

# Double formation de voies pour la séparation et l'identification d'ondes: applications en contexte fortement bruité et à la campagne FAF03

Double Beamforming for wave separation and identification: robustness against noise and application on FAF03 experiment

**Barbara Nicolas<sup>1</sup>, Ion Iturbe<sup>1</sup>, Philippe Roux<sup>2</sup>  
et Jérôme I. Mars<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> GIPSA-lab, INPG-CNRS, 961 rue de la Houille Blanche, Domaine universitaire - BP 46, 38402 Saint Martin d'Heres Cedex 9  
prenom.nom@gipsa-lab.inpg.fr

<sup>2</sup> LGIT, UJF-CNRS, 1381 rue de la Piscine, Domaine universitaire - BP 53, 38041 Saint Martin d'Heres Cedex 9

Manuscrit reçu le 26 mars 2008

Résumé et mots clés

La tomographie acoustique océanique a pour objectif l'estimation des variations de la vitesse des ondes dans l'océan à partir des temps de trajet de ces ondes. L'estimation des variations des temps d'arrivée des ondes ainsi que l'association des ces ondes avec des trajets théoriques dans le milieu, nécessaire pour réaliser la tomographie, est rarement possible sur le signal enregistré entre une source et un capteur dans des configurations réelles : mélange des ondes, faible rapport signal sur bruit.

Cependant, en tenant compte de la structure multidimensionnelle de l'acquisition, des alternatives existent. Dans ce papier, nous proposons une nouvelle méthode : la double formation de voies (en émission et en réception) permettant de séparer les ondes se propageant dans le milieu océanique et d'extraire les informations nécessaires aux algorithmes de tomographie. Nous étudions sa robustesse face au bruit sur des données simulées en contexte fortement bruité ainsi que les résultats obtenus sur données réelles provenant de la campagne de tomographie FAF03.

Estimation de retard, identification d'ondes, formation de voies, Tomographie Acoustique Océanique (TAO).

Abstract and key words

Ocean Acoustic Tomography aims at estimating ocean celerity variations using wave travel times in the ocean. Estimation of the variations of these travel times and identification of each acoustic arrival with a theoretical ray path in the medium is necessary for tomographic purposes. These estimations and identifications are usually impossible on the recorded signals due to several wavefront arrivals at the same time or to weak Signal to Noise Ratio.

Using the fact that we have two arrays of sensors : a receive and a source arrays, some alternative processings can be developed. In this paper we propose a new method : time-delay double beamforming (on the source and receive arrays) which allows wave separation and extraction of the information required for the tomography. We study the robustness of this method against noise and apply it to real data from the experiment FAF03.

Time delay estimation, wave identification, beamforming, Ocean Acoustic Tomography (OAT).

## Remerciements

Nous remercions le Saclant Center (La Spezia) pour l'utilisation des données de la campagne FAF03 et plus particulièrement le responsable de la campagne Mark Stevenson ainsi que les ingénieurs ayant permis son déroulement : Piero Boni et Piero Guerrini. Nous remercions également le Marine Physical Laboratory (SCRIPPS, San Diego) et les responsables scientifiques de la campagne W.A. Kuperman et W.S. Hodgkiss.

# 1. Introduction

## 1.1. Contexte : la Tomographie Acoustique Océanique (TAO)

La Tomographie Acoustique Océanique (TAO) [1] a pour objectif l'estimation de la variation de la vitesse des ondes dans une portion d'océan. Cette estimation fournit une carte spatiale et temporelle des variations de vitesse et permet aux océanographes de remonter à des cartes de variation de la température. Les variations locales de température entraînent des variations locales de vitesse de propagation des ondes et par conséquent des variations du temps de propagation des rayons se propageant dans le milieu et traversant les hétérogénéités de vitesse. La tomographie consiste alors à résoudre le problème inverse suivant : estimer les variations locales de vitesse des ondes à partir des mesures de variations du temps de propagation des rayons, via des méthodes d'inversion. Pour cela, il faut donc être capable de **mesurer les variations de temps d'arrivée des rayons** mais également d'**associer ces rayons avec un trajet théorique dans le milieu** afin d'utiliser les mesures de temps d'arrivée dans les algorithmes d'inversion.

Dans tout problème de tomographie, plus le nombre de rayons utilisés est important, meilleure est la résolution spatiale après l'inversion. Deux facteurs permettent d'augmenter le nombre de rayons utilisés : les moyens expérimentaux et les traitements adoptés. Ces deux facteurs sont généralement liés car les traitements développés sont adaptés à la configuration expérimentale afin d'utiliser le plus efficacement possible l'ensemble des données disponibles.

Jusqu'ici, les moyens expérimentaux classiquement utilisés en tomographie étaient constitués d'une source et d'une antenne verticale de récepteurs ; de nouveaux systèmes apparaissent aujourd'hui utilisant une antenne verticale d'émetteurs et une antenne verticale de récepteurs. Ainsi, le nombre de signaux enregistrés augmentant, il est possible d'obtenir plus d'information sur le milieu.

Concernant les traitements, il est nécessaire de développer des traitements dédiés aux besoins spécifiques de la TAO permettant l'utilisation d'un grand nombre de rayons à partir des signaux enregistrés. C'est donc dans ce contexte que les méthodes de séparation d'ondes et d'estimation de retards entrent en jeu. À partir des enregistrements bruts où les arrivées des différents rayons interfèrent entre eux (empêchant la mesure précise de

leurs temps de propagation et leur identification), les traitements doivent tout d'abord permettre **la séparation des différents rayons**. Cette séparation rend alors possible l'estimation des variations des temps d'arrivée. Les traitements développés doivent également répondre au second besoin des méthodes de tomographie en permettant **l'identification des ondes avec un modèle théorique**. Les méthodes classiques d'estimation de retards [2] sont souvent peu adaptées car, même si elles fournissent une bonne estimation des retards dans le cas de rayons très proches sur le signal enregistré, elles ne permettent pas l'association de ce retard mesuré avec un trajet théorique. Par ailleurs, des méthodes haute résolution (HR) pour l'estimation conjointe des angles et temps d'arrivée ont également été proposées [3], [4] permettant de séparer des rayons ayant des caractéristiques très proches. Leur utilisation ne peut cependant pas résoudre le problème d'association des rayons réels avec les rayons théoriques. Pour cela, une extension de ce type de méthodes HR à la configuration de deux antennes émission/réception est envisageable. Cependant nous ne faisons pas ce choix ici car les méthodes hautes résolution sont généralement sensibles à la connaissance du milieu ainsi qu'au bruit et nous souhaitons développer une méthode robuste qui puisse s'appliquer dans des environnements réels bruités et connus de manière approximative.

## 1.2. Démarche adoptée

La démarche adoptée dans la suite de ce papier est la suivante :

- Nous considérons le cas d'un réseau vertical de sources et d'un réseau vertical de capteurs.
- Nous cherchons à mettre au point un traitement permettant la séparation du plus grand nombre possible de rayons (et par conséquent l'estimation de leur temps d'arrivée) et l'association de ces rayons avec des rayons prédits par un modèle théorique (également appelé identification des ondes).

