

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر و تهيئة الساحل

Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral



MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME

DE MASTER EN SCIENCES DE LA MER

Sujet :

**Représentation spectrale de l'état de la mer par
les specters de Pierson-Moskowitz et JONSWAP**

Présenté par:

- **Himeur Zouheyr**

Soutenu devant le jury suivant :

Mr	O. Sefiane	Maître de conférences B(ENSSMAL)	Président
Mr	Y.Hamdane	Maître de conférences B(ENSSMAL)	Promoteur
Mr	M.Hellel	Maitre assistante A (ENSSMAL)	Examinatrice
Mr	F.Bouaicha	Maitre assistante A (ENSSMAL)	Examineur

Promotion : (2012)

SOMMAIRE

Remerciements

Liste des figures

Introduction général

Chapitre I : généralité

1.Définitions, terminologie.....	1
2.Les modèles spectraux d'état de mer.....	3
2.1 .Modèles de 1ère et 2ème génération	3
2.2. Modèles de 3ème génération	6

Chapitre II: Explications de PM et JONSWAP

Itroduction	5
Spectre de Pierson-Moskowitz	5
formulation de Goda	10

Chapitre III :Application des spectres de JONSWAP et de PiersonMoskowitz

Introduction.....	12
Application du $S_{PM}(f)$	12
Conclusion.....	23

Remerciements

Nous tenons à exprimer toutes nos reconnaissances à ceux qui, à divers titres, ont collaboré à la réalisation de ce travail. Nous les devons à de nombreuses personnes que nous avons le plaisir et l'honneur de citer ci-après.

***Mr, Hemdane** Yacine pour avoir dirigé ce travail et lui avoir accordé un intérêt tout au long de son élaboration.*

Nous tenons à remercier :

***Mr, Soufiane** Omar d'avoir accepté de présider le jury de cette soutenance.*

***Mr, Hellel** Mustapha nous avoir honoré de sa présence, d'avoir accepté d'examiner ce travail.*

***Mr, Bouaicha** Farid on le remercie d'avoir accepté examiner notre travail.*

Enfin nos vifs remerciements, à toutes les personnes qui nous ont aidé du près ou de loin à la réalisation de ce mémoire de Master.

Himeur Zouheyr

Liste des figures

Figure n° 1 : la forme de spectre PM en fonction de la vitesse du vent

Figure n° 02 : Densités spectrales des énergies calculées à partir du spectre de Pierson et
Moscowitz. Pour un vent de : 10 m/ S

Figure n°3 :Densités spectrales des énergies calculées à partir du spectre de Pierson et
Moscowitz. Pour un vent de : 11 m/ S .

Figure n°4 : Densités spectrales des énergies calculées à partir du spectre de Pierson et
Moscowitz. Pour un vent de : 12 m/ S.

Figure n°5 : Densités spectrales des énergies calculées à partir du spectre de Pierson et
Moscowitz. Pour un vent de : 13m/ S.

Figure n°6 : Densités spectrales des énergies calculées à partir du spectre de Pierson et
Moscowitz. Pour un vent de : 14m/ S.

Figure n°7 :Densités spectrales des énergies calculées à partir du spectre de Pierson et
Moscowitz. Pour un vent de : 15m/ S.

Figure n°8 :Densités spectrales des énergies calculées à partir du spectre de Pierson et
Moscowitz. Pour un vent de : 16m/ S.

Figure n°9 :Densités spectrales des énergies calculées à partir du spectre de Pierson et
Moscowitz. Pour un vent de : 17m/ S. .

Figure n°10 :Densités spectrales des énergies calculées à partir du spectre de Pierson et
Moscowitz. Pour un vent de : 18m/ S. .

Figure n°11 :Densités spectrales des énergies calculées à partir du spectre de Pierson et
Moscowitz. Pour un vent de : 19m/ S. .

Figure n°12 :Densités spectrales des énergies calculées à partir du spectre de Pierson et
Moscowitz. Pour un vent de : 20m/ S.

