

Double formation de voies pour l'estimation de temps de trajet en contexte fortement bruité

Barbara NICOLAS¹, Philippe ROUX², Ion ITURBE¹, Jérôme I. MARS¹

¹GIPSA-lab, Département Images Signal
961 rue de Houille Blanche, St Martin d'Hères, France

²Laboratoire de Géophysique Interne et de Tectonophysique
1381 rue de la Piscine, St Martin d'Hères, France
barbara.nicolas@gipsa-lab.inpg.fr

Résumé – La tomographie acoustique océanique a pour objectif l'estimation des variations de la vitesse des ondes dans l'océan à partir des temps de trajet de ces ondes. L'identification des différentes ondes est rarement possible sur le signal enregistré entre une source et un capteur dans des configurations réelles : mélange des ondes, faible rapport signal sur bruit.

Cependant, en tenant compte de la structure multidimensionnelle de l'acquisition, des alternatives existent. Dans ce papier, nous proposons une nouvelle méthode : la double formation de voies (en émission et en réception) permettant d'extraire les ondes se propageant dans le milieu océanique et nous étudions sa robustesse face au bruit sur des données simulées.

Abstract – The aim of ocean acoustic tomography is to estimate sound speed velocity variations using waves travel time. Waves identification, necessary to estimate waves travel time, is often impossible using the temporal signal between a source and a receiver in real experiments due to the complexity of the propagation and to the weak signal to noise ratio

Using multidimensional recordings, between an array of sources and an array of receivers, and signal processing methods, this identification can be performed. In this paper, we propose a new method : double beamforming (in emission and reception) and study its robustness against noise on simulated data.

1 Introduction

1.1 Contexte

La tomographie acoustique océanique [4] estime les variations de la vitesse des ondes dans l'océan afin de fournir une carte spatiale et temporelle de cette variation, que les océanographes peuvent ensuite relier à des variations de température.

Jusqu'ici, les moyens expérimentaux classiquement utilisés en tomographie étaient constitués d'une source et d'une antenne verticale de récepteurs ; de nouveaux systèmes apparaissent aujourd'hui utilisant une antenne verticale d'émetteurs et une antenne verticale de récepteurs. Ainsi, le nombre de signaux enregistrés augmentant, il est possible d'obtenir plus d'information sur le milieu, notamment en combinant les différents signaux enregistrés afin d'extraire des informations non visibles sur un unique signal.

1.2 Démarche adoptée

La question primordiale est alors : "Quelle information extraire et de quelle manière réaliser l'extraction ?"

Au cours de la campagne, chacune des sources émet (l'une après l'autre) un signal enregistré sur l'antenne de récepteurs et l'ensemble de tirs enregistrés sur l'ensemble des capteurs constituent une "expérience". Ce processus est ensuite répété, permettant d'avoir une nouvelle expérience. L'idée est alors de mesurer les changements de vitesse de propagation des ondes entre ces deux expériences. Si le temps d'arrivée d'un rayon

augmente ou diminue, cela traduit une variation de la vitesse des ondes sur une partie de son trajet. En combinant l'information apportée par plusieurs rayons, ayant des trajets différents dans le milieu océanique, il est possible de localiser en espace la ou les variations de vitesse ainsi que leur amplitude

Pour résumer, il faut donc, sur chacune des expériences, identifier les ondes (entre un émetteur et un récepteur) pour mesurer les variations de leur temps de trajet (par rapport à l'expérience précédente). Ces temps de trajet sont ensuite utilisés comme entrées dans des algorithmes d'inversion et permettent de construire des cartes spatiales et temporelles de l'évolution de la vitesse des ondes [4].

L'identification des différentes ondes est rarement possible sur le signal enregistré entre une source et un capteur dans des configurations réelles, notamment à cause du mélange des ondes (plusieurs ondes arrivent au même instant) ou d'un faible rapport signal sur bruit (RSB). Il est alors nécessaire de prendre en compte la structure multidimensionnelle de l'acquisition pour réaliser cette identification ainsi que l'estimation des temps de trajet.

