

DIXIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

267



NICE du 20 au 24 MAI 1985

PROPAGATION SOUS-MARINE : MESURE DES STABILITES SPATIALES ET TEMPORELLES
DU PLAN D'ONDE *
UNDERWATER PROPAGATION : MEASUREMENTS OF THE SPATIAL AND TEMPORAL STABI-
LITIES OF THE MEDIUM

Christian JAIN

THOMSON-CSF - Division des Activités Sous-Marines
Route du Conquet - 29283 BREST CEDEX

THOMSON-CSF - ASM Division
Route du Conquet - 29283 BREST CEDEX - FRANCE

RESUME

Pour améliorer les performances sur le plan de la résolution des sonars de chasse-aux-mines, on est amené à réaliser des antennes très longues (1000λ) ou des antennes dites "synthétiques". Des mesures ont été menées pour s'assurer compte tenu de la nature inhomogène du milieu de propagation sous-marin que la cohérence spatiale du signal (phase-amplitude) le long de l'antenne est suffisante pour atteindre la résolution attendue. Dans le cas d'antenne "synthétique" constituée à partir de la sommation cohérente des signaux reçus au cours de récurrences successives, la cohérence spatio-temporelle du signal doit être respectée.

Au cours des expérimentations, les signaux de capteurs d'une antenne de 1000λ ont été enregistrés sous forme numérique après démodulation complexe. L'émission était assurée par une sonde située à une distance que l'on a fait varier de 50 à 200 m de l'antenne de réception. Les mesures ont été faites sur une période de 4 mois et par des hauteurs d'eau de 10 à 15 m.

Les résultats obtenus montrent que dans 80 % des cas l'écart type des fluctuations de phase le long de l'antenne reste inférieur à $\lambda/16$. Cependant les fluctuations temporelles observées sont telles que les fluctuations de phase et d'amplitude sont plus importantes dans le cas d'une antenne "synthétique" que dans le cas d'une antenne classique de longueur équivalente.

* Etude soutenue par la Direction des Recherches,
Etudes et Techniques - PARIS - FRANCE.

SUMMARY

Long aperture ($> 1000 \lambda$) or synthetic aperture are considered to improve the spatial resolution of hunting mines sonars. Measurements were conducted to see that the phase and amplitude coherency of the sonar signal along the aperture (1000λ) is sufficient to attain the theoretical spatial resolution. In the case of synthetic aperture the spatial and temporal coherency of the sonar signal must be respected because synthetic aperture is constituted of the addition of coherent sonar signal received in the course of several successive pulses.

During experiments the in phase and quadrature components of the received sonar signal were converted into a 8-bits digital format and recorded on a magnetic tape. The measurements were made bistatically using a projector separated by a distance from 50 m to 200 m of the receiving aperture. Measurements were conducted over a four month span. At the site the water is 10 - 15 m deep.

Results obtained show that in 80 % of the measurements the standard deviation of the phase along the aperture is as small as $\lambda/16$. However the observed temporal variations are such that the phase and amplitude variations are greater for a synthetic aperture than for a standard aperture of equivalent length.



1 - INTRODUCTION

Le traitement réalisé lors de la formation de voies dans le cas d'une antenne sonar classique consiste à sommer les signaux issus des différents capteurs après les avoir retardés (ou déphasés) de manière que la sommation soit cohérente pour un signal issu d'une direction donnée.

Le signal reçu par le capteur i d'une antenne peut s'écrire après démodulation complexe

$$s_i : A_i e^{j\psi_i}$$

Le traitement d'antenne réalise l'opération suivante pour la direction θ_0

$$y(\theta_0) = \sum_{i=1}^{N_c} h_i s_i e^{-j\psi_i(\theta_0)}$$

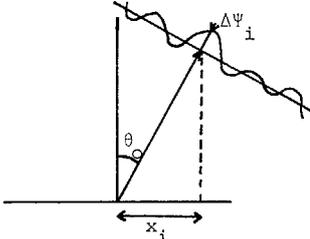
$$= \sum_{i=1}^{N_c} h_i A_i e^{j(\psi_i - \Psi_i(\theta_0))}$$

avec : N_c = nombre de capteurs de l'antenne
 h_i = coefficient de pondération d'amplitude

$\Psi_i(\theta_0)$ est un déphasage qui dépend de la direction visée et est choisi de sorte que la sommation soit cohérente (c'est-à-dire $\psi_i - \Psi_i(\theta_0)$ indépendant de i)

$$\Psi_i(\theta_0) = x_i \cdot \sin(\theta_0)$$

x_i étant l'abscisse du capteur i sur l'antenne.



