



Inversion géoacoustique passive en milieux petits fonds à partir de signaux représentatifs des émissions de cétacés

Amélie Barazzutti, Cedric Gervaise, Yann Stéphan, Florian Dadouchi,
Jean-Pierre Sessarego

► To cite this version:

Amélie Barazzutti, Cedric Gervaise, Yann Stéphan, Florian Dadouchi, Jean-Pierre Sessarego. Inversion géoacoustique passive en milieux petits fonds à partir de signaux représentatifs des émissions de cétacés. *Traitement du Signal*, 2013, 30 (3-4-5), pp.169-194. hal-00941164

HAL Id: hal-00941164

<https://hal.science/hal-00941164>

Submitted on 3 Feb 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Inversion géoacoustique passive en milieux petits fonds à partir de signaux représentatifs des émissions de cétacés

Amélie Barazzutti¹, Cédric Gervaise², Yann Stéphan³,
Florian Dadouchi⁴, Jean-Pierre Sessarego⁵

1. DGA IP/ASC/ENV et LMA

7-9 rue des Mathurins

F-92221 Bagneux

amelie.barazzutti@intradef.gouv.fr

2. Chaire CHORUS, fondation Grenoble INP, GIPSA-LAB, Grenoble INP et CNRS

11 rue des Mathématiques, Domaine Universitaire

BP 46 F-38402 Saint Martin d'Heres cedex

cedric.gervaise@gipsa-lab.grenoble-inp.fr

3. SHOM

13 rue du Chatellier

F-29200 Brest

yann.stephan@shom.fr

4. GIPSA-LAB, Grenoble INP et CNRS

11 rue des Mathématiques, Domaine Universitaire

BP 46 F-38402 Saint Martin d'Heres cedex

florian.dadouchi@gipsa-lab.grenoble-inp.fr

5. LMA et CNRS

31 chemin Joseph-Aiguier

F-13402 Marseille cedex 20

sessarego@lma.cnrs-mrs.fr

RÉSUMÉ. Cet article présente un procédé d'inversion géoacoustique passif à partir de signaux représentatifs de vocalises de mammifères marins et d'un unique hydrophone en milieux petits fonds. Notre méthode utilise au mieux la propagation en multitrajets des vocalises et leur signature temps-fréquence pour extraire un observable permettant d'estimer par inversion les propriétés du fond marin. Il s'applique aux vocalises présentant au moins trois trajets résolus (direct, fond, surface) ce qui implique une portée d'environ 300 m autour de l'hydrophone pour des hauteurs d'eau de 100 m. A partir d'outils temps-fréquence, chaque émission est localisée

et permet d'estimer le couple (rasance, coefficient de réflexion) lui correspondant. Le cumul d'un ensemble d'émissions permet de mesurer une courbe du coefficient de réflexion en fonction des angles de rasance. Cette donnée alimente un algorithme d'inversion géoacoustique mis en œuvre à travers un algorithme génétique. Dans cet article, nous détaillons la théorie de la méthode et nous étudions ses performances. Nous démontrons la validité de la méthode sur des signaux génériques réels émis par une source contrôlée dans le Golfe du Lion (rampes de fréquences de 1 kHz à 2 kHz de durée 10 ms). Ces données permettent de valider la méthode sur des signaux aux caractéristiques très proches de celles de vocalises de mysticètes (baleines à bosse par exemple). Le cas des sifflements de delphinidés (ex : dauphins communs), plus hauts en fréquence, est également abordé.

ABSTRACT. *This paper presents a geoacoustic inversion scheme relying on the inversion of signal close to marine mammals vocalizations on a single hydrophone in shallow waters. Our method makes best use of the multipath propagation of vocal calls and of their time-frequency signature to extract an observable used by the inversion algorithm to estimate sea bottom features. This method requires vocalizations with at least three resolved paths (direct, first bottom reflected and first surface reflected paths), which implies a 300 meter range around the hydrophone for 100 meter water depth. Using time-frequency tools, each emitted call is localized and processed to provide its corresponding couple (grazing angle, reflexion coefficient). Through the processing of several vocalizations, we get a curve of the reflexion coefficient according to grazing angles. This curve feeds a geoacoustic inversion algorithm run with a genetic algorithm. In this paper, we describe both the theory and performances of our method. We demonstrate its validity on generic real signals emitted through a controlled acoustic source in the Gulf of Lion (10 ms duration chirps with [1 kHz-2 kHz] bandwidth). An application on delphinids higher frequency calls is also mentioned but the inversion step for those signals will need further functions to assess and correct the directivity losses.*

MOTS-CLÉS : *acoustique passive, inversion, géoacoustique, mammifères marins.*

KEYWORDS: *passive acoustics, inversion, geoacoustics, marine mammals.*

DOI:10.3166/TS.30.169-194 © 2013 Lavoisier

Extended abstract

Context

The geoacoustic inversion aims at giving an estimate of the oceanographic properties impacting the acoustic propagation, such as the sea bottom features (number of layers, sound speed in the sediment, density, etc.). 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 at 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. This paper presents a geoacoustic inversion

scheme relying on the inversion of signal close to marine mammals vocalizations on a single hydrophone in shallow waters. Our method makes best use of the multipath propagation of vocal calls and of their time-frequency signature to extract an observable used by the inversion algorithm to estimate sea bottom features.

Method

The scheme needs a set of vocalizations with at least three resolved paths (direct, first bottom reflected and first surface reflected paths). That implies any source in a disc of 300 meter radius around the hydrophone for 100 meter water depth. Each emitted call is localized and processed using time-frequency tools to provide its corresponding couple (grazing angle, reflection coefficient). Through the processing of several vocalizations, we get a curve of the reflection coefficient according to grazing angles. This curve feeds a geoacoustic inversion algorithm run with a genetic algorithm. Both the theory and performances of our method is discussed in the paper.

Experiment and results

In the Gulf of Lion (site CALIMERO) - where the ground truth is well known - 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 dBrel. $1\mu Pa$, 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 the scheme described previously. The first step was to localize the source and then to estimate the reflection coefficient for the associated grazing angle. A good estimation of the source location was performed until 300 m. Above this limit - which was the limit anticipated thanks to the performances study - the paths are not resolved anymore so that the source can't be localized using our method. The direct (reference) and bottom reflected paths levels are used to estimate a reflection coefficient for each signal, leading to a curve of the reflection coefficient according to grazing angles along the transect. This observable covers grazing angles from 15° to 57° and feed a genetic algorithm. The inverted parameters are the sound speeds, densities, attenuations and thicknesses for a geoacoustic model composed of two layers of sediment. The results for the first layer correspond to the ground truth contrary to those of the second layer that are not well estimated because of both measurement dispersion and a theoretically weaker accuracy of the inversion scheme for the deepest layer.

Conclusion

The passive inversion scheme has been evaluated and validated on controlled emission in a known environment. The emissions are similar to vocalizations of Humpback whales. The application of the scheme on delphinids requires further function such as directivity loss corrections.

1. Introduction - Objectifs

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 propriétés recherchées sont notamment le nombre de couches le constituant, leur épaisseur, les densités, les vitesses et atténuations de compression du son, etc. La plupart des méthodes d'inversion géoacoustique reposent sur l'inversion d'émissions actives (émissions volontaires et contrôlées) propagées entre un émetteur et un récepteur.

Si les techniques actives assurent contrôle et connaissance de la source, elles ont néanmoins des inconvénients qui incitent de plus en plus la communauté scientifique à se tourner vers des alternatives passives. Pour les applications militaires, émettre volontairement signifie être entendu, ce qui nuit à la discrétion des opérations. Les émissions actives sont considérées comme une pollution acoustique supplémentaire et sont fortement suspectées d'être dangereuses pour la faune marine, causant des perturbations pouvant aller de la simple gêne jusqu'à des pertes définitives d'audition (Southall *et al.*, 2007). Ainsi, la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (CE, 2008) et (CE, 2010) définit, parmi un ensemble de descripteurs du bon état écologique, le descripteur 11a qui traduit la pollution anthropique sur l'environnement marin en un ensemble d'indicateurs et a pour objectif de garantir que l'introduction d'énergie de sources sonores sous-marines s'effectue à des niveaux qui ne nuisent pas au milieu marin. Enfin, les techniques actives nécessitent de déployer des moyens lourds et consommateurs d'énergies, ce qui est souvent rédibitoire lors d'une observation long terme.

Les méthodes passives représentent donc les alternatives idéales pour pallier les points faibles des concepts actifs. Elles consistent à estimer les propriétés acoustiques du milieu sans émettre mais en utilisant les sources acoustiques d'opportunité déjà présentes, ce qui garantit la discrétion acoustique et le respect de l'environnement marin. Les méthodes passives, pour lesquelles seuls les récepteurs sont à déployer, permettent d'étudier des régions peu accessibles, hostiles (ex : conditions climatiques extrêmes) ou même en contexte non permissif. Le matériel mis en œuvre peut consister en plusieurs hydrophones en réseau comme dans (Gervaise *et al.*, 2007) et (Simard *et al.*, 2010) ou un unique hydrophone comme dans (Gervaise *et al.*, 2011) où les dauphins communs (*Delphinus Delphis*) sont localisés par différences de temps d'arrivée entre les multitrajets. Toutefois, le challenge est d'atteindre, avec les sources d'opportunité à notre disposition, des performances équivalentes à celles des méthodes actives.

