
Utilisation de warping temporel pour étendre le domaine de fonctionnement d'un procédé d'inversion géoacoustique passive

Amélie Barazzutti^{1,3}, Cédric Gervaise^{2,3}, Jérôme I. Mars³

1. DGA Ingénierie des Projets/ASC/ENV
60 Boulevard du Général Martial Valin
75009 Paris, France

amelie.barazzutti@intradef.gouv.fr

2. Foundation of Grenoble-INP
46 Avenue Félix Viallet
F-38301 Grenoble, France

cedric.gervaise@chorusacoustics.com

3. Université Grenoble Alpes, GIPSA-LAB
Université Grenoble Alpes, CNRS
F-38000 Grenoble, France

jerome.mars@gipsa-lab.grenoble-inp.fr

RÉSUMÉ. Cet article introduit de nouveaux outils pour le traitement de signal dans le cadre d'un schéma d'inversion géoacoustique passive s'appuyant sur des modulations de fréquence de mammifères marins captés sur un unique hydrophone. La méthode se base sur l'utilisation de la propagation multitrajet pour extraire l'information nécessaire à l'estimation du coefficient de réflexion du sédiment superficiel. Jusqu'à présent, l'utilisation d'outils de traitement du signal basés sur le spectrogramme limitait la portée et les signaux candidats à l'inversion, ceux-ci devant présenter des échos résolus dans le plan temps-fréquence au regard des outils mis en œuvre. Ce papier propose l'ajout d'une nouvelle étape de traitement basée sur des opérateurs de déformation temporelle (warping) permettant la séparation haute résolution des échos. Les échos sont transformés en composantes de fréquences pures par application d'un opérateur de déformation avec pour loi de déformation, la loi de fréquence instantanée du signal. En contexte passif, cette loi est estimée à partir du premier écho reçu. L'application de l'opérateur de déformation sur une fenêtre temporelle glissante permet d'obtenir la réponse impulsionnelle (RI) du canal. Celle-ci est ensuite utilisée pour estimer la position de la source, l'angle de rasance et les pertes de transmission. Le warping conservant l'énergie, le niveau de chaque écho peut être alors estimé sur le signal déformé sans devoir revenir dans l'espace temporel initial. A l'instar de la méthode d'inversion de base, le traitement d'une série d'émissions fournit une courbe estimée du coefficient de réflexion en fonction des angles de rasance. Cette

courbe sert d'observable à l'algorithme d'inversion. Le résultat important de cette étude est que ces nouveaux outils permettent d'augmenter la portée et la diversité des signaux candidats à la méthode d'inversion. Les performances et la validité du schéma d'inversion étendu ont été évaluées sur données synthétiques puis confrontées avec succès aux émissions réelles dans le golfe du Lion sur lesquelles la méthode d'origine avait été précédemment évaluée. La portée a été triplée et la durée d'enregistrement utile multipliée par un facteur 2,5 grâce aux nouveaux outils. Avec ces nouveaux outils, nous avons accès à un ensemble de paramètres géoacoustiques permettant de mieux décrire les caractéristiques du fond marin.

ABSTRACT. This paper presents new tools to improve a geoacoustic inversion scheme relying on the inversion of marine mammals vocalizations recorded on a single hydrophone. This method makes best use of the multipath propagation and time-frequency signature of vocal calls. The classical signal processing tools based on spectrogram limit both the range of the scheme and the signals panel that can be processed. In this paper, we introduce new tools based on temporal warping that allow high resolution paths separation. Each echo has to be transformed into a pure frequency. Therefore, they are warped according to the frequency law of the signal estimated according to the first echo. The warping tools enable a high resolution of each echo in the time-frequency warped domain. Applying the warping on a moving window, one can estimate the impulsive response (IR) of the channel and deduce the source location, grazing angle and transmission losses. Then, as warping operators conserve energy, the path levels can be estimated using the time-frequency warped representation. Through the processing of several signals, we get a curve of an estimation of the reflection coefficient that feeds the inversion algorithm. The theory of this extended method is described and its performances are evaluated on a controlled real data set in the Gulf of Lion. The range and the recording duration have been improved (range from 300 to 900 meters and duration multiplied by 2.5). With the new scheme, we have access to a set of geoacoustic parameters allowing to better describe the bottom features.

MOTS-CLÉS : warping, acoustique passive, inversion géoacoustique, observation de l'environnement, traitement du signal multidimensionnel, tomographie océanique.

KEYWORDS: warping, passive acoustics, geoacoustic inversion, environmental observation, multi-dimensional signal processing, oceanographic tomography.

DOI:10.3166/TS.33.53-72 © 2016 Lavoisier

Extended abstract

The geoacoustic inversion aims at giving an estimate of the oceanographic properties impacting the acoustic propagation, such as the sea bottom features. Most of the current geoacoustic inversion methods are active methods. However, the environment protection policy as well as military necessity of discretion is leading the community into working on less invasive and more discrete inversion schemes. The main idea of passive geoacoustic inversion is to take advantage of opportunity sources by listening to the effect of the environmental properties on their propagation. Usual approaches use the ambient noise or ship noise as opportunity source. Only few studies exist on geoacoustic inversion using marine mammals' signals. Previous works described the development of a new geoacoustic inversion scheme relying on the inversion of

signals close to marine mammals vocalizations on a single hydrophone in shallow waters (Barazzutti *et al.*, 2013). The method makes use of the multipath propagation to locate the source and extract the reflexion coefficient from the paths levels. The processing of a set of calls provide an estimate of the reflexion coefficient. This method needs resolved multipath and has been validated on controlled emissions. The classical signal processing tools based on the spectrogram, used to separate the paths, are low resolution tools. Both the slope of the signal and the range of the source affect the scheme ability to resolve the paths. It thus limits the bottom features description (great ranges give access to small grazing angles). In this paper, we introduce new tools based on temporal warping that allow high resolution paths separation. Each echo has to be transformed into a pure frequency. Therefore, they are warped according to the frequency law of the signal, estimated according to the first echo. The warping tools enable a high resolution of each echo in the time-frequency warped domain. Applying the warping on a moving window, one can estimate the impulsive response (IR) of the channel and deduce the source location, grazing angle and transmission losses. Then, as warping operators conserve energy, the path levels can be estimated using the time-frequency warped representation. Through the processing of several signals, we get a curve of an estimation of the reflection coefficient that feeds the inversion algorithm.

In the Gulf of Lion, marine mammals like emissions were performed through a controlled low frequency acoustic source and received on a moored hydrophone. Chirp signals between 1 and 2 kHz, at 180 dB rel. $1\mu\text{Pa}$, were emitted every 2 seconds on a transect from 140 m to 1 km from the receiver. The received signals were processed as real opportunity signals, using both the LR (previous works) and HR (described in the current paper) schemes. With the LR method, a good estimation of the source location was performed until 300 m. Above this limit - which was the limit anticipated in the performances study - the paths are not resolved anymore so that the source can't be localized. With the HR method, the source can be located above 300 m until 900 m, significantly extending the range of the scheme. At the same time, the amount of suitable calls has been increased since the recording duration has been improved (range from 300 to 900 meters and duration multiplied by 2.5). The inversion results with the HR scheme match the bottom characteristics in the area of experiment, though being different from the core sample available in the area. The HR scheme does not limit the bandwidth or slope of the candidate signals. However, the range extent raises some points that have to be studied in future works such as the range-invariant approximation and the observation of groups of paths instead of single paths.

