l'instrument, totalement immergé, est enfoncé manuellement dans la couverture sédimentaire sur 10 cm de profondeur (Figure 1).

Vingt-trois signaux harmoniques sont successivement émis par chaque transducteur sur une gamme de fréquences allant de 50 à 270 kHz par pas de 10 kHz. La réception de ces ondes s'effectue sur les trois autres piquets. Chaque enfoncement dans le sédiment mesure donc 12 chemins acoustiques distincts (A→B, B→A, A→C, etc.). L'estimation des temps de vols et des amplitudes des signaux reçus permet par la suite de mesurer l'évolution du coefficient d'absorption et de la vitesse de propagation de l'onde dans le sédiment sur chaque chemin en fonction de la fréquence (DEMOULIN *et al.*, 2015).

Pour un lot, trois enfoncements sont réalisés, procurant ainsi 36 courbes de célérités et d'atténuations. Après vérification des données et retrait d'éventuels chemins incohérents avec la tendance générale, les trajets validés sont moyennés afin d'obtenir une seule courbe de célérités et d'atténuations en fonction de la fréquence d'émission pour chaque lot. L'INSEA étant couplé à une CTD, un étalonnage est également mené dans l'eau pour tenir compte de l'impact de l'environnement fluide (salinité, température, profondeur) sur la transmission acoustique de l'onde. Une série de mesures acoustiques pour un lot (3 enfoncements + 1 calibration) est réalisée en 5 minutes en moyenne.



*Figure 1. Mise à l'eau manuelle de l'INSEA (à gauche), Visual hors eau d'un enfoncement dans le sédiment (à droite).*

## 2.2 Prélèvements sédimentaires

Conjointement aux mesures acoustiques, un échantillonnage de la couverture sédimentaire est également effectué pour chaque lot à l'aide d'un mini-carottier manuel (15 cm de long et 6,5 cm de diamètre intérieur). Les 159 prélèvements sont ensuite soumis à la même procédure de traitements.

La première moitié de l'échantillon brut est tout d'abord préservée en l'état. Le reste est ensuite pesé, lavé sur un tamis à 50 microns, séché puis repesé avant de subir un tamisage. En fonction du type de sédiments en présence, un tamisage impulsif de 10 minutes sur colonne et/ou une analyse au microgranulomètre laser Beckman Coulter LS 13 320 sont employés pour caractériser la granulométrie du matériau. Ceci permet d'obtenir plusieurs paramètres : diamètre moyen, percentiles de la courbe granulométrique en mm du  $D_5$  au  $D_{95}$  par pas de 5%, indice de tri  $S_0$  et coefficient d'asymétrie de la distribution  $S_k$ , non exhaustivement.

Dans un second temps, un pycnomètre à hélium Micromeritics AccuPyc III 1340 fournit la densité et la porosité du matériau brut.

Enfin, un calcimètre Bernard est utilisé pour déterminer le pourcentage de bioclastes au sein de l'échantillon. Une faible quantité de sédiments bruts préalablement broyés est ainsi attaquée par de l'acide chlorhydrique. La mesure du volume de  $CO_2$  dégagé durant la réaction permet une estimation de la proportion de  $CaCO_3$  dans le sédiment.

### 3. Résultats

#### 3.1 Données sédimentologiques

Les sites étudiés durant les 78 campagnes mentionnées ont été choisis pour obtenir une gamme de sédiments de natures et d'origines variées.

Le diagramme ternaire présenté sur la figure 2, indique les proportions de trois catégories de grains au sein des différents prélèvements :

- les sables et les vases de diamètre inférieur à 0,5 mm,
- les sables grossiers, composés de grains de diamètre compris entre 0,5 et 2 mm,
- les cailloutis et graviers de taille supérieure à 2 mm.