L'océan est loin d'être un monde de silence. Les sources d'opportunité sont nombreuses et sont autant de sources potentiellement exploitables par des méthodes d'inversion géoacoustique passive. Ainsi, l'utilisation du bruit ambiant a été largement étudiée (e.g. (Siderius *et al.*, 2006), (Harrison, Simons, 2002)). Le bruit de surface induit par les vagues et utilisé comme source directionnelle naturelle fait également l'objet de nombreuses publications (e.g. (Traer *et al.*, 2011), (Jones, 2008)). Des schémas d'inversion exploitant le bruit rayonné par les bateaux (coopérants ou non) ont

également été proposés notamment par (Gervaise *et al.*, 2012) ou (Park *et al.*, 2005). Les vocalises de mammifères marins sont quant à elles encore rarement exploitées dans le domaine de l'inversion géoacoustique ((Thode *et al.*, 2000), (D'Spain *et al.*, 1995) ou encore (Bonnel *et al.*, 2012)). Les cétacés offrent pourtant une grande diversité de signaux tant sur le plan des fréquences que des formes d'onde. On distingue notamment des impulsions large bande (clics), des modulations de fréquences (vocalises) ou encore des pavés temps-fréquence (grognements, tons pulsés). Les bandes de fréquences des émissions de mammifères marins couvrent un large spectre fréquentiel depuis les vocalises de baleines bleues de quelques dizaines de Hz (en limite du spectre auditif de l'Homme) jusqu'aux clics de certains odontocètes atteignant plusieurs centaines de kHz (cf. figure 1 inspirée de (Mellinger *et al.*, 2007)). Une illustration sur le cas du dauphin commun (*Delphinus delphis*) est donnée dans la figure 2.

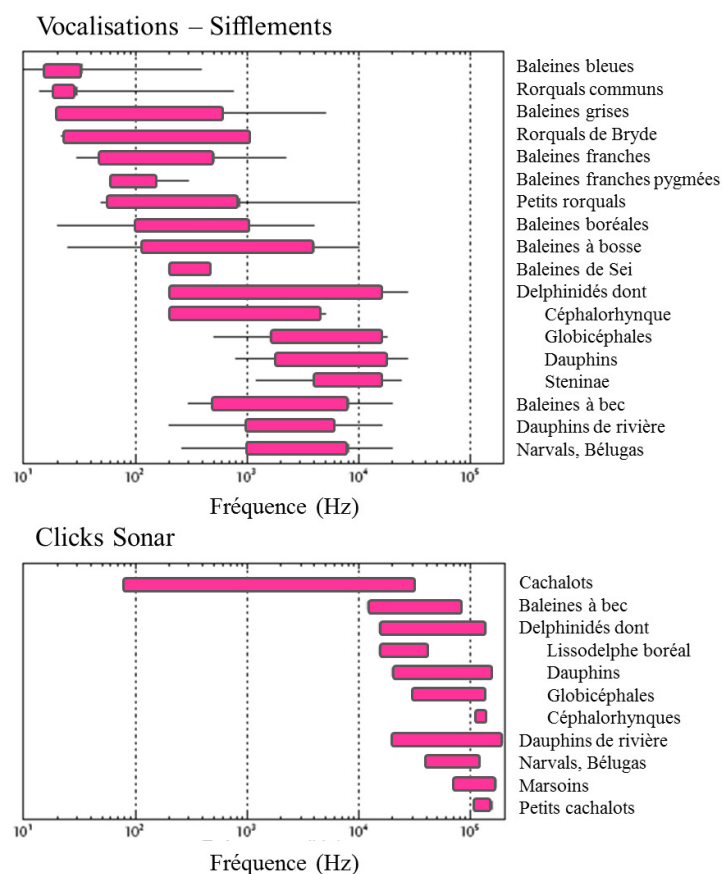


Figure 1. Principaux signaux émis par les cétacés et leur support fréquentiel qui détermine la portée (100 Hz : 50 à 100 kilomètres, 50 kHz : 200 mètres). Figure construite à partir de Mellinger *et al.*, 2007

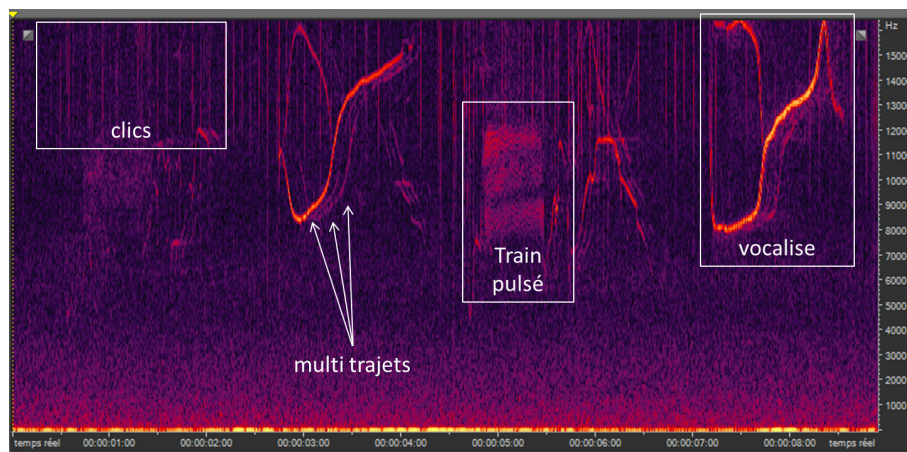


Figure 2. Vocalises de dauphins communs issues des données de la campagne ERATO 2009

La première raison de l'exploitation des signaux de cétacés par les chercheurs est la localisation et le *tracking* de mammifères marins pour l'étude et la protection des espèces (nombre, répartitions, alimentation, éducation des jeunes, migration, etc. (Zimmer, 2011)). La littérature est riche sur ce thème pour un grand nombre d'espèces et pour des signaux variés. Ainsi (Nosal, Frazer, 2007) proposent une méthode de suivi de trajectoire 3D et de l'orientation spatiale de cachalots (*Physeter macrocephalus*) à partir des clics enregistrés sur 5 hydrophones ; (Roy *et al.*, 2010) suivent la position de Bélugas (*Delphinapterus leucas*) à partir des clics enregistrés sur un réseau d'hydrophones dans le Saint-Laurent. (Simard *et al.*, 2010) estiment la densité de Bélugas présente à partir des vocalises observées. Toutes ces méthodes contribuent à ce qu'on appelle le monitoring par acoustique passive (PAM).

Les méthodes de localisation par acoustique passive permettent pourtant de se rapprocher de la situation de départ des concepts actifs pour lesquels la configuration source-récepteur est connue. Le mammifère marin, une fois localisé, devient une source acoustique potentiellement exploitable par des méthodes d'inversion géoacoustique passive, alternatives discrètes et écologiques. Parmi les cas d'exploitation de signaux biologiques pour l'inversion géoacoustique, on observe là encore une diversité des espèces et types de signaux. Citons (D'Spain *et al.*, 1995) qui exploitent la dispersion modale de clics atypiques très basses fréquences de rorqual commun (*Balaenoptera physalus*) pour estimer simultanément la position de la source et la vitesse de compression dans le fond. (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 des modulations de fréquences (signal et harmonique entre 10 Hz et 70 Hz) et des tons pulsés (durée d'environ 15 sec, bande [10 Hz-130 Hz]), 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. (Bonnell *et al.*, 2012) réalisent quant à eux l'inversion des paramètres d'environnement par inversion des dispersions de modes sur des signaux de baleines à bosse (*Megaptera novaeangliae*, < 400 Hz) sur un unique hydrophone.

La méthode que nous proposons consiste à réaliser une inversion géoacoustique passive à partir de vocalises de cétacés et d'un unique hydrophone en milieux petits fonds. Notre méthode peut être considérée comme une déclinaison passive des méthodes de (Demoulin *et al.*, 2000) et (Plantevin *et al.*, 2009) développées dans un contexte actif. (Demoulin *et al.*, 2000) présentent une méthode monocapteur basée sur la réponse impulsionnelle du canal à des modulations de fréquences. Cette réponse est inversée (durée de la réponse et amplitudes des réfléchis fond) pour estimer les paramètres géoacoustiques du fond. (Plantevin *et al.*, 2009) proposent une méthode petits fonds à partir d'émissions, par une source basse fréquence, de modulations de fréquences enregistrées sur un unique hydrophone. Les amplitudes des échos sont utilisées pour fournir une courbe du coefficient de réflexion en fonction des angles de rasance, observable pour son algorithme d'inversion géoacoustique. Tout comme (Demoulin *et al.*, 2000), notre procédé exploite les multitrajets et la signature temps-fréquence de modulations de fréquences, enregistrées sur un unique capteur. Les niveaux des trajets réfléchis fond d'un ensemble de vocalises sont exploités afin d'estimer le coefficient de réflexion qui alimente notre algorithme d'inversion (Plantevin *et al.*, 2009). Néanmoins, contrairement à ces méthodes actives, nous utilisons des sources d'opportunité donc non contrôlées.

