

# Traitement de données vectorielles multicapteurs

## Application à l'acoustique sous-marine

Marianne Nardin (1), [Marianne.Nardin@cephag.inpg.fr](mailto:Marianne.Nardin@cephag.inpg.fr).  
 François Glangeaud (1), [Francois.Glangeaud@cephag.inpg.fr](mailto:Francois.Glangeaud@cephag.inpg.fr).  
 Jean-Michel Vanpé (1), [Jean-Michel.Vanpe@cephag.inpg.fr](mailto:Jean-Michel.Vanpe@cephag.inpg.fr).

CEPHAG-ENSIEG  
 Centre d'Etude des PHénomènes Aléatoires et Géophysiques  
 Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs en Electricité de Grenoble  
 Domaine Universitaire, B.P. 46  
 38402 Saint Martin d'Hères Cedex

### RÉSUMÉ

L'utilisation de données vectorielles multi-capteurs en acoustique sous-marine offre de nouvelles possibilités de séparation d'ondes. Nous proposons d'utiliser séquentiellement le traitement vectoriel (polarisation) puis le traitement multi-capteurs (antenne).

Pour l'étude de la propagation marine, sismique et acoustique en Ultra Basses Fréquences (U.B.F., entre 1 et 50 Hz), une estimation de la contribution du sous-sol sur des données réelles basée sur ce traitement séquentiel illustre l'intérêt de cette méthode.

## I) Introduction

L'un des buts du traitement de données vectorielles multicapteurs est de disjointer les ondes en définissant de nouveaux sous-espaces par différentes méthodes de séparation de sources basées sur l'estimation de la fonction de transfert de l'ondelette et la polarisation de la source. Une caractérisation de chacune des sources est effectuée dans ces nouveaux sous-espaces. Toute onde est assimilée à une source. Une application à l'analyse de la propagation en Ultra Basses Fréquences (U.B.F.) en milieu marin est présentée.

## II) Traitement utilisant la fonction de transfert

### a) Définitions et type de données

Les données sont issues de campagnes en mer conçues dans le but d'étudier la propagation « grand angle » entre la surface et le fond. Les tirs sont émis régulièrement sur une ligne, de part et d'autre du capteur, au voisinage de la surface. Les données sont de type vectoriel, 3 ou 4 composantes : elles sont fournies par 3 géophones sensibles

### ABSTRACT

The use of vectorial and multi-sensors data in underwater acoustics offers new possibilities for waves separation. We propose to use sequentially a vectorial method (polarisation), then a multi-sensors method (antenna).

For the study of the underwater, seismic and acoustic propagation, in Ultra Low Frequencies (ULF, between 1 and 50 Hz), an estimation of the underground contribution of real data based on this sequential processing illustrates the interests of this method.

aux mouvements et disposés selon un trièdre direct avec parfois adjonction d'un hydrophone sensible aux variations de pression. L'enregistrement de l'hydrophone situé comme les 3 géophones à l'interface eau-fond marin est proportionnel au vecteur du mouvement.

Chaque composante ou section sismique se présente sous la forme d'une matrice :

$$r(t, x(i)) = \left( r_1(t) \quad \dots \quad r_i(t) \quad \dots \quad r_N(t) \right)^T$$

où  $x$  représente la distance et  $i \in [1, N]$  indique les numéros de tirs et, par extension, la distance horizontale en considérant un intertir fixe.

Soit le  $i^{\text{ème}}$  tir de cette section sismique :

$$r_i(t) = \sum_{j=1}^p s_{i,j}(t) * a_j(t) + b_i(t)$$

où  $b_i(t)$  est un bruit additif sur le  $i^{\text{ème}}$  tir, aléatoire et indépendant du signal,  $s_{i,j}(t)$  décrit la propagation de la  $j^{\text{ème}}$  onde sismo-acoustique pour ce  $i^{\text{ème}}$  tir et  $a_j(t)$  caractérise la signature de cette  $j^{\text{ème}}$  onde.

