

HUITIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS



NICE du 1^{er} au 5 JUIN 1981

REFRACTION D'UN FAISCEAU SONORE PARAMETRIQUE A TRAVERS
UNE INTERFACE EAU-SEDIMENT
REFRACTION OF A HIGHLY DIRECTIONAL PARAMETRIC BEAM
THROUGH A WATER-SEDIMENT INTERFACE

Dominique ODERO

SINTRA-ALCATEL, 1, avenue Aristide Briand 94117 ARCUEIL

RESUME

Nous présentons ici une étude expérimentale de la pénétration d'un faisceau borné très directif dans un fond marin sédimentaire (sable).

Le faisceau est généré paramétriquement, suivant les propriétés bien connues de l'acoustique non linéaire.

Nous étudions ici les caractéristiques de la pénétration suivant que l'angle de rasance du faisceau est supérieur ou inférieur à l'angle critique.

SUMMARY

We present here an experimental study of the penetration of a highly directional acoustic beam into bottom sediment (sand).

The acoustic beam is parametrically generated, i.e. by means of the well known properties of non linear acoustics.

We studie here the manner in which directional beam penetrate when its grazing angle is greater, or lower the critical grazing angle.



REFRACTION D'UN FAISCEAU SONORE PARAMETRIQUE A TRAVERS
UNE INTERFACE EAU-SEDIMENT

1.- INTRODUCTION

Nous présentons dans cet article une étude expérimentale de la pénétration d'un faisceau acoustique très directif dans un sédiment. Une précédente expérience (réf. 1) sur le même sujet, faite "in situ" avait montrée que les difficultés inhérentes à l'expérimentation en milieu marin naturel étaient très difficilement surmontables et qu'il était pratiquement impossible d'obtenir une description "fine" des phénomènes physiques. De plus les conditions expérimentales (Célérités de l'eau C_e et du sédiment C_s , positions géométriques de l'antenne et des hydrophones enfouis, etc.) furent telles que nous n'avions pu étudier la propagation sonore dans le sédiment que pour des angles d'incidence inférieurs à l'angle critique θ_c (pour mémoire : $\theta_c = \text{Arc sin } C_e/C_s$).

Cependant, il n'apparaissait pas que la réalisation d'une expérience en laboratoire, dans une cuve en modèle réduit, apporte une lumière aveuglante sur ce qui pouvait se passer dans la réalité. Ceci pour deux raisons :

- malconnaissance des facteurs d'échelle,
- mauvaise reconstitution du sédiment en cuve, ou modélisation arbitraire d'un sédiment par un fluide différent de l'eau.

On a donc imaginé un compromis entre l'étude in-situ, trop grossière, et l'étude en modèle réduit, a priori trop éloignée de la réalité physique. C'est ainsi que nous avons été amenés à étudier la propagation d'un faisceau acoustique très directif dans un sédiment marin "déplacé" dans une cuve de dimensions respectables mais avec des conditions d'environnement matériel permettant de connaître avec une assez grande précision les positions des hydrophones enfouis dans le sédiment, celles de l'antenne ainsi que son inclinaison en site.

Après quelques déboires, nous avons donc effectivement expérimenté la pénétration d'un faisceau directif dans une cuve remplie de sable sédimentaire marin. C'est cette étude que nous présentons aux chapitres suivants.

Parallèlement à nos travaux, nous avons eu connaissance d'autres résultats, tant expérimentaux (MUIR, HORTON et THOMPSON (réf. 2) que théoriques C.W. HORTON (réf. 3), NAZE TJOTTA et S.TJOTTA (réf. 4).

Nous verrons que nos observations expérimentales confirment et généralisent celles de MUIR et al et sont en accord avec les résultats théoriques des TJOTTA.

2.- SUR QUELQUES CONSIDERATIONS THEORIQUES

On admet qu'à l'interface entre deux fluides non absorbants, dont les célérités acoustiques sont respectivement C_1 et C_2 , il est possible qu'une onde plane indéfinie soit partiellement réfléchiée et partiellement transmise. Au-delà d'un certain angle θ_c (si $C_1 < C_2$) l'onde est seulement réfléchiée. La transmission obéit aux lois de SNELL-DESCARTES.