Dans ce papier, nous présenterons la méthode classique utilisant la formation de voies en réception et détaillerons particulièrement une nouvelle méthode : la double formation de voies (en émission et en réception). Puis nous étudierons sa robustesse face au bruit sur des données simulées et la comparerons à celle de la formation de voies classique.

2 Formation de voies

2.1 Méthode classique

Une méthode classique consiste à réaliser une formation de voies à la réception ([1][2][3]), c-à-d sur l'ensemble de signaux enregistrés sur l'antenne de réception pour une source donnée. Cette formation permet d'identifier, dans un plan angle de réception - temps de propagation, les ondes se propageant entre cette source et un récepteur de référence sur l'antenne de réception. Notons que cette formation de voies, classique en tomographie océanique, ne calcule pas la puissance dans une direction donnée mais fournit le signal temporel reçu dans cette direction.

Elle permet une meilleure identification des ondes propagées mais se révèle insuffisante si le RSB devient très faible ou dans le cas d'ondes ayant le même couple (temps, angle de réception). Grâce au nouveau réseau d'émetteurs, une double formation de voies peut alors être réalisée et rendre l'identification possible.

2.2 Double formation de voies

Considérons deux antennes verticales : une antenne d'émetteurs et une antenne de récepteurs. Chaque émetteur, situé à la profondeur z_e émet un signal enregistré sur l'ensemble des récepteurs, situés aux profondeurs z_r . Ces émissions se font de manière successive mais nous supposons (et cela est vérifié en pratique) que le temps pour réaliser l'ensemble des émissions est suffisamment court pour supposer l'océan invariant. Ainsi, pour une "expérience", l'ensemble des émissions, enregistrées sur l'ensemble des capteurs, est représenté sous la forme d'un cube de données : $p(t, z_r, z_e)$.

La première étape consiste à réaliser une formation de voies en réception sur chacun des plans $p(t, z_r)$ à z_e fixée. Le principe de la formation de voies sur un plan $p(t, z_r)$ est le suivant :

1. On choisit un récepteur de référence à la profondeur z_{r0} sur l'antenne de réception.
2. Pour un angle θ_r fixé, correspondant à une onde plane potentielle reçue sur le réseau, on calcule le retard de l'onde plane sur chacun des capteurs (par rapport au capteur de référence) : $r(z_r)$. Ce retard peut se calculer si la vitesse des ondes au niveau du réseau de récepteurs est connue (même approximativement).
3. On applique ensuite ces retards au plan $p(t, z_r)$ et on effectue la moyenne de l'ensemble des signaux décalés. Ceci permet d'obtenir le signal $p(t, \theta_r)$ correspondant à la formation de voies pour l'angle θ_r , c-à-d aux ondes reçues avec l'angle θ_r sur le récepteur de référence.
4. On renouvelle les étapes 2 et 3 pour chaque θ_r .

Après la formation de voies en réception, le plan $p(t, z_r)$ à z_e fixée devient donc le plan $p(t, \theta_r)$ à z_e fixée (figure 1). Cette formation de voies est réalisée pour tous les z_e possibles et les données résultantes forment un nouveau cube : $p(t, \theta_r, z_e)$.

Considérons maintenant le plan $p(t, z_e)$ à θ_r fixé. Ce plan contient l'ensemble des ondes émises par le réseau d'émetteurs

et arrivant sur le récepteur de référence avec un angle θ_r . En utilisant le principe de réciprocité spatiale [5], ce plan est équivalent à l'enregistrement sur tous les capteurs du réseau d'émission d'une onde qui aurait été émise par le récepteur de référence avec un angle θ_r fixé. A partir de cette constatation, il est possible de faire une formation de voies sur le réseau d'émission (à partir d'un émetteur de référence) pour un θ_r fixé. Le principe est le même que précédemment et permet de passer d'un plan $p(t, z_e)$ à θ_r fixé à un plan $p(t, \theta_e)$ à θ_r fixé (figure 2).

Cette formation de voies est réalisée pour tous les θ_r possibles. Ainsi le cube précédent devient un nouveau cube $p(t, \theta_r, \theta_e)$ où chaque signal $p(t)$ à θ_r et θ_e fixés contient les ondes ayant été émises par l'émetteur de référence avec un angle θ_e et reçues par le récepteur de référence avec un angle θ_r .