Le dispositif expérimental mis en place à partir des deux antennes est le suivant : au cours de la campagne, chacune des sources émet (l'une après l'autre) un signal enregistré sur l'antenne de récepteurs. En supposant que le temps nécessaire pour réaliser l'ensemble de ces tirs est court par rapport à l'échelle temporelle de variation de l'océan, il est possible de regrouper ces signaux dans un cube de données constituant une « expérience », représentant l'état de l'océan à « un instant donné », et

contenant l'ensemble des fonctions de transfert entre chaque source et chaque récepteur. Ce processus est ensuite répété, permettant d'avoir une nouvelle expérience, représentant l'état de l'océan à un instant ultérieur. Pour une expérience donnée, nous avons à disposition un cube de données  $p(t, z_r, z_e)$  où  $t$  représente le temps,  $z_r$  la profondeur du récepteur et  $z_e$  la profondeur de la source. Chaque signal  $p(t, z_{r0}, z_{e0})$  correspond au signal temporel reçu par le récepteur à  $z_{r0}$  pour une émission de l'émetteur à  $z_{e0}$  et l'ensemble des signaux représente la matrice de transfert entre l'ensembles des sources et des récepteurs.

La séparation et l'identification des différentes ondes est rarement possible sur le signal enregistré entre une source et un capteur  $p(t, z_{r0}, z_{e0})$  dans des configurations réelles, notamment à cause du mélange des ondes (plusieurs ondes arrivent au même instant) et/ou d'un faible Rapport Signal sur Bruit (RSB). Dans ce cas, la prise en compte du caractère plan des ondes propagées permet de tirer profit de la structure multidimensionnelle de l'acquisition, et ainsi de réaliser la séparation et l'identification. En tomographie acoustique sous-marine, la Formation de Voies à la réception (FV) est classiquement appliquée sur une antenne de récepteurs enregistrant le signal émis par un unique émetteur. Celle-ci permet de séparer les rayons entre la source et un récepteur de référence à partir de leur angle de réception et de leur temps de propagation.

Nous nous plaçons ici dans la configuration plus complexe mais plus riche d'une antenne de récepteurs et d'une antenne d'émetteurs. Dans ce cadre, et sous certaines hypothèses (réciprocité spatiale et stationnarité du milieu pendant l'acquisition), nous réalisons une Double Formation de Voies (D-FV) : en réception et en émission [5]. Cette double transformation permet de séparer les différents rayons, non seulement par rapport à leur temps de propagation et angle de réception, mais également par rapport à leur angle d'émission. De plus, nous possédons alors trois informations : temps, angle de réception, angle d'émission permettant d'associer plus facilement le rayon extrait à un trajet théorique.

Dans ce papier, nous présentons la méthode classique utilisant la formation de voies en réception puis détaillons particulièrement une nouvelle méthode : la double formation de voies (en émission et en réception) ainsi que les avantages liés à son utilisation en tomographie. Puis nous étudions sa robustesse face au bruit sur des données simulées et la comparons à celle de la formation de voies classique. Enfin, nous illustrons le gain apporté par cette double formation de voies sur des signaux réels issus d'une campagne de tomographie en mer (campagne FAF03).

## 2. Formation de voies

### 2.1. Méthode classique : simple formation de voies

La formation de voies a été introduite en acoustique sous-marine dans les années quarante. La théorie de base, le calcul des diagrammes de directivité, pour différentes types d'antennes (linéaires, circulaires,...) sont présentés dans [6] et [7]. Des travaux sur son optimalité sont proposés dans [8], [9], [10],.... Avec l'apparition des appareils numériques, de nombreux travaux sur l'implémentation des algorithmes ont été réalisés ([11], [12],...). Finalement, pendant les années quatre-vingt quelques études des performances de la formation de voies vis à vis des erreurs des récepteurs [13], des erreurs sur le calcul de la loi de retard [14], de la cohérence des sources [15] ont été réalisés. La bibliographie dans le domaine est donc très large et variée.

Dans le cas de la TAO, nous souhaitons séparer et identifier les ondes (modélisables sous forme de rayons) se propageant entre une source et un récepteur donnés, appelés par la suite source et récepteur de référence (ou couple de référence), situés respectivement à la profondeur  $z_{e0}$  et  $z_{r0}$ .

La méthode classique consiste à considérer la matrice de données  $p(t, z_r, z_{e0})$  contenant l'ensemble des signaux émis par la source de référence  $z_{e0}$  et enregistrés sur l'antenne (ou sur un sous-ensemble de l'antenne), puis à réaliser une simple Formation de Voies à la réception (FV) par rapport au récepteur de référence  $z_{r0}$ . Le résultat de cette FV se situe dans le plan temps-angle de réception  $(t, \theta_r)$  et se calcule par :

$$p(t, \theta_r, z_{e0}) = \frac{1}{N_r} \sum_{i=1}^{N_r} a_i p(t + \tau_i(\theta_r), z_{ri}, z_{e0}) \quad (1)$$

où  $N_r$  est le nombre de récepteurs choisis pour réaliser la formation de voies,  $z_{ri}$ , la profondeur du  $i$ -ème récepteur,  $a_i$  le coefficient de pondération du récepteur  $i$  (utilisation d'une fenêtre de pondération spatiale) et  $\tau_i$  le retard, entre le récepteur  $i$  et le récepteur de référence, d'une onde plane arrivant sur l'antenne avec un angle de réception  $\theta_r$ . Nous verrons par la suite comment choisir les  $N_r$  récepteurs utilisés en fonction du récepteur de référence considéré. Notons que l'application du retard  $\tau_i$  permet de recalculer l'ensemble des signaux reçus sur l'antenne autour du temps d'arrivée du rayon ayant un angle de réception  $\theta_r$  et permet ainsi une sommation cohérente s'il existe effectivement un rayon ayant cet angle de réception.

Dans le cas d'un profil de vitesse non uniforme,  $\tau_i$  peut être calculé à partir de l'équation suivante, proposée par Dzieciuch [16] :

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

où  $c(z)$  est la célérité en fonction de la profondeur au niveau de l'antenne de réception,  $c_0$  est la célérité minimale dans le milieu,  $z_{r0}$  est la profondeur du récepteur de référence.

Grâce au caractère plan des ondes propagées, l'arrivée de chaque rayon, en sortie de la FV, est localisée autour de son angle de réception, dans l'espace  $(t, \theta_r)$ . Ainsi on obtient une séparation des différents rayons se propageant entre le couple de référence. Cependant, le pouvoir de séparation de la FV est limité et celle-ci se révèle insuffisante si le RSB devient très faible ou dans le cas d'ondes ayant le même couple (temps, angle de réception).

### 2.2. Double formation de voies

Grâce au nouveau réseau d'émetteurs, une double formation de voies, sur l'antenne de réception mais également sur l'antenne d'émission, peut alors être réalisée et rendre la séparation possible [5]. Pour réaliser cette Double Formation de Voies (D-FV) et aboutir à une meilleure séparation des rayons se propageant entre le couple de référence, deux étapes sont nécessaires :

1) On réalise une formation de voies classique sur chaque plan  $p(t, z_r, z_{ek})$  correspondant aux données émises par l'émetteur  $k$  et reçues sur l'antenne de réception (ou sur un sous-ensemble de l'antenne). Réalisant cette opération pour tous les  $k$ , on obtient un cube de données  $p(t, \theta_r, z_e)$  (figure 1).

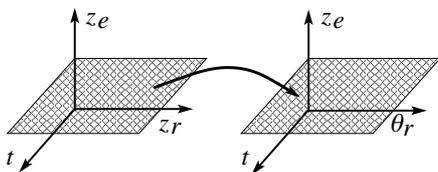


Figure 1. Première formation de voies :  $p(t, z_r, z_e) \rightarrow p(t, \theta_r, z_e)$ .

