

# SEPTIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 28 MAI au 2 JUIN 1979

---

PRINCIPE DE LA GONIOMETRIE PASSIVE ADAPTATIVE \*  
PRINCIPLE OF ADAPTIVE LOCALIZATION IN PASSIVE LISTENING

G. BIENVENU et L. KOPP

Thomson-C.S.F., Division A.S.M., Chemin des Travaux  
06802 Cagnes-sur-Mer, France

Thomson-C.S.F., A.S.M. Division, Chemin des Travaux  
06802 Cagnes-sur-Mer, France

---

## RESUME

## SUMMARY

Pour mesurer, à l'aide d'une antenne passive, les paramètres des sources présentes dans un champ de bruit, l'antenne adaptative constitue un progrès certain. Il est cependant possible d'accroître encore les performances de mesure, au prix d'une augmentation de l'information a priori sur le milieu. L'antenne adaptative ne nécessite que la connaissance a priori de la forme de la surface d'onde reçue d'une source. Si l'on se donne, en plus, la cohérence spatiale du bruit de fond, on peut alors imaginer une méthode adaptative pour localiser les sources avec une précision asymptotique théoriquement infinie. On présente le principe de cette méthode et on examine sa robustesse vis à vis de la cohérence spatiale du bruit de fond.

In the field of passive listening, the adaptive antenna allows estimation of source parameters of the noise field with performances on the previous systems. However, it is still possible to increase these performances if more a priori information is given. Adaptive antenna only needs to know the shape of wavefronts coming from the sources. If the spatial coherence of the background noise is given, it is possible to find an adaptive method to locate sources with a theoretically infinite asymptotic accuracy. This method is presented here and its robustness to hypothesis on the spatial coherence of the background noise is studied.



PRINCIPE DE LA GONIOMETRIE PASSIVE ADAPTATIVE  
PRINCIPLE OF ADAPTIVE LOCALIZATION IN PASSIVE LISTENING

1. - INTRODUCTION.

Des études précédentes [1 à 4] ont progressivement montré l'intérêt pour localiser les sources en écoute passive, d'utiliser la décomposition en éléments propres de la matrice des densités spectrales  $\Gamma(f)$  des signaux reçus sur un ensemble de capteurs.

Cette méthode de décomposition repose sur une modélisation des cohérences spatiales des sources qui sont les grandeurs intéressantes et du bruit de fond qui pollue les mesures. On suppose que les sources sont ponctuelles et de cohérence spatiale parfaite : les signaux qu'elles créent sur les capteurs sont identiques à un filtrage linéaire près. On suppose de plus, connues la forme de la surface d'onde reçue d'une source et la fonction de transfert des capteurs : on supposera pour simplifier que le signal créé par une source est identique sur tous les capteurs à un temps de retard près caractéristique de la direction de cette source (onde plane, capteur omnidirectionnel et transparent). La matrice des densités spectrales d'une source seule s'écrit alors :

$$\Gamma_s(f) = \gamma(f) \vec{D}(f) \vec{D}^+(f)$$

$\vec{D}(f)$  est le vecteur direction de la source ( $\vec{D}^+$  est le transposé conjugué de  $\vec{D}$ ) :

$$\vec{D}^+(f) = [e^{-2\pi j f \tau_1}, e^{-2\pi j f \tau_2}, \dots, e^{-2\pi j f \tau_K}]$$

$\tau_k$  est le retard sur le capteur  $k$   
 $\gamma(f)$  est la densité spectrale du signal sur les capteurs

Le bruit de fond est supposé incohérent (statistiquement indépendant entre les capteurs) : sa matrice des densités spectrales s'écrit :

$$\Gamma_B(f) = \sigma(f) I$$

On suppose enfin que les sources sont indépendantes entre elles et du bruit de fond, et que le champ de bruit peut être résolu par l'antenne : il comporte un nombre de sources  $N$  inférieur à celui des capteurs  $K$ . La matrice des densités spectrales du champ de bruit ainsi modélisé s'écrit donc :

$$\Gamma(f) = \sigma(f) I + \sum_{i=1}^{I < K} \gamma_i(f) \vec{D}_i(f) \vec{D}_i^+(f)$$

Les procédés de mesures tirés de cette méthode de décomposition présentent une propriété qui les rend très attrayants : ils possèdent asymptotiquement (temps

d'observation infini) un pouvoir de résolution infini ; il est possible de discriminer deux sources aussi proches et aussi faibles par rapport au bruit de fond soient-elles. Les limitations sont donc dues aux erreurs que l'on fait dans la modélisation. Elles sont de deux espèces. D'une part, les surfaces d'onde sont distordues par la propagation et le système de réception : il est possible [4] d'inclure dans le modèle des paramètres inconnus dans le modèle de propagation. D'autre part, le bruit de fond n'est pas indépendant entre les capteurs. On peut toujours supposer sa matrice des densités spectrales de la forme :

$$\Gamma_B = \sigma(f) J(f)$$

Si la cohérence spatiale  $J(f)$  est connue, il est possible de se ramener au cas précédent, mais en fait  $J(f)$  est mal connue [5].

On se propose d'examiner ici la sensibilité à la connaissance de la cohérence spatiale du bruit de fond d'un procédé que l'on a appelé goniomètre adaptatif.

2. - PRINCIPES DU GONIOMETRE.

Afin d'alléger l'écriture, on omettra dans la suite de noter la dépendance avec la fréquence  $f$ .

2.1. Bruit de fond incohérent.

La matrice des densités spectrales des signaux reçus s'écrit :

$$\Gamma = \Gamma_B + \Gamma_S = \sigma I + \sum_{i=1}^{I < K} \gamma_i \vec{D}_i \vec{D}_i^+$$

La matrice hermitienne  $\Gamma_S$  se diagonalise en  $\Lambda_S$  par une transformation unitaire  $U$  :  $\Gamma_S = U \Lambda_S U^+$ . On peut donc écrire :

$$\Gamma = U(\sigma I + \Lambda_S)U^+$$

$\Gamma$  et  $\Gamma_S$  ont mêmes vecteurs propres et des valeurs propres qui se déduisent par translation de  $\sigma$ . Si  $\text{Ker } \Gamma_S$  désigne le noyau de  $\Gamma_S$  (espace propre associé à la valeur propre multiple nulle) et si  $\{\vec{D}_i\}^+$  désigne l'espace orthogonal à l'espace vectoriel  $\{\vec{D}_i\}$  engendré par les vecteurs directions des sources ( $\vec{D}_i$ )  $i = 1, \dots, K$  que l'on suppose linéairement indépendants, on a :

