



TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

Nice 7 au 12 mai 1973

ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES*

Bruno LALLEMENT et Bernard LOUBIERES

THOMSON-CSF - Division des Activités Sous-Marines

06802 CAGNES-sur-MER

RESUME Les propriétés réfléchissantes des fonds d'une zone géographique donnée ont été étudiées au moyen de leur réponse impulsionnelle et des fonctions de corrélation des signaux direct et réfléchi, dans une bande de fréquences s'étendant de 0,5 à 5 kHz.

On présente un modèle théorique de la réflexion d'ondes acoustiques sur un milieu visco-élastique stratifié, dont les couches, en nombre quelconque, sont planes et homogènes ; elles sont définies par leur épaisseur, leur densité humide et les vitesses et absorptions des ondes longitudinales et transversales. On compare les résultats expérimentaux obtenus par déconvolution à ceux que fournit le modèle utilisant les caractéristiques du fond considéré, mesurées par analyse de carottes.

SUMMARY

The reflecting properties of a given zone have been studied by means of their impulse response and the correlation function between direct and bottom reflected paths, in a frequency band from 0.5 to 5 kc/s.

A theoretical model is presented for the reflection of acoustic waves on a visco-elastic stratified medium, made of flat and parallel layers. They are defined by their thickness, their wet density, and sound velocities and absorptions of compressional and shear waves. Experimental results obtained by deconvolution are compared with theoretical computations based upon the bottom characteristics, measured on cores.

*Etude financée par la Direction des Recherches et Moyens d'Essais - Paris (France).

ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES.

1. - INTRODUCTION.

Les études de propagation dans le milieu marin doivent, pour être complètes, tenir compte des propriétés des frontières de ce milieu, qui interviennent dans les phénomènes de réflexion et de diffusion. Leur rôle est particulièrement important par petits fonds, où ils font partie intégrante des modèles de propagation établis.

C'est pourquoi une étude détaillée de la réflectivité des fonds d'une zone assez régulière du plateau continental Méditerranéen a été entreprise au cours de diverses campagnes d'essais en mer, menées avec le concours du Laboratoire DSM du Brusco et de la Mission Océanographique de Méditerranée. Ces expérimentations ont permis de mesurer la réponse impulsionnelle et le coefficient de corrélation du fond, en fonction de la fréquence et de l'angle d'incidence, et de relever les caractéristiques géologiques des sédiments du tréfond. Ces résultats acoustiques ont ensuite été comparés aux valeurs obtenues avec un modèle de la réflexion sur un fond stratifié, solide et absorbant.

2. - CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES FONDS MARINS.

On peut distinguer sommairement deux zones bien différentes dans les océans :

- le plateau continental, qui borde la plupart des côtes, s'étendant parfois sur des dizaines ou des centaines de kilomètres, et dont la profondeur varie entre 50 et 300 mètres ;
- les régions profondes, dont la profondeur moyenne est de l'ordre de 1000 à 5000 mètres, et qui couvrent la majeure partie des océans.



ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES.

Le plateau continental est souvent recouvert de sédiments, répartis de façon irrégulière, et son relief présente de nombreux accidents de faible amplitude. Une zone de transition brutale (falaises, canyons, etc...) conduit aux régions profondes où l'on trouve de grands bassins sédimentaires relativement réguliers. On distingue dans ces régions différentes provinces physiographiques, fondées sur la nature de leur relief, telles que des plaines abyssales parfaitement planes, des collines abyssales très "erodées", des dépressions ou des bassins sédimentaires, enfin des chaînes montagneuses.

Les irrégularités de la surface du fond ont une grande importance pour la réflexion -ou plutôt la diffusion- des ondes acoustiques, lorsqu'elles ont des dimensions comparables aux longueurs d'onde utilisées (0,1 à 10 mètres environ).

Les outils disponibles pour leur étude -photographie en relief, télévision, sondeurs latéraux- permettent difficilement d'en faire l'étude statistique qui serait nécessaire pour tenir compte de leur influence. Seules les mesures de diffusion acoustique permettent d'en obtenir indirectement une description qui dépend malheureusement du modèle choisi pour interpréter ces résultats expérimentaux [1, 2].

La structure interne du fond a aussi une influence essentielle sur les phénomènes qui nous intéressent. Les carottages et les sondages à grande résolution ont permis de constater la présence très fréquente d'une stratification des sédiments qui le composent. Ils sont disposés sous forme de couches souvent régulières et homogènes, parallèles à la surface du fond, d'épaisseur très variable (de quelques centimètres à plusieurs

ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES.

mètres). Elles recouvrent un soubassement rocheux, et leur épaisseur totale varie aussi dans de larges limites, de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres. Nous nous intéresserons surtout aux sédiments jusqu'à quelques dizaines de mètres de profondeur, puisqu'eux seuls rentrent en ligne de compte dans les phénomènes traités comme on le verra plus loin.

La porosité des sédiments, qui exprime la proportion du volume d'eau au volume total de sédiment, nous a semblé être le paramètre le plus utilisé et le plus commode pour caractériser les sédiments rencontrés. Malgré les effets complexes qui la régissent, elle est pratiquement proportionnelle au coefficient Φ ($\Phi = \log_{10} m$: diamètre moyen des grains en mm., Cf. référence [3]) et les propriétés qui nous intéressent en dépendent assez étroitement ; il s'agit de la densité humide, de la célérité et de l'absorption des ondes longitudinales et transversales, qui permettent de définir les propriétés acoustiques d'un sédiment (Cf. chapitre 2).

2.1. Densité humide.

La densité humide ρ des sédiments est proportionnelle à leur porosité : $\rho = (1-p) \rho_{\text{séd.}} + p \rho_{\text{eau}}$. La densité de l'eau de mer varie un peu suivant les lieux et la profondeur ; elle est comprise entre 1,02 et 1,05 gr/cm³. La densité des grains minéraux composant les sédiments (quartz et feldspaths) est voisine de 2,66 ± 0,1 gr/cm³. Les plus lourds sont souvent les sables fins ($\rho_{\text{séd.}} = 2,70$ à 2,75) et, lorsque leur densité tombe en-dessous de 2,6 gr/cm³, cela signifie que ces sédiments contiennent une certaine quantité de matières organiques [4].



ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES.

Cette dépendance linéaire a été bien vérifiée expérimentalement et les formules trouvées par différents auteurs sont très voisines [3, 4, 5, 6, 7, 8].

La formule que nous avons retenue, a été calculée par régression linéaire à partir des valeurs fournies par la référence [3]. L'écart quadratique moyen entre droite et valeurs réelles est égal à 0,03 et l'équation retenue est la suivante :

$$\rho = 2,66 (1-p) + 1,01 p \pm 0,03.$$

2.2. Vitesse des ondes longitudinales.

Une relation entre la célérité du son dans les sédiments et la porosité peut être aussi établie, mais d'une façon moins directe et moins rigoureuse. Cette vitesse est aussi influencée par la rigidité des sédiments, probablement liée à la quantité de grains de gros diamètre, par la compressibilité des grains minéraux [3].

De nombreux auteurs ont mesuré la vitesse des ondes de compression dans les sédiments, soit "in-situ" [9, 10, 11], soit sur des échantillons [4, 5, 6], soit sur des suspensions constituées en laboratoire [12, 13, 14]. La relation entre cette vitesse et la porosité des sédiments est étudiée dans tous ces articles et interprétée grâce à des formules valables soit pour des suspensions de particules dans un liquide [14, 15], soit pour des sédiments composés de grains en contact les uns avec les autres et présentant donc une certaine rigidité [3, 12].

Nous avons choisi une formule semi-empirique, inspirée de la référence [3], qui permet de calculer une



ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES.

valeur moyenne du rapport des célérités α/α_0 dans les sédiments et dans l'eau, en fonction de la porosité p des sédiments :

$$p < 0,53 \quad \alpha/\alpha_0 = 3,313 - 11,644 p + 21,885 p^2 - 18,375 p^3 + 5,818 p^4$$

$$p \geq 0,53 \quad \alpha/\alpha_0 = 1,1908 - 0,1768 p - 0,7624 p^2 + 1,034 p^3 - 0,2856 p^4$$

Ecart quadratique moyen des mesures/courbes $\pm 0,03$.

La dispersion des résultats autour de la courbe proposée est assez importante, en particulier pour les faibles porosités ainsi que le notent les références [5 et 6]. Toutes les mesures faites confirment l'allure générale de cette courbe, où la vitesse du son dans les sables, de porosité inférieure à 50 %, est supérieure à celle de l'eau, et où les sédiments de porosité élevée ont au contraire une vitesse légèrement inférieure. Ce sera souvent la caractéristique de l'interface eau-sédiments en eaux profondes ou près des côtes, car ce type de sédiments prédomine à la surface des fonds.

La référence [17] donne une étude statistique des propriétés des sédiments saturés d'eau douce, avec notamment une relation polynomiale entre la vitesse des ondes de compression et la porosité, qui diffère un peu de la courbe calculée pour les porosités comprises entre 50 et 70 %. Ce résultat, ainsi que ceux d'autres références [7, 18, 19, 20], confirment tout l'intérêt des mesures directes de la vitesse des ondes de compression dans les sédiments.



ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE
FONDS MARINS STRATIFIES.

Selon les références [3, 10 et 21], l'influence de la température et de la pression sur la vitesse des ondes de compression semble bien suivre la même loi que celle qui régit les variations de la vitesse dans l'eau de mer intersticielle (formules de Wilson par exemple). Les mesures faites "in-situ" par des plongeurs ou avec un bathyscaphe, correspondent assez bien aux résultats obtenus sur des échantillons ; il en va de même pour ceux qui sont obtenus sur des sédiments composés en laboratoire. Le milieu sédimentaire est un peu dispersif et la vitesse du son croît légèrement avec la fréquence dans les vases et les argiles (5 à 6‰ de 3 à 200 kHz, réf. [14]). Le phénomène n'a pu être mis en évidence dans les sables.

2.3. Absorption des ondes longitudinales.

L'absorption des ondes longitudinales a été mesurée par divers auteurs dans des conditions assez différentes :

- sur des échantillons entre 20 et 37 kHz pour différents types de sédiments par Hamilton [4] et par Shumway [3];
- sur des sédiments artificiels en laboratoire par Hampton [14] entre 4 et 600 kHz pour des suspensions de porosité 65 à 75 % et pour des sables de porosité non indiquée (probablement voisine de 40 %), et par Nolle et al [13] entre 0,2 et 1 MHz pour des sables de porosité 0,36 ;
- "in-situ" par Wood et Weston entre 4 et 50 kHz pour une boue de porosité 0,75 [11], et par Hamilton entre 3,5 et 100 kHz pour des porosités allant de 36 à 87 % [22].
- indirectement par Cole pour un fond à trois couches entre 0,1 et 1 kHz [23].

ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES.

Ces différents résultats expérimentaux demandent à être liés entre eux par des lois suffisamment précises pour pouvoir prédire la valeur de l'absorption dans des conditions données. La théorie complète de la propagation en milieu sédimentaire marin n'est pas encore établie, mais deux idées directrices semblent conduire à des résultats intéressants. Urik et Ament [16] ont proposé une théorie valable pour les suspensions ; l'absorption y est due à deux effets additifs, la diffusion par les particules solides et les forces de friction exercées sur les particules en mouvement des particules dues à la viscosité du fluide. Ce dernier effet est prépondérant. La théorie proposée par Biot dans une série d'article [24] s'applique aux solides poreux remplis d'un liquide où, aux basses fréquences, les absorptions des ondes longitudinales et transversales sont proportionnelles au carré de la fréquence, et, aux hautes fréquences, à sa racine carrée.

Les interprétations fondées sur la première théorie sont assez intéressantes. Celle donnée par Shumway est une explication des résultats obtenus et ne donne pas de résultats vérifiés dans une large gamme de fréquences. Duykers [25] obtient des courbes théoriques correspondant bien aux résultats de Shumway [3], mais son interprétation est critiquable [26].

Les formules dérivées de la seconde théorie par Stoll et Bryan [27] sont peut-être plus générales et les courbes théoriques proposées (Figure 1) rendent assez bien compte des différentes mesures mentionnées. Les résultats de la référence [3] pour les porosités élevées et ceux des références [15, 22, 28, 29, 30] ont été indiqués par les auteurs, car ils n'étaient pas



ETUDE THÉORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES.

mentionnés dans la référence [27]. Il est cependant évident que ces courbes demanderaient de nombreuses mesures pour être confirmées ; en particulier les échelles utilisées ne facilitent pas des comparaisons précises entre expérience et théorie.

Les valeurs de l'absorption utilisées dans cette étude ont été déduites des lois de régression, établies en fonction de la porosité par la référence [22]. Elles sont assez comparables à celles que nous avons pu établir à partir des mesures de la référence [3] mais avec un maximum d'absorption plus marqué aux porosités voisines de 50%.

La loi à utiliser en fonction de la fréquence a été déterminée à partir des mesures et des courbes indiquées sur la figure 1. Pour les vases, l'absorption est directement proportionnelle à la fréquence, et pour les sables les courbes indiquent une zone de transition, de pente 1, entre environ 100 Hz et 25 kHz. Nous avons donc choisi une loi linéaire pour déduire l'absorption à une fréquence comprise entre 100 Hz et 10 kHz, comme le confirme la référence [22] entre autres.

2.4. Vitesse et absorption des ondes transversales.

Ces quantités n'ont été l'objet pour l'instant que d'un très petit nombre de mesures. En effet, pour être à même de les mesurer, il faut atteindre la rigidité des sédiments, donc disposer d'échantillons non perturbés mécaniquement, n'ayant pas subi de variations de pression ou de température, ni de migration d'eau d'un point à un autre du sédiment. Ce qui exclut le carottage classique et nécessite des mesures "in-situ" délicates.

On peut citer cependant la méthode indirecte proposée par Bucker et al [31]. Il est difficile de créer des ondes transversales prépondérantes dans des sédiments, à cause de leur faible rigidité. Bucker a donc utilisé les ondes de Stoneley, qui se propagent le long de l'interface eau-sédiment et qui sont mesurables. Il en a

ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES.

déduit la vitesse des ondes de cisaillement de 197 m/s et une absorption de $0,2 \pm 0,13$ dB/m à 25 Hz pour du sable en eaux peu profondes ; ceci correspond à un rapport entre vitesses des ondes transversales et longitudinales d'environ 0,11 à 0,12.