Dans le présent papier, la section 2 détaille le procédé d'inversion géoacoustique proposé, en particulier le modèle de mesures et les deux grandes étapes du procédé que sont l'étape de traitement du signal individuel de chaque sifflement et l'étape d'inversion géoacoustique. Le traitement d'un ensemble de sifflements permet d'obtenir une estimée du coefficient de réflexion en fonction des angles de rasance, donnée d'entrée de notre algorithme d'inversion. La section 3 présente l'analyse de la sensibilité du procédé d'inversion aux différents paramètres géoacoustiques recherchés. L'évaluation de la sensibilité est effectuée sur un modèle de fond constitué d'une couche de sédiment sur un socle semi-infini, modèle *a priori* de la zone de campagne à la mer dont les résultats sont présentés en section 4. La campagne ERATO 2011 nous a fourni un jeu de données de difficulté intermédiaire où une émission active recopiant une vocalise de mammifère marin est transmise dans un environnement réel puis traitée par notre méthode comme une vocalise réelle. Ces données permettent de valider l'intégralité de la méthode. Les deux dernières sections sont consacrées à la discussion et à la conclusion.

2. Description du procédé d'inversion

Nous proposons un procédé d'inversion géoacoustique passive à partir des modulations de fréquences émises par les cétacés. Ce procédé utilise un unique capteur en exploitant au mieux la propagation multitrajet et la signature temps-fréquence des

signaux émis. La captation et le traitement d'une succession de sifflements permet d'extraire l'observable utilisée pour l'inversion : la courbe de coefficient de réflexion d'une onde plane à l'interface eau-sédiment obtenue pour une succession d'angle de rasance. L'inversion proprement dite consiste à faire coller un modèle à cette observable.

La première étape dite « étape de traitement du signal d'une émission individuelle » (cf. figure 5) consiste à exploiter la représentation temps-fréquence du signal reçu pour évaluer le coefficient de réflexion « onde plane » à l'interface eau-sédiment pour une rasance particulière. Pour cela, nous supposons i) que le signal source est une modulation de fréquences, ii) que les conditions de propagation fournissent trois trajets mesurables à la réception (trajet direct, premier réfléchi surface et premier réfléchi fond), 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). Sous ces hypothèses dont le domaine de validité est discuté dans la section 5, le modèle de mesure reçu est le suivant :

$$m(t) = \frac{1}{Rd} e^{(t-Rd/c)} - \frac{1}{Rs} e^{(t-Rs/c)} + \frac{1}{Rf} R(\theta) e^{(t-Rf/c)} + b(t) \quad (1)$$

où Rd , Rs et Rf sont respectivement les longueurs du trajet direct, réfléchi surface et réfléchi fond, c est la célérité du son dans l'eau, θ est la rasance du réfléchi fond, $R(\theta)$ est le coefficient de réflexion, $e(t)$ est le signal émis, $b(t)$ est le bruit.

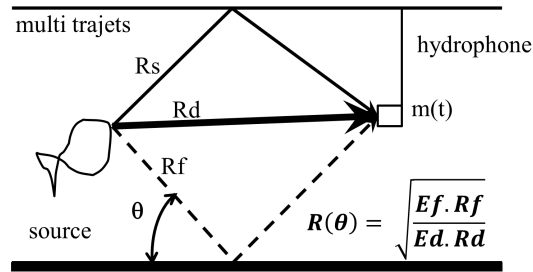


Figure 3. En première approximation, la propagation se fait le long de lignes droites et suivant trois trajets. E_d (resp. E_f) est le niveau du trajet direct (resp. fond) intégré sur la bande de fréquences du signal (μPa^2)

A partir de cette mesure, nous formons sa représentation temps-fréquence qui met bien en avant l'existence des trois trajets. Nous exploitons cette représentation temps-fréquence en appliquant un outil de tracking des pistes temps-fréquence. A terme, le tracker temps-fréquence-phase, que nous avons développé et testé sur les vocalises, sera utilisé. Ses détails en termes d'architecture, implémentation et performances peuvent être trouvés dans (Ioana, Gervaise *et al.*, 2010) et (Ioana, Jarrot *et al.*, 2010). La figure 4 illustre le tracking sur une vocalise exploitable par notre procédé d'inversion. D'autres outils plus ou moins complexes, automatiques et performants peuvent

être utilisés suivant les sensibilités et compétences de chacun. (Lampert, O’Keefe, 2010) en proposent une synthèse.

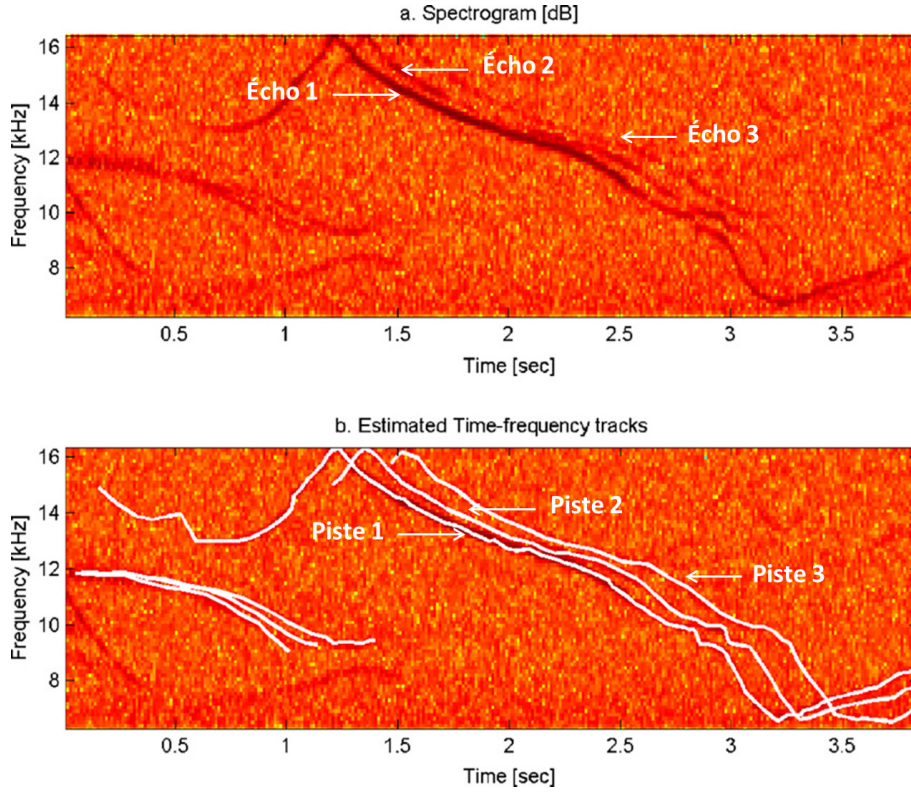


Figure 4. Prétraitement temps-fréquence-phase sur une vocalise de dauphin commun. La figure du haut montre les trois premiers échos de la vocalise. La figure du bas montre les pistes estimées par l’outil de prétraitement

L’application des outils temps-fréquence-phase permet de prétraiter les données et d’obtenir les observables nécessaires à l’inversion :

- les temps d’arrivée relatifs des échos direct (τ_d), réfléchi fond (τ_f) et réfléchi surface (τ_s) ;
- l’énergie de chaque écho (direct E_d , réfléchi fond E_f , réfléchi surface E_s).

A partir des temps d’arrivée, nous localisons la source en appliquant la méthode décrite dans (Aubauer *et al.*, 2000). Connaissant la position de la source, nous sommes alors capables, par des critères géométriques simples, d’estimer les longueurs des trajets acoustiques R_d , R_f et R_s ainsi que l’angle de rasance θ . Grâce aux pistes temps-fréquence de chaque arrivée, nous pouvons en estimer l’énergie en intégrant le spectrogramme le long de la piste. L’énergie des échos est corrigée des pertes de transmission par une simple multiplication avec la longueur estimée de chaque rayon. Le module du

coefficient de réflexion est estimé en calculant la racine carré du rapport entre l'énergie du réfléchi fond corrigée des pertes de transmission et l'énergie du trajet direct corrigée des pertes de transmission. Finalement l'étape dite « étape de traitement du signal d'une émission individuelle » fournit pour chaque sifflement une estimée du couple $(\theta, R(\theta))$ associé. En utilisant les longues périodes d'écoute permises par les enregistreurs acoustiques autonomes, l'étape 1 est appliquée à un nombre conséquent (N_s) de sifflements pour produire une collection C de coefficients de réflexion pour différentes rasances θ , $C = \{\theta(i), R(\theta(i)), i \in \{1 : N_s\}\}$.

Dans une seconde étape dite « étape d'inversion » (cf. figure 5), la collection C des coefficients de réflexion sert d'observable pour estimer les paramètres géoacoustiques du fond. Pour cela, nous choisissons une structure sédimentaire (nombre de couches, fluide ou élastique) paramétrée par le vecteur de propriétés α . Nous produisons un modèle théorique $R_t(\theta, \alpha)$ du coefficient de réflexion de la structure à partir de (Gervaise *et al.*, 2011). Les paramètres du modèle géoacoustique sont estimés par minimisation de l'erreur quadratique moyenne entre les collections de coefficients de réflexion mesurés et modélisés :

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

En fonction de la structure sédimentaire du fond, l'erreur quadratique moyenne peut présenter un seul minimum ou des minima secondaires (cf. section 4). La recherche de l'optimum α_{opt} est effectuée par l'algorithme Levenberg-Marquard dans le cas d'un minimum global et par algorithme génétique dans le cas de l'existence de plusieurs minima secondaires. La figure 5 résume le schéma d'inversion.

