

TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

Nice 7 au 12 mai 1973

*COHERENCE SPATIALE DE SIGNAUX ACOUSTIQUES PROPAGES PAR PETITS FONDS***R. ANCEY***Attaché aux Services techniques de l'Armement**Laboratoire de Détection Sous-Marine Le Brusac*

RESUME La cohérence d'un signal acoustique transmis en eau peu profonde et reçu sur deux hydrophones est étudiée en fonction de la distance entre les deux capteurs.

L'influence de divers paramètres est analysée : distance de propagation, orientation de la ligne hydrophonique par rapport à la direction de propagation, fréquence et largeur de bande du signal...

Les résultats sont utilisés pour définir le gain d'une antenne très simple.

SUMMARY Coherence of an acoustic signal, propagated in shallow water and received on two hydrophones is measured in function of distance between hydrophones.

Influence of various parameters is analysed : propagation range, orientation of hydrophonic array versus propagation direction, frequency and frequency band of signal...

Results are used to determine the gain of a very simple antenna.

QUATRIEME COLLOQUE SUR LE
TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS



Nice 7 au 12 mai 1973

COHERENCE SPATIALE DE SIGNAUX ACOUSTIQUES PROPAGES PAR PETITS FONDS

R. ANCEY

Attaché aux Services Techniques de l'Armement

Laboratoire de Détection Sous-Marine Le Brusac

1. INTRODUCTION :

En "eau profonde" on suppose habituellement qu'un signal reçu en plusieurs points d'une antenne est toujours identique, au retard de propagation près.

Il en va tout autrement dans le cas de propagation en eau peu profonde : les multiples réflexions sur les frontières et le grand nombre de trajets différents utilisés par le signal transmis font que la "décohérence" spatiale de celui-ci ne peut plus être négligée, et peut même être mesurée.

La connaissance de la "non ressemblance" d'un même signal transmis reçu sur différents capteurs d'une antenne peut être un facteur important pour la définition de celle-ci, ou pour l'évaluation d'une antenne existante.

Des mesures de cohérence spatiale, en fonction de différents paramètres, ont été effectuées dans le Golfe du Lion, sur une zone déjà étudiée acoustiquement sous l'aspect perte de transmission, réverbération...



2.- DEFINITION DE LA COHERENCE - CALCULS EFFECTUES SUR LES SIGNAUX :

Un signal étant transmis et reçu sur deux hydrophones, dont les sorties sont $f_1(t)$ et $f_2(t)$, nous définissons la cohérence entre ces deux sorties comme étant la valeur maximale de leur fonction d'intercorrélation.

On cherche en fait le maximum de la valeur absolue de cette fonction, *normée* par la moyenne géométrique des énergies moyennes des deux signaux.

Soit :

$$\Gamma(\tau) = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T f_1(t) \cdot f_2(t - \tau) dt}{\left[\frac{1}{T} \int_0^T f_1^2(t) dt \cdot \frac{1}{T} \int_0^T f_2^2(t) dt \right]^{1/2}}$$

$\Gamma(\tau)$ = fonction d'intercorrélation normée entre deux signaux $f_1(t)$ et $f_2(t)$ de durée T .

Pratiquement les deux signaux sont échantillonnés à la fréquence F_e , pendant la durée T , soit f_{1n} et f_{2n} les échantillons représentant f_1 et f_2 .

On calcule :

$$F\left(m, \frac{1}{F_e}\right) = \frac{\sum_{n=1}^{n=T \cdot F_e} f_{1n} \cdot f_{2(n-m)}}{\left[\sum_{n=1}^n (f_{1n}^2) \cdot \sum_{n=1}^n (f_{2n}^2) \right]^{1/2}}$$

Après avoir cadré au mieux dans le temps les deux signaux, pour minimiser le nombre de points de la fonction de corrélation à calculer, on garde $C = \text{Max} | \Gamma(\tau) | = \text{Max} | F |$.

N.B. : Bien que le signal émis (explosion) soit très bref (quelques millisecondes) les signaux reçus sont longs (une seconde ou plus lorsque la distance émetteur - récepteurs est de l'ordre d'une dizaine de kilomètres), cependant le maximum de $\Gamma(\tau)$ a toujours lieu pour τ très faible (correspondant probablement à l'imprécision du cadrage "manuel").

Ceci est d'autant plus vrai que le rapport signal / bruit est important, et que la valeur de C finalement calculée est proche de 1.

3.- EXPERIENCES :

3.1.- Paramètres étudiés :

3.1.1.- Orientation de la ligne de mesure par rapport à la direction de propagation :

Trois orientations ont été étudiées : la ligne d'hydrophone est placée successivement :

- Horizontalement, perpendiculaire à la direction de l'émetteur (cohérence Horizontale Transverse ou C_{HT}).
- Horizontalement dans la direction de l'émetteur (cohérence Horizontale Longitudinale ou C_{HL}).
- Verticalement (cohérence Verticale : C_V).



3.1.2. - Distance émetteur - Récepteurs :

Pour chaque type de cohérence étudié, le bâtiment émetteur se place successivement en 5 stations, à distances des hydrophones de 2, 4, 10, 20 et 40 mètres.

3.1.3. - Fréquence et largeur de bande d'analyse :

Les signaux utilisés sont des signaux à large bande produits par des explosions (500 g de TNT ou 100 g d'explosif plastique), ceci permet l'étude en fonction de la fréquence.

