

IDENTIFICATION DE SOURCES ACOUSTIQUES EN PRESENCE DE TRAJETS MULTIPLES

B.BALIGAND*, J.P.PASQUALINI**

METRAVIB R.D.S. - Division Etudes-64 Chemin des Mouilles-B.P.132-69132 ECULLY-FRANCE
CERDAN DGA/DCN TOULON - 83800 TOULON

RÉSUMÉ

L'étude traite de l'identification au second ordre d'une source acoustique située dans une lame d'eau à l'aide de traitements d'antenne à Haute Résolution. Le milieu est modélisé par une description "sources images" proche de la réalité où la propagation se fait par trajets multiples. Ceci conduit à identifier sur l'antenne un champ de sources partiellement corrélées. A cet effet, nous évaluons les performances de trois traitements d'antenne à bande étroite : **Maximum d'Entropie**, **CAPON** et **MUSIC**, la comparaison étant faite ensuite avec la préformation de voies. L'accent est mis sur la qualité de l'estimation de la puissance des sources sous des hypothèses de forte corrélation entre trajets (0,9) et de front d'onde sphérique. Les simulations montrent l'apport de la H.R. (notamment MUSIC) au problème du déconfinement de mesure. Les limites d'un tel traitement sont ensuite établies et nous montrons enfin les liens avec les méthodes d'identification par moindres carrés (TLS) de système surdéterminé.

I - INTRODUCTION -

On considère le champ acoustique créé par un monopole situé dans une lame d'eau limitée par la surface libre et le fond responsables de réflexions multiples. L'objectif de l'étude est de réaliser une analyse spatiale au second ordre :

- localiser la source ainsi que les deux premiers trajets réfléchis
- estimer leur intensité de rayonnement.

Pour répondre à ce problème, plusieurs méthodes de traitements d'antenne sont étudiées et appliquées. On analyse ainsi le pouvoir séparateur des méthodes (qualité du premier ordre) et l'estimateur de puissance associé (qualité du second ordre) pour **des corrélations proches de l'unité entre les différents trajets**.

La limitation en résolution angulaire de l'antenne (utilisée classiquement en formation de voies) est à l'origine des traitements à Haute Résolution (H.R.) [2] [3]. Outre le champ spatial de pression, ces méthodes intègrent des informations à priori sur les sources, sur le milieu de propagation, et sur le bruit à la réception. Elles supposent, en particulier connue la cohérence spatiale du bruit ainsi que la forme du vecteur source décrivant le front d'onde incident sur l'antenne. Dans notre application, l'approximation champ lointain n'étant plus respectée, nous considérons **des fronts d'onde sphériques**.

ABSTRACT

This communication presents some results and comments about performances and limits of high resolution methods in array processing for identifying acoustical sources in multipath waveguide environment. We compare Maximum Entropy Method, CAPON and MUSIC methods to overcome the shortcomings of conventional beamforming with rectilinear and vertical array. Hypothesis assume spherical wavefronts, perfectly uncorrelated background noise and important correlation between multipath near the one value (0,9). In these conditions, we show the superiority of these algorithms especially with MUSIC using computer simulations of shallow water Pekeris waveguide. Main limits are due to the unknown wavefronts, to the signal to noise ratio, and of course to sources number in relation to elements number of the array. In fine, we show the link between all these methods and the Least Means Square methods.

II - HYPOTHESES ET FORMULATION -

II-1 - Hypothèses pour la génération des données-

- Le modèle de propagation utilisé est celui décrit par une approche sources-images [1]. Il permet de calculer le champ acoustique en tout point de la lame d'eau pour une source ponctuelle. Chaque trajet acoustique, réfléchi plusieurs fois par les deux interfaces, est considéré comme provenant d'une source image géométriquement symétrique par rapport aux interfaces (cf. figure 1). Le champ reçu sur l'antenne est alors équivalent à celui dû à une multitude de sources ponctuelles. Le milieu est considéré homogène, isotrope et non turbulent. Si de surcroît, les deux interfaces sont parfaitement stables, les sources images demeurent parfaitement corrélées. Pour éviter cela et se rapprocher de la physique du problème, un coefficient β variant entre 0 et 1 est introduit dans la matrice interspectrale des sources. Il définit la cohérence spatiale entre les différentes sources images.
- L'antenne broadside utilisée est formée de neuf hydrophones régulièrement espacés de 0,5 m en position verticale et centrée dans la lame d'eau.
- La source ponctuelle est monochromatique dans la bande de fréquences [250 Hz, 750 Hz]. Son niveau de pression sur l'antenne est de 3 Pa.



