



## SEPARATION AVEUGLE DE SIGNAUX LARGE BANDE : UN NOUVEAU CHALLENGE EN PROSPECTION SISMIQUE

**Nadège THIRION, Jérôme MARS, Jean-Louis LACOUME**

*Centre d'Etude des PHénomènes Aléatoires et Géophysiques (CEPHAG),  
URA CNRS 346, BP 46, rue de la Houille Blanche, 38402 ST MARTIN D'HERES Cedex France,  
Tél/Fax : 76.82.64.21 / 76.82.63.84, E-Mail : thirion@cephag.observ-gr.fr*

Le problème de la séparation de mélanges convolutifs de signaux à large bande de fréquences apparaît très souvent en traitement du signal. Les signaux sismiques, qui sont des signaux déterministes, colorés et corrélés entre eux du fait du problème des multi-trajets, s'inscrivent dans cette problématique. L'objet de cet article sera d'exploiter certains concepts de la séparation aveugle de sources (bien qu'elle ait été développée dans le cadre de signaux aléatoires, et statistiquement indépendants) afin d'apporter des réponses à la question de la séparation aveugle d'ondes sismiques.

### I. INTRODUCTION

Le problème de la séparation de mélanges convolutifs de signaux à large bande de fréquences reçues sur une antenne linéaire de capteurs se pose dans de nombreux domaines tels que les télécommunications, l'acoustique sous-marine, la géophysique interne, etc... En prospection sismique, l'objectif majeur du traitement du signal est la séparation et l'identification des ondes en vue d'une meilleure description du sous-sol. Si les techniques conçues à cette fin (Filtrage f-k, filtre médian, filtrage basé sur la matrice interspectrale, sur la transformée de Radon, ou de Karhunen-Loève [3]) donnent de bons résultats dans la majeure partie des cas, elles n'en conservent pas moins certaines limites, lesquelles seront susceptibles de se manifester, dès lors que les ondes présenteront des énergies trop voisines ou des vitesses (pentes) trop proches. Nous montrerons qu'il est possible de résoudre ce problème par le biais d'un algorithme aveugle : des exemples illustrant les performances d'une telle approche seront présentés. Effectuée dans le domaine fréquentiel, la méthode de séparation proposée se décompose en deux étapes successives :

- 1) Séparation, pour chaque canal de fréquence, des contributions des diverses ondes, grâce à l'introduction d'un critère de stationnarité locale en distance sur la phase des vecteurs d'ondes estimés.
- 2) Reconstruction des spectres sur toute la bande des fréquences utiles, au moyen d'un algorithme basé sur la continuité en fréquence des phases des vecteurs d'ondes estimés.

L'intérêt de notre démarche est d'offrir un plus grand nombre de degrés de liberté puisqu'elle s'affranchit au moins partiellement du modèle onde plane sur lequel reposent la plupart des méthodes de Traitement d'Antenne (TA), qu'il s'agisse de

The problem of separation of convolutive mixtures of wideband signals often arises in signal processing. Seismic signals, which are deterministic, colored, and correlated - this is due to the multi-paths propagation -, belong to that set of problems. The aim of this article is to explain how it is possible to exploit some of the concepts of blind separation of sources (even though it was developed for random, independent processes) in order to solve the question of blind separation of waves.

méthodes paramétriques basées sur les propriétés de l'Estimateur du Maximum de Vraisemblance ou d'algorithmes de type Goniomètre, Propagateur ou autres [4]...

