

DIXIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

325



NICE du 20 au 24 MAI 1985

METHODES HAUTE RESOLUTION APRES FORMATION DE VOIES

Georges BIENVENU et Laurent KOPP

THOMSON-CSF - Division ASM - BP 53 - 06801 - CAGNES-sur-MER CEDEX - FRANCE

RESUME

R E S U M E

Durant ces dernières années, on a développé en écoute passive sous-marine des méthodes de traitement d'antenne dites à haute résolution qui permettent d'accroître sensiblement le pouvoir séparateur par rapport aux traitements antérieurs. Elles sont basées sur une modélisation du milieu qui est plus complète que celle utilisée auparavant comme pour la formation de voie adaptative. Son pouvoir séparateur est fondamentalement limité par les différences qui existent entre le modèle et le milieu réel. On montre que cette sensibilité peut être réduite en appliquant les méthodes haute résolution à la sortie de formations de voies classiques qui couvrent un secteur limité de l'espace.

De plus, cette technique réduit aussi considérablement la charge de calcul. Quelques résultats sur signaux réels sont aussi présentés.

SUMMARY

A B S T R A C T

In the recent years, the resolving capability of passive array processing has been greatly improved by the so-called high resolution methods. They are based on a more complete modeling of the medium than previous array processing like adaptative antenna. Their resolving power is basically limited by discrepancies between the model and the actual medium. In this paper, we show by simulation results that the sensitivity can be reduced by implementing high resolution methods at the outputs of conventional secondary beams spanning a limited angular sector.

Moreover, this technique reduce the computation load. Results at sea are also presented.



1. - INTRODUCTION

Les méthodes haute résolution, utilisées en acoustique sous-marine pour la localisation des sources en présence de bruit de fond, sont maintenant bien connues, et ont donné lieu à de très nombreuses publications

Elles sont basées sur une modélisation du milieu qui est plus complète que celle utilisée par les formations de voies classiques et adaptatives. Ces dernières méthodes ne font d'hypothèses que sur les sources : elles sont ponctuelles parfaitement cohérentes spatialement, et la forme de la surface d'onde reçue d'une source et restituée par les capteurs est une fonction connue de la position de la source (distance, direction). De plus, les sources et le bruit de fond sont supposés statistiquement indépendants. Les méthodes haute résolution utilisent une hypothèse supplémentaire qui concerne le bruit de fond : sa cohérence spatiale est connue. Elles supposent aussi que le nombre P de sources est inférieur au nombre K de capteurs. Avec ces hypothèses, la matrice des densités spectrales des signaux reçus sur les capteurs s'écrit :

$$T(f) = G(f) J(f) + \sum_i \gamma_i(f) \vec{d}_i(f) \vec{d}_i^+(f) \quad (1)$$

$G(f)$ est la densité spectrale du bruit de fond et $J(f)$ sa matrice de cohérence spatiale. $\vec{d}_i(f)$ est le vecteur position de la source i 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 de l'antenne. $\gamma_i(f)$ est la densité spectrale de la source i mesurée sur le point de référence. \vec{d}_i^+ est le conjugué transposé de \vec{d}_i

Les méthodes haute résolution utilisent le fait que, grâce au modèle de milieu adopté, l'espace d'observation peut être divisé en deux sous-espaces :

- le sous-espace, de rang P , engendré par les vecteurs position des sources (que l'on suppose linéairement indépendants). [1] à [8]
- le sous-espace orthogonal, de rang $(K-P)$, dont chaque vecteur est orthogonal à chacun des vecteurs position des sources. [9] à [21]

Ces deux sous-espaces peuvent être construits à partir des valeurs et vecteurs propres de la matrice des densités spectrales. Grâce à cette dichotomie, les méthodes haute résolution possèdent la propriété très intéressante d'avoir théoriquement un pouvoir séparateur asymptotique (temps d'observation tendant vers l'infini) infini : on peut résoudre deux sources aussi proches et faibles soient-elles.