$$\text{Ker } \Gamma_S = \{\vec{D}_i\}^+$$



PRINCIPE DE LA GONIOMETRIE PASSIVE ADAPTATIVE  
PRINCIPLE OF ADAPTIVE LOCALIZATION IN PASSIVE LISTENING

En effet, si  $\vec{v} \in \{\vec{D}_i\}^+ \Leftrightarrow \vec{v} \vec{D}_i^+ = \vec{D}_i^+ \vec{v} = 0 \quad \forall i=1, \dots, K$   
 et  $\Gamma_S \vec{v} = \sum_{i=1}^I \gamma_i \vec{D}_i^+ (\vec{D}_i^+ \vec{v}) = \vec{0} \Leftrightarrow \vec{v} \in \text{Ker } \Gamma_S$   
 Réciproquement :  $\vec{v} \in \text{Ker } \Gamma_S \Leftrightarrow \sum_{i=1}^I \gamma_i \vec{D}_i^+ (\vec{D}_i^+ \vec{v}) = \vec{0} \Rightarrow \vec{v} \in \{\vec{D}_i\}^+$

$$\Gamma^* = \Gamma_o^* + V$$

La perturbation V dégradera les performances du goniomètre

### 3. - ETUDE DE LA PERTURBATION.

Si par extension on appelle  $\text{Ker } \Gamma$  l'espace propre de  $\Gamma$  associé à la plus petite valeur propre  $\sigma$ , on a d'après ce qui précède :

$$\text{Ker } \Gamma = \text{Ker } \Gamma_S = \{\vec{D}_i\}^+$$

Si  $g(\vec{\theta})$  désigne le module de la projection orthogonale du vecteur direction  $\vec{D}_{\vec{\theta}}$  sur  $\text{Ker } \Gamma$  ( $\vec{\theta}$  désigne la direction géométrique), les solutions de l'équation  $g(\vec{\theta})=0$  sont précisément les directions des sources (d'où le nom de "goniomètre" donné au système). En effet :

$$g(\vec{\theta}_k) = 0 \Leftrightarrow \vec{D}_{\vec{\theta}_k} \in \{\text{Ker } \Gamma\}^+ = \{\{\vec{D}_i\}^+\}^+ = \{\vec{D}_i\}$$

Si  $\vec{D}_{\vec{\theta}_k} \in \{\vec{D}_i\}$ , il existe une valeur  $i$  telle que :  
 $\vec{D}_{\vec{\theta}_k} = \vec{D}_{\vec{\theta}_i}$

En l'absence de lobes images,  $\vec{\theta}_k$  est la direction d'une source. Si, pour des raisons pratiques, on utilise la projection de  $\vec{D}_{\vec{\theta}}$  sur un seul vecteur de  $\text{Ker } \Gamma$ , la fonction  $f(\vec{\theta}) = |\vec{D}_{\vec{\theta}}^+ \vec{v}|$  ( $\vec{v} \in \text{Ker } \Gamma$ ) admet en général  $N-1$  zéros y compris la direction des  $K$  sources. L'ambiguïté qui en résulte pourra être levée par l'antenne détectrice qui, pour d'autres raisons, reste un élément indispensable d'une chaîne de détection passive.

#### 2.2. J connu, non incohérent.

J étant une matrice définie positive est réductible sous forme de cholesky  $J=CC^+$ . En calculant :  
 $C^{-1} \Gamma C^{-1+} = \Gamma^* = \sigma I + \sum_{i=1}^I \gamma_i (C^{-1} \vec{D}_i^+) (C^{-1} \vec{D}_i^+)^+$ , on aura :

$$\text{Ker } \Gamma^* = \{C^{-1} \vec{D}_i^+\}^+ \text{ avec les notations précédentes.}$$

L'étude des zéros de la projection de  $C^{-1} \vec{D}_{\vec{\theta}}$  sur  $\text{Ker } \Gamma^*$  fournira de même la direction des sources.

#### 2.3. J inconnu.

L'utilisation de la méthode précédente mène à une erreur :  $J_o$  est la cohérence spatiale inconnue du bruit de fond :  $\Gamma = \sigma J_o + \sum_{i=1}^I \gamma_i \vec{D}_i^+ \vec{D}_i^+$ . On suppose que la cohérence spatiale est J avec  $J = CC^+$ ; on a :

$$C^{-1} \Gamma (C^{-1})^+ = \Gamma^* = \sigma I + \sum_{i=1}^I \gamma_i C^{-1} \vec{D}_i^+ (C^{-1} \vec{D}_i^+)^+ + \sigma C^{-1} (J_o - J) C^{-1+}$$

Pour étudier cette perturbation de façon commode, on a modélisé la cohérence spatiale du bruit de fond par une famille, qui dépend d'un paramètre. Elle est obtenue en supposant que le bruit de fond est engendré par des bruiteurs répartis uniformément sur une surface horizontale  $\mathcal{S}$  avec des diagrammes de directivité de la forme :  $A(\theta) g(\alpha)$  ( $\theta$  : gisement ;  $\alpha$  : site) et que les capteurs de réception sont dans un plan parallèle à  $\mathcal{S}$ . La matrice de cohérence spatiale est alors donnée par :

$$J = \frac{\int_{\mathcal{S}} A^2(\theta) g^2(\alpha) \text{Tga } \vec{D}_{\alpha, \theta}^+ \vec{D}_{\alpha, \theta}^+ d\alpha d\theta}{\int_{\mathcal{S}} A^2(\theta) g^2(\alpha) \text{tga } d\alpha d\theta}$$

En choisissant une famille de bruits isotropes :  $A(\theta) = \text{Cte}$ , et avec des diagrammes de directivité en site de la forme  $g(\alpha) = \cos \alpha^m$ , on trouve une famille de matrices de cohérence spatiale  $J_m$  symétriques et réelles de terme général :

$$(J_m)_{k\ell} = \frac{2^m m!}{(2\pi \frac{f}{c} d_{k\ell})^m} J_m(2\pi \frac{f}{c} d_{k\ell})$$

où  $J_m$  est la fonction de Bessel d'ordre  $n$  ( $m \in \mathbb{R}^+$ ),  $d_{k\ell}$  la distance entre les capteurs  $k$  et  $\ell$ , et  $c$  la vitesse de propagation du son. Ce modèle semble proche de la réalité [7] [8].  $J_m$  sera la cohérence spatiale inconnue et  $J_o$  la cohérence spatiale supposée.

L'étude de la perturbation ne peut être faite ici de façon exhaustive. On donnera simplement un des exemples de simulation qu'on pourrait multiplier à l'infini : l'antenne de réception est linéaire et composée de 8 capteurs équidistants d'une demi-longueur d'onde à 750 Hz. Le champ de bruit comporte outre le bruit de fond de paramètre de cohérence spatiale :  $m_o = 1$ , deux sources situées dans le plan de l'antenne parallèle à  $\mathcal{S}$  dans les gisements  $0^\circ$  et  $10^\circ$  et de rapports signal à bruit (rapport des densités spectrales) égaux à -10 dB.