Cette transformation permet de séparer les ondes dans l'espace (t, θ_r, θ_e) alors que celles-ci étaient mélangées dans l'espace (t, z_r, z_e) . Il est alors possible, en observant le plan $p(z_r, z_e)$ à différents t fixés, d'identifier les différentes ondes se propageant entre les deux capteurs de référence.

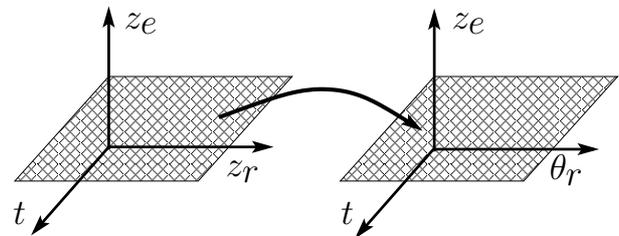


FIG. 1 – Formation de voies en réception

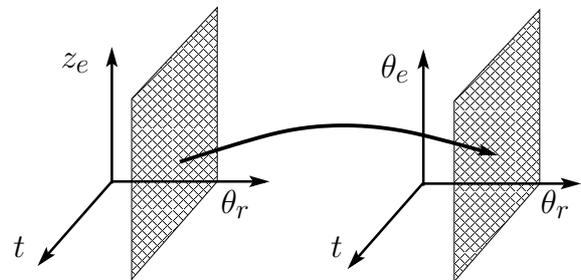


FIG. 2 – Formation de voies en émission

3 Robustesse face au bruit

3.1 Configuration

Nous illustrons la méthode présentée précédemment sur un jeu de données simulées issues d'un logiciel de propagation par équations paraboliques (figure 3). Les sources émettent un signal de fréquence centrale 1 kHz et de bande passante de 200 Hz. Nous disposons d'une antenne verticale 33 émetteurs et d'une antenne verticale de 49 récepteurs régulièrement espacées dans la colonne d'eau entre 4.5 et 148.5 m pour les sources et 3 et 147 m pour les récepteurs. Ces deux antennes sont distantes de 9 km.

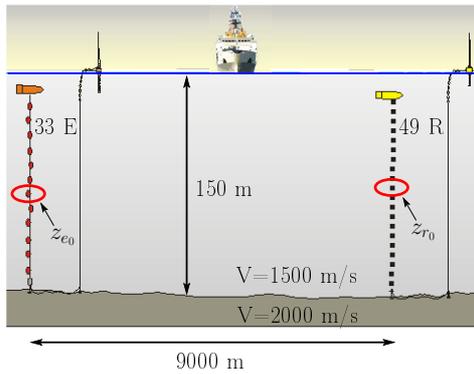
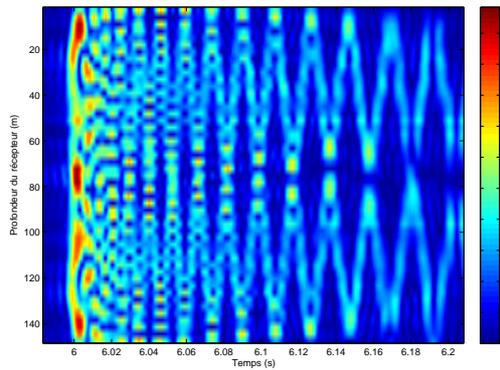
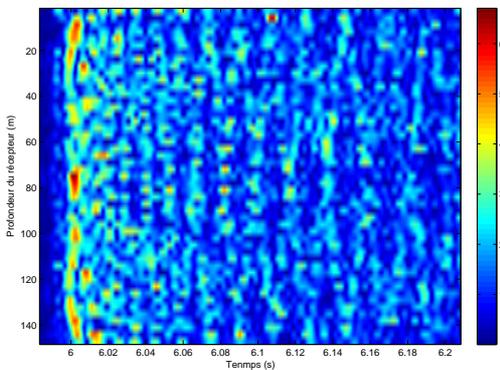