1. Contexte et objectifs des travaux

L'inversion géoacoustique a pour objectif d'estimer les propriétés caractéristiques de l'environnement marin, en particulier du fond marin, en étudiant l'impact de cet environnement sur la propagation acoustique. Les méthodes d'inversion géoacoustique active reposent sur l'inversion d'émissions volontaires et contrôlées propagées entre un émetteur et un ou plusieurs récepteurs. Si ces techniques actives garantissent le contrôle et la connaissance de la source, elles ont néanmoins des inconvénients (pol-

lution sonore (CE, 2008), (CE, 2010), (Southall *et al.*, 2007), lourdeur de déploiement du matériel) qui incitent de plus en plus la communauté scientifique à se tourner vers des alternatives passives. Les méthodes d'inversion géoacoustique passive consistent à estimer les propriétés acoustiques du milieu mais en utilisant les sources acoustiques d'opportunité déjà présentes. Cela assure la discrétion acoustique et le respect de l'environnement marin. Ces méthodes, pour lesquelles seuls les récepteurs sont à déployer, permettent d'étudier des régions peu accessibles, hostiles (ex : conditions climatiques extrêmes) ou encore en contexte non permissif. Toutefois, le challenge des méthodes passives reste d'atteindre, avec les sources d'opportunité, des performances équivalentes à celles des méthodes actives.

Dans ce cadre, les sources d'opportunité sont d'origines multiples et présentent des caractéristiques variées: bande de fréquences, durée des signaux, formes d'ondes, directivité... L'utilisation du bruit ambiant a été largement étudiée (Harrison, Simons, 2002), (Siderius *et al.*, 2006). Le bruit de surface induit par les vagues, utilisé comme source directionnelle naturelle, fait aussi l'objet de plusieurs publications (Jones, 2008) (Traer *et al.*, 2011). Des schémas d'inversion exploitant le bruit rayonné par les bateaux (coopérants ou non) ont également été proposés notamment par (Gervaise *et al.*, 2012), (Vallez *et al.*, 2006) ou (Park *et al.*, 2005). Les vocalises de mammifères marins, exploitées pour le monitoring des animaux, sont encore peu exploitées dans le domaine de l'inversion géoacoustique. (Thode *et al.*, 2000) proposent une méthode d'inversion géoacoustique de type *Matched Field Processing* à partir de signaux de baleines bleues (*Balaenoptera Musculus*) enregistrés sur une antenne verticale. Ils utilisent les modulations de fréquence et des tons pulsés émis par les mammifères marins, et obtiennent des résultats cohérents avec la connaissance *a priori* de la zone étudiée. La position de la source et les paramètres du milieu sont inversés simultanément à l'aide d'un algorithme génétique (AG). (Josso, 2010) démontre la faisabilité d'estimer la RI du canal à partir d'une source d'opportunité en déplacement et montre des résultats de réponse impulsionnelle estimée sur des signaux de dauphins communs (*Delphinus Delphis*), corrigées du mouvement des sources, sans prendre en compte la directivité des sources. (Bonnell *et al.*, 2014) proposent une méthode monocapteur basée sur la propagation modale permettant d'estimer la distance d'émissions très basses fréquences de baleines boréales (*Balaena Mysticetus*) et pour laquelle une inversion géoacoustique est nécessaire. Le modèle de Pekeris utilisé permet la correction des distances mais n'est pas cohérent avec la zone d'étude (zone arctique petits fonds). Ces sources sont difficiles à exploiter en termes de présence, de connaissance des signaux émis (nature, niveau, directivité, etc.) et de connaissance de la position et de la vitesse de la source.

Dans (Barazzutti *et al.*, 2013), nous avons présenté un schéma d'inversion qui s'appuie sur les modulations de fréquence représentatives des émissions de mammifères marins. Cette méthode, monocapteur, se base sur la propagation multitrajet et l'étude d'une collection de modulations de fréquence pour estimer la courbe de coefficient de réflexion sur le fond en fonction de la rasant, observable classique en inversion géoacoustique (Dettmer *et al.*, 2008), (Stotts *et al.*, 2004). Nous avons démontré l'intérêt de cette méthode sur des données simulées et sur des données réelles contrôlées

émises par une source omnidirectionnelle. Cette méthode présente néanmoins des limitations d'emploi. Elle n'intègre pas la prise en compte de la directivité des sources. Or la directivité, peu documentée pour les sources d'opportunité biologiques, impacte les niveaux des trajets utilisés par la méthode et devrait donc être prise en compte. En contexte passif, on ne sait pas encore le faire mais cette limite devra être levée pour pouvoir exploiter les sources hautes fréquences. Autre limitation, notre méthode nécessite la résolution des trajets dans le plan temps-fréquence. Les outils classiques de traitement du signal mis en œuvre pour séparer les échos limitent donc la portée des sources et la pente des signaux exploitables, et par conséquent la connaissance sur le fond.

Dans ce nouvel article, pour palier cette limite, un étage de séparation des trajets par application d'opérateurs de déformation temporelle (*warping*) a été ajouté (figure 2). Les vocalises basses fréquences, peu directives mais présentant des difficultés en termes de séparation/résolution des échos, vont ainsi pouvoir être utilisées. Les opérateurs de déformation temporelle sont adaptés aux signaux analysés et à leur propagation, et permettent de transformer le signal et ses échos en fréquences pures facilement identifiables et exploitables dans le plan temps-fréquence déformé (Jarrot *et al.*, 2006). La piste temps-fréquence du signal fournit ainsi l'opérateur de déformation adapté au signal (Ioana, Quinquis, 2004). Cet opérateur de déformation temporelle est ensuite appliqué sur une fenêtre glissante sur l'axe temporel du signal initial pour fournir la réponse impulsionnelle (RI) du canal entre la source et le récepteur. Tout comme la méthode de (Barazzutti *et al.*, 2013), l'estimation des temps d'arrivée des trajets sur la RI permet de déduire la position de la source, l'angle de rasance et les pertes de transmission. L'opérateur de déformation conservant l'énergie, les niveaux des trajets sont directement estimés à partir du signal déformé et permettent une évaluation du coefficient de réflexion. Ces nouveaux outils visent à augmenter la portée de la méthode et donc le domaine angulaire couvert, permettant une meilleure description du contexte environnemental, notamment des fonds peu réfléchissants (2.3).

Après un bref rappel de la méthode décrite dans (Barazzutti *et al.*, 2013) en section 2.1, les nouveaux outils de séparation haute résolution des échos sont décrits dans la section 2.2. Une étude des performances du nouveau schéma proposé est détaillée dans la section 2.3. La méthode est ensuite évaluée sur des émissions contrôlées en environnement réel (golfe du Lion) et comparée aux résultats de la méthode décrite dans (Barazzutti *et al.*, 2013) pour l'étape de localisation de source puis l'étape d'inversion. Pour faciliter la lecture, la méthode initiale d'inversion géoacoustique basée sur le spectrogramme sera nommée "IGA-VMM-BR" (pour inversion géoacoustique à partir de vocalises de mammifères marins basse résolution), la méthode avancée basée sur les outils de *warping* sera nommée "IGA-VMM-HR" (pour inversion géoacoustique à partir de vocalises de mammifères marins haute résolution).

2. Description du procédé d'inversion étendu

2.1. Rappel de la méthode d'inversion IGA-VMM-BR basée sur le spectrogramme

La méthode initialement proposée consiste à réaliser une inversion géoacoustique passive à partir de vocalises de cétacés et d'un unique hydrophone en milieux petits fonds. Cette méthode peut être considérée comme une déclinaison passive des méthodes de (Demoulin *et al.*, 2000) (méthode active monocapteur basée sur l'inversion de la réponse impulsionnelle du canal à des modulations de fréquence) et (Plantevin *et al.*, 2009) (méthode active monocapteur exploitant les amplitudes des échos de modulations de fréquence émises en petits fonds pour estimer puis inverser le coefficient de réflexion du fond). Tout comme (Demoulin *et al.*, 2000), notre procédé exploite les multi-trajets et la signature temps-fréquence des modulations de fréquence, enregistrées sur un unique capteur. Les niveaux des trajets réfléchi-fond d'un ensemble de vocalises sont exploités afin d'estimer la courbe du coefficient de réflexion en fonction de la rasance, courbe qui alimente l'algorithme d'inversion (Plantevin *et al.*, 2009). Néanmoins, contrairement à ces méthodes actives, les signaux proviennent de sources d'opportunité donc non contrôlées, en particulier des modulations de fréquence émises par les cétacés.

