

Séparation d'ondes par double formation de voies: Application à la campagne FAF03 de tomographie acoustique océanique

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

¹GIPSA-lab, Département Images Signal
961 rue de Houille Blanche, 38902 St Martin d'Hères, France

²Laboratoire de Géophysique Interne et de Tectonophysique
1381 rue de la Piscine, 38051 St Martin d'Hères, France

ion.iturbe@gipsa-lab.inpg.fr, Philippe.Roux@obs.ujf-grenoble.fr
barbara.nicolas@gipsa-lab.inpg.fr, jerome.mars@gipsa-lab.inpg.fr

Résumé – En tomographie acoustique, la formation de voies est souvent appliquée sur des données obtenus sur une antenne de récepteurs, dans le but de mieux identifier les arrivées des différents rayons et de pouvoir mesurer ensuite leurs temps de propagation. Dans ce papier, nous proposons une nouvelle méthode pour des données obtenues à partir d'une antenne d'émetteurs et une antenne de récepteurs: la double formation de voies (en émission et en réception). Nous analysons son utilité sur des données réelles obtenues dans un chenal acoustique sous-marin.

Abstract – In travel-time acoustic tomography, beamforming is often applied on data recorded by an antenna of receivers. Beamforming allows to identify the arrivals of different rays and to measure their travel times. In this paper, we propose a new method for data recorded by an antenna of transmitters and an antenna of receivers: double beamforming (in emission and reception). We analyse its benefit on shallow water at-sea data.

1 Introduction

La tomographie acoustique océanique consiste à estimer les variations locales de la température de l'eau via les mesures de temps de propagation des ondes, dans une portion d'océan située entre un émetteur et des récepteurs. Dans le cas où la propagation est bien décrite par la théorie des rayons, les variations de température produisent des variations du temps de propagation des rayons se propageant dans le milieu. La tomographie consiste à résoudre le problème inverse suivant : estimer les variations de température à partir des mesures de variation du temps de propagation des rayons, via des méthodes d'inversion [11].

Comme dans tout problème de tomographie, plus le nombre de rayons sera important, meilleure sera la résolution spatiale après l'inversion. C'est donc dans ce contexte que les méthodes de séparation d'ondes entrent en jeu. A partir des enregistrements bruts où les arrivées des différents rayons interfèrent entre eux (empêchant la mesurer précise de leurs temps de propagation), il faut séparer les arrivées des différents rayons, pour pouvoir ainsi tirer des informations précises sur chacun de ces rayons.

Dans ce but, en tomographie acoustique sous-marine, la formation de voies est généralement appliquée sur une antenne de récepteurs enregistrant le signal émis par un unique émetteur. Cela nous permet de séparer les rayons arrivant sur l'antenne par leurs différents angles de réception, et leurs temps de propagation.

Nous nous plaçons ici dans la configuration plus com-

plexe mais plus riche d'une antenne de récepteurs et une antenne d'émetteurs. Dans ce cadre, et sous certaines hypothèses (réciprocité spatiale et stationnarité du milieu pendant l'acquisition), nous réalisons une double transformation : en réception et en émission. Cette double transformation permettra de séparer les arrivées des différents rayons, non seulement par rapport à leur temps de propagation et angle de réception, mais également par rapport à leur angle d'émission.

Dans ce papier, nous présenterons tout d'abord la formation de voies classique, puis nous introduirons la double formation de voies. Enfin, nous illustrerons le gain apporté par cette double formation de voies sur des signaux réels issus d'une campagne de tomographie en mer (campagne FAF03).

2 Séparation d'ondes

2.1 Formation de voies classique

La formation de voies a été introduite en acoustique sous-marine vers les années quarante. La théorie de base, le calcul des diagrammes de directivité, pour différentes types d'antennes (linéaires, circulaires,...) a été présentée par [1] et [2]. Des travaux sur l'optimalité de la formation de voies sont proposés dans [3], [4], [5],.... Avec l'apparition des appareils numériques, de nombreux travaux sur l'implémentation des algorithmes ont été réalisés ([6], [7],...). Finalement, pendant les années quatre-vingt

quelques études des performances de la formation de voies vis à vis des erreurs des récepteurs [8], des erreurs sur le calcul de la loi de retard [9], et sur la cohérence des sources [10] ont été réalisés. La bibliographie dans le domaine est donc très large et variée.

Par souci de simplicité, on travaillera ici avec l'équation 1 pour exprimer la formation de voies.