II-2 - Formulation -

Soit une antenne uniforme de N capteurs (ponctuels, omnidirectionnels, identiques et de gain complexe unité) recevant les signaux fréquentiels des M sources : $d_1(v), d_2(v), \dots, d_M(v)$. Le transfert linéaire entre le signal source j et le capteur k est défini par une réponse U_{jk} qui dépend de la fréquence spatiale.

La transformée de Fourier du signal temporel observé sur le capteur n° k s'écrit :

$$W_k(v) = \sum_{j=1}^M U_{jk}(v, \theta_j) \cdot d_j(v) + b_k(v) \quad (1)$$

$$U_{jk}(v, \theta_j) = e^{-i \frac{\omega \cdot R_{jk}}{C}} / R_{jk} \quad \text{avec } \omega = 2 \pi \cdot v$$

$$R_{jk} = R_j + k \cdot \Delta x \cdot \sin \theta_j + \frac{1}{2} \frac{(k \cdot \Delta x)^2}{R_j} \cdot (1 - \sin^2 \theta_j) + \dots + O \left(\frac{k \Delta x}{R_j} \right)^3$$

dans le cas d'onde sphérique.

- C est la célérité du son dans l'eau.
- Δx l'espacement entre capteur
- θ_j la direction de la source j
- R_j la distance de la source j au centre de l'antenne
- b_k un bruit blanc additif indépendant des sources

Ce qui peut se mettre sous la forme matricielle :

$$\underline{W}(v) = \underline{U}(v) \cdot \underline{d}(v) + \underline{b}(v) \quad (2)$$

avec $\underline{W} \in \mathbb{C}^N$, $\underline{d} \in \mathbb{C}^M$, $\underline{b} \in \mathbb{C}^N$, $\underline{U} \in \mathbb{C}^{N \times M}$

La matrice \underline{U} est formée des M vecteurs sources \underline{u}_i décrivant les fronts d'ondes incidents sur l'antenne. Le bruit \underline{b} est considéré isotrope, et de même puissance σ_b^2 sur chaque capteur. Il permet de définir un rapport signal sur bruit si p_i est le niveau de pression de la source i sur l'antenne par $RSB_i = 20 \log (P_i / \sum_{i=1}^M \sigma_b)$.

A partir des signaux captés sur l'antenne, la matrice interspectrale $\underline{\Gamma} (\underline{\Gamma} \in \mathbb{C}^{N \times N})$ est estimée

$$\underline{\Gamma}(v) = E [\underline{W} \cdot \underline{W}^\#] = \underline{U} \cdot \underline{S} \cdot \underline{U}^\# + \sigma_b^2 \cdot \underline{I} \quad (3)$$

- $\underline{S} = E [\underline{d} \cdot \underline{d}^\#]$ matrice interspectrale des sources
- \underline{I} = matrice identité définissant la cohérence spatiale du bruit
- # = symbole de la matrice transposée conjuguée.

Elle est supposée connue sans erreur d'estimation, ce qui implique un temps d'observation infini des signaux sur l'antenne et rend théoriquement sans limite le pouvoir séparateur des méthodes H.R.. Ces dernières exploitant les propriétés de la matrice $\underline{\Gamma}$, nous sommes confrontés aux deux cas limites suivants :

- Les sources sont toutes parfaitement non corrélées, \underline{S} est de rang plein, comme \underline{U} est une matrice régulière, $\underline{\Gamma}$ est Hermitienne semi-définie positive et de rang plein. Elle est Toeplitz dans le cas d'ondes planes.
- Les sources sont partiellement corrélées, \underline{S} devient non diagonale, mais reste de rang plein donc régulière. $\underline{\Gamma}$ devient singulière et non inversible dans le cas limite de deux sources parfaitement corrélées.

III - TRAITEMENTS D'ANTENNE ETUDIÉS [2] [3] -

III-1 - Méthodes d'analyse continue -

En première approche, nous étudions des méthodes d'analyse continue qui estiment conjointement les puissances des sources $p(\theta, v)$ et leur direction θ à la fréquence v et lorsque la forme du vecteur directionnel $\underline{u}(\theta, v)$ est connue. Elles ne font pas d'hypothèse sur le nombre de sources. Le tableau 1 donne les formules qui permettent de réaliser l'estimation au second ordre pour les trois méthodes utilisées.

