

Annales Hydrographiques

5ème série ; Vol. 4, Fasc. 1, 1976, n° 743, PP. 59-64.

RELATIONS ENTRE LES VARIATIONS DE PRESSION AU FOND ET LES COURANTS PARTICULAIRES DANS LA HOULE CÔTIÈRE PROCHE DU DÉFERLEMENT

par

MM. Michel ARHAN et Yves GOURITEN

Centre Océanologique de Bretagne

RÉSUMÉ

— Des enregistrements *in situ* de variations de pression au fond et de courants particuliers au sein de la houle littorale mettent en évidence le caractère non-linéaire de l'écoulement dans la zone de déferlement. Le calcul des corrélations et cohérences entre ces paramètres permet de déterminer les domaines d'influence dans le spectre des courants côtiers, de la houle et de la turbulence. Une relation quasi linéaire courant-pression apparaît dans le domaine correspondant à la houle. —

ABSTRACT

— *In situ* recordings of pressure near the bottom and particle velocity in shallow water reveal the non-linear nature of the flow in the breaker zone. The different frequency domains linked to nearshore currents, wind waves, and turbulence are determined using correlations and coherences. A quasi-linear pressure-velocity relation exists in the wind wave frequency range. —

INTRODUCTION

La houle côtière exerce une influence sur les structures littorales naturelles ou artificielles, directement par les efforts considérables qu'elle engendre, ou indirectement en créant des courants côtiers qui agissent sur le régime de sédimentation d'une zone donnée. Actuellement, les connaissances théoriques et expérimentales des écoulements liés aux trains d'ondes de forte cambrure en eau peu profonde ne sont pas suffisantes pour décrire correctement ces phénomènes. Compte tenu de leur complexité (écoulement non-linéaire et non-stationnaire, fond de profondeur variable), il est peu probable que la théorie puisse venir à bout de tels problèmes dans les années à venir. Par contre, sur le plan expérimental, l'arrivée sur le marché dans les dernières années de différents capteurs (bouée Datawell, courantomètres à ultrasons ou électromagnétiques) rend possible une observation quantitative précise de la houle côtière et des courants particuliers qui en découlent.

Ces considérations ont conduit l'équipe d'Océa-

nographie Physique du Département Scientifique du Centre Océanologique de Bretagne à réaliser et implanter une station de mesure de houle littorale sur la plage de La Palue, située dans la presqu'île de Crozon. Ce site a été choisi en raison de sa faible pente (2,5/100) et de sa bonne exposition aux fortes houles d'ouest arrivant du Golfe de Gascogne. Dans le cadre des opérations menées à la station, des mesures simultanées de pression au fond et de vitesses horizontales ont été effectuées en janvier 1974 lors d'une tempête. Ce rapport présente les résultats de l'analyse statistique de ces enregistrements. La première partie de l'étude met en évidence la non-linéarité importante de la houle à la limite du déferlement. Dans la deuxième partie les calculs des corrélations et des cohérences entre les variations de pression sur le fond et la composante de la vitesse particulière dans le sens de propagation de la houle montrent une relation quasi linéaire entre ces deux variables dans le domaine de fréquences correspondant à la houle.

Contribution n° 317 du Département Scientifique du Centre Océanologique de Bretagne.

I. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

— Le courantomètre utilisé est un courantomètre électromagnétique BEN-COMEX à deux voies, travaillant sur la gamme ± 3 m/s. Les caractéristiques de l'appareil, déterminées par étalonnage, sont les suivantes :

- précision de 2% sur [20 cm/s, 3 m/s]
- erreur absolue inférieure à 5 cm/s sur [0,20 cm/s].

— Un capteur de pression absolue est posé sur le fond sous le courantomètre. L'ensablement de ce capteur au cours de l'expérience et les variations de pression atmosphérique sont la cause d'une imprécision de 10 cm sur la pression moyenne enregistrée.

— L'ensemble du dispositif expérimental est représenté sur la figure 1. Les capteurs étant posés à la laisse de basse mer, la hauteur d'eau à leur niveau n'excède pas 4 m. Les signaux analogiques sont ramenés par un câble à la station d'enregistrement à terre où ils sont digitalisés et stockés sur ruban perforé.

