

CHAPTER 15

METHODES DE MESURE ET TRAITEMENT DE LA HOULE

par René BONNEFILLE

Laboratoire National d'Hydraulique - 78 - CHATOU (France)

Résumé :

Un sondeur à ultra-son inversé, un manographe immergé au fond et une bouée accélérométrique ont été utilisés pour mesurer la houle, au même point. Les enregistrements, dont certains sont simultanés, ont été soumis à divers traitements en vue de comparaisons et de critiques orientées vers la connaissance de la précision des appareils et le choix économique de la méthode de dépouillement.

LES APPAREILS DE MESURE

D'octobre 1970 à mars 1971 fut installé au large de Cap Couronne, par fonds de 18 m, près de Marseille (France) un ensemble de trois houlographes en vue de comparer les appareils et les méthodes de traitement de leurs enregistrements :

a) Un écho-sondeur inversé type Electricité de France (1) était posé sur le fond et relié à terre par un câble. Le transducteur donne un pinceau conique d'ultra-son à la fréquence 200 kHz, d'ouverture utile 8° ; il permet d'enregistrer sans déformation les houles de périodes supérieures à 4 s, mais il est inutilisable pour enregistrer les agitations de la surface libre de période inférieure à 2 s. Etant donné sa précision, ce houlographe est considéré pour cette étude comme l'appareil de référence. Les informations de l'appareil sont digitalisées (1 mesure toutes les 0,2 s) et enregistrées sur bande de papier perforé, en code binaire-décimal.

b) Un manographe autonome⁽²⁾ type Laboratoire National d'Hydraulique était immergé à proximité. Les enregistrements de la pression au fond sont obtenus sur film, ce qui présente deux inconvénients majeurs : La lecture automatique du film en vue du traitement des données est délicate ; il convient de calculer l'agitation en surface à partir des fluctuations de pression au fond.

c) Une bouée accélérométrique "Datawell" appartenant au Service des Phares et Balises flottait en surface. Les informations sont transmises à terre par radio. A la réception le signal analogique est numérisé et enregistré sur bande magnétique. Ce dispositif présente deux inconvénients majeurs : L'ensemble bouée-ligne de mouillage a une période d'oscillation propre qui perturbe la mesure (le degré de nuisance de cet effet est un des buts de l'étude) ; la transmission radioélectrique des signaux analogiques est entachée d'erreurs dues aux perturbations hertziennes qui ne sont malheureusement pas décelables par les méthodes de traitement simples.

Les aléas de fonctionnement du houlographe à pression et les difficultés de traitement des données de la bouée, n'ont permis d'obtenir que quelques enregistrements de 20 mn vraiment simultanés de deux des appareils (8 avec la bouée et 4 avec le manographe) ; néanmoins, ces comparaisons sont très instructives au niveau de l'étude de la précision des appareils et de l'intérêt économique des méthodes de traitement automatique.

LES METHODES DE TRAITEMENT

Deux grandes classes de méthodes de traitement furent utilisées :

a) Les méthodes statistiques s'appuient sur l'analyse de l'enregistrement au niveau des vagues, c'est-à-dire des distances des crêtes à creux successifs. L'étude de l'ensemble des vagues permet de construire les histogrammes (creux, période, croisés creux-périodes) et de déterminer les grandeurs classiques (creux maximal, creux significatif, périodes moyennes). A côté de cette méthode d'analyse globale, est utilisé un procédé proposé par DRAPER (3), consistant à déduire les grandeurs caractéristiques d'une séquence d'enregistrement de la mesure des deux plus grandes oscillations en s'appuyant sur des hypothèses assez plausibles sur la répartition statistique de l'agitation.

b) Les méthodes d'analyse spectrale, conduisent à la connaissance de la répartition de l'énergie de l'enregistrement suivant les fréquences. Moyennant des hypothèses sur la répartition statistique de l'agitation, elles permettent d'estimer les caractéristiques de la houle.

COMPARAISON ECHO-SONDEUR INVERSE - BOUEE ACCELEROMETRIQUE

La comparaison des résultats du traitement par l'analyse spectrale des enregistrements par écho-sondeur inversé et bouée accélérométrique conduit aux résultats suivants, lorsque les parasites ne perturbent pas la transmission radio-électrique :

- Les moments d'ordre zéro (m_0) de la répartition d'énergie coïncident (Fig. 1) ; l'énergie totale contenue dans le processus est la même.

