

Cohérence de signaux réfléchis par le sol marin : modèle numérique et données expérimentales

Coherence of signals reflected by the seafloor : numerical modeling vs experimental data

Laurent Guillon¹, Charles W. Holland²

¹ École navale, IRENav, BP 600, 29240 Brest armées, France
guillon@ecole-navale.fr

² Applied Research Laboratory, The Pennsylvania State University, State College, Pennsylvania 16804, USA
cwh10@psu.edu

Manuscrit reçu le 14 novembre 2006

Résumé et mots clés

Dans cet article, nous présentons les premiers résultats de l'analyse de la fonction de cohérence (dans le domaine temporel) d'un signal acoustique réfléchi par le fond de la mer. Une onde sphérique émise par une source large bande est enregistrée sur une antenne verticale après réflexion sur le sol dans deux sites différents de faible profondeur d'eau (entre 100 et 150 mètres). La cohérence temporelle est définie comme étant le maximum du coefficient de corrélation entre les différents hydrophones. Un modèle numérique a été développé à partir du calcul du coefficient de réflexion d'une onde sphérique. La comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats numériques est très satisfaisante et montre une grande dépendance de la cohérence à la structure géoacoustique du sol marin. En première analyse, cette dépendance est principalement liée à la structure macro-échelle du sol ainsi qu'à la partie cohérente du champ acoustique ; les écarts entre les prédictions théoriques et les résultats expérimentaux seraient liés à la structure micro-échelle et à la partie incohérente du champ. Ces résultats ouvrent des perspectives quant à l'utilisation de la cohérence pour la caractérisation des fonds marins.

Acoustique sous-marine, cohérence, réflexion d'ondes sphériques, caractérisation des fonds marins.

Abstract and key words

In this paper, we present the results of the analysis of the coherence (in the time domain) of an acoustic signal reflected by the seafloor. A spherical wave emitted by a broadband source is recorded on a vertical array after its reflection on the seafloor at two different shallow (between 100 m and 150 m) water sites. The temporal coherence is defined as the maximum of the correlation coefficient between two hydrophones. A numerical model was developed from the computation of the reflection coefficient of a spherical wave. The comparison between the experimental and the numerical results is very satisfactory and shows a significant dependence of the coherence on the geoacoustic structure of the seafloor. In a first analysis, this dependence is mainly due to the large scale structure of the seafloor and to the coherent part (i.e. reflection) of the acoustic field ; the differences between numerical and experimental results should be connected to the small-scale structure and to the incoherent part (i.e. scattering) of the field. These results give us some perspectives for the use of the temporal coherence in seafloor characterization applications.

Underwater acoustics, coherence, reflection of spherical waves, seafloor characterization.

Remerciements

Ce travail a été fait alors que Laurent Guillon était à l'Applied Research Laboratory de l'Université d'État de Pennsylvanie pour un congé de recherches. Il aimerait remercier l'École navale pour lui avoir donné la possibilité de ce séjour ainsi que Brest Métropole Océane pour son soutien financier. Les deux auteurs remercient également l'ONR (US Office of Naval Research) pour le soutien financier de Charles W. Holland et le NURC (Nato Undersea Research Center, La Spezia, Italie) sous l'autorité duquel les expériences ont été réalisées.

1. Introduction

La cohérence de signaux réfléchis par le sol marin a rarement été étudiée dans le contexte de la caractérisation des fonds par acoustique. Berkson [3] a utilisé cette grandeur pour obtenir des informations sur la rugosité du sol; Dahl l'a étudiée dans le cadre de la diffusion par la surface de la mer [8]. Dans le domaine de l'imagerie de bruit ambiant, la cohérence entre les signaux enregistrés sur les hydrophones d'une antenne est largement utilisée dans le but d'obtenir les paramètres géoacoustiques du sol [9, 13]. Dans ce cas, les conditions expérimentales sont en effet adaptées à l'étude de la cohérence puisque la source peut être considérée comme un bruit aléatoire stationnaire large bande [2]. L'objectif de notre étude est de déterminer si la cohérence de signaux réfléchis peut donner des informations sur la structure du sol marin dans le contexte de la caractérisation des fonds par acoustique [11, 12]. Pour cela, nous avons utilisé des signaux large bande (100-6000 Hz) enregistrés sur une antenne verticale dans deux zones de petits fonds dans le cadre d'une expérience menée pour étudier la réflexion par les fonds (fig. 1). Pour évaluer la capacité de la cohérence à décrire les fonds marins, nous l'avons comparée à un modèle numérique basé sur le calcul de la réflexion d'un onde sphérique.