Principalement les signaux de réception sont analysés dans 6 bandes $\frac{1}{3}$ Octave centrées sur 100, 200, 400, 800, 1600 et 3200 Hz.

Dans l'un des cas, l'analyse est faite également dans des bandes de 1 et $\frac{1}{6}$ Octave autour de ces fréquences.

3.1.4. - Distance entre hydrophones :

Toutes choses fixées par ailleurs, c'est en fonction de cette variable qu'on étudiera la cohérence.

On verra que ce qui importe en fait n'est pas tant la distance entre les deux capteurs, que la distance "normalisée" c'est-à-dire mesurée en longueurs d'onde de la fréquence analysée : $\frac{d}{\lambda}$ ou $2\pi \frac{d}{\lambda}$.

3.2. Dispositif expérimental :

Lors des expériences, effectuées en juin 1972, le profil bathyocéanographique présentait une nette thermocline à environ 30 mètres d'immersion.

Les figures 1a et 1b montrent les dispositions retenues pour les hydrophones de réception dans les deux cas "cohérence horizontale" (1a) et "cohérence verticale" (1b).

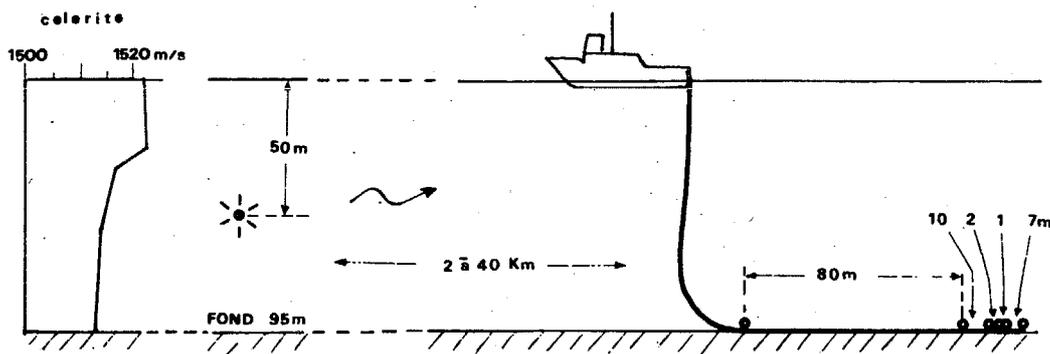


Fig. 1a cohérence horizontale

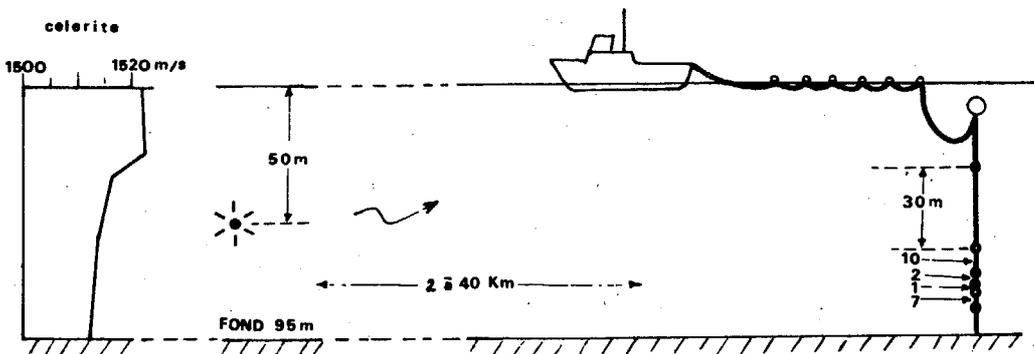


Fig. 1b cohérence verticale



COHERENCE SPATIALE DE SIGNAUX ACOUSTIQUES PROPAGES PAR PETITS FONDS

Ces dispositifs permettent de réduire le bruit sur les récepteurs en les éloignant de deux à trois cents mètres du bâtiment, et dans les deux cas les hydrophones sont découplés des mouvements de surface (de surcroît très faibles lors des expériences, faites par état de mer ≤ 1).

Dans la mesure du possible on a évité de placer les hydrophones dans ou de part et d'autre de la thermocline.

Les écarts variés entre hydrophones (de 1 à 80 mètres) permettent de multiples combinaisons et un bon échantillonnage de l'axe des abscisses gradué en $2\pi \frac{d}{\lambda}$ (de 10^{-1} à 10^3 environ en jouant également sur λ).

Les explosions étaient réalisées à l'immersion 50 mètres, à peu près à mi-hauteur d'eau.

N.B. : Une expérience préliminaire avait été effectuée sur la même zone, quelques mois auparavant, par profil bathycélérimétrique pratiquement isotherme. Seules avaient été réalisées des mesures de Cohérence Horizontale Longitudinale, les immersions d'émission et de réception étant alors 20 mètres.

Aucun écart notable n'ayant été observé sur les résultats des deux séries mesures "CHL", ces résultats sont présentés ensemble.

4.- RESULTATS OBTENUS :

4.1.- Influence de la distance émetteur - récepteur :

Les figures 2, 3, 4, 5, présentent les résultats obtenus pour la Cohérence Horizontale Transversale, lorsque l'émetteur est placé successivement à 2, 5, 10 et 20 kilomètres des récepteurs.

