

HUITIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

365



NICE du 1^{er} au 5 JUIN 1981

TRAITEMENT SPATIAL AVEC DES ANTENNES DEFORMEES*

SPATIAL PROCESSING WITH DISTORTED ARRAYS*

L. KOPP*, M. AIACH**

*THOMSON-CSF, Division A.S.M. Chemin des Travaux
06802 Cagnes-sur-Mer - France

**FACULTE DES SCIENCES, Parc Valrose
06034 NICE-CEDEX

RESUME

Les grandes ouvertures nécessaires à l'écoute passive en TBF conduisent à utiliser des câbles remorqués porteurs d'hydrophones. Les vibrations du câble sous tension et ses ondulations incontrôlables sous l'effet de la traction et des forces hydrodynamiques posent le problème de faire un traitement spatial avec une antenne de forme inconnue ou partiellement connue. Ce problème offre de grandes similitudes avec celui que posent à l'optique astronomique les distorsions atmosphériques pour lequel une technique de compensation a été proposée. Le but de cet article est de montrer dans quelle mesure cette méthode (dite de maximum de contraste) est applicable à l'acoustique sous-marine.

SUMMARY

Passive listening at very low frequencies asks for very wide aperture provided, for instance, by an array where sensors are carried by a towed cable. Like any string under tension such a cable will oscillate under any perturbation and the spatial processing may be strongly affected. A problem we suggest to discuss under the light of optical astronomy where atmospheric distortions ask similar questions and has lead to an interesting solution known as the "image sharpening" telescope.



1. - INTRODUCTION.

Dans la mesure du possible, les réseaux de capteurs utilisés en acoustique sous-marine ont, bien sûr, des géométries connues. Cependant, dans certaines applications, le problème peut se poser de faire un traitement avec des antennes dont la forme est mal connue à la suite de déformations inévitables. Par exemple, on peut citer :

- . l'écoute passive en très basse fréquence (~ 100 Hz) où on utilise de longues antennes constituées d'hydrophones fixés sur un câble remorqué (flûtes) : un câble sous tension "ondulera" sous l'effet de la moindre perturbation,
- . les systèmes de réseaux aléatoires constitués de bouées dérivantes.

La question est de faire de l'écoute passive et en particulier de donner une image du champ acoustique à l'aide d'une antenne de forme inconnue (ou plutôt, en pratique, partiellement connue).

On propose pour cela d'utiliser une méthode de "contraste d'image" appliquée en astronomie à la correction d'images dégradées par les turbulences atmosphériques. Cette méthode permet, d'une façon purement passive, d'identifier la forme de l'antenne (à certaines ambiguïtés près) indépendamment de la composition du champ sonore.

2. - METHODE DU MAXIMUM DE CONTRASTE.

On commence par décrire la façon dont cette méthode est appliquée en optique et les hypothèses sur lesquelles elle s'appuie. Lorsqu'une étoile (ponctuelle) est observée par un télescope à travers une atmosphère turbulente, l'image formée et photographiée est fractionnée en "tâchetures" (speckles), du moins si le temps de pose utilisé est suffisamment faible pour qu'on puisse considérer l'atmosphère comme "figée" (dans le cas contraire on observera une tâche dont le diamètre caractérise plutôt la turbulence que l'étoile). Le fractionnement de l'étoile provient du fait que l'onde plane issue de l'étoile observée est déformée par les inhomogénéités de la couche atmosphérique (Fig. 1 très symbolique).