La Fig. 1 montre l'évolution des valeurs propres de  $\Gamma^*$  en fonction du paramètre  $m$  que l'on a fait varier de 0 à 2. La perturbation lève la dégénérescence de la plus petite valeur propre de  $\Gamma_o^*$ . Elle crée des "mélanges" entre sources et bruits et si on essaie d'utiliser le noyau initial tel qu'il a été perturbé



PRINCIPE DE LA GONIOMETRIE PASSIVE ADAPTATIVE  
PRINCIPLE OF ADAPTIVE LOCALIZATION IN PASSIVE LISTENING

par  $V$ , on a des difficultés à choisir les vecteurs correspondants, qui ne sont plus simplement indexés par le numéro des valeurs propres.

On s'aperçoit cependant que pour  $m < m_0$ , la numérotation n'est pas trop bouleversée (pas de "mélanges"), mais que pour  $m > m_0$ , il peut arriver que la valeur propre la plus élevée ne corresponde pas nécessairement à une source (ce qui avait déjà été mis en évidence [5] avec une autre famille de bruits).

On aura des phénomènes analogues avec des valeurs propres plus faibles (ici, seulement pour  $m > m_0$ , mais en fait cela dépendra de la position des sources, de la fréquence ...)

On a donc étudié systématiquement (dans le cadre de cet article seulement pour  $m = .5$  et  $m = 1.5$ ) les projections de  $C^{-1} \vec{D}_0$  sur chacun des vecteurs propres  $\vec{V}_i$  (on numérote les vecteurs propres selon l'ordre croissant des valeurs propres correspondantes) :  $f_i(\theta) = |\vec{V}_i^+ C^{-1} \vec{D}_0| / \|C^{-1} \vec{D}_0\|$ . La Fig. 2 montre en fonction du gisement les densités spectrales de sortie respectivement de l'antenne classique (2-a) et de l'antenne adaptative (2-b) : elles ne permettent pas de discriminer les deux sources. On remarque la variation en fonction du gisement du niveau du bruit de fond qui est due à sa cohérence spatiale.

On a porté sur les Fig. 3 et 4 les courbes  $f_i(\theta)$  pour chaque valeur de  $i \in [1, 8]$  et respectivement pour  $m = 0.5$  et  $m = 1.5$ . On remarque que les six premiers vecteurs propres ne sont pas toujours orthogonaux aux sources : pour  $m = 1.5$ , les deux premiers donnent des résultats satisfaisants, alors que ce sont le 5ième et le 6ième pour  $m = 0.5$ . Compte tenu de l'effet de la perturbation, il n'y a pas de raison d'utiliser  $f_1(\theta)$  plutôt qu'un autre  $f_i(\theta)$  correspondant par continuité à un vecteur de  $\text{Ker } \Gamma_0^*$ . C'est pourquoi le terme de "noyau" désignera désormais un sous-espace engendré par  $n$  vecteurs propres de  $\Gamma^*$  convenablement choisis, sur lequel on étudiera la projection de  $C^{-1} \vec{D}_0$ . On dira qu'on travaille à  $\text{Ker } = n$  avec les vecteurs correspondants.

On présente sur la Fig. 5 les résultats obtenus avec  $m = 0.5$  pour différents noyaux dont les compositions sont indiquées sur la figure : on s'aperçoit que les ambiguïtés disparaissent, mais que pour avoir de bons résultats, il faut utiliser les vecteurs 5 et 6. La Fig. 6 présente les résultats pour  $m = 1.5$  : les ambiguïtés disparaissent aussi, mais l'on n'a pas

intérêt à utiliser un noyau d'ordre trop élevé.

On remarque qu'avec le modèle utilisé, le choix d'une valeur pour le paramètre  $m$  supérieure à celle de  $m_0$ , assure le bon comportement des deux premiers vecteurs propres.

Les résultats d'une étude sur le pouvoir séparateur du goniomètre en fonction du rapport signal à bruit des sources et de l'erreur faite sur l'indice  $m$ , sont regroupés sur le tableau de la Fig. 7. Pour  $m > m_0$  on utilise le premier vecteur propre et pour  $m < m_0$ , les six premiers vecteurs propres. On a porté aussi sur ce tableau les résolutions obtenues avec les antennes classique et adaptative. La Fig. 8 illustre les performances meilleures en résolution du goniomètre en présence de 2 sources fortes (-3 dB) de plus en plus proches. Le bruit de fond correspond à  $m_0 = 1$  et on le suppose incohérent ( $m = 0.5$ ). Les courbes a, b et c sont obtenues avec un noyau comprenant les six premiers vecteurs propres et pour des séparations angulaires des sources égales à  $15^\circ$ ,  $10^\circ$  et  $5^\circ$ . La courbe d correspond au vecteur propre n° 6 seul, pour une séparation de  $5^\circ$  : le résultat obtenu est meilleur que précédemment (courbe c). Les courbes e, f et g sont obtenues avec  $m = 1.5$  et un noyau comprenant les deux premiers vecteurs propres.

#### 4. - RECHERCHE DU BRUIT DE FOND.

En dehors de la politique de choix du noyau, la méthode la plus efficace (et la plus logique) pour améliorer les performances est de faire une recherche de la cohérence spatiale du bruit de fond (adaptativité du système au bruit).

Les mesures expérimentales déjà effectuées [7] [8] permettent de donner une forme approchée de la cohérence spatiale en fonction des conditions extérieures (état de la mer, bathy ...). Il est nécessaire d'affiner et de compléter ces mesures afin d'établir un modèle paramétré de cohérence spatiale de bruit de fond. Si le modèle de bruit utilisé ici se révèle bien conforme à la réalité, les simulations précédentes suggèrent des approches possibles :

a) On remarque le changement radical de la forme du diagramme  $f_1(\theta) = |\vec{V}_1^+ C^{-1} \vec{D}_0| / \|C^{-1} \vec{D}_0\|$  lorsqu'on passe de  $m < 1$  à  $m > 1$ , qui dénote le passage par le "point focal" correspondant à la valeur correcte de la cohérence spatiale comme l'illustre la Fig. 9.



b) D'une façon générale, on pourra rechercher, dans une famille J de cohérences spatiales du bruit de fond, celle qui minimise un critère, qui pourra être par exemple, l'écart entre les plus petites valeurs propres : c'est en fait ce qu'illustre le diagramme de la Fig. 1.

#### 5. - CONCLUSION.

L'étude qui a été présentée montre que le goniomètre possède des performances intéressantes même si l'on n'a qu'une connaissance assez approximative de la cohérence spatiale du bruit de fond, à condition toutefois qu'une politique convenable pour le noyau soit appliquée. Avec le modèle utilisé, un choix du paramètre qui caractérise la famille de cohérence spatiale supérieur à celui du bruit réel, assure un bon comportement du vecteur propre qui correspond à la plus petite valeur propre, et même du second ce qui permet par leur utilisation simultanée de lever les ambiguïtés. On peut noter que ces dernières peuvent être levées aussi en intégrant les résultats dans une bande large, ou en utilisant des bases directives comme capteurs élémentaires.