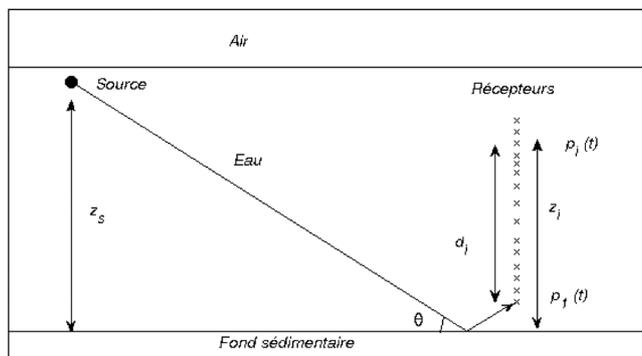


Figure 1. Schéma de l'expérience. L'hydrophone numéro i est à la distance d_i du premier hydrophone (le plus près du sol) et à la hauteur z_i par rapport au sol. La source est à la hauteur z_s par rapport au sol. Le trajet acoustique réfléchi sur le fond entre la source et le premier récepteur fait un angle de rasant θ par rapport à l'horizontale.

L'article est composé de la façon suivante. Tout d'abord, nous définissons la cohérence dans le domaine temporel et nous décrivons le calcul du modèle numérique. Par la suite, nous présentons la zone d'expérimentation en insistant sur les paramètres géoacoustiques des deux zones étudiées. Finalement, nous comparons la cohérence calculée sur les données expérimentales et celle calculée à partir du modèle numérique. Cette comparaison est discutée, en insistant sur les potentialités de l'utilisation de la cohérence dans le contexte de la caractérisation des fonds.

2. Définition et modèle numérique

Au sens strict, le terme de « cohérence » devrait être réservé au domaine fréquentiel [2]. À l'instar de Berkson [3] et Dahl [8], nous utilisons ce terme pour des études dans le domaine temporel et ce pour deux raisons. Premièrement, l'étude dans le domaine temporel permet de travailler directement sur les signaux expérimentaux sans changer d'espace de représentation. Deuxièmement, la méthode d'inversion géoacoustique qui nous a permis d'obtenir les paramètres du fond (cf. section 3.2 et [11]) est une approche travaillant de manière conjointe en temps et en fréquence. Nous avons donc choisi de mener nos premières études dans le domaine temporel. L'analyse de la cohérence dans le domaine fréquentiel sera l'objet d'un travail futur.

La cohérence du signal $p_i(t)$ enregistré par l'hydrophone i par rapport au premier hydrophone (situé près du fond) est définie comme étant la valeur maximale du coefficient de corrélation :

$$\gamma_{1i} = \max \left[\frac{C_{1i}(\tau)}{\sqrt{C_{11}(0)C_{ii}(0)}} \right], \tag{1}$$

avec $C_{ab}(\tau) = p_a(t)p_b^*(t + \tau)$.

Dans le but d'interpréter les résultats expérimentaux, nous avons établi un modèle numérique de la cohérence. Dans un premier temps, le champ acoustique émis par une source ponctuelle et réfléchi par le sol est calculé pour chaque hydrophone à chaque fréquence dans la bande du signal [6]. Ce calcul est

basé sur une évaluation numérique de l'intégrale de Sommerfeld [4] :

$$p(r, z_i, f) = ik \int_0^{\pi/2 - i\infty} J_0(kr \cos \theta) R(\theta, f) e^{-k(z_s + z_i) \sin \theta} \cos \theta d\theta, \quad (2)$$

où θ est l'angle de rasance, $z_s + z_i$ est la somme des hauteurs de la source et de l'hydrophone au-dessus du sol, r est la distance entre la source et l'antenne verticale, et $R(\theta, f)$ est le coefficient de réflexion en onde plane. Ce coefficient peut être calculé pour une grande variété de structures (voir, par exemple, [1, 7]) : multicouches, fluides, solides, poroélastiques, ...

Par la suite, les signaux temporels de chaque hydrophone sont obtenus par Transformée de Fourier inverse :

$$p_i(r, z, t) = \text{IFFT}[p(r, z, f) \times S(f)], \quad (3)$$

où IFFT est la Transformée de Fourier inverse rapide et $S(f)$ est le spectre de la source. La cohérence en fonction de l'écart entre les différents hydrophones est finalement calculée pour toute l'antenne à l'aide de l'équation (1). D'un point de vue pratique, la fonction $C_{1i}(\tau)$ est calculée pour tous les décalages temporels τ permis par la taille de la fenêtre d'analyse. C'est la valeur maximum de cette fonction (normalisée par la racine carrée du produit des fonctions d'auto-corrélation) qui donne la valeur de la cohérence temporelle pour un hydrophone donné.

3. Description des données expérimentales

3.1. Description des expériences

Les données de réflexion par le sol ont été acquises en juin 1997 dans la zone du bassin de Capria dans le nord de la mer Tyrrhénienne (fig. 2) lors des campagnes SCARAB (Scattering And Reverberation from the sea Bottom) conduites par le NURC (Nato Undersea Research Center, la Spezia, Italie).

Les expériences utilisaient une antenne verticale fixe de récepteurs et une source large bande tractée. L'antenne de réception ancrée au fond de la mer était constituée de 16 hydrophones Benthos AQ-4 espacés irrégulièrement sur une longueur totale de 62 m (fig. 1).