### II. PRÉSENTATION DES TRAITEMENTS

#### II.1. Paramétrisation à un canal de fréquence

Soit une antenne linéaire de  $N$  capteurs équidistants : en vertu du principe de superposition, le signal enregistré sur le capteur  $k$ , est une combinaison linéaire des  $p$  ondes détectées par l'antenne, auxquelles s'ajoute un bruit [4], lequel se traduit sous la forme matricielle donnée par l'équation (1) :

$$\underline{R}(t) = \underline{S}(t) * \underline{A}(t) + \underline{B}(t) = \sum_{j=1}^p \underline{O}_j + \underline{B}(t) \quad (1)$$

Sous les hypothèses suivantes :

- $\underline{B}(t) = [b_1(t), \dots, b_N(t)]^T$  bruit additif ; supposé spectralement et spatialement blanc, gaussien, indépendant des signaux sources, ( $^T$  étant l'opérateur de transposition), de densité spectrale de puissance moyenne  $\sigma_b^2$ .

- $\underline{A}(t) = [a_1(t), \dots, a_p(t)]^T$  où  $a_k(t)$  est la source  $k$  (amplitude de l'onde  $k$ ) ; elle n'est porteuse d'aucune information de nature propagative ;  $\underline{O}_i = \underline{S}_i(t) * a_i(t)$  désigne le vecteur d'onde  $i$ ,

- $\underline{S}(t) = [\underline{S}_1(t), \dots, \underline{S}_p(t)]$  matrice (N,p) dont les colonnes ou vecteurs directionnels sont les  $\underline{S}_k(t) = [s_{1,k}(t), \dots, s_{N,k}(t)]^T$ . La phase de leur première composante sera supposée nulle ce qui revient à prendre le premier capteur comme référence, tout en assurant l'unicité de ce qui a été défini comme les sources. En outre, ces vecteurs décrivent la propagation sur l'antenne



$\frac{s_{x,k}(\nu)}{s_{x+1,k}(\nu)}$  est la fonction de transfert entre 2 capteurs successifs. Dans le cas d'ondes planes, d'un milieu non dispersif et non absorbant, cette fonction se limite à un terme de phase pur, tandis que dans le cas général sa forme sera celle de l'équation (2) [1] :

$$\frac{A(u_x, \nu) \cdot e^{j2\pi\nu_0(\tau_p(\nu_0, u_x) - \tau_g(\nu_0, u_x))} \cdot e^{j2\pi\nu(\tau_g(\nu_0, u_x))}}{A(u_{x+1}, \nu) \cdot e^{j2\pi\nu_0(\tau_p(\nu_0, u_{x+1}) - \tau_g(\nu_0, u_{x+1}))} \cdot e^{j2\pi\nu(\tau_g(\nu_0, u_{x+1}))}} \quad (2)$$

Avec :  $u_x$  position du capteur  $x$ ,  $\tau_g$ ,  $\tau_p$  respectivement retard de groupe et de phase,  $A(u_x, \nu)$  terme lié à l'atténuation due au milieu traversé. Le point essentiel étant que cette grandeur varie continûment avec la variable fréquentielle.

La Transformée de Fourier appliquée à l'équation (1), permet de scinder le problème global en un ensemble de problèmes de séparation de mélanges instantanés de signaux (on parlera alors de "multi-bande étroite"). Les traitements effectués à un canal de fréquence sont faits indépendamment de ceux effectués aux autres fréquences (contrairement à certaines méthodes qualifiées de cohérentes qui nécessitent l'utilisation d'opérateurs de focalisation [4]). Pour des signaux déterministes, l'estimation des quantités impliquées dans le calcul est une étape déterminante [5] qui passe par la mise en oeuvre d'opérateurs de moyenne autres que la moyenne statistique (souvent remplacée par la moyenne empirique sous hypothèse d'ergodisme). Les opérateurs auxquels nous recourons afin de décorréler au moins partiellement les ondes sont des opérateurs de type lissage spatial [7] ou lissage fréquentiel [8], que dans la suite nous noterons  $\xi(\cdot)$ . Afin de mettre en exergue les analogies avec la séparation de sources, nous sommes également amenés à introduire deux matrices de renormalisation des sources : l'une,  $\underline{D}(\nu)$ , est une matrice diagonale de blanchiment spectral, l'autre,  $\underline{T}(\nu)$  assure une totale décorrélation des sources :

$$(1) \xrightarrow{TF} \begin{aligned} \underline{R}(\nu) &= \underline{S}(\nu) \cdot \underline{D}(\nu) \cdot \underline{D}^{-1}(\nu) \underline{A}(\nu) + \underline{B}(\nu) \\ &= \underline{S}''(\nu) \cdot \underline{T}(\nu) \cdot \underline{D}^{-1}(\nu) \underline{A}(\nu) + \underline{B}(\nu) \end{aligned} \quad (3)$$

