

# Séparation paramétrique des ondes sismiques multicomposantes

## Parametric Separation of Multicomponent Seismic Waves

par Abderrahman ESSEBBAR

CEPHAG (URA CNRS 346), ENSIEG  
BP46 38402 Saint-Martin-d'Hères, France

### *résumé et mots clés*

Dans cet article, on s'intéresse à la séparation des ondes sismiques multicomposantes. C'est le problème principal de la phase de prétraitement qui précède toute interprétation physique des données. Nous utilisons l'estimateur classique du maximum de vraisemblance (MV) appliqué à des signaux à large bande de fréquences. Nous illustrons notre propos par des résultats obtenus sur des signaux sismiques expérimentaux. Ces signaux sont issus d'un profil sismique vertical oblique (PSO).

Séparation d'ondes, traitement d'antenne, estimateur du maximum de vraisemblance, polarisation, sismique.

### *abstract and key words*

This paper is devoted to multicomponent seismic wave separation. This is the main problem of the preprocessing task which enables any physical interpretation. We use the classical maximum likelihood estimator applied to broad band signals. We show the results obtained on experimental seismic signals. These signals are issued from an offset seismic vertical profile.

Wave Separation, Array Processing, Maximum Likelihood Estimator, Polarization, Seismic.

## 1. introduction

La séparation des ondes sismiques représente un traitement essentiel qui doit précéder toute interprétation physique des données. Elle s'apparente au traitement d'antenne en écoute passive qui cherche à caractériser des sources rayonnantes à partir des signaux reçus sur une antenne rectiligne. Le traitement d'antenne met en oeuvre un ensemble de techniques ayant un champ d'application étendu. Parmi les domaines d'applications autres que la sismique, on peut citer le radar et le sonar.

Le signal sismique est stationnaire sur une courte durée et couvre une large bande de fréquences. Par rapport à l'acoustique sous-marine, les formes d'ondes (sources) en sismique sont différentes et sont essentielles à l'identification du milieu.

Dans cet article, nous proposons une méthode de séparation paramétrique qui utilise directement les signaux reçus sur les différents capteurs de l'antenne. On évite ainsi les difficultés liées à l'estimation des signaux rencontrées par exemple avec la méthode utilisant la décomposition de la matrice spectrale [5] [6].

Cette dernière n'exploite pas complètement le modèle décrivant le problème de la séparation des ondes. La séparation paramétrique utilise l'estimateur au sens du maximum de vraisemblance appliqué aux signaux à large bande de fréquence.

Dans le cas de signaux enregistrés selon deux composantes, l'estimateur MV a été appliquée à des sources polarisées et bande étroite [13]. En ce qui concerne la sismique, Esmersoy a utilisé l'estimateur des moindres carrés pour la séparation des ondes descendantes multicomposantes [1].

Le paragraphe 2 introduit le modèle classique de traitement d'antenne, donne les hypothèses utilisées dans le problème de séparation paramétrique et ensuite décrit les ondes sismiques. L'estimateur du maximum de vraisemblance, appliqué à des signaux monocomposantes (on ne tient pas compte de la polarisation des ondes) et à large bande de fréquences, est détaillé dans le paragraphe 3. Le paragraphe 4 donne l'estimateur MV pour des signaux multicomposantes. La mise en oeuvre de la méthode est donnée dans le paragraphe 5. Finalement, le paragraphe 6 présente l'application de la méthode proposée à des signaux expérimentaux.

## 2. modélisation

### 2.1. modèle

Pour simplifier, on présente le cas d'une seule composante. Considérons une antenne linéaire composée de  $K$  capteurs (figure 1). On suppose qu'il existe  $P$  ondes planes notées ( $s_p(t)$ ,  $p = 1, \dots, P$ ) et on dispose d'un enregistrement fini du signal  $d_k(t_i)$  (que l'on appelle *trace sismique*) reçu sur chaque capteur  $k$  :

$$d_k(t_i) = \sum_{p=1}^P s_p(t_i - \tau_{kp}) + b_k(t_i) \quad \text{pour } i = 1, \dots, N \quad (1)$$

$N$  le nombre d'échantillons temporels,  $\tau_{kp}$  est le retard de propagation de  $s_p(t_i)$  entre le capteur de référence et le  $k^{\text{ième}}$  capteur du front d'onde qui arrive sur l'antenne avec un angle d'incidence  $\theta_p$ .  $b_k(t_i)$  représente le bruit additif sur le  $k^{\text{ième}}$  capteur. La lenteur de l'onde  $p$  qui arrive sur le capteur  $k$  est :

$$\frac{\tau_{kp}}{\Delta_k} = \frac{\cos(\theta_p)}{V_p}$$

avec  $V_p$  la vitesse de propagation de l'onde  $p$ , qui est un paramètre inconnu et différent pour chaque type d'onde.  $\Delta_k$  est la distance entre le capteur  $k$  et le capteur de référence. Dans la suite de l'article, la lenteur sera paramétrée par le retard.

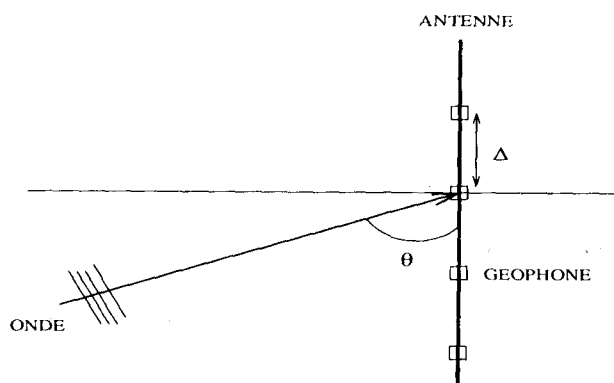


Figure 1. – Onde plane reçue sur une antenne verticale.

