

HUITIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 1^{er} au 5 JUIN 1981

METHODES HAUTE RESOLUTION EN ECOUTE PASSIVE*

HIGH RESOLUTION METHODS IN PASSIVE LISTENING*

Georges BIENVENU et Denis PILLON

THOMSON-C.S.F. - Division des Activités Sous-Marines, Chemin des Travaux
06802 CAGNES-sur-MER (France)

RESUME

Le traitement adaptatif d'antenne repose sur une modélisation du milieu qui comporte d'une part les sources à détecter, et d'autre part ce que l'on appellera le bruit de fond. Il ne fait d'hypothèses que sur les sources : elles sont parfaitement cohérentes spatialement et la forme des surfaces d'onde reçues est une fonction connue de la position des sources. On a montré que si l'on désirait faire de la détection optimale, il était nécessaire de définir un contraste, qui ne peut être que spatial entre les sources et le bruit de fond. Il faut donc ajouter une hypothèse supplémentaire sur le milieu qui est la connaissance de la cohérence spatiale du bruit de fond. Cette nouvelle modélisation du milieu permet par décomposition de la matrice des densités spectrales des signaux reçus en vecteurs et valeurs propres, de séparer dans un certain sens les sources du bruit de fond, et d'obtenir de ce fait des méthodes haute résolution. On montre que la cohérence spatiale du bruit de fond n'a pas besoin d'être connue exactement. Elle peut dépendre d'un certain nombre de paramètres qui peuvent être estimés, ce qui permet alors d'obtenir une estimation de la matrice des densités spectrales des sources seules. M. MERMOZ a montré d'autre part, qu'à partir de cette matrice, il est possible de retrouver les caractéristiques des sources tout en incluant des paramètres dans le modèle de propagation qui seront déterminés simultanément. Ces méthodes permettent donc des modélisations du milieu assez souples, ayant plus de chance d'approcher la réalité. On donne un exemple obtenu par simulation.

SUMMARY

Adaptive antenna processing lies upon a model of the noise field which contains on the one hand the sources to be detected and on the other hand the background noise. It uses hypotheses only on the sources : they are spatially perfectly coherent and the shape of received wavefronts is a known function of source position. It has been shown that if optimal detection is desired, it is necessary to define a contrast, that can be spatial only, between the sources and the background noise. One must then add an hypothesis more on the noise field that is the knowledge of the background noise spatial coherence. This new modelization of the noise field allows, by using the eigenvectors eigenvalues decomposition of the spectral density matrix of the received signals, to split in a certain sense the sources from the background noise, and so to obtain high resolution methods. It is shown that background noise spatial coherence does not need to be exactly known. It can be a function of unknown parameters that can be estimated, which then allows to obtain an estimate of the source alone spectral density matrix. Furthermore, H. MERMOZ has shown that, by using this matrix, it is possible to find the source parameters while including unknown parameters in the propagation model which are estimated simultaneously. Therefore, these methods allow rather flexible noise field models, which have greater chance to approach the reality. A simulation example is given.



1. - INTRODUCTION.

Une des fonctions principales d'un système d'écoute passive sous-marine est la détermination du nombre de sources présentes dans le milieu, ainsi que des valeurs des paramètres qui les caractérisent. Pour cela, on utilise les bruits émis par les sources que l'on recueille sur les capteurs d'une antenne. La fonction de base est le traitement d'antenne qui est traditionnellement remplie par la formation de voie classique. Un souci d'amélioration des performances a conduit tout d'abord au traitement adaptatif d'antenne. Le gain qu'il apporte est limité par le rapport signal à bruit des sources. Plus récemment, on s'est intéressé à des méthodes plus puissantes que l'on appelle haute résolution, mais qui nécessitent de faire une hypothèse supplémentaire sur le milieu [1] [2] [3] [4].