Les données étaient échantillonnées à 24 kHz et filtrées par un filtre passe-bas à 8 kHz. Une liaison numérique rapide avec l'antenne fournissait les données. Des données non-acoustiques (gains, paramètres du filtrage, ...) étaient entrelacées parmi le flot temporel et envoyées au navire océanographique Alliance de l'OTAN (cf. [11] pour plus de détails sur les expériences).

La source était une source sismique marine Uniboom qui a une qualité suffisante de répétabilité d'impulsions de courte durée et de largeur de bande (100-6000 Hz, le maximum étant aux envi-

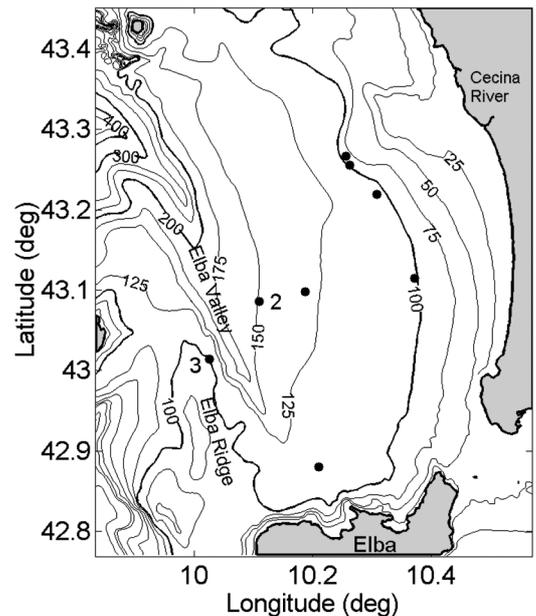


Figure 2. Zone des expériences avec les sites 2 et 3. La côte italienne se trouve dans le secteur est-nord-est de la carte.

rons de 2 kHz). Elle était montée sur un catamaran, immergée à une profondeur d'environ 0.2 m, et remorquée à une vitesse de 4 nœuds. L'impulsion acoustique générée a une durée inférieure à une milliseconde (fig. 3). Sur la figure 3, elle apparaît un peu plus longue à cause du trajet réfléchi par la surface (le pic positif à 2,5 ms). Les oscillations apparaissant après correspondent aux oscillations de faible amplitude de la source dont nous supposons qu'elles n'affectent pas nos résultats. La directivité de la source est comparable à celle d'un piston plan. Aux fréquences et aux angles considérés ici, la source peut être considérée comme omnidirectionnelle.

3.2. Description du site et paramètres géoacoustiques

Les calculs de cohérence ont été faits sur des données acquises sur deux sites de cette zone, les sites 2 et 3 (fig. 2). Les paramètres géoacoustiques de ces zones ont été obtenus par analyse et inversion de données de réflexion large bande en utilisant une technique conjointe en temps et en fréquence. Les trois étapes de cette inversion sont brièvement décrites ici (pour plus de détails, voir [11]). Premièrement, les données dans le domaine temporel sont utilisées pour spécifier la paramétrisation géoacoustique initiale, *i.e.*, le nombre et l'épaisseur des couches ainsi qu'une estimation des vitesses de compression de chaque strate. La mesure fondamentale dans le domaine fréquentiel est l'amplitude du coefficient de réflexion sphérique pour des angles compris entre 10 et 75 degrés. Dans une deuxième étape, un modèle direct est utilisé pour affiner la paramétrisation originale en effectuant une recherche itérative sur l'espace des paramètres dans une approche couche par couche. Pour ce faire, le coefficient de réflexion sphérique est obtenu à partir des don-

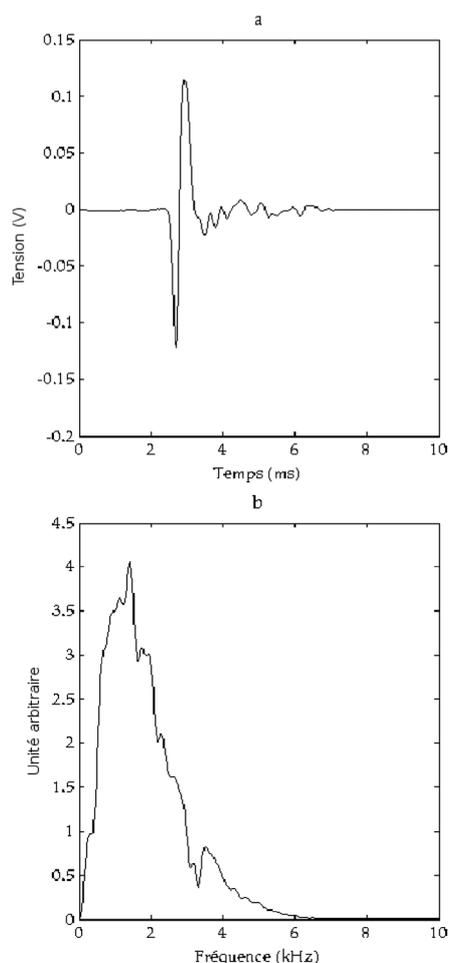


Figure 3. Signal émis par la source (a) dans le domaine temporel, et (b) dans le domaine fréquentiel. Le signal est enregistré sur un des hydrophones de l'antenne de réception.