2) L'hypothèse de réciprocité spatiale du milieu est alors utilisée [17][18]. La réciprocité spatiale 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 fixé  $\theta_{rk}$  comme étant l'enregistrement sur l'antenne d'émission, d'une onde partie du récepteur de référence avec l'angle  $\theta_{rk}$ . On peut donc voir ces données comme correspondant à un enregistrement sur une antenne, et appliquer à nouveau la formation de voies sur l'antenne d'émission, avec comme émetteur de référence celui à  $z_{e0}$  (figure 2).

Réalisant cette opération pour tous les angles de réception  $\theta_{rk}$ , on obtient le cube  $p(t, \theta_r, \theta_e)$  contenant l'ensemble des rayons se propageant entre le couple de référence (situé à  $z_{r0}$  pour le récepteur de référence et à  $z_{e0}$  pour l'émetteur de référence). Dans ce domaine final  $(t, \theta_r, \theta_e)$  on pourra séparer les rayons par leur temps de propagation  $t$ , leur angle de réception  $\theta_r$ , et leur angle d'émission  $\theta_e$ . On a ainsi ajouté un nouveau critère de

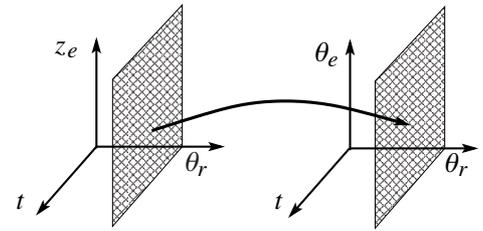


Figure 2. Deuxième formation de voies :  $p(t, \theta_r, z_e) \rightarrow p(t, \theta_r, \theta_e)$ .

séparation, qui est l'angle d'émission, dont on montrera l'intérêt dans les sections 2.4, 3 et 4.

L'expression mathématique de la D-FV est donnée par l'équation 3 :

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

où  $N_r$  et  $N_e$  sont respectivement le nombre de récepteurs/émetteurs choisis pour réaliser la formation de voies,  $z_{ri}$  et  $z_{ej}$ , les profondeurs du  $i$ -ème récepteur et du  $j$ -ème émetteur,  $a_i b_j$  le coefficient de pondération du signal émis par la source  $j$  et reçu sur le récepteur  $i$ .  $\tau_i$  (resp.  $\tau_j$ ) est le retard, entre le récepteur  $i$  (resp. l'émetteur  $j$ ) et le récepteur (resp. l'émetteur) de référence, d'une onde plane arrivant sur l'antenne avec un angle de réception  $\theta_r$  (resp. d'émission  $\theta_e$ ).

Dans notre cas, nous disposons d'une antenne linéaire d'émission (à  $N_e$  composantes) et d'une antenne linéaire de réception (à  $N_r$  composantes). On remarque que l'expression de la D-FV (équation 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 ([21]). 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 [19] 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, plus proches de nos applications en acoustique sous-marine, ont également été réalisées [20], [21].

Nous nous intéresserons aux caractéristiques et performances de cette transformation lors du choix des sous-antennes sur lesquelles la D-FV est appliquée (section 2.3) ainsi que lors de l'étude théorique de la robustesse face au bruit (section 3).

### 2.3. Mise en place de la D-FV

Afin de réaliser la D-FV pour un couple de référence, il est nécessaire de choisir les sous-antennes (à l'émission et à la réception) sur lesquelles s'appliquera ce traitement. Ce choix est réalisé suivant deux critères [23] :

- le nombre de capteurs de chacune des sous-antennes est choisi aussi grand que possible,
- les sous-antennes doivent être centrées autour de l'émetteur et du récepteur de référence.

Le choix de sous-antennes les plus grandes possible est motivé par le pouvoir de séparation de la formation de voies qui est d'autant plus grand que le nombre de capteurs est important. De plus, un grand nombre de capteurs permet d'avoir un meilleur RSB en sortie du traitement (le gain de traitement en fonction du nombre de capteurs sera présenté brièvement dans la section 3). Notons cependant que dans une configuration réelle, il n'est pas toujours possible d'utiliser un grand nombre de capteurs à cause des phénomènes de réfraction des ondes. Les fronts d'ondes arrivant sur l'antenne sont alors incohérents entre deux capteurs éloignés et par conséquent l'opération de décalage-somme de la formation de voies se révèle inefficace. Dans le cas de données acquises en mer, il sera donc nécessaire de prendre en compte ce phénomène pour choisir une sous-antenne la plus grande possible sur laquelle les fronts d'ondes restent cohérents. Concernant la position de la sous-antenne par rapport au récepteur (ou à l'émetteur) de référence, nous justifions notre choix d'antenne centrée par le calcul de la FV dans le cas simple d'un milieu homogène (célérité  $c$ ), d'une apodisation spatiale uniforme ( $a_i = 1$ ) et d'un réseau de  $N$  capteurs équi-distants. Les phénomènes observés restent les mêmes dans les cas plus complexes (célérité non uniforme, apodisation spatiale, D-FV...) mais ce choix a été fait par souci de clarté des calculs présentés. Considérons, dans ce cas simple, une onde arrivant avec un angle de réception « réel »  $\theta_{r0}$  sur l'antenne de réception. Le résultat de la FV dans le domaine fréquentiel s'écrit (avec le récepteur de référence à  $z_{r0}$ ):

$$P(\theta_r, \nu) = S(\nu) \frac{\sin\left(\frac{\pi Nd}{c}(\sin \theta_r - \sin \theta_{r0})\right)}{\sin\left(\frac{\pi d}{c}(\sin \theta_r - \sin \theta_{r0})\right)} \exp(j\phi(\theta_{r0}, \theta_r, \nu, z_{r0})) \quad (4)$$

avec  $S(\nu)$  le spectre du signal source,  $d$  la distance inter-capteur sur l'antenne de réception. Le résultat de la formation de voies peut être vu comme un filtre dont la sortie est le spectre de la source (qui contient le retard à estimer) atténué par le rapport des sinus et déphasé par le terme exponentiel.

Nous nous intéressons au terme exponentiel car celui-ci introduit un déphasage supplémentaire et peut influencer la mesure des temps d'arrivée des rayons. Il est donc nécessaire que ce terme soit nul pour ne pas introduire de décalage temporel supplémentaire. La phase vaut, pour une fréquence  $\nu$ :

$$\phi(\theta_{r0}, \theta_r, \nu, z_{r0}) = \frac{2\pi\nu}{c}(\sin \theta_{r0} - \sin \theta_r) \left( d \frac{N-1}{2} + z_{rs} - z_{r0} \right) \quad (5)$$

avec  $z_{rs}$  la profondeur du capteur de l'antenne le plus proche de la surface. Ce déphasage correspond à un retard  $\tau$  défini par:

$$\tau(\theta_{r0}, \theta_r, \nu, z_{r0}) = \frac{1}{c}(\sin \theta_{r0} - \sin \theta_r) \left( d \frac{N-1}{2} + z_{rf} - z_{r0} \right) \quad (6)$$

Si la sous-antenne est choisie de manière à être centrée autour du récepteur de référence, on a  $z_{r0} = d(N-1)/2 + z_{rf}$  et le retard  $\tau$  est nul. Si l'antenne n'est pas centrée et si l'échantillonnage utilisé en  $\theta_r$  ne permet pas de calculer la formation de voies en  $\theta_{r0}$  (hypothèse souvent vérifiée en pratique), un déphasage apparaît et le signal extrait après FV contient un retard supplémentaire entraînant une mauvaise mesure du temps d'arrivée du rayon.

