



ANALYSE SPATIO-TEMPORELLE HAUTE-RÉSOLUTION APPLICATION À LA CAMPAGNE PROTEE 93

S. Bozinoski, P. Gounon et F. Verniol

CEPHAG, URA 346 CNRS, ENSIEG, BP 46
38402 St Martin d'Hères Cedex

RESUME

Cet article présente les résultats de l'analyse spatio-temporelle des données expérimentales issues de la campagne PROTEE en 93. L'algorithme utilisé est une méthode active large-bande qui permet l'estimation conjointe des directions d'arrivées et des temps de propagation.

Les données expérimentales ainsi que la méthode sont présentées. Les résultats de l'analyse spatio-temporelle montre que l'on peut faire une identification très fine dans les zones où les trajets ne peuvent être distingués par l'analyse classique.

1. INTRODUCTION

Nous présentons ici les résultats de l'analyse spatio-temporelle de données de propagation acoustique sous-marine issues de la campagne PROTEE 93¹. L'algorithme utilisé s'applique aux antennes actives et permet une estimation conjointe des directions d'arrivée et des temps de propagation. Cette méthode d'analyse est dite haute-résolution dans le sens où son pouvoir de résolution est très supérieur à celui du traitement classique par formation de voies-filtrage adapté.

2. PRÉSENTATION DES DONNÉES

L'expérimentation PROTEE [1], qui s'est déroulée en octobre 93 entre les Açores et Madère, constitue un support très intéressant que ce soit par la nature du signal ou par la disposition des récepteurs: la base émettrice a une bande fréquentielle relativement large et les signaux sont reçus sur une ligne d'hydrophones verticale de grande longueur (environ 500 m.).

ABSTRACT

This paper deals with spatio-temporal analysis of underwater acoustic signal received on an array during the PROTEE experimental that occurred in 93. Here, we apply a high-resolution wide-band active algorithm that simultaneously estimates the travel time and angle of arrival of the paths. In the first part of this paper, we briefly describe the experimentation data as well as the principle of the method. And then, we apply the algorithm to experimental data and we show that the spatial and temporal resolution of the method is improved in comparison to classical analysis such as matched-filtering-beamforming.

Les signaux utilisés ici [2] sont des BPSK de produit BT égal à 511 et de fréquence porteuse 1022 Hz ou 2044 Hz. La distance émetteur-récepteur est de l'ordre de 55 km, ce qui correspond au voisinage de la première zone de convergence. Les signaux, d'une durée d'une seconde, sont émis en continu pendant 30 minutes, ce qui permet de disposer d'un grand nombre de récurrences de signal.

3. PRINCIPE DE L'ALGORITHME

Le principe de l'algorithme est présenté dans [3], ses performances statistiques sont étudiées dans [4]. Nous rappelons simplement ici son principe.

On s'intéresse à l'analyse d'un champ acoustique constitué d'un nombre fini de sources ponctuelles. Ce champ est observé par un réseau de capteurs. On notera M le nombre de capteurs du réseau et P le nombre de sources. Le signal reçu sur l'antenne se modélise de la façon suivante:

$$x_m(t) = \sum_{p=1}^P a_p \cdot e_p(t - \tau_{m,p}) + b_m(t) \quad (1)$$

¹Travail réalisé avec le concours de la DTCN.



- $x_m(t)$ est le signal reçu sur le capteur m .
- $e_p(t)$ est le signal émis par la source p .
- a_p est l'amplitude de la source p , aléatoire, complexe.
- $\tau_{m,p}$ est le retard lié à la propagation de la source p reçu sur le capteur m .
- $b_m(t)$ est le bruit additif reçu sur le capteur m .

Le temps de parcours $\tau_{m,p}$ se décompose de la façon suivante :

$$\tau_{m,p} = T_p + t_m(\theta_p)$$

T_p étant le retard entre la $p^{ième}$ source et le capteur de référence et $t_m(\theta_p)$ le temps de propagation entre le capteur de référence et le capteur m pour la source p de direction d'arrivée θ_p sur l'antenne.