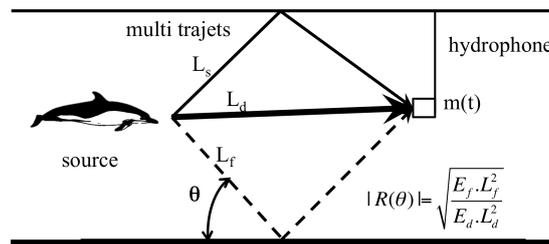


Figure 1. En première approximation, la propagation se fait suivant des trajets rectilignes. E_d (resp. E_f) est le niveau du trajet direct (resp. fond) intégré sur la bande de fréquences du signal (μPa^2). $|R(\theta)|$ est le coefficient de réflexion pour la rasance θ de l'émission. Il est calculé à partir de E_f et E_d et des corrections de pertes de transmission selon les longueurs des trajets direct et fond L_d et L_f

Une description complète du procédé d'inversion et de ses performances est déjà disponible dans (Barazzutti *et al.*, 2013). En résumé, il se compose de deux principales étapes de traitements. La première étape dite « traitement du signal d'une émission individuelle » (figure 2) consiste à exploiter la représentation temps-fréquence (RTF) d'un signal reçu pour évaluer le coefficient de réflexion $R(\theta)$ d'une onde plane à l'interface eau-sédiment pour la rasance particulière θ associée au réfléchi fond de l'émission considérée. Pour cela, nous supposons i) que le signal source est une modulation de fréquence, ii) que les conditions de propagation fournissent trois trajets mesurables à la réception (trajet direct, premier réfléchi surface et premier réfléchi fond (figure 1), iii) que la trajectoire des rayons acoustiques est rectiligne et iv) que

ces trois trajets sont résolus dans une représentation temps-fréquence de type spectrogramme (*i.e.* les temps d'arrivée sont accessibles par les outils mis en œuvre). Cette première étape fournit, pour chaque sifflement, dans le cas d'une source isotrope, une estimée du couple $(\theta, |R(\theta)|)$ à partir du rapport des niveaux des trajets réfléchi-fond et direct (figure 1).

En utilisant les longues périodes d'écoute permises par les enregistreurs acoustiques autonomes, cette étape est appliquée à un nombre conséquent (N_s) de sifflements pour produire une collection C de coefficients de réflexion pour différentes ransances θ , $C = \{\theta_i, R(\theta_i), i \in \{1 : N_s\}\}$. La seconde étape dite « d'inversion » (figure 2) utilise la collection C des coefficients de réflexion comme observable pour l'estimation des paramètres géoacoustiques du fond. La structure sédimentaire (nombre de couches, fluide ou élastique) est paramétrée par le vecteur de paramètres géoacoustiques α d'un modèle théorique $R_t(\theta, \alpha)$ du coefficient de réflexion de la structure (Gervaise *et al.*, 2011). Ainsi, les paramètres du modèle, notamment les célérités, atténuations et épaisseurs du sédiment sont estimés par minimisation de l'erreur quadratique moyenne entre les collections de coefficients de réflexion mesurés et modélisés :

$$\tilde{\alpha} = \arg_{\alpha} \min \left(\frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} |R(\theta_i) - R_t(\theta_i, \alpha)|^2 \right) \quad (1)$$

Dans ce processus, les outils temps-fréquence jouent un rôle prépondérant car ils permettent de prétraiter les données et d'obtenir les observables nécessaires à l'inversion, c'est-à-dire :

- les temps d'arrivée relatifs des échos nécessaires pour l'estimation de la position de la source et l'estimation des pertes de transmission ;
- l'énergie de chaque écho nécessaire pour l'estimation du coefficient de réflexion associé à la vocalise traitée.

Le domaine de fonctionnement (portée notamment) de l'algorithme d'inversion est donc dicté par ces outils. Une vocalise n'est exploitable que si les outils temps-fréquence mis en œuvre sont capables de séparer les échos correspondant aux différents trajets.

Dans la méthode IGA-VMM-BR, nous mettons en œuvre ce schéma avec un tracking de la vocalise sur le spectrogramme servant de piste le long de laquelle l'énergie est intégrée sur une fenêtre temporelle glissante pour estimer la réponse impulsionnelle et permettre d'estimer les temps et niveaux des trajets. Les caractéristiques nécessaires à l'inversion sont donc extraites du spectrogramme. La résolution des trajets dans cet espace de représentation impose des limites en termes de portée des signaux exploitables et de pente de modulation de fréquence (2.3). Aux vues des limitations, l'utilisation d'outils avancés de traitement de signal basés sur une déformation temporelle pour séparer les trajets *a priori* non résolus dans le spectrogramme, doit permettre d'étendre la portée du schéma d'inversion.

La figure 2 résume le schéma d'inversion IGA-VMM-BR et présente l'ajout du bloc d'outils de déformation permettant l'extension du domaine de fonctionnement initial.

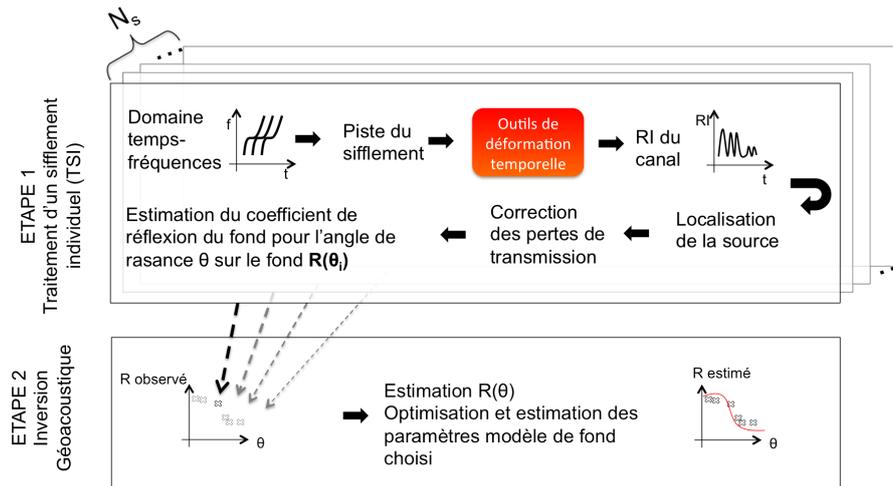


Figure 2. Architecture du schéma d'inversion avec une étape de traitement du signal d'une émission individuelle puis une étape d'inversion géoacoustique à partir d'une collection C d'émissions traitées. Les outils de déformation remplacent les outils basiques basés sur le spectrogramme

2.2. Les outils de déformation pour la séparation des échos et l'estimation de la RI

Partant du constat que les signaux de mammifères marins possèdent généralement des structures temps-fréquence non-linéaires pour lesquelles les représentations standards temps-fréquence (classe de Cohen) sont peu adaptées, (Ioana, Quinquis, 2004) proposent l'utilisation d'une combinaison de transformations unitaires pour linéariser le contenu temps-fréquence des signaux. Ces outils leur permettent d'estimer et de visualiser les paramètres temps-fréquences des signaux, dans un contexte passif. (Jarrot *et al.*, 2006) décrivent l'application des opérateurs de *warping* temporel (déformation temporelle) à des séries temporelles discrètes et également les conditions d'application du *warping* inverse. En contexte actif et passif, (Josso, 2010) utilise les déformations temporelles pour filtrer efficacement les trajets d'arrivée dans le cadre d'un algorithme de correction de la RI de l'effet Doppler dû au mouvement de la source d'opportunité. En passif, dans des milieux petits fonds, (Bonnell, Thode, 2013) utilisent le *warping* temporel pour améliorer la séparation des modes d'une source basse fréquence et pouvoir ainsi estimer les temps d'arrivée et courbes de dispersion des modes. Cette séparation leur permet de proposer un schéma d'inversion géoacoustique dans un guide d'onde dispersif. (Bonnell *et al.*, 2014) appliquent ces mêmes outils pour la localisation de sources très basse fréquence en passif.

