



# Identification de milieu par traitement spatial avec un hydrophone mobile

D. Mauuary, A. Essebbar, P. Gounon, B. Faure

Centre d'Etude des PHénomènes Aléatoires et Géophysiques  
URA CNRS 346, ENSIEG, BP46  
F-38402 Saint Martin d'Hères-FRANCE

**Résumé** Dans ce travail, nous mettons en évidence le caractère spatial des signaux reçus sur un hydrophone mobile dans le cadre d'expérience d'identification active du milieu acoustique sous-marin. La présence de Doppler justifie alors l'utilisation de méthodes de traitement d'antenne aussi bien passives qu'actives pour séparer les trajets multiples parvenant sur l'hydrophone, en plus du traitement d'ambiguïté classique.

**Abstract** In that work, we show the spatial properties of the signals received on a moving hydrophone in the context of active identification in underwater acoustic experiment. The Doppler phenomena enable us to use array processing methods, both active and passive, in order to separate the multiple paths arriving at the hydrophone. Those methods are added to the classical ambiguity function processing.

## I Introduction

En identification active de milieu, le signal est supposé parfaitement connu. Le milieu dans lequel il se propage est lui peu connu et c'est en analysant le signal reçu sur un récepteur après propagation qu'on arrive à identifier certains paramètres inconnus d'un modèle décrivant le milieu physique. On propose ici d'appliquer à des signaux réels, obtenus au cours d'expériences d'identification, des méthodes de traitement spatial qui permettent d'analyser les Dopplers et les réponses impulsives affectés à chaque trajet du canal acoustique sous-marin. La prise en compte du Doppler est indispensable surtout lorsqu'on utilise des signaux large bande du type "BPSK", très résolvents en temps mais aussi très résolvents en fréquence. Ces signaux sont utilisés dans les expérimentations de Tomographie Acoustique des Océans, et le Doppler apparaît comme un facteur non négligeable dans la plupart des résultats obtenus [3]. L'effet Doppler est causé principalement par des modifications de position des émetteurs ou des récepteurs acoustiques. Le milieu peut lui aussi induire de l'effet Doppler et il sera en général difficile de distinguer ces deux effets sans connaissance *a priori* de l'un ou de l'autre.

Dans un premier temps, nous décrivons les signaux utilisés et l'analogie entre l'écriture temporelle avec effet Doppler et l'écriture "spatiale" obtenue à la sortie d'une ligne à retard. On montre l'équivalence entre Doppler et angle d'incidence de l'onde par rapport à la trajectoire de l'hydrophone. Cette approche nous permet alors d'utiliser

la fonction d'ambiguïté et toute la panoplie du traitement d'antenne pour identifier et caractériser les différentes ondes reçues, chaque onde correspondant à un trajet particulier. Les méthodes ne sont pas comparées entre elles mais simplement proposées dans un deuxième temps, comme méthodes efficaces pour traiter ce style de signaux. Les résultats des traitements qui se sont montrés les plus pertinents sont donnés en dernière partie.

Par commodité, les équations sont écrites dans le cas d'un seul trajet mais supposent implicitement la présence de plusieurs trajets.

## II Modélisation des signaux

Le signal émis consiste en la répétition de  $M$  séquences d'un même signal PSK large-bande de durée  $T$  modulé autour d'une fréquence porteuse  $f_0$  fixée par la suite, de sorte qu'on ait un nombre entier de périodes sur la longueur  $T$  d'une séquence. On peut écrire en notation complexe :

$$e(t) = c_{[T]}(t) \exp j2\pi f_0 t ; \quad 0 \leq t \leq MT. \quad (1)$$

$c_{[T]}$  est le code du PSK de période  $T$ . La réception après propagation sous-marine est caractérisée par la présence de trajets multiples. On supposera que chaque trajet est issu d'un front d'onde localement plan au niveau du récepteur et repéré par un vecteur normé  $k_R$ . Si le récepteur est mobile, animé d'une vitesse  $v_R$ , alors il est aisé de voir sur le schéma de la figure 1 que le signal issu du front d'onde  $k_R$  va subir