Préformation de Voies	$P_{PV}(\theta, v) = \frac{\underline{u}^\#(\theta, v) \cdot \underline{\Gamma}(v) \cdot \underline{u}(\theta, v)}{\underline{u}^\#(\theta, v) \cdot \underline{u}(\theta, v)} \quad (4)$
Maximum d'Entropie	$P_{MEM}(\theta, v) = \frac{\underline{1}^T \cdot \underline{\Gamma}^{-1}(v) \cdot \underline{1}}{ \underline{u}^\#(\theta, v) \cdot \underline{\Gamma}^{-1}(v) \cdot \underline{1} ^2} \quad (5)$ avec $\underline{1}^T = [1, 0, 0, \dots, 0]$
CAPON	$P_{CAPON}(\theta, v) = \frac{1}{\underline{u}^\#(\theta, v) \cdot \underline{\Gamma}^{-1}(v) \cdot \underline{u}(\theta, v)} \quad (6)$

Tableau 1

→ La préformation de voies réalise une projection spatiale (normée) du champ reçu $\underline{\Gamma}$ sur un vecteur source $\underline{u}(\theta, v)$. Dans le cas où $\underline{u}(\theta, v)$ décrit des ondes planes, la préformation de voies est une transformée de Fourier spatiale. Si l'on définit le pouvoir séparateur $\delta\theta$ comme la largeur à mi-hauteur du lobe principal de la réponse spatio-fréquentielle de l'antenne, on obtient :

$$\delta\theta = \pm \arcsin(0.6 \cdot \lambda / L) \quad L = N \cdot \Delta x \quad (7)$$

où L est l'envergure de l'antenne et λ la longueur d'onde.

Pour l'antenne utilisée (N = 9), à 250 Hz, on obtient $\delta\theta = \pm 53^\circ$. Ceci illustre le caractère de "pupille pauvre" que constitue l'envergure L de l'antenne vis-à-vis des longueurs d'onde et donc conduit à une limitation dans le pouvoir séparateur angulaire décrit par le résultat de la figure 2.

→ La méthode du Maximum d'Entropie (ou d'erreur de prédiction minimale) modélise le champ de pression sur l'antenne par un modèle AR (tout pôle) excité par un bruit blanc (spatialement). Ce qui revient encore à rendre minimale l'erreur de prédiction sur l'antenne entre un point d'écoute et les N-1 autres points affectés de coefficients complexes (ceux du modèle AR) et donc à extrapoler le champ de pression en dehors du support d'antenne (au sens du M.E.).

→ La méthode de CAPON fournit la solution optimale au critère du Maximum de Vraisemblance de la détection d'une source sous l'hypothèse de données gaussiennes. Le résultat (6) est obtenu [9] en maximisant la densité de probabilité conditionnelle de l'observable $\underline{W}(k)$ (pour la réalisation k sur l'antenne), sachant que la source d(k) existe et en prenant comme hypothèse que $\underline{W}(k)$ est une variable aléatoire gaussienne (multinormale complexe).

III-2 - Méthode paramétrique -

→ La technique MUSIC (Multiple Signal Classification) [4] adopte un formalisme plus géométrique que statistique en généralisant l'exploitation du sous-espace bruit. Cette approche permet de résoudre des sources partiellement corrélées sans restriction sur les fronts d'onde décrit par $\underline{u}(\theta, v)$. Le calcul se fait en deux opérations :

i) La localisation de la source est obtenue en projetant un vecteur source candidat $\underline{u}(\theta, v)$ sur le sous-espace bruit engendré par les vecteurs propres $\underline{V}_i, i \in [M+1, N]$ associés au plus petites valeurs propres λ_j :

$$Q_{MUSIC}(\theta, v) = \left| \sum_{i=M+1}^N \underline{V}_i^{\#}(v) \cdot \underline{u}(\theta, v) \right|^2 - 1 \quad (8)$$

fonctionnelle de détection

Les directions θ_j des sources sont déterminées par $\max_{\theta} Q(\theta, v)$,

ii) On estime ensuite la matrice de covariance \underline{S} par :

