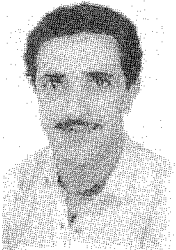


Localisation de sources
corrélées par traitement d'antenne
en utilisant le lissage spatial

Localization of correlated sources by array processing
using spatial smoothing



Idir TAS

CEPHAG-ENSIEG, BP n° 46, 38402 SAINT-MARTIN-D'HÈRES.

Docteur de 3^e cycle en Automatique et Traitement du signal à l'INPG (1987). Ses travaux de recherche intéressent l'analyse spectrale et le traitement d'antenne en écoute passive.



Claudine LATOMBE

CEPHAG, UA 346, BP n° 46, 38402 SAINT-MARTIN-D'HÈRES.

Claudine Latombe est ancienne élève de l'ENSET, docteur de 3^e cycle en Informatique (1974), docteur d'État en Traitement de Signal à l'INPG (1982). Elle a enseigné à l'INPG de 1970 à 1987; son travail de recherche porte sur les problèmes d'analyse spectrale et les traitements multiplicateurs.



Jean-Louis LACOUME

CEPHAG, INPG/IEG, UA 346, BP n° 46, 38402 SAINT-MARTIN-D'HÈRES.

Ancien élève de l'École Normale Supérieure, Agrégé de Physique (1964), Docteur ès Sciences (1969), Professeur à l'Institut National Polytechnique de Grenoble, Directeur du CEPHAG, Domaine de recherche : Géophysique : étude de l'environnement ionisé de la terre par sondage électromagnétique, Traitement du Signal : Analyse spectrale et interspectrale, applications en Instrumentation, Acoustique Sous-Marine, Géophysique.

RÉSUMÉ

Dans cet article, nous regroupons les diverses méthodes connues de traitement d'antenne en deux catégories : méthodes découplées, méthodes globales. Nous présentons la méthode du lissage spatial qui permet de décorréler les sources à la réception. Nous appliquons ensuite ces méthodes de traitement d'antenne à des signaux enregistrés au cours d'une expérimentation en acoustique sous-marine dans laquelle une onde monochromatique a été émise dans différentes configurations géométriques et météorologiques. Dans cette situation, le lissage spatial doit être utilisé pour décorréler les trajets multiples.

MOTS CLÉS

Analyse spectrale multidimensionnelle, détection, estimation.

SUMMARY

In this paper, the classical array processing methods are separated in two classes: uncoupled solutions and global solutions. We expose the method that uses the spatial smoothing to decorrelate the received signals. Then we apply these array processing methods to signals that are recorded in an underwater acoustics experiment; in this situation the spatial smoothing is compulsory. Results are discussed.

KEY WORDS

Multidimensional spectral analysis, detection, estimation.

1. Introduction

Le traitement d'antenne cherche à caractériser des sources rayonnantes (nombre, position géographique, puissance, ...). Ce problème se rencontre dans divers domaines comme en acoustique sous-marine, en sismique, en géophysique externe et en électroencéphalographie. Les informations désirées sont obtenues en utilisant les corrélations des signaux reçus sur les différents capteurs, qui dans le domaine fréquentiel sont représentées par leur matrice spectrale.

$\gamma(f)$ étant la matrice spectrale des N signaux reçus sur les N capteurs constituant l'antenne; elle se décompose, sous l'hypothèse de bruits additifs non corrélés avec les $P (P < N)$ signaux émis, comme suit :

$$\gamma(f) = \gamma_S(f) + \gamma_B(f)$$

où $\gamma_S(f)$ est la matrice spectrale des sources seules et $\gamma_B(f)$ celle des bruits.

Les hypothèses habituellement admises en traitement passif d'antenne sont les suivantes :

(i) milieu de propagation linéaire et invariant, ce qui entraîne que chaque front d'onde est spatialement cohérent. La matrice $\gamma_S(f)$ est alors de rang maximal P .

(ii) bruits non corrélés entre eux et de même puissance sur tous les capteurs. $\gamma_B(f)$ s'écrit alors :

$$\gamma_B(f) = \beta(f) \cdot I_N$$

$\beta(f)$ est la densité spectrale des bruits sur chaque capteur et I_N la matrice identité.