Lorsque le deuxième milieu est absorbant, la notion d'angle critique disparaît et on a toujours transmission pour l'onde plane indéfinie (MAC KENZIE réf. 5).

Lorsqu'on n'a plus une onde plane incidente mais un faisceau acoustique borné dans les trois dimensions, plusieurs phénomènes nouveaux apparaissent, ou du moins sont prédits par les théoriciens. A la suite des TJOTTA (réf. 4), nous en citerons en particulier deux :

- Pour un angle d'incidence $\theta_i < \theta_c$, l'angle transmis θ_t est inférieur à l'angle transmis θ_c^S prédit par la loi de SNELL DESCARTES, ceci d'autant plus que la

largeur du faisceau est faible (cf. fig. 2 de la réf. 4)

- Pour un angle d'incidence $\theta_i > \theta_c$, il y a transmission après déplacement sur l'interface avec un vecteur d'onde qui est d'autant plus incliné vers la verticale que le faisceau incident est étroit.

De fait, ce dernier point ne peut être vérifié que si l'hydrophone récepteur dans le sédiment se trouve assez "loin".

En effet, le faisceau sonore incident est considéré comme la cause de l'excitation de l'interface suivant une surface limitée par son intersection avec cet interface. Cette surface ("spot"), dont chaque point est excité avec un certain déphasage, rayonne dans le sédiment et il est nécessaire de se placer dans sa zone de FRAUNHOFER pour obtenir une direction de vecteur d'onde transmis. Profitons en ici pour définir quelques paramètres qui nous seront utiles par la suite (les notations sont celles de la figure 1, avec $a = R \sin \theta_3$, k' : vecteur d'onde dans l'eau)

- champ proche du "spot" : $0 < r < a/\cos \theta_1$ (1)

- champ intermédiaire du spot : $a/\cos \theta_1 \ll r \ll k'a^2 \sin \theta_1/2$ (2)

- champ lointain du "spot" : $r \gg k'a^2 \sin \theta_1/2$ (3)

Suivant la modélisation utilisée pour définir l'amplitude des ondes constituant le faisceau incident (crêteau, gaussienne,...) le faisceau transmis présente des caractéristiques de directivité fort différentes (cf. réf. 4).

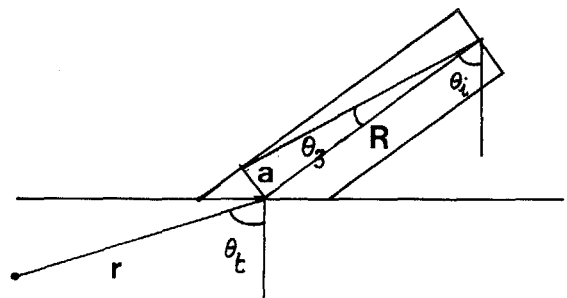


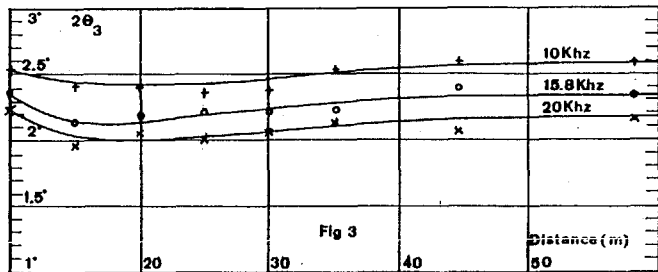
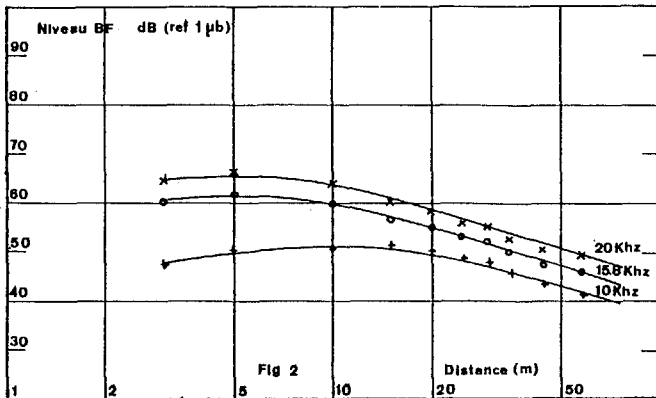
Fig 1