Plaçons nous dans le cadre de la tomographie sous-marine. On enregistre sur une antenne linéaire d'hydrophones placée verticalement dans l'océan, le champ de pression produit par l'arrivée des rayons provenant d'une source omnidirectionnelle (généralement un émetteur acoustique). On obtient donc des données $p(t, z_{ri})$ où p est la pression enregistrée au cours du temps t par le récepteur i situé à la profondeur z_{ri} . Le but ensuite est d'identifier les arrivées des différents rayons s'étant propagés dans le milieu.

Dans ce cadre, on choisit un récepteur de référence et on réalise la formation de voies telle que :

$$p(t, \theta_r) = \frac{1}{N_r} \sum_{i=1}^{N_r} p(t + \tau_i(\theta_r), z_{ri}) \quad (1)$$

où N_r est le nombre de récepteurs; z_{ri} , la profondeur du i -ème récepteur; et τ_i le retard à chaque récepteur i , calculé théoriquement à partir d'une onde plane arrivant sur l'antenne avec un angle de réception θ_r .

Dans le cas d'un profil de vitesse non uniforme, τ_i peut être calculé par l'équation 2, donnée par Dzieciuch [12].

$$\tau_i(\theta_r) = \int_{z_{r0}}^{z_{ri}} \sqrt{\frac{1}{c^2(z)} - \frac{\cos^2(\theta_r)}{c_0^2}} \quad (2)$$

où $c(z)$ est la célérité en fonction de la profondeur; z_{r0} est la profondeur du récepteur choisit comme référence; et c_0^2 est la célérité minimal dans le milieu.

En réalisant le calcul (1) pour plusieurs θ_r (arbitrairement choisis), on transforme les données initiales du domaine (t, z_r) au domaine (t, θ_r) . Dans ce domaine (t, θ_r) l'arrivée de chaque rayon est localisée autour de son angle de réception, alors que dans le domaine (t, z_r) chaque arrivée occupe tout l'espace z_r . On obtient ainsi après transformation, une meilleure séparation des différentes rayons. Cependant, le pouvoir de séparation de la formation de voies est limité par la taille du réseau de récepteurs, et comme on illustrera avec l'exemple sur des données réelles, on trouve des cas où cette transformation ne suffit pas. Notamment lorsque plusieurs rayons arrivent à des instants proches, avec des angles d'arrivée également proches.

Nous verrons que cette limitation peut être surmontée, grâce à l'utilisation d'une antenne d'émetteurs.

2.2 Double formation de voies

Nous nous plaçons maintenant dans le cas de données issues d'une expérience avec une antenne d'émetteurs et une antenne de récepteurs, présentées sur la figure 3.

Chaque émetteur j , situé à la profondeur z_{ej} , émet un signal dont la réponse est enregistrée sur l'ensemble des récepteurs, situés à des profondeurs z_{ri} . Ces émissions se font de manière successive, et l'ensemble de tirs successifs émis par tous les émetteurs et enregistrés sur tous les

récepteurs, est appelée "expérience". Si le temps pour réaliser une expérience est suffisamment petit par rapport au temps d'une possible variation du milieu, on peut considérer que le milieu reste invariant pendant l'expérience. On obtient ainsi pour une expérience, un cube de données $p(t, z_{ri}, z_{ej})$, où p est la pression acoustique en fonction du temps t , enregistrée sur le récepteur i pour une émission de l'émetteur j .

Sur ces données, la double formation de voies est réalisée en deux étapes :

1. On réalise une formation de voies classique sur les données obtenus pour chaque émetteur (sur chaque plan $p(t, z_r, z_{ek})$ obtenue pour chaque émetteur k , pour des θ_r désirés. Réalisant cette opération pour tous les k , on transforme les données du domaine (t, z_r, z_e) au domaine (t, θ_r, z_e) (fig.1).