Introduction

Général

Introduction

Le spectre des vagues est la distribution fréquentielle des énergies spectrales en fonction des fréquences. A la différence des spectres réels, dont leur obtention ne requiert que le signal périodique du niveau de la mer à haute fréquence (0.03 à 0.3 Hz), les spectres irréels des vagues nécessitent certains paramètres comme la vitesse du vent, sa durée d'action, le fetch, etc.

L'objet de cette contribution est de décrire les méthodes spectrales permettant la modélisation de l'état de la mer telles que les spectres de Pierson-Moskowitz et de JONSWAP. Ces spectres sont très importants dans l'étude des vagues, le génie côtier, la protection du littoral et les transports sédimentaires. Ils peuvent également être utilisés pour la description de l'énergie marine.

Par ailleurs, ce travail comprendra également une application du spectre de Pierson-Moskowitz $S_{PM}(f)$, développé à partir des enregistrements du Nord de l'océan atlantique pour des vitesses moyennes de vents allant de 10 à 20 $m.s^{-1}$, mesuré à une hauteur de 19.5 m (**Whitford, 2002**). Cette application concernera les vitesses du vent allant de 10 à 20 $m.s^{-1}$. Les résultats de cette application aideront à mieux comprendre l'évolution des spectres des énergies des vagues au fur et à mesure que le vent change de vitesse.

Chapitre I

Chapitre I : Généralité

Dans ce chapitre, les grandeurs nécessaires à la compréhension de la modélisation spectrale de l'état de la mer sont introduites.

1. Définitions, terminologie :

Lors que le vent exerce un frottement avec la surface de la mer, cette dernière se met en mouvement pour en générer des vagues et de la houle.

Les vagues sont des ondes de gravité appartenant à une gamme fréquentielle comprise entre 0.03 et 0.3 Hz. Celles-ci, sont générées dans la zone du fetch, laquelle est la zone où le vent souffle pour former des vagues. En quittant la zone de génération, si ces vagues progressent vers la côte en l'absence du vent, la houle est ainsi créée.

Le terme « état de mer » désigne l'agitation locale de la mer observée sur une certaine durée. L'état de mer peut recouvrir des formes diverses selon que la mer est calme ou peu agitée ou bien en phase de tempête, selon que les vagues sont en phase de formation (on parle alors de « mer de vent » ou de « clapot ») ou au contraire arrivent de l'océan après s'être propagées sur plusieurs milliers de kilomètres (on parle alors de « houle océanique ») (**Bonnefille.1992**).

Il peut être composé de plusieurs systèmes de vagues ayant des origines différentes.

Dans cette contribution relative à l'étude de l'état de la mer, nous nous intéresserons au spectre de l'état de la mer au large.

Parmi les paramètres caractérisant les vagues on peut citer :

La période (T) : qui est le temps écoulé entre deux crêtes (d'une vague) successives.

La longueur d'onde : qui est la distance entre deux crêtes successives.

Chapitre I : Généralité

La hauteur : qui est la distance verticale entre la crête et le creux d'une seule vague. Cependant, en ce qui concerne les vagues réelles, les vagues sont souvent définies par la hauteur significative (H_s) qui est égale à la moyenne du tiers supérieur des vagues.

Le spectre d'énergie des vagues est la représentation des énergies des vagues en fonction de leurs fréquences. On parle d'un spectre réduit, lorsque les vagues comprennent moins de fréquences et d'un spectre large, lorsque les vagues contiennent plusieurs fréquences. Il convient toutefois de rappeler qu'il existe deux types de spectres :

Spectre réel : est un spectre obtenu à partir des données réelles du niveau de la mer ;

Spectre théorique : est un spectre théorique obtenu à l'aide des données liées au vent (par exemple) et des équations mathématiques.

On note que, en ne conservant que l'énergie des vagues et sa répartition spectrale, on perd une partie de l'information sur un état de mer réel et on ne pourra pas reconstituer de façon unique un champ de surface libre à partir du spectre (**Chevalier.1995**)

Pour des précisions sur ces définitions et l'établissement des équations fondamentales, on pourra se référer aux livres généraux de **Komen et al. (1994)**, **Young (1999)** ou **(Holthuijsen)(2007)**.

