



**DEUXIÈME COLLOQUE
SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL
ET SES APPLICATIONS
NICE - 5 AU 10 MAI 1969**

10 / 1

REFLEXION DIFFUSE D'UNE ONDE ULTRASONORE PAR UNE SURFACE ALÉATOIRE,
REALISATION D'UN MODELE REDUIT EN CUVE.

Claude Gazanhes

Résumé

Afin d'étudier la réflexion diffuse d'une onde ultrasonore par la surface de la mer, nous avons réalisé un modèle réduit de houle aléatoire en cuve.

Pour quatre houles différentes, nous avons mesuré la densité de probabilité et la fonction d'autocorrélation, puis nous avons calculé le spectre d'énergie de la surface à l'aide d'un ordinateur.

Nous donnons pour terminer, les premiers résultats portant sur la réflexion diffuse d'une onde ultrasonore de 300 kHz.

Diffuse reflection of ultrasonic waves from a random
surface, design of a model tank.

Abstract

In view of studying the scattering waves from the sea surface, a model tank with a wind-driven random surface has been built.

Four different surfaces are investigated, probability density and autocorrelation function are measured, power spectral density function is calculated by means of a digital computer.

First results about diffuse reflection of a 300 kHz ultrasonic wave are given.



**DEUXIÈME COLLOQUE
SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL
ET SES APPLICATIONS
NICE - 5 AU 10 MAI 1969**

10/3

REFLEXION DIFFUSE D'UNE ONDE ULTRASONORE PAR UNE SURFACE ALEATOIRE,
REALISATION D'UN MODELE REDUIT EN CUVE.

Claude Gazanhes
Centre de Recherches Physiques - C.N.R.S. Marseille

Introduction

La surface de la mer, agitée sous l'action du vent, prend une configuration aléatoire [1]. Un signal, d'origine acoustique ou électromagnétique, réfléchi par cette surface, voit son amplitude et sa phase subir des variations qui dépendent du temps et des propriétés de la surface [2]. Il en résulte une forte distorsion du signal reçu réduisant ainsi les performances des radars et des sonars.

La réflexion par la surface n'est pas la seule cause des distorsions du signal, pour l'acoustique sous-marine elles proviennent aussi de la réflexion sur le fond et des hétérogénéités du milieu marin. Dans une étude "in-situ" il est souvent difficile de séparer ces différents phénomènes. C'est pourquoi afin de n'envisager que le problème de la réflexion par la surface nous avons réalisé un modèle réduit de houle aléatoire en cuve.

Nous présentons ici les essais de ce modèle et les premiers résultats que nous avons obtenus avec une onde ultrasonore de 300 kHz.

Description du modèle réduit

a) Le Dispositif expérimental

Les vagues et la houle prennent naissance et croissent sous l'effet du vent ; pour ne pas nous éloigner de la réalité nous avons choisi de produire la houle du modèle au moyen d'une soufflerie [3] disposée suivant le grand axe d'une cuve acoustique (figure 1).

