
Passive Acoustic Tomography with moving ships

S. Vallez⁽¹⁾, C. Gervaise⁽¹⁾, A. Martin⁽¹⁾, A. Khenchaf⁽¹⁾, Y. Stephan⁽²⁾, G. Theuillon⁽²⁾, M. André⁽³⁾

⁽¹⁾ ENSIETA, E3I2, EA3876, 2 rue François Verny, 29200, Brest, France

E-mail: vallezsi@ensieta.fr, Cedric.Gervaise@ensieta.fr, Arnaud.Martin@ensieta.fr, Ali.Khenchaf@ensieta.fr,

⁽²⁾ SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine), 13 rue du Chatelier 29200 Brest, France

E-mail: stephan@shom.fr, theuillo@shom.fr,

⁽³⁾ LAB/UPC, Avda. Rambla Exposició s/n, 08800 Vilanova i la Geltrú, Barcelona, Spain

E-mail: Michel.Andre@upc.edu

ABSTRACT:

This paper discusses inversions for geoacoustic parameters of very shallow water channels (depth from 10 to 30 meters) using monochromatic sounds radiated by moving ships. Our approach requires a very simple system and allows to take into account several ships. By using the movement of the ships we are able to extract radial wave numbers of the channel at several frequencies and thus to fill dispersion curves. We propose to invert those dispersion curves in order to estimate the geoacoustic parameters. We describe and validate our approach on synthetic realistic data and on real very shallow water at sea trial data conducted in the south of Barcelona.

Keywords: *Geoacoustic inversion, Passive tomography, ship, wave number, shallow water.*

RÉSUMÉ:

Dans le contexte de la tomographie acoustique passive, nous proposons une méthode d'estimation des propriétés d'un canal océanique très petits fonds (profondeur de 10 à 30 mètres) à partir des raies spectrales rayonnées par des navires en transit. La solution est développée afin de conduire à un système de mesure de simplicité maximale et permet la prise en compte de plusieurs navires dans le procédé d'inversion. A partir de l'observation acoustique de radiales centrées sur un hydrophone de mesure, les raies rayonnées par les navires et le mouvement de ceux-ci sont utilisés pour extraire les nombres d'onde radiaux du canal aux fréquences rayonnées. La concaténation des nombres radiaux d'onde pour une ou plusieurs fréquences issues d'un ou plusieurs navires constitue les courbes de dispersion du milieu qui sont inversées 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 réalisée au sud de Barcelone à partir des navires d'opportunité. Les résultats produits sont encourageants et permettent de dresser des perspectives d'amélioration pour la méthode proposée.

Mots clés : *Inversion Géo-acoustique, tomographie passive, navires d'opportunité, nombres d'onde radiaux, canal très petit fond.*

1 INTRODUCTION

La tomographie acoustique océanique développée depuis 1979 et initialement proposée par Munk et Wunsch [1,2] constitue un moyen rapide et précis d'évaluation des propriétés acoustiques ou physiques d'un milieu marin sur de larges zones géographiques. A partir d'une expérimentation de tomographie constituée d'une phase d'émission, de propagation et de mesure du champ acoustique induit, les distorsions causées par la propagation sont estimées et permettent de retrouver par inversion les propriétés d'intérêt du milieu.

La Tomographie active nécessite des émissions acoustiques puissantes, récurrentes et résolventes et pour des positions de sources et de récepteurs connues et maîtrisées. Cependant, le recours à de telles caractéristiques est parfois interdit notamment dans le contexte d'une utilisation militaire où la discrétion acoustique peut être exigée ou dans le cadre du respect de la faune marine qui peut être perturbée par ces émissions.

Récemment la communauté scientifique a proposé l'utilisation des sources acoustiques d'opportunité naturellement présentes dans le milieu afin de réaliser l'inversion et d'éviter une émission active, donnant naissance à la tomographie acoustique passive [3]. Deux raffinements à la tomographie passive sont proposés. Pour la tomographie passive assistée, le rayonnement naturel des sources est utilisé pour l'inversion alors que la position des sources est connue tandis que celle-ci est inconnue pour la tomographie passive autonome. Les applications relatées dans la bibliographie utilisent le bruit de mer, le bruit rayonné par les navires et les vocalises de mammifères marins[4,5,6]. Notre papier aborde l'inversion géo-acoustique des milieux très petits fonds (profondeur variant entre 10 et 30 mètres) à partir du bruit rayonné par les navires d'opportunité en

mouvement dans le cadre des tomographies passives assistées et autonomes. Les algorithmes proposés conduisent à des systèmes expérimentaux de complexité minimale en utilisant au mieux le mouvement des sources, l'information provenant de plusieurs navires d'opportunité et en ayant recours à un étage de traitement du signal renforcé.