3.- CARACTERISTIQUES DU FAISCEAU ACOUSTIQUE DIRECTIF

La nécessité d'avoir un faisceau étroit unique, sans lobes secondaires gênants, et d'avoir ce faisceau à des fréquences suffisamment faibles pour pénétrer dans le sédiment (dont l'absorption suit grosso-modo une loi en $1 \text{ dB}/\lambda$) suggère fortement l'utilisation d'une antenne paramétrique.

Celle que nous avons construite fonctionne avec des fréquences HF primaires autour de 200 kHz. Elle est équivalente à un piston circulaire de 22,5 cm de diamètre. Les fréquences BF secondaires sont comprises entre 5 et 50 kHz. Nous donnons, figure 2, les niveaux BF à 20, 15,8 et 10 kHz émis par cette antenne et relevés expérimentalement en fonction de la distance. La figure 3 représente les valeurs expérimentales des $2\theta_3$ correspondants en fonction de la distance. (Il est intéressant, accessoirement, de noter ici l'existence d'une valeur minimum du $2\theta_3$).

REFRACTION D'UN FAISCEAU SONORE PARAMETRIQUE A TRAVERS
UNE INTERFACE EAU-SEDIMENT



Les hydrophones utilisés sont de très petite taille, avec un centre acoustique connu à 1 mm près, sensibles ($S_h \approx 110$ dB réf. 1 μ b) et avec une bonne bande passante (> 150 kHz). Ils sont montés sur un "squelette" acoustiquement transparent. Ces réseaux ont été enfouis dans le sable contenu dans une cuve en bois de grandes dimensions. Cette cuve a été construite au fond d'un bassin en communication avec la mer. De ce fait, un courant marin s'établissait avec la marée. Ceci entraînait la formation de rides à l'interface eau-sédiment, dont la taille (de l'ordre de la longueur d'onde à 20 kHz) s'est avérée peu gênante. La figure 5 représente une vue de l'interface au-dessus du réseau R7 d'après un relevé topographique.

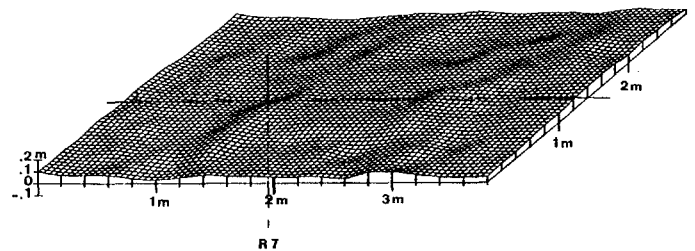


Fig 5

L'antenne était montée sur un dispositif orientable en site et en gisement, l'ensemble pouvant se déplacer suivant les trois axes de coordonnées trirectangles. La précision du positionnement était supérieure à 10 cm. La précision du positionnement relatif en site était de $\pm 0,1^\circ$.

L'enfouissement des hydrophones, les fréquences BF, la largeur (a) du faisceau frappant l'interface, les différents angles θ_i d'incidence et les diverses positions de l'antenne ont toujours été telles que les distances r (cf. fig. 1) étaient en champ intermédiaire du "spot" (cf. éq. (2)).

4.- VALEUR DE L'ANGLE CRITIQUE α_c (EN SITE) :

Des mesures effectuées par le Centre de Recherches en Sédimentologie Marine de Perpignan ont montré que les célérités, au cours de l'expérimentation, étaient :

- dans l'eau : 1490 m/s
- dans le sable : 1742 m/s

La vitesse dans le sable a en fait été une fonction croissante du temps : 1500 m/s au moment du dépôt dans la cuve, pour atteindre 1742 m/s au moment de l'expérimentation, 4 mois après.

