

Champs d'ondes adaptés en fréquences spatiales et temporelles : application en ASM

Barbara NICOLAS, Jean-Louis LACOUME, Jérôme MARS

Laboratoire des Images et Signaux

ENSIEG/INPG, Domaine universitaire, BP 46, 38402 Saint Martin d'Hères, France

barbara.nicolas@lis.inpg.fr, jean-louis.lacoume@lis.inpg.fr, jerome.mars@lis.inpg.fr

Résumé – Le traitement par champs adaptés (Matched Field Processing) est fréquemment utilisé pour localiser des sources dans le domaine des ondes Ultra Basses Fréquences (< 100 Hz). Nous utilisons ici le MFP associé au traitement du signal et à la physique de la propagation pour estimer la profondeur d'une source UBF. Cette localisation est effectuée dans un environnement petits fonds à partir d'un réseau de capteurs horizontal posé sur le fond. Le traitement par champs d'ondes adaptés est réalisé dans le domaine fréquence-nombre d'onde et se base sur les coefficients d'excitation des modes dans le cas d'une propagation guidée.

Abstract – Matched Field Processing is frequently used to localize underwater sources, in range and depth, using arrays recording Ultra Low Frequency waves (< 100 Hz). In this paper, we use matched-field techniques, guided waves propagation and signal processing tools to estimate source depth in a shallow water environment with a horizontal array. MFP is performed in the frequency-wavenumber domain and is based on modes excitation factors in waveguides.

1 Introduction

La localisation de source en acoustique sous-marine (estimation de la distance et de la profondeur) a donné lieu à de nombreuses recherches. Les méthodes classiques supposent que les ondes reçues par le réseau de capteurs sont planes et utilisent la formation de voies pour déterminer la direction de la source. Ces méthodes ne sont pas adaptées dans le cas d'une propagation océanique petits fonds car le signal reçu sur l'antenne est une somme de trajets ayant subi de nombreuses réflexions sur la surface et le fond. Pour prendre en compte la propagation acoustique océanique, le traitement par champs adaptés (ou Matched-Field Processing, MFP) a été proposé [2]. D'autres méthodes d'estimation de la profondeur sont basées sur la décomposition théorique des modes [9] mais fonctionnent uniquement sur des réseaux verticaux et à une fréquence unique.

Nous proposons ici d'utiliser conjointement les techniques de MFP, la physique de la propagation et le traitement de signal afin d'estimer la profondeur de la source. Pour cela, le champ acoustique est enregistré sur un réseau de capteurs horizontal. Le traitement par champs adaptés est ensuite effectué en fréquences spatiales et temporelles. En effet, l'étude de la physique de la propagation guidée indique que les modes, bien séparés sur la représentation fréquence-nombre d'onde $f - k$ (double transformée de Fourier en temps et en distance), sont plus ou moins excités suivant la profondeur de la source [5].

Après un bref rappel sur le MFP, nous justifierons le choix de la représentation $f - k$ en étudiant la propagation des modes dans un guide d'ondes parfait. Puis la transformée $f - k$ sera utilisée pour établir la fonction de coût nécessaire au MFP. Une étude de la qualité de l'estimation sera ensuite réalisée afin de montrer que la minimisation de la fonction de coût permettra effectivement l'estimation de la profondeur de la source. Enfin, nous utiliserons le traitement par champs d'ondes adaptés pour estimer la profondeur de la source sur des données réelles issues de campagne sismique.

2 Estimation de la profondeur par traitement de champs adaptés

Les applications du MFP sont diverses : estimation des paramètres géoacoustiques des fonds océaniques [3, 8] ou encore localisation de sources en utilisant des antennes dans le domaine des ondes Ultra Basses Fréquences (< 100 Hz) [1, 10]. Le traitement consiste à choisir une fonction de coût dépendant des paramètres à estimer puis à effectuer l'estimation de ces paramètres en la minimisant. Un exemple de MFP permettant la localisation d'une source consiste à maximiser une fonction de corrélation entre le champ acoustique mesuré sur un réseau de capteurs, généralement vertical, et un champ simulé dans un environnement similaire et dépendant de la position de la source [4]. La plupart des méthodes utilisent le signal temporel enregistré par les capteurs ou son spectre pour calculer la fonction de coût [10].

