

Mesure d'angles par double formation de voies appliquée à la tomographie acoustique sous-marine

Florian AULANIER¹, Barbara NICOLAS¹, Philippe ROUX², Romain BROSSIER², Jérôme I MARS¹

¹Université Grenoble Alpes, Gipsa lab
11 rue des Mathématiques, Grenoble Campus, BP46, F - 38402 Saint Martin d'Hères Cedex, France

²Université Grenoble Alpes, ISTerre
ISTerre BP 53, 38041 Grenoble CEDEX 9, France

Florian.Aulanier@gipsa-lab.grenoble-inp.fr, Barbara.Nicolas@gipsa-lab.grenoble-inp.fr
Philippe.Roux@obs.ujf-grenoble.fr, Romain.Brossier@ujf-grenoble.fr,
Jerome.Mars@gipsa-lab.grenoble-inp.fr

Résumé – Cet article traite de la tomographie acoustique océanique utilisant les angles de départ et les angles d'arrivée des ondes sonores. Dans ce but, deux antennes (en émission et en réception) sont utilisées pour séparer les arrivées acoustiques et mesurer leur temps de trajet, direction de réception et direction d'émission. Ces mesures sont ensuite utilisées dans un processus d'inversion visant à retrouver la carte des variations de vitesse du son au sein du milieu de propagation (guide d'onde océanique peu profond). L'apport de ces travaux est double : (1) ils montrent qu'il est possible de faire de la tomographie acoustique océanique en utilisant les angles d'émission et de réception, ce qui n'avait jamais été fait à ce jour ; (2) ils permettent de se passer de synchronisation émetteur-récepteur haute précision, qui est un problème technique délicat à régler en pratique.

Cet article présente des résultats de tomographie acoustique océanique sur des données simulées. Les résultats obtenus à partir des seuls angles d'émission et de réception sont équivalents à ceux obtenus à partir des temps de trajet des ondes acoustiques, nécessitant la synchronisation émetteur-récepteur.

Abstract – This article deals with ocean acoustic tomography based on the sound-wave directions of arrival and directions of departure. To this aim, a source arrays and a receiver array are used to separate the acoustic arrivals and measure their respective travel time, direction of arrival and direction of departure. These measurements are then used to retrieve the sound-speed variations occurring within the propagation medium (oceanic shallow water waveguide). The input of this work is twofold: (1) it shows that directions-of-arrival and directions-of-departure based ocean acoustic tomography is possible, which has not been done before; (2) it overcomes the high-precision source-to-receiver synchronization, which is a difficult challenge in practice. Results of ocean acoustic tomography performed on simulated data are shown and compare favorably angle-based tomography to travel-time tomography. Inversion using only angles or only travel times does show similar results, when angle tomography does not need source-receiver synchronization.

1 Introduction

Le concept de tomographie acoustique océanique, introduit par Munk and Wunsch en 1979[7], décrit la possibilité de mesurer les caractéristiques de l'eau de mer à grande échelle et haute résolution spatiale en utilisant les ondes acoustiques.

Dans un contexte d'environnement marin petit fond (e.g. ~ 100 m de profondeur et 1 à 10 km de longueur), pour des signaux large bande de fréquence moyenne (e.g. ~ 2 kHz de fréquence centrale et ~ 1 kHz de largeur de bande), le milieu marin agit comme un guide pour les ondes acoustiques. Les ondes sonores suivent alors des trajets multiples, similaires aux rayons de l'approximation fréquence infinie, pour se propager d'une source à un récepteur.

La tomographie acoustique océanique se découpe en deux

problématiques principales : le problème direct, ou comment modéliser les caractéristiques du signal acoustique reçu à l'aide des paramètres du milieu de propagation ; le problème inverse, ou comment retrouver les paramètres du milieu en utilisant les caractéristiques du signal reçu. Ce travail porte plus spécifiquement sur l'étude de la distribution spatiale de la vitesse du son dans le guide d'onde acoustique.

Jusqu'à présent la manière la plus classique de faire de la tomographie acoustique océanique est de s'intéresser au temps de propagation (TP) des différents trajets acoustiques [5, 6]. D'autres méthodes existent telles que l'inversion de forme d'onde, plus couteuse en temps de calcul, ou encore l'utilisation d'autres observables comme la phase du signal reçu. Toutes ces méthodes nécessitent une synchronisation source-récepteur extrêmement précise (\sim

$1\mu\text{s}$ pour détecter des variations de 1 m/s s'étendant sur 10 m , soit environ un centième de période pour un signal de 2 kHz de fréquence centrale), ce qui est un défi technique compte tenu du fait que les émetteurs et les récepteurs peuvent être séparés de plusieurs kilomètres.