Si le milieu de propagation est inhomogène, la surface d'onde peut être déformée et la phase $\Psi_i(\theta_0)$ est alors différente de celle qui a été prise comme hypothèse pour le calcul de ψ_i . Dans ce cas la sommation n'est plus cohérente et il en résulte une détérioration du lobe de directivité : élargissement du lobe principal, remontée des lobes secondaires.

Les mêmes effets se produisent si l'amplitude A_i du signal n'est pas la même sur tous les capteurs. Tout se passe alors comme si la loi de pondération d'amplitude était différente de la loi idéale.

Aussi il est nécessaire que la cohérence du milieu soit respectée sur toute la longueur de l'antenne pour que celle-ci ait la résolution attendue.

Dans le cas d'une antenne synthétique on somme les signaux reçus au cours de plusieurs récurrences successives et la cohérence phase et amplitude doit être respectée non seulement sur toute la longueur de l'antenne mais également pendant le temps nécessaire (T_s) à l'acquisition des signaux.

Antenne réelle



L_s : longueur antenne synthétique

$$T_s = \frac{L_s}{v}$$

Tout ceci montre l'intérêt de mesurer la cohérence spatio-temporelle du milieu. Pour ce faire on a enregistré au cours d'expérimentations les signaux de capteurs d'une antenne de 1000λ .

2 - DESCRIPTION DES EXPERIMENTATIONS

Les expérimentations ont été menées en rade abri de Brest. Sur ce site la hauteur d'eau varie de 10 à 15 m. Les mesures ont été effectuées sur un trajet direct. L'antenne de réception était fixée à l'extrémité d'un quai sur un chariot, l'ensemble possédant diverses possibilités de réglages en site, gisement et profondeur d'immersion. La sonde utilisée pour l'émission était installée sur un tripode face à l'antenne de réception à une distance que l'on a fait varier de 50 m à 200 m par pas de 50 m.

L'antenne de réception comprend une partie centrale équipée de 50 capteurs au pas de 8λ et deux extrémités lacunaires ayant chacune 5 capteurs au pas de 80λ soit une longueur totale de 1000λ .

Une maquette a été réalisée permettant l'acquisition des signaux des capteurs de l'antenne de réception.

La chaîne d'acquisition comprend :

- . une préamplification
- . une démodulation complexe, ce qui permet de conserver les informations de phase et d'amplitude.
- . une numérisation sur 8 bits.

Les signaux ont été enregistrés après numérisation sur bande magnétique. Ces données ont ensuite été transférées sur un site informatique pour dépouillements.

Avant les expérimentations la maquette avait été étalonnée en bassin pour compenser les différences de phase ou de gain apparaissant sur les chaînes d'acquisition relatives à chaque capteur.

Des mesures ont été effectuées avec les géométries suivantes :

- . distance émission réception 50 m, 100 m, 150 m, 200 m
- . hauteur sur le fond de la sonde d'émission 4,3 m
- . hauteur sur le fond de l'antenne de réception de 4 m à 13 m ceci afin d'apprécier l'influence de l'état de surface.

Dans tous les cas on s'était assuré que les conditions d'expérimentations étaient telles qu'elles permettaient de dissocier le trajet direct (sonde d'émission, antenne de réception) des trajets réfléchis par le fond ou la surface.

Les mesures se sont déroulées sur une période de 4 mois de juin 1983 à septembre 1983.

Caractéristiques du signal émis :

- . fréquence pure 400 kHz
- . durée d'émission 100 μ s
- . récurrence émission 1,2 s

La durée de chaque enregistrement est de l'ordre de 20 s.