La problématique de la tomographie passive à partir des bruits de navire est apparue à la fin des années 90 et s'est essentiellement intéressée aux milieux petits fonds. Le rayonnement des navires étant constitué de raies spectrales et de bruit large bande, une première série de références a étudié la faisabilité des méthodes Matched Field processing à partir du bruit rayonné par les navires considérés comme immobiles pendant la mesure et de positions connues [7,8,9,10] en se focalisant sur les raies énergétiques. Conformément aux méthodes de Match Field processing, ces applications utilisent une antenne verticale dont le déploiement peut être complexe et leurs utilisations semblent être réservées de ce fait aux observatoires fixes. En outre, par leur nature même, ces méthodes n'utilisent pas pleinement le mouvement des sources. Une utilisation opportuniste du mouvement des sources a été proposée par Battle [11] où un navire tracte une antenne horizontale mesurant en champ proche le son rayonné par l'hélice, le mouvement du navire étant alors utilisé pour parcourir rapidement une zone aux propriétés range-dépendante. Une première application du mouvement des sources en tomographie active a été rapportée par [13] où une source active de fréquence fixée est remorquée et où le champ mesuré sur une radiale est utilisé pour estimer les nombres d'onde radiaux et les amplitudes des modes. Les références en tomographie passive sur bruit de navire utilisant le mouvement comme source d'information pour l'inversion ont recours principalement au bruit large bande rayonné et plus particulièrement le réseau d'interférences destructives et constructives ('*Lloyds mirror, Bath TuB effect*') qu'il crée dans le plan range-fréquence dont les caractéristiques peuvent être utilisées pour retrouver les paramètres du milieu [5,13].

Parallèlement à la proposition de méthodes pour la tomographie passive sur bruit de navire, de nouvelles méthodes en tomographie active ont été introduites pour s'affranchir de l'utilisation d'une antenne verticale en utilisant une source couvrant une bande fréquentielle importante a) un unique récepteur et un espace de représentation temps fréquences [14] b) une antenne horizontale et un espace de représentation fréquence-nombres d'onde [15]. Le changement d'espace de représentation, bien que coûteux en calcul, permet de mettre en évidence les phénomènes de dispersion dans les canaux petits fonds qui sont alors utilisés pour réaliser l'inversion.

Cette communication présente une méthode originale d'inversion passive du milieu à partir des bruits de navires peu exigeante en nombre de capteurs (1 hydrophone en tomographie passive assistée et 3 hydrophones en tomographie passive autonome). A partir d'une succession de navires transitant dans une zone d'intérêt, la méthode d'inversion permet de bâtir les courbes de dispersion du milieu et d'utiliser celles-ci afin d'estimer les propriétés du milieu. Un point particulier des courbes de dispersion de fréquence f_0 est obtenu à partir de la mesure sur un seul hydrophone du son rayonné par un navire à la fréquence f_0 et réalisant une radiale centrée sur l'hydrophone. Cette mesure permet l'extraction des nombres d'onde radiaux à cette fréquence en utilisant le phénomène doppler qui affecte différemment chaque mode de propagation. Les originalités de la méthode proposée sont a) le nombre minimal d'hydrophones requis b) l'utilisation conjointe du mouvement et des raies rayonnées par les navires c) la prise en compte de plusieurs navires pour aboutir à une inversion large bande. En ce sens, notre méthode est une adaptation passive originale des références [12] et [15].

La communication est organisée en 2 parties. La première est destinée à présenter l'algorithme d'inversion proposé et sera organisée en deux paragraphes, le premier aborde l'algorithme d'estimation des nombres d'onde radiaux à partir de l'observation d'une raie particulière pour un navire donné permettant alors la construction d'un point des courbes de dispersion et le second aborde l'inversion à partir des courbes de dispersion. Finalement la seconde partie présente les résultats prometteurs 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 2005 réalisée en méditerranée au large de Barcelone, Espagne.

2 METHODE D'INVERSION PROPOSEE

2.1 Modélisation directe

La source

Le son rayonné par un navire [16] est dû au bruit de machineries, au bruit d'hélice et au bruit hydrodynamique. En conséquence de ces trois sources initiales, le son rayonné par un navire est constitué d'un spectre continu superposé à un spectre de raies. Ce spectre est concentré principalement dans la bande [5Hz,1000Hz] très bien adaptée à l'inversion géoacoustique.

Les raies spectrales sont des composantes essentielles au bruit rayonné par les entités, elles sont signantes de résonances mécaniques ou hydrodynamiques. Les fréquences porteuses de ces raies peuvent évoluer en fonction du régime du navire, de la charge de celui-ci. Ainsi, des pertes de cohérence peuvent ainsi être observées en fonction du temps. Dans le cadre de cette communication, nous étudierons le bruit rayonné par un navire de plaisance qui présentera 4 raies utilisables (60Hz, 90Hz, 110Hz et 120 Hz) d'une puissance de l'ordre de 120 dB

ref $((1\mu\text{P}@1\text{m})^2)$ possédant un rayon de corrélation estimé de 60 secondes et un pied de raies continu de l'ordre de 120 dB ref $(1\mu\text{P}@1\text{m})^2/\text{Hz}^{-1}$.

