

Diffusion des ondes ultrasonores
par le fond marin
en fonction de la granulométrie

Diffusion of ultrasonic waves by the sea bottom. Influence of the mean grain size



Jean-Paul LONGUEMARD

Laboratoire d'Électronique et de Physique Appliquée, École Centrale, Grande Voie des Vignes, 92290 CHÂTENAY-MALABRY

Professeur des Universités, J.-P. Longuemard a fondé le LMAI. Une des activités essentielles de ce laboratoire concerne l'acoustique sous-marine et la conception de vecteurs sous-marins en appui sur les fonds. Une des applications consiste à réaliser un système complet (véhicule et senseur) de contrôle des qualités mécaniques ou géoacoustiques des sédiments marins. Il dirige actuellement le laboratoire d'électronique à l'École Centrale.



Alain GOUTIÈRE

Laboratoire de Mécanique, d'Acoustique et d'Instrumentation (LMAI), Université de Perpignan, avenue de Villeneuve, 66025 PERPIGNAN

Travaux sur la fluidisation d'un sédiment marin sous l'effet de la houle. Étude des corrélations entre les paramètres d'une onde ultrasonore et les caractéristiques géotechniques et mécaniques du sédiment insonifié.

RÉSUMÉ

Une onde ultrasonore incidente en interaction avec un fond marin provoque différents types d'ondes diffusées fonction de la fréquence ultrasonore, de la dimension moyenne des sables (granulométrie) qui détermine une certaine rugosité et des caractéristiques géométriques de la zone soumise aux vibrations.

Les résultats obtenus, pour des longueurs d'ondes grandes devant la dimension des particules, confirment que le niveau des ondes diffusées est maximal lorsque la fréquence ultrasonore F est liée aux modes granulométriques Q_2 par une équation de la forme: $F = a + b \log Q_2$.

La valeur des paramètres a et b découle des conditions d'essais. Deux applications, contrôlées par des expériences, sont présentées: la détermination *in situ* des modes granulométriques des sables sous-marins et la réduction du coefficient du frottement d'une plaque glissant sur un sable (ou ski) par l'emploi d'ultrasons. La face de la plaque en contact avec le sédiment sert alors de face parlante.

MOTS CLÉS

Ultrasons, médiane granulométrique, contrôle par ultrason.

SUMMARY

*An ultrasonic wave in interaction with the sea bottom generates some characteristic waves (reflected-refracted and scattering waves). The authors describe the behaviour of scattering wave according to the frequency of the acoustic wave and to the mean grain size (Q_2). The geometry of the area subjected to the ultrasound are also taken into account for the equation. The datas obtained for wavelengths that are long in ration to the mean grain size, give the following conclusion: the peak of the scattering wave is at its highest when the acoustic frequency (F) is in correlation to Q_2 in the equation $F = a + b \log Q_2$. Two applications are described: the determination *in situ* of Q_2 and the reduction of the friction of a ski on the sea bed. The face of the ski in contact with the sand is a generator of ultrasonic waves.*

KEY WORDS

Ultrasonics, mean grain size, ultrasonic control.

TABLE DES MATIÈRES

- 1. Introduction
- 2. Sonde placée à une distance r_0 au-dessus du fond
- 3. Émission placée au contact du sable
- 4. Discussion
- 5. Conclusion
- Bibliographie

1. Introduction

Le niveau d'énergie des ondes ultrasonores, renvoyées par le fond marin, dépend de plusieurs phénomènes physiques dont deux (réflexion-diffusion) sont particulièrement intéressants vis-à-vis du comportement mécanique de l'interface eau-sédiment.

Les niveaux de ces différents types d'ondes dépendent de plusieurs caractéristiques qui sont représentatives du fond marin et des conditions de fonctionnement du matériel utilisé. Il semble donc logique d'utiliser les variations de ce dernier en vue de concevoir un système de cartographie automatisé, à partir d'un vecteur (ou support) navigant près (ou sur le) du fond par exemple.

Dans cet objectif, il convient donc de traiter séparément chacune de ces possibilités en vue de définir les caractéristiques du système chargé de traiter et d'enregistrer les informations captées.

L'amplitude des ondes réfléchies sous incidence verticale (Loi de Descartes) qui découle des masses volumiques ρ des milieux concernés et, dans les sédiments marins, de la célérité des ondes de compression est également corrélée à ρ [1, 4, 5, 9, 11]. Cette possibilité déjà présentée par ailleurs ne sera pas étudiée ici; par contre, une analyse du niveau des ondes diffusées en fonction de la fréquence ultrasonore des caractéristiques du fond et du trajet acoustique est à analyser.