Dans notre cas, la transformée $f - k$ est utilisée pour établir la fonction de coût. Deux fonctions de coût sont étudiées : la première utilise la totalité de la transformée $f - k$ alors que la seconde ne tient compte que des modes sur cette même représentation. Pour justifier ces choix, nous étudions la propagation des modes dans un guide d'ondes idéal.

2.1 Modes du guide d'ondes idéal

Considérons un guide d'ondes de hauteur D . Les interfaces air/eau et eau/sol sont supposées parfaitement réfléchissantes (coefficient de réflexion de -1 et 1). Le milieu de propagation est invariant en distance horizontale r et les propriétés du milieu ne dépendent pas de la profondeur z (célérité c et masse volumique ρ constantes). En supposant les ondes cylindriques, par raison de symétrie, nous nous intéressons uniquement à la propagation dans le plan distance-profondeur ($r - z$). Les capteurs sont posés sur le fond et la source ponctuelle, située à la

profondeur z_s , émet un signal mono-fréquentiel. L'extension de l'étude théorique au cas d'une source large bande ne sera pas présentée mais les résultats sont identiques. Par conséquent, le traitement par champs adaptés fonctionnera pour une source large bande afin d'utiliser toute l'information reçue.

La pression acoustique $P(r, z, t)$ reçue au point $C(r, z)$ peut s'exprimer sous la forme $P(r, z, t) = p(r, z)e^{-i\omega t}$ où $p(r, z)$ satisfait l'équation générale d'Helmholtz :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \rho \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \right) + \frac{\omega^2}{c^2} p = -\frac{\delta(r)\delta(z - z_s)}{2\pi r} \quad (1)$$

avec ω la pulsation. À partir de cette équation, en utilisant la séparation des variables, ainsi que les conditions aux limites [5, 8], on exprime la pression en champs lointain sous forme d'une somme de modes (indiqués par m) :

$$p(r, z) = A \sum_{m=1}^{+\infty} \psi_m(z_s) \psi_m(z) \frac{\exp(ik_{rm}r)}{\sqrt{k_{rm}r}} \quad (2)$$

où les fonctions d'excitation des modes s'expriment en fonction de la profondeur de la source z_s par :

$$\psi_m(z_s) = \sqrt{\frac{2}{D}} \sin(k_{zm}z_s) \quad (3)$$

avec $k_{zm} = (2m - 1)\pi / (2D)$. La figure 1 présente l'évolution de facteurs d'excitation des modes en fonction de la profondeur. Deux exemples sont présentés : pour une source située à $z_{S_1} = 0.2D$, les coefficients d'excitations des quatre premiers modes sont : 0.10, 0.28, 0.34 et 0.28, alors que pour une source située à $z_{S_1} = 0.5D$, ils deviennent tous égaux à 0.25.

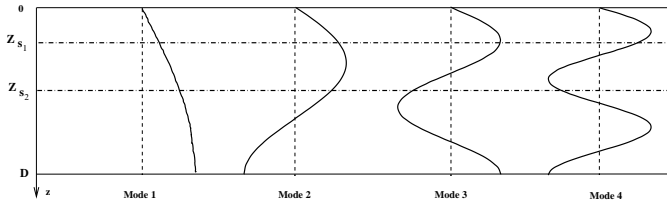


FIG. 1: Facteur d'excitation des modes en fonction de la profondeur et exemple de 2 sources situées à z_{S_1} et z_{S_2}

Pour faire apparaître les facteurs d'excitation des modes, nous utilisons le module de la transformée $f-k$ des données enregistrées sur le réseau de capteurs horizontal. Une première étude de cette représentation dans le cas d'une propagation guidée a montré que les modes y étaient séparés [7]. Les facteurs d'excitation des modes dépendant de la profondeur de la source, la représentation $f-k$ (Fig. 2) va permettre une comparaison immédiate entre les facteurs d'excitation des modes du modèle et ceux des données à traiter, et donc l'estimation de la profondeur de la source.