Lors de telles expériences, l'onde peut être considérée comme localement plane. Soit  $H(v)$  la fonction de transfert intertirs pour la  $j^{\text{ème}}$  onde :

$$H(v) = \frac{TF[s_{i,j}(t)]}{TF[s_{k,j}(t)]}$$

Cette fonction de transfert est localement constante et varie lentement en fonction de la distance.

L'onde est caractérisée dans le repère (t, x) par sa fonction de transfert et son ondelette. Elle peut également être décrite par sa polarisation (cf. infra).

## b) Choix du traitement classique multi-capteurs

Ces méthodes sont basées sur l'estimation de la fonction de transfert de l'ondelette et la connaissance de la bande passante. Nous présentons tout d'abord le choix du traitement que nous utilisons (3 méthodes différentes sont proposées) puis nous faisons un bref récapitulatif des autres traitements multi-capteurs classiques en sismo-acoustique.

**La matrice spectrale (SMF)** [2] correspond à une analyse en sections propres dans le domaine des fréquences :

$$\begin{aligned} \underline{MS}(f) &= \text{Moy}\{TF(r(t,x(i))) \times TF(r(t,x(i)))^{T*}\} \\ &= \sum_{j=1}^N \lambda_j(f) \underline{V}_j(f) \underline{V}_j(f)^{T*} \end{aligned}$$

On peut sélectionner l'onde en sommant un nombre k suffisant de sections propres, 1 ou 2 suffisent généralement après un alignement de cette onde.

$$r_{inv}(t,x(i)) = TFI \left\{ \sum_{i=1}^k \langle \underline{V}_i(f) | TF(r(t,x(i))) \rangle \underline{V}_i(f) \right\}$$

Le traitement multi-capteurs de type SMF est très adapté à des données où le nombre des sources est restreint. Au-delà, l'estimation de la fonction de transfert de l'ondelette n'est plus efficace. Le domaine d'applications de tels algorithmes est fonction des hypothèses nécessaires pour les utiliser.

Trois types de moyennes sont utilisées et combinées : moyennage en fréquence, en distance et en épreuves. Certaines hypothèses sont en outre nécessaires : stationnarité locale des fonctions de transfert, pré-alignement des ondes, redondance de l'information...

1. Dans le cas de nos données multi-composantes, le moyennage d'épreuves est un moyennage des différentes composantes. Ce type de pré-traitement suppose que les fonctions de transfert et surtout la polarisation soient stables et que le sous-sol soit stationnaire en distance [7]. L'estimation de la fonction de transfert de l'ondelette est difficile car le nombre d'ondes en présence peut être grand.
2. Un traitement SMF puis un traitement par polarisation de la source à séparer suppose que le rapport S/B est faible sur chaque composante. De plus, le traitement SMF n'est pas optimal. En effet, on ne résout pas le problème de la diminution de la dimension de l'espace de travail par cet algorithme de séparation de sources.
3. La meilleure solution pour ce type de données est le traitement par polarisation de la source à sélectionner suivi de sa séparation à l'aide d'un traitement SMF dans

le nouveau sous-espace de dimension plus faible incluant cette source (cf. infra).

On peut citer d'autres méthodes couramment utilisées qui seront présentées ultérieurement.

## c) Autres traitements classiques multi-capteurs

**La décomposition en valeurs singulières ou transformée de Karhunen-Loève** [3], classique en traitement d'image est aussi utilisée lors de traitements de sections sismiques. Soit  $\underline{C}$  matrice de covariance de la section sismique, moyenne des matrices de covariance de chacune des traces composant cette section :

$$\underline{C} = \sum_{j=1}^N \text{sections propres} = \sum_{j=1}^N \underline{u}_j \lambda_j \underline{v}_j^T,$$

où  $\underline{u}_j$  et  $\underline{v}_j^T$  sont des vecteurs de la dimension d'une trace,  $\underline{u}_j$  traduit les variations d'amplitude,  $\lambda_j$  est la valeur propre associée à chacun des sous-espaces propres et N le nombre de tirs.