L'onde diffusée par un sable unimodal de mode granulométrique Q_2 est étudiée avec les hypothèses simplificatrices suivantes: les grains superficiels (responsables de la diffusion) reposent librement sur le fond et sont indépendants les uns des autres. Ils sont sphériques et de diamètre Q_2 .

L'énergie reçue par un grain est fonction de la fréquence F de l'onde incidente et éventuellement des paramètres géométriques relatifs à la position du grain par rapport à la source émissive. Pour une énergie reçue donnée, un grain renvoie une énergie fonction de F et de Q_2 , soit $\Phi(F, Q_2)$. L'intensité sonore totale I_T de l'onde diffusée par le fond, et captée en un point, est égale à la somme des intensités sonores

partielles en ce point des ondes diffusées par les grains superficiels de la surface S insonifiée. L'influence de F sur I_T pour Q_2 donné est étudiée selon deux processus expérimentaux: la source est à une certaine distance r_0 du fond, puis au contact du fond. Une application correspondant à chacun de ces cas est décrite: détermination de Q_2 et réduction du frottement d'un ski glissant sur le fond.

2. Sonde placée à une distance r_0 au-dessus du fond (fig. 1)

Si l'on considère les grains situés à la surface libre (ils peuvent même être en mouvement) et si chacun d'entre eux est soumis à une pression acoustique fonction de la distance et du lobe de rayonnement représenté par $g(\theta, F)$ (fig. 1), un grain n situé à la distance r d'une source émettant une onde sphérique produit une onde diffuse dont l'intensité (I_D) sera définie par [6, 7]:

$$(1) \quad I_D = \frac{P_0^2}{2Zr^2} \Phi(Q_2, F) \cdot g(\theta, F),$$

où P_0 est l'amplitude de l'onde émise, Z est l'impédance caractéristique, $\Phi(Q_2, F)$ peut prendre deux aspects suivant la longueur d'onde λ . Nous retiendrons ici, pour λ très supérieur à Q_2 :

$$\Phi(Q_2, F) \simeq 1 + k Q_2^2 F^2,$$

où k est une constante:

$$g(\theta, F) = \left[\frac{2J_1((\pi D/\lambda) \sin \theta)}{(\pi D/\lambda) \sin \theta} \right]^4.$$

Le nombre de grains de sable, pour un sédiment unimodal, est inversement proportionnel au carré de la médiane granulométrique Q_2 . L'énergie totale produite par une surface S et captée à proximité de la source vaudra:

$$(2) \quad I_T = \iint_S \frac{P_0^2}{2Zr^4} \cdot \Phi(Q_2, F) \cdot g(\theta, F) \cdot \frac{k_1}{\pi Q_2^2} ds.$$

Dans le cas particulier d'une source circulaire, il est possible d'écrire ds en coordonnées polaires (ρ, α) (fig. 1):

$$ds = \rho d\rho d\alpha \quad \text{avec} \quad \rho = r_0 \operatorname{tg} \theta,$$

d'où:

$$ds = \frac{r_0^2 \sin \theta}{\cos^3 \theta} d\theta d\alpha,$$

or:

$$r = r_0 (\cos \theta)^{-1}$$

et α varie de 0 à 2π , donc:

$$(3) \quad I_T = \frac{P_0^2}{2Zr_0^2} \frac{k_1}{Q_2^2} \Phi(Q_2, F) \int_0^{\theta_0} g(\theta, F) \sin 2\theta d\theta,$$

