



**EXTRACTION D'UN SIGNAL UTILE NOYÉ DANS UN BRUIT SPATIALEMENT COHÉRENT:  
LA FORMATION DE VOIE PONDÉRÉE: APPLICATION A UN RESEAU DE MAGNÉTOMETRES**

Bruno Flament, Stéphane Guédon, Roland Blanpain

LETI (CEA-DTA) DSYS-CEN/G-85X  
F 38041 Grenoble Cedex  
E-mail: flament@dsys.ceng.cea.fr

RÉSUMÉ

Nous présentons une méthode d'extraction d'un signal utile à durée limitée noyé dans un bruit spatialement cohérent en espace. La technique utilisée est adaptée des méthodes de formation de voie classiques. Les signaux issus des  $N$  capteurs du réseau sont d'abord pondérés par des coefficients calculés selon leur degrés d'appartenance à l'ensemble des capteurs qui reçoivent du signal utile. Cette méthode est appelée formation de voie pondérée. Nous proposons une méthode de calcul automatique des coefficients de pondération basée sur un test de cohérence spatiale des signaux reçus. Une application en détection magnétique est présentée.

## 1. Introduction

### 1.1. La détection par réseau magnétique

L'utilisation de réseaux de capteurs magnétiques permet d'effectuer la surveillance de zones océaniques ou terrestres. En détection sous-marine, les cibles progressent toujours en discrétion acoustique et leur localisation par fonds faibles est difficile. Le futur système de détection pourra intégrer l'utilisation d'un réseau de capteurs magnétiques pour relayer des méthodes classiques. Leur collaboration permettra ainsi de résoudre les problèmes difficiles en détection.

Cette étude fait suite à une précédente communication [FLAMENT 91]. Nous étudions une méthode de séparation des signaux parvenant sur une antenne de capteurs magnétiques pour retrouver le signal cible, et permettre le calcul des paramètres de localisation. La méthode de projection pondérée permet d'améliorer la séparation réalisée par la formation de voie classique, en y intégrant une éventuelle information sur les signaux reçus par chaque capteur.

Nous proposons maintenant une méthode de génération automatique de cette information. Le système est ainsi autonome et réalise seul la séparation, sans information extérieure.

### 1.2. Contexte de l'étude

Nous nous intéressons au problème de la détection et de la séparation d'un signal magnétique utile à durée limitée, noyé dans un bruit spatialement cohérent.

La méthode proposée dans [FLAMENT 91], appelée formation de voie pondérée, permet, si certains capteurs sont suspectés de recevoir du signal utile, d'améliorer la séparation. Cette méthode se situe entre les méthodes de soustraction de bruit, où des capteurs de référence de bruit sont connus, et la formation de voie classique où tous les capteurs jouent le même rôle. Elle permet d'incorporer au traitement une information, même incertaine sur la partition de l'ensemble des indices des capteurs  $E$  en un sous-ensemble des

ABSTRACT

We present a separation method able to extract a time limited signal from a spatially coherent noise. The technique presented here is called wheighted beamforming and is based on the classical beamforming method. The  $N$  signals measured by an  $N$  sensor array are first processed into an apodising function. The  $N$  wheight factors should be computed for every sensor. Their value closely depends on their belonging to the noise only sensor set or to the signal sensor set. We present here an automatic method for the apodising function computation. It is based on a spatial coherence test that detects the signal sensors. The wheighted beamforming is then applied on a magnetic detection network.

capteurs bruit seul  $E_{ref}$  et son complémentaire dans  $E$ , nommé  $E_{su}$ , dont les capteurs reçoivent également du signal utile.

Nous proposons ici une méthode de partition de l'ensemble des capteurs en  $E_{ref}$  et  $E_{su}$  permettant de générer automatiquement les coefficients de pondération nécessaires à la formation de voie pondérée.

Dans la seconde partie, nous donnons le modèle des signaux utilisé. Nous rappelons ensuite la méthode de formation de voie pondérée dans la troisième partie. Puis nous montrerons, dans la partie 4 comment les pondérations affectées à chaque capteur peuvent être calculées. Une application sur un réseau à 5 capteurs montre enfin les résultats de la méthode dans la partie 5.