La formulation du problème est la suivante : on se donne  $[d_1(t_i), \dots, d_K(t_i)]_{i=1, \dots, N}$  le vecteur des signaux observés sur les  $K$  capteurs de l'antenne et on souhaite estimer le nombre  $P$  d'ondes présentes, les  $P$  lenteurs et les  $P$  formes d'onde. L'approximation bande étroite permet de séparer les  $s_p(t_i)$  et  $\tau_{kp}$ . Dans le cas où la forme de l'onde est connue (en SONAR actif par exemple), on peut appliquer l'estimateur MV directement en temps [7]. Estimer les paramètres  $s_p(t_i)$  ( $1 \leq i \leq N$ ) et  $\tau_{kp}$ , à partir du modèle temporel (1), n'est pas un problème facile. Par contre, si on écrit ce modèle dans domaine fréquentiel on

s'aperçoit que ces paramètres sont séparables pour la formulation des estimateurs (voir paragraphe 3). L'équation (1) s'écrit à la fréquence  $f_i$  :

$$D_k(f_i) = \sum_{p=1}^P S_p(f_i) \exp(-j2\pi f_i \tau_{kp}) + B_k(f_i) \quad \text{pour } i = 1, \dots, N \quad (2)$$

On note TFD la Transformée de Fourier Discrète. Pour  $i = 1, \dots, N$ , nous avons  $[D_k(f_i)] = TFD[d_k(t_i)]$ ,  $[S_p(f_i)] = TFD[s_p(t_i)]$  et  $[B_k(f_i)] = TFD[b_k(t_i)]$ . Pour résoudre le problème de la séparation des ondes, on utilise les hypothèses suivantes qui sont souvent réalistes :

1. les bruits  $B_1(f_i), \dots, B_K(f_i)$  ( $i = 1, \dots, L$ ;  $L$  est le nombre de fréquences a priori dans la bande utile du signal reçu) sont indépendants identiquement distribués et suivent dans leur ensemble une loi normale de moyenne nulle et de matrice de covariance  $\sigma^2(f_i) \mathbf{I}_K$ .  $\mathbf{I}_K$  est la matrice identité de dimension  $(K, K)$  et  $\sigma^2(f_i)$  la puissance du bruit à la fréquence  $f_i$ ,
2.  $B_k(f_1), \dots, B_k(f_L)$  ( $k = 1, \dots, K$ ) sont statistiquement indépendants,
3. le nombre  $P$  est supposé connu, il existe toutefois de nombreux critères statistiques pour estimer conjointement ce nombre. On suppose également que  $K > P$ .
4. la forme d'onde modélisée est déterministe et inconnue.
5. l'onde est localement plane sur les  $K$  capteurs ( $\tau_{kp} = \tau_p + \Delta_k \cos(\theta_p)/V_p$ , pour  $k = 1, \dots, K$ ). Cette hypothèse nous permet d'utiliser une fenêtre spatiale glissante le long de l'antenne.

Le modèle vectoriel à la fréquence  $f_i$  est :

$$\mathbf{d}(f_i) = \mathbf{A}(\boldsymbol{\tau}, f_i) \mathbf{s}(f_i) + \mathbf{b}(f_i) \quad (3)$$

avec  $\mathbf{d} = [D_1, \dots, D_K]$ ,  $\mathbf{s} = [S_1, \dots, S_P]$ ,  $\mathbf{b} = [B_1, \dots, B_K]$ ,  $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1, \dots, \tau_P]$ , le vecteur des paramètres à estimer et  $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_P]$  la matrice de propagation de dimension  $(K, P)$ . Le vecteur  $\mathbf{a}_k$  s'écrit :

$$\mathbf{a}_p = [1, \exp(-j2\pi f_i \tau_p), \dots, \exp(-j2\pi(K-1)f_i \tau_p)]^T.$$

### 2.2. ondes sismiques

Une section sismique est obtenue par la représentation en temps et en distance des enregistrements successifs (figure 6). Les sections sont représentées sous la forme de traces avec un noircissage des amplitudes positives. Dans une section sismique, nous pouvons détecter la présence de différents types d'ondes sismiques :

- les ondes de volumes sont composés des ondes de compression (Onde  $P$ ) et des ondes de cisaillement (Onde  $S$ ).
- les ondes de surfaces (Rayleigh, Love, Stoneley, ondes de tubes) qui sont dispersives : leurs vitesses de propagation dépend de la fréquence.

Ces ondes sont caractéristiques du signal émis et du type de milieu (sismique de surface, sismique de puits, sismique marine).

Les ondes sismiques, comme les ondes électromagnétiques, sont polarisées. Si l'on considère un milieu isotrope, homogène et élastique, on peut montrer que chaque onde a une polarisation propre.

Dans cet article nous allons nous intéresser seulement à la séparation des ondes  $P$  et  $S$ . On appelle alors bruit sismique l'information non utile. En général, les ondes de surface sont considérées comme du bruit tandis que les ondes de volume sont considérées ici comme l'information utile. Ce bruit se décompose donc en deux catégories :

- le bruit cohérent formé d'ondes indésirables pour l'interprétation,
- le bruit aléatoire qui peut être soit le bruit ambiant (créé par l'environnement extérieur au milieu dans lequel les ondes se propagent, ce bruit existe même en absence du signal émis), soit la somme de plusieurs ondes indésirables.

### 3. signaux monocomposantes : Estimateur du MV

La méthode utilisée est l'estimateur conjoint au sens du maximum de vraisemblance pour les forme de l'onde et les lenteurs. Cet estimateur a été appliqué pour la première fois en traitement d'antenne par Schweppe [12]. La densité des observations à la fréquence  $f_i$  par rapport aux inconnues, s'écrit :

$$p(\mathbf{d}(f_i)/\mathbf{s}(f_i), \tau, \sigma^2(f_i)) = \frac{1}{\pi^K \sigma^{2K}(f_i)} \exp \left( - \frac{\|\mathbf{d}(f_i) - \mathbf{A}(\tau, f_i)\mathbf{s}(f_i)\|^2}{\sigma^2(f_i)} \right) \quad (4)$$

et la densité conjointe sur les  $L$  canaux de fréquences de la bande utile :

$$p(\mathbf{d}(f_1), \dots, \mathbf{d}(f_L)/\mathbf{s}(f_1), \dots, \mathbf{s}(f_L), \tau, \sigma^2(f_1), \dots, \sigma^2(f_L)) = \prod_{i=1}^L p(\mathbf{d}(f_i)/\mathbf{s}(f_i), \tau, \sigma^2(f_i)) \quad (5)$$

La fonction log-vraisemblance (FLV) est donnée par le logarithme de la densité conjointe. En écartant les termes constants, on trouve :

$$FLV = - \sum_{i=1}^L [K \log \sigma^2(f_i) + \frac{1}{\sigma^2(f_i)} \|\mathbf{d}(f_i) - \mathbf{A}(\tau, f_i)\mathbf{s}(f_i)\|^2] \quad (6)$$

L'estimateur MV consiste à maximiser FLV par rapport aux paramètres  $\sigma^2$ ,  $\tau$  et  $\mathbf{s}$ . La première étape consiste à estimer  $\sigma^2$  en fixant les autres paramètres :

$$\hat{\sigma}^2(f_i) = \frac{1}{K} \|\mathbf{d}(f_i) - \mathbf{A}(\tau, f_i)\mathbf{s}(f_i)\|^2 \quad (7)$$