FIG. 3 – Configuration expérimentale

FIG. 4 – Enveloppe du signal temporel émis par la source à z_{e_0} enregistré par l'antenne de réception, sans bruit additifFIG. 5 – Enveloppe du signal temporel émis par la source à z_{e_0} enregistré par l'antenne de réception, avec RSB = 3 dB

Afin d'évaluer la méthode et sa résistance face au bruit, nous nous fixons un objectif : identifier les ondes se propageant entre la source située à $z_{e_0} = 76.5$ m et le récepteur situé à $z_{r_0} = 75$ m. Notons que les capteurs choisis peuvent être situés à n'importe quelle profondeur, il suffit de les choisir comme capteurs de référence dans les formations de voies. Dans le cas non bruité, il est possible d'identifier certaines ondes sur le signal temporel (figure 4) mais cela devient impossible si le rapport signal sur bruit diminue (figure 5, représentant les mêmes signaux, bruités avec un RSB de 3 dB).

3.2 Résultats obtenus

Le signal émis occupant seulement une partie de la bande fréquentielle possible, nous avons ajouté du bruit, blanc et gaussien, uniquement dans cette bande. Nous définissons donc le RSB de la manière suivante : rapport de puissance entre le signal et le bruit "dans la bande du signal".

Afin d'identifier les ondes, deux méthodes sont utilisées : méthode classique de formation de voies à la réception et double formation de voies. Nous présentons les résultats obtenus pour deux RSB différents : 0 dB et -10 dB.

Nous présentons ici le cas où la vitesse des ondes au niveau des réseaux d'émission et de réception est connue (les formations de voies sont donc parfaitement réalisées). L'effet d'une erreur sur la connaissance de ces vitesses fera l'objet de travaux futurs mais nous pouvons d'ores et déjà annoncer qu'une erreur faible (une dizaine de m/s) n'affecte pas de manière significative les résultats obtenus.

RSB = 0 dB : La figure 6 présente les résultats obtenus par simple formation de voies des signaux enregistrés sur l'antenne de réception et provenant de la source à z_{e_0} (récepteur de référence à z_{r_0}). Elle présente, au cours du temps, les enveloppes des signaux arrivant sur le capteur de référence en fonction de l'angle de réception. Dans ce cas, il est possible de séparer les différentes ondes (car les taches correspondantes sont visibles et séparées dans le plan $p(t, z_r)$ à z_{e_0}) et d'estimer leur temps d'arrivée. La double formation de voies n'est donc pas indispensable ici.

RSB = -10 dB : Etudions le cas d'un environnement fortement bruité. Comme dans le cas précédent, nous réalisons la formation de voies sur l'antenne de réception (figure 7). Les différentes ondes ne sont plus visibles et le suivi des temps d'arrivée ne peut donc pas être réalisé. Nous appliquons alors la double formation de voies sur le cube de données $p(t, z_r, z_e)$ (avec comme capteurs de référence les capteurs situés à z_{r_0} et z_{e_0}). Nous obtenons alors un cube $p(t, \theta_r, \theta_e)$ contenant les ondes propagées entre la source à z_{e_0} et le récepteur à z_{r_0} .

Il est possible de balayer ce cube suivant l'axe des temps pour observer les ondes, avec leur angle d'émission et de réception. La figure 8 présente un plan du cube $p(t, \theta_r, \theta_e)$ à $t = 6.008$ s. On peut identifier deux ondes, ayant comme couple (θ_r, θ_e) les couples : $(-3^\circ, -3^\circ)$ et $(2.8^\circ, 2.8^\circ)$. Ces ondes n'étaient pas identifiables après une simple formation de voies en réception mais le sont ici. La double formation de voies permet donc de limiter efficacement l'influence du bruit affectant les données même si celui-ci est très important.

4 Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté une méthode originale d'extraction d'ondes permettant ensuite l'estimation de leur temps d'arrivée. Cette méthode, basée sur le principe de réciprocité spatiale utilise une double formation de voies en réception et en émission et s'avère efficace en tomographie acoustique océanique. En la testant dans des environnements fortement bruités, nous avons montré la possibilité d'identification des ondes pour des RSB allant jusqu'à -10 dB.