Dans une situation de propagation en ASM avec une source et des trajets multiples, comme c'est le cas pour PROTEE, chaque source du modèle (1) représente un trajet, les $e_p(t)$ sont égaux au signal émis $e(t)$. $e(t)$ est déterministe et contient toute l'information a priori sur le signal (son évolution au cours du temps). Les a_p et T_p sont respectivement les amplitudes complexes aléatoires et les temps de propagation de chaque trajet. θ_p représente l'angle d'incidence du trajet p sur le réseau de capteurs.

Les a_p peuvent être considérés comme partiellement décorrélés du fait de la propagation.

En passant dans le domaine des fréquences, on peut compacter (1) dans l'écriture matricielle :

$$\mathbf{x}_g = \underline{\mathbf{H}} \cdot \mathbf{c} + \mathbf{b}_g \quad (2)$$

- $\mathbf{x}_g = [\mathbf{x}^+(\nu_1), \mathbf{x}^+(\nu_2), \dots, \mathbf{x}^+(\nu_F)]^+$
- $\mathbf{x}(\nu_i) = [x_1(\nu_i), x_2(\nu_i), \dots, x_M(\nu_i)]^+$
- F : nombre de canaux fréquentiels du signal.
- $\mathbf{b}_g = [\mathbf{b}^+(\nu_1), \mathbf{b}^+(\nu_2), \dots, \mathbf{b}^+(\nu_F)]^+$
- $\mathbf{b}(\nu_i) = [b_1(\nu_i), b_2(\nu_i), \dots, b_M(\nu_i)]^+$
- $\mathbf{c} = [a_1, a_2, \dots, a_P]^+$
- $\underline{\mathbf{H}} = [\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \dots, \mathbf{h}_P]$
- $\mathbf{h}_p = [e_p(\nu_1) \cdot e^{-2i\pi\nu_1\tau_{1,p}}, \dots, e_p(\nu_F) \cdot e^{-2i\pi\nu_F\tau_{M,p}}]^+$
- $+$ transposé.

\mathbf{x}_g (respectivement \mathbf{b}_g) est un vecteur obtenu par concaténation de vecteurs observation (respectivement bruit) à chaque fréquence. $\underline{\mathbf{H}}$ est la matrice des fonctions de transfert entre les sources et les capteurs et \mathbf{c} est le vecteur des amplitudes complexes des

sources.

En considérant la matrice interspectrale des signaux reçus, $\underline{\mathbf{X}} = E(\mathbf{x}_g \cdot \mathbf{x}_g^*)$, il est simple d'étendre l'algorithme MUSIC aux antennes actives en large-bande. Si les sources sont décorréées entre elles et du bruit, supposé blanc et de variance σ^2 , on peut définir un sous-espace signal engendré par les P premiers vecteurs propres de $\underline{\mathbf{X}}$, et son complémentaire, le sous-espace bruit ou orthogonal, engendré par les $M \cdot F - P$ derniers vecteurs propres de $\underline{\mathbf{X}}$ relatifs à la valeur propre σ^2 . Il s'agit ensuite d'effectuer la projection du vecteur directionnel issu du modèle de propagation sur le sous-espace orthogonal. Les estimateurs des paramètres du signal rendent minimale cette projection.

L'algorithme proposé consiste donc à maximiser la fonctionnelle:

$$d(\theta, T) = \frac{1}{\sum_{i=P+1}^{M \cdot F} \|\mathbf{a}^*(\theta, T) \cdot \mathbf{v}_i\|^2} \quad (3)$$

$\mathbf{a}(\theta, T)$ est le vecteur directionnel large-bande et \mathbf{v}_i est le $i^{ième}$ vecteur propre de $\underline{\mathbf{X}}$.

$$\mathbf{a}(\theta, T) = \begin{bmatrix} e(\nu_1) \cdot e^{-2i\pi\nu_1 T} \cdot \mathbf{d}^+(\nu_1, \theta) \\ \dots \\ e(\nu_F) \cdot e^{-2i\pi\nu_F T} \cdot \mathbf{d}^+(\nu_F, \theta) \end{bmatrix} \quad (4)$$

avec :

$$\mathbf{d}(\nu_i, \theta) = [1, e^{-2i\pi\nu_i t_{1,2}(\theta)}, \dots, e^{-2i\pi\nu_i t_{1,M-1}(\theta)}]^+$$

$\mathbf{d}(\nu_i, \theta)$ est le vecteur directionnel classique utilisé en bande-étroite.