En remplaçant l'équation (7) dans l'équation (6), on retrouve l'erreur suivante à minimiser par rapport à  $\tau$  et  $\mathbf{s}$  :

$$\epsilon(\mathbf{s}, \tau) = \sum_{i=1}^L \|\mathbf{d}(f_i) - \mathbf{A}(\tau, f_i)\mathbf{s}(f_i)\|^2 \quad (8)$$

On remarque dans l'expression de l'erreur une séparation entre la forme d'onde  $\mathbf{s}$  et les lenteurs  $\tau$ . Cette séparation réduit la complexité du calcul et du problème. Dans la deuxième étape, on fixe les paramètres  $\tau$  et on résoud, à chaque fréquence  $f_i$ , l'équation linéaire suivante :

$$\mathbf{s}(f_i) = [\mathbf{A}(\tau, f_i)^H \mathbf{A}(\tau, f_i)]^{-1} \mathbf{A}(\tau, f_i)^H \mathbf{d}(f_i) \quad (9)$$

$^H$  représente la transconjugée. Remplaçons l'équation (9) dans l'équation (8), on trouve la fonctionnelle à minimiser :

$$\epsilon_{1C}(\tau) = \sum_{i=1}^L \|\mathbf{d}(f_i) - \mathbf{P}_{\mathbf{A}(\tau, f_i)} \mathbf{d}(f_i)\|^2 \quad (10)$$

où  $\mathbf{P}_{\mathbf{A}(\tau, f_i)} = \mathbf{A}(\tau, f_i)[\mathbf{A}(\tau, f_i)^H \mathbf{A}(\tau, f_i)]^{-1} \mathbf{A}(\tau, f_i)^H$  est l'opérateur de projection ou projecteur.

Le problème peut être aussi formulé en utilisant la Décomposition en Valeurs Singulières (DVS) de la matrice  $\mathbf{A}$  [10]. Cette formulation de l'erreur  $\epsilon_{1C}$  nous permet de calculer directement le conditionnement de la matrice  $\mathbf{A}$ , noté  $\kappa(\mathbf{A})$  :

$$\kappa(\mathbf{A}) = \frac{\lambda_{\min}}{\lambda_1}$$

où  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_{\min}$  sont les valeurs singulières issues de la DVS de  $\mathbf{A}$  et  $0 \leq \kappa(\mathbf{A}) \leq 1$ .

En effet, à certaines fréquences et pour certaines fenêtres spatiales,  $\mathbf{A}$  est mal conditionnée. On utilise alors une solution régularisée donnée par :

$$\hat{\mathbf{s}}(f_i, \mu) = [\mathbf{A}(\hat{\tau}, f_i)^H \mathbf{A}(\hat{\tau}, f_i) + \mu \mathbf{I}_K]^{-1} \mathbf{A}(\hat{\tau}, f_i)^H \mathbf{d}(f_i) \quad 1 \leq i \leq N \quad (11)$$

où  $\mu$  est un paramètre de régularisation. Ce paramètre est toujours positif et n'a pas de valeur « passe-partout ». En pratique, on choisit le  $\mu$  qui donne le résidu de séparation le plus faible.

La forme d'onde  $p$  reconstruite dans le domaine temporel est donnée par :

$$\hat{\mathbf{s}}_p(t_i) = \text{TFD}^{-1}[\hat{\mathbf{S}}_p(f_i, \mu)], \quad 1 \leq i \leq N \quad (12)$$

## 4. signaux multicomposantes

La prospection sismique multicomposante permet d'enregistrer le vecteur vitesse de déplacement de l'onde au même point et au même instant suivant les trois directions de l'espace. Le capteur utilisé est appelé triphone : il est composé de trois géophones classiques et identiques montés rigidement sur un même bloc, de telle façon que chacun capte le mouvement suivant la direction qui lui est assignée.

Le traitement multicomposante représente un outil important par rapport à la sismique monocomposante classique. Elle permet d'accéder à la vitesse de propagation des ondes et de discriminer les ondes par leur polarisation. Dans la suite, on s'intéresse au cas de deux composantes.

La figure 2 illustre l'intérêt qu'il peut y avoir à estimer la polarisation des deux ondes :

- Dans le cas où les ondes sont séparées temporellement et spatialement (figure 2a), la séparation des ondes est effectuée en sélectionnant une onde et en appliquant une pondération temporelle. Dans le cas d'une seule trace, la polarisation peut être estimée en représentant l'hodogramme<sup>1</sup> associé à l'onde. Si on dispose de plusieurs traces, on applique la méthode utilisant la matrice spectrale [4]. Cette méthode améliore le rapport signal sur bruit et suppose une cohérence spatiale de l'onde.

- Dans le cas où les ondes interfèrent en temps et en espace (figure 2b), la séparation des deux ondes peut être effectuée en estimant conjointement les paramètres de propagation et de polarisation.

Dans ce qui va suivre, nous allons présenter deux estimateurs appliqués à des signaux multicomposantes. La figure 4 montre l'organigramme des traitements utilisés pour séparer des ondes polarisées.

### 4.1. estimation conjointe

Nous nous intéressons au cas où le modèle de polarisation de l'onde est connu (figure 3 : Cas A, Cas B). A titre d'exemple, nous représentons sur la figure 4 une polarisation linéaire d'une onde P et d'une onde S verticale. La polarisation de l'onde P est colinéaire au vecteur d'onde alors que celle de l'onde S est perpendiculaire au vecteur d'onde.

Soit  $\mathbf{h}_p(\theta)$  le vecteur de polarisation de l'onde  $p$  enregistrée selon les deux composantes  $X$  et  $Z$ . Cette polarisation est paramétrée par l'angle d'incidence  $\theta$ . L'équation (3) se réécrit :

$$\mathbf{d}_{pol}(f_i) = \mathbf{A}_{pol}(\tau, \theta, f_i) \mathbf{s}(f_i) + \mathbf{b}_{pol}(f_i) \quad (13)$$

1. Figure représentant la trajectoire suivie par une particule dans le plan  $XZ$ .

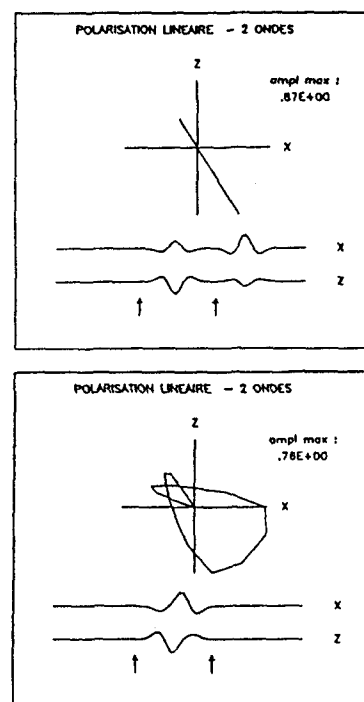


Figure 2. - Exemple d'hodogrammes synthétiques : sans interférence spatio-temporelle (en haut) et avec interférence (en bas). Les deux flèches représentent la fenêtre temporelle traitée.