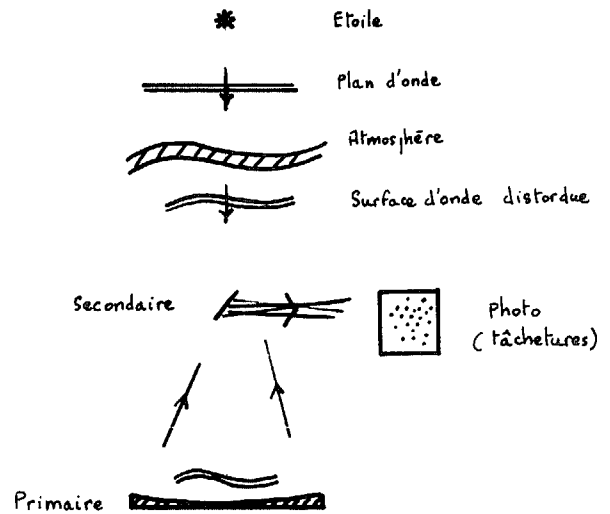


Figure 1

Si on observe deux étoiles angulairement proches le système de tâchetures est un mélange de 2 sous-systèmes qu'on est, en général, incapable de séparer. Quand les étoiles séparées sont très proches (étoiles doubles par exemple), on peut considérer que les ondes planes qui en sont issues ont traversé la même couche inhomogène et que les deux sous-systèmes sont identiques à une translation près. Une analyse "spatiale" de l'image permet de mettre cette translation en évidence (speckle interférométrie). Le fait que les ondes planes aient été déformées de la même manière s'appelle la condition d'isoplanétisme. Elle est vérifiée dans un domaine angulaire restreint (zone d'isoplanétisme). Une méthode simple, qui pouvait sembler utopique, pour séparer deux étoiles dans la zone d'isoplanétisme, est d'identifier la surface d'onde déformée et de la compenser à l'aide d'un miroir déformable. Il est remarquable qu'une telle opération soit réalisable et ait été réalisée (en temps réel) [4,5,6,7].

Cette méthode est fondée sur le fait qu'il est possible de définir une fonction de l'image formée qui est maximale lorsque la déformation est parfaitement compensée : cette fonction est le "contraste d'image". Pour appliquer cette méthode à l'acoustique sous-marine les mêmes hypothèses devront pouvoir s'appliquer :

- . court temps de pose,
- . isoplanétisme,
- . critère de contraste.

L'hypothèse d'isoplanétisme n'est jamais vérifiée en acoustique sous-marine si on considère les déformations dues à la propagation (deux sources, aussi proches soient-elles, sont distordues de façon indépendante).

TRAITEMENT SPATIAL AVEC DES ANTENNES DEFORMEES
 SPATIAL PROCESSING WITH DISTORTED ARRAYS

Dans le cas particulier où c'est l'antenne qui est déformée, on a, en quelque sorte, isoplanétisme sur tout l'horizon d'observation (la "déformation" subie par les signaux n'est pas exactement la même pour des sources de gisements différents, mais elle peut se déduire de façon déterministe d'un point du milieu à l'autre.

L'hypothèse sur les courts temps de pose signifie qu'on doit disposer d'une mesure de qualité suffisante (ici l'antenne sera supposée déformée mais fixe : l'étude permet de fixer la vitesse de déformation limite pour laquelle la méthode s'appliquera).

De façon analogue à l'optique, on définit un contraste d'image par :

$$C(D, D_o) = \int_{\Omega} \gamma^2(D, D_o, \theta) d\theta$$

où l'image est définie par l'ensemble $\{\gamma(D, D_o, \theta)\}_{\theta \in \Omega}$ des puissances estimées $\gamma(D, D_o, \theta)$ en fonction de la position θ (sur l'horizon Ω).

Pour fabriquer une image il faut faire une hypothèse (notée D) sur le modèle de propagation, qui, en réalité, ne correspond pas au modèle de propagation réel (noté D_o).

Le contraste d'image dépend également du système qui a formé l'image, c'est-à-dire du traitement d'antenne appliqué aux signaux :

Traitement classique :

$$\gamma(D, D_o, \theta) = \vec{D}_{\theta}^+ \Gamma_{D_o} \vec{D}_{\theta} / (\vec{D}_{\theta}^+ \vec{D}_{\theta})^2$$

Traitement adaptatif :

$$\gamma(D, D_o, \theta) = (\vec{D}_{\theta}^+ \Gamma_{D_o}^{-1} \vec{D}_{\theta})^{-1}$$

Traitement goniométrique : [2, 3]

$$\gamma(D, D_o, \theta) = \left(\sum_{i \in \text{Ker}} (\vec{D}_{\theta}^+ \vec{U}_i \vec{U}_i^+ \vec{D}_{\theta}) \right)^{-1}$$

Dans les expressions ci-dessus Γ_D est la matrice de densité spectrale mesurée et \vec{D}_{θ} le vecteur direction associé à la position θ (qui dépend du choix du modèle).