Au centre de la méthode IGA-VMM-HR se trouve le *warping* temporel - nommé déformation temporelle dans cet article. Il s'agit d'une classe de transformation unitaire selon l'axe temporel. Il est défini par un opérateur de $l^2(\mathfrak{R})$ W_w , associé à la fonction de déformation $w(t)$, tel que :

$$(W_w s)(t) = |\dot{w}(t)|^{1/2} s(w(t)) \quad (2)$$

avec $\dot{w}(t)$ la dérivée selon la variable t de la fonction de déformation $w(t)$. Cet opérateur présente plusieurs caractéristiques intéressantes pour améliorer notre schéma d'inversion. Il s'agit d'un changement de variable temporel qui permet la linéarisation du comportement temps-fréquence d'un signal ((Ioana, Quinquis, 2004) et (Jarrot *et al.*, 2006)) ce qui doit permettre une meilleure estimation de la réponse impulsionnelle du signal grâce à une meilleure séparation des arrivées. De plus, cette déformation temporelle conserve l'énergie, ce qui permet de travailler indifféremment à partir des niveaux du signal initial ou de ceux du signal déformé.

Soit $s(t) = \exp(2\pi j\phi(t))$ le signal étudié avec $\phi(t)$ la phase du signal. Le signal initial subit le changement de variable temporelle $t = \phi^{-1}(f_i w)$. La loi de déformation temporelle permettant de transformer le signal en fréquence pure est $w(t) = \phi(t)/f_i$ avec la fréquence de déformation f_i choisie telle que $w(0) = 0$ et $w(T) = T$, T la durée du warping (Ioana, Quinquis, 2004). Une représentation de l'effet de la déformation temporelle sur le signal est schématisée dans la figure 3 pour le cas d'un chirp linéaire. Cet opérateur impose une certaine connaissance de la loi de modulation du signal $s(t)$ pour définir la fonction de déformation. Pour cela, la loi de fréquence instantanée $f(t) = d\phi(t)/dt$ du signal est apprise sur la RTF du signal d'origine puis intégrée pour donner la loi de déformation temporelle. L'estimation de la loi de fréquence instantanée peut être réalisée à l'aide algorithmes de tracking temps-fréquence comme ceux décrits dans (Dadouchi *et al.*, 2013).

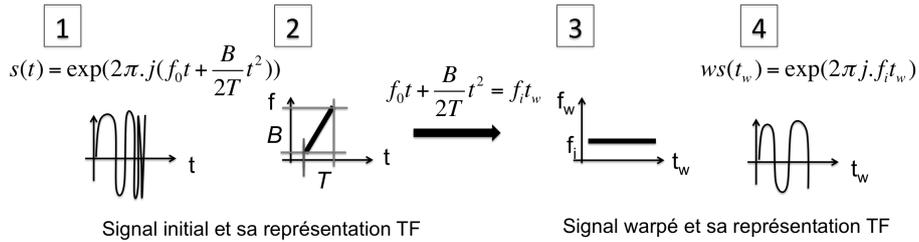


Figure 3. Représentation schématique de l'effet de déformation temporelle (*warping temporel*) sur une rampe de fréquences $s(t)$, avec t_w le temps déformé et f_i la fréquence de déformation, B la bande de fréquences et T la durée d'un écho

Pour obtenir la RI du canal entre la source et le récepteur, on applique la déformation temporelle sur une fenêtre glissante de longueur T , le long de l'axe des temps d'origine, T choisie comme étant égale à la durée d'un écho reçu. Pour chaque instant n/fe , $n = 1 : N - T \times fe$ (avec fe la fréquence d'échantillonnage, N la taille du

signal): on applique la déformation sur $s[n : n + T \times f_e - 1]$, puis la RTF du signal déformé est calculée et l'énergie de la RTF est intégrée à la fréquence de déformation f_i le long de l'axe des temps déformés t_w (spectre du signal déformé à la fréquence f_i). Les instants d'arrivée des échos maximisent cette intégrale. On obtient ainsi la RI du signal dans l'espace des temps non déformés.

Tout comme dans la méthode IGA-VMM-BR, les différences de temps d'arrivée sont estimées à partir de la RI en recherchant les dates des maxima de la RI et en formant leurs différences. Elles permettent l'estimation de la localisation de la source (Aubauer *et al.*, 2000). Comme la déformation temporelle conserve l'énergie, les niveaux des trajets déformés $W_ws(t_d)$ (avec t_d l'instant d'arrivée du trajet direct) et $W_ws(t_f)$ (avec t_f l'instant d'arrivée du premier réfléchi fond), corrigés des pertes de transmission, sont utilisés pour l'estimation du coefficient de réflexion à l'angle de rasance θ du réfléchi fond. Ces outils de warping sont insérés dans la méthode IGA-VMM-BR à l'étape des traitements individuels des signaux (figure 2). A l'instar de la méthode BR, le traitement d'une collection de signaux individuels fournit une courbe du coefficient de réflexion mesuré en fonction des angles de rasance (étape 2 détaillée dans la section 2.1). Cette courbe sert d'observable pour l'algorithme d'inversion.

2.3. Etude de performances - IGA-VMM-HR

Seuls les signaux présentant des multi-trajets résolus sont exploités par le procédé d'inversion. La distance limite, au-delà de laquelle une source n'est plus exploitable, dépend donc de la capacité des outils de traitement utilisés à pouvoir séparer les différents échos.

Dans la méthode BR, les trajets doivent être résolus dans le spectrogramme. Le principe d'incertitude, permet d'écrire la résolution temporelle (formule de Storey): $\Delta t_s \geq l_{fft}/(2.f_e)$, pour une longueur de la fenêtre FFT l_{fft} . De plus, pour un réglage adapté à la pente α du signal traité, le principe d'incertitude permet d'écrire la résolution temporelle en fonction de cette pente: $\Delta t_{sp} \geq \sqrt{1/(2\alpha)}$. Pour des sifflements de dauphins de pente 20 kHz, la résolution temporelle est estimée à 0,005 s (Barazzutti *et al.*, 2013). Dans la méthode HR, les outils de déformation temporelle appliqués transforment les trajets en fréquence pure f_i (fréquence de déformation). Cela autorise un réglage optimal pour résoudre finement en fréquence le signal warpé. La déformation $w(t)$ est appliquée de manière glissante sur l'axe des temps non déformé. Ainsi, la résolution temporelle de la méthode HR vaut $\Delta t_w = 1/f_e$ avec f_e la fréquence d'échantillonnage du signal non déformé. Ainsi, le spectrogramme limite, en termes de pente et de portée, les signaux exploitables tandis que la déformation temporelle permet d'augmenter la résolution telle que $\Delta t_w \geq \Delta t_s$.

