

SEPTIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 28 MAI au 2 JUIN 1979

LA RETRODIFFUSION ACOUSTIQUE COMME MOYEN D'ANALYSE A DISTANCE
DE L'ETAT DE SURFACE DE LA MER.

BACK-SCATTERING OF ACOUSTIC WAVES FOR REMOTE- SENSING OF THE SEA STATES.

Jean-Pierre LEFEBVRE

LABORATOIRE DE MECANIQUE ET D'ACOUSTIQUE, 31, chemin Joseph Aiguier- 13274 MARSEILLE Cedex 2 - C.N.R.S.

RESUME

On propose en un premier temps un modèle théorique assez simple expliquant les phénomènes saillants de l'interaction d'une onde acoustique avec une onde de gravité. Le modèle est limité à l'analyse statistique au second ordre. Des expériences de contrôle sont conduites sur un modèle réduit de houle naturelle en cuve.

On montre ensuite comment ce modèle permet de tirer de mesures de rétrodiffusion des renseignements sur l'état de surface, tels que vitesse, fréquence caractéristique, et spectre de la houle. La faisabilité est mise en évidence par des expériences, toujours sur modèle réduit.

SUMMARY

In a first step, we propose a simple theoretical model to explain from the spectral point of view the interaction between acoustic and gravity waves.

In a second step we propose a remote-sensing method of the sea states - waves velocity, and frequency spectrum - by means of back-scattering measures.

The experiments were made in an acoustic tank with a wind-driven surface.



LA RETRODIFFUSION ACOUSTIQUE COMME MOYEN D'ANALYSE A DISTANCE DE L'ETAT DE SURFACE DE LA MER.

BACK-SCATTERING OF ACOUSTIC WAVES FOR REMOTE SENSING OF THE SEA STATES.

INTRODUCTION

Après s'être intéressé aux mécanismes du décalage et de l'élargissement spectral d'une onde acoustique "monochromatique" lors de sa diffraction par la surface de la mer [1] [2] [3], on s'est récemment penché sur le problème inverse, à savoir la méthodologie à employer pour obtenir par voie acoustique et à distance des renseignements sur l'état de la mer [4]. Ceci n'a été possible que grâce à une bonne maîtrise théorique de l'interaction d'une onde acoustique avec une onde de surface complexe, en l'occurrence une onde de gravité.

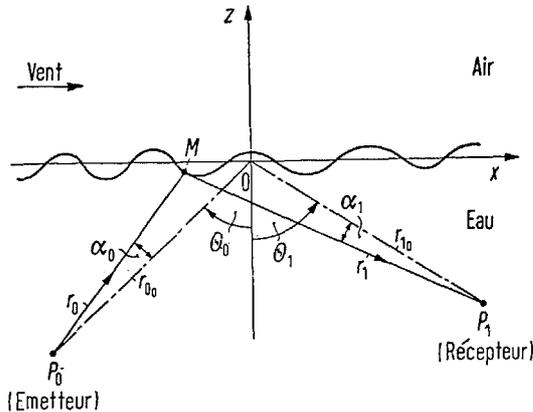
En un premier temps on rappelle dans ses grandes lignes l'étude antérieure qui a abouti à l'élaboration d'un modèle théorique assez fin pour expliquer les phénomènes saillants qui se produisent lors de l'interaction onde sonore-onde de gravité.

En un second temps on tire parti de ce modèle pour proposer une méthode simple d'investigation à distance de l'état de la mer. On adopte alors le montage monostatique qui permet d'exploiter la rétrodiffusion.

Les expériences de contrôle sont conduites en cuve, sur un modèle réduit de houle naturelle (générée par le vent d'une soufflerie).

1. INTERACTION D'UNE ONDE ACOUSTIQUE ET D'UNE ONDE DE GRAVITE.

On étudie la diffraction d'une onde ultrasonore par une surface agitée sous l'action d'un vent.
- figure 1 -



On émet en P₀, sous l'incidence moyenne θ_0 , une onde ultrasonore de fréquence ν_0 . Un récepteur, placé en P₁, capte le champ diffusé sous l'incidence moyenne θ_1 (Fig.1).

Les transducteurs étant peu directifs, la zone insonifiée est importante et couvre plusieurs longueurs d'onde de houle. Cette dernière est due à un vent parallèle à la direction P₀ P₁ et peut être décrite, statistiquement, en négligeant la dispersion (dans la zone insonifiée) par une onde plane se propageant à la vitesse moyenne v_s .

