

# Estimation de la position relative du récepteur d'une antenne synthétique

Patrick PIGNOT et Bernard FAURE

Centre d'Étude des PHénomènes Aléatoires et Géophysiques de Grenoble,  
ENSIEG, Domaine Universitaire, BP 46  
38402 Saint Martin d'Hères, France  
patrick.pignot@cephag.inpg.fr

## RÉSUMÉ

Cette étude traite du problème d'estimation de la position relative des émetteurs/récepteurs utilisés en acoustique sous-marine. Nous présentons une méthode simple d'estimation du déplacement horizontal et de la profondeur d'un instrument en mouvement au cours du temps. Ce traitement est validé sur des données simulées, puis utilisé sur des données expérimentales recueillies lors de la campagne PROTEE de 1993.

## ABSTRACT

This study deals with the problem of the relative positions estimation of transmitters/receivers in underwater acoustic. We present a simple method for horizontal displacement and depth estimation of a moving instrument. This processing is validated with simulated data and used with experimental data recorded during the 1993 PROTEE Campaign.

## 1 Introduction

En acoustique sous-marine, l'étude du milieu de propagation passe par l'utilisation d'un émetteur et d'un capteur ou d'une antenne verticale à la réception lorsque l'on veut obtenir une information spatiale. Cette antenne difficile à mettre en œuvre peut être remplacée par une antenne synthétique constituée d'un seul hydrophone mobile [4]. Dans ce cas, la source émet pendant la remontée de l'hydrophone un signal périodique et l'ensemble des signaux enregistrés par le récepteur est équivalent aux signaux reçus sur une antenne verticale constituée d'un très grand nombre de capteurs. Malheureusement, la remontée de l'hydrophone n'est jamais parfaitement verticale et le signal enregistré se décale temporellement suivant le trajet de l'hydrophone.

Nous proposons dans cette étude une méthode de mesure des distorsions de l'antenne synthétique par rapport à la verticale. À l'aide de la théorie des modes, nous montrons, dans l'approximation des milieux faiblement hétérogènes (approximation W.K.B., Wentzel-Kramers-Brillouin), que les temps de propagation des signaux reçus sur l'antenne peuvent se regrouper par paquets de quatre. Pour chaque paquet, la moyenne des quatre temps est indépendante de la profondeur. Il est alors possible de recalibrer temporellement les traces enregistrées, d'estimer la distance de propagation entre la source et le récepteur pour chaque récurrence, et d'estimer la profondeur du récepteur mobile. Ce traitement est appliqué à des données simulées puis expérimentales obtenues lors d'une campagne de mesures.

## 2 Temps de propagation

Considérons un point source  $S$  situé à la profondeur  $z_s$  et un guide d'ondes invariant en distance, de célérité  $c(z)$ . Pour un signal d'émission monochromatique, la pression modale en un point quelconque  $D(r, z)$  du plan de propagation s'exprime, dans l'approximation W.K.B., comme une somme de quatre ondes dont les termes de phase s'expriment par [3] :

$$\phi_m(\varepsilon_1, \varepsilon_2, r, z) = k_{r,m}r + \varepsilon_1 \int_{z_m^+}^z k_{z,m}(z) dz + \varepsilon_2 \int_{z_m^+}^{z_s} k_{z,m}(z) dz \quad (1)$$

avec  $\varepsilon_1 = \pm 1$  et  $\varepsilon_2 = \pm 1$ . La valeur  $\varepsilon_1 = 1$  correspond à la propagation vers les  $z$  croissants (vers le fond) et la valeur  $\varepsilon_1 = -1$  à la propagation vers les  $z$  décroissants (vers la surface). Les termes  $k_{z,m}(z)$  et  $k_{r,m}$  sont respectivement les nombres d'onde verticaux et horizontaux associés au mode  $m$ ,  $z_m^+$  la profondeur du point de retournement supérieur du mode  $m$ .

