

# Inversion géoacoustique d'un canal très petits fonds à partir des navires en mouvement Traitement incohérent

Passive geoacoustic inversion of very shallow water  
environment with ship's noise:  
incoherent processing

**S. Vallez<sup>1</sup>, C. Gervaise<sup>1</sup>, A. Khenchaf<sup>1</sup>, Y. Stephan<sup>2</sup>,  
M. André<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> ENSIETA, E3I2, EA3876, 2 rue François Verny, 29806, Brest Cedex 9, France.  
vallezsi@ensieta.fr, Cedric.Gervaise@ensieta.fr, Ali.Khenchaf@ensieta.fr,

<sup>2</sup> SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine), 13 rue du Chatelier 29200 Brest, France.  
stephan@shom.fr

<sup>3</sup> Laboratoire d'applications bioacoustiques, Université Polytechnique de Catalogne, Avda.  
Rambla Exposicio, 08800 Vilanova i la Geltru, Barcelona, Spain.  
Michel.Andre@upc.edu

Manuscrit reçu le 27 novembre 2006



## Résumé et mots clés

Dans le contexte de l'inversion géoacoustique passive, nous proposons une méthode d'estimation des propriétés acoustiques d'un canal océanique très petits fonds (profondeur de 10 à 30 m) à partir du bruit large bande rayonné par des navires en transit. La solution est développée afin de conduire à un système de mesure minimisant le nombre d'hydrophones requis, pour cela elle utilise le mouvement des sources. À partir de l'observation acoustique de radiales centrées sur un hydrophone, les phénomènes d'interférences entre modes de propagation sont utilisés pour extraire les courbes de dispersion relatives du canal sur une bande fréquentielle choisie entre 50 et 500Hz. La contribution d'un navire est alors inversée pour fournir les propriétés du canal. Une description des algorithmes et de leurs implémentations est effectuée et leurs validations sont envisagées sur des données synthétiques réalistes ainsi que sur des données réelles issues d'une campagne expérimentale très petits fonds (profondeur ~20 m) réalisée au sud de Barcelone à partir de petits navires d'opportunité constitués principalement de chalutiers. Les résultats produits sont encourageants et permettent de dresser des perspectives d'amélioration pour la méthode proposée.

**Inversion géoacoustique, tomographie passive, navires d'opportunité, nombres d'onde radiaux, canal très petits fonds.**

## Abstract and key words

In the context of the passive geoacoustic inversion, this manuscript proposes a new Inversion Method suitable for very shallow water environments (10 to 30 m) from the broadband noise produced by ships of opportunity. The solution is dedicated to a small number of hydrophones and is easy to implement. The interference patterns generated by the ship movement and the propagation properties are exploited to extract the relative dispersion curves on a chosen bandwidth then the geoacoustic inversion is performed. Here, we describe our algorithms and validate them on realistic synthetic

data as well as on real data from a very shallow water trial performed off the Southern coast of Barcelona, Spain. Valuable results are obtained and allow to draw some way of improvement.

Geoacoustic Inversion, passive tomography, ship noise, wave numbers, shallow water environment.

### Remerciements

Nous tenons à remercier le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine Française pour avoir soutenu financièrement ce travail sous le contrat de recherche CA/2003/06/CMO. Nous remercions également Sergio Jesus (Professeur à l'université d'Algarve) pour ses conseils avisés lors de la réalisation de cet article, ainsi que les deux reviewers anonymes qui ont permis, par leurs remarques, d'améliorer ce dernier.

## 1. Introduction

Les océans recouvrent 70% de la surface terrestre, et le recueil d'informations sur ces derniers est essentiel pour comprendre les phénomènes dont ils sont le siège. À cause de l'étendue et du caractère inhospitalier des milieux océaniques, le relevé de mesures *in situ* est souvent confronté à des coûts et délais de mise en œuvre importants et souffre d'un sous-échantillonnage spatio-temporel. Pour combler ces limitations, des mesures indirectes par méthodes acoustiques ont été proposées, les propriétés d'un canal océanique sont estimées par l'analyse des conditions de propagation acoustique en son sein. Initialement développée par Munk et Wunsch [Munk79] pour mesurer la température moyenne des océans à l'échelle des bassins océaniques, la tomographie acoustique a été appliquée pour la caractérisation de sous-bassins et de phénomènes régionaux comme les marées internes [Munk95 *et al.*], [Porter97 *et al.*], [Stephan00 *et al.*]. Depuis les années 90, par convergences de besoins civils et militaires, le champ d'application a glissé des milieux grands fonds aux milieux petits fonds et la tomographie acoustique est devenue inversion géoacoustique. Pour ces milieux petits fonds, les échelles spatiales de caractérisation sont de l'ordre de la dizaine de kilomètres. Pour des émissions aux fréquences intermédiaires (autour de 500 Hertz), les méthodes dites MFP (Matched Field Processing) [Baggeroer93] ou MIR (Matched Impulse Response) [Hermand] ont été proposées suivant que l'on favorise la diversité spatiale ou fréquentielle des mesures. Pour des émissions inférieures à quelques centaines de Hertz, des méthodes utilisant plus particulièrement les phénomènes de dispersion ont été proposées et associent une phase de traitement du signal permettant l'extraction des caractéristiques de dispersion et une phase d'inversion de celles-ci [Glattetre89], [Potty00], [Nicolas03 *et al.*]. Alors que les procédés de tomographies acoustiques grands fonds et d'inversion géoacoustique petits fonds commencent à être bien maîtrisés et utilisés régulièrement, ces derniers exigent une répétition d'émissions actives de forte puissance. Ceci pose le problème non seulement de l'alimentation et du maintien des sources pour des observations sur le long terme, mais aussi de la pollution acoustique en

lien avec le respect de la faune marine et finalement de la discrétion pour les opérations militaires. À ces trois problèmes posés, la communauté scientifique a proposé d'utiliser les sources acoustiques d'opportunité présentes dans le milieu en lieu et place des émissions actives (voir [Gervaise07 *et al.*] pour une revue bibliographique). Bruits hydrodynamiques de surface, vocalises de mammifères marins et bruit rayonné par les navires sont trois sources utilisées pour l'inversion géoacoustique passive des milieux petits fonds. L'utilisation du bruit hydrodynamique de surface est bien référencée et conduit aujourd'hui à la proposition de systèmes opérationnels [Carbone98 *et al.*], [Harrison02]. Concernant les vocalises de mammifères marins les références sont moins nombreuses et le recul sur les méthodes est limité [Thode00 *et al.*], [Gervaise07 *et al.*]. Pour les bruits rayonnés par les navires, les travaux relatés débutent dans les années 2000 et étudient la faisabilité des méthodes MFP à partir des bruits rayonnés par les navires en se focalisant sur les composantes fréquentielles les plus énergétiques du spectre rayonné [Mecklenbrauker01], [Chapman04] [Koch05], [Jesus06 *et al.*]. Conformément aux méthodes MFP, ces applications utilisent une antenne verticale dont le déploiement est complexe, en aucun cas discret, et plutôt réservée aux observatoires fixes. Par leur nature même, ces méthodes n'utilisent pas le mouvement des sources qui pourrait permettre la simplification des systèmes de mesure en conservant la précision d'inversion. Une première utilisation opportuniste de mouvement des sources est proposée par Battle [Battle03] pour les milieux variant en distance. Finalement le mouvement des navires et le spectre rayonné large bande sont utilisés dans [Dspain99 *et al.*] et [Heaney04]. Ces travaux exploitent les réseaux d'interférences créés conjointement par le mouvement et la propagation modale. De ces réseaux sont extraits des caractéristiques qui sont alors inversées. Les résultats restent limités notamment par le choix des caractéristiques qui semblent être peu sensibles aux propriétés du milieu.

Dans le sillage de ces deux dernières références et des dernières avancées des techniques d'inversion géoacoustiques actives basse fréquence [Potty00], [Nicolas03 *et al.*], notre publication présente une méthode originale d'inversion passive du milieu à partir des bruits de navires (dans la bande 50 Hz-500 Hz) peu

exigeante en nombre de capteurs : 1 hydrophone en inversion avec trajectoire des navires connues et 3 hydrophones en inversion passive avec trajectoire (rectiligne uniforme) des navires inconnues. À partir d'une succession de navires transitant dans une zone d'intérêt, la méthode d'inversion consiste à utiliser les phénomènes d'interférences dus à la propagation modale et au mouvement des navires pour estimer les courbes de dispersion relatives du milieu et les inverser. L'originalité de la méthode proposée repose sur le faible nombre d'hydrophones requis, l'utilisation conjointe du mouvement et du spectre rayonné large bande et finalement sur la possibilité d'utiliser plusieurs navires dans le processus d'inversion.