Les limitations viennent, en plus du temps d'observation fini, des différences qui existent entre le milieu réel et le modèle adopté. Quelques méthodes ont été proposées pour réduire la sensibilité aux hypothèses, à la forme des surfaces d'onde [2] et à la cohérence spatiale du bruit de fond [12] par exemple.

Pour réduire cette sensibilité de façon beaucoup plus simple, on propose d'utiliser un pré-traitement spatial conventionnel qui permet de plus de diminuer notablement la quantité de calculs à effectuer.

2. - IMPLEMENTATION APRES PRE-TRAITEMENT SPATIAL CONVENTIONNEL

La quantité de calcul demandée par les méthodes haute résolution est proportionnelle à K^2 pour l'estimation de la matrice des densités spectrales, et à peu près à $K^{2,5}$ pour le calcul de ses vecteurs et valeurs propres. Pour diminuer cette charge, il faut réduire la taille de la matrice. D'où l'idée d'utiliser non pas les capteurs, mais des sorties de formation de voies classiques qui délimitent un secteur restreint de l'espace. Cette opération peut être répétée le nombre de fois nécessaire pour couvrir un secteur angulaire plus grand (tout l'horizon si nécessaire). Mais il est probable que, tout au moins dans un premier temps, les méthodes haute résolution seront utilisées en moyen de mesure performant dans des secteurs angulaires restreints désignés par une veille classique qui effectuera la plupart du temps la première détection d'un ensemble de sources non forcément séparées.

Un ordre de grandeur moyen pour que cette procédure ait de bonnes performances est d'utiliser 4 fois moins de voies que de capteurs (antenne correctement échantillonnée), ce qui donne un gain de 16 sur la quantité de calculs pour la couverture d'un secteur.

De plus la taille de la matrice étant réduite, la stabilité numérique des calculs de diagonalisation est accrue et donc la précision de calcul peut être réduite. L'effet de biais d'estimation est aussi réduit par la limitation du secteur angulaire traité.

En plus de ses avantages sur le plan calcul, cette procédure en présente d'autres comme on va le montrer sur des simulations : moins de sensibilité aux hypothèses faites dans la modélisation du milieu (forme des surfaces d'onde, répartition spatiale du bruit de fond), meilleur pouvoir séparateur. En revanche, le nombre de sorties de voies utilisées étant inférieur à celui des capteurs, le nombre de sources "détectables" par le traitement est en principe plus petit : mais en fait, les sources qui se trouvent en dehors du secteur spatial délimité par les voies utilisées peuvent être fortement atténuées car elles se trouvent dans les lobes secondaires. Il est donc important d'avoir des lobes secondaires hors du secteur angulaire couvert aussi bas que possible.

Les voies que l'on utilise peuvent être obtenues de différentes façons. Deux exemples sont donnés sur la figure 1 : on peut utiliser C voies classiques adjacentes qui sont formées donc à partir de tous les capteurs de l'antenne, et pointées avec un recouvrement suffisant dans des directions différentes de façon à couvrir le secteur nécessaire : ou bien encore l'antenne peut être divisée en C groupes de capteurs adjacents (qui peuvent se recouvrir) avec lesquels on forme C voies classiques, toutes pointées dans la même direction et dont chacune possède un diagramme qui correspond au secteur nécessaire.

Soit $\vec{d}(\theta_i, f)$ le vecteur de formation de voie qui correspond à la voie formée dans la direction θ_i à partir de tous les capteurs (si des capteurs ne sont pas utilisés comme dans le cas des groupes de capteurs adjacents, les composantes correspondantes de ce vecteur sont nulles). Soit $H(f)$ la matrice de dimension $(K \times C)$ formée de C vecteurs de formation de voie.