Chapitre I : Généralité

1.1. Spectres directionnels de l'état de mer :

2. Les modèles spectraux d'état de mer :

Les modèles spectraux d'état de mer, qui résolvent l'équation d'évolution du spectre d'énergie des vagues, sont couramment utilisés pour la prédiction des états de mer car ils permettent de s'affranchir des détails du mouvement des vagues. Trois générations de modèles de vagues se sont succédé, s'appuyant sur des connaissances physiques de plus en plus importantes et sur l'accroissement des capacités informatiques.

2.1 Modèles de l'état de la mer de la 1^{ère} et la 2^{ème} génération :

Les premiers modèles spectraux d'état de mer ont été élaborés dans les années 1950 – 1960 (Gelci et al., 1957). Ils s'appuient sur les théories de Miles (1957) et Phillips (1957) pour la génération des vagues par le vent et sur le concept de saturation universelle de Pierson & Moskowitz (1964). Les interactions non-linéaires sont traitées comme un phénomène secondaire et négligées ou paramétrisées très sommairement. Ces modèles sont appelés « modèles de 1^{ère} génération » (1G) (cf. SWAMP Group, 1985) (**Gagnaire-Renou, 2009**).

Les modèles de 2^{ème} génération (2G) apparaissent alors, prenant en compte les premières paramétrisations des interactions non-linéaires vague-vague (e.g. Barnett, 1968; Ewing, 1971; Hasselmann et al., 1976) et comprenant un couplage entre les différentes composantes spectrales (**Gagnaire-Renou, 2009**).

Chapitre I : Généralité

2.2 Modèles de 3ème génération :

Le développement de la méthode de calcul des interactions non-linéaires DIA (Hasselmann et al., 1985) a marqué le début des modèles de 3ème génération. Dans ces modèles, chaque composante spectro-angulaire du spectre de variance évolue « librement » sous l'action combinée des différents processus physiques pris en compte. Le terme de transfert non-linéaire S_{nl} n'est plus paramétrisé, mais calculé à partir d'une expression de manière plus ou moins approchée (**Gagnaire-Renou, 2009**).

Chapitre II

Introduction :

Le spectre des vagues est la représentation fréquentielle et énergétique des vagues. Plusieurs méthodes permettent la description de l'état de la mer : échelle de Beaufort (descriptive) développée par *British Rear Admiral Sir Francis Beaufort* en 1805 ; méthode statistique (**Longuet-Higgins, 1952**) et la méthode spectrale (**Whitford, 2002**).

Spectre de Pierson-Moskowitz :

Nous aborderons dans ce travail le spectre de JONSWAP (Joint North Sea Wave Project). Cependant, tout d'abord, il y avait le spectre de Pierson-Moskowitz (PM) qui est développé à partir des données de vagues et de vents en Océan Atlantique Nord pour des vents allant de 10 à 20 m.s⁻¹ (**Whitford, 2002**).

$$S_{PM}(f) = \frac{\alpha_{PM} g^2}{(2\pi)^4 f^5} e^{-1.25(f_p/f)^4}$$

Avec :

$$\alpha_{PM} = 0.0081$$

F est la fréquence en Hz ; f_p est la fréquence au niveau du pic du spectre qui est égale à $1/(0.729W)$ où W est la vitesse du vent en m.s⁻¹ mesurée sur une hauteur de 19.5 m et $S_{PM}(f)$ en m²s (**Whitford, 2002**).

Le Pierson-Moskowitz (PM) des spectres est une relation empirique qui définit la distribution de l'énergie à une fréquence au sein de l'océan. Développé en 1964, le spectre de PM est l'une des descriptions les plus simples pour la distribution d'énergie. Il suppose que, si le vent souffle régulièrement pendant une longue période sur une grande surface, les ondes finira par atteindre un point d'équilibre avec le vent.

