

# Localisation de source par filtrage modal : Application à des données petites échelles en ASM

Barbara NICOLAS<sup>1</sup>, Philippe ROUX<sup>2</sup>, Jean-Louis LACOUME<sup>1</sup>, Jérôme MARS<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire des Images et des Signaux  
INPG/ENSIEG, BP 46, 38402 St Martin d'Hères, France

<sup>2</sup> Marine Physical Laboratory  
8820 Shellback Way, La Jolla CA 92093-0238 , Etats Unis  
barbara.nicolas@lis.inpg.fr, proux@ucsd.edu  
jean-louis.lacoume@lis.inpg.fr, jerome.mars@lis.inpg.fr

**Résumé** – Dans les environnements océaniques peu profonds, la propagation peut être modélisée, à grande distance, par une somme de modes. En utilisant les coefficients d'excitation de ces modes, le filtrage modal permet de localiser une source acoustique située dans le guide d'ondes océanique. Une méthode permettant l'extraction de ces coefficients à partir d'un réseau horizontal de capteurs a été développée [6]. Celle-ci est appliquée sur un ensemble de données "petites échelles" réalisées en cuve et reproduisant un guide d'ondes océanique. Ses performances sont étudiées et une amélioration est proposée.

**Abstract** – In shallow water environments, the acoustic field propagates at long range as depth dependent modes. Using these modes and particularly their excitation factors, modal filtering achieves source localization in oceanic waveguides. A method estimating these coefficients using a Horizontal Array of Sensors has been developed [6]. This method is applied to ultrasonic data recorded in a tank which emulates a shallow water waveguide and we propose an improvement of the method.

## 1 Introduction

Dans les environnements océaniques peu profonds, les méthodes classiques de **localisation de source** par formation de voies ne pouvant pas être appliquées, le **filtrage modal** constitue une alternative fréquemment utilisée [1, 7, 10]. A grande distance, de tels environnements peuvent être considérés comme des guides d'ondes permettant une propagation modale des ondes. Le filtrage modal consiste alors à utiliser les modes pour localiser la source. L'information de profondeur de source est contenue dans les coefficients d'excitation des modes. Ceux-ci sont extraits par filtrage puis comparés à des coefficients théoriques obtenus pour différentes profondeurs de sources (généralement à partir des équations analytiques de la propagation dans un guide parfait [7, 11], ou en utilisant un modèle de propagation basé sur les modes normaux [10]). La profondeur estimée est alors celle pour laquelle les coefficients d'excitation des modes théoriques sont les plus proches des coefficients réels.

Nous souhaitons ici estimer la profondeur  $z_s$  d'une source acoustique Ultra Basse Fréquence (1-100 Hz) à partir d'un **réseau horizontal de capteurs**, posés sur le fond, et enregistrant le champ de pression à grande distance. Dans cette configuration spécifique, la généralisation du filtrage modal [7] n'est pas applicable et il faut adopter une nouvelle approche pour extraire les coefficients d'excitation des modes de la section enregistrée. L'**espace fréquence - nombre d'onde**  $f - k$ , issu de la double transformée de Fourier en temps et distance de la section enregistrée, con-

stitue une alternative intéressante : il permet de séparer les modes, localisés sur les courbes de dispersion, du bruit réparti sur l'ensemble du plan  $f - k$ . Nous proposons donc une approche dans ce plan, basée sur un filtrage par masque, pour réaliser l'extraction des coefficients d'excitation des modes et l'estimation de la profondeur de la source.

Après une présentation de la méthode de filtrage modal dans le plan  $f - k$ , nous validons ce filtrage sur un jeu de données réelles "petites échelles", réalisée en cuve au Marine Physical Laboratory (SCRIPPS, San Diego), dans un guide constitué d'une couche d'eau sur un socle d'acier. Sur cet ensemble de données, nous évaluons les performances de la méthode d'estimation de la profondeur de source et nous montrons que la connaissance du signe des coefficients d'excitation des modes permet d'améliorer de manière significative les résultats obtenus.

## 2 Localisation par filtrage modal dans le plan $f - k$

La méthode de filtrage modal employée pour estimer la profondeur de la source a été présentée en détail dans [4, 6]. Nous nous contentons ici de décrire les principales étapes. Les signaux traités sont la sortie d'une antenne rectiligne de capteurs de pression. Nous appelons "section sismique" la matrice contenant l'ensemble des signaux enregistrés.