$$\underline{S}^{-1}(v) = \underline{U}^{\#}(\theta_j) \cdot \underline{V}_M \cdot (\underline{\Lambda}_M - \sigma_b^2 \cdot \underline{I}_M) \cdot \underline{V}_M^{\#} \cdot \underline{U}(\theta_j) \quad (9)$$

avec $\underline{V}_M \in \mathbb{C}^{N \times M}$ les M vecteurs propres des M plus grandes valeurs propres $\lambda_i, i=1, \dots, M$. Soit encore

$$\underline{S}(v) = \underline{U}^l(\theta_j) \cdot \underline{V}_M \cdot (\underline{\Lambda}_M - \sigma_b^2 \cdot \underline{I}_M) \cdot \underline{V}_M \cdot (\underline{U}^l(\theta_j))^{\#} \quad (10)$$

- $\underline{U}^l = (\underline{U}^{\#} \cdot \underline{U})^{-1} \cdot \underline{U}^{\#}$, la pseudo-inverse de \underline{U} obtenue par DVS
- $\underline{\Lambda}_M = \text{diag}(\lambda_i) \quad i = 1, \dots, M$
- $\underline{I}_M =$ matrice identité (M,M)

IV - APPLICATION A LA LAME D'EAU -

Les différentes méthodes sont appliquées à la lame d'eau avec $M < N+1$ et en considérant des fronts d'onde sphérique dans $\underline{u}(v, \theta)$. La source est au centre et le coefficient de corrélation vaut $\beta = 0,9$. Les figures 2-3-4-5-6-7-8 présentent ces résultats.

- La préformation de voies (figure 2) ne localise pas la source principale en $\theta = 0^\circ$ ni les deux premiers trajets à $\theta = \pm 41^\circ$ entre 250 Hz et 640 Hz.

- MEM localise les trois premiers trajets avec un pouvoir de résolution important, mais n'estime pas leur niveau.

- CAPON localise les trois premiers trajets en sous-estimant leur niveau de puissance (figure 4).

- MUSIC (figures 5,6 et 8) localise précisément (à 1,4 degré près) la source principale tout en estimant à moins de 2,5 dB le niveau de pression de la source. Les deux autres trajets apparaissent à une distance $R' = R / \cos 41^\circ = 18,35$ m car dans l'utilisation des fronts d'onde sphérique, la distance r est un second paramètre, θ étant le premier (voir terme R'_{jk} dans la formule (1)). De plus, en réalisant une approximation au second ordre (approximation de FRESNEL) sur les fronts d'onde (terme R'_{jk}), la variable θ_j intervient au premier ordre alors que la distance r n'intervient qu'au second ordre (en $1/R'_j$). Ceci explique que MUSIC possède une meilleure résolution en θ qu'en r (voir figure 8).

V - CONCLUSION -

Cet article consacré à l'application de traitements d'antenne H.R. au déconfinement de source monopolaire en lame d'eau montre l'apport précieux de ces méthodes. Ceci est spécifiquement illustré par les résultats fournis par MUSIC, qui estime le niveau de pression de la source avec un écart relatif de 25 % (contre 46 % pour la préformation-figure 6) pour une corrélation $\beta = 0,9$ entre trajets. Concernant la localisation, le trajet principal ainsi que les deux suivants (surface et fond) est toujours obtenue précisément alors qu'il y a fausses détections avec la préformation.

Parallèlement, nous dégageons quelques limites d'application :

- La préformation de voies, estimateur non biaisé, robuste au bruit et au front d'onde est vite limité par le rapport λ/L (L envergure de l'antenne).

- La méthode CAPON estime correctement la puissance des sources que si elles sont décorrélées avec un moins bon pouvoir séparateur que MEM.

- L'estimateur MUSIC le plus performant ne résoud théoriquement pas le problème dans les trois cas suivants :

- 1 - Le cas où le nombre de sources images est plus important que le nombre de capteurs $\forall 0 \leq \beta < 1$, le s.e.v. orthogonal étant indéfini.
- 2 - Le cas où la cohérence spatiale du bruit est mal connue.
- 3 - Le cas où le type de front d'onde est inconnu.

