

COMPARAISON DES CARACTERISTIQUES DE HOULE POUR DE DONNEES THEORIQUES ET MESURES A TUXPAN, MEXIQUE

Víctor Rosales¹, Rodolfo Silva² et Cristina Garcia³

¹Thésard, Groupe Hydraulique Maritime et Ouvrages d'Eau LNHE-EDF/Université de Caen, 6 Quai
Watier-BP 49 78400 Chatou, Tél. 01 30 87 72 66, Fax 01 30 87 80 86

²Docteur, Grupo de Ingeniería de Puertos y Costas. Instituto de Ingeniería - UNAM; 04510, Coyoacán,
México. Tel (52-5)6.22.33.26. Fax (52 5)616 21 64

³Thésard, Morphodynamique Continental et Cotière, 24, rue des Tilleus, 14000 Caen, Tél. 02 31 56 57 09
Fax 02 31 56 57 57

RESUME

Dans ce travail, on présente une méthodologie pour obtenir et comparer les caractéristiques de la houle entre des données théoriques et mesurées. Avec cette analyse, on peut recommander la répartition statistique des hauteurs et périodes, et le spectre d'énergie théorique le plus proche des mesures. Par ailleurs, on a caractérisé la houle dans les zones proches au site de mesure. Cela signifie qu'à partir de données ponctuelles on peut extrapoler les critères pour caractériser la houle par des zones plus vastes. Les données utilisées ont été mesurées en face de la Central Thermoélectrique « Adolfo López Mateos », à Tuxpan, Mexique.

Pour obtenir les hauteurs et les périodes individuelles des houles mesurées, on a utilisé la méthode de correction parabolique du niveau moyen et la méthode des passages par le niveau moyen (zero up crossing). Les résultats obtenus, sont comparés avec ceux des répartitions statistiques des hauteurs de Rayleigh, Tayfun et Carter, et des périodes de Bretchneider et Cavanié. Par ailleurs, on a calculé le spectre d'énergie des mesures en utilisant la méthode FFT (Fast Fourier Transform) et on l'a comparé avec des spectres d'énergie théoriques : Jonswap-Hasselmann, Pierson-Moskowitz, Bretchneider-Mitsuyasu, Neumann, ITTC, ISSC et Ochi-Hubble.

Comparison of maritime climate characteristic between theoretic and field data, measured in Tuxpan, Mexico.

This work presents a methodology to calculate and compare maritime climate characteristics between theoretic and field data, with this methodology the best high and period distributions and spectrum will be able to recommend in the near zones to the point of measures. The importance of this work is that using punctual data it's possible to extrapolate criteria to characterize maritime climates in larger zones. In order to exemplify the method, measured wave data from "Adolfo Lopez Mateos" thermoelectric plant at Tuxpan, Veracruz, have been used.

In order to obtain individual highs and periods, the parabolic mean level correction and zero up crossing methods were applied. Then, the wave high (Rayleigh, Tayfun and Carter) and wave period (Bretchneider and Cavanié) theoretic probability distributions were compared with the field data probabilistic distribution results. By the other hand, theoretic spectrums (Jonswap-Hasselmann, Pierson-Moskowitz, Bretchneider-Mitsuyasu, Neumann, ITTC, ISSC and Ochi-Hubble) were computed and compared with the one obtained from Tuxpan data using the Fast Fourier Transform method.

From the study results in Tuxpan, Veracruz, it was concluded that the Tayfun wave high and Cavanié wave period probability distributions better fitted to Tuxpan field data. In the spectral analysis, the Bretchneider-Mitsuyasu spectrum better coupled to the one obtained from Tuxpan field data.

INTRODUCTION

Un des aspects le plus important dans le design hydraulique maritime est la connaissance des houles à partir desquelles on peut calculer la dynamique des sédiments, dimensionner les ouvrages en mer ou prévoir le rechargement ou l'érosion des plages.

Quand on n'a pas de données mesurées de houles, il faut utiliser les méthodes analytiques de calcul pour estimer les valeurs caractéristiques des houles à utiliser par l'ingénieur. Le but de ce travail est de déterminer une méthode pour calculer les caractéristiques des houles à partir de mesures faites in situ et de les comparer avec celles des relations statistiques temporelles et énergétiques théoriques.