Les outils de déformation offrent donc une séparation haute résolution des échos d'un signal et permettent ainsi l'exploitation de sources plus éloignées qu'avec la méthode basée sur le spectrogramme. Comme la rasance du premier réfléchi fond est liée à la distance r entre la source et le récepteur par $\text{atan}(\frac{2.h-z_s-z_h}{r})$ (avec h la hauteur d'eau, z_s et z_h les profondeurs respectives de la source et du capteur), les sources plus

éloignées offrent des rasances plus faibles ce qui permet de décrire les fonds peu réfléchissants pour lesquels l'angle critique est faible. Pour un hydrophone et une source à 60 m dans 100 m d'eau, la résolution temporelle de la méthode BR permet d'atteindre une portée de 300 m soit une rasance minimale de 15° contre plusieurs kilomètres de portée avec la méthode HR. Il s'agit d'une portée théorique. Il faut en effet que la fonction de déformation soit correctement déterminée, or en concept passif, la phase instantanée $\phi(t)$, qui permet d'obtenir la loi de déformation temporelle, est inconnue et doit être estimée à partir du signal reçu. Si la loi de déformation est dégradée, le signal ne sera pas transformé en fréquence pure f_i et la RI sera en conséquence dégradée. Soit $g(t)$ la phase 'fausse' estimée, le signal déformé sera $s(t) = \exp(2\pi(\phi \circ g^{-1})(f_i t))$ et non $s(t) = \exp(2\pi(\phi \circ \phi^{-1})(f_i t))$, cela entraîne une erreur sur la fréquence de warping du signal, sur la RTF du signal déformé et donc sur l'estimation de la RI. Cette erreur est difficile à quantifier dans un contexte passif.

Pour illustrer les différences de performances précédemment décrites, nous estimons la RI d'une des émissions du jeu de données évalué dans la section 3 à partir des deux méthodes (BR et HR). La source est à 60 m de profondeur et à 550 m du récepteur. La figure 4 présente l'émission reçue non traitée avec les arrivées détectées par la méthode HR. Les RI estimées selon les deux méthodes sont présentées en figure 4. Les 3 premiers trajets, encadrés sur la figure 4, ne sont résolus que par la méthode HR, or ils sont indispensables pour la localisation de la source dans notre schéma.

3. Résultats sur données réelles avec émissions synthétiques contrôlées dans le golfe du Lion (Campagne ERATO 2011)

3.1. Matériel expérimental et zone d'expérimentation

La campagne ERATO 2011¹ du SHOM² s'est déroulée en juin 2011 dans la région du golfe du Lion en Méditerranée. Cette campagne, conduite dans le cadre de projets d'études amont de la DGA, avait pour objectif la mise au point de techniques d'évaluation rapide et discrète de l'environnement océanique et acoustique à partir de systèmes acoustiques ancrés, dérivants et sous-marin (AUV). Notre travail porte sur l'inversion des données mesurées par le système ancré TELEMAQUE. Il est constitué d'une bouée de surface et d'une antenne acoustique de 6 hydrophones fixés à des profondeurs s'étalant entre 17 et 85 mètres. Le système d'émission est une source acoustique remorquée basse fréquence, contributrice du système d'évaluation rapide de l'environnement acoustique STEREO³.

1. ERATO = Evaluation RAPide de l'environnement par Tomographie Océano-acoustique - programme d'études amont de la Direction Générale de l'Armement.

2. Service Hydrographique et Océanographique de la Marine.

3. Programme d'études amont de la Direction Générale de l'Armement - Système temps réel d'évaluation rapide de l'environnement océano-acoustique.

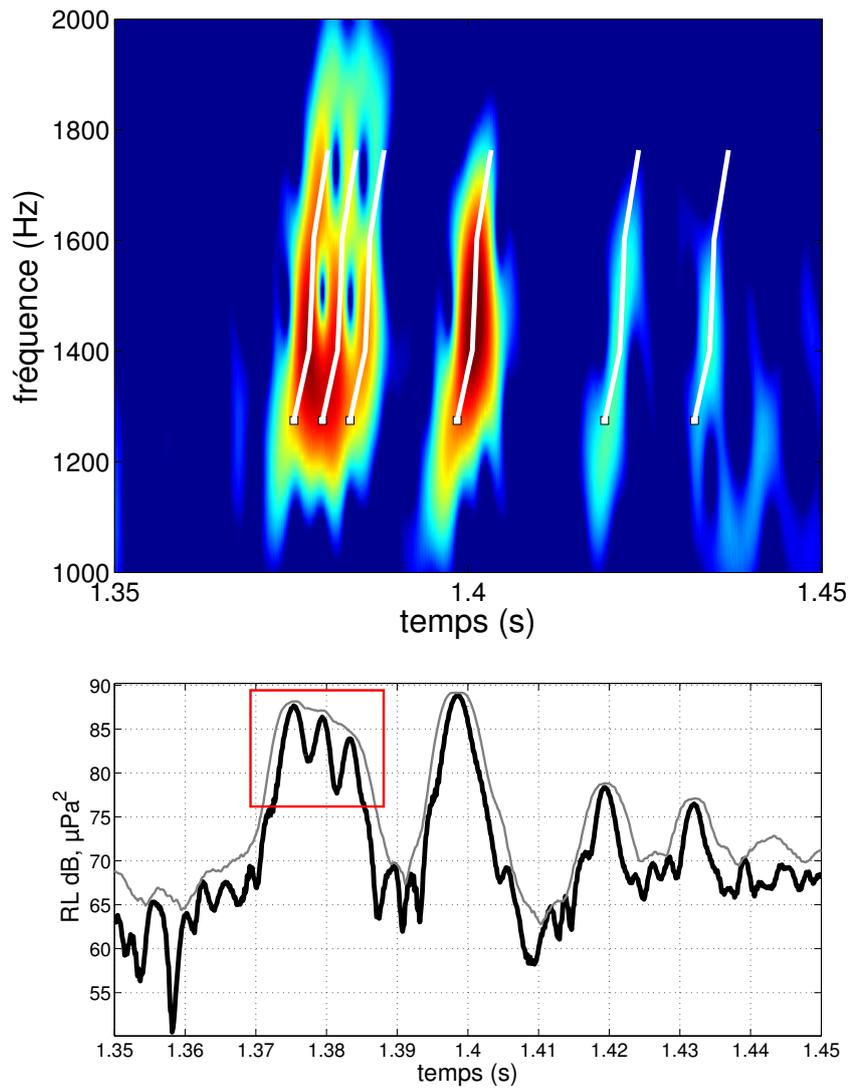


Figure 4. Haut : RTF de l'émission reçue avant déformation, la source est à 550 m. Les trajets d'arrivée détectés par la méthode HR sont les traits blancs. Bas : RI estimée par la méthode BR (fin) et par la méthode HR (épais). Le cadre rouge souligne les 3 premiers trajets détectés par la méthode HR et invisibles en BR

La zone de travail est une zone dite de référence CALIMERO-B, ayant fait l'objet de levés hydro-océanographiques dans le cadre du projet CALIMERO⁴ mené conjointement par le SHOM et l'IFREMER⁵ (Lurton, Le Gac, 2004), (Theuillon *et al.*, 2008). A l'endroit de l'antenne acoustique, les prélèvements par carottiers d'interface et de gravité (Roubi *et al.*, 2009) montrent que le fond est constitué d'une couche de 50 cm de sédiments sableux (vitesse de compression de 1 588 m/s) sur un sous-bassement sableux consolidé (vitesse de compression de 1 850 m/s) (source : SHOM). Sur une radiale, le bateau s'est dirigé à une allure de 4 noeuds vers l'antenne d'hydrophones mouillée au point de coordonnées [lat : 42,8495N, lon : 3,6579E]. Le long de la radiale, la source acoustique émettait des rampes de fréquences de durée 10 ms, entre 1 kHz et 2 kHz, à 180 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ au rythme d'une émission toutes les 2 secondes (soit une tous les 4 m) et ce jusqu'à un éloignement de 1 km de l'antenne. Le passage au CPA⁶ correspond à une distance source/antenne de 140 m (GPS).

3.2. Résultats sur les émissions contrôlées dans le golfe du Lion

Les paragraphes suivants présentent les résultats de localisation (3.2.1) et d'inversion géoacoustique (3.2.2) comparés entre la méthode BR et la méthode HR.