Nafe et Drake [5] déduisent une valeur générale de ce rapport égale à 0,35 par calcul théorique en fonction d'une porosité et d'un coefficient de compressibilité estimés.

Hastrup [32] utilise des valeurs comprises entre 0,05 (vases) et 0,2 (sables) pour la comparaison favorable d'un modèle théorique stratifié et des résultats d'expériences.

Ce rapport de vitesses est lié au coefficient de Poisson par la formule $\beta/\alpha = \sqrt{(1-2\sigma)/2(1-\sigma)}$. Or, on sait que $\sigma = 0,5$ pour les liquides et que $\sigma \approx 0,25$ pour les solides ; ce rapport varie donc théoriquement entre 0 et 0,577, ce qui correspond bien aux chiffres mentionnés précédemment.

Les références [22] et [33] proposent une méthode du calcul de la vitesse des ondes de cisaillement à partir des valeurs mesurées de la porosité et de la vitesse des ondes de compression, ainsi qu'une valeur calculée du module de compressibilité $1/k$ du sédiment. Le module k est calculé à partir des modules de compressibilité $1/k_w$ de l'eau, $1/k_s$ de l'agrégat constituant les grains solides, et A/k_f de la matrice des grains.

Le module k_w est calculé grâce à la formule :
 $k_w = \rho_w C_w^2$; ρ_w : densité de l'eau "in-situ", C_w : vitesse du son dans l'eau "in-situ".

Le module k_s a été déterminé par différents auteurs et est de l'ordre de $(52 \pm 2) \cdot 10^{10}$ dynes/cm².



ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES.

Le module k_f est donné en fonction de la porosité par la formule : $k_f = 10^{(1,7358 - 4,25075 p)}$, p étant la porosité, qui rend bien compte des différentes lois de régression données par la référence [3].

La quantité k est alors égale à :

$$k = k_s (k_f + q) / (k_s + q)$$

avec :

$$q = k_w (k_s - k_f) / [p(k_s - k_w)].$$

Il est alors possible de calculer les différentes constantes élastiques du sédiment : le rapport de Poisson, le module de rigidité μ et la vitesse des ondes de cisaillement β . Soit :

$$\beta = (\mu/\rho)^{1/2} = [3/4 (\alpha^2 - k/\rho)]^{1/2}$$

α étant la vitesse des ondes longitudinales.

Les valeurs obtenues sont comparables aux valeurs mesurées pour des sédiments ayant des porosités comprises entre 35 et 80 % environ qui sont rassemblées dans la référence [10].

L'absorption des ondes de cisaillement, dans l'état actuel des recherches, ne peut être qu'estimée par des calculs théoriques. Ses valeurs sont voisines de celles de l'absorption des ondes longitudinales ou supérieures (rapport de 2 à 10 dans les sables cités par la référence [34]).



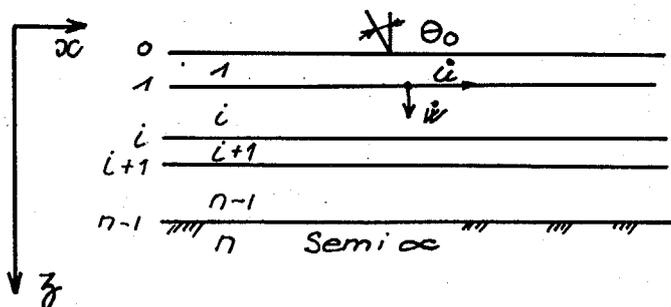
ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES.

3. - MODELE THEORIQUE DE LA REFLEXION SUR UN FOND STRATIFIE.

La présence fréquente de dépôts sédimentaires assez réguliers, surtout par grands fonds, a conduit au développement de modèles où les couches du fond sont homogènes et parallèles ; ces modèles donnent de bons résultats [32, 36] et peuvent être compliqués par l'introduction de couches inclinées ou de gradients de vitesse ou de densité dans les couches [37 par exemple].

3.1. Modèle théorique.

Le modèle choisi ici est donné par la référence [38] où un fond solide stratifié sera représenté en axes x, z de la façon suivante :



L'interface eau première couche est noté 0. La couche n° i recouvre l'interface numéro i . L'établissement du modèle mathématique est basé sur l'écriture des conditions de continuité aux interfaces :

- . de la vitesse u horizontale des particules
- . de la vitesse w verticale des particules
- . de la contrainte σ selon z (normale)
- . de la contrainte τ selon x (tangentielle).

u et w sont normalisés dans le calcul par la valeur de la vitesse de phase horizontale des ondes,



ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES.

soit $C = \alpha_0 / \sin \theta_0$, α_0 étant la célérité des ondes P dans l'eau et θ_0 l'angle d'incidence des rayons acoustiques frappant le fond.

Les paramètres descriptifs des différentes couches, ainsi que des ondes qui s'y propagent, sont les suivants :

eau : α_0 célérité du son
 ρ_0 masse volumique
 θ_0 angle d'incidence sur le fond

couche i : α_i célérité des ondes P
 θ_i direction de propagation des ondes P
 β_i célérité des ondes S
 η_i direction de propagation des ondes S
 ρ_i masse volumique du sédiment
 d_i épaisseur de la couche
 $\delta_{pi} \delta_{si}$ absorption en dB/ λ des ondes P et S.

Les conditions de propagation des ondes P et S sont données par les relations générales :

$$\frac{\alpha_0}{\sin \theta_0} = \frac{\alpha_i}{\sin \theta_i} = \frac{\beta_i}{\sin \eta_i} = C \quad \text{Loi de Descartes}$$

i = indice de couche

$$\omega = 2\pi f = k_0 \alpha_0 = k_i \alpha_i = \chi_i \beta_i$$

ω = pulsation

f = fréquence

k_i = nombre d'onde des ondes P

χ_i = nombre d'onde des ondes S

on en tire :

$$k_0 \sin \theta_0 = k_i \sin \theta_i = \chi_i \sin \eta_i = h = \omega / C$$

ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES.

nombre d'onde "horizontal" ne dépendant que de f , θ_0 , α_0 .

On évalue alors les quantités classiques en résistance des matériaux Δ_i et Θ_i définies ci-dessous :

$$\Delta_i = \frac{\partial u_i}{\partial x} + \frac{\partial w_i}{\partial z} \quad (\text{ondes P}) ; \quad \Theta_i = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial z} - \frac{\partial w_i}{\partial x} \right) \quad (\text{ondes S})$$

et indépendantes de y ; le milieu étant considéré comme isotrope dans les dimensions \vec{x} , \vec{y} , \vec{z} étant perpendiculaire au plan de propagation des rayons acoustiques.

u = déplacement mécanique des particules en x

w = déplacement mécanique des particules en z

u et v dérivant des potentiels φ_i et ψ_i [39]

$$u_i = \frac{\partial \varphi_i}{\partial x} + \frac{\partial \psi_i}{\partial z} ; \quad v_i = \frac{\partial \varphi_i}{\partial z} - \frac{\partial \psi_i}{\partial x}$$

Ces potentiels sont liés à Δ et Θ par les relations :

$$\Delta_i = \frac{\partial u_i}{\partial x} + \frac{\partial w_i}{\partial z} = \nabla^2 \varphi_i = \frac{1}{\alpha_i^2} \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial t^2}$$

équation d'onde

$$\Theta_i = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial z} - \frac{\partial w_i}{\partial x} \right) = \frac{1}{2} \nabla^2 \psi_i = \frac{1}{2\beta_i^2} \frac{\partial^2 \psi_i}{\partial t^2}$$

pour chaque couche on pose a priori, sous forme harmonique :

$$\Delta_i = \left[A_i \exp(-iK_i \cos \theta_i) z + B_i \exp(iK_i \cos \theta_i) z \right] e^{i(\omega t - hx)}$$

$$\Theta_i = \left[C_i \exp(-i\chi_i \cos \eta_i) z + D_i \exp(i\chi_i \cos \eta_i) z \right] e^{i(\omega t - hx)}$$

A_i , B_i , C_i , D_i étant des constantes,

A_i , B_i caractérisant une propagation suivant \vec{z}^+ ,

C_i , D_i caractérisant une propagation suivant \vec{z}^- ;



ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES.

l'exponentielle $e^{i(\omega t - hx)}$ caractérisant la propagation horizontale et l'excitation harmonique.

Les ondes se propageant suivant \vec{z}^+ doivent être d'amplitude finie pour $z \rightarrow \infty$ ce qui implique que la partie imaginaire de $\cos \theta_i = \pm \sqrt{1 - \sin^2 \theta_i}$ doit être négative, en effet l'introduction de l'absorption dans les couches de sédiments entraîne que les nombres d'ondes sont à valeurs complexes.

Les quatre quantités mentionnées initialement \dot{u}_i/C , \dot{w}_i/C , τ_i et σ_i peuvent, par le biais des relations classiques et relativement simples de la résistance des matériaux, être reliées matriciellement aux quantités A_i+B_i , A_i-B_i , C_i-D_i , C_i+D_i , [38], puisque $\psi = -\frac{\alpha^2}{\omega^2} \Delta_i$, $\Psi = -2 \frac{\alpha^2}{\omega^2} \Theta_i$ (intégration deux fois sous hypothèse d'excitation harmonique $e^{i\omega t}$), sous la forme :

$$\begin{bmatrix} \dot{u}_i/C \\ \dot{w}_i/C \\ \sigma \\ \tau \end{bmatrix}_i = [T_{e.k}] \begin{bmatrix} A_i+B_i \\ A_i-B_i \\ C_i-D_i \\ C_i+D_i \end{bmatrix}$$

ou encore : $S_i = T_i(z) \cdot P_i$ en plaçant l'origine des axes au m-ième interface

$$z = 0 \quad S_{i-1} = T_i(0) \cdot P_i$$

$$z = d_i \quad S_i = T_i(d_i) \cdot P_i \quad d_i = \text{épaisseur de couche}$$

en éliminant P_i , il vient :

$$S_i = T_i(d_i) \cdot T_i^{-1}(0) \cdot S_{i-1}$$

Si l'on définit la matrice $\mathcal{A}_i = T_i(d_i) T_i^{-1}(0)$, on obtient :

ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES.

$$S_i = A_i \cdot A_{i-1} \cdot A_{i-2} \dots A_1 \cdot S_0$$

$$P_i = T_i^{-1}(0) \cdot A_{i-1} \cdot A_{i-2} \dots A_1 \cdot S_0$$

dans les deux 1/2 espaces 0 et n, les conditions à satisfaire sont les suivantes :

- dans le fluide, $\tau = C_0 = D_0 = 0$
- dans la dernière couche ; potentiel nul à l'infini
soit :

$$B_n = D_n = 0$$

en définissant la matrice $H = T_n^{-1}(0) \cdot A_{n-1} \cdot A_{n-2} \dots A_2 \cdot A_1$
on a la relation suivante entre le vecteur P_n et le vecteur S_0 :

$$\begin{pmatrix} A_n \\ A_n \\ C_n \\ C_n \end{pmatrix} = [H_{KL}] \cdot \begin{pmatrix} \dot{u}/C \\ \dot{w}/C \\ \sigma \\ 0 \end{pmatrix}$$

On développe les relations équivalentes, on élimine A_n et C_n puis u/C , et l'on obtient :

$$\dot{w}/C = - \frac{M}{N} \sigma \quad (\alpha)$$

M et N étant des expressions en h_{KL} éléments de la matrice $[H]$.

Le coefficient de réflexion V est défini comme étant :

$$V = \frac{\varphi_{ref}}{\varphi_{in}}$$

rapport des potentiels réfléchi et incident (seul le potentiel de pression est transmis dans l'eau).



ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES.

A_i représente alors φ incident (z^+), B_i représente φ réfléchi (z^-), pour $z = 0$ en tenant compte des valeurs des éléments de la matrice T, on obtient :

$$w/c = - \left(\frac{\alpha_o}{C} \right)^2 \cotg \theta_o [\varphi_{in} - \varphi_{ref}]$$

$$\sigma = \rho_o \alpha_o [\varphi_{in} + \varphi_{ref}] \quad (\beta)$$

en éliminant w/c et σ entre les équations α et β , on

$$V = \frac{N/MC - \rho_o \alpha_o / \cos \theta_o}{N/MC + \rho_o \alpha_o / \cos \theta_o} .$$

3.2. Calculs sur ordinateur.

La forme matricielle de l'ensemble des équations constituant le modèle mathématique est particulièrement commode pour une exploitation sur ordinateur.

Les paramètres d'entrée sont "hybrides", c'est-à-dire que le système d'unités choisi pour chaque grandeur tend à ramener celle-ci au voisinage de l'unité de la mesure du possible. Ceci permet d'obtenir des matrices A_i à coefficients dont les ordres de grandeur sont "raisonnables" et évitent, par produit itéré, la mise en jeu de valeurs altérant ensuite la précision du calcul.

Le coefficient de réflexion obtenu résulte de l'effet d'un rapport d'expression homogène (il est sans dimension), ce fait autorise donc des normalisations a priori dans le calcul.

Le programme mis au point fournit donc pour une série de fréquences déterminées, et une série d'angles d'incidence fixés, la valeur complexe du coefficient de réflexion, ou la valeur de son module en dB,

ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES.

Une transformée de Fourier inverse, effectuée sur une telle série de coefficients complexes, permet d'obtenir la réponse impulsionnelle d'un fond stratifié pour une incidence donnée, dans une bande passante fixée.

4. - EXPERIMENTATIONS.

Une série d'essais en mer a été effectuée pour recueillir les paramètres géologiques utiles dans la zone étudiée, et de mesurer la réponse impulsionnelle du fond sous différentes incidences et en plusieurs points de la zone.

Afin de connaître la pénétration et la résolution nécessaires pour l'utilisation du modèle théorique aux différentes fréquences, différents calculs comparatifs de coefficients de réflexion ont été effectués pour déterminer à partir de quand une couche sédimentaire peut être considérée comme semi-infinie ou au contraire comme négligeable. On a choisi pour ce faire une couche d'épaisseur variable située soit au milieu, soit au-dessus d'une couche semi-infinie d'un autre sédiment.