La fonction caractéristique bidimensionnelle de la surface s'écrira donc, dans ces conditions:

$$\Phi_S(u, \nu, x, x', y, y', t, t') \cong E \left\{ e^{i[\nu S(x, y, t) + \nu S(x', y', t')]} \right\} = \Psi_S(u, \nu, t - t' - \frac{x - x'}{v_s})$$

où $S(x, y, t)$ décrit l'amplitude des oscillations de la surface au point (x, y) à l'instant t.

Le champ recueilli en P₁ résulte de la diffraction par toute la zone insonifiée de la surface. On montre qu'il s'agit d'un signal à bande étroite comprenant une modulation d'amplitude et une modulation de phase.

On ne s'intéresse qu'à cette dernière (un amplificateur à contrôle automatique de gain supprimant la modulation d'amplitude) :

$$X(t) = e^{i\pi\nu_0 t} \int_{\mathbb{R}^2} A(x, y) e^{-ik[ax + by + cS(x, y, t)]} dx dy$$

où k est le nombre d'onde des ultrasons, a, b, c les cosinus directeurs :

$$a = \sin \theta_0 - \sin \theta_1, \quad b = 0, \quad c = \cos \theta_0 + \cos \theta_1$$

et A(x, y) le produit des directivités de l'émetteur et du récepteur.

Le calcul de la densité spectrale de la modulation de phase X(t) donne :

$$\chi(\nu) = \delta(\nu - \nu_0) * \left[\int \int \left(\frac{ka}{2\pi} + \frac{\nu}{v_s}, \frac{kb}{2\pi} \right)^2 \Psi_S(-kx, ky, \nu) \right]$$

où $\int \int$ (u, v) est la TF bidimensionnelle de A(x, y), et $\Psi_S(u, v, \nu)$ la TF de la fonction caractéristique bidimensionnelle de la surface :

$$\Psi_S(u, \nu, \tau) = E \left\{ e^{i[\nu S(x, y, t) + \nu S(x, y, t - \tau)]} \right\}$$



LA RETRODIFFUSION ACOUSTIQUE COMME MOYEN D'ANALYSE A DISTANCE
DE L'ETAT DE SURFACE DE LA MER.

BACK-SCATTERING OF ACOUSTIC WAVES FOR REMOTE-SENSING OF THE SEA STATES.

2. LE PROBLEME DIRECT : CONTROLE DE LA VALIDITE DU
MODELE.

Les expériences sont menées en cuve, avec une houle générée par le vent d'une soufflerie et contrôlée par des sondes de niveau.

Le signal étudié étant à bande très étroite (quelques dizaines de hertz autour de 150 KHz), on effectue une translation de porteuse à 50 Hz afin de pouvoir étudier les deux bandes latérales.

2.1. Etude qualitative.

L'expression théorique que nous avons trouvée peut s'interpréter de la manière suivante :

- La convolution par $\delta(\nu - \nu_0)$ indique que le spectre est centré sur la fréquence d'émission ν_0 .

- Le terme $\Psi_S(\nu)$, transformée de Fourier de $\Psi_S(\tau)$, fonction caractéristique, confère au spectre ultrasonore l'allure d'un spectre de raies ($0, \pm \nu_s, \pm 2\nu_s \rightarrow$) dans le cas où la surface est à bande étroite autour d'une fréquence ν_s .

- Le terme $\delta(\frac{k_a}{2\pi} + \frac{\nu}{\nu_s}, \frac{k_b}{2\pi})$, transformée de Fourier de $A(x, y)$, produit des directivités des transducteurs, est centré sur la fréquence

$$\nu_D = -\frac{k_a}{2\pi} \frac{\nu_s}{c} = \nu_0 \frac{\nu_s}{c} (\sin \theta_1 - \sin \theta_2)$$

qui n'est autre que la formule classique du Doppler.

Ainsi $\delta(u, \nu)$ se comporte comme une "fenêtre" à travers laquelle on "voit" $\Psi_S(\nu)$; cette fenêtre se déplaçant avec l'effet Doppler et étant d'autant plus large que les transducteurs sont directifs (Fig.2).