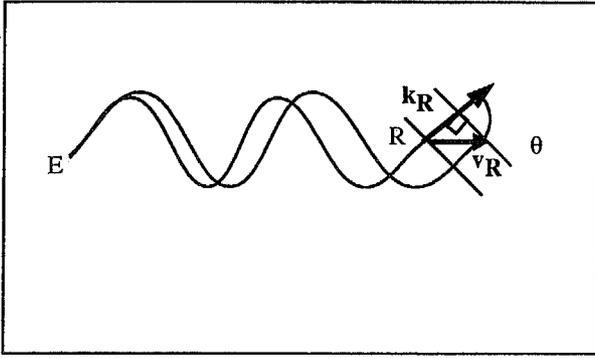


Fig. 1: Propagation acoustique sur un hydrophone mobile. L'approximation d'onde localement plane fournit une expression simple du Doppler

un **Doppler fréquentiel** mesuré par le coefficient Doppler  $\mu$  classiquement donné par la formule :

$$\mu = \frac{k_R \cdot v_R}{c}, \quad (2)$$

$c$  étant la célérité acoustique du milieu. On notera en premier lieu  $s_{[T]}$  le signal acoustique issu de  $e(t)$  parvenant à l'hydrophone si bien que le signal total reçu prend alors la forme:

$$r(t) = s_{[T]}(kt) + b(t); \quad 0 \leq t \leq MT. \quad (3)$$

où  $k$  est le coefficient de dilatation Doppler égal à  $1 - \mu$  et  $b(t)$  le bruit additif. On suppose ainsi que le signal acoustique issu de  $e(t)$  est de période  $kT$ . Cela correspond aux situations physiques décrites par le modèle suivant :

$$s(t) = h(t) \otimes e(kt) = (h \otimes e)(kt), \quad (4)$$

où  $\otimes$  désigne le produit de convolution et  $h$  est l'effet du milieu qui est supposé non-dispersif et spatialement homogène.

Le modèle utilisé pour le traitement spatial est issu du modèle précédent que l'on découpe en tranches récurrentes de longueur  $T$ , longueur connue *a priori*. La  $i$ ème tranche ( $r_i(t) = r(t + iT)$ ) a pour expression :

$$r_i(t) = s_{[T]}(kt - i\mu T) + b_i(t), \quad 0 \leq t \leq T; \quad i = 0, M-1 \quad (5)$$

Considérons maintenant le cas d'une antenne ayant la direction donnée par le vecteur  $\mathbf{d}$  et constitué de  $M$  capteurs distants de  $d = |\mathbf{d}|$  et d'une émission d'une seule séquence PSK. On a dans ce cas la formulation classique d'un modèle spatio-temporel :

$$r(t, i) = s_{[T]}(t - i \frac{k_R \cdot \mathbf{d}}{c}) + b(t, i), \quad 0 \leq t \leq T, i = 0, M-1. \quad (6)$$

$\mathbf{d}$  étant le vecteur normé désignant la direction de l'antenne. La seule différence réside dans la présence d'un coefficient de dilatation dans les composantes fonction du temps (enveloppe et porteuse) et des coefficients incrémentaux qui, pour avoir équivalence entre les deux approches, doivent vérifier la relation :

$$\alpha = \frac{k_R \cdot v_R T}{c} = \frac{k_R \cdot \mathbf{d}}{c} \quad (7)$$

### III Traitement Doppler classique

Le traitement Doppler classique issu de la théorie de l'estimation fait apparaître la **fonction d'interambiguïté bande étroite** [6] donnant la valeur du Doppler pour un trajet. La forme correspondante de cette fonction appliquée sur un nombre de tranches égales à  $P$  du modèle 3 est :

$$\mathcal{F}_{rc}(t, f) = \int_{[PT]} r(u) c_{[T]}(u - t) \exp j2\pi f u \, du \quad (8)$$

Développé dans le cadre du modèle 4, on obtient :

$$\mathcal{F}_{rc}(t, f) = h(t) \otimes \mathcal{F}_{cc}(t, f) + \mathcal{F}_{bc}(t, f), \quad (9)$$

qui fait apparaître la **fonction d'autoambiguïté** du code  $c(t)$ . La fréquence  $f$  peut être convertie en Doppler  $\mu$  mais aussi en angle  $(v_R, k_R)$  grâce à la relation 7.

La fonction d'autoambiguïté fait en outre apparaître la notion de pouvoir de résolution à la fois en temps et en fréquence [6]. Ce dernier est alors convertible en pouvoir de résolution en angle  $(v_R, k_R)$ . La fonction 8 n'est autre qu'une "formation de voie active".

