



TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

Nice 1^{er} au 5 juin 1971

ETUDE DU CHAMP ULTRASONORE DIFFUSE PAR UNE
SURFACE AGITEE.

Claude GAZANHES

RESUME

Nous avons étudié la diffusion par une surface agitée d'un signal ultrasonore entretenu à la fréquence de 150 kHz ; l'étude porte sur trois points.

- a) Statistique des variations d'amplitude du signal reçu.
- b) Calcul des spectres énergétiques de ces variations d'amplitude.
- c) Mesures par corrélation des spectres énergétiques de la modulation de phase.

SUMMARY

The ultrasound signal at 150 kHz reflected and forward scattered from a time-varying rough surface has been studied.

Probability density and power spectra functions are obtained for the amplitude modulation.

Power spectral density measurements for the phase modulation are obtained by means of the autocorrelation function.



ETUDE DU CHAMP ULTRASONORE DIFFUSE PAR UNE
SURFACE AGITEE.

= INTRODUCTION

Un signal acoustique réfléchi par la surface de la mer subit des fluctuations d'amplitude et de phase qui dépendent du temps et des propriétés de la surface. Les distorsions qui en résultent peuvent modifier sensiblement les performances des sonars. Afin de mieux connaître la nature de ces distorsions, et leurs propriétés nous avons :

a) Transposé sur un modèle réduit en cuve acoustique les paramètres réels qui interviennent dans les problèmes liés à la réflexion d'un signal acoustique émis par un sonar ; fréquence, longueur d'onde acoustique, états de la mer etc ... Cette étude a fait l'objet d'une communication au précédent colloque [1]

b) fait une étude statistique des fluctuations de l'enveloppe du signal diffusé suivant la direction spéculaire et une analyse spectrale par corrélation de ces fluctuations d'amplitude ainsi que des fluctuations de phase. Mais avant de traiter ce sujet rappelons les principales caractéristiques des états de surface obtenus avec le modèle réduit. Ces états de surface sont réalisés au moyen d'une soufflerie disposée suivant le grand axe d'une cuve acoustique remplie d'eau (Figure 1).

Par variation du régime de la soufflerie, nous avons choisi 5 états de surface dont les caractéristiques sont résumées dans le tableau A.



ETUDE DU CHAMP ULTRASONORE DIFFUSE PAR UNE
SURFACE AGITEE.

- TABLEAU A -

Etats de surface N°	I	II	III	IV	V
Vitesse/vent ms ⁻¹	7,76	6,16	4,66	3,77	3
Ecart type de la surface mm	6,28	4,13	2,43	0,75	0,28
Longueur d'onde moyenne cm	18	12,5	8,75	5,4	3,4
Fréquence Hz	2,76	3,26	3,95	5,5	6,98
Portée de corrélation cm	26,6	15,4	15,1	7,15	5,35

La vitesse du vent a été mesurée à 25 cm de la sortie de la soufflerie.

L'écart type σ de la surface est mesuré par

$$\langle \xi(t) \xi(t + \tau) \rangle = \sigma^2 \rho(\tau)$$

où $\rho(\tau)$ est le coefficient de corrélation.

La portée de corrélation est la distance mesurée sur la surface et parallèlement à la direction du vent au bout de laquelle le coefficient de corrélation est passé de la valeur 1 à l'origine de la valeur 1/e.

STATISTIQUE DE L'ENVELOPPE DU SIGNAL DIFFUSE

Pour cette étude, nous avons travaillé en émission entretenue à la fréquence ultrasonore de 150 kHz. Le transducteur émetteur comporte un disque ferroélec-



ETUDE DU CHAMP ULTRASONORE DIFFUSE PAR UNE SURFACE AGITEE.

trique de zirconate de plomb de 6 cm de diamètre. L'angle d'ouverture à 3 dB est de 10° . Un dispositif mécanique permet de faire varier l'angle d'incidence tout en maintenant l'émetteur à une distance fixe de un mètre de la surface. Pour chaque incidence une sonde piézoélectrique capte le signal réfléchi suivant la direction spéculaire. La figure 2 montre le dispositif de mesure. Le plan d'incidence défini par les rayons moyens émis et réfléchis est parallèle à la direction de propagation des vagues engendrées par la soufflerie. En présence des vagues, l'énergie acoustique émise est diffusée dans toutes les directions, de sorte que l'amplitude du signal diffusé varie de façon aléatoire en fonction du temps.

