



TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

Nice 1^{er} au 5 juin 1971

PROBLEMES LIES AU MILIEU MARIN

LORS DE L'UTILISATION DES FREQUENCES ULTRASONORES (50-1000 kHz)

PROBLEMS RELATED TO THE MEDIUM ENCOUNTERED
IN THE USE OF ULTRASONICS FREQUENCIES UNDER WATER

C.C. LEROY - CIT-ALCATEL

RESUME

On passe en revue les différents problèmes liés au milieu marin rencontrés lors de l'utilisation de systèmes acoustiques à haute fréquence (50 à 1000 kHz). L'absorption sonore est étudiée de façon systématique en fonction de la température, de la salinité et de l'immersion, en se basant sur les mesures les plus appropriées.

On étudie ensuite brièvement les sources de bruit à haute fréquence (agitation thermique, pluie), l'effet des particules en suspension (atténuation et diffusion) et celui des frontières naturelles du milieu (réverbération par la surface et le fond de la mer). On examine pour terminer l'effet des hétérogénéités de température sur la cohérence des signaux ultrasonores.

SUMMARY

The various problems due to the medium, that are encountered in the use of high-frequency sound (50-1000 kHz) in underwater systems are reviewed in this article. The absorption by sea-water is systematically investigated as a function temperature, salinity and depth. Graphs based on the most appropriate data are presented. The following phenomena are subsequently reviewed briefly : high frequency noise sources (thermal agitation and rain), effect of particles in suspension (attenuation and diffusion), effect of boundaries (sea-surface and bottom reverberation). The loss of signal coherence due to thermal inhomogeneities is finally dealt with in the case of high frequencies.



UTILISATION DE FREQUENCES ULTRASONORES

1.- INTRODUCTION

La plupart des équipements utilisant les ondes acoustiques en milieu marin opèrent à des fréquences inférieures à 50 kHz.

Les sonars modernes pour la détection à moyenne ou longue portée des sous-marins et des navires opèrent désormais au-dessous de 20 kHz. Par contre, le développement récent de système de télémétrie ou de télécommande pour applications civiles (ancrage dynamique, exploitation off-shore, etc..) a remis à l'ordre du jour l'utilisation de la gamme 15-50 kHz. Ces fréquences sont en effet bien adaptées aux portées à atteindre et aux considérations économiques limitant la puissance utilisable et la complexité des systèmes.

Il existe cependant des domaines particuliers d'application où le besoin d'un pouvoir de résolution élevé peut conduire à l'emploi de fréquences hautes. Ce sont tous les domaines où l'on est amené à faire des mesures très précises de distance ou de vitesse (doppler), ou encore de la reconnaissance de forme sur des objets de dimensions relativement petites.

Le but de cet article est de récapituler les problèmes liés au milieu qui se posent lors de l'utilisation de fréquences supérieures à 50 kHz en milieu marin. Nous considérerons successivement l'absorption sonore, le bruit, la réverbération de fond, l'effet des particules en suspension et celui des hétérogénéités sur la cohérence des signaux.

2.- ABSORPTION2.1.- Généralités

2.1.1.- Nous étudions dans ce chapitre la fraction de l'atténuation (perte énergétique proportionnelle à la longueur du trajet acoustique) qui est due à l'eau de mer elle-même, c'est-à-dire compte non tenu de l'effet des particules en suspension ou hétérogénéités diverses, qui sera examiné plus loin.

Dans la littérature, le coefficient d'absorption est introduit de façons diverses selon les auteurs. On trouve essentiellement les coefficients α et a définis par :

$$I(r) = \frac{I_0}{f(r)} e^{-2\alpha r} \quad (1)$$

$$I(r) = \frac{I_0}{f(r)} = 10^{-\frac{a}{10} r} \quad (2)$$

où I_0 intensité sonore à la distance unité,
 $I(r)$ intensité à la distance r ,
 $f(r)$ perte par divergence ($= r^2$ en propagation sphérique).

La première formulation est surtout utilisée par les physiciens :

2α est alors le coefficient d'absorption en intensité et α s'exprime en Neper par unité de longueur. La deuxième formulation, où a est en dB par unité de longueur, est plus communément utilisée en ASM.



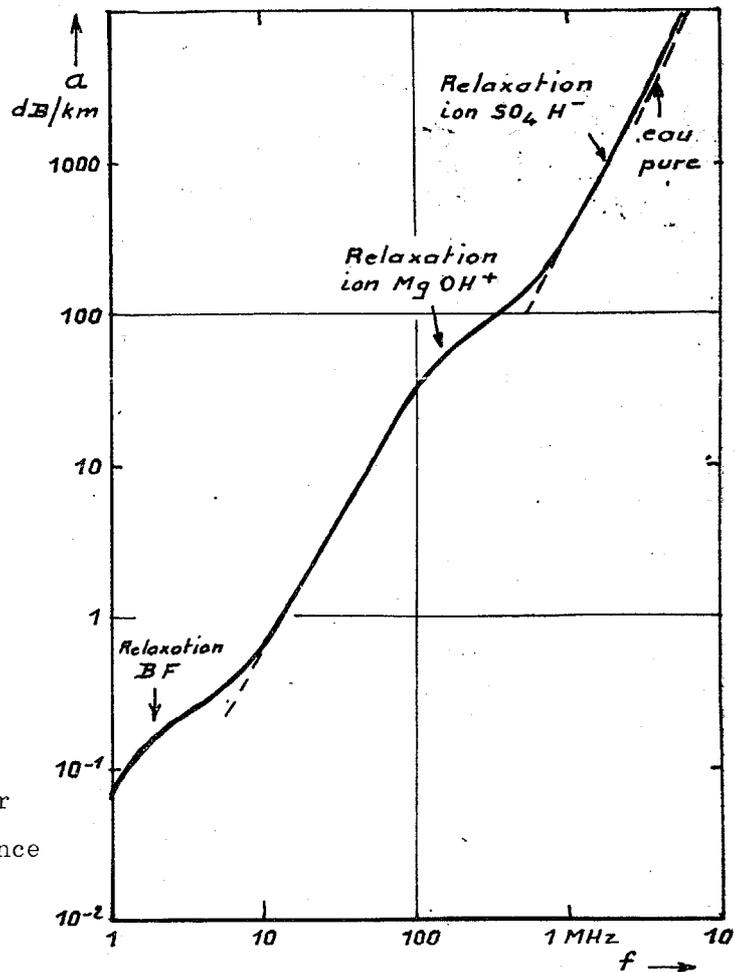
UTILISATION DE FREQUENCES ULTRASONORES

2.1.2.- L'absorption par l'eau de mer résulte d'un certain nombre de phénomènes plus ou moins prépondérants selon la gamme de fréquence envisagée . Ceci est illustré en figure 1.

Dans le domaine des fréquences utilisées pour les sonars ASM, on peut négliger l'absorption pure (par l'eau distillée) et ne tenir compte que de l'absorption due à la principale relaxation du $\text{SO}_4 \text{Mg}$ (voir plus loin), et de celle causée par une relaxation BF d'origine inconnue, découverte en 1963 seulement [2,3].

Fig. 1

Atténuation en eau de mer en fonction de la fréquence (Allure générale).



Dans le domaine de fréquences qui nous intéresse (50-1000 kHz) ce dernier phénomène n'intervient pas, mais par contre on ne peut plus négliger l'absorption existant dans l'eau (distillée) elle-même, ni oublier complètement la deuxième relaxation du $\text{SO}_4 \text{Mg}$. De plus, on se trouve dans une zone de fortes variations des différentes causes d'absorption avec la température et le phénomène résultant évolue de façon complexe. Il convient de l'analyser en détail, car l'absorption constitue le plus grand obstacle rencontré dans l'utilisation des



UTILISATION DE FREQUENCES ULTRASONORES

hautes fréquences.

Nous examinerons d'abord les résultats concernant l'eau pure (coefficients α_p et a_p .)

2.2.- Absorption dans l'eau pure

L'absorption sonore en eau distillée est plus élevée que les premières théories classiques ne l'avaient prédit. La cause de cet excès d'absorption découverte par HALL [4] en 1948 est due à un phénomène de relaxation, excité par le passage de l'onde sonore, entre deux configurations d'empilement des molécules d'eau. On montre que ce phénomène conduit à une absorption de la forme :

$$\alpha = A \frac{\omega^2}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (3)$$

où τ = constante de temps de relaxation, non mesurable mais évaluée à environ 10^{-12} s.