nées depuis l'interface eau/sédiment jusqu'à une certaine profondeur D dans le sédiment et comparé avec les prédictions du modèle pour l'intervalle de profondeur. Quand les prédictions en fonction de l'angle et de la fréquence sont raisonnablement correctes, les paramètres de cet intervalle de profondeur sont fixés et le coefficient de réflexion est calculé pour un intervalle plus grand, $D + D$, et le processus est répété. L'avantage de cette approche couche par couche est qu'elle accroît le nombre de paramètres indépendants et par conséquent qu'elle réduit les problèmes d'unicité qui sont souvent des points critiques d'inversion de milieux multicouches. La dernière étape du processus est de comparer les données mesurées dans le domaine temporel avec un sismogramme synthétique obtenu à partir du modèle géoacoustique. Les derniers ajustements sont faits au modèle géoacoustique pour satisfaire la comparaison des sismogrammes tout en respectant les données dans le domaine fréquentiel.

Un des points les plus difficiles de l'inversion est d'obtenir les propriétés des couches plus fines que la résolution autorisée par la longueur de l'impulsion acoustique. Ces propriétés peuvent

être estimées dans le domaine fréquentiel (par exemple, à partir des résonances) mais à condition d'accepter la non-unicité de la solution. Pour finir, il faut noter que les résultats de l'inversion telle qu'elle est présentée ici sont très peu sensibles à l'atténuation. En résumé, nous pensons que les paramètres géoacoustiques présentés ici sont des estimations raisonnables de la réalité dans les deux zones présentées bien que des mesures quantitatives de l'incertitude ne soient pas disponibles.

Le site 2, à une profondeur de 150 m, présente un sol plat et régulier (interprétation faite à partir de données de sonar latéral) avec des pentes inférieures à 0.3° . Le sol présente une structure très stratifiée de couches de vase entrelacées avec des couches de sable (fig. 4 a et fig. 5 a). Cette structure a probablement été établie par des changements du niveau de la mer lors du pléistocène.

Le site 3, à une profondeur de 104 m, est situé sur le récif de l'île d'Elbe. Il est séparé du site 2 par la vallée sous-marine de l'Elbe qui agit comme un réceptacle pour les sédiments fins venant de la côte italienne par la rivière Cecina. Le récif de l'île d'Elbe est d'origine magmatique, recouvert de sédiments relativement grossiers (fig. 4 b et fig. 5 b).

Une différence majeure entre les deux sites est que le socle consolidé (d'un point de vue acoustique, c'est-à-dire lié à la profondeur de pénétration des ondes sonar) se situe à une profondeur de 150 m pour le site 2 et de 15 m pour le site 3.

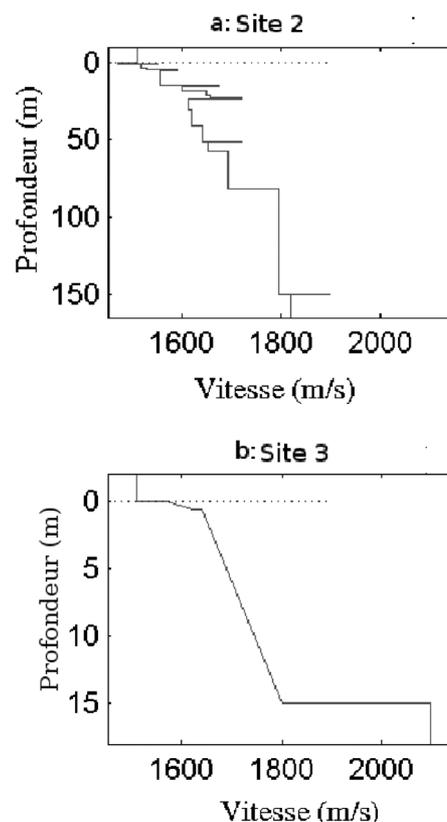


Figure 4. Vitesses du son obtenues par inversion géoacoustique pour le site 2 (a) et le site 3 (b) (d'après [10]). Les échelles verticales diffèrent d'un facteur 10.