## 2. Modèle des signaux reçus par le réseau

Nous considérons un réseau de  $N$  magnétomètres fixes. Chaque capteur mesure la somme de plusieurs effets externes: le bruit géomagnétique, le signal utile de la cible, en plus des effets internes de bruit propre au capteur que nous négligeons dans la suite.

### 2.1. Le signal utile

Le signal utile est du au déplacement relatif des capteurs et d'un objet d'aimantation non nulle. Ce dernier déforme les lignes de champ magnétique dans son voisinage. Son mouvement par rapport aux sondes provoque l'apparition d'un signal de durée finie sur un certain nombre de capteurs. En pratique, le réseau est disposé de façon à ce que les effets magnétiques des cibles traquées, ne puissent être vus par toutes les sondes en même temps. A chaque instant, nous pouvons considérer qu'au plus 3 sondes du réseau sont touchées par le signal cible. Nous remarquons que les ensembles  $E_{su}$  et  $E_{ref}$  sont variables avec le temps.

### 2.2. Les pulsations géomagnétiques

Les pulsations géomagnétiques sont générées pour leur majeure partie, par l'interaction des vents solaires avec la magnétosphère et l'ionosphère terrestre. Selon une analyse "fonctionnelle" des



signaux géomagnétiques [BERDICHEVSKI 84], il est montré que si l'onde primaire géomagnétique peut être considérée comme plane, alors le champ magnétique mesuré en un point quelconque de l'espace et la somme de deux signaux indépendants.

C'est cette propriété de cohérence spatiale que nous allons exploiter.

### 2.3. Conclution

Les signaux parvenant sur le réseau magnétique sont constitués de la somme du signal géomagnétique et du signal utile. Le signal utile n'est présent que sur un nombre limité de capteurs. Nous pouvons écrire, si une cible est présente (hypothèse  $H_1$ ):

$$C(\nu) = F^t(\nu)B(\nu) + B_{\text{utile}}(\nu)$$

$$= \begin{bmatrix} F_1^u(\nu) & F_1^v(\nu) \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots \\ F_N^u(\nu) & F_N^v(\nu) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B^u(\nu) \\ B^v(\nu) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{\text{utile } 1}(\nu) \\ \dots \\ B_{\text{utile } k}(\nu) \\ \dots \\ B_{\text{utile } N}(\nu) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$B^u(\nu)$  et  $B^v(\nu)$  sont les transformées de Fourier des pulsations géomagnétiques enregistrées en un point fictif de référence, selon des directions indépendantes  $u$  et  $v$  et:

$$B_{\text{utile } k}(\nu) \neq 0 \text{ si } k \in E_{su}$$

Si aucune cible n'est présente (hypothèse  $H_0$ ),  $B_{\text{utile}}$  est nul pour tous les capteurs.

### 3. Formation de voie sur le réseau

Notre but est d'extraire le signal utile du réseau de capteurs. Nous proposons une démarche qui consiste à extraire tout d'abord le bruit géomagnétique, puis à soustraire cette estimée du signal de réseau  $C$ . On obtient ainsi l'estimée du signal utile parvenant sur tous les capteurs du réseau.

#### 3.1. Estimation du bruit spatialement cohérent

L'estimation des fonctions de transfert de propagation des pulsations géomagnétiques peut être réalisée par identification sur une tranche de signal de réseau, lorsque le signal utile n'est pas présent. Les vecteurs de propagation  $F^u$  et  $F^v$  qui constituent la matrice de propagation du bruit géomagnétique sont vecteurs propres de la matrice interspectrale formée sur le signal de réseau  $C$  [LACOME 88]. L'estimation du bruit géomagnétique peut se faire par projection du signal de réseau sur l'espace formé par les deux premiers vecteurs propres de la matrice interspectrale. Si  $E_1$  et  $E_2$  sont les vecteurs propres associés aux valeurs propres les plus grandes de la matrice interspectrale, alors le bruit géomagnétique sur le réseau peut être estimé par:

$$\hat{B}_{\text{gmag}}(\nu) = \sum_{i=1}^2 [E_i^*(\nu)C(\nu)]E_i(\nu) \quad (2)$$

Cet estimateur réduit les bruit spatialement incohérents. Nous voulons obtenir un estimateur du bruit géomagnétique dans l'hypothèse où le signal utile est présent sur le réseau.