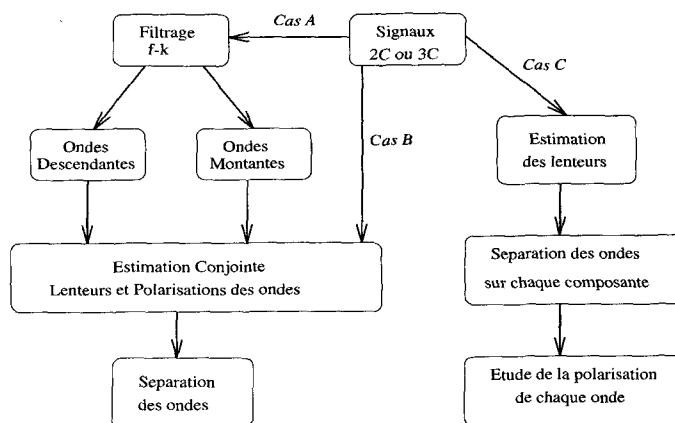


Figure 3. - Organigramme de séparation des ondes sismiques multicomposantes.

où  $\mathbf{d}_{pol} = [\mathbf{d}_1, \dots, \mathbf{d}_K]$  et  $\mathbf{d}_i = [D_{iX}, D_{iZ}]$ ,  $\mathbf{A}_{pol} = [\mathbf{a}_{1_{pol}}, \dots, \mathbf{a}_{K_{pol}}]$ ,  $\theta = [\theta_1, \dots, \theta_K]$ , et  $\mathbf{a}_{p_{pol}} = \mathbf{a}_p \otimes \mathbf{h}_p$ , avec  $\otimes$  le produit de Kronecker et  $\mathbf{h}_p = [-\sin(\theta_p), \cos(\theta_p)]^T$  pour une onde de compression.

Les hypothèses suivantes sont rajoutées à celles de la partie 2 (i.e. Modélisation) :

- la polarisation de l'onde est constante pour les  $K$  capteurs,
- la variance du bruit est la même sur les deux composantes  $X$  et  $Z$ .

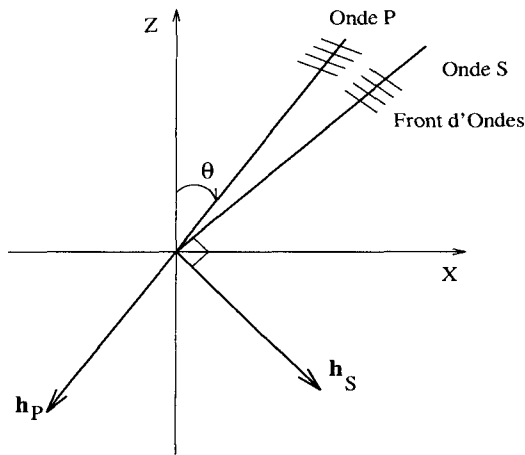


Figure 4. – Onde P et Onde S enregistrées selon les composantes X et Z.

En utilisant la même démarche que dans le cas d'une seule composante, la nouvelle formulation de l'erreur s'écrit :

$$\epsilon_{2Conj}(\tau, \theta) = \sum_{i=1}^L \|d_{pol}(f_i) - P_{A_{pol}(\tau, \theta, f_i)} d_{pol}(f_i)\|^2 \quad (14)$$

Dans ce cas, la forme de l'onde estimée est donnée par :

$$\hat{s}(f_i) = [A_{pol}(\hat{\tau}, \hat{\theta}, f_i)^H A_{pol}(\hat{\tau}, \hat{\theta}, f_i)]^{-1} A_{pol}(\hat{\tau}, \hat{\theta}, f_i)^H d_{pol}(f_i) \quad (15)$$

## 4.2. estimation des lenteurs

Dans le cas où le modèle de polarisation de l'onde est inconnu (figure 3 : Cas C), on supposera en plus que :

- la puissance du bruit additif est la même sur les deux composantes (X, Z),
- la polarisation de l'onde est constante et peut être elliptique, circulaire ou rectiligne.

La même démarche que dans le cas d'une seule composante est utilisée (paragraphe 3), la fonctionnelle à minimiser est :

$$\epsilon_{2C}(\tau) = \sum_{C=X}^Z \sum_{i=1}^L \|d_C(f_i) - P_{A(\tau, f_i)} d_C(f_i)\|^2 \quad (16)$$

avec  $d_C = [D_{1,C}, \dots, D_{K,C}]$  le vecteur des données issues de la composante  $C = X$  (ou  $Z$ ).

## 5. mise en œuvre de la méthode

L'algorithme de séparation paramétrique se déroule en deux étapes :

### Estimation

On estime les paramètres non-linéaires  $(\hat{\tau}, \hat{\theta})$ . La fonctionnelle  $\epsilon_{2Conj}(\tau, \theta)$  est multidimensionnelle et multimodale, sa minimisation exige une bonne initialisation et beaucoup de temps de calcul. Sa complexité croît avec le nombre de paramètres à estimer. Nous avons utilisé la méthode quasi-Newton [11]. Pour converger vers un minimum global, l'étape d'initialisation pour la première fenêtre spatiale utilise une recherche exhaustive pour les angles. L'initialisation des lenteurs se fait d'une manière manuelle : on utilise le fait que les ondes montantes et descendantes ont des lenteurs opposées. On peut aussi appliquer une formation de voies temporelle [6]. Pour la fenêtre spatiale courante, on prend comme initialisation de  $(\tau, \theta)$  l'estimation obtenue à la fenêtre spatiale précédente.

### Séparation

Les estimées  $(\hat{\tau}, \hat{\theta})$  sont utilisées dans l'équation (15) pour estimer les  $P$  différentes ondes. Le résidu de la séparation est aussi calculé. Dans le domaine fréquentiel, ce résidu est donné par :

$$\hat{r}_{pol}(f_i) = d_{pol}(f_i) - A_{pol}(\hat{\tau}, \hat{\theta}, f_i) \hat{s}(f_i), \quad 1 \leq i \leq N \quad (17)$$

Il va être composé du bruit additif, des erreurs d'estimations faites sur les ondes, des ondes qui n'ont pas été estimées et des erreurs de modèle. Le résidu constitue le critère minimal d'efficacité de toute méthode de séparation.