- Le moment d'ordre deux (m_2) donné par la bouée est de l'ordre du double de celui du houllographe à ultra-son (Fig. 2) ; la bouée amplifie les mouvements de faible période, alors que le sondeur les atténue.

En admettant que le processus soit gaussien, les caractéristiques classiques s'en déduisent, en particulier si le spectre est étroit :

- creux moyen : $\bar{H} = \sqrt{2\pi m_0}$

- creux significatif : $H_{1/3} = 4\sqrt{m_0}$

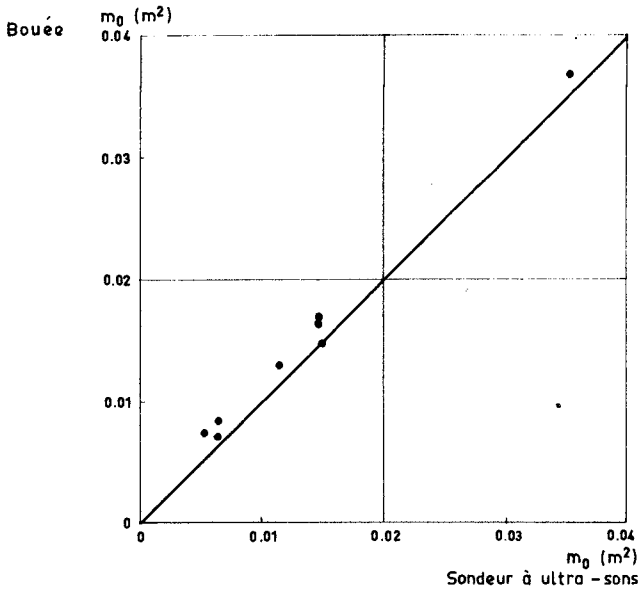
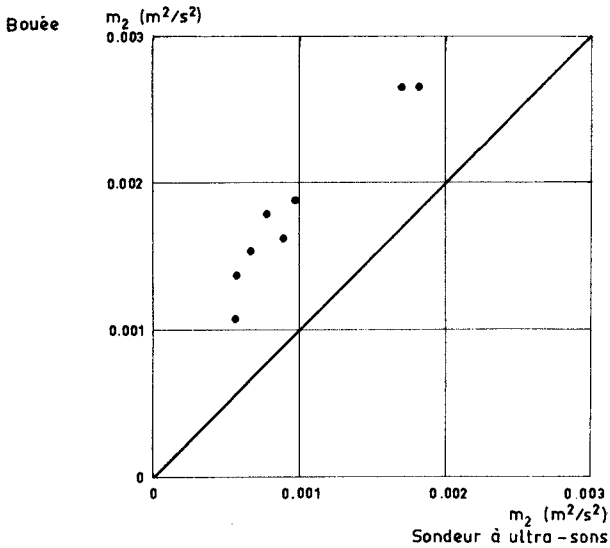
- période moyenne : $T = \sqrt{m_0/m_2}$

Les creux moyens et significatifs coïncident, mais la différence sur m_2 fait que les creux maximaux donnés par la bouée sont environ 10 % supérieurs et que les périodes moyennes sont d'environ 20 % inférieures à celles obtenues par le houllographe à ultra-son. En revanche, la période d'énergie maximale coïncide bien.

COMPARAISON ECHO-SONDEUR INVERSE - MANOGRAPHE

La comparaison des enregistrements par les houllographes à ultra-son et à pression a d'abord permis de préciser la valeur du coefficient de restitution K utilisé dans la relation :

$$z(t) = K p(t) \text{ ch } 2\pi \frac{d}{L}$$

Fig.1-COMPARAISON DES PREMIERS MOMENTS DU SPECTRE, m_0 Fig.2-COMPARAISON DES SECONDS MOMENTS DU SPECTRE, m_2

pour passer des fluctuations de pression $p(t)$ à la profondeur d , à celle de la surface libre $z(t)$ de longueur d'onde L . En fait, pour les vagues de faible période le terme en cosinus hyperbolique est grand et peut donc introduire des erreurs appréciables ; dans cette étude ce terme est arbitrairement conservé constant (égal à 12,35) pour les périodes inférieures à 5,33 s, ce qui revient à éviter de donner trop de poids aux courtes périodes.