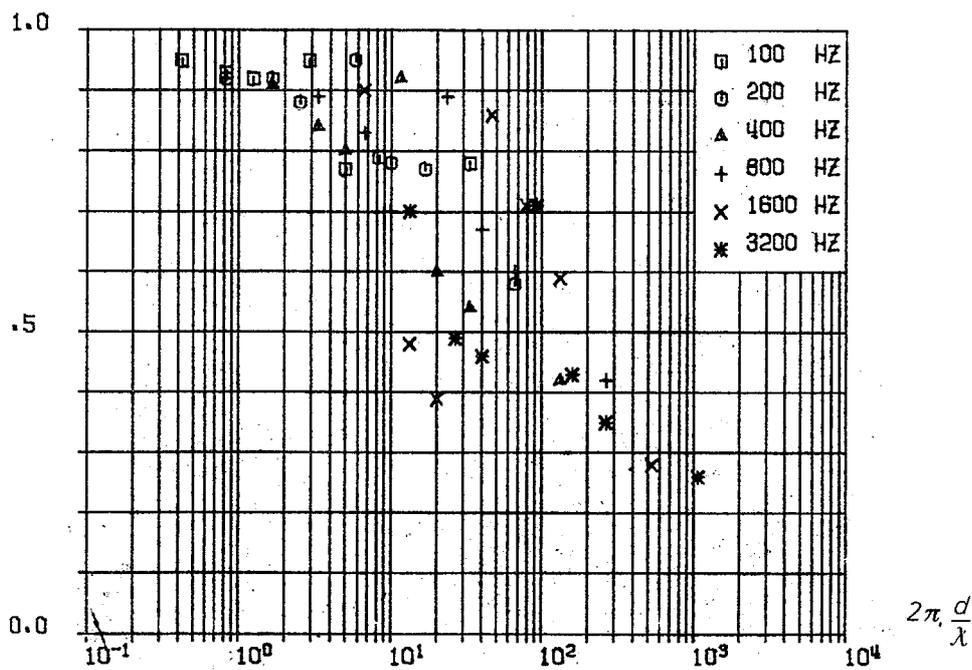


Fig. 2 Cohérence Horizontale Transversale - Emetteur à 2 Km



COHERENCE SPATIALE DE SIGNAUX ACOUSTIQUES PROPAGES PAR PETITS FONDS

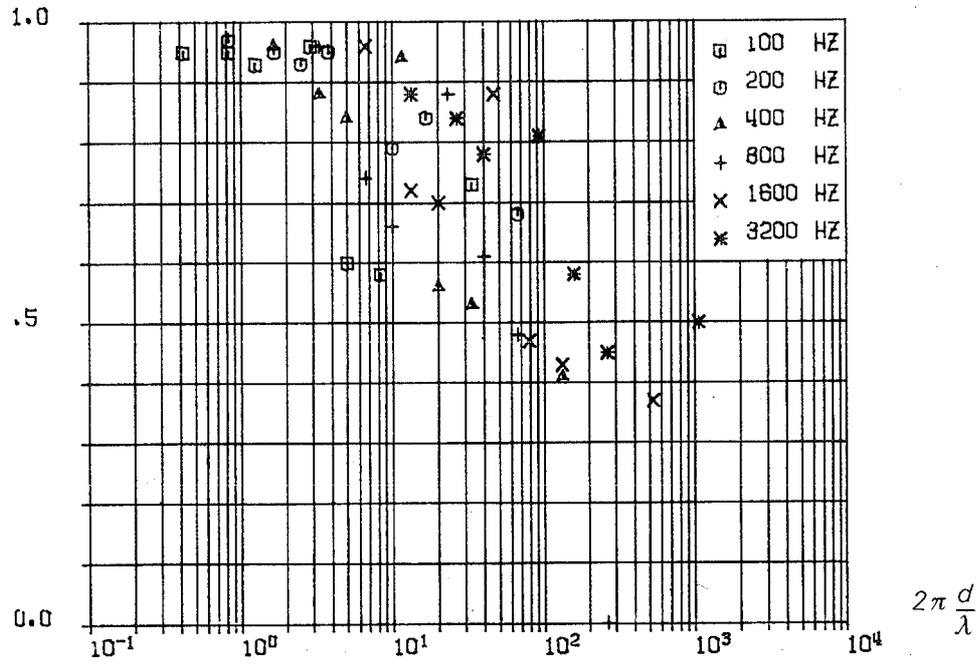


Fig. 3 Cohérence Horizontale Transversale - Emetteur à 5 Km

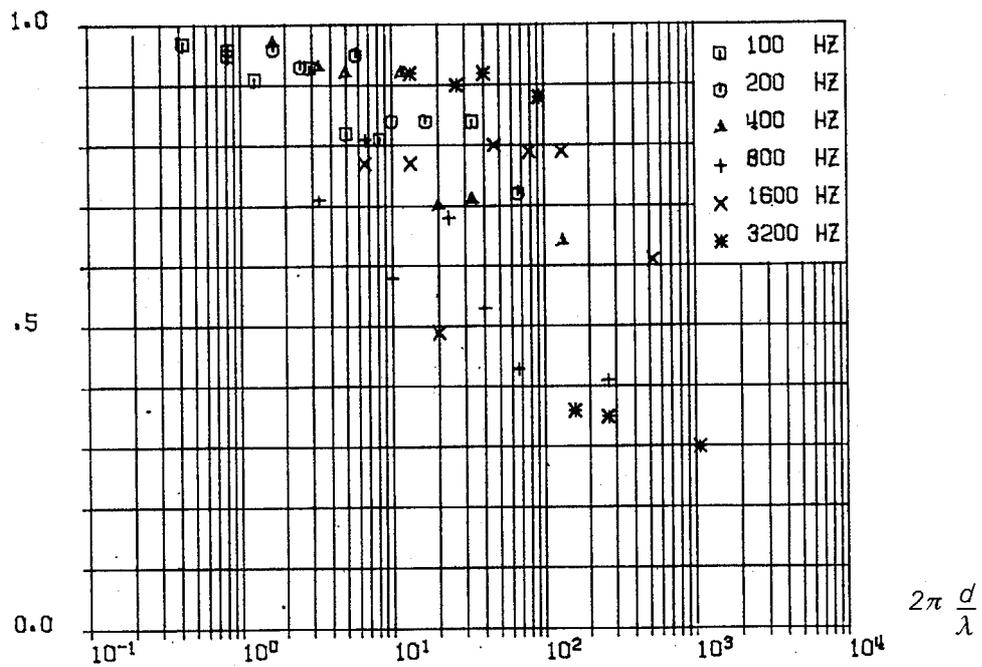


Fig. 4 Cohérence Horizontale Transversale - Emetteur à 10 Km

COHERENCE SPATIALE DE SIGNAUX ACOUSTIQUES PROPAGES PAR PETITS FONDS

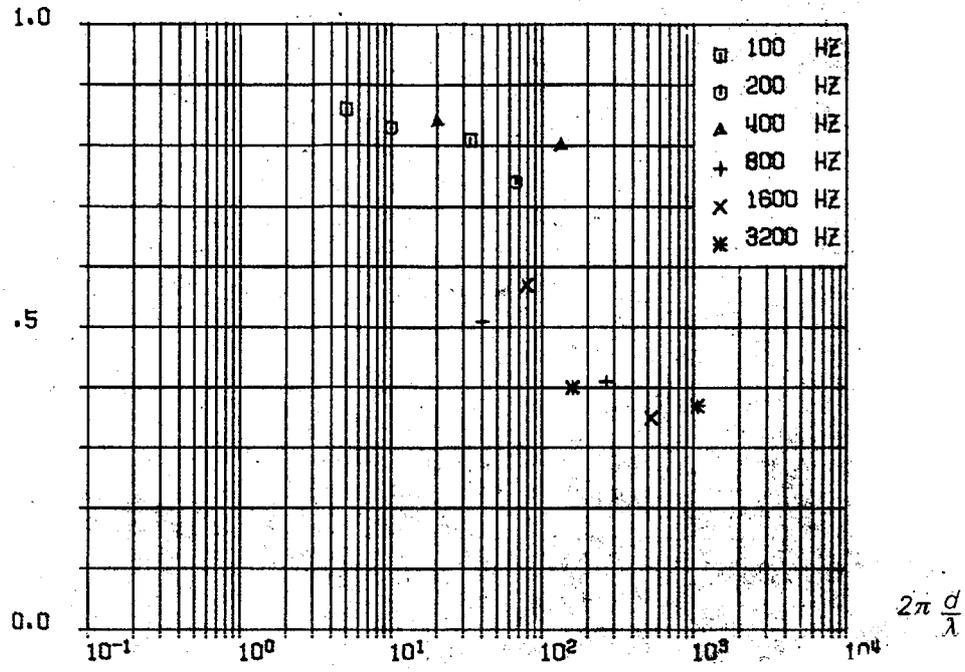


Fig. 5 Cohérence Horizontale Transversale - Emetteur à 20 km

Sur chaque figure les résultats obtenus pour les 6 fréquences analysées sont groupés, bien qu'individualisés par des signes différents (ce qui permet de vérifier que la "loi" suivie par la "décohérence" en fonction de l'écartement des hydrophones est à peu près indépendante de la fréquence, si on choisit une abscisse normalisée en $\frac{d}{\lambda}$).

On note que la dispersion des résultats augmente avec la distance émetteur, ce qui n'est pas surprenant, puisque le rapport signal sur bruit diminue lui avec la distance, surtout pour les fréquences les plus élevées qui sont très affaiblies par la transmission. (Un mauvais fonctionnement de plusieurs hydrophones explique le nombre plus faible des points présentés figure 5).



4.2. Influence de la largeur de bande d'analyse :

Pour l'un des cas de mesure : Cohérence Verticale avec distance émetteur 2 kilomètres, le paramètre "largeur de bande d'analyse" a été étudié en filtrant numériquement avec dans des bandes de largeur : 1, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{6}$ Octave (autour des mêmes fréquences centrales 100 à 3200 Hz).

Les résultats obtenus sont présentés figure 6, ($\frac{1}{6}$ Octave), figure 7 ($\frac{1}{3}$ Octave), figure 8 ($\frac{1}{6}$ Octave).