Le temps de propagation des ondes est calculé en considérant les phases des différentes ondes propagées dans le milieu comme stationnaires ([1] p. 113), ce qui revient à écrire :

$$\frac{d}{d\omega} [\omega t - \phi_m(\varepsilon_1, \varepsilon_2, r, z)] = 0, \quad (2)$$

Le temps de propagation s'exprime alors en fonction des vitesses de groupe horizontales et des vitesses de groupe verticales définies respectivement par  $v_{gr,m}^h = \frac{\partial \omega}{\partial k_{r,m}}$  et

$v_{gr,m}^v(z) = \frac{\partial \omega}{\partial k_{z,m}(z)}$ . Il vient [5] :

$$t_m(\varepsilon_1, \varepsilon_2, r, z) = \frac{r}{v_{gr,m}^h} + \varepsilon_1 \int_{z_m^+}^z \frac{dz}{v_{gr,m}^v(z)} + \varepsilon_2 \int_{z_m^+}^{z_s} \frac{dz}{v_{gr,m}^v(z)}. \quad (3)$$

Notons que le premier terme de cette expression (terme en  $r$ ) est très supérieur aux deux autres termes (termes en  $z$ ) puisque nous supposons  $r \gg z$  et que dans le cas général la vitesse de groupe horizontale est très inférieure à la vitesse de groupe verticale. Néanmoins, les deux termes de droite ne sont pas négligeables.

### 3 Maximums d'énergie

L'amplitude de la pression acoustique  $p(r, z, t)$  est fonction de la somme de tous les modes. En certains instants  $t$  particuliers, les modes peuvent se sommer de façon cohérente donnant lieu à des maximums d'énergie. Tindle et Guthrie [6] ont montré que ces maximums apparaissent pour des interférences constructives d'un nombre restreint de modes voisins. Cette condition est satisfaite lorsque la variation de phase  $\Delta\phi$  sur une variation  $\Delta m$  du nombre de modes est un multiple de  $2\pi$ , soit (Cf. [6] p. 292) :

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta m} = 2p\pi \quad (4)$$

où  $p$  est un entier. Appliquée aux quatre termes de phase de l'expression (1), cette équation donne :

$$\frac{\Delta k_{r,m}}{\Delta m} r + \varepsilon_1 \int_{z_m^+}^z \frac{\Delta k_{z,m}}{\Delta m} dz + \varepsilon_2 \int_{z_m^+}^{z_s} \frac{\Delta k_{z,m}}{\Delta m} dz = 2p\pi. \quad (5)$$

À chaque valeur de  $p$  correspond quatre groupes de modes possibles puisque  $\varepsilon_1 = \pm 1$  et  $\varepsilon_2 = \pm 1$  et donc quatre temps de propagation différents. Nous noterons  $m_p(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$  le mode central pour chacun de ces groupes. Les interférences constructives apparaissent ainsi pour les groupes de modes  $m_p(\varepsilon_1, \varepsilon_2) \pm \frac{\Delta m_p(\varepsilon_1, \varepsilon_2)}{2}$ . Les quatre valeurs de  $m_p(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$  sont centrées autour d'un mode « moyen »  $M_p$  obtenu pour les valeurs moyennes de  $\varepsilon_1$  et  $\varepsilon_2$ , soit  $\langle \varepsilon_1 \rangle = 0$  et  $\langle \varepsilon_2 \rangle = 0$ , et vérifiant la relation :

$$\frac{\Delta k_{r,M_p}}{\Delta M_p} r = 2p\pi. \quad (6)$$

Dans ce cas, le temps de propagation associé au mode  $M_p$  s'exprime uniquement en fonction de la vitesse de groupe horizontale par la relation :

$$t_{M_p} = \frac{r}{v_{gr,M_p}^h}. \quad (7)$$

À la différence de l'expression de temps du propagation donné par la relation (3), le temps de propagation associé au mode  $M_p$  est indépendant de la profondeur. En supposant qu'au voisinage du mode  $M_p$  les vitesses de groupe horizontales et verticales varient linéairement (hypothèse justifiée pour les modes élevés, c'est-à-dire pour les signaux réfractés par grand fond ou bien réfléchis sur le sol), le temps de propagation

$t_{M_p}$  est alors très proche de la moyenne arithmétique des quatre temps de propagation  $t_{m_p(\varepsilon_1, \varepsilon_2)}$ . Ainsi la moyenne des temps de propagation d'un paquet de quatre maximums est indépendante de la profondeur.