Le traitement adaptatif d'antenne, comme la formation de voie classique, ne fait d'hypothèses que sur les sources : elles sont ponctuelles, parfaitement cohérentes spatialement, et la forme de la surface d'onde reçue d'une source est une fonction connue de la position de la source (la fonction de transfert des capteurs est supposée connue). Soit $\vec{r}(t)$ le vecteur représentatif des signaux reçus sur les K capteurs de l'antenne. On appelle matrice de corrélation des signaux reçus :

$$C(\tau) = E [\vec{r}(t) \vec{r}^+(t+\tau)] \quad (1)$$

où $E()$ est l'espérance mathématique et $\vec{r}^+(t)$ le transposé-conjugué de $\vec{r}(t)$. Avec les hypothèses faites, la matrice des densités spectrales qui est la transformée de Fourier de $C(\tau)$ s'écrit pour une source seule :

$$\Gamma(f) = \gamma(f) \vec{D}(f) \vec{D}^+(f) \quad (2)$$

où $\gamma(f)$ est la densité spectrale du signal reçu de la source et $\vec{D}(f)$ le vecteur direction de la source composé des fonctions de transfert entre la source et chacun des capteurs, normalisées par la fonction de transfert entre la source et un point de référence sur l'antenne. C'est une matrice de rang 1, ce qui est caractéristique de la cohérence spatiale parfaite.

Les méthodes haute-résolution font une hypothèse supplémentaire sur le milieu : elles supposent que la cohérence spatiale du bruit de fond, qui compose, en plus des sources, le champ de bruit, est connue. C'est grâce à cette hypothèse nouvelle que leurs performances sont meilleures que celles de l'antenne adaptative.

Elles supposent de plus que le champ de bruit est résoluble, c'est-à-dire que le nombre N de sources est inférieur à celui K des capteurs de l'antenne. La matrice des densités spectrales totale s'écrit donc (sources et bruit de fond sont statistiquement indépendants) :

$$\Gamma(f) = \Gamma_S(f) + \sigma(f) J(f) = \sum_{i=1}^{N < K} \gamma_i(f) \vec{D}_i(f) \vec{D}_i^+(f) + \sigma(f) J(f) \quad (3)$$

$\Gamma_S(f)$ est la matrice des densités spectrales des sources seules, $J(f)$ la matrice de cohérence spatiale du bruit de fond supposée connue, et $\sigma(f)$ sa densité spectrale, inconnue.

La plupart des méthodes haute-résolution supposent le bruit de fond indépendant ($J(f) = I$ matrice unité) : on a montré [5] que dans le cas général où il ne l'est pas, il est possible de transformer la matrice $\Gamma(f)$ en une matrice $\Gamma_c(f)$ telle que :

$$\Gamma_c(f) = C(f) \Gamma(f) C^+(f) = \sum_{i=1}^N \gamma_i(f) \vec{D}_{C_i}(f) \vec{D}_{C_i}^+(f) + \sigma(f) I = \Gamma_{CS}(f) + \sigma(f) I \quad (4)$$

Elles sont basées sur la décomposition en vecteurs et valeurs propres de $\Gamma_c(f)$. On montre que $\Gamma_c(f)$ possède :

- N vecteurs propres $\vec{U}_i(f)$ qui sont aussi vecteurs propres de la matrice des sources seules $\Gamma_{CS}(f)$ et qui correspondent aux N valeurs propres $\lambda_i(f)$ non nulles de $\Gamma_{CS}(f)$ qui est de rang N ; les valeurs propres correspondantes sont égales à : $\lambda_i(f) + \sigma(f)$; ces N vecteurs propres forment une base du sous-espace à N dimensions généré par les N vecteurs direction $\vec{D}_{C_i}(f)$ que l'on appellera sous-espace image ; on peut écrire :

$$\vec{D}_{C_i}(f) = \sum_{j=1}^N \alpha_{ij} \vec{U}_j(f) \quad (5)$$

et on a la relation :

$$\sum_{i=1}^N \gamma_i(f) \vec{D}_{C_i}(f) \vec{D}_{C_i}^+(f) = \sum_{i=1}^N \lambda_i(f) \vec{U}_i(f) \vec{U}_i^+(f) \quad (6)$$

- (K-N) vecteurs propres \vec{U}_{K-i+1} orthogonaux aux précédents, donc à chacun des vecteurs direction $\vec{D}_{C_i}(f)$; les valeurs propres correspondantes sont toutes égales à $\sigma(f)$, et donc inférieures aux précédentes.