L'enveloppe du signal électrique issu de la sonde piézoélectrique est détectée puis envoyée à l'entrée d'un analyseur statistique d'amplitude (Didac 800 plus tiroir H 26). Nous obtenons ainsi les densités de probabilité de l'enveloppe pour les incidences de 4° , 17° , 33° , 48° et 67° et pour cinq états de surface.

Les résultats de cette analyse sont présentés sur les figures 3 à 7.

Dans tous les cas nous avons calculé le coefficient de variation V_v rapport de l'écart type à la valeur moyenne. La précision du résultat est liée à la qualité du système de détection.

Toutefois nous constatons que :

- a) V_v diminue quand l'écart type de la surface diminue.
- b) V_v augmente quand l'angle d'incidence se déplace vers l'incidence normale.



ETUDE DU CHAMP ULTRASONORE DIFFUSE PAR UNE SURFACE AGITEE.

Le signal reçu par le récepteur est de la forme

$$S_1(t) = E(t) \cos [\omega_0 t + \Phi(t)] \quad (1)$$

Après détection nous obtenons uniquement les variations $E(t)$ de l'enveloppe. Celle-ci se déduit du signal analytique en posant

$$S(t) = S_1(t) + j S_2(t)$$

$$S(t) = E(t) e^{[j\omega_0 t + \Phi(t)]}$$

Nous avons :

$$E(t) = \sqrt{S_1^2(t) + S_2^2(t)} \quad (2)$$

En supposant que les valeurs instantanées de S_1 et S_2 suivent une loi normale de même écart type σ , et que la phase $\Phi(t)$ est équipartie entre $-\pi$ et $+\pi$, un calcul classique montre que les variations de l'enveloppe $E(t)$ suivent la loi de RAYLEIGH

$$P(E) = \frac{E}{\sigma^2} e^{-\frac{E^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

Pour cette loi le coefficient de variation

$$\nu_v = 0,52 \quad (4)$$

Les coefficients ν_v que nous avons calculés restent toujours inférieurs à cette valeur. Nous nous éloignons d'autant plus du modèle de RAYLEIGH que la modulation de phase $\Phi(t)$ est faible, c'est-à-dire lorsque l'écart type de la surface diminue ou bien lorsque l'incidence augmente, l'écart type apparent de



ETUDE DU CHAMP ULTRASONORE DIFFUSE PAR UNE SURFACE AGITEE.

la surface diminue. C'est bien ce que nous constatons expérimentalement.

Théoriquement les écarts au modèle de RAYLEIGH peuvent s'expliquer de deux façons différentes.

La première explication suppose qu'un signal diffusé reçu se superpose à un signal cohérent sinusoïdal. Cette hypothèse conduit à la loi de probabilité de RICE [2].

$$p(E) = \frac{E}{\sigma^2} e^{-\frac{E^2 + E_0^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{E E_0}{\sigma^2}\right) \quad (4)$$

Où E_0 est l'amplitude du signal cohérent. Cette loi s'applique bien dans le cas d'un émetteur peu directif, qui envoie toujours une fraction constante de l'énergie sur le récepteur. L'autre fraction étant diffusée par la surface.

C'est notre cas pour les grandes incidences (supérieures à 60°) et les faibles écarts types de la surface. Il correspond aux résultats de la figure 3. On montre que l'expression (4) tend vers une loi normale quand E_0 devient grand, quant au coefficient de variation, il décroît quand E_0 augmente.

Pour la deuxième explication qui correspond au cas où le signal cohérent E_0 n'existe pas OL' SHEVSKII [3] propose de considérer que le signal capté par le récepteur est la somme de plusieurs signaux élémentaires dont l'enveloppe résultante sera donnée par :

$$E(t) = \sum_{n=1}^N E_n(t) \quad (5)$$



ETUDE DU CHAMP ULTRASONORE DIFFUSE PAR UNE SURFACE AGITEE.

Si les composantes E_n sont statistiquement indépendantes, de même écart type σ et obéissant à la loi de RAYLEIGH (3), on peut représenter la loi de probabilité de (5) sous la forme d'un développement en série de EDGEWORTH. Loi de probabilité qui tend vers la loi normale quand N tend vers l'infini et vers la loi de RAYLEIGH quand N est petit.

Dans le cas général nous pouvons calculer le coefficient de variation à partir de la valeur moyenne $m = N \langle E \rangle$ et de l'écart type $\sigma^2 = N \sigma_E^2$

$$\text{d'où } \nu_v = \frac{\sigma}{m} = \frac{\sqrt{N} \sigma_E}{N \langle E \rangle} = \frac{1}{\sqrt{N}} \frac{\sigma_E}{\langle E \rangle} = \frac{1}{\sqrt{N}} \nu_R \quad (6)$$

avec $\nu_R = 0,52$ puisque nous avons supposé pour chaque composante une loi de RAYLEIGH.