Pour cette raison, nous choisissons une sous-antenne de réception centrée autour du récepteur de référence. De la même manière, la sous-antenne d'émission est choisie centrée autour de l'émetteur de référence.

En conclusion sur le choix des sous-antennes, nous choisissons les sous-antennes les plus grandes possible et centrées autour des capteurs de référence. La figure 3 présente les sous-antennes choisies pour un couple de référence donné.

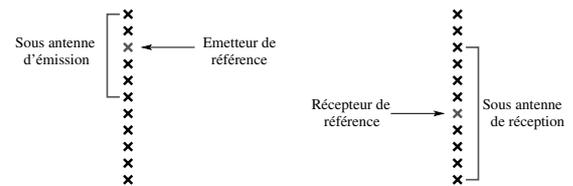


Figure 3. Choix des sous-antennes en émission et en réception.

### 2.4. Intérêt de la double formation de voies

Comme nous l'avons précisé auparavant, l'intérêt du traitement proposé est de pouvoir réaliser conjointement la séparation des ondes et l'association des ondes avec des trajets théoriques. Nous allons montrer sur un exemple comment la D-FV permet de réaliser ces deux opérations.

Considérons deux rayons arrivant sur le récepteur de référence avec des angles  $\theta_r$  proches ( $\theta_{r0}$ ) et des  $\theta_e$  très différents ( $\theta_{e1}, \theta_{e2}$ ). Un exemple de trajets de tels rayons est schématisé sur la figure 4 et sera utilisé par la suite pour montrer comment traiter les deux rayons R1 (trait plein) et R2 (pointillés) en vue de leur utilisation pour la tomographie.

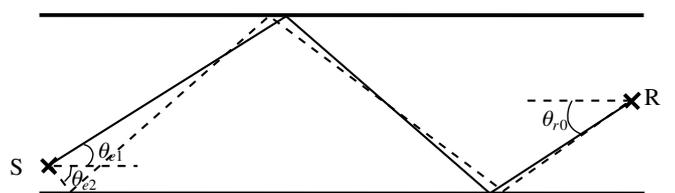


Figure 4. Trajets des deux rayons considérés.

Dans le cas de la FV, ces deux rayons ayant un angle de réception très proches, il n'est généralement pas possible de les séparer. Dans le plan  $(t, \theta_r)$ , nous observons un unique « spot » (figure 5-gauche) et les deux rayons sont inutilisables pour réaliser la tomographie. En revanche, cette séparation est simple en réalisant une D-FV car les angles d'émission  $\theta_{e1}$  et  $\theta_{e2}$  sont de signe opposé (un « spot » R1-uni et un « spot » R2-hachuré, figure 5-droite). Nous voyons donc ici l'apport de la D-FV pour la séparation des ondes. Notons que cette séparation permet ensuite l'estimation des temps d'arrivée des ondes à partir du signal temporel extrait du cube  $p(t, \theta_r, \theta_e)$  (au couple  $(\theta_{rm}, \theta_{em})$  correspondant au maximum du spot du rayon).

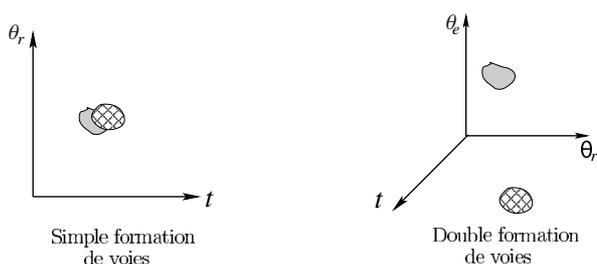


Figure 5. Images des deux rayons après simple (gauche) et double (droite) formation de voies.



En supposant que la séparation de ces deux ondes ait été possible à partir de la FV (en ayant un grand nombre de récepteurs par exemple), la méthode doit également permettre d'associer ces ondes à des trajets théoriques obtenus grâce à un modèle de propagation par rayons. Un nouveau problème apparaît car ce modèle constitue une simplification de l'environnement. Par conséquent, pour chaque rayon théorique, le modèle nous fournit un angle de réception proche mais pas égal à celui du rayon réel. Ainsi, pour deux rayons ayant des angles de réception proches, l'association de chacun à un rayon théorique ne sera pas possible alors que cela ne posera aucun problème après D-FV grâce à des angles d'émission très différents (cf. figure 6).

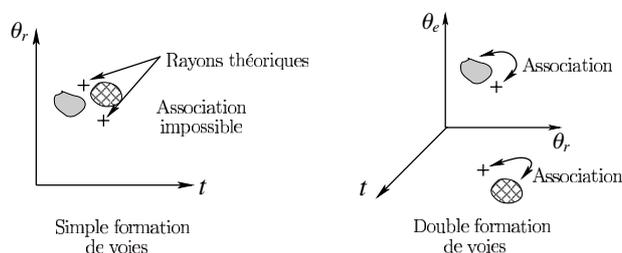


Figure 6. Association des rayons réels avec ceux proposés par le modèle après simple (gauche) et double (droite) formation de voies.

Ainsi, nous avons montré sur cet exemple schématique l'apport de la D-FV aussi bien au niveau de la séparation des ondes que de leur identification.

### 3. Robustesse face au bruit

#### 3.1. Configuration

Nous illustrons la méthode présentée précédemment sur un jeu de données simulées issues d'un logiciel de propagation par équations paraboliques (figure 7). Les sources émettent un signal de fréquence centrale 1 kHz et de bande passante de 200 Hz. Nous disposons d'une antenne verticale 33 émetteurs et d'une antenne verticale de 49 récepteurs régulièrement espacées dans la colonne d'eau entre 4.5 et 148.5 m pour les sources et 3 et 147 m pour les récepteurs. Ces deux antennes sont distantes de 9 km.

Afin d'évaluer la méthode et sa résistance face au bruit, nous nous fixons un objectif : séparer les ondes se propageant entre la source située à  $z_{e0} = 76.5$  m et le récepteur situé à  $z_{r0} = 75$  m. Notons que les capteurs choisis peuvent être situés à n'importe quelle profondeur, il suffit de les choisir comme capteurs de référence dans les formations de voies. Dans le cas non bruité, il est possible d'identifier certaines ondes sur le signal temporel (figure 8) mais cela devient impossible si le rapport signal sur bruit diminue (figure 9, représentant les mêmes signaux, bruités avec un RSB de 3 dB). Notons que pour l'ensemble des figures du papier, les échelles utilisées sont linéaires.

#### 3.2. Résultats obtenus

Le signal émis occupant seulement une partie de la bande fréquentielle possible, nous avons ajouté du bruit, blanc, gaussien et stationnaire, uniquement dans cette bande. Nous définissons donc le RSB de la manière suivante : rapport de puissance entre le signal et le bruit « dans la bande du signal ». Ces puissances sont estimées dans le domaine temporel par la somme des carrés des échantillons (du signal ou du bruit).

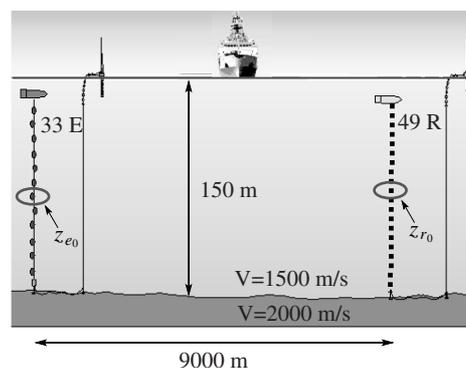


Figure 7. Configuration expérimentale.