La propagation

Les sons rayonnés par les navires concentrant majoritairement leurs énergies 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 retenu et l'hypothèse d'un milieu range indépendant, isotrope en azimut est effectuée. Sous ces conditions, la fonction de transfert entre un émetteur et un récepteur supposés immobiles s'écrit [17] :

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

où Q est un facteur de normalisation, $g_m(z)$ 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 et r le range du récepteur et où $T_1(r)$ est un terme qui tend 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 k_r 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 :

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

Comme les nombres d'onde radiaux kr sont fonctions de l'indice du mode et de la fréquence, les composantes modales se propageront avec des vitesses différentes en fonction de la fréquence et de l'indice du mode. Ces phénomènes sont appelés dispersions et sont signants de la nature du milieu (colonne d'eau et fond) et 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 communication.

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 d'autres fréquences. La réponse harmonique entre l'émetteur mobile et le récepteur s'exprime différemment si l'on peut négliger (ou pas) le mouvement de la source durant le temps de propagation entre l'émetteur et le récepteur.

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

$$h(f_0, t) \approx Q \sum_{m=1}^{+\infty} g_m(z_s) g_m(z_e) \frac{\exp(-jk_r(m, f_0)r(t))}{\sqrt{k_r(m, f_0)r}} \times \exp(2\pi j f_0 t) \quad (3)$$

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

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

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

$$u + \frac{r(u)}{v_\varphi(m, f_0)} = t. \quad (5)$$

Dans les deux cas, il est intéressant de remarquer que le mouvement de la source affecte chaque composante modale d'une modulation différente. Ainsi l'observation par un seul hydrophone d'une source en mouvement et ces modulations différentes doivent pouvoir être utilisées pour la séparation.

2.2 Organisation de la méthode d'inversion

Afin de proposer une méthode d'inversion passive utilisant les bruits rayonnés par les navires, nous supposons disposer dans un canal petits fonds a) 1 hydrophone (trajectoires des navires connues) ou b) 3 hydrophones (trajectoires des navires inconnues) et nous supposons qu'à la surface de ce canal, un ou plusieurs navires (trajectoires connues ou pas) réalisent des radiales 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 signantes à partir des mesures acoustiques puis une étape d'inversion de ces grandeurs signantes.

Dans notre cas, l'étape d'extraction consiste à retrouver les courbes de dispersion du milieu. Pour ce faire, chaque raie rayonnée durant une radiale de chaque navire d'opportunité sera analysée pour en extraire les

nombre d'onde radiaux procurant ainsi un point des courbes de dispersion. Une accumulation du résultat de l'extraction des raies et des navires fournit au final les courbes de dispersion sur une large gamme de fréquences pouvant s'étendre de 10 Hertz à quelques centaines de Hertz. Le mouvement des sources induisant une modulation fréquentielle de largeur de bande assez faible, pour chaque fréquence rayonnée par les sources un filtrage passe-bande sélectif peut être appliqué et permettra une augmentation significative du rapport signal à bruit sans complexifier le système de mesure. La méthode que nous proposons s'oriente alors naturellement vers l'utilisation des raies rayonnées par les navires.

Une fois effectué ce filtrage passe-bande autour d'une fréquence rayonnée par une source, le signal extrait suit l'expression :

$$m(f_0, t) \approx Q \left(\sum_{m=1}^{+\infty} g_m(z_s) g_m(z_e) \frac{\exp(-jk_r(m, f_0)r(t))}{\sqrt{k_r(m, f_0)r}} S(f_0, m) \right) \times \exp(2\pi j f_0 t) \quad (6)$$

où $S(f_0, m)$ représente l'amplitude de la source émise à la fréquence f_0 et dans la direction relative au mode m . Dans le cas du bruit rayonné par les navires, cette quantité $S(f_0, m)$ est inconnue et interdit l'estimation des fonctions modales $g_m(z_s)$ et $g_m(z_e)$. Les seules quantités accessibles par une méthode passive sont donc les nombre d'onde radiaux $k_r(m, f_0)$ qui constitueront ainsi les observables que l'on cherchera à extraire des mesures.

Cette extraction se fera à partir d'une analyse des modulations $k_r(m, f_0)r(t)$ autour de la fréquence f_0 . Il faut remarquer que ces modulations dépendent de $k_r(m, f)$ et de la position de la source $r(t)$, ainsi les nombre d'onde radiaux seront extraits par d'une mesure mono-capteur lorsque la position du navire est connue (Tomographie Passive Assistée) et par une mesure en trois capteurs lorsque la position du navire est inconnue (sous l'hypothèse d'une route rectiligne uniforme) et que celle-ci doit être estimée simultanément avec les nombre d'onde (Tomographie Passive Assistée).