Si chaque composante élémentaire E_n provient d'un diffuseur, dans le cas de la surface nous pourrions assimiler le nombre de diffuseurs au nombre de portées de corrélation spatiale couvert par le faisceau incident. Il devient alors facile de calculer N soit à partir de la formule 6

$$N_1 = \left(\frac{\nu_R}{\nu_v} \right)^2$$

Soit à partir du rapport

$$N_2 = \frac{L}{a}$$

où L est la portion de surface couverte par le faisceau incident, \tilde{a} la portée de corrélation.



ETUDE DU CHAMP ULTRASONORE DIFFUSE PAR UNE
SURFACE AGITEE;

Nous avons rassemblé dans le tableau B les résultats obtenus pour les incidences de 67, 33 et 4°. Pour ces incidences L a respectivement valeurs 38, 20 et 17 cm. Les portées de corrélation sont données dans le tableau A.

- TABLEAU B -

Etats de Surfaces	I			II			III			IV			V		
	v	N ₁	N ₂												
67°	44	1,4	1,47	49,4	1,15	2,46	36,4	2,05	2,52	22,3	5,4	5,8	9,9		7,1
33°	47,5	1,2	0,78	42,5	1,5	1,3	37,8	1,9	1,33	39,5	1,73	2,8	25	1,3	3,75
4°	47	1,22	0,65	46	1,28	1,1	41,5	1,58	1,13	38,5	1,82	2,38	40,5	1,66	3,18

Nous avons signalé au début de cet exposé que les mesures de ρ_v étaient liées à la qualité du système de détection. Les mesures se poursuivent actuellement afin d'améliorer nos résultats, de réduire la dispersion de certaines valeurs du tableau B, et de vérifier avec le maximum de précision les hypothèses que nous avons envisagées.

ANALYSE SPECTRALE DU SIGNAL DIFFUSE

Nous avons effectué cette analyse à partir des fonctions de corrélation du signal diffusé.

Rappelons que le signal $s(t)$ a pour fonction d'autocorrélation

$$C_{ss}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T s(t) s(t-\tau) dt$$

ETUDE DU CHAMP ULTRASONORE DIFFUSE PAR UNE
SURFACE AGITEE

et que par application du théorème de WIENER -
KHINCHINE la transformée de Fourier de $C_{SS}(\tau)$
à savoir

$$r(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} C_{SS}(\tau) e^{-2\pi j f \tau} d\tau$$

Soit encore puisque $C_{SS}(\tau)$ est paire

$$r(f) = 2 \int_0^{\infty} C_{SS}(\tau) \cos(2\pi f \tau) d\tau \quad (7)$$

Les valeurs de $r(f)$ peuvent être obtenues sur
calculateur à partir de la fonction C_{SS} convenable-
ment échantillonnée ou bien directement au moyen
d'un transformateur de Fourier associé à un corrélateur
automatique en temps réel.

Les spectres de la modulation d'amplitude sont
obtenus par corrélation plus calcul sur ordinateur.
Ils sont centrés autour de la fréquence zéro, le cal-
cul ne donne que la partie positive des spectres.

Les spectres de modulation de phase sont obtenus
directement à l'aide d'un corrélateur en temps réel
suivi d'un transformateur de Fourier. Les spectres
sont centrés autour de la fréquence porteuse f_0
des ultrasons.

Nous avons vu que le signal diffusé par la sur-
face est modulé en amplitude et en phase. D'une ma-
nière très générale nous pouvons l'écrire sous la
forme

$$S(t) = A(t) \cdot F(t)$$

où $A(t)$ représente les variations d'amplitude et $F(t)$
les variations de phase. La modulation d'amplitude
provient :



ETUDE DU CHAMP ULTRASONORE DIFFUSE PAR UNE
SURFACE AGITEE

a) du battement entre les fréquences voisines traduisant la dispersion de fréquences provoquée par les mouvements de la surface.

b) du miroitement variable de celle-ci, miroitement lié aux variations aléatoires de la normale en un point de la surface.

La modulation de phase exprime la différence de marche de deux rayons voisins. Cette différence de marche dépend des variations d'amplitude de la surface, donc sera aléatoire. Suivant la direction spéculaire elle s'écrit :

$$\phi(t) = \frac{4\pi}{\lambda} h(t) \cos \theta \quad (8)$$

où $h(t)$ représente les variations d'amplitude de la surface. Nous avons obtenu la modulation d'amplitude en détectant l'enveloppe du signal diffusé. Le signal basse fréquence ainsi obtenu est ensuite analysé à partir du corrélateur numérique L 10 de Intertechnique, la transformée de Fourier se fait ensuite sur calculateur.