Cette méthode permet d'obtenir, avec les performances (et les limitations) de MUSIC, une estimation des angles d'arrivée ainsi que des temps d'arrivée.

4. APPLICATION SUR LES DONNÉES RÉELLES

4.1. Corrélation des sources

Une des hypothèses importantes de l'algorithme présenté réside dans la décorrélation des sources. Dans le cas de sources décorréées, la matrice interspectrale $\underline{\mathbf{X}}$ est de rang P et le sous-espace signal est correctement estimé. Dans le cas de sources totalement corrélées, la matrice $\underline{\mathbf{X}}$ est de rang inférieur à P , les sous-espaces sont alors mal estimés. En pratique, une décorrélation partielle des sources est suffisante pour la mise en oeuvre de l'algorithme. Dans le cas de trajets multiples, cette décorrélation partielle est justifiée par la propagation dans le milieu. Les différents trajets peuvent subir des perturbations aléatoires selon les différents milieux qu'ils traversent.

Ces perturbations portent sur l'amplitude ainsi que sur la phase. D'une réalisation à l'autre du signal, les trajets peuvent aussi être affectés de légères variations de temps de propagation. Ces variations peuvent être assimilées en première approximation à des fluctuations de phase sur la porteuse du signal, ce qui contribue encore à la décorrélation des sources. Pour vérifier l'hypothèse de décorrélation des sources, nous disposons de situations pour lesquelles les trajets sont bien résolus à l'aide du traitement classique par filtrage adapté. Ceci permet d'analyser les variations d'amplitudes ou de phase de chaque trajet.