Pour des raisons de simplicité, on n'a présenté que l'exploitation du procédé pour la détermination de la direction des sources. Mais il est évident que ses possibilités sont plus vastes. Comme dans le cas où l'on travaille sur l'espace engendré par les vecteurs propres qui ne sont théoriquement pas orthogonaux aux sources [4], il est possible d'introduire des paramètres inconnus pour caractériser la surface d'onde : les vecteurs propres utilisés devront être projetés alors sur des vecteurs directions qui dépendent aussi de ces paramètres. On peut introduire la distance des sources et chercher alors les zéros sur une surface gisement-distance par exemple. Ce procédé améliore sensiblement la mesure de distance en passif.

Enfin, pour conclure, on présente des résultats obtenus en mer dans des conditions de propagation difficiles (petits fonds, côte très proche). L'antenne utilisée est linéaire et composée de cinq capteurs omnidirectionnels équidistants de 1 mètre. Il y a sur la mer trois bâtiments reconnus. Les images du champ de bruit données par l'antenne classique (C) et l'antenne adaptative (A), et la position des sources donnée par le goniomètre (G) sont portées pour trois situations différentes sur la colonne de gauche de la Fig. 10 et sur la colonne de droite on a porté pour les mêmes situations l'inverse du goniomètre. Les termes de

la matrice des densités spectrales ont été estimés par analyse spectrale avec une résolution de 5 Hz et par intégration de 10 produits croisés. La réponse du goniomètre a été calculée en utilisant les deux premiers vecteurs propres et en supposant le bruit de fond conforme au modèle utilisé avec  $m = 0.5$ . Les résultats obtenus sont encourageants.

#### REFERENCES

- [1] W.L. OWSLEY "An adaptive search and track array (ASTA)", NUSL Technical Memorandum n° 2242166-69 July 1969
- [2] W.S. LIGGETT "Passive sonar : fitting models to multiple time series" NATO ASI On Signal Processing Loughborough (U.K), 1972
- [3] G. BIENVENU "Détection passive de sources ponctuelles dans un bruit isotrope" Cinquième Colloque National sur le traitement du signal et ses applications, Nice (16-21 juin 1975), pp. 473-479.
- [4] H. MERMOZ "Imagerie, corrélation et modèles" Annales de Télécommunications, Janv-Fév. 1976, t. 31, n° 1-2 pp. 17-36
- [5] G. BIENVENU "Influence de la cohérence spatiale du bruit de fond sur la résolution de sources ponctuelles" Sixième Colloque National sur le Traitement du signal et ses applications, Nice (26-30 avril 1977) pp. 17/1-17/9
- [6] B.F. CRON, C.H. SHERMAN "Spatial-correlation functions for various noise models" JASA, vol 34, n° 11 Nov. 1962, pp. 1732-1736
- [7] E.M. ARASE, T. ARASE "Correlation of ambient sea noise" JASA, vol 40, n° 1, 1966; pp. 205-210
- [8] B.F. CRON, B.C. HASSELL, F.J. KELTONIC "Comparison of theoretical and experimental values of spatial correlation" JASA, vol 37, n° 6, March 1965, pp. 523-529.



PRINCIPE DE LA GONIOMETRIE PASSIVE ADAPTATIVE  
 PRINCIPLE OF ADAPTIVE LOCALIZATION IN PASSIVE LISTENING

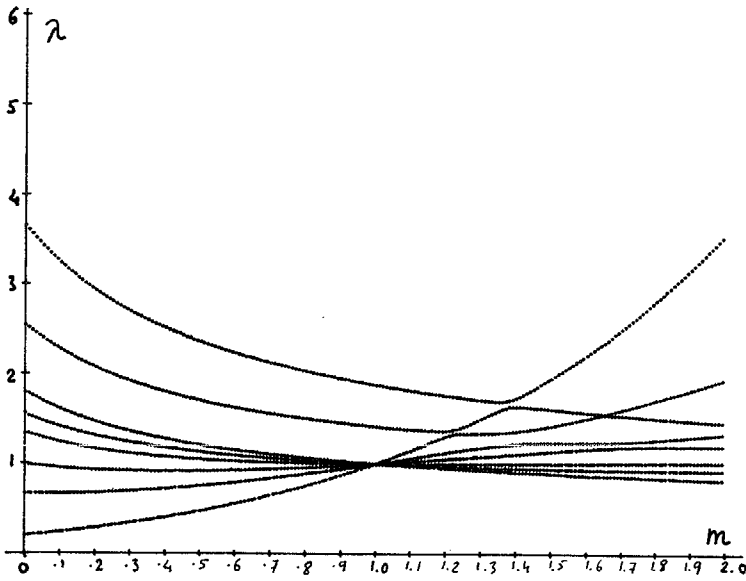


Fig. 1 - Diagramme des valeurs propres

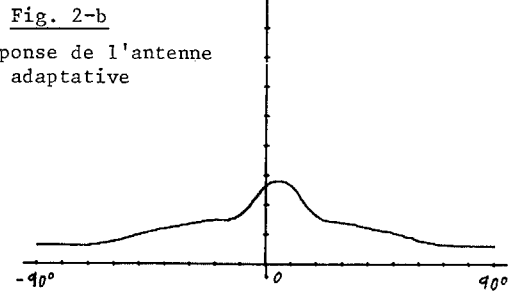
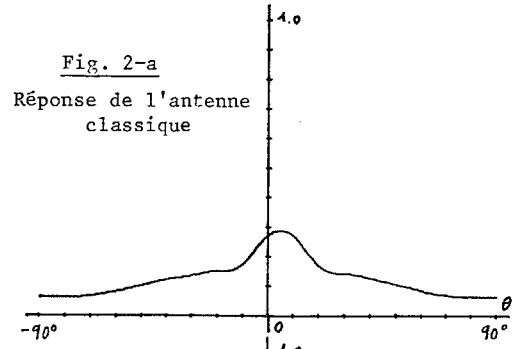