DIFFUSION PAR DES INHOMOGÉNÉTÉS

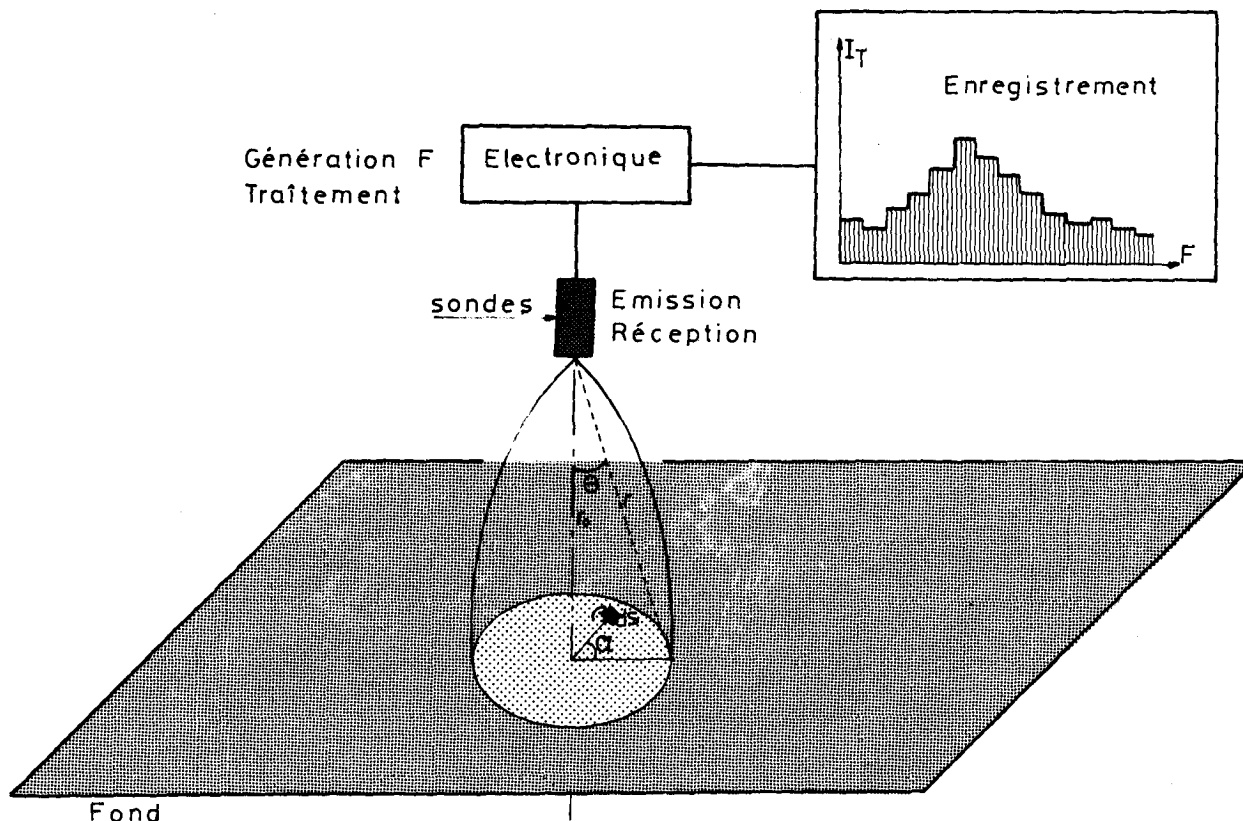


Fig. 1. - Schéma des essais.

θ_0 est défini par convention par le lobe de rayonnement à -3 dB, doit :

$$(4) \quad \theta_0 = \arcsin 0,51 \frac{D}{\lambda},$$

D est le diamètre de la source, λ est la longueur d'onde.

L'équation (3) a pour expression :

$$(5) \quad I_T = \frac{P_0^2}{2Zr_0^2} \cdot \frac{k_1}{Q_2^2} \cdot \Phi(Q_2, F) \\ \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^n} \sin \left[2\theta + (n-2) \frac{\pi}{2} \right] \cdot g^{(n-1)}(\theta, F),$$

où : $g^{(n-1)}(\theta, F)$ est la $(n-1)$ -ième dérivée de $g(\theta, F)$. Nous nous proposons, à ce stade de l'étude d'effectuer une analyse du comportement physique des phénomènes en cause et de conforter celle-ci par une vérification expérimentale.

Un double effet fonction de la fréquence acoustique a lieu :

- croissance de $\Phi(Q_2, F)$ avec F et Q_2 ;
- décroissance de $g(\theta, F)$ avec F .

La relation (5) établie dans le cas d'un système fonctionnant en laboratoire ne correspond pas exactement aux utilisations en nature où il serait plus logique de considérer une surface $S(F)$ décroissante avec F pour

laquelle on aurait défini une section S_0 d'intersection avec le fond. Une telle formulation peut conduire à un développement en série susceptible de prendre en compte la décroissance de S avec F :

$$(6) \quad S(r, F) = S_0(r_0) \left(1 + \sum_0^n \frac{a_n}{F^n} \right),$$

$S_0(r_0)$ correspond à la section soumise aux ultrasons pour $\theta = \theta_0$ à la fréquence la plus basse.