#### 3.2. Estimation en présence de signal utile

L'utilisation directe de l'estimateur (2) en présence de signal utile, conduit à une erreur due aux voies qui présentent un signal utile non nul. Le calcul de la différence entre l'estimée du bruit géomagnétique sans signal utile et l'estimée avec signal utile fait apparaître l'effet néfaste du signal utile:

$$\Delta B = (\hat{B}_{\text{gmag}} / H_1) - (\hat{B}_{\text{gmag}} / H_0)$$

$$= \sum_{i=1}^2 \sum_{p \in E_{su}} (E_{ip}^*(\nu)B_{\text{utile } p}(\nu))E_i(\nu)$$

L'erreur commise sur le bruit géomagnétique est due à la projection d'une partie du signal utile sur le sous-espace bruit géomagnétique, généré par les 2 premiers vecteurs propres de la matrice interspectrale. Nous désirons modifier l'estimateur de façon à réduire son erreur.

La priorité est d'éliminer les capteurs qui reçoivent du signal utile ou en règle générale, un signal autre que le bruit géomagnétique.

### 3.3. La formation de voie pondérée

Nous proposons de modifier les signaux issus des capteurs avant de les utiliser dans (2). Selon l'information dont on dispose, chaque capteur se voit affecter un coefficient  $\beta$  dépendant du temps, dont la valeur prise entre 0 et 1, reflète son appartenance à  $E_{su}$  ou  $E_{ref}$ .

Si ces coefficients  $\beta_p(t)$  sont connus, la formation de voie pondérée agit sur les signaux de la façon suivante:

- pondération:

$$\tilde{c}_k(t) = \tilde{\beta}_k(t) c_k(t) \text{ avec : } \tilde{\beta}_k(t) = N \frac{\beta_k(t)}{\sum_{p=1}^N \beta_p(t)}$$

- projection sur le sous-espace signal géomagnétique:

$$\tilde{B}_{\text{gmag } p}(\nu) = \sum_{i=1}^2 \left( \sum_{k=1}^N E_{ik}^*(\nu) \tilde{c}_k(\nu) \right) E_{ip}(\nu) \text{ où}$$

$E_{ip}$  est la  $p^{\text{ème}}$  composante du  $i^{\text{ème}}$  vecteur propre de la matrice interspectrale.

$\tilde{B}_{\text{gmag } p}$  est l'estimée du bruit géomagnétique sur la  $p^{\text{ème}}$  voie.

$c_k$  est le signal du  $k^{\text{ème}}$  capteur

Dans le cas où la partition dynamique est connue et certaine, on affecte aux capteurs de  $E_{su}$  un coefficient égal à 0 et aux autres un coefficient égal à 1. Si la partition est inconnue, une éventuelle information extérieure permet de fixer la valeur des coefficients.

Les méthodes de soustraction de bruit emploient des coefficients constants et égaux soit à 0, pour les voies où du signal utile est présent, ou à 1 pour les voies de référence bruit seul.

### 4. La partition capteurs utiles, capteurs bruit seul

Nous proposons un mode de calcul automatique des coefficients  $\beta$ . On utilise la connaissance du mode de propagation du bruit géomagnétique. Cette connaissance peut être issue d'un modèle physique ou du calcul de la matrice interspectrale formée sur le réseau en l'absence de signal utile.

A chaque instant, la cohérence spatiale du signal du réseau est testée. Pour ce faire, on utilise la prédiction du bruit géomagnétique réalisée par un groupe de sondes de taille supérieure ou égale à 2. Cette prédiction peut être réalisée en toute autre sonde du réseau. La comparaison de cet estimateur de prédiction spatiale avec les signaux réellement enregistrés donne une erreur de prédiction. Si cette erreur de prédiction est non nulle, une des sondes du groupe de prédiction ou la sonde sur laquelle on a effectué la prédiction voient du signal utile. Pour lever l'indétermination, plusieurs prédictions spatiales sont réalisées, en modifiant le groupe de sondes à chaque fois. Le paragraphe suivant détaille cette méthode de prédiction spatiale, basée sur l'utilisation du propagateur.

#### 4.1. Calcul des erreurs de prédiction: le propagateur

Le signal de chaque capteur du réseau est la somme des pulsations géomagnétique plus un éventuel signal utile.