### IV Traitement spatial

#### IV.1 Une méthode passive bande étroite : MUSIC

Cette méthode très répandue dans le domaine du traitement d'antenne [4, 5] utilise une seule fréquence du signal reçu et ne fait donc aucune hypothèse sur la forme du signal émis. On se contente de mesurer les angles de sites des signaux parvenant sur une antenne. Cette mesure permet en outre de séparer les deux trajets dans le domaine spatio-temporel par filtrage spatial au voisinage des angles mesurés. Mais cette méthode peut être améliorée en effectuant une analyse large bande du signal.

#### IV.2 Une méthode passive large bande : Estimation Paramétrique

Nous appliquons une méthode d'estimation paramétrique au sens du maximum de vraisemblance (MV) utilisant une fenêtre spatiale glissante [1]. Dans cette fenêtre composée de  $P$  tranches du modèle 5 intercorrélées et écrites dans le domaine fréquentiel, on estime conjointement  $\alpha$  et la forme d'onde  $s(t)$ . C'est donc une méthode passive au sens où l'on estime  $s(t)$  mais qui deviendrait active si l'on prend pour objectif d'isoler la fonction de transfert du milieu  $h(t)$  dans le modèle 4. Le bruit additif est supposé blanc gaussien temporellement et spatialement. L'algorithme de Quasi-Newton est utilisé pour estimer les paramètres non-linéaires  $\alpha$ . Pour chaque fenêtre spatiale courante, nous prenons comme initialisation de  $\alpha$  l'estimation de la fenêtre précédente.

C'est une méthode Haute-Résolution par rapport au traitement donné au paragraphe III. Seul la présence du Doppler et donc du mouvement de l'hydrophone permet la séparation des deux trajets. On peut montrer que la qualité de l'estimation, donnée par les bornes de Cramer-Rao, est d'autant meilleure que l'écart de site entre les deux trajets est important.

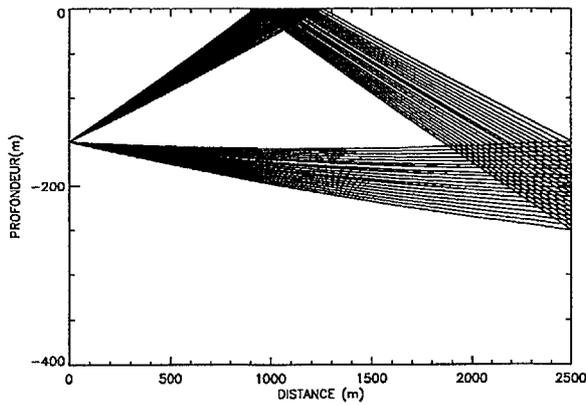


Fig. 2: Rayons de la propagation acoustique dans la configuration de l'expérimentation.

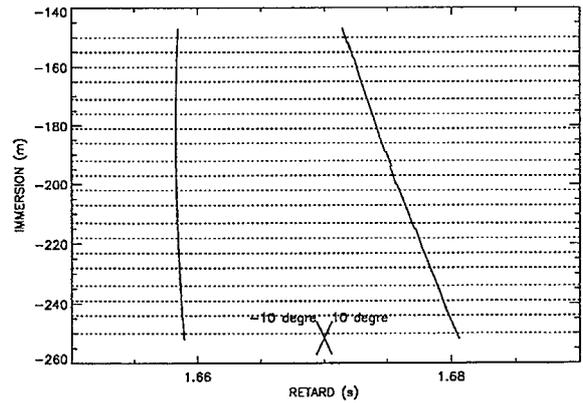


Fig. 4: Diagramme spatio-temporel de la propagation. Deux lignes pointillées successives représentent le temps d'une séquence  $T$ . Les courbes continues représentent le temps d'arrivée de chaque trajet et leur pente peut être convertie en angle d'arrivée sur la trajectoire de l'hydrophone.

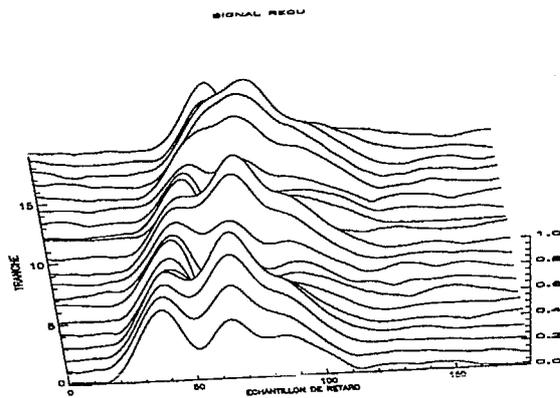


Fig. 3: Enveloppe du signal reçu représentée après intercorrélation.