Dans ces conditions, l'angle critique, en site, se situe autour de 30° .

5.- CONFIGURATION EXPERIMENTALE

La propagation dans le sédiment marin (sable) a été étudiée à l'aide de deux réseaux d'hydrophones. Le premier, que nous appellerons R7 (figure 4) a été utilisé pour essayer d'obtenir les composantes horizontales et verticales du vecteur d'onde transmis.

A partir de ces valeurs, il est possible de connaître la vitesse de phase dans le sédiment ainsi que l'angle de transmission.

Le deuxième, appelé R2, était prévu pour obtenir les valeurs d'absorption dans le sédiment par une mesure directe de l'atténuation entre deux hydrophones distants de 1 m.

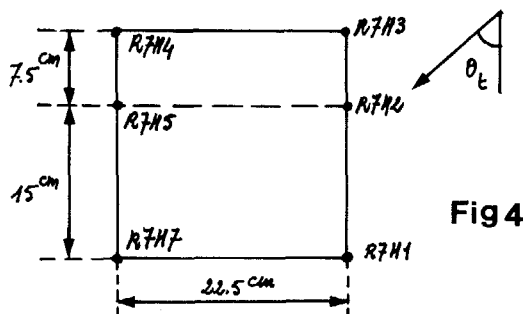


Fig 4

6.- EXPERIMENTATION

Un certain nombre de positions de l'antenne ont été choisies de façon, à avoir :

- d'une part une grande plage d'incidences, au-delà, en deça, et autour de l'angle critique
- d'autre part, des valeurs de R inférieures, voisines ou supérieures à la distance de RAYLEIGH R_0 de l'antenne aux fréquences HF. (On a ici : $R_0 \approx 6.5$ m).

Pour chaque position d'antenne, un certain nombre de sites étaient explorés autour d'un site bien pointé sur l'un des hydrophones du réseau R7.

Pour chacun de ces sites, on enregistrait, après numérisation, les signaux temporels reçus par les hydrophones des réseaux R2 et R7 ainsi que la copie du signal émis dans l'eau. Ces signaux avaient les configurations suivantes :

- en fréquence pure :
 - fréquences : 5,8,10,12.6,15.8, 20 kHz
 - durée : 1 m sec.
- en fréquence modulée :
 - fréquences de départ : 5,8,10,12.6,15.8,20 kHz
 - bande : 8 kHz
 - durée : 1 m sec.



REFRACTION D'UN FAISCEAU SONORE PARAMETRIQUE A TRAVERS
UNE INTERFACE EAU-SEDIMENT

7.- DEPOUILLEMENT DES ENREGISTREMENTS

Les signaux temporels étaient numérisés en 4096 échantillons avec une fréquence d'échantillonnage de 200 kHz (on prenait donc une tranche de 20 ms autour du signal reçu).

Les figures 6 et 7 représentent quelques signaux FP reçus à 10 kHz, en-deçà et au-delà de l'angle critique théorique de 30° (en site).