La fonction $\Phi(Q_2, F)$ également établie pour des cas simples se résume à une fonction croissante de $\Phi(Q_2, F)$ avec Q_2 et F soit :

$$\Phi(Q_2, F) \simeq 1 + k \varphi(Q_2, F).$$

En utilisant ces deux dernières relations simplifiées, il vient :

$$I_T \simeq S_0(r_0) \left(1 + \sum_0^n \frac{a_n}{F^n} \right) [1 + k \varphi(Q_2, F)].$$

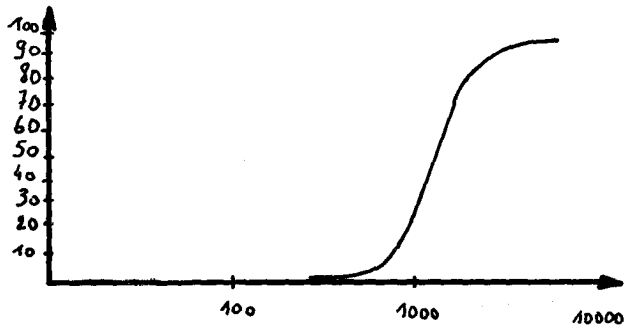
La granulométrie étant une constante (donnée physique) on peut faire varier la fréquence F avec un système à balayage, on obtiendra une intensité maximale pour :

$$\left(\sum_0^n -n \frac{r_n}{F^{n+1}} \right) (1 + k \varphi(Q_2, F)) \\ + \left(1 + \sum_0^n \frac{a_n}{F^n} \right) \cdot \frac{\delta \varphi \kappa}{\delta F}(Q_2, F) = 0,$$

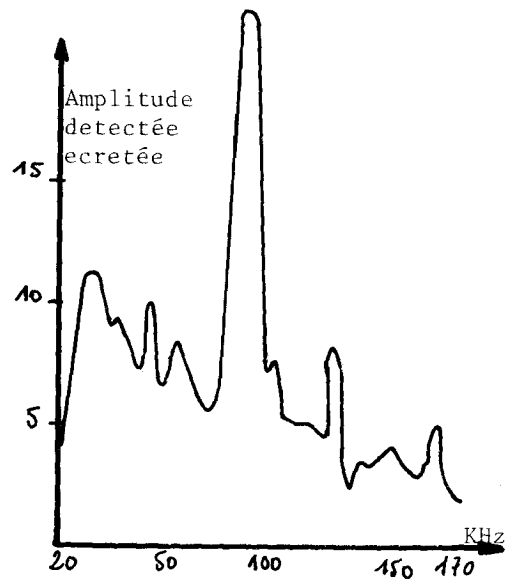
DIFFUSION DES ONDES ULTRASONORES PAR FOND MARIN EN FONCTION DE LA GRANULOMÉTRIE

PENETROMETRIE			
1	3,9cm	C	
2	4,3cm	Cc	

% Sable	3.22	Station de mesure BREG 48.17'45"N 04.23'36"W
% Calcaire	62.44	
% Vase	34.32	ANSE de Pool mic
e_i	40°	Hauteur d'eau 5cm



Exemple de variation de CE
avec la granulométrie.



Sédiment unimodal.