3.2.1. Localisation de la source : comparaison BR/HR

On évalue la méthode IGA-VMM-HR sur le jeu d'émissions utilisé dans (Barazzutti *et al.*, 2013). La source est localisée à partir d'un seul hydrophone de l'antenne situé à 60 m de profondeur. La figure 5 présente les résultats de localisation superposés des 2 méthodes. On observe une bonne localisation de la source par la méthode IGA-VMM-HR sur le domaine de fonctionnement de la méthode IGA-VMM-BR. De plus, conformément à l'étude de performances (section 2.3), la méthode IGA-VMM-HR permet la localisation précise sur une plus grande plage de distances (jusqu'à 900 m) et sur des durées plus importantes tandis qu'avec la méthode BR, la source n'est localisée que jusqu'à 300 m et seules 5 minutes d'enregistrement sont exploitables. L'erreur quadratique moyenne sur l'estimation de la distance par la méthode IGA-VMM-HR est inférieure à 13 m jusqu'à 500 m de l'hydrophone puis atteint 21 m entre 500 m et 800 m.

Dans le cas des mesures ERATO 2011, l'effet Doppler, dû au mouvement de la source, induit des erreurs négligeables devant la résolution intrinsèque des échos dans le plan déformé (décalage Doppler de 2 Hz, estimé avec une vitesse relative de 2 m/s, pour un étalement fréquentiel de 100 Hz).

4. CALibration des Méthodes de Reconnaissances des fonds Océaniques.

5. Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER.

6. *Closest point of approach*.

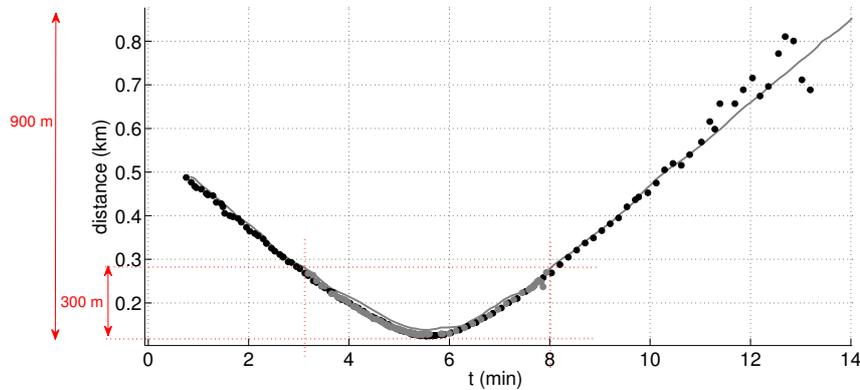


Figure 5. Estimation de la distance source / récepteur (km). La ligne continue correspond à la localisation par GPS. Les points noirs correspondent à l'estimation de la position de la source par la méthode IGA-VMM-HR, les points gris à l'estimation de la position par la méthode IGA-VMM-BR

3.2.2. Inversion géoacoustique : comparaison BR/HR

Le coefficient de réflexion mesuré est un coefficient moyen sur la bande de fréquences du signal. Il est estimé à partir du rapport des trajets réfléchi-fond et direct corrigés des pertes de transmission (section 2.1). Les résultats de l'estimation du coefficient de réflexion par les deux méthodes BR et HR sont présentés dans la figure 6. Les courbes de coefficients de réflexion mesurés par les deux méthodes sont les observables qui alimentent un algorithme génétique permettant d'inverser les paramètres optimaux pour le fond.

Pour l'évaluation du coefficient de réflexion, nous considérons uniquement la phase d'approche de la source vers l'hydrophone (entre 0 et 6 min, figure 5), plus riche en mesures. De plus, au-delà de 500 m, la dispersion des points est plus importante. La structure géoacoustique retenue pour l'inversion est un fond marin constitué d'une couche de sédiment sur un socle semi-infini. Le sédiment est supposé fluide et le socle est supposé élastique. Les paramètres du modèle géoacoustique sont estimés par minimisation de l'erreur quadratique moyenne entre les coefficients de réflexion moyens mesurés et modélisés (équation 1). Les sites les plus visités parmi les meilleurs candidats de l'algorithme génétique (AG) sont les paramètres optimaux. Les paramètres inversés sont : la vitesse de compression c_p dans la première couche de sédiment, son atténuation α_p , la vitesse de compression dans le socle c_s , son atténuation α_s , la vitesse de cisaillement c_{cis} et l'épaisseur h de la première couche de sédiment. Nous avons choisi d'exploiter les relations entre la vitesse de compression et la densité du sédiment (Hamilton, 1978) et non de tout inverser comme dans (Barazzutti *et al.*, 2013). Les densités sont estimées à partir de (Hamilton, 1978) selon les vitesses de compression : *sea floor* selon la loi $\rho = 14,8 \times c_p - 21,014$, *soft sediment* selon la loi $\rho = 1,135 \times c_p - 0,19$ et *shale curve* selon $\rho = 0,917 + 0,744 \times c_p - 0,08 \times c_p^2$

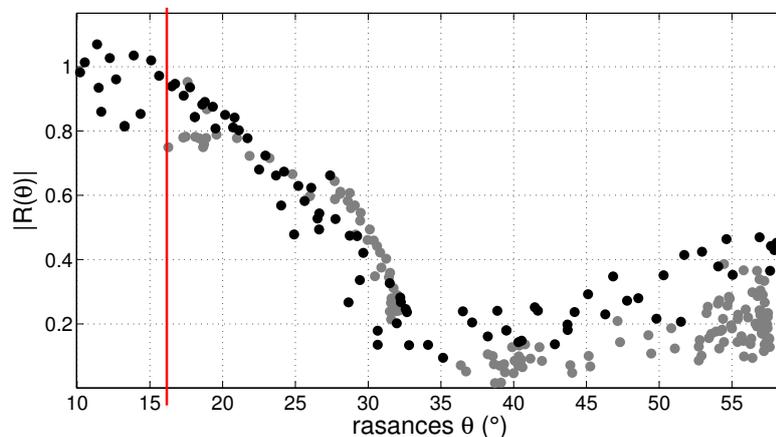


Figure 6. Estimation du coefficient de réflexion $|R(\theta)|$ en fonction de l'angle de rasance θ avec la méthode IGA-VMM-BR (gris) et avec la méthode IGA-VMM-HR (noir). La limite des rasances accessibles en BR est indiquée par la droite verticale

avec (c_p en km/s et ρ en g/cm^3). L'inversion du cisaillement a été ajoutée. L'AG est répété 100 fois - contre 500 fois dans (Barazzutti *et al.*, 2013) - sur 100 générations de 20 individus. Les histogrammes des paramètres inversés sont représentés en figure 7 et analysés dans le tableau 1.

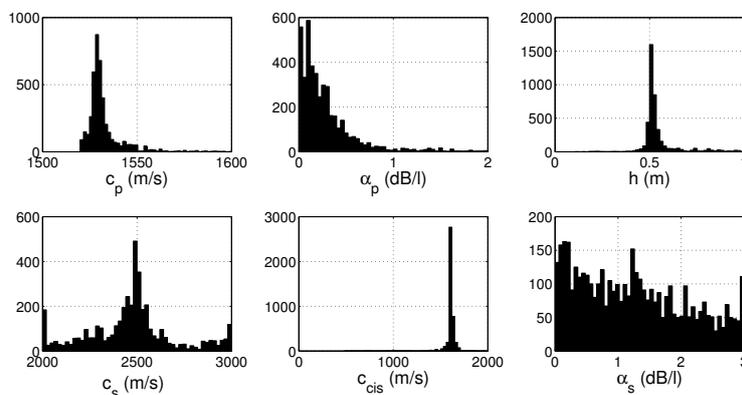


Figure 7. Histogrammes des sites les plus visités pour les 100 répétitions de l'AG, avec la vitesse de compression dans la première couche de sédiment c_p , son atténuation α_p , la vitesse de compression dans le socle c_s , son atténuation α_s , la vitesse de cisaillement c_{cis} et l'épaisseur h de la première couche de sédiment

Le tableau 1 présente les résultats obtenus avec la méthode HR (optimums, moyennes et écarts types des paramètres sensibles, donc hors atténuation). Les deux dernières

colonnes rappellent les résultats obtenus par la méthode BR et les paramètres issus de la mesure directe in situ disponible. La figure 8 représente la courbe du coefficient de réflexion estimée par la méthode HR.

