

APPLICATION DES METHODES HAUTE RESOLUTION
EN PRESENCE DE TRAJETS MULTIPLES

B.BOUTHEMY - L.KOPP

THOMSON-SINTRA ASM B.P.53 Chemin des Travaux 06801 CAGNES/MER CEDEX FRANCE

RESUME

En acoustique sous-marine, il est fréquent qu'un signal émis en un point parvienne à un récepteur par plusieurs trajets du fait des réflexions sur la surface et sur le fond. Les différents trajets transportent des signaux qui peuvent être corrélés à la réception. Dans ce cas, les méthodes de traitement spatial dites à haute résolution, c'est à dire les méthodes fondées sur l'exploitation des vecteurs propres de la matrice interspectrale mesurée en sortie des capteurs ne sont pas directement applicables.

Nous montrons d'une part que ces méthodes peuvent être généralisées au cas de sources corrélées et nous évaluons, à partir de signaux synthétiques, leurs performances en pouvoir séparateur en fonction de la corrélation entre trajets. Nous présentons ensuite deux approches valables pour une corrélation parfaite.

D'autre part, la séparation des divers trajets issus d'une même source permet de localiser le bruiteur en distance. La précision de mesure de la distance est évaluée à partir de simulations et comparée à la limite donnée par la borne de Cramer-Rao.

1- POSITION DU PROBLEME

Le problème posé est la séparation de divers trajets issus d'une même source. Dans le cas général, pour pouvoir localiser les sources, il est nécessaire de connaître les angles d'arrivée des trajets et les temps de retard entre trajets.

Le modèle utilisé pour décrire une situation à P sources pouvant être corrélées est une généralisation du modèle utilisé couramment dans l'utilisation des méthodes HR (haute résolution) [1]. Les hypothèses faites concernent d'une part les sources. Comme pour les méthodes classiques elles sont ponctuelles et de cohérence spatiale parfaite et la forme de la surface d'onde reçue sur l'antenne est une fonction connue de la position de la source. D'autre part les méthodes HR utilisent une hypothèse supplémentaire qui concerne le bruit de fond: sa cohérence spatiale est connue. De plus les sources et le bruit de fond sont supposés statistiquement indépendants. Avec ces hypothèses, la matrice interspectrale des signaux reçus sur les K capteurs de l'antenne s'écrit:

$$\Gamma(f) = \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^P \gamma_{ij}(f) \underline{d}_i(f) \underline{d}_j^+(f) + \sigma(f) J(f)$$

$$\Gamma(f) = D \gamma D^+ + \sigma(f) J(f)$$

où γ est la matrice de covariance des sources, et D la matrice de dimension (K,P) dont les colonnes sont formées des vecteurs sources $\underline{d}_1 \dots \underline{d}_P$. Le symbole + désigne le transposé conjugué. $\sigma(f)$ est la densité spectrale du bruit de fond et J(f) sa matrice de cohérence spatiale.

ABSTRACT

An underwater acoustic channel is often characterized by multiple paths (reflexions on boundaries). The various paths may be pairwise correlated or not. For passive listening purposes the situation is simply modeled as correlated targets. In such cases the application of HR (High Resolution) methods has to be reconsidered.

In this paper two approaches are seen to offer a solution to this problem. In the simple case of two correlated paths simulations are performed to evaluate the resolving power as a function of the degree of correlation between the paths.

This method may be used to localize a distant target with a vertical line array. The variance of the range estimate by this method is compared to the Cramer-Rao bound.

On peut distinguer trois cas:

- les sources (où les différents trajets issus d'une même source) ne sont pas corrélées: γ est alors une matrice diagonale et la séparation de l'espace d'observation en deux sous-espaces orthogonaux permettra de résoudre les sources [1][2].
- les sources sont partiellement corrélées: la matrice γ est non diagonale mais de rang P et les méthodes HR permettent encore de séparer les sources [3][4].
- les sources sont parfaitement corrélées: la matrice γ n'est pas de rang plein et les méthodes HR ne sont plus directement applicables.

2- INFLUENCE DE LA CORRELATION SUR LE POUVOIR SEPARATEUR

Pour des sources non corrélées, le pouvoir séparateur des méthodes haute résolution, dans le cas d'un modèle correspondant au milieu réel, ne dépend que de deux paramètres: le rapport signal sur bruit des sources et le temps d'observation. Il tend vers l'infini lorsque le temps d'observation tend vers l'infini et pour un temps d'observation donné il est d'autant meilleur que le rapport signal sur bruit est plus élevé.