Pour obtenir la modulation de phase nous envoyons le signal diffusé à l'entrée d'un amplificateur à contrôle automatique de gain qui supprime la modulation d'amplitude. La modulation de phase est centrée autour de la porteuse $f_0 = 150$ kHz du signal incident. Elle est analysée par un corrélateur SAIP C T R 100 A suivi du transformateur de Fourier FF SAIP TF 200.

Le signal que nous analysons étant à bande étroite, nous pouvons par repliement des spectres obtenir un écart de 0,25 Hz entre point calculé. Toutefois la résolution en fréquence est plus faible.



ETUDE DU CHAMP ULTRASONORE DIFFUSE PAR UNE
SURFACE AGITEE

Les figures 8 à 10 montrent les spectres correspondant à la modulation d'amplitude du signal diffusé. Ils représentent la superposition d'un spectre de bruit et de raies plus ou moins fortes provenant des composantes périodiques de la surface. Aux grandes vitesses du vent dans la soufflerie, les spectres de bruit masquent les spectres discontinus. Les résultats apportent peu d'informations au sujet de la surface.

Pour les surfaces peu agitées, par contre, des pointes apparaissent, elles correspondent à des fréquences voisines de la fréquence fondamentale des vagues et à ses harmoniques.

Les figures 11 à 13 montrent les spectres correspondant à la modulation de phase. Ces spectres sont obtenus à partir du transformateur de Fourier. Nous constatons :

a) Aux fortes vitesses du vent le spectre de bruit est encore dominant, toutefois quelques pointes correspondant aux fréquences des vagues apparaissent.

b) Pour les vitesses intermédiaires nous obtenons des spectres de raies bien marquées.

c) Pour les faibles vitesses du vent la modulation de phase n'est pas sensible, seule la pointe centrale correspondant à la fréquence f_0 de la porteuse apparaît.

Le tableau C donne les fréquences correspondant aux raies des spectres mesurés. A titre de comparaison nous donnons les fréquences des houles des trois états de surface que nous avons envisagés. Nous remarquons ainsi que nous obtenons les harmoniques des fréquences des vagues pour les incidences voisines de l'incidence normale.



ETUDE DU CHAMP ULTRASONORE DIFFUSE PAR UNE
SURFACE AGITEE

- TABLEAU C -

SURFACES	:	I	:	III	:	V		
	:		:		:			
Fr/HOULES	:	2,76	:	3,95	:	6,98		
	:		:		:			

FREQUENCES DES RAIES RELEVÉES SUR LES SPECTRES								

67°	:	A	:	BRUIT	:	4,63 - 9,26	:	7,72-16,67
	:		:		:		:	
48°	:	F	:	3,5	:	4,5	:	PORTEUSE
	:		:		:		:	
33°	:	A	:	2,78-4,32-9,26	:	4,63 - 9,88	:	
	:		:		:		:	
17°	:	B	:	2,5 - 6 - 10	:	4,25 - 6 - 9,75	:	PORTEUSE
	:		:		:		:	
4°	:	A	:	3,1	:	3,89	:	5,86
	:		:		:		:	
4°	:	F	:	2,73-5,5-10,25	:	4,75 - 9,25	:	PORTEUSE
	:		:		:		:	
4°	:	A	:	2,49-6,48-8,95	:	3,39 - 9,98	:	5,86
	:		:		:		:	
4°	:	F	:	3 - 6,5 - 9	:	4,5 - 9,5	:	5,75
	:		:		:		:	
4°	:	A	:	2,78 - 7,72	:	2,5 - 8,64	:	6,48 - 12,9
	:		:		:		:	
4°	:	F	:	3,25 - 7,5	:	4,75 - 8,75	:	7,75
	:		:		:		:	
=====								



ETUDE DU CHAMP ULTRASONORE DIFFUSE PAR UNE
SURFACE AGITEE

CONCLUSION

L'étude statistique des variations d'amplitude du signal ultrasonore diffusé par une surface agitée nous apporte un moyen de relier le nombre de portées de corrélation spatiale de la surface vue par l'émetteur au coefficient de variation correspondant à la loi de probabilité de la modulation de l'amplitude.

Les spectres énergétiques de la modulation d'amplitude et de phase permettent de mesurer les fréquences des houles. Sauf pour le cas des faibles modulations les spectres de phase sont beaucoup plus nets que les spectres d'amplitude.