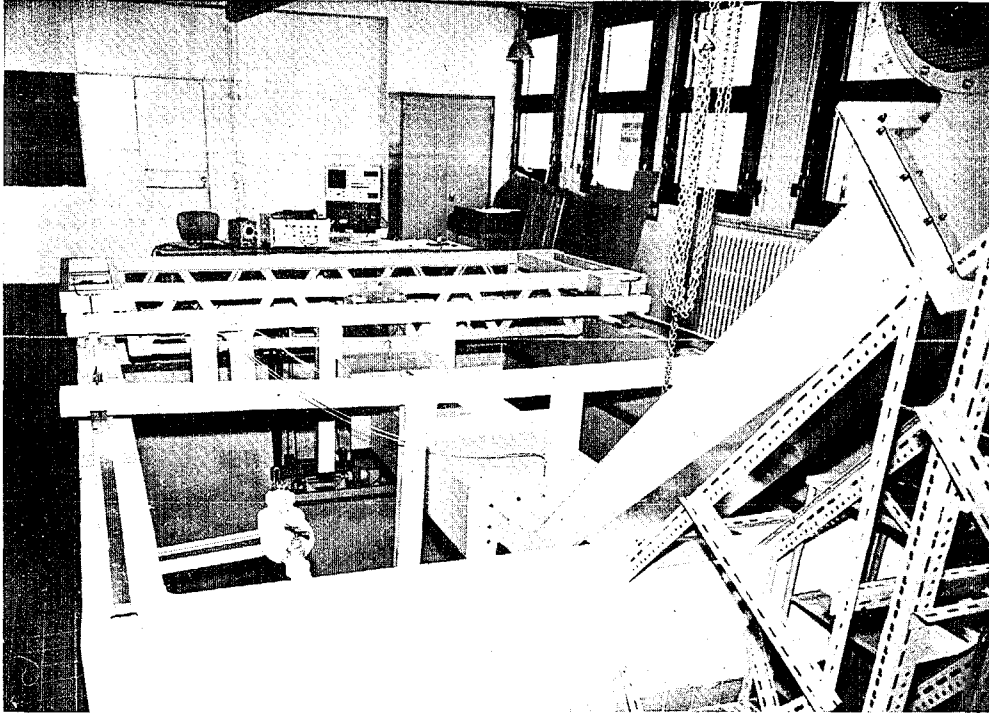


Figure 1

Celle-ci mesure $4,5 \times 3 \times 3$ mètres, elle contient de l'eau. Le tunnel de la soufflerie a les dimensions suivantes : $0,10 \times 0,60 \times 2,5$ mètres. Plusieurs régimes de fonctionnement permettent d'obtenir dans le tunnel un débit d'air pouvant varier de 6 ms^{-1} à 12 ms^{-1} . Les amplitudes de la houle sont mesurées à l'aide de sondes en acier inoxydable [4]. La tension électrique recueillie à leurs bornes est proportionnelle à l'amplitude de la houle. Cette tension peut-être soit enregistrée, soit envoyée directement à un ensemble de traitement statistique permettant, après échantillonnage, d'obtenir des densités de probabilité d'amplitude, ou de calculer des fonctions de corrélation. On peut éliminer les réflexions de la houle par les parois de la cuve en disposant des plages artificielles.

b) Paramètres du modèle réduit

L'étude en cuve nécessite de transposer à une échelle réduite les paramètres réels. En acoustique sous-marine pour le problème qui nous intéresse les fréquences utilisées



REFLEXION DIFFUSE D'UNE ONDE ULTRASONORE...

sont comprises entre 1 kHz et 10 kHz, les durées d'impulsion entre 30 et 200 ms, les caractéristiques des houles sont données par des tables des états de la mer. Les premiers essais de la soufflerie montrent que l'on peut obtenir des amplitudes de houles variant de 0,5 à 5 cm.

Choisissons une fréquence ultrasonore de 5 kHz et une durée d'impulsion de 100 ms, correspondant à une longueur d'onde de 30 cm, et à une impulsion contenant 500 longueurs d'onde. Compte tenu des états de la mer nous pouvons dresser le tableau suivant :

Paramètres réels			Paramètres transposés	
Vent	H (cm)	H/ λ	F (MHz)	H/ λ
1	2,4	0,08	0,1	
2	10	0,33	0,1	0,3
3	30	1		
4	88	2,93		3,2
5	210	7	1	3
6	400	13,3		
7	700	23,4		
8	1 130	38		32

Force du vent - Echelle Beaufort

H : hauteur significative de houle

λ : longueur d'onde US pour une fréquence de 5 kHz.



qui montre qu'entre un vent de force 2 et un vent de force 8 le rapport des amplitudes de la houle significative est de 100, alors que le rapport des amplitudes des houles données par la soufflerie n'est que de 10, ce qui conduit à choisir trois fréquences différentes de travail afin de conserver l'analogie pour toutes les houles significatives, les facteurs de réduction correspondants sont de 20 et 200. Pour les amplitudes de houles inférieures à 10 cm nous prendrons une fréquence transposée inférieure à 100 kHz.

