



Goniomètre à incidence normale, application à des données expérimentales de sismique

F. Guillet

CEPHAG, UA346 CNRS, ENSIEG, BP46, F-38402 St Martin d'Hères Cedex

RÉSUMÉ

ABSTRACT

Ce travail concerne la séparation d'ondes sismiques enregistrées en sortie d'un réseau de capteurs équidistants. Ces ondes peuvent être caractérisées par leur angle d'incidence sur l'antenne. Nous proposons de mesurer ces angles d'incidence afin de séparer les ondes présentes. Pour cela, nous utilisons les méthodes fréquentielles à haute résolution développées pour les signaux à large bande. Nous proposons une mise en oeuvre particulière, le goniomètre à incidence normale (G.I.N). Cette méthode nous fournit les pentes de chaque onde qui utilisées dans un algorithme des moindres carrés permet de restituer le signal relatif à chaque onde. Nous montrons les résultats obtenus dans le cadre d'une expérimentation de sismique marine.

I - INTRODUCTION

La mesure d'angle d'incidence d'ondes sismiques reçues sur un réseau de capteurs équidistants peut permettre de séparer les ondes présentes. Lorsque le nombre de capteurs est faible, les méthodes classiques de formation de voie n'ont pas une résolution angulaire suffisante. Ce travail concerne les méthodes fréquentielles de recherche exhaustives du type goniomètre. Nous insistons sur une mise en oeuvre particulière, le goniomètre à incidence normale (G.I.N) adapté à des signaux de type large bande fortement corrélés et non stationnaires.

La difficulté essentielle des méthodes haute résolution réside dans le calcul de la matrice interspectrale dont on ne peut obtenir qu'une estimée [1]. L'opérateur de moyenne utilisé doit d'une part être robuste au bruit et d'autre part conduire à la décorrélation des diverses ondes. Deux types de moyenne sont utilisées le lissage spatial et le lissage fréquentiel. Le lissage spatial [2] ne suffit pas à lui seul à décorréler les ondes, étant donné le nombre peu élevé de capteurs. Nous sommes conduit à utiliser le lissage fréquentiel. L'application directe de ce lissage biaise l'estimation des ondes qui se propagent dans des directions autre que la normale à l'antenne. Ces biais peuvent être atténués par une transformation adéquate des signaux reçus (technique de focalisation [3]). Ces techniques sont relativement complexes à mettre en oeuvre. Une focalisation simple unidirectionnelle θ_r peut être réalisée par décalage angulaire des vecteurs des signaux reçus selon cette direction (Kaveh Krolik). La réitération d'un tel processus sur toutes les directions de l'espace peut permettre de minimiser le biais

This work deals with seismic wave separation which are recorded with a linear equidistant array. Waves considered as plane are characterised by their angle to the antenna. We propose to estimate bearings for wide band signal in order to separate each wave. We propose a new method referred as steered MUSIC algorithm. This technique gives slope of each wave. This information is used in a mean square algorithm and allows to reconstitute the wave shape. Results are shown on a seismic marine experiment.

d'estimation successivement dans toutes ces directions. Ce processus peut être décrit dans une fonctionnelle dépendant de deux variables angulaires la direction de focalisation θ_r et la variable de la méthode haute résolution θ_g . Cette méthode peut également être définie comme l'application d'une méthode haute résolution dans une fenêtre spatiale glissante qui balaie tout l'espace.

Nous présenterons tout d'abord les hypothèses et la modélisation des signaux reçus, nous montrerons en quoi le traitement bande étroite ne suffit pas à séparer les ondes et ainsi la nécessité de moyennner en fréquence. Enfin nous présenterons la méthode du goniomètre à incidence normale sous ses diverses représentations et l'application sur des données expérimentales de sismique.