**Correction de vitesse :** Cette étape préliminaire consiste à appliquer une correction de vitesse sur l'ensemble des signaux de la section sismique afin que l'onde directe arrive au même instant sur l'ensemble des capteurs. Ce pré-traitement, classique en sismique, évite le repliement [3] et permet la séparation des modes dans le plan  $f - k$ .

**Construction des masques des modes dans le plan  $f - k$  :** Nous considérons un guide d'ondes de Pekeris constitué d'une couche de fluide représentant le milieu océanique, de hauteur  $D$  de vitesse  $V_1$  et de densité  $\rho_1$  et d'une couche de fluide représentant le fond de vitesse  $V_2$  et de densité  $\rho_2$ . Dans cette configuration, l'étude de la propagation [8, 2] a montré que l'énergie des signaux reçus se répartit sur des courbes, appelées courbes de dispersion de modes.

Pour chaque mode, il est possible de tracer ces courbes dans le plan  $f - k$  à partir de l'équation qui relie la fréquence  $f_m$  du mode  $m$  au nombre d'onde horizontal  $k_{rm}$  [2]. Dans la pratique, les modes ne sont pas situés sur une ligne unique mais sur une région, il est donc nécessaire d'effectuer une dilatation du masque correspondant au tracé théorique des courbes de dispersion. De plus, cette dilatation permet d'améliorer la robustesse de la méthode vis-à-vis des erreurs d'identification du milieu [4]. La figure 1 présente les masques des modes obtenus pour les données petites échelles présentées par la suite.

Il est important de noter que pour le cas particulier d'un guide d'ondes eau/acier, la vitesse des ondes de cisaillement (S) dans l'acier étant supérieure à la vitesse des ondes de compression (P), le modèle du guide de Pekeris (constitué de deux couches de fluides) ne représente plus une bonne approximation du milieu et doit être adapté. Une solution simple mais réaliste consiste à considérer le guide eau/acier comme un guide de Pekeris en utilisant comme vitesse des ondes dans le fond celle des ondes S dans l'acier (et non pas celle des ondes P dans l'acier).

**Coefficients d'excitation des modes des données réelles :** Une fois, les masques correspondant à chaque mode construits, il est possible, grâce à un filtrage par masque sur la transformée  $f - k$  de la section sismique, d'extraire chacun des modes dans le plan  $f - k$  et de calculer l'énergie associée. Ces coefficients conduisent à une estimation des modules des coefficients d'excitation des modes des données réelles.

**Simulations et extraction des coefficients sur les données simulées :** L'étape suivante consiste à réaliser un ensemble de simulations pour différentes profondeurs de sources dans un environnement le plus proche possible de l'environnement réel. L'identification de l'environnement a été réalisée dans [5] et les simulations sont réalisées à partir d'un logiciel par différences finies permettant de prendre en compte l'ensemble des ondes existant dans l'eau et le sous-sol [9]. Pour chacune de ces simulations, les coefficients d'excitation des modes sont extraits de manière similaire à celle utilisée sur les données réelles.

**Fonction de contraste :** La dernière étape consiste à

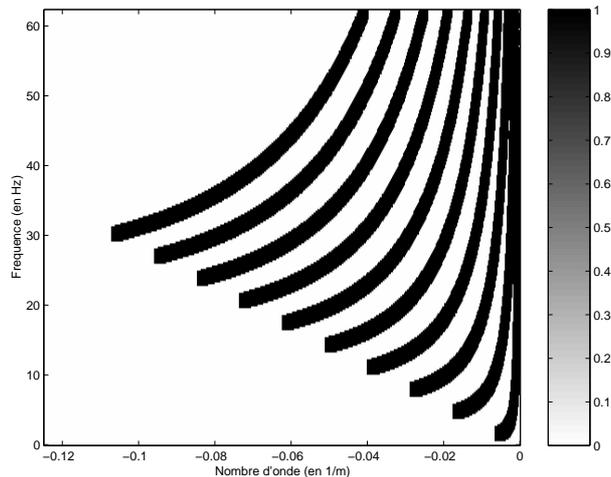


FIG. 1 – Masques des modes dans le plan  $f - k$

comparer, à l'aide d'une fonction de contraste, les coefficients extraits des données réelles à l'ensemble des coefficients extraits des données simulées. La profondeur estimée est alors celle pour laquelle la fonction de contraste est maximale, c'est à dire la profondeur pour laquelle les coefficients d'excitation réels et simulés sont les plus proches.