Pour toutes les fréquences considérées en acoustique (< 100 MHz) on a donc $\omega \tau \ll 1$ et (3) se réduit à

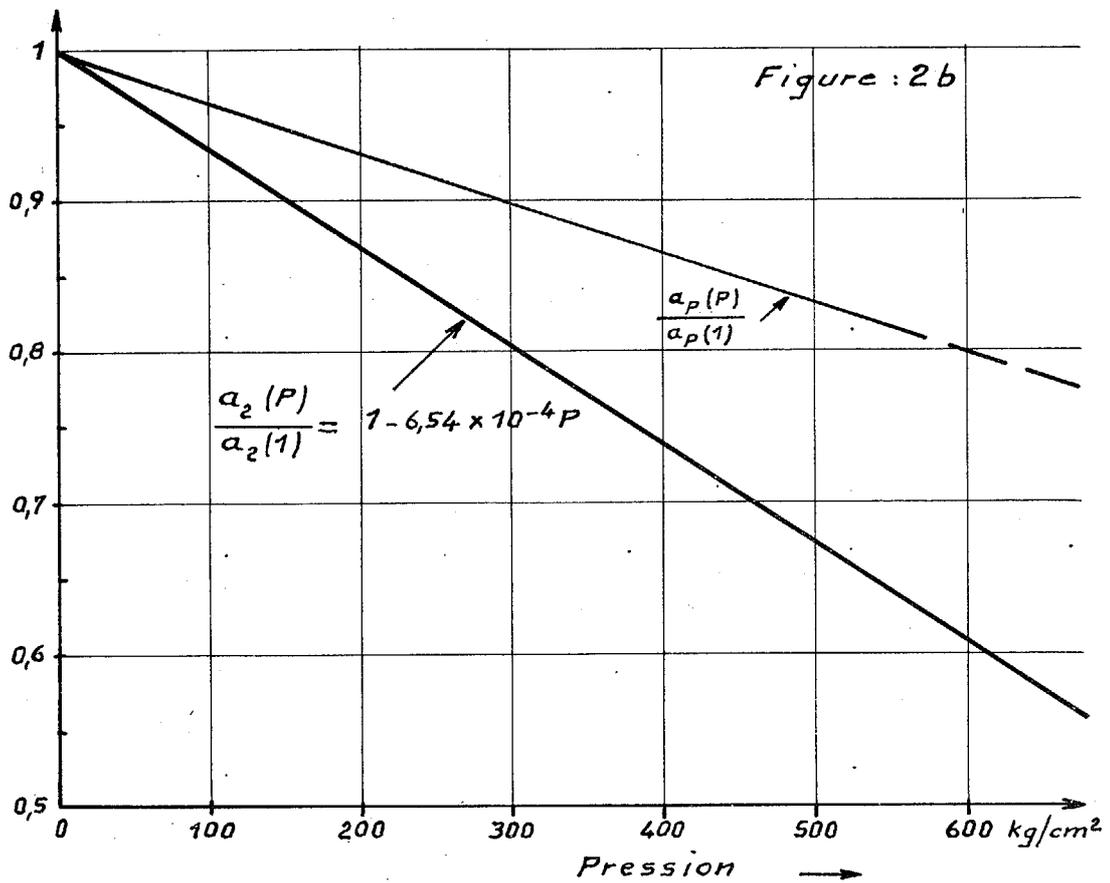
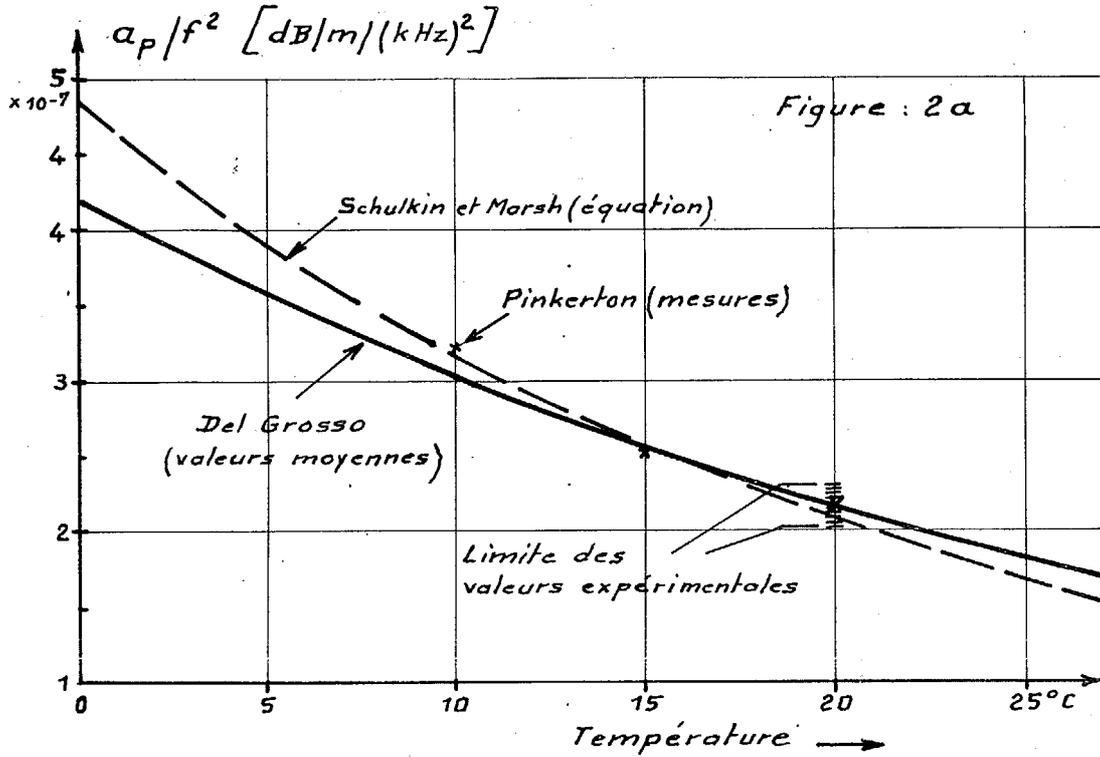
$$\alpha_p \sim A\omega^2 \quad \text{soit} \quad a_p = Kf^2$$

Les résultats actuellement connus sur l'absorption par l'eau pure semblent pouvoir être considérés comme suffisants et définitifs, tout au moins en ce qui concerne les hautes fréquences (Aux fréquences sonar il ne serait pas impossible que la relaxation BF indiquée précédemment existe aussi en eau pure : elle a été observée dans un lac [5] . Ce problème sortirait du cadre de notre étude).

Les résultats expérimentaux concordent pour indiquer que l'absorption



UTILISATION DE FREQUENCES ULTRASONORES





UTILISATION DE FREQUENCES ULTRASONORES

dans l'eau pure diminue quand la température ou la pression augmente, et ceci suivant des lois indépendantes de la fréquence. La figure 2 montre la variation de $K = a_p / f^2$ avec la température et la pression.

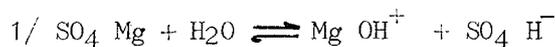
L'influence de la température est importante. Par contre, l'effet de pression est faible pour les petites profondeurs et n'entre pas en ligne de compte dans la plupart des problèmes.

Les références ayant servi à l'établissement de ces courbes sont cités dans les articles de DEL GROSSO [6] et SCHULKIN et MARSH [7].

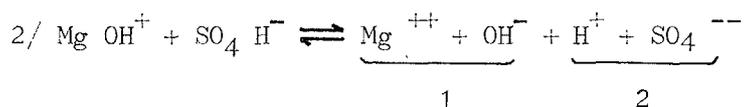
2.3.- Absorption aux hautes fréquences dans l'eau de mer épurée

2.3.1.- On a très tôt trouvé par mesures que l'absorption en eau de mer dans la gamme 20-200 kHz était très supérieure à ce qu'elle est en eau pure. La cause n'a été découverte qu'en 1953 par LEONARD et WILSON [8]. Il s'agit de processus de dissociations et réassociations ioniques dans le sulfate de magnésium contenu dans l'eau en faible quantité (4,7 % des sels dissous contre 78 % pour le ClNa).

Ces processus, au cours desquels de l'énergie est dissipée, sont les suivants :



avec une constante de temps de l'ordre de 10^{-9} s



avec des constantes de temps différentes pour les deux ions, et variables avec la température et la pression.



UTILISATION DE FREQUENCES ULTRASONORES

La dissipation d'énergie dépend des molécules libres, c'est-à-dire de la concentration en $\text{SO}_4 \text{ Mg}$. Les autres sels dissous, et principalement le ClNa (en forte proportion) viennent freiner les processus de dissociation, de sorte qu'une solution de $\text{SO}_4 \text{ Mg}$ qui donnerait la même absorption que l'eau de mer, aurait une concentration de 0,014 mole/litre seulement.

2.3.2.- Première relaxation par du $\text{SO}_4 \text{ Mg}$ (coefficient a_1)

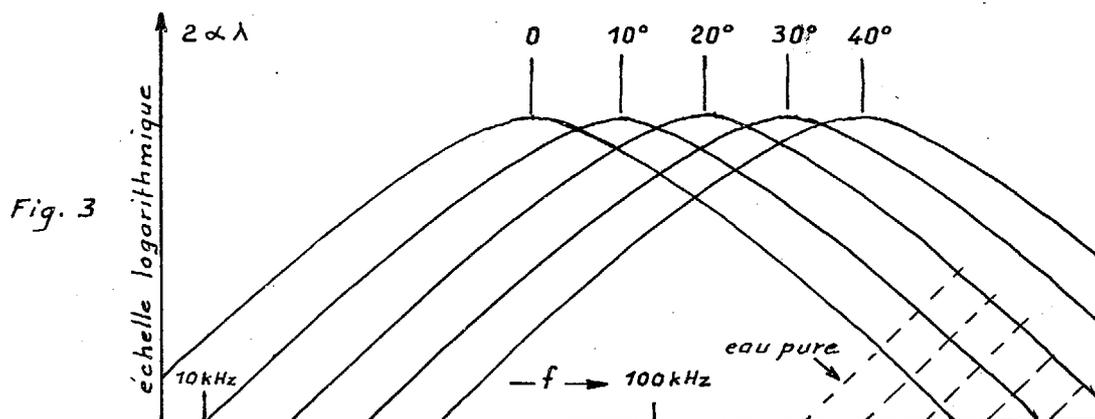
La première relaxation (ion Mg OH^+) est de loin la plus importante : fréquence de relaxation dans la gamme étudiée, absorption résultante élevée.

Les nombreux résultats de mesure concordent sur le point suivant :

Si l'on écrit la formule (3) en introduisant la fréquence de relaxation $f_r = 1/2 \pi \tau$, et que l'on trace pour diverses températures les courbes $\alpha (f)$ donnant l'absorption sur une longueur d'onde :

$$\alpha_1 \lambda = 4 \pi^2 A c \frac{f_r^2 f^2}{f_r^2 + f^2} \quad (4)$$

(c étant la célérité du son), on observe que ces courbes ont des maxima égaux (Cf Fig. 3).



On voit immédiatement que ceci n'est possible que si $A/f_r = \text{constante}$.

Les mesures se scindent alors en deux catégories mises en relief par les synthèses de DEL GROSSO [6] et SCHULKIN et MARSH [7].