A la réception, le rapport signal utile sur bruit électronique était dans le cas le plus défavorable de + 47 dB.

3 - DEPOUILLEMENTS

Lors du dépouillement des données en centre de calcul on a effectué les opérations suivantes :

- Focalisation à la distance séparant la sonde émettrice de l'antenne de réception. La focalisation nécessite deux corrections :

sur chaque capteur, on a corrigé la différence de phase due à la géométrie. La propagation se faisant autour de la fréquence F. il faut faire la correction de phase suivante pour le capteur i :

$$2\pi jF \frac{x_i^2}{2c\rho_0}$$

avec x_i : abscisse le long de l'antenne de réception du capteur i

ρ_0 : distance émission réception

c : célérité du son dans l'eau de mer

Dans la bande de base il faut tenir compte pour chaque capteur d'un retard

$$\tau_i = \frac{x_i^2}{2c\rho_0}$$

Ce retard a été compensé par passage dans le domaine spectral, déphasage de la voie K du spectre de

$$2\pi j \frac{K}{N} f_e \frac{x_i}{2c\rho_0} \text{ et ensuite retour dans le temporel}$$

(f_e : fréquence d'échantillonnage).

- calcul de la phase et de l'amplitude pour chaque capteur.

4 - RESULTATS

4.1 Fluctuations spatiales

Les figures 1 et 2 donnent un exemple des fluctuations de phase et d'amplitude le long de l'antenne. Les fluctuations présentées sur ces courbes ont été calculées de la manière suivante :

$$\text{pour la phase } \psi_i = \arctg \frac{Y_i}{X_i} - \arctg \frac{Y_{25}}{X_{25}}$$

$$\text{pour l'amplitude } A_i = 20 \log X_i^2 + Y_i^2 - 20 \log X_{25}^2 + Y_{25}^2$$

X_i et Y_i sont les informations sinus et cosinus relatives au capteur i.

Sur ces courbes l'axe des x représentent les capteurs le long de l'antenne en tenant compte du pas entre chaque capteur. Sur la partie centrale de l'antenne le pas est de 8λ sur les extrémités le pas est de 80λ .

Calculs statistiques :

Pour chaque enregistrement on a calculé les valeurs moyennes et écarts type des fluctuations de phase et d'amplitude le long de l'antenne. D'un enregistrement à l'autre les écarts type varient :
 pour la phase de 4° à 20°
 pour l'amplitude de $0,8 \text{ dB}$ à $1,8 \text{ dB}$.

A partir de ces résultats et en considérant les enregistrements où seul le paramètre distance émission réception diffère d'un enregistrement à l'autre, on note que les écarts type des fluctuations de phase et d'amplitude paraissent peu corrélés avec la distance émission réception du moins dans l'intervalle entre 50 m et 200 m .

Par contre on note que les écarts type des fluctuations de phase et d'amplitude diminuent lorsqu'augmente l'immersion de l'antenne de réception. Plus l'immersion est profonde et moins l'influence des couches de surface (bulles, clapet, ...) se fait sentir.

Pour illustrer ces résultats et voir leurs influences sur le fonctionnement des sonars, on a calculé le lobe de l'antenne de réception en effectuant une FFT des signaux de capteurs. Les figures 3 et 4 représentent les lobes relatifs aux figures 1 et 2.

4.2 Fluctuations temporelles

Les figures 5 et 6 donnent l'évolution temporelle de la phase et de l'amplitude pour un même enregistrement. Il s'agit de l'évolution des fluctuations de phase et d'amplitude sur une durée de 30 secondes.

Pour chaque enregistrement, on a calculé les statistiques temporelles suivantes :

Valeurs moyennes et écarts type des fluctuations de phase et d'amplitude pour chaque capteur sur toutes les récurrences de l'enregistrement.

Les écarts type varient :
 pour la phase de 3° à 21°
 pour l'amplitude de $0,3 \text{ dB}$ à $1,2 \text{ dB}$.