— Vingt-deux enregistrements de 35 mm effectués à la cadence d'échantillonnage d'une demi-seconde furent obtenus pendant la durée des mesures.

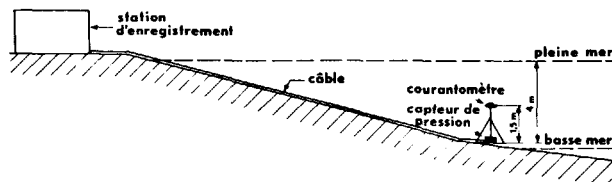


FIG. 1

II. ÉTUDE STATISTIQUE DE CHAQUE SIGNAL

1) Prétraitement

La composante de marée est éliminée sur chaque signal à l'aide d'un filtre passe-haut, réalisé pratiquement en recalant les données sur une moyenne courante calculée sur des intervalles de temps de 8 mn.

La vitesse horizontale au sein du fluide est connue à chaque instant par ses composantes suivant les axes du courantomètre. La position du courantomètre étant indépendante de la direction de la houle, un nouveau repère est défini pour chaque enregistrement, tel que les deux compo-

santes de la vitesse soient non corrélées. Celui des deux nouveaux axes correspondant au plus grand transport d'énergie est considéré comme l'axe moyen de propagation de la houle.

Le traitement statistique décrit ci-après a été effectué sur les données dans ce nouveau système d'axes, dont la figure 2 présente un échantillon. Les variations de pression au fond et les vitesses suivant l'axe moyen de propagation de la houle et l'axe directement perpendiculaire sont notées respectivement p , u , et v .

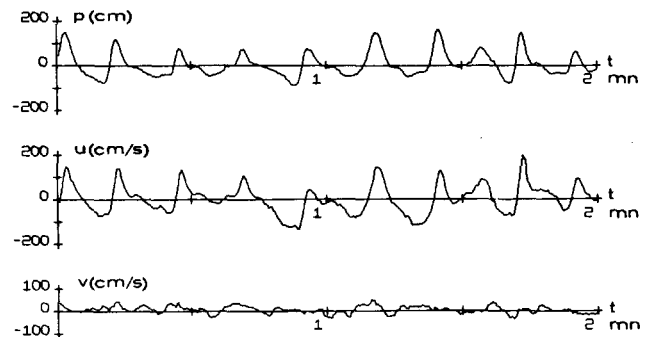


FIG. 2

2) Ordres de grandeur

Les variations maximales crête-creux enregistrées au cours de cette campagne de mesure sont les suivantes :

- pression au fond : 2,5 m d'eau pour un niveau moyen de 3,5 m;
- vitesse dans le sens de la houle au niveau du courantomètre : 3,5 m/s.

Les accélérations maximales sont de l'ordre de 2 m/s^2 .

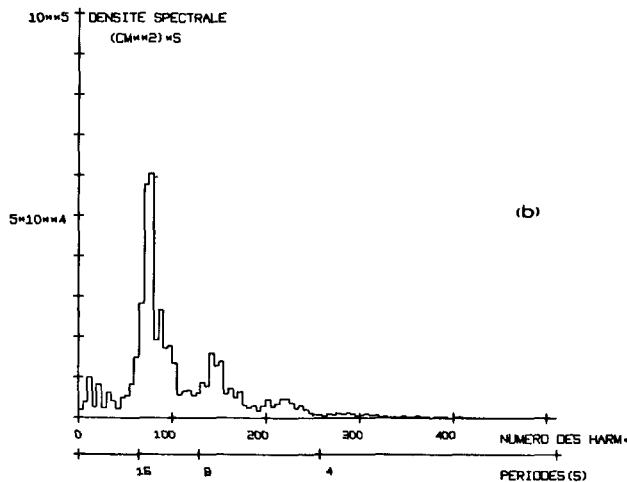
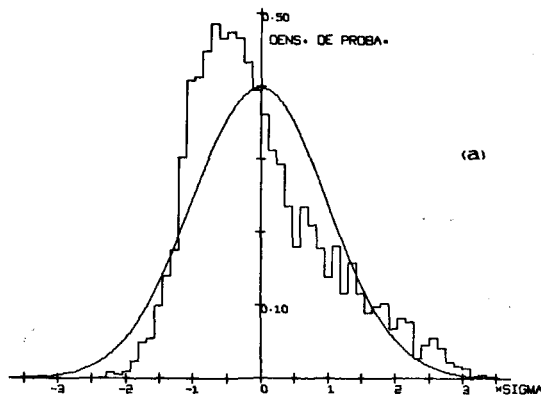
3) Histogrammes