Etude de la houle en modèle réduit

Nous avons fait une étude statistique des houles artificielles obtenues afin de tester le modèle réduit et de comparer nos résultats à ceux obtenus en mer dans le milieu réel.

a) La distribution des amplitudes

Supposons le régime permanent de la soufflerie établi. Soit alors $\eta(x, t)$. La fonction aléatoire qui décrit les variations d'amplitude de la surface, et que nous enregistrons, sous forme de signal analogique, aux bornes des sondes en acier inoxydable. La position de la sonde fixant la valeur de x , le signal ne dépend plus alors que du temps. On admet en général que la densité de probabilité qui caractérise les valeurs instantanées de η est Gaussienne et s'écrit :

$$p(\eta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\eta^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

où la variance $\sigma^2 = \overline{\eta^2}$ si l'on a choisi un niveau de référence tel que $\overline{\eta} = 0$. Pratiquement nous verrons que les courbes obtenues s'écartent parfois sensiblement de la courbe de Gauss et deviennent dissymétriques.

En 1956 D.E.Cartwright et H.S. Longuet-Higgins [5] considèrent la distribution des valeurs maximums de $\eta(x, t)$ et proposent pour la densité de probabilité une expression qui dépend du paramètre.

$$\epsilon^2 = \frac{m_0 m_4 - m_2^2}{m_0 m_4}$$

où

$$m_n = \int_0^\infty \omega^n \Phi(\omega) d\omega \quad (2)$$



REFLEXION DIFFUSE D'UNE ONDE ULTRASONORE...

$\Phi(\omega)$ étant le spectre d'énergie de $\eta(x,t)$.

Si $\epsilon = 0$ (spectre étroit) La distribution est de Rayleigh.
 Si $\epsilon = 1$ (spectre étendu) La distribution est de Gauss.

b) Le spectre d'énergie de la houle

En océanographie la détermination du spectre $\Phi(\omega)$ est fondamentale, depuis que Neumann [6] en 1953 en a proposé l'expression pratique

$$\Phi(\omega) = [A(\omega)]^2 = C\omega^{-6} e^{-2g^2 \omega^{-2} U^{-2}} \cos^2\theta \quad (3)$$

où U représente la vitesse du vent
 θ sa direction par rapport à une direction d'observation
 g l'accélération de la pesanteur
 C est une constante que l'on détermine expérimentalement.

Nous avons calculé le spectre d'énergie à partir de la fonction d'autocorrélation de la surface soit

$$R(\tau; x) = \overline{\eta(t, x) \eta(t + \tau, x)} \quad (4)$$

Nous savons que la densité spectrale d'énergie $\Phi(\omega)$ est la transformée de Fourier de $R(\tau, x)$ (relations de Wiener-Khintchine) soit

$$\Phi(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R(\tau, x) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (5)$$

$R(\tau, x)$ étant paire on peut écrire

$$\Phi(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} R(\tau, x) \cos\omega\tau d\tau \quad (6)$$

c) Résultats expérimentaux

Pour quatre vitesses de rotation de la soufflerie, nous avons tracé la courbe de probabilité $p(\eta)$, la fonction d'autocorrélation $R(\tau)$ et calculé l'énergie spectrale $\Phi(\omega)$. La sonde de mesure est placée suivant l'axe de la soufflerie à 80 cm de la sortie du tunnel, un exemple du signal analogique obtenu est



10/8

REFLEXION DIFFUSE D'UNE ONDE ULTRASONORE...

montré figure 2, nous constatons qu'il est dissymétrique, et possède une valeur moyenne positive.