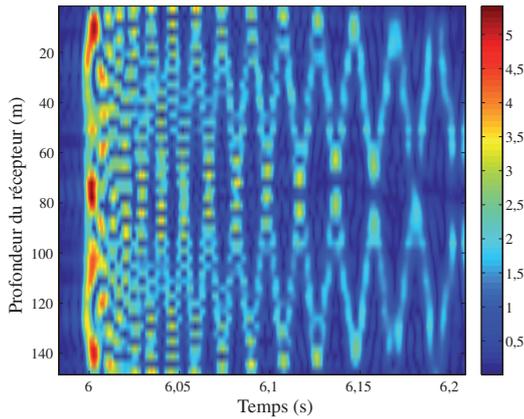


Figure 8. Enveloppe du signal temporel émis par la source à  $z_{e_0}$  enregistré par l'antenne de réception, sans bruit additif.

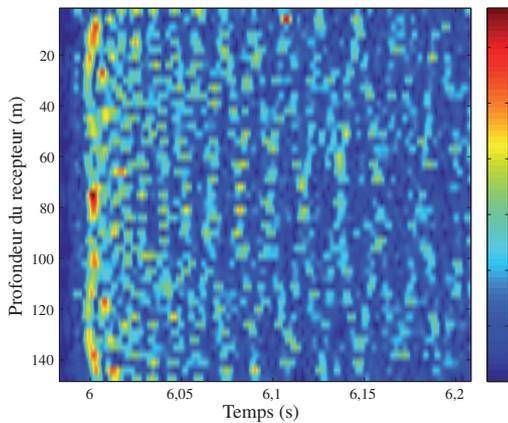


Figure 9. Enveloppe du signal temporel émis par la source à  $z_{e_0}$  enregistré par l'antenne de réception, avec  $RSB = 3$  dB.

Afin d'identifier les ondes, les deux méthodes sont utilisées : FV et D-FV. Nous présentons les résultats obtenus pour deux RSB différents : 0 dB et -10 dB.

Nous présentons ici le cas où la vitesse des ondes au niveau des réseaux d'émission et de réception est connue (les formations de voies sont donc parfaitement réalisées). Ceci n'est pas toujours le cas en pratique mais nous avons constaté qu'une erreur faible sur cette vitesse (une dizaine de m/s) n'affecte pas de manière significative les résultats obtenus.

**RSB = 0 dB :** La figure 10 présente les résultats obtenus par FV des signaux enregistrés sur l'antenne de réception et provenant de la source à  $z_{e_0}$  (récepteur de référence à  $z_{r_0}$ ). Elle présente, au cours du temps, les enveloppes des signaux arrivant sur le capteur de référence en fonction de l'angle de réception. Dans ce cas, il est possible de séparer les différentes ondes (car les taches correspondantes sont visibles et séparées dans le plan  $p(t, z_r)$  à  $z_{e_0}$ ) et d'estimer leur temps d'arrivée. La D-FV n'est donc pas indispensable ici.

**RSB = -10 dB :** Étudions le cas d'un environnement fortement bruité. Comme dans le cas précédent, nous réalisons la FV sur l'antenne de réception (figure 11). Les différentes ondes ne sont

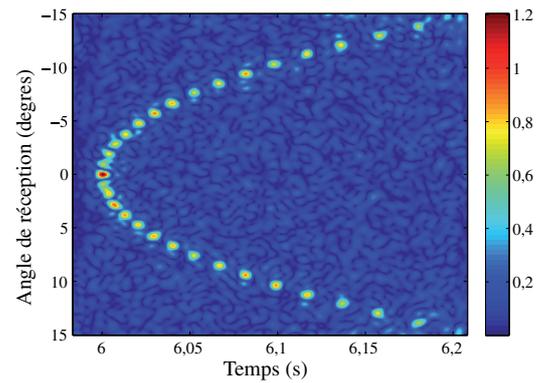


Figure 10. Formation de voies du signal émis à  $z_{s_0}$  enregistré par l'antenne de réception,  $RSB = 0$  dB.

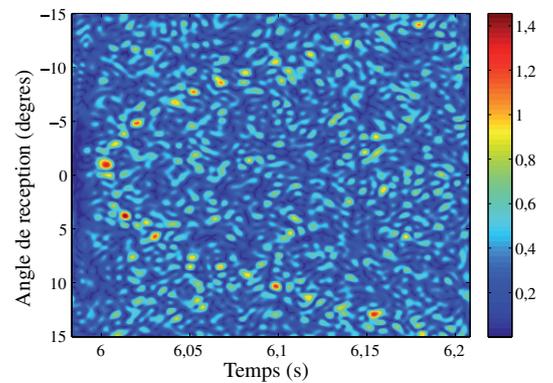


Figure 11. Formation de voies du signal émis à  $z_{s_0}$  enregistré par l'antenne de réception,  $RSB = -10$  dB.

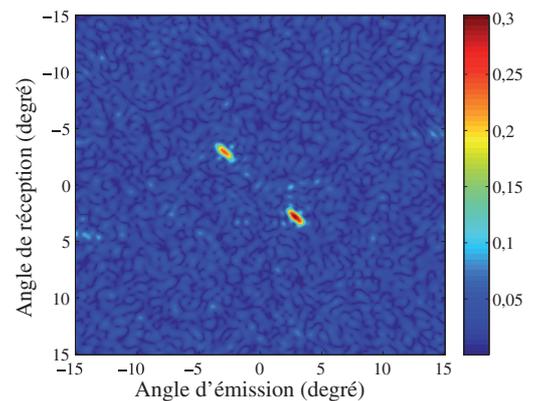


Figure 12. Double formation de voies : coupe du cube  $p(t, \theta_r, \theta_e)$  à  $t = 6.008$  s,  $RSB = -10$  dB.

plus visibles, elles sont noyées dans le bruit et le suivi des temps d'arrivée ne peut donc pas être réalisé. Nous appliquons alors la D-FV sur le cube de données  $p(t, z_r, z_e)$  (avec comme capteurs de référence les capteurs situés à  $z_{r_0}$  et  $z_{e_0}$ ). Nous obtenons alors un cube  $p(t, \theta_r, \theta_e)$  contenant les ondes propagées entre la source à  $z_{e_0}$  et le récepteur à  $z_{r_0}$ .

Il est possible de balayer ce cube suivant l'axe des temps pour observer les ondes, avec leur angle d'émission et de réception. La figure 12 présente un plan du cube  $p(t, \theta_r, \theta_e)$  à  $t = 6.008$  s. On peut identifier deux ondes car celles-ci ressortent sans ambiguïté du bruit, elles ont comme couple  $(\theta_r, \theta_e)$  les couples :  $(-3, -3)$  et  $(2.8, 2.8)$ . Ces ondes n'étaient pas identifiables après une FV mais le sont ici. La D-FV permet donc de limiter efficacement l'influence du bruit affectant les données même si celui-ci est très important.

On peut également appréhender cet apport à partir du gain théorique de la FV. Dans le cas où signal et bruit sont décorrélés, le RSB en sortie de la FV ( $RSB_{FV}$ ) s'exprime par :

$$RSB_{FV} = RSB_{ini} + 10 \log_{10} \frac{\left( \sum_{i=1}^{N_r} a_i \right)^2}{\sum_{i=1}^{N_r} a_i^2} \quad (7)$$

où  $RSB_{ini}$  est le RSB avant FV et les  $a_i$  sont les coefficients de la fenêtre de pondération spatiale sur l'antenne. Notons que dans le cas d'une apodisation uniforme  $a_i = 1$  on retrouve le gain d'antenne classique en  $10 \log_{10} N_r$  avec  $N_r$  le nombre de récepteurs de l'antenne.