On peut citer deux manières d'étudier les houles, l'une qui considère les caractéristiques statistiques temporelles de la surface libre de l'eau $\eta(t)$, et l'autre qui considère les caractéristiques énergétiques des mesures $s(f)$. Dans ce travail, on présente des comparaisons entre des caractéristiques de houles mesurées et théoriques pour ces deux types d'étude.

ANALYSE STATISTIQUE TEMPORELLE

On considère un enregistrement temporel de la surface libre de la mer sur un point donné. On suppose que celui-ci représente un état de la mer où les variations temporelles par rapport au niveau moyen sont définies par $\eta(t)$.

Correction du niveau moyen

Pour éliminer l'influence de la marée des enregistrements des houles il faut soustraire la fonction de la marée. Cette fonction peut se présenter comme une ligne de trois façons différentes : horizontale (moyenne arithmétique), recta ou parabolique.

On a décidé d'utiliser la correction parabolique qui est la plus proche de la variation de la marée [8].

La fonction parabolique utilisée pour corriger l'effet de la marée se déduit de la méthode des moindres carrés qui est donné par l'équation suivante :

$$\bar{\eta} = B_0 + B_1(\Delta t \circ n) + B_2(\Delta t \circ n)^2 \quad n = 1, 2, 3, \dots, N$$

avec :

$$H_{rms} = \left[\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} H_i^2 \right]^{1/2}$$

où les valeurs $N_0, N_1, N_2, N_3, N_4, Y_0, Y_1$ et Y_2 sont définis par:

$$A_0 = \frac{N_2 Y_0 - N_1 Y_1}{N_0 N_2 - N_1^2}, \quad A_1 = \frac{N_0 Y_1 - N_1 Y_0}{N_0 N_2 - N_1^2},$$
$$N_r = \sum_{n=1}^N (n \Delta t)^r \quad Y_r = \sum_{n=1}^N (n \Delta t)^r \eta_n$$

où N est le nombre des points sur l'enregistrement

Méthode de passages par le niveau moyen

Les houles individuelles peuvent être définies en utilisant la méthode des passages par le niveau moyen [5]. Le début de la vague est caractérisé par un passage par le niveau moyen et sa fin par le passage suivant qui est le début de la houle d'après. Il faut calculer le passage exact en utilisant une interpolation linéaire entre les points d'avant et d'après le passage :

$$h_i \cdot h_{i+1} > 0 \quad \text{et} \quad h_{i+1} > 0$$

où h_i est l' i -ème point de la hauteur de la surface libre.

La période de la houle T_i , est le temps entre les deux passages par le niveau moyen. La valeur maximale de chaque houle, h_{max} , se calcule à l'aide d'une équation parabolique qui passe par trois points les plus proches à la valeur la plus haute, h_i .

Cette équation s'écrit :

$$\eta_{max} = C - \frac{B^2}{4A} \quad \text{avec} \quad \begin{aligned} A &= \frac{1}{2}(\eta_{i-1} - 2\eta_i + \eta_{i+1}) \\ B &= \frac{1}{2}(\eta_{i+1} - \eta_{i-1}) \\ C &= \eta_i \end{aligned}$$

La valeur minimale de chaque houle, h_{min} , peut être calculée d'une manière similaire. La hauteur de la houle correspondante, H_i , écrit :

$$H_i = \eta_{max} - \eta_{min}$$

Le processus se fait pour chaque vague de l'enregistrement, on alors obtient une séquence de données (hauteurs et périodes de houles) qui peuvent être analysées par des techniques statistiques.

La hauteur de la houle moyenne, \bar{H} , et la période moyenne, \bar{T} , peuvent être calculés en utilisant les équations suivantes :

$$\bar{H} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} H_i$$

$$\bar{T} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} T_i$$

où N_0 , est le nombre d'ondes individuels.