Sur les figures 3(a), 4(a) et 5(a) sont tracés les histogrammes des variables centrées normées p , u et v ainsi que la courbe de Gauss de variance unité. Si la distribution de la vitesse transversale v est bien représentée par une loi normale, les histogrammes de p et u par contre s'écartent sensiblement de la courbe gaussienne. Le calcul des moments d'ordre 3 et 4 des distributions normées (facteur de dissymétrie m_3 et facteur d'aplatissement m_4) a permis de chiffrer ces écarts. Pour une loi normale :

$$m_3 = 0; \quad m_4 = 3.$$

Le tableau ci-dessous regroupe les valeurs maximales et minimales de ces coefficients ainsi que leurs valeurs moyennes calculées sur les vingt-deux enregistrements.

	p		u		v	
	m ₃	m ₄	m ₃	m ₄	m ₃	m ₄
mini	0,42	2,82	0,13	2,73	-0,06	3,05
maxi	0,82	3,44	0,66	3,32	0,26	3,98
moyenne	0,62	3,04	0,37	2,99	0,04	3,30



Les valeurs du coefficient de dissymétrie de la distribution de p sont supérieures à d'autres valeurs expérimentales publiées par Kinsman [2] et Longuet-Higgins [3], qui n'excèdent pas 0,43. D'autres mesures effectuées lors d'une tempête à la station de houle, par une profondeur de 10 m, ont fourni des valeurs de m_3 inférieures à 0,35. Les chiffres présentés plus haut indiquent une non-linéarité importante qui se manifeste seulement lorsque la profondeur moyenne de l'eau et l'amplitude crête à creux des vagues sont voisines. Ce résultat est en accord avec l'observation courante : la déformation de la houle en eau peu profonde, vers un profil d'onde solitaire, ne devient importante qu'au voisinage immédiat du rivage ; l'allure de l'histogramme de la figure 3(a) traduit l'aplatissement du creux et l'augmentation de la cambrure

près de la crête, pour une onde à la limite du déferlement.

4) Spectres d'énergie

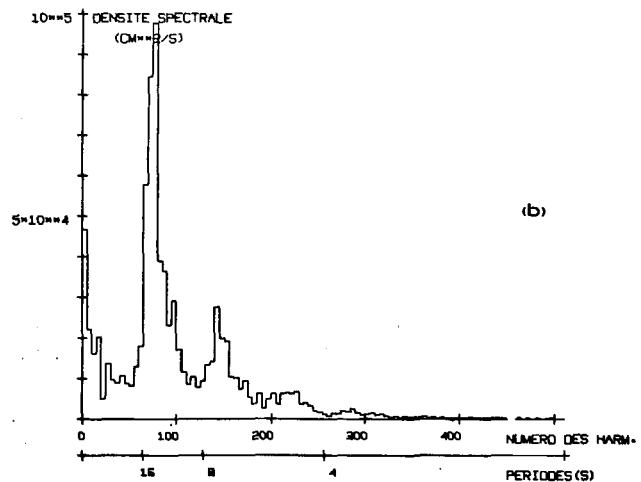
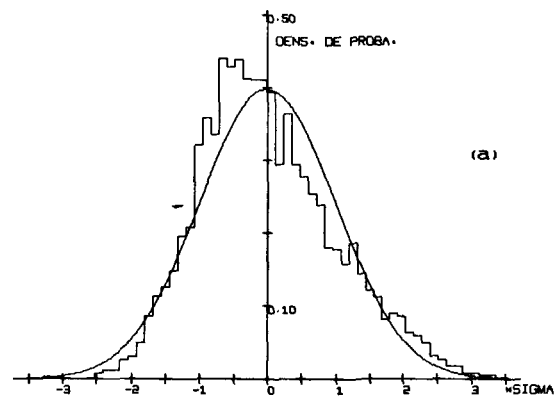
Les spectres d'énergie sont présentés sur les figures 3(b), 4(b) et 5(b). La non normalité des signaux ne permet pas de chiffrer la précision de l'estimation de ces spectres. Pour des signaux gaussiens chaque niveau d'énergie calculé par la méthode employée aurait une répartition en χ^2 à 20 degrés de liberté.