La corrélation entre les sources, lorsqu'elle ne dépasse pas une certaine valeur, a peu d'influence sur le pouvoir séparateur. Cette propriété est illustrée par les résultats de simulation présentés sur la figure 1. Dans cette simulation le champ de bruit est composé d'une source et d'un bruit de fond incohérent. Le signal émis par la source parvient à l'antenne par deux trajets (un trajet direct et un trajet réfléchi-surface) dont le coefficient de corrélation varie. La matrice interspectrale est obtenue en moyennant N produits croisés des transformées de Fourier des sorties des capteurs.

$$\Gamma(f) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \underline{X}_n(f) \underline{X}_n^+(f)$$



Les résultats sont présentés pour la méthode du goniomètre adaptatif en fonction du module du coefficient de corrélation pour deux valeurs du rapport signal sur bruit -5 dB et 0 dB et pour N=100 spectres intégrés. La largeur à -3 dB de l'antenne considérée (neuf capteurs distants d'une demi longueur d'onde) est d'environ 12.5 degrés.

Pour chaque rapport signal sur bruit sont tracés le pouvoir séparateur (—) et l'écart angulaire estimé (↔). L'écart entre les deux courbes donnent une idée du biais de mesure. Le pouvoir séparateur varie peu avec le coefficient de corrélation jusqu'à une valeur d'environ 0.8. Au delà de cette valeur, deux maxima ont bien été détectés sur la réponse du goniomètre mais leurs positions ne correspondent plus aux positions réelles des sources. Cette valeur fixe donc la limite pour la configuration étudiée au delà de laquelle la méthode du goniomètre n'est plus applicable.

3- EXTENSION DES METHODES HAUTE-RESOLUTION AUX SIGNAUX PARFAITEMENT CORRELÉS

Lorsque les signaux sont parfaitement corrélés, deux solutions sont proposées. La première consiste à effectuer un prétraitement pour "décorrélérer" les sources et la seconde est une extension du goniomètre adaptatif à plusieurs dimensions.

3.1- Prétraitement

Pour "décorrélérer" les sources, trois techniques de lissage sont envisagées dans les domaines temporel, fréquentiel et spatial. Dans le domaine temporel, on comprend aisément qu'en intégrant sur une certaine durée, les différents phénomènes liés au milieu (mouvements des sources et du récepteur, agitation de la surface, nature du relief et du fond...) auront tendance à décorrélérer les trajets.

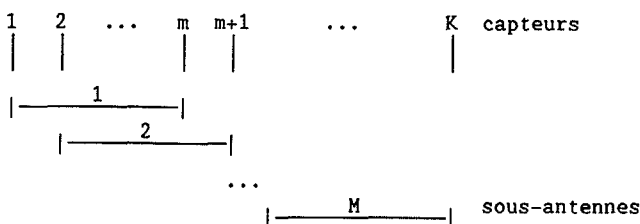
Dans le domaine fréquentiel, il s'agit de combiner de façon cohérente les différentes fréquences de manière à générer un seul sous-espace signal permettant d'identifier les sources. Cette technique est basée sur le résultat suivant [5]: si la matrice $D(f_j)$ définie au paragraphe 1 est de rang P pour toutes les fréquences j de 1 à J, il existe des matrices de transformations (K,K) non singulières telles que :

$$T(f_j) D(f_j) = D(f_0) \quad \text{pour } j = 1, J$$

On montre alors que l'on peut appliquer la méthode du goniomètre à partir de la matrice :

$$\Gamma_F = \sum_{j=1}^J T(f_j) \Gamma(f_j) T^+(f_j)$$

Dans le domaine spatial, la technique de lissage consiste à diviser l'antenne en M sous-antennes de m capteurs avec m-1 capteurs communs entre deux sous-antennes adjacentes [6]. On aura $M = K - m + 1$ sous-antennes.



La matrice interspectrale après lissage spatial est définie comme la moyenne des matrices interspectrales des M sous-antennes :

$$\bar{\Gamma} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \Gamma_k$$

Cette matrice est de rang P quelquesoit la corrélation entre les sources.