## 6. applications

Dans cette partie, nous présentons le principe de la sismique de puits, le filtrage  $f - k$  et nous montrons les résultats de la séparation paramétrique sur des signaux expérimentaux issus d'un profil sismique oblique (PSO)<sup>2</sup>.

### 6.1. sismique de puits

La sismique de puits permet d'enregistrer des ondes dans un puits creusé à la verticale. Le signal émis en surface est enregistré par

2. Les signaux m'ont été gracieusement fournis par l'Institut Français du Pétrole.

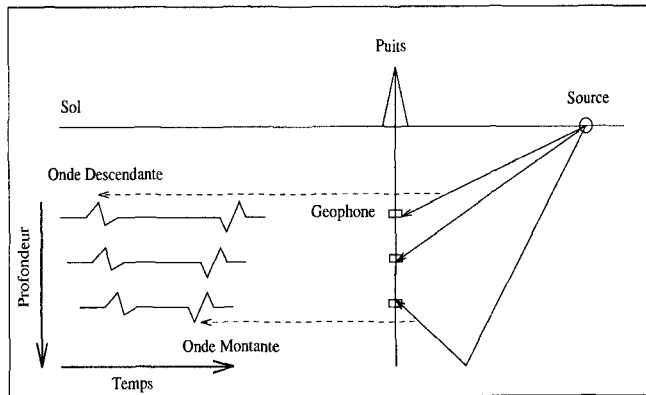


Figure 5. – Dispositif de sismique de puits.

un géophone à différentes profondeurs dans le puits (figure 5). Cette sismique permet [9] :

- l'amélioration de la connaissance des vitesses sismiques au voisinage du puits,
- la reconnaissance des contrastes lithologiques,
- l'exploration fine des structures situées autour du puits.

Sur une section sismique de puits, les ondes montantes et descendantes interfèrent. Les ondes descendantes proviennent de la propagation du signal émis et de l'énergie réfléchi à la surface et sur des interfaces successives de faible impédance. Les ondes montantes proviennent des réflexions sur des réflecteurs. Les deux profils sismiques utilisés :

- le profil sismique vertical (PSV) : les sources sont placées avec un faible déport par rapport à la tête du puits.
- le profil sismique vertical avec déport ou profil sismique oblique (PSO) : les sources sont placées loin du puits et permettent d'élargir le champ d'investigation.

Le PSO, par rapport au PSV, apporte une information latérale sur les réflecteurs et permet d'atténuer les ondes de tube. Quand la source se trouve très loin de la tête du puits, des phénomènes complexes de propagation d'ondes apparaissent sur les sections sismiques.

## 6.2. filtrage $f - k$

Les signaux dans le domaine  $f - k$  sont obtenus à partir d'une transformée de Fourier discrète bidimensionnelle des signaux spatio-temporels. Deux ondes planes de lenteurs apparentes différentes et qui interfèrent entre elles sont dissociées dans ce nouveau domaine. Il est donc possible de filtrer une onde, puis, avec une TFD inverse de séparer les différentes ondes. Cette méthode est simple à utiliser et peu coûteuse, mais elle comporte quelques inconvénients :

- le choix du filtre de pondération de l'atténuation de l'onde est parfois délicat.

- l'antenne doit disposer d'un nombre important de capteurs équidistants et respecter l'échantillonnage spatial pour éviter les effets de repliement.

## 6.3. traitements

A partir de signaux multicomposantes (2 ou 3) de sismique de puits enregistrés, nous pouvons appliquer les trois cas représentés par l'organigramme de la figure 3 :

### Cas A

On effectue un filtrage  $f - k$ , qui permet de séparer les ondes montantes et les ondes descendantes. Ce filtrage permet de réduire le nombre de paramètres à estimer. On estime conjointement les deux ondes  $P$  et  $S$  sur chaque section sismique des ondes descendantes et sur celle des ondes montantes. Puisque les ondes montantes ont une amplitude plus faible que celle des ondes descendantes, la vitesse de ces dernières peut être utilisée comme information a priori pour améliorer l'estimation des ondes montantes dans le cas d'un PSV [3].

### Cas B

On estime conjointement les quatre ondes de volume.

### Cas C

On estime les lenteurs à partir de la fonctionnelle  $\epsilon_{2C}(\tau)$ , on applique ensuite l'équation (11) à chaque composante. Nous disposons donc d'une seule onde, la méthode utilisant la matrice spectrale peut être appliquée [4].

## 6.4. signaux expérimentaux PSO

La section sismique étudiée est composée de 64 traces, chacune étant composée de 512 points échantillons. Nous avons représenté les deux composantes  $X$  et  $Z$  sur la figure 6. On constate que l'onde  $P$  descendante est la plus énergétique sur la composante  $Z$ . En ce qui concerne les ondes montantes  $P$  et  $S$ , elles sont d'une faible amplitude et ont un faible rapport signal sur bruit par rapport aux ondes descendantes. Nous supposons que les ondes ont une polarisation rectiligne.

### Estimation

Pour ne pas estimer conjointement les lenteurs et les angles de polarisations des quatre ondes (onde  $P$  et onde  $S$  montantes et descendantes), nous avons effectué un filtrage  $f - k$  sur les données initiales. Ce filtrage nous a permis de séparer les ondes montantes et les ondes descendantes.

La figure 7 montre la comparaison entre les lenteurs (données en points échantillons) des quatre ondes obtenues avec un filtrage  $f - k$  comme prétraitement et celles obtenues en estimant conjointement les lenteurs et les polarisations sans filtrage. La fenêtre spatiale utilisée est de cinq traces ( $K = 5$ ).