C'est cette séparation en deux sous-espaces, l'un contenant le bruit de fond, l'autre contenant les sources qui donne aux méthodes haute-résolution leur propriété fondamentale : elles possèdent un pouvoir de résolution asymptotique infini, alors qu'il est limité par le rapport signal à bruit pour l'antenne adaptative.

Cela est dû à l'hypothèse supplémentaire sur la cohérence spatiale du bruit de fond, qui permet la détermination de la matrice de transformation C(f).

Dans la pratique, le pouvoir de résolution sera limité bien sûr par le fait que le temps d'observation étant fini, on ne possède qu'une estimation de $\Gamma(f)$, mais aussi par le fait que l'on ne connaît exactement ni la cohérence spatiale du bruit de fond, ni la forme des surfaces d'onde reçues des sources.

On a montré [6] qu'il n'est en fait pas nécessaire de connaître la cohérence spatiale du bruit de fond. Il suffit qu'elle soit une fonction connue de paramètres inconnus. Il est alors possible d'estimer ces paramètres. En effet, asymptotiquement, les valeurs propres minimums deviennent égales pour les valeurs des paramètres qui correspondent aux valeurs réelles. En pratique, n'ayant qu'une estimation de la matrice des densités spectrales, les valeurs propres minimums ne deviendront pas égales, mais on observera un point de focalisation au voisinage des valeurs réelles des paramètres : on obtient ainsi une estimation de ces paramètres, une estimation du nombre de sources en comptant les valeurs propres supérieures qui se détachent du paquet des plus faibles (c'est une opération de détection qui possède donc une probabilité de fausse alarme et une probabilité de détection) [7], et une estimation de la densité spectrale du bruit de fond en effectuant la moyenne des valeurs propres du paquet des plus faibles. Un exemple est donné sur la Figure 1. Le champ de bruit est composé de deux sources et d'un bruit de fond dont la cohérence spatiale dépend d'un paramètre ; c'est un modèle bruit de surface : la densité spectrale croisée entre deux capteurs distants de d s'écrit :

$$\sigma(f) 2^m m! J_m(2\pi fd/c) / (2\pi fd/c)^m \quad (7)$$

J_m est une fonction de Bessel d'ordre m et m le paramètre inconnu. La figure 1 présente les valeurs propres d'une estimation de $\Gamma(f)$ en fonction de m : on observe la focalisation près de la valeur m = 0,5 qui est la valeur réelle du bruit de fond simulé, et on remarque les deux valeurs propres supérieures qui indiquent la présence de deux sources.

Il est important de noter que la procédure de détection du nombre de sources est indépendante de la forme des surfaces d'onde.

Une fois le bruit de fond identifié et le nombre de sources évalué, il est possible de déterminer les sous-espaces image et orthogonal, et donc d'estimer les paramètres des sources. Que l'on exploite le sous-espace orthogonal comme dans le goniomètre adaptatif [6], ou le sous-espace image [3], il est nécessaire d'utiliser des hypothèses sur la forme des surfaces d'onde. Mais comme l'a montré H. MERMOZ [3], il n'est pas nécessaire de connaître exactement la forme des surfaces d'onde. Il est possible de la faire dépendre d'un certain nombre de paramètres de propagation inconnus qui sont estimés en même temps que les paramètres des sources.

On présente dans cet exposé, après en avoir rappelé le principe, une analyse de cette méthode et des résultats de simulation, en se limitant à l'exploitation du sous-espace image. On appellera le procédé : méthode image.

2. - PRINCIPE DE LA METHODE IMAGE.

Les premiers principes généraux d'une méthode permettant d'assouplir les hypothèses faites a priori sur les surfaces d'onde furent énoncés par H. MERMOZ [3] et ont pour base l'exploitation de la relation (6) (on suppose dans la suite de l'exposé que le bruit de fond est indépendant entre les capteurs : $J(f) = I$, et on omettra de noter la dépendance avec la fréquence) :

$$\Gamma_S = \sum_{i=1}^N \gamma_i \vec{D}_i \vec{D}_i^+ = \sum_{i=1}^N \lambda_i \vec{U}_i \vec{U}_i^+$$

Si l'on se situe dans le cas théorique parfait où aucune erreur d'estimation et de détection ne sont faites, alors le nombre de sources N est exact et la matrice Γ_S est parfaitement connue : ses valeurs propres λ_i et ses vecteurs propres \vec{U}_i aussi. Ce que l'on cherche ce sont les vecteurs direction \vec{D}_i et les valeurs γ_i des densités spectrales des sources.