Concernant l'étape d'inversion, celle-ci consistera à utiliser les courbes de dispersion pour choisir le modèle d'environnement par une procédure incrémentale en partant du milieu le plus simple (mono-couche sur socle) vers les milieux les plus complexes (structures sédimentaires multi-couches à gradient...) et pour estimer les paramètres du modèle retenu.

2.3 Algorithmes d'extraction

Dans cette partie, nous décrivons les algorithmes utilisés pour la construction des courbes de dispersion à partir des mesures recueillies. Par soucis de simplicité, nous supposons travailler dans le cadre de la tomographie passive assistée où la position des sources est connue. Afin de construire les courbes de dispersion du milieu, nous supposons posséder les mesures des sons rayonnés en un hydrophone par une succession de navires rayonnant chacun un spectre de raies particulier et réalisant des radiales dans la zone de portée de l'hydrophone de mesure. Une radiale particulière est décrite sur l'intervalle temporel $[0, T]$ avec un passage au CPA à $T/2$.

Un pré-traitement appliqué aux mesures consiste à extraire de l'enregistrement complet, le signal rayonné par une fréquence particulière d'un navire donné sur l'ensemble de sa radiale. Ce traitement est constitué d'une détection du passage d'un navire d'intérêt, du fenêtrage temporel de l'enregistrement sur le passage du navire, de la détection des fréquences rayonnées par celui-ci (fréquences notées f_0), de l'extraction d'une raie particulière par filtrage passe-bande, d'un retour en bande de base (autour de la fréquence f_b avec idéalement $f_b \sim f_0$) et finalement un sous-échantillonnage (fréquence d'échantillonnage $f_e \sim f_0 - f_b$).

Ayant retenu les nombre d'onde comme observables pertinents, nous proposons d'appliquer l'estimateur du maximum de vraisemblance. Cette méthode est classique et consiste à rechercher le vecteur de paramètres le plus vraisemblablement à l'origine des observations. Si on note s le vecteur des mesures fournies par le prétraitement précédent et m le modèle théorique de signal reçu, on a :

$$s(t) = m(t) + b(t) = \sum_{m=1}^{+\infty} A_m \frac{e^{ik_r(m, f_0)r(t)}}{\sqrt{k_{rm}(f_0)r(t)}} e^{2\pi i \delta f_0 t} e^{j\varphi} + b(t), \quad t \in [T_1, T_2] \quad (7)$$

avec φ la phase initiale du signal émis et $b(t)$ le bruit supposé blanc gaussien et où A_m est l'amplitude du signal reçue contenant à la fois les pondérations modales et la puissance de la source.

On notera qu'en pratique la fréquence δf_0 ne sera pas la fréquence d'émission de la raie, mais la différence entre cette fréquence f_0 et la fréquence f_b utilisée pour le retour en bande de base.

L'écriture de l'estimateur du maximum de vraisemblance fait apparaître une dépendance linéaire en A (le terme d'amplitude) et une dépendance non linéaire en θ (vecteur des paramètres qui regroupe les nombre d'onde, la fréquence de la raie, la phase initiale du signal, et les paramètres de trajectoires uniquement dans le cas de la tomographie passive autonome). La dépendance linéaire en A peut être utilisée pour simplifier l'écriture du critère du maximum de vraisemblance et sa minimisation associée le calcul complet nous permet d'aboutir à l'expression suivante :

$$\hat{\theta}^{\text{MV}} = \arg \max_{\theta} \frac{|\tilde{\mathbf{m}}^{\text{H}}(\theta\theta)|^2}{\tilde{\mathbf{m}}^{\text{H}}(\theta)\tilde{\mathbf{m}}(\theta)} = \arg \max_{\theta} (J(\theta))$$

$$\text{où } J(\theta) = \frac{\left(\int_{T_1}^{T_2} m^*(t, \theta) s(t) dt \right)^2}{\int_{T_1}^{T_2} |m(t, \theta)|^2 dt} = \frac{\left(\int_{T_1}^{T_2} \sum_{m=1}^{+\infty} A_m \frac{e^{ik_r(m, f_0)r(t)}}{\sqrt{k_{r_m}(f_0)r(t)}} e^{2\pi i f_0 t} e^{j\varphi} s(t) dt \right)^2}{\int_{T_1}^{T_2} \left| \sum_{m=1}^{+\infty} A_m \frac{e^{ik_r(m, f_0)r(t)}}{\sqrt{k_{r_m}(f_0)r(t)}} e^{2\pi i f_0 t} e^{j\varphi} \right|^2 dt} \quad (8)$$

Le choix de l'intervalle d'intégration $[T_1, T_2]$ est fonction de la cohérence de la raie rayonnée et va donner naissance à deux algorithmes d'estimation des nombres d'onde : l'algorithme à cohérence globale et l'algorithme à cohérence partielle.

Algorithme à cohérence globale

Si la raie considérée est cohérente sur l'ensemble de la radiale, on fixera $T_1 = 0$ s et $T_2 = T$ et on estimera les nombres radiaux et autres paramètres par application de l'équation 8.