3. Etude du conditionnement du procédé d'inversion

Nous étudions le conditionnement de notre schéma d'inversion à partir d'un modèle géoacoustique simulé proche de celui de la zone d'ERATO 2011 (cf. section 4). Pour cela nous supposons un fond constitué d'une couche de sédiment posée sur un socle semi-infini.

La couche sédimentaire possède les propriétés suivantes :

- vitesse de compression dans le sédiment $c_p = 1677(m/s)$;
- densité du sédiment $\rho_p = 1.8(kg/m^3)$;
- l'atténuation de compression notée $\alpha_p = 0.59(dB/\lambda)$;
- l'épaisseur du sédiment (pour les sédiments intermédiaires) notée $h = 50(cm)$.

Le socle semi-infini possède les propriétés suivantes :

- vitesse de compression dans le socle $c_s = 3000(m/s)$;
- vitesse de cisaillement $c_{cis} = 1600(m/s)$;
- densité du socle $\rho_s = 2.4(kg/m^3)$;

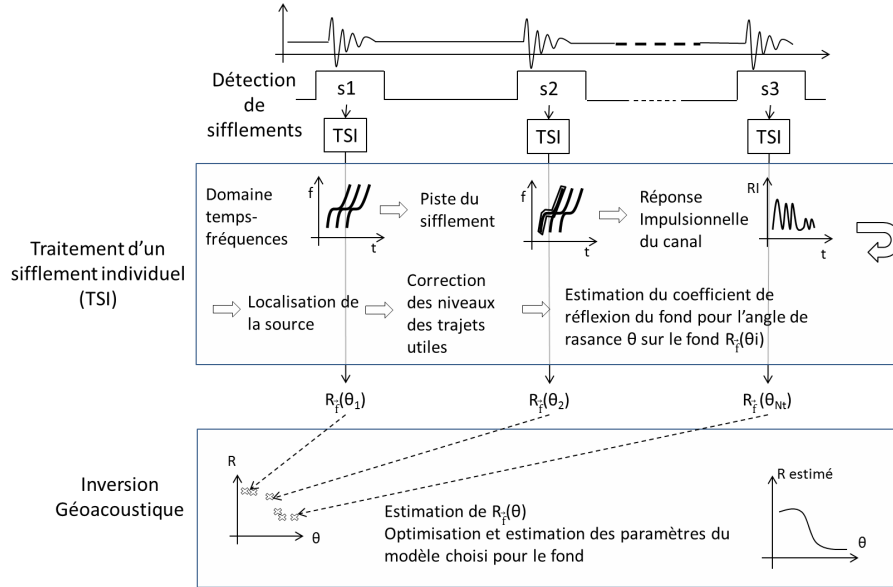


Figure 5. Architecture du schéma d'inversion avec une étape de traitement du signal d'une émission individuelle puis une étape d'inversion géoacoustique à partir de N_t émissions traitées

- l'atténuation de compression notée $\alpha_s = 0.5(dB/\lambda)$;
- atténuation de cisaillement (pour un socle dur) notée $\alpha_{cis} = 0.4(dB/\lambda)$.

L'ensemble de ces paramètres constitue le vecteur α_{opt} dont dépend le coefficient de réflexion du fond. Pour la collection de rasances, nous supposons posséder $N_t=50$ mesures pour des rasances comprises entre 15° et 57° . Afin d'étudier le conditionnement du procédé d'inversion, nous calculons l'erreur quadratique moyenne entre la collection des coefficients de réflexion générée avec les propriétés α_{opt} et la collection de coefficients générée avec les propriétés α . Le vecteur α correspond au vecteur α_{opt} dont un ou deux des paramètres sont modifiés pour évaluer l'impact sur le résultat de l'inversion de l'erreur sur ce(s) paramètre(s). Les variations de l'erreur quadratique sont évaluées paramètre par paramètre (cf. figure 6) puis par couple de paramètres (cf. figure 7).

La figure 6 présente l'erreur quadratique moyenne commise sur le coefficient de réflexion lorsqu'un des paramètres x est mal estimé de Δx . Pour chaque paramètre, l'erreur sur le coefficient de réflexion est tracée en fonction de l'écart du paramètre x à sa vraie valeur x_{opt} (écart en pourcentages entre $\pm 50\%$). Plus l'erreur est importante pour de petites erreurs sur x , plus le procédé est sensible au paramètre et donc meilleure sera l'estimation de ce paramètre par le procédé. On constate que les paramètres les plus sensibles sont les paramètres du sédiment, notamment la vitesse de compression dans le sédiment c_p , sa densité ρ_p et son épaisseur h . Vient ensuite

l'atténuation de compression dans le sédiment α_p . Les paramètres relatifs au socle semi-infini sont les paramètres les moins sensibles à l'exception de la vitesse de cisaillement dans le socle c_{cis} . Les paramètres d'atténuation de compression dans le socle α_s et d'atténuation de cisaillement α_{cis} sont les paramètres les moins sensibles et seront plus difficiles à estimer par la méthode. Les erreurs évoluent de façon monotone (croissantes lorsque l'écart à la valeur vraie augmente) à l'exception de celle du paramètre épaisseur de sédiment qui oscille dès 5 % d'erreur sur l'estimation de l'épaisseur h . Ainsi les écarts d'estimation de l'épaisseur de 2 % et 20 % par rapport à sa valeur vraie induisent la même erreur sur le coefficient de réflexion. Ces minima locaux indiquent que, même si l'épaisseur de sédiment fait partie des paramètres les plus sensibles, elle reste un paramètre difficile à estimer si on s'éloigne trop de sa valeur vraie.

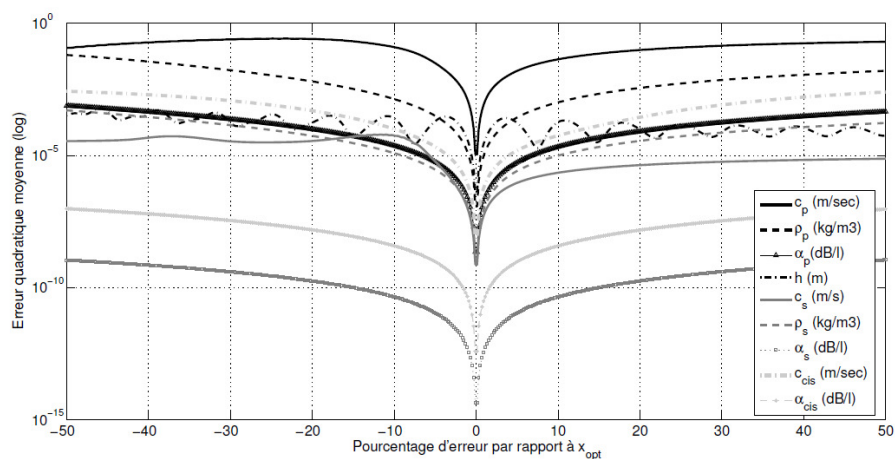


Figure 6. Critères monoparamètre du conditionnement du problème d'inversion pour un fond constitué d'un sédiment sur socle dur. En abscisse, l'écart en pourcentage entre la valeur supposée estimée pour le paramètre et la valeur vraie du paramètre. En ordonnée, l'erreur quadratique moyenne sur le coefficient de réflexion pour l'écart du paramètre à la valeur vraie

La figure 7 montre la sensibilité du modèle pour chaque couple de paramètres lorsque tous les autres paramètres sont connus. L'encadré A regroupe les couples de paramètres propres à la couche de sédiment. L'encadré C regroupe les couples de paramètres propres au socle semi-infini. L'encadré B correspond aux couples croisés. L'encadré B présente des profils horizontaux pour la plupart des couples, ce qui montre que l'estimation des paramètres de la couche de sédiment est insensible aux variations des paramètres du socle semi-infini. Dans A et C, on observe des motifs droits (horizontaux ou verticaux) pour les atténuations de compression α_{sed} , α_{socle} et de cisaillement α_{cis} en regard des paramètres de vitesses de compression c_{sed} , c_{socle} , de cisaillement c_{cis} et de densités ρ_{sed} , ρ_{socle} . Les paramètres α_{sed} , α_{socle} et α_{cis} seront difficiles à estimer même avec une bonne estimation des autres paramètres. Dans A et C, les couples (densité-vitesse de compression) décrivent des motifs obliques, tant pour le

sédiment que pour le socle, indiquant une corrélation entre ces paramètres. Dans C, on observe que les motifs liant le cisaillement aux autres paramètres du socle sont concentrés. Le paramètre c_{cis} de vitesse de cisaillement est un paramètre relativement sensible.