On peut extraire un sous-réseau à 2 capteurs de l'ensemble des  $N$  capteurs. Ce sous-réseau est appelé groupe de prédiction. La prédiction spatiale des pulsations géomagnétiques parvenant sur les autres sondes se fait par application de la matrice du propagateur [MUNIER 87] sur le sous-réseau

Le propagateur est une matrice  $N-q$  lignes par  $q$  colonnes, calculée à partir de la matrice interspectrale des pulsations géomagnétiques. Cette matrice comprend  $q$  colonnes qui correspondent aux signaux utilisés pour réaliser la prédiction.  $q$  est égal au nombre de signaux cohérents spatialement et indépendants qui parviennent sur le réseau.

Pour les pulsations géomagnétiques,  $q$  est égal à 2. En outre, les  $q$  signaux choisis doivent être indépendants.



Selon le modèle des signaux reçus (2), on voit que  $F$  peut être scindée en deux sous-matrices:

$$F = \begin{bmatrix} F_1^u(v) & F_1^v(v) \\ F_2^u(v) & F_2^v(v) \\ F_3^u(v) & F_3^v(v) \\ \dots & \dots \\ F_N^u(v) & F_N^v(v) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ \dots \\ Y \end{bmatrix} \text{ où } X(2,2) \text{ et } Y(N-2,2) \quad (3)$$

Comme  $F$  génère un espace de dimension 2, il est possible de trouver  $X$  inversible. On suppose que  $X$  est formé comme dans (3) sur les 2 premiers capteurs. Alors:

$$\begin{bmatrix} \hat{C}_3(v) \\ \dots \\ \hat{C}_N(v) \end{bmatrix} = YX^{-1} \begin{bmatrix} C_1(v) \\ C_2(v) \end{bmatrix} \text{ avec } P=YX^{-1} \text{ le propagateur.}$$

On peut ensuite former les erreurs de prédiction en réalisant la différence entre le signal reçu et le signal prédit par le propagateur:

$$E_k^p(v) = \hat{C}_k^p(v) - C_k(v) \text{ où } p \text{ désigne le propagateur choisi}$$

Il existe plusieurs combinaisons possibles pour former le groupe de prédiction. Les prédictions réalisées sont donc indicées par un indice de groupe  $p$ . La coopération judicieuse des différentes erreurs permet de lever l'indétermination.

La formation du propagateur peut se faire directement à partir de la matrice interspectrale du réseau. Son calcul est détaillé dans [MUNIER 87]

#### 4.2. Calcul des coefficients de pondération

Une fois les groupes de prédiction constitués, il faut détecter un signal dans les erreurs calculées. On se trouve face au problème classique de la détection d'un signal dans du bruit [VAN TREES 68]. Les multiples résultats doivent être ensuite combinés pour retrouver les coefficients de pondération  $\beta_k(t)$ . Le système est dépendant de  $q$ . Nous en donnons d'abord les principes. Une application dans le cas simple  $q=1$  illustre ensuite une implémentation.

Dans le cas de la formation de voie pondérée, les signaux  $\beta_k(t)$  peuvent prendre toutes les valeurs entre 0 et 1. Pour utiliser cet avantage, nous avons choisi de gérer des indices de détection sous forme de probabilité de présence. On gère ainsi des passages continus de la non présence du signal cible à sa présence certaine. La théorie des connaissances incertaines ou imprécises fournit un cadre adapté à nos besoins [PIQUES 92].

##### 4.2.1. Représentation d'un fait incertain

Les faits que nous allons gérer et combiner sont tous issus de la détection d'un signal dans du bruit. Dans le cas de la détection d'un signal dipolaire dans du bruit, c'est la technique du filtrage adapté qui est optimale. A chaque instant, une décision de détection est faite. Elle doit être accompagnée de son degrés de certitude.

La représentation d'un fait incertain noté  $A$  (ici, la détection d'un signal), est représentée par un intervalle de probabilité  $[P_-(A), P_+(A)]$ .  $P_-(A)$  est la borne inférieure de la probabilité de  $A$ ,  $P_+(A)$  est la borne supérieure. On remarque que cette représentation des faits reste très proche des méthodes classiques de Bayes, mais permet de tenir compte d'erreurs de modèles sur les types de lois de probabilité employées.