Ces divers mécanismes sont bien mis en évidence expérimentalement ([1] [2] [3])

2.2. Etude quantitative.

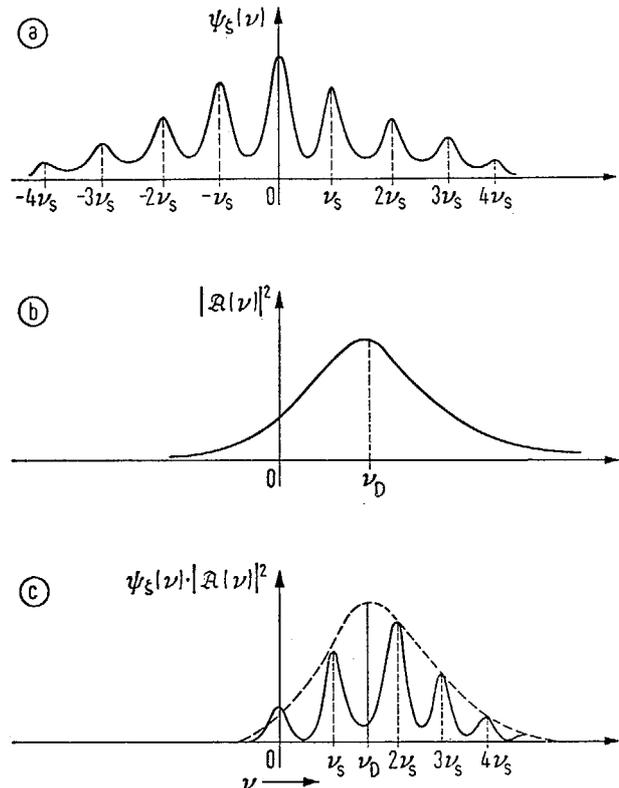
Un contrôle rigoureux de l'expression théorique trouvée nécessiterait la connaissance de la fonction caractéristique $\Psi_S(\tau)$.

On montre qu'une hypothèse supplémentaire de surface Gaussienne permet de mener à bien les calculs à partir de la simple connaissance de la fonction de corrélation $\Gamma_S(\tau)$ ou de la densité spectrale énergétique $\delta_S(\nu)$ de la surface: $\delta_S(\nu) = e^{-k^2 \sigma_s^2 [1 - \beta_S(\tau)]}$ on peut en effet écrire alors: $\Psi_S(\tau) = e^{-\frac{1}{2} k^2 \sigma_s^2 \tau^2}$ où σ_s est l'écart type de la surface et $\Gamma_S(\tau) = \beta_S(\tau)$ la fonction de corrélation.

Le calcul numérique de $\Psi_S(\tau)$ à partir de $\Gamma_S(\tau)$ nécessite une régularisation de $\Gamma_S(\tau)$. Celle-ci est effectuée en approximant $\Gamma_S(\tau)$ par

une sinusoïde amortie $e^{-\alpha_s \tau} \cos(2\pi \nu_s \tau)$, où ν_s est la fréquence centrale des spectres de houle, α_s le coefficient d'amortissement de $\Gamma_S(\tau)$.

- Figure 2 -



On montre qu'on obtient une bonne concordance entre spectres ultrasonores théoriques et expérimentaux en prenant un α_s arbitrairement la moitié du coefficient d'amortissement réel; c'est-à-dire un spectre δ_S deux fois plus étroit que le spectre réel. [1] [2]. Cette opération est suffisante pour rendre valide l'hypothèse Gaussienne.

3. LE PROBLEME INVERSE: ACCES INDIRECT AUX CARACTERISTIQUES DE LA SURFACE.

Notre modèle théorique fait intervenir la surface par l'intermédiaire des paramètres statistiques:

ν_s : vitesse moyenne de propagation des vagues

Ψ_S : fonction caractéristique en un point, ou sa TF Ψ_S

ou Γ_S : fonction de corrélation en un point, lorsqu'on utilise l'hypothèse Gaussienne, ou sa TF δ_S



LA RETRODIFFUSION ACOUSTIQUE COMME MOYEN D'ANALYSE A DISTANCE DE L'ETAT DE SURFACE DE LA MER.

BACK-SCATTERING OF ACOUSTIC WAVES FOR REMOTE- SENSING OF THE SEA STATES.

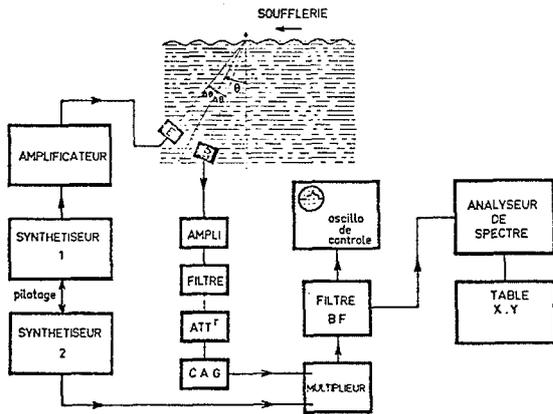
Le problème inverse consiste à calculer ces diverses quantités à partir de mesures expérimentales du spectre ultrasonore.