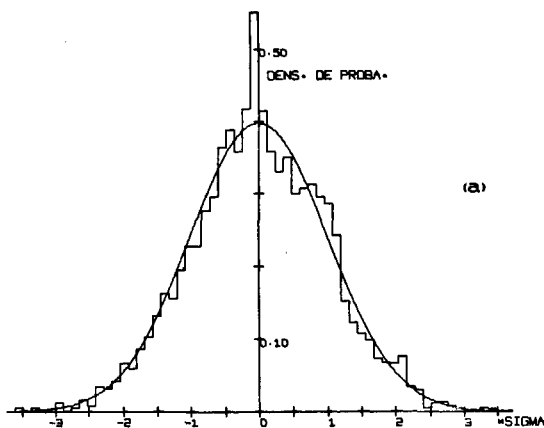
Caractères généraux des spectres

Le maximum d'énergie dans les spectres de p et u correspond à des périodes variant de 12 s à 16 s suivant les enregistrements.

La vitesse transversale v peut être considérée comme un bruit blanc.

Le filtrage hydrostatique inhérent à la méthode de mesure utilisée ne permet pas de détecter les ondes de courte période. Ceci se traduit par un





ENR. NO. 2 VITESSE TRANSVERSALE

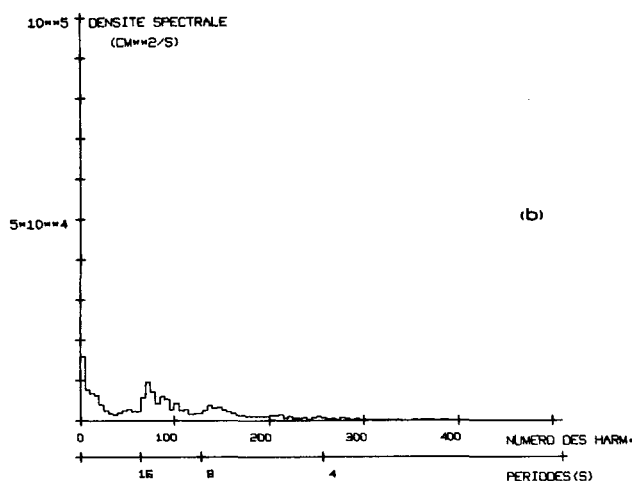


FIG. 5

très faible niveau d'énergie dans le spectre au-dessous de 3 s.

Un niveau d'énergie non négligable existe dans les spectres de u et v et n'apparaît pas dans le spectre de p , aux basses fréquences (périodes de 4 à 5 mn). Ceci révèle l'existence de courants côtiers fluctuants au large du point de déferlement.

Non-linéarité des signaux

Sur certains spectres (dont ceux présentés ici), des maxima secondaires existent aux harmoniques de la période fondamentale de la houle. A l'approche du rivage, les conditions non linéaires satisfaites à la surface libre produisent un transfert d'énergie fondamentale de la houle au large vers les fréquences multiples de celle-ci. Un programme de mesures simultanées au large et à la côte sera mis en œuvre pendant l'hiver 1974-75 ayant pour but de préciser ce point.

Ces résultats expérimentaux sont à rapprocher du modèle théorique de houle non linéaire, établi par L. Tick [7] qui met en évidence l'existence de tels maxima secondaires du spectre.

III. CORRÉLATIONS ENTRE LES VARIATIONS DE PRESSION AU FOND ET LA VITESSE DANS LE SENS DE LA HOULE

La théorie classique de Stokes s'applique bien à la houle au large et permet avec une bonne approximation de déduire le champ de vitesse au sein du fluide à partir du profil de la surface libre. Près du littoral, par contre, la profondeur variable et les non-linéarités à la surface libre empêchent toute résolution théorique précise de l'écoulement. Une vérification expérimentale de chaque résultat théorique est souhaitable dans cette zone. Les mesures simultanées de pression au fond et de vitesses particulières recueillies à la station de La Palue ont permis cette confrontation avec l'expérience. La houle de Stokes du premier ordre (houle d'Airy) et la théorie non linéaire de l'onde longue, on été testées par l'étude des corrélations entre les deux signaux aléatoires p et u , pour quatre enregistrements.