De la même manière, le RSB en sortie de la D-FV ( $RSB_{FV E-R}$ ) s'exprime par :

$$RSB_{D-FV} = RSB_{ini} + 10 \log_{10} \frac{\left( \sum_{i=1}^{N_r} a_i \right)^2 \left( \sum_{j=1}^{N_e} b_j \right)^2}{\sum_{i=1}^{N_r} a_i^2 \sum_{j=1}^{N_e} b_j^2} \quad (8)$$

soit, dans le cas d'une apodisation uniforme ( $a_i = 1$  et  $b_j = 1$ ) :  $10 \log_{10} N_r N_e$ .

En réalisant ce calcul théoriquement pour le cas d'une pondération spatiale par une fenêtre de Hanning sur des sous-antennes de 29 émetteurs et 45 récepteurs (choisie centrée, la plus grande possible et conservant la cohérence des fronts d'ondes), le gain d'antenne de la FV est de 15 dB et celui de la D-FV est de 28 dB. En les mesurant en pratique sur différents rayons nous trouvons un gain de 14 dB pour la FV à la réception et 30 dB pour la D-FV ce qui est cohérent avec le résultat attendu. Notons que la différence entre les résultats théoriques et mesurés s'expliquent par la contribution sur la partie signal d'autres rayons (de manière constructive ou destructive) arrivant sur les extrémités du réseau avec des temps et angles proches du rayons considéré.

Par conséquent, le RSB en sortie de la FV est de 4 dB ce qui n'est pas suffisant pour réaliser les mesures nécessaires à la tomographie alors que celui en sortie de la D-FV est de 20 dB et permet une séparation et une identification sans ambiguïté des rayons observés. On observe à nouveau l'intérêt de la D-FV dans le cas d'environnements fortement bruités.

## 4. Application sur données réelles

### 4.1. Campagne FAF03

Cette section présente les résultats obtenus sur des données réelles provenant de la campagne d'acquisition FAF03 réalisé en juillet 2003 en large de l'île d'Elbe [22].

La configuration expérimentale est composée de deux antennes verticales (une antenne d'émetteurs, et une de récepteurs) distantes de 8.6 km. La profondeur du milieu est d'environ 115 m. L'antenne d'émetteurs est composée de 29 émetteurs équidistants ( $d = 2.78$  m) couvrant une profondeur de 78 m (de 17.7 m à 95.7 m). L'antenne de récepteurs est composée de 32 récepteurs équidistants ( $d = 2$  m) couvrant une profondeur de 62 m (de 27.3 m à 89.3 m). La fréquence centrale des signaux enregistrés est de 3,4 kHz, avec une largeur de bande de 1 kHz. Pour illustrer l'intérêt, au niveau de la séparation d'ondes et de l'identification, de la D-FV par rapport FV, trois cas sont présentés. Dans le premier cas, la FV suffit à séparer et identifier les rayons. Dans le second cas, la FV ne permet pas la séparation de certains rayons (et rend par conséquent impossible l'identification) alors que la D-FV fournit des résultats satisfaisants. Enfin, dans un troisième cas, la FV permet la séparation des rayons, mais présente une forte ambiguïté au niveau de l'identification et la D-FV permet de résoudre ce problème

### 4.2. Résultats obtenus

**Cas 1 :** Nous analysons les rayons se propageant entre la source à  $z_{e0} = 56.7$  m et un récepteur virtuel à  $z_{r0} = 58.6$  m (le couple de référence est situé au centre des deux antennes). La figure 13-a montre les données émises par l'émetteur de référence et enregistrées sur l'antenne de récepteurs. Nous observons que la séparation des différents rayons est impossible sur les données enregistrées.

Afin de réaliser l'étape d'identification, nous simulons la propagation entre le couple de référence par la théorie des rayons et nous obtenons les trajets théoriques présentés sur la figure 13-b. Puis nous appliquons le traitement classique de FV. La figure 13-b présente le résultat obtenu, dans l'espace  $(t, \theta_r)$ , ainsi que les temps et angles d'arrivée théoriques des rayons (croix). La plupart des rayons sont séparés (une « tache » pour une croix), à l'exception des premiers rayons, ayant des angles de réception très faibles, qui restent mélangés (une « tache » pour plusieurs croix). Nous ne nous intéresserons pas ici à ces rayons, relativement peu nombreux, qui resteront donc inutilisables pour la tomographie.

Pour la majorité des rayons, on peut donc mesurer le temps d'arrivée et il est aisé d'associer chaque tache de la FV à une croix (identification). La FV est donc un traitement suffisant pour la séparation et l'identification des rayons dans ce cas.

**Cas 2 :** Étudions maintenant deux des rayons se propageant entre la source à  $z_{e0} = 87,3$  m et un récepteur virtuel à  $z_{r0} = 39,3$  m (figure 14-a). La figure 14-b montre le résultat de la FV, deux croix indiquant les positions théoriques des deux rayons. On observe une unique « tache » due aux interférences des arrivées des deux rayons, il n'est donc pas possible de séparer ces rayons pour mesurer leur temps de trajet. Ce phénomène apparaît fréquemment pour des rayons ayant des angles de réception et des temps d'arrivée proches.

Une possibilité consiste alors à appliquer la D-FV (figures 14-c), nous obtenons un cube  $p(t, \theta_r, \theta_e)$  dont nous observons des coupes à  $t$  fixé pour une visualisation plus aisée. Dans l'espace  $(t, \theta_r, \theta_e)$ , les deux rayons sont parfaitement séparés, grâce à leurs angles d'émission très différents. Il est alors possible de mesurer leur temps de trajet et de les associer avec les rayons théoriques obtenus par simulation (représentés par des croix sur la figure 14-c).

**Cas 3 :** Ce cas illustre l'apport de la D-FV dans un cas où la FV a permis la séparation des rayons mais se révèle insuffisante pour réaliser l'identification des rayons. Ce phénomène apparaît fréquemment lorsque l'environnement est connu de manière approximative. Dans ce cas, les rayons théoriques et les « taches » ne se superposent pas parfaitement et il peut exister une ambiguïté au moment de l'association entre rayon théorique et rayon observé. Considérons le rayon théorique représenté sur la figure 15-a. Une fois la FV appliquée et les coordonnées du rayon théorique superposées (figure 15-b), il n'est pas possible d'associer ce dernier avec un rayon réel : la croix se situe entre deux rayons réels et nous ne savons pas lequel de ces deux rayons correspond au rayon théorique. Une nouvelle fois, la D-FV va permettre de résoudre ce problème grâce à l'introduction de l'angle d'émission. La figure 15-c montre le résultat de la D-FV, il est alors possible d'associer sans ambiguïté le trajet du rayon théorique à un rayon réel car une seule « tache » se situe à proximité de la croix représentant le rayon théorique. Ainsi, nous avons montré la robustesse de la D-FV pour l'identification des ondes vis à vis des connaissances du milieu.