Pour remédier au troisième point, il est possible de paramétrer $u(\theta, v)$ avec N-1 degrés de liberté, puis procéder par minimisation multidimensionnelle sur $Q(\theta, v)$, ce qui, par ailleurs, ouvre le champ d'application au champ proche. Alors que le second point pose un problème d'estimation de bruit que l'on peut toujours résoudre en pratique, le premier point apparaît irrémédiable sans changer de modèle. Tels sont actuellement orientés nos travaux qui ne considèrent non plus un modèle à M entrées et N sorties, mais un modèle à une entrée (source unique) et N sorties. Utilisant un estimateur TLS (Total Least Square [8]) sur un modèle de prédiction linéaire [5], nous montrons les liens entre cet estimateur plus robuste au bruit et l'approche H.R..

REFERENCES

[1] L.M. BREKHOVSKIKH, Waves in Layered Media, (1980)
 [2] H. MERMOZ, "Imagerie, corrélation et modèles"-Annales des Télécom.31, n°12,(1976)
 [3] J.L. LACOUME, Revue Traitement du Signal, Vol.5 n° 2, pp87-106, (1988)
 [4] R.O. SCHMIDT, I.E.E.E. Trans. on A.P., Vol.34, n° 3, (March 1986)
 [5] R.KUMARESAN, I.E.E.E. Trans. on A.S.S.P. Vol 30, n°6, (Dec 1982)
 [6] R.ROY, T.KAILATH, I.E.E.E. Trans on A.S.S.P.,Vol 37, n°7 (July 1989)
 [7] S.MAYRARGUE, ASSP Workshop on S.E.M., Minneapolis, pp307-311, (Aug 1988)
 [8] G.H.GOLUB,C.F. Van LOAN, SIAM,Journal on N.A.,Vol 17 n°6,(Dec1980)
 [9] B.BALIGAND,F.ZEGERMAN,B.BEGUET,Rapport METRABIB N°293742,(1989)

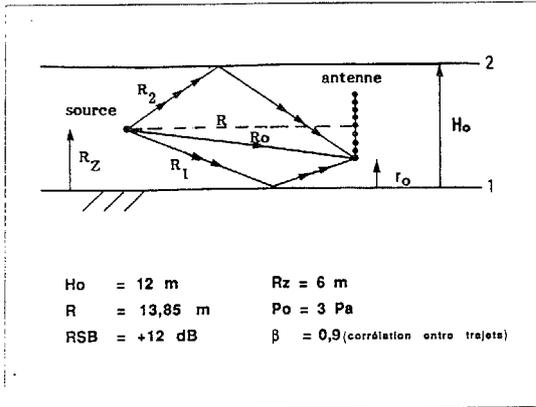


Figure 1 : Géométrie du modèle de lame d'eau testé à trois sources images.

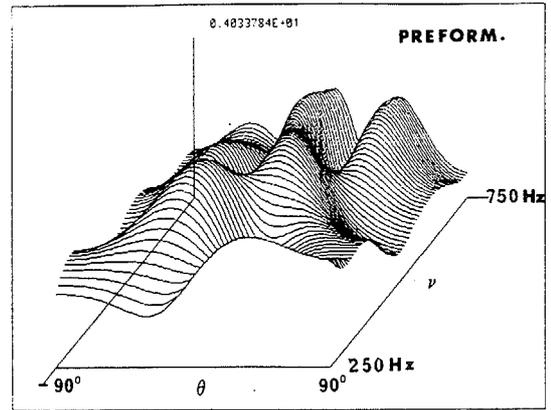


Figure 2 : Préformation de voies en fonction de la fréquence.

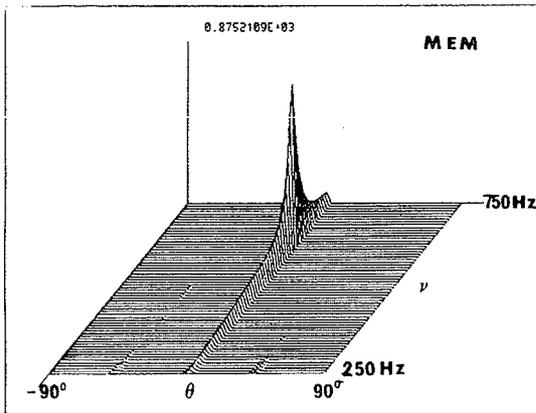


Figure 3 : Méthode M.E.M. en fonction de la fréquence (front d'onde sphérique)