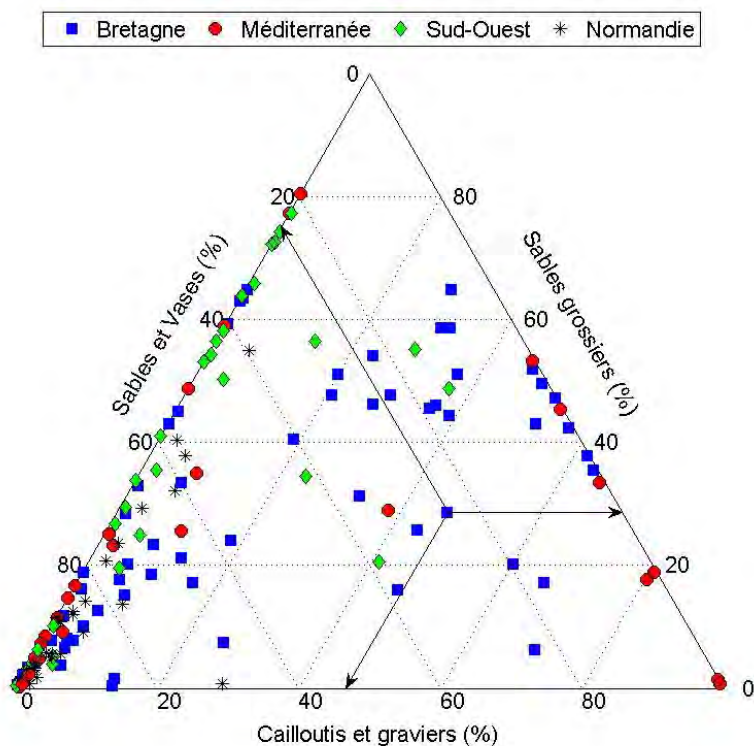


Figure 2. Composition des échantillons de sédiments prélevés in situ pour chaque zone littorale étudiée (les flèches précisent le sens de lecture pour un point en exemple).

La figure 2 atteste de la forte variabilité granulométrique des environnements marins investigués. Il est intéressant de noter qu'environ 40% des 159 échantillons sont constitués de 80 à 100 % de sables et vases. Les deux autres classes de tailles sont toutefois bien représentées sur la quasi-totalité de leur gamme respective.

La figure 3 représente quant à elle le nombre d'échantillons comptabilisés en fonction du pourcentage de CaCO<sub>3</sub> ou de porosité mesurée. Ce graphique permet ainsi de confirmer que:

- les prélèvements récoltés *in situ* présentent une bonne diversité en proportion de bioclastes allant de 15 à 75% de CaCO<sub>3</sub> au sein du sédiment,
- 88% des 159 échantillons ont une porosité comprise entre 40 et 55%.

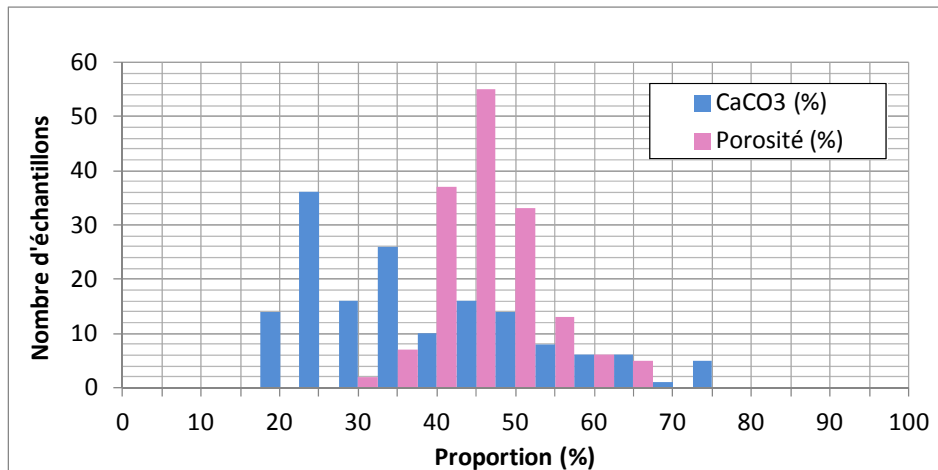


Figure 3. Gammes de valeurs de porosité et de proportion de coquilles représentées au sein des 159 prélèvements.

### 3.2 Données acoustiques

Une analyse préliminaire des données souligne une relation entre la nature des sédiments et le type d'évolution constatée sur les paramètres acoustiques. Les résultats de 18 lots représentatifs des grandes tendances observées jusqu'à présent sont représentés sur la figure 4. Chaque lot est défini par une courbe de célérités et d'atténuations en fonction de la fréquence d'émission, calculées comme décrit dans la section 2.1.

Dans la figure 4b, la vitesse du son s'avère quasiment constante dans toute la bande de fréquence pour des granulométries homogènes. 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 (Figure 4d) est régulièrement observable en présence d'hétérogénéités (mauvais tri granulométrique, inclusions non négligeable de cailloutis par exemple).

Les valeurs de coefficients d'absorption se révèlent également plus élevées en environnements non uniformes (Figure 4c).