Si l'on suppose de plus, que l'on ne connaît rien de la forme de la surface d'onde portant le signal, on cherche donc les vecteurs \vec{V}_i appartenant au sous-espace image tels que :

$$\Gamma_S = \sum_{i=1}^N \vec{V}_i \vec{V}_i^+ = \sum_{i=1}^N \lambda_i \vec{U}_i \vec{U}_i^+ \quad (8)$$

Les vecteurs \vec{V}_i sont définis à une phase près : si \vec{V}_i est solution, $\vec{V}_i e^{j\varphi}$ l'est aussi quel que soit φ .



Si l'on pré et post-multiplie les deux membres de (8) par les différents vecteurs propres, on obtient un système de $\frac{N(N+1)}{2}$ équations qui s'écrit :

$$\begin{cases} \vec{U}_j^+ \left(\sum_{i=1}^N \vec{V}_i \vec{V}_i^+ \right) \vec{U}_k = \vec{U}_j^+ \left(\sum_{i=1}^N \lambda_i \vec{U}_i \vec{U}_i^+ \right) \vec{U}_k = 0 & (k \neq j) \\ \vec{U}_j^+ \left(\sum_{i=1}^N \vec{V}_i \vec{V}_i^+ \right) \vec{U}_j = \vec{U}_j^+ \left(\sum_{i=1}^N \lambda_i \vec{U}_i \vec{U}_i^+ \right) \vec{U}_j = \lambda_j \end{cases} \quad (9)$$

Les vecteurs propres \vec{U}_i formant une base ortho-normée du sous-espace image, le produit scalaire $\vec{V}_i^+ \vec{U}_k$ n'est autre que la coordonnée v_{ik} de \vec{V}_i dans la base des vecteurs propres. Les équations (9) s'écrivent donc :

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N v_{ij}^* v_{ik} = 0 & \text{pour } k \neq j \\ \sum_{i=1}^N |v_{ij}|^2 = \lambda_j \end{cases} \quad (10)$$

Si l'on s'intéresse uniquement à la résolution mathématique de ce système, on constate qu'il y a N^2 inconnues qui sont les N coordonnées des N vecteurs \vec{V}_i . Le nombre d'équations est lui égal à $\frac{N(N+1)}{2}$. Dans le cas où $N \neq 1$, il n'y a donc pas assez d'équations pour déterminer complètement les vecteurs \vec{V}_i .

La seule exploitation des relations (10) n'est donc pas suffisante pour déterminer les vecteurs sources. Tout ce que l'on peut en déduire, c'est que les vecteurs \vec{V}_i , appartenant au sous-espace image, solutions de (10), sont liés par q relations avec :

$$q = N^2 - \frac{N(N+1)}{2} = \frac{N(N+1)}{2} \quad (11)$$

Il est aussi possible d'écrire de façon équivalente que les vecteurs \vec{V}_i s'expriment en fonction de q paramètres inconnus.

Enfin, il faut bien remarquer que même si l'on connaissait les vecteurs \vec{V}_i , la tâche ne serait pas terminée : ce que l'on cherche en fait, et c'est le but de tout système sonar, c'est à localiser les sources. Par exemple dans le cas où il y a une seule source, le vecteur source unique \vec{V} est déterminé ($\vec{V} = \lambda \vec{U}$). Mais on n'a pas pour autant répondu à la question posée, car on ne sait toujours pas où est la source.

Il est clair qu'il est impossible de résoudre le problème sans avoir une idée a priori sur la forme des vecteurs sources, c'est-à-dire finalement sans se fixer un certain modèle de propagation. Mais il n'est pas nécessaire de prendre un modèle figé comme en formation

de voie classique : il peut comporter un certain nombre de degrés de liberté, ce qui permet de s'affranchir dans une certaine mesure de la méconnaissance de la forme exacte des surfaces d'onde.