##### 4.2.2. Les opérateurs

Les connaissances représentées par des intervalles de probabilités peuvent être manipulées: si plusieurs indices de détection sont présents, il faut pouvoir les combiner pour extraire la décision finale.

Les opérateurs de conjonction, disjonction permettent de combiner les informations propres à différents faits incertains. On peut ainsi calculer:

$$P(A \cap B) \text{ et } P(A \cup B)$$

Il est possible également de combiner des information incertaines qui portent sur le même fait  $A$ , mais de provenances différentes: ce

sont les opérateurs d'agrégation nommés *Join* et *Meet*. Enfin, des règles similaires à celles d'un système expert peuvent être implantées:

Si E Alors H

## 5. Application à la détection magnétique

### 5.1. Modèle simplifié des signaux magnétiques

Dans ce paragraphe, on reprend le modèle des signaux présenté en détection magnétique, simplifié pour  $q=1$ . Pour un réseau magnétique de détection en milieu océanique, cette hypothèse est respectée dans la mesure où les sondes sont immergées à une même profondeur et où les éléments perturbateurs (côtes, courants marins) sont à grande distance par rapport à la taille du réseau. Le signal de pulsations géomagnétiques enregistré est alors identique d'une sonde à l'autre. La figure 4 représente les signaux obtenus par le réseau expérimental.

### 5.2. Apprentissage de la propagation du bruit géomagnétique

On suppose que la phase de détection est précédée d'une phase durant laquelle le réseau est opérationnel mais n'enregistre aucun signal utile. Cette phase est la phase dite "d'apprentissage".

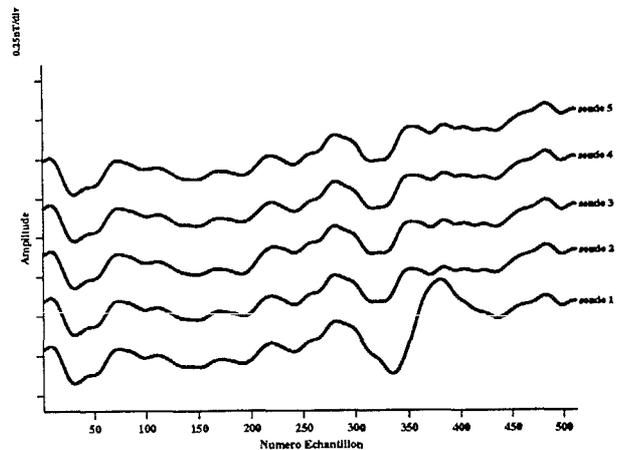


Figure 4: Le signal de réseau expérimental. 5 capteurs à Résonance Magnétique Nucléaire sont disposés sur un milieu stratifié (Vercors). Un dipôle magnétique passe au milieu du champ des capteurs pour générer le signal utile.

Si le mode de propagation du bruit géomagnétique est inconnu, on peut calculer la matrice interspectrale pour identifier la dimension  $q$  du sous-espace bruit géomagnétique. On vérifie que  $q$  est égal à 1, en comptant les valeurs propres non nulles.

L'étude des fonctions de transfert associées à la valeur propre dominante nous montre que les filtres intercapteurs sont pratiquement égaux à l'identité.

### 5.3. Génération des erreurs de prédiction

Dans le cas  $q=1$ , les erreurs de prédictions sont construites à l'aide de couples de capteurs. Pour  $N$  capteurs, il est possible de construire  $N(N-1)/2$  couples différents. Les propagateurs sont simplement des filtres linéaires déduits à partir de la matrice interspectrale. Les erreurs de prédiction spatiales peuvent alors s'écrire:

$$e_k^j(t) = c_k(t) - f_{jk}(t) * c_j(t) \text{ où } f_{jk}(t) \text{ est la réponse impulsionnelle du filtre prédictif de la sonde } j \text{ à la sonde } k$$

Pour le signal magnétique enregistré, nous utilisons les fonctions de transfert identifiées par la matrice interspectrale. Elles sont très proches de l'identité.