Algorithme à cohérence partielle

Si la raie considérée n'est pas cohérente sur l'intervalle $[0, T]$ mais possède un rayon de corrélation T_c , on propose de définir un intervalle glissant $I(t) = [t, t + T_c]$, $t \in [0, T - T_c]$ et pour chaque intervalle $I(t)$, on règle $T_1 = t$, $T_2 = t + T_c$ et on estime les nombres radiaux et autres paramètres concaténés dans $\hat{\theta}^{\text{MV}}(t)$. Deux solutions sont alors envisagées pour l'utilisation de $\hat{\theta}^{\text{MV}}(t)$, a) la réalisation d'une moyenne sur les différents instants d'estimation ou b) la présentation de $\hat{\theta}^{\text{MV}}(t)$ en fonction du temps afin d'en analyser les variations temporelles dans le cas des milieux variables en range ou en temps.

L'algorithme à cohérence globale possède pour atout la résolution en terme de nombres d'onde radiaux et la bonne résistance face au bruit additif de mesure alors que l'algorithme à cohérence partielle est robuste à la perte de cohérence de la source et à tout type de bruit multiplicatif (instabilité de phase ou d'amplitude).

L'estimateur défini par l'équation 8 n'est pas linéaire et ne conduit pas à une formule analytique. Il exige le recours à un algorithme d'optimisation numérique. L'étude du comportement du critère à minimiser en fonction des différents paramètres d'intérêts met en lumière l'existence de nombreux optima secondaires d'où la nécessité d'utiliser des méthodes d'optimisation globales. Une étude bibliographique large abordant les algorithmes génétiques, le recuit simulé, les méthodes tabou et des colonies de fourmis ainsi qu'une étude comparative sur la minimisation de notre critère ont démontré la supériorité des algorithmes génétiques qui seront retenus comme outils de minimisation.

2.4 Algorithmes d'inversion

Afin d'estimer la structure du canal sous-marin étudié et les propriétés de celui-ci, les données utilisées sont issues de l'extraction des nombres d'onde radiaux en fonction de toutes les fréquences de raies disponibles rayonnées par un ou plusieurs navires en transit dans la zone de portée de l'hydrophone. L'extraction est réalisée par l'algorithme à cohérence globale ou cohérence partielle du paragraphe précédent. Il est à noter que l'indice des modes estimés n'est pas connu et qu'il convient d'opérer l'inversion en tenant compte de l'absence de cette information.

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 θ et nous cherchons à estimer les valeurs θ des propriétés de cette structure donnée. On suppose connaître *a priori* un intervalle possible pour ces valeurs qui nous permet de connaître le nombre $N_m(f)$ maximal de modes à la fréquence f .

Les valeurs estimées θ sont celles qui minimisent la distance au sens des moindres carrées entre les courbes de dispersion estimées ($\hat{k}_n(f_i)$) et les courbes de dispersion simulées ($k_r(f, \theta)$) en prenant soin de balayer tous les nombres d'onde fournis par un jeu de paramètres particulier .

$$\hat{\theta} = \arg \min_{\theta} \sum_{i=1}^M \sum_{n=1}^{N_m} \min_{k_r(f_i, \theta)} \left| \hat{k}_n(f_i) - k_r(f_i, \theta) \right|^2 \quad (9)$$

avec M le nombre total de raies extraites des mesures.

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 en courbe des

dispersions estimées et courbes de dispersion simulées. L'accord satisfaisant est obtenu lorsque le résidu entre nombres d'onde estimés et nombres d'onde modélisés sur l'ensemble des fréquences et le long de chaque courbe modale disponible est blanc gaussien.

3 MISE EN ŒUVRE EN MILIEU TRES PETIT FOND

3.1 Le contexte experimental

La validation de notre méthode d'inversion est effectuée à partir d'un jeu de mesures récolté lors d'une campagne très petits fonds MOVEBOAT 2005. Cette campagne, réalisée en collaboration avec le LAB/UPC, se déroula durant 3 jours entre le 25 septembre et le 7 octobre 2005 aux abords des côtes de Vilanova i la Geltrú au sud de Barcelone. Ces expérimentations consistaient à mesurer sur un hydrophone les bruits rayonnés par différents types de navires (chalutiers, navires de plaisance, zodiac) en mouvement dans un canal d'une vingtaine de mètres de profondeur. L'hydrophone de mesure utilisé est un hydrophone Bruel&Kjaer 8101 immergé à une profondeur choisie à partir d'une bouée de surface. Le canal étudié est très petit fond (profondeur égale à 15 mètres), la colonne d'eau est supposée isocélère ($c=1505ms^{-1}$) et le fond bi-couche est constitué :

- d'une première couche d'épaisseur 0.5 m, de célérité $1650ms^{-1}$, de densité 1.3 et d'atténuation 0.2 dB/λ,
- d'une seconde couche d'épaisseur 30 m, de célérité $1950ms^{-1}$, de densité 2.3 et d'atténuation 0.6 dB/λ.