La comparaison des m_0 déduits des analyses spectrales des enregistrements des deux houlographes conduit alors à choisir :

$$K = 1,11$$

En revanche, les moments d'ordre deux sont encore différents ; celui donné par le houlographe à pression ne vaut que 86% de celui du houlographe à ultra-son, ce qui conduit à penser que la réduction des faibles périodes est trop atténuée. Cependant, cet écart est trop faible pour empêcher que les creux moyens, significatifs et maximaux ne soient pas bien restitués avec $K = 1,11$ (Fig.3). La période moyenne est évidemment trop faible (10%); les périodes d'énergie maximale coïncident.

En résumé, avec le coefficient de restitution proposé et une troncature du spectre du côté des petites périodes, les enregistrements de deux appareils traités par l'analyse spectrale conduiraient à des résultats concordants.

COMPARAISON DES METHODES DE TRAITEMENT

La comparaison des résultats obtenus par les différentes méthodes de traitement donne les résultats suivants :

Les méthodes d'analyse statistique, par histogramme ou DRAPER, et d'analyse spectrale donnent des résultats concordants à partir des enregistrements du sondeur à ultra-son inversé (Fig.4). Elles ne diffèrent que par leur prix de revient variant dans le rapport de 2 à 5. La méthode des histogrammes coûte deux fois plus cher que la méthode DRAPER ; l'analyse spectrale coûte 5 fois plus cher ; il est vrai que dans ces prix sont inclus le tracé des histogrammes ou du spectre.

Appliquées aux résultats du houlographe à pression, les méthodes d'analyse statistiques conduisent à des creux significatifs environ 13% inférieurs à ceux obtenus par l'analyse spectrale. La différence peut provenir de la restitution de l'agitation à partir de la pression ; dans

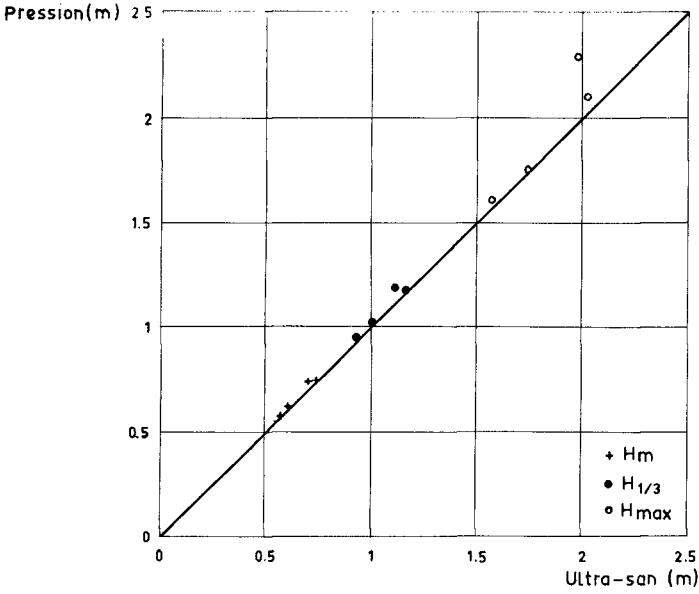


Fig:3- COMPARAISON DES DONNEES DES HOULOGRAPHERS A ULTRA-SAN ET A PRESSION (K=1.11)