## 5. Conclusion

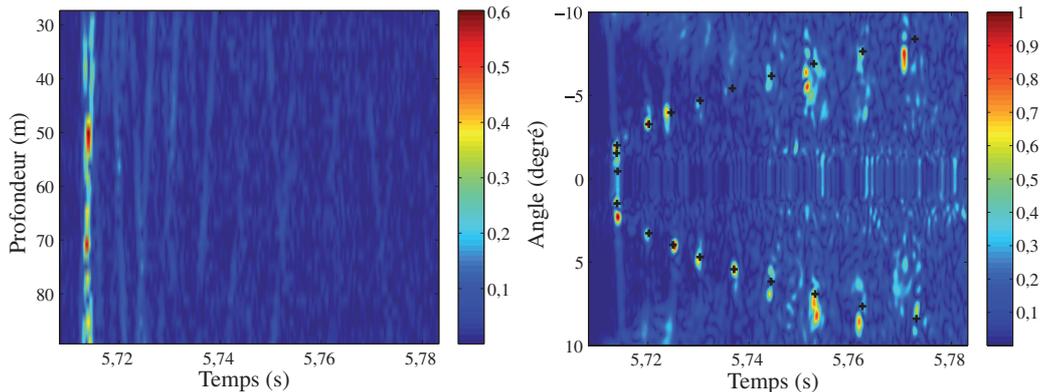
Dans ce papier nous avons proposé une méthode efficace pour la séparation et l'identification d'ondes : la double formation de voies utilisant une antenne de réception et une antenne d'émission. Ses apports, notamment en vue d'une utilisation en tomographie, ont été montrés de manière théorique mais également sur des données simulées fortement bruitées ainsi que sur des données réelles provenant d'une campagne en mer. La méthode a montré une grande robustesse face au bruit, elle a également permis, sur des données réelles, de séparer et identifier des rayons qui ne pouvaient pas l'être à partir des méthodes classiques utilisant un unique réseau de récepteur.

Nous pouvons conclure en disant que cette méthode promet des résultats très intéressants en tomographie car elle permettra de séparer et d'identifier un grand nombre de rayons et par consé-

quent d'aboutir à une carte des variations de vitesse ayant une très bonne résolution spatiale. Des travaux sur ce sujet sont actuellement en cours [23].

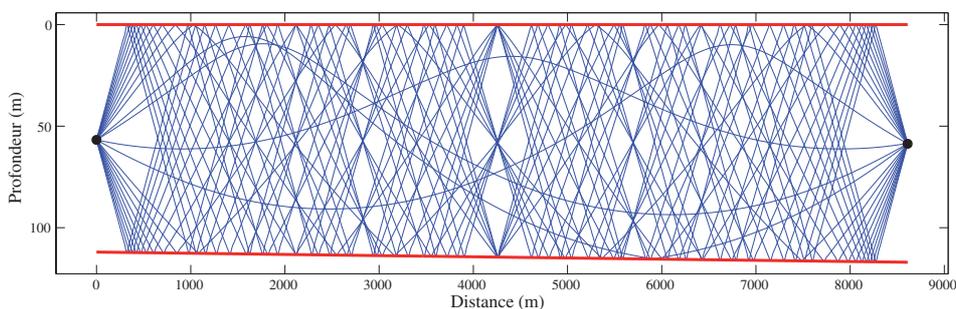
## Références

- [1] W. MUNK, P. WORCESTER et C. WUNSCH, *Ocean Acoustic Tomography*. Cambridge, 1995.
- [2] J.L. LACOUME, *Mesure de retard. De l'acoustique sous-marine à la tomographie acoustique océanique*, Trait. Sig. vol. 24, n°4, pp 247-258, 2007.
- [3] Y-Y. WANG et J.T. CHEN et W-H. FANG, *TST-MUSIC for joint DOA-Delay Estimation*, IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 49, n°4, pp 721-729, April 2001.
- [4] M.C. VANDERVEEN et C.B. PAPADIAS et A. PAULRAJ, *Joint angle and delay estimation (JADE) for multipath signals arriving at an antenna array*, IEEE Communication Letters, vol. 1, n°1, pp 12-14, January 1997.
- [5] P. ROUX et B.D. CORNUELLE et W.A. KUPERMAN et W.S. HODGKISS, *The structure of ray-like arrivals in a shallow water waveguide*, Soumis à J. Acoust. Society America.
- [6] Y.T. LO et S.W. LEE, *Antenna Handbook*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1993, chap 11.
- [7] R.E. COLLIN et F.J. ZUCKER, *Antenna Theory, part 1*. McGraw-Hill Book Company, 1969.
- [8] R.L. PRITCHARD, *Optimum Directivity Patterns for Linear Point Arrays*, J. Acoust. Society America, vol. 25, n°5, pp 879-891, 1953.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] V.C. ANDERSON, *Digital Array Phasing*, J. Acoust. Society America, vol. 32, n°7, pp 867-870, 1960.
- [12] B. MARANDA, *Efficient digital beamforming in the frequency domain*, J. Acoust. Society America, vol. 86, n°5, pp 1813-1819, November 1989.
- [13] 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.
- [14] L.C. GODARA, *The Effect of Phase-Shifter Errors on the Performance of an Antenna-Array Beamformer*, IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 10, n°3, pp 278-284, July 1985.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] P.M. MORSE et H. FESHBACH, *Methods of theoretical physics I*, McGraw-Hill Book Company, Inc, 1953.
- [18] P.M. MORSE et K. UNO INGARD, *Theoretical Acoustic*, Pinceton University Press, 1986.
- [19] R.J. MAILLOUX, *Phased array theory and technology*, Proc. IEEE, vol. 70, issue 3, pp 246-291, Mar. 1982.
- [20] 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.
- [21] N.J. MOHAMED, *Two-Dimensional Beamforming with Nonsinusoidal Signals*, Proc. IEEE, vol. 70, issue 3, pp 246-291, Mar. 1982.
- [22] P. ROUX et W.A. KUPERMAN et W.S. HODGKISS et H.C. SONG et T. AKAL et M. STEVENSON, *A nonreciprocal implementation of time reversal in the ocean*, J. Acoust. Society America, vol. 116, pp 1009-1015, 2004.
- [23] I. ITURBE et P. ROUX et B. NICOLAS et J. VIRIEUX et J.I. MARS, *Shallow water acoustic tomography performed from a double beamforming algorithm*, Soumis à J. Acoust. Society America.



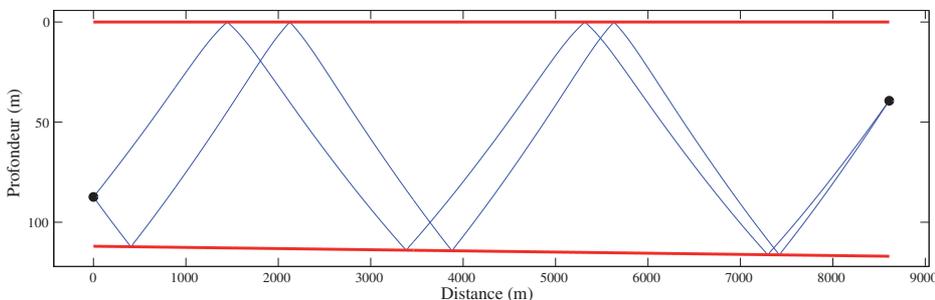
(a) Données enregistrées :  $z_{e0} = 56,7$  m