La présente publication est organisée en 4 parties. La première décrit le matériel expérimental à notre disposition. La campagne de mesures MOVEBOAT, réalisée en méditerranée au large de Barcelone (Espagne), servant de support au développement de nos méthodes est décrite et une analyse statistique des propriétés spectrales des sons rayonnés par les petits navires est réalisée. La deuxième partie aborde la modélisation directe et établira le modèle de signal reçu par un hydrophone lorsqu'un navire réalise une radiale dans un milieu petits fonds, les liens entre caractéristiques du canal et propriétés du signal reçu seront mis en avant. La troisième présente la méthode d'inversion fondée sur un traitement incohérent des mesures et est organisée en deux paragraphes : le premier aborde l'algorithme d'estimation des courbes de dispersion relatives à partir de l'observation d'un navire donné et le second aborde l'inversion de ces courbes de dispersion pour estimer les propriétés du canal. Finalement la quatrième partie présente les résultats de notre méthode dans le cas d'un canal d'une profondeur de 15 mètres sur des données simulées et des données réelles issues de la campagne MOVEBOAT.

## 2. Le schéma expérimental : la campagne MOVEBOAT

Les travaux d'inversion acoustique du canal à partir du bruit rayonné par les navires en mouvement sont appliqués à un canal très petits fonds. Les données réelles sont issues de la campagne MOVEBOAT, réalisée par les laboratoires E3I2/ENSIETA et LAB/UPC. Le lieu de la campagne est une zone très petits fonds d'une profondeur de 15 mètres (environ) au large de Vilanova I la Geltru (Lat : 41°10.8227N, Long : 1°43.1204E) sur une radiale entre le port de Vilanova et une ferme aquacole située à 2 nautiques de la côte (situation privilégiée par la présence de navires d'opportunités, principalement de type chalutiers). De la température de l'eau, mesurée durant l'expérience, on déduit un modèle simple de profil bathycélérimétrique consistant en une colonne isocélère de 1520 ms<sup>-1</sup> (justifiable par la faible profondeur du canal). Le fond est constitué d'une fine couche de sable

de 50 cm d'épaisseur surmontant une couche de sable et graviers compactés d'une épaisseur de 25 m qui sera considérée par la suite comme un socle de profondeur infini. Le tableau 1 résume les propriétés *a priori* du canal.

Tableau 1. Paramètres a priori du canal MOVEBOAT.

Paramètres du milieu	Valeurs
Hauteur d'eau	15 m
Célérité eau	1 520 ms <sup>-1</sup>
Hauteur couche sédiment 1	0,5 m
Célérité couche sédiment 1	1 600 ms <sup>-1</sup>
Atténuation sédiment 1	0.2 dB/λ
Célérité couche sédiment 2	1 900 ms <sup>-1</sup>
Atténuation sédiment 2	0.6 dB/λ

Concernant la mesure, une station est ancrée et un hydrophone B&K8101 équipé de son amplificateur est mouillé à une profondeur choisie par l'expérimentateur entre 6 et 12 m. Le signal mesuré subit une conversion analogique numérique à une fréquence d'échantillonnage de 80 KHz. Le gain d'amplification est choisi pour optimiser la dynamique de mesure et le signal est quantifié sur 16 bits.

Concernant les sources, le lieu de la campagne est choisi afin de rencontrer comme sources d'opportunité un nombre important de bateaux de pêche et de bateaux d'approvisionnement d'une ferme aquacole située au large de Vilanova. Enfin un bateau de pêche coopérant (chalutier « Domingo », 15 mètres de long, 2 moteurs 700 CV) a effectué des radiales monitorées, rectilignes, s'étendant sur plus de 2 km de part et d'autre de l'hydrophone, avec une distance de passage au plus proche de l'hydrophone de l'ordre de 100 m, effectuées à vitesse constante variant de 8 à 13 nœuds et parallèlement et perpendiculairement aux lignes iso-bathymétriques.

En rassemblant les productions d'une journée à la mer en octobre 2005 et 3 journées en octobre 2006, 29 sources (28 radiales de chalutiers et 1 radiale de yacht de plaisance, 15 radiales contrôlées et 14 radiales d'opportunité) ont été successivement enregistrées.

La figure 1 fournit le spectre moyen mesuré sur la campagne MOVEBOAT, ainsi que le spectre de Wenz (modèle empirique d'estimation du spectre du bruit ambiant) pour un bruit de trafic d'indice 4 et un vent de 10 nds, et les pertes de transmission incohérentes du milieu *a priori* calculées grâce au code ORCA [Westwood96] pour une source placée à 1 mètre de profondeur, un récepteur placé à 6 mètres de profondeur et une distance radiale entre ces derniers égale à 1 000 m.

La figure 1 présente le spectre moyen des sources d'opportunité (29 navires), chaque densité spectrale est estimée en fenêtrant la mesure autour du CPA, en corrigeant des pertes de transmission cylindriques et en appliquant l'estimateur de Welch ( $f_e = 2\,500$  Hz, résolution = 0.5 Hz, moyennage = 100, recouvrement = 50 %, fenêtre de Hamming). La densité spectrale de puissance moyenne possède un niveau moyen maximal de l'ordre de

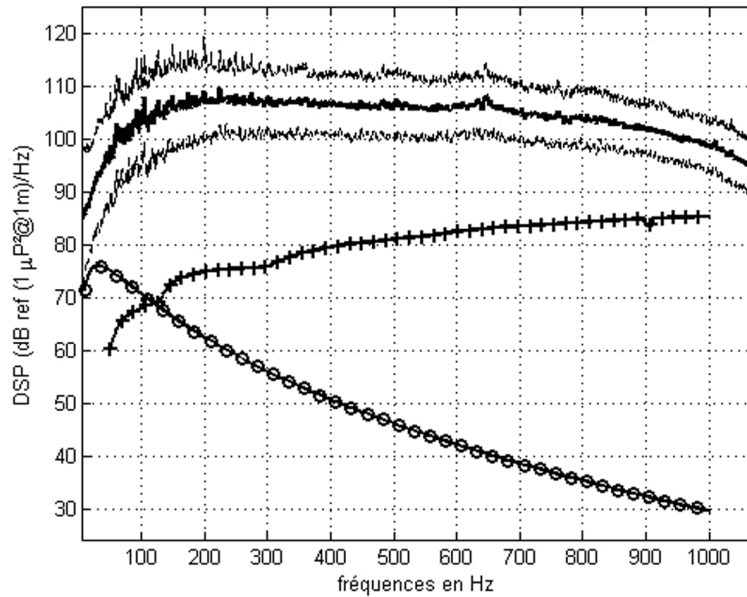


Figure 1. Courbe trait noir continu, épais : densité spectrale moyenne du bruit rayonné par les sources d'opportunité de la campagne MOVEBOAT; courbe trait noir pointillé fin : densité spectrale moyenne plus ou moins l'écart type; courbe trait noir et rond : densité spectrale de puissance du bruit ambiant, modèle de Wenz indice de trafic 4; courbe trait noir et croix : pertes de transmission incohérentes calculées par ORCA pour le canal a priori (le niveau de perte possède un offset positif de 130 dB).

110 dB ref  $1\mu P^2@1$  m/Hz autour de 200 Hz s'expliquant puisque les pertes de transmission du canal *a priori* atténuent grandement les basses fréquences inférieures à 100 Hz pour lesquelles nous aurions attendu un maximum. Cette constatation expérimentale est le résultat d'un compromis entre les navires rayonnant plutôt à des fréquences inférieures à 100 Hz et le canal très petits fonds qui possède un caractère passe haut. La comparaison du niveau rayonné par rapport au spectre de bruit de Wenz démontre un excédent de l'ordre de 35 dB entre la source et le bruit dans la bande entre 100 Hz et 200 Hz conduisant à une portée de l'ordre de 3 kms en supposant des pertes cylindriques, portée qui a été observée en pratique dans la campagne MOVEBOAT. D'autre part, l'écart type des spectres est de l'ordre de 7 dB ce qui montre une grande variabilité du son perçu pour des petits bateaux comme les chalutiers. Cette variabilité peut être expliquée par la grande diversité d'âge des navires rencontrés et par l'influence de la profondeur de la source (principalement l'hélice) sur la pondération modale et donc sur le niveau reçu. Cette variabilité est cohérente avec celle observée dans [Wales02] pour une très large base de données de gros navires.

### 3. Modélisation directe

L'objectif de cette partie est d'établir le modèle de signal reçu en un hydrophone lorsqu'un navire réalise une radiale dans un milieu petits fonds en rayonnant en mouvement une composan-

te large bande. Afin d'aboutir à ce modèle, la propagation en milieu petits fonds et la prise en compte du mouvement sont abordées alors que les caractéristiques des sources ont été étudiées dans la partie précédente.