La matrice des densités spectrales des signaux de sortie des C voies est égale à :

$$T_H^+(f) = H^+(f)T(f)H(f) \quad (2)$$

Donc, de la relation (1), on déduit :

$$T_H^+(f) = G(f) H^+(f) J(f) H(f) + \sum_{i=1}^P \gamma_i(f) H^+(f) \vec{d}_i^+(f) \vec{d}_i^+(f) H(f) \quad (3)$$

$H^+(f) \vec{d}_i^+(f)$ est un vecteur qui a C composantes seulement, que l'on écrit $\vec{d}_{Hi}^+(f)$. On a donc :

$$T_H^+(f) = G(f) H^+(f) J(f) H(f) + \sum_{i=1}^P \gamma_i(f) \vec{d}_{Hi}^+(f) \vec{d}_{Hi}^+(f) \quad (4)$$

Si P' est le nombre de sources qui se trouvaient dans le secteur angulaire utile, et si les autres sources sont suffisamment atténuées la matrice des densités spectrales en sortie des $\gamma_{p'}$ peut s'écrire :

$$T_H^+(f) = G(f) H^+(f) J(f) H(f) + \sum_{i=1}^{P'} \gamma_i(f) \vec{d}_{Hi}^+(f) \vec{d}_{Hi}^+(f) \quad (5)$$

Les méthodes haute résolution peuvent donc s'appliquer sur $T_H^+(f)$ comme le traitement adaptatif d'antenne d'ailleurs pour lequel il est possible d'utiliser la même procédure.

Dans la suite, on va montrer, en utilisant des simulations que l'utilisation de sorties de voies classiques augmente les performances en pouvoir séparateur des méthodes haute résolution et réduit la sensibilité à la distribution spatiale du bruit de fond et aux distorsions des surfaces d'ondes. Pour les simulations, le milieu est réduit à un plan, et on utilise une antenne linéaire composée de 32 capteurs équidistants au pas d'une demi-longueur d'onde.

3. - INFLUENCE SUR LE POUVOIR SEPARATEUR

Le pouvoir séparateur des méthodes haute résolution ne dépend, dans le cas d'un modèle de milieu en parfait accord avec le milieu réel, que de deux paramètres : le rapport signal à 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 à bruit est plus élevé.

Lorsque l'on utilise des sorties de voies, on observe par rapport à l'utilisation des sorties des capteurs un gain en pouvoir séparateur qui est probablement dû au meilleur rapport signal à bruit qui existe à la sortie des voies. Cette propriété est illustrée par les résultats de simulation présentés sur la figure 2. Dans cette simulation, le champ de



bruit est composé de deux sources de mêmes niveaux et d'un bruit de fond incohérent. On utilise les sorties de quatre voies obtenues à partir de 4 groupes de 8 capteurs adjacents, sans pondération. La matrice des densités spectrales est obtenue en moyennant un nombre N des produits croisés de transformées de Fourier des sorties des voies et en moyennant les diagonales (matrice de Toeplitz). Les résultats sont présentés en fonction de N (proportionnel donc au temps d'observation) pour deux valeurs du rapport signal à bruit $\gamma(f)/\sigma(f)$ des sources : -10dB et -15dB. Ils sont donnés pour le goniomètre adaptatif utilisant les 32 capteurs et les 4 voies. On observe une amélioration d'un facteur 1,45 du pouvoir séparateur du goniomètre adaptatif en sortie des voies par rapport au goniomètre adaptatif en sortie des capteurs.

4. - INFLUENCE SUR LA SENSIBILITE A LA REPARTITION DU BRUIT DE FOND

Lorsque le bruit de fond n'est pas statistiquement indépendant entre les capteurs, il peut être "blanchi" spatialement [9] en utilisant une transformation linéaire déduite de sa matrice de cohérence spatiale. Donc le "blanchissement" dépend de la distribution spatiale de la puissance de bruit de fond qui n'est pas en général uniforme. Si l'on suppose qu'elle est uniforme, les méthodes haute résolution qui utilisent les sorties des capteurs seront plus sensibles à une distribution non-uniforme que celles qui utilisent les sorties de voies dans un secteur angulaire restreint, à condition que la distribution ne varie pas trop vite par rapport à la largeur angulaire du secteur. C'est ce que démontrent les résultats de simulation.