La hauteur de la houle quadratique moyenne, H_{rms} , peut être définie comme suit :

$$H_{rms} = \left[\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} H_i^2 \right]^{1/2}$$

Pour déterminer la hauteur significative de la houle, H_s , et la période significative, T_s , il faut mettre en ordre les données (H_i , T_i) de façon décroissante. La hauteur significative de la houle est la valeur moyenne du tiers supérieur des vagues du train de houle. H_s sera définie par l'expression suivante :

$$H_s = \frac{3}{N_0} \sum_{r=1}^{N_0/3} H_r$$

où H_r est la hauteur de la houle considéré de façon décroissante. D'une façon similaire, la période significative peut être calculé grâce a l'expression suivante :

$$T_s = \frac{3}{N_0} \sum_{r=1}^{N_0/3} T_r$$

De la même façon que pour la hauteur significative, on appelle H_n la valeur moyenne des n vagues les plus grandes H_{10} et T_{10} sont définis comme suite :

$$H_{10} = \frac{10}{N_0} \sum_{r=1}^{N_0/10} H_r \quad \text{et} \quad T_{10} = \frac{10}{N_0} \sum_{r=1}^{N_0/10} T_r$$

REPARTITIONS STATISTIQUES DES HAUTEURS DE HOULE

Nous avons comparé des hauteurs de houle réelle mesurées in situ, aux résultats prédits par la théorie. Green, en 1994, a conclu que la répartition de Rayleigh représente très bien les trains de houle type SWELL (bien développés), celle de Carter [1] est la meilleur pour le type SEA (pas développés) et celle de Tayfun [6] est correcte pour les cas intermédiares.

La fonction de répartition de Rayleigh peut s'écrire de la façon suivante :

$$p(\xi) = 2\xi e^{-\xi^2} \quad \text{avec :} \quad \xi = \frac{H}{H_{rms}}$$

La fonction de répartition de Tayfun est définie par :

$$p(\xi, N) = \xi \int_0^{\infty} \left[u J_0^N \left(\frac{u}{N^{1/2}} \right) J_0(\xi u) \right] du \quad 0 \leq \xi \leq N^{1/2}$$

$$p(\xi, N) = \xi \left[1 - \frac{4}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{N^{1/2}}{\xi} \right) \right] \int_0^{\infty} \left[u J_0^N \left(\frac{u}{N^{1/2}} \right) J_0(\xi u) \right] du \quad N^{1/2} \leq \xi \leq (2N)^{1/2}$$

avec N le paramètre de Tayfun :

$$N = \left(\frac{\pi \tanh(k_o h)}{7\sqrt{2} k_o \sqrt{2m_o}} \right) \quad \text{et} \quad \xi = H / H_{rms}$$

k_o le numéro d'onde associé à la fréquence moyenne : $k_o = 2\pi / L_m$

J_0 la fonction de Bessel d'ordre zéro.

La fonction de répartition de Carter est donnée par:

$$P(H \geq H_o) = 1 - \left(e^{-8 \left(\frac{H_o}{H_s} \right)^2} + 2\sqrt{\pi} \frac{H_o}{H_s} e^{-4 \left(\frac{H_o}{H_s} \right)^2} \text{Erf} \left[\frac{2H_o}{H_s} \right] \right)$$

$$\text{Erf}(X) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^X e^{-u^2} du \quad \text{et} \quad P(H \geq H_o) = 1 - \left(e^{-8 \left(\frac{H_o}{H_s} \right)^2} + 2 \frac{H_o}{H_s} e^{-4 \left(\frac{H_o}{H_s} \right)^2} \int_0^{\frac{H_o}{H_s}} e^{-\frac{u^2}{4}} du \right)$$

REPARTITIONS STATISTIQUES DES PERIODES DE HOULE

Les répartitions des périodes de houle les plus proches de celles des mesures sont les répartitions statistiques de Bretchneider [2] et Cavanié.