## 3 Application sur des données "petites échelles"

### 3.1 Contexte expérimental

Le principe des expériences "petites échelles" est le suivant : en multipliant la fréquence du signal source par un facteur  $x$ , on divise les distances par ce même facteur. Les phénomènes physiques de propagation des ondes n'étant pas affectés par ce changement d'échelle, il est possible de réaliser une propagation océanique à grande distance dans une cuve de faibles dimensions. La cuve ayant une longueur de 1 m, le facteur d'échelle choisi est de  $10^4$  ce qui permet de simuler une propagation océanique d'environ 10 km. Nous parlerons d'échelle "réduite" pour les grandeurs utilisées au cours de l'expérience et d'échelle "réelle" pour les valeurs correspondantes dans un guide océanique. Les grandeurs seront données par défaut en échelle réelle.

Le **guide** est constitué d'une couche d'eau de 266 m et d'un fond constitué d'acier (ce qui diffère d'un fond océanique réel mais permet tout de même d'étudier les principales propriétés des guides d'ondes océaniques). La **source** est située dans la colonne d'eau et émet une modulation linéaire de fréquence entre 10-50 Hz. Le **système de réception** est constitué d'une antenne linéaire de 514 capteurs, espacés de 10 m, et commençant à 4 km de la source. Nous disposons de 22 sections sismiques pour des profondeurs de source comprises entre 30 et 240 m avec un pas de 10 m.

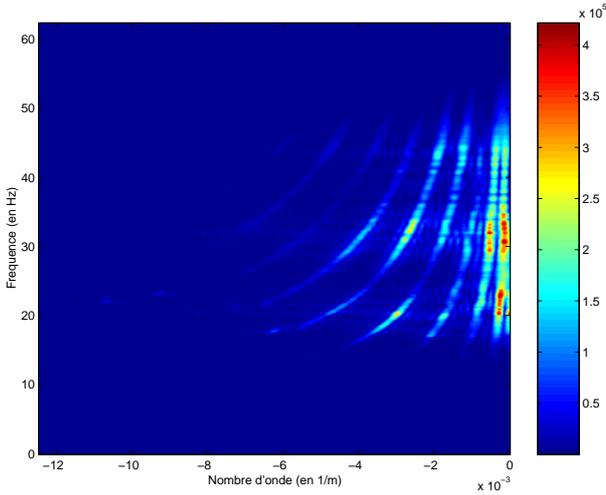


FIG. 2 – Transformée  $f - k$  de la section sismique enregistrée pour  $z_s = 70$  m

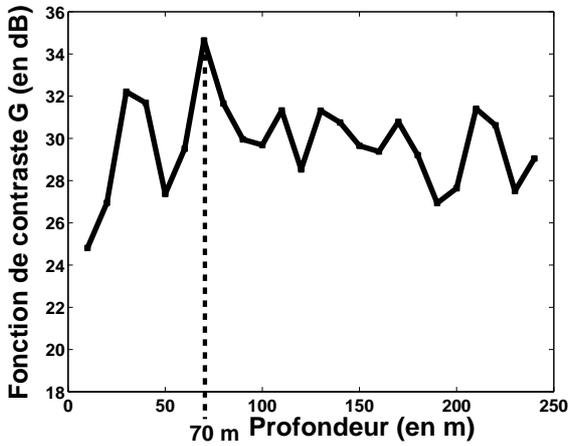


FIG. 3 – Fct. de contraste pour une source située à  $z_s = 70$  m

### 3.2 Résultats obtenus

Etudions tout d'abord en détail le cas d'une source source située à une profondeur  $z_s = 70$  m. La vitesse  $V_1$  des ondes dans la cuve a été mesurée et vaut 1487 m/s. Nous appliquons donc une correction de vitesse  $V_1$ . Par ailleurs, la construction des masques des modes est réalisée et permet d'obtenir les masques présentés sur la figure 1. Puis la transformée  $f - k$  de la section sismique est calculée (figure 2) et les coefficients d'excitations des modes extraits des données réelles. Un ensemble de simulations est réalisé pour des profondeurs de source allant de 10 à 240 m, et les coefficients d'excitation des données simulées sont extraits. La fonction de contraste est calculée (figure 3) et permet d'estimer une profondeur de source de 70 m ce qui correspond à la valeur mesurée en pratique.