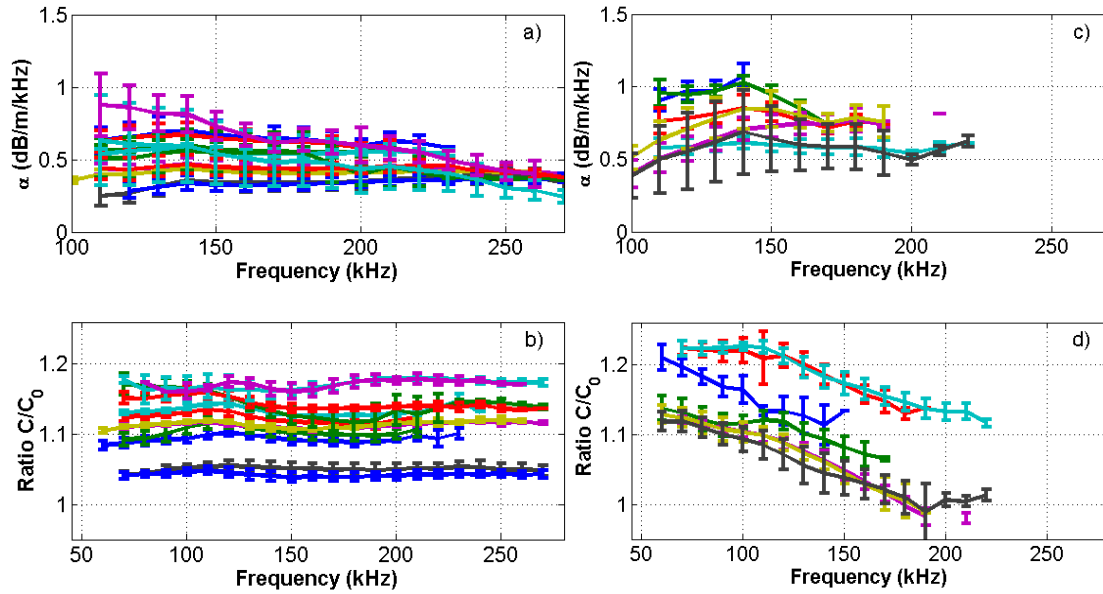


Figure 4. Evolution en fonction de la fréquence du coefficient d'atténuation et de la célérité normalisée par la vitesse de l'onde dans l'eau  $C_0$  pour des granulométries homogènes (a et b) et en présence d'hétérogénéités (c et d).

Afin d'établir des liens entre paramètres sédimentologiques et variables acoustiques, chaque courbe est ensuite ajustée grâce à la méthode des moindres carrés par une fonction linéaire de type  $y=ax+b$  telle que :

$$C_p = a_c * F + b_c \tag{1}$$

$$\alpha = a_{At} * F + b_{At} \tag{2}$$

où :  $C_p$  est égal à  $4*C/C_0$  et  $F$  est la fréquence normalisée en fonction de  $f_0$  (50kHz) selon  $F = (f-f_0)/f_0$ .

On obtient donc 159 couples  $(a_c, b_c)$  pour décrire l'évolution de la célérité en fonction de la fréquence et autant pour l'atténuation  $(a_{At}, b_{At})$ .

Une analyse par composantes principales (ACP) des paramètres sédimentologiques est également menée, permettant de repérer et d'éliminer certains coefficients corrélés au-delà d'un seuil fixé à 0,9, et par conséquent totalement redondants. Chacun des 4 paramètres acoustiques obtenus après ajustement va donc être comparé à chacun des 14 paramètres sédimentologiques retenus après ACP. Cette méthode de corrélation 1/1 atteste d'un lien linéaire fort ( $R^2=0,82$ ) entre  $b_c$  et la porosité (Figure 5).

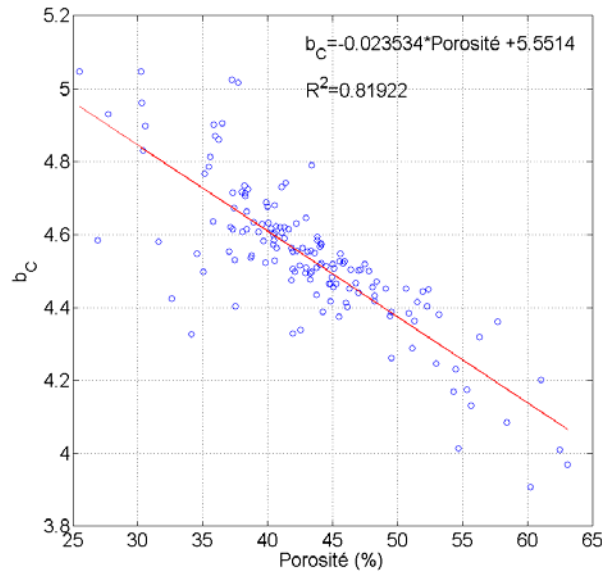


Figure 5. Régression linéaire du coefficient  $b_c$  en fonction de la porosité.