Des fonds du premier type : vase - sable fin - vase, vase - sable grossier - vase, sable fin - sable grossier - sable fin, sable grossier - roches - sable grossier, et du second type : vase - sable fin, vase - sable grossier, sable fin - sable grossier, sable grossier - roches, ont été étudiés.

On peut en conclure qu'une couche doit avoir une épaisseur de 5 à 10 longueurs d'onde λ pour être considérée comme semi-infinie, et de $\lambda/10$ à $\lambda/20$ pour avoir une influence vraiment négligeable. Il est évident



ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES.

que ce n'est qu'un ordre de grandeur et que l'épaisseur minimum ou maximum dépendra essentiellement du fond, de l'absorption dans ses couches et du pouvoir réflecteur des interfaces.

De plus, pour les études de propagation par petits fonds, ce sont surtout les incidences rasantes qui sont importantes et ces ordres de grandeur peuvent être ramenés à 2 ou 4λ et $\lambda/4$ ou $\lambda/8$ respectivement.

4.1. Mesure des caractéristiques géologiques.

Ces considérations ont donc guidé le choix des moyens d'investigation géologique : carottages et sondeur à haute résolution pour la gamme de fréquences 0,5 à 5 kHz étudiée ici, sparker de faible puissance pour les basses fréquences (50-500 Hz).

Une campagne de sondage effectuée par la M.O.M (Service Hydrographique de la Marine Nationale) a permis d'établir un relevé détaillé de la topographie de la région concernée par cette étude. Le fond y est très régulier, voisin de 95 mètres d'immersion, mais le relevé détaillé des dix premiers mètres du tréfond n'a pu être effectué.

Des relevés de sismique-réflexion avec un sparker SIG de faible puissance et des carottages ont complété l'étude géologique de la zone. Les relevés de sismique-réflexion concernent les couches plus profondes du fond -10 à 100 m sous l'interface eau-fond et les carottes prises ont été analysées par SCOP Océanographie afin de connaître les caractéristiques des sédiments dans les dix premiers mètres. La région comportant

ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES.

des couches de sables coquilliers assez grossières n'a permis d'obtenir des carottes de grande longueur, 4 mètres au maximum.

Les mesures effectuées ont permis de connaître la teneur en eau, les densités sèche et humide et la célérité des ondes de compression le long des carottes recueillies [35]. La porosité vraie des sédiments et leur vitesse du son "in-situ" ont été obtenues en appliquant les corrections préconisées par la référence [8]. Les figures 2 et 3 permettent de comparer tous les résultats obtenus avec les courbes de régression choisies au chapitre 2 pour la densité et le rapport des célérités sédiment/eau en fonction de la porosité des sédiments. Les densités obtenues sont un peu faibles, ce qui est peut-être dû à la présence de carbonates et de nombreuses coquilles dans le fond. Les valeurs du rapport de célérité obtenus sont particulièrement bonnes.

Les valeurs de l'absorption des ondes de compression et la vitesse des ondes de cisaillement en ont été déduites par les méthodes proposées au chapitre 2 précédent. L'absorption des ondes de cisaillement a été choisie égale à celle des ondes de compression.

4.2. Mesures acoustiques.

Le meilleur moyen d'obtenir "in situ" des réponses impulsionnelles d'un fond donné, est de l'exciter sous diverses incidences par une source monopulse brève. Il faut par une disposition géométrique judicieuse de la source et du récepteur, bien séparer les rayons direct et réfléchi sur le fond, nécessaires aux mesures et s'affranchir des arrivées sonores parasites, à savoir :



ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES.

- le rayon réfléchi sur la surface - qui peut avec certaines précautions être compris dans l'excitation,
- les rayons réfléchis plusieurs fois sur la surface et le fond,
- éventuellement, les impulsions dues aux pulsations de la bulle de gaz engendrée par une explosion.

Seules des charges explosives à mise à feu hydrostatique (ou éventuellement électrique) conviennent pour cette application : elles ont une très large bande, donc une bonne résolution, et elles permettent d'obtenir, par petits fonds de 100 mètres, des pénétrations de l'ordre d'une dizaine de mètres aux faibles incidences sans qu'une autre arrivée sonore vienne perturber les mesures. En utilisant des charges près de la surface, l'ensemble rayons direct et réfléchi sur la surface peut alors servir de source sonore et assurer des pénétrations de près d'une centaine de mètres.

Le récepteur, situé près du fond, reçoit donc les deux arrivées sonores utiles et permet de les enregistrer dans des conditions identiques de gain et de bruit de la chaîne électronique [Cf. figure 4]. Une méthode de déconvolution peut alors être appliquée pour traiter ces signaux et en extraire une réponse impulsionnelle dans la bande des fréquences enregistrées.

Au vu des courtes distances séparant source, récepteur et fond, il est utile de vérifier si l'on mesure toujours un coefficient de réflexion en ondes planes ou s'il faut le définir pour des ondes sphériques. En effet, le modèle proposé calcule un coefficient de réflexion en ondes planes, qu'il faut donc vérifier dans les mêmes conditions. Il sera alors ensuite possible

ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITÉ DE
FONDS MARINS STRATIFIES.

d'utiliser ce modèle du fond pour n'importe quel type de propagation guidée, étant entendu que l'on a vérifié l'exactitude des hypothèses faites et des paramètres physiques du fond,

La référence [39] examine le cas d'une source située au-dessus d'un fond fluide homogène. On déduit que les ondes réfléchies correspondent bien à un coefficient de réflexion en ondes planes, si ce fond a une vitesse du son α inférieure à celle de l'eau α_0 , ou si l'on est avant l'angle critique dans le cas où $\alpha_1 > \alpha_0$ et à condition que :

$$\frac{\alpha_0}{\omega D ((\alpha_0^2/\alpha^2) - \sin^2 \theta_1)^{\frac{3}{2}}} \ll 1$$

avec D longueur du trajet réfléchi. Ceci est vrai pour ces essais, car le produit ωD est suffisamment grand (on a au minimum $D = 2 \times 500 \text{ Hz} \times 20 \text{ mètres} = 60000$), si l'on n'est pas trop près de l'angle critique θ_c (cas $\alpha > \alpha_0$).

Au-delà de cet angle, il y a, en plus des rayons direct et réfléchi normaux, apparition d'une onde de réfraction (onde de surface) qui transmet une certaine énergie à l'eau. Son trajet a un parcours de durée minimum et son temps d'arrivée est toujours inférieur à celui du réfléchi sur le fond (de quelque nsec, à plusieurs dizaines de millisecondes).

On voit donc que l'on est assuré de toujours mesurer le coefficient de réflexion en ondes planes et qu'une éventuelle onde réfractée ne risque d'être gênante que très près de l'angle critique, où elle est confondue avec l'onde réfléchie.



ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES.

4.3. Traitement des signaux.

Les enregistrements réalisés à la mer sont dépouillés comme suit :

- numérisation à cadence convenable des "événements acoustiques"
- détermination des portions utiles du signal, à savoir excitation ou arrivée directe réponse ou arrivée réfléchi sur le fond
- cadrages de ces deux signaux au format de N échantillons, N étant une puissance de 2 (512 ou 1024 en général) pour permettre l'emploi d'un algorithme de transformée de Fourier Rapide.

Du fait du résultat cyclique que fournit cet algorithme, on choisit toujours N de manière à ce que le signal utile présente une étendue faible devant le format, pour approcher du cas idéal de l'impulsion isolée.

On applique au signal direct et au signal réfléchi l'algorithme de transformée de Fourier rapide et l'on divise terme à terme les spectres obtenus, ce qui représente bien une déconvolution dans le temps. On obtient directement les valeurs du coefficient de réflexion valables dans un domaine de fréquence que l'on est obligé de restreindre par suite de l'existence du bruit.

En effet, le spectre du signal direct chute dans le bruit à partir d'une certaine fréquence, au-delà de laquelle, physiquement, il n'est pas concevable d'observer un spectre significatif pour le signal réfléchi, bruité lui aussi dans les mêmes conditions.



ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES.

Il devient donc inutile de diviser terme à terme les spectres au-delà de cette fréquence limite, puisque l'on n'opèrerait que sur des erreurs, et que l'on obtiendrait des valeurs erronées du coefficient de réflexion pouvant même dépasser l'unité en module.

Les sources explosives utilisées permettent d'atteindre 5 à 7 kHz de bande, du fait que le spectre présente peu d'énergie au-delà de ces valeurs.

L'obtention de la réponse impulsionnelle du fond se fait au moyen d'une pondération gaussienne, réduisant de façon régulière les extrémités du spectre représentatif du coefficient de réflexion, et dont les valeurs marginales sont fausses. On ajuste expérimentalement le gabarit de pondération pour atténuer dans des proportions correctes les bandes supérieures du spectre dès qu'elle présentent des valeurs manifestement douteuses.

La réponse impulsionnelle ainsi calculée n'est donc plus la réponse à un Dirac, mais à une impulsion gaussienne, de finesse cependant suffisante pour conserver une bonne définition (de l'ordre de la dizaine de cm pour une bande de fréquence globale de 0 à 8 kHz).

Par ailleurs, on reconstitue au moyen des temps d'occurrence des diverses impulsions, la géométrie de l'évènement considéré et l'on obtient donc la valeur de l'angle d'incidence aussi que les corrections de pertes par divergence à introduire pour éliminer l'effet des différences de parcours entre les rayons direct et réfléchi sur le fond. Ces calculs sont faits en tenant compte des relevés bathythermiques effectués au cours des essais en mer.



ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES.

4.4. Présentation des résultats.

Pour une même série de mesures on présente en superposition soit les coefficients de réflexion en décibels, soit les réponses impulsionnelles, ce qui permet d'apprécier l'homogénéité des résultats, puisque le rangement se fait par valeurs croissantes de l'incidence.

On observe ainsi la déformation progressive des réponses impulsionnelles (Cf. figure 5) ou des séries du coefficient de réflexion, dont les creux d'absorption doivent en gros suivre la loi :

$$f_0 \cos \theta = \text{constante},$$

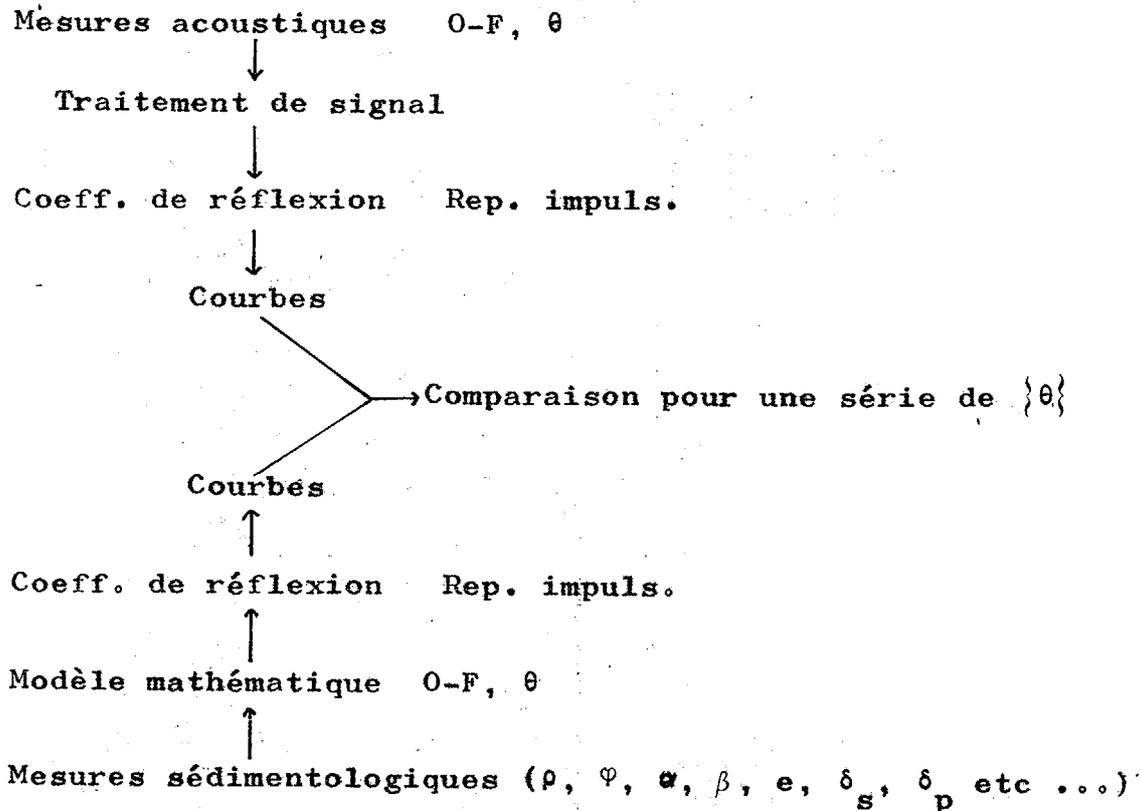
La réponse impulsionnelle permet d'apprécier la structure géométrique des premières couches du fond, chaque extremum de cette fonction étant en principe caractéristique d'un changement de la nature physique des sédiments qui composent le fond.

On peut aussi présenter pour chaque événement le coefficient de réflexion et la réponse impulsionnelle associée, correspondant à une valeur de l'angle d'incidence, permettant d'interpréter le spectre du coefficient de réflexion à partir des données géométriques restituées par la réponse impulsionnelle (Cf. figure 6).

5. - COMPARAISON DU MODELE ET DES RESULTATS EXPERIMENTAUX.

On peut donner un synoptique permettant de saisir la méthode de comparaison entre modèle et expérimentation.

ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE FONDS MARINS STRATIFIES.



La comparaison effectuée est d'autant plus probante, si elle est réussie, qu'elle doit être satisfaisante non pas pour une seule valeur de θ , mais pour un ensemble de telles valeurs.