Le traitement est répété sur l'ensemble des données et les résultats sont présentés dans le tableau 1 (colonne 2). La taille de l'émetteur en échelle réelle étant de 10 m, l'estimation de la profondeur de source est considérée comme

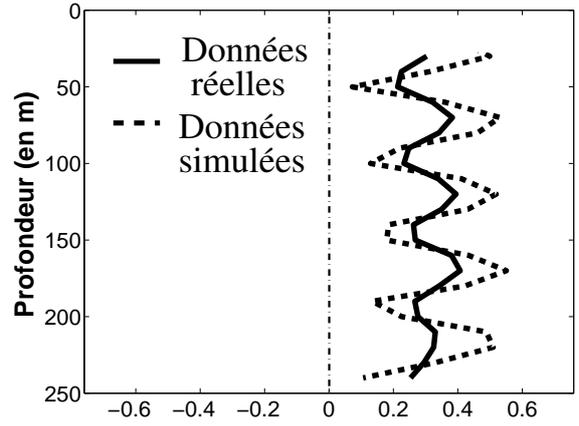


FIG. 4 – Module du coef. d'excitation du mode 6 (trait plein : données réelles ; tiret : données simulées)

correcte tant que l'erreur d'estimation reste entre 0 et 10 m soit dans 15 cas sur 22. Ces résultats n'étant pas totalement satisfaisants, nous étudions l'apport du signe des coefficients d'excitation des modes sur les performances de la méthode.

### 3.3 Apport du signe des coefficients d'excitation

La méthode proposée utilise les modules des coefficients d'excitation des modes pour estimer la profondeur de la source. Dans l'expérience présentée ici, il est possible d'extraire le signe de ces coefficients (car nous disposons d'un ensemble de profondeurs de source, ce qui ne serait pas le cas en pratique pour la localisation d'une unique source). Cette extraction a été réalisée [4] : la figure 4 présente le module du coefficient d'excitation du mode 6 pour l'ensemble des profondeurs de sources (données réelles et simulées) et la figure 6 présente le coefficient d'excitation avec son signe pour ces mêmes profondeurs de source.

En utilisant les coefficients d'excitation avec leur signe, il est alors possible de calculer la fonction de contraste entre un jeu de coefficients réels et l'ensemble des coefficients simulés : la figure 5 présente la fonction de contraste obtenue pour une source réelle située à 70 m de profondeur. La dynamique est identique à celle de la fonction de contraste obtenue à partir des modules des coefficients d'excitation (figure 3). La fonction de contraste obtenue en tenant compte du signe présente un pic plus prononcé à 70 m et pas de pics secondaires (pouvant conduire à une mauvaise estimation de la profondeur). De plus, en traitant l'ensemble des données (tableau 1, colonne 3), nous obtenons 21 estimations correctes sur 22 soit une amélioration importante par rapport aux résultats précédents. La prise en compte du signe des coefficients d'excitation des modes permet donc une amélioration significative de l'estimation de la profondeur de source. Des travaux doivent être développés pour extraire cette information à partir de la représentation  $f - k$  ou de représentations temps-fréquence.

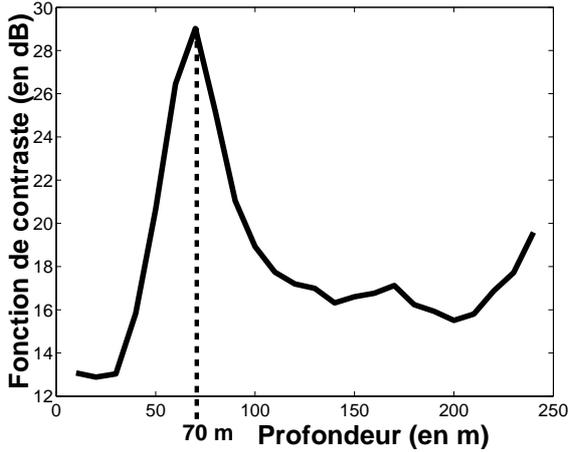


FIG. 5 – Fct. de contraste pour une source située à  $z_s = 70$  m avec utilisation du signe des coefficients d’excitation