On peut démontrer dans un cas particulier la validité du critère de contraste : la démonstration présentée ici concerne des distorsions d'un type particulier (on suppose que, dans la chaîne de réception, existent des déphasages accidentels, et que l'antenne est linéaire à capteurs équidistants).

La matrice de densité spectrale mesurée s'écrit :

$$\hat{\Gamma}_S = \sum_{i=1}^N \gamma_i (\alpha_o \vec{D}_i) (\alpha_o \vec{D}_i)^+$$

où $\alpha_o = \text{diag}(e^{i\psi_1}, \dots, e^{i\psi_K})$ [Les ψ_i désignent les déphasages accidentels]. On néglige ici l'effet du bruit de fond. On va démontrer que le contraste :

$$I_c = \int_{-1}^{+1} |(\alpha \vec{D}_{\theta})^+ \hat{\Gamma}_S (\alpha \vec{D}_{\theta})|^2 d(\sin\theta)$$

est, comme fonction de α , maximale lorsque $\alpha = \alpha_o$.

Remarques :

- I_c représente, à un facteur près, le carré de l'image donnée par le traitement classique
- Pour des raisons qui apparaissent ci-dessous, la variable d'intégration $\sin\theta$ est plus judicieuse que θ .

On aura :

$$I_c = \int_{-1}^{+1} d(\sin\theta) \left| \sum_{i=1}^N \gamma_i \left| \sum_{k=1}^N \omega_{\theta}^{1-k} e^{-i\varphi_k} e^{i\psi_k} \omega_i^{k-1} \right|^2 \right|^2$$

où $(\vec{D}_{\theta})_k = \omega_{\theta}^{k-1}$; $(\vec{D}_i)_k = \omega_i^{k-1}$; $(\alpha)_{kk} = e^{i\psi_k}$; $(\alpha_o)_{kk} = e^{i\psi_k}$

où $\omega_{\theta} = \exp(2i\pi f \frac{d}{c} \sin\theta)$

Développant :

$$I_c = \int_{-1}^{+1} d(\sin\theta) \sum_{ijklmn} \gamma_i \gamma_j \omega_{\theta}^{\ell-k+m-n} \omega_i^{k-\ell} \omega_j^{n-m} e^{i\Delta\varphi_{k\ell mn}}$$

avec $\Delta\varphi_{k\ell mn} = \varphi_{\ell} - \varphi_k + \psi_k - \psi_{\ell} + \varphi_m - \varphi_n + \psi_n - \psi_m$

Isolant les termes en θ :

$$I_c = \sum_{ijklmn} \gamma_i \gamma_j \omega_i^{k-\ell} \omega_j^{n-m} e^{i\Delta\varphi_{k\ell mn}} \int_{-1}^{+1} d(\sin\theta) \omega_{\theta}^{\ell-k+m-n}$$

Or :

$$\int_{-1}^{+1} d(\sin\theta) \omega_{\theta}^{\ell-k+m-n} = \int_{-1}^{+1} du e^{2i\pi f \frac{d}{c} u(\ell-k+m-n)}$$

Si on travaille à $\lambda/2$ (d'une façon équivalente, on intègre sur un horizon Ω convenable), on aura $2f \frac{d}{c} = 1$, et :

$$I_c = \sum_{ijklmn} \gamma_i \gamma_j \omega_i^{k-\ell} \omega_j^{n-m} e^{i\Delta\varphi_{k\ell mn}} \sin c(h)$$

avec :

$$\sin c(h) = \frac{\sin \pi h}{\pi h} \quad \text{et } h = \ell - k + m - n$$

Si $h \neq 0$, on trouvera $\sin c(h) = 0$. En changeant les indices de sommation $(k, \ell, m, n) \rightarrow (k, p, m, h)$ avec :