Ce résultat ne peut être atteint qu'à l'aide d'un compromis pour la directivité des transducteurs:

Il faut en effet que la "porte" $\mathcal{A}(u,v)$ soit suffisamment étroite pour qu'on puisse apprécier son centre \mathcal{V}_D qui donne la vitesse v_s , et suffisamment large pour qu'on puisse y observer plusieurs raies de \mathcal{V}_s , ce qui donne \mathcal{V}_s .

Nous adoptons la position de rétrodiffusion qui confond émetteur et récepteur: en fait, pour des raisons pratiques, ceux-ci sont juxtaposés sur un même bâti et convergent avec un angle $2 \Delta\theta = 10^\circ$, selon une direction moyenne θ (Fig.3).

- Figure 3 -



On a alors $\theta_0 = \theta + \Delta\theta$, $\theta_1 = -(\theta - \Delta\theta)$ et $a = 2 \sin\theta \cos \Delta\theta$, $b = 0$, $c = 2 \cos\theta \cos \Delta\theta$

Dans ces conditions le Doppler est :

$$\mathcal{V}_D = -2 \frac{v_s}{c_0} v_0 \sin\theta \cos \Delta\theta$$

On le rendra positif en prenant $\theta > 0$ et $v_s < 0$

3.1. Accès à la vitesse de propagation de la houle.

Le décalage Doppler \mathcal{V}_D de la "fenêtre" spectrale donne accès non pas à la célérité des ondes de gravité v_s mais à sa composition $v_{st} = v_s + v_{se}$ avec la vitesse d'entraînement v_{se} .

$$\mathcal{V}_{st}^{(US)} = -\frac{c_0}{2} \frac{\mathcal{V}_D}{v_0} \frac{1}{\sin\theta \cos \Delta\theta}$$

Les mesures sont effectuées dans les conditions suivantes:

$$\theta = 13^\circ, \Delta\theta = 5^\circ, \mathcal{V}_0 = 150050 \text{ Hz}, c_0 = 1485 \text{ m/s (21}^\circ\text{C)}$$

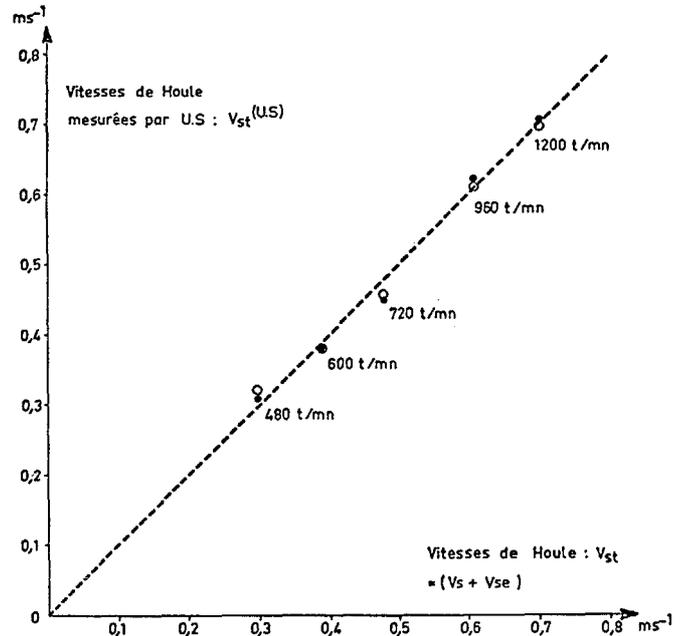
; pour cinq états de surface correspondant à cinq régimes de soufflerie ; à l'aide d'un analyseur de spectre "ubiquitus" dans la bande 0-50 Hz pour les spectres translatés à 0Hz(\bullet); dans la bande 0-100 Hz pour les spectres translatés à 50 Hz (\circ) (Tableau I, Fig.4).

Les mesures directes de v_s ont été faites par intercorrélation entre 2 sondes; celles de v_{se} par entraînement d'un bouchon immergé.