2.2 MFP : fonction de coût

Pour comparer les facteurs d'excitation des modes entre les données simulées et les données à traiter, nous construisons une fonction de coût. Deux fonctions de coût sont étudiées : la première est associée à toute la représentation $f-k$ tandis que la deuxième est liée aux zones d'existence des modes dans cette représentation.

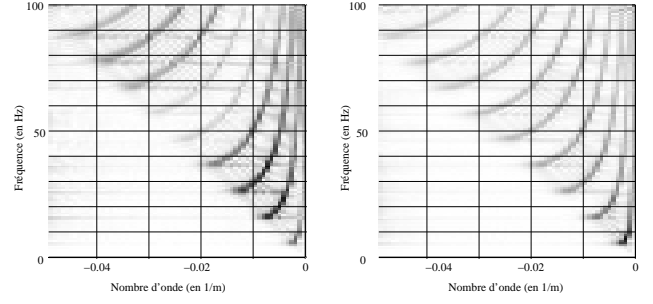


FIG. 2: Exemple de deux représentations $f-k$ simulées dans un guide parfait de hauteur D à deux profondeurs de source différentes : z_{S_1} et z_{S_2}

2.2.1 Fonction de coût associée à toute la représentation $f-k$

Le module de la représentation $f-k$ (de la section sismique) centré et réduit est considéré comme une image $fk_{reel}(i, j)$ de taille $m \times n$. La fonction de coût choisie est alors l'erreur quadratique moyenne [8] entre les modules des représentations $f-k$ des données réelles $fk_{reel}(i, j)$ et des données simulées $fk_{simu}(i, j)$, également centré et réduit :

$$EQM = \frac{1}{mn} \sum_i \sum_j \|fk_{reel}(i, j) - fk_{simu}(i, j)\|^2 \quad (4)$$

A partir de cette EQM qui sera la fonction de coût utilisée, on construit un rapport signal sur bruit (RSB), le signal étant le module de la représentation $f-k$ des données réelles et le bruit la différence entre les modules des représentations $f-k$ des données réelles et simulées :

$$\begin{aligned} RSB &= 10 \log_{10} \frac{\sum_i \sum_j \|fk_{reel}(i, j)\|^2}{EQM} \\ &= 10 \log_{10} \frac{1}{\sum_i \sum_j \|fk_{reel}(i, j) - fk_{simu}(i, j)\|^2} \end{aligned} \quad (5)$$

Le traitement par champs adaptés consiste alors à maximiser ce RSB pour estimer la profondeur de la source. Pour une section sismique réelle à traiter, on simule une série de sections sismiques dans un environnement similaire avec des profondeurs de sources différentes (l'identification de l'environnement a été étudiée dans [6]). Pour chaque simulation, on calcule le RSB entre le $f-k$ simulé et le $f-k$ réel (à partir de l'équation 5). La profondeur simulée pour laquelle le RSB est maximum nous donne alors la profondeur de la source (Fig. 3).

Les champs simulés sont calculés en utilisant un algorithme de modélisation par différences finies dans le plan temps-distance développé par J. Virieux [11]. Cette modélisation est exacte pour de nombreux environnements. Le modèle prend en compte les ondes d'interfaces ainsi que les modes à fuite et fournit donc des simulations fidèles pour l'environnement marin petits fonds étudié ici.

2.2.2 Fonction de coût associée à l'existence des modes dans la représentation $f-k$

Un autre choix possible pour la fonction de coût est d'utiliser uniquement les zones de l'espace $f-k$ où les modes sont présents. Ainsi, la fonction de coût établie sera moins sensible au bruit et ses variations permettront une meilleure estimation de la profondeur de la source dans le cas de données réelles.