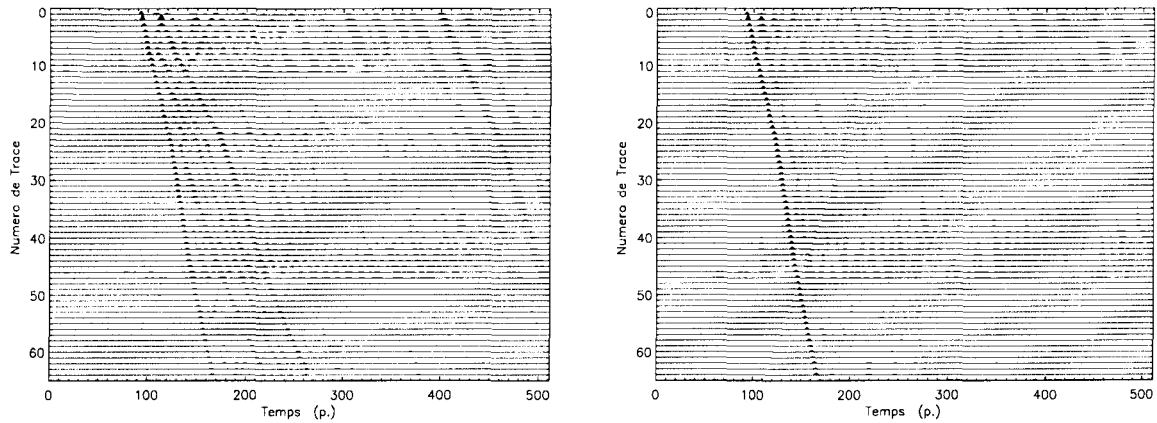


Figure 6. – Signaux initiaux : Composantes X et Z.

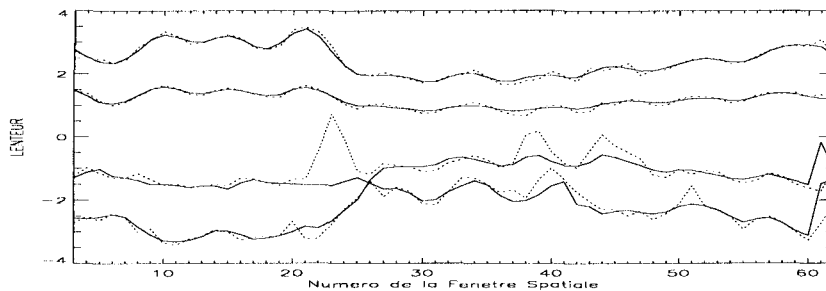


Figure 7. – Lenteurs estimées avec filtrage  $f - k$  comme prétraitement (trait plein) et sans filtrage  $f - k$  (trait pointillé).

Les résultats obtenus avec un filtrage  $f - k$  sont meilleurs, ceci étant dû au fait que l'on a cherché deux ondes pour  $K = 5$  au lieu de quatre ondes pour le cas sans filtrage. Par contre, le fait d'estimer conjointement les quatre ondes évite le problème d'ambiguïté d'identification des ondes montantes. En effet, les deux courbes ne se croisent pas à la trace 25 qui correspond à un changement d'interface. Ce problème peut être évité après l'étape d'estimation, en effectuant une procédure de suivi de chaque onde.

On constate aussi que les ondes descendantes sont toujours bien estimées et fluctuent moins que les ondes montantes.

Nous montrons l'influence du choix de la longueur de la fenêtre spatiale. La valeur de  $K$  doit être un compromis entre le bruit additif et l'hypothèse d'onde localement plane. Pour ces données, une estimation avec  $K = 7$  donne de meilleurs résultats que ceux obtenus avec  $K = 5$  (figures 8 et 9).

La figure 10 montre que l'estimation des lenteurs seules (Cas C) donne de mauvais résultats pour les fenêtres spatiales où il y'a des interférences entre les ondes montantes et descendantes. Une estimation conjointe est donc nécessaire.

### Séparation

Comme le traitement utilise une fenêtre spatiale glissante de  $K$  traces, sur les sections sismiques reconstruites, les  $K/2$  traces de début et de fin sont manquantes.

Les figures 11 et 12 montrent les quatre ondes séparées à partir des deux composantes X et Z et en estimant conjointement les quatre ondes (Cas B,  $K = 7$ ). Les marqueurs sismiques sont bien localisés sur les ondes montantes.

On remarque que sur le résidu, calculé à partir de l'équation (17), et représentée sur la figure 13, il ne reste que du bruit et un peu du signal issu de la mauvaise estimation des différents paramètres et des erreurs de modèle. L'amplitude maximale est de 4.5 fois plus faible que celle des signaux initiaux.

La figure 14 représente  $\kappa(\mathbf{A})$  et  $\kappa(\mathbf{A}_{pol})$  en fonction de la fréquence et pour une fenêtre spatiale. Dans le cas d'une estimation conjointe, la matrice  $\mathbf{A}_{pol}$  est toujours bien conditionnée. Le paramètre de régularisation  $\mu$  n'est pas nécessaire ce qui n'est pas le cas pour la matrice  $\mathbf{A}$ .

### Remarques

– Il est évident que le temps de calcul est relativement important pour une section sismique. Par exemple pour le PSO présenté, l'estimation conjointe des huit paramètres (quatre lenteurs et quatre angles) en utilisant une fenêtre spatiale glissante de cinq traces dure 70 minutes sur le calculateur IBM590 du CEPHAG (avec la puissance maximale disponible). L'étape de séparation des quatre ondes polarisées est presque immédiate.

## Séparation paramétrique des ondes sismiques multicomposantes

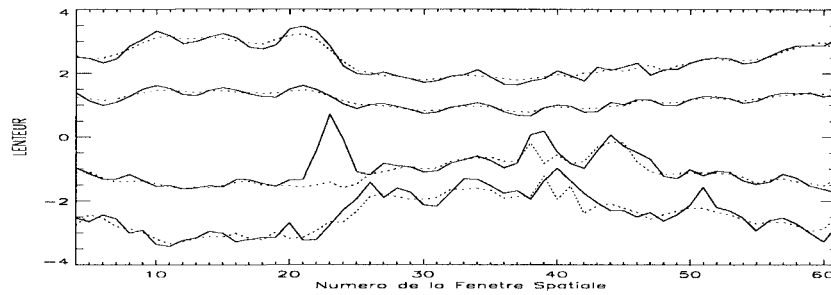


Figure 8. – Lenteurs estimées pour  $K = 5$  (trait plein) et  $k = 7$  (trait pointillé).

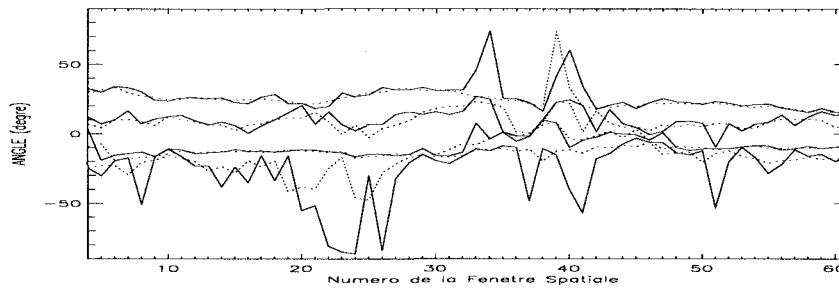


Figure 9. – Angles estimés pour  $K = 5$  (trait plein) et  $K = 7$  (trait pointillé).