Les figures 7 et 8 représentent les écarts type des fluctuations de phase et d'amplitude en fonction de h : différence d'immersion entre l'antenne de réception et la sonde d'émission. Chaque courbe concerne une famille d'enregistrements où seul le paramètre h varie. On note sur ces courbes que les fluctuations temporelles de phase et d'amplitude augmentent avec la hauteur d'eau traversée par les ondes sonores.

La figure 9 représente les écarts type des fluctuations temporelles de phase et d'amplitude pour chaque capteur calculés sur l'ensemble des mesures dépouillées. On constate une dégradation de la stabilité temporelle en ce qui concerne la phase et l'amplitude sur les extrémités de l'antenne.

$$\text{pour la phase } \sigma_{t\phi\max} - \sigma_{t\phi\min} = 12,5^\circ (= \lambda/30)$$

$$\text{pour l'amplitude } \sigma_{tA\max} = 2 \text{ dB}, \sigma_{tA\min} = 0,5 \text{ dB}$$

Parmi les enregistrements dépouillés on a relevé des cas d'instabilités importantes concernant les mesures faites pendant deux jours consécutifs.

En spatial on a noté des fluctuations d'amplitude entre deux capteurs voisins ($d = 28,8 \text{ mm}$) de l'ordre de 6 à 10 dB (figure 10). En temporel les fluctuations d'amplitude sont du même ordre de grandeur d'une récurrence à l'autre ($1,2 \text{ s}$). Les conditions météorologiques (force du vent, état de la mer) n'avaient rien de particulier pour ces deux journées.



Ces fluctuations d'amplitude peuvent être imputer à des inhomogénéités thermiques du milieu. Ces inhomogénéités peuvent être schématisées comme des bulles d'eau de célérité différentes. Ces structures microthermiques créent des fluctuations spatiales et temporelles (courants, convections) du plan d'onde.

D'après [1] on a :

$$\frac{E(p^2) - E^2(p)}{E(p^2)} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} E(\mu^2) k^2 Ra$$

avec p : amplitude instantanée de la pression sonore
 (E() : valeur moyenne)

$$\mu = \frac{\Delta c}{c}, \quad c : \text{célérité}$$

$k = 2\pi/\lambda$: longueur d'onde du signal émis

R : distance émission réception

a : distance de corrélation du milieu ($a = 0,2e^{D/40}$:
 formule empirique)

D : profondeur

Ceci en supposant que la fonction d'autocorrélation de μ suit une loi gaussienne.

Concernant nos mesures on a :

$$a = 20 \text{ cm}$$

$$\frac{E(p^2) - E^2(p)}{E(p^2)} = 0,38$$

$$\text{soit } E(\mu^2) = 1,3 \cdot 10^{-8}$$

En supposant les fluctuations de célérité dus uniquement aux variations de température :

$$E(\mu^2) = E\left(\frac{\Delta^2 c}{c}\right) = E(\alpha^2 \Delta T^2)$$

$$\alpha = 2,19 \cdot 10^{-3}$$

$$E(\Delta T^2) = 2,7 \cdot 10^{-3}$$

En considérant $E(T) = 0$, l'écart type des fluctuations de température = $0,05^\circ\text{C}$

4.3 Antenne synthétique

La figure 11 représente les fluctuations de phase et d'amplitude que l'on obtiendrait dans le cas d'une antenne synthétique de longueur équivalente à l'antenne réelle et nécessitant 3 récurrences pour sa reconstruction. Les courbes présentées sur les figures 11 et 12 sont à comparer avec celles des figures 1 et 2.

On note que les écarts type des fluctuations de phase et d'amplitude sont supérieurs pour une antenne synthétique.

CONCLUSION

Lors des dépouillements des mesures on a constaté :

- que dans 80 % des cas les fluctuations de phase et d'amplitude restent faibles et apportent peu de dégradations au lobe de l'antenne. On peut donc considérer qu'avec une antenne longue de 1000λ la cohérence spatiale (phase et amplitude) le long de l'antenne est suffisante pour atteindre la résolution théorique attendue.