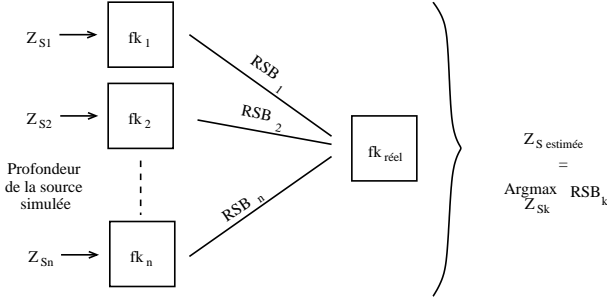


FIG. 3: Fonctionnement du MFP

Une étape préliminaire consiste à définir un coefficient d'excitation des modes à partir de la transformée $f-k$. Pour chaque mode, un masque binaire (0 – 1) est obtenu à partir de l'équation 6 (où θ_1 représente l'angle d'incidence et est lié au nombre d'onde horizontal k_{rm} par : $k_{rm} = f_m/V_1 \cos \theta_1$). On effectue ensuite une dilatation de ce masque. Cette étape est nécessaire car, dans le cas de données réelles, les modes seront localisés sur une région et non sur une simple ligne.

$$\tan\left(\frac{2\pi f_m H_1 \cos \theta_1}{V_1} - \left(m - \frac{1}{2}\right)\pi\right) = \frac{\rho_1 \sqrt{\sin^2 \theta_1 - (V_1/V_2)^2}}{\rho_2 \cos \theta_1} \quad (6)$$

Puis la représentation $f-k$ de la section étudiée est multipliée par ce masque dilaté. La valeur moyenne de la représentation $f-k$ sur la zone isolée par le masque représente le coefficient d'excitation du mode. Afin de pouvoir comparer les coefficients d'excitation des modes pour différentes configurations, une normalisation est effectuée : la somme des coefficients d'excitation est ramenée à 1. On peut donc, pour chaque section sismique, calculer les coefficients d'excitation des modes (c_1, \dots, c_n). La construction des coefficients est schématisée sur la figure 4. La fonction de coût utilisée est alors l'erreur quadra-

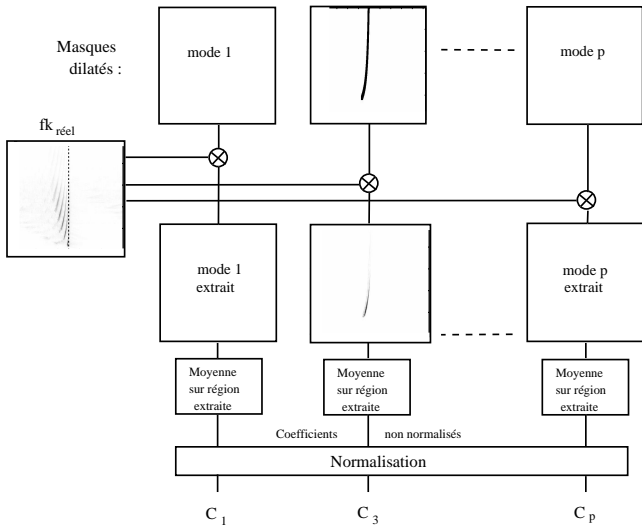


FIG. 4: Construction de coefficients d'excitation des modes à partir de la transformée $f-k$

tique moyenne entre les coefficients d'excitations des modes des données réelles et des données simulées :

$$EQM = \frac{1}{nb_{modes}} \sum_{modes} (c_{i_{simu}} - c_{i_{reel}})^2 \quad (7)$$

On en déduit un rapport signal sur bruit :

$$RSB = 10 \log_{10}(1/EQM) \quad (8)$$

La méthode employée pour maximiser ce RSB est alors la même que celle décrite précédemment : une série de simulations avec des profondeurs de source différentes et l'estimation de la profondeur de la source à partir de la simulation maximisant le RSB.