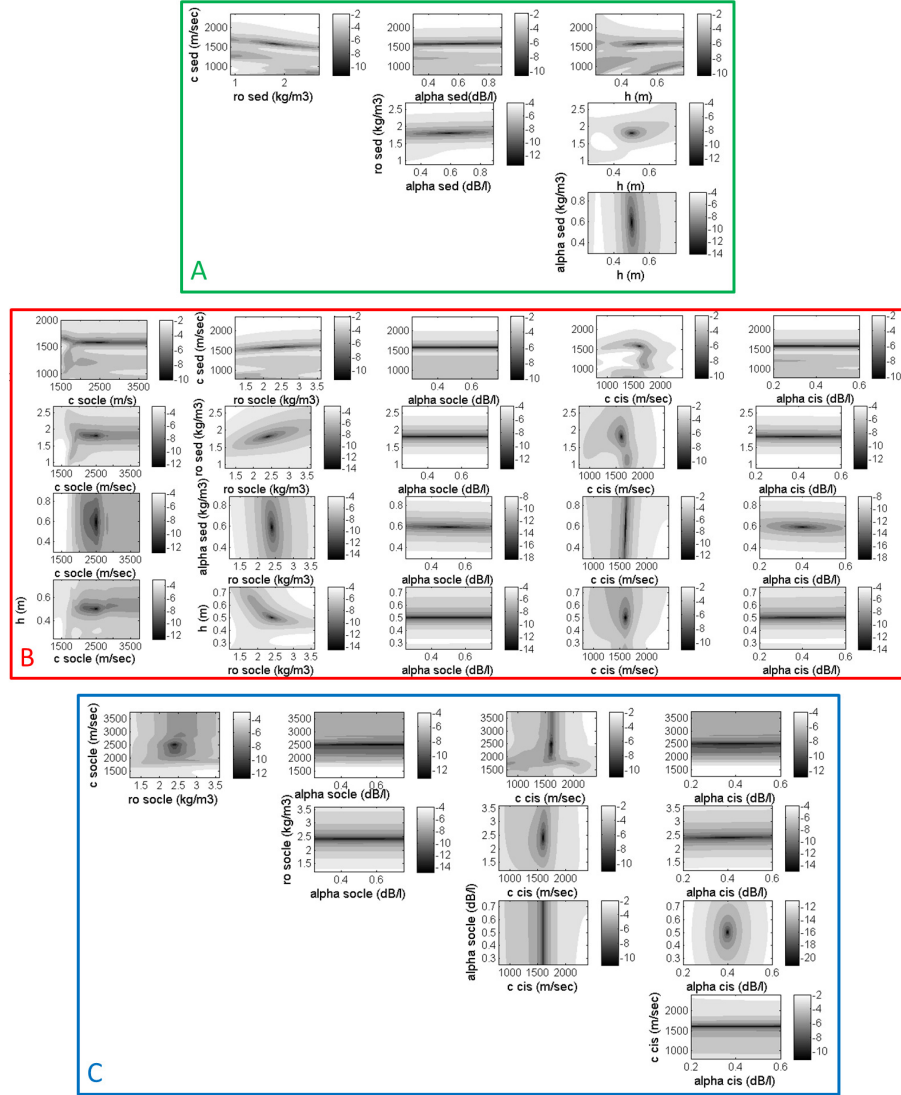


Figure 7. Critères biparamètres pour le conditionnement du problème d'inversion pour un fond constitué d'un sédiment sur socle dur. Les encadrés permettent d'identifier les critères biparamètres propres à chacune des couches (A pour le sédiment et C pour le socle) et les critères croisés (B)

L'examen de l'évolution du critère d'erreur en fonction des paramètres pris individuellement (cf. figure 6) permet de démontrer que :

1. les paramètres les plus sensibles sont la célérité, la densité et l'épaisseur de la couche supérieure de sédiment ;
2. le critère présente des minima secondaires dans sa dépendance à l'épaisseur de la couche supérieure sédimentaire, ce qui rend l'estimation plus difficile malgré la sensibilité ;
3. les célérités et la densité du socle restent des paramètres sensibles ;
4. les propriétés des deux couches sont peu dépendantes l'une de l'autre ;
5. les atténuations sont des paramètres peu sensibles.

L'examen de l'évolution du critère d'erreur pour des couples de paramètres (cf. figure 7) confirme la hiérarchie de sensibilité entre paramètres et montre une légère corrélation pouvant apparaître entre la densité et la célérité de compression de la couche sédimentaire et entre la densité et la célérité de compression du socle ainsi qu'entre les atténuations de compression et de cisaillement du socle (paramètres individuellement peu sensibles).

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

4.1. 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 programmes 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 sur le système ancré (cf. figure 8). Ce système, appelé TELEMAQUE, 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 (cf. figure 9).

La zone de travail est une zone dite de référence CALIMERO-B, ayant fait l'objet de levés hydro-océanographiques intensifs dans le cadre du projet CALIMERO⁴ mené conjointement par le SHOM et l'IFREMER (Lurton, Le Gac, 2004), (Theuillon *et al.*,

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

2. Service Hydrographique et Océanographique de la Marine.

3. Programme d'études amont de la Direction Générale de l'Armement - Système Temps réel d'Evaluation Rapide de l'Environnement Océano-acoustique.

4. CALibration des Méthodes de Reconnaissances des fonds Océaniques.

2008). À l'endroit de l'antenne acoustique, les prélèvements par carroliers 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 1580 m/s) sur un sous-bassement sableux consolidé (vitesse de compression de 1850 m/s).

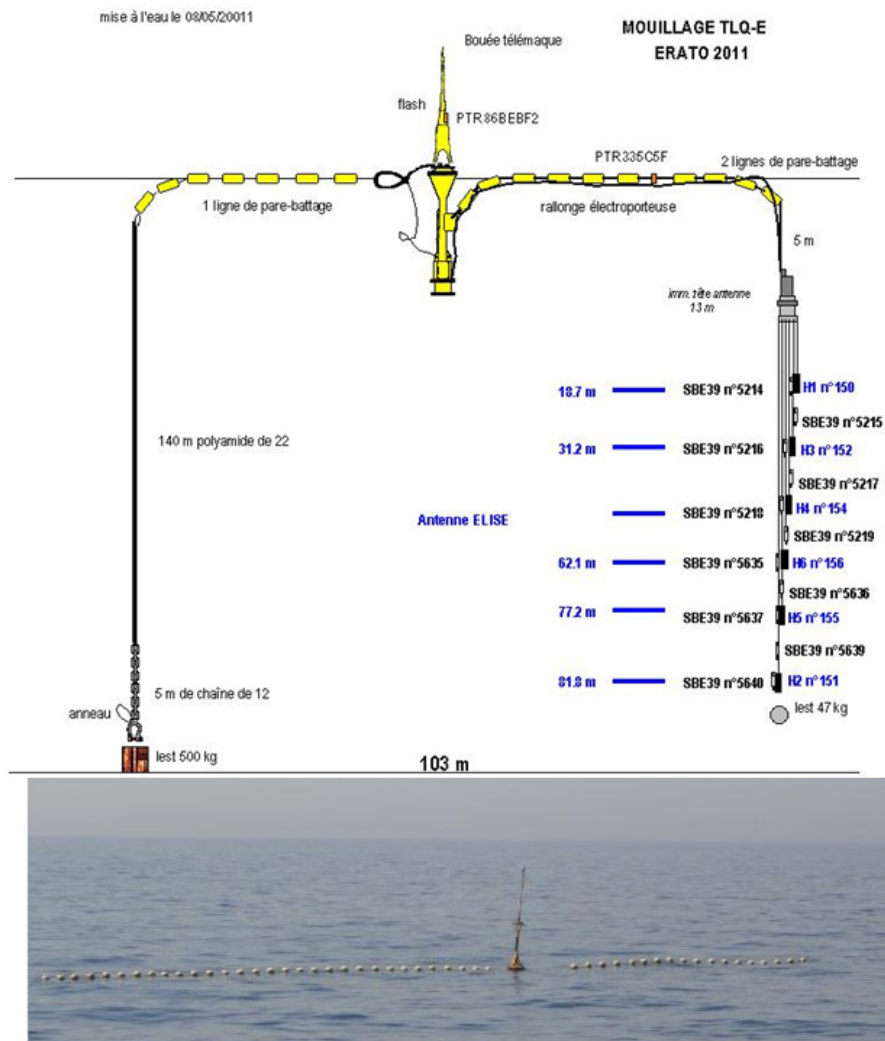


Figure 8. L'antenne d'hydrophones et la bouée TELEMAQUE

4.2. Scénario AMELOCHE

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].

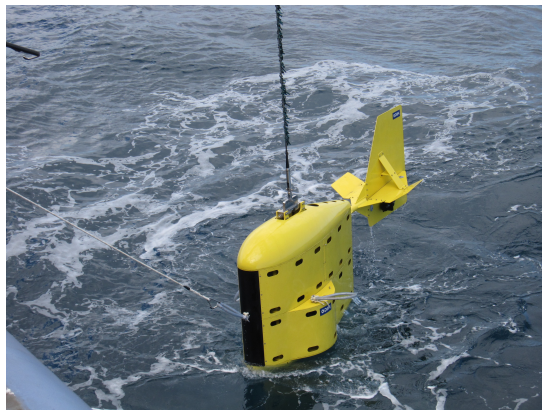


Figure 9. La source acoustique STEREO

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 rel. $1 \mu Pa^2$ 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 CPA⁵ correspond à une distance source/antenne de 140 m.

La figure 10 présente un exemple du signal reçu par l'hydrophone n° 6 de l'antenne située à 60 m de profondeur. On observe 5 trajets résolus.