Les résultats présentés concernent une radiale d'un navire de plaisance réalisée à 16 nœuds avec une distance CPA de 30 mètres et une immersion d'hydrophone de 7.5 mètres.

Cette configuration *a priori* sera dénommée configuration pseudo-théorique.

3.2 Tests sur données simulées

Dans ce paragraphe consacré aux tests sur données synthétiques réalistes, nous nous placerons dans un canal de type Pekeris d'une hauteur de 15 mètres avec des célérités de l'eau et du sédiment respectivement égales à $1505ms^{-1}$ et $1950ms^{-1}$. Les autres conditions expérimentales sont identiques à celles de la campagne MOVEBOAT2005. Pour valider notre approche, nous extrayons dans un premier temps les nombres d'onde pour 10 fréquences distinctes entre 50Hz et 130Hz (4 d'entre elles coïncidant avec des fréquences de raies effectivement observées durant MOVEBOAT2005), et ce avec des fenêtres glissantes de 30s et un recouvrement égal au tiers de cette largeur afin d'appliquer l'algorithme à cohérence partielle (le seul qui donnera de bons résultats sur données réelles).

Une fois les nombres d'onde extraits sur chaque fenêtre, on opère un moyennage des estimés afin de remplir les courbes de dispersion aux différentes fréquences considérées, en l'occurrence : 50, 63, 80, 85, 93, 100, 109, 115, 126, et 130 Hz. A partir des courbes de dispersions remplies, on opère l'inversion des propriétés du canal de Pekeris *via* l'optimisation de la fonction coût définie par l'équation 9

Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 1 et correspondent à un moyennage de 20 simulations :

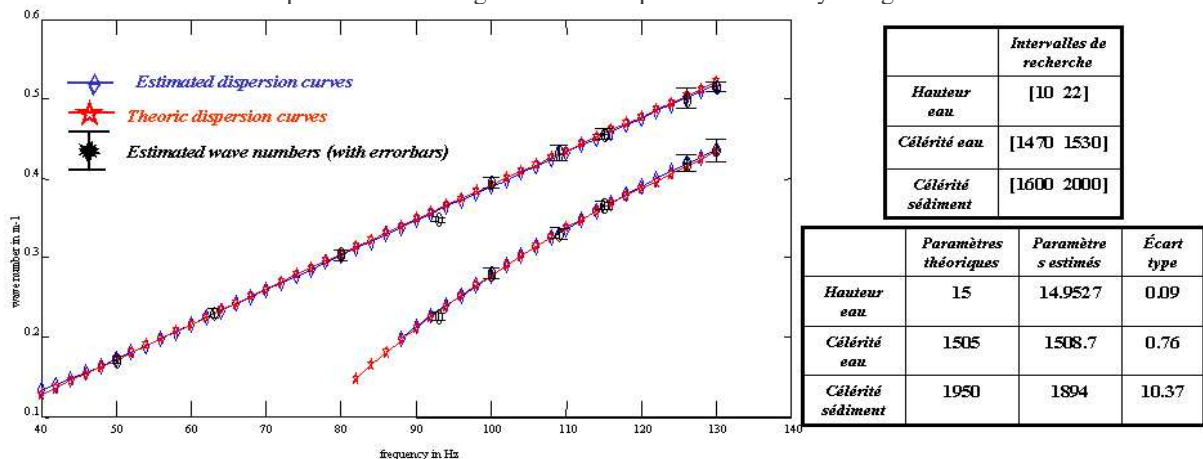


Figure 1 : Comparaison courbes de dispersion théoriques et estimées et résultats d'estimation des paramètres d'un canal de Pekeris

L'écart-type mentionné dans le tableau ci-dessus est en réalité l'écart-type sur les différents résultats d'itérations du processus d'optimisation. Au final, que ce soit en terme d'estimation des nombres d'onde ou d'inversion des paramètres du canal, les résultats obtenus sur données synthétiques proches de celles de MOVEBOAT sont tout à fait satisfaisants.

3.3 Tests sur données réelles

Dans ce paragraphe, nous appliquons notre algorithme aux données réelles issues de la campagne MOVEBOAT et plus particulièrement sur 4 fréquences de raies spectrales (63, 93, 109 et 126Hz).

Comme précédemment, nous utilisons une fenêtre glissante de 30 secondes. Nous ne conservons que les résultats d'estimation fournissant une fonction coût finale supérieure à 0.6 (seuil choisi empiriquement). Un exemple de résultat est fourni sur la figure 2 et ce pour la raie à 109Hz.