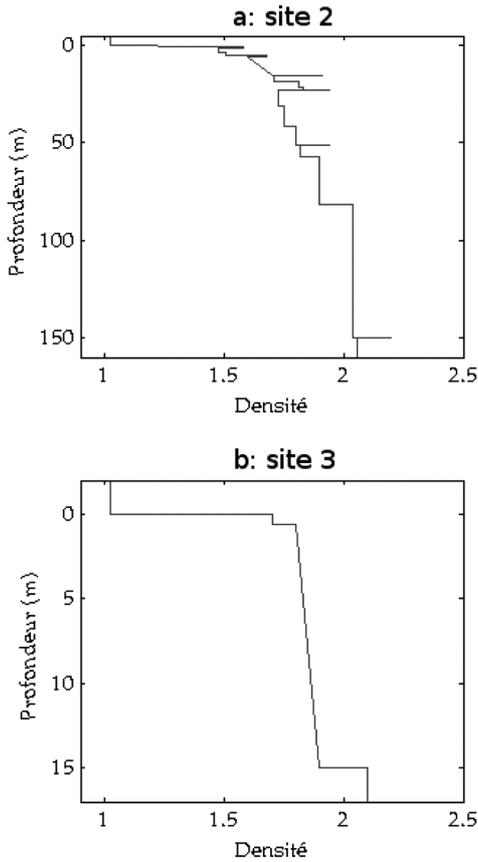


Figure 5. Densités obtenues par inversion géoacoustique pour le site 2 (a) et le site 3 (b) (d'après [10]). Les échelles verticales diffèrent d'un facteur 10.

Les valeurs des profils de vitesse et de densité (fig. 4 et 5) sont utilisées telles quelles pour le calcul du coefficient de réflexion en ondes planes qui est nécessaire au calcul du champ de pression réfléchi par le sol marin (équation 2).

3.3. Traitement des données

Les signaux expérimentaux enregistrés sur l'ensemble de l'antenne à grande distance (700 m) sur le site 2 sont présentés sur la figure 6. Il faut noter que seulement 15 hydrophones de l'antenne étaient utilisés pour enregistrer le champ de pression. Un agrandissement du signal enregistré sur l'hydrophone numéro 8 est présenté sur la figure 7. Le rapport signal à bruit est correct même si on peut noter la présence d'un bruit basse fréquence. Il faut également noter que les 15 signaux de pression ne sont pas parfaitement alignés car les hydrophones ne sont pas placés de manière régulière sur l'antenne (fig. 1).

Le traitement des données est simple. Tout d'abord, on effectue un fenêtrage temporel de manière à ne garder que les signaux réfléchis par le fond. La taille de cette fenêtre est imposée par les signaux enregistrés sur le quinzième hydrophone car ce sont ceux qui correspondent à la plus faible durée entre le signal

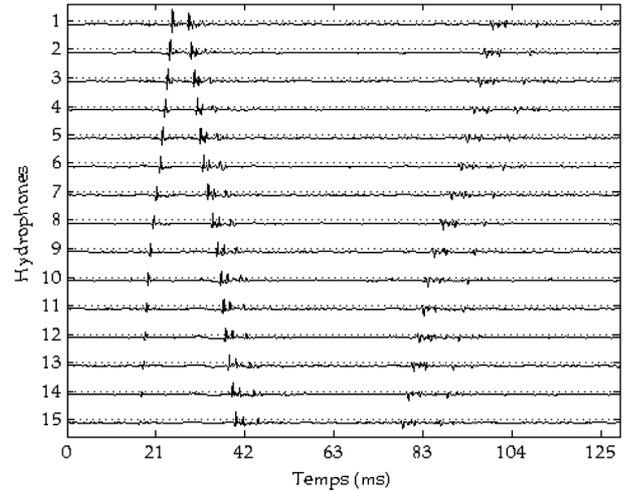


Figure 6. Signaux enregistrés sur l'ensemble de l'antenne à grande distance (700 m) sur le site 2. L'hydrophone 1 correspond à celui proche du fond tandis que l'hydrophone 15 est le plus proche de la surface. L'origine des temps est arbitraire.

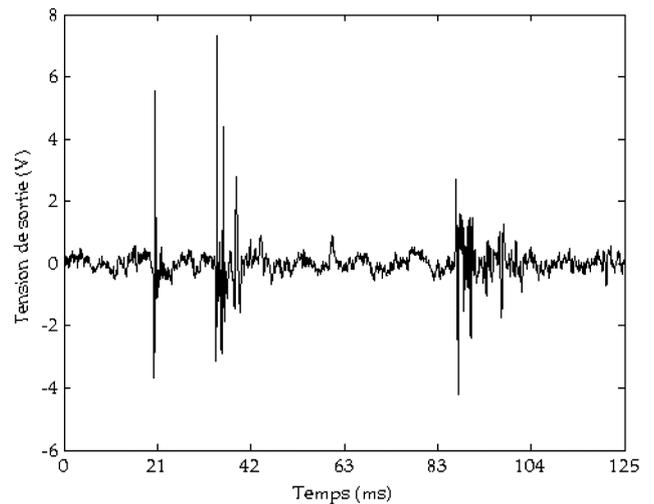


Figure 7. Signal enregistré sur la huitième hydrophone sur le site 2 à grande distance (700 m). L'enregistrement montre successivement le signal direct, le signal réfléchi sur le fond, et le signal réfléchi sur le fond puis sur la surface. L'origine des temps est arbitraire.

réfléchi et le signal réfléchi fond-surface. Ensuite, les signaux sont alignés suivant leur maximum. Et finalement, la cohérence est calculée à l'aide de l'équation (1). Il faut noter que l'alignement des signaux n'est pas une étape nécessaire mais elle permet de réduire les temps de calcul.