Tableau 1. Statistiques sur l'application de l'AG (20 individus, 100 générations, 100 répétitions de l'AG) pour la méthode HR, la dernière colonne rappelle les résultats de l'inversion par la méthode BR

	estim. HR	mean	std	borne inf.	borne sup.	estim. BR	in situ
c_p (m/s)	1 530,4	1 534,7	12,4	1 520	1 600	1 579,9	1 588
h (m)	0,51	0,57	0,13	0,1	1	0,54	0,50
c_s (m/s)	2 510,0	2 432,1	242,6	2 000	3 000	1 767,4	1 850
c_{cis} (m/s)	1 605,5	1 600,3	77	100	2 000	na	na

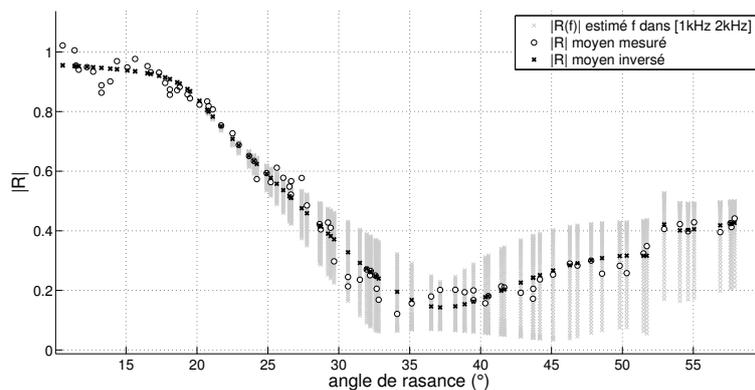


Figure 8. Estimation du coefficient de réflexion en fonction de l'angle de rasance avec la méthode HR (moyen en croix noires et selon la fréquence en croix grises). Le coefficient mesuré est un coefficient moyen sur la bande de fréquence du signal

3.2.3. Comparaison des résultats

L'étude de sensibilité de l'inversion géoacoustique à partir du coefficient de réflexion ((Jensen *et al.*, 1994), (Barazzutti *et al.*, 2013)) montre que les paramètres d'atténuation sont peu sensibles ; les histogrammes de résultats présentés en figure 7 sont en accord avec cette étude. Nous ne faisons donc pas de comparaison sur ces paramètres. La méthode IGA-VMM-HR offre un gain en portée de source et nombre d'émissions exploitables sur une durée d'enregistrement donnée. Sur les données de la campagne ERATO 2011, la durée d'enregistrement utile pour l'inversion est doublée et la portée des sources localisée triplée. La méthode HR proposée permet ainsi d'atteindre des rasances plus petites et de décrire la tranche $[10^\circ-20^\circ]$. Cependant, on note que l'estimation devient également plus bruitée aux angles inférieurs à 15° . Ce bruit peut avoir diverses explications dont les distances source / récepteur grandes devant la

hauteur d'eau, une potentielle variation du profil de célérité, une perte d'information fréquentielle sur le coefficient de réflexion due à l'intégration des niveaux des trajets pour son estimation. Les trajets 4 et 5 (trajets réalisant une réflexion fond et une surface) sont très proches dans les conditions de l'expérimentation avec une différence de temps d'arrivée de l'ordre de $2 \cdot 10^{-3}$ s. Ils ne sont donc pas résolus par les outils de la méthode IGA-VMM-BR (section 2.3). Les outils de déformation temporelle nouvellement proposés permettent, au contraire, une haute résolution de ces trajets. Ces échos sont donc identifiables sur le signal déformé et leur niveau peut être extrait comme ceux du direct et du premier réfléchi fond. Leur exploitation permet ainsi d'enrichir la description de la deuxième partie de la courbe de coefficient, témoin de couches de sédiment plus profondes.

Dans (Barazzutti *et al.*, 2013), le modèle choisi ne comprenait pas de cisaillement. Cela explique, en partie, les résultats très différents sur le socle. Le socle semble mieux décrit et estimé avec une erreur quadratique moyenne de 0,0454 sur l'estimation du coefficient de réflexion moyen. Tout comme le socle estimé par l'ancienne méthode, le socle estimé avec la méthode HR ne correspond pas à la carotte disponible dans la zone. Pour le sédiment, la hauteur estimée est cohérente avec celle estimée par la méthode BR. La vitesse de compression estimée est plus faible. La différence provient d'une pente plus faible du coefficient de réflexion estimé en HR. L'écart à la vérité terrain donnée par la carotte doit être nuancé car on compare une mesure ponctuelle à une estimation sur une pastille de plusieurs centaines de mètres. De plus, nos résultats correspondent à une "vision" du fond par des fréquences comprises en 1 et 2 kHz. Enfin, la zone présente des zones d'affleurement rocheux très réfléchissants, cohérentes avec les paramètres estimés.

4. Discussion et perspectives

Notre schéma d'inversion initial (2013) s'appuyait sur des outils de traitement basiques nécessitant une résolution des multi-trajets sur le spectrogramme. L'étude des performances et la démonstration sur émissions contrôlées ont été faites (Barazzutti *et al.*, 2013) et ont montré que, pour les caractéristiques des signaux émis, la distance limite d'exploitabilité d'une source par cette méthode était de 300 m pour une hauteur d'eau de 100 m. Cela limite les angles de rasance accessibles et donc la capacité de description du fond. Nous proposons l'ajout d'une fonction de séparation haute résolution des échos basée sur des opérateurs de déformation temporelle. La portée est ainsi étendue et, par conséquence, le domaine des rasances couvertes par la nouvelle méthode est également étendu aux faibles rasances ($[10^\circ-15^\circ]$). La déformation temporelle permet de disposer de structures simples facilitant le filtrage de chaque trajet et donc l'extraction des grandeurs requises par le schéma d'inversion. La RI du canal est estimée par application d'un opérateur de déformation temporelle glissante construit à partir de la loi de fréquence instantanée du signal. La méthodologie reste ensuite la même mais c'est le signal déformé, et non plus le signal initial, qui est exploité.

L'étude des performances du schéma d'inversion doté de ces nouveaux outils montre que la localisation de la source est très bonne jusqu'à des distances grandes devant la hauteur d'eau. On accède ainsi à de faibles rasances. L'application de ce nouveau schéma au même jeu de données que pour la méthode BR permet la localisation de la source jusqu'à trois fois plus loin que la méthode initiale avec moins de 13 m d'erreur pour des distances de 500 m. Le temps d'enregistrement utile est également doublé. L'estimation du coefficient de réflexion à l'aide des premiers trajets réfléchis fond permet de décrire l'impact du fond au-delà de la couche superficielle de sédiment. L'inversion du coefficient de réflexion mesuré permet de décrire correctement le sédiment superficiel sur un socle cohérent avec le type de fond présent dans la zone des mesures bien que les résultats ne correspondent pas (pour la deuxième couche) à la mesure ponctuelle *in situ* disponible.