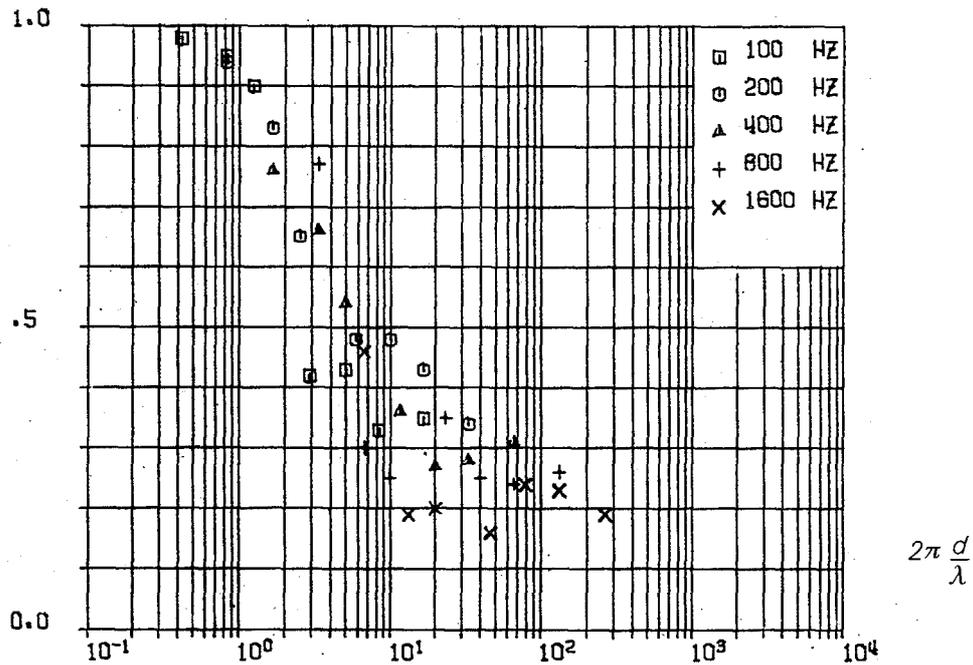


Fig. 6 Cohérence Verticale - Emetteur à 2 Km

Bande d'analyse : 1 Octave

CÔHERENCE SPATIALE DE SIGNAUX ACOUSTIQUES PROPAGÉS PAR PETITS FONDS

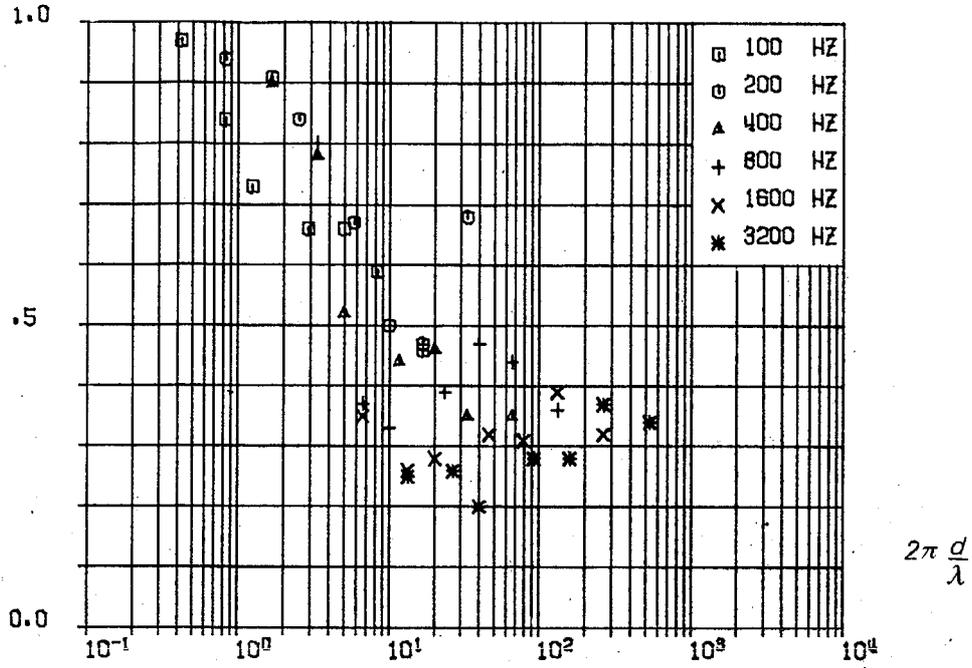


Fig. 7 Cohérence Verticale - Emetteur à 2 Km
Bande d'analyse : $\frac{1}{3}$ Octave