#### 3.1. La Propagation

Les sons rayonnés par les navires concentrant majoritairement leur énergie sur les basses fréquences et les milieux d'intérêt étant des canaux petits fonds, le choix d'une résolution modale pour les équations de la propagation est effectué et l'hypothèse d'un milieu stratifié ne variant pas avec la distance, isotrope en azimut est appliquée. Sous ces conditions, la fonction de transfert entre un émetteur et un récepteur supposés immobiles s'écrit de la façon suivante [Jensen00 *et al*] :

$$H(f) = (2\pi)^{1/2} \sum_{m=1}^{+\infty} g_m(z_s) g_m(z_r) \frac{\exp(-jk_r(m, f)r)}{\sqrt{k_r(m, f)r}} + T_1(r) \quad (1)$$

où  $g_m(z)$  la fonction modale d'indice  $m$ ,  $k_r(m, f)$  le nombre d'onde radial du mode d'indice  $m$  à la fréquence  $f$ ,  $z_s$  la profondeur de la source,  $z_r$  la profondeur du récepteur,  $r$  la distance radiale entre la source et le récepteur et  $T_1(r)$  est un terme qui tend exponentiellement vers zéro lorsque  $r$  tend vers l'infini. La formulation de la fonction de transfert précédente permet une interprétation complète des conséquences de la propagation acoustique. Celle-ci conduit à une propagation multi-composantes, chaque composante nommée mode de propagation est

pondérée par la valeur des fonctions modales à la source et au récepteur et produit une onde radiale avec un nombre d'onde radial  $kr(m, f)$  qui fixe les propriétés de temps de propagation entre l'émetteur et le récepteur. Ainsi vitesse radiale de phase et vitesse radiale de groupe sont définies par les formules suivantes :

$$v_{\varphi}(m, f) = \frac{2\pi f}{k_r(m, f)} \quad (2)$$

$$v_g(m, f) = \frac{2\pi \partial f}{\partial k_r} \quad (3)$$

Comme les nombres d'onde radiaux  $k_r$  sont fonction de l'indice du mode et de la fréquence, les composantes modales se propagent avec des vitesses différentes en fonction de la fréquence et de l'indice du mode. Ces phénomènes appelés dispersions, sont signants de la nature du milieu (colonne d'eau et fond). Ils peuvent être utilisés pour réaliser une inversion. Les courbes représentant les valeurs du nombre d'onde radial en fonction de l'indice du mode et de la fréquence seront nommées « courbes de dispersion » du canal jusqu'à la fin de la publication, de la même façon on nommera « courbes de dispersion relatives » les valeurs des différences entre nombres d'onde radiaux en fonction de la fréquence.

### 3.2. Le Mouvement

Lorsque la source est mobile dans le canal, la propagation précédemment décrite qui formait un système linéaire invariant entre l'émetteur et le récepteur constitue un système linéaire variant où une source émettant une fréquence  $f_0$  en suivant une trajectoire  $r(t)$  va générer une réponse harmonique excitant par phénomène doppler une bande fréquentielle autour de  $f_0$ . La réponse harmonique entre l'émetteur mobile et le récepteur fixe s'exprime différemment selon que l'on peut négliger ou pas le mouvement de la source durant le temps de propagation entre l'émetteur et le récepteur.

Si ce dernier mouvement est négligeable, alors l'expression de la réponse harmonique du canal est :

$$h(f_0, t) \simeq (2\pi)^{1/2} \sum_{m=1}^{+\infty} g_m(z_s) g_m(z_r) \frac{\exp(-jk_r(m, f)r(t))}{\sqrt{k_r(m, f)r(t)}} \exp(2\pi j f_0 t) \quad (4)$$

Si ce mouvement n'est pas négligeable, l'expression de la réponse harmonique du canal se complexifie et devient :

$$h(f_0, t) \simeq (2\pi)^{1/2} \sum_{m=1}^{+\infty} g_m(z_s) g_m(z_r) \frac{\exp(-jk_r(m, f)r(u(m, t)))}{\sqrt{k_r(m, f)r(u(m, t))}} \exp(2\pi j f_0 u(m, t)) \quad (5)$$

où  $u(m, t)$  est le temps d'émission, solution de l'équation :

$$u + \frac{r(u)}{v_{\varphi}(m, f_0)} = t \quad (6)$$

Dans les deux cas, il est intéressant de remarquer que le mouvement de la source affecte chaque composante modale d'une modulation différente (décalage de  $f_d = \frac{v_r \times k_r}{2\pi}$  où  $v_r$  est la vitesse radiale de la source).

Ainsi l'observation par un seul hydrophone d'une source en mouvement de ces modulations différentes doivent pouvoir être utilisées pour la séparation des composantes modales et l'estimation de leurs caractéristiques. La figure 2 expose une synthèse des phénomènes induits par la propagation et le mouvement des sources sur la structure tempo-fréquentielle des mesures lorsque le navire réalise une radiale rectiligne à vitesse constante  $v$ .

Concernant le bruit large bande, le modèle du signal reçu est obtenu par une synthèse de Fourier de la réponse harmonique du canal définie précédemment dans les équations (4) ou (5) :

$$s(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(r, f_0, t) E(f_0) \exp(2\pi j f_0 t) dt \quad (7)$$

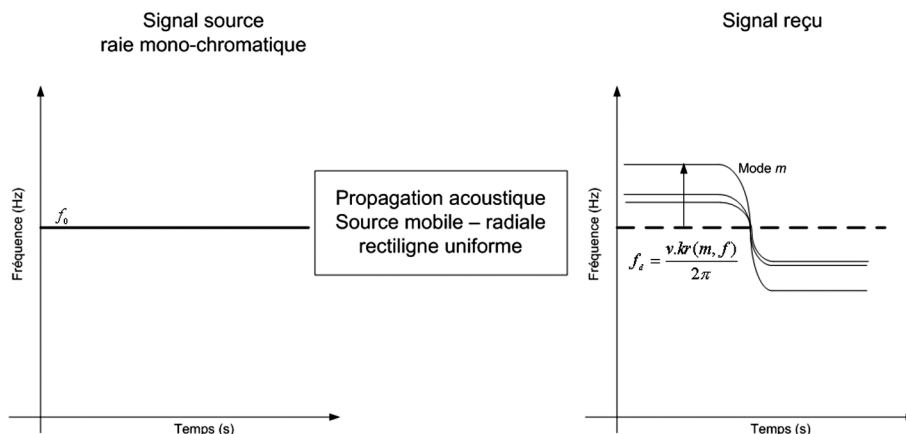


Figure 2. Synthèse de l'effet de la propagation et du mouvement de la source sur des raies spectrales.

Pour la composante à la fréquence  $f$ , l'intensité acoustique reçue au niveau de l'hydrophone vaut :

$$I(r, f) = \gamma_e(f) \left( \sum_n A_n^2 + 2 \sum_{n,m} A_n A_m \cos(\Delta k_r^{mn}(f)r) \right) \quad (8)$$

avec  $\gamma_e(f)$  le niveau spectrale de la source et  $A_n$  l'amplitude du mode  $n$  valant :

$$A_n(z_s, z_r) = \left( \frac{2\pi}{k_r^n} \right)^{1/2} g_n(z_s) g_n(z_r) \quad (9)$$

Les effets conjoints de la propagation et du mouvement de la source induisent donc des phénomènes remarquables pour le bruit large bande émis par les navires. En effet, on observe un phénomène d'interférences entre modes, pour deux modes de propagations d'indice  $m$  et  $n$ , l'énergie du signal reçu au niveau de l'hydrophone est fonction d'un terme en  $\cos(\Delta k_r^{mn}(f)r)$  avec  $\Delta k_r^{mn} = k_r^m - k_r^n$ .

De ce fait, en fonction de l'avancée du navire (soit la distance radiale  $r$ ) et de la fréquence de rayonnement, les modes  $m$  et  $n$  peuvent battre en phase ou en opposition de phase. Ces battements créent un réseau d'interférences dans le plan  $(r, f)$  ou de manière équivalente  $(t, f)$  pour les sources mobiles en fonction du temps. La figure 3 illustre le type de signal reçu pour un bateau naviguant en route rectiligne uniforme dans un milieu très petits fonds.