### 4 Estimation de la forme d'une antenne synthétique

L'indépendance suivant la profondeur de la moyenne temporelle d'un paquet de quatre maximums peut s'utiliser pour redresser les signaux enregistrés par une antenne synthétique dont la remontée ne s'effectue pas parfaitement verticalement. La première étape du traitement consiste à mettre en évidence sur un enregistrement un paquet de quatre trajets correspondant si possible à des ondes réfractées par grand fond ou bien réfléchies sur le sol. Le temps de propagation de chacun de ces trajets pris individuellement varie en fonction de la profondeur certes, mais pas la moyenne temporelle de ces trajets. Nous noterons  $\bar{T}_n$  la moyenne temporelle de ces quatre trajets enregistrés sur la  $n^{i\text{ème}}$  trace correspondant à une profondeur  $z_n$  du récepteur mobile. La seconde étape utilise une méthode de « tracking » permettant de suivre l'évolution et de mesurer les temps de trajet en fonction de la profondeur. La moyenne temporelle  $\bar{T}_n$  de ces trajets est alors calculée pour chaque trace. Toute variation de cette moyenne d'une trace à une autre implique une distance de propagation différente d'un enregistrement à un autre. La dernière étape consiste alors à décaler temporellement les traces de façon à obtenir la même moyenne temporelle  $\bar{T}$  pour toutes les traces. La valeur de  $\bar{T}$  est choisie arbitrairement. Elle peut par exemple être la moyenne des valeurs de  $\bar{T}_n$  pour toutes les traces. Quoiqu'il en soit, la notion de temps absolu n'a plus véritablement de signification. L'ensemble des traces redressées est exprimée en temps relatif.

La variation relative  $\Delta r_n$  de la distance de propagation entre l'émetteur et le récepteur est obtenue pour chaque enregistrement par la relation :

$$\Delta r_n = \bar{v}_n (\bar{T}_n - \bar{T}), \quad (8)$$

où  $\bar{v}_n$  est la vitesse de propagation moyenne vérifiant la relation  $\bar{v}_n = \frac{r_n}{\bar{T}_n}$  ( $r_n$  est la distance de propagation entre l'émetteur et le récepteur mobile au moment de l'enregistrement de la  $n^{i\text{ème}}$  trace). Bien évidemment  $r_n$  n'est pas connue. On peut simplifier le problème en considérant que  $\bar{v}_n$  est proche de  $c_o = 1500$  m/s. L'erreur commise ne sera que de quelques pourcents. Il vient finalement :

$$\Delta r_n \simeq c_o (\bar{T}_n - \bar{T}). \quad (9)$$

Par ailleurs, dans le cas où l'émetteur et le récepteur sont situés à faible profondeur (inférieure à quelques centaines de mètres), les nombres d'onde verticaux  $k_{z,m}(z)$  peuvent être considérés en première approximation comme indépendants de la profondeur sur cette hauteur d'eau. Cette approximation est d'autant plus justifiée que les modes sont élevés. Il est alors possible de montrer que la variation temporelle  $\Delta T_p(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$  entre les temps de propagation  $t_{m_p(\varepsilon_1, \varepsilon_2)}$  et  $t_{M_p}$  est proportionnelle à la somme ou à la différence de profondeur des instruments (suivant les valeurs de  $\varepsilon_1$  et  $\varepsilon_2$ ) [5]. La profondeur  $z$  du

récepteur s'exprime alors très simplement en fonction de celle de l'émetteur par la relation :

$$z = z_s \frac{\left[ \Delta T_p(1, -1) - \Delta T_p(-1, 1) \right] + \left[ \Delta T_p(1, 1) - \Delta T_p(-1, -1) \right]}{\left[ \Delta T_p(1, -1) - \Delta T_p(-1, 1) \right] - \left[ \Delta T_p(1, 1) - \Delta T_p(-1, -1) \right]} \quad (10)$$

## 5 Application à des données simulées

Ce traitement a été validé dans un premier temps sur des données simulées. La figure 1 (gauche) représente le signal temporel reçu sur un récepteur mobile dont la remontée n'est pas verticale. La distance de propagation est ici de 100 km

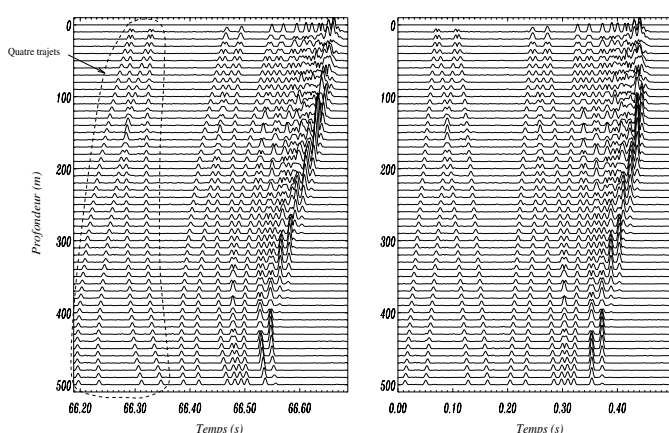


FIG. 1 — (gauche) signal reçu sur l'antenne synthétique avant correction. Le traitement est effectué sur les trajets entourés d'une ligne brisée - (droite) signal reconstitué après traitement