Fig. 2

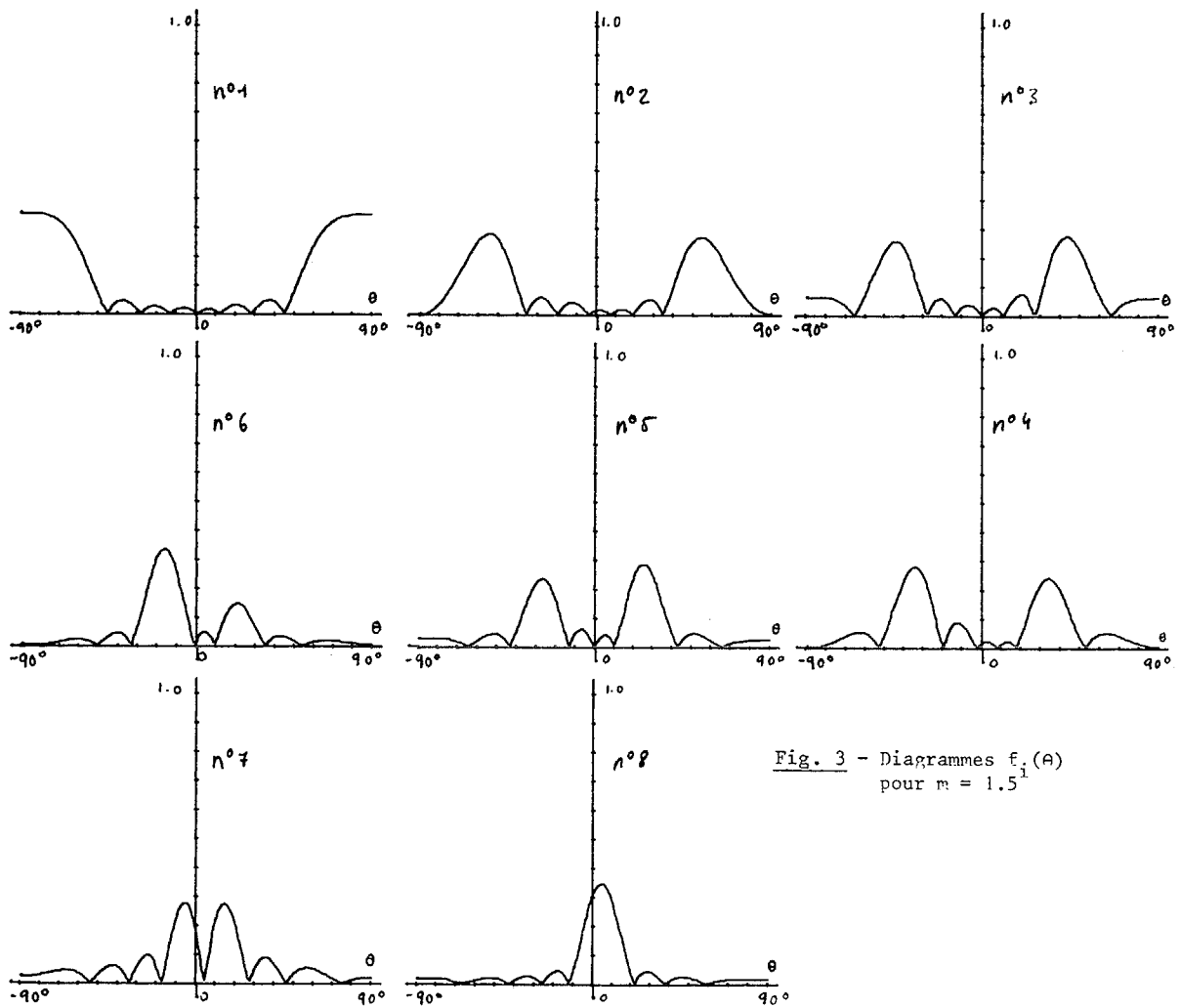


Fig. 3 - Diagrammes  $f_1(A)$  pour  $m = 1.5^1$

PRINCIPE DE LA GONIOMETRIE PASSIVE ADAPTATIVE  
 PRINCIPLE OF ADAPTIVE LOCALIZATION IN PASSIVE LISTENING

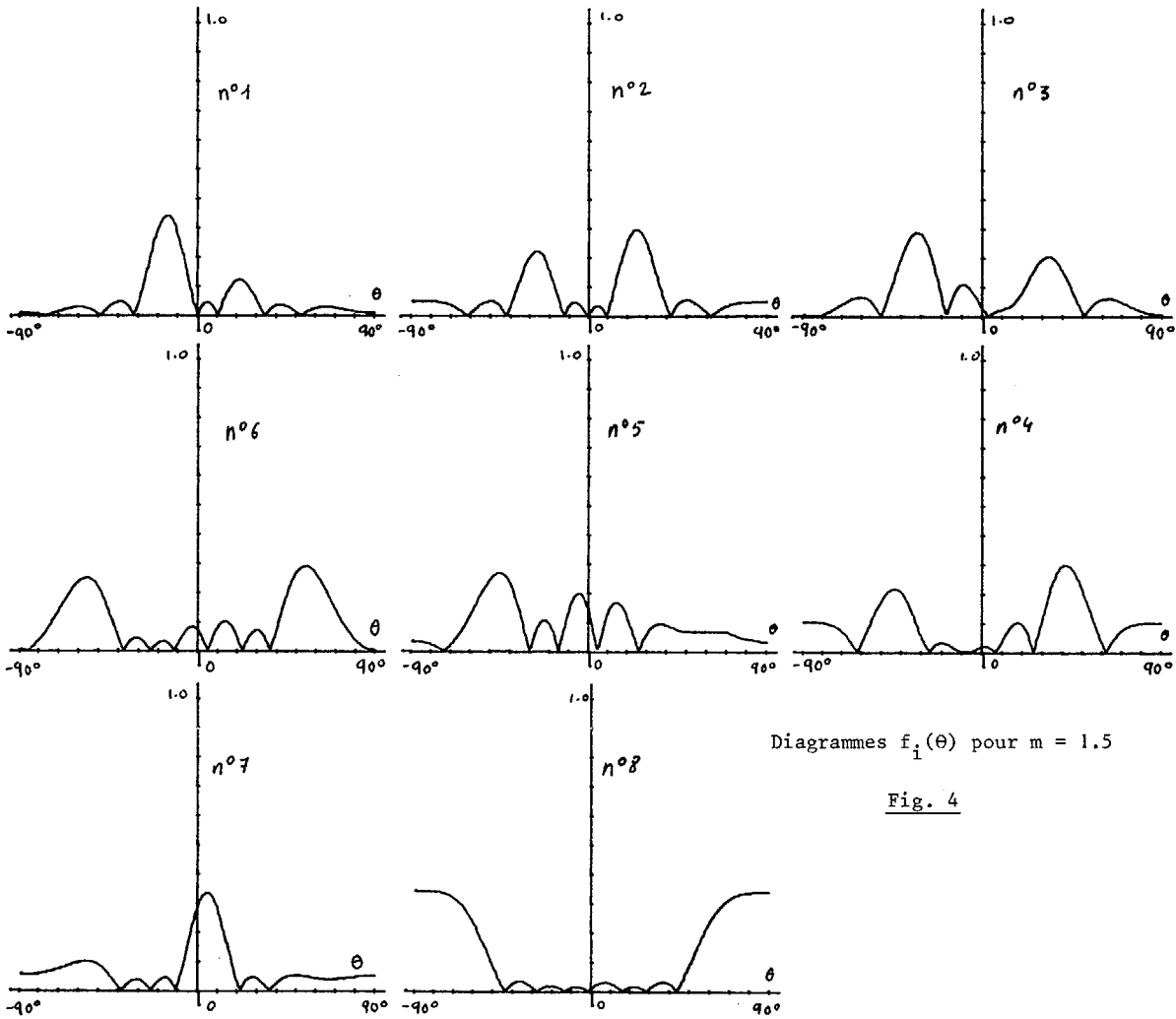
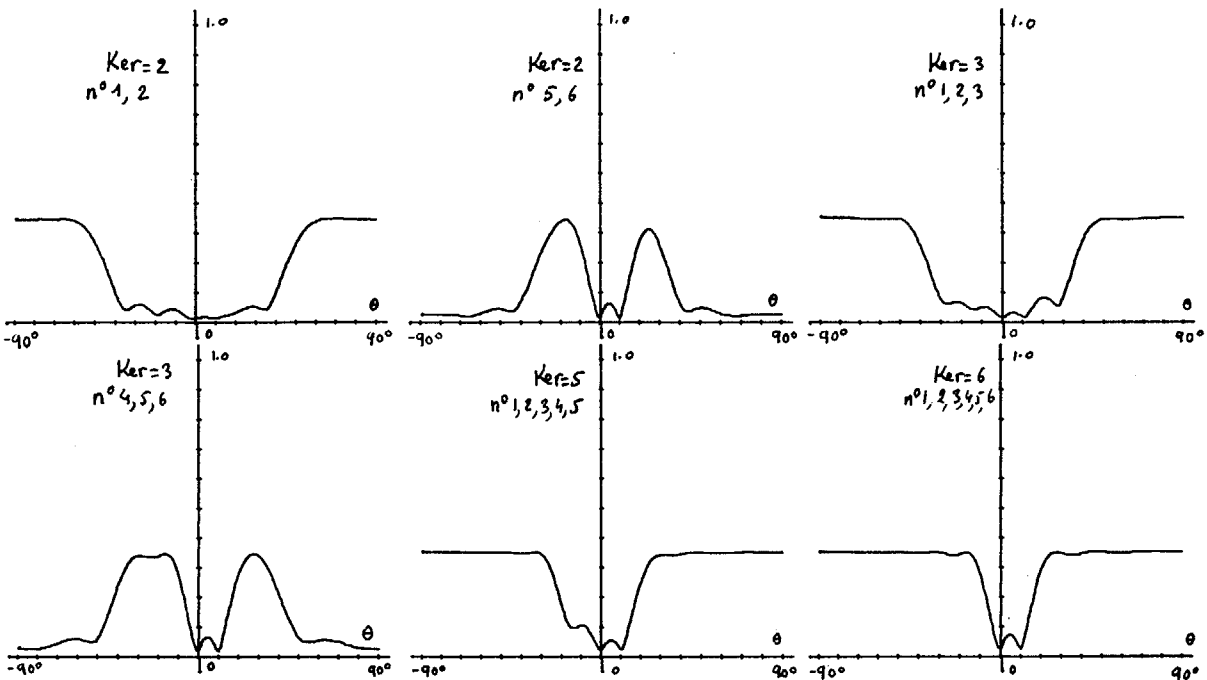