$p = k - \ell, h = \ell - k + m - n$:

$$I_c = \sum_{ijkpm} \gamma_i \gamma_j \left(\frac{\omega_i}{\omega_j}\right)^p e^{i\Delta\varphi_{kpm}}$$



Après sommation sur (i, j) :

$$I_c = \sum_{k,p,m} e^{i\Delta\varphi_{kpm}} \sum_i \gamma_i \omega_i^p \sum_j \omega_j^p \gamma_j$$

$$= \sum_{k,p,m} e^{i\Delta\varphi_{k,p,m}} \left| \sum_i \gamma_i \omega_i^p \right|^2$$

La fonction, somme d'exponentielle pondérée par des coefficients positifs sera maximale si $\Delta\varphi_{kpm} = 0$ $\forall kpm$, c'est-à-dire s'il est possible de réaliser :

$$\Delta\varphi_{kpm} = \varphi_l - \varphi_k + \psi_k - \psi_l + \varphi_m - \varphi_n + \psi_n - \psi_m = 0$$

$$= \varphi_{k-p} - \varphi_k + \psi_k - \psi_{k-p} + \varphi_m - \varphi_{m-p} + \psi_{m-p} - \psi_m = 0$$

dont la solution générale vérifie :

$$\psi_k - \varphi_k = a + bk \quad \forall k \in [1, K]$$

"a" correspond à la référence de phase choisie et n'a aucune influence pratique.

"b" a pour effet que $(\alpha)_{kk}$ soit connu à e^{ikb} près. On aura une indétermination dans la direction de référence du système. En tout cas quand $\alpha = \alpha_0$, I_c est bien maximale. Cette ambiguïté n'est pas gênante en optique où seule la résolution angulaire est intéressante et non pas la position absolue des sources.

3. - APPLICATION DE LA METHODE.

Le contraste $C(D, D_0)$ est maximal quand $D = D_0$. L'identification de D_0 pourra se faire en appliquant une méthode d'optimisation sur $C(D, D_0)$ comme fonction de D . Pour les besoins de l'étude, le problème a été simplifié : l'antenne aura une forme partiellement inconnue dépendant d'un petit nombre de paramètres.

On a par exemple étudié les cas où l'antenne est circulaire de rayon inconnu (problème à 1 paramètre) et où l'antenne a une forme sinusoïdale de fréquence et d'amplitude inconnues (problème à 2 paramètres).

On analyse un champ de bruit constitué de deux sources de gisement 0° et 40° , de puissance spectrale -3 dB par rapport au bruit de fond incohérent ; il y a 12 capteurs. La distance "rectifiée" entre capteurs est de 1 m et on travaille à une fréquence $f = 750$ Hz. Dans le cas où l'antenne est circulaire on a représenté (Fig. 2) les réponses des traitements classiques, adaptatifs, goniométriques obtenues avec une antenne de rayon $R = 20$ m, en supposant l'antenne

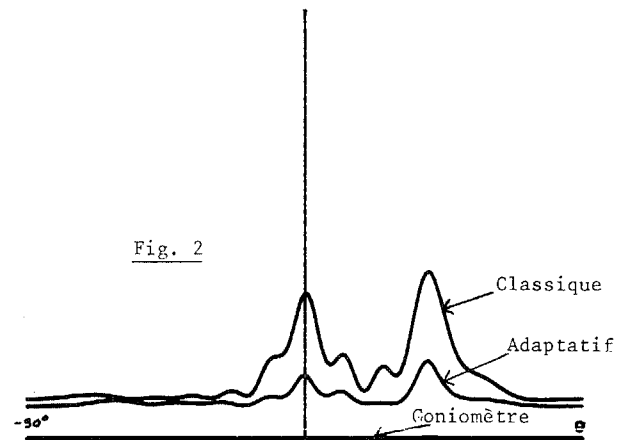


Fig. 2 - L'antenne est circulaire de rayon $R = 20$ m. Les traitements d'antenne appliqués la supposent rectiligne. La réponse inverse du goniomètre (noyau 4) est présentée.