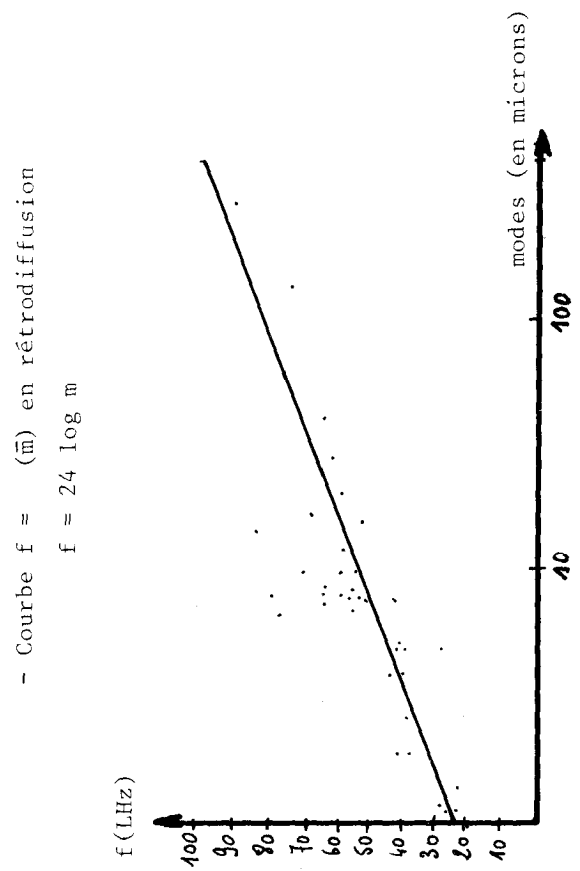
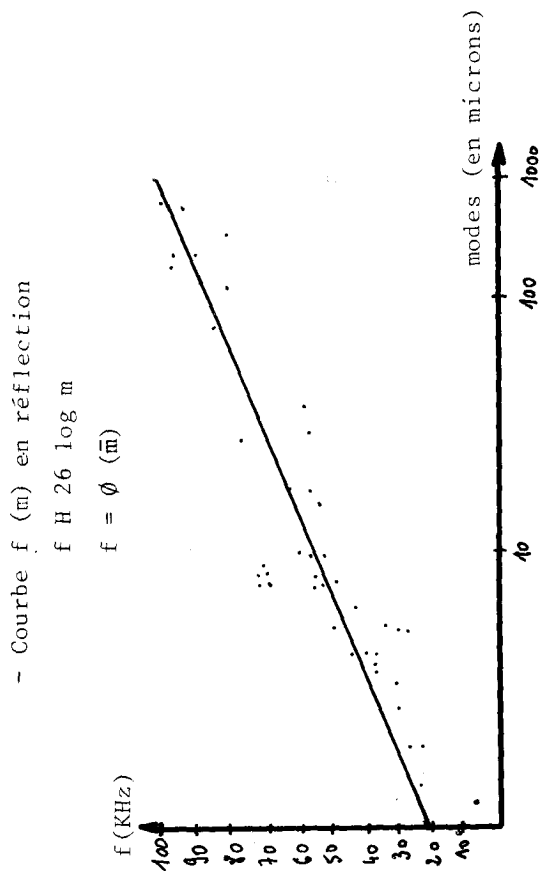
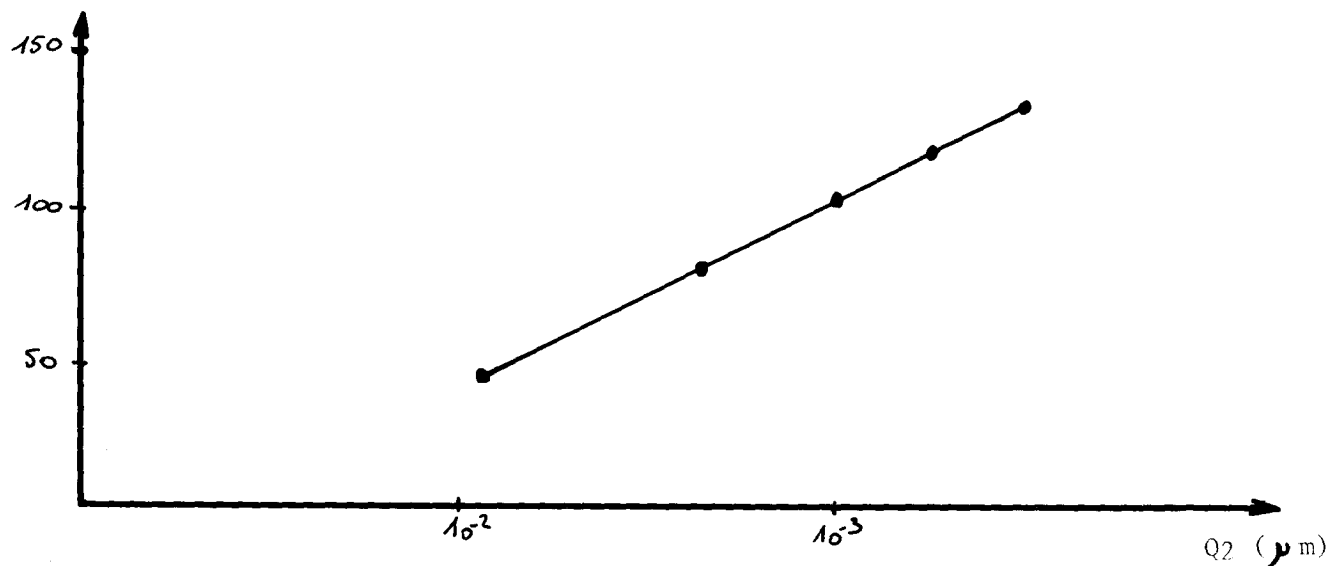


Fig. 2. — Relation Fréquence- Q_2 pour I_T maxi.