1) Rappels théoriques

Les variations de pression au fond autour de la valeur moyenne sont notées p , les pressions totales P et la pression moyenne P_m .

• *Théorie linéaire d'Airy* : dans les conditions de l'expérience et pour une onde monochromatique de longueur $L = 2\pi/k$ et de pulsation σ , on a :

$$p = \frac{\rho\sigma}{chkh_0} u$$

où u est la vitesse horizontale à une distance h_0 au-dessus du fond et ρ la masse spécifique du fluide considéré.

• *Théorie non linéaire de l'onde longue* [5] : la vitesse au sein du fluide est constante dans un plan vertical perpendiculaire à la direction de propagation de la perturbation et a pour valeur :

$$u = 2\sqrt{\frac{P}{\rho}} - 2\sqrt{\frac{P_m}{\rho}}$$

Ce modèle théorique néglige les accélérations verticales qui sont particulièrement importantes au voisinage du déferlement.

2) Corrélations

Le tableau ci-dessous présente les coefficients de corrélation entre u et p d'une part, et u et \sqrt{P} d'autre part.

Enregistrement n°	2	5	6	7
Corrélation u, p (théorie d'Airy)	0,823	0,862	0,872	0,836
Corrélation u, \sqrt{P} (th. ondes longues)	0,804	0,872	0,836	0,858

Il n'est pas possible, au vu de ces résultats, de faire un choix entre les deux théories. Les nuages de points (u, p) et (u, \sqrt{P}) présentés sur les figures 6(a) et 7(a), ont des formes très voisines. La figure 6(a) porte aussi l'arc de parabole d'équation

$$u = 2 \sqrt{\frac{P}{\rho}} - 2 \sqrt{\frac{P_m}{\rho}}$$

limité au domaine de variation des variables P et u . Ce domaine correspond à la partie quasi-rectiligne de la parabole, ce qui explique l'équivalence des deux théories.

La pente moyenne des nuages de points est de l'ordre de $u/p = 1,5$. Les pentes théoriques seraient 1,82 pour une houle d'Airy de période 6 s et 1,76

pour une houle d'Airy de période 15 s. Pour les très grandes périodes, les deux théories fournissent le même résultat :