La méthode, proposée ici, est de s'intéresser à d'autres caractéristiques des trajets acoustiques : les angles de réception (AR) et d'émission (AE) mesurés à l'aide d'un système de double-antenne (émission-réception) sur lesquelles on réalise une double formation de voie (DFV) [8]. En effet, comme le montre la figure 1a les AR (Θ_r) et les AE (Θ_e) peuvent être utilisés comme caractéristiques des trajets acoustiques au même titre et en complément des TP (τ). Cette approche permet de réduire l'aspect critique de la synchronisation source-récepteur.

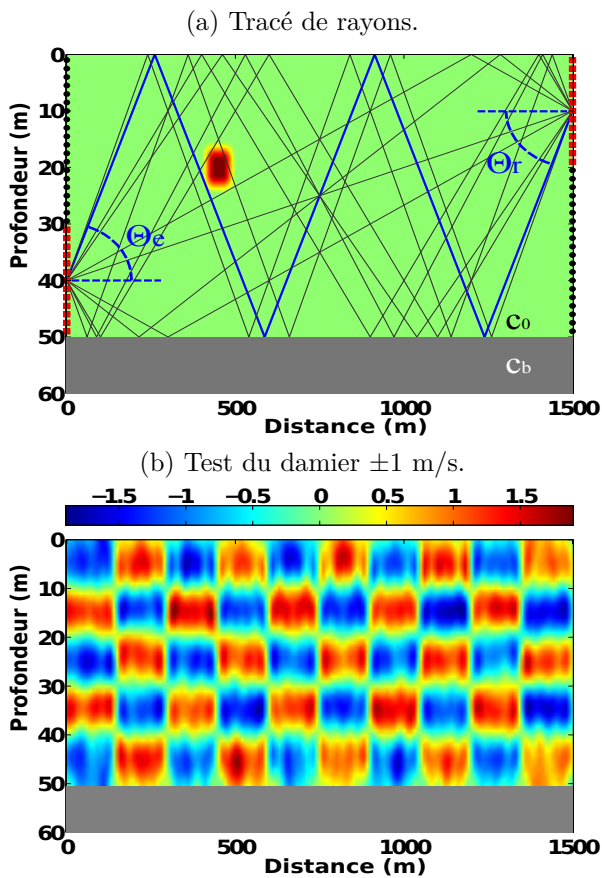


FIGURE 1 – (a) Guide d'onde de Pekeris avec des exemples de trajets acoustiques et un exemple de perturbation de vitesse du son à 0.3 m/s . (b) Test du damier sur le modèle d'inversion utilisant les noyaux de sensibilité des angles de réception (NSAR) et d'émission (NSAE) sur le même guide d'onde.

2 Méthode

2.1 Le problème direct

Le problème direct consiste à modéliser les observables, i.e. TP (τ), AR (Θ_r) et AE (Θ_e), connaissant les caractéristiques du guide d'onde océanique, en particulier la distribution spatiale de vitesse du son ($c(\mathbf{r})$). Pour simplifier ce problème non-linéaire, difficile à résoudre analytiquement, on cherche à établir le lien entre de petites variations de la distribution de vitesse du son (δc) et les variations d'observables (i.e. $\delta\tau$, $\delta\Theta_r$ et $\delta\Theta_e$), qu'on prendra linéaire en première approximation [2, 1].

Le méthode consiste à regarder les variations entre un état de référence, c_0 et un état faiblement perturbé $c_0 + \delta c$. En appliquant une série d'approximations (approximation de Born au premier ordre de l'équation de Helmholtz et développement de Taylor au premier ordre du signal perturbé) et l'opération de double formation de voie, un lien linéaire entre δc et $\delta\tau$, $\delta\Theta_r$ et $\delta\Theta_e$ peut-être établi par l'intermédiaire de noyaux appelés : « noyaux de sensibilité des temps et des angles » (NSTA), relatifs à chaque observable.

$$\begin{pmatrix} \delta\tau \\ \delta\Theta_r \\ \delta\Theta_e \end{pmatrix} \simeq \iiint_V \begin{pmatrix} K_{TT}(\mathbf{r}') \\ K_{DOA}(\mathbf{r}') \\ K_{DOD}(\mathbf{r}') \end{pmatrix} \delta c(\mathbf{r}') dV(\mathbf{r}') \quad (1)$$

où K_{TT} , K_{DOA} and K_{DOD} sont les noyaux de sensibilité (NS) associés respectivement à chaque observable TP, AR and AE. Le volume défini par le guide d'onde est noté V et $dV(\mathbf{r}')$ est un élément de ce volume positionné au point \mathbf{r}' .