Enregistrement d'une houle
756 tr/mn

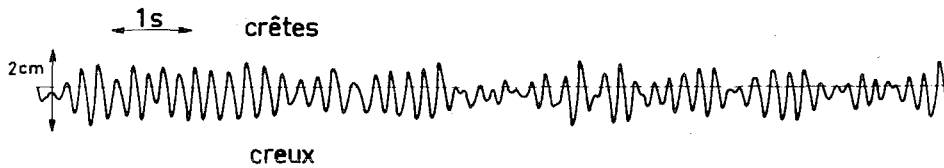


Figure 2

L'analyse statistique du signal est faite au moyen d'un analyseur électronique DIDAC 800 d'Intertechnique.

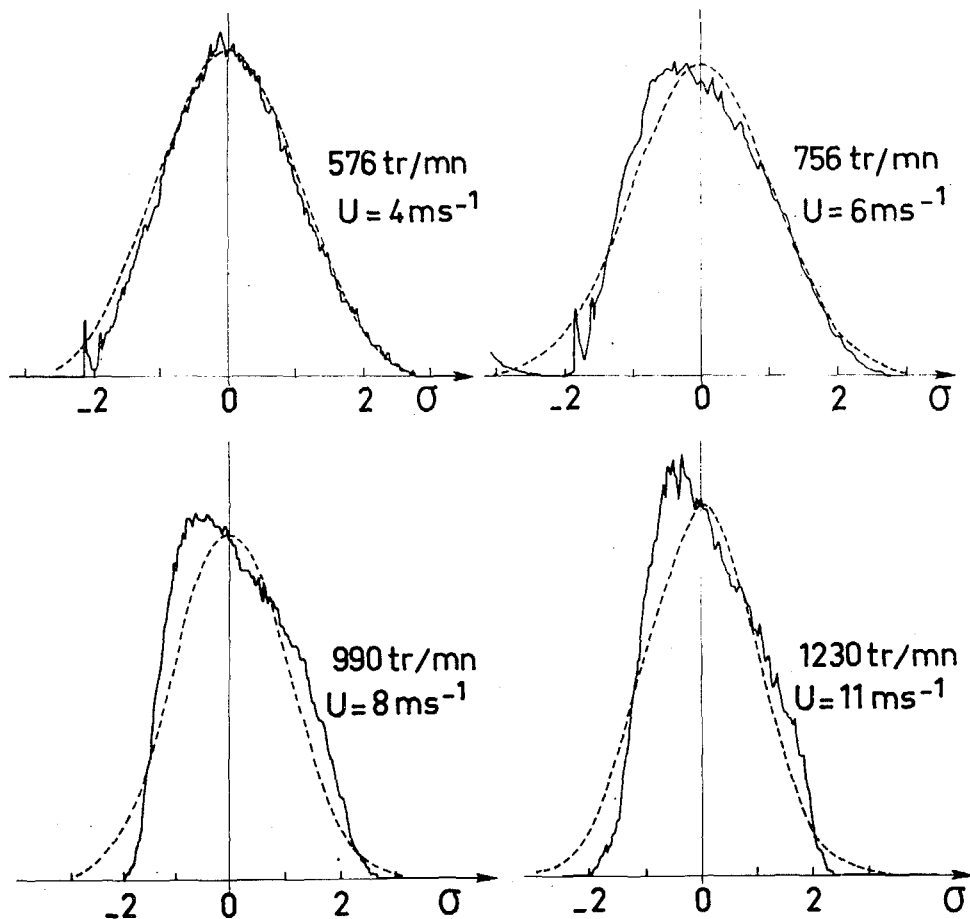


Figure 3

La figure 3 montre les courbes de densité de probabilité obtenues



REFLEXION DIFFUSE D'UNE ONDE ULTRASONORE...

Dans tous les cas le signal est échantillonné toutes les milli-secondes pendant 450 secondes, il y a donc 450 000 échantillons prélevés.

En l'état actuel des mesures, la moyenne m_0 et l'écart type σ sont exprimés en nombre de canaux puisque le DIDAC 800 visualise le nombre d'échantillons classés dans le canal correspondant, chaque canal correspond à une amplitude de houle, en fait à une tension électrique. Sans affaiblissement à l'entrée nous avons 1 volt pour 200 canaux soit 5 mV par canal.