La distribution du bruit de fond est supposée uniforme, alors que la distribution réelle est multipliée par : $(1 - \alpha \cos 4\theta)$, où θ est le gisement et α un paramètre. Il y a deux sources près du gisement 0° de même rapport signal à bruit : -10dB. Comme le modèle de milieu est dans ce cas différent du milieu réel, le pouvoir séparateur asymptotique n'est plus infini. La figure 3 présente, en fonction de α , le gain en pouvoir séparateur asymptotique par rapport à la formation de voie classique du goniomètre adaptatif utilisant les sorties des 32 capteurs (K32) et les sorties de 4 voies formées à partir de 4 groupes de capteurs adjacents (G4). On observe une amélioration lorsque l'on utilise les

sorties de voies de l'ordre de 2 en moyenne.

5. - INFLUENCE SUR LA SENSIBILITE AUX DISTORSIONS DE LA SURFACE D'ONDE

Dans la modèle de milieu utilisé par les méthodes haute résolution, on suppose que la forme de la surface d'onde reçue d'une source est une fonction connue de la position de la source. Cette hypothèse est utilisée dans le goniomètre adaptatif lors de la projection du vecteur direction modèle dans le sous-espace orthogonal. Si la surface d'onde réelle présente des distorsions par rapport au modèle, le pouvoir séparateur asymptotique n'est plus infini. Il est limité à une valeur qui ne dépend pas du rapport signal à bruit, mais uniquement de la distorsion, alors que pour le traitement d'antenne adaptatif, la dégradation augmente avec le rapport signal à bruit.

En utilisant les sorties des voies classiques, on peut espérer que la dégradation sera moindre qu'en utilisant directement les capteurs, car les distorsions sont en un certain sens "moyennées" par la formation de voie classique. C'est ce que montrent les simulations.

On a pris un bruit de fond incohérent. Le pouvoir de résolution asymptotique a été évalué pour deux types de distorsions par rapport à une surface d'onde supposée plane : des distorsions de phase équirépartie entre $+\Psi$ et des distorsions d'amplitude équiréparties entre $+A$. Les mesures ont été moyennées sur 100 réalisations indépendantes. Les résultats sont portés sur les figures 4 et 5 qui montrent, respectivement en fonction de Ψ et de A , le gain en pouvoir séparateur asymptotique, par rapport à la formation de voie classique, du goniomètre adaptatif en sortie des 32 capteurs (K32), de 8 voies formées à partir de tous les capteurs (V8), de 8 voies formées à partir de groupes de capteurs adjacents (G8), et enfin de 4 voies formées à partir de groupes de capteurs adjacents (G4). Les solutions (V8) et (G8) recouvrent le même secteur angulaire. On note que la solution groupements est moins sensible que la solution voies utilisant tous les capteurs.

6. - CONCLUSION

L'implémentation des méthodes haute résolution à la sortie de formation des voies classiques dans un secteur angulaire limité est une technique intéressante qui réduit non seulement la puissance de calcul par rapport à l'utilisation directe des sorties des capteurs, mais aussi la sensibilité aux erreurs de modélisation des surfaces d'onde et de la répartition du bruit de fond.

En conclusion, on présente sur la figure 6 quelques résultats obtenus sur des signaux enregistrés en mer sur une antenne linéaire. Elle montre les résultats obtenus avec une formation de voie classique et le goniomètre adaptatif à la sortie des capteurs et à la sortie de 11 voies classiques formées à partir de tous les capteurs : dans ce dernier cas, on présente les images obtenues pour deux directions de pointage du secteur qui est repéré par une double flèche.