Des mesures en Laboratoire sur des solutions de $\text{SO}_4 \text{ Mg}$ ou de l'eau de mer synthétique ; des mesures sur de l'eau de mer véritable, en Laboratoire ou in situ. Les deux groupes conduisent à la même forme de variation de f_r en fonction de la température absolue T , à savoir :

$$f_r = m 10^{(p - \frac{q}{T})} \quad (5)$$

mais avec des coefficients différents. On trouvera en figure 4 la variation de f_r en fonction de la température selon les deux sources.

Par ailleurs, les chercheurs ayant étudié les solutions de $\text{SO}_4 \text{ Mg}$, ont constaté la proportionalité de l'absorption avec la concentration, et sa variation linéaire avec la pression hydrostatique (FISHER [9]), d'où pour le coefficient a_1 une loi suivant :

$$a_1 = K S \frac{f_r f^2}{f_r + f} (1 - \beta P) \quad (6)$$

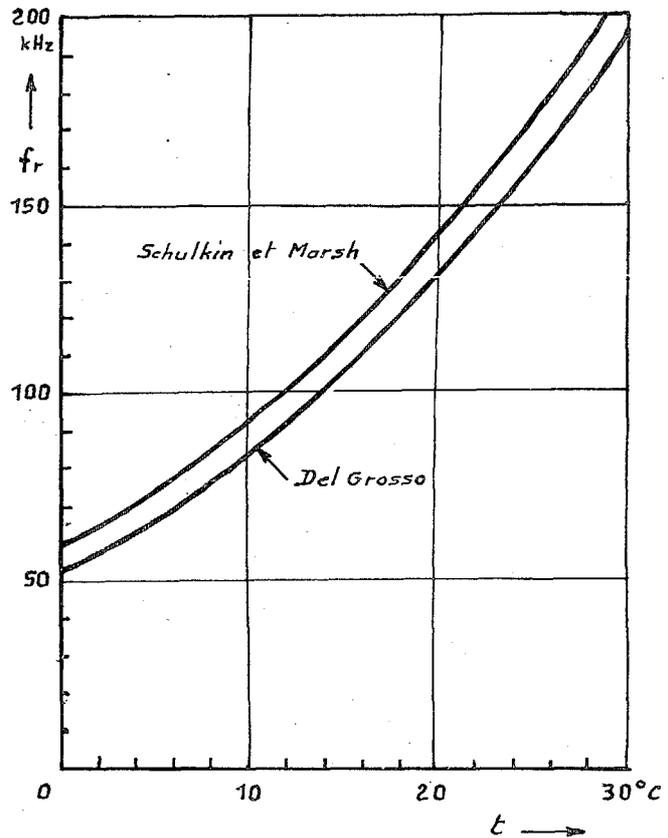


Fig. 4 - Relaxation de MgOH^+ en fonction de la température



UTILISATION DE FREQUENCES ULTRASONORES

où S est la salinité en ‰ et P la pression.

(N.B. la variation en fonction de la pression a été indiquée en figure 2 pour comparaison avec le cas de l'eau pure).

L'équivalence entre proportionnalité de l'absorption à la molarité des solutions de $\text{SO}_4 \text{ Mg}$ et proportionnalité à la salinité de l'eau de mer n'est pas absolument prouvée [7], mais peut être retenue comme une bonne approximation pour les salinités moyennes.

2.3.3.- Deuxième relaxation du $\text{SO}_4 \text{ Mg}$ (cause de l'absorption a_2)

Cet effet est moins bien mesuré que le premier car il est faible aux concentrations équivalentes à celle de l'eau de mer (on l'appelle parfois absorption "résiduelle". A des concentrations supérieures on a trouvé une fréquence de relaxation vers la centaine de MHz et un rapport $(a_2 + a_p)/a_p$ indépendant de la température. La variation de a_2 avec la molarité n'est inhabituelle aux basses concentrations (loi en n^2). Aucune valeur n'est citée pour ce qui correspondrait à l'eau de mer, mais l'examen des données nous laisse à penser que l'on devrait s'attendre pour les salinités standard (~ 35 ‰) à :

$$(a_2 + a_p) / a_p \sim 1,05$$

Nous n'avons trouvé aucune étude en fonction de la pression.

2.3.4.- Absorption totale en eau de mer d'après les principaux auteurs.

Les références [6] et [7] constituent les deux principaux essais de synthèse pouvant être considérés aux fréquences qui nous intéressent ici.



UTILISATION DE FREQUENCES ULTRASONORES

a) DEL GROSSO prend pour bases :

— $a_T = a_1 + a_p$, et dans le doute sur a_2 , (qui vérifie : $(a_2 + a_p)/a_p$).

Il préfère arrêter les courbes présentées dès que a_1 s'approche trop de a_p .

— a_1 strictement proportionnel à la salinité S , et égal à la valeur donnée par une solution de SO_4 Mg pur de molarité

$$n = \frac{S}{35} \times 0,014$$

— f_r résultant des mesures de KURTZ, TAMM et KAISER

— a_p donné par $a_p = K f^2$ selon une moyenne de mesures (Fig. 2).

L'effet de pression n'est pas considéré.

b) SCHULKIN et MARSH prennent pour bases :

— $a_T = a_1 + a_p$, malgré la mention de a_2 et le fait qu'une figure de leur article peut conduire à $(a_2 + a_p)/a_p \sim 1,5$ à 2, ce qui est excessif.

— a_1 de la forme (6) mais avec des réserves sur la validité de la formule aux faibles salinités.

— f_r donné par une équation de la forme (5)

— a_p posé arbitrairement égal à $a_p = \frac{B f^2}{f_r}$, après observation

du fait que B/f_r ne s'éloigne pas de plus de 10 % des valeurs de a/f^2 données par PINKERTON. Cette façon de procéder permet de n'introduire qu'une seule loi en fonction de la température..



UTILISATION DE FREQUENCES ULTRASONORES

— La pression est considérée comme agissant de la même façon sur a_1 et a_p : On prend $a_T = (a_1 + a_p) (1 - \beta P)$, β étant le coefficient mesuré par FISHER pour a_1 . Cette approximation est néanmoins acceptable étant donné le but des auteurs, à savoir la formulation d'une équation valable aux fréquences sonar.

L'équation de SCHULKIN et MARSH est alors :

$$a_T = 10^{-2} \times \left(2,03 S \frac{f_r f^2}{f_r^2 + f^2} + 2,93 \frac{f^2}{f_r} \right) (1 - 6,54 \cdot 10^{-4} P) \quad (7)$$

avec $f_r = 21,9 \cdot 10 \left[6 - \frac{1520}{t+273} \right]$

où : a en dB/km, S en ‰, t en °C, P en Kg/cm², f en KHz.

2.4.- Valeurs proposées pour l'absorption dans la gamme 50-1000 kHz

Au vu des hypothèses, simplifications ou contradictions relevées dans les paragraphes précédents, nous préférons proposer comme valeurs pour l'absorption totale a_T dans la gamme 50-1000 kHz des courbes calculées suivant $a_T = a_0 + a_1 + a_2$ ou chaque atténuation partielle est évaluée au mieux.

2.4.1.- Valeurs à la pression atmosphérique et aux salinités courantes.

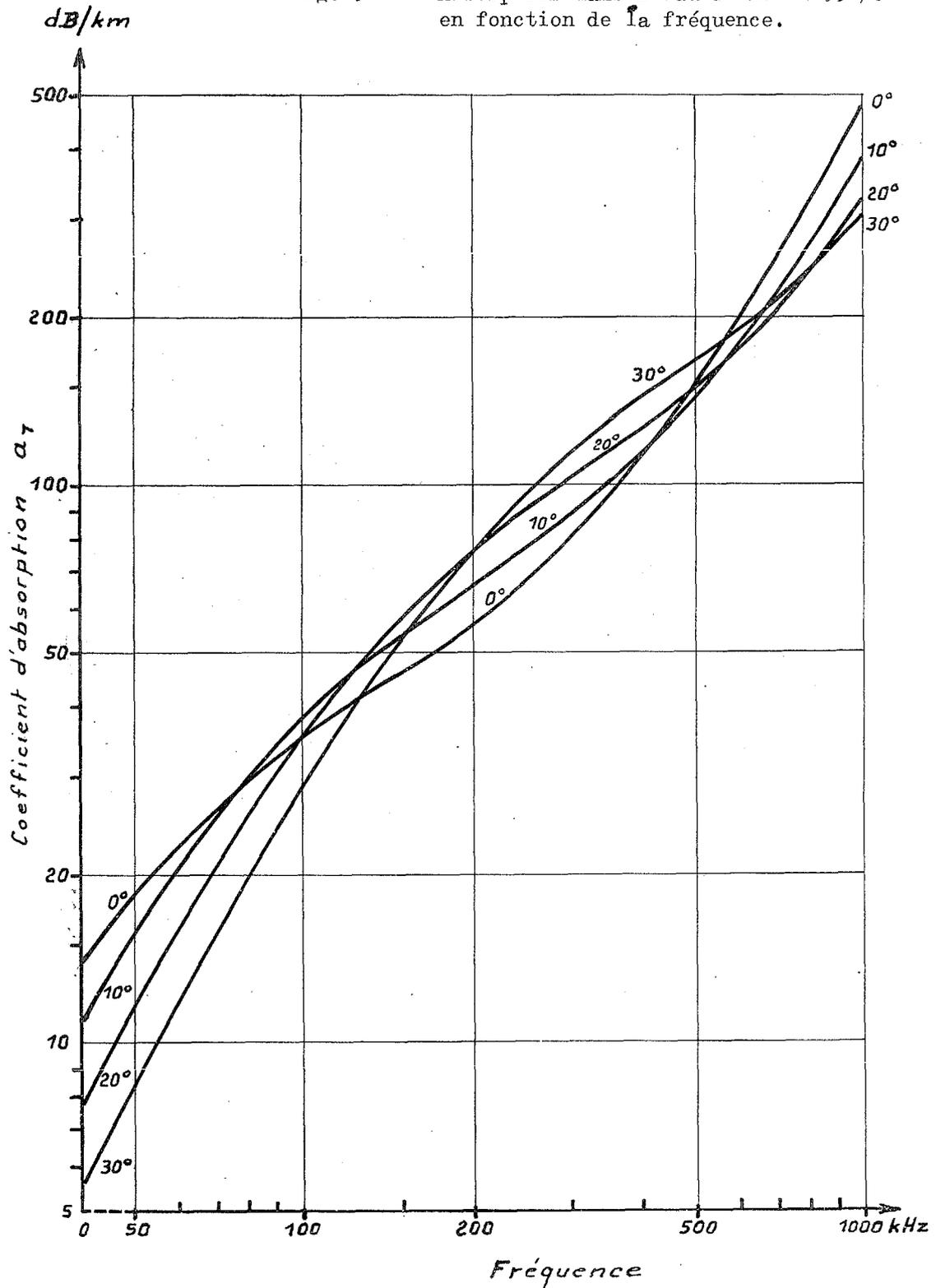
On admettra pour a_1 les valeurs proposées par SCHULKIN et MARSH (Eq-7, 1er terme), en faisant aussi quelques restrictions sur l'exactitude de ces valeurs aux basses salinités, mais dans la gamme $S = 30$ ‰ à 40 ‰ qui nous intéresse plus particulièrement, il sera tout-à-fait légitime d'adopter la proportionnalité de a_1 à la salinité.