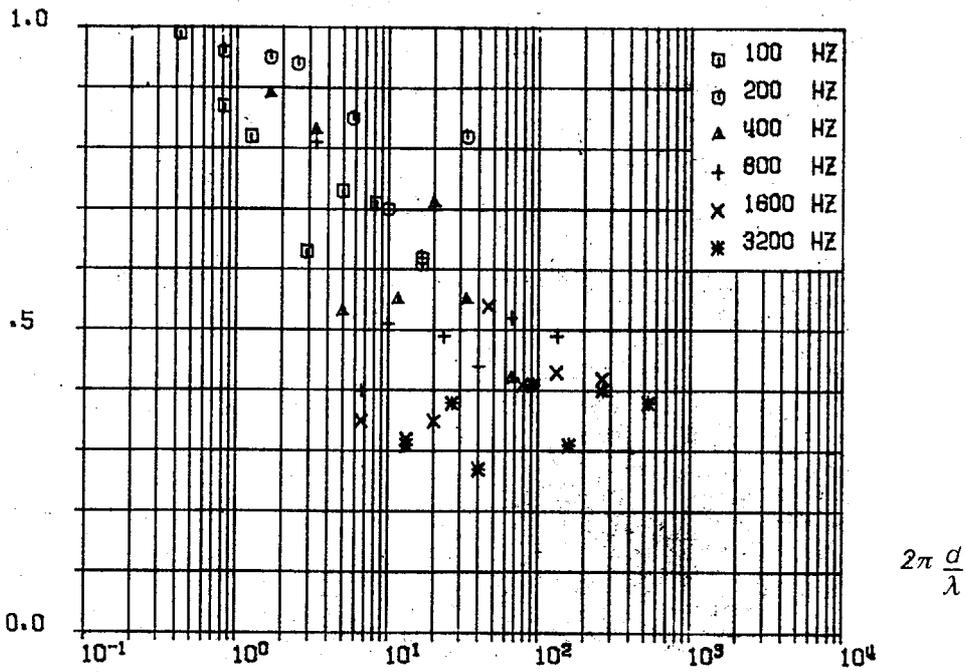


Fig. 8 Cohérence Verticale - Emetteur à 2 Km
Bande d'analyse : $\frac{1}{6}$ Octave



COHERENCE SPATIALE DE SIGNAUX ACOUSTIQUES PROPAGES PAR PETITS FONDS

On voit que la différence est seulement une dispersion croissante des résultats lorsque la bande devient plus étroite, c'est-à-dire lorsque l'énergie du signal diminue.

4.3. - Orientation de l'antenne :

Si l'on admet que la distance émetteur - récepteur n'est pas significative, on peut résumer tous les résultats obtenus dans 3 courbes (ou 3 images de points) : CHL - CHT et CV .

Si l'on compare les trois figures n° 3, 9 et 10 représentant respectivement les résultats obtenus (pour une distance émetteur 5 kilomètres) en Cohérence : Horizontale Transversale, Horizontale Longitudinale et Verticale; il apparaît que les deux premières sont très voisines.