Une différence majeure avec les autres études [3, 8] est que nous ne pouvons pas faire de moyennage sur plusieurs réalisations faites dans les mêmes conditions expérimentales et ce pour deux raisons. Premièrement, la source étant remorquée derrière le navire, elle est en mouvement et la géométrie est différente à chaque tir. Deuxièmement, la source n'est pas parfaitement

répétable. Ces deux raisons combinées nous ont conduit à calculer la cohérence temporelle pour une distance donnée comme étant le résultat d'une réalisation unique.

4. Comparaison des données et des résultats numériques

4.1. Résultats numériques

Les signaux synthétiques obtenus par notre modèle numérique pour le site 2 à longue distance (700 m) sont présentés sur la figure 8 en regard des signaux expérimentaux. Seuls les signaux réfléchis par le sol sont calculés puisque ce sont les seuls qui nous intéressent dans cette étude. Pour obtenir une meilleure résolution temporelle et, par conséquent, une estimation plus précise de la cohérence, nous avons suréchantillonné nos données numériques par un facteur 4. La structure temporelle des signaux synthétiques est très similaire à celle des signaux expérimentaux avec la présence de trois pics principaux. Un quatrième

me pic, imputable à une structure profonde, est présent un peu plus tard dans les données synthétiques. Par ailleurs, le décalage temporel d'un capteur à l'autre est très correctement calculé par le modèle numérique.

4.2. Comparaison des données expérimentales et des résultats numériques

Les signaux synthétiques sont calculés pour l'ensemble de l'antenne pour les deux sites à deux distances différentes. Ces distances sont choisies pour fournir deux angles de rasance θ (fig. 1) similaires dans les deux sites : un inférieur ($\sim 12^\circ$) et un supérieur ($\sim 65^\circ$) à l'angle critique. Du fait des différences de hauteur d'eau, cela conduit à deux distances différentes pour les deux sites. Au site 2, la grande distance est de 700 m et la faible distance est de 71 m ; au site 3, la grande distance est de 535 m et la faible distance est de 30 m.

La comparaison entre la cohérence obtenue à partir des données expérimentales et celle obtenue à partir des simulations numériques est présentée sur la figure 9 pour le site 2 et sur la figure 10 pour le site 3.

4.3. Discussion

Deux commentaires principaux peuvent être faits sur ces résultats :

1. en dépit de certaines différences, il y a un bon accord général entre le modèle et les données. En particulier, la valeur globale de la cohérence, sa forme, et son évolution avec la distance sont bien prédites par le modèle ;
2. la cohérence a une dépendance très forte avec les propriétés géoacoustiques du sol.

Notre interprétation de cette importante différence dans la forme générale de la cohérence entre les deux sites est qu'elle est principalement due à la structure grande échelle du sol, *i.e.*, à des échelles de l'ordre de 1 à 100 m. Les caractéristiques du sol au site 2 autorisent une plage assez grande d'angles verticaux pour une position source-récepteur donnée étant donné les profils de vitesse, de densité et d'atténuation. Par contraste, la vitesse du son plus élevée au site 3 restreint les angles verticaux possibles et permet une cohérence plus importante. De plus, comme il a été signalé à la section 3.2, le socle consolidé se trouve à deux profondeurs très différentes dans les deux sites. La configuration géoacoustique du site 3 (stratification, profondeur du socle) donne naissance à moins de multitrajets dans le sédiment que la configuration géoacoustique du site 2 et conduit par conséquent à des valeurs de cohérence plus importante. En effet, il existe un lien direct entre trajets multiples et cohérence [2]. L'étude de la cohérence dans le domaine fréquentiel devra permettre de regarder ces aspects plus en détail.

Le fait que la cohérence soit sensible aux propriétés géoacoustiques des fonds marins ouvre des perspectives pour une nou-

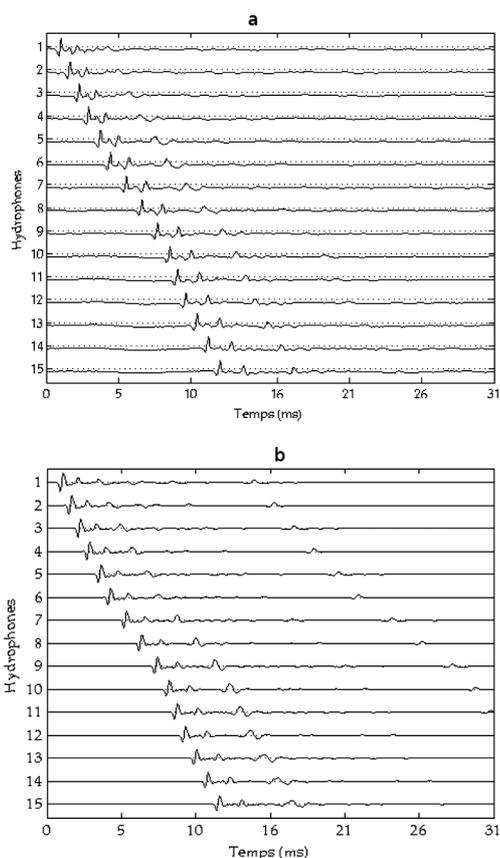


Figure 8. Signaux expérimentaux (a) et synthétiques (b) obtenus pour le site 2 à grande distance (700 m). L'origine des temps est arbitraire.