Si le diagramme temps-fréquence ou distance-fréquence du signal reçu à l'hydrophone est analysé pour une fréquence donnée, celui-ci présente  $C_N^2$  battements si le canal propage  $N$  modes à cette fréquence (on peut observer les successions de battements sur la partie droite de la figure 3). Chaque battement a une fréquence spatiale égale à la différence de nombre d'ondes des deux modes impliqués dans le battement divisée par  $2\pi$ . Ainsi dans le cadre d'un traitement incohérent, nous proposons d'estimer les fréquences spatiales de ces battements pour différentes fréquences afin de bâtir les courbes de dispersion relatives et d'inverser celles-ci pour obtenir les paramètres du milieu. Nous avons donc présenté un modèle de mesures recueillies par un hydrophone en présence d'une source mobile émettant une

raie spectrale ou un bruit large bande dans un canal petits fonds. Le modèle, implémenté dans un simulateur développé par nos soins à partir du code ORCA, fournit des données synthétiques et nous a permis d'identifier les observables à extraire des mesures à partir desquels on cherchera à estimer les propriétés du canal dans un contexte passif.

## 4. La méthode d'inversion

### 4.1. Stratégie générale

Afin de proposer une méthode d'inversion passive utilisant les bruits rayonnés par les navires, nous supposons disposer dans un canal petits fonds d'un hydrophone (trajectoires des navires connues) ou de trois hydrophones (trajectoires des navires inconnues) et nous supposons qu'à la surface de ce canal, un ou plusieurs navires (trajectoires connues ou pas) réalisent successivement des radiales en route rectiligne uniforme dans la zone de réception des hydrophones. Conformément à la grande majorité des méthodes acoustiques d'inversion, la stratégie proposée comprend successivement une étape d'extraction des grandeurs signifiantes à partir des mesures acoustiques puis une étape d'inversion de ces grandeurs. Dans notre cas, l'étape d'extraction consiste à estimer les courbes de dispersion relatives du milieu. Pour ce faire, on analyse le bruit large bande mesuré pour chaque navire et on balaie l'espace des fréquences afin de déterminer les fréquences radiales de battement qui exprimeront les différences de nombres d'onde radiaux entre modes normaux. Après accumulation des résultats pour différentes fréquences et différents navires, on dispose ainsi des courbes de dispersion relatives sur une large gamme de fréquences pouvant s'étendre (pour des données très petits fonds) de la dizaine de Hertz à plusieurs centaines de Hertz. Concernant l'étape d'inversion, celle-ci consistera à utiliser les courbes de dispersion

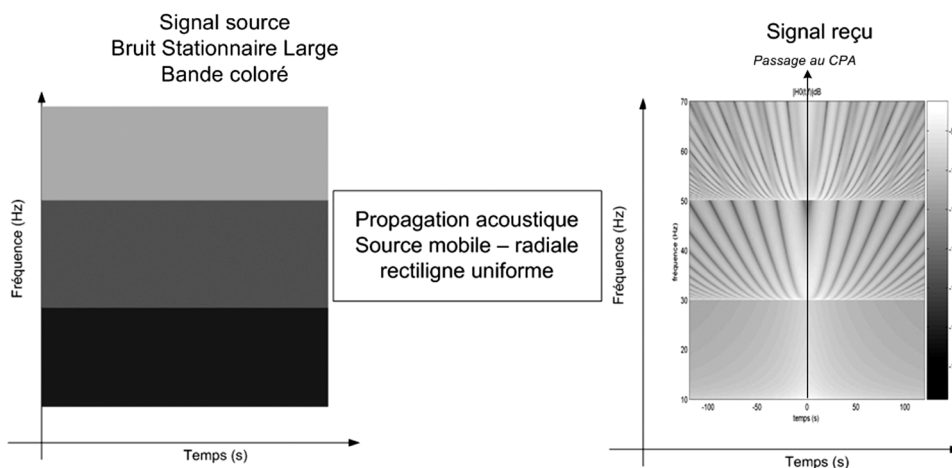


Figure 3. Synthèse de l'effet de la propagation et du mouvement de la source pour le bruit large bande.

relatives pour choisir le modèle d'environnement par une procédure incrémentale en partant du milieu le plus simple (canal de Pekeris) vers les milieux les plus complexes (structures sédimentaires multi-couches à gradient avec présence d'ondes de cisaillement par exemple) et estimer ses paramètres en minimisant une distance entre les courbes de dispersion relatives mesurées et modélisées. On cherchera donc le milieu « vu » par une onde acoustique basse fréquence donnant une image du milieu de type « vérité sonar » [LeGac03].

## 4.2. Algorithmes d'extraction

Afin de construire les courbes de dispersion relatives du milieu évaluées pour une série de fréquences  $f_i, f_i \in [10Hz, 500Hz]$ , nous possédons les mesures des sons rayonnés en un hydrophone par une succession de navires émettant chacun un bruit large bande particulier et réalisant des radiales rectilignes à vitesse constante dans la zone de portée de l'hydrophone de mesure. Après détection du passage du navire, on sélectionne au choix la partie en approche et/ou en éloignement du signal en prenant soin de se placer suffisamment loin du CPA (une vingtaine de fois la hauteur d'eau) pour éviter les effets de champ proche. Pour chacune des fréquences d'intérêts  $f_i$  un pré-traitement est

appliqué. Il consiste en un filtrage passe-bande très étroit de bande  $B$ , d'un retour en bande de base (autour de la fréquence  $f_i$ ) et finalement d'un sous-échantillonnage (fréquence d'échantillonnage  $f_e = 2B$ ). On élève ensuite ce signal bande étroite au carré pour obtenir l'intensité acoustique à la fréquence  $f_i$  et à partir de la connaissance de  $r(t)$  en fonction du temps, on reconstruit l'intensité acoustique à la fréquence  $f_i$  en fonction de la distance radiale  $r$ . Finalement on applique une transformée de Fourier par rapport à  $r$ . Les fréquences spatiales remarquables sont reliées aux différences de nombres d'onde radiaux par la formule  $f_r = \frac{\Delta k_r^{mn}(f)}{2\pi}$  et nous permettent de remplir les courbes de dispersion relatives. La figure 4 résume le synoptique de la méthode d'extraction des courbes de dispersion relatives.

Schématiquement, le traitement proposé consiste à effectuer une transformée fréquence-différence entre nombres d'onde, et à en extraire les maxima locaux qui correspondent aux battements entre modes. Par ailleurs, dans les milieux très petits fonds comme ceux dans lesquels nous travaillons, aux basses fréquences, très peu de modes propagatifs existent. Ainsi il est relativement aisé d'extraire les fréquences de coupure des modes à partir du spectrogramme de nos mesures comme illustré sur le spectrogramme figurant sur la figure 4.b.

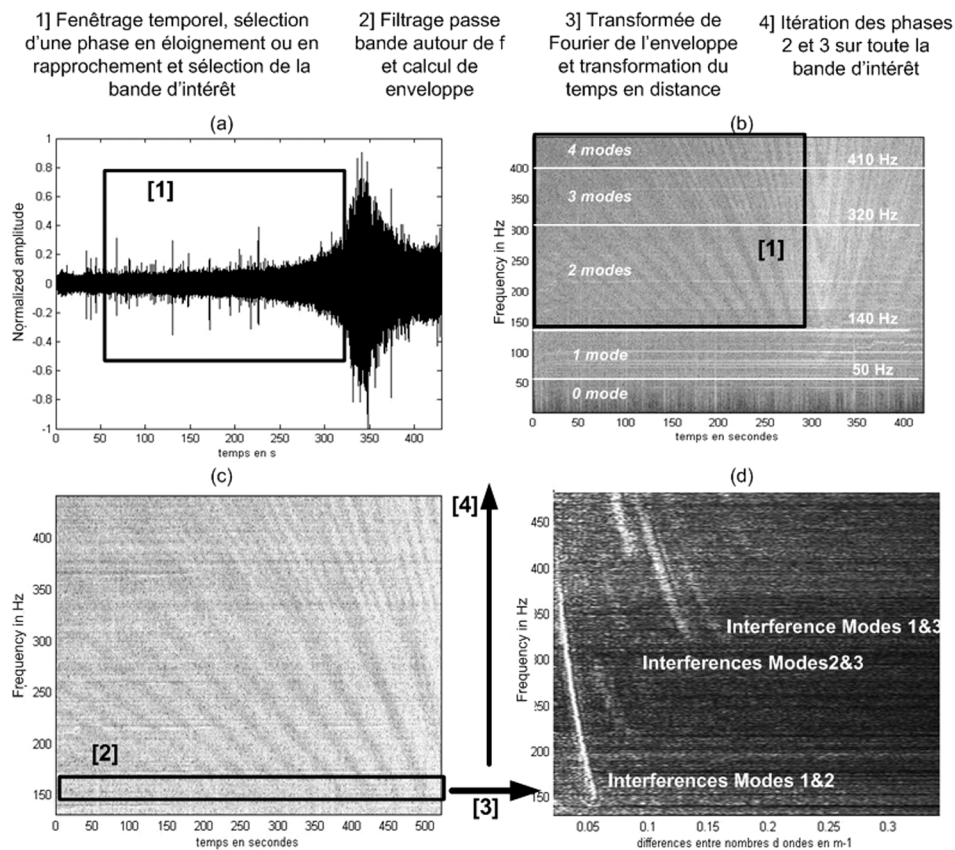


Figure 4. Synoptique de la méthode d'extraction des courbes de dispersion relatives par traitement incohérent (les figures étant générées avec des données réelles d'une radiale à 12nds du Domingo). (a) signal temporel sélectionné partie en approche; (b) spectrogramme du signal sélection de la bande fréquentielle d'intérêt et fréquences de coupure des modes; (c) spectrogramme du signal utile à traiter, la fenêtre symbolise un filtrage passe bande (d) transformée fréquence-différence entre nombres d'onde.