Les méthodes de traitement d'antenne qui estiment le nombre et les caractéristiques des sources non corrélées sont regroupées en deux catégories (§ 2.1). Une application en acoustique sous-marine est présentée (§ 3) où l'hypothèse de sources non corrélées n'est plus vérifiée. Dans ce cas les performances sont liées au choix de l'estimateur de la matrice spectrale.

2. Méthodes de traitement d'antenne

2.1. CLASSIFICATION

Le but de ce paragraphe n'est pas de redémontrer les diverses méthodes de traitement d'antenne, largement étudiées dans la littérature abondante, nous pro-

posons simplement de les regrouper en deux catégories [15]. On appellera :

(a) *méthodes découplées* : celles obtenues en séparant le problème de la détection du nombre de sources de celui de l'estimation de leurs caractéristiques.

Le problème de la détection est d'abord résolu indépendamment de celui de l'estimation; puis le nombre d'excitations non corrélées étant obtenu, le problème d'estimation (puissance-direction) qui se ramène alors à un problème d'identification de paramètres est ensuite traité.

Ces méthodes nécessitent au préalable la connaissance du nombre d'excitations non corrélées qui peut être estimé par les critères AIC et MDL ou tout autre critère à seuil (test du chi-deux, ...) (cf. [14]). Elles utilisent soit le sous-espace source, soit le sous-espace bruit (MUSIC [1-11], Pisarenko, Tufts-Kumaresan [5], Mermoz-Latombe [4-7]).

(b) *méthodes globales* : celles qui donnent une représentation du champ de sources (intensité, position) sans faire appel au préalable à la détermination du nombre de sources (voie préformée, Capon, MEM-AR, Lagunas).

Munier [8] a montré que ces méthodes appelées aussi méthodes d'analyse continue au second ordre, dérivent toutes d'un schéma général qui est celui des systèmes FAQI (Filtrage Adapté Quadrature Intégration). Le principe de base consiste à effectuer le produit scalaire du vecteur observé par un vecteur d'analyse, puis à appliquer au scalaire obtenu un système quadrature-intégration censé estimer la variance. Ainsi chaque méthode d'analyse continue au second ordre correspond à un système FAQI normalisé avec un choix particulier du vecteur d'analyse [8].

Dans ces méthodes le nombre de pics « significatifs » nous donne une estimée du nombre de sources.

2.2. CAS DE SOURCES CORRÉLÉES : LISSAGE SPATIAL

Les méthodes précédentes ont été établies en supposant les sources non corrélées. Elles ne sont pas directement applicables au cas de sources corrélées.

Proposée par Evans *et al.* [2], le lissage spatial permet de décorréler les sources à la réception. Cette méthode est basée sur une subdivision du réseau principal de réception en sous-réseaux et elle moyenne les matrices spectrales des sous-réseaux. Cette procédure est appelée méthode du lissage spatial.

En plus des hypothèses classiques sur les bruits (non corrélés avec les signaux émis, non corrélés entre eux

et de même puissance sur tous les capteurs), cette méthode suppose que l'antenne de réception est linéaire et à capteurs équidistants. Elle suppose également que les propriétés statistiques du signal sont invariantes par translation dans l'espace.

Soit L le nombre total de capteurs divisés en m sous-réseaux, chacun de dimension n . Les capteurs $[1, \dots, n]$ forment le premier sous-réseau, les capteurs $[2, \dots, n+1]$ le deuxième sous-réseau, ...

Le nombre m de sous-réseaux est :

$$m = L - n + 1$$

La matrice spectrale « lissée » $\bar{\gamma}(f)$ est définie comme suit :

$$\bar{\gamma}(f) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \gamma^k(f)$$

$\gamma^k(f)$ est la matrice spectrale obtenue à partir du vecteur $\mathbf{R}^k(f)$ correspondant au k -ième sous-réseau :

$$\mathbf{R}^k(f) = [\mathbf{R}_k(f), \dots, \mathbf{R}_{n+k-1}(f)]^T; \quad k \in [1, m],$$

où $\mathbf{R}_k(f)$ désigne le signal reçu sur le k -ième capteur. Shan *et al.* [12] ont montré que même avec des sources parfaitement corrélées, la matrice $\bar{\gamma}(f)$ est de rang maximal P si et seulement si les deux conditions suivantes sont vérifiées :

- (i) $n \geq P + 1$ (condition classique du traitement d'antenne, $P < N$);
- (ii) $m = L - n + 1 \geq P$.