Le modèle permet de construire un vecteur source \vec{d}_i , que l'on qualifiera de modèle, et qui dépend d'un certain nombre de paramètres que l'on peut classer en deux groupes :

- Ceux qui caractérisent la source, et qui sont les inconnues cherchées : ses coordonnées : x_i, y_i, z_i , et sa densité spectrale au niveau des capteurs par rapport à une référence ; on écrira \vec{d}_i sous la forme : $\sqrt{\alpha_i} \vec{d}_i$, où α_i représente la densité spectrale inconnue, et où \vec{d}_i est tel que par convention : $\vec{d}_i^+ \vec{d}_i = K$ (nombre de capteurs).
- Ceux qui caractérisent la propagation, au nombre de p : r_1, \dots, r_p .

Les vecteurs sources modèles peuvent donc s'écrire :

$$\vec{d}_i = \vec{m}(\alpha_i, x_i, y_i, z_i, r_1, \dots, r_p)$$

où $\vec{m}()$ est une fonction connue.

L'indétermination sur les N vecteurs sources expérimentaux \vec{V}_i sera donc levée en les identifiant à N vecteurs sources modèles \vec{d}_i .

On a à résoudre un système de KN équations :

$$\vec{V}_i = \sqrt{\alpha_i} \vec{d}_i \quad i \in [1, N] \quad (12)$$

dont le nombre d'inconnues est égal à :

- p pour le modèle de propagation
- $4N$ pour les sources
- q pour les vecteurs \vec{V}_i

soit : $p+q+4N$ en tout ; le système ne peut être résolu que si : $KN = p+q+4N$.

Le nombre de paramètres inconnus que l'on doit donc inclure dans le modèle est égal à :

$$p = KN - 4N - q = KN - 4N - \frac{N(N+1)}{2} = N \left(K - \frac{N+7}{2} \right) \quad (13)$$

S'il est supérieur, le système est indéterminé ; s'il est inférieur, le système n'est pas soluble.

3. - PROBLEMES LIES A LA MODELISATION DU MILIEU.

Dans la procédure qui vient d'être présentée, on montre que si l'on choisit correctement le nombre de paramètres libres du modèle, le nombre d'inconnues est égal au nombre d'équations : c'est une condition nécessaire pour que le système soit soluble. Cependant, il n'est pas évident qu'elle soit suffisante.

Si le modèle correspond à la réalité, elle est suffisante : on déterminera les valeurs exactes des paramètres de propagation inconnus et de ceux des sources. Mais dans la pratique, il y a peu de chance pour que le modèle soit conforme à la réalité. Dans ce cas, il n'y a pas obligatoirement de solution.

En effet, la procédure de calcul est la suivante :

- On a une matrice des densités spectrales :

$$\Gamma_S = \sum_{i=1}^N \gamma_i \vec{D}_i \vec{D}_i^+ \quad (14)$$

- On a des vecteurs propres \vec{V}_i qui correspondent aux valeurs propres non nulles de Γ_S ; ils sont tels que :

$$\vec{U}_i = \sum_{j=1}^N \beta_{ij} \vec{D}_j \quad (15)$$

- On cherche N vecteurs \vec{V}_i tels que :

$$\sum_{i=1}^N \vec{V}_i \vec{V}_i^+ = \Gamma_S \sum_{i=1}^N \lambda_i \vec{U}_i \vec{U}_i^+ \quad (16)$$

Ils sont dans le sous-espace engendré par les vecteurs \vec{V}_i , et donc :

$$\vec{V}_i = \sum_{j=1}^N v_{ij} \vec{U}_j \quad (17)$$

- Les vecteurs \vec{V}_i n'étant pas définis de façon unique, on cherche à les identifier à des vecteurs modèles :

$$\vec{V}_i = \sqrt{\alpha_i} \vec{d}_i$$

Or, d'après les relations ci-dessus, les vecteurs

\vec{V}_i s'écrivent :

$$\vec{V}_i = \sum_{j=1}^N v_{ij} \vec{U}_j = \sum_{j=1}^N v_{ij} \left(\sum_{k=1}^N \beta_{jk} \vec{D}_k \right) = \sum_{k=1}^N \left(\sum_{i=1}^N v_{ij} \beta_{jk} \right) \vec{D}_k \quad (18)$$

Ce sont donc des combinaisons linéaires des vecteurs direction inconnus des sources. Leur identification avec des vecteurs modèles ne peut donc être possible que si ces vecteurs modèles sont eux-mêmes des combinaisons linéaires des vecteurs direction des sources.