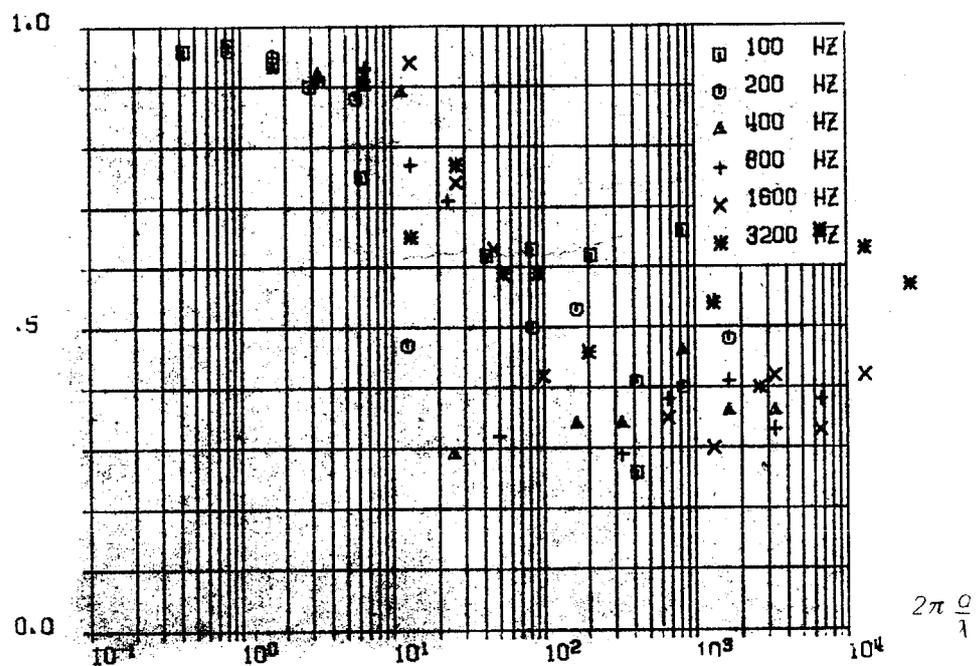


Fig: 9 Cohérence Horizontale Longitudinale - Emetteur à 5 Km

COHERENCE SPATIALE DE SIGNAUX ACOUSTIQUES PROPAGES PAR PETITS FONDS

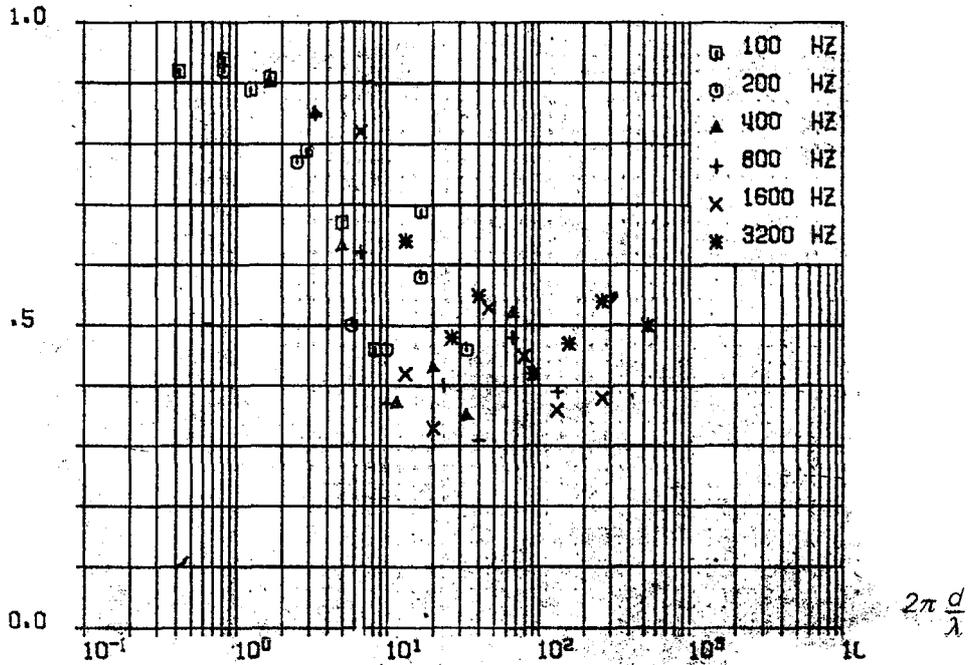


Fig. 10 Cohérence Verticale - Emetteur a 5 km

On peut resumer tous les résultats en deux courbes, l'une caractérisant la Cohérence Horizontale (quelle que soit l'orientation de la ligne de mesure par rapport à la direction de propagation, l'autre caractérisant la Cohérence Verticale).



COHÉRENCE SPATIALE DE SIGNAUX ACOUSTIQUES PROPAGÉS PAR PETITS FONDS

C'est ce que traduit la figure 11, où les deux courbes sont très voisines, mais décalées sur l'axe des abscisses d'un facteur ≈ 3 .

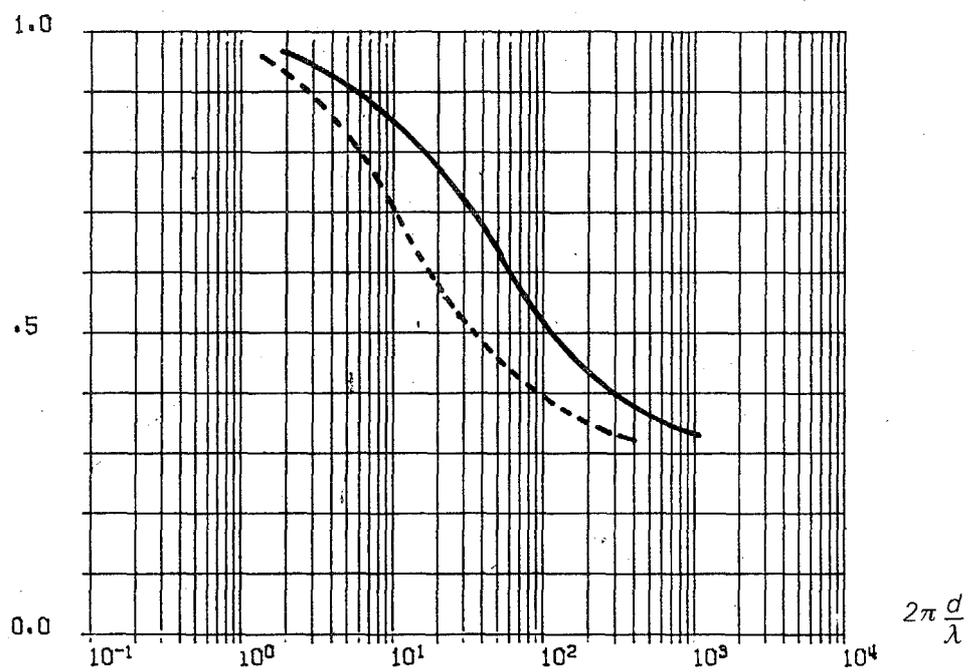


Fig. 11 ——— Cohérence Horizontale
 - - - - - Cohérence Verticale



5. INTERPRETATION DU POINT DE VUE DU GAIN D'ANTENNE :

Supposons une antenne constituée de N capteurs sur lesquels le bruit est totalement décorrélié ($C = 0$)

Dans le cas où les signaux sont complètement corrélés (cas pratiquement des signaux propagés en eau profonde, dans la mesure où l'on a corrigé les écarts de temps d'arrivée dus à des distances de propagation différentes), si l'on fait l'addition des sorties des N capteurs, on obtient en sortie un rapport Puissance de signal / Puissance de bruit

$$= \frac{(N S)^2}{N B^2} = N \cdot \frac{S^2}{B^2}$$

si S tension signal, B tension quadratique moyenne du bruit sur un hydrophone. On obtient donc un gain d'antenne $G = 10 \log N$.

Par petits fonds, la puissance du signal après addition des sorties des N hydrophones, n'est pas égale à $(N S)^2$, même après correction du temps d'arrivée.

On peut exprimer cette puissance du signal par :

$$E \{ (S_1 + S_2 + \dots + S_N)^2 \}, \text{ faisant intervenir les}$$

fonctions d'auto et d'intercorrélacion des différents signaux.