P est le nombre de sources (pouvant être parfaitement corrélées). En pratique P est inconnu. Il est choisi en tenant compte des informations qu'on possède *a priori* sur le nombre de sources, mais limité par la dimension L du réseau principal.

Pour identifier P sources corrélées, le nombre L de capteurs nécessaires est au moins égal à $2P$ ($L \geq 2P$). Si l'on compare cette condition ($L \geq 2P$) avec la condition habituelle en traitement d'antenne ($L \geq P + 1$), il est évident que la méthode du lissage spatial nécessite environ deux fois plus de « temps de calcul » et de « moyens techniques » qu'il en faudrait habituellement. Cet inconvénient est néanmoins subordonné aux performances des résultats qu'on désire obtenir.

Une méthode voisine (moyenne glissante le long de l'antenne effectuée directement en temps) a été présentée par Ouamri [9].

Signalons que la matrice lissée peut-être déduite de la matrice initiale par une moyenne glissante sur des diagonales.

3. Application à une expérimentation en ASM

Dans ce paragraphe nous donnons tout d'abord une brève description de l'expérimentation menée en Atlantique nord; nous présentons ensuite quelques résultats significatifs, choisis parmi un certain

ensemble, obtenus par diverses méthodes de traitement d'antenne en distinguant les deux cas : avant lissage spatial et après lissage spatial.

3.1. DESCRIPTION DE L'EXPÉRIMENTATION

En mars 1984, le GERDSM avec le concours de l'IFP et du CEPHAG, a organisé une campagne de mesures en Atlantique Nord dans le but d'étudier la propagation acoustique sous-marine à longue distance.

Dans cette expérimentation, deux bâtiments s'éloignaient à vitesse constante dans deux directions faisant un angle de 45° environ. Le premier bateau était porteur de la base d'émission immergée à 60 m, et le second traînait une antenne longue de type « flûte pétrolière » immergée à 30 m, ayant 96 capteurs. Plusieurs types de signaux ont été émis. Nous ne présentons ici que les résultats obtenus avec une fréquence pure (81,9 Hz). La distance émetteur-récepteur (E-R) augmentait à raison de 7 km par heure jusqu'à une valeur maximale de 2000 km. Les déplacements des deux bateaux étaient tels que la source restait quasiment sur la normale au réseau de capteurs (fig. 1).

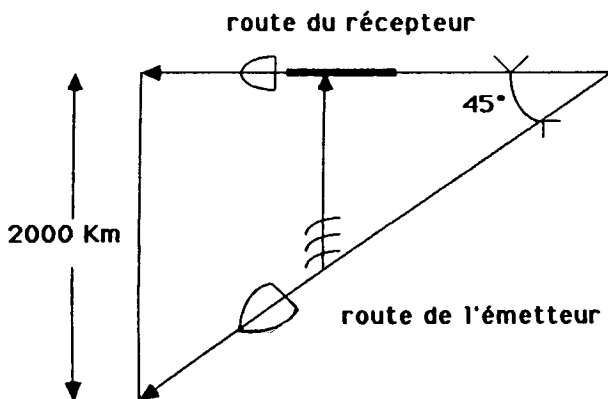


Fig. 1. — Schéma de l'expérimentation.

Le réseau de réception est constitué d'une antenne rectiligne longue de 2300 m comportant 96 groupements de capteurs distants de 25 m. Chaque groupement est la somme des sorties de 12 capteurs équidistants de 2,08 m.

Le bateau récepteur enregistre sur des bandes magnétiques les informations numérisées et multipliées, des différentes voies.

Les signaux analogiques ont été échantillonnés à 500 Hz à l'aide de deux multiplexeurs à 48 voies chacun.