### 5.4. Le système de décision compilé

La détection d'un signal non nul dans une erreur de prédiction  $e_k^j(t)$  signifie que l'un ou l'autre des capteurs  $k$  ou  $l$  enregistre un signal supplémentaire au bruit géomagnétique. Il nous faut d'abord détecter un signal non nul, dipolaire, dans du bruit. En théorie, le bruit qui subsiste sur les erreurs de prédiction est le bruit des capteurs, que l'on peut considérer comme blanc dans la partie utile



de la bande. La technique du filtrage adapté est donc optimale. Pour généraliser la méthode et détecter également des anomalies de fonctionnement éventuelles des capteurs, nous avons associé au filtrage adapté un détecteur Proportionnel Intégrale Dérivée qui réalise une détection sur  $e_k^j(t)$ , sur sa dérivée et son intégrale.

La figure 5 présente schématiquement le système de traitement des indices de détection P,I,D et F (Forme).

Pour un capteur  $p$ , tous les couples  $(p,i)$  sont formés. On dispose ainsi de  $N-1$  erreurs de prédiction, à chaque instant.

La branche de droite traite les indices PID. Les PID propres à un couple sont d'abord réunis par un OR. Nous cherchons en effet à détecter un événement quelconque; il suffit que l'une des indices P,I ou D réponde. Un vote entre les différents "avis" de tous les couples  $(p,i)$  ( $i$  varie de 1 à  $N$  sauf  $p$ ) est ensuite effectué. En fait, il suffit que l'une des erreurs de prédiction  $(p,l)$  soit nulle pour que le capteur  $p$  soit exempt de signal dipolaire. Dans le cas contraire, toutes les erreurs de prédiction sont non nulles. L'opérateur VOTE réalise cette combinaison.

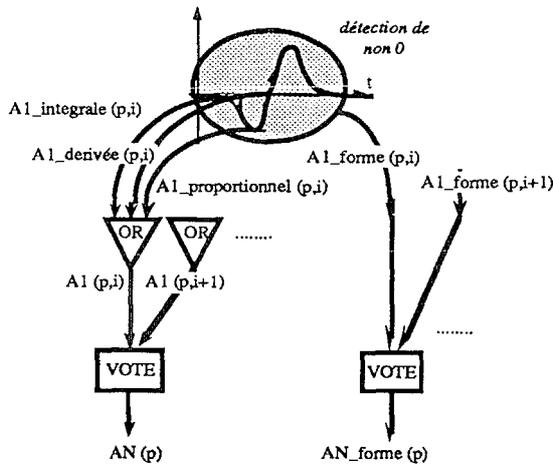


Figure 5: Le système de décision prend en entrée les indices de détection sous forme de couples de probabilité issus des erreurs de prédiction. 4 types d'indices sont utilisés selon l'erreur de prédiction, sa dérivée, son intégrale, et la sortie du filtrage adapté.

La branche de gauche du système procède de la même façon sur les indices de détection F, propres aux signaux dipolaires.

Selon le but recherché, ou les hypothèses de départ, on utilise les résultats issus des indices PID ou ceux du filtrage adapté, ou une combinaison des deux. Nous avons combiné les deux types de détection par un opérateur d'agrégation réalisant le raisonnement suivant: La détection PID est nécessaire à la présence d'une cible, mais non suffisante, et la détection par la voie F est suffisante à la présence d'une cible, mais non nécessaire.

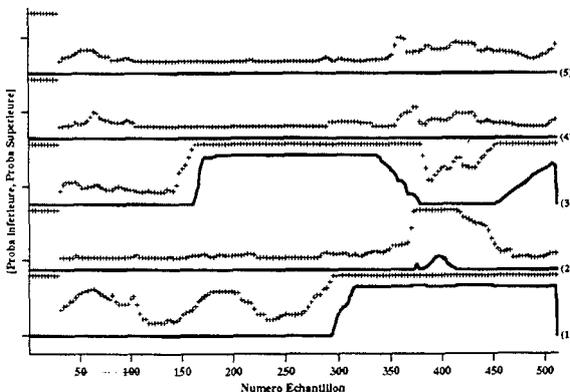


Figure 6: Les indices de détection utilisés comme coefficients de pondération pour la formation de voie pondérée. Pour chaque capteur, un couple de probabilité encadre la probabilité de présence d'une cible. La cible est bien détectée sur les voies 1 et 3. La sonde 2 montre également le passage du dipôle.