- la bande fréquentielle entre 0 et 50 Hz ne contient pas d'énergie, le canal ne propage aucun mode,
- la bande de fréquences entre 50 et 140 Hz contient de l'énergie mais aucune interférence apparaît : le canal propage un seul mode de propagation,
- la bande de fréquences entre 140 et 320 Hz contient de l'énergie et présente un seul rythme de battement : le canal propage 2 modes,
- la bande de fréquences entre 320 et 410 Hz contient de l'énergie et présente trois rythmes de battement : le canal propage 3 modes,
- ...

L'extraction des fréquences de coupure du canal nous permet d'avoir un *a priori* sur le nombre de modes à rechercher en fonction de la fréquence.

### 4.3. Algorithmes d'inversion

Afin d'estimer la structure du canal sous-marin étudié et les propriétés de celui-ci, les courbes de dispersion relatives mesurées à partir du bruit large bande des différents navires sont utilisées.

Il est à noter que l'indice des modes estimés n'est pas connu *a priori* et qu'il convient d'opérer l'inversion en tenant compte de l'absence de cette information. Dans un premier temps, on suppose connu *a priori* la structure du canal sous-marin (nombre de couches et structure des profils de propriétés dans les couches) paramétrée par  $\theta$  et nous cherchons à estimer les valeurs  $\theta$  des propriétés. On suppose connaître *a priori* un intervalle possible pour ces valeurs qui nous permet de borner l'espace de recherche.

Les valeurs estimées  $\hat{\theta}$  sont celles qui minimisent la distance au sens des moindres carrées entre les courbes de dispersion relatives estimée  $\Delta \widehat{k}_r^{mn}(f_i)$  et les courbes de dispersion relatives simulées  $\Delta k_r^{mn}(f, \theta)$  en prenant soin de balayer pour chaque interférence mesurée tous les couples de modes propagatifs simulés (en effet une trace dans le plan fréquence- $\Delta \widehat{k}_r^{mn}$  indique un battement entre deux modes mais n'indique pas les indices des modes impliqués). Cela revient à minimiser le critère suivant :

$$\hat{\theta} = \underset{\theta}{\operatorname{argmin}} \left( \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i} \min_{m,n \in N_n(f)} |\Delta \widehat{k}_r^j(f_i) - \Delta k_r^{m,n}(f_i, \theta)|^2 \right) \quad (10)$$

avec  $M$  le nombre de fréquences considérées et  $N_i = \frac{N_m(f)!}{(N_m(f) - 2)!}$  le nombre de figures d'interférences entre modes recherchés (avec  $N_m(f)$  le nombre de modes propagatifs à la fréquence  $f$ ). On notera que ce dernier nombre pourra être défini à partir de l'étude qualitative des fréquences de coupure des différents modes du canal (Étude similaire à celle de la figure 4.b). Afin de réaliser cette étape de minimisation du critère, nous avons envisagé l'utilisation de méthodes d'optimisation globales. L'approche par algorithmes génétiques

a été retenue après une phase de comparaison de performances avec la méthode de recuit simulé (à temps de calcul égal) ainsi qu'une étude bibliographique des méthodes tabou et colonie de fourmis [Glover86], [Dorigo05]. Lorsque l'*a priori* sur la structure du canal est faible, on propose d'appliquer la méthode d'inversion précédente pour une classe de structures différentes en partant de la structure la plus simple vers la structure la plus complexe. La structure retenue est la structure la plus simple donnant un accord satisfaisant entre courbes de dispersions relatives estimées et courbes de dispersion relatives simulées. L'accord satisfaisant est défini lorsque les résidus entre courbes de dispersion relatives estimées et mesurées suivent une loi gaussienne.

## 5. Mise en œuvre en milieu très petits fonds

### 5.1. Tests sur données simulées

#### 5.1.1. Estimation des courbes de dispersion relatives

On se place dans les conditions de la campagne MOVEBOAT en négligeant la première couche sédimentaire (cf. tableau 1). En effet, aux longueurs d'onde considérées (entre 3 et 10 m environ), une hauteur de 0.5 m de sédiment n'a quasiment aucune influence sur la propagation. On place un hydrophone à une immersion de 11 m, le navire évolue en ligne droite à plus ou moins 2000 m de l'hydrophone à la vitesse de 12.5 nds et passe au plus près de l'hydrophone à une distance DCPA = 60 m. La figure 5 présente un résultat de simulation de propagation du bruit blanc large bande entre 0 et 400 Hz dans les conditions décrites précédemment.

Les fréquences de coupure des modes 3 et 4 dans le canal simulé valant respectivement 220 Hz et 320 Hz, on devrait observer 3 figures d'interférences entre ces deux fréquences, ce qui n'est pas le cas sur le spectrogramme de la figure 5. En effet, à l'immersion de l'hydrophone considérée, le mode 3 est très atténué (une vingtaine de dB en dessous des autres modes) excepté lorsque l'on se situera très près du CPA. On applique ensuite l'algorithme incohérent décrit dans le *paragraphe* 4.2. Le calcul du spectre de l'enveloppe du signal est réalisé pour des fréquences allant de 150 (fréquence à partir de laquelle 2 modes commencent à interférer) à 450 Hz avec un pas de 2 Hz. Pour réduire la variance de l'estimateur spectral et ainsi rehausser le contraste entre pics imputables aux interférences entre modes et ceux dus au bruit, on opère un moyennage sur 12 spectres calculés avec un pas de 0.1 Hz autour de la fréquence d'intérêt. On suppose connaître une estimée grossière des fréquences de coupure des modes (obtenue par observation visuelle du spectrogramme conformément à la figure 4.b) se propageant dans la bande d'intérêt en l'occurrence  $f_{c1} = 50$  Hz,  $f_{c2} = 150$  Hz,



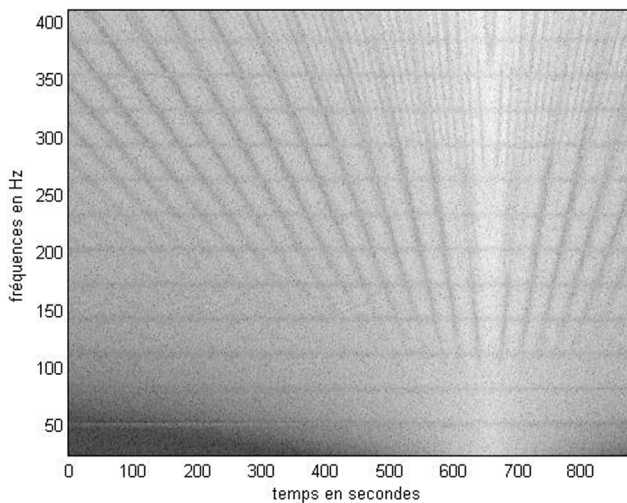


Figure 5. Spectrogramme d'un bruit de navire simulé dans des conditions proches de MOVEBOAT /  $f_e = 1000$  Hz, fenêtre de Kaiser 180 dB, 2048 pts

$f_{c4} = 320$  Hz, et  $f_{c5} = 400$  Hz. On recherche donc dans les spectres des enveloppes aux différentes fréquences balayées, le nombre de pics correspondant au nombre d'interférences possibles entre modes qui vaut  $N_i = \frac{N_m(f)!}{(N_m(f) - 2)!}$  (soit une fréquence de battement entre 150 et 320 Hz, 3 entre 320 et 400Hz...). La figure 6 illustre les résultats obtenus sur les données simulées. On observe une très bonne concordance entre courbes de dispersion relatives théoriques et estimées tendant à valider notre algorithme d'extraction sur données synthétiques réalistes.

### 5.1.2. Inversion

À partir des courbes de dispersion relatives estimées précédemment, on opère l'inversion des paramètres caractérisant le canal de Pekeris par optimisation *via* les algorithmes génétiques du critère défini dans l'équation 10.

Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 7 et synthétisés au sein du tableau 2. Comme on peut l'observer, on obtient un bon accord entre courbes de dispersions relatives théoriques et estimées ainsi qu'entre les paramètres décrivant le canal. Par ailleurs, afin d'évaluer les performances de notre procédé d'inversion nous proposons de réaliser une estimation des densités de probabilité *a posteriori* ainsi que de la matrice de covariance *a posteriori* *via* la méthode proposée par Gerstoft [Gerstoft94]. Pour l'exemple présenté précédemment, nous obtenons une matrice de covariance normalisée (termes diagonaux correspondant à un écart type en pourcents et termes non diagonaux aux coefficients de corrélation normalisés) égale à :

$$C = \begin{pmatrix} 3.7515 & 0.1253 & 0.0733 & 0.0967 \\ 0.1253 & 0.2617 & 0.1088 & 0.1156 \\ 0.0733 & 0.1088 & 3.0334 & 0.2279 \\ 0.0967 & 0.1156 & 0.2279 & 18.1949 \end{pmatrix}$$

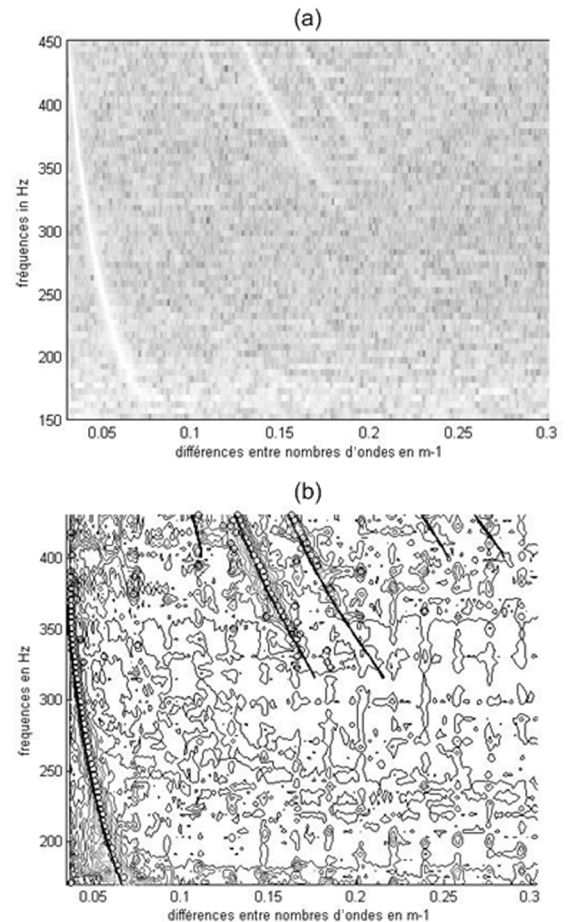


Figure 6. Résultats d'estimation des fréquences d'interférences entre modes sur données synthétiques proches de MOVEBOAT. (a) transformée fréquence-différence entre nombres d'onde (b) Estimation des maxima locaux (cercles) et comparaison avec les courbes théoriques (traits continus).

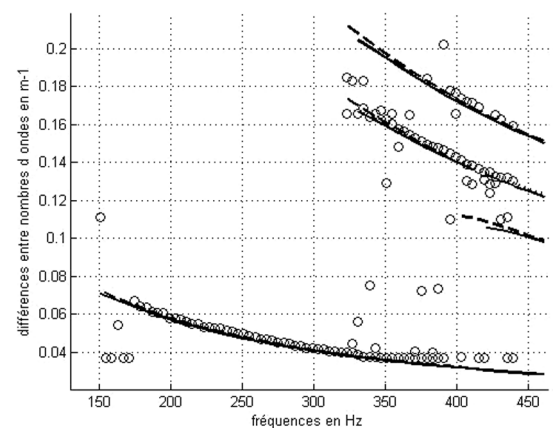


Figure 7. Résultats d'inversion des paramètres d'un canal de Pekeris sur données synthétiques réalistes. Ronds noirs = maxima locaux extraits; traits continus = Courbes de dispersion relatives estimées; traits discontinus = Courbes de dispersion relatives théoriques.

Tableau 2. Synthèse des résultats d'inversion obtenus.

Paramètres	Bornes de recherche	Paramètres estimés/théoriques	Écarts types relatifs en %
Hauteur d'eau (m)	[10 20]	15.169/15	3.75
Célérité eau (ms <sup>-1</sup> )	[1480 1530]	1518.3/1520	0.26
Célérité sédiment (ms <sup>-1</sup> )	[1550 2000]	1844/1850	3.03
Atténuation sédiment (dB/λ)	[- 0.9 – 0.001]	- 0.49/- 0.6	18.2

Comme on peut l'observer, les écarts type estimés sur les différents paramètres d'intérêt sont faibles (excepté pour l'atténuation dans le sédiment qui est le paramètre le moins sensible) ce qui prouve l'efficacité de notre algorithme d'inversion sur données synthétiques réalistes.

### 5.2. Tests sur données réelles

#### 5.2.1. Estimation des courbes de dispersion relatives

Dans ce paragraphe, nous appliquons notre algorithme aux données réelles issues de la campagne MOVEBOAT et plus particulièrement sur 1 radiale à 12 nds. Les résultats d'estimation des différences entre nombres d'onde sur la bande 150-500 Hz sont présentés sur la figure 8.

Sur cette figure, se détachent clairement les courbes de dispersion relatives du canal. Par ailleurs si on applique le même algorithme sur une seconde radiale effectuée par le Domingo 1/2 heure plus tard, les résultats obtenus sont similaires. Le fait que les différences entre nombres d'onde estimés pour deux radiales coïncident tend non seulement à prouver l'efficacité de l'algorithme d'extraction mais également le caractère quasi stationnaire du canal durant l'intervalle de de temps englobant les deux radiales. Ces courbes de dispersion relatives extraites des données réelles vont dans la suite être utilisées pour mener une inversion géoacoustique.

#### 5.2.2. Inversion

Dans ce paragraphe on utilise les données issues de l'estimation des courbes de dispersion relatives afin d'inverser les paramètres d'un canal de Pekeris alors que l'*a priori* est une structure bicouche sur socle. Cependant cette approche est justifiée puisque, comme précisé précédemment, la faible épaisseur de la première couche sédimentaire induit un effet quasi nul sur la propagation acoustique aux fréquences considérées. Le canal de Pekeris est caractérisé par 4 paramètres sensibles sur les courbes de dispersion : la hauteur et célérité de la colonne d'eau, la célérité de compression et l'atténuation de la couche sédimentaire. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 9. On notera que vu l'immersion de l'hydrophone (11 m), le mode 3 est *a priori* fortement atténué. Aussi lors de la comparaison entre courbes de dispersions estimées par inversion et courbes mesurées, nous ne présentons pas les interférences mettant en jeu ce mode 3. On parvient à trouver un canal de Pekeris dont les courbes de dispersion relatives s'accordent avec les courbes de dispersion relatives estimées sur données réelles (cf. figure 9), et dont les paramètres sont cohérents avec la connaissance limitée dont nous disposons sur le milieu. Plus particulièrement les valeurs de célérité et d'atténuation dans le sédiment sont cohérentes avec une couche sédimentaire de type «sable + gravier» et la hauteur d'eau ainsi que la célérité de la colonne d'eau sont cohérentes avec l'*a priori*.

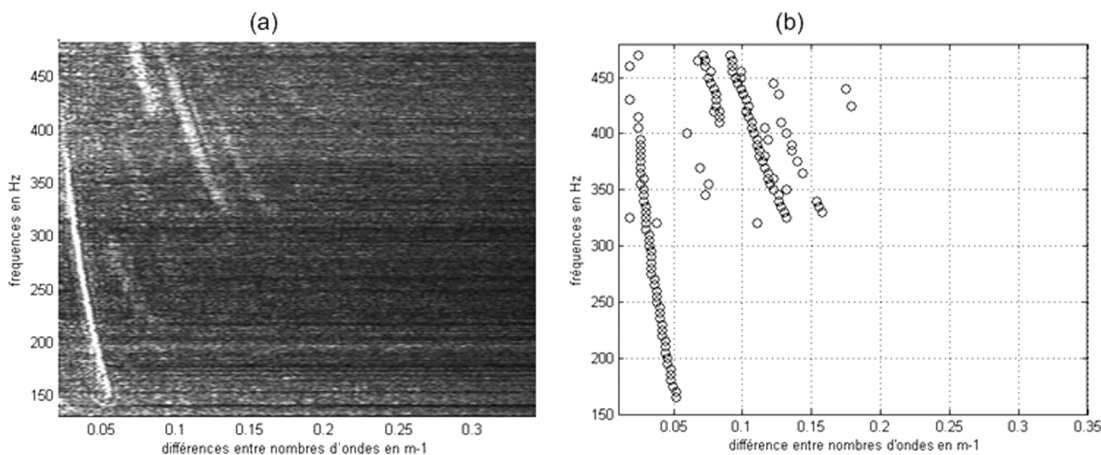


Figure 8. Estimation des différences entre nombres d'onde sur une radiale à 12 nds effectuée par le Domingo lors de la campagne MOVEBOAT. (a) Transformée fréquence-différence entre nombres d'onde (b) Estimation des maxima locaux (ronds noirs) de la TFdKr.