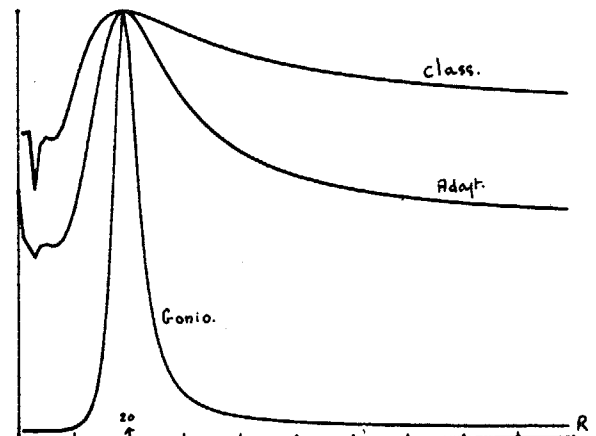


Fig. 3 - Evolution du critère de contraste en fonction du rayon supposé d'une antenne circulaire de rayon 20 m.

linéaire (rayon infini); on utilise une résolution spectrale de 20 Hz et on intègre 200 spectres pour estimer la matrice de densité spectrale croisée et fabriquer l'image.

Le critère de contraste est représenté Fig. 3 en fonction du rayon supposé et on remarquera que le contraste est bien maximal, pour les trois traitements lorsque le rayon correct de l'antenne a été trouvé. (Le critère de contraste représenté est normalisé au maximum pour les trois traitements).

La figure 4 représente les images obtenues après correction. La simplicité du modèle à 1 paramètre permet de déterminer, en fonction du rapport signal à bruit des deux sources, la durée d'estimation minimale pour pouvoir déterminer la forme de l'antenne avec une précision suffisante (on s'est fixé une borne de 5 % - Tableau 1).

Le problème à 2 paramètres nécessite déjà une masse de calcul beaucoup plus importante et on a simplement donné un exemple d'application de la méthode.

TRAITEMENT SPATIAL AVEC DES ANTENNES DEFORMEES
 SPATIAL PROCESSING WITH DISTORTED ARRAYS

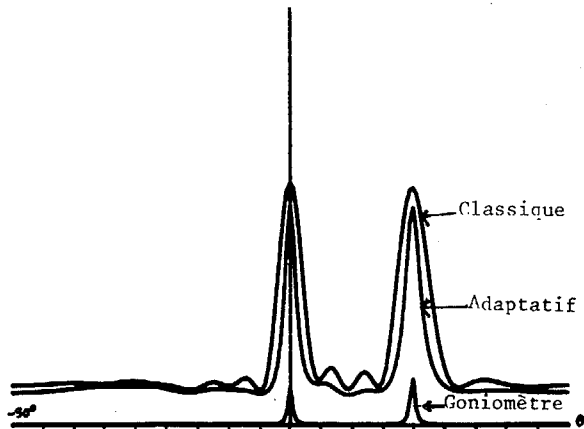


Fig. 4 - Après correction par la méthode du maximum de contraste

- TABLEAU 1 -

S/N (dB)	Class.	Adapt.	Goniomètre
-10	400	400	800
-7	350	350	300
-5	250	350	100
-4	250	300	100
-3	250	300	100
-2	250	300	100
-1.5	250	300	100
-1	250	300	100
-0.5	250	300	100
0	250	300	100

Tableau 1 : Produit BT minimal nécessaire à la détermination correcte (5 %) du rayon d'une antenne circulaire en fonction de la puissance de deux sources (0°, 40°)

L'antenne travaille sur le même champ de bruit que précédemment. Elle a une forme sinusoïdale de fréquence 0,5 m⁻¹ et d'amplitude 0,5 m (λ/4). On la suppose tout d'abord rectiligne. Les réponses d'antenne sont représentées Fig. 5. Les Figures 6 a,b,c représentent l'évolution du critère de contraste pour les trois traitements en fonction des paramètres supposés.