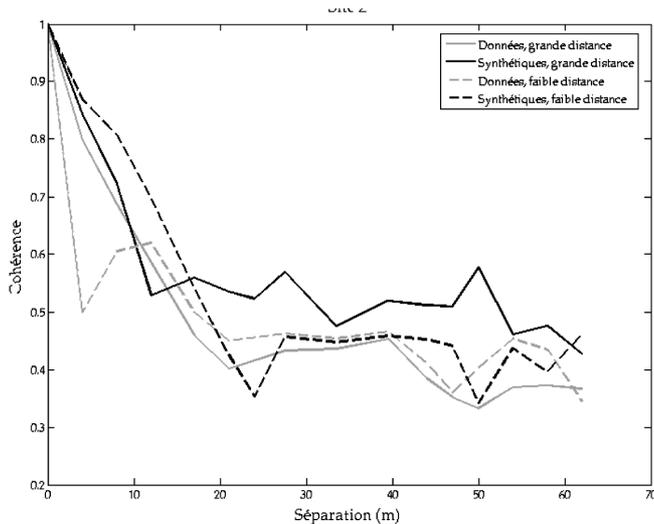


Figure 9. Cohérence numérique et expérimentale en fonction de l'écart au premier hydrophone pour le site 2. Lignes noires : cohérence numérique, lignes grises : données expérimentales. Lignes pleines : grande distance (angle de rasance $\sim 12^\circ$), lignes pointillées : faible distance (angle de rasance $\sim 65^\circ$).

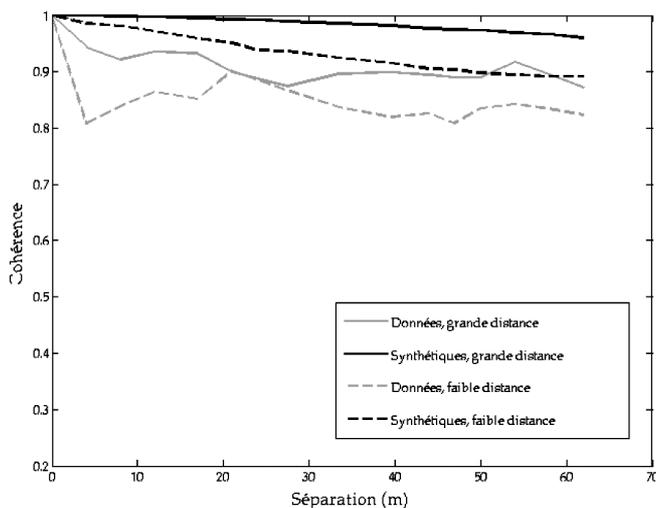


Figure 10. Cohérence numérique et expérimentale en fonction de l'écart au premier hydrophone pour le site 3. Lignes noires : cohérence numérique, lignes grises : données expérimentales. Lignes pleines : grande distance (angle de rasance $\sim 12^\circ$), lignes pointillées : faible distance (angle de rasance $\sim 65^\circ$).

velle méthode de caractérisation des fonds, à la fois à grande et à petite échelle. En effet, les différences entre la cohérence mesurée et la cohérence calculée à chaque site suggère, si le modèle géoacoustique est correct, la présence de fluctuations à petite échelle, *i.e.* de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-1} m, dans les propriétés géoacoustiques qui peuvent être traitées de manière sta-

tistique. Par conséquent, la mesure de la cohérence temporelle peut donner des informations sur la manière dont l'énergie acoustique se répartit, après interaction avec un sol complexe, entre une partie cohérente (correspondant à la réflexion) et une partie incohérente (correspondant à la diffusion) [5]. Cette information est importante pour de nombreuses applications, par exemple les techniques de REA (Rapide Environmental Assessment, ou Evaluation Rapide de l'Environnement), pour lesquelles on doit inférer une quantité (par exemple l'indice de diffusion bistatique) à partir de la mesure d'une autre grandeur (par exemple le coefficient de réflexion).

La mesure de la cohérence peut également fournir une contrainte supplémentaire pour les méthodes de caractérisation des fonds basées sur l'inversion du coefficient de réflexion [11]. En effet, du fait que cette mesure utilise le même dispositif expérimental, elle donne des informations sur la même parcelle du sol, dans les mêmes conditions expérimentales, et à la même résolution. Par conséquent, l'utilisation de cette grandeur supplémentaire doit permettre de mieux conditionner le problème inverse et les résultats obtenus peuvent ainsi être plus précis. Par exemple, les différences observées entre la simulation et les données pour les faibles distances (donc les forts angles de rasance) peuvent être dues à des erreurs dans le modèle géoacoustique. L'utilisation de la cohérence dans les processus d'inversion géoacoustique en complétant le jeu de données disponibles peut permettre de lever certaines ambiguïtés et peut affiner des résultats dans certaines configurations.