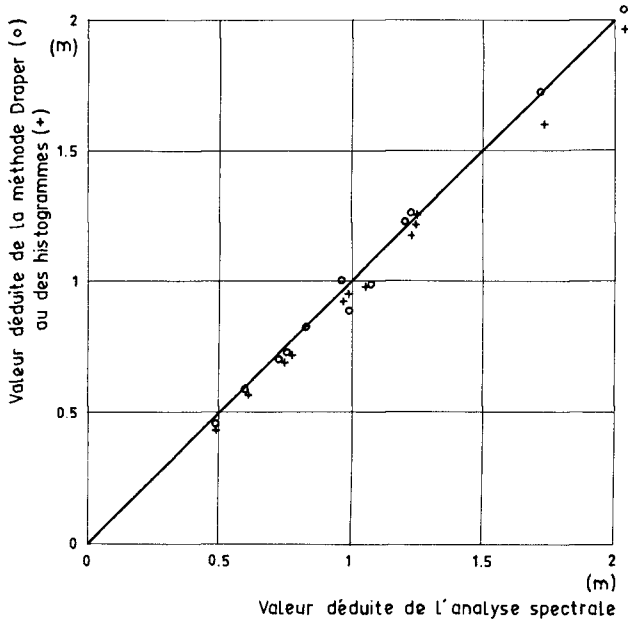


Fig:4- COMPARAISON DES DONNEES DU HOULOGRAPHE A ULTRA-SAN TRAITES PAR DIFFERENTES METHODES

le facteur de restitution K ch $2\pi \frac{d}{L}$, la longueur d'onde L est fonction de la période dans l'analyse spectrale ; elle est celle de la vague effectivement mesurée dans l'analyse statistique. Il semble donc que le coefficient de restitution global K déduit de l'analyse spectrale, soit trop faible, et qu'il conviendrait de le majorer d'environ 13 %, c'est-à-dire prendre :

$$K = 1,25$$

pour les restitutions vague par vague ou par la méthode DRAPER.

COMPARAISON DES RESULTATS AVEC LES MODELES THEORIQUES

La disponibilité des enregistrements de houle sous forme facile à soumettre aux traitements automatiques permet d'estimer la validité des modèles théoriques.

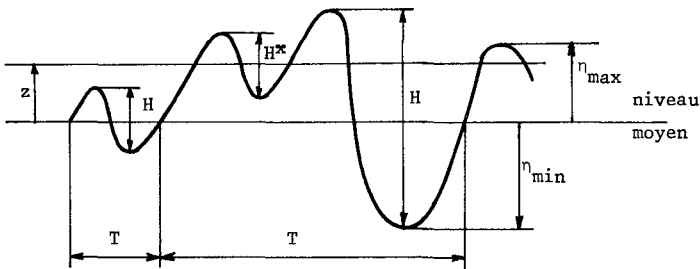
L'étude a porté sur les points suivants :

- vérification de la loi de probabilité gaussienne des passages des niveaux par une cote donnée z :

$$P(z) = \frac{1}{\sqrt{2m_0}} e^{-z^2/2m_0}$$

- étude statistique :

- . des cotes des maximums η_{\max} et des minimums η_{\min}
- . des hauteurs H^* de toutes les vagues, c'est-à-dire la distance verticale entre une crête et le creux suivant (T^* désigne la période associée calculée entre 2 crêtes successives)
- . des hauteurs H entre les crêtes et les creux successifs situées de part et d'autre du niveau moyen, T est leur période associée définie par le temps qui sépare 2 passages successifs au niveau moyen.