Ce nouveau schéma permet d'exploiter une variété de sources sans limite de pente ni de bande de fréquences (dans la limite de validité de l'approximation de propagation en rayons). L'une des conditions nécessaires aux bonnes performances des méthodes HF et BF est d'avoir des sources isotropes afin que chaque trajet ne voit pas son niveau modulé par l'index de directivité de la source et que cette modulation ne vienne biaiser l'estimation du coefficient de réflexion. Cette hypothèse est vérifiée pour les émissions contrôlées utilisées dans le présent papier, pour les vocalises basse fréquence de mysticètes mais elle n'est pas justifiée dans le cas des sifflements des delphinidés. Dans ce cas, nous avons proposé des pistes (Barazzutti *et al.*, 2012) en cours de développement pour estimer simultanément l'index de directivité de la source, sa position et le coefficient de réflexion. Une perspective envisageable à plus court terme est l'exploitation de vocalises de mysticètes, plus basses fréquences, donc peu voire pas directives et laissant envisageable l'accès aux couches profondes de sédiments. Cependant, l'augmentation de la portée de détection et d'inversion par notre schéma nécessite de revoir les approximations, notamment sur l'invariance du fond et la propagation rectiligne des trajets. Enfin, sur de grandes distances, l'application de la déformation temporelle ne permettra plus de distinguer chaque trajet individuellement mais plutôt des paquets de trajets, ce qui nécessitera des adaptations du schéma.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier le Service hydrographique et océanographique de la Marine pour l'accès aux données de la campagne ERATO 2011 conduite dans le cadre d'un programme financé par la Direction Générale de l'Armement.

Bibliographie

- Aubauer R., Lammers M. O., Au W. W. L. (2000). One-hydrophone method of estimating distance and depth of phonating dolphins in shallow water. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 107, n° 5, p. 2744-2749.
- Barazzutti A., Gervaise C., Sessarego J., Di Iorio L., Stephan Y. (2012). *Estimer l'attitude d'un dauphin à partir d'un seul capteur - premiers résultats*. Poster.

- Barazzutti A., Gervaise C., Stephan Y., Dadouchi F., Sessarego J.-P. (2013). Inversion géoacoustique passive en milieux petits fonds à partir de signaux représentatifs des émissions de cétacés. *Traitement du Signal*, vol. 30, n° 3-4-5, p. 169-194.
- Bonnel J., Thode A. (2013). Using warping processing to range bowhead whale sounds from a single receiver. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, vol. 19, n° 1.
- Bonnel J., Thode A. M., Blackwell S. B., Kim K., Michael Macrander A. (2014). Range estimation of bowhead whale (*balaena mysticetus*) calls in the arctic using a single hydrophone. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 136, n° 1, p. 145-155.
- CE. (2008, 25/06/2008). *Directive 2008/56/ce du parlement europeen et du conseil du 17 juin 2008 établissant un cadre d'action communautaire dans le domaine de la politique pour le milieu marin (directive-cadre "stratégie pour le milieu marin")*. Rapport technique. Parlement Européen.
- CE. (2010, 02/09/2010). *Decision de la commission 2010/477/ue du 1er septembre 2010 relative aux criteres et aux normes methodologiques concernant le bon etat ecologique des eaux marines*. Rapport technique. Parlement Europeen.
- Dadouchi F., Gervaise C., Ioana C., Huillery J., Mars J. I. (2013). Automated segmentation of linear time-frequency representations of marine-mammal sounds. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 134, n° 3, p. 2546-2555.
- Demoulin X., Pelissero L., Stephan Y., Jesus S., Porter M., Coelho E. (2000, July). Estimating equivalent bottom geoacoustical parameters from broadband inversion. In *European conference of underwater acoustics (ecua 2000)*, vol. 1, p. 191-196. Lyon, France.
- Dettmer J., Dosso S. E., Holland C. W. (2008). Joint time/frequency-domain inversion of reflection data for seabed geoacoustic profiles and uncertainties. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 123, n° 3, p. 1306-1317.
- Gervaise C., Barazzutti A., Dadouchi F., Ioana C., Stephan Y. (2011, June). A new scheme to estimate the nature of superficial sediment with dolphin whistles. In *Underwater acoustic measurements (uam 2011)*. Kos, Greece.
- Gervaise C., Kinda B. G., Bonnel J., Stephan Y., Vallez S. (2012). Passive geoacoustic inversion with a single hydrophone using broadband ship noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 131, n° 3, p. 1999-2010.
- Hamilton E. L. (1978). Sound velocity-density relations in sea-floor sediments and rocks. *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 63, n° 2, p. 366-377.
- Harrison C. H., Simons D. G. (2002). Geoacoustic inversion of ambient noise: A simple method. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 112, n° 4, p. 1377-1389.
- Ioana C., Quinquis A. (2004). On the use of time-frequency warping operators for analysis of marine-mammals signals. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, vol. II, p. 605-608.
- Jarrot A., Ioana C., Quinquis A. (2006). An extension of the class of unitary time-warping projectors to discrete-time sequences. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, vol. III, p. 412-415.
- Jensen F. B., Kuperman W. A., Porter M. B., Schmidt H. (1994). Computational ocean acoustics, aip series in modern acoustics and signal processing. *American Institute of Physics, New York*.

- Jones B. D. (2008). Geoacoustic inversion of ocean surface-wave noise with a littoral glider. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 124, n° 4, p. 2521-2521.
- Josso N. (2010). *Underwater environments characterization by motion opportunity sources*. Theses, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG. Consulté sur <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00546875>
- Lurton X., Le Gac J.-C. (2004). The calimero project: Scientific objectives and first at-sea results. In *1st seatech week*. Brest, France.
- Park C., Seong W., Gerstoft P. (2005). Geoacoustic inversion in time domain using ship of opportunity noise recorded on a horizontal towed array. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 117, n° 4, p. 1933-1941.
- Plantevin P., Le Gac J., Auger E., Theuillon G., Stephan Y. (2009). A joint seismo-geoacoustic inversion in shallow water using a subsurface towed sound source. *Journal of Marine Systems*, vol. 78, p. S321-S332.
- Roubi A., S. B., M.A. B., Danielou B., Jouet G. (2009). *Analyse sédimentologique des prélèvements in situ de la campagne calimero 3, rapport final du contrat de recherche 08/cr/0001*. Rapport technique. SHOM-IFREMER.
- Siderius M., Harrison C. H., Porter M. B. (2006). A passive fathometer technique for imaging seabed layering using ambient noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 120, n° 3, p. 1315-1323.
- Southall B. L., Bowles A. E., Ellison W. T., Finneran J. J. (2007). Marine mammal noise exposure criteria: initial scientific recommendations (2007) [Scientific]. *Aquatic Mammals*, vol. 33, p. 411-522. (and Gentry, Roger L. and Greene Jr., Charles R. and Kastak, David and Ketten, Darlene R. and Miller, James H. and Nachtigall, Paul E. and Richardson, W. John and Thomas, Jeanette A. and Tyack, Peter L)
- Stotts S. A., Knobles D. P., Koch R. A., Grant D. E., Focke K. C., Cook A. J. (2004). Geoacoustic inversion in range-dependent ocean environments using a plane wave reflection coefficient approach. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 115, n° 3, p. 1078-1102.
- Theuillon G., Stephan Y., Pacault A. (2008). High-resolution geoacoustic characterization of the seafloor using a subbottom profiler in the Gulf of Lion. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 33, n° 3, p. 240-254.
- Thode A. M., D'Spain G. L., Kuperman W. A. (2000). Matched-field processing, geoacoustic inversion, and source signature recovery of blue whale vocalizations. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 107, n° 3, p. 1286-1300.
- Traer J., Gerstoft P., Hodgkiss W. S. (2011). Ocean bottom profiling with ambient noise: A model for the passive fathometer. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 129, n° 4, p. 1825-1836.
- Vallez S., Gervaise C., Khenchaf A., Stephan Y. (2006). Inversion géoacoustique d'un canal très petits fonds à partir des navires en mouvements. *Traitement du Signal*, vol. 25, n° 151-164.

Reçu le 21/05/2015
Accepté le 17/12/2015