Il est bien évident qu'en général, il n'y a a priori aucune chance pour que ce soit le cas. Il est clair cependant que plus le modèle peut posséder de paramètres libres, plus il sera possible de se rapprocher de cette condition, dans la mesure bien sûr où une bonne connaissance du milieu guide le choix des paramètres à inclure dans le modèle.

De plus dans la pratique, on ne disposera que d'une estimation $\hat{\Gamma}$ de la matrice des densités spectrales. On n'aura donc que des estimations des vecteurs propres \vec{V}_i et donc même si le modèle était conforme à la réalité, il y a très peu de chance a priori pour que ces estimations soient dans le sous-espace engendré par les vecteurs direction des sources \vec{D}_i .

L'identification parfaite entre les vecteurs source expérimentaux \vec{V}_i et les vecteurs source modèle \vec{d}_i est donc impossible, et il est nécessaire d'avoir recours à des méthodes d'ajustement. Afin de minimiser le nombre de paramètres sur lesquels porte l'optimisation, on a choisi un critère de distance entre ce que l'on appellera la matrice modèle des densités spectrales des sources seules :

$$\Gamma_M = \sum_{i=1}^N \alpha_i \vec{d}_i \vec{d}_i^+ \quad (19)$$

et la matrice expérimentale des sources seules $\hat{\Gamma}_S$ déduite de la décomposition en vecteurs et valeurs propres de la matrice des densités spectrales estimée $\hat{\Gamma}$. Cette distance a été prise égale à la norme de Hilbert-Schmidt. Le critère à minimiser vaut donc :

$$c = \text{trace} (\Gamma_M - \hat{\Gamma}_S)^2 = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K [a_{ij}]^2 \quad (20)$$

où a_{ij} est le terme général de la matrice $(\Gamma_M - \hat{\Gamma}_S)$.

4. - ETUDE PAR SIMULATION.

La méthode image a été testée sur un cas simple. Pour cela il a fallu modéliser le milieu réel. On a choisi une propagation par petit fond où à la fois fond et surface sont parfaitement plans, réfléchissants et horizontaux (Fig. 2). Dans ce milieu, la propagation se fera par trois trajets : direct, réfléchi et réfléchi surface.

Le champ de bruit est constitué d'une part de deux sources de cohérence spatiale parfaite, et d'autre part d'un bruit de fond incohérent.



La réception s'effectue sur une antenne linéaire verticale constituée de 12 capteurs équidistants. Le pas entre capteurs est égal à une demi-longueur d'onde à la fréquence de travail : 750 Hz. La Figure 2 montre la géométrie de la situation simulée. Les deux sources ont la même puissance et sont à 7,5 m du fond et respectivement à 154,7 m et 103,6 m de l'antenne. La hauteur d'eau est égale à 29,5 m. Enfin, une dernière simplification a été faite : les fronts d'ondes correspondant à chaque trajet sont considérés comme plans à leur arrivée sur l'antenne.

On peut déjà se rendre compte qu'avec cette configuration, la formation de voie classique, qui considère qu'il y a une onde plane par source, est inefficace comme le montre sa réponse portée sur la Figure 3.

Que permet alors la méthode image ? Une fois la matrice des densités spectrales expérimentale $\hat{\Gamma}$ obtenue, on effectue les opérations suivantes :

- On détecte le nombre de sources en extrayant les valeurs propres maximales. L'objet de l'exposé n'étant pas la détection, on supposera que celle-ci se fait sans erreur, ce qui est parfaitement justifié avec les rapports signal à bruit utilisés : 12 dB ou 0 dB, car dans ce cas les deux valeurs propres maximums λ_1 et λ_2 se détachent nettement du paquet des plus faibles.

- On construit l'estimation $\hat{\Gamma}_S$ de la matrice des densités spectrales des sources seules en utilisant les deux vecteurs propres \vec{V}_1 et \vec{V}_2 associés aux deux valeurs propres maximums λ_1 et λ_2 :

$$\hat{\Gamma}_S = (\lambda_1 - \sigma) \vec{V}_1 \vec{V}_1^* + (\lambda_2 - \sigma) \vec{V}_2 \vec{V}_2^*$$

où σ est la densité spectrale du bruit de fond que l'on supposera ici parfaitement estimée.