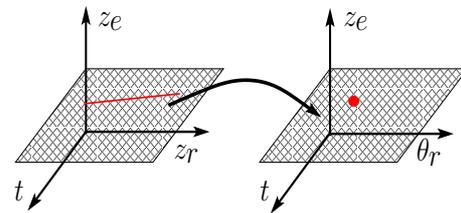


FIG. 1 – Première formation de voies

2. L'hypothèse de réciprocité spatiale du milieu est utilisée [13][14]. La réciprocité consiste à dire que le champ de pression produit sur un point B par un signal $s(t)$ émis d'un point A, est le même que le champ qui aurait été produit en A, si on avait émis $s(t)$ de B. Sous cette hypothèse, on peut interpréter chaque plan $p(t, \theta_{rk}, z_e)$ pour un angle de réception fixe (k fixe), comme étant l'enregistrement sur l'antenne d'émission, d'une onde partie du récepteur de référence avec l'angle θ_{rk} . On peut donc voir ces données comme correspondant à l'enregistrement sur une antenne, et on peut appliquer à nouveau la formation de voies (eq.1), maintenant par rapport à z_e au lieu de z_r (fig.2).

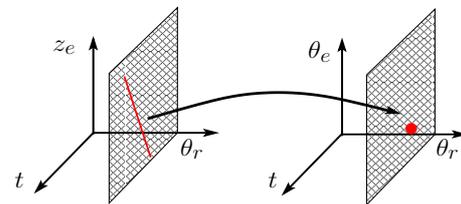


FIG. 2 – Deuxième formation de voies

Réalisant cette opération pour tous les angles de réception (tous les k), on transforme les données du domaine (t, θ_r, z_e) au domaine (t, θ_r, θ_e) .

Dans ce domaine finale (t, θ_r, θ_e) on pourra séparer les rayons par leur temps de propagation, leur angle de réception, et leur angle d'émission. On a ainsi ajouté un nouveau critère de séparation, qui est l'angle d'émission.

L'expression mathématique de la double formation de voies est donnée par l'équation 3 :

$$p(t, \theta_r, \theta_e) = \frac{1}{N_e N_r} \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_e} p(t + \tau_i(\theta_r) + \tau_j(\theta_e), z_{ri}, z_{ej}) \quad (3)$$

où z_{ri} , τ_i et θ_r , ont été définis précédemment (eq.1); z_{ej} est la profondeur du j -ème émetteur; τ_j le loi des retards d'une onde plane arrivant sur l'antenne d'émetteurs avec un angle de réception θ_e ; et t , le temps de propagation entre l'émetteur de référence et le récepteur de référence.

Dans notre cas, nous avons une antenne linéaire d'émission (à N_e composantes) et une antenne de réception (à N_r composantes). Cependant, on remarque que l'expression de la **Double Formation de Voies** (equa. 3), est identique à la **Formation de Voies en 2D** réalisé à partir d'une seule antenne de réception à deux dimensions avec $N_e * N_r$ composantes régulièrement réparties sur le plan ([17]). On pourra donc profiter en grande partie des analyses de performances qui ont déjà été réalisées sur les antennes 2D, pour analyser notre méthode.

Mailloux [15] réalise une analyse de performances de la formation de voies à deux dimensions pour le cas des signaux à fréquence pure. Des analyses pour le cas de certains signaux non sinusoïdaux ont aussi été faites ([16] [17]). En effet, ces dernières sont plus proches de nos applications en acoustique sous-marine. Finalement, une analyse expérimentale des performances de la double formation de voies vis à vis d'un bruit blanc est présentée en [18].

3 Application sur données réelles

La configuration de la campagne d'acquisition FAF03, réalisée en juillet 2003 en large de l'île d'Elbe, est présentée sur la figure 3. Une antenne de 29 émetteurs et une antenne de 32 récepteurs ont été placées verticalement, à 8.6 km de distance, dans un guide d'ondes d'environ 115 m de profondeur.

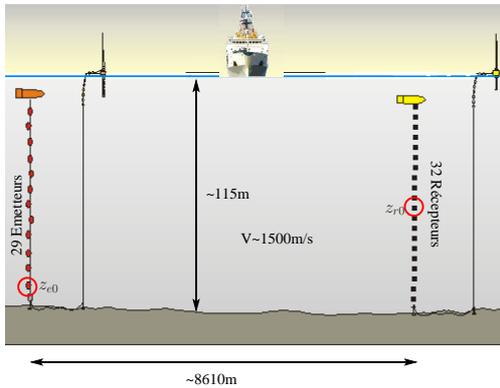


FIG. 3 – Descriptif de la campagne FAF03

Pour illustrer l'utilité de la double formation de voies, nous étudions un cas produisant des rayons "difficiles" à séparer par la méthode classique : le cas d'une propagation à partir d'une source z_{e0} proche du fond, vers un point z_{r0} du milieu de l'antenne de récepteurs (figure 3).