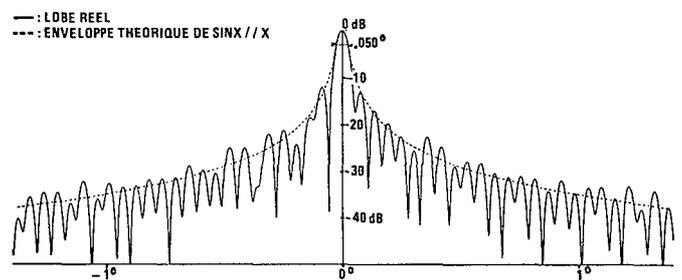
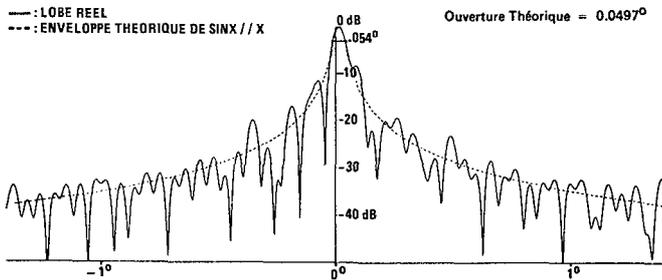
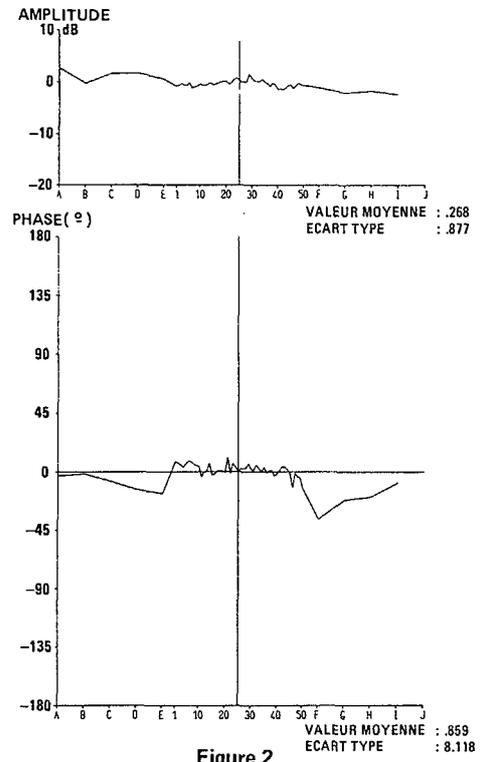
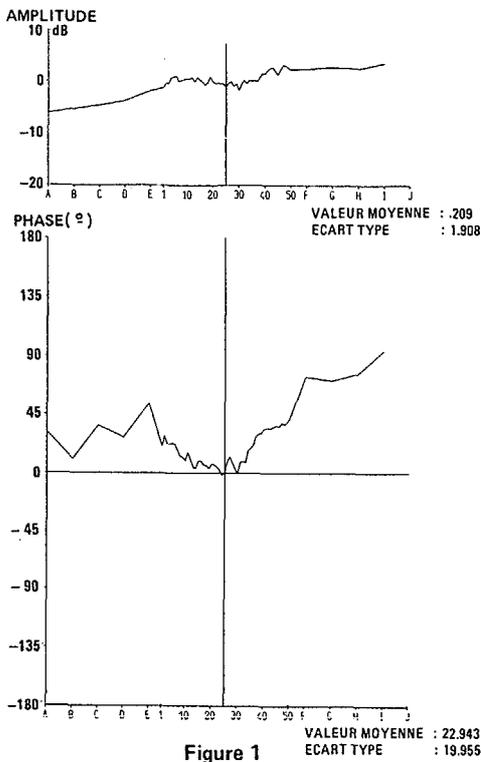
- Par ailleurs les fluctuations temporelles observées sont telles que les fluctuations de phase et d'amplitude sont plus importantes dans le cas d'une antenne synthétique que dans le cas d'une antenne classique de longueur équivalente.