Ce traitement nécessite l'alignement précis de l'onde à extraire. Suivant les valeurs significatives des  $\lambda_j$ , on somme un certain nombre de sections propres pour obtenir celle contenant l'onde à séparer. Le temps de calcul est assez long.

**Le filtre f-k** [4] nécessite à la fois un très bon échantillonnage tant du point de vue temporel que du point de vue spatial et une grande stationnarité entre chaque trace. Ces conditions satisfaites, l'onde mise à plat précisément est facilement extraite par un filtre en nombre d'onde k. L'espace mémoire nécessaire est très important et l'hypothèse d'approximation en ondes planes est requise.

**La séparation d'ondes selon la méthode paramétrique** [5] nécessite de connaître le nombre n d'ondes contenues dans la section sismique. Ces ondes doivent satisfaire l'approximation d'ondes planes. Cette méthode est basée sur l'estimation du retard entre traces, propre à chaque onde, même si ce signal est de courte durée. Elle est dite haute résolution mais elle exige déjà une interprétation poussée de la section sismique considérée.

**Le filtre médian** [6] rapide et efficace est utilisé en cascade. Mais, il nécessite un pas en distance suffisamment petit et difficile à obtenir ainsi qu'un alignement précis de l'onde. Il ne conserve pas l'information de l'amplitude. C'est un traitement non linéaire.

**La transformée de Radon**, apportant par inversion des informations sur la vitesse de propagation des ondes, peut compléter ces traitements.

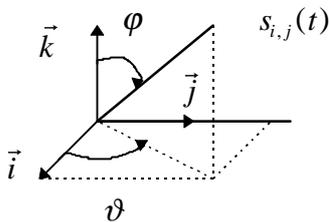
En résumé, ces traitements classiques de sections sismiques sont efficaces mais restent très coûteux en temps de calculs en raison des importants volumes et de la complexité des données à traiter. De plus, les hypothèses nécessaires sont souvent très contraignantes : stabilité de la fonction de transfert et de l'ondelette dans les sections sismiques traitées. Enfin, l'estimation de cette même fonction de transfert et de cette ondelette n'est pas évidente et donne de bons résultats dans le cas où le nombre d'ondes présentes est faible.

### III) Traitement par rotation d'un récepteur multi-composantes

Une onde peut être également décrite en termes de polarisation. Elle est caractérisée angulairement selon son mode de vibration et sa direction d'arrivée. On suppose que la polarisation d'une onde est indépendante de la fréquence et localement stationnaire en fonction de la distance. De plus, les ondes étudiées sont soit longitudinales de type P ou soit transversales de type S ; leurs polarisations sont quasi-linéaires c'est-à-dire rectilignes, orientées soit dans le sens de la propagation soit perpendiculairement.

#### a) Dans le cas de 3 composantes

Soit le repère de base  $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$  orthonormé.



A une distance fixée et à une fréquence  $f$  donnée, on peut définir le signal caractéristique de la  $j^{\text{ème}}$  onde du  $i^{\text{ème}}$  tir enregistré sur les 3 capteurs :

$$\vec{s}_{i,j}(t) = s_{i,j,1}(t)\vec{i} + s_{i,j,2}(t)\vec{j} + s_{i,j,3}(t)\vec{k}$$

$$\text{où : } s_{i,j,1} = a_1 \cos(2\pi f t + \varphi_1) \times e(t),$$

$$s_{i,j,2} = a_2 \cos(2\pi f t + \varphi_2) \times e(t),$$

$$s_{i,j,3} = a_3 \cos(2\pi f t + \varphi_3) \times e(t),$$

avec  $e(t)$  l'enveloppe du signal caractéristique de la source.

Soit  $\vec{k}(t_1) = \frac{\vec{s}_{i,j}(t_1) \wedge \vec{s}_{i,j}(t_2)}{|\vec{s}_{i,j}(t_1) \wedge \vec{s}_{i,j}(t_2)|}$  où  $\wedge$  désigne le produit

vectorel.