Pour ceux-ci, aux raies d'énergie correspondant aux fréquences des vagues, viennent s'ajouter le bruit dû au miroitement d'une part et des fréquences parasites provenant de la surmodulation de la porteuse d'autre part.

Les spectres que nous obtenons sont comparables à ceux de CRON et RODERICK [5] obtenus en mer et en cuve sur une houle sinusoïdale.

L'effet Doppler n'apparaît pas suivant la direction spéculaire. Toutefois un léger déplacement du récepteur de part et d'autre de celle-ci le fait apparaître. Il en résulte un déplacement du spectre par rapport à la raie centrale correspondant à la porteuse.

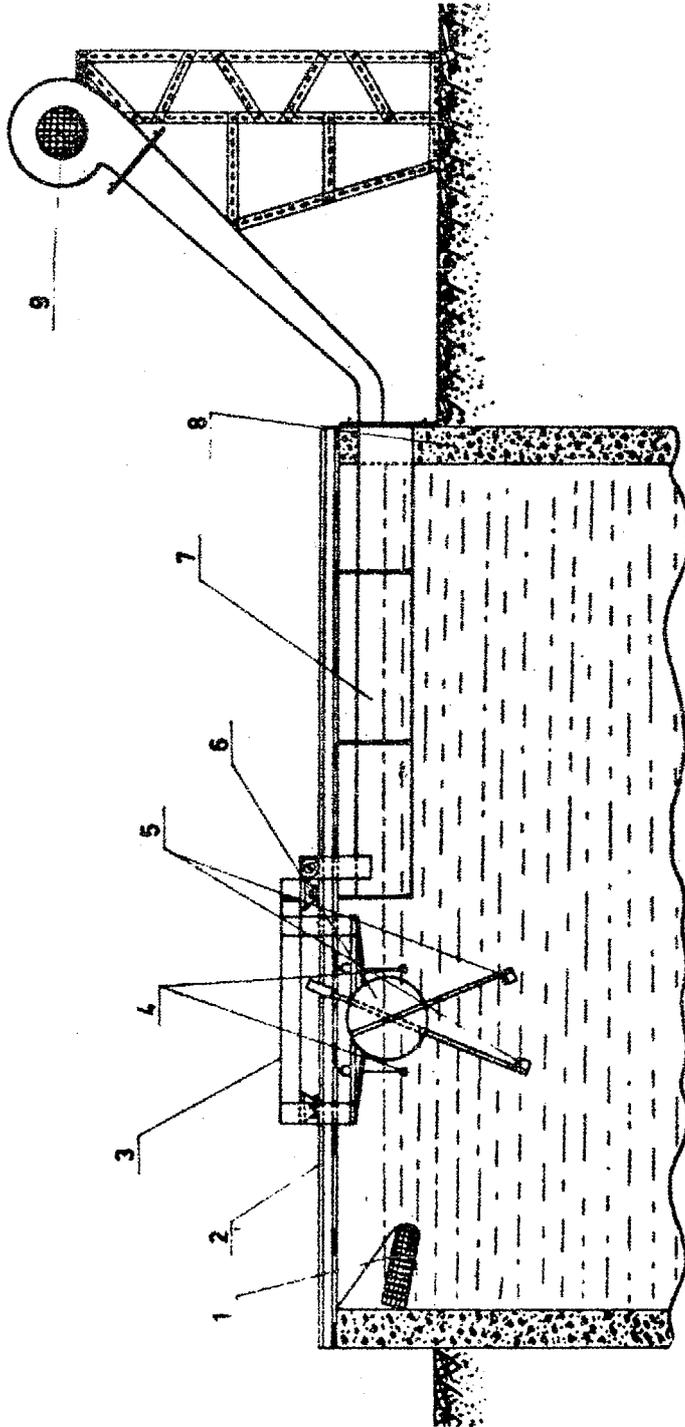


ETUDE DU CHAMP ULTRASONORE DIFFUSE PAR UNE
SURFACE AGITEE

BIBLIOGRAPHIE

- (1) Claude GAZANHES
Réflexion diffuse d'une onde ultrasonore par
par une surface aléatoire. Réalisation d'un
modèle réduit en cuve.
Deuxième colloque sur le traitement du signal
et ses applications - Nice Mai 1969 -
- (2) S.O. RICE
Mathematical Analysis of Random Noise. The Bell
System - Technical Journal - Vol 24 - 1945 -NY
- (3) V.V. OL'SHEVSKII
Characteristics of Sea reverberation -
Consultants bureau - NY 1967 -
- (4) J. MAX
Les Principales méthodes de traitement du
signal - Rapport CEA-R-4018 - Juillet 1970.
- (5) W.I. RODERICK - B.F. CRON
Frequency Spectra of Forward Scattered Sound
from the Ocean Surface.
JASA 48 - 3 - 759-766 Septembre 1970