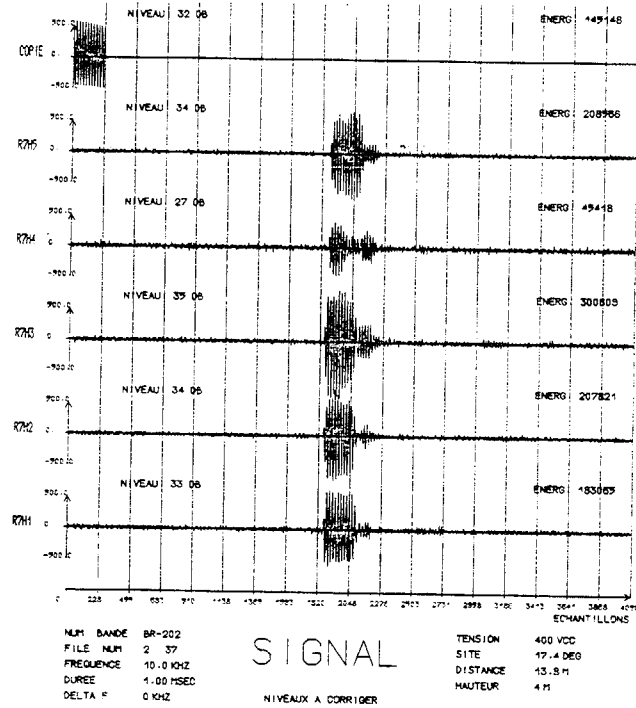


Fig 6

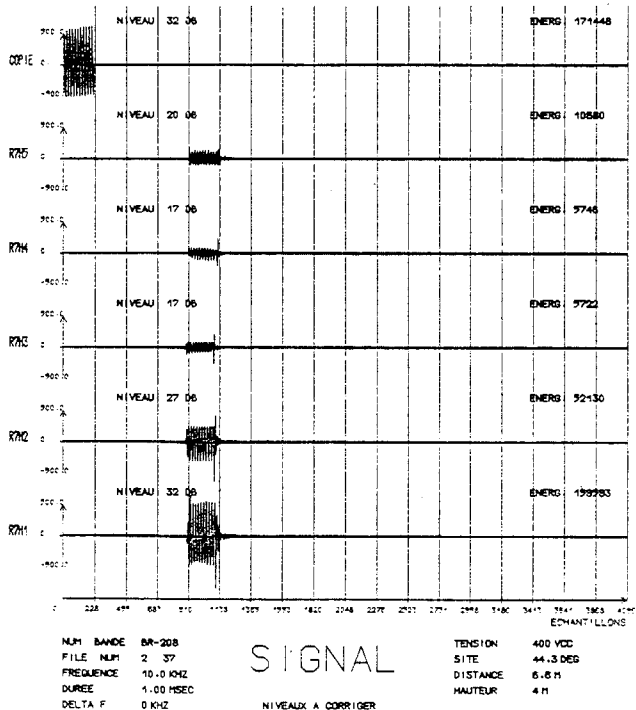


Fig 7

Ce même programme, par FFT de 1024 échantillons du signal temporel numérisé reçu et du signal émis, permettait de calculer l'interspectre puis, par FFT⁻¹, la fonction d'intercorrélation des deux signaux.

On avait donc, avec une précision de 5 µ sec., les instants d'arrivée des signaux arrivant sur un hydrophone et ayant parcouru des trajets différents. Les figures 8 et 9 représentent quelques fonctions d'intercorrélation pour des sites au-delà et en deçà de l'angle critique.