Ce dernier vecteur permet de déterminer le plan de l'ellipse, les caractéristiques de l'ellipse et son sens de rotation.

Puis, dans le plan de l'ellipse, le signal est caractérisé par les 2 équations suivantes :

$$s'_{i,j,1} = a'_1 \cos(2\pi f t + \psi_1) \times e(t),$$

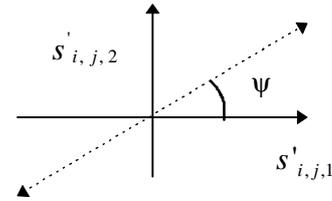
$$s'_{i,j,2} = a'_2 \cos(2\pi f t + \psi_2) \times e(t).$$

Une polarisation elliptique est la somme de 2 polarisations rectilignes perpendiculaires.

Une polarisation rectiligne est identifiée par le rapport

$$\frac{s'_{i,j,1}}{s'_{i,j,2}} = \frac{1}{\tan \psi},$$

qui ne dépend ni de la fréquence ni du temps et de fait est une constante.



L'angle  $\psi$  est déterminé par l'étude précise de la polarisation de cette onde, il permet de la sélectionner sur une seule composante par rotation d'angle  $\psi$ . En changeant de sous-espaces pour les 2 composantes précédentes suivant cette rotation d'angle  $\psi$ , on définit 2 nouveaux sous-espaces : l'un contient toute l'onde sélectionnée et l'autre le bruit ainsi que les autres ondes en entier ou en partie.

Plus simplement,  $\vec{s}_{i,j}(t)$  s'écrit :

$$s_{i,j,1}(t) = r_1(t) \sin \varphi \cos \vartheta,$$

$$s_{i,j,2}(t) = r_2(t) \sin \varphi \sin \vartheta,$$

$$s_{i,j,3}(t) = r_3(t) \cos \varphi,$$

avec  $r_1(t)$ ,  $r_2(t)$  et  $r_3(t)$  ayant localement la même enveloppe temporelle.

L'étude de la polarisation revient à déterminer les angles  $\varphi$  et  $\theta$  nécessaires pour effectuer les rotations qui permettent de définir un sous-espace contenant l'onde à séparer et un sous-espace contenant le bruit et d'autres ondes.

Ce triplet de coordonnées est complété parfois par  $s_{i,j,4}$  représentant les variations de pression. On généralise la polarisation à 4 composantes.

#### b) Dans le cas de 4 composantes

4 composantes de natures différentes sont étudiées (3 issue de géophones et 1 issue d'un hydrophone) : **fusion de données sismo-acoustique**.

La fonction de transfert entre l'hydrophone et les géophones est estimée, ainsi les 4 composantes sont ramenées à des sous-espaces de même nature. On revient à un problème classique d'étude de polarisation d'onde avec 4 composantes au lieu de 3. L'étude de la polarisation d'une source permet de réorienter une des composantes selon la direction privilégiée de cette source afin de la sélectionner. Ainsi, on définit des sous-espaces dont la dimension est plus faible et où la source est incluse. Ce traitement à lui seul permet de sélectionner cette source sur une seule composante mais il ne permet pas sa séparation totale. Un traitement de type SMF complète le traitement vectoriel en permettant d'isoler cette source.

### IV) Application à des données réelles

Le traitement retenu (3 - traitement par polarisation de l'onde suivi de sa séparation à l'aide d'un traitement SMF dans le nouvel espace défini) est appliqué sur des données 4 composantes de la campagne Rinalig.

Les figures ci-dessous représentent 2 des 4 composantes initiales ainsi que les 2 étapes de traitement qui permettent

d'obtenir la séparation des 3 ondes contenues dans les sections initiales.