2 - HYPOTHESES ET MODELISATION

Nous supposons que nous recevons des ondes planes sur une antenne équirépartie placée en milieu homogène peu absorbant de façon à négliger l'atténuation. Nous définissons le vecteur de propagation le long de l'antenne en terme de déphasage

$$\underline{U}(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{N}} [1, e^{-j\varphi}, \dots, e^{-j(N-1)\varphi}]^T$$

(\cdot^T : opérateur de transposition)

où $\varphi = 2\pi f \tau = 2\pi \frac{d}{c} f \sin\theta$ représente le déphasage à la fréquence f entre deux capteurs consécutifs de l'antenne dû au retard de propagation τ , τ est lié à l'incidence de l'onde sur l'antenne par la relation : $\tau = \frac{d}{c} \sin\theta$



où d représente la distance entre capteurs et c la vitesse de l'eau supposée constante dans la gamme de fréquences étudiée. Nous pouvons également définir ce retard en fonction de la vitesse apparente sur l'antenne $\tau = \frac{d}{V_a}$

Nous parlerons donc indifféremment de mesure d'incidence, de mesure de vitesse apparente ou de mesure de pente sur le réseau de capteurs.

3 - MESURE D'INCIDENCE EN BANDE ETROITE, INCONVENIENTS

Nous montrons dans la figure 1c, le résultat de localisation, par le goniomètre [4] multi-bandes étroites, sur des données simulées constituées de deux ondes représentées figure 1a, de pentes 0.9 et 1 point d'échantillonnage par capteur.

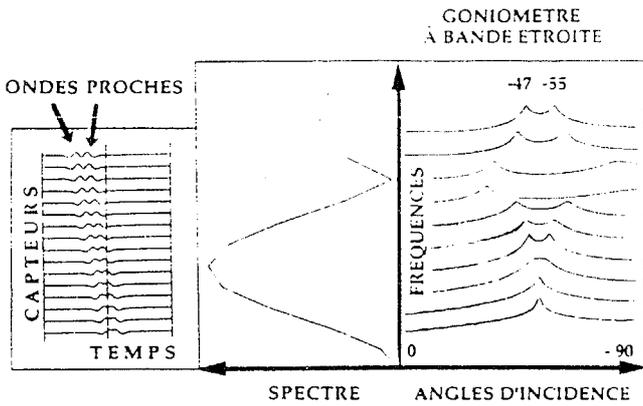


figure 1 : localisation de deux ondes de pentes très proches pour diverses fréquences
 a/ représentation des deux ondes simulées
 b/ spectre du signal sur le premier capteur
 c/ résultat de localisation obtenu à chaque fréquence

Les matrices ont été rendues à structure de Toeplitz par moyenne selon leur diagonale.

Les résultats de localisation fluctuent avec la fréquence, cela peut être expliqué par le fait qu'à certaines fréquences la matrice interspectrale est mal conditionnée. En raison de la corrélation, des interférences destructrices apparaissent sur les termes d'interspectres. Si les ondes sont très proches, ces atténuations sont localisées dans une même bande de fréquence pour tous les termes interspectraux le long de l'antenne. Le calcul de ces termes d'interspectres à ces fréquences est perturbé par les fréquences voisines plus énergétiques. Les résultats des méthodes de localisation bande étroite appliquées à ces fréquences sont fortement biaisés.

Pour réduire ces biais importants, des techniques de moyenne en fréquence ont été développées afin d'améliorer le conditionnement de la matrice interspectrale [3], [5], [6]. Nous proposons une technique ne nécessitant aucune connaissance a priori sur la direction des ondes.

4 - MOYENNE EN FREQUENCE OU LISSAGE FREQUENTIEL APPLIQUE A DES SIGNAUX LARGES BANDES, G.I.N.

4-1 Formulation

L'algorithme réalisé est présenté figure 2. Les données sont blanchies puis décalées selon une loi de retard correspondant à une direction d'observation θ_r (focalisation par déphasage des signaux reçus selon cette direction). Un filtre spatial réduit l'observable autour de cette valeur. Une matrice spectrale est obtenue à chaque itération, par lissage spatial et moyenne

arithmétique sur tous les canaux de fréquence. Ce processus permet d'obtenir un espace signal $V_i(\theta_r)$ propre à chaque direction sur lequel est appliquée une méthode haute résolution de variable angulaire θ_g . Nous obtenons une fonctionnelle dépendant de deux variables $Q(\theta_r, \theta_g)$

$$Q(\theta_r, \theta_g) = \frac{1}{\sum_{i=K+1}^N |\underline{U}(\theta_g)^\dagger \underline{V}_i(\theta_r)|^2}$$

où $\underline{U}(\theta_g) = \underline{U}(\phi_g) = \frac{1}{\sqrt{N}}(1, e^{j\phi_g}, \dots, e^{j(n-1)\phi_g})^T$ représente le

modèle de propagation le long de l'antenne, $\underline{V}_i(\theta_r)$ les vecteurs propres dans la direction θ_r et K le nombre pris en considération pour le dimensionnement de l'espace signal.