BIBLIOGRAPHIE :

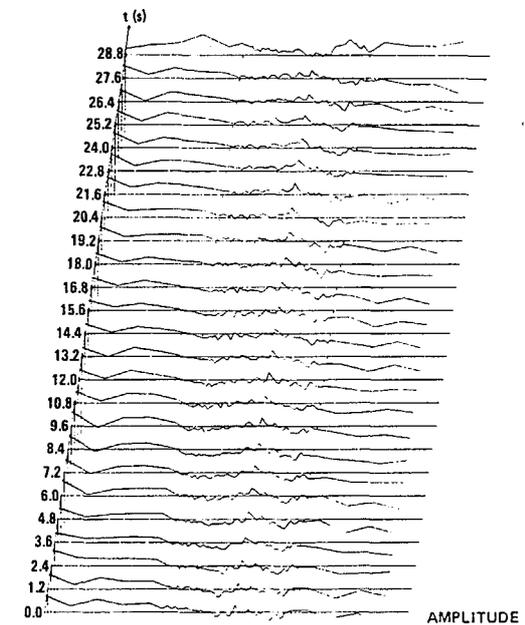
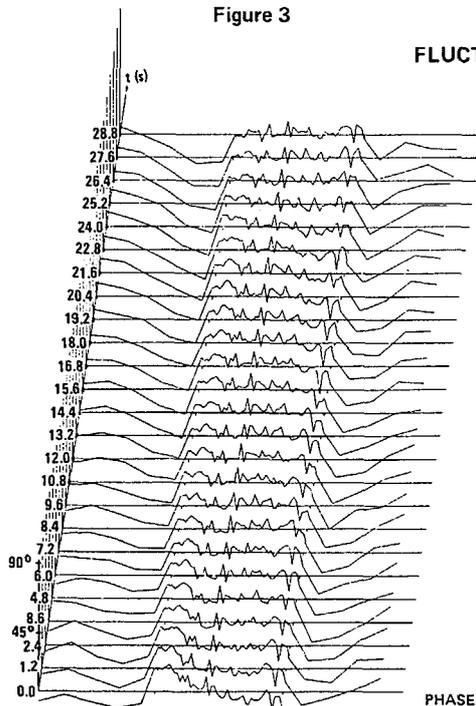
- [1] Sound phase and amplitude fluctuations due to temperature microstructure in the upper ocean - H. MEDWIN - JASA Volume 56 n° 4 - Octobre 1974
- [2] Acoustic fluctuations due to the temperature fine structure of the ocean. Santha Unni - Charles Kaufman - JASA Volume 69 n° 3 - Mars 1981

PROPAGATION SOUS-MARINE : MESURE DES STABILITES SPATIALES ET TEMPORELLES DU PLAN D'ONDE
 UNDERWATER PROPAGATION : MEASUREMENTS OF SPATIAL AND TEMPORAL STABILITIES OF THE MEDIUM

FLUCTUATIONS SPATIALES :



FLUCTUATIONS TEMPORELLES





PROPAGATION SOUS-MARINE : MESURE DES STABILITES SPATIALES ET TEMPORELLES DU PLAN D'ONDE
 UNDERWATER PROPAGATION : MEASUREMENTS OF THE SPATIAL AND TEMPORAL STABILITIES OF THE MEDIUM