Les maxima du contraste ont bien lieu pour les valeurs correctes des deux paramètres du problème. La Figure 7 donne les réponses d'antenne après correction.

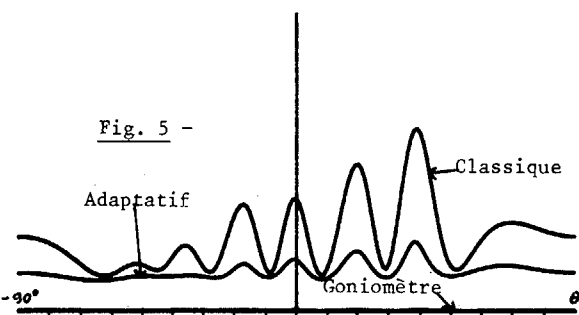


Fig. 5 - Antenne sinusoïdale de fréquence 0,5 m⁻¹ et d'amplitude 0,5 m (λ/4). Réponses d'antenne en supposant qu'elle est rectiligne

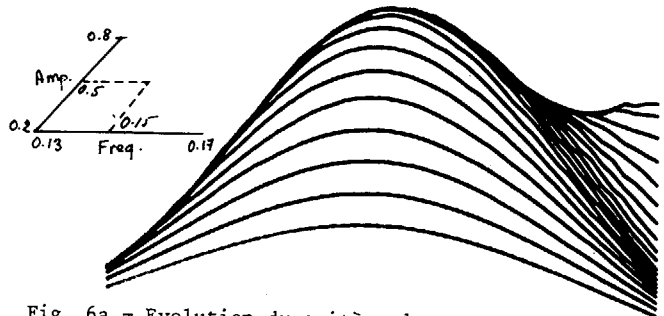


Fig. 6a - Evolution du critère de contraste en fonction des paramètres supposés de la sinusoïde (traitement classique)

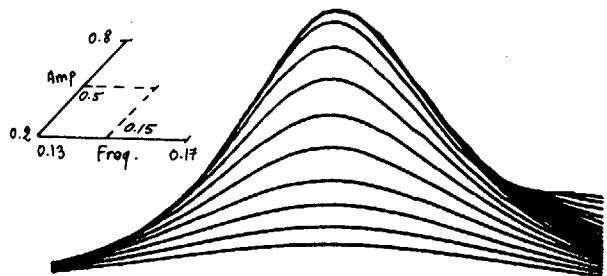


Fig. 6b - Evolution du critère de contraste en fonction des paramètres supposés de la sinusoïde (traitement adaptatif)

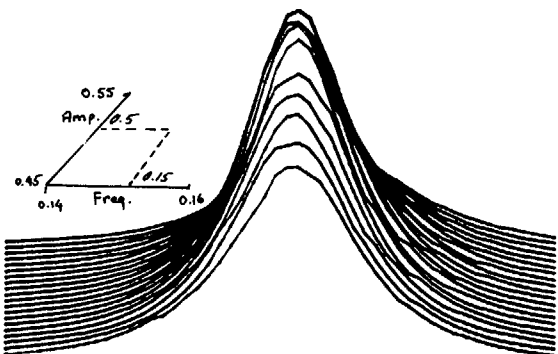


Fig. 6c - Evolution du critère de contraste en fonction des paramètres supposés de la sinusoïde (Goniomètre en nouveau 4)

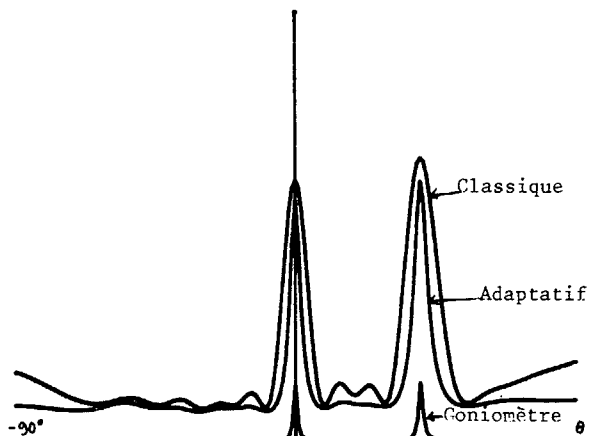


Fig. 7 - Réponse de l'antenne sinusoïdale après correction par la méthode du maximum de contraste

4. - REMARQUES.