(\dagger : opérateur de transposition conjugaison)

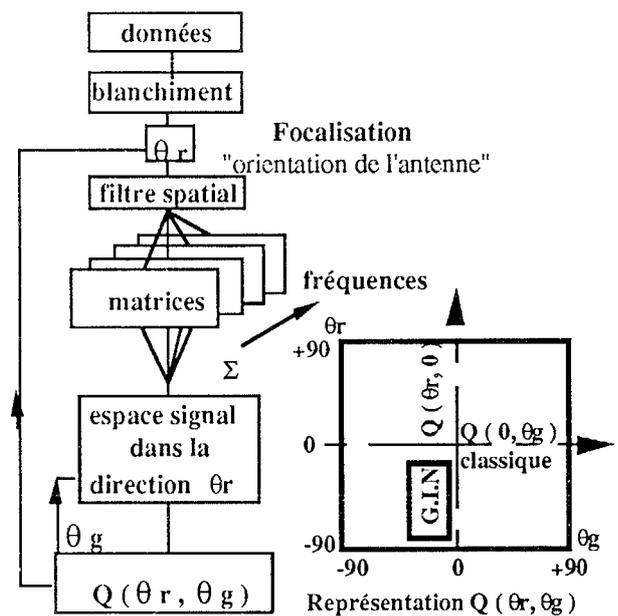


figure 2 : organigramme de traitement

Cette formulation regroupe un double goniomètre. Le goniomètre classique rappelé ci-dessous obtenu pour $\theta_r=0$:

$$Q(\theta_g) = \frac{1}{\sum_{i=K+1}^N |\underline{U}(\theta_g)^\dagger \underline{V}_i|^2}$$

le goniomètre à incidence normale obtenu pour $\theta_g=0$

$$Q(\theta_r) = \frac{1}{\sum_{i=K'+1}^N |\underline{1}^\dagger \underline{V}_i(\theta_r)|^2}$$

La base de vecteurs propres unique utilisée dans le cas du goniomètre à incidence normale interspectrale, devient variable selon la direction d'observation pour le goniomètre à incidence normale, par contre le modèle de propagation $\underline{U}(\theta_g)$ initialement variable est fixé selon la direction privilégiée caractérisée par le vecteur suivant :

$$\underline{1} = \frac{1}{\sqrt{N}}(1, 1, \dots, 1)^T$$

Ce vecteur caractérise la direction à incidence normale sur l'antenne qui bénéficie des conditions de biais minimal.

4-2 Présentation des résultats

Pour justifier ce traitement et se familiariser avec la représentation des résultats, nous proposons de traiter un exemple simple concernant la mesure d'incidence de deux ondes descendantes de pentes 0.9 et 1 point d'échantillonnage par capteur soit -47 et -55° pour les conditions d'expérimentation. Nous modélisons les signaux par des fonctions de Ricker propagées selon des directions connues de l'espace figure (1a). Nous traitons le problème en absence de bruit afin de mieux discerner les effets de la corrélation. La moyenne de la matrice interspectrale est réalisée sur toute la bande de fréquences. Les matrices sont rendues à structure de Toeplitz.

Nous traçons (figure 3) la fonctionnelle $Q(\theta_r, \theta_g)$. La dynamique de cette fonctionnelle est représentée en courbe de niveaux. Les maxima décrivent deux trajectoires principales relatives à l'évolution de chaque onde, en absence de biais les trajectoires devraient être rectilignes. Cependant dès que la direction de focalisation s'écarte trop de la direction des ondes, le biais devient important, les trajectoires s'incurvent. La position des maxima donnée par le goniomètre est biaisée, par contre la section obtenue pour $\theta_g=0$ (GIN) donne la direction des ondes avec un biais théoriquement nul. Cette section est rabattue à droite de la figure principale. Pour cette simulation, nous avons utilisé deux vecteurs propres et nous n'avons pas utilisé de filtrage spatial.