La fonction de répartition de Bretchneider s'écrit :

$$p(T_z) = 2.7 \frac{T_z^3}{T_z^4} e^{-0.675 \left(\frac{T_z}{T_z} \right)^4}$$

où T_z est la période calculé par la méthode des passages par le niveau moyen (*zero up cross*)

La fonction de répartition de Cavanié est définie par:

$$p(T_z) = \frac{\alpha^3 \beta^2 \bar{\delta}^2 T_z}{\bar{T}_z^2 \left[\left(\frac{\bar{\delta}^2 T_z^2}{\bar{T}_z^2} \right)^2 + \alpha^4 \beta^2 \right]^{3/2}}$$

Les variables α et β sont calculées avec les équations suivantes:

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \varepsilon^2} \right) \quad \beta^2 = \frac{\varepsilon^2}{1 - \varepsilon^2} \quad \text{où } \varepsilon \text{ est le largeur du spectre et } \bar{\delta}^2 = 1.$$

ANALYSE ENERGETIQUE

Pour l'analyse énergétique, la correction parabolique mentionnée à l'avance est nécessaire.

Correction des discontinuités

Pour l'analyse de trains de houles non continus, il est nécessaire de corriger la cession d'énergie aux fréquences proches, c'est-à-dire les valeurs aux extrêmes des trains. L'équation s'écrit :

$$\eta_b(t) = \eta(t)b(t_*)$$

Le filtre trapézoïdal et le filtre cosinus sont les moyens plus communs pour corriger les discontinuités. En ce qui concerne ce travail on a utilisé la méthode du filtre trapézoïdal qui s'écrit :

$$b_1(t_*) = \begin{cases} t_* / l & : 0 \leq t_* < l \\ 1 & : l \leq t_* \leq N - l \\ (N - t_*) / l & : N - l < t_* \leq N \end{cases} \quad \text{La valeur } l = 0.1N \quad \text{et} \quad t_* = t / \Delta t : t_* = 1, 2, \dots, N$$

Evaluation des coefficients de Fourier

La technique utilisée pour l'analyse énergétique est la transformée rapide de Fourier (FFT) [6]; cependant, elle a une limite importante en ce qui concerne le nombre des éléments dans le calcul $N=2^m$.

La variation de la surface libre de l'eau, $\eta(t)$, peut être définie par une série de Fourier en utilisant une analyse harmonique, bien connue comme la transformée inverse de Fourier:

$$\eta_b(t_*) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{N/2-1} \left(A_k \cos \frac{2\pi k}{N} t_* + B_k \sin \frac{2\pi k}{N} t_* \right) + \frac{A_{N/2}}{2} \cos \pi t_*$$

où $t_* = t/\Delta t$: $t_* = 1, 2, \dots, N$

Le calcul des coefficients A_k et B_k se fait avec la méthode de la transformée de Fourier :

$$A_k = \frac{2}{N} \sum_{t_*=1}^N \eta_b(t_*) \cos \frac{2\pi k}{N} t_* \quad 0 \leq k \leq N/2$$

$$B_k = \frac{2}{N} \sum_{t_*=1}^N \eta_b(t_*) \sin \frac{2\pi k}{N} t_* \quad 1 \leq k \leq (N/2)-1$$

Calcul du spectre

Une fois qu'on a calculé les coefficients de Fourier, il est possible de calculer le spectre avec la formule suivante :

$$S_b(f) = \sum_{k=1}^{N/2} (A_k^2 + B_k^2) \Delta f$$

avec : $\Delta f = 1/(N/2)$

A cause de l'application d'un filtre au train de houle, il est nécessaire d'introduire un facteur de correction pour la rétribution de l'énergie perdue :

$$\beta = \frac{N}{\sum_{n=1}^N [b(t_n)]^2} \quad \text{L'énergie totale est donc} \quad S(f) = S_b(f) \beta$$

Paramètres spectraux

Tous les paramètres spectraux sont calculés à partir des moments d'ordre n définis de la façon suivante:

$$m_n = \int_0^\infty f^n S(f) df$$

$S(f)$ est la fonction de densité spectrale ; on obtient la longueur spectrale avec :

$$\varepsilon = \left[1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4} \right]^{1/2}$$

On peut estimer la hauteur significative de houle ($H_{1/3}$) et la période moyenne (T) à partir des moments spectraux en considérant qu'ils suivent la répartition de Rayleigh. Alors ils peuvent être définis comme suit :

$$H_{1/3} = 4.004 (m_0)^{1/2} \quad \text{et} \quad \bar{T} = \sqrt{m_0 / m_2}$$

FONCTIONS SPECTRALES DES HOULES

Différents auteurs ont proposé des fonctions de spectres pour les houles. On verra les plus importantes [4]. Il s'est alors développé de nombreux modèles mathématiques de spectres de houle parmi lesquels on peut citer :