5. Conclusion

Les premiers résultats que nous avons obtenus sont très prometteurs. Le bon accord observé entre la cohérence expérimentale et la cohérence numérique nous donne une bonne confiance dans le modèle numérique développé. La manière dont la cohérence temporelle est calculée nous autorise également à simuler une grande variété de fonds et permet par conséquent des études de cas très larges.

La sensibilité de la cohérence temporelle à la structure géoacoustique du sol nous indique que cette grandeur contient de nombreuses informations utiles aux procédés de caractérisation des fonds par acoustique.

Avant de passer à l'utilisation de la cohérence temporelle dans un processus d'inversion géoacoustique, il convient d'approfondir ces premiers résultats. Plusieurs points feront l'objet de travaux futurs, en particulier : 1) le calcul et l'analyse de la cohérence dans le domaine fréquentiel, et 2) l'influence de la rugosité de surface sur la cohérence.

Références

- [1] J.-F. ALLARD, Propagation of sound in porous media. Modelling sound absorbing materials, Elsevier Applied Science, 1993.
- [2] J.S. BENDAT and A.G. PIERSOL, Engineering applications of correlation and spectral analysis, John Wiley and sons, 1980.
- [3] J.M. BERKSON, Measurements of coherence of sound reflected from ocean sediments, J. Acoust. Soc. Am., 1980, 68, 1436-1441.
- [4] L. BREKHOVSKIKH and O. GODIN, Acoustics of layered media. II: point sources and bounded beams., Springer-Verlag, 1999.
- [5] L. BREKHOVSKIKH and Y. LYSANOV, Fundamentals of Ocean Acoustics, Springer-Verlag, 1991.
- [6] J. CAMIN and C.W. HOLLAND, On numerical computation of the reflected field from a point source above a boundary, Personal communication.
- [7] P. CERVENKA and P. CHALLANDE, A new efficient algorithm to compute the exact reflection and transmission factors for plane waves in layered absorbing media (liquids and solids), J. Acous. Soc. Am., 1991, 89, 1579-1589.
- [8] P.H. DAHL, Forward scattering from the sea surface and the Van Cittert-Zernike theorem, J. Acous. Soc. Am., 2004, 115, 589-599.
- [9] G.B. DEANE, M.J. BUCKINGHAM and C.T. TINDLE, Vertical coherence of ambient noise in shallow water overlying a fluid seabed, J. Acous. Soc. Am., 1997, 102, 3413-3424.
- [10] C.W. HOLLAND, R. HOLLETT and L. TROIANO, A measurement technique for bottom scattering in shallow water, J. Acoust. Soc. Am., 2000, 108, 997-1011.
- [11] C.W. HOLLAND and J. OSLER, High resolution geoacoustic inversion in shallow water: A joint time and frequency domain technique, J. Acoust. Soc. Am., 2000, 107, 1263-1279.
- [12] X. LURTON, An introduction to underwater acoustics, Springer-Praxis, 2002.
- [13] P. ROUX, K.G. SABRA, W.A. KUPERMAN and A. ROUX, Ambient noise cross correlation in free space: Theoretical approach, J. Acous. Soc. Am., 2005, 117, 79-84.



Laurent Guillon

Laurent Guillon est titulaire d'un DEA (1995) et d'un doctorat (1999) d'Acoustique Appliquée de l'Université du Maine. Il a effectué son travail de thèse au sein du laboratoire d'acoustique sous-marine de l'IFREMER à Brest. De 1999 à 2001, il a travaillé en tant que post-doctorant au Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique du CNRS à Marseille. Depuis 2001, il est Maître de Conférences à l'Ecole navale où il est responsable du groupe de recherche en acoustique sous-marine. Il est également chercheur associé au laboratoire E3I2 (EA 3876) de l'ENSIETA. Ses activités de recherche concernent la caractérisation des fonds par acoustique, le traitement du signal appliqué à l'acoustique sous-marine, et la modélisation géoacoustique des sédiments marins.



Charles W. Holland

Charles W. Holland a obtenu un titre de Bachelor of Science (1983) à l'Université de Hartford (USA), un Master (1985) et un doctorat (1991) d'Acoustique à l'Université d'État de Pennsylvanie (USA). De 1985 à 1996, il a travaillé pour la société Planning Systems (Virginie, USA). En 1996, il a intégré le NURC, le centre de recherche de l'Otan à la Spezia (Italie). Depuis 2001, il est senior scientist à l'Applied Research Laboratory de l'Université d'État de Pennsylvanie (USA). Ses travaux de recherche couvrent un large spectre dans le domaine de l'acoustique des fonds marins : classification des fonds, modélisation géoacoustique, modélisation et mesure en mer des coefficients de réflexion et de diffusion, prédiction de pertes de transmission et de niveaux de réverbération. Charles Holland est fellow de la société américaine d'acoustique.