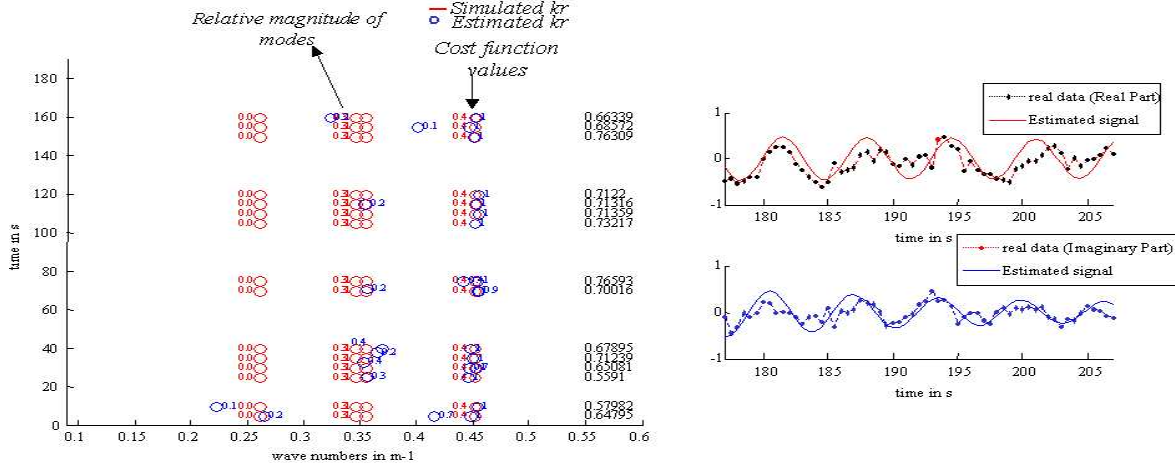


Figure 2 : (a) Résultats d'estimation des nombres d'onde pour $f=63\text{Hz}$ et une fenêtre glissante de 30s. (b) comparaison signal théorique/signal estimé (coefficient d'accord = 0.77)

On notera que les résultats obtenus sont comparés aux nombres d'onde simulés dans les conditions de MOVEBOAT 2005 bien que ces dernières soient relativement mal connues (ces nombres d'onde seront dénommés pseudo théoriques).

Afin d'inverser les propriétés du milieu, étant donné la relativement faible quantité d'observables disponibles, il serait utopique de choisir un modèle complexe multicouches. De ce fait, nous nous contentons dans un premier temps de chercher un canal de Pekeris équivalent qui rende compte des nombres d'onde estimés. En l'occurrence, nous choisissons d'inverser un canal de Pekeris à partir des deux premiers modes propagatifs estimés. La figure ci-dessous illustre les résultats obtenus.

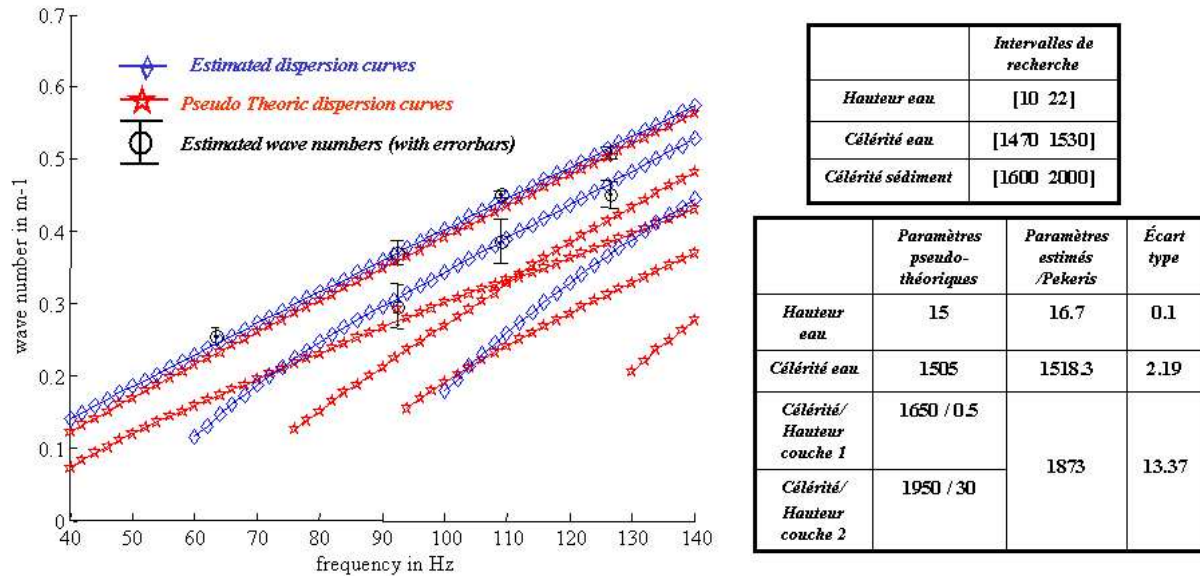


Figure 3 : (a) Comparaison courbes de dispersion pseudo- théoriques et estimées / résultats d'estimation des paramètres d'un canal de Pekeris à partir des kr 's estimés sur données réelles

Le canal de Pekeris équivalent estimé est cohérent avec les données environnementales dont nous disposons et rendra ainsi compte du comportement acoustique des signaux observés (4 raies pour un navire unique) dans la gamme de fréquences considérée (50-130Hz).