Spectre de Pierson-Moskowitz:

$$S(f) = \frac{H_s^2}{2} \left(\frac{2\pi}{T_z} \right)^4 (2\pi f)^{-5} \exp \left[- \left(\frac{2\pi}{T_z} \right)^4 \left(\frac{2\pi f}{\pi} \right)^{-4} \right]$$

où :

T_z est la période moyenne par la méthode de passages par le niveau moyen.

H_s est la hauteur significative de houle et f est la fréquence.

Spectre de Bretchneider-Mitsuyasu:

$$S(f) = 0.257 (H_{1/3})^2 T_{1/3} (T_{1/3} f)^{-5} \exp[-1.03 (T_{1/3} f)^{-4}]$$

où :

$H_{1/3}$ est la hauteur significative de houle.

$T_{1/3}$ est la période significative de houle.

Spectre de Jonswap-Hasselmann:

$$S(f) = \alpha (H_{1/3})^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp[-1.25 (T_p f)^{-4}] \gamma^{\exp[-(T_p f - 1)^2 / 2\sigma^2]}$$

où :

T_p est la période d'énergie maximale.

$H_{1/3}$ est la hauteur significative de houle.

$$\alpha = 0.0624 / [0.230 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}]$$

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_a : f \leq f_p \\ \sigma_b : f \geq f_p \end{cases} \quad \gamma = 1 \sim 7 \text{ (moyen 3.3), } \sigma_a = 0.07 \text{ et } \sigma_b = 0.09$$

Spectre de Neumann:

$$S(f) = 1.466 H_{m0}^2 \frac{f_p^5}{f^6} \exp \left[-3 \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-2} \right]$$

avec :

$$H_s \approx H_{m0} = 4(m_0)^{1/2} \quad f_p = [(1/6)(g/(\pi U_{10}))]^{1/2}$$

Spectre du ISSC:

$$S(f) = 0.1107 H_s^2 \frac{\bar{f}^4}{f^5} \exp \left[-0.4427 \left(\frac{f_s}{f} \right)^4 \right] \quad \bar{f} = 1.296 f_p$$

Spectre du ITTC:

$$S(f) = 1.272 m_0 f_z^{-4} f^{-5} \exp[-0.318 (f_z/f)^4]$$

Spectre de TMA:

$$S_{TMA} = S_J(f) \phi_K(\omega_H), \quad \text{où } S_J(f) \text{ est la fonction spectrale de Jonswap}$$

avec :

$$\phi_K(\omega_H) = \tanh^2(kh) [1 + (2kh)/\sinh(2kh)] \text{ et } k \text{ s'obtient de: } (2\pi f)^2 = gk \tanh(kh)$$

Spectre d'OCHI-HUBBLE:

$$S(f) = \frac{\pi}{2} \sum_{j=1}^2 \left(\frac{4\lambda_j + 1}{4} (2\pi f_{0j})^4 \right)^{\lambda_j} \frac{H_{sj}^2}{(2\pi f)^{4\lambda_j + 1}} \exp \left[- \left(\frac{4\lambda_j + 1}{4} \right) \left(\frac{f_{0j}}{f} \right)^4 \right]$$

où H_{s1} , f_{01} et λ_1 sont respectivement la hauteur significative de houle, la fréquence modale et le facteur pour les composantes de basse fréquence ; d'ailleurs, H_{s2} , f_{02} et λ_2 correspondent aux composantes de haute fréquence.

$$H_s = \sqrt{H_{s1}^2 + H_{s2}^2}$$

$$\lambda_1 = 2.72,$$

$$\lambda_2 \text{ est la fonction de la hauteur significative de houle: } \lambda_2 = 1.82e^{-H_s/121.5}$$

RESULTATS

La méthodologie présentée a été appliquée au cas réel de Tuxpan au Mexique. Les mesures de houle réalisées in situ nous permettent de mettre en avant plusieurs résultats concernant la comparaison de la houle réelle et la houle théorique.