Quelle que soit  $\underline{S}''(\nu)$ , matrice des nouveaux vecteurs directionnels, elle se décompose en valeurs singulières (DVS) :

$$\underline{S}''(\nu) = \underline{V}(\nu) \cdot \underline{\Delta}^{1/2}(\nu) \cdot \underline{\Pi}(\nu) \quad (4)$$

•  $\underline{V}$  matrice unitaire (N,N) (i.e.  $\underline{V} \cdot \underline{V}^H = \underline{I}_N$  ; si  $^H$  représente l'opérateur de transconjugaison),

•  $\underline{\Delta}^{1/2}$  matrice diagonale (N,p) dont les N-p dernières lignes sont nulles, si l'on suppose  $N > p$ ,

•  $\underline{\Pi}$  matrice unitaire (p,p), paramétrée dans le cas général au moyen d'un produit de matrices de rotation de Givens, et d'une matrice diagonale de termes de phases.

Enfin étant donné que la matrice  $\underline{T}(\nu)$  assure la décorrélation des sources normalisées, on doit avoir :

$$\xi[\underline{A}'' \cdot \underline{A}''^H] = \underline{I}_p \Rightarrow \underline{T} = \underline{K} \cdot \underline{\omega}^{1/2} \cdot \underline{W} \quad (5)$$

Avec :

- $\underline{\omega}^{1/2}$  matrice diagonale (p,p),
- $\underline{K}$  et  $\underline{W}$  matrices unitaires (p,p)

Le problème de la séparation d'ondes sismiques formalisé de la façon la plus générale qui soit passe donc par l'estimation de 5 matrices :  $\underline{V}, \underline{\Delta}^{1/2}, \underline{\Pi}, \underline{K}, \underline{\omega}^{1/2}, \underline{W}$ . Nous verrons que le problème se simplifie énormément dans le cas où l'opérateur de lissage conduit à la totale décorrélation des ondes.

## II.2 Estimation des paramètres inconnus

### II.2.1. Estimation de $\underline{V}$ et $\underline{\Delta}^{1/2}$ ou l'étape à l'ordre deux

La décomposition en valeurs propres (DVP) de la matrice interspectrale des signaux reçus [4] étant unique, on l'identifie avec l'équation (6b), obtenue quant à elle en réintroduisant la paramétrisation de la matrice  $\underline{S}''$  :

$$\hat{\underline{\Gamma}}(\nu) = \begin{cases} \xi[\underline{S}'' \cdot \underline{A}'' \cdot \underline{A}''^H \cdot \underline{S}''^H] + \xi[\underline{B} \cdot \underline{B}^H] = \underline{S}'' \cdot \underline{S}''^H + \sigma_b^2 \cdot \underline{I} & (6a) \\ \xi[\underline{R} \cdot \underline{R}^H] = \underline{V} \cdot (\underline{\Delta} + \sigma_b^2 \cdot \underline{I}) \cdot \underline{V}^H & (6b) \end{cases}$$

La matrice des vecteurs propres coïncide donc avec la matrice  $\underline{V}$  recherchée. La matrice des valeurs propres permet quant à elle l'accès à la matrice  $\underline{\Delta}^{1/2}$ , après soustraction du terme lié au bruit.