Connaissant σ nous avons calculé les probabilités $p(n)$ à l'aide d'une table [7] de la fonction $p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$ que nous avons tracée sur le même graphique. Si la première répartition est voisine de la répartition normale, les autres s'en écartent d'autant plus que l'amplitude des houles, donc la dissymétrie du signal est accentuée, les creux étant beaucoup plus longs et plats que les crêtes. Kinsmann [8] a obtenu un résultat semblable en mer. Toutefois, la dissymétrie est plus accentuée sur nos résultats, le facteur d'échelle modifie les phénomènes, entre autre la viscosité de l'eau est toujours négligée à grande échelle, cela n'est plus légitime sur le modèle réduit. Nous retrouverons l'influence de la viscosité sur les spectres d'énergie.

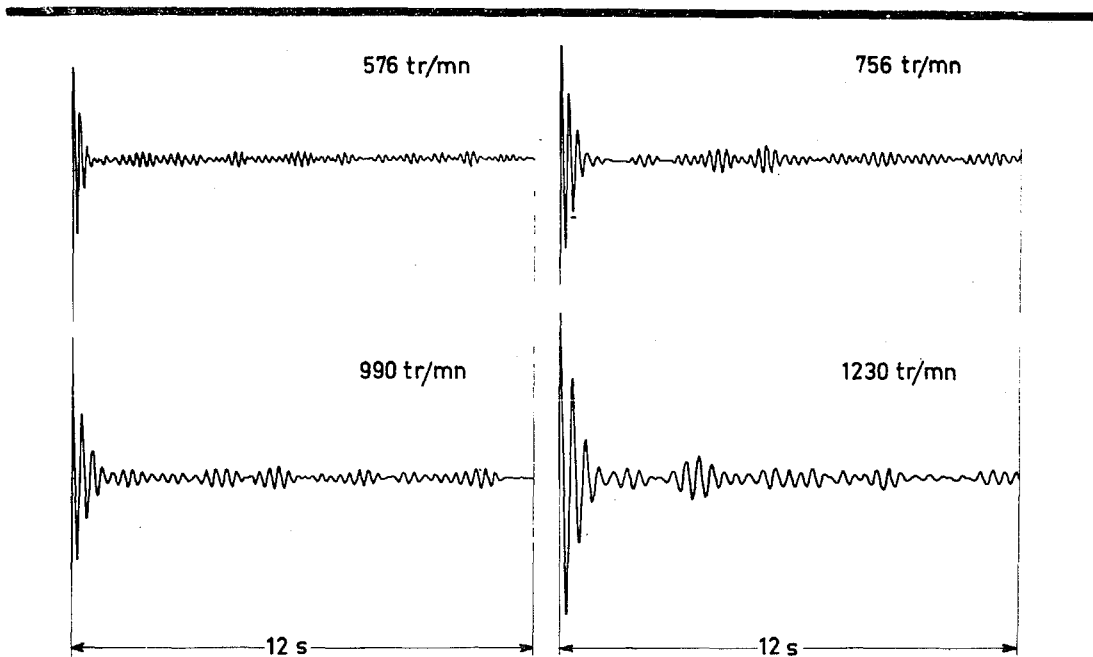
Les courbes d'autocorrélation obtenues à partir des signaux issus de la sonde sont calculées par le tiroir corrélateur L 10 du Didac 800 avec les paramètres suivants ; retard incremental 40 ms, durée du calcul 120 secondes, nombre de points calculés 300.

Les courbes obtenues sur la figure 4 présentent l'allure générale d'une fonction périodique rapidement amortie, toutefois on note la présence de maximums successifs dus aux réflexions de la houle sur les parois de la cuve. (nous cherchons actuellement à éliminer cet effet).



10/10

REFLEXION DIFFUSE D'UNE ONDE ULTRASONORE...