Les simulations précédentes présentent certains caractères intéressants en particulier les durées d'intégration et les puissances des sources ne sont nullement prohibitives. Cependant, en pratique, on sera rapidement limité par la masse des calculs nécessaires à analyser des modèles d'antenne permettant une description plus fine (en intégrant davantage de paramètres).

Certains phénomènes n'apparaissent pas clairement dans la présentation précédente : on a montré comment, dans certains cas, il pouvait y avoir un problème d'ambiguïté (un exemple simple est celui d'une antenne circulaire de rayon de courbure R égal à la distance de la seule source présente).

Il semble qu'un nombre minimal de sources soit nécessaire pour pouvoir décrire la forme de l'antenne. En utilisant le formalisme de H. MERMOZ [1], si l'antenne possède K capteurs et qu'il y ait N sources dans le milieu, on dispose de p paramètres libres pour décrire le modèle de propagation. Dans le cas du problème plan où les sources sont à l'infini, on aura

$$p = N(K - \frac{N+3}{2})$$

Si la propagation est "parfaite" ces p paramètres pourront servir à décrire la forme de l'antenne (qui fait partie du modèle de propagation). Si on a p_0 paramètres pour décrire la forme de l'antenne, on devra avoir $p \geq p_0$, c'est-à-dire :

$$N^2 - (2K-3)N + 2p_0 \leq 0$$

Il faut alors un nombre minimum de capteurs $K > \frac{3+\sqrt{8p_0}}{2}$

Auquel cas, il faudra que :

$$N_- \leq N \leq N_+$$

$$\text{avec : } N_{\pm} = \frac{2K-3 \pm \sqrt{(2K-3)^2 - 8p_0}}{2}$$

La condition la plus intéressante est $N > N_-$. On voit que si $p_0 < K+2 \Rightarrow N_- < 1$ et le problème est théoriquement soluble avec une seule source.

Ceci suppose bien sûr que le modèle d'antenne soit correct. Avec ce formalisme, le problème des déformations d'antenne apparaît comme un cas particulier du problème de la description du modèle de propagation et les mêmes méthodes d'identification peuvent s'y appliquer.

5. - CONCLUSIONS.

Pour corriger les images formées par un traitement d'antenne lorsque l'antenne est déformée, il est théoriquement possible d'appliquer une méthode de contraste d'image. En pratique, on sera cependant rapidement limité par les puissances de calcul nécessaires à la description d'une antenne dont la forme dépend de nombreux paramètres. Les résultats de simulations obtenus avec des formes d'antenne très simples sont cependant très encourageants bien qu'on ne puisse, et de loin, prétendre avoir ici épuisé le sujet même dans les cas les plus simples.

REFERENCES

- [1] H. MERMOZ "Imagerie, corrélation et modèles" Annales des Télécom. T. 31 n° 1-2, Jan. Fev. 1976
- [2] G. BIENVENU, L. KOPP "Principe de la goniométrie passive adaptative" Proceed. Colloque GRETSI Nice mai 1979, pp. 106/1-10
- [3] G. BIENVENU, L. KOPP "Adaptive high resolution passive methods" Proceeding EUSIPCO 80, Sept. 16-18 (1980), pp 715-721
- [4] A. MULLER and A. BUFFINGTON "Real-time correction of atmospherically degraded telescope images through image sharpening" JOSA, 64, 1200 (1974).
- [5] A. BUFFINGTON "Correction of atmospheric distortions with an image sharpening telescope" JOSA 64, 298 (1977)
- [6] J.W. HARDY "Active optics : a new technology for the control of light". Proc. IEEE 66, 651 (1978)
- [7] A. BUFFINGTON "First observatory results with an image sharpening telescope" JOSA 69, 84 (1979)