Les images sont présentées en fonction du gisement sur l'axe horizontal, et l'évolution avec le temps est rendue en décalant les réponses successives le long de l'axe vertical. L'image obtenue en utilisant les sorties des voies est aussi bonne que celle obtenue directement à partir des capteurs.

A titre d'exemple, on présente aussi sur la figure 7 les images obtenues dans les mêmes conditions avec la formation de voie adaptative : dans ce cas là aussi, les images sectorielles obtenues après formation de voie sont aussi bonnes que celles obtenues en utilisant directement tous les capteurs.

(Etude financée en partie par le DRET - PARIS - FRANCE)

R E F E R E N C E S

- [1] LIGETT (WS) : "Passive Sonar : fitting model to multiple time series" Proceed. NATO ASI on Signal Processing, August 1972, Loughborough (UK) : in Signal Processing Academic Press, 1973, pp 327-345
- [2] MERMOZ (H) : "Imagerie, corrélation et modèles" Annales des Télécommunications, t.31, n°1-2, janvier-février 1976, pp 17-36.
- [3] REDDI (S.S) "Multiple source location : a digital approach" IEEE Trans. Aer. Elect. System, vol. AES 15, n° 1, January 1979, pp 95-105.
- [4] LACOUME (JL), BOUTHEMY (B), GLANGEAUD (F), LATOMBE(C), SILVENT (A) : "Caractérisation par analyse interspectrale du champ d'ondes reçu sur un réseau de capteurs - Applications" - Recueil des conférences du 7è colloque GRETSI, Nice 28 mai-2 juin 1979, pp 80-180/7.
- [5] KUMARESAN (R), TUFTS (DW) : "Data Adaptive principal component signal processing" Proceed, 19th IEEE Int. Conf. on Decision and Control, Albuquerque, NM, December 10th-12th, 1980, pp 949-954
- [6] VEZZOSI (G) : "Wavefront separation by rectification of the Choleski factor of the cross-spectral matrix" Proceed. Intern. Conf. on Spectral Analysis and its Use in Underwater Acoustics, Imperial College, London, April 29th-30th, 1982, pp 22/1-22/8
- [7] OWSLEY (NL), LAW (JF) : "Dominant mode power spectrum estimation". Proceed, ICASSP 82, Paris (France) May 3rd-5th, 1982, pp 775-778
- [8] TUFTS (DW), KUMARESAN (R) : "Estimation of frequencies of multiple sinusoids : making linear prediction perform like maximum likelihood" Proceed IEEE, Vol.70, n° 9, September, 1982, pp. 975-989.
- [9] BIENVENU (G), KOPP (L) : "Principe de la Goniométrie passive adaptative". Recueil des conférences du 7è colloque GRETSI, Nice, 28 mai-2 juin 1979, pp. 106/1-106/10
- [10] SCHMIDT (RO) : "Multiple emitter location and signal parameter estimation" Proceed RADC Spectrum Estimation Workshop, October 1979, pp. 243-258.
- [11] CANTONI (A), GODARA (LC) : "Resolving the directions of sources in a correlated field incident on an array" JASA, 67(4), April 1980, pp 1247-1255.
- [12] BIENVENU (G), KOPP (L) : "Adaptivity to back-ground noise spatial coherence for high resolution passive methods" Proceed ICASSP 80, Denver (CO), April 9th-11th, 1980, pp 307-310.
- [13] BOHME (JF) : "On the sensitivity of orthogonal beam-forming" Proceed ICASSP 82, Paris (France), May 3rd-5th, 1982, pp 787-790.
- [14] SCHOLTZ (B), KROLL (W) : "Discussion of the system for high resolution noise measurements in shallow water". Proceed Underwater Ambient Noise Conference, Saclantcenter, La Spezia (Italy) May 11th-14th, 1982
- [15] SCHNEIDER (M) : "Evaluation of an orthogonal beam-forming procedure using real data". Proceed ICASSP 83, Boston (MA), April 14th-16th, 1983, pp. 359-362
- [16] WAX (M), SHAN (TJ), KAILATH (T) : "Covariance eigenstructure approach to 2-D harmonic retrieval" Proceed ICASSP 83, Boston (MA), April 14th-16th, 1983, pp. 891-894.
- [17] JOHNSON (DH), DEGRAAF (SR) : "Improving the resolution of bearing in passive sonar arrays by eigenvalue analysis" IEE Trans on ASSP, Vol. ASSP-30, n° 4, August 1982, pp. 638-647
- [18] KATES (JM) : "A generalized approach to high resolution array processing" Proceed ICASSP 83, Boston (MA), April 14th-16th, 1983, pp. 359-362.
- [19] BIENVENU (G), KOPP (L) : "Optimality of high resolution array processing using the eigensystem approach" IEE Trans On Acoust. Speech and Signal Process. Vol. ASSP-31, n°5, Oct. 1983, pp 1235-1247
- [20] LUCAS (BG), LE CADRE (JP) : "Experimentation of spatial processing methods" NATO ASI on "Adaptive methods in underwater acoustics, LUNEBURG, Germany August 1984
- [21] LE CADRE (JP) : "Applications of some statistical measures to spatial signal processing", NATO ASI on "Adaptive methods in underwater acoustics" LUNEBURG, GERMANY, August 1984.