On ne négligera pas complètement a_2 et l'on prendra $a_p + a_2 = 1,05 a_p$, quelle que soit la fréquence et indépendamment de la salinité dans la gamme ci-dessus indiquée (variation du deuxième ordre). A l'encontre de SCHULKIN et MARSH on adoptera pour a_p les valeurs moyennes trouvées en fonction de la température (pas de simplification de formule), c'est-à-



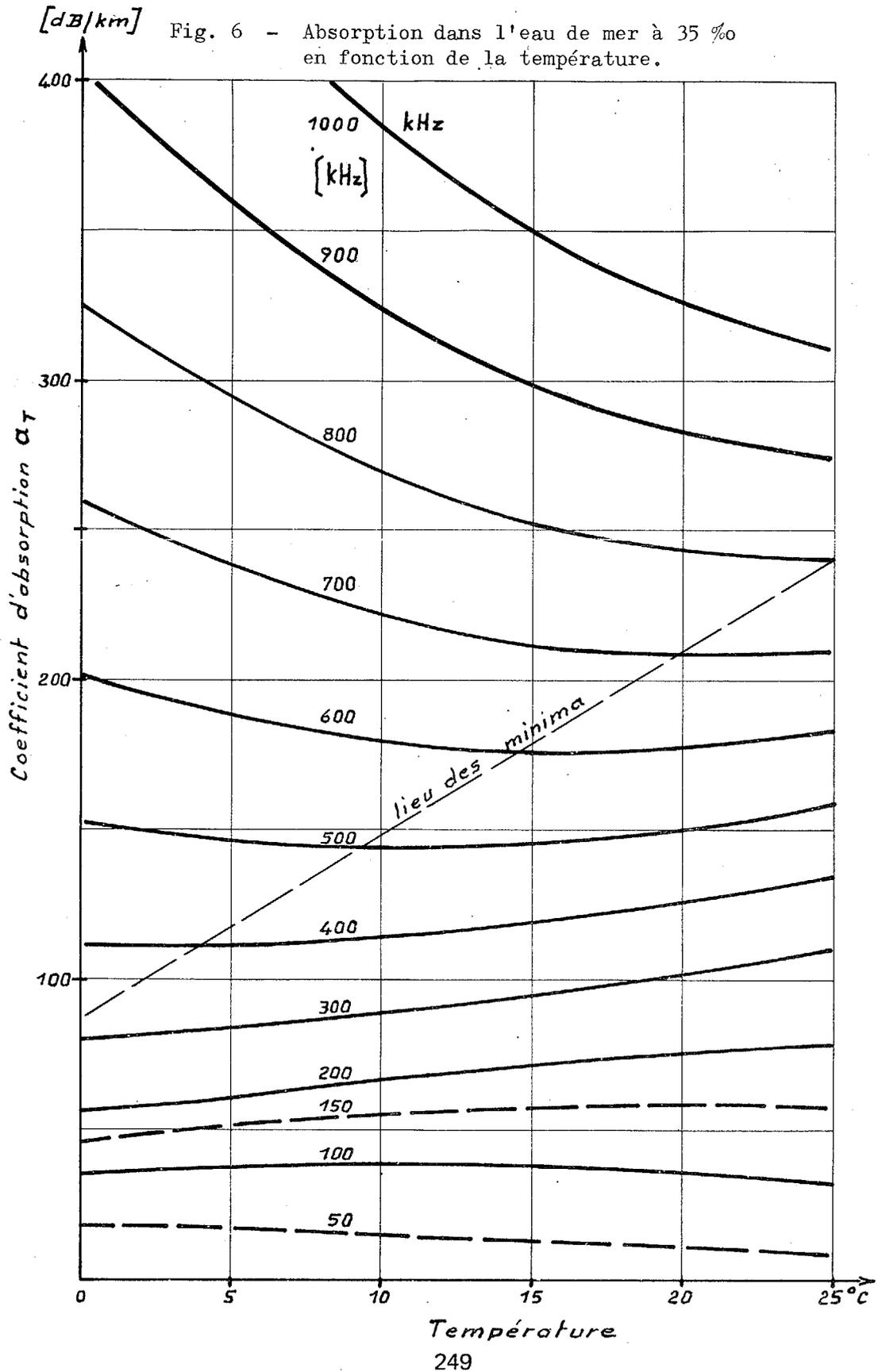
UTILISATION DE FREQUENCES ULTRASONORES

Fig. 5 - Absorption dans l'eau de mer à 35 ‰ en fonction de la fréquence.





UTILISATION DE FREQUENCES ULTRASONORES





UTILISATION DE FREQUENCES ULTRASONORES

dire les valeurs indiquées par DEL GROSSO, d'où $a_p = a_2 = Kf^2$ avec K donnée en figure 2.

Il est conventionnel de représenter l'atténuation par des courbes donnant a en fonction de f dans une échelle doublement logarithmique. Chaque courbe correspond à une température. Un jeu de courbes est donné pour chaque salinité. [6] par exemple).

La figure 5 donne ce type de représentation pour les valeurs calculées à 35 ‰ et pour quelques températures. On voit nettement l'enchevêtrement des phénomènes dans la gamme qui nous intéresse. Il nous semble instructif d'adopter une autre représentation non trouvée dans la littérature habituelle. On trouvera figure 6 l'atténuation totale pour différentes fréquences en fonction de la température, sur des échelles linéaires. Ces courbes font nettement ressortir l'influence de la température et l'existence d'un minimum d'absorption avec la température aux fréquences supérieures à 200 kHz.

2.4.2.- Influence de la salinité et de l'immersion

- a En l'absence de renseignements complémentaires, on ne peut qu'adopter en première approximation le principe de la proportionalité de a_1 à la salinité S . Pour ce qui est de $a_2 = a_p$ on pourrait évidemment introduire une variation continue avec la salinité, encore que celle-ci soit fort mal connue. Dans la pratique mieux vaut négliger a_2 .
- b Jusqu'à des profondeurs de 500 m la pression n'affecte l'absorption que de quantités inférieures à 4 %, ce qui peut être négligé. Pour les très grandes profondeurs l'absorption est diminuée substantiellement, surtout celle du ion $SO_4 Mg$. Il convient dans notre gamme de fréquence de traiter séparément a_2 et a_p selon les courbes de la figure 2_b.



UTILISATION DE FREQUENCES ULTRASONORES

3.- BRUIT DE FOND

Aux fréquences supérieures à 100 kHz il ne reste que deux sources de bruit :

- le bruit thermique
- le bruit de la pluie (source intermittente)

Toutes les autres sources : vent, vagues, trafic lointain, etc... sont négligeables.

3.1.- Bruit thermique

Le bruit thermique est dû à l'agitation moléculaire : il peut être évalué par la théorie classique. D'après MELLEND [10] la densité spectrale de la pression sonore du bruit thermique est :

$$\langle p^2 \rangle = \frac{4 \pi f^2}{c^2} k T \rho c \left(\text{dynes/cm} \right)^2 \times s. \quad (8)$$

avec f fréquence

c célérité du son

k constante de Boltzmann = $1,37 \times 10^{-16}$ erg/d° absolu

ρ densité du milieu

T température absolue

$\rho c = 1,54 \times 10^5$ g/cm² s.

Ceci donne en exprimant le niveau en décibels par rapport à 1 barye/Hz.

$$N_s = - 115 + 20 \log f \quad (9)$$

f fréquence en kHz.



UTILISATION DE FREQUENCES ULTRASONORES

Ce bruit thermique correspond au bruit de la résistance de rayonnement de l'hydrophone, et par suite le bruit total d'un hydrophone est le bruit thermique divisé par le rendement.

Des mesures réalisées en 1962 par D.H.EZROW [11] dans la bande 1-2,5 MHz ont montré une bonne concordance entre les valeurs théoriques et les résultats expérimentaux.

Notons que ce bruit est isotrope et que pour calculer le bruit ramené par un hydrophone il faut l'affecter de l'index de directivité.