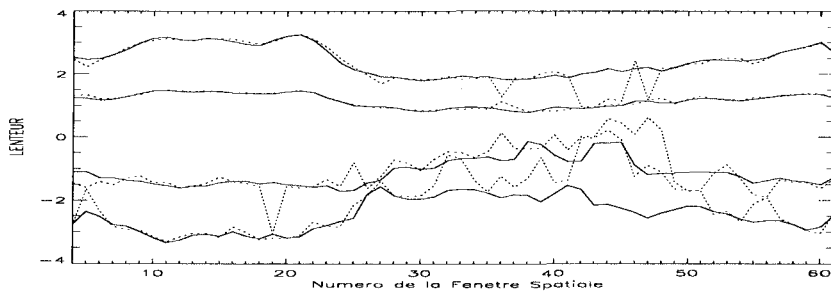


Figure 10. – Lenteurs estimées conjointement avec la polarisation *Cas B* (trait plein) et lenteurs estimées seules *Cas C* (trait pointillé), ( $K = 7, P = 4$ ).

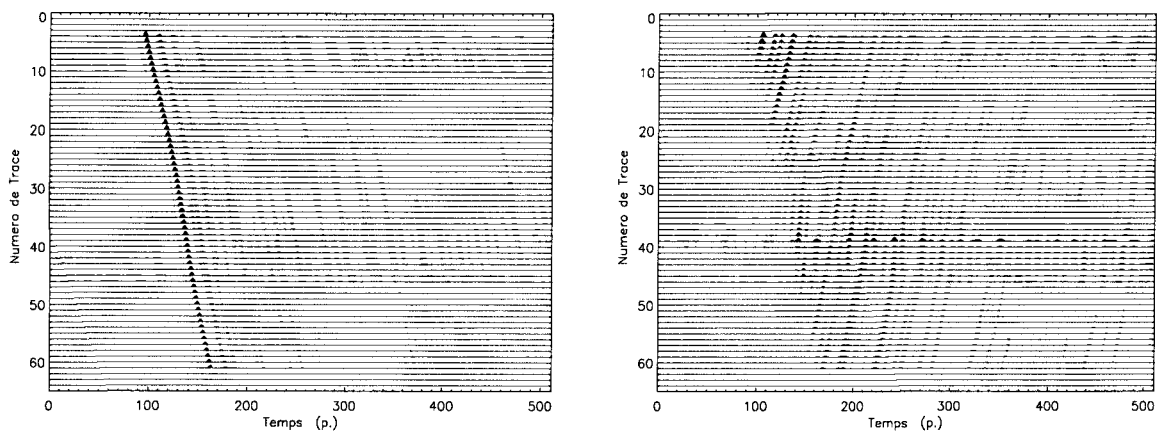


Figure 11. – Ondes  $P$  estimées (la descendante et la montante).



## Séparation paramétrique des ondes sismiques multicomposantes

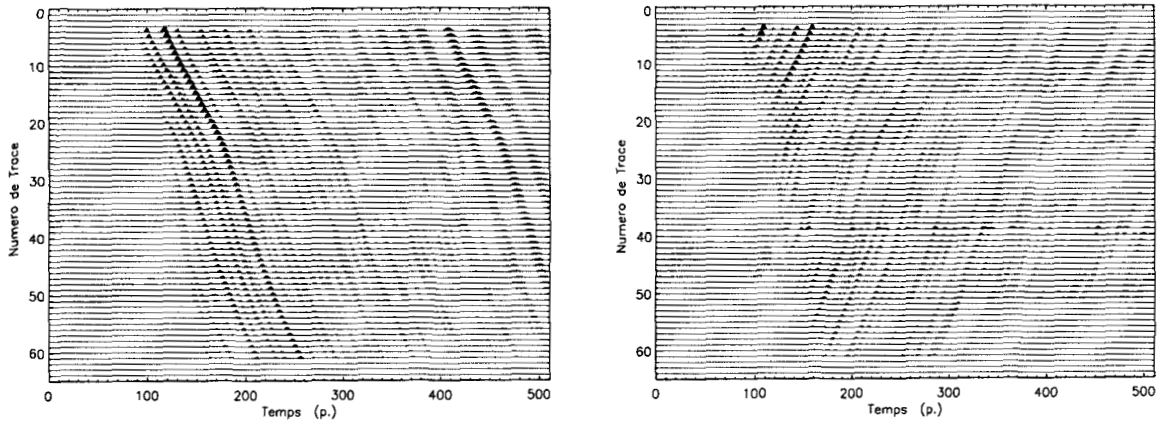


Figure 12. – Onde  $S$  estimées (la descendante et la montante).

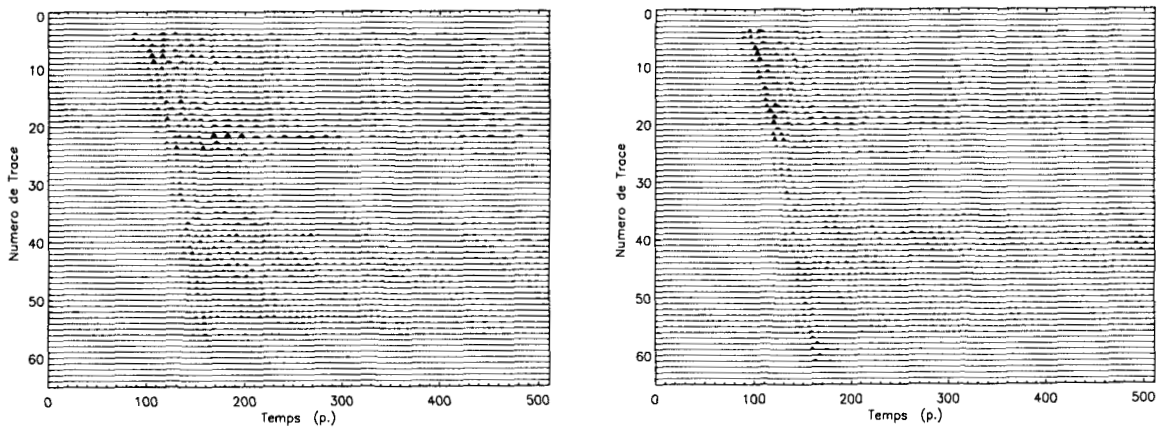


Figure 13. – Résidu de la séparation issu des deux composantes  $X$  et  $Z$ .