ETUDE DU CHAMP ULTRASONORE DIFFUSE PAR UNE SURFACE
AGITEE



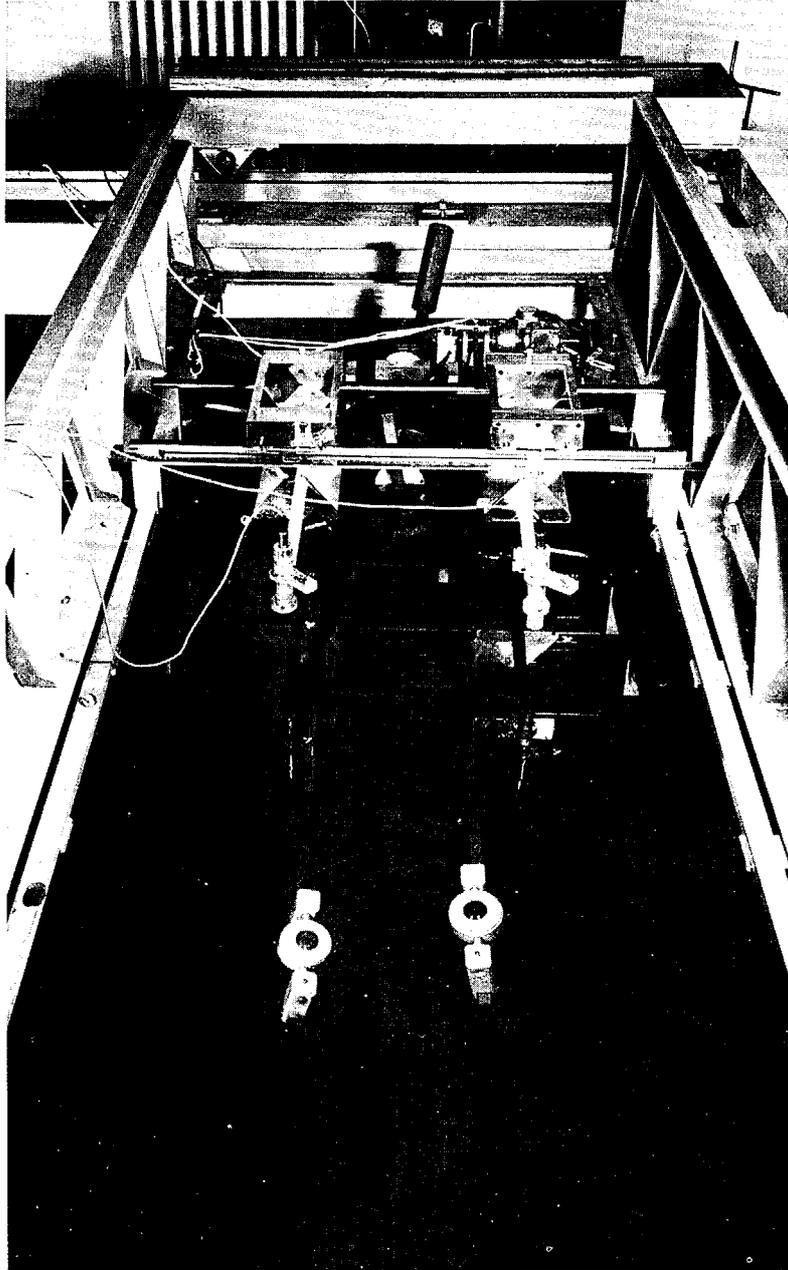
- Figure 1 -

- | | |
|--|----------------------------------|
| 1 - Amortisseur de houle | 7 - Tunnel à vent |
| 2 - Rails | 8 - Cuve |
| 3 - Pont roulant | 9 - Ventilateur de la soufflerie |
| 4 - Sondes résistantes (enregistrement des houles) | |
| 5 - Emetteurs-récepteurs à ultrasons | |
| 6 - Mécanisme d'entraînement des émetteurs à ultrasons | |