Les indices de détection calculés sont représentés sur la figure 6. L'utilisation des couples de probabilité fournis permet de réaliser la pondération avec les probabilités inférieures, ou les probabilités supérieures. Le premier cas ne retire un capteur qu'à coup sur:  $E_{ref}$  reste assez important et la formation de voie pondérée réalise un moyennage sur un nombre de capteurs assez grand. Avec les probabilités supérieures, les capteurs rangés dans  $E_{ref}$  sont triés selon des critères plus difficiles. Le moyennage est réalisé sur un nombre de capteurs faible. Les deux calculs peuvent être effectués selon les circonstances: lorsqu'un bruit blanc spatial important s'ajoute aux signaux, il est préférable d'utiliser les probabilités inférieures. Dans notre cas, il est préférable de prendre les probabilités supérieures pour réduire les artefacts du signal utile.

### 5.5. Estimation du signal utile

L'application de la formation de voie pondérée donne le signal estimé représenté sur la figure 7:

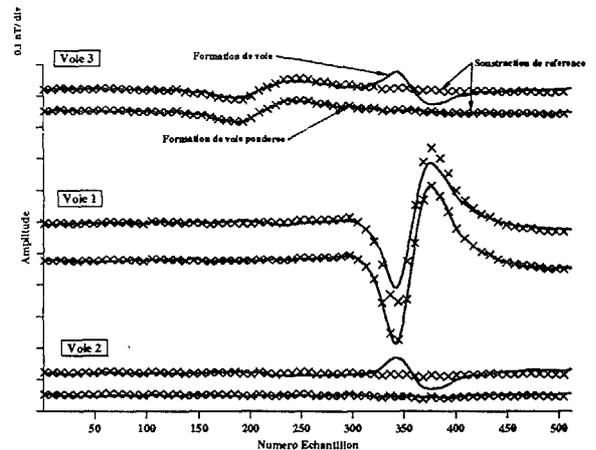


Figure 7: 3 estimateurs du signal cible: les x représentent la soustraction de bruit avec une référence de bruit seul donnée au système; c'est le résultat de référence. La formation de voie est représentée en traits pleins. Seuls les signaux estimés des 3 premières sondes sont représentés. La trace supérieure est le résultat de la formation de voie sans pondération, la trace inférieure utilise la pondération de la figure 6

Les résultats parviennent au niveau de la qualité de la soustraction de bruit pour la formation de voie pondérée.

### 6. Conclusion

Nous avons montré que l'adaptation de la technique de formation de voie permet de réaliser une bonne séparation entre un signal spatialement cohérent parvenant sur un réseau de capteurs, et un signal à durée limitée. La qualité de la séparation dépend de la finesse de la partition réalisée entre les capteurs qui ne reçoivent que le signal cohérent spatialement et les capteurs qui enregistrent également le signal utile. Nous avons proposé une méthode de partition adaptative basée sur la vérification, à chaque instant de la cohérence spatiale du signal du réseau. Une illustration sur un signal réel issu d'un réseau magnétique illustre la méthode. Dans le cas où les signaux cohérent et indépendants sont en nombre supérieur à 1, le calcul et le traitement des erreurs de prédiction sont encore à préciser.

### 7. Bibliographie

- [VAN TREES 68] H.L. Van Trees; "Detection, Estimation, and Modulation Theory"; John Wiley and Sons, Inc. New York. London. Sydney.
- [FLAMENT 91] B. Flament, R. Blanpain; "Traitement d'Antenne et Réseaux Magnétiques"; GRETSI 1991 Juan-les-Pins, pp109-113; 1991.
- [BERDICHEVSKY 84] M.N. Berdichevski, M.S. Zhdanov; "Advanced Theory of deep Magnetic Sounding"; Elsevier Science Publishers B.V., 1984.
- [MUNIER 87] J. Munier, "L'identification de Fronts d'Ondes Corrélés et Distordus"; Traitement du Signal, Vol 4, N°4, 1987.
- [PIQUES 92] J.D. Piques; "Systèmes Experts en Contexte Opérationnel"; Thèse de l'INPG, Informatique, 1992.
- [LACOUME 88a] J.L. Lacoume; "Modèles et Traitements de Signaux Multidimensionnels"; Traitement du Signal, Vol 5, N°2, 1988.