La propagation entre ces deux points donne lieu à plu-

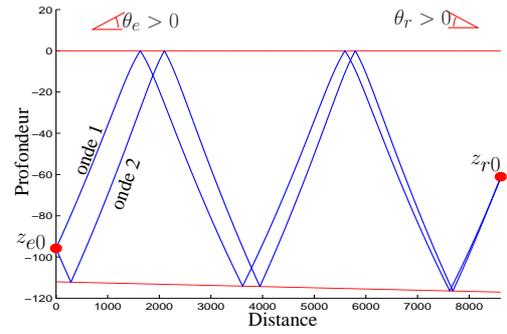


FIG. 4 – Résultat de simulation : tir de l'émetteur en z_{e0} , réception sur le centre de l'antenne de récepteurs z_{r0}

sieurs rayons avec différents trajets. La figure 4 illustre les trajets (obtenus en simulation) de deux de ces rayons. Les parcours de ces deux rayons étant très proches, leur temps d'arrivée ainsi que leur angle de réception sont très proches.

En effet, la figure 5 montre l'enveloppe du résultat obtenu avec la formation de voies classique, en utilisant les données provenant de l'émetteur en z_{e0} et enregistrées sur l'antenne de récepteurs. On choisit le récepteur de référence en z_{r0} . Chacune des taches visibles sur la figure correspond alors a priori à l'arrivée d'un rayon, avec son temps de propagation et son angle de réception.

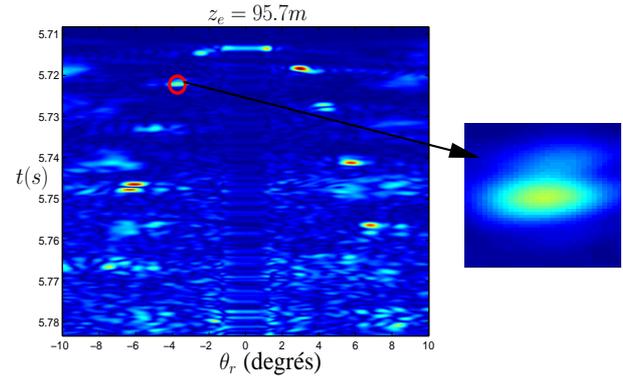


FIG. 5 – Résultat de la méthode classique et zoom.

Par simulation (figure 4), on sait qu'autour de $t_{onde} = 5.722$ s et $\theta_{r_{onde}} = -3.75^\circ$ deux rayons devraient arriver. Or, si on regarde la figure 5 autour de ces t_{onde} et $\theta_{r_{onde}}$, on ne voit qu'une seule tache. On ne peut donc pas séparer ces deux rayons par la méthode classique. De plus, on peut remarquer que ces deux rayons interfèrent destructivement, ce qui explique l'amplitude faible de la tache obtenue.

Les figures 6 et 7 montrent l'enveloppe du résultat de la double formation de voies, avec émetteur et récepteur de référence en z_{e0} et z_{r0} , pour deux instants autour de t_{onde} . On voit une tache en $t = 5.7214$ s, $\theta_r = -3.75^\circ$, $\theta_e = 3.5^\circ$ (fig.6), qui correspond au rayon 1 sur la figure 4; et une deuxième tache en $t = 5.7221$ s, $\theta_r = -3.75^\circ$, $\theta_e = -3.5^\circ$ (fig.7), qui correspond au rayon 2 sur la figure 4. On arrive donc avec la double formation de voies à séparer ces deux rayons, car leurs angles d'émission sont bien différents (opposés en signe). On pourra ainsi utiliser ces deux rayons pour augmenter la résolution spatiale de la tomographie.

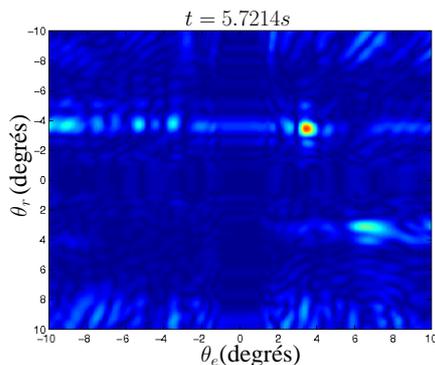


FIG. 6 – Résultat de la double formation de voies, $t = 5.7214s$. Tache en $(\theta_r = -3.75^\circ, \theta_e = 3.5^\circ)$