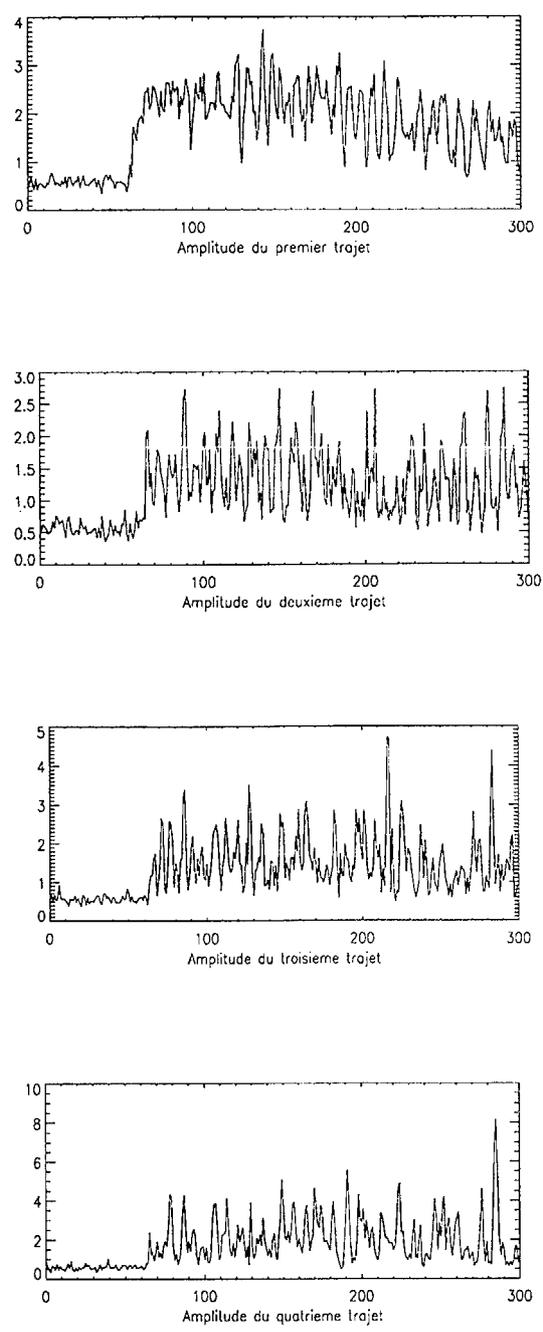


Figure 1: Variations d'amplitude

A titre d'exemple, la figure 1 montre les variations d'amplitude de 4 trajets présents sur le capteur immergé à 250 m. Le signal est reçu une minute après le début de l'enregistrement. On peut donc avoir une bonne idée du niveau de bruit en observant les 60 premières secondes de ces courbes. On constate clairement que les fluctuations d'amplitude lorsque le signal est présent sont beaucoup plus importantes que les fluctuations dues au bruit et qu'elles ne peuvent pas être attribuées à des erreurs d'estimation. Les fluctuations d'amplitude en sortie de filtrage adapté sont donc interprétées comme des variations d'amplitude de chaque trajet.

De plus, ces variations d'amplitude sont (au moins partiellement) décorrélées. Cette décorrélation se traduit en terme de matrice interspectrale par le fait que \underline{X} est de rang 4. Ceci est vérifié en visualisant les premières valeurs propres de \underline{X} (figure 2). On note sur cette figure la présence de 4 valeurs propres significatives.

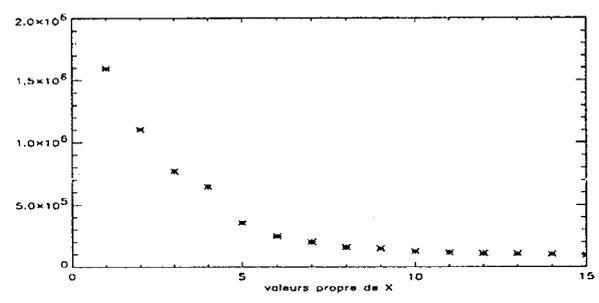


Figure 2: Valeurs propres de \underline{X}

4.2. Mesure de retard

Après avoir vérifié l'hypothèse de décorrélation des sources, nous avons effectué une analyse des données PROTEE sur un seul capteur. Nous ne nous intéressons donc qu'à la partie analyse temporelle de la méthode afin de la comparer à la méthode classique par filtrage adapté.

Afin de valider les résultats obtenus par l'algorithme, nous avons d'abord travaillé dans un contexte où la résolution du filtrage adapté est suffisante pour permettre la séparation des 4 trajets. Les deux approches nous ont donné des résultats tout à fait comparables. Nous avons aussi mis en évidence l'amélioration de la résolution en diminuant la bande d'analyse des signaux: en travaillant avec une bande de 200 Hz, le filtrage adapté ne fait apparaître que 2 trajets alors que notre méthode permet encore de distinguer les 4 trajets.

Nous nous sommes ensuite intéressés à une situation pour laquelle les trajets sont très proches et ne sont pas tous résolus par le filtrage adapté. La figure



3 représente les résultats obtenus avec l'hydrophone d'immersion 20 m pour l'estimation des temps d'arrivée par moyennage incohérent des intercorrélations des signaux émis-reçus et par application de notre méthode sur un seul capteur. Nous voyons que dans ce contexte où le filtrage adapté ne décèle que trois trajets, Music Actif Large-bande révèle la présence de 4 trajets.