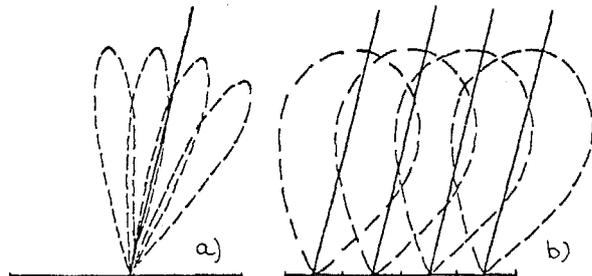


Figure 1 - Exemples de sorties de voies :
a) Voies conventionnelles
b) Groupements de capteurs adjacents

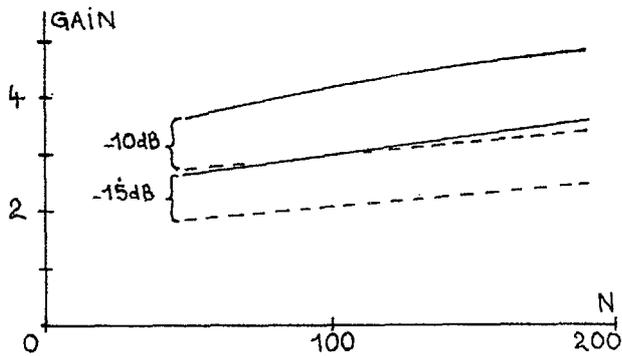


Figure 2 - Gain en pouvoir séparateur sur la formation de voie classique en utilisant les sorties :
--- des 32 capteurs ; — de 4 groupements

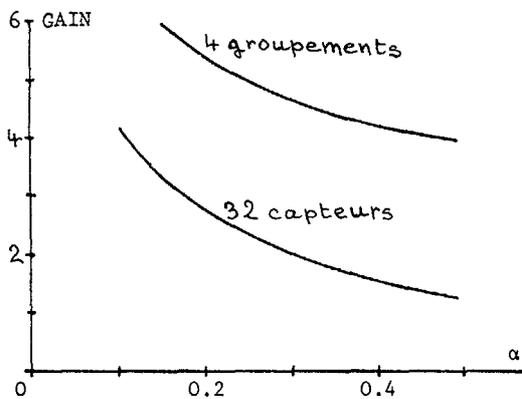


Figure 3 - Gain en pouvoir séparateur : influence de la répartition du bruit de fond.