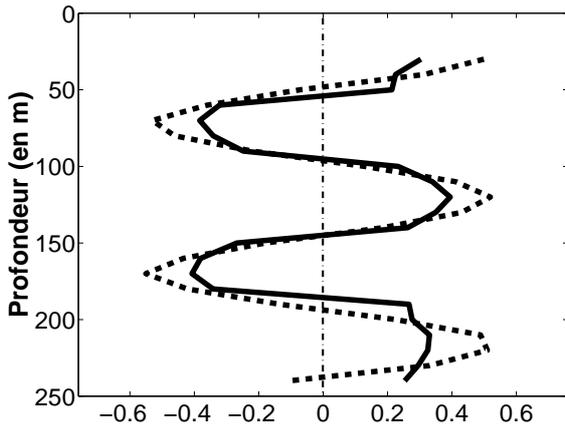


FIG. 6 – Coef. d’excitation du mode 6 avec son signe (trait plein : données réelles ; tiret : données simulées)

	Sans signe	Avec signe
Erreur d’estimation	Nb d’estimations ayant une erreur donnée	Nb d’estimations ayant une erreur donnée
< 10 m	9	16
= 10 m	6	5
> 10 m	7	1

TAB. 1 – Erreur d’estimation de la profondeur de source sans et avec utilisation du signe des coefficients d’excitation

## 4 Conclusion

Dans des environnements océaniques peu profonds, le filtrage modal utilise les coefficients d’excitation des modes, extraits à partir d’un réseau vertical de capteurs, afin de localiser une source acoustique située dans la colonne d’eau. Dans le cas d’un réseau horizontal de capteurs, les méthodes classique ne peuvent pas être appliquées, nous avons proposé une méthode permettant cette extraction, basée sur la physique de la propagation et la transformée fréquence - nombre d’onde.

Cette méthode a été appliquée à des données ”petites échelles”, reproduisant une guide d’ondes océanique, pour lesquelles la profondeur de source était connue de manière précise. Ses performances ont été étudiées et nous avons montré que l’estimation de la profondeur de source pouvait être améliorée grâce à la connaissance du signe des coefficients d’excitation des modes.

## Références

- [1] C.W. Bogart and T. C. Yang. Comparative performance of matched-mode and matched-field localization in a range-dependent environment. *J. Acoust. Soc. Am.*, 92(4) :2051–2068, 1992.
- [2] F. B. Jensen, W. A. Kupperman, M. B. Porter, and H. Schmidt. *Computational ocean acoustics*. AIP press, NY, 1994.
- [3] J.-L. Mari, F. Glangaud, and F. Coppens. *Traitement du signal pour géologues et géophysiciens : techniques de base*. Editions Technip, Paris, 2001.
- [4] B. Nicolas. *Identification du milieu océanique et localisation de source en Ultra Basse Fréquence (1-100 Hz)*. PhD thesis, INPG, Grenoble, 2004.
- [5] B. Nicolas, J. Mars, and J-L. Lacoume. Geoacoustical parameters estimation with impulsive and boat noise sources. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 28(3) :494–501, 2003.
- [6] B. Nicolas, J. Mars, and J-L. Lacoume. Source depth estimation using modal decomposition and frequency-wavenumber transform. In *12th European Signal Processing Conference*, Vienne, 2004.
- [7] E. C. Shang. Source depth estimation in waveguides. *J. Acoust. Soc. Am.*, 77(4) :1423–1418, 1985.
- [8] R. J. Urick. *Principles of underwater sound for engineers*. MacGraw Hill, New York, 1967.
- [9] J. Virieux. P-SV wave propagation in heterogeneous media : velocity-stress finite-difference method. *Geophysics*, 51(4) :889–901, 1986.
- [10] G. R. Wilson, R. A. Koch, and P. J. Vidmar. Matched mode localization. *J. Acoust. Soc. Am.*, 84(1) :310–320, 1988.
- [11] T. C. Yang. A method of range and depth estimation by modal decomposition. *J. Acoust. Society America*, 82(5) :1736–1745, 1987.