4 CONCLUSION

Dans cet article, nous avons présenté un procédé novateur permettant d'inverser les paramètres d'un canal océanique très petit fond à partir du bruit rayonné par des navires en transit. Nous proposons d'exploiter le mouvement de ces sources d'opportunité et les raies rayonnées afin d'estimer les nombres d'onde du canal qui servent ensuite à inverser les propriétés du milieu.

L'extraction des nombres d'onde radiaux pour une raie particulière est réalisée après un pré-traitement (fenêtrage temporel, filtrage passe-bande, retour en bande de base et sous échantillonnage) par application de l'estimateur du maximum de vraisemblance en utilisant une optimisation par algorithmes génétiques. La concaténation des nombres d'onde en fonction des fréquences rayonnées fournit les courbes de dispersion du milieu. L'inversion des courbes de dispersion est réalisée pour une série de milieux à complexité croissante 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 MOVEBOAT2005 dans le cas de l'algorithme à cohérence partielle, l'algorithme à cohérence globale ayant échoué pour sa part.

En perspective à ces travaux, une application de notre approche à un canal possédant une hauteur d'eau plus importante (environ 100m) est envisagée. D'autre part, nous prévoyons de combiner les informations extraites des raies spectrales des navires avec celles issues du bruit large bande et plus particulièrement des figures d'interférences qu'il génère dans le plan range-fréquence.

5 REMERCIEMENTS

Ce travail est financé par le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine de la marine française sous le contrat de recherche CA/2003/06/CMO.

6 REFERENCES

- [1] W. Munk, C. Wunsch, "Ocean acoustic tomography: a scheme for large scale monitoring", Deep-Sea Research, Vol 26A, 1979.
- [2] W. Munk, P. Worcester, C. Wunsch, "Ocean Acoustic Tomography", Cambridge University Press, 1995.
- [3] C. Gervaise, S. Vallez, C. Ioana, Y. Stephan, Y. Simard, "Passive acoustic tomography : review, new concepts and application using marine mammals", accepté pour publication Journal of marine Biology Association of United Kingdom, 2006.
- [4] N. Carbone, G. Dean, M. Buckingham et Al, "Estimating the compressional and shear wave speeds of a shallow water seabed from the vertical coherence of ambient noise in the water column", JASA, 103 n°2, 1998.
- [5] K. Heaney, "Rapid geoacoustic characterization using a surface ship of opportunity", IEEE Journal of Oceanic Engineering 88-99 vol 29 n°1, January 2004.
- [6] A.M. Thode, G.L. D'Spain, W.A. Kuperman, "Matched-field processing, geoacoustic inversion and source signature recovery of blue whale vocalizations", JASA, 107, n°3, 2000.
- [7] C.F. Mecklenbrauker, A. Gershman, "Broadband maximum likelihood estimation of shallow ocean parameters using shipping noise", ICASSP, 2001.
- [8] S.M. Jesus, C. Soares, J. Onofre, E. Coelho, P. Picco, "Experimental testing of the blind ocean acoustic tomography concept", in the proceedings of acoustic variability conference, Lercici Italy, 2002.
- [9] R. Chapman, "Inversion of geoacoustic model parameters using ship noise", Gayana 68(2) supl. t.I. Proc, 108-114, 2004.
- [10] R. Koch, D. Knobles, "Geoacoustic Inversion Using Broadband Noise from Surface Ships » 150th ASA Meeting, Minneapolis, 2005.
- [11] D. Battle, P. Gerstoft, W.A. Kuperman, W.S. Hodgkiss, M. Siderius, "Geoacoustic inversion of tow-ship noise via near-field-matched-field processing", IEEE JOE, vol.28 (3), 2003.
- [12] J. Glattetre, T. Knudsen, K. Sostrand, "Mode interference and mode filtering in shallow-water - a comparison of acoustic measurements and modeling", JASA, 86 n°2, 680-690, 1989.
- [13] 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", JASA, 106 n°5, 2454-2468, 1999.
- [14] G. Potty, "Tomographic inversion for sediment parameters in shallow water", JASA, 108 n°3, 973-986, 2000.
- [15] B. Nicolas B., J. Mars, J.L. Lacoume, "Geoacoustical parameters estimation with impulsive and boat-noise sources", IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol 18, issue3, 2003.
- [16] Urick, "Principles of underwater sounds", Peninsula Publishing, California, 2003.
- [17] F.B. Jensen, W.A. Kuperman, M.B. Porter, and H. Schmidt. "Computational Ocean Acoustics", New York: AIP Press/Springer, 2000.