Un exemple de NSTA est représenté sur la figure 3 et montre la sensibilité du trajet acoustique réfléchi deux fois sur la surface et deux fois sur le fond du guide d'onde (ligne continue) pour chaque observable. Le domaine de validité de cette formulation linéaire du problème direct peut être étudiée en utilisant un code aux équations paraboliques (EP) [3]. Des ondes acoustiques sont propagées à travers le guide d'onde présenté sur la figure 1a, pour des valeurs croissantes de la perturbation de vitesse du son allant de 0.01 m/s à 20 m/s . On mesure ensuite les TP, AR et AE de plusieurs trajets acoustiques et on compare leur comportement par rapport à celui estimé avec les NSTA. La figure 2 montre que les angles varient linéairement avec la vitesse du son sur une plage plus importante (0 à 20 m/s) que les temps de propagation (0 à 6 m/s).

2.2 Le problème inverse

De manière classique, le problème inverse est traité avec la méthode du *maximum a posteriori*, avec des *a priori* gaussiens sur la statistique des paramètres du modèle et l'erreur du problème direct. Sous ces hypothèses, l'estimation du *maximum a posteriori* est donnée par la formule

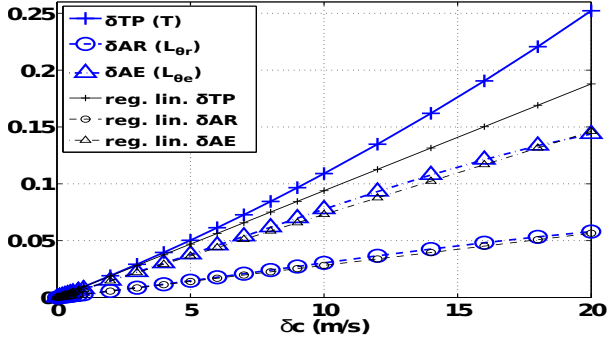


FIGURE 2 – Comportement des trajets acoustiques avec 7 à 12 réflexions en fonction de la valeur de la perturbation de vitesse du son δc .

suivante :

$$\widehat{\mathbf{m}}_{\text{MAP}} = \mathbf{m}_0 + \lambda \mathbf{C}_m \mathbf{G}^T (\mathbf{G} \lambda \mathbf{C}_m \mathbf{G}^T + \mathbf{C}_d)^{-1} (\mathbf{d} - \mathbf{G} \mathbf{m}_0) \quad (2)$$

où \mathbf{d} est le vecteur des données (i.e. les variations d'observables de chaque arrivée acoustique), \mathbf{m} est le vecteur des paramètres du modèle (i.e. les pixels de la carte de perturbation de vitesse) et \mathbf{G} est la matrice des dérivées de Fréchet (i.e. les NSTA). Les informations *a priori* sont contenues dans \mathbf{C}_d , la matrice de covariance des données, \mathbf{C}_m , la matrice de covariance du modèle, et \mathbf{m}_0 , l'espérance du modèle. λ est le paramètre de la courbe en L [4], inclus ici pour ajuster l'importance relative des *a priori* du modèle par rapport au données.

3 Application sur un jeu de données simulées

3.1 Résultats

L'inversion utilisant les variations d'AR et d'AE est comparée à l'inversion utilisant uniquement les variations de TP sur un jeu de données simulées avec un code aux équations paraboliques. Les variations des TP, AR et AE de 2200 rayons sont mesurées entre un guide d'onde de Pekeris à célérité constante de 1500 m.s^{-1} et le même guide d'onde dans lequel on a introduit une perturbation locale de 0.3 m.s^{-1} située à 20 m de profondeur et à 450 m de distance de l'antenne source. Les rayons acoustiques couvrent la totalité du guide d'onde (cf. exemple figure 1a), mais le contexte d'inversion reste délicat étant donné que les antennes sont situées aux deux extrémités d'un guide d'onde particulièrement long (30 fois plus long que profond). Les trajets acoustiques sont donc très peu inclinés par rapport à l'horizontale (22.9° au maximum), ce qui est défavorable pour obtenir une bonne résolution suivant la profondeur. Afin de vérifier la résolution du modèle utilisant les noyaux en angles, on effectue le test du damier (figure 1b). Cette figure est obtenue avec la formule

suivante :