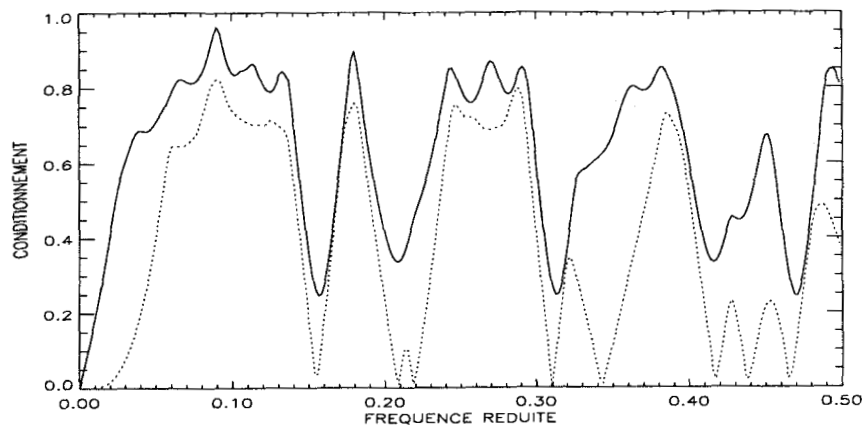


Figure 14. – Conditionnement des matrices  $A_{pol}$  (trait plein) et  $A$  (trait pointillé) pour  $K = 7$ .

– Quand on dispose de plusieurs traces avec  $\Delta$  constante (ce qui est le cas en PSO et en PSV), une estimation utilisant le filtrage  $f - k$  sera meilleure. Elle permet de réduire le nombre de paramètres à estimer ainsi que le temps de calcul. Une estimation conjointe donnera de meilleurs résultats pour des signaux issus d'une antenne composée de capteurs non équidistants ainsi que pour des signaux walkaway (antenne avec peu de capteurs).

– Si dans une section sismique, il existe une onde de tube (cas d'un PSV). Cette onde supplémentaire apparaîtra dans le résidu, car elle est légèrement dispersive et possède une polarisation rectiligne dans le plan perpendiculaire à  $XZ$ .

– Cette méthode peut être généralisée au cas de signaux enregistrés sur trois composantes. Elle peut être aussi appliquée à des ondes polarisées elliptiquement (le vecteur  $h$  est complexe) et à des signaux autre que ceux de la sismique de puits.

## 7. conclusion

Dans cet article, nous avons montré l'intérêt de l'estimation conjointe des paramètres de propagation et de la polarisation. L'utilisation d'une fenêtre spatiale glissante le long de la section sismique permet de décomposer le problème global de la séparation des ondes en un problème local plus simple à traiter, donc plus robuste aux différents termes d'erreurs. Ceci permet de réduire la charge de calcul en s'affranchissant du problème d'initialisation (sauf pour la première estimation) et permet aussi de mieux suivre les fluctuations spatiales de l'onde, fluctuations liées à celles du milieu de propagation.

La séparation paramétrique nécessite une charge de calcul relativement élevée, mais elle permet de séparer conjointement toutes les ondes et d'estimer leur vitesse de propagation. Le coefficient de Poisson est calculé à partir du rapport des vitesses des ondes  $P$  et  $S$ . Ce coefficient permet, d'obtenir des informations sur les propriétés physiques des roches [8].

Les résultats obtenus sur des signaux expérimentaux montrent l'efficacité de l'approche paramétrique proposée. La difficulté de cette approche réside dans le choix d'un bon modèle qui correspond à une bonne description des données expérimentales, car une estimation paramétrique implique l'existence d'un modèle physique sous-jacent, le plus souvent simplifié.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Esmeroy C., « Inversion of P and SV waves from multicomponent offset vertical seismic profiles », *Geophysics*, 1990, vol. 55, pp. 39-50.
- [2] Essebbar A., « Séparation paramétrique des ondes en sismique », thèse de Doctorat INPG, 1992.
- [3] Essebbar A., « Bayesian Parametric separation applied to Multicomponent seismic signals », *IEEE Signal Processing Letters*, Juillet 96, vol. 3, n°7, pp. 218-220.
- [4] Glangeaud F., Lacoume J.L., et Mars J., « Polarisation study of seismic signals by adaptative methods », *Proceedings EUSIPCO*, Grenoble 1988, pp. 983-986.
- [5] Glangeaud F., Gavin P., et Mari J.L., « Utilisation des valeurs propres de la matrice spectrale dans le temps », *Application à la prospection sismique*, *Revue TS*, 1993, vol. 10, n° 2, pp. 85-104.
- [6] Glangeaud F. et Mari J.L., *Wave separation*, Editions Technip, 1994.
- [7] Graffoulière Ph. et Essebbar A., « Multisensor Active Broadband Sonar in Multipath Propagation », *Congrès OCEANS'95*, Octobre 1995, pp. 1277-1280 San-Diego, USA.
- [8] Lavergne M., *Méthodes sismiques*, Edition Technip, 1986.
- [9] Mari J.L. et Coppens F., *La sismique de puits*, Editions Technip, 1989.
- [10] Menke W., *Geophysical Data Analysis : Discrete Inverse Theory*, Academic Press Inc., 1984.
- [11] Press W.H., Flannery B.P., Teukolsky S.A. et Vetterling W.T., *Numerical Recipes : The Art of Scientific Computing*, Cambridge University Press, 1989.
- [12] Schweppe F.C., « Sensor array processing for multiple sensor sources », *IEEE Trans. IT*, 1968, vol. 14, pp. 294-305.
- [13] Ziskind I. et Wax M., « Maximum likelihood localization of diversely polarized sources by simulated annealing », *IEEE Tran. on ASSP*, July 1990, vol. 35, n° 7, pp. 1111-1114.

Manuscrit reçu le 22 août 1995.

L' AUTEUR

Abderrahman ESSEBBAR



Né en 1964 à Rabat (Maroc). Maître en Modélisation et Logiciels d'Applications à l'Université Joseph Fourier (1988) et titulaire d'un doctorat en traitement du signal de l'Institut National Polytechnique de Grenoble en 1992. Il a travaillé dans le cadre du projet européen PARACOM-MAST (PARAMetric COMMunication, Marine And Science Technology). Ses principaux centres d'intérêt sont : les communications numériques et le traitement d'antenne avec des applications en sismique et en acoustique sous-marine.