### II.2.2. Autres inconnues du problème

Si l'opérateur  $\xi$  conduit à la complète décorrélation des ondes, il devient inutile de chercher à calculer la matrice  $\underline{T}$ . Celle-ci est unitaire dans la mesure où :

$$\underline{T} \cdot \xi \left[ \underline{A}' \cdot \underline{A}'^H \right] \cdot \underline{T}^H = \underline{I}_p$$

On retrouve alors sur un résultat désormais classique [3], à savoir que la seule matrice encore inconnue à l'issue de l'étape à l'ordre deux est une matrice unitaire, se réduisant à une matrice de rotation complexe (paramétrée par deux angles  $\theta(\nu) \kappa(\nu)$  dans un cas à deux ondes). Cette matrice a pour expression :

$$\underline{\underline{IT}} = \begin{pmatrix} \cos(\theta(\nu)) & \sin(\theta(\nu)) \cdot e^{j\kappa(\nu)} \\ -\sin(\theta(\nu)) \cdot e^{-j\kappa(\nu)} & \cos(\theta(\nu)) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{j\psi_1(\nu)} & 0 \\ 0 & e^{j\psi_2(\nu)} \end{pmatrix} = \underline{\underline{IP}} \cdot \underline{\underline{P}}$$

En séparation aveugle de sources indépendantes, la matrice de rotation que l'on considère comme la bonne solution est celle qui conduit aux sources le plus indépendantes possible au sens d'un critère à l'ordre quatre [2]. Pour le type d'application qui nous intéresse, les problèmes d'estimation sont doré et déjà apparus au niveau de l'ordre deux et ont nécessité la mise en oeuvre d'opérateurs de lissage spécifiques (lissage spatial et fréquentiel). Classiquement, l'ordre deux est suivi d'une projection dans un espace p-dimensionnel qui est l'espace des sources : l'utilisation du lissage spatial s'avère exclue dans cet espace. Aussi, avons-nous été amené à remplacer le critère sur les sources par un critère de stationnarité locale en distance sur les phases des vecteurs d'ondes estimés. La mise en oeuvre de ce critère impose un prétraitement sur ces phases qui devront être déroulées spatialement c-à-d qu'elles n'appartiennent plus à  $[-\pi, \pi]$  mais varient continûment avec la distance.

En séparation aveugle d'ondes, bien que toutes les matrices impliquées dans la paramétrisation ne soient pas estimées (il

s'agit en l'occurrence des matrices  $\underline{D}$ ,  $\underline{P}$ ), il ne subsiste pas d'indétermination de type phase ou puissance. Ceci vient du fait que pour un canal de fréquence donné, l'onde  $k$  s'obtient en multipliant l'estimée du vecteur directionnel  $k$  par l'estimée de la forme d'onde  $k$ . Or, s'il est vrai que tout vecteur directionnel n'est défini qu'à un coefficient multiplicatif complexe près, la forme d'onde qui lui est associée n'est obtenue, quant à elle, qu'à l'inverse de ce même coefficient près - le vecteur des sources résultant du produit entre la pseudo-inverse de la matrice des vecteurs directionnels et le vecteur des observations (i.e.:  $\hat{A}' = S'^{\#} \cdot R \Rightarrow \hat{O}_i = \hat{S}' \cdot \hat{A}'_i$  si  $\hat{A}'_i$  désigne le vecteur dont toutes les composantes sont nulles sauf la  $i^{\text{ème}}$  qui correspond à la  $i^{\text{ème}}$  composante de l'estimée du vecteur des sources  $\underline{\hat{A}}$ ).

Dans le cas d'une décorrélation seulement partielle des ondes, la complexité croît dans des proportions considérables puisque l'on dénombre pas moins de six paramètres inconnus à l'issue de l'étape à l'ordre deux : le problème est alors beaucoup trop compliqué pour pouvoir être traité en aveugle. Il faudra donc porter une attention toute particulière à l'étape d'estimation de la matrice interspectrale si l'on veut pouvoir conduire l'étape de séparation dans de bonnes conditions.