3.2.- Bruit dû à la pluie

Le bruit de la pluie a été étudié par FRANZ [12] qui suppose que le bruit est produit par l'impact des gouttelettes d'eau sur la surface libre. Chaque gouttelette est une source de bruit assimilable à un doublet. Le niveau spectral pour différentes précipitations évaluées en mm d'eau par heure a été calculé entre 10 Hz et 100 kHz. Vers les fréquences élevées le niveau spectral décroît comme le bruit de la mer. En l'absence de données concernant les fréquences plus élevées, nous avons extrapolé ces courbes jusqu'à 1 MHz en supposant une décroissance de 5 dB/octave (figure 7).

La variation du niveau de bruit en fonction de la précipitation R est de la forme $K \log R$.

Si R est exprimé en mm/heure on a d'après FRANZ $K = 14,5$.

Signalons que les résultats de FRANZ ont été trouvés faibles de quelques 5 à 12 dB lors de mesures réelles effectuées par BOM [13] dans la gamme 0,3 - 10 kHz.

Ces mesures ayant été faites dans un très petit lac de faible profondeur (10 m) à fond argileux, il est possible que les niveaux mesurés aient été renforcés. Quoiqu'il en soit il eut été délicat de bâtir



UTILISATION DE FREQUENCES ULTRASONORES

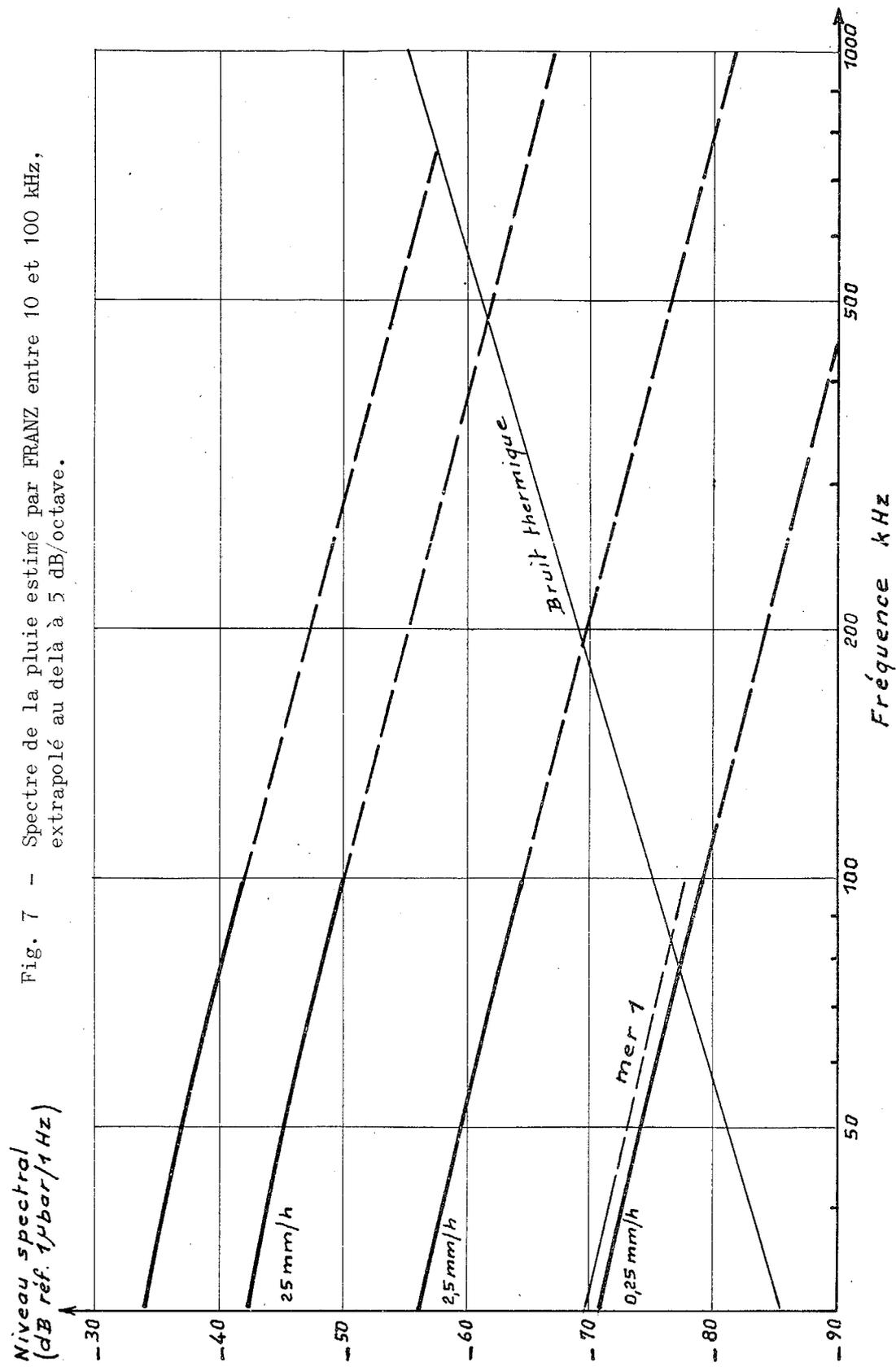


Fig. 7 - Spectre de la pluie estimé par FRANZ entre 10 et 100 kHz, extrapolé au delà à 5 dB/octave.

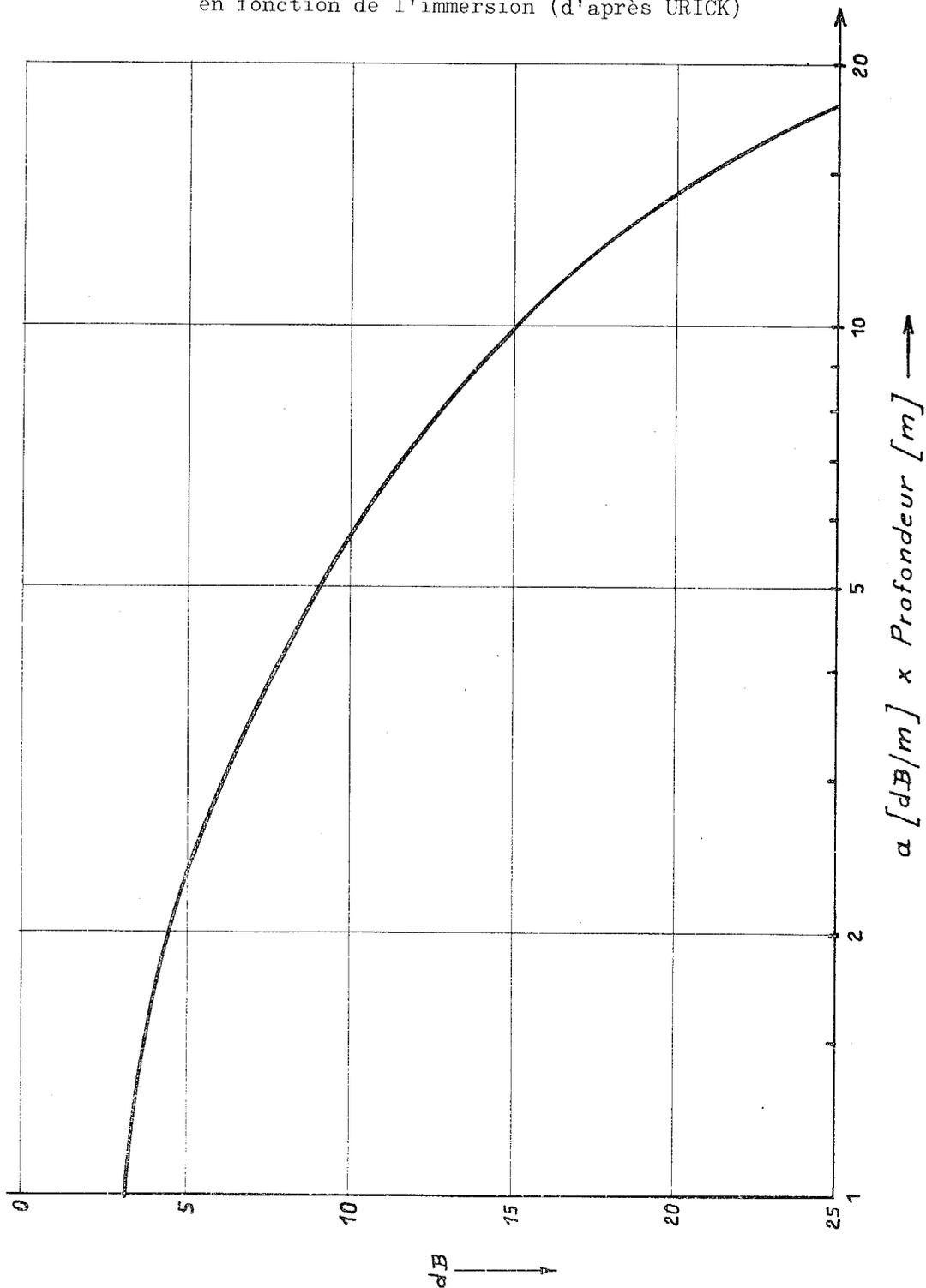
Niveau spectral (dB réf. 1 μbar/1 Hz)

Fréquence kHz



UTILISATION DE FREQUENCES ULTRASONORES

Fig. 8 - Variation du niveau de bruit de surface en fonction de l'immersion (d'après URICK)





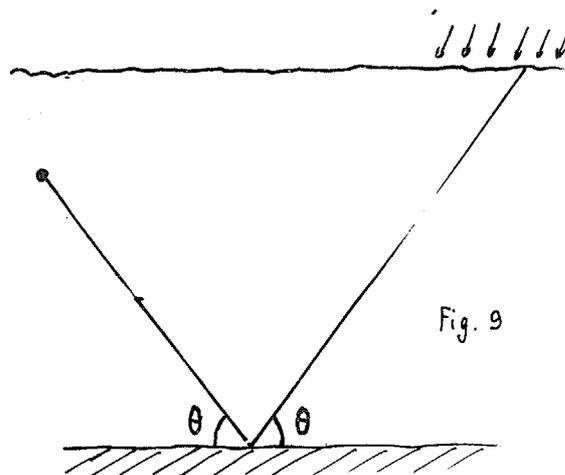
UTILISATION DE FREQUENCES ULTRASONORES

notre extrapolation à partir de valeurs à fréquences aussi basses et c'est pourquoi les résultats de FRANZ ont été retenus. Il convient à ce sujet de souligner l'extrême pauvreté des mesures recueillies sur ce sujet, ce qui est d'autant plus curieux que la mesure devrait être facile. Il serait souhaitable d'explorer ce domaine, et également de prendre pour l'évaluation de la précipitation une mesure instantanée tenant compte de la taille des gouttelettes, et non les résultats intégrés que donnent les pluviomètres classiques.