Tableau 3. Synthèse des résultats d'inversion obtenus sur données réelles.

Paramètres	Bornes de recherche	Paramètres estimés/la priori	Écart types relatifs en %
Hauteur d'eau (m)	[10 20]	16.2/15	5.02
Célérité eau ( $\text{ms}^{-1}$ )	[1480 1530]	1518.9/1520	0.56
Célérité sédiment ( $\text{ms}^{-1}$ )	[1550 2000]	1848/1900	4.83
Atténuation sédiment ( $\text{dB}/\lambda$ )	[- 0.9 – 0.001]	- 0.81/- 0.6	24.37

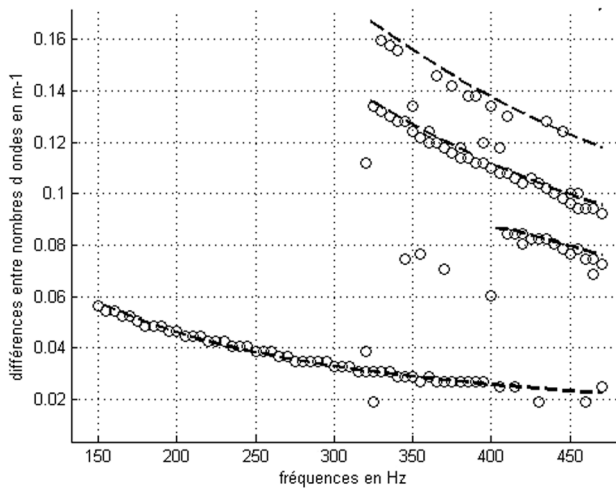


Figure 9. Résultats d'inversion des paramètres du canal à partir d'une radiale à 12 nds du Domingo. Ronds noirs = maxima locaux extraits; traits discontinus = Courbes de dispersion relatives estimées.

À l'instar de ce qui a été fait sur données synthétiques, on estime la matrice de covariance *a posteriori* via la méthode proposée par Gerstoft [Gerstoft94] on ne présente que les écarts type en % dans le tableau 3. Comme on peut l'observer les écarts types estimés sur les différents paramètres d'intérêts sont inférieurs à 10 % pour les trois premiers paramètres, ce qui traduit un procédé d'inversion relativement performant. Si on compare ces résultats à ceux obtenus sur données simulées, on observe un facteur d'augmentation des erreurs de l'ordre de 2. Les simulations ayant été réalisées avec le même rapport signal à bruit que les mesures, cette augmentation de l'écart type constitue une conséquence des erreurs non imputables au bruit de mesure comme toutes les incertitudes expérimentales (erreur de positionnement du navire et de l'hydrophone, milieu variable en distance...). Par ailleurs, afin d'inverser le milieu, nous proposons dans le paragraphe 4.1 d'utiliser une procédure incrémentale afin de rechercher et d'inverser le modèle de canal le plus simple qui rende compte de nos observables. Sur les données de la campagne MOVEBOAT, on constate qu'il est inutile de chercher à inverser une structure sédimentaire plus complexe alors qu'un guide de Pekeris est suffisant pour obtenir un bon accord avec nos données.

## 6. Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté un procédé novateur permettant d'inverser de façon passive les paramètres d'un canal océanique très petits fonds à partir du bruit rayonné par des navires en transit. Nous proposons d'exploiter le mouvement des sources d'opportunité et les interférences entre modes afin d'estimer les courbes de dispersion relatives du canal qui servent ensuite à inverser les propriétés du milieu. L'estimation des différences entre nombres d'onde à une fréquence particulière est réalisée par estimation du spectre de l'enveloppe d'un signal bande étroite centré autour de la fréquence considérée. La concaténation de ces différences entre nombres d'onde pour une gamme de fréquences voulue (et éventuellement pour plusieurs navires) fournit les courbes de dispersion relatives du milieu. L'inversion de celles-ci est réalisée par minimisation du critère des moindres carrés entre courbes de dispersion estimées et modélisées. Après avoir pleinement validé notre approche sur données synthétiques réalistes, nous avons obtenu des résultats prometteurs sur les données réelles issues de la campagne MOVEBOAT. On notera toutefois, qu'une des limitations essentielles de notre approche réside dans la résolution des modes, il conviendra d'avoir un nombre relativement faible de modes et donc une gamme de fréquences plutôt basses (en fonction de la hauteur du canal). Notre approche est par ailleurs adaptée à un traitement monocapteur, mais nécessite la connaissance de la trajectoire du navire (ou un navire en route rectiligne uniforme de vitesse connue).

En guise de perspectives, un portage de notre approche à un canal possédant une hauteur d'eau plus importante ( $h \approx 100$  m) est envisagé, des simulations non présentées dans cet article fournissent d'ores et déjà de bons résultats. Par ailleurs, alors que nous avons utilisé le spectre continu rayonné par les navires qui a exigé un traitement incohérent et produit les courbes de dispersion relatives, le spectre de raies peut être exploité dans le cadre d'un traitement cohérent qui fournirait les courbes de dispersion absolues. Nous avons récemment développé une version de cette approche cohérente. Notre estimateur basé sur le maximum de vraisemblance consiste à maximiser le produit scalaire entre modèle et données. Toutefois, si notre algorithme donne entière satisfaction sur données synthétiques réalistes, il nécessite d'être modifié afin de s'adapter à l'instabilité fréquentielle des raies rencontrées lors de la campagne MOVEBOAT. Cette modification constitue une seconde perspective à nos travaux.

Au final, nous prévoyons de combiner les informations extraites des raies spectrales des navires avec celles issues du bruit large bande en vue d'affiner l'étape d'inversion des paramètres du canal. Une dernière perspective consistera à adapter notre traitement au cas d'une trajectoire de navire quelconque et inconnue.