Toutefois, la même technique n'a pas fourni de résultats concluants pour  $a_c$ ,  $a_{At}$  et  $b_{At}$  ( $R^2$  égal à 0,3-0,7). Les influences de plusieurs paramètres sédimentologiques doivent donc être considérées simultanément. Ces derniers étant cependant partiellement corrélés entre eux ( $R^2 < 0,9$ ), une régression par composantes corrélées (CCR) est en cours de réalisation pour obtenir des relations géoacoustiques plus satisfaisantes.

### 3.3 Création d'une base de données

L'ensemble des données sédimentologiques et acoustiques susmentionnées est centralisé au sein d'une base de données (DEMOULIN *et al.*, 2016). Cette dernière, hébergée localement à l'IRENav, se présente sous la forme d'un site internet avec identification de l'utilisateur. La structure de la base de données est détaillée ci-après.

Une page d'accueil indique tout d'abord le nombre total de campagnes et de lots composant la base. En sélectionnant l'une des campagnes listées, un onglet dédié à celle-ci est affichée à l'écran (Figure 6), et fournit son identifiant, sa localisation, les paramètres météorologiques durant la mesure et le nombre de lots réalisés.

Chaque lot dispose également d'une page attitrée, composée des 3 volets explicités Figure 5 :

- 1 volet "Photos", contenant l'identification du lot, des commentaires éventuels sur le déroulement de la mesure, ainsi que des photographies du site (plage, GoPro) et de l'échantillon prélevé (loupe binoculaire).
- 1 volet "Echantillon", comprenant un tableau des pourcentages des refus de tamis, un tableau des paramètres sédimentologiques définis dans la section 2.2, un histogramme ainsi qu'une distribution cumulative.
- 1 volet "Mesure INSEA" (Figure 7).

### Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

MICAS Données Gestion Exploitation Compte Déconnexion

**CAMPAGNE 20150518\_I2B\_1**

Modifier

**Détails**

Date de début:	18/05/2015 07:22
Date de fin:	18/05/2015 07:39
Chef:	Xavier Mathias
Lieu:	Saint-Cyr-sur-Mer - Les Lecques
Latitude:	43.1752
Longitude:	5.692419
Modalité:	Plage
Pression:	1016.0
Temperature:	21.0
Etat du ciel:	Ensoleillé
Etat de la mer:	2 Belle (0,1 à 0,5 m)
Heure de la marée basse:	18/05/2015 02:00
Coefficient de la marée:	0.0
Commentaire:	

**LISTE DES LOTS** + Ajouter un Lot

Id Lot	Heure de Début	Heure de Fin	Echantillon	Mesure INSEA	Photos	Options
20150518_I2B_1.1	07:25	07:30	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
20150518_I2B_1.2	07:35	07:39	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	

Figure 6. Exemple d'une page de campagne dans la base de données.