La variation du bruit de la pluie en fonction de l'immersion ne devrait dépendre que de l'absorption comme dans la théorie classique du bruit de surface de URICK [14]. Dans la gamme de fréquence envisagée ici, elle devient donc importante. Nous avons représenté sur la figure 8 la variation du niveau en fonction de l'immersion à 300 et à 500 kHz. Nous ne connaissons pas de résultats de mesures dans cette gamme de fréquence.

La directivité du bruit de la pluie n'a pas non plus été étudiée. On peut vraisemblablement la considérer comme celle du bruit de surface chaque élément ayant la directivité d'un doublet en $\cos\theta$. Dans ces conditions le bruit venant du fond serait nul. En réalité il arrive également par réflexion sur le fond mais compte tenu des coefficients d'absorption élevés il doit être rapidement négligeable.

On peut tenter d'évaluer ce niveau en supposant (Fig. 9) une perte β à la réflexion sur le fond, et un coefficient d'absorption a , sachant que le bruit maximum viendra également de la verticale et aura seulement un affaiblissement égal à $2a \frac{Z}{\cos\theta} + \beta$, où Z est





UTILISATION DE FREQUENCES ULTRASONORES

la profondeur d'eau.

En supposant le récepteur près de la surface et en prenant $\alpha = 0,1$ dB/m, $z = 100$ m, et $\beta = 10$ dB on trouvera un affaiblissement minimal de 30 dB.

Il est à penser que l'on recevra autant de bruit par les lobes secondaires que par le lobe principal et que l'amélioration de l'index de directivité ne se traduira pas par une diminution de bruit dû à la pluie.

En conclusion, malgré le niveau apparemment élevé du bruit de la pluie il est à penser qu'il ne gênera pas la réception du fait de ses caractéristiques propres. Il semble cependant souhaitable, si l'on désire un fonctionnement en cas de fortes pluies, d'étudier ce problème particulier.



UTILISATION DE FREQUENCES ULTRASONORES

4.- EFFET ENERGETIQUE DES HETEROGENEITES

4.1.- Généralités

Les différentes hétérogénéités rencontrées au sein de l'eau de mer agissent sur la propagation de façons diverses et complexes. Le chapitre 6 traitera spécialement des variations d'index de réfraction et de leurs conséquences sur la cohérence des signaux reçus après un certain parcours en milieu marin. Nous ne considérerons ici que l'aspect énergétique de l'effet des particules et autres hétérogénéités.

Les phénomènes en jeu sont imbriqués, mais on peut considérer deux types d'action :

- L'oscillation des particules entraînées dans un mouvement vibratoire lors du passage de l'onde sonore : A cause des frottements en jeu ce phénomène dissipe de l'énergie, d'où une véritable atténuation venant s'ajouter à l'absorption proprement dite

A ce même type de phénomènes il faut rattacher les turbulences possibles créées autour des particules, avec dissipation d'énergie.

- La diffusion du son par les particules situées dans le champ sonore. Cette diffusion peut absorber de l'énergie s'il y a vibration, mais elle se traduira surtout par une redistribution d'énergie dans tout l'espace. S'il s'agit d'un faisceau sonore étroit on peut donc observer une perte énergétique par diffusion hors du faisceau.

De même on pourra observer une diffusion vers la source (rétrodiffusion ou réverbération) qui viendra s'ajouter au bruit pour masquer le signal. Notons finalement qu'aux fréquences considérées il peut y avoir des phénomènes de radiation résonnante lorsque les particules sont élastiques ou sont constituées par des bulles d'air.



UTILISATION DE FREQUENCES ULTRASONORES

4.2.- Absorption par les particules

La théorie de l'absorption par le frottement visqueux des particules a été développée par URICK [15]. La théorie s'applique surtout aux mélanges liquides-solides proches des sédiments, mais elle peut s'invoquer dans certains cas de forte concentration en particules.

En général, les particules normalement en suspension dans l'eau de mer sont de dimensions et concentration faibles. Un certain nombre d'expériences ont été faites pour étudier l'effet des particules propres à l'eau de mer, à savoir celles d'origine biologique (plancton, algues, etc.). On trouvera notamment dans la littérature une série d'articles assez complexes écrits par MEISTER en collaboration avec différents autres auteurs [16.17.18]. Le dernier en date récapitule plus clairement les essais effectués.

Les auteurs ont avant tout essayé de couvrir par leurs recherches des particules de nature et de rigidité différentes.

Les particules étudiées sont petites et la fréquence a été poussée jusqu'à des longueurs d'onde aussi basses que leurs dimensions. On a étudié des diatomées, des algues microscopiques, et des oeufs d'artemia (crevettes), en suspension dans l'eau pure. Les quantités mesurées sont présentées sous forme d'atténuation totale A ou d'"excès" d'absorption ($A - a_p$).

a) Diatomées : De dimensions de l'ordre de 25 à 35 μ , ils n'ont causé aucun excès d'absorption mesurable au-dessous de 1 MHz.

Vers 50 MHz on observe pour des concentrations très élevées, non trouvées dans l'eau de mer normale, une variation de $A - a_p$ suivant f^2 .



UTILISATION DE FREQUENCES ULTRASONORES

- b) Microalgues : Le type étudié (*Scenedesnus*) se rassemble en agrégats de 50 μ de diamètre.

L'atténuation totale suit une loi en f^2 de 0,5 à 20 MHz et varie avec la température comme l'absorption en eau pure.

On n'obtiendrait un effet à considérer (5 % d'excès d'absorption) que pour des concentrations de 0,2 g/l, c'est-à-dire 20.000 fois supérieure à la valeur normale dans l'eau.

- c) Oeufs d'*artemia* : Ce sont essentiellement des coquilles sphériques ($D \sim 230 \mu$) et de 5 μ d'épaisseur. L'effet d'atténuation est différent de celui observé avec les autres particules biologiques :

Pour des concentrations suffisantes, on observe une variation en $f^{3/2}$ avec une résonance autour de 10 MHz (Fig. 10). Les mêmes oeufs scindés donnent lieu à une atténuation bien moindre. Là encore il faudrait une concentration inhabituelle pour obtenir un effet nuisible dans l'eau de mer.

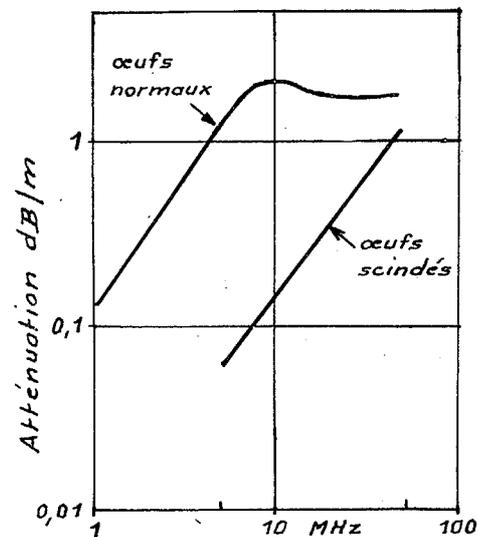


Fig. 10 Atténuation par les oeufs d'*artemia* (1g/l)

Les mécanismes entrant en cause dans les phénomènes précédents semblent exclure une diffusion du type de RAYLEIGH [19] qui se traduit par une variation de a selon la puissance 4ème de la fréquence. Dans les cas a) et b) il semble que l'on soit en présence de phénomènes de frottements visqueux (URICK [15]). Dans le cas c) la résonance correspond à $\lambda = \frac{4}{3} D$, ce qui est en accord avec une théorie de SEWELL et



UTILISATION DE FREQUENCES ULTRASONORES

LOWAN [20] relative à une forme de diffusion.

Il semble bien acquis que l'on trouve en fin de compte très peu d'excès d'absorption en eau libre, la concentration en particules étant faible. Par contre, toutes les théories prédisent une forte atténuation en eau troublée. La théorie de URICK en particulier est à considérer dans les cas extrêmes constitués par les boues. Il est donc très important d'éviter de perturber les couches de vases lors de l'emploi d'ultrasons au voisinage du fond de la mer.

4.3.- Effet de l'air contenu dans l'eau.

L'air dissous dans l'eau ne provoque aucun effet mesurable. Par contre, des bulles d'air peuvent entraîner une atténuation et une diffusion appréciables.

On admet, voir par exemple URICK [14], que l'atténuation produite par un écran de bulles de concentration n est de la forme :

$$a(\text{dB}) = 4,34 n (\sigma_a + \sigma_d) \quad (10)$$

où σ_a et σ_d sont respectivement les sections droites d'"atténuation" et de "diffusion" données par les formules :

$$\sigma_a = \frac{4\pi D^2 (\delta c / 2\pi f_R D - 1)}{(f_R^2 / f^2 - 1)^2 + \delta^2} \quad (11)$$

$$\sigma_d = \frac{4\pi D^2}{(f_R^2 / f^2 - 1)^2 + \delta^2} \quad (12)$$

avec f_R fréquence de résonance : $f_R (\text{KHz}) \sim \frac{3,26}{D(\text{mm})} \sqrt{P(\text{kg cm}^2)}$
 D diamètre des bulles
 δ coefficient d'amortissement.