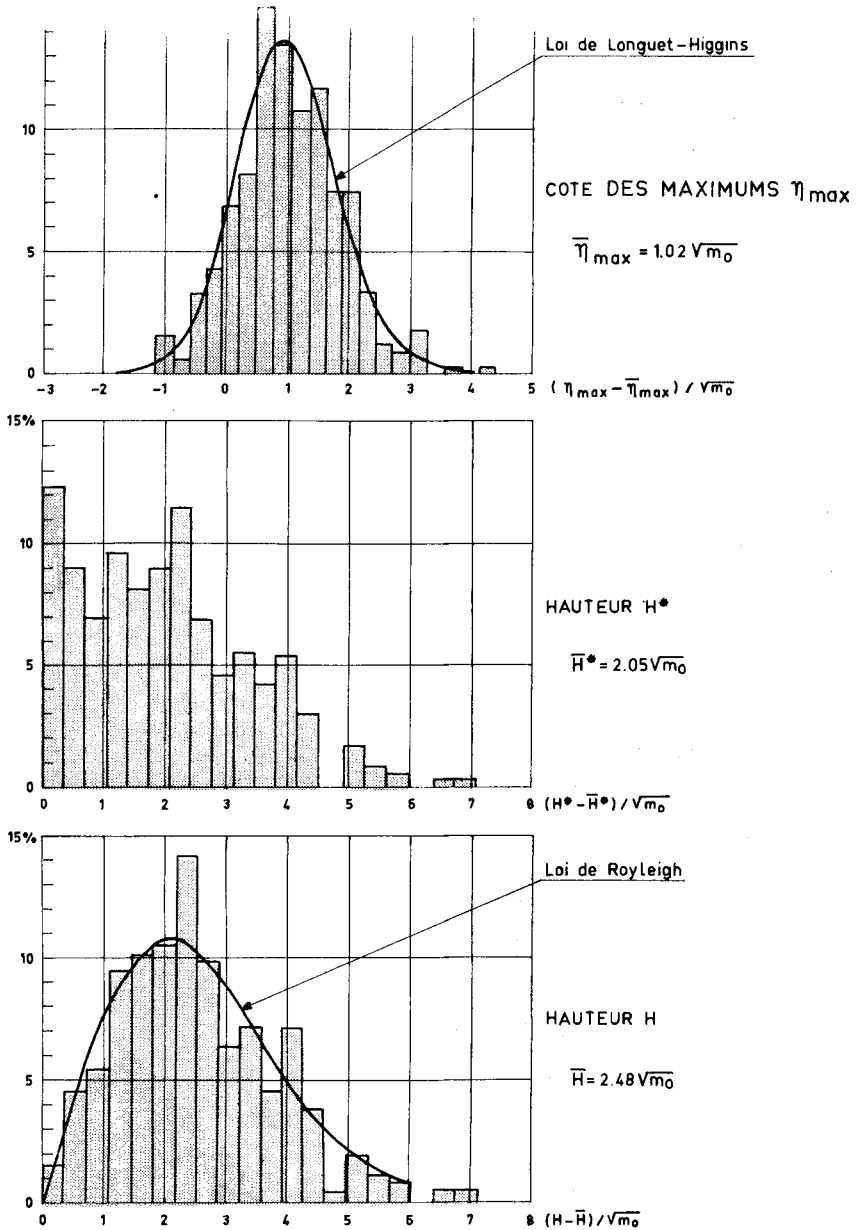


Fig.5- EXEMPLES DE REPARTITIONS STATISTIQUES
 (le 7 Octobre 1970 à 7h) $\sqrt{m_0} = 0.367m$

La loi de probabilité gaussienne étant vérifiée, les résultats théoriques, qui en découlent, moyennant les hypothèses de stationnarité et d'ergodicité, doivent être aussi bien vérifiées. Les figures 5 et 6 illustrent les faits suivants :

- Les cotes η_{\max} (et de même η_{\min}) se répartissent suivant la loi de Longuet-Higgins (4) ; leurs valeurs moyennes suivent bien la loi théorique en fonction de la largeur ϵ du spectre par :

$$\bar{\eta}_{\max} = \frac{1}{2} \sqrt{2\pi m_0} (1 - \epsilon^2)$$

avec

$$\epsilon^2 = 1 - (N_0/N_1)^2 = 1 - m_2^2/m_0 m_4$$

ϵ étant donc estimé à partir du rapport entre le nombre N_0 de passage par le niveau moyen et le nombre N_1 de creux et crêtes, ou à partir des moments m_0 , m_2 et m_4 des spectres d'énergie.

- Les valeurs significatives $(\eta_{\max})_{1/3}$, $(\eta_{\min})_{1/3}$ dérivent par rapport aux lois théoriques quand η augmente ; $(\eta_{\max})_{1/3}$ est supérieur, $(\eta_{\min})_{1/3}$ est inférieur, de sorte que :

$$\eta = \frac{1}{2} \left[(\eta_{\max})_{1/3} + (\eta_{\min})_{1/3} \right]$$

suit assez bien la loi théorique.

La loi de Rayleigh ne peut pas être retenue pour représenter la distribution des hauteurs H^x entre toutes les crêtes et creux ; en conséquence, on ne dispose pas de loi théorique pour représenter $H^x_{1/3}$ et \bar{H} . Cependant la figure 6 montre que la valeur moyenne \bar{H}^x varie comme η_{\max} en fonction de ϵ .

- Les hauteurs H entre crêtes et creux de part et d'autre des niveaux moyens se répartissent suivant la loi de Rayleigh ($\epsilon = 0$) :

$$P(H) = \frac{H}{4m_0} e^{-H^2/2m_0}$$

les grandeurs caractéristiques correspondantes doivent donc être indépendantes de ϵ , ce que montre la figure 6 ; cependant les valeurs moyennes et significatives \bar{H} et $H_{1/3}$ prennent des valeurs un peu inférieures (2,5 et 4 %) aux valeurs théoriques $\sqrt{2\pi m_0}$ et $4\sqrt{m_0}$ déduites de la distribution de Rayleigh ; de même $H_{1/10}$ est 7 % inférieur à la valeur théorique $5,09\sqrt{m_0}$.