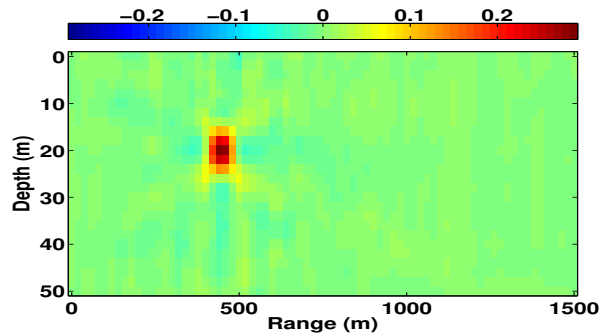
$$\widehat{\mathbf{m}}_{\text{damier}} = \mathbf{G} \widehat{\mathbf{G}}^{-1} \mathbf{m}_{\text{damier}} \quad (3)$$

avec $\widehat{\mathbf{G}}^{-1} = \lambda \mathbf{C}_m \mathbf{G}^T (\mathbf{G} \lambda \mathbf{C}_m \mathbf{G}^T + \mathbf{C}_d)^{-1}$ est l'estimée de l'inverse de \mathbf{G} par la méthode du *maximum a posteriori*; $\mathbf{m}_{\text{damier}}$ le damier témoin (cases de 150 m de longueur et 10 m de profondeur de $\pm 1 \text{ m/s}$); et $\widehat{\mathbf{m}}_{\text{damier}}$ l'estimation de ce damier après propagation dans le milieu avec le modèle \mathbf{G} et retro-propagation avec $\widehat{\mathbf{m}}_{\text{damier}}$.

Ce test montre d'une part que la résolution spatiale du problème direct utilisant les NS des angles est quasi uniforme sur tout le guide d'onde (légèrement plus faible aux interfaces), et d'autre part, que la résolution spatiale, relativement aux dimensions du guide d'onde, est plus faible en profondeur qu'en longueur.

Les résultats des inversions utilisant les variations des AR et AE d'une part et des TP d'autre part sont présentés respectivement sur la figure 4a et 4b. On remarque que les performances des deux types d'inversion sont similaires. La valeur de la perturbation est retrouvée à 0.28 m/s pour les TP, et à 0.29 m/s pour les AR et AE. Une légère amélioration du bruit de fond peut être notée dans le cas de l'inversion des variations d'AR et d'AE (norme ℓ^2 de 0.0085 m/s pour les AR et AE, et 0.01 m/s dans le cas des TP).

(a) Résultat d'inversion des variations d'AR-AE (en m.s^{-1}).



(b) Résultat d'inversion des variations de TP (en m.s^{-1}).

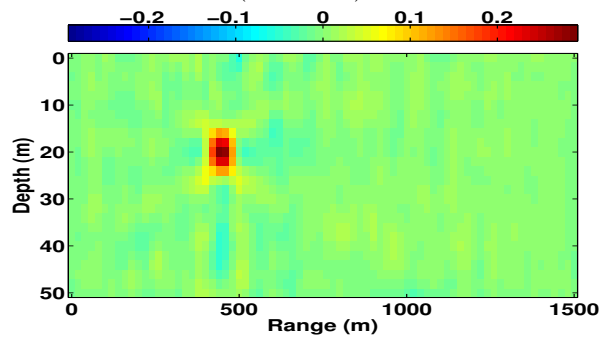


FIGURE 4 – Estimées (*maximum a posteriori*) utilisant les AR et les AE (a) et les TP (b).

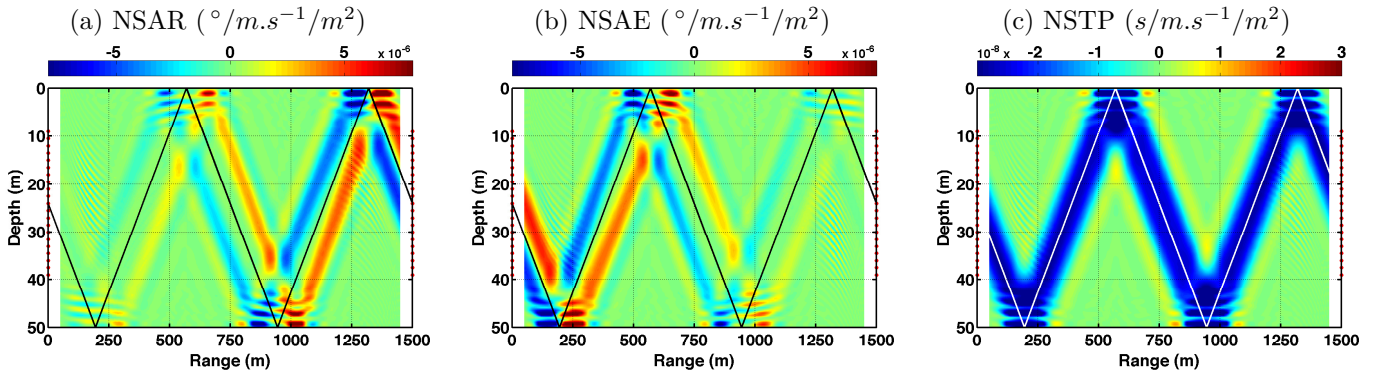


FIGURE 3 – Noyaux de sensibilité des AR (a), des AE (b) et des TP (c)