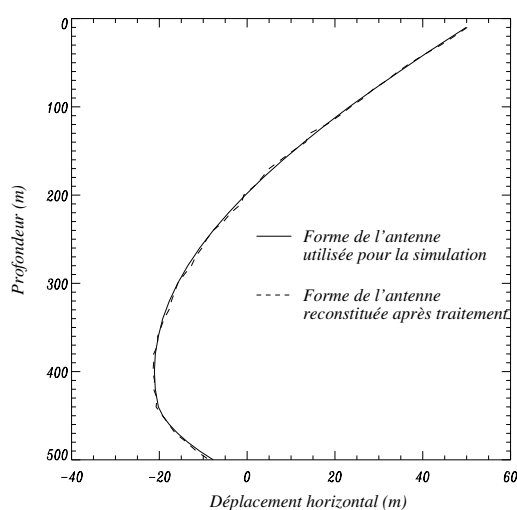


FIG. 2 — Déplacement horizontal de l'antenne utilisé pour la simulation (ligne pleine) - Forme de l'antenne reconstituée après traitement (ligne brisée).

pour un profil de célérité linéaire variant de 1500 m/s en surface à 1534 m/s à 2000 m de fond. La profondeur de

l'émetteur est de 150 m, l'hydrophone mobile est remonté de 500 m de profondeur à la surface. Le signal émis est centré autour de la fréquence 400 Hz, d'allure gaussienne en fréquence et de largeur de bande 200 Hz. La simulation est réalisée à l'aide du code de calcul KRAKEN adapté aux signaux large bande. Le nombre de modes à la fréquence centrale est de 150. Les trajets situés à gauche sur la figure 1 correspondent à des signaux réfractés par grand fond. Il apparaît nettement un paquet de quatre trajets (entourés d'une ligne brisée) dont les temps de propagation varient tout au long de la remontée de l'instrument. Le traitement décrit au paragraphe précédent a été appliqué sur cette série de quatre trajets. Le signal redressé est donné sur la figure 1 (droite). La variation relative de la distance de propagation a été estimée par la relation (9). L'erreur moyenne entre la forme de l'antenne initiale et celle reconstituée est très faible (40 cm) pour cette simulation. Un traitement analogue a été effectué pour retrouver la profondeur de l'émetteur en supposant connue celle de la source. Les résultats obtenus sont très satisfaisants dans la couche d'eau comprise entre 0 et 200 m. L'erreur d'estimation de la profondeur du récepteur mobile est inférieure à 1 m. Au delà de 200 m de profondeur, un biais dans l'estimation commence à apparaître et va croissant avec la profondeur. Ce biais était théoriquement prévisible : les variations du nombre d'onde vertical sont significatives pour une hauteur d'eau supérieure à 200 m. Dans cette simulation, l'erreur d'estimation de la profondeur est d'environ 40 m à 400 m de fond. Cette erreur d'estimation est fonction du choix des trajets que l'on traite. Il est en fait préférable d'estimer la profondeur du récepteur mobile pour des trajets qui se sont réfléchis sur le sol (correspondant à des modes élevés, et à des nombres d'onde verticaux faiblement fonction de la profondeur). Le même traitement effectué sur les premières arrivées de trajets réfléchis sur le sol donne (pour les mêmes données simulées) des résultats nettement meilleurs. L'erreur d'estimation est de l'ordre de 10 m à une profondeur de 400 m.