Pour des raisons techniques, les signaux ont été conditionnés en « tranches temporelles » de 32 secondes toutes les 36 secondes, pendant un intervalle de temps d'une demi-heure et pour une distance E-R fixée.

Afin de limiter la « surabondance » d'information, les signaux ont été filtrés en fréquence. Nous ne gardons pour chaque groupement qu'une bande de 16 Hz autour de la raie émise, et représentée par 512 points en fréquence (à la réception le spectre provient *a priori* d'une fréquence pure à l'émission).

Notre but est ici d'illustrer les résultats des méthodes de traitement d'antenne et non de traiter la grande quantité de signaux « collectés » au cours de l'expérience (qui avait duré 11 jours!). En fonction des résultats préliminaires obtenus [3], nous nous limitons au cas où la distance E-R est de 330 km (conditions expérimentales difficiles).

La demi-heure d'enregistrement a été conditionnée en tranches temporelles (appelées tirs) de 32 secondes chacune. Nous traitons des tranches de signal n'ayant que 256 points en fréquence ($\Delta f = 30$ mHz). Ceci correspond à une largeur de bande en fréquence de 8 Hz autour de la fréquence centrale. Cette tranche est repérée sous le numéro de tir 4486.

En outre nous n'utilisons pas les 96 sorties de l'antenne; nous nous limitons aux traces suivantes :

- 1 à 18 (début d'antenne);
- 63 à 85 (fin d'antenne).

Le traitement est effectué point par point pour les 256 points en fréquence des signaux. Pour des raisons de simplicité, nous n'utilisons que des matrices spectrales de dimension (6×6) . Elles sont estimées par périodogramme lissé apodisé par une fonction de Tuckey. Nous fixons le nombre de degrés de liberté ($B_e T$) à 5, ce qui est suffisant pour traiter une raie fréquentielle quasiment pure (élargissement de la raie à cause des effets de propagation).

Pour la détection du nombre d'excitations, nous utilisons les critères [14], AIC1, CSS et test du chi-deux avec des probabilités de détection de 0,70 et 0,98.

Pour la localisation de sources, nous utilisons les méthodes de Capon, MEM-AR (méthodes globales) et le goniomètre ou MUSIC (méthode découplée).

La distance inter-capteur étant de 25 m (cf. § 3.1) et la vitesse de propagation du son dans l'eau de 1 500, 5 m/s, la longueur d'onde à la fréquence 82 Hz est alors de 18,3 m (modèle d'ondes planes). Afin d'éviter les repliements (ambiguïtés géométriques dues au sous-échantillonnage spatial), nous représentons les résultats des méthodes de localisation de sources sur l'intervalle $[-22^\circ, 22^\circ]$. Le pas incrémental en azimuth est de $0,5^\circ$.

3.2. HYPOTHÈSE DE SOURCES NON CORRÉLÉES

Nous avons choisi les capteurs 7 à 12 et estimé la matrice spectrale correspondante par périodogramme lissé ($B_e T$ de 5). Le nombre de sources indiqué par les critères de détection sont présentés figure 2.

Le critère AIC donne des résultats erratiques (de nombreuses sources parasites).

Le test du chi-deux, avec une probabilité de détection de 0,70, donne des sources parasites; avec une probabilité de 0,98 il donne très peu de sources parasites.

Le critère CSS ne donne qu'une seule source autour de 82 Hz.

Seuls les critères à seuil (CSS, test du chi-deux avec $P_d = 0,98$) arrivent à isoler la raie émise. Nous sommes dans une situation de fort rapport S/B (plus de 20 dB [3]). Les critères AIC2 et MDL2 (cf. [14]) sont également appliqués; leurs résultats sont aussi erra-