La figure 2 représente la réponse du goniomètre avant (a) et après (b) lissage spatial pour deux trajets parfaitement corrélés. Il s'agit d'une antenne de neuf capteurs espacés d'une demi longueur d'onde. La réponse du goniomètre en sortie de l'antenne initiale ne permet pas de séparer les deux trajets. Par contre après avoir appliqué le lissage spatial avec quatre sous-antennes (M=4) de 6 capteurs (m=6), le goniomètre permet de déterminer les sites des deux trajets.

3.2- Goniomètre à plusieurs dimensions

La méthode du goniomètre adaptatif utilise la projection sur l'espace bruit de tous les vecteurs direction possibles \underline{d}_θ . L'extension proposée consiste à projeter non plus les vecteurs direction, mais des combinaisons linéaires des vecteurs direction [7] de la forme :

$$\underline{\delta}(\theta_1, \dots, \theta_q) = c_1 \underline{d}_{\theta_1} + \dots + c_q \underline{d}_{\theta_q} = D \underline{c}$$

où q représente la taille du plus grand groupe de signaux cohérents ou encore le nombre maximum de trajets issus d'une même source. On cherche alors à minimiser dans un espace à q dimensions la fonction :

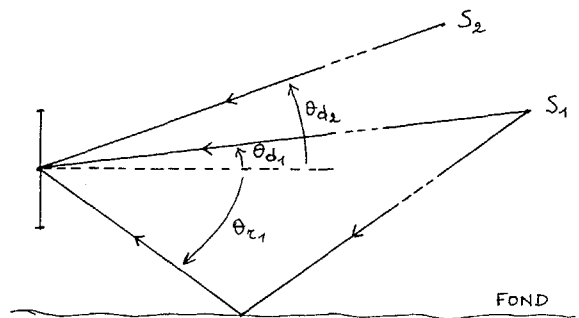
$$G(\theta_1, \dots, \theta_q) = \underline{c}^+ D^+ P_N D \underline{c}$$

P_N étant le projecteur sur l'espace bruit.

Ceci est équivalent à rechercher la plus petite valeur propre de la matrice :

$$M(\theta_1, \dots, \theta_q) = D^+ P_N D$$

Prenons un exemple a deux dimensions (q=2). Le signal issu d'une source S_1 arrive à l'antenne par deux trajets parfaitement corrélés, un troisième signal provient d'une source S_2 .

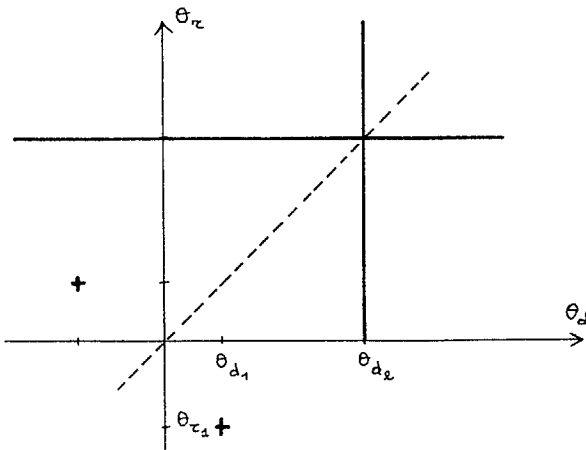


Dans ce cas la matrice :

$$M(\theta_d, \theta_r) = D^+(\theta_d, \theta_r) P_N D(\theta_d, \theta_r)$$

est singulière dès que θ_d ou θ_r est égal à θ_2 : on détectera toujours une source en (θ_d, θ_d) pour toute valeur de θ_d et en (θ_d, θ_r) pour toute valeur de θ_r .

De plus le spectre présentera un pic tendant vers l'infini pour $(\theta_{d1}, \theta_{r1})$ et $(\theta_{r1}, \theta_{d1})$.



Les croix représentent les pics dus aux trajets cohérents et les lignes continues les crêtes dues au signal incohérent. Ceci offre une possibilité de distinguer les bruiteurs corrélés de ceux qui ne le sont pas.