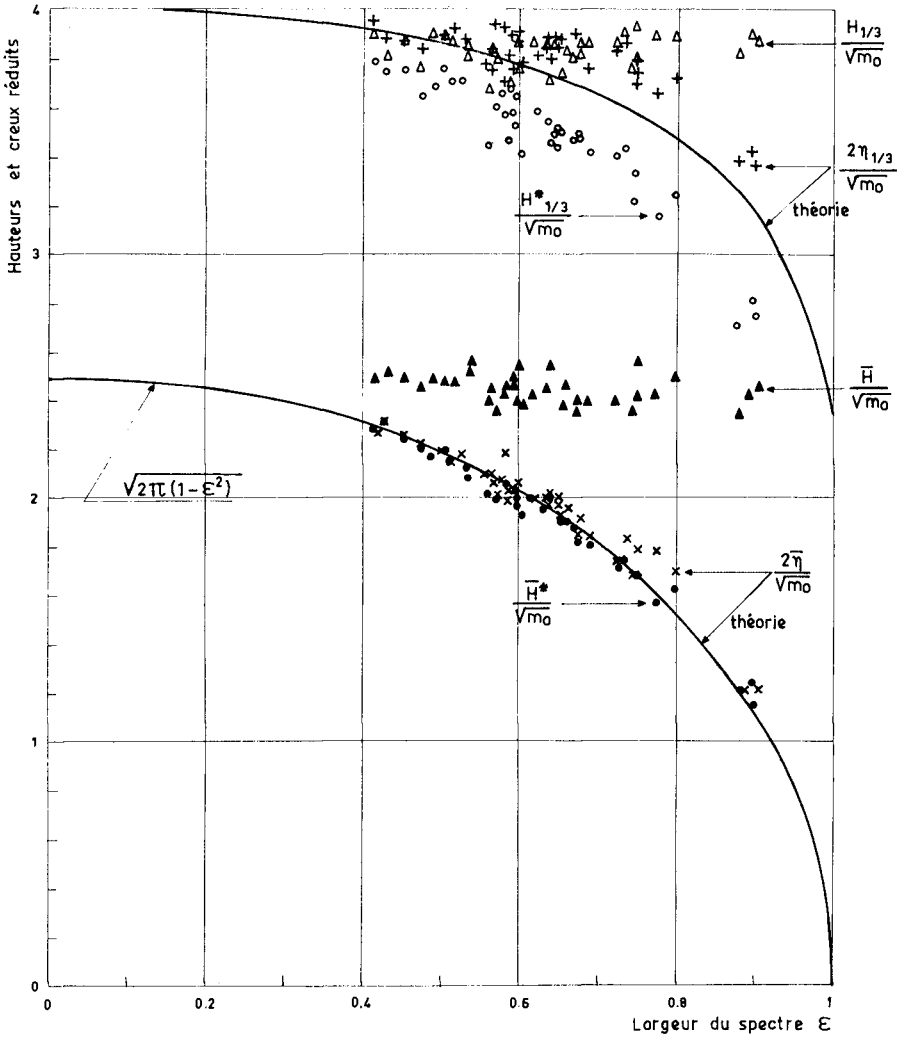


Fig.6- PROPRIETES DES VALEURS SIGNIFICATIVES ET MOYENNES DE η , H^* ET H

RECOMMANDATIONS SUR LES METHODES DE TRAITEMENT

En conclusion de l'analyse des enregistrements de pression au fond, le coefficient K du facteur de restitution doit être pris égal à :

1,11 dans le cas de l'analyse spectrale

1,25 dans le cas de l'analyse statistique

L'imprécision du calcul de m_2 (et à fortiori de m_4) provient de la part importante que jouent les ondes de petites périodes de hauteur mal connue : il en résulte une mauvaise connaissance de la largeur du spectre ϵ et par suite des valeurs caractéristiques des hauteurs η_{\max} , η_{\min} , $\overline{H^x}$. L'étude de ϵ et m_0 en fonction de la fréquence de coupure f_c au-dessus de laquelle il n'est pas tenu compte des mesures, ne fait pas apparaître de singularités dans la courbe $\epsilon(f_c)$; en revanche, la fonction $m_0(\epsilon)$ varie assez vite au-dessous d'un certain seuil de fréquence (figure 7). Ceci suggère de définir la fréquence de coupure à l'aide de l'erreur qu'entraînerait le calcul de m_0 en ne considérant que les fréquences inférieures à f_c . Une valeur intéressante est celle pour laquelle cette erreur est 2 % : elle est définie par