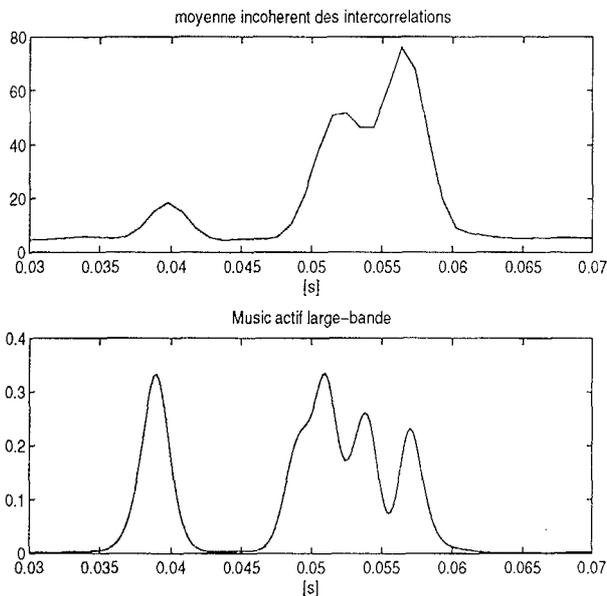


Figure 3: Analyse sur l'hydro 20

4.3. Analyse spatiale

Afin de faire une analyse à la fois spatiale et temporelle, nous avons traité les signaux issus d'une antenne verticale constituée de 3 hydrophones immergés respectivement à 20 m, 50 m et 200 m. Les angles sont pris par rapport à la normale à l'antenne.

L'analyse temporelle sur chacun des capteurs permet de distinguer 4 trajets en temps. Nous voyons sur la figure 4 qu'il est possible de discriminer ces trajets à la fois en temps et en angle. Ces 4 trajets arrivent sur l'antenne avec des incidences alternées, le premier arrivant avec un angle négatif. Cette configuration est vérifiée d'une part en calculant les angles d'arrivée à partir des déphasages entre capteurs, et d'autre part grâce à des simulations par les tracés de rayons.

Nous voyons que, dans la dimension spatiale aussi, la résolution est largement améliorée par rapport à l'analyse classique par formation de voies. En effet, nous ne disposons ici que de trois capteurs pour estimer 4 sources. De plus, l'analyse large-bande permet de pallier le problème de sous-échantillonnage spatial.

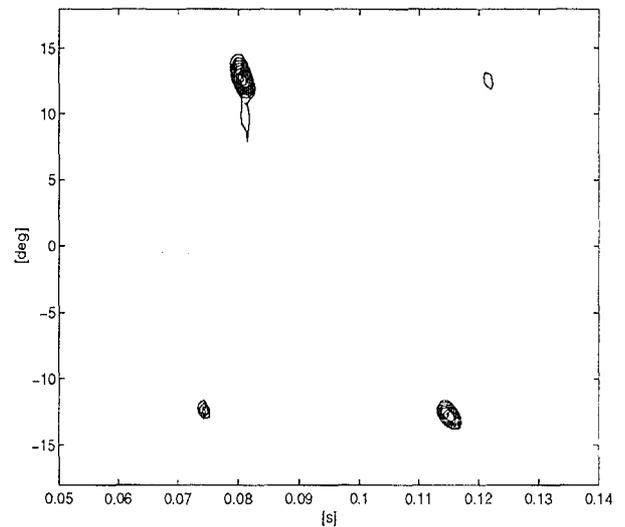


Figure 4: Music Actif Large-Bande

5. CONCLUSION

L'analyse des données PROTEE est très intéressante pour la validation de l'algorithme proposé. Tout d'abord, le nombre de récurrences de signal permet une bonne estimation de la matrice interspectrale. Ensuite, la diversité des configurations émetteur-récepteur permet de vérifier le bon comportement de l'algorithme. On peut en effet choisir des zones où la résolution de l'analyse classique est suffisante pour séparer les trajets et donc comparer ces résultats avec ceux de notre algorithme. Cette étape nécessaire de validation étant réalisée, l'analyse haute-résolution fournit une identification très fine dans les zones où les trajets ne peuvent être distingués par l'analyse classique.

6. RÉFÉRENCES

- [1] Note technique Campagne "PROTEE". C'TSN/DLSM/HAR. 1994
- [2] B. Faure, P. Gounon, "Participation du CEPHAG à la campagne de mesures PROTEE 93", rapport CEPHAG 39/93, 1993
- [3] P. Gounon, "Analyse Spatio-Temporelle Haute-Résolution à l'aide d'une Antenne Active", Traitement du Signal 1994, vol. 11, n. 5, p. 351-360, 1994
- [4] P. Gounon, S. Bozinoski, "High resolution spatio-temporal analysis by an active array", Proc of ICASSP 95, vol. 5, p. 3575-3578, 1995