### II.3. Reconstruction des spectres

Au cours du traitement des permutations sur les formes d'ondes sont susceptibles de se produire d'une fréquence à l'autre. Leur origine est double, elles viennent :

- 1) du reclassement des valeurs propres par valeurs décroissantes dictée par la volonté de ne conserver que celles qui soient représentatives du Sous-espace Signal (SeS),
- 2) du mode de recherche des paramètres encore inconnus à l'issue de l'étape à l'ordre deux.

Afin de pallier ce problème, nous avons basé notre algorithme de reconstruction sur le fait que la phase des vecteurs directionnels est une grandeur qui varie continûment avec la fréquence, comme on l'a constaté au niveau de (2). Avant d'appliquer cet algorithme qui reclasse les vecteurs d'ondes estimés en minimisant leurs fluctuations fréquentielles de phase, nous réalisons un prétraitement qui consiste en un déroulement de phase. Ceci permet d'éviter les sauts de phase de  $2\pi$  (susceptibles de se produire dès lors que l'angle d'arrivée par rapport à l'antenne s'écarte de la normale) et qui risqueraient d'entraver le bon déroulement de l'étape de reconstruction.

## III. APPLICATIONS

Nous présentons les résultats de simulations qui ont été obtenues sur données synthétiques et sur données réelles.

### III.1. Données synthétiques

Pour cet exemple, nous avons utilisé une source réelle large bande et une ondelette ARMA (2,2). Les spectres des deux sources sont donnés en Fig. 6. Le mélange synthétisé (Fig. 3) est non bruité, il résulte de la somme des deux ondes présentées en Fig. 1-2 ; elles sont planes sur 20 capteurs avec des incidences proches (1 point échantillons d'écart sur les pentes) (voir Fig. 4 : transformée f-k). Pour estimer la matrice spectrale, nous avons utilisé un lissage spatial sur 7 capteurs (expliquant la perte des 3 premières et des 3 dernières traces au niveau des ondes estimées) et une fenêtre d'exposant 2 pour

le lissage fréquentiel. Les résultats de la séparation après filtrage matriciel (la section propre  $i$  est donnée par :  $\hat{O}_i = (V_i^H \cdot R) \cdot V_i$  si  $V_i$  est le  $i^{\text{ème}}$  vecteur propre) sont présentés en Fig. 7-8 : on retrouve sur chacune des sections propres une partie des deux ondes : la séparation n'est donc pas bonne (corroboré par les Fig. 9-10). Les résultats après traitement complet (rotation + reconstruction) sont présentés sur les Fig. 11-12 (voir aussi f-k en Fig. 13-14) : ils sont relativement bons si l'on compare les ondes estimées avec les ondes des Fig. 1-2.

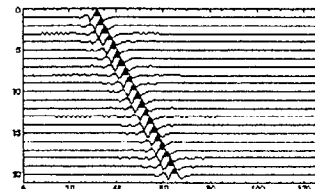


Fig. 1 : Première onde (source réelle)

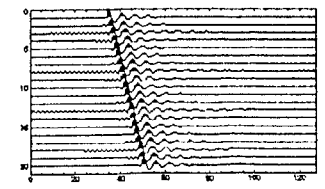


Fig. 2 : Seconde onde (ARMA)