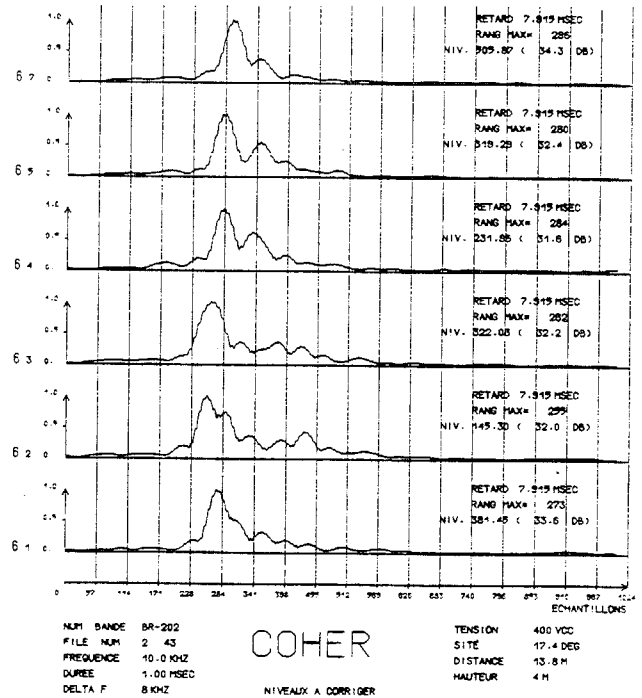


Fig 8

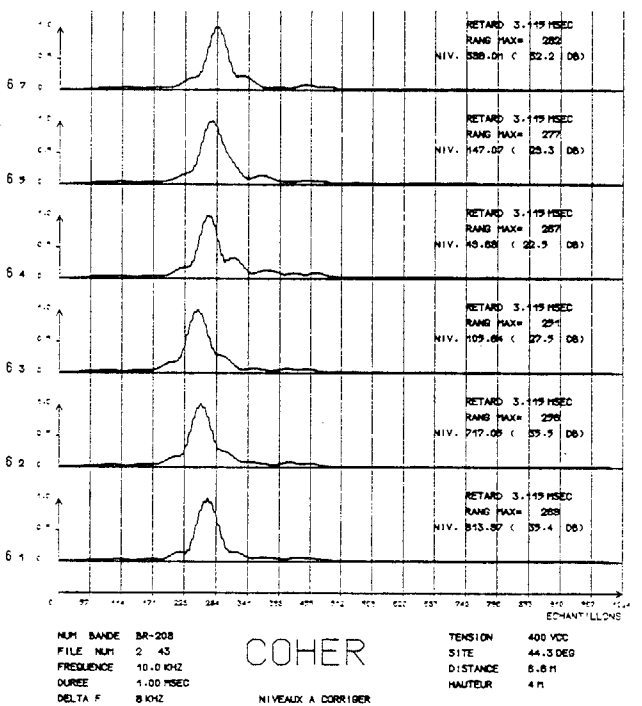


Fig 9

Un programme de calcul permet, par détection quadratique-intégration, d'obtenir le niveau acoustique reçu par les différents hydrophones.

REFRACTION D'UN FAISCEAU SONORE PARAMETRIQUE A TRAVERS
UNE INTERFACE EAU-SEDIMENT

8.- RESULTATS

Trajets observés et niveaux reçus

8.1.- Sites compris entre $\alpha = 60^\circ$ et $\alpha = 30^\circ$
($\alpha \approx \alpha \approx 30^\circ$)

a- Temps d'arrivée

Les valeurs des maxima des fonctions d'intercorrélation permettent d'obtenir les temps de trajet expérimentaux. Les décalages temporels de ces maxima sur les différents hydrophones du réseau R7 permettent d'obtenir les composantes verticales et horizontales de la vitesse de phase dans le sédiment ainsi que l'angle de transmission expérimental.

Nous avons représenté figure 10 quelques instants d'arrivée en fonction du site.

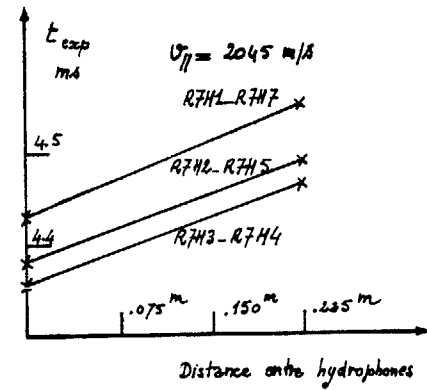
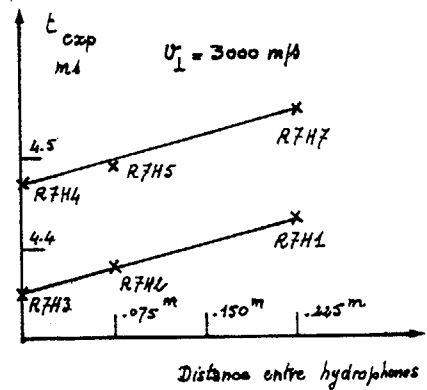
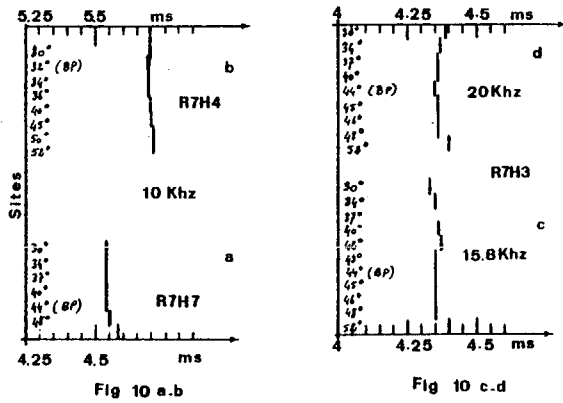