Le même programme traite les coefficients de réflexion fournis par le modèle, et fournit sous la même présentation que les résultats de mesures acoustiques, la réponse impulsionnelle du fond calculée. Il s'agit ici d'un calcul portant sur les premières couches du fond, tandis que les réponses expérimentales intéressent une profondeur de pénétration de l'ordre de 7 ou 8 mètres à faible incidence. En effet, les carottages n'ont pas fournis de données au-delà des deux ou trois premiers mètres du tréfond (Cf. chapitre 4.1.).



ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES.

La série des figures 8 à 14 représente une comparaison des réponses mesurées et calculées pour deux stations de mesure différentes, et par valeurs croissantes de l'angle d'incidence.

Les carottes obtenues à ces stations ont des longueurs de 120 et 105 cm ; la première est essentiellement sablonneuse, la seconde comporte une couche de vase à célérité inférieure à celle de l'eau surplombant une couche de sables grossiers. Les mesures effectuées sur ces carottes dont ont été tirés les paramètres du modèle, sont représentées sur les figures 6 et 7.

On constate la bonne correspondance existant entre les résultats expérimentaux et théoriques ; néanmoins, les niveaux des réponses impulsionnelles calculées et mesurées diffèrent parfois de 1 à 2 dB. Par petits fonds, il est en effet difficile d'obtenir une très grande précision dans la géométrie des essais, cependant nécessaire pour appliquer des corrections de propagation entre direct et réfléchi ; de plus, la proximité des arrivées sonores aux fortes incidences rend leur séparation difficile, et on peut parfois se heurter à des phénomènes de focalisation dans le fond. La valeur absolue des réponses impulsionnelles, et des coefficients de réflexion est donc entachée d'une certaine erreur, environ 2 à 3 dB. Il n'en reste pas moins que les formes d'onde obtenues permettent encore une comparaison entre théorie et mesure, cette forme d'onde étant particulièrement sensible à la valeur de l'angle d'incidence (Cf. figures 11 et 12).



ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES.

6. - DEDUCTION D'UN MODELE THEORIQUE A PARTIR DES MESURES ACOUSTIQUES.

La figure 15 représente une simulation à partir de paramètres présumés d'un fond sur lequel on possède seulement des mesures acoustiques.

Il a été possible de construire les éléments d'un fond stratifié à 16 couches en se basant sur la configuration géométrique de la réponse impulsionnelle de la figure 5. On a tenu compte du fait que le module du coefficient de réflexion à incidence faible ne dépend pratiquement que de la densité des sédiments, et qu'à incidence élevée, après l'angle critique, le déphasage varie progressivement jusqu'à 180° ou change brusquement de 180° pour un angle d'incidence. Les déformations de la réponse impulsionnelle qu'apportent ces déphasages sont calculables et donc bien identifiables. Le programme de simulation a travaillé sur une structure en couches de sables et vases de différentes caractéristiques suivant les lois fixées au chapitre 2, dont les valeurs ont été affinées pour atteindre le mieux possible la similitude avec le résultat expérimental.

Comme précédemment, le résultat de la simulation est comparé au résultat expérimental, pour deux valeurs de l'angle d'incidence 35° et 62° . Les formes d'onde et niveaux obtenus montrent que le modèle théorique obtenu par approximations successives est en nette concordance avec l'expérience.

Il semble donc possible, à partir d'une mesure acoustique pour quelques valeurs d'incidence, de déduire un modèle théorique d'un fond stratifié donné



ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES.

et d'en déduire en retour le coefficient de réflexion à d'autres incidences (étude d'une portée par petit fond, où les incidences rasantes jouent un rôle important).

7. - COEFFICIENT DE CORRELATION ENTRE ARRIVEES DIRECTE
ET REFLECHIE SUR LE FOND.

Il est intéressant de mesurer la corrélation existant entre le rayon direct et le rayon réfléchi sur le fond, pour apprécier dans quelle mesure le signal est dégradé par une réflexion sur le fond dans ses caractéristiques globales. Il s'agit d'estimer indépendamment de l'atténuation, la perte d'information induite par une réflexion au moyen de la fonction de corrélation normalisée définie par :

$$F(\tau) = \frac{C_{D.R}(\tau)}{\sqrt{C_{DD}(0)} \cdot \sqrt{C_{RR}(0)}}$$

D désignant l'arrivée directe

R désignant l'arrivée réfléchie.

Les figures 16 et 17 montrent pour les mêmes stations que celles présentées au chapitre 4, la fonction de corrélation normalisée, obtenue par transformée de Fourier inverse du produit des spectres :

$$S_D(f) \times S_R^*(f)$$

et division par la quantité $\sqrt{C_{DD}(0)} \times \sqrt{C_{RR}(0)}$ calculée directement.

Les résultats conduisent aux conclusions suivantes : le déphasage introduit par une réflexion sur le fond modifie la forme de la fonction de corréla-



ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES.

tion. Les pics de corrélation obtenus présentent des valeurs absolues assez fortes et cela pour toutes les incidences, oscillant entre 0,6 et 0,8, ce qui montre que la perte d'information n'est pas trop importante. Le coefficient de réflexion, dans le cas des incidences rasantes, est proche de l'unité, l'influence du déphasage devient importante. Il faut remarquer que ces fonctions de corrélation sont estimées sur un signal à large bande on obtiendrait sans doute des valeurs plus fortes avec un signal à bande étroite, l'influence de la réflexion se manifestant alors de manière plus ponctuelle.

Une série de réflexions sur le fond (propagation par modes) entraîne donc une perte de cohérence du signal due surtout aux changements de la forme de la fonction de corrélation. Dans le cas d'une corrélation avec une copie de référence, on doit tenir compte de ce phénomène, qui devient prépondérant par rapport à l'atténuation produite par le fond aux faibles incidences.



- REFERENCES -

- [1] - B. LALLEMENT et C. LEROY,
Réflexion et diffusion des ondes acoustiques par le
fond de la mer.
Bulletin d'Acoustique Sous-Marine, vol. III n° 3, (1969)
DTCN Marine Nationale.

- [2] - H.W. MARSH, T.G. BELL and C.W. HORTON,
Reflection and Scattering of Sound by the Sea Bottom,
The 68th ASA Meeting Austin, Tex, (Oct. 1964).

- [3] - G. SHUMWAY,
Sound Speed and Absorption Studies of Marine Sediments
by a Resonance Method,
Geophysics XXV, 451, (1960).

- [4] - E.L. HAMILTON, G. SHUMWAY, H.W. MENARD and C.J. SHIPEK,
Acoustic and Other Physical Properties of Shallow-Water
Sediments off San Diego - JASA 28, 1, (1956).

- [5] - J.E. NAFE and C.L. DRAKE,
Variation with Depth in Shallow and Deep Water Marine
Sediments of Porosity, Density and the Velocities of
Compressional and Shear Waves -
Geophysics XXII, 523, (1957).

- [6] - A. KERMABON, GEHIN and P. BLAVIER,
The Relation Ship of Porosity with Density, Electrical
Resistivity and Sound Velocity of Some Unconsolidated
Deep Sea-Sediments from the Thyrrenian Sea, unpublished
Saclant Center Report, n° 114 , LA SPEZIA (Italy).

- [7] - E.L. HAMILTON,
Sound Velocity and Related Properties of Marine Sedi-
ments - North Pacific - Journal of Geophysical Research,
vol. 75, n° 23, p. 4423, (August 1970).

- [8] - E.L. HAMILTON,
Prediction of in-situ Acoustic and Elastic Properties
of Sediments-Geophysics, vol.36 n°2, p 266(April 1971)



ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE
DE FONDS MARINS STRATIFIES

- [9] - L.R. BRESLAU,
Classification of Sea-Floor Sediments,
Revue Pétrolière n° 1073 (Juin 1965 - Congrès "Le Pétrole et la Mer - Monaco).
- [10] - E.L. HAMILTON,
Sediment Sound Velocity Measurements made in-situ from Bathyscaph,
Journal of Geoph. Res. vol. 62,21, p. 5991 (1963).
- [11] - WOOD and WESTON,
The propagation of Sound in mud. Acoustica, 14, 156, (1964)
- [12] - H. BRANDT,
Factors Affecting Compressional Wave Velocity in Unconsolidated Marine Sand Sediments, JASA 32, p 171 (1960)
- [13] - A.W. NOLLE et al,
Acoustical Properties of Water-Filled Sands.
JASA 35, p. 1934 (1963).
- [14] - L.D. HAMPTON,
Acoustical Properties of Sediments,
JASA 42, p. 882 (1967).
- [15] - E.L. HAMILTON,
Low Sound Velocities in High Porosity Sediments,
JASA 28, p. 16, (1956).
- [16] - R.J. URICK,
The Absorption of Sound in suspension of irregular particles, JASA 20, p. 283, (1948).
- [17] - MORGAN,
Physical Properties of Marine Sediments as related to seismic Velocities -
Geophysics, vol.34, n°4, p.529, (August 1969).



-
- 18] - SUTTON et al,
Physical Analysis of Deep Sea Sediments,
Geophysics, vol.22, n°4, Oct. 1957, p. 779.
- 19] - FRY and RAITT,
Sound Velocities at the Surface of Deep Sea Sediments.
Journal of Geophysical Research, Vol. 66, n° 2,
Fev. 1961, p. 589.
- 20] - DAHLKE and SOUTHWORTH,
Portable Sound Velocimeter and its Application on Unopened Marine Sediments Cores, Liquids and Solids.
IEEE Trans. on Geoscience Electronics, Vol. GE-9, n° 1,
Jan. 1971, p. 74.
- 21] - E.L. HAMILTON,
Prediction of in-situ Acoustic and Elastic Properties of Marine Sediments,
Geophysics, Vol.36, n°2, April 1971, p. 266.
- 22] - E.L. HAMILTON,
Compresional wave attenuation in Marine sediments.
Geophysics, vol. 37, n°4, p. 620 (August 1972).
- 23] - B.F. COLE,
Marine Sediment Attenuation and Ocean-bottom-reflected Sound, - JASA 38, p. 291, (1965).
- 24] - M.A. BIOT,
Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid Saturated Porous Media, I - Low Frequency Range, II - Higher Frequency Range - JASA 28, p.168 and 179 (1956).
- M.A. BIOT,
Mechanics of Deformation and Acoustic Propagation in Porous Media,
J. Appl.Phys. vol. 33, p. 1482 (1962).
- M.A. BIOT,
Generalized Theory of Acoustic Propagation in Porous Media - JASA 34, p. 1254 (1962).



ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE
DE FONDS MARINS STRATIFIES

-
- 25] - L.R.B. DUYKERS,
Sound Attenuation in liquid. Solid Mixtures.
JASA 41, p. 1330 (1967).
- 26] - C. Mc CANN, D.M. Mc CANN and L.R.B. DUYKERS,
Comments on "Sound Attenuation in Liquid-Solid Mixtures"
JASA 41, p. 1330 (1967), JASA 43, 2, p. 381(L) (Fev. 1968).
- 27] - R.D. STOLL and G.M. BUYAN,
Wave Attenuation in Saturated Sediments,
JASA 47, p. 1440 (1970).
- 28] - BENNETT,
In Situ Measurements of Acoustic Absorption in unconsolidated Sediments PhD Thesis, Bryn Mawr College, Pa. 1966.
- 29] - TULLOS and REID,
Seismic Attenuation of Gulf Coast Sediments,
Geophysics, vol. 34, n° 4, Aug. 1969, p. 516.
- 30] - ANDERSON and BLACKMAN,
Attenuation of Low-Frequency Sound Waves in Sediments,
JASA vol. 49, n° 3, p. 786, March 1971.
- 31] - H.P. BUCKER, J.A. WHITNEY, and D.L. KEIR,
Use of Stoneley Waves to Determine the Shear Velocity in Ocean Sediments.
JASA 36, 8, p. 1595 (L), Aug. 1964.
- 32] - O.F. HASTRUP,
Digital Analysis of Acoustic Reflectivity in the
Thyrranian Abyssal Plain, JASA 47, p. 181 (1970).
- 33] - E.L. HAMILTON,
Prediction of in-situ Acoustic and Elastic Properties of Marine Sediments,
Geophysics, vol. 36, n° 2, April 1971, p. 266.



ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE
DE FONDS MARINS STRATIFIES

-
- [34] - MIZIKOS,
Propriétés mécaniques et acoustiques des sédiments
marins meubles non argileux. Cahiers océanographiques.
- [35] - Rapports de SCOP Océanographie - Septembre 1972 -
Février 1973.
- [36] - P. STANGERUP,
A detailed Study of Sound Reflections from a layered
Ocean bottom,
Saclant Center Report n° 42 (1965).
- [37] - H.E. MORRIS,
Bottom reflection-loss model with a velocity gradient
JASA 48, 5, p. 1198 (1970).
- [38] - N.A. HASKELL,
The Dispersion of surface Waves on Multi-layered Media
Bulletin of the Seismologic Society of America,
Vol. 43, 1, p. 17 (1953).
- [39] - C.B. OFFICER,
Introduction to the Theory of Sound Transmission,
Mc Graw-Hill Book Co New-York, (1958).

ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES

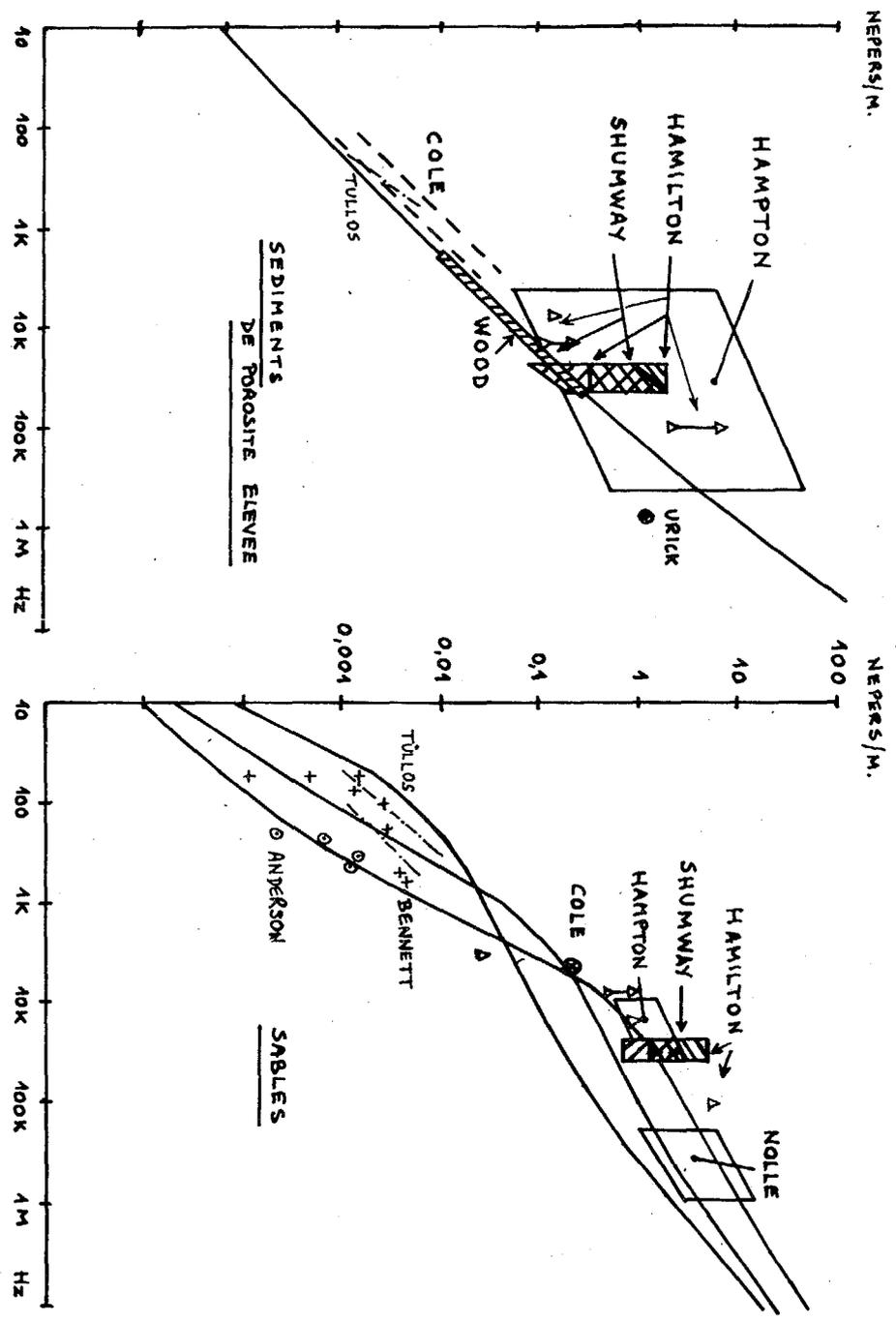


FIGURE N° 1 - ABSORPTION DANS LES SEDIMENTS



ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES

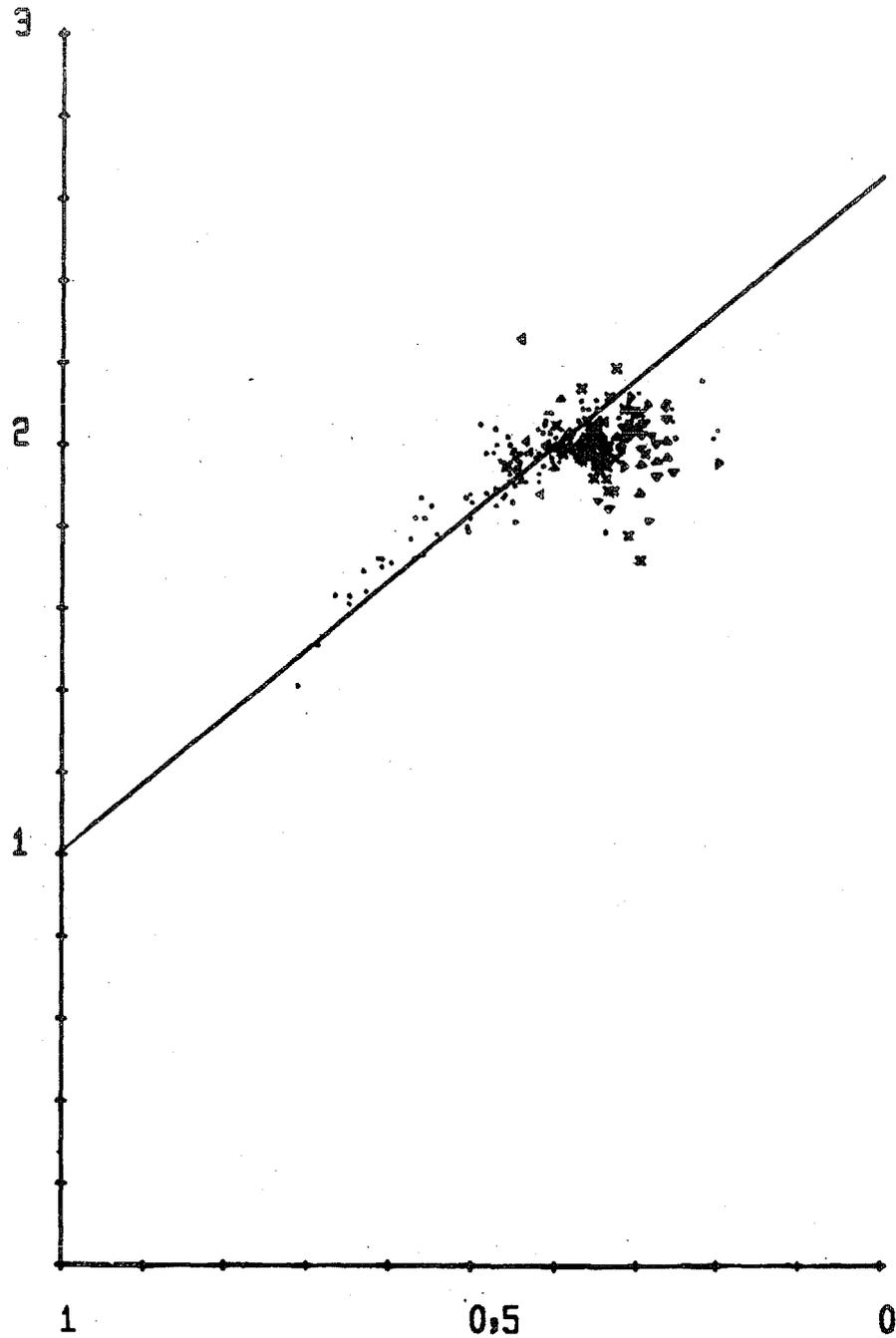


Figure 2

Densité en fonction de la porosité des sédiments



ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES

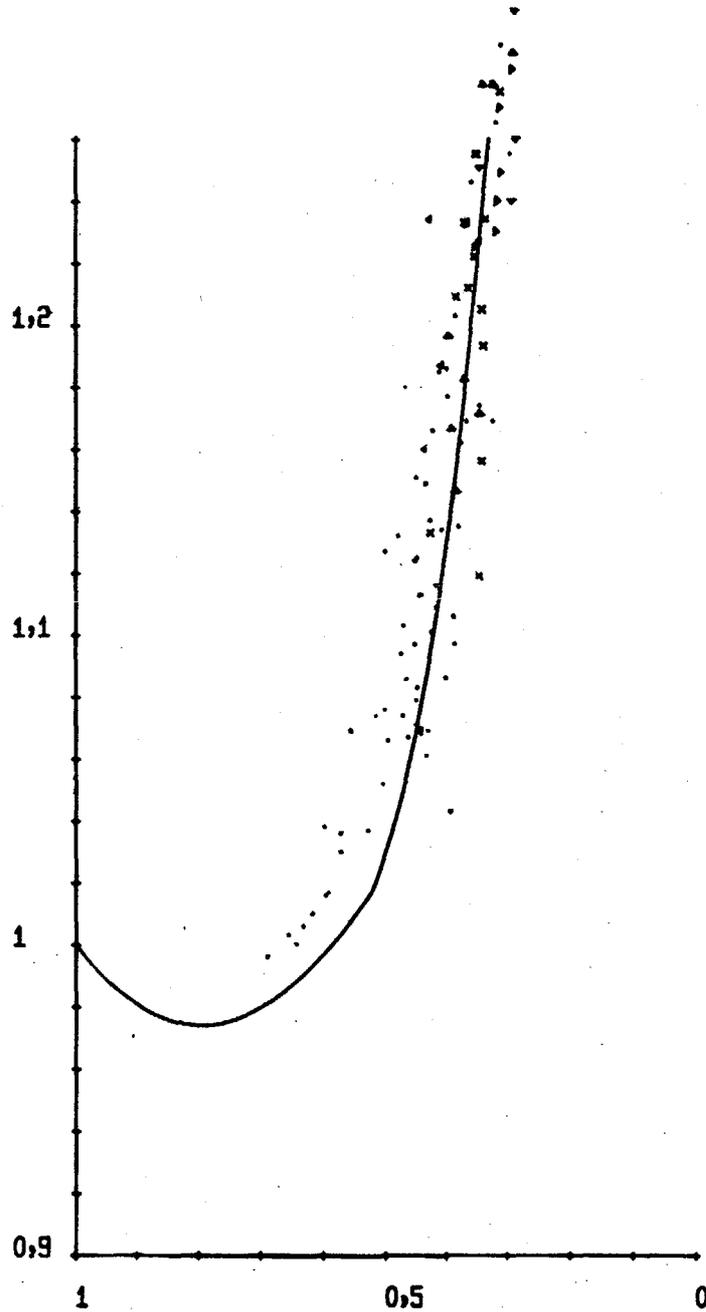
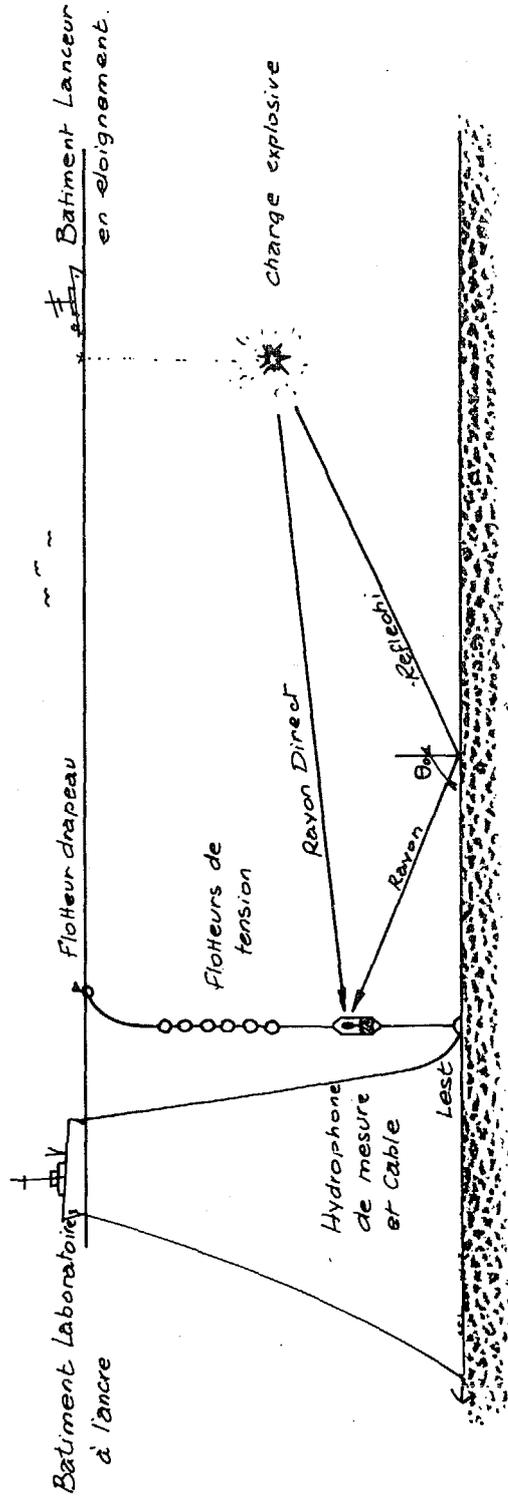


Figure 3

Rapport des célérités sédiment/eau en fonction
de la porosité



ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES



Geometrie des Essais en mer.