COHERENCE SPATIALE DE SIGNAUX ACOUSTIQUES PROPAGES PAR PETITS FONDS

Par exemple dans le cas simple de trois hydrophones disposés linéairement (avec le même intervalle d), ce rapport puissance signal / puissance bruit devient :

$$R = \frac{E\{(S_1 + S_2 + S_3)^2\}}{3 B^2} = \frac{E\{S_1^2\} + E\{S_2^2\} + E\{S_3^2\} + 2E\{S_1 S_2\} + 2E\{S_2 S_3\} + 2E\{S_1 S_3\}}{3 B^2}$$

Si C_{12} , C_{23} , C_{13} sont les maxima des fonctions de corrélation (donc après correction des temps d'arrivées sur les trois hydrophones), et en remarquant que :

$$E\{S_1^2\} = E\{S_2^2\} = E\{S_3^2\} = S^2$$

et aussi : $C_{12} = C_{23}$ (équidistance des capteurs), on obtient :

$$R = \frac{3 S^2 + 4 C_{12} S^2 + 2 C_{13} S^2}{3 B^2}$$

$$= \frac{S^2}{B^2} \left(1 + \frac{4}{3} C_{12} + \frac{2}{3} C_{13} \right)$$

COHERENCE SPATIALE DE SIGNAUX ACOUSTIQUES PROPAGES PAR PETITS FONDS

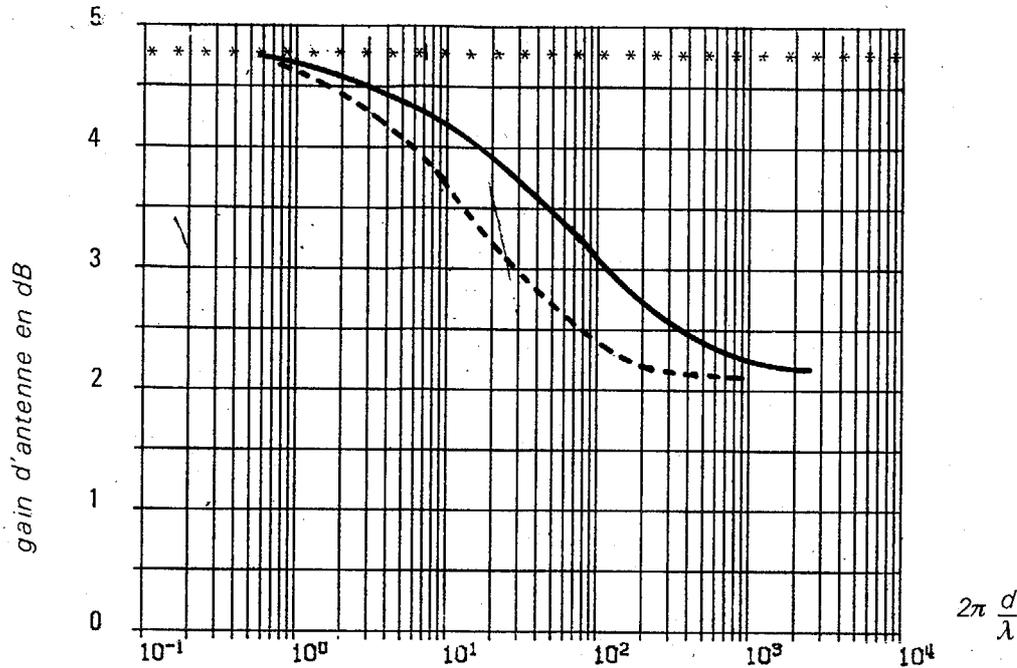


Fig. 12 Gain d'antenne ——— ligne d'hydrophones horizontale
 ----- ligne verticale

(* * * * gain avec 3 hydrophones par grands fonds)

Le gain d'antenne est alors :

$$G = 10 \log\left(1 + \frac{4}{3} C_{12} + \frac{2}{3} C_{13}\right) \text{ et non } 10 \log 3 \text{ comme par grands fonds.}$$

En utilisant les résultats de la figure 11, on peut calculer G en fonction de d (intervalle "élémentaire") lorsque les trois hydrophones sont disposés sur une ligne horizontale ou verticale. Cf. figure 12, où G en dB est calculé pour les deux orientations en fonction de l'intervalle normalisé $2\pi \frac{d}{\lambda}$, on a également indiqué le gain "Grands Fonds" (avec $C_{ij} = 1$) correspondant à trois hydrophones : soit $10 \log 3 = 4,8$ dB.



6. - CONCLUSION :

L'exemple ci-dessus, quoique très simplifié (on n'a supposé ni corrélés par exemple, indique bien cependant l'influence sur le gain d'antenne des dimensions de celle-ci, dans le sens horizontal et dans le sens vertical ; en particulier on retrouve bien un rapport de l'ordre de 3 entre les espacements horizontaux et verticaux donnant la même valeur de "cohérence". La valeur de ce rapport dépend bien sûr de la valeur de cohérence nécessaire, elle-même en rapport avec le traitement d'antenne effectué.

Ce rapport de 3 est néanmoins caractéristique des valeurs de cohérence de l'ordre de 0,6 à 0,7 (cf. figure 11), là où la chute de la cohérence en fonction de l'écartement des deux hydrophones est rapide.

Les résultats présentés (selon le choix d'une valeur de cohérence limite admissible, choix fait éventuellement au vu de ces résultats) peuvent permettre de fixer les dimensions de l'antenne au-delà desquelles le gain n'est plus "rentable".