- Tableau I -

Régime soufflerie (t/mn)	v_s (cm/s)	v_{se} (cm/s)	v_{st} (cm/s)	$(US) v_{st}$ (cm/s)	
1200	50,5	20	70,5	70,44	69,34
960	41	20	61	61,83	60,72
720	34,5	13,3	47,8	44,83	45,27
600	29,8	9,5	39,3	37,76	37,98
480	23,8	5	28,8	31,13	32,02

- Figure 4 -



L'erreur relative de mesure est ainsi, en moyenne quadratique de 5,4%.

3.2. Accès à la fréquence de la houle.

L'accès au spectre \mathcal{V}_s de la surface c'est-à-dire à la fonction de corrélation \mathcal{R}_s pose dans le cas général (λ quelconque) le même problème de régularisation des données expérimentales que pour le pro-

LA RETRODIFFUSION ACOUSTIQUE COMME MOYEN D'ANALYSE A DISTANCE DE L'ETAT DE SURFACE DE LA MER.

BACK-SCATTERING OF ACOUSTIC WAVES FOR REMOTE -SENSING OF THE SEA STATES.

blème direct.

Nous ne pouvons actuellement accéder dans le cas général (λ quelconque) qu'à la fréquence moyenne γ_s de la surface, par mesure de la périodicité des raies du spectre $\gamma(\nu)$.

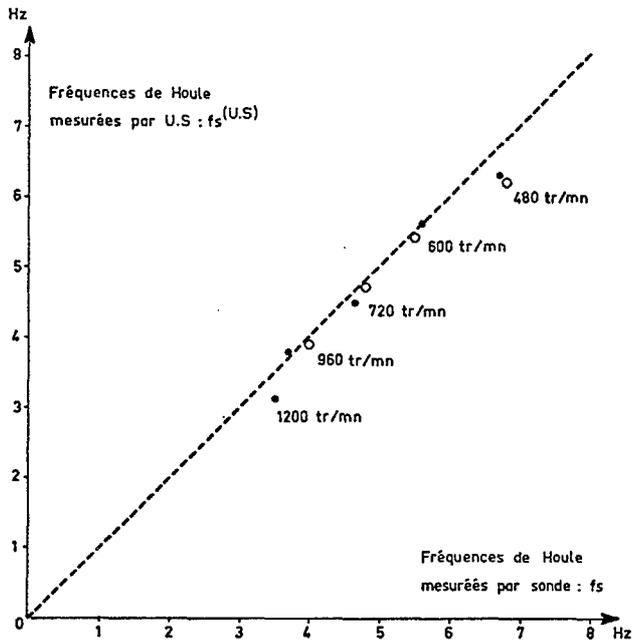
Ce dernier est relevé dans les conditions de la réflexion spéculaire ($\theta=0^\circ$) où il est symétrique, pour $\Delta\theta = 5^\circ$, $\gamma_0 = 150025$ Hz; pour cinq états de surface correspondant à cinq régimes de soufflerie différents; à l'aide d'un analyseur de spectre "ubiquitus" (dans la bande 0-20 Hz pour les spectres translétés à 0 Hz (●), dans la bande 0-50 Hz pour les spectres translétés à 25 Hz (○)). (Tableau II, Fig.5).

Les mesures directes de γ_s sont faites avec le même analyseur, à partir d'une sonde de niveau.

- Tableau II -

Régime soufflerie (t/mn)	● (US) γ_s (Hz)		○ (US) γ_s (Hz)	
	γ_s (Hz)	γ_s (Hz)	γ_s (Hz)	γ_s (Hz)
1200	3,49	3,15	3,50	
960	3,72	3,80	4,00	3,90
720	4,64	4,49	4,80	4,70
600	5,64	5,60	5,50	5,35
480	6,69	6,24	6,80	6,20

- Figure 5 -



L'erreur relative de mesure est ainsi, en moyenne quadratique, de 5,3%.

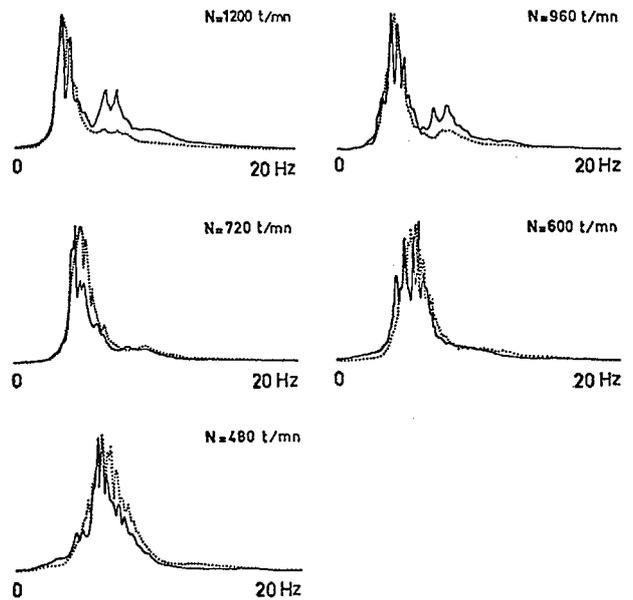
3.3. Accès au spectre de la houle.