## V Résultats

L'exemple choisi ici est tiré d'une expérimentation faite par le CEPHAG pendant la campagne de tomographie CON-VHIV (MAST I) [2]. Le signal est constitué de 20 périodes de BPSK 511 bits modulés autour de 400 Hz à 4 périodes par bits. L'émission est produite à 150 m d'immersion et la réception est faite à 2,5 km de distance sur un hydrophone se déplaçant de 250 m à 150 m d'immersion pendant la durée de l'émission. On supposera donc que la vitesse est verticale et de 1m/s. Une image de la propagation par un modèle de rayons acoustiques appliqué dans cette configuration est donnée à la figure 2.

La réponse du milieu est constituée de deux trajets non résolus en temps (figure 3) dont un est réfléchi en surface et arrive plus tard avec un angle d'incidence plus élevé sur la trajectoire de l'hydrophone (figure 4).

Le traitement en ambiguïté est montré à la figure 5. Il a été fait sur un nombre de séquences suffisant ( $P=16$ ) pour que les deux trajets soit résolus en fréquence. L'échelle des fréquences est convertie en degrés sur la figure grâce à la formule 7.

La figure 6 montre le résultat de la localisation angulaire des trajets par la méthode MUSIC bande étroite à la fréquence 400Hz. On distingue nettement la présence de deux trajets. Les gisements ainsi mesurés sont en très bonne concordance avec les modélisations par tracé de rayons.

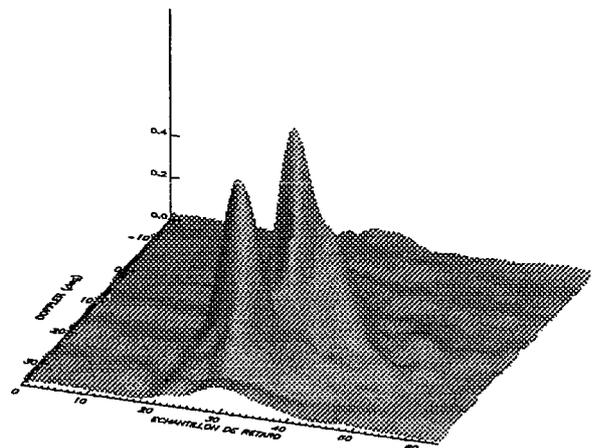


Fig. 5: Traitement en ambiguïté du signal reçu sur 16 séquences. Le premier trajet est pointé à 13 degré, le deuxième à 18 degré.

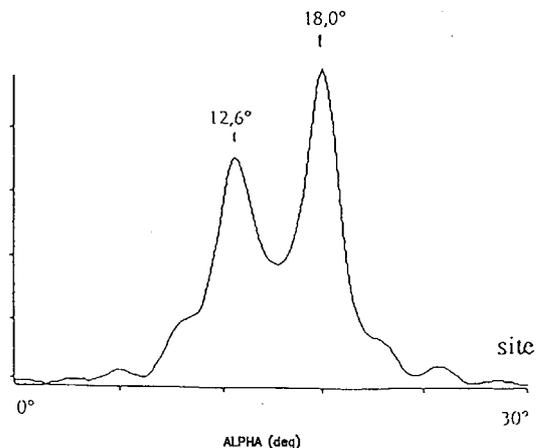


Fig. 6: Localisation angulaire des trajets par MUSIC à la fréquence de travail de 400 Hz.

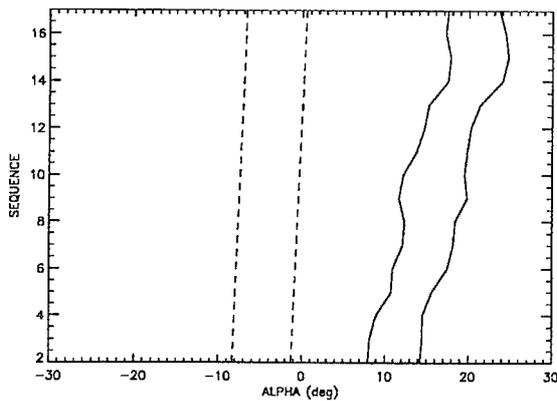


Fig. 7: Estimation du paramètre  $\alpha$  pour les deux trajets de la configuration de l'expérience. Les courbes en pointillées montrent l'évolution des paramètres prédits par le modèle.