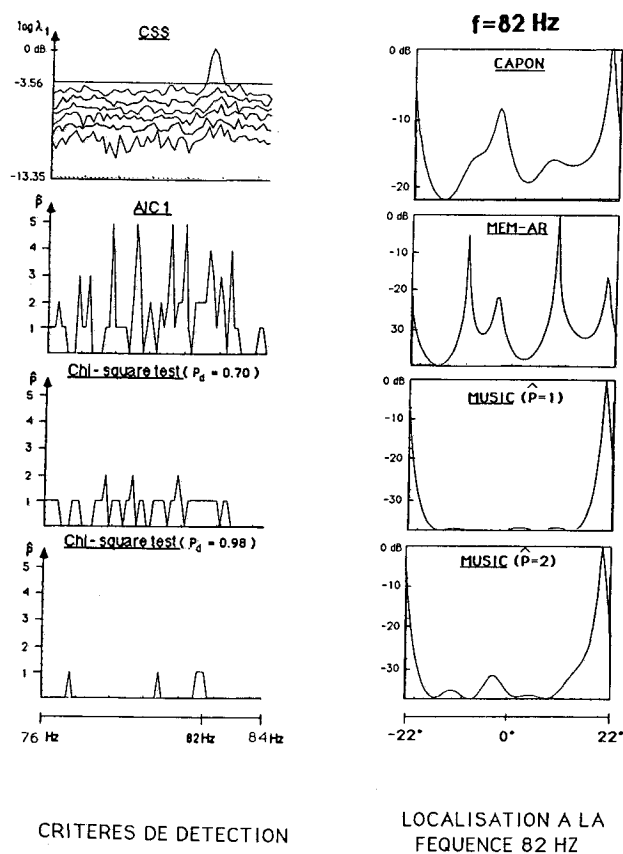


Fig. 2. — Position E-R de 330 km (tir n° 4486).
6 voies simples (capteurs 7 à 12).

tiques que ceux de AIC1; ils ne seront pas présentés sur les figures.

Les résultats de localisation par différentes méthodes de traitement d'antenne, pour la fréquence 82 Hz, sont présentés figure 2. Les méthodes globales semblent indiquer qu'il existe plusieurs sources à la même fréquence de 82 Hz. Ceci prouverait l'existence de 2 à 4 trajets multiples (et fortement corrélés) à cette fréquence.

Les méthodes de Capon et MUSIC ($P=1$ ou 2) indiquent une source dominante à l'azimuth $\theta = 20^\circ$.

Le même traitement appliqué aux capteurs 80 à 85 (fin d'antenne) aboutit à des conclusions similaires (fig. 3).

3.3. HYPOTHÈSE DE SOURCES CORRÉLÉES

En fonction des résultats obtenus au paragraphe 3.2, nous supposons qu'à la réception, il existe des trajets multiples qui apparaissent comme des sources corrélées. Nous appliquons alors la méthode du lissage spatial décrite au paragraphe 2.2, pour décorréliser les trajets. En premier lieu, nous moyennons spatialement les matrices spectrales de dimension (6×6) obtenues avec les 18 premiers capteurs (début d'antenne). Ensuite nous utilisons les capteurs 63 à 85 (fin d'antenne). Dans le premier cas (voies 1 à 18), le nombre

APPLICATIONS

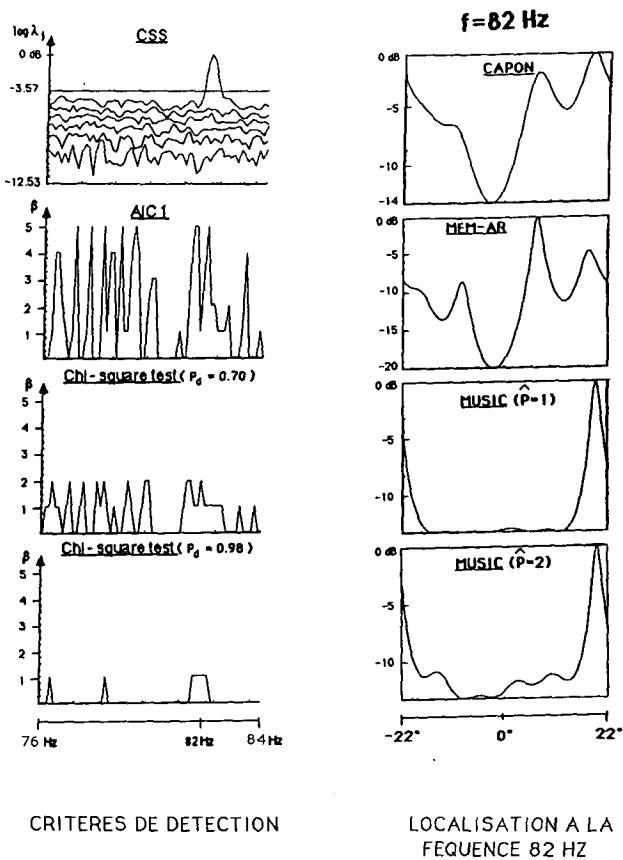


Fig. 3. — Position E-R de 330 km (tir n° 4486).
6 voies simples (capteurs 80 à 85).