- On identifie $\hat{\Gamma}_S$ à une matrice Γ_M obtenue à partir d'un modèle plus ou moins proche de celui qui a servi à simuler la réalité.

Plusieurs cas ont été étudiés. Les résultats sont consignés dans le tableau 1. Tout d'abord, le modèle étant identique à la réalité et la hauteur d'eau supposée parfaitement connue, on a étudié l'erreur sur les paramètres des sources pour deux durées d'estimation de la matrice $\hat{\Gamma}$: 10 s et 30 s et pour deux valeurs du rapport signal à bruit des sources : 12 dB et 0 dB. Le tableau 1 montre que la précision s'améliore avec le temps d'estimation. \hat{h}_1 , \hat{D}_1 et $\hat{\gamma}_1$ représentent respectivement les estimations de la hauteur par rapport au fond, de la distance et de la densité spectrale de la ième source. Ensuite, on a laissé le paramètre

profondeur d'eau inconnu. Dans ce cas, à temps d'estimation égal, la précision est légèrement moins bonne que dans le cas du modèle où la hauteur d'eau est connue.

Enfin, le cas d'une erreur sur le paramètre profondeur d'eau a été étudié comme représentatif de la situation où l'observateur commet une erreur ("raisonnable") sur le modèle. On constate alors des erreurs plus importantes sur les paramètres des sources, sur les densités spectrales en particulier. On continue néanmoins à distinguer nettement les deux sources, ce qui n'est pas le cas avec la formation de voie classique.

5. - CONCLUSION.

Les résultats de la simulation très simple que l'on vient de décrire montrent que la méthode image peut être un moyen efficace pour traiter les cas de propagation compliqués dans lesquels la formation de voie classique est inefficace. On dispose donc là d'un moyen très intéressant pour résoudre le problème des incertitudes sur la forme des surfaces d'onde reçues des sources.

Cette méthode suppose cependant que l'on a tout d'abord su identifier correctement la cohérence spatiale du bruit de fond. Une erreur d'identification trop importante peut perturber de façon non négligeable les vecteurs propres associés aux valeurs propres maximums qui ne sont plus alors exactement dans l'espace image qui contient les sources.

Elle pose d'autre part deux problèmes, l'un théorique, l'autre pratique découlant du précédent. Le premier est celui de l'adéquation du modèle de propagation à la réalité. On a vu qu'un écart sur ce plan se traduit par une augmentation des erreurs d'estimation des paramètres des sources qui peut être importante. Il sera donc nécessaire de savoir construire dans toute circonstance un modèle pas trop éloigné de la réalité, notion que l'on devra préciser par l'expérimentation. L'adéquation exacte n'étant pas possible, la résolution directe d'un système d'équation pour trouver les paramètres des sources, ne semble pas envisageable. Il faut donc avoir recours à des méthodes d'ajustement mesure-modèle avec minimisation de critères du style moindres carrés. Le deuxième problème posé par la méthode est apporté par les nombreux minimums locaux que possède l'hypersurface qui représente le critère en fonction des paramètres, tout au moins avec le critère choisi. Il serait intéressant d'étudier la complexité de cette surface pour différents critères, afin de faciliter la tâche des algorithmes de minimisation.

METHODES HAUTE RESOLUTION EN ECOUTE PASSIVE
HIGH RESOLUTION METHODS IN PASSIVE LISTENING

REFERENCES:

- [1] W.S. LIGGET "Passive sonar : fitting models to multiple time series" Proceed. NATO ASI on Signal Processing, 21 aug.-11 sept. 1972, Loughborough pp. 327-345 (Academic Press).
- [2] G. BIENVENU "Détection passive de sources ponctuelles dans un bruit isotrope" 5ème Colloque GRETSI Nice, 16-21 juin 1975, pp. 473-479
- [3] H. MERMOZ "Imagerie, corrélation et modèles" Ann. Télécom. 31, n° 12, Janv. Fev. 1976, p. 17-36
- [4] J.L. LACOUME, B. BOUTHEMY, F. GLANGEAUD, C. LATOMBE A. SILVENT "Caractérisation par analyse interspectrale du champ d'ondes reçu sur un réseau de capteurs" 7ème Colloque GRETSI, Nice, 28 mai-2 juin 1979, pp. 80/1-80/7
- [5] G. BIENVENU "Influence de la cohérence spatiale du bruit de fond sur la résolution de sources ponctuelles" 6ème Colloque GRETSI, Nice, 26-30 avril 1977, pp. 17/1-17/9
- [6] G. BIENVENU, L. KOPP "Principe de la goniométrie passive adaptative" 7ème Colloque GRETSI Nice, 28 mai-2 juin 1979, pp. 106/1-106/10
- [7] G. BIENVENU, L. KOPP "Adaptativity to background noise spatial coherence for high resolution passive methods" Proceedings ICASSP-80, 9-11 april 1980 Denver, CO (USA) pp. 307-310

	Valeurs réelles	S/B = 0 dB		S/B = -12 dB					
		T = 10 s	T = 30 s	T = 10 s	T = 30 s	T = 30 s	T = 30 s	T = 30 s	
SOURCE n° 1	\hat{h}_1 (m)	7,5 m	8	8	8	8	8	8	8
	\hat{D}_1 (m)	154,7 m	156	154	156	154	154	160	140
	$\hat{\gamma}_1$	1	1,2	0,99	1,2	1	1,2	3,5	2,1
SOURCE n° 2	\hat{h}_2 (m)	7,5 m	2	8	2	2	2	2	3
	\hat{D}_2 (m)	103,6 m	94	108	94	110	114	110	110
	$\hat{\gamma}_2$	1	1,3	1,1	1,1	1,1	1,1	0,9	2
Paramètre modèle : hauteur d'eau	29,5 m	29,5	29,5	29,5	29,5	29,5	Libre	34	26

- TABLEAU 1 -

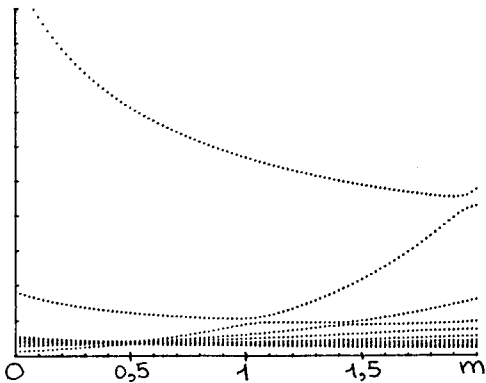


Fig. 1 - Diagramme des valeurs propres en fonction du paramètre inconnu m de la cohérence spatiale du bruit de fond dont le paramètre réel vaut 0,5. Il y a deux sources dans le milieu

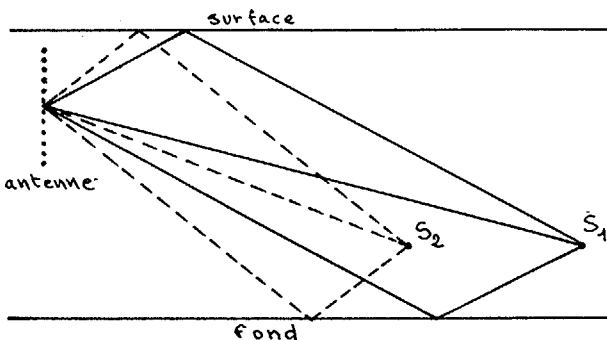


Fig. 2 - Géométrie du champ de bruit utilisé dans la simulation

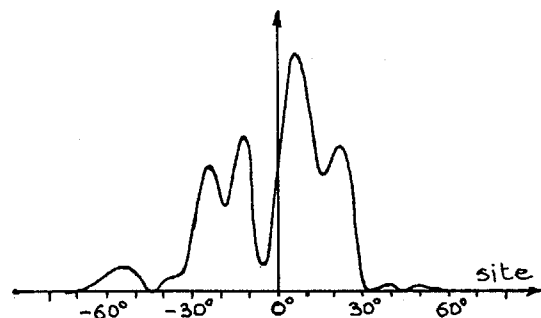


Fig. 3 - Réponse de l'antenne classique au champ schématisé sur la Figure 2.