Fig. 5 - Etude de la projection de  $C_n^{-1} D_\theta$  sur différents noyaux pour  $m = 0.5$   
 La composition des noyaux est indiquée sur chaque figure.

↓





PRINCIPE DE LA GONIOMETRIE PASSIVE ADAPTATIVE  
 PRINCIPLE OF ADAPTIVE LOCALIZATION IN PASSIVE LISTENING

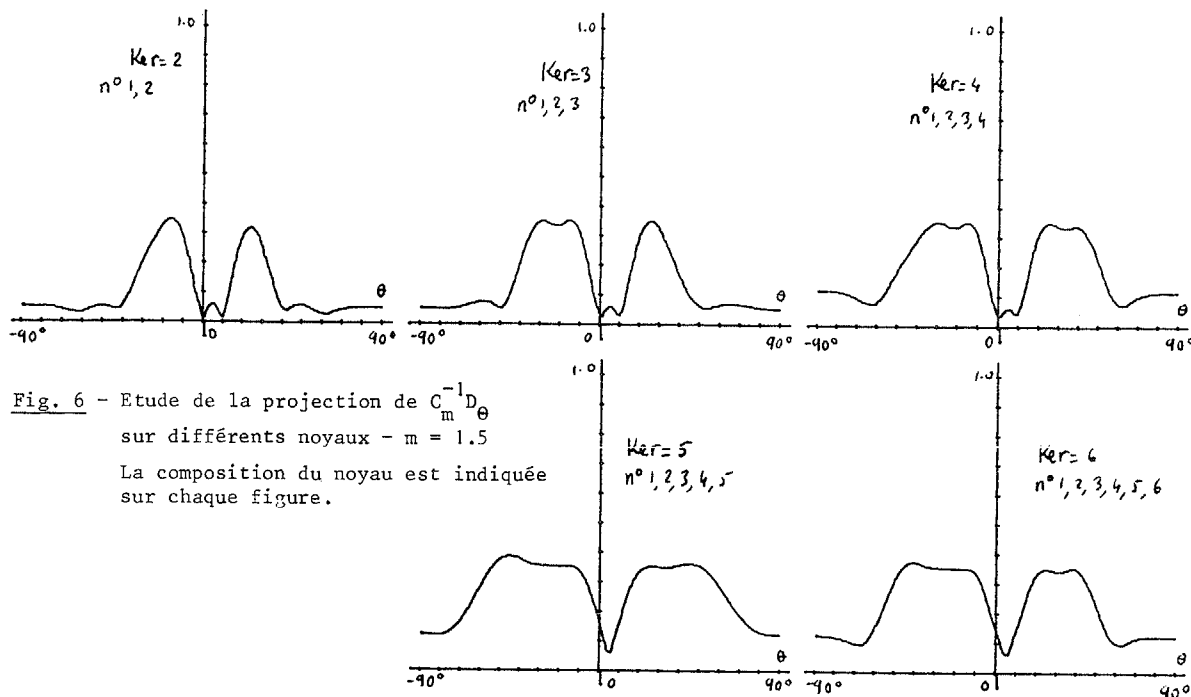


Fig. 6 - Etude de la projection de  $C_m^{-1} D_\theta$  sur différents noyaux -  $m = 1.5$   
 La composition du noyau est indiquée sur chaque figure.

m	0				0.5				1				1.5				2				dB
	-3	-5	-10	-20	-3	-5	-10	-20	-3	-5	-10	-20	-3	-5	-10	-20	-3	-5	-10	-20	
0	9	10	13	14	9	10	13	14	9	10	13	14	9	10	13	14	9	10	13	14	A.
	0	0	0	0	3	4	5	8	3	4	5	11	3	4	6	12	4	5	8	13	C.
0.5	10	11	13	14	10	11	13	14	10	11	13	14	10	11	13	14	10	11	13	14	A.
	3	4	5	8	0	0	0	0	3	4	6	9	3	5	7	10	4	5	8	11	C.
1	10	11	13	14	10	11	13	14	10	11	13	14	10	11	13	14	10	11	13	14	A.
	4	5	8	12	3	4	7	11	0	0	0	0	3	4	7	10	3	5	8	12	C.
1.5	10	11	13	14	10	11	13	14	10	11	13	14	10	11	13	14	10	11	13	14	A.
	4	5	9	13	3	4	8	12	3	4	7	10	0	0	0	0	3	4	6	10	C.
2	10	11	13	14	10	11	13	14	10	11	13	14	10	11	13	14	10	11	13	14	A.
	4	6	10	13	4	5	9	13	3	4	8	11	3	4	6	10	0	0	0	0	C.