DIFFUSION PAR DES INHOMOGÉNÉTÉS

Fréquence (KHz) présentant une efficacité maximale.



Coeff de frottement.

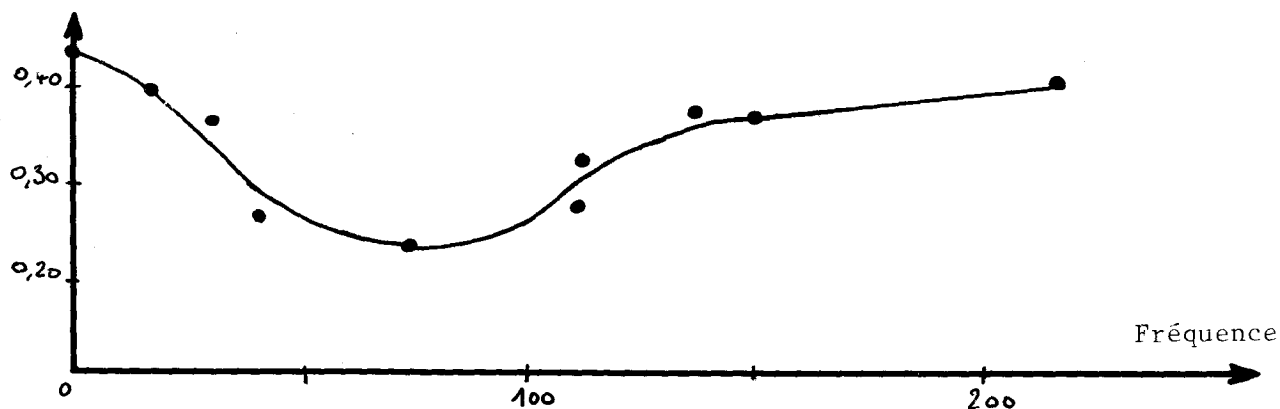


Fig. 3. — Diminution de frottement par émission d'ondes ultrasonores.

d'où, en intégrant, il vient :

$$k \varphi(Q_2, F) = \left(\sum_0^n \frac{a_n}{F^n} \right) + \exp CF.$$

Le terme $\sum_0^n (a_n/F^n)$ est négligeable devant $\exp CF$, et ce, d'autant plus que F est grand, donc :

$$F \simeq \text{Log} \frac{K}{C} + \text{Log}(Q_2, F),$$

d'après l'expression $\Phi(Q_2, F)$ nous pouvons écrire ($\text{Log } F \ll F$) :

$$(7) \quad F \simeq a + b \text{Log } Q_2.$$

Plusieurs centaines d'expériences réalisées en mer confirment que la valeur de I_T passe par un maximum pour Q_2 donné en fonction de F . Les valeurs F pour lesquelles le phénomène a lieu augmente avec Q_2 (fig. 2).

Nous avons également constaté que I_T a autant de maximums qu'il y a de modes granulométriques pour un sédiment multimodal. r_0 a également un rôle: il intervient sur les valeurs de a et b . Les valeurs statistiques des facteurs a et b pour une source de 6 cm de diamètre sont respectivement de 10 et 26,25 pour $r_0=0,4$ m; 8 et 24 pour $r_0=0,5$ m; 20 et 10 pour $r_0=80$ cm.

3. Émission placée au contact du sable

Le but recherché, réduction du frottement d'une plaque émettrice glissant sur du sable, est tout autre. La pression de radiation existant entre la plaque et le sable varie avec l'intensité des ondes diffusées. Une plaque munie d'un transducteur de dimensions finies provoque également des sections d'interactions qui diminuent avec F . La fonction $\Phi(Q_2, F)$ restant identique, la réduction du frottement doit être maximale pour une fréquence en regard de la granulométrie.