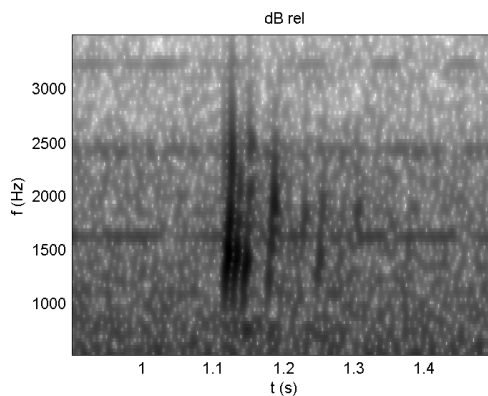


Figure 10. Rampe de fréquences reçue après propagation dans le canal (Golfe du Lion)

Ces émissions contrôlées représentent un jeu de données exploitables, de difficulté intermédiaire entre des données purement simulées (milieu simulé, signaux synthétiques) et des données réelles (milieu réel, signaux réels) et permettent de cerner les

5. Closest point of approach.

performances et limitations de la méthode. L'intégralité du procédé d'inversion géoacoustique présenté dans cet article a été testé sur ces émissions synthétiques contrôlées. Les résultats sont décrits dans la section suivante.

4.3. Mesures et observables

L'analyse des données est faite à partir d'un unique hydrophone de l'antenne (l'hydrophone n° 6 situé à 60 m de profondeur - cf. figure 8).

La première étape de notre procédé consiste à traiter individuellement chaque émission (cf. section 2) avec pour commencer la localisation de la source à l'aide des différences de temps d'arrivée des multitrajets (Aubauer *et al.*, 2000). Le tracking des émissions exploitées est réalisé manuellement. Nous estimons ensuite le couple [coefficient de réflexion, angle de rasance] pour chaque émission à partir du rapport des énergies du trajet direct et des réfléchis fond. La figure 11 présente l'estimation de la position de la source par l'algorithme à partir des transmissions enregistrées sur l'hydrophone n° 6.

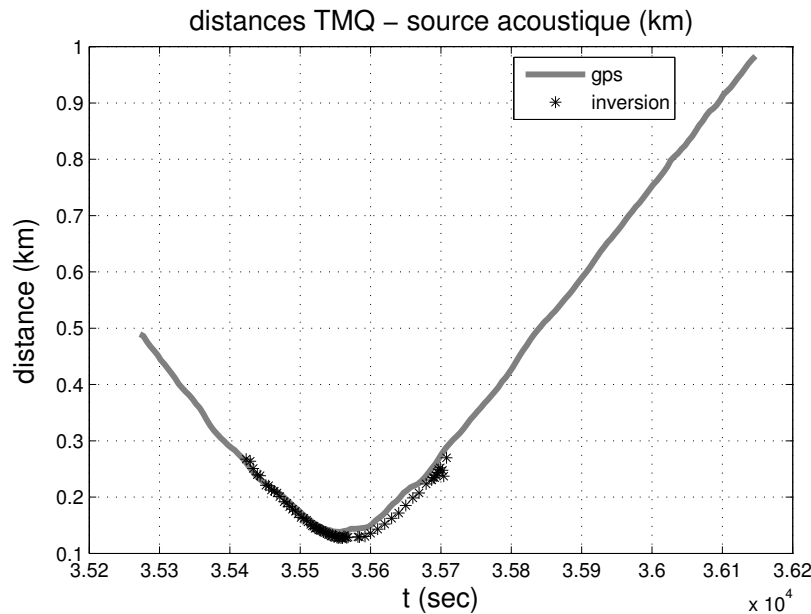


Figure 11. Comparaison entre l'estimation de la distance de la source STEREO à l'antenne d'hydrophones TELEMAQUE (TMQ) durant la radiale par notre méthode (croix) et la distance GPS réelle (ligne continue)

Seuls les signaux présentant des multitrajets résolus sont exploités par notre procédé d'inversion. La distance limite au-delà de laquelle la localisation n'est plus possible est de 300 m. Cette distance limite dépend de la configuration source-récepteur

et de la pente de modulation du signal (Δt entre les arrivées). (Aubauer *et al.*, 2000) permettent d'exprimer les angles de rasance des réfléchis fond en fonction de la hauteur d'eau (h), des profondeurs de la source (z_s) et de l'hydrophone (z_h) ainsi que de la distance source-récepteur (r). Avec une émission toutes les 2 secondes à 4 nœuds, on dispose de 150 émissions exploitables. Pour une source et un hydrophone à 60 m de profondeur dans 100 m d'eau et pour des distances source-récepteur variant de 150 m (CPA) à 300 m, l'exploitation des 2 premiers réfléchis fond permet d'explorer des angles de rasance entre 15° et 55° (cf. équation 3).

$$\begin{aligned}\theta_{min} &= \text{atan}\left(\frac{2.h - z_s - z_h}{r_{max}}\right) \approx 15^\circ \\ \theta_{max} &= \text{atan}\left(\frac{2.h + z_h - z_s}{r_{min}}\right) \approx 55^\circ\end{aligned}\quad (3)$$

Le traitement, par notre méthode, de l'ensemble des signaux émis et propagés dans le canal lors de la radiale fournit en sortie une courbe du coefficient de réflexion mesuré en fonction des angles de rasance sur le fond (étape 2 détaillée dans la section 2). La figure 12 décrit la courbe du coefficient de réflexion estimée par le procédé. Cet observable alimente l'algorithme d'inversion dont les résultats sont présentés dans la section 4.4. La qualité des estimations du coefficient de réflexion varie en fonction de la rasance.

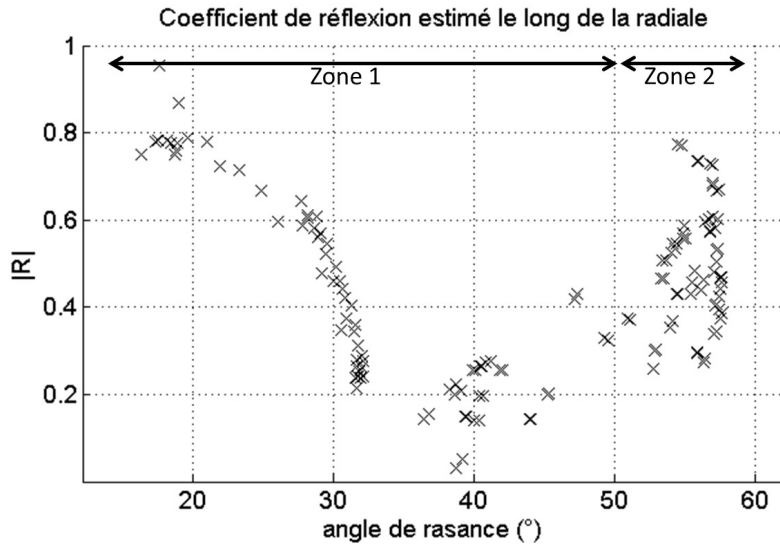


Figure 12. Courbe du coefficient de réflexion estimé sur la zone de la radiale en fonction des angles de rasance

Les données semblent assez peu dispersées pour les rasances inférieures à 50° (cf. zone 1 figure 12) et plus dispersées au-delà (cf. zone 2 figure 12). Nous avons donc choisi d'inverser les paramètres du fond à partir des angles compris entre 0° et 50° .

4.4. Résultats sur l'inversion géoacoustique

L'aspect de la courbe du coefficient de réflexion estimé traduit la présence d'au moins 2 couches de sédiments avec un premier angle critique aux alentours de 32° . Nous avons appliqué une minimisation par algorithme génétique (adaptation, par les auteurs, du code source libre de droit de (Houck *et al.*, ACM Transactions on Mathematical Software 1996) pour le problème d'inversion) avec une population de 20 individus (20 fonds candidats) et 100 générations sur la base d'un modèle de fond à deux couches (sédiment sur socle semi-infini). La figure 13 présente le résultat de l'algorithme génétique. La figure 14 montre les histogrammes des valeurs des sites visités par l'algorithme génétique pour chaque paramètre recherché avec les fréquences de visites.

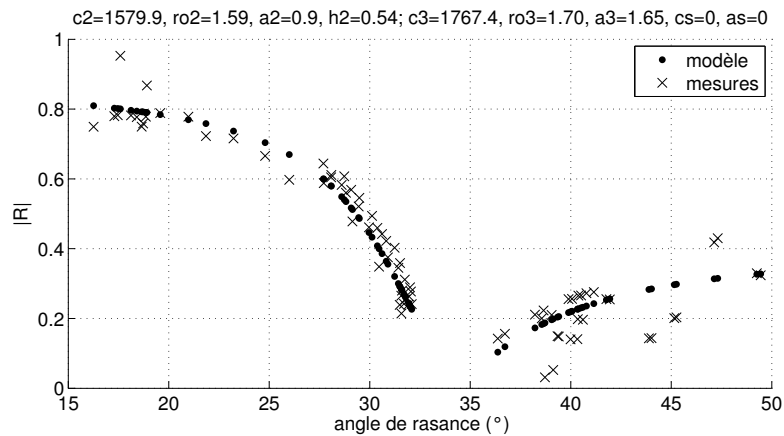


Figure 13. Résultats de l'inversion géoacoustique par algorithme génétique des données de la radiale (x pour les mesures et • pour l'estimation)

Pour valider cette méthode sur ce problème d'inversion et s'assurer de la stabilité de l'algorithme génétique pour notre problème, nous avons exécuté 500 fois l'algorithme génétique pour des populations de 20 individus et 100 générations. Ce multirun nous permet d'extraire les écarts types des paramètres estimés. Le tableau 1 indique pour chaque paramètre estimé, l'écart type et la moyenne observés sur les résultats de l'algorithme génétique pour les 500 expériences ainsi que les bornes données à l'algorithme génétique. Les noms des paramètres sont explicités dans la section 3.