La figure 1 montre la comparaison entre la hauteur de houle H_{10} théoriques et mesurée.

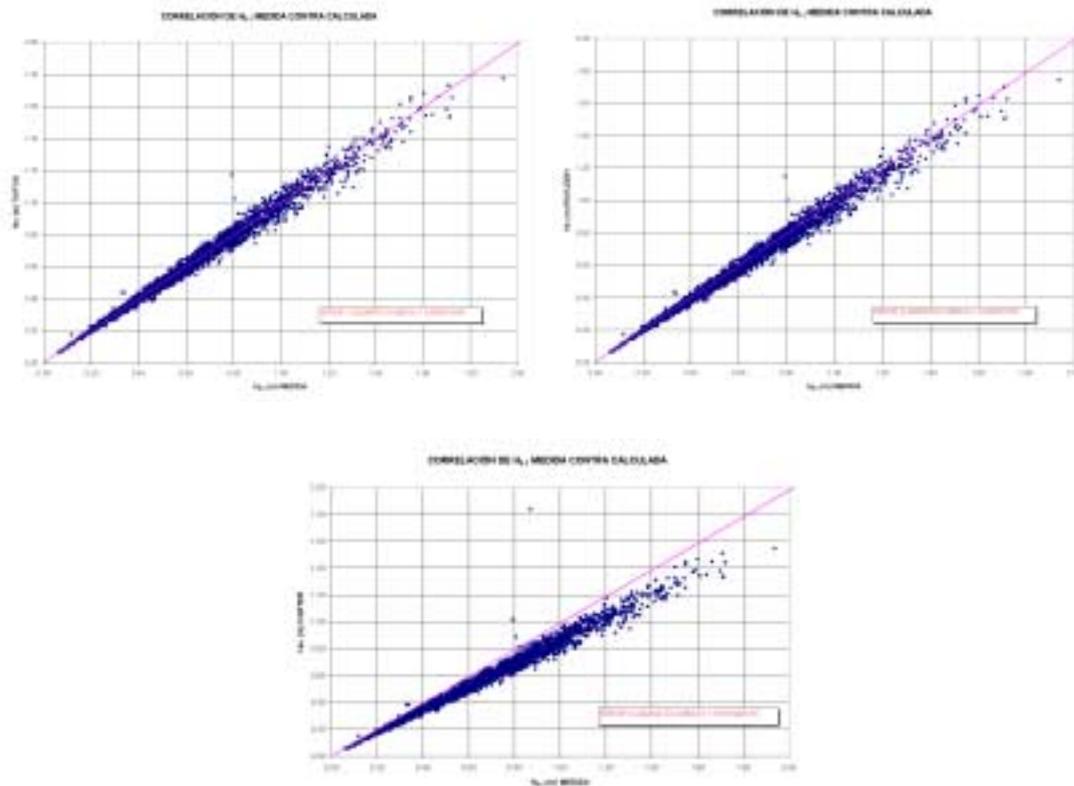


Figure 1. Comparaison entre les hauteurs de la de houle mesurées et calculées avec les fonctions de répartition de Tayfun, Rayleigh et Carter

La figure 2 montre la comparaison entre la période de houle théorique et mesurée pour un enregistrement de houles normal.

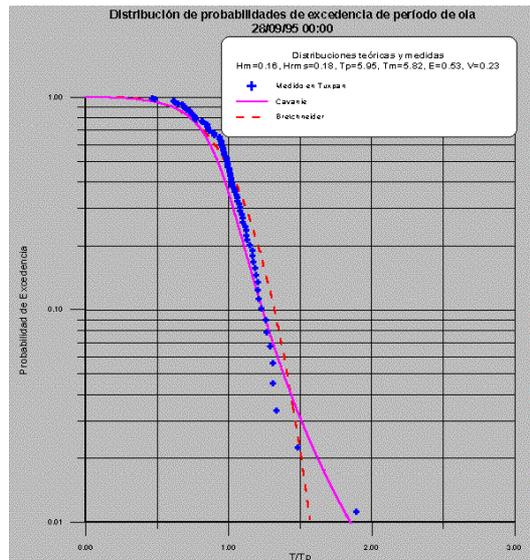


Figure 2. Comparaison entre les périodes de houle mesurées et calculées avec les fonctions de répartition de Bretchneider et Cavanié

Finalement la figure 3 montre les valeurs des erreurs quadratiques moyennes de chaque spectre théorique par rapport au spectre réel.