~ FIGURE 4 ~



REPONSE IMPULSIONNELLE D'UN FOND REEL STRATIFIE

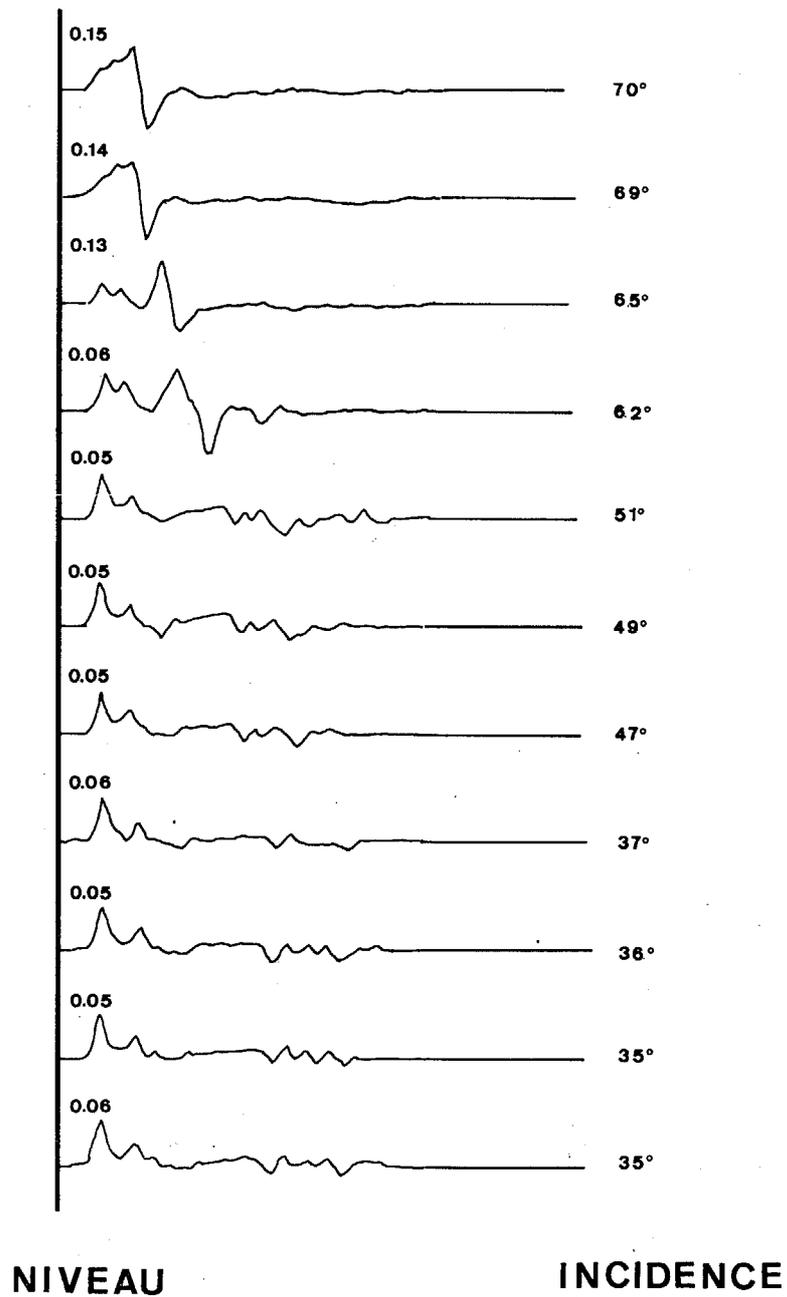


FIGURE 5



ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES

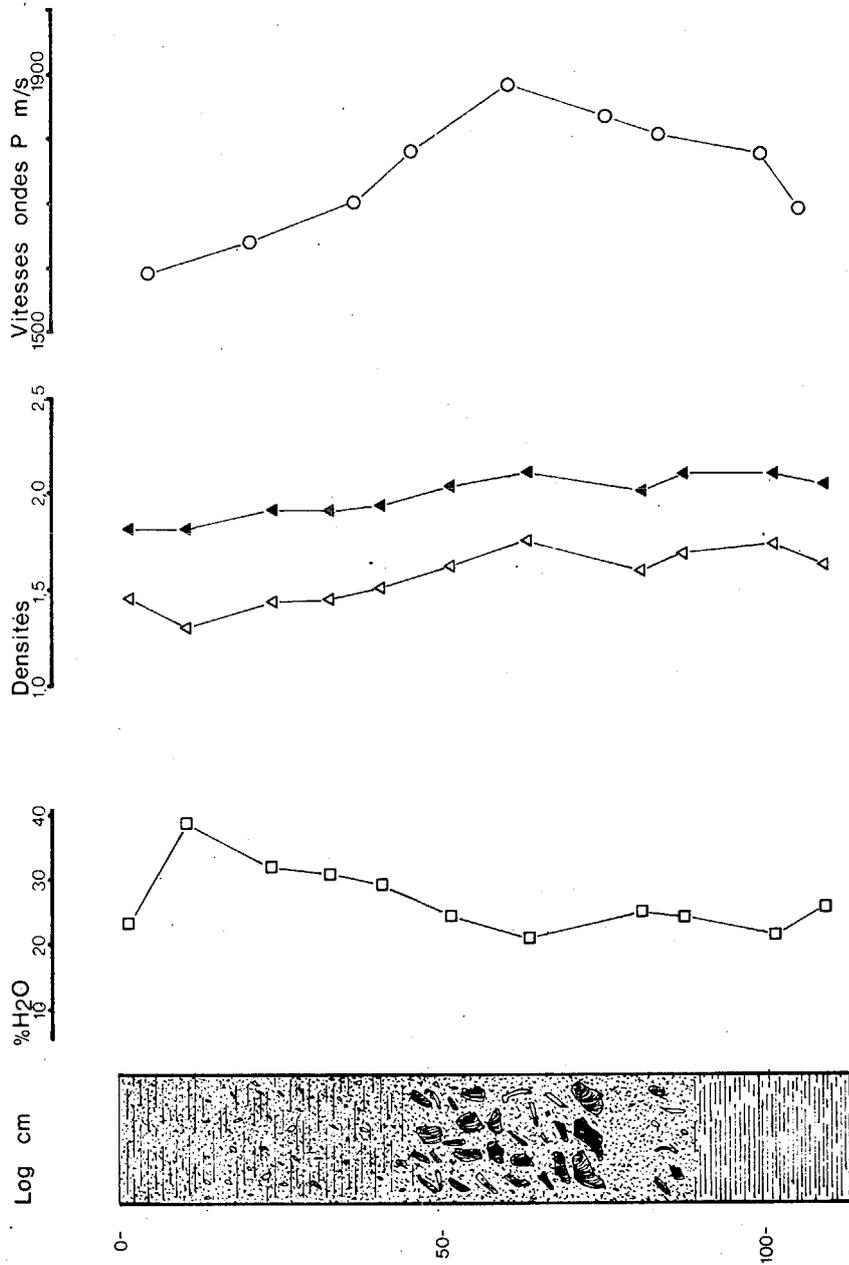


fig.6

carotte n°1



ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES

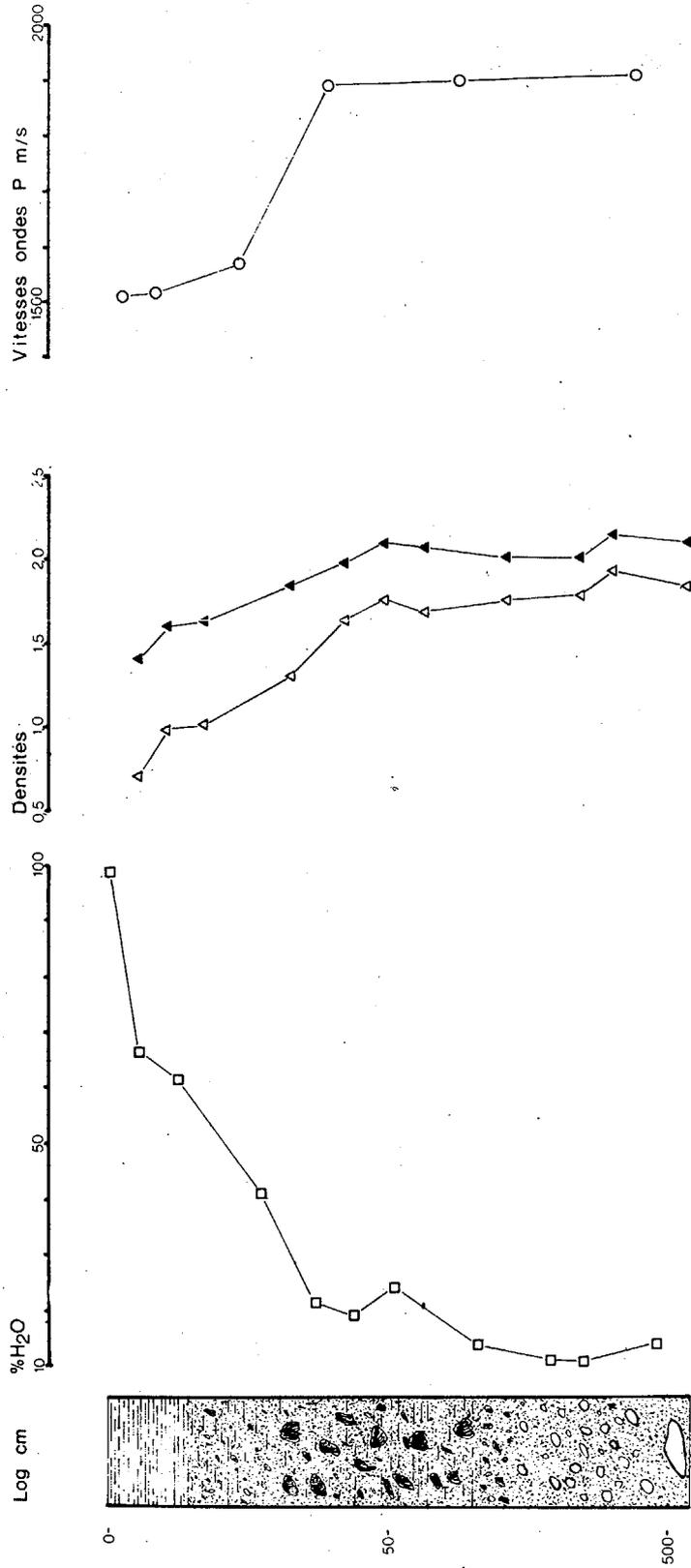
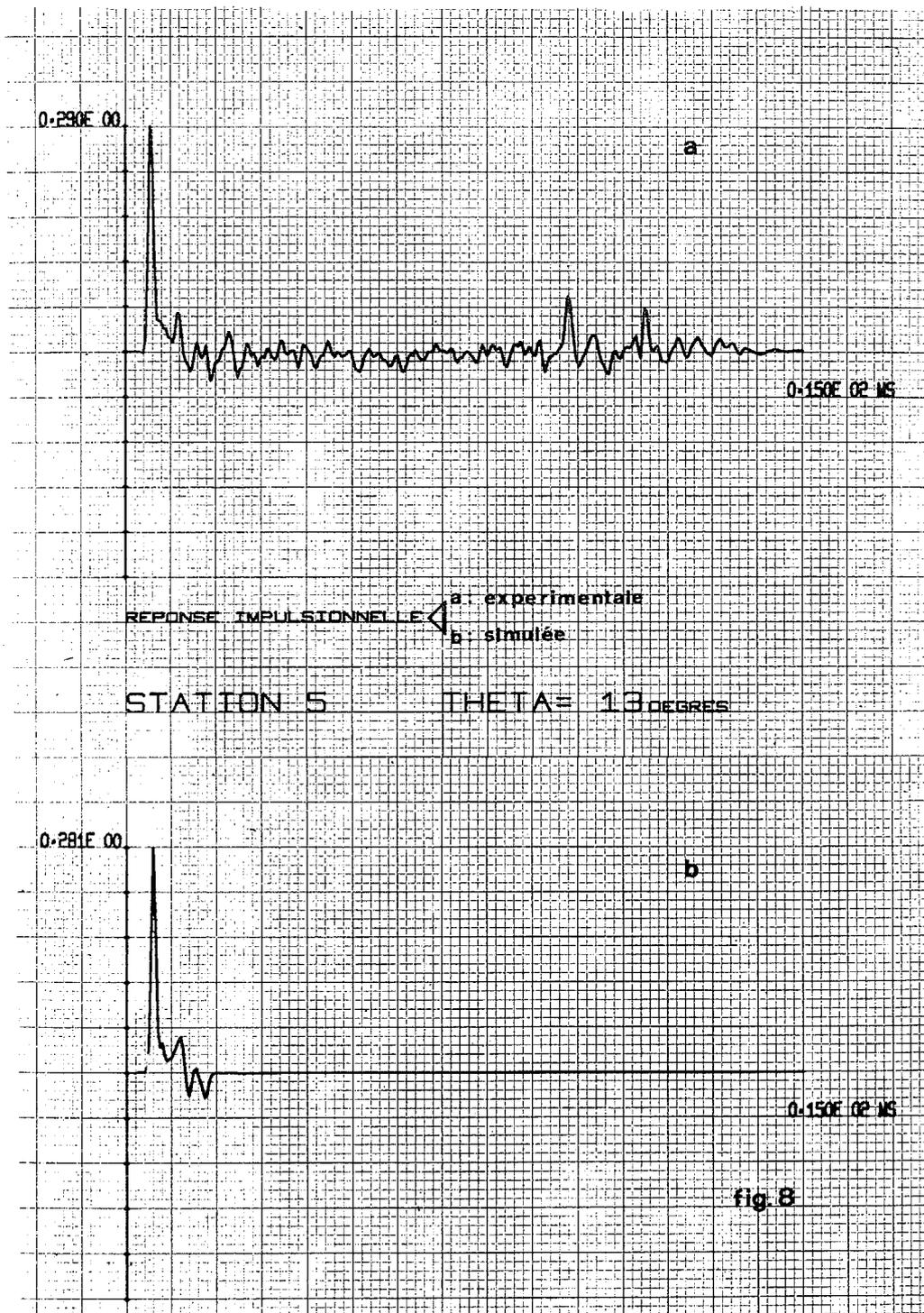