DIFFUSION PAR DES INHOMOGÉNÉTÉS

Des essais conduits avec des sables triés et de faible hétérométrie montrent que l'action des ultrasons est maximale pour une fréquence donnée.

La relation expérimentale établie pour une centaine de séries d'essais à des fréquences comprises entre 20 et 150 kHz est :

$$(8) \quad F = -20 + 55 \log Q_2.$$

La section maximale est de 200 cm² alors que dans le cas précédent elle était nettement plus importante (de 3 000 à 4 000 cm²).

4. Discussion

L'utilisation de ces deux possibilités dans le cadre de relevés automatisés impose :

– un choix de gammes de fréquences fonction de la distance r_0 ;

– la connaissance parfaite de l'influence de r_0 sur les facteurs a et b en regard de la surface active de la source émettrice et du capteur.

Il semble toutefois, pour des émetteurs dont le diamètre est de l'ordre de quelques centimètres qu'il ne faille pas prévoir un vecteur permettant une valeur de r_0 supérieure à 1 m. Le système est d'autant plus sensible que la section d'intersection $S(r_0)$ est faible, ce qui conduit à choisir un compromis entre r_0 et la section de la face émettrice.

Le traitement du signal capté en réception devra assurer deux fonctions :

– calculer la valeur moyenne du coefficient de réflexion (R) pour plusieurs fréquences comprises dans une certaine gamme de fréquence;

– détecter les valeurs maximales de I_T ou de R pour déterminer Q_2 . Nous suggérons l'emploi d'une trentaine de fréquences comprises entre 15 et 100 kHz.

Les données acquises peuvent conduire à :

$$\rho = \Phi(R) \quad [6, 9],$$
$$Q_2 = \psi(F) \quad \text{pour } R \text{ maximum.}$$

Le deuxième aspect du traitement consiste surtout à faire une sélection de certaines fréquences en fonction d'un critère.

5. Conclusion

Deux types d'expériences, conduisant à deux procédés, confirment l'analyse physique concernant la double influence de la fréquence sur l'effet résultant. Dans les conditions d'essais, le niveau diffusé est maximum lorsque F est relié à Q_2 par une relation de la forme $F = a + b \log Q_2$.

Les meilleurs résultats ont été obtenus pour des fréquences comprises entre 15 et 100 kHz en ce qui concerne les essais en nature.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] J. BRESSON, Acquisition automatique et traitement de données appliquées à la caractérisation *in situ* des sédiments marins, *Thèse Doct. Ing.*, Université de Montpellier, octobre 1979.
- [2] H. F. BEZDECK, Reflexion of high frequency sound at normal incidence from the bottom ocean, *J. Geoph. res.*, 78, n° 1, n° 17, juin 1973.
- [3] B. DEMERS, *Rapid site investigation prior the use of submarine vehicles North East coast institution of engineers and ships builders transaction*, 93, 1977, p. 91.
- [4] E. L. HAMILTON, Prediction of deep sea sediments properties strate of the art, *Deep sea sediments*, Plenum Press, 1973.
- [5] E. L. HAMILTON, Sound velocity density relations in sea floor sediments and rocks, *J. Acoust. Soc. Amer.*, 63, (2), février 1974.
- [6] J. P. LONGUEMARD, Mesures de l'amplitude des ondes réfléchies ou rétrodiffusées par les sédiments marins. Application à la détermination des modes granulométriques, *Revue Physique*, 13, septembre 1979.
- [7] J. P. LONGUEMARD, A. PAKA et P. VILLALONGUE, Étude de la diminution de frottement entre un fond sous-marin sableux et une plaque métallique à son contact sous l'effet d'ondes ultrasonores émises sur celle-ci. Influence de la fréquence, *C.R. Acad. Sc. Paris*, 296, série II, 1983, p. 937-942.
- [8] P. M. MORSE et K. INGARD, *Theoretical acoustics*, McGraw Hill Company, New York, 1968.
- [9] J. MOUSSESSIE, Contribution à l'étude des relations entre l'acoustique et les qualités géotechniques de sédiments marins, *Thèse de 3^e cycle*, Université Paul-Sabatier, Toulouse, février 1984.
- [10] D. TAYLOR-SMITH, Acoustic and mechanical loading marine sediments, *Marine Sciences*, Plenum Press, New York, 1974.
- [11] R. C. TYLE, Real time proceding and display of near bottom acoustic reflectivity measurement, *I-EEE Ocean*, 30, 1974.