Les figures 3, 4 et 5 représentent les résultats d'une simulation correspondant au champ de bruit décrit ci-dessus avec une antenne de seize capteurs espacés d'une demi longueur d'onde. La figure 3 montre encore que le goniomètre ne permet pas de séparer les trajets cohérents. Les traits verticaux représentent les positions réelles des sources. Le spectre à deux dimensions est tracé pour des matrices idéales (figure 4) et pour des matrices estimées avec N=100 spectres intégrés (figure 5). On observe sur les deux figures une crête qui donne la position de la source incohérente ($\theta_d=7^\circ$) et un pic qui donne les sites des deux trajets corrélés ($\theta_d=2^\circ, \theta_r=-3^\circ$). Dans le cas des matrices estimées, le pic est moins fin et sa position précise est recherchée par l'algorithme du simplex ($\theta_d=1^\circ 91, \theta_r=-3^\circ 0$).

4- MESURE DE LA DISTANCE

La présence de trajets multiples permet lorsqu'ils sont séparés en site de mesurer la distance pour des distances bien supérieures à la distance de Fresnel. Pour des distances inférieures, la mesure se fait par la courbure du front d'onde.

Pour estimer la variance de mesure de la distance, on estime les sites d'arrivée des trajets sur la réponse du goniomètre et en fonction de la géométrie du problème, on calcule la distance ρ . Par exemple pour une antenne verticale de même immersion r que la source, en présence de deux trajets (un direct et un réfléchi-surface) de site ψ_1 et ψ_2

$$\rho = \frac{2r}{\tan \psi_1 + \tan \psi_2}$$

La figure 6 représente la variance de mesure de l'inverse de la distance ainsi estimée pour une antenne verticale de neuf capteurs, pour différentes valeurs du rapport signal sur bruit. Les deux trajets sont supposés de même puissance et décorrélés. Les traits continus représentent la borne de Cramer-Rao. Elle est définie par :

$$V - F^{-1} \geq 0$$

où V est la matrice de covariance de l'estimateur et F la matrice de Fisher dont les composantes s'écrivent en fonction de la vraisemblance logarithmique L :

$$F_{kl} = F(\beta_k, \beta_l) = -E\{\partial_{kl}^2 L\} \text{ avec } L = \text{Ln}(P(\underline{X}(\underline{\beta})))$$

$\underline{\beta}$ étant l'ensemble des paramètres à estimer [8].

Les matrices interspectrales sont calculées avec 100 spectres intégrés et les variances sont estimées à partir de 100 réalisations de la même simulation. Ces tracés montrent que la borne de Cramer-Rao est atteinte pour des distances correspondant à des situations où les sites d'arrivée des deux trajets sont bien distincts. Lorsqu'on est en limite de séparation, la variance estimée s'écarte de la borne de Cramer-Rao. La valeur limite de la distance que l'on peut mesurer est bien sûr fonction du rapport signal sur bruit et des données géométriques du problème.

5- CONCLUSION

Les méthodes haute-résolution peuvent être généralisées au cas de sources corrélées ce qui correspond à une propagation par plusieurs trajets transportant des signaux corrélés à la réception. Jusqu'à une certaine valeur du coefficient de corrélation (0.8 dans l'exemple étudié), la méthode du goniomètre est applicable et permet de résoudre les sources. Dans les cas où la corrélation est très forte ou même totale, deux méthodes permettent de séparer les trajets : soit un prétraitement équivalent à une décorrélation, soit une recherche dans un espace à plusieurs dimensions.

La séparation des différents trajets permet de localiser les sources en distance pour des distances bien supérieures à la distance de Fresnel. La variance de mesure atteint la borne de Cramer-Rao lorsque les sites sont bien distincts.

Etude financée par la DRET (Direction des Recherche et Etudes Techniques) Paris.