UTILISATION DE FREQUENCES ULTRASONORES

On constate que des bulles d'un diamètre de l'ordre de 50 à 5 μ interviennent pour l'atténuation dans la gamme des fréquences étudiées. Là encore la concentration est telle que l'effet est faible en eau normale, mais il n'en est plus de même près d'une surface agitée ou en présence de systèmes générateurs de turbulences.

4.4.- Réverbération

Lors de phénomènes de diffusion une partie de l'énergie est rérayonnée vers la source (rétrodifusion ou réverbération). Pour un écran de bulles on aurait par exemple pour l'index de réverbération de volume S_v :

$$S_v = 10 \log \frac{n \sigma_d}{4\pi} \quad (13)$$

où σ_d est donné par (12)

La réverbération de volume en mer par des bulles de gaz est en fait plus importante aux fréquences basses : Elle est due aux poches gazeuses, de grandes dimensions, que constituent les vessies natatoires des poissons.

La réverbération peut par contre provenir aux fréquences élevées des petites particules en suspension, mais les effets de résonance sont rares. Il existe peu de données, mais la tendance des courbes de réverbération relevées en mer de 10 à 80 kHz dans des conditions de propagation normale (eau libre) n'indique qu'une très faible augmentation de l'index avec la fréquence : On observerait même une très légère décroissance au-delà de 50 kHz [14]



UTILISATION DE FREQUENCES ULTRASONORES

5.- REVERBERATION PAR LES FRONTIERES

C'est en général la réverbération de fond qui sera le plus susceptible de gêner les systèmes utilisant les très hautes fréquences.

Etant donné les faibles portées en jeu, l'emploi près de la surface de faisceaux ultrasonores pouvant intercepter celle-ci est plus rare. Nous ne ferons donc qu'ébaucher le problème de la réverbération de surface.

5.1.- Réverbération de surface

Il existe une importante littérature concernant la réverbération de surface (Voir par exemple les références [14-21]). URICK distingue judicieusement trois mécanismes contribuant à la réverbération de manière différente selon les angles de rasance (Fig. 11).

La zone II correspond à la réverbération par des rugosités de dimensions comparables à la longueur d'onde, ce qui n'est plus tout-à-fait le cas aux fréquences ultrasonores.

La zone I correspondrait à l'effet des bulles d'air en suspension près de la surface. Cet effet risque d'être important lors de l'emploi des ultrasons.

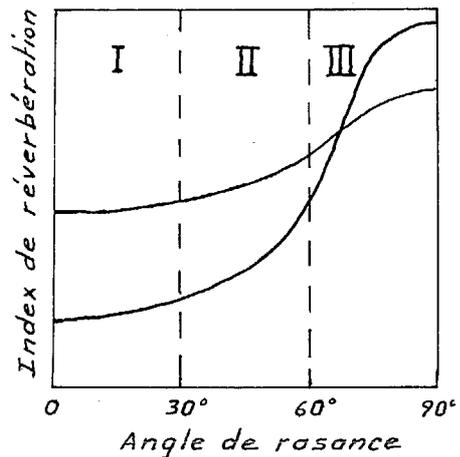


Fig. 11 - Exemple de courbes de réverbération.

La réverbération dans la zone III est attribuée surtout à un effet de réflexions pures sur des facettes. Celles-ci seront plus nombreuses mais plus petites pour les faibles longueurs d'onde.



UTILISATION DE FREQUENCES ULTRASONORES

L'examen des courbes donnant l'index de réverbération en fonction de la fréquence pour différents angles de rasance entre 10 et 70°, semble effectivement indiquer une convergence vers une valeur moyenne dépendant peu de la rasance, et de l'ordre de -20 dB à 200 kHz pour un vent de 20 noeuds.

L'index ne devrait plus guère varier pour des fréquences plus élevées, mais rester fonction de l'état de la mer et de la couche de bulles.

5.2.- Réverbération de fond

Le problème de la réverbération de fond est extrêmement complexe et les index varient dans une très large gamme selon la nature et le relief du fond, l'angle de rasance, et (à un degré moindre) la fréquence : Voir par exemple les références [14, 22]. La tendance actuelle est de considérer que le relief a plus d'importance qu'on ne l'avait escompté dans les premières recherches, où l'on s'attachait surtout à établir des corrélations avec la constitution du fond.

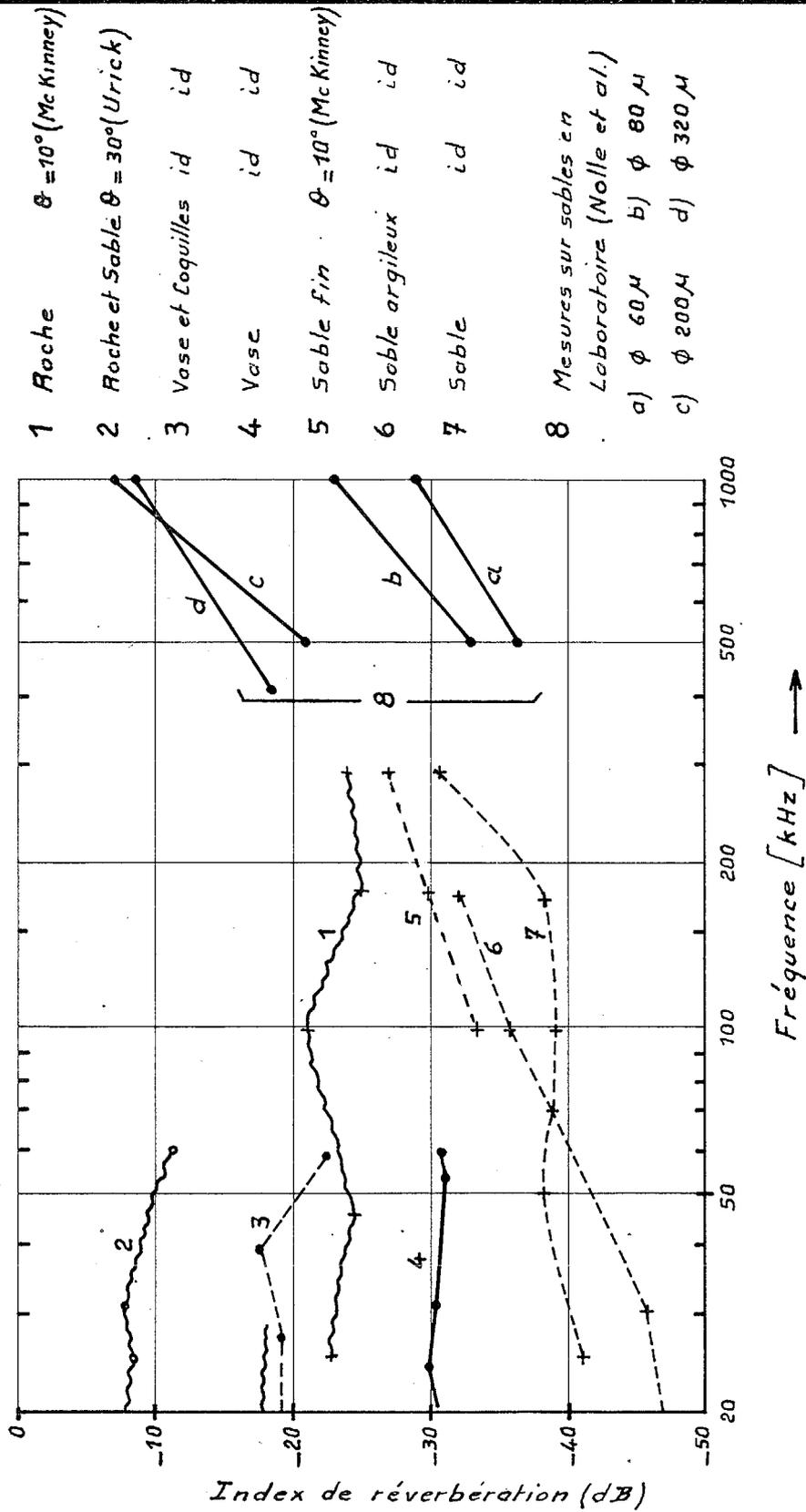
Pour les fréquences ultrasonores, où l'absorption dans les sols est très élevée, la rugosité de l'interface a certainement une importance accrue, et le microrelief intervient plus.

La figure 12 donne des index de réverbération (rétrodiffusion) à 30 et 10° de rasance en fonction de la fréquence.

Elle illustre la grande dispersion des résultats. On notera en particulier la variation de l'index de réverbération avec la taille moyenne des grains de sable pour des fonds sablonneux reconstitués en Laboratoire (NOLLE et al., Réf. [23]).

UTILISATION DE FREQUENCES ULTRASONORES

Fig. 12 - Réverbération de fond aux fréquences élevées.

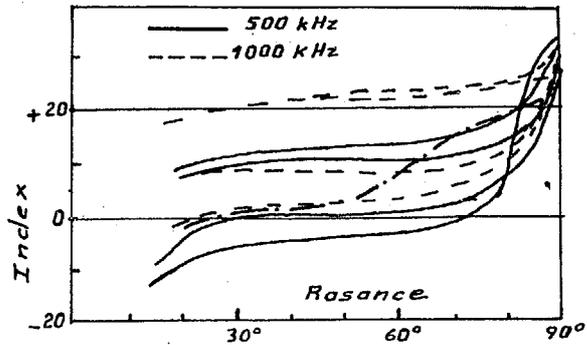




UTILISATION DE FREQUENCES ULTRASONORES

Notons que ces auteurs ont observé une très grande variation de l'index de réverbération quand on se rapproche de l'incidence verticale.

(Figure 13)



On peut dire pour conclure que la réverbération de fond risque de gêner les systèmes ultrasonores de façon croissante lorsque l'on passe des fonds argileux aux fonds sableux à grains de plus en plus grossiers, puis aux fonds rocheux..