Fig 11

On observe, pour une fréquence donnée, soit un retard constant (fig. 10a-b) soit un décalage en fonction du site (fig. 10c-d). Ce décalage n'est pas fonction d'une fréquence particulière, mais est sur l'ensemble des résultats, plus sensible à 20 kHz qu'aux autres fréquences. Il est de l'ordre de 50 μ sec.

L'explication de ce décalage vient des déplacements du centre de l'antenne causés d'une part par les mouvements d'eau dus à la marée et d'autre part par les petites oscillations de la plate-forme supportant l'antenne (50 μ sec. correspondent à un déplacement de 7,5 cm, l'antenne est fixée en bout d'une tige métallique de 6 m de long, soit un écart angulaire de moins de 1°).

Il est possible de moyenner ces décalages sur l'ensemble des résultats et par suite de minimiser cette erreur.

La figure 11 représente un exemple de résultats obtenus pour les composantes $V_{//}$ et V_{\perp} . On en déduit l'angle de transmission suivant le schéma de la figure 12. Dans ce cas précis, on obtient :

$V_{exp} = 1690 \text{ m/s}, \alpha_{t \text{ exp}} = 34^\circ 3'$

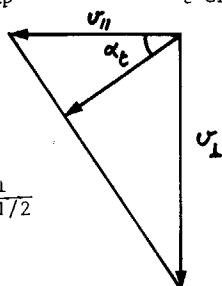


Fig 12

$$V = \frac{V_{//} \cdot V_{\perp}}{(V_{\perp}^2 + V_{//}^2)^{1/2}}$$

L'angle d'incidence expérimental, compte tenu de la célérité dans l'eau (B.P. sur R7 à 44°3) donne, si on prend la loi de SNELL DESCARTES, un angle de transmission en site de 35°7. L'accord entre ces deux valeurs est bon.

En règle générale, compte tenu des divers résultats expérimentaux, la célérité moyenne dans le sédiment obtenue est de 1700 m/s, soit un écart de 3% avec les valeurs du CRSM de Perpignan.

Les sites expérimentaux sont toujours un peu plus faibles (1 à 2°) que les sites théoriques donnés par la loi de SNELL DESCARTES (en prenant pour cette dernière les valeurs de célérité trouvées expérimentalement).

b- Niveaux reçus

La figure 13 représente un exemple de niveaux reçus sur R7-7.

Ici la position de l'antenne est différente de l'exemple précédent.

L'abscisse représente le site incident. Les niveaux à 10, 15.8 et 20 kHz sont corrigés des différences de niveaux émis par l'antenne (cf. figure 2).

On remarque l'absence de lobes secondaires et un élargissement du lobe principal par rapport à ce qu'il était dans l'eau (3° à 20 et 15.8 kHz). Dans cette configuration, la distance entre l'antenne et le "spot" était de 8m 50.



REFRACTION D'UN FAISCEAU SONORE PARAMETRIQUE A TRAVERS
UNE INTERFACE EAU-SEDIMENT

8.2.- Sites α compris entre 9° et 17°

$$(\alpha < \alpha_c \sim 30^\circ)$$

a- Temps d'arrivée

Nous donnons des exemples figures 14a et b. Ces temps de trajets ne correspondent pas à un trajet d'onde évanescente (d'ailleurs ils sont impossibles à voir car dans ces configurations les niveaux théoriques reçus devraient être inférieurs à - 100 dB).

On trouve un temps de trajet de 14,60 msec. sur R7H7, pour un BP en site incident de $11^\circ 7'$. On trouve : $V_{II} = 1800$ m/s, $V_I = 5000$ m/s. Ceci donne $V = 1694$ m/s et donc un angle de transmission en site de : $19^\circ 8'$.