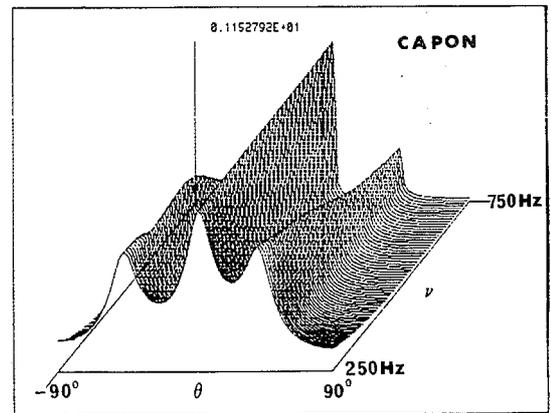


Figure 4 : Méthode CAPON en fonction de la fréquence (front d'onde sphérique)

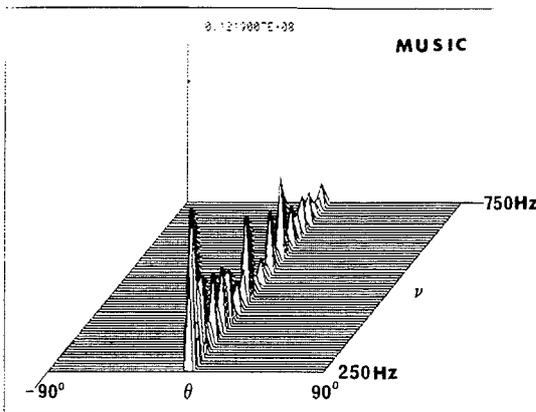


Figure 5 : Méthode MUSIC en fonction de la fréquence (front d'onde sphérique)

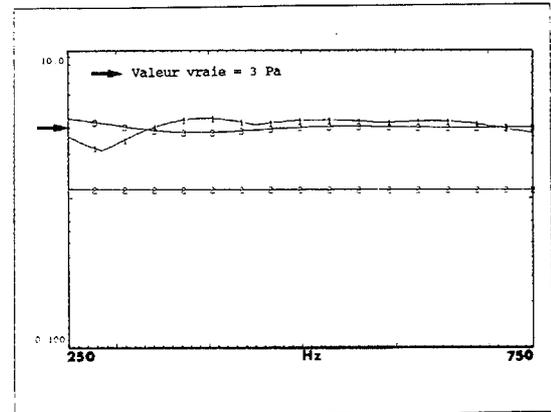


Figure 6 : Niveau de pression estimé sur le trajet direct ($\theta=0^\circ$) en fonction de la fréquence
1-Préformation de voies, 2-CAPON, 3-MUSIC.

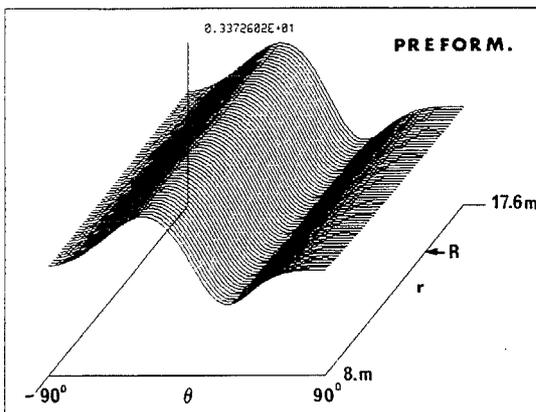


Figure 7 : Préformation de voies en fonction de la distance r (source-antenne) ($\nu=320$ Hz)

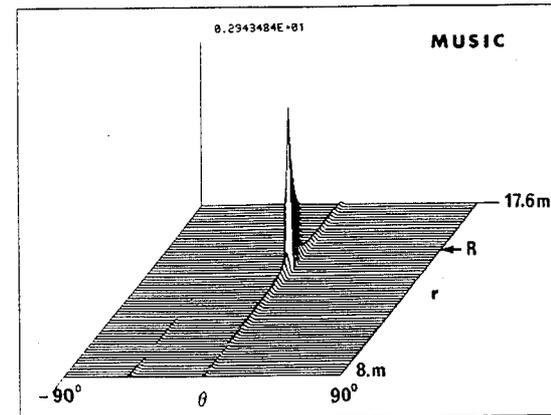


Figure 8 : Méthode MUSIC en fonction de la distance r ($\nu=320$ Hz)