La figure 15 présente l'ensemble des couples de paramètres estimés par l'algorithme génétique au cours de ses 500 répétitions. Cette figure confirme i) la corrélation entre la vitesse de compression et la densité des sédiments pour les deux couches, ii) l'indépendance des deux couches avec des graphes étalés pour les couples mixtes des deux couches. On constate également que la vitesse de compression du fond semi-infini est plus facile à estimer (écart type plus faible, cf. tableau 1). Cette couche est en effet inversée à partir de mesures d'angles de rasance plus forts donc en champ proche.

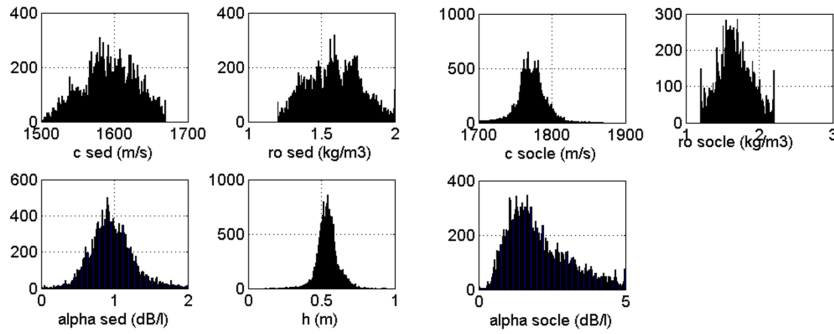


Figure 14. Histogrammes des sites parcourus par l'algorithme génétique. En ordonnée, le nombre de visites - en abscisses les valeurs des sites visités

Tableau 1. Statistiques sur l'application d'un algorithme génétique (20 individus, 100 générations, 100 répétitions de l'algorithme génétique)

	<i>opt</i>	<i>mean</i>	<i>std</i>	<i>borne inf</i>	<i>borne sup</i>
c_p (m/s)	1579.9	1592.9	36.7	1500	1670
ρ_p (kg/m ³)	1.59	1.59	0.17	1.2	2.0
α_p (dB/λ)	0.9	0.96	0.29	0	2
h (m)	0.54	0.54	0.07	0.1	1
c_s (m/s)	1767.4	1772.1	20.5	1700	1870
ρ_s (kg/m ³)	1.70	1.67	0.22	1.2	2.2
α_s (dB/λ)	1.65	2.04	1.04	0	5
c_{cis} (m/s)	0	0	0	0	0
α_{cis} (dB/λ)	0	0	0	0	0

Des carottes effectuées sur la zone montrent la présence d'une couche de faible célérité de compression - 1588 m/s - de 50 cm, sur une couche de sable de vitesse de compression 1850 m/s (source : SHOM). Notre méthode permet une bonne estimation de la première couche de sédiment. La seconde couche correspond à un sable plus absorbant que la vérité terrain. Nous constatons cependant la dispersion des points de la partie correspondante du coefficient de réflexion estimé, dispersion pouvant provenir de la diffusion sur cette couche, de la directivité de la source.

Cette étude confirme les points soulignés dans l'analyse du conditionnement du problème (section 3). En effet, les écarts types des sites visités pour les paramètres épaisseur (h), célérités de compression (c_p) et célérité de cisaillement (c_s) sont faibles, ce qui implique une estimation fiable par l'algorithme génétique. L'expérience confirme également la faible sensibilité du modèle aux atténuations pour lesquelles on observe un fort étalement des histogrammes des valeurs estimées.

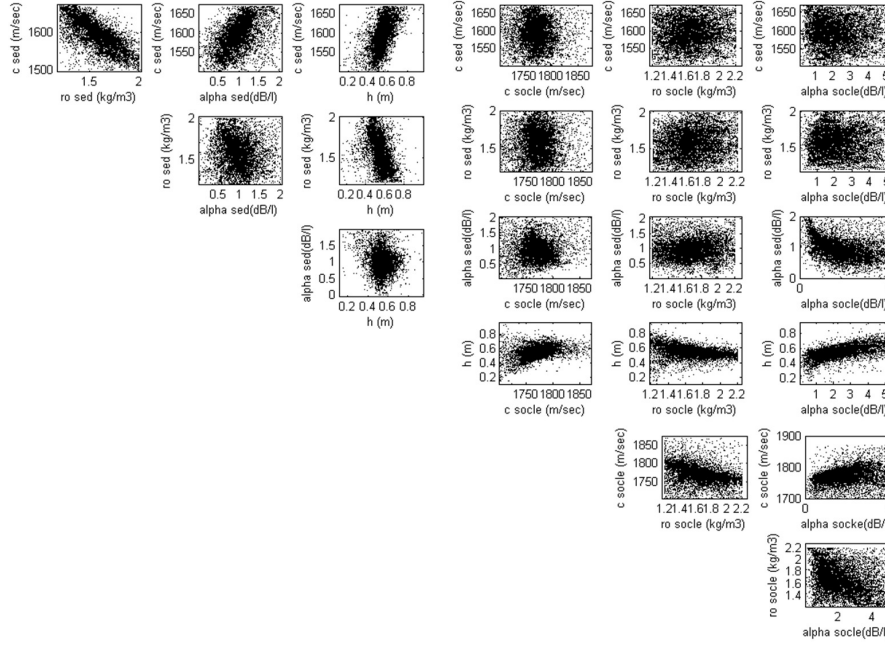


Figure 15. Représentation des couples de paramètres estimés par l'algorithme génétique sur 500 répétitions

5. Discussion et perspectives

Nous proposons une procédure d'inversion utilisant les émissions de modulations de fréquences analogues à celles produites par certains mammifères marins et un unique capteur afin de produire des procédés opérationnels permettant l'étude de milieux lointains et hostiles. Le procédé a été testé avec succès sur données réelles pour ce qui est de l'estimation de la première couche sédimentaire, dont les propriétés géoacoustiques contrôlent principalement la propagation à longue distance. La méthode repose sur une instrumentation minimale (traitement monocapteur en bande large). Malgré la simplicité extrême du système de mesures sur lequel repose le procédé d'inversion, les performances observées sont de bon niveau car notre procédé valorise la diversité de fréquences des modulations pour positionner les sources et la diversité de sources pour bâtir la courbe de réflexion en fonction de la rasanse.

Notre procédé d'inversion repose sur l'existence d'un nombre suffisant de vocalises de mammifères marins. Notre expérience des données réelles réalisées sur le plateau continental de la façade française Atlantique et Manche laisse penser que cette ressource n'est pas anecdotique et constitue bien une matière première utilisable pour l'inversion géoacoustique :

- 48 heures de mesure dans le Golfe de Gascogne en septembre 2009 (Gervaise *et al.*, 2010) fournissent 8 heures de présence de sifflements exploitables ;

- 40 jours dans la zone du rail d'Ouessant en septembre et octobre 2009 (Comm. Pers. C. Gervaise, série temporelle disponible sur demande) fournissent approximativement 2 heures de sifflements par jour ;
- 6 mois dans la zone de l'Iroise entre Juin 2011 et Novembre 2011 (Comm. Pers., C. Gervaise, série temporelle disponible sur demande) fournissent approximativement 6000 minutes de sifflements.

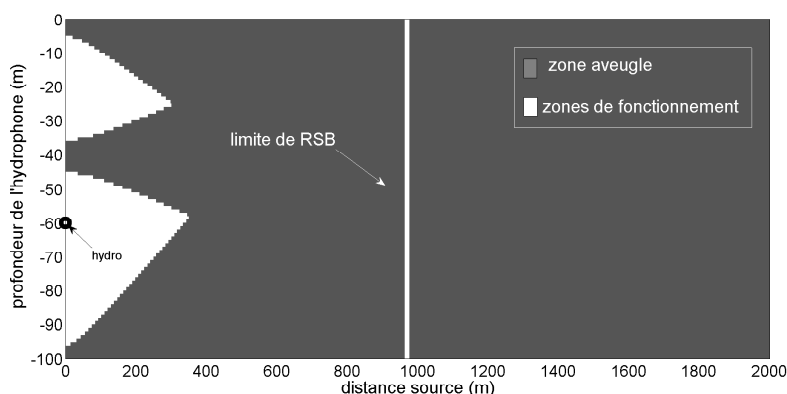


Figure 16. Domaine de fonctionnement de la méthode pour un capteur à 60 m et une hauteur d'eau de 100 m. La droite blanche indique la limite de détection des sifflements et les cones blancs indiquent les zones dans lesquelles un sifflement émis présentera des trajets suffisamment résolus pour la méthode