AUTOCORRELATION DE LA HOULE

Figure 4

La période des houles croît lorsqu'on augmente le débit de la soufflerie. Par intercorrélation sur deux sondes placées à 30 cm l'une de l'autre suivant l'axe de la soufflerie nous avons déduit la vitesse de propagation de la houle. Ces valeurs trouvées sont voisines de celles calculées à l'aide de la formule

$$c = \frac{g}{2\pi} T \quad (7)$$

donnant la vitesse de propagation des ondes de gravité en fonction de leur période.

Le tableau II résume l'ensemble de ces résultats qui confirme la validité du modèle.



REFLEXION DIFFUSE D'UNE ONDE ULTRASONORE...

Soufflerie		Paramètres				
		mesurés			calculés	
T tr/mn	U ms ⁻¹	f Hertz	C cms ⁻¹	λ cm	C cms ⁻¹	λ cm
576	4	5,75	27,3	4,66	27	4,7
756	6	4,5	32,6	7,44	34,8	7,7
990	8	3,75	40,5	10	41,6	11
1230	11	3,25	52,5	16	48	14,8

T : vitesse soufflerie
 U : débit soufflerie
 f : fréquence houle
 C : vitesse de propagation houle
 λ : longueur d'onde houle.

L'intérêt des fonctions d'autocorrélation réside dans le fait, qu'elles permettent de calculer les spectres d'énergie de la houle. Ces spectres ne sont que des estimations des spectres réels, ils sont calculés à partir d'une fonction qui n'est connue qu'en certains points, nous obtenons un spectre de raies. Le nombre de points choisis sur $R(\tau; x)$ et leur espacement fixe la résolution en fréquence, de plus $R(\tau; x)$ est nécessairement tronquée il faut donc que la fréquence de coupure soit convenablement choisie afin que la densité d'énergie correspondant à ces fréquences soit négligeable.

Pour cela nous sommes partis d'une fonction d'autocorrélation calculée sur 50 points avec un retard incremental de 40 ms. Il y correspond une fréquence de Nyquist de

$$f_N = \frac{1}{2\tau} = \frac{1}{2 \times 40} = 12,5 \text{ Hertz.}$$

et des raies espacées de

$$\Delta f = \frac{1}{2 \cdot \tau \cdot m} = \frac{1}{2 \times 40 \times 50} = 0,25 \text{ Hertz.}$$



10/12

REFLEXION DIFFUSE D'UNE ONDE ULTRASONORE...

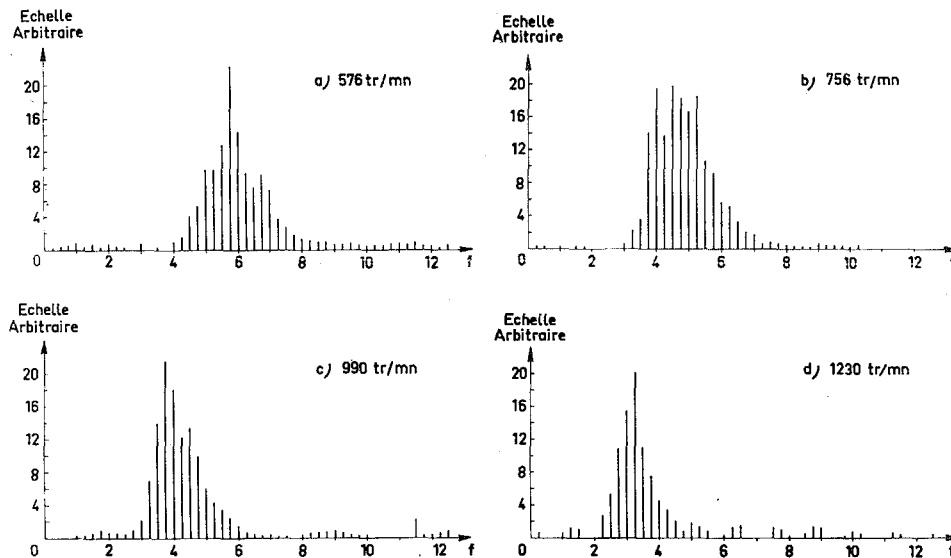


Figure 5

Les courbes de la figure 5 montrent les spectres d'énergie obtenus après calcul sur ordinateur Univac 1108. Ces spectres sont comparables aux spectres de Neumann réels. Les fréquences du modèle sont plus élevées, elles varient de 3 à 6 Hertz, alors qu'en mer on note une variation de 0,5 à 0,1 Hertz. L'énergie diminue très vite avec la fréquence, nous voyons là aussi l'influence de la viscosité.