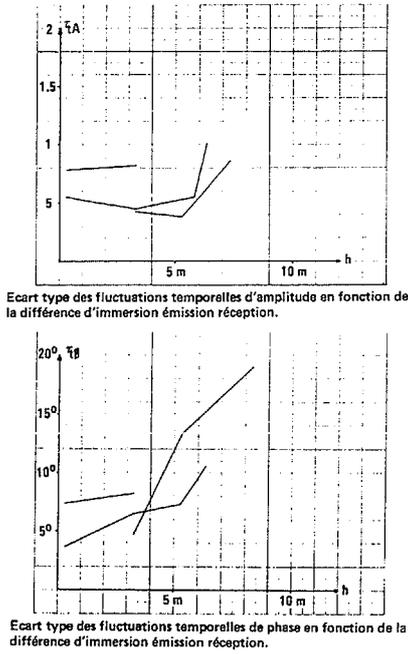


Figure 8

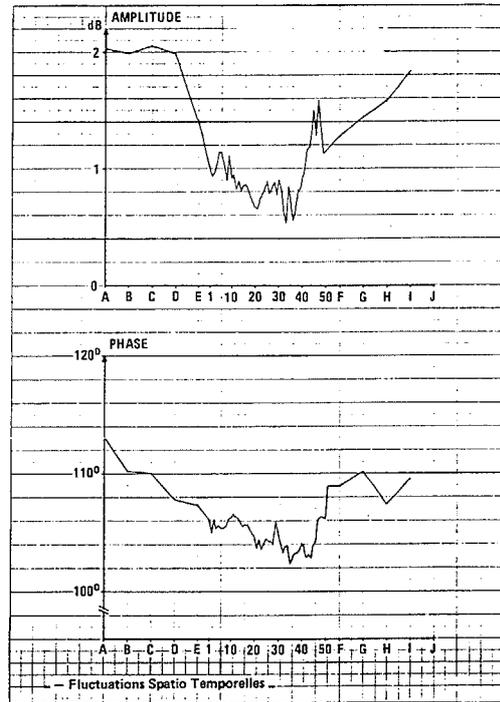


Figure 9

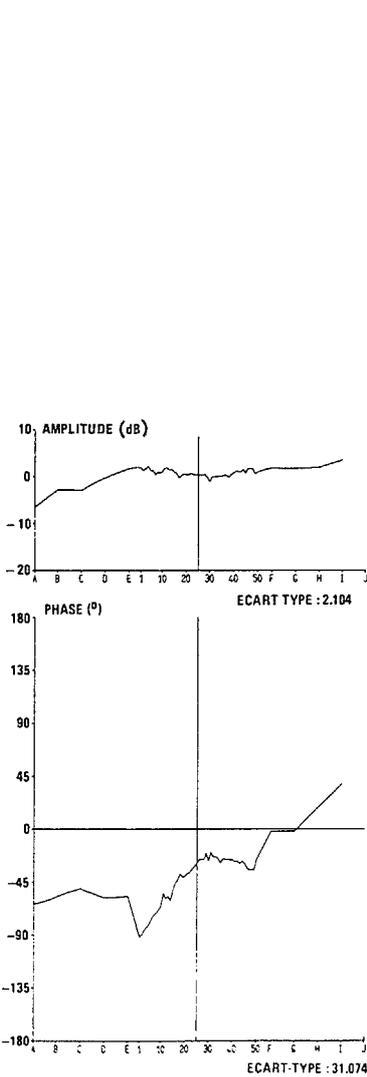


Figure 11

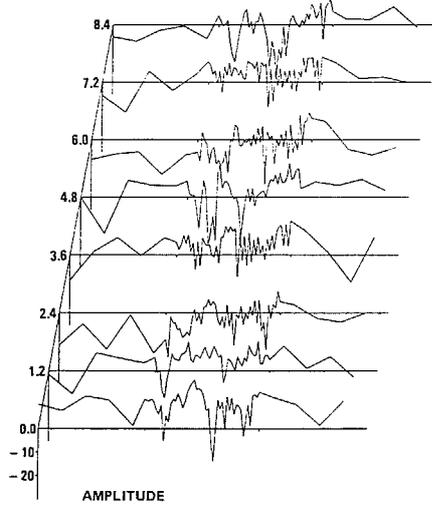


Figure 10

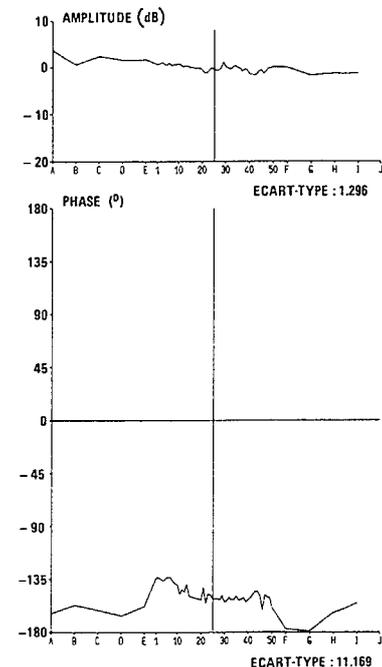


Figure 12