$$u = \frac{p}{\sqrt{\rho P_m}} = 1,72 p.$$

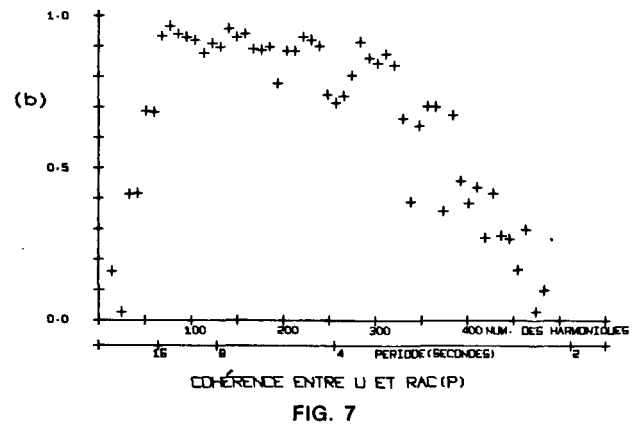
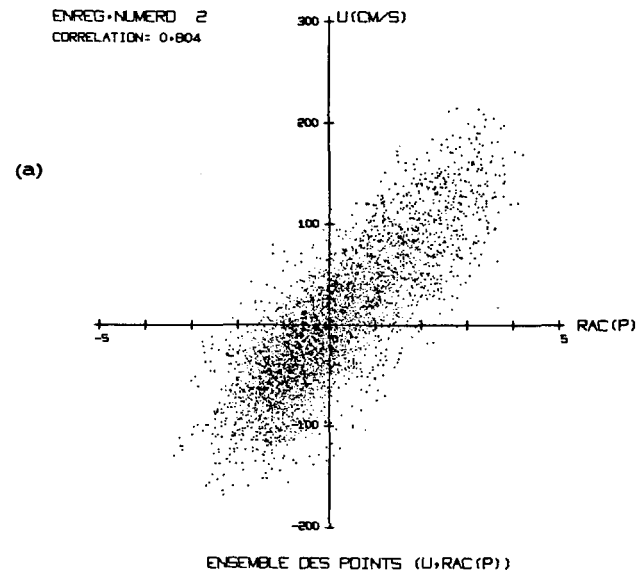
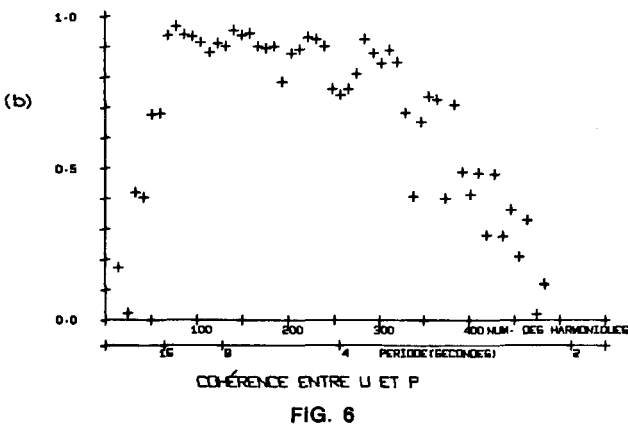
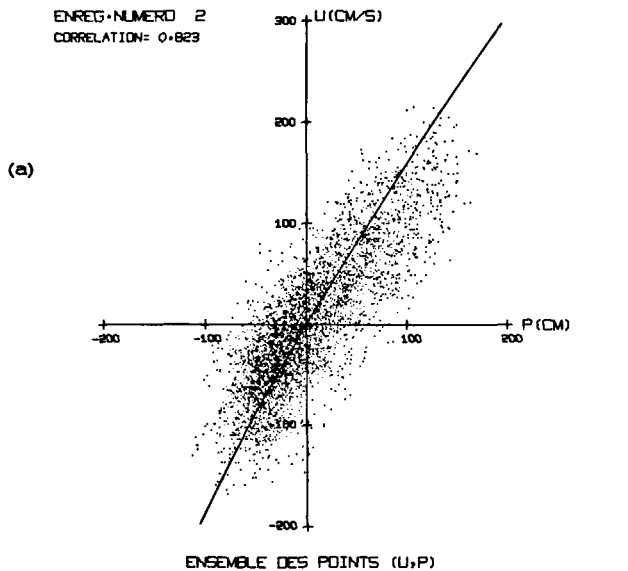
La dispersion des points expérimentaux autour des courbes théoriques dans ces nuages de points a plusieurs causes :

— la houle enregistrée n'est pas monochromatique et le rapport théorique u/p dépend de la période;

— le courantomètre étant plus proche de la surface libre que le capteur de pression, détecte de petites oscillations que celui-ci ignore;

— seule la composante de la vitesse dans le sens de propagation moyenne de la houle est prise en compte, tandis que p résulte de la superposition de plusieurs ondes se propageant dans des directions différentes;

— enfin, l'étude des spectres a révélé l'existence sur les enregistrements de signaux engendrés par des phénomènes différents de la houle (courants côtiers). Le calcul des cohérences entre signaux permet de préciser le domaine de fréquences intéressé par ces phénomènes.



3) Cohérences

La cohérence est un outil statistique qui permet de déceler les relations linéaires entre deux signaux en fonction de la fréquence. Lorsqu'une relation linéaire existe entre les composantes des deux signaux, pour une bande de fréquence donnée, la cohérence dans cette bande est égale à l'unité. Une valeur comprise entre 0 et 1 implique, soit une relation non linéaire entre les deux signaux, soit l'existence de signaux supplémentaires indépendants.

Soit $\nu_{xy}^2(f)$ la valeur de la cohérence entre les variables x et y , à la fréquence f ;

$$\nu_{xy}^2(f) = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_x(f) G_y(f)}$$

où $G_{xy}(f)$ est le spectre croisé entre x et y ,

$G_x(f)$ et $G_y(f)$ sont les spectres de x et y .