Réflexion diffuse d'une onde ultrasonore par la houle

Emettons un signal ultrasonore en direction de la surface. En l'absence de houle, l'énergie maximum est reçue suivant la direction de la réflexion spéculaire. Agitons la surface au moyen de la soufflerie, nous constatons que l'amplitude et la phase du signal réfléchi varient de façon aléatoire dans le temps. Avec Beckmann [2] nous pouvons chiffrer le degré de déformation de la surface par le paramètre

$$\sqrt{g} = 2\pi \frac{h}{\lambda} (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \quad (8)$$

où h représente l'amplitude significative de la houle, θ_1 et θ_2 les angles d'incidence et de réception du signal ultrasonore. Pour les surfaces peu déformées nous avons

$$\sqrt{g} \ll 1$$



REFLEXION DIFFUSE D'UNE ONDE ULTRASONORE...

Pour celles qui le sont fortement.

$$\sqrt{g} \gg 1$$

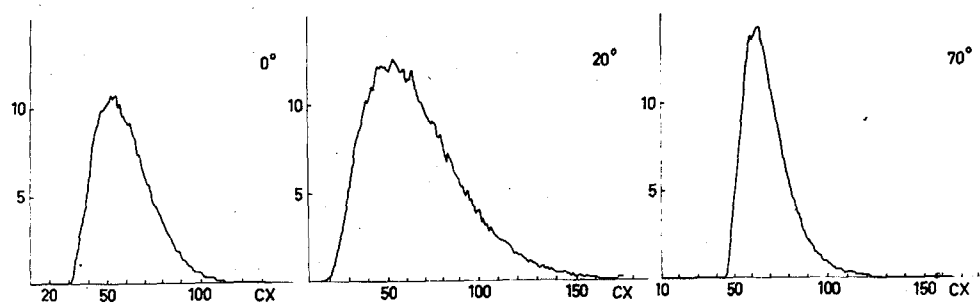
Le cas intermédiaire $\sqrt{g} \sim 1$ étant difficile à traiter théoriquement.

Nous avons choisi pour cet essai préliminaire une fréquence ultrasonore de 300 kHz en émission entretenue, une vitesse de soufflerie de 756 tours/mn. Si nous supposons que $h = 0,5$ cm et une incidence θ_1 de 45° . Ce paramètre $\sqrt{g}$ varie de 5,55 à 10,8 quand l'angle d'observation θ_2 passe de 80° (incidence rasante) à 0° incidence normale.

Nous nous trouvons dans le cas d'une surface très déformée comme cela se produit pour le radar et l'acoustique sous-marine.

L'émetteur ultrasonore est un disque de quartz piézoélectrique de 60 mm de diamètre. Il est excité sur sa fréquence de résonance 300 kHz. L'hydrophone récepteur est un disque de TiO_3Ba de 60 mm de diamètre. Les diagrammes de directivité de l'émetteur et de l'hydrophone sont identiques. L'angle d'ouverture du faisceau correspondant au point où l'énergie est réduite de moitié est de 5° .

Emetteur et récepteur sont placés à 1 mètre de la surface. L'enveloppe du signal ultrasonore reçu sur l'hydrophone est détectée puis envoyée à l'entrée de l'analyseur statistique.