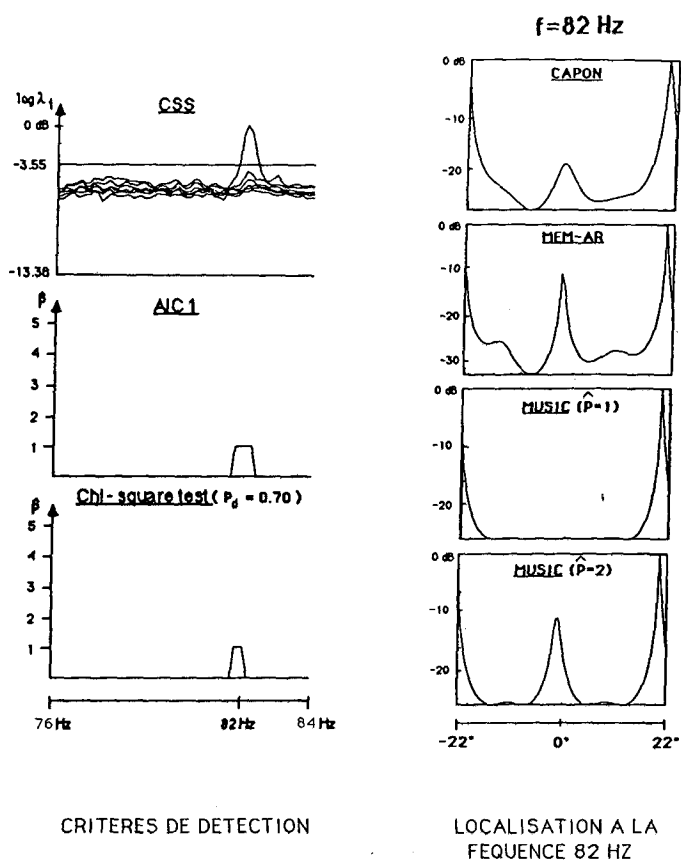


Fig. 4. — Position E-R de 330 km (tir n° 4486).
Lissage spatial sur les voies 1 à 18.

de moyennes spatiale est de 13 et dans le second, il est de 18. Le nombre de sources (même parfaitement corrélées) est supposé au plus égal à 5 (cf. § 2.2).

Les résultats donnés par les critères de détection sont nettement améliorés (cf. fig. 4 et 5). Les méthodes de Capon, MEM-AR et MUSIC donnent toutes l'azimut de la source principale (dominante) à 20°.

La valeur excessive de l'azimut θ trouvé pour cette séquence (20° au lieu de 0°) s'explique par des conditions expérimentales difficiles (mer agitée, existence de zones de courants, . . .) ou plus vraisemblablement par un mauvais positionnement des deux bateaux. Ce résultat est d'ailleurs confirmé par d'autres travaux [3 et 10]. En outre, les méthodes de Capon et MEM-AR indiquent l'existence de trajets secondaires (fig. 4 et 5). Le plus important est à l'azimut -2°. Il est à -18 dB du principal (fig. 4) ou -15 dB (fig. 5) (Capon). En prenant $P=2$, la méthode MUSIC détecte également le trajet secondaire à -2°.

Les deux autres trajets (à $\pm 10^\circ$) ont une amplitude très faible vis-à-vis du trajet principal. Nous les négligerons. Il est impossible de dire si les pics donnés par les méthodes de traitement d'antenne en dessous de -28 dB ont encore une signification physique, ils peuvent être associés au bruit plutôt qu'être considérés comme des trajets secondaires.