Remarque : La résolution de l'antenne classique est de 14°

Fig. 7

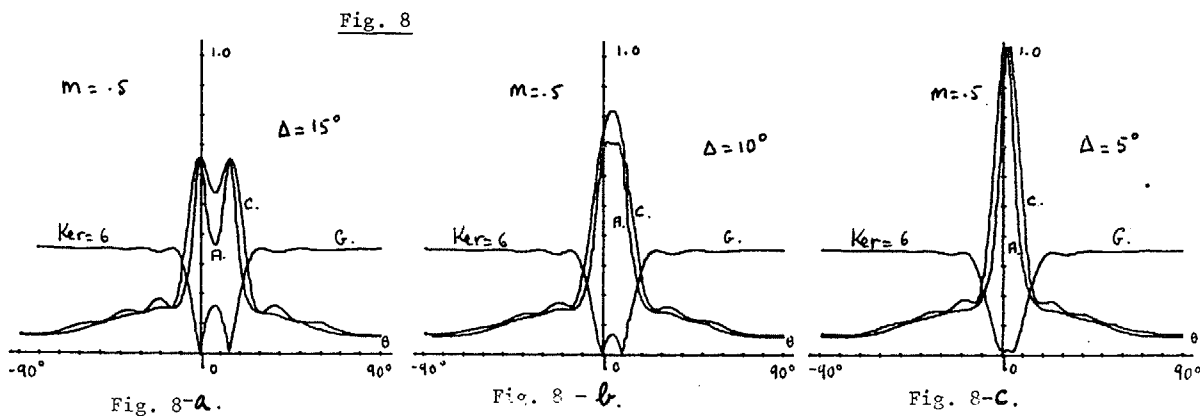
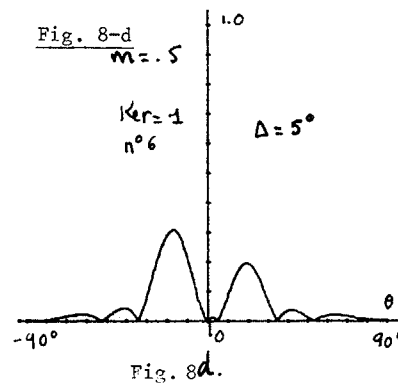


Fig. 8 (ci-dessus et page suivante) - Comparaison des résolutions de l'antenne classique (C), Antenne adaptative (A) et Goniomètre (G). Réponse des 3 systèmes à 2 sources fortes (-3 dB) de plus en plus proches 15°, 10°, 5°.



PRINCIPE DE LA GONIOMETRIE PASSIVE ADAPTATIVE  
 PRINCIPLE OF ADAPTIVE LOCALIZATION IN PASSIVE LISTENING

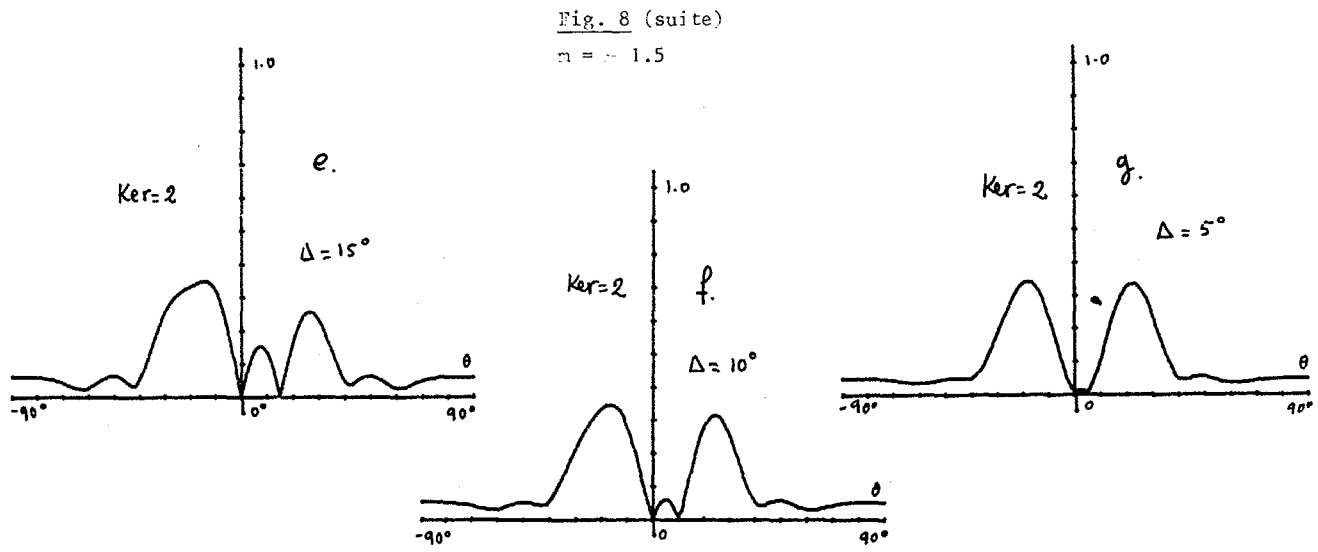
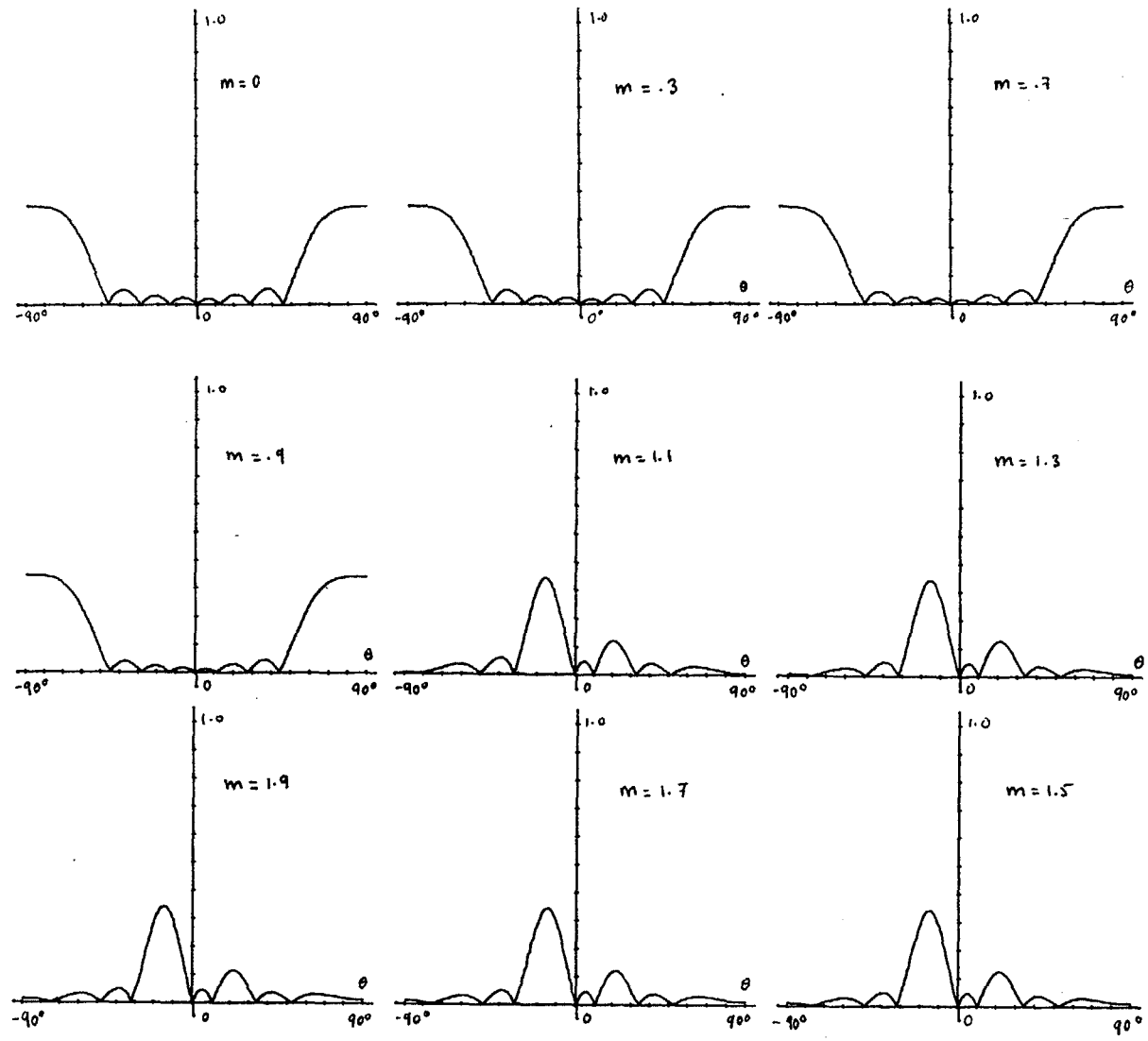