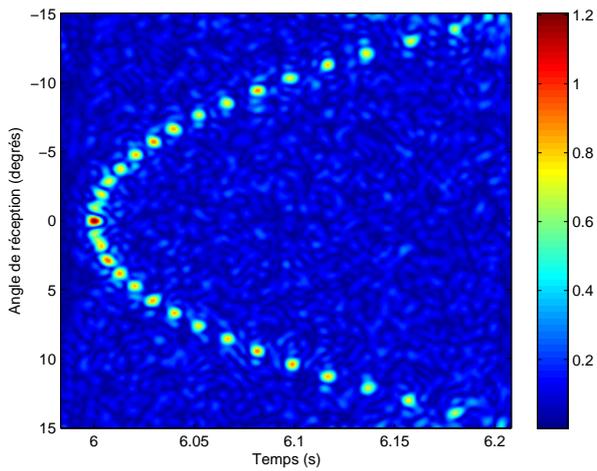


FIG. 6 – Formation de voies du signal émis à z_{s_0} enregistré par l'antenne de réception, RSB = 0 dB

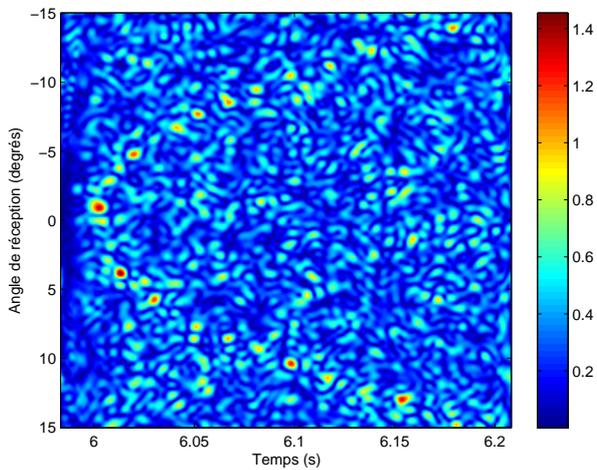


FIG. 7 – Formation de voies du signal émis à z_{s_0} enregistré par l'antenne de réception, RSB = -10 dB

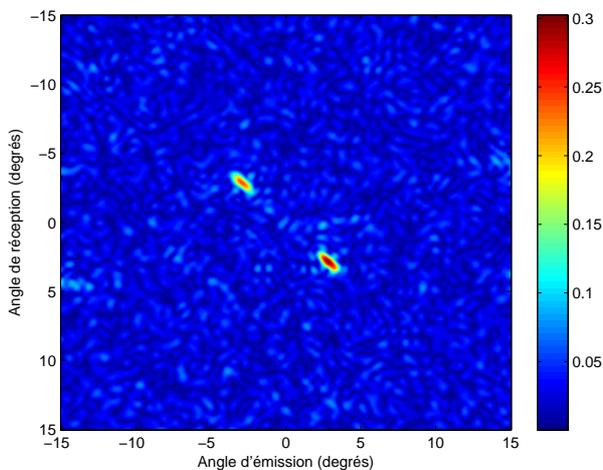


FIG. 8 – Double formation de voies : coupe du cube $p(t, \theta_r, \theta_e)$ à $t = 6.008$ s, RSB = -10 dB

Références

- [1] Y.T. Lo et S.W. Lee *Antenna Handbook* Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1993, chap 11.
- [2] R.E. Collin et F.J. Zucker *Antenna Theory, part 1*. McGraw-Hill Book Company, 1969.
- [3] M. Dzieciuch, P. Worcester et W. Munk. *Turning point filters : analysis of sound propagation on a gyre scale* J. Acoust. Society America, vol. 110, n°1, pp 135-149, 2001.
- [4] W. Munk, P. Worcester et C. Wunsch. *Ocean Acoustic Tomography* Cambridge monographs on mechanics, 1995.
- [5] P.M. Morse et H. Feshbach. *Methods of Theoretical Physics* MacGraw Hill, New York, 1953.