L'existence d'un 2° trajet (vers 0°) a été confirmée par [10] en utilisant la préformation de voies. Ce 2° trajet

est probablement réfléchi sur un fond sous-marin (la carte marine révèle des dénivellations importantes). Le fait que les critères de détection ne donnent qu'une seule source à la fréquence 82 Hz peut s'expliquer par la puissance très faible du 2° trajet vis-à-vis de celle du principal (en dessous de 15 dB). Les énergies du 3° et 4° trajets sont encore plus faibles que celles du 2°.

La différence des résultats donnés par la méthode de MUSIC (avec $P=2$) avec ou sans lissage spatial est à noter (fig. 2 et 4, début d'antenne ou fig. 3 et 5, fin d'antenne). Ce résultat montre que bien que deux sources fortement corrélées soient séparables par MUSIC, leur contraste est meilleur lorsqu'on les décorrelle.

Dans cette étude nous n'avons pas discuté la validité des critères de détection après l'utilisation du lissage spatial. Nous nous sommes basés sur les travaux de Shan *et al.* [13] qui indiquent que les critères de détection sont toujours applicables si le nombre M de moyennes est bien choisi. On se ramène alors au cas classique de sources parfaitement décorrelées. Dans notre cas le nombre de moyenne est choisi d'une façon empirique.

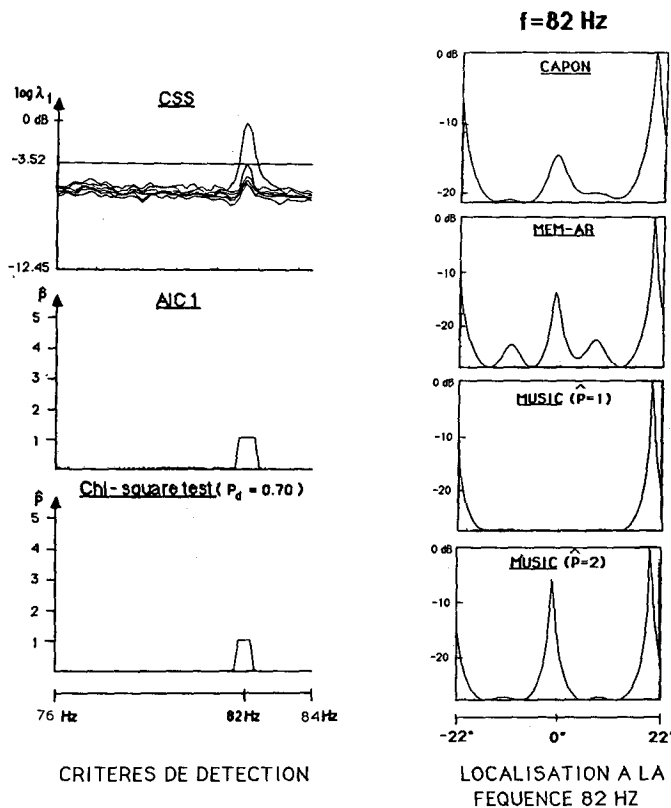


Fig. 5. — Position E-R de 330 km (tir n° 4486).
Lissage spatial sur les voies 63 à 85.

4. Conclusion

Le traitement d'antenne cherche à détecter et localiser des sources rayonnantes. Ces dernières années, des solutions de plus en plus performantes ont été proposées. Ces solutions, généralement bien connues, sont très éparpillées dans la littérature. Nous les avons regroupées en deux catégories : méthodes découplées, méthodes globales. Notre but n'était pas de dresser une barrière entre ces deux types de solutions, mais simplement de noter les différences entre les deux formalismes.

Nous avons appliqué des méthodes classiques de traitement d'antenne à des signaux expérimentaux en ASM et avons présenté l'étude d'une séquence correspondant à une distance de propagation de 330 km. D'autres séquences de signal et d'autres fréquences d'émission ont été aussi traitées; malheureusement nous ne pouvons présenter tous les résultats [16]. Nous pouvons conclure que le problème principal dans cette expérience est lié aux trajets multiples, qui dégradent sévèrement les performances des méthodes de traitement d'antenne, et non aux bruits (omnidirectionnels ou non, S/B fort).