Cette énergie semble provenir d'un point de l'interface décalé de 0,23 cm par rapport au centre du faisceau incident.

Ce résultat expérimental est en accord avec ceux de MUIR et al (réf. 2) et avec les travaux théoriques des TJOTTA (réf. 4).

b- Niveaux reçus

La figure 15 représente un exemple de niveaux reçus sur R7H7.

Ces niveaux sont à comparer avec ceux de la figure 13, en tenant compte de ce que les distances de l'antenne à l'interface pour ces deux figures sont dans le rapport $22/8.5 = 2.6$.

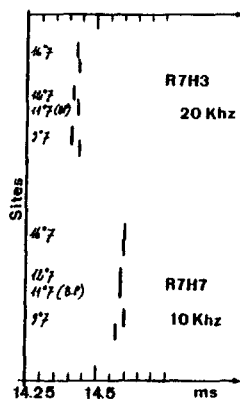


Fig 14

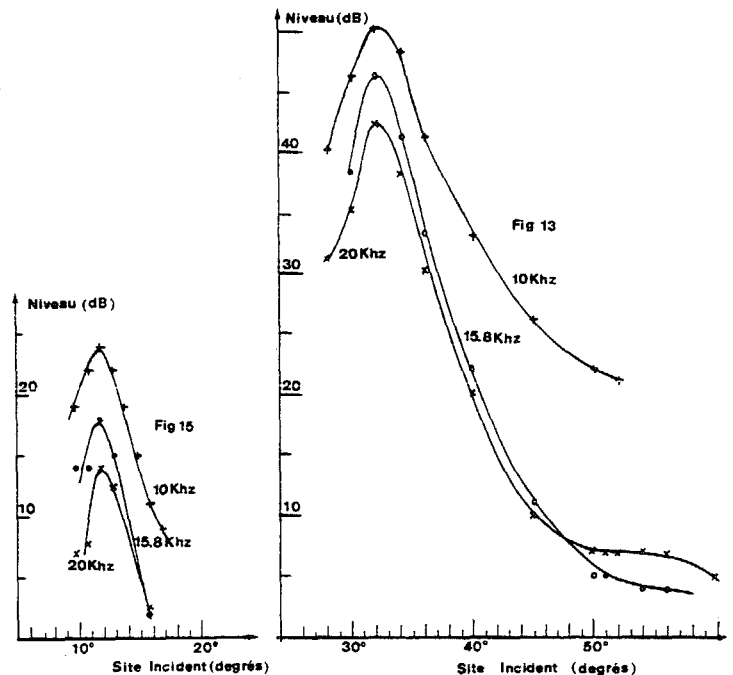
REMERCIEMENTS :

Cette étude a pu être menée à bien grâce à l'aide technique et financière du GESMA et de la DRET.

Nous remercions, tout particulièrement le GESMA pour les facilités qu'il nous a accordées et pour les diverses réalisations mécaniques nécessaires à nos expériences.

Les résultats présentés ici sont dûs au travail de toute une équipe.

Nous tenons à remercier A. MIQUEL pour la réalisation de l'électronique et l'expérimentation, G. MARTY pour la conception des programmes, M.C. LECOMTE et M.GENSANE pour les dépouillements.



BIBLIOGRAPHIE :

- (1) J.P. LONGUEMARD, D. ODERO, "Journal de Physique", Colloque C8, Suppl. au n° 11, tome 40 (1979)
- (2) T.G. MUIR, C.W. HORTON, L.A. THOMPSON, "Journal of Sound and vibration", 64 (4) (1979)
- (3) C.W. HORTON, Rapport interne ARL TR 74-28, University of Austin, Texas (1974)
- (4) J. NAZE TJOTTA, S.TJOTTA, "Bottom-Interaction Ocean Acoustics Conference" SACLANT CEN, La Spezia (1980)
- (5) K.V. MACKENZIE, Journal of Acoustical Society of America 32, (1960).