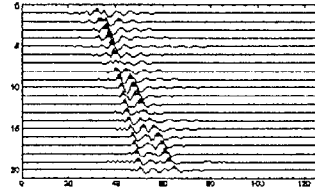


Fig. 3 : Mélange synthétisé

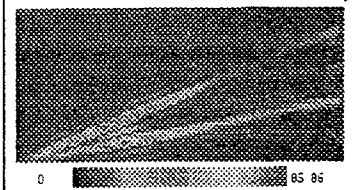


Fig. 4 : Transformée f-k

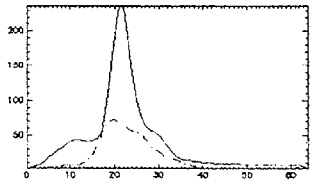


Fig. 5 : Valeurs propres

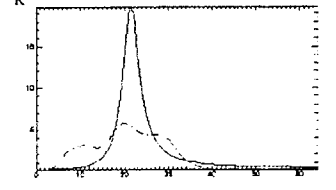


Fig. 6 : Spectres des sources

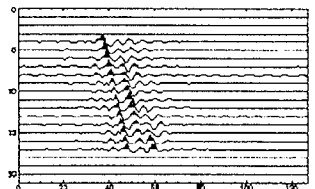


Fig. 7 : Projection sur le 1er vecteur propre

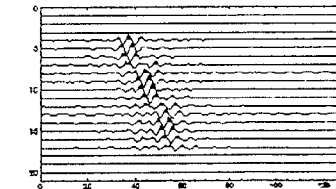


Fig. 8 : Projection sur le 2ème vecteur propre

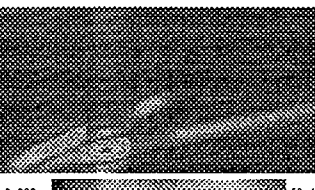


Fig. 9 : Transformée f-k

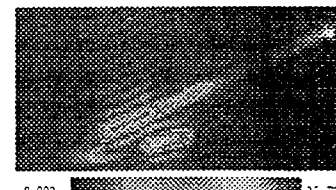


Fig. 10 : Transformée f-k

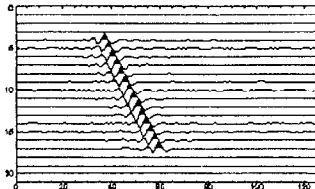


Fig. 11 : onde 1 (traitement complet)

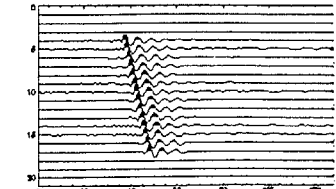


Fig. 12 : onde 2 (traitement complet)



Fig. 13 : Transformée f-k

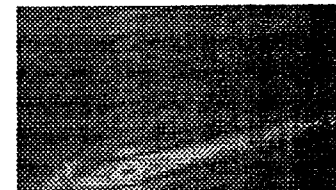


Fig. 14 : Transformée f-k



### III.2. Les données réelles

Les données réelles, nous ont été fournies par la société ELF, elles ont été collectées sous forme de Profil Simique Oblique (Fig. 15 : données après mise à plat (on compense partiellement le décalage qui existe entre 2 capteurs par l'introduction d'un retard : tout se passe alors comme si l'onde arrivait normalement par rapport à l'antenne)). On dispose d'un total de 66 capteurs. La matrice interspectrale a ensuite été estimée au moyen d'un lissage spatial sur 7 capteurs, et d'une fenêtre d'exposant 5 pour le lissage fréquentiel. Les Fig. 17-18 correspondent aux deux premières sections propres, tandis que les Fig. 19-20 correspondent aux signaux obtenus après traitement complet. On constate une amélioration notable par rapport aux résultats obtenus à l'ordre deux.