La fonction de coût ainsi établie est moins sensible au bruit et permet une meilleure estimation de la profondeur de la source. Dans la suite, nous nous intéresserons donc uniquement à celle-ci pour estimer la profondeur de la source.

2.3 Qualité de l'estimation

L'étude théorique des modes a montré que l'excitation des modes varie selon la profondeur de la source. Cette constatation nous a amenés à construire la fonction de coût présentée dans 2.2.2 basée sur les coefficients d'excitation des modes. Il est cependant nécessaire de vérifier la pertinence de ce critère.

Pour cela, nous réalisons un jeu de 100 simulations avec des sources situées à des profondeurs différentes dans un même environnement. Le cadre de la simulation est constitué d'une couche d'eau de 200 m, de vitesse $V_p = 1500$ m/s, et d'une couche infinie de sédiments de vitesses $V_p = 2000$ m/s et $V_s = 1000$ m/s. Ces simulations vont montrer que le critère choisi permet effectivement de comparer différentes profondeurs de sources. Pour chaque couple de simulations, le RSB est représenté en fonction de la distance verticale entre les deux sources simulées. La figure 5 présente les résultats obtenus : il apparaît nettement que les faibles distances entre sources correspondent à de forts RSB et que les grandes distances entre sources correspondent à de faibles RSB. Ceci montre donc que le critère RSB construit est pertinent pour comparer des profondeurs de sources. Ainsi, en comparant les données réelles à des données simulées à des profondeurs différentes, il sera possible d'estimer la profondeur de la source.

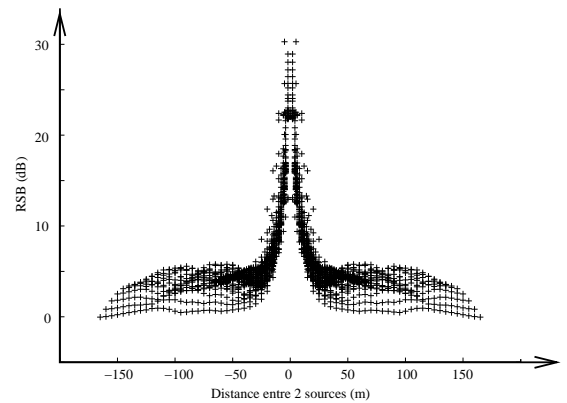


FIG. 5: RSB en fonction de la distance verticale entre 2 sources

3 Applications : données réelles

La technique présentée ci-dessus est appliquée sur des données réelles pour estimer la profondeur de la source. La source est un canon à air tracté par un bateau qui effectue un tir tous les

25 m. Le récepteur est un Ocean Bottom Seismometer (OBS) qui enregistre les variations de pression ainsi que le déplacement dans les trois directions de l'espace ; ici seule la pression sera utilisée. La section sismique enregistrée est équivalente à celle enregistrée sur une antenne synthétique de 240 OBS espacés de 25 m et posés sur le fond. L'échantillonnage temporel est de 4 ms.

La figure 6 présente la représentation $f - k$ de la section sismique. À partir de cette représentation, les coefficients d'excitation des modes des données réelles sont calculés (Fig. 7). Une série de simulations à des profondeurs de sources différentes est réalisée. La figure 7 présente également quelques exemples de coefficients d'excitation des modes pour plusieurs profondeurs de sources simulées. Pour chacune de ces simulations, le RSB entre les données réelles et simulées est calculé (Fig. 8). L'estimation de la profondeur de la source est donnée par la profondeur simulée qui maximise le RSB : $z_{estimee} = 17m$. Nous ne possédons pas de valeur précise de profondeur de source pour ces données mais l'utilisation d'un canon à air tracté par un bateau nous assure que la source était à une profondeur comprise entre 10 et 20 m ce qui est cohérent avec la profondeur estimée.