## 7. Références

- [Baggeroer93] A.B. BAGGEROER, W.A. KUPERMAN, P.N. MIKHAI-LEVSKY, «An overview of matched field methods in ocean acoustics», *IEEE J. Oceanic Eng.*, Vol. 18, #4, pp. 401-424, 1993.
- [Battle03] D. BATTLE, P. GERSTOFT, W.A. KUPERMAN, W.S. HODG-KISS, M. SIDERIUS, «Geoacoustic inversion of tow-ship noise via near-field-matched-field processing», *IEEE J. Oceanic Eng.*, Vol. 28, pp. 342-353, #3, 2003.
- [Carbone98 *et al*] N. CARBONE, G. DEAN, M. BUCKINGHAM, «Estimating the compressional and shear wave speeds of a shallow water seabed from the vertical coherence of ambient noise in the water column», *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 103, pp. 801-813, #2, 1998.
- [Chapman04] R. CHAPMAN, «Inversion of geoacoustic model parameters using ship noise», *Gayana* 68(2) *supl. t.I. Proc.*, pp. 108-114, 2004.
- [Dorigo05] M. DORIGO, C. BLUM, «Ant colony optimization theory: a survey», *Theoretical Computer Science*, Vol. 344, pp. 243-278, 2005.
- [Dspain99 *et al*] G.L. D'SPAIN, W.A. KUPERMAN, «Application of waveguide invariants to analysis of spectrograms from shallow water environments that vary in range and azimuth», *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 106, #5, pp. 2454-2468, 1999.
- [Gerstoft94] P. GERSTOFT, "Inversion of seismoacoustic data using genetic algorithms and *a posteriori* probability distributions», *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 95, #2, pp. 770-782, 1994.
- [Gervaise07 *et al*] C. GERVAISE, S. VALLEZ, C. IOANA, Y. STEPHAN, Y. SIMARD, «Passive acoustic tomography: review, new concepts and application using marine mammals», *Journal of marine Biology Association of United Kingdom*, Vol. 87, pp. 5-10, 2007.
- [Glattetre89] J. GLATTETRE, T. KNUDSEN, K. SOSTRAND, «Mode interference and mode filtering in shallow-water – a comparison of acoustic measurements and modeling», *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 86, #2, pp. 680-690, 1989.
- [Glover86] F. GLOVER, «Future paths for integer programming and links to artificial intelligence», *Computers and Operations Research*, Vol. 5, pp. 533-549, 1986.
- [Harrison02] C. H. HARRISON, D. G. SIMONS, «Geoacoustic inversion of ambient noise: A simple method», *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 112, #4, pp. 1377-1389, 2002.
- [Heaney04] K. HEANEY, «Rapid geoacoustic characterization using a surface ship of opportunity», *IEEE J. Oceanic Eng.*, Vol. 29, #1, pp. 88-99, January 2004.
- [Hermant] J.P. HERMAND, P. GERSTOFT, «Inversion of broad band multitone acoustic data from the Yellow Shark summer experiments», *IEEE J. Oceanic Eng.*, Vol. 21, #4, pp. 324-346, 1996.
- [Hermant99] J.P. HERMAND, «Broad-band geoacoustic inversion in shallow water from waveguide impulse response measurements on a single hydrophone: theory and experimental results», *IEEE J. Oceanic Eng.*, Vol. 24, pp. 41-66, #1, 1999.
- [Jensen00 *et al*] F.B. JENSEN, W.A. KUPERMAN, M.B. PORTER, and H. SCHMIDT, «Computational Ocean Acoustics», *New York: AIP Press/Springer*, 2000.
- [Jesus06 *et al*] S.M. JESUS, C. SOARES, J. ONOFRE, E. COELHO, P. PICCO, «Experimental testing of blind ocean acoustic tomography», *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 119, #3, pp. 1420-1431, 2006.
- [Koch05] R. KOCH, D. KNOBLES, «Geoacoustic Inversion Using Broadband Noise from Surface Ships», *J. Acoust. Soc. Am.*, Volume 118, #3, pp. 1857-1857, 2005.
- [LeGac03] M. ASCH, J.-C. LE GAC, Y. STAPHAN, X. DEMOULIN, «Geoacoustic inversion of broadband acoustic data in shallow water by a single hydrophone», *IEEE J. Oceanic Eng.*, Vol. 28, #3, 2003.
- [Mecklenbrauker01] C.F. MECKLENBRAUKER, A. GERSHMAN, «Broadband maximum likelihood estimation of shallow ocean parameters using shipping noise», *ICASSP*, 2001.
- [Munk79] W. MUNK, C. WUNSCH, «Ocean acoustic tomography: a scheme for large scale monitoring», *Deep-Sea Research*, Vol. 26A, 1979.
- [Munk95 *et al*] W. MUNK, P. WORCESTER, C. WUNSCH, «Ocean Acoustic Tomography», *Cambridge University Press*, 1995.
- [Nicolas03 *et al*] B. NICOLAS B., J. MARS, J.L. LACOUME, «Geoacoustical parameters estimation with impulsive and boat-noise sources», *IEEE J. Oceanic Eng.*, Vol. 18, pp. 494-501, #3, 2003.
- [Porter97 *et al*] M. PORTER, S. JESUS, Y. STAPHAN, X. DEMOULIN, E. COELHO, «Exploiting reliable features of the ocean channel response», in the proceedings of *SW Acoustics Conf.*, Beijing, 1997.
- [Potty00] G. POTTY, «Tomographic inversion for sediment parameters in shallow water», *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 108, #3, pp. 973-986, 2000.
- [Stephan00 *et al*] Y. STEPHAN., X. DEMOULIN, T. FOLEGOT, S. JÉSUS, M. PORTER, M., E. COELHO, «Acoustical effects of internal tides on shallow water propagation: An overview of the INTIMATE96 experiment, in Experimental Acoustics Inversion Methods for Exploration of the Shallow Water Environment», Caiti, Hermant, Jesus and Porter (eds.), *KLUWER*, pp. 19-38, 2000.
- [Thode00 *et al*] A.M. THODE, G.L. D'SPAIN, W.A. KUPERMAN, «Matched-field processing, geoacoustic inversion and source signature recovery of blue whale vocalizations», *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 107, pp. 1286-1300, #3, 2000.
- [Wales02] S.C. WALES, R. M. HEITMEYER, «An ensemble source spectra model for merchant ship-radiated noise», *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 111, #3, p. 1211-1231, 2002.
- [Westwood96] E. K. WESTWOOD, C. T. TINDLE, N. R. CHAPMAN, «A normal mode model for acousto-elastic ocean environments», *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 100, pp. 3631-3645, #6, December 1996.



**S. Vallez**

Simon Vallez est doctorant au laboratoire E312 de l'École Nationale Supérieure des Ingénieurs des Études des Techniques d'Armement (ENSIETA) de Brest. Il est diplômé de l'ENSIETA en 2002 et titulaire d'un master en télécommunications et réseaux obtenu à l'Université de Bretagne Occidentale (UBO) de Brest en 2004. Ses domaines de recherche portent sur l'acoustique sous-marine (inversion géoacoustique passive) et le traitement du signal.



**A. Khenchaf**

Ali Khenchaf est titulaire d'un DEA en juin 1989 en traitement de l'information de l'Université Rennes 1 et d'une thèse de Doctorat en septembre 1992 de l'Université de Nantes et l'École centrale de Nantes. Dr. Khenchaf a été ensuite Maître de Conférences à l'École Polytechnique de l'Université de Nantes et chercheur d'abord au laboratoire SEI et ensuite au laboratoire IRCCyN (UMR CNRS 6597). En 2000, il a soutenu une Habilitation à Diriger les Recherches intitulée « Modélisation Électromagnétique, Radar Bistatique et Traitement de l'Information ». Il est actuellement Professeur des Universités à l'École Nationale Supérieure des Ingénieurs des Études des Techniques d'Armement (ENSIETA) et Directeur du laboratoire E312 (EA3876) depuis 2001. Ses domaines de recherche concernent la propagation et la diffusion des ondes électromagnétiques en environnements naturels, la télédétection et les liaisons radar bistatique et multistatique et l'estimation des paramètres de cibles Radar.



**C. Gervaise**

C. Gervaise est né le 11 03 1971 à Romilly sur Seine. Il est titulaire d'un diplôme d'ingénieur en Aéronautique de l'École Nationale Supérieures d'Ingénieurs en Construction Aéronautique (ENSICA) obtenu en 1994. Après avoir fait son temps au service militaire, il obtient en 1996 le diplôme d'études approfondies en traitement du signal de l'université Paul Sabatier, Toulouse. Durant sa thèse soutenue en 1999 à l'université Paul Sabatier, en collaboration avec le centre technique d'Arcueil de la Délégation Générale pour l'Armement et l'ENSICA, il développe des recherches sur les méthodes d'inversion et le traitement du signal appliqués à la métrologie des propriétés thermiques des matériaux complexes. Enseignant-Chercheur à l'École Nationale Supérieure d'Ingénieurs des Études et Techniques de l'Armement depuis 2000, ses activités couvrent le traitement du signal, la théorie du signal et l'acoustique sous-marine. Depuis 2001, il porte un thème de recherche sur la veille environnementale marine par acoustique passive incluant la tomographie ou l'inversion géoacoustique passive, la détection-classification-localisation des activités sonores biologiques et anthropiques. Au sein du groupe d'intérêt scientifique Europôle MER, il collabore régulièrement avec le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (Dr Y. Stéphan), l'université du Québec à Rimouski (Pr Y. Simard) et le laboratoire d'applications bioacoustiques de l'université polytechniques de Catalogne (Pr M. André).



**Y. Stephan**

Yann Stephan est né le 28 juillet 1966 à Lannion. Diplômé de l'École Nationale Supérieure des ingénieurs électriciens de Grenoble (ENSIEG) en 1990, il entre à la Délégation Générale pour l'Armement en 1992. Affecté au Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, il reçoit le doctorat en informatique du Centre National des Arts et Métiers en 1996. Ses principaux domaines de recherche concernent la tomographie acoustique océanique et l'évaluation rapide de l'environnement océano-acoustique.

Yann Stéphan est membre de la SFA.



**M. André**

Né en 1963 à Toulouse, France. Professeur de l'Université Polytechnique de Catalogne (UPC). Directeur du Laboratoire d'Applications Bioacoustiques (LAB) Michel André est ingénieur en biotechnologie de l'Institut National des Sciences Appliquées, INSA, Toulouse. Il possède une maîtrise en Biochimie et en Physiologie Animale de l'Université Paul Sabatier de Toulouse. Docteur ès-sciences de l'Université de Las Palmas de Gran Canaria. Il fut chercheur associé de la San Francisco State University, Californie, et professeur de l'Université de Las Palmas de Gran Canaria. Ses recherches se centrent sur le développement de technologies acoustiques passives pour le contrôle de la pollution sonore dans le milieu marin, sur l'étude de ses effets physiologiques et pathologiques sur les voies de réception acoustiques des cétacés; sur les mécanismes mathématiques, physiques, morphologiques et électrophysiologiques du biosonar des cétacés, ainsi que sur l'extraction de l'information de leurs signaux acoustiques.