Cette fonction a été estimée, dans le cas présent, par l'expression :

$$\nu^2\left(\frac{q}{T}\right) = \frac{\left\{ \sum_{k=q-m}^{q+m} (a_k c_k + b_k d_k) \right\}^2 + \left\{ \sum_{k=q-m}^{q+m} (a_k d_k - b_k c_k) \right\}^2}{\left\{ \sum_{k=q-m}^{q+m} (a_k^2 + b_k^2) \right\} \left\{ \sum_{k=q-m}^{q+m} (c_k^2 + d_k^2) \right\}}$$

où T est la durée de l'enregistrement,

a_k , b_k et c_k , d_k sont les coefficients de Fourier des deux signaux x et y .

Après différents essais, une bonne estimation de la cohérence a été obtenue par un lissage préalable des spectres sur $2m + 1 = 9$ harmoniques successives.

Les cohérences sont représentées sur les figures 6(b) et 7(b) pour les couples de variables (u, p) et (u, \sqrt{P}) . Les deux tracés sont très voisins en raison de l'équivalence des deux théories expliquée dans les paragraphes précédents. Trois domaines de périodes distincts ressortent de ces courbes :

- pour les composantes du spectre ayant des périodes comprises entre 4 s et 16 s, la relation entre u et p peut être considérée comme linéaire (cohérence supérieure à 0,9). Dans ce domaine, la houle est le seul signal enregistré;

- dans le domaine des périodes supérieures à 16 s, la chute de la cohérence traduit l'existence de courants côtiers de longues périodes;

- la décroissance de la cohérence au-dessous de 4 s s'explique par :

- la différence de niveau entre courantomètre et capteur de pression et le filtrage hydrostatique qui en résulte entre les deux signaux,

- l'apparition, pour ces hautes fréquences, de la turbulence, particulièrement sensible dans la zone de mesure située à la limite du déferlement.

CONCLUSION

L'analyse statistique des variations de pression au fond et des vitesses dans le sens de la houle a montré que la représentation Gaussienne généralement admise pour la houle n'est plus acceptable au voisinage du déferlement.

L'étude des corrélations entre ces deux variables a permis de tester la validité des théories d'Airy et de l'onde longue dans la zone littorale. L'ingénieur chargé d'un travail particulier dans cette zone jugera, à l'aide des résultats présentés ci-dessus, si les approximations fournies par ces deux théories simples lui sont suffisantes.

Les domaines d'influence dans le spectre, de la turbulence et des courants côtiers de houle, ont été déterminés par le calcul des cohérences. L'étude complète d'un site littoral devrait comporter des mesures spécifiques à ces deux phénomènes auxquels sont directement rattachés les mécanismes de sédimentation.

Les prochaines campagnes de mesures à la station de La Palue verront la mise en œuvre d'une instrumentation plus adaptée à la mesure des composantes de grande période des courants et des hauteurs d'eau (houlographe et courantomètre à ultrasons). Un autre objectif des prochaines mesures sera la comparaison des caractères statistiques de la houle au large et au point de déferlement.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BENDAT J.S. et PIERSOL A.G. (1971). — Random data : analysis and measurement procedures. Wiley Interscience.
- [2] KINSMAN B. (1965). — Wind waves, their generation and propagation on the ocean surface. Prentice Hall.
- [3] LONGUET-HIGGINS (1963). — The effects of non linearities on statistical distributions in the theory of sea-waves. *Jour. Fluid Mech.*, **17**, pp. 459-480.
- [4] LUKASIK S.J. et GROSCH C.E. (1963). — Pressure velocity correlations in ocean swell. *Jour. Geoph. Res.*, **68**, n° 20, pp. 5689-5699.
- [5] STOKER J.J. (1957). — Water waves. Interscience Publishers Inc., New-York.
- [6] THORNTON E.B. et KRAPOHL R.F. (1974). — Water particle velocities measured under ocean waves. *Jour. Geoph. Res.*, **79**, n° 6, pp. 847-852.
- [7] TICK L.J. (1959). — A non linear random model of gravity waves I. *Jour. Math. Mech.*, **8**, pp. 643-652.