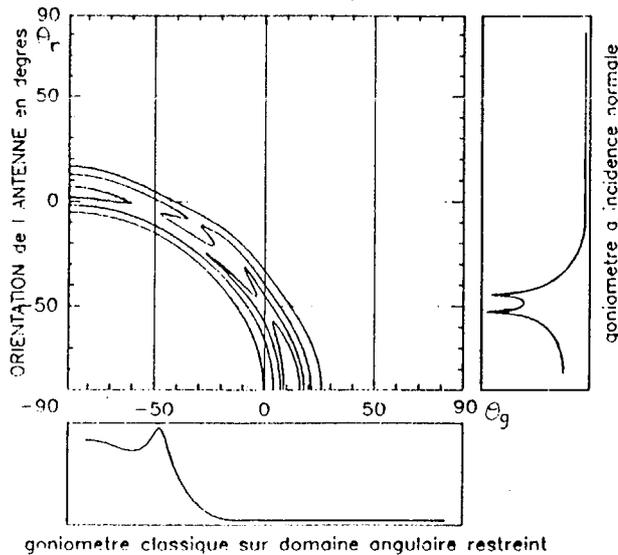


figure 3 : résultat de localisation de deux ondes de pentes voisines correspondant à des incidences de -47 et -55°

4-3 Choix des paramètres

Comme la plupart des méthodes haute résolution la difficulté de la méthode réside dans le dimensionnement de l'espace de travail, l'avantage étant ici une souplesse dans le choix de ces paramètres. En effet, les maxima superflus provenant d'une surestimation de l'espace signal apparaissent généralement en dehors de la section du G.I.N. ($\theta_g=0$). D'autre part il est également possible de modifier ce paramètre en fonction de la direction par un critère de détection ce qui permet de pondérer son importance. Le dimensionnement est fonction d'une part de la largeur du filtrage spatial, d'autre part du nombre de vecteurs à prendre en considération. Le rôle du filtrage spatial est d'éliminer à chaque itération les ondes trop éloignées de la direction de focalisation. Dans la simulation précédente nous disposons de deux sources proches, le filtrage n'était pas justifié. Le choix et le rôle de ces paramètres est présenté dans [7]. Des améliorations peuvent également être apportées par

exemple en blanchissant les données préalablement, ce qui contribue à un élargissement de la bande de fréquence utile, et permet par exemple de récupérer l'atténuation due au filtre antirepliement appliqué lors de la numérisation.

5 APPLICATION DE CETTE TECHNIQUE SUR LES DONNEES EXPERIMENTALES

5-1 Présentation

Dans le cadre d'une expérimentation sismique marine réalisée en Mer Rouge par IFREMER [8], nous disposons d'un réseau A de 15 capteurs équidistants espacés de 30m. Cette antenne verticale ancrée en fond de mer enregistre les ondes directes réfléchies réfractées provoquées par un canon à air tracté par un bateau selon une trajectoire rectiligne (figure 4).

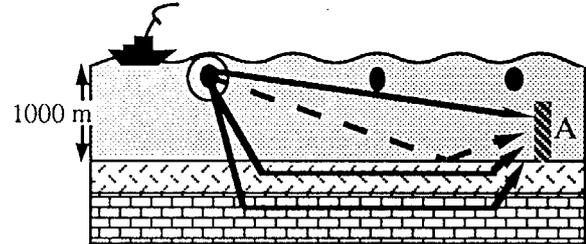


figure 4 : expérimentation Ifremer

Les signaux sont à bande large très basse fréquence (inférieure à 20 hertz), afin de pénétrer dans le sous-sol et sont fortement corrélés puisqu'ils résultent tous du signal émis. Un enregistrement des signaux reçus sur 15 capteurs de l'antenne est présenté figure 5.

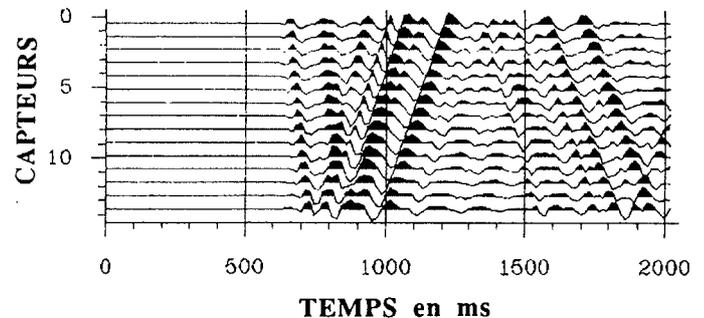


figure 5 : signaux expérimentaux

Les ondes montantes apportent les informations sur la structure du milieu. Pour mieux identifier chacune des ondes, nous proposons de les séparer selon leur incidence [9], de voir leur évolution en fonction de l'emplacement du dispositif d'émission. La méthode présentée ci-dessus est appliquée sur un tir. Une méthode des moindres carrés permet de reconstituer chacune des ondes à partir de leur incidence.