Fig. 9 (ci-dessous) - Evolution du diagramme  $f_1(\theta)$  pour des valeurs de  $m$  comprises entre 0 et 1.9





PRINCIPE DE LA GONIOMETRIE PASSIVE ADAPTATIVE  
 PRINCIPLE OF ADAPTIVE LOCALIZATION IN PASSIVE LISTENING

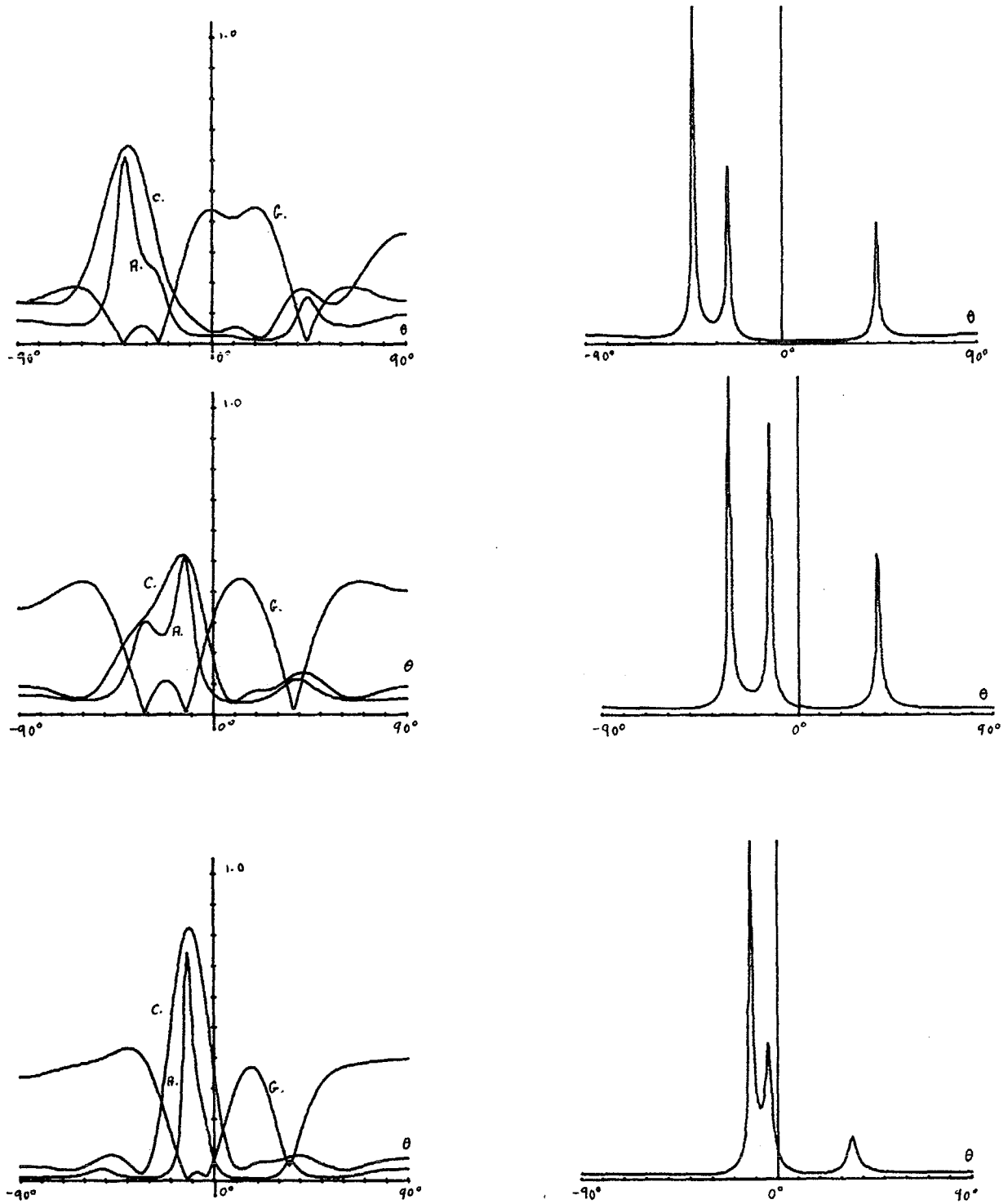


Fig. 10 - Résultats en mesures réelles - 5 capteurs séparés de 1 m à 835 Hz. Les figures de gauche donnent les réponses des antennes classique (C), adaptative (A) et du goniomètre (G) en noyau Ker = 2. Les figures de droite représentent l'inverse de la réponse du goniomètre pour les mêmes mesures.