Figure 1
Pouvoir séparateur en fonction du coefficient de corrélation

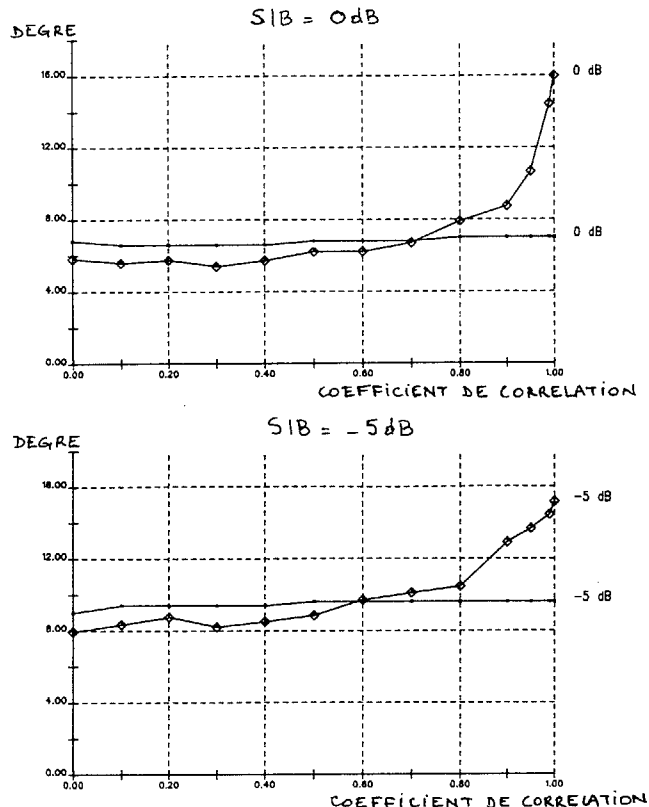
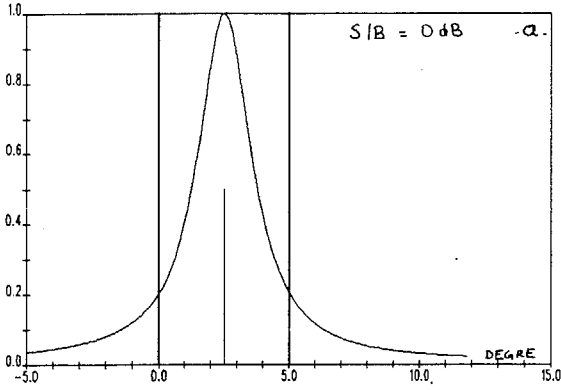
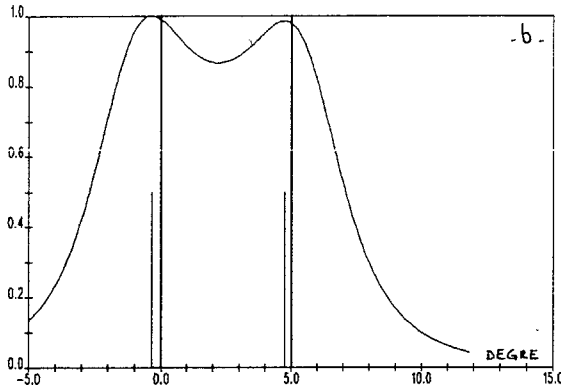




Figure 2



Réponse du goniomètre en sortie de l'antenne



Réponse du goniomètre après lissage spatial (M=4, m=6)

Figure 3

Réponse du goniomètre
 2 trajets corrélés - S/B = 0dB $\theta_d = 2^\circ$ $\theta_r = -3^\circ$
 1 source incohérente - S/B = 5dB $\theta_d = 7^\circ$