On a vu que cet accès est difficile dans le cas général pour des problèmes de régularisation. Cependant, du fait que l'on est maître de la fréquence d'émission, on peut descendre en basses fréquences de façon à rendre le paramètre $kc\sigma_s^2$ petit. La fonction caractéristique de la surface se réduit alors, toujours sous l'hypothèse Gaussienne à $\Psi_s(\nu) = 1 - k^2 c^2 \sigma_s^2 (1 - \rho_s(\nu))$ ou $\Psi_s(\nu) = (1 - k^2 c^2 \sigma_s^2) + k^2 c^2 \rho_s(\nu)$, et le spectre ultrasonore de la rétrodiffusion spéculaire ($\theta=0$) à :

$$\gamma(\nu) = \delta(\nu - \gamma_0) * [|t_{\theta}(0,0)|^2 (1 - 4k^2 c^2 \sigma_s^2) \delta(\nu) + |t_{\theta}(\nu,0)|^2 4k^2 c^2 \sigma_s^2 \delta(\nu)]$$

Le spectre de la houle $\gamma_s(\nu)$ apparaît alors directement en tant que bande latérale du spectre ultrasonore $\gamma(\nu)$, simplement pondéré par la fenêtre t_{θ} qui est maintenant très large du fait que l'on travaille en basses fréquences (forte directivité, donc A étroit et sa TF t_{θ} large) et qui n'affecte donc pas la mesure.

- Figure 6 -



La figure 6 donne une comparaison entre les spectres obtenus par ultrasons (-) et les spectres obtenus par sondes résistives (...); pour $\theta=0^\circ$, $\Delta\theta=5^\circ$, $\gamma_0 = 30060$ Hz; pour cinq états de surface correspondant à cinq régimes de souffleries différents.



LA RETRODIFFUSION ACOUSTIQUE COMME MOYEN D'ANALYSE A DISTANCE
DE L'ETAT DE SURFACE DE LA MER.
BACK-SCATTERING OF ACOUSTIC WAVES FOR REMOTE-SENSING OF THE SEA STATES.

Le matériel est toujours le même, et la bande analysée de 0 à 20 Hz. Le paramètre $\frac{c \cos \theta}{\lambda}$ prend successivement les valeurs 0,25; 0,16; 0,09; 0,03; 0,01.

CONCLUSION.

L'élaboration d'un modèle théorique simple et performant pour rendre compte des perturbations spectrales provoquées par la surface de la mer sur un signal acoustique, nous a permis de mettre au point une méthode fiable d'investigation à distance de l'état de la mer.

En un premier temps des mesures de rétrodiffusion hautes fréquences permettent de déterminer la vitesse des vagues et leur fréquence caractéristique. En un second temps, des mesures basses fréquences permettent d'accéder à une caractéristique plus fine: le spectre de la houle.

Les opérations à effectuer étant très simples, on pourrait envisager un système opérationnel entièrement automatique.

BIBLIOGRAPHIE.

- [1] J.P. LEFEBVRE
Diffusion d'une onde sonore par une surface agitée.
Analyse statistique au second ordre.
Thèse de 3ème Cycle d'Acoustique,
Université de Provence (1971).
- [2] J.P. LEFEBVRE, C. GAZANHES
Diffusion d'une onde sonore par une surface agitée.
Analyse statistique au second ordre.
Acustica, Vol.27,N° 2, pp. 197-202 (1972).
- [3] C. GAZANHES, J. LEANDRE, J.P. LEFEBVRE
Spectral structure of an ultrasound wave scattered
by a random surface: application to the scattering
of sound from the sea surface.
Journ. Acust. Soc. Amer. Vol.63,n°5, pp.1347-52.
(1978).
- [4] J.P. LEFEBVRE, C. GAZANHES
Détermination des paramètres statistiques de la
surface de la mer par voie ultrasonore.
3ème Congrès Français de Mécanique- Grenoble
(1977).