5-2 Conditionnement des données

L'enregistrement comporte 15 capteurs, 128 points échantillonnés à une période de 16 ms, le signal a une bande fréquentielle entre 5 et 12 Hertz. Les incidences négatives correspondent aux ondes descendantes, les incidences positives aux ondes montantes. Le signal est tout d'abord blanchi de façon à élargir et égaliser la bande de fréquences utile. L'atténuation du filtre à l'enregistrement peut ainsi être compensée jusqu'à 20 hertz.

Pour la représentation donnée figure 6, 4 vecteurs propres ont été utilisés, le filtrage spatial étant d'environ 30° .



5-3 Résultat

Les maxima de la fonctionnelle décrivent des motifs propres à chaque onde ou paquet d'ondes estimé. Lorsque θ_r s'écarte d'un maximum, la direction de focalisation s'écarte de cette onde, l'opération de moyenne en fréquence et le filtrage spatial détruisent ces ondes. Le vecteur propre va alors s'aligner sur une autre onde, ce qui explique les décrochements entre chaque motif. La direction de biais nul de ces paquets est donnée par la section $\theta_g=0$ (G.I.N.). On note la présence du filtrage spatial qui limite l'étude à θ_g compris entre

Cette représentation apporte une information supplémentaire sur le choix des paramètres. En effet pour les incidences comprise entre -50° et 50° les maxima sont très marqués par contre pour les directions d'incidence plus forte les trajectoires sont plus difficiles à suivre. On peut sur ces figures apprécier la résolution de la méthode.

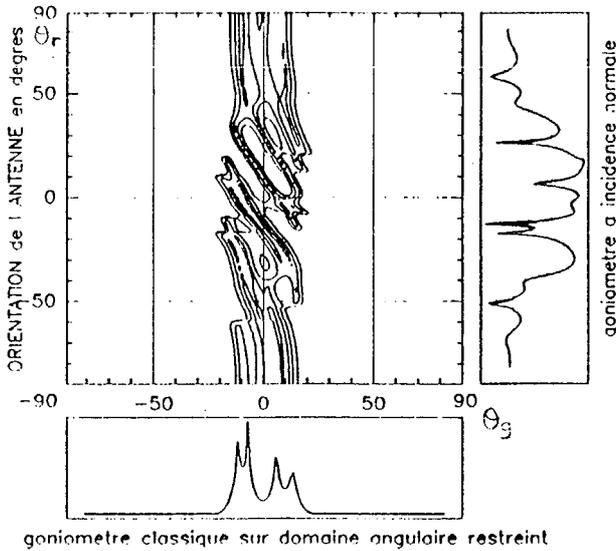


figure 6 : résultat du G.I.N. sur données expérimentales

5-4 Identification et validation

Pour valider le traitement, il est important de regarder la forme respective de chaque onde, nous utilisons pour cela un critère des moindres carrés [9].

Les résultats ne sont pas décrits dans ce papier mais sont présentés dans [7], nous insistons ici sur la nécessité de contrôler le processus. Ce contrôle peut être fait de plusieurs manières, tout d'abord en restituant après séparation des diverses ondes, les résidus de traitement (figure 7) et en veillant à que ces résidus ne présentent plus d'arrivée d'énergie cohérente le long de l'antenne.

Il est également important de vérifier la continuité des résultats d'un tir à l'autre. Nous montrons les résultats de localisation sur une fenêtre de 64 point centrée sur l'arrivée de l'onde directe et cela sur plusieurs tirs consécutifs (figure 8).