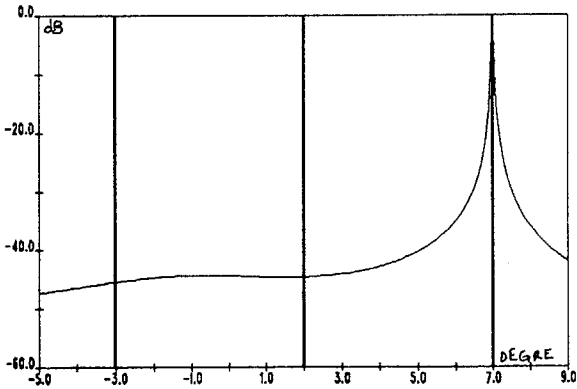


Figure 4

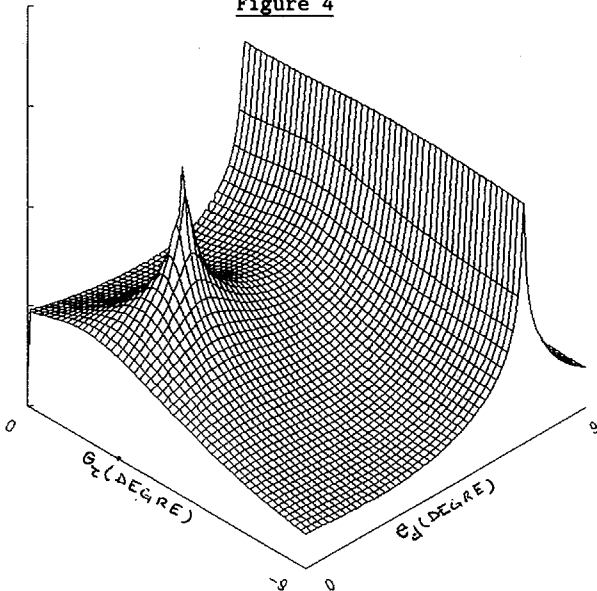


Figure 5

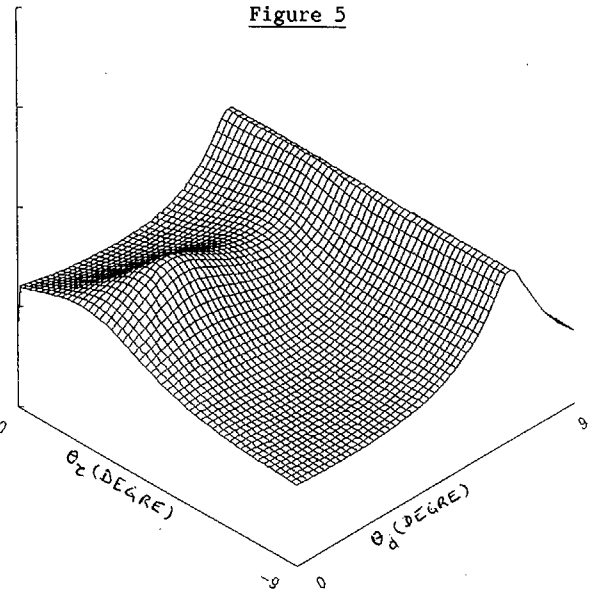
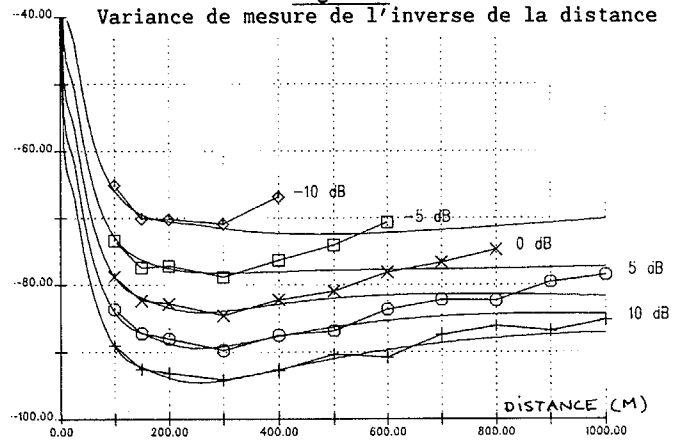


Figure 6



REFERENCES

- [1] MERMOZ H. "Imagerie, corrélation et modèles" Annales des télécommunications, t.31, n°1-2, janvier-fevrier 76, pp. 17-36
- [2] BIENVENU G., KOPP L. "Principe de la goniométrie passive adaptative" 7ème colloque GRETSI, Nice, 28 mai-2 juin 79 pp. 106/1-106/10
- [3] VEZZOZI G., NICOLAS P. "Séparation de fronts d'onde corrélés" 9ème colloque GRETSI, Nice, 16-20 mai 83, pp.277-282
- [4] CANTONI A., GODARA LC. "Resolving the Direction of Sources in a Correlated Field Incident on an Array" JASA, 67(4), April 80, pp. 1247-1255
- [5] WANG H., KAVEH M. "Coherent Signal-Subspace Processing for the Detection and Estimation of Angles of Arrival of Multiple Wide-Band Sources" IEEE, ASSP-33, no4, August 85, pp. 823-835
- [6] SHAN TJ., WAX M., KAILATH T. "On Spatial Smoothing for Direction-of-Arrival Estimation of Coherent Signal" IEEE, ASSP-33, n°4, August 85, pp. 806-811
- [7] ZOLTOWSKI M., HABER F. "A Vector Space Approach to Direction Finding in a Coherent Multipath Environment" IEEE, AP-34, n°9, September 86, pp. 1069-1079
- [8] KOPP L., THUBERT D. "Bornes de Cramer-Rao en traitement d'antenne. Première partie: formalisme" Traitement du Signal, vol.3, no3, 86, pp. 111-125