3.2 Discussion

Les résultats obtenus sur les simulations montrent l'intérêt potentiel que représente l'utilisation des variations angles d'émission et de réception mesurées une antenne source et une antenne réceptrice, dans le cas de signaux réels. Pour des résultats similaires, la tomographie n'utilisant que les angles ne nécessite pas de synchronisation émetteur-récepteur. En effet, le déploiement d'antennes double, déjà réalisé en contexte réel durant les campagnes FAF-03 et FAF-05 [9], montre que la synchronisation source-récepteur à des distances de plusieurs kilomètres est un point clé pour pouvoir utiliser les temps de propagation. Les dérives des horloges doivent être corrigées régulièrement grâce à l'horloge GPS, pour que l'antenne source et l'antenne réceptrice reste synchronisées, ceci afin d'éviter d'introduire des biais dans les mesures. L'utilisation des angles requiert uniquement que les éléments d'une même antenne soient synchronisés pour que la mesure d'angle soit correcte, ce qui reste largement réalisable en pratique car les éléments des antennes sont proches. Une dernière source de biais dans les mesures des trois observables, est la déformation et l'inclinaison des antennes ; mais celles-ci sont corrigées en pratique. L'utilisation des NSTA sera restreinte au domaine de validité de cette approche linéaire, limité (1) par le pouvoir de séparation des arrivées acoustiques, (2) par la valeur de la perturbation (cf. figure 2).

4 Conclusion

Les variations d'angles de réception et d'émission des arrivées acoustiques, mesurées avec une antenne double (émission - réception) et un traitement par double formation de voies, sont des observables exploitables pour faire de la tomographie acoustique sous-marine. Les performances de la tomographie à partir des angles sont similaires (voire sensiblement supérieures) à celles obtenues avec les méthodes classiques utilisant les variations de temps de propagation. De plus, l'utilisation des angles permet de s'affranchir du problème délicat de la synchronisa-

tion à haute précision entre émetteurs et récepteurs. Une validation sur données réelles à petite échelle, en cours, doit permettre de confirmer les résultats obtenus sur les données simulées.

Références

- [1] F. Aulanier, B. Nicolas, P. Roux, and J. I. Mars. Time-angle sensitivity kernels for sound-speed perturbations in a shallow ocean. *The Journal of the Acoustical Society of America*, (in press) 2013.
- [2] F. Aulanier, B. Nicolas, P. Roux, J. I. Mars, et al. Direction-of-arrival, direction-of-departure and travel-time sensitivity kernels obtained through double beamforming in shallow water. In *Proceedings of the 4th international conference and exhibition on Underwater Acoustic Measurements : Technologies and Results (UAM 2011)*, pages 453–460, 2011.
- [3] M. D. Collins. A split-step padé solution for the parabolic equation method. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 93 :1736, 1993.
- [4] P. C. Hansen. Analysis of discrete ill-posed problems by means of the l-curve. *SIAM review*, 34(4) :561–580, 1992.
- [5] B. M. Howe, P. F. Worcester, and R. C. Spindel. Ocean acoustic tomography : Mesoscale velocity. *Journal of Geophysical Research : Oceans (1978–2012)*, 92(C4) :3785–3805, 1987.
- [6] I. Iturbe, P. Roux, B. Nicolas, J. Virieux, and J. I. Mars. Shallow-water acoustic tomography performed from a double-beamforming algorithm : simulation results. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 34(2) :140–149, 2009.
- [7] W. Munk and C. Wunsch. Ocean acoustic tomography : A scheme for large scale monitoring. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 26(2) :123–161, 1979.
- [8] P. Roux, B. D. Cornuelle, W. Kuperman, and W. Hodgkiss. The structure of raylike arrivals in a shallow-water waveguide. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 124 :3430, 2008.
- [9] P. Roux, W. Kuperman, B. D. Cornuelle, F. Aulanier, W. Hodgkiss, and H. C. Song. Analyzing sound speed fluctuations in shallow water from group-velocity versus phase-velocity data representation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 133 :1945, 2013.