(c) Résultat FV :  $z_{e0} = 56,7$  m

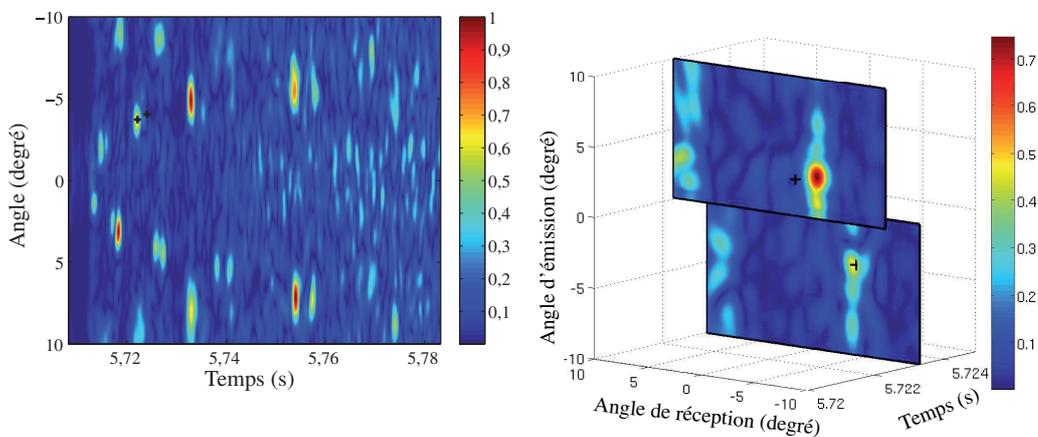


(b) Rayons Cas 1 :  $z_{e0} = 56,7$  m,  $z_{r0} = 58,6$  m

Figure 13. Cas 1 : Données (a), Tracés théoriques des rayons (b), Résultat de la FV (c).



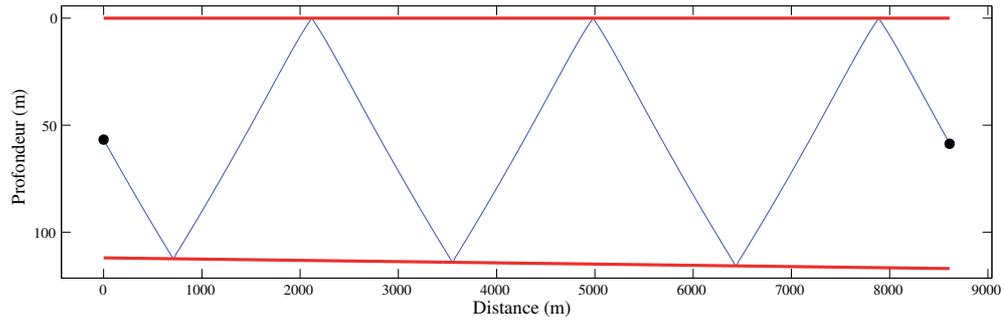
(a) Rayons Cas 2 :  $z_{e0} = 87,3$  m,  $z_{r0} = 39,3$  m



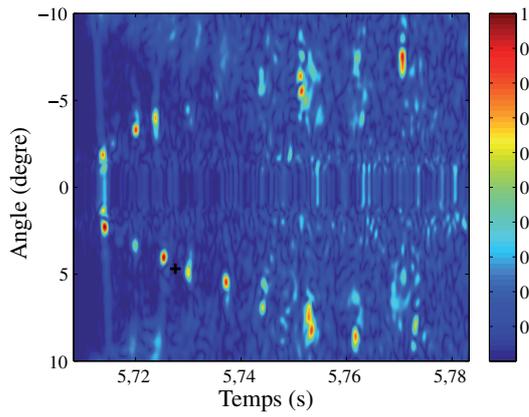
(b) Résultat FV :  $z_{e0} = 87,3$  m

(c) Résultat D-FV

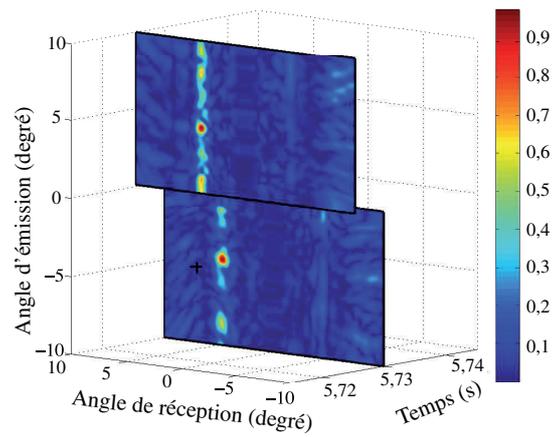
Figure 14. Cas 2 : Tracés théoriques des rayons (a), résultat de la FV (b) et de la D-FV (c).



(a) Rayons Cas 3 :  $z_{e0} = 56,7$  m,  $z_{r0} = 58,6$  m



(b) Résultat FV :  $z_{e0} = 56,7$  m



(c) Résultat D-FV

Figure 15. Cas 3 : Tracé théorique du rayon (a), résultat de la FV (b) et de la D-FV (c).





Barbara Nicolas

Barbara Nicolas a obtenu le diplôme d'ingénieur de l'École Nationale Supérieure des Ingénieurs Electriciens de Grenoble (INPG) ainsi que le DEA Signal Image Parole Telecom (INPG) en 2001. Elle a réalisée sa thèse ainsi qu'un ATER au Laboratoire des Images et Signaux (INPG) entre 2001 et 2004. Elle a ensuite effectuée un séjour post doctoral au Marine Physical Laboratory à San Diego en 2005 puis un post-doc au CEA Grenoble en 2005-2006. Depuis 2006, elle est chargée de recherche CNRS au laboratoire GIPSA-Lab à Grenoble. ses domaines de recherche incluent l'inversion géoacoustique, la détection et la localisation de sources en acoustique sous marine.



Philippe Roux

Philippe Roux a obtenu le titre de docteur de l'Université de Paris VI en 1997 pour ses recherches concernant les miroirs à retournement temporel ultrasonores et leur application dans les guides d'ondes. Après un post-doc au Marine Physical Laboratory (MPL), San Diego, il a obtenu en 1998 un poste de chargé de recherche au CNRS au sein du Laboratoire Ondes et Acoustique, Paris et obtient son HDR en 2001. La même année, il retourne au MPL pour travailler sur le retournement temporel en acoustique sous-marine en tant que chercheur associé. Depuis 2005, il effectue sa recherche au sein du Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique à Grenoble. Ses thèmes de recherche sont centrés sur la propagation d'ondes acoustiques/élastiques en milieu complexe avec une prédilection pour les expériences multi-échelles mêlant laboratoire et travail de terrain.

S



Ion Iturbe

Ion Iturbe est titulaire du Master 2 Recherche Signal Image Parole Télécommunications de l'Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG). Il réalise actuellement un doctorat au Laboratoire GIPSA-lab, au Département Image Signal, sur la tomographie acoustique sous-marine.



Jérôme I. Mars

Jérôme I. Mars est titulaire d'un doctorat de Traitement du Signal de l'Institut National Polytechnique de Grenoble (1988). De 1989 à 1992, il effectue un post-doctorat au Centre des Phénomènes Aléatoires et Géophysiques, Grenoble. De 1992 à 1995, il est chercheur invité au Materials Sciences and Mineral Engineering Dpt de l'Université de Californie, Berkeley. Il est actuellement professeur à Grenoble INP et responsable de l'équipe Signal-Image-Physique du département Images Signal du laboratoire GIPSA-Lab. Ses axes de recherche concernent le traitement du signal et les géosciences, plus particulièrement les méthodes de séparation, les méthodes temps-fréquence et temps-échelle appliquées à des signaux d'acoustique et de sismique. Il est membre IEEE, SEG et EAGE.