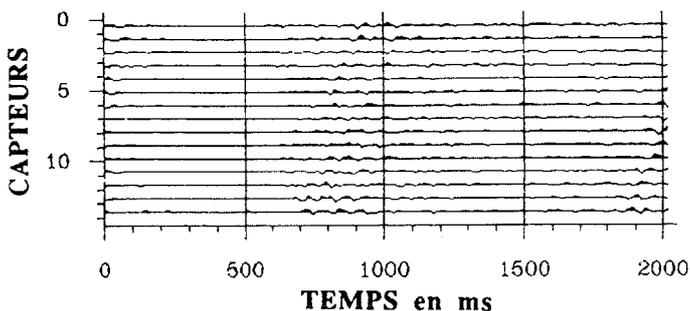


figure 7 : résidus de traitement

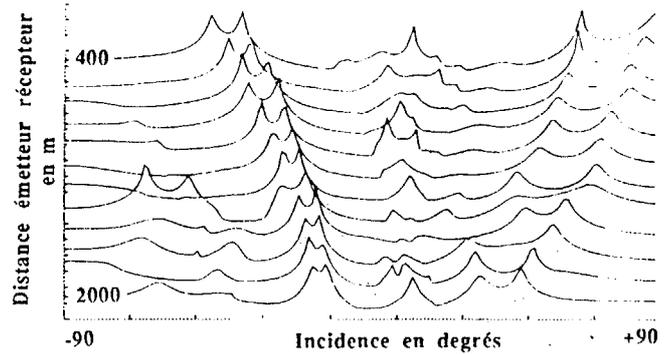


figure 8: résultat de localisation sur plusieurs tirs consécutifs

6 CONCLUSION

Nous avons montré une extension des techniques de filtrage matriciel à des signaux de types quasi déterministes et fortement corrélés par utilisation d'opérateurs de moyenne adéquats. Pour cela il a été nécessaire d'adapter les techniques d'estimation d'angle d'arrivée à haute résolution. Nous nous sommes orientés vers les méthodes matricielles à espace signal cohérent dans la bande de signal utile, nous avons proposé une mise en oeuvre particulière le G.I.N. qui ne nécessite aucune connaissance a priori sur les incidences. Cette méthode permet de réaliser une moyenne cohérente sur toute la bande de signal utile après focalisation successive dans chaque direction de l'espace. Quelques règles s'imposent pour obtenir une meilleure résolution :

- choisir des longueurs de fenêtres temporelles convenables de façon à ne pas avoir un nombre d'ondes trop important
- blanchir les données préalablement
- établir un filtrage spatial autour de la direction de "focalisation"

BIBLIOGRAPHIE

- [1] I. Lecomte, F. Glangaud, L. Géli, J. Mars, P. Gounon, P. Gavin: Signal processing applied to refraction seismic data obtained with an ocean bottom vertical seismic array: spectral matrix method and other processing., Signal processing 4, proceedings of EUSIPCO-88 vol 3 pp 1369-1372.
- [2] T.J. Shan, M.Wax and T.Kailath: On spatial smoothing for direction of arrival estimation of coherent signals. IEEE -ASSP-33, n°4, pp 806- 811, Aug. 1985.
- [3] H. Wang and M. Kavch: Coherent signal subspace processing for the detection and estimation of angles of arrival of multiple wide-band sources. IEEE -ASSP- 33, pp 823- 831, Aug. 1985.
- [4] J. Krolik, D.N. Swingler focused wide-band array processing by spatial resampling. IEEE ASSP, vol 38 p356-360, february 1990
- [5] S. Bourennane : Traitement de signaux large-bande, Thèse de doctorat de l'I.N.P. Grenoble 1990.
- [6] G. Biennu and L. Kopp: Optimality of high resolution array processing using the eigensystem approach. IEEE -ASSP- 33, pp 1235 - 1247, Oct.1983.
- [7] F. Avedik: Sea-floor seismology: mobile Ocean Bottom Vertical Seismic Array (OBVSA) for controlled source experiments: Ocean seismo-acoustics, T.Akal and J.M. Berkson, Plenum Publishing Corp. (1986).
- [8] F. Guillet : G.I.N.; goniometre à incidence normale, application à des données expérimentales de sismique marine grand angle, Thèse de doctorat de l'I.N.P. Grenoble 1990.
- [9] P. Gavin : Séparation d'ondes en sismique à partir d'un modèle a priori et de l'estimation de l'espace signal, Thèse de doctorat de l'I.N.P. Grenoble 1989.