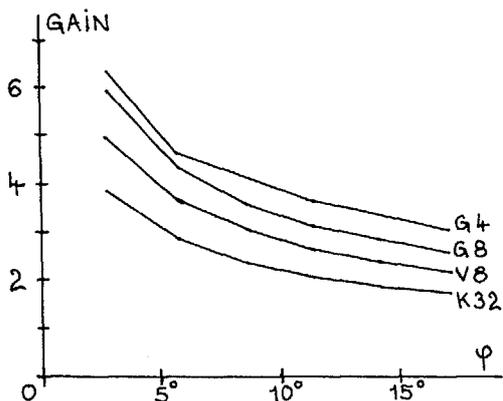


Figure 4 - Gain en pouvoir séparateur : influence de distorsions de phase de la surface d'onde

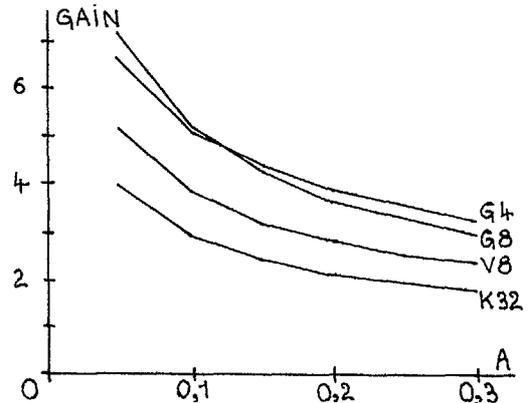


Figure 5 - Gain en pouvoir séparateur : influence de distorsions en amplitude de la surface d'onde

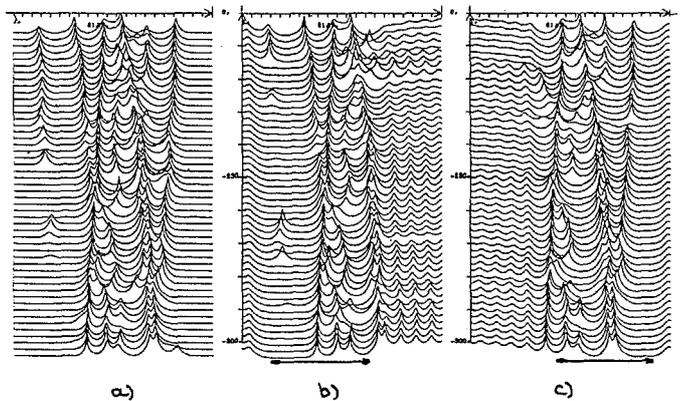


Figure 6 - Expériences sur signaux réels avec le goniomètre adaptatif implanté en :
a) sortie des capteurs
b) et c) : sortie de 11 voies classiques (← secteur utile)

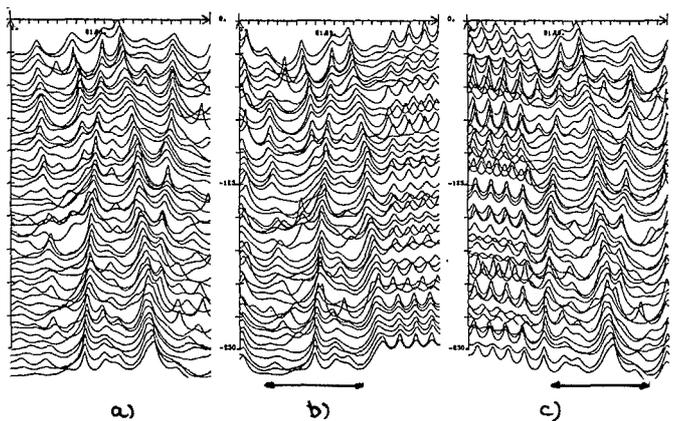


Figure 7 - Expériences sur signaux réels avec l'antenne adaptative implantée en :
a) sortie des capteurs
b) et c) : sortie de 11 voies classiques (← secteur utile)