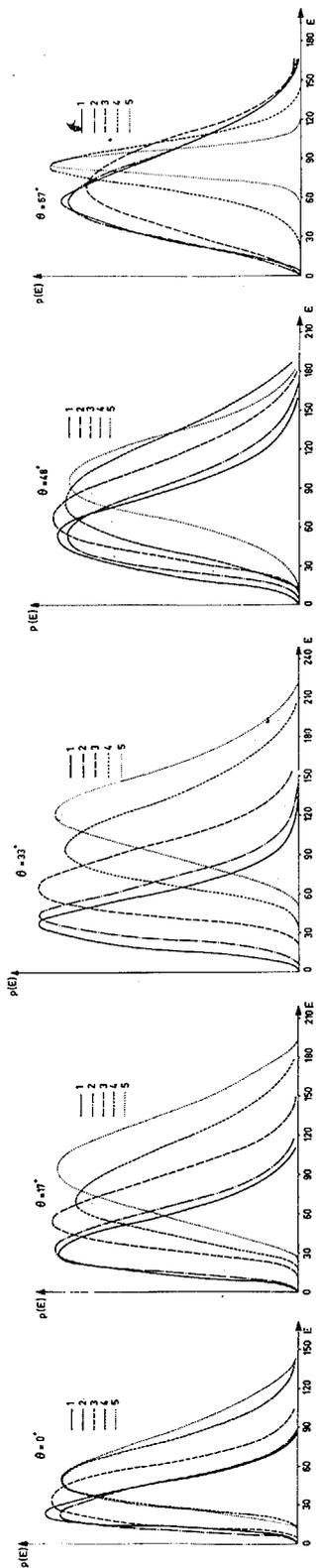


ETUDE DU CHAMP ULTRASONORE PAR UNE SURFACE
AGITEE



- FIGURE 2 -

ETUDE DU CHAMP ULTRASONORE DIFFUSE PAR UNE SURFACE AGITEE



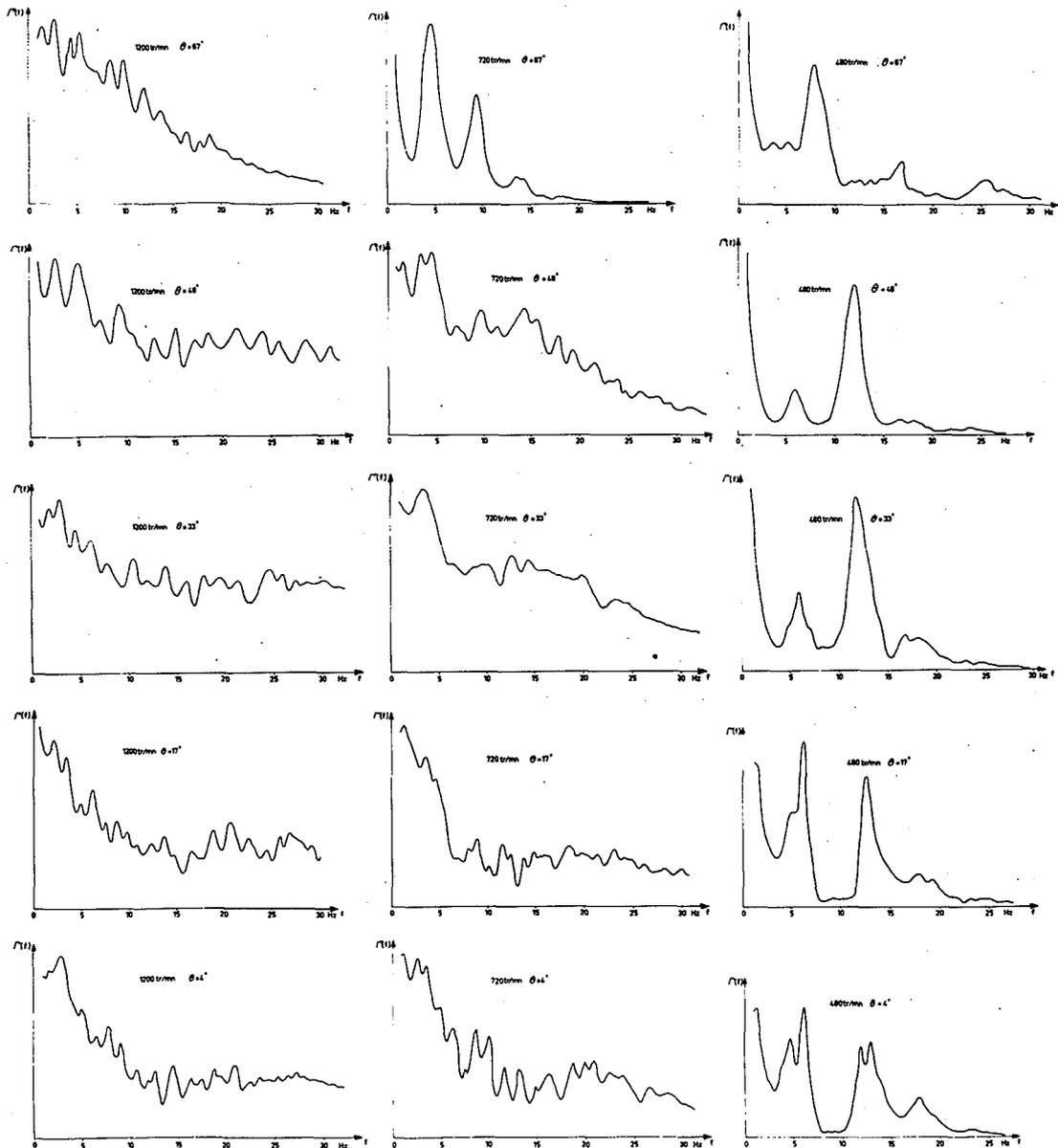
- Figure 3 à 7 -

Densité de probabilité de l'enveloppe du signal diffusé