$$\int_0^{f_c} S(f) df = 0,98 \int_0^{\infty} S(f) df = 0,98 m_0$$

$S(f)$ étant la distribution spectrale d'énergie en fonction de la fréquence f . Dans le cas de la figure 7, ϵ vaudrait alors 0,56 et devrait être désigné par ϵ_{98} ainsi que toutes les grandeurs qui en découlent (m_2)₉₈, ($\eta_{\max 1/3}$)₉₈, etc

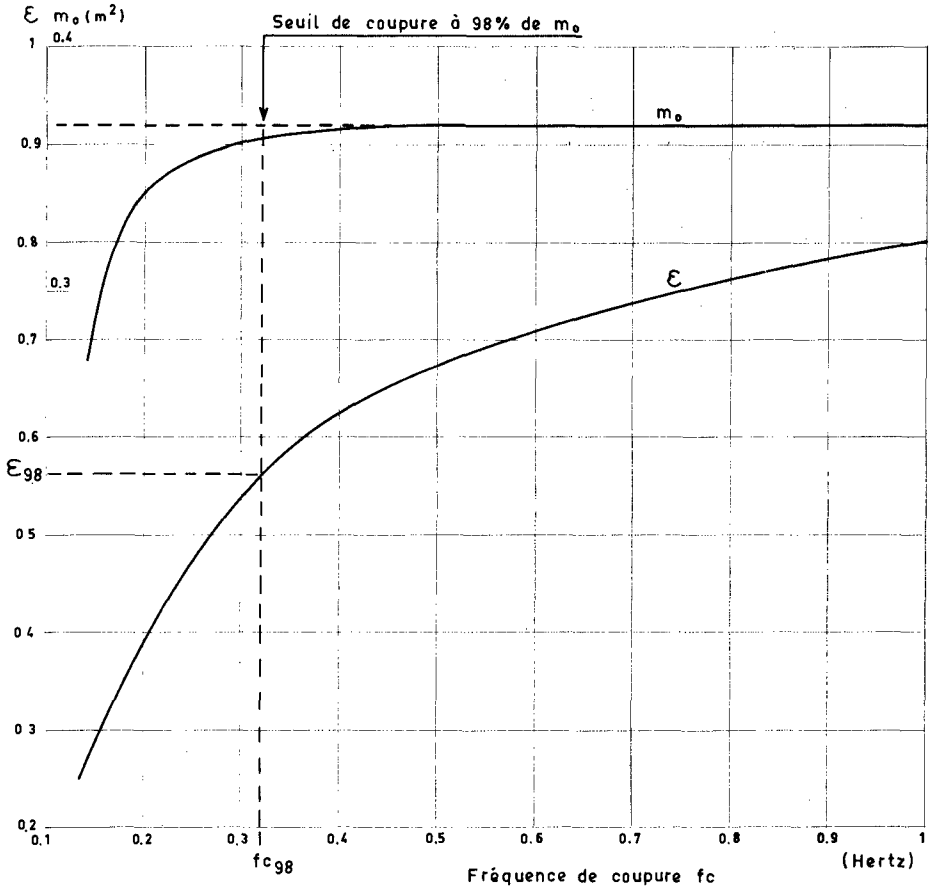


Fig.7-EXEMPLE DE VARIATION DE ϵ et m_0 EN FONCTION DE LA FREQUENCE DE COUPURE

- (1) R. BONNEFILE - P. CORMAULT - J. VALEMOIS - "Progrès des méthodes de mesure de la houle naturelle au Laboratoire National d'Hydraulique". - Proceedings Xth Conference on Coastal Engineering - Tokyo 1966.
- (2) J. VALEMOIS - "Les appareils réalisés à Chatou pour la mesure de la houle naturelle". - Proceedings VIth Conference on Coastal Engineering - Grenoble 1954.
- (3) L. DRAPER - "Wave recording instruments for civil engineering use". - National Institute of Oceanography - Wormley 1968.
- (4) M.S. LONGUET-HIGGINS - "On the Statistical Distribution of the Height of Sea Waves". - Journal of Marine Research, Vol. XI, n° 3, 1952.