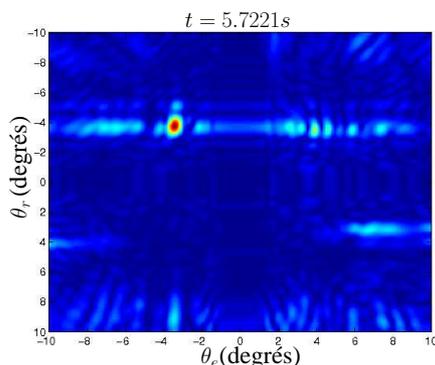


FIG. 7 – Résultat de la double formation de voies, $t = 5.7221s$. Tache en $(\theta_r = -3.75^\circ, \theta_e = -3.5^\circ)$.

4 Conclusion

Dans cet article, nous avons proposé une nouvelle méthode de séparation d'ondes, qui permet de profiter de l'utilisation d'une antenne d'émetteurs en acoustique sous-marine. La double formation de voies (en émission et en réception), basée sur le principe de réciprocité spatiale, a montré son efficacité pour la tomographie acoustique sous-marine, permettant ainsi de séparer certains rayons qui n'étaient pas séparables par une simple formation de voies en réception.

Au cours des futurs travaux en tomographie, cela nous permettra d'utiliser les temps de propagation d'un plus grand nombre de rayons dans les méthodes d'inversion, et d'obtenir ainsi des meilleures résolutions spatiales des cartes de température du milieu.

Nous avons aussi remarqué que l'expression mathématique de cette transformation correspond exactement à celle de la formation de voies utilisé sur des antennes à deux dimensions.

5 Remerciements

Nous souhaitons remercier Mark Stevenson (NURC, La Spezia) pour l'accès aux données FAF03.

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] R.L. Pritchard *Optimum Directivity Patterns for Linear Point Arrays* J. Acoust. Society America, vol. 25, n°5, pp 879-891, 1953.
- [4] N. Davids, E.G. Thurston et R.E. Mueser *The Design of Optimum Directional Acoustic Arrays* J. Acoust. Society America, vol. 24, n°1, pp 50-56, 1952.
- [5] J.A. Smolko *Optimization of Pattern Sidelobes in Arrays With Regular Subarray Architectures* Antennas and Propagation Society International Symposium IEEE, vol. 2, pp 756-759, 1998.
- [6] V.C. Anderson *Digital Array Phasing* J. Acoust. Society America, vol. 32, n°7, pp 867-870, 1960.
- [7] B. Maranda *Efficient digital beamforming in the frequency domain* J. Acoust. Society America, vol. 86, n°5, pp 1813-1819, November 1989.
- [8] D.J. Ramsdale *Effect of element failure and random errors in amplitude and phase on the sidelobes level attainable with a linear array* J. Acoust. Society America, vol. 68, n°3, pp 901-906, September 1989.
- [9] L.C. Godara *The Effect of Phase-Shifter Errors on the Performance of an Antenna-Array Beamformer* IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. OE-10, n°3, pp 278-284, July 1985.
- [10] V.U. Reddy, A. Paulraj et T. Kailath *Performance Analysis of the Optimum Beamformer in the Presence of Correlated Sources and Its Behavior Under Spatial Smoothing* IEEE Transactions on Acoustics, vol. ASSP-35, n°7, pp 927-936, July 1987.
- [11] W. Munk, P. Worcester et C. Wunsch *Ocean Acoustic Tomography*. Cambridge, 1995.
- [12] 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.
- [13] P.M Morse et H. Feshbach *Methods of theoretical physics I* McGraw-Hill Book Company, Inc, 1953.
- [14] P.M Morse et K. Uno Ingard *Theoretical Acoustics* Princeton University Press, 1986.
- [15] R.J. Mailloux *Phased array theory and technology* Proc. IEEE, vol. 70, issue 3, pp 246-291, Mar. 1982.
- [16] H.F. Harmuth *Synthetic-Aperture Radar Based on Nonsinusoidal Functions : X-Array Gain, Planar Arrays, Multiple Signals* IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. EMC-23, n°2, pp 72-79, May 1981.
- [17] N.J. Mohamed *Two-Dimensional Beamforming with Nonsinusoidal Signals* Proc. IEEE, vol. 70, issue 3, pp 246-291, Mar. 1982.
- [18] B Nicolas, P. Roux, I. Iturbe et J. Mars *Double formation de voies pour l'estimation de temps de trajets en contexte fortement bruité* GRETSI, 2007.