fig.7

carotte n°2

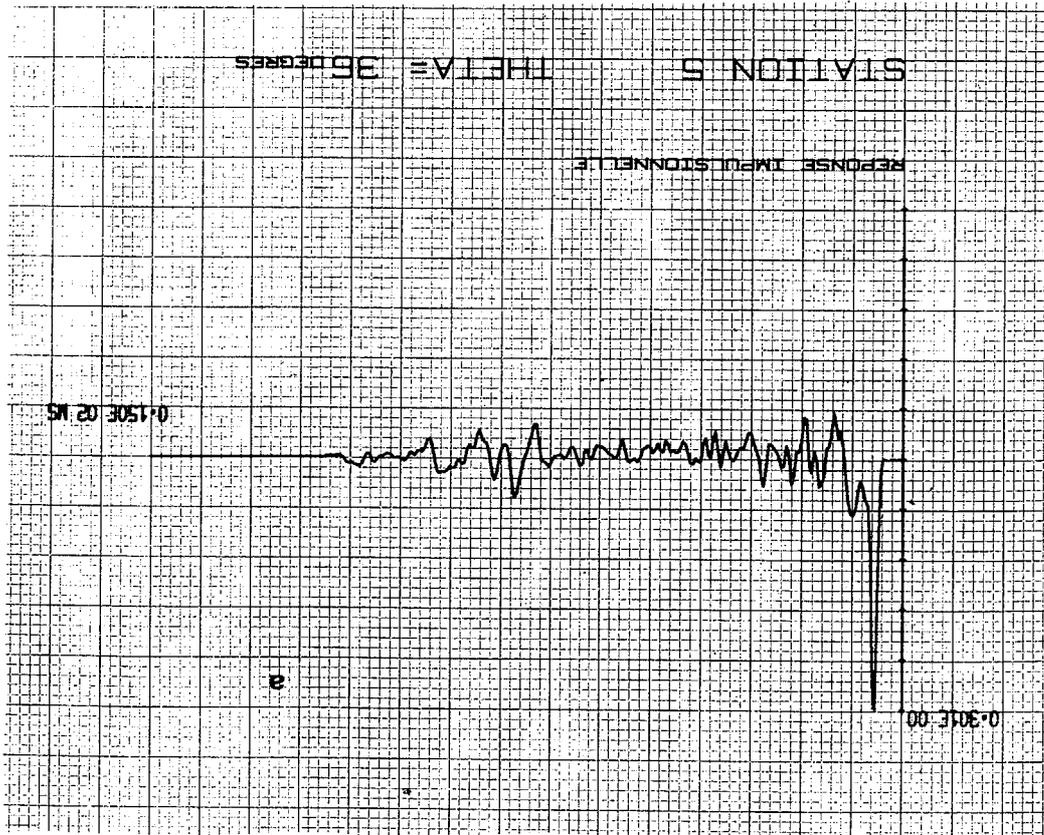
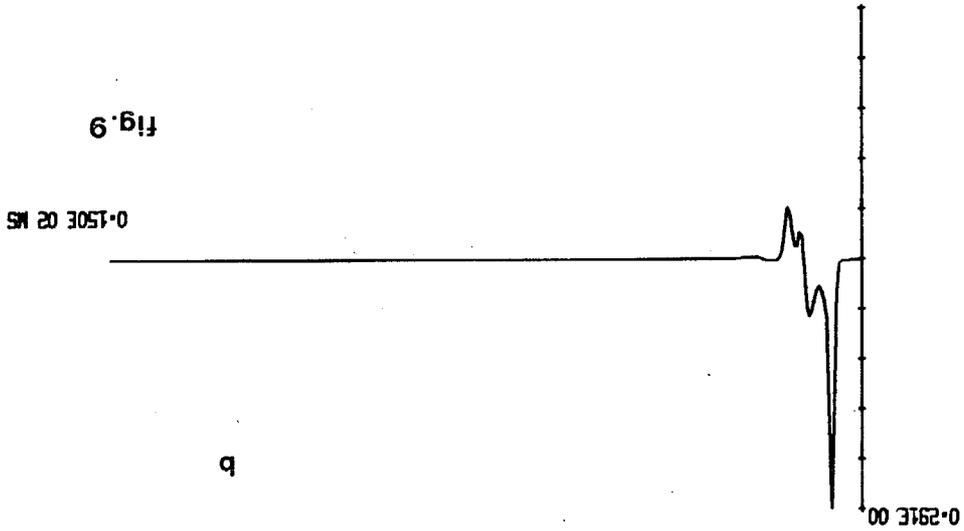


ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES



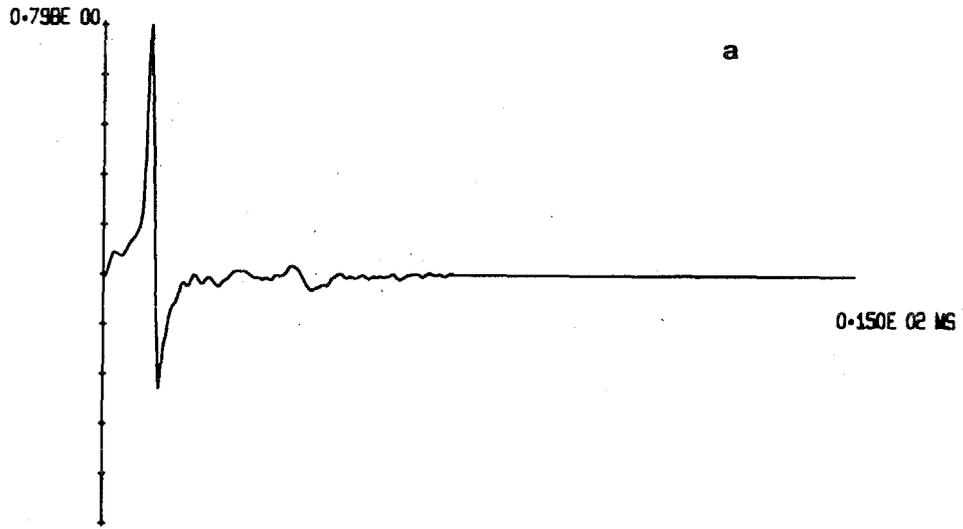


ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES





ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES



REPONSE IMPULSIONNELLE

STATION 5

THETA = 71 DEGRES

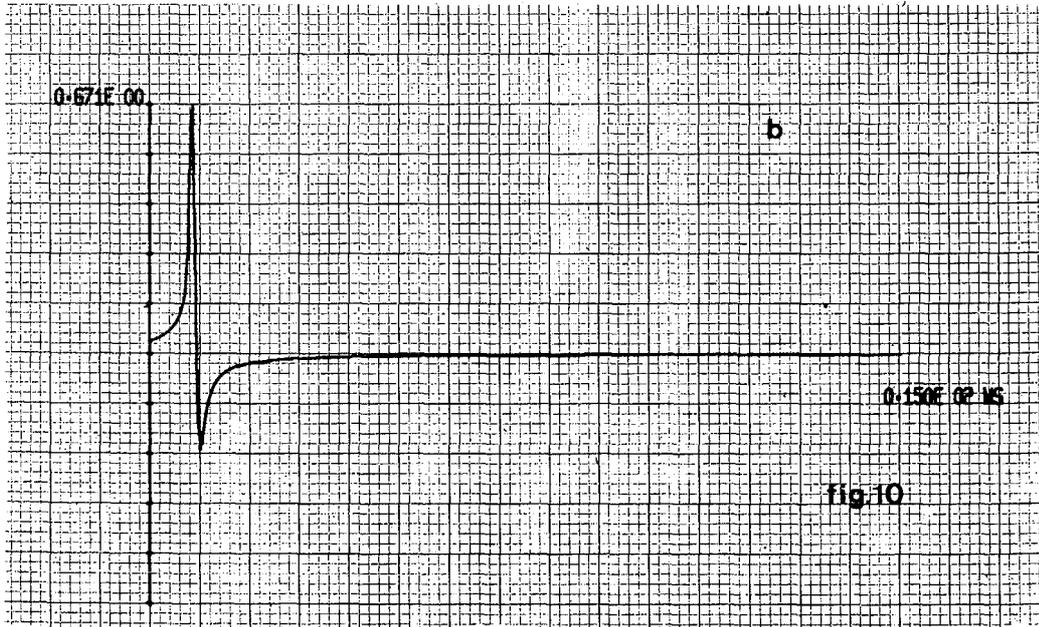
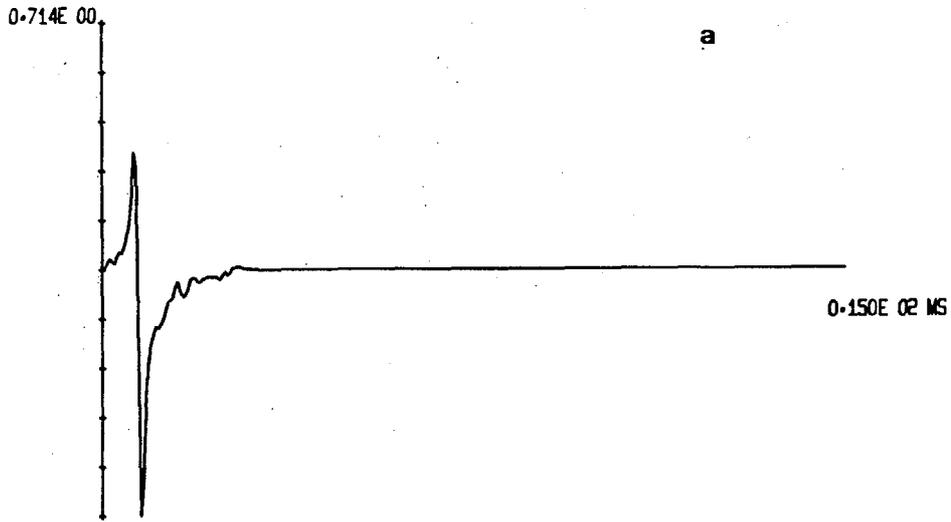


fig.10



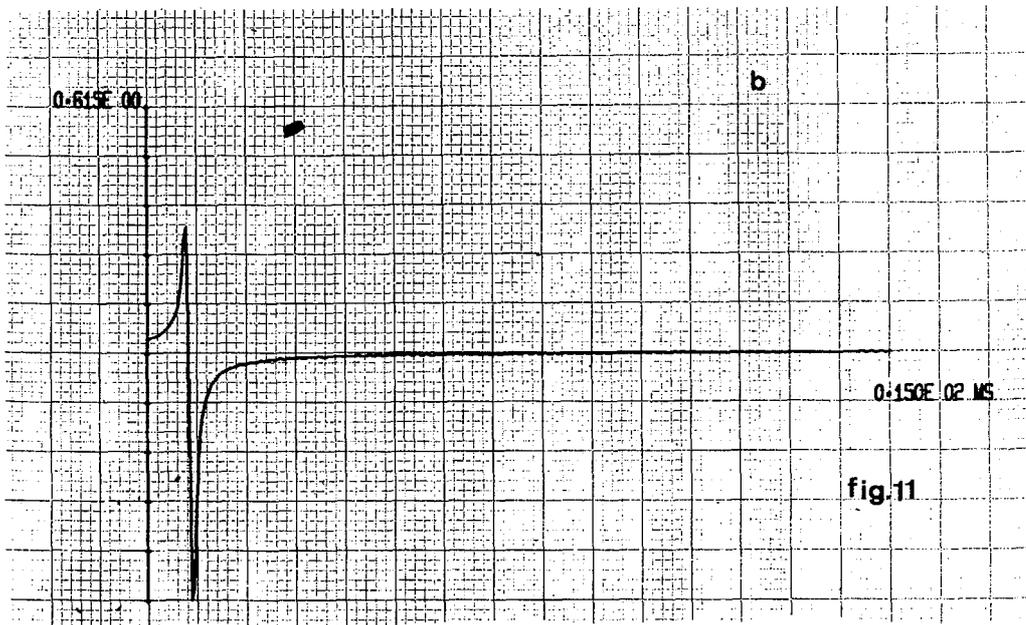
ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES



REPONSE IMPULSIONNELLE

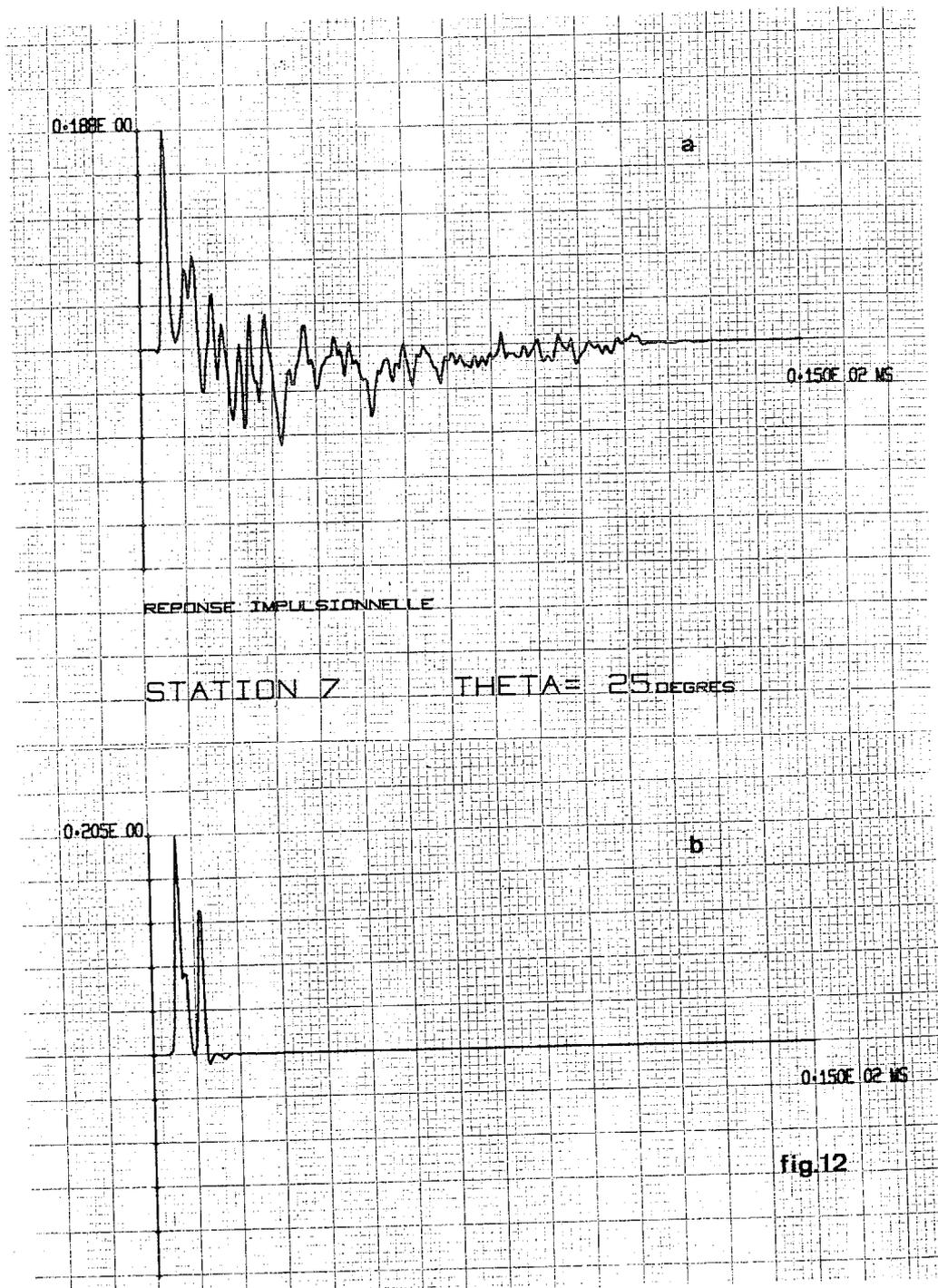
STATION 5

THETA = 83 DEGRES



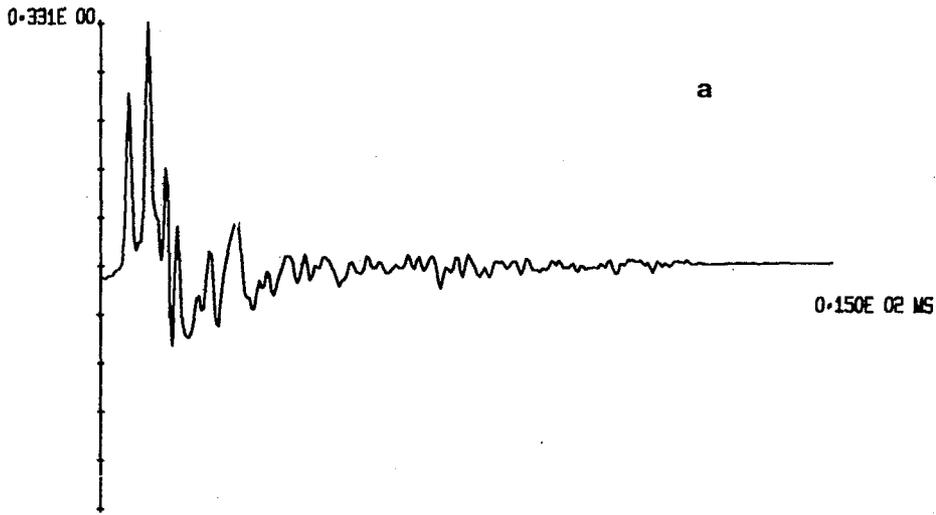


ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES





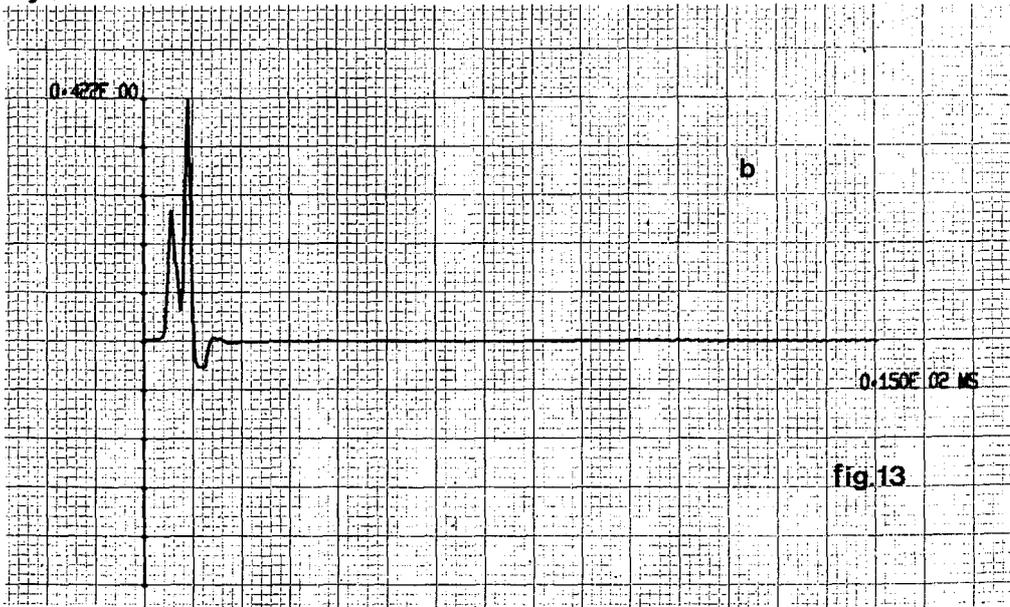
ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES



REPONSE IMPULSIONNELLE

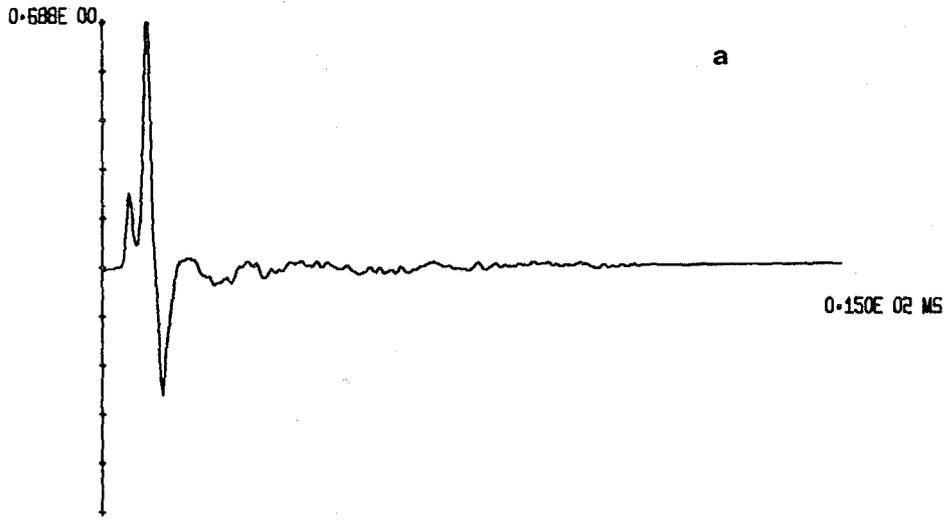
STATION 7

THETA= 51 DEGRES





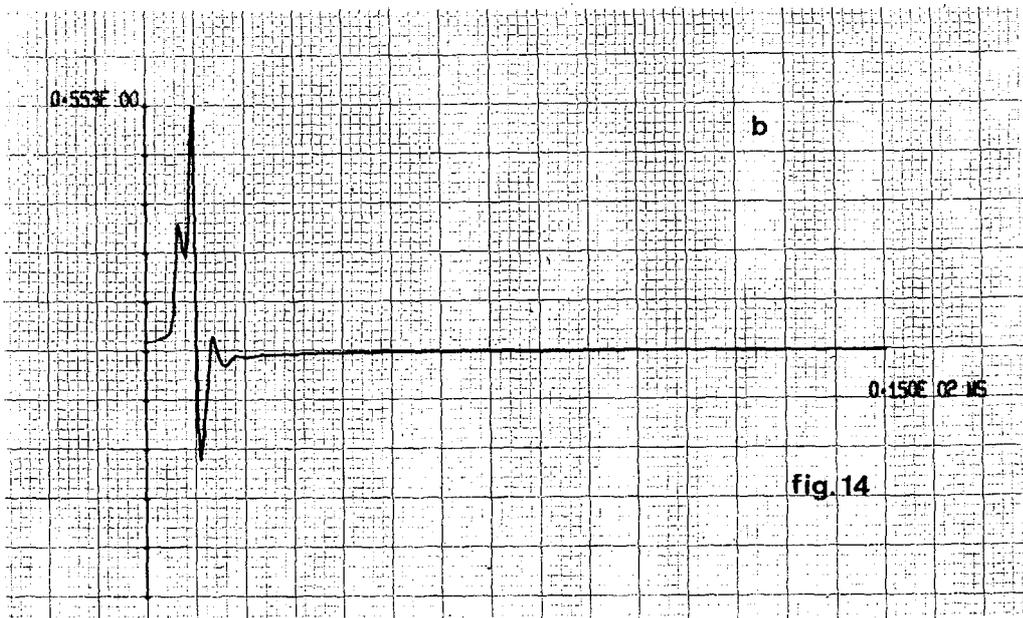
ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES



REPONSE IMPULSIONNELLE

STATION 7

THETA= 55 DEGRES



ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES

REEL (A)
REponses D UN FOND ◁
POUR DEUX INCIDENCES **SIMULE (B)**

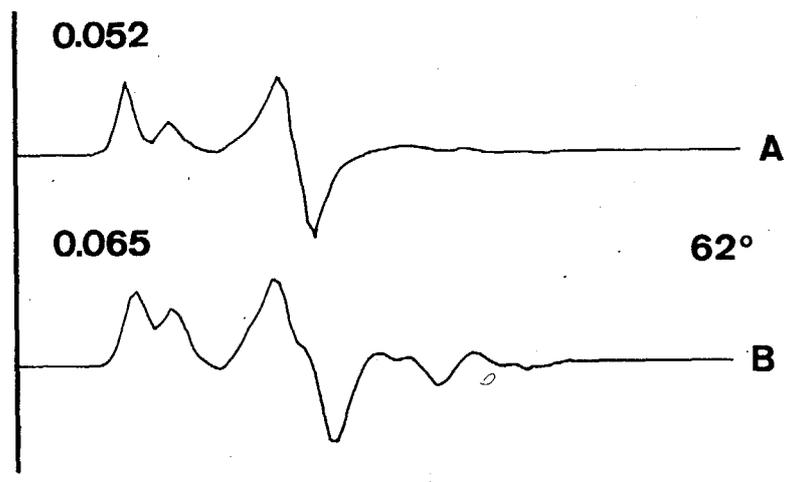
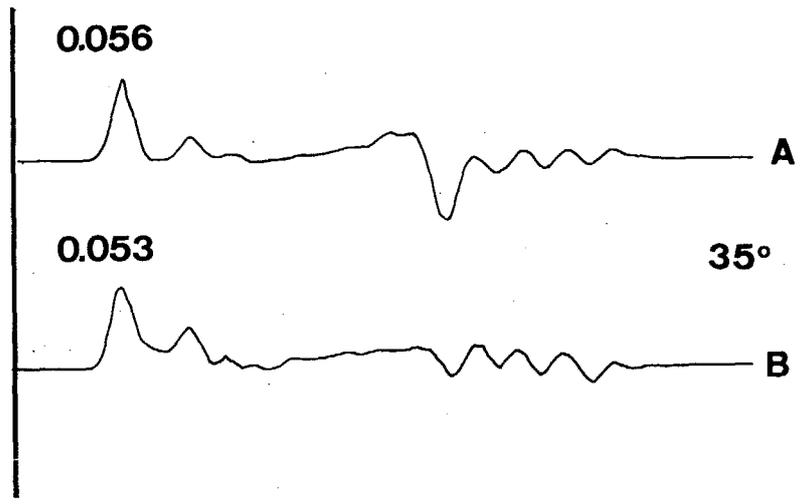
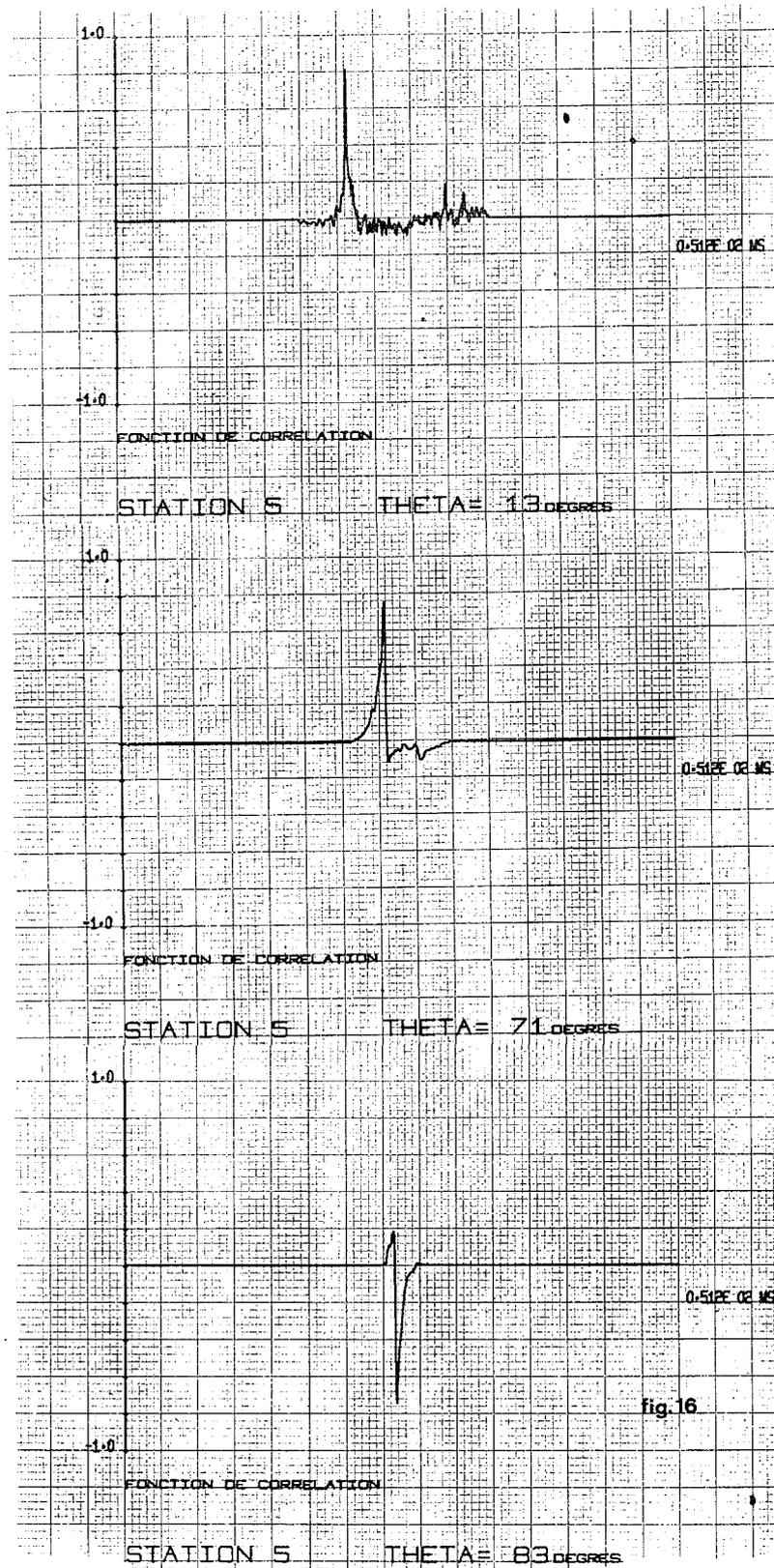


FIGURE 15



ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES



ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE LA REFLECTIVITE DE
FONDS MARINS STRATIFIES