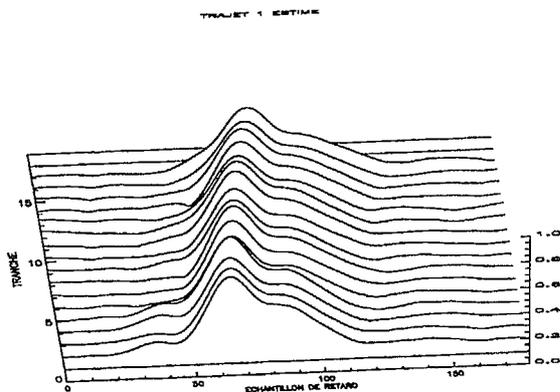


Fig. 8: Estimation de l'enveloppe de la forme d'onde associée au premier trajet.

Le résultat d'estimation de  $\alpha$  (converti en degrés) par la méthode de séparation paramétrique ( $P=5$ , et deux trajets) est donné sur la figure 7. On a aussi représenté le modèle théorique en pointillé. On remarque un décalage et une différence de pente que nous expliquons par le peu de précision avec laquelle le déplacement du récepteur était estimé. Ce manque de précision ne minimise pas les performances de la méthode et du procédé expérimental qui constituent à eux deux un principe simple et modeste comparé à la technologie nécessaire à l'utilisation des antennes classiques. Nous pouvons résumer les conditions d'utilisation :

- stationnarité du milieu à l'échelle de l'émission,
- bon contrôle de la vitesse et de la direction de déplacement du récepteur.

Comme la méthode utilisée est une méthode passive, elle permet alors d'obtenir les formes d'ondes associées à chaque trajet. Le résultat d'estimation de ces formes d'ondes est montré aux figures 8 et 9. Si par contre, on néglige l'action du milieu dans le modèle 4, on peut envisager une méthode d'estimation paramétrique active, ce qui donnerait des résultats plus robustes sur l'estimation des Doppler (i.e. des angles de réception) notamment dans des configurations plus complexes que celle présentée.

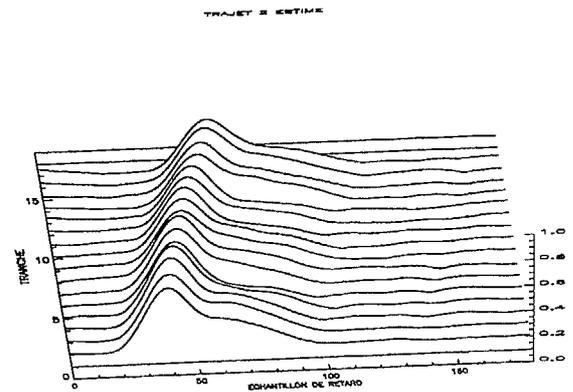


Fig. 9: Estimation de l'enveloppe de la forme d'onde associée au deuxième trajet.

## VI Conclusion

Les méthodes classiques de traitement d'antenne sont appliquées dans ce type de configuration sur un seul hydrophone avec profit car elles permettent de mesurer efficacement le Doppler sur chaque trajet, Doppler convertible en angle d'incidence de l'onde sur la direction de déplacement de l'hydrophone. Elles utilisent de plus le Doppler différentiel entre trajets comme facteur de séparation et estiment ainsi les réponses impulsionnelles affectées à chaque trajet. Ce travail met en évidence la pertinence de l'analyse spatio-temporelle du milieu marin faite à partir d'un seul hydrophone.

## Références

- [1] Essebbar, A. "Séparation paramétrique des ondes en sismique," thèse de Doctorat INPG, 1992.
- [2] Faure, B., Mauuary, D. "Caractérisation des ERATOs en condition normale de fonctionnement et étude du milieu marin", rapport CEPHAG 54/91, 1991.
- [3] Mauuary, D., Faure, B and Jourdain, G., "Simultaneous Delay and Doppler Measurements in SOFAR Multipath Propagation", European Conference on Underwater Acoustics, Ed. M. Weydert, Elsevier Science Publishers, 1992.
- [4] Bienvenu, G., Kopp, L. "Optimality of high resolution array processing using the eigensystem approach," IEEE ASSP, ASSP-31, n 5, 1983.
- [5] Gounon, P. "Séparation de trajets à l'aide d'une antenne synthétique. Expérimentation CONVHIV", rapport CEPHAG 13/92, 1992.
- [6] Woodward, P.N. *Probability and Information Theory*, Pergamon, New York, 1953.

## Remerciements

Nous tenons à remercier l'IFREMER qui nous a permis de réaliser cette expérimentation pendant la campagne de tomographie THETIS MASTI.