A chaque tir est associé un signal d'une longueur temporelle de 2 secondes (largeur de la fenêtre en abscisse). Entre chaque tir, le bateau se déplace de 450 mètres, cet espace représente la distance entre deux tirs ou entre deux signaux. Comme nous représentons en ordonnées 24 tirs pour chaque section sismique, nous avons au total une distance de 10,350 km. L'astérisque désigne le point de passage du bateau au plus près de la position du capteur disposé sur le fond marin. De part et d'autre de ce point, l'émetteur s'éloigne du récepteur.

On rappelle qu'en considérant le milieu de propagation linéaire, le système expérimental déployé (un capteur, l'O.B.S., avec  $n$  tirs) est équivalent à une antenne avec  $n$  capteurs et un seul émetteur. Ainsi, l'émetteur et les récepteurs sont inversés par rapport aux configurations classiques d'expérience en acoustique sous-marine.

Sur la première ligne, on retrouve les 2 sections sismiques initiales sur lesquelles le traitement vectoriel et le traitement multi-capteurs sont appliqués :

- la composante initiale verticale relative au géophone vertical (V),
- la composante relative à l'hydrophone (Hy).

Sur la deuxième ligne, les différents résultats après traitements sur ces 2 sections sismiques sont représentés.

Sur les sections sismiques initiales V et Hy, 3 ondes sont visibles : l'onde directe (od) matérialisée par un trait gras continu, et 2 ondes réfractées (or1 et or2) qui se sont à la fois propagées dans le sous-sol et l'eau. « or1 » et « or2 » sont respectivement encadrées, d'une part par un rectangle en trait gras et, d'autre part par un rectangle en trait fin. « od » est matérialisée par une trajectoire hyperbolique en raison de la configuration émetteurs-récepteur. « or1 » et « or2 » sont alignées : elles ont une vitesse infinie de propagation soit, en termes de traitement d'antenne, chacune d'entre elles arrive sur l'ensemble des capteurs en même temps. De plus, ayant la même loi d'alignement, elles ont la même vitesse de propagation tout en ayant effectué un trajet différent : un aller et retour supplémentaire dans la couche sédimentaire considérée pour « or2 ».

Le couple de sections sismiques V et Hy est transformé par une rotation telle que « or2 » disparaît, « or1 » est amplifiée et « od » est conservée. Le résultat est présenté sur la section sismique ROT. « or1 » est ensuite isolée par un traitement SMF comme le montre la section sismique SMF. Cette sélection est efficace, car, l'onde « or1 » se distingue alors de part et d'autre du capteur.

## V) Conclusion

Sur de tels types de données pour séparer les sources, il faut créer de nouveaux sous-espaces où les ondes sont disjointes ou en nombre plus faible. Ensuite, dans ce nouveau sous-espace, le traitement multi-capteurs est tout à fait judicieux.

## VI) Références

- [1] Glangeaud, F., Mari, J.L., Coppens F., 1997, Traitement du signal pour les géologues et les géophysiciens, Editions Technip, Paris, 300 p.
- [2] Glangeaud, F., Mari, J.L., 1994, Wave separation, Editions Technip, Paris, 105 p.
- [3] Freire S., Ulrych L.M., Tad J., 1988, Application of singular value decomposition to vertical seismic profiling, Geophysics, Vol. 53, N°6, 778-785.
- [4] Hemon C.H., 1966, Seismic filtering, SEG et Editions Technip, Paris, 223 p.
- [5] Harris P.E., Kerner C.J. and White R.E., 1992, Multichannel estimation of frequency dependent Q from VSP data, 54th meeting EAGE, Paris.
- [6] Ducan G. and G. Bereford, 1995, Median filter behaviour with seismic data, Geophysical prospecting, N°43, 329-345.
- [7] Glangeaud F., Lacoume J.L., Mars J., Dubesset M., Cllet C. et Lambert M., 1988, Polarization study of seismic signals by adaptative methods, Signal Processing IV, 98-101.

## VII) Remerciements

Nous remercions pour la campagne Rinalig (A) S. Gaffet, directeur des opérations, ainsi que la DGA et le LDG.