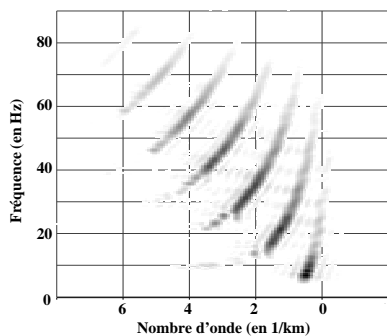


FIG. 6: transformée $f - k$ des données enregistrées sur le réseau de capteurs

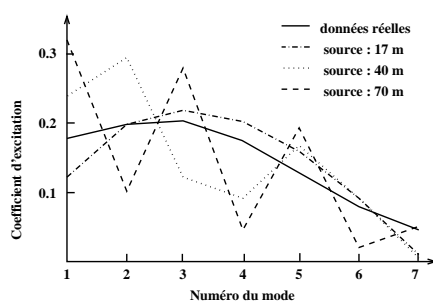


FIG. 7: Facteurs d'excitation des modes (normalisés) des données réelles (en trait plein) et de quelques données simulées

4 Conclusion

L'étude de la propagation par modes a permis de mettre en évidence le lien entre les facteurs d'excitation des modes et la profondeur de la source. Utilisant cette propriété, nous avons mis au point une méthode de localisation de source en acous-

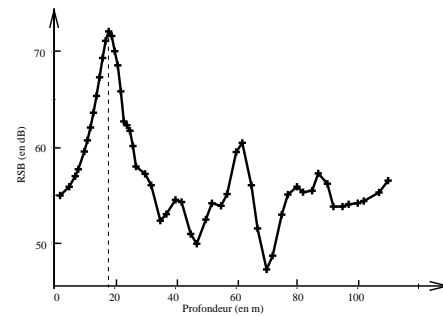


FIG. 8: RSB en fonction de la profondeur de la source simulée

tique sous-marine Ultra Basse Fréquence par champs d'ondes adaptés en fréquences spatiales et temporelles. Cette méthode peut s'appliquer dans le cas d'eaux peu profondes où la propagation par modes est prépondérante et a donné des résultats satisfaisants sur des données réelles issues d'une campagne sismique.

Références

- [1] R. K. Brienzo and W. S. Hodgkiss. Broadband matched-field processing. *J. Acoust. Society America*, 94(5):2821–2831, 1993.
- [2] H.P. Bucker. Use of calculated sound fields and matched field detection to locate sound sources in shallow water. *J. Acoust. Society America*, 59(5):368–373, 1976.
- [3] N. R. Chapman and C. E. Lindsay. Matched-field inversion for geoacoustic model parameters in shallow water. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 21(4):347–353, 1996.
- [4] J. A. Fawcett, M. L. Jeremy, and N. R. Chapman. Matched-field source localisation in a range-dependent environment. *J. Acoust. Society America*, 99(1):272–282, 1996.
- [5] F.B. Jensen, W.A. Kuperman, M.B. Porter, and Schmidt H. *Computational ocean acoustics*. AIP Press, New York, USA, 1994.
- [6] B. Nicolas, J. Mars, and J-L. Lacoume. Geoacoustical parameters estimation with impulsive and boat noise sources. *IEEE J. Oceanic Eng.*, in press.
- [7] B. Nicolas, J. Mars, and J-L. Lacoume. Are ultra low frequency waves suitable for detection? In *IEEE/MTS Oceans*, Biloxi, 2002.
- [8] P. Pignot. *Analyse globale du milieu de propagation pour la tomographie acoustique océanique*. thèse de doctorat, INPG, Grenoble, 1997.
- [9] E. C. Shang. Source depth estimation in waveguides. *J. Acoust. Society America*, 77(4):1423–1418, 1985.
- [10] D Tollefsen and E. Eidem. Matched-field localization of explosives sources in the Barents sea using a horizontal array. In *IEEE/MTS Oceans*, Biloxi, 2002.
- [11] J. Virieux. P-SV wave propagation in heterogeneous media : velocity-stress finite-difference method. *Geophysics*, 51:889–901, 1986.