Le lissage spatial apporte une amélioration très sensible. Les résultats ainsi obtenus ont permis de :

- confirmer et compléter les résultats déjà obtenus ([3] et [10]);
 - mesurer les fluctuations énergétiques et le positionnement de la raie reçue et d'en déduire le positionnement respectif des deux bateaux;
 - mettre en évidence un trajet secondaire non négligeable probablement réfléchi sur le fond sous-marin.
- Pour terminer soulignons aussi le problème dans cette expérience des distorsions de l'antenne (longue de 2300 m) mais ceci a peu d'influences sur les résultats présentés obtenus uniquement avec 6 capteurs.

Remerciements

Cette étude est réalisée avec le concours de la Direction des Constructions Navales Françaises dans le cadre d'une convention DCN/CEPHAG.

Manuscrit reçu le 22 juin 1987.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] G. BIENVENU et L. KOPP, Méthodes haute résolution pour la localisation de sources rayonnantes, *Onde électrique*, 64, n° 4, 1984, p. 28-37.
- [2] J. E. EVANS, D. R. JOHNSON et D. F. SUN, High resolution angular spectrum estimation techniques for scattering analysis and angle of arrival estimation, in *Proc. 1st ASSP workshop on spectral estimation*, Hamilton, Ontario, Canada, 1981, p. 134-139.
- [3] B. FAURE, Analyse temporelle et spatiale d'une onde reçue sur une grande antenne à longue distance en ASM, 7^e JESPA, EC de Lyon, 3-6 juin 1986.
- [4] F. GLANGEAUD et C. LATOMBE, Identification of electromagnetic sources, *Annales Geophysicae*, 1, n° 3, May-June 1983, p. 245-252.
- [5] R. KUMARESAN et D. W. TUFTS, Estimating the angles of arrival of multiple plane waves, *IEEE*, AES-19, n° 1, June 1983, p. 134-139.
- [6] J. L. LACOUME, *Nouvelles méthodes d'analyse spectrale; méthodes et moyens de traitement du signal, application aux mesures physiques*, J. Max, 4^e éd.
- [7] H. MERMOZ, Imagerie, corrélation et modèles, *Ann. Télécomm.*, 31, n° 1-2, 1976, p. 17-36.
- [8] J. MUNIER et G. Y. DELISLE, De l'analyse spatiale continue à l'analyse paramétrique, *Actes du GRETSI*, Nice, 20-24 mai 1985, p. 307-312.
- [9] A. OUAMRI, Étude des performances des méthodes d'identification à haute résolution et application à l'identification des échos par une antenne linéaire multicapteurs, *thèse de doctorat d'état*, Orsay, juin 1986.
- [10] A. PLAISANT et S. LEROY, Cohérence spatiale de signaux très basse fréquence reçus sur une antenne sismique remorquée, après propagation sur de grandes distances, 7^e JESPA, ECL, 3-6 juin 1986.

APPLICATIONS

- [11] R. O. SCHMIDT, Multiple source emitter and signal parameter estimation, *IEEE, trans. on. AP-30*, n° 3, March 1986, p. 276-280.
- [12] T. J. SHAN, M. MAX et T. KAILATH, On spatial smoothing for direction of arrival estimation of coherent signals, *IEEE, trans. on. ASSP-33*, n° 4, Aug. 1986.
- [13] T. J. SHAN, A. PAULRAJ et T. KAILATH, On smoothed rank profile tests in eigenstructure methods for direction-of-arrival estimation, *IEEE-ASSP*, 35, n° 10, p. 1377-1385. Oct. 1987.
- [14] I. TAS et C. LATOMBE, Détection multiple par les valeurs propres de la matrice spectrale, *TS*, 3, n° 2, 1986, p. 79-90.
- [15] I. TAS, Traitement d'antenne passif : détection et identification de sources, *thèse de 3^e cycle*, INPG, juin 1987.
- [16] I. TAS et B. FAURE, Application des méthodes de traitement d'antenne aux signaux multi-raies de la compagnie de mesure IFP-85, rapport CEPHAG, n° 50/87.