DENSITE DE PROBABILITE DE L'ENVELOPPE DU SIGNAL US REFLECHI

Figure 6

Nous montrons sur la figure 6 les densités de probabilité de



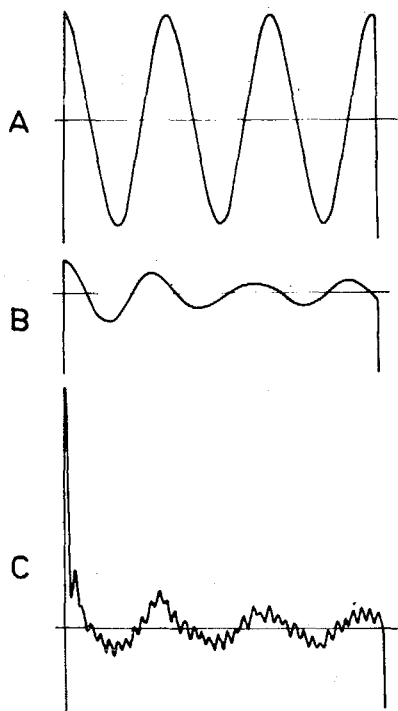
l'enveloppe tracées pour une incidence de 20° et des angles d'observation de 0° , 20° et 70° . Nous observons une nette dissymétrie pour les trois courbes.

Si l'on admet que l'amplitude reçue a est une expression complexe satisfaisant à la condition $a^2 = x^2 + y^2$ où x et y sont des fonctions aléatoires normalement distribuées et de même écart type σ , on démontre que la densité de probabilité de l'amplitude a est une densité de Rayleigh et s'écrit

$$p(a) = \frac{a}{\sigma^2} e^{-\frac{a^2}{2\sigma^2}} \quad (9)$$

Ces résultats sont qualitatifs ; nous terminons actuellement la mise au point de l'appareillage de mesure, et principalement l'étalonnage de la chaîne émission-réception ultrasonore.

Toujours du point de vue qualitatif, nous donnons la fonction d'autocorrélation de l'enveloppe du signal reçu (figure 7).



AUTOCORRELATION

A - Signal 4 Hertz

B - Houle

C - Signal U.S. réfléchi

Nous obtenons une fonction rapidement amortie ; la période des oscillations lentes est identique à celle de la houle, de plus nous constatons la présence d'oscillations beaucoup plus rapides qui sont peut-être dues aux rides capillaires qui se superposent aux amplitudes beaucoup plus amples de la houle.

Figure 7



REFLEXION DIFFUSE D'UNE ONDE ULTRASONORE...

Conclusion

Les résultats préliminaires que nous venons d'exposer montrent la possibilité de réaliser en cuve des modèles réduits de houles statistiques. Les résultats que nous avons obtenus sont semblables à ceux obtenus dans le milieu réel. Toutefois, l'influence de la viscosité n'est pas toujours négligeable dans le modèle réduit.

Ce modèle va nous permettre une étude systématique de la réflexion diffuse d'une onde ultrasonore. Les résultats seront comparés avec ceux obtenus dans le milieu réel et étendus au problème d'acoustique sous-marine.



Bibliographie

- [1] Cours d'Océanographie physique - H. LACOMBE
Gauthier-Villars Paris (1965)
- [2] The scattering of Electromagnetic Waves from rough surfaces-
P. BECKMANN - A. SPIZZICHINO
Pergamon Press, New-York (1963)
- [3] Etude expérimentale de la houle dans un canal - M.S. VERAS
JUNIOR
Thèse d'Université, Paris (1963)
- [4] Dispositif de mesure des amplitudes de houles - J.L. GARNIER
Note C.R.P. à paraître
- [5] The statistical distribution of the maxima of a random
function - D.E. CARTWRIGHT - M.S. LONGUET-HIGGINS
Proc. Roy. Soc. A 237 (1956)
- [6] On ocean wave spectra and new method of forecasting wind-
generated waves
Beach Erosion Board. Tech. Memo. n° 143 (1953)
- [7] Methodes Pratiques d'étude des fonctions aléatoires -
J. STERN - J de BARBEYRAC - R. POGGI
Dunod, Paris (1967)
- [8] Wind waves - B. KINSMAN
Printice Hall (1965).