## 6 Application à des données expérimentales

Cette méthode d'estimation des positions relatives des instruments a été validée sur des données expérimentales issues de la campagne PROTEE organisée par le CTSN du Brusac et effectuée en 1993 au large des Açores [2]. La source située à 150 mètres de profondeur émettait des signaux BPSK. Un récepteur mobile était placé à 55 km de la source. Sa remontée à la surface était assurée par un treuil fixé sur un bateau. La figure 3 représente l'un des enregistrements effectués sur le récepteur mobile lors de sa remontée à la surface. On peut discerner sans ambiguïté quatre trajets ainsi qu'une dérive évidente des temps de parcours des signaux, caractéristique d'un déplacement horizontal du récepteur, dû principalement à une dérive du bateau. En repérant les temps de propagation de chaque trajet par une méthode de « tracking », il est alors possible de redresser l'intégralité des traces par rapport à la moyenne temporelle de toutes les traces. Les signaux redressés sont présentés sur la figure 4. De

plus, en appliquant l'estimation de la profondeur du récepteur donnée par la relation (10), nous avons pu reconstituer la forme de l'antenne (déplacement horizontal) en fonction de la profondeur.

## 7 Conclusion

Nous avons présenté un traitement simple destiné à redresser temporellement les signaux reçus sur une antenne synthétique dont la remontée n'est pas parfaitement verticale. Il permet en outre d'estimer le déplacement horizontal de l'hydrophone mobile tout au long de sa remontée. Il est utilisé pour estimer les positions relatives des émetteurs/récepteurs, et également pour obtenir, par formation de voies, la représentation spatio-temporelle des signaux sur l'antenne.

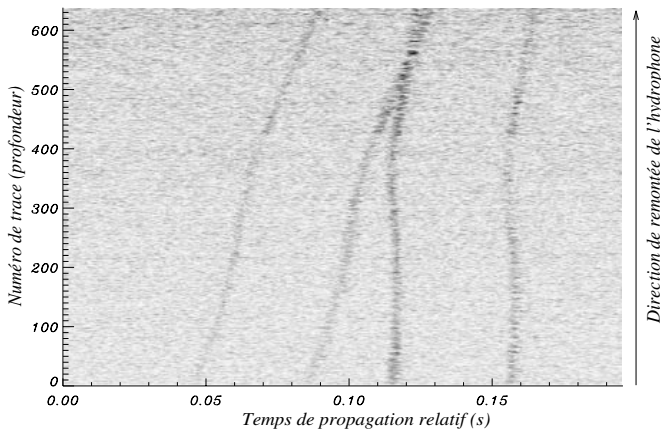


FIG. 3 — Données enregistrées par l'antenne synthétique

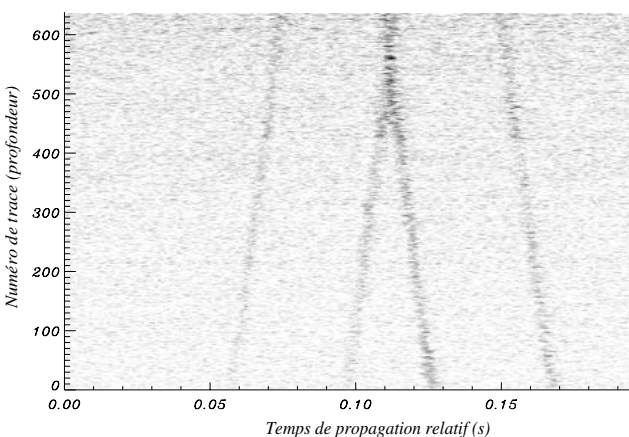


FIG. 4 — Données expérimentales après traitement

## Remerciements

Les données expérimentales de la campagne PROTEE 93 ont été obtenues grâce au concours de la Direction des Constructions Navales.

## Références

- [1] C. Clay et H. Medwin. *Acoustical oceanography*. John Wiley & Sons, 1977.
- [2] B. Faure et P. Gounon. *Participation du CEPHAG à la campagne PROTEE 93*. Rapport CEPHAG 39/93, 1993.
- [3] M. Guthrie. *The connection between normal modes and rays in underwater acoustics*. *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 32, #2, pages 289 à 293, 1974.
- [4] D. Mauuary et B. Faure *Vertical synthetic aperture sonar for ocean acoustic tomography : doppler processing*. Soumis à la revue *Journal of Oceanic Engineering*, janvier 1996.
- [5] P. Pignot. *Caractérisation spatio-temporelle de la propagation acoustique sous-marine : reconstruction des vitesses de groupe et de phase*. Article à paraître dans la revue *Traitement du Signal*.
- [6] C. TINDLE et M. GUTHRIE. *Rays as interfering modes in underwater acoustics*. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 34, #2, pages 291 à 295, 1974.