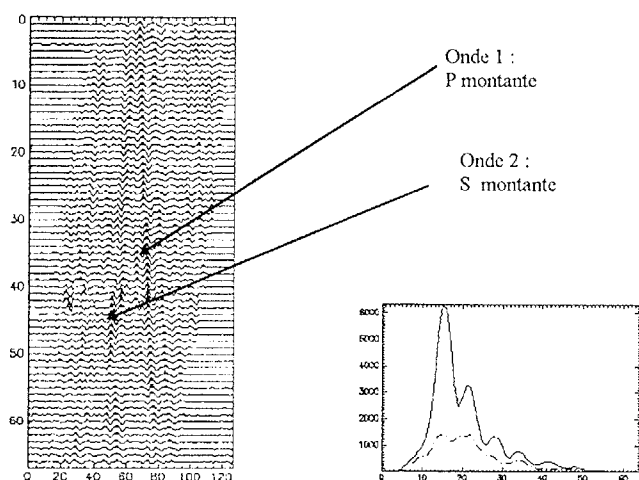


Fig. 15 : Données du PSO après mise à plat

Fig. 16 : Valeurs propres

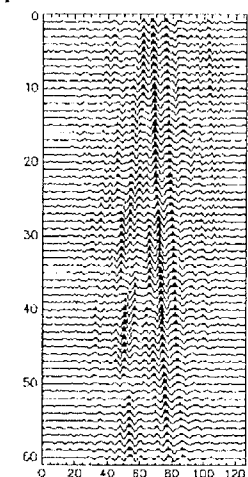


Fig. 17 : la première section propre



Fig. 18 : la deuxième section propre

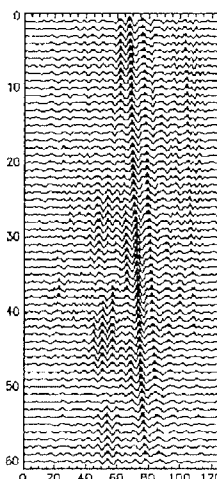


Fig. 19 : Onde 1 après traitement complet

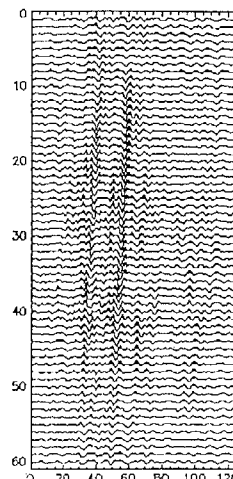


Fig. 20 : Onde 2 après traitement complet

### IV. CONCLUSION

Nous avons montré que le problème de la séparation d'ondes sismiques d'énergies proches et de pentes voisines pouvait être résolu en aveugle, à condition toutefois d'obtenir une bonne estimation de la matrice interspectrale des signaux reçus. L'algorithme proposé a permis l'obtention de bons résultats aussi bien sur données réelles que synthétiques.

### V. RÉFÉRENCES

- [1] **Berkhout A. J.** "Seismic migration, imaging of acoustic energy by wave field extrapolation : A. theoretical aspects". *Elsevier scientific publishing company*, 1982.
- [2] **Gacta M., Lacoume J. I.** "Estimateurs du maximum de vraisemblance étendus à la séparation de sources non gaussiennes". *Traitement du signal*, vol. 7, n°5, p. 419-434. Numéro spécial non gaussien, non linéaire. 1990.
- [3] **Glangeaud F., Mari J. L.** "Wave separation". *Editions Technip, Paris*. 1994.
- [4] **Haykin S.** "Advances in spectrum analysis and array processing". *Prentice-Hall advanced reference series engineering*. Vol. I & II. 1991.
- [5] **Lacoume J. L.** "Modèles et traitement des signaux multidimensionnels". *11<sup>ème</sup> colloque du GRETSI*. Nice 1-5 juin 1987.
- [6] **Mars J., Glangeaud F., Lacoume J. L., Fourmann J. M., Spitz S.** "Separation of seismic waves". *57<sup>th</sup> SEG meeting, New Orleans, Expanded abstracts*, 1987. p. 489-492.
- [7] **Reddi S. S.** "On a spatial smoothing technique for multiple source location". *IEEE ASSP*, vol. 35, n°5. pp. 709. Mai 1987.
- [8] **Wang H., Kaveh, M.** "Estimation of angles of arrival for wideband sources". *Proc. IEEE, ICASSP'84*, p. 7.5-1-7.5-4.

Les auteurs tiennent à remercier la société ELF pour leur avoir fourni les données réelles ainsi que le professeur R. White de Birbeck College (University of London) pour l'ondelette réelle large bande utilisée dans l'exemple synthétique.