ETUDE DU CHAMP ULTRASONORE PAR UNE SURFACE AGITEE

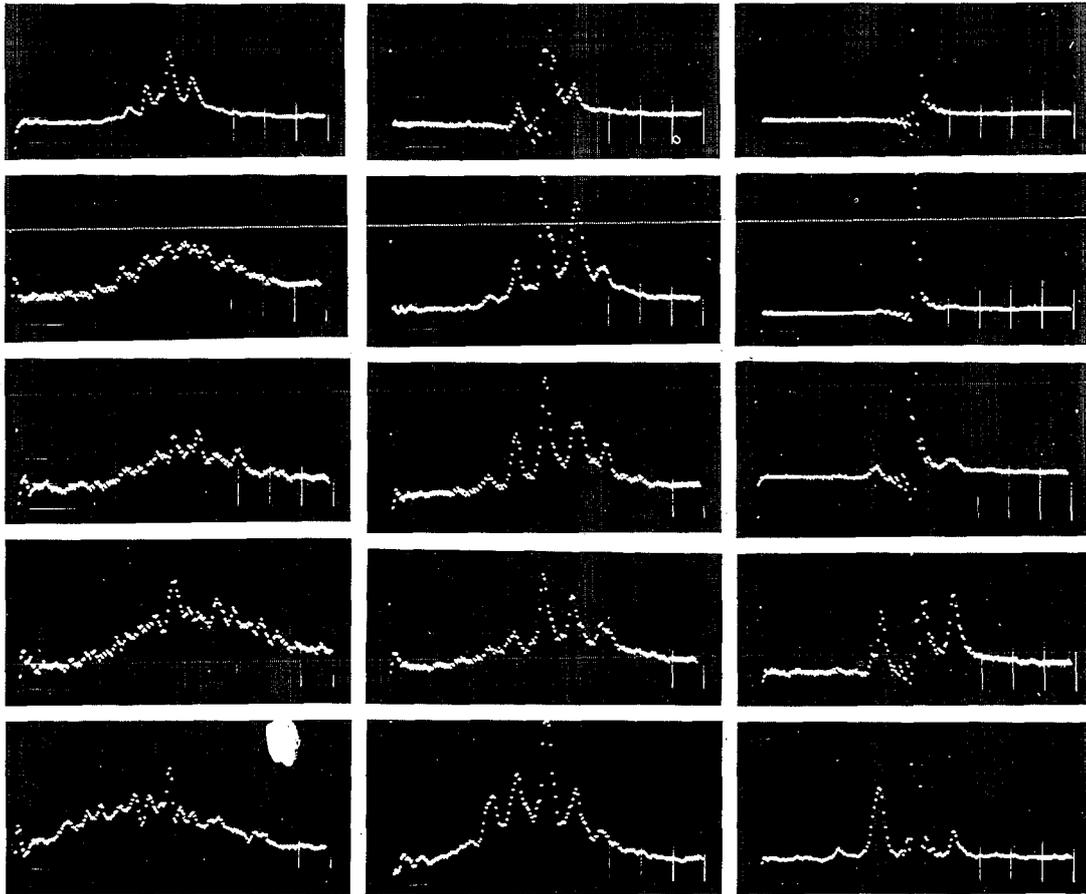


- Figures 8 à 10 -

Spectres énergétiques de la modulation d'amplitude



ETUDE DU CHAMP ULTRASONORE DIFFUSE PAR UNE
SURFACE AGITÉE



- Figure 11 à 13 -

Spectres énergétiques de la modulation de phase