6.- PROBLEMES LIES A LA COHERENCE DU MILIEU

6.1.- Généralités

Le milieu marin n'est pas homogène et lorsqu'on effectue des mesures précises de la célérité du son le long d'une droite, on s'aperçoit que de légères fluctuations affectent la valeur moyenne. La propagation dans un milieu dont l'indice de réfraction n'est pas homogène a été étudiée de façon très complète par de nombreux auteurs [24,25,26;27,28].

La distorsion du champ sonore qui en résulte peut être décrite en termes de fluctuations d'amplitude et de phase dans le cas d'une onde monochromatique. L'étude de la distribution de ces fluctuations dans le temps et dans l'espace permet une connaissance statistique complète du phénomène.

Nous appliquerons ici directement les résultats du centre de la Spezia qui ont été établis dans le cas de la propagation d'ondes sonores en milieu marin [27,28,29].

6.2.- Etude des fluctuations de la célérité du son

Les résultats expérimentaux sur les fluctuations de la célérité du son sont assez rares.

Rappelons ceux de LIEBERMANN [30], dont les mesures ont été faites en relevant la température de l'eau à l'aide d'un thermomètre rapide très sensible installé sur un sous-marin navigant entre 30 et 60 m. Il a ainsi obtenu une valeur quadratique moyenne relative de célérité $\frac{\bar{\mu}^2}{\mu^2} = 5 \times 10^{-9}$ avec une fonction de corrélation spatiale de la forme $e^{-|x|/a}$ avec $a = 60$ cm, ou de la forme $e^{-\frac{x^2}{a}}$. Ces résultats

semblent assez contestables car les fluctuations rapides de célérité sont dues vraisemblablement à la turbulence de l'eau liée aux mouvements du sous-marin.



UTILISATION DE FREQUENCES ULTRASONORES

FORTUIN [28] propose une valeur de $\bar{\mu}^2 = 5 \times 10^{-9}$ avec $a = 2$ m. Ces valeurs sont confirmées par les mesures réalisées en Méditerranée [29] et semblent plus près de la réalité.

6.3.- Fluctuations en amplitude et en phase

L'évaluation des fluctuations s'effectue en supposant que la fonction de corrélation dans l'espace de la célérité est gaussienne et isotrope.

$$N = e^{-\frac{x^2}{a^2}}$$

La distance de corrélation a est supposée grande devant la longueur d'onde, et la distance entre la source (supposée ponctuelle) et le point de mesure, grande devant a . Toutes ces hypothèses sont vérifiées assez généralement.

LAVAL et FORTUIN définissent une fréquence de coupure f_c telle que

$$\frac{4 L}{k_c a^2} = 1$$

L : distance à laquelle on effectue la mesure

k_c : nombre d'ondes à la fréquence f_c ($k_c = \frac{2\pi}{\lambda_c}$)

Les propriétés des fluctuations de phase et d'amplitude diffèrent suivant que l'on se trouve très au-dessous ou très au-dessus de cette fréquence.

En prenant $L = 100$ m et $a = 2$ m

$$f_c = \frac{4 L c}{2\pi a^2} = 25 \text{ kHz.}$$



UTILISATION DE FREQUENCES ULTRASONORES

Le domaine des fréquences ultrasonores étudié se situe donc en général dans celui des fréquences élevées où

$$D = \frac{4L}{k a^2} \ll 1$$

Dans ces conditions, les fluctuations d'amplitude sont indépendantes de la fréquence, et la fluctuation de phase est proportionnelle à la fréquence, ce qui provoque donc une fluctuation de temps de propagation. Ceci correspond bien au domaine géométrique où l'on peut expliquer l'action du milieu par la théorie des rayons sonores.

La fluctuation du temps de propagation est alors une variable aléatoire gaussienne définie par son carré moyen.

$$\overline{\tau^2} = \frac{1}{c^2} \mu^2 L a \sqrt{\pi}$$

La fonction de corrélation spatiale de ces fluctuations décroît très lentement le long d'un rayon. Dans une direction perpendiculaire à la direction de propagation et toujours dans l'hypothèse des fréquences élevées, la fonction de corrélation spatiale des fluctuations est la même que celle des variations de célérité (CHERNOV) et l'on peut considérer que sur toute la surface d'une base dont les dimensions sont de l'ordre de grandeur de 1 m, elles sont parfaitement corrélées pour $a = 2$ m.

Évaluons la valeur de $\overline{\tau^2}$ à 100 m pour une valeur de μ^2 de 50×10^{-10} avec $a = 2$ m

$$\overline{\tau^2} \approx 10^{-12}$$

Cette valeur relativement élevée ne peut pas cependant perturber les phénomènes, car cette fluctuation est corrélée sur toute la base.

UTILISATION DE FREQUENCES ULTRASONORESREFERENCES

- 1 L'Amortissement du Son en Milieu Marin
B. GRANDVAUX
Bulletin d'Acoustique Marine, 2, 1, Mars 1959.
- 2 Sound Attenuation between 200 and 10.000 Hz Measured along
Single Paths.
C.C. LEROY
SACLANTCEN Tech. Rep.43, Sept. 1965.
- 3 Deep-Ocean Sound Attenuation in the Sub. and Low Kilocycle.
per Second Region
W.H. THORP
J.A.S.A., 38, 4, p. 648-654, Oct. 1965.
- 4 The origin of Ultrasonic Absorption in Water
L. HALL
Phys. Rev., 73, p. 775, etc..., 1948.
- 5 BROWNING, THORP et MELLEN
Communication au 6e Congrès International d'Acoustique
Tokyo, Août 1968.
- 6 Dependence of Sound Absorption on Concentration, Frequency, and
Temperature in $MgSO_4$ Solutions Equivalent to Sea Water.
V.A. DEL GROSSO
N.R.L. Report 4279, Janv. 1954.
- 7 Absorption of Sound in Sea Water
M. SCHULKIN et H.W. MARSH
J.E.R.E., 25, 6, p. 493-500, Juin 1963.
- 8 Measurements of Sound Absorption in Water and Aqueous Solutions
of Electrolytes.
O.B. WILSON et R.W. LEONARD
J.A.S.A., 26, p. 223, etc..., 1954.
- 9 Effect of High Pressure on Sound Absorption and Chemical
Equilibrium
F.H. FISHER
J.A.S.A., 30, p. 442, etc..., 1958.
- 10 The Thermal Noise Limit in the Detection of Underwater Acoustic
Signals
Robert H. MELLEN
J.A.S.A., 24, p. 478, etc..., Sept. 1952.



UTILISATION DE FREQUENCES ULTRASONORES

-
- 11 Measurement of the Thermal Noise Spectrum of Water
D.H. EZROW
J.A.S.A., 34, 5, p. 550, Mai 1962.
 - 12 Splashes as Sources of Sound in Liquids
G.J. FRANK
J.A.S.A., 31, 8, p. 1080. etc... Août 1959.
 - 13 Effect of Rain on Underwater Noise Level
Nicolaas BOM
J.A.S.A., 45, 1, p. 150-156, Janv. 1969.
 - 14 Principles of Underwater Sound for Engineers
Robert J. URICK
Mc Graw-Hill Book Company, New York 1967.
 - 15 The absorption of Sound in Suspensions of Irregular Particles
R.J. URICK
J.A.S.A., 20, p. 283, etc..., 1948.
 - 16 Ultrasonic Absorption and Velocity in Water containing Algae
in Suspension
Robert MEISTER and Rodrigue St-LAURENT
J.A.S.A., 32, 5, p. 556-559, Mai 1960.
 - 17 Ultrasonic Attenuation in Water containing Brine Shrimp in
Suspension
George J. GRUBER et Robert MEISTER
J.A.S.A., 33, 6, p. 733-740, Juin 1961.
 - 18 Ultrasonic Absorption in Water containing Plankton in Suspension
John D. WATSON et Robert MEISTER
J.A.S.A., 35, 10, p. 1584-1589, Oct. 1963.
 - 19 The Theory of Sound
J. STRUTT (Lord RAYLEIGH)
Dover Publications, New York, 1945.
 - 20 Scattering and Radiation from Circular Cylinder and Spheres
A.N. LOWAN et al.
M.I.T. Underwater Sound Lab., Fév. 1945 et
C.T.T. SEWELL, Phil. Trans. Roy. Soc., 210, Londres, 1910.
 - 21 Diffusion des Ondes Acoustiques par la Surface de la Mer
C. GAZANHES
Bulletin d'Acoustique Marine, 2, 4, Dec. 1969.
 - 22 Réflexion et Diffusion des Ondes Acoustiques par le Fond de la Mer
B. LALLEMENT et C.C. LEROY
Bulletin d'Acoustique Marine, 3, 3, Sept. 1970.



UTILISATION DE FREQUENCES ULTRASONORES

-
- 23 Acoustical Properties of Water-Filled Sands
A.W. NOLLE et al.
J.A.S.A., 35, 9, p. 1394-1408, Sept. 1963.
 - 24 Wave Propagation in a Random Medium
Lev. A. CHERNOV
Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1960.
 - 25 Wave Propagation in a Turbulent Medium
V.I. TATARSKI
Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1961.
 - 26 Transformation Aléatoire des Signaux par la Propagation
R. LAVAL
Cours d'Eté OTAN - Marine Nationale, Grenoble, 1964.
 - 27 Coherence Problems in Underwater Acoustic Propagation
R. LAVAL
NATO - Marina Italiana Advanced Study Institute
LERICI 1967.
 - 28 Impulse Response of a Random Medium
L. FORTUIN
LERICI. 1967.
 - 29 Experimental Study of Coherence in Underwater Acoustics
D.J. PARKES et M. PAZZINI
LERICI, 1967.
 - 30 Effect of Temperature Inhomogeneities in the Ocean
on the Propagation of Sound
L.J. LIEBERMANN
J.A.S.A., 23, p. 563, etc..., 1951.