Pour garantir de bonnes performances de la méthode d'inversion, il est nécessaire de détecter, identifier et séparer les trois premiers échos (direct, réfléchi fond et réfléchi surface). Nonobstant les performances intrinsèques des outils temps-fréquence grâce auxquels nous réalisons les traitements, ces prérequis sont atteints pour une émission produite au sein d'une certaine partie du volume d'eau autour de l'hydrophone que nous nommons « domaine de fonctionnement ». Nous avons déterminé ce domaine de fonctionnement par application de l'équation du sonar pour la détection et par l'examen des différences de temps d'arrivée entre les trois trajets grâce à un modèle de lancer de rayon sous l'hypothèse de propagation rectiligne par les méthodes des images (Aubauer *et al.*, 2000). Les résultats détaillés peuvent être trouvés dans (Gervaise *et al.*, 2011). Pour des émissions typiques de grands dauphins *Tursiops truncatus* ou de dauphins communs *Delphinus delphis* (pente moyenne de modulation de 20 kHz/sec et niveaux de source de 151 dB re 1 μ Pa à 1 m rms (Zimmer, 2011) pour le dauphin commun), des niveaux de bruit typiques du plateau continental et un canal de 100 mètres de profondeur avec un hydrophone positionné approximativement au centre de la colonne, nous avons démontré que les sifflements pouvaient être détectés à 1000 mètres de l'hydrophone et que les trois trajets étaient résolus au sein d'un spectrogramme dans deux zones triangulaires ayant pour base la moitié de la colonne d'eau supérieure et inférieure et un sommet situé à 300 mètres de l'hydrophone (cf. figure 16). Au sein du domaine de fonctionnement, les sources permettent de produire

des coefficients de réflexion pour des rasances allant théoriquement de 90° (source au-dessus des hydrophones) à 15° (source en limite du domaine de fonctionnement).

Durant la campagne ERATO 2011, nous avons utilisé la source active STEREO avec ses caractéristiques propres dont une bande passante plutôt basse comprise entre 300 Hz et 2000 Hz. Les signaux émis (modulation linéaire de fréquences de 1000 Hz à 2000 Hz en 10 millisecondes) permettent d'étudier la faisabilité de notre méthode pour deux grandes familles de cétacés. Les membres de la première famille appartiennent aux mysticètes (baleines à bosse, boréales, franches) pour lesquels le signal émis représente fidèlement (fréquence centrale et pente) certaines portions de leur vocalisation et chant. Les performances de notre méthode d'inversion identifiées à partir des émissions synthétiques d'ERATO 2011 s'appliquent donc directement pour cette première famille avec en guise de perspective l'inversion géoacoustique passive de l'Arctique. Les membres de la seconde famille appartiennent aux delphinidés (grands dauphins, dauphins communs...). Pour cette seconde famille, les signaux émis durant ERATO 2011 reproduisent les pentes des sifflements mais pas la fréquence centrale. Ainsi ERATO 2011 permet pour cette seconde famille de valider l'étape 1 de traitement du signal des sifflements individuels puisque celle-ci est conditionnée par la séparabilité des échos qui elle-même est conditionnée par la pente des modulations. Pour l'étape d'inversion, les performances sur ERATO 2011 ne sont pas représentatives de celles que nous attendons pour les sifflements des delphinidés où la fréquence centrale est plus élevée et les profondeurs de pénétration seront donc limitées. Par ailleurs, pour cette seconde famille, il convient de noter que les sifflements peuvent être entachés d'un diagramme de directivité non négligeable, la fréquence centrale augmentant (Barazzutti *et al.*, 2012). Aussi pour cette seconde famille, l'estimation et la correction des termes de directivité constituent des fonctions nécessaires à ajouter à l'étape de traitement du signal et constituent des perspectives que nous allons réaliser à courts termes en plus de la réalisation d'une campagne d'expérimentations impliquant des émissions synthétiques dédiées à cette seconde famille.

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.-P., Stephan Y. (2012, July). Estimating the "attitude" of a dolphin while whistling towards a unique hydrophone. In *European conference of underwater acoustics (ecua 2012)*, vol. 1. Edimburg, UK.
- Bonnel J., Gervaise C., Nicolas B., Mars J. I. (2012). Single-receiver geoacoustic inversion using modal reversal. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 131, n° 1, p. 119-128.
- CE. (2008, 25/06/2008). *Directive 2008/56/ce du parlement europeen et du conseil du 17 juin 2008 etablissant un cadre d'action communautaire dans le domaine de la politique pour le milieu marin (directive-cadre "strategie pour le milieu marin")*. Rapport technique. Parlement Europeen.

- CE. (2010, 02/09/2010). *Décision de la commission 2010/477/ue du 1er septembre 2010 relative aux critères et aux normes méthodologiques concernant le bon état écologique des eaux marines*. Rapport technique. Parlement Européen.
- Demoulin X., Pelissiero 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.
- D'Spain G. L., Kuperman W. A., Clark C. W., Mellinger D. K. (1995). Simultaneous source ranging and bottom geoacoustic inversion using shallow water, broadband dispersion of fin whale calls. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 97, n° 5, p. 3353.
- 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*. Kos, Greece.
- Gervaise C., Di Iorio L., Kinda B., Stphan Y., Josso N. (2010). Monitorage acoustique passif des campagnes d'oceanographie acoustique en presence de mammiferes marins: exemple de la campagne erato-09. *Annales hydrographiques*, vol. 7, n° 776.
- 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.
- Gervaise C., Vallez S., Ioana C., Stephan Y., Simard Y. (2007). Passive acoustic tomography: new concepts and applications using marine mammals: a review. *Journal of the Marine Biological Association of the UK*, vol. 87, n° 01, p. 5-10.
- 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.
- Houck C., Joines J., Kay M. (ACM Transactions on Mathematical Software 1996). *A genetic algorithm for function optimization: A matlab implementation*.
- Ioana C., Gervaise C., Stephan Y., Mars J. (2010). Analysis of underwater mammal vocalisations using time-frequency-phase tracker. *Applied Acoustics*, vol. 71, p. 1070-1080.
- Ioana C., Jarrot A., Gervaise C., Stephan Y., Quinquis A. (2010). Localization in underwater dispersive channels using the time-frequency-phase continuity of signals. *Signal Processing, IEEE Trans*, vol. 58, n° 8, p. 4093-4107.
- 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.
- Lampert T., O'Keefe S. (2010). A survey of spectrogram track detection algorithms. *Applied Acoustics*, vol. 71, n° 2, p. 87-100.
- Lurton X., Le Gac J.-C. (2004). The calimero project: Scientific objectives and first at-sea results. In *1st seatech week*. Brest, France.
- Mellinger D. K., M. S. K., Moore S. E., P. D. R., Haru M. (2007, December). An overview of fixed passive acoustic observation methods for cetaceans. *Oceanography*, vol. 20, n° 4, p. 36-45.
- Nosal E.-M., Frazer L. N. (2007, 01 octobre). Sperm whale three-dimensional track, swim orientation, beam pattern, and click levels observed on bottom-mounted hydrophones. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 122, n° 4, p. 1969-1978.

- Park C., Seong W., Gerstoft P. (2005, April). 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.
- Roy N., Simard Y., Gervaise C. (2010). 3d tracking of foraging belugas from their clicks: Experiment from a coastal hydrophone array. *Applied Acoustics*, vol. 71, p. 1050-1056.
- 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.
- Simard Y., Roy S., N. and Giard, Gervaise M., C. and Conversano, Menard N. (2010). Estimating whale density from their whistling activity: Example with st. lawrence beluga. *Applied Acoustics*, vol. 71, p. 1081-1086.
- 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. 1-121. (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)
- 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.
- Zimmer W. M. X. (2011). *Passive acoustic monitoring of cetaceans*. Cambridge University Press.

Amélie Barazzutti, ingénieur des études et techniques de l'armement à la Direction Générale de l'Armement, en poste à DGA Ingénierie des Projets, est membre du GIPSA-Lab et doctorante de l'école doctorale TUE de l'université de Grenoble. Ses travaux portent sur l'inversion géoacoustique passive à partir de signaux d'opportunités, notamment les émissions de mammifères marins.

Cédric Gervaise chercheur à l'ENSTA Bretagne de 1999 à 2011 puis au GIPSA-Lab de 2011 à 2013, il est co-titulaire de la chaire d'excellence CHORUS, fondation partenariale Grenoble INP, 2013-2017. Ses thèmes de recherche sont : le traitement du signal, le monitoring des environnements naturels par acoustique passive et l'écologie des paysages acoustiques.

Yann Stephan est ingénieur de recherche au SHOM à Brest au sein de la division hydrographie océanographie météorologie (HOM). Ses travaux portent sur l'évaluation rapide de l'environnement par acoustique active et passive.

Florian Dadouchi est doctorant au GIPSA-Lab au sein du département Images et Signal. Ses travaux portent sur les représentations temps-fréquence, le traitement du signal statistique et la théorie de la détection. Il s'intéresse plus particulièrement à la détection et à la caractérisation des sons émis par certains mammifères marins.

Jean-Pierre Sessarego est Directeur de Recherche au CNRS. Il est membre du laboratoire de mécanique et d'acoustique (LMA). Ses travaux portent sur la propagation des ondes sonores dans le milieu marin et sur les interactions avec des objets situés dans la couche d'eau. Il s'intéresse aussi à la caractérisation des sédiments et à leur influence sur la propagation.