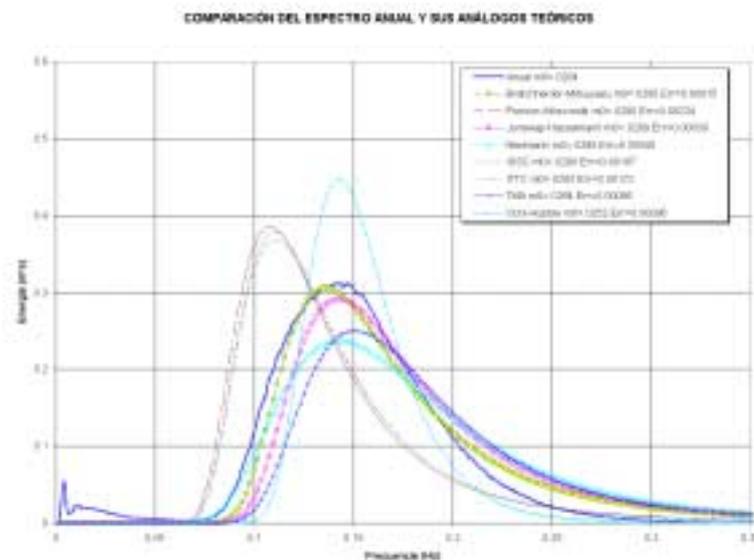


Figure 3. Comparaison entre le spectre mesuré et les fonctions des spectres théoriques

CONCLUSIONS

- Les fonctions de répartition statistiques théoriques les plus proches des mesures sont obtenues par la fonction de Tayfun pour les hauteurs de houle et la fonction de Cavanié pour les périodes de houle.
- La fonction de Bretchneider-Mitsuyasu a été la mieux adaptée à la zone d'étude pour le calcul de la fonction du spectre d'énergie.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) Carter, D.J.T., Challenor, P.G., et al.1986. **“Estimating wave parameters for engineering applications.”** Offshore Technology Report No. OTH 86-228, Dept. Of Energy, London, England, pp 92.
- (2) BRETCHNEIDER C. L. (1959), **Wave variability and Wave spectra for wind-generated gravity waves.** Tech memo No. 118 CERC USA

- (3) CAVANIE A. et al. (1976), **A statistical relationship between individual Heights and Periods of Storm Waves**, Proc. Conf. Behav. Offshore Structures
- (4) Chakrabarti S. K., 1977. “**Statical distribution of Periods and Highs of Ocean Waves**”. JGR. J. Geophysics
- (5) Goda, Y. 1991 “**Distribution of sea state parameters and data fitting**” Gulf Publishing. Handbook on Ocean Eng., Cap.7 pp. 372-408
- (6) HWEI P. Hsu (1970), **Análisis de Fourier**, Fondo Educativo Interamericano SA de CV
- (7) Rosales Victor, 1999. **Caracterización del oleaje aplicada a Tuxpan, Veracruz**. Tesis de Maestría en Hidráulica Marítima. IPN Méx.
- (8) Silva Rodolfo, 1998. **Apuntes del curso: Análisis y predicción de oleaje** UNAM. Méx. pp 16-22
- (9) Tayfun, M.A. 1990, **Distribution of Large Wave Heights**. Jour. Wat. , Port., Coast, and Oce. Eng., Vol.116, no 6, pp.686-707.

Figures

Figure 1. Comparaison entre les hauteurs de la de houle mesurées et calculées avec les fonctions de répartition de Tayfun, Rayleigh et Carter

Figure 2. Comparaison entre les périodes de houle mesurées et calculées avec les fonctions de répartition de Bretchneider et Cavanié

Figure 3. Comparaison entre le spectre mesuré et les fonctions des spectres théoriques