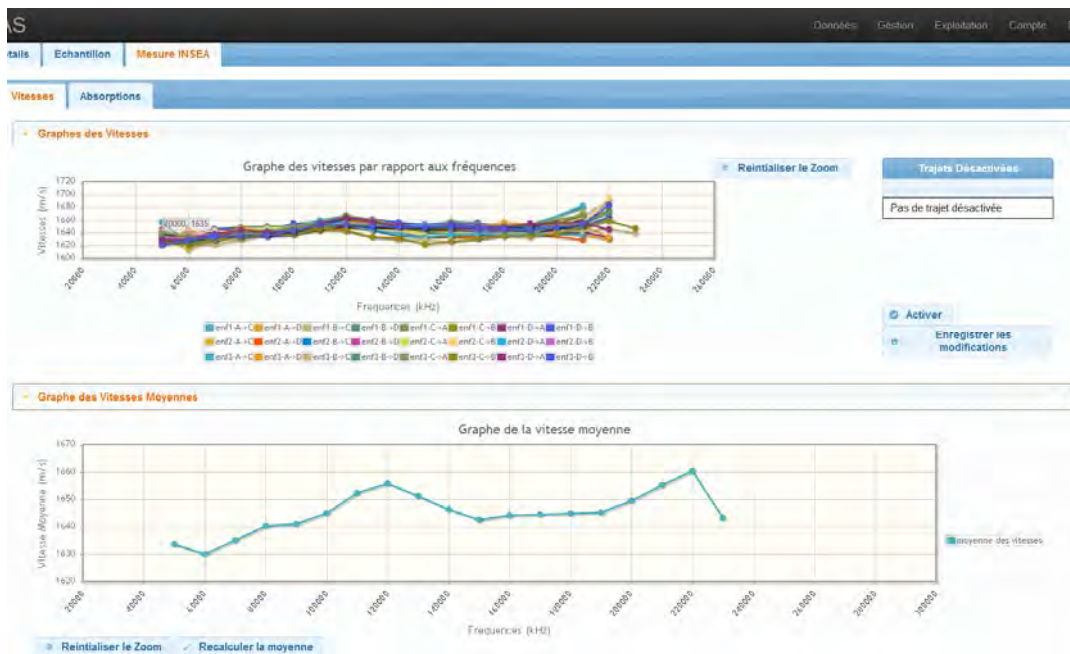


Figure 7. Volet "Mesure INSEA" du lot 20150518\_I2B\_1.1



Ce dernier volet est séparé en deux onglets (Figure 7), consacrés respectivement à l'évolution de la célérité et de l'atténuation en fonction de la gamme de fréquences testées. Les résultats des différents chemins entre les piquets A-B-C-D y sont présentés pour les trois enfoncements (notés "enf1", "enf2" ou "enf3") ainsi qu'une valeur moyenne pour le lot étudié. La valeur de l'écart-type en fonction de la fréquence est également disponible.

L'utilisateur peut enfin désactiver des chemins incohérents puis recalculer la moyenne et les écarts-types en fonction des modifications apportées.

#### 4. Conclusions et perspectives

L'objectif final du projet MICAS est de définir un ou plusieurs modèles géoacoustiques pour les sédiments, uniformes comme hétérogènes. Pour cela, de nombreuses campagnes ont d'ores et déjà été menées sur plages et ont démontré tout le potentiel de l'INSEA pour caractériser la couche sédimentaire superficielle en fonction de ses paramètres acoustiques. Une importante tâche en cours vise donc à analyser et corréler l'ensemble des données acoustiques et sédimentologiques recueillies grâce à la base de données mise en place.

Les premiers résultats ont démontré que des corrélations 1/1 seraient insuffisantes pour décrire les réponses observées des sédiments au passage du signal acoustique. Une analyse par composantes principales a toutefois permis de commencer un recentrage des données autour des paramètres sédimentologiques les plus discriminants pour appliquer sur la suite du projet des méthodes d'analyses statistiques plus poussées (CCR).

Par ailleurs, dans l'optique de rendre l'INSEA polyvalent, des modifications ont également été apportées à la procédure d'acquisition des données. Ainsi, un module géotechnique de faible encombrement a été développé pour réaliser des mesures au large, sur le plateau continental. Le prélèvement de sédiments est effectué dans ce cadre grâce à une benne Van Veen. Si les piquets actuels présentés dans ce papier permettent une bonne approche de la célérité et de l'atténuation des ondes P dans le sédiment, de nouveaux piquets sont en cours de validation pour réaliser les mêmes analyses sur les ondes de cisaillement. Enfin, des campagnes de mesures supplémentaires sont prévues et permettront d'enrichir le contenu de la base de données.

#### 5. Références bibliographiques

- DEMOULIN X., GARLAN T., GUILLON L., GUYOMARD P. (2015). *In situ acoustic measurements of water saturated beach sands*. Seabed and Sediment Acoustics Conference, I. of Acoustics, Ed., Bath, UK.
- DEMOULIN X., BOUDRAA A., BOURDON R., DURAFOR M., GARLAN T., GUILLON L., GUYOMARD P., JAN R., RAY C., TOUAZI I. (2016). *Instrumentation and Data Management for Geoacoustic Characterization of Shallow Water Sediments*. Oceans '16 MTS/IEEE Shanghai conference, China.

*Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection*

GUILLON L., DEMOULIN X., HEFNER B.T., ZOU D. (2013). *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.

JACKSON D., RICHARDSON M. (2007). *High-frequency seafloor acoustics*. Springer. <http://dx.doi.org/10.1007/978-0-387-36945-7>