Ceci est connu comme un pleinement développé mer. Pierson et Moskowitz développé leur spectre de mesures dans l'Atlantique Nord en 1964, et a présenté le rapport suivant entre la distribution de l'énergie et du vent:

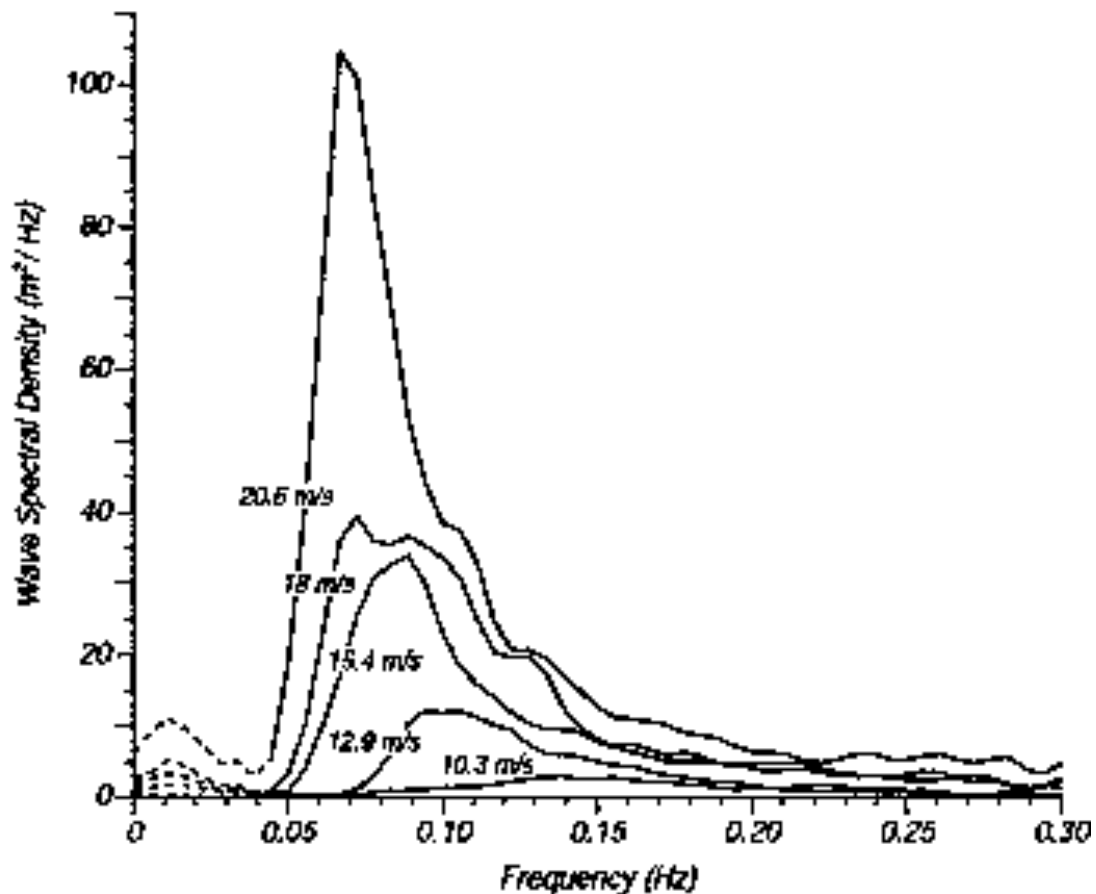


Fig n° 1 : la forme de spectre PM en fonction de la vitesse du vent

$$S_{PM}(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp \left[-\beta \left(\frac{g}{\omega U_{19.4}} \right)^4 \right]$$

Où

α est une constante numérique $\alpha=0,0081$

β est une constante numérique

$$\beta = 0,74$$

g est la gravité

U est la vitesse du vent à 19,4 M dessus de la surface de la mer.

Compte tenu de la relation entre k et ω on obtient :

$$S_{PM}(k) = \frac{\beta}{2k^3} \exp \left(-0,74 \frac{g^2}{k^2 v^4} \right)$$

K est le nombre d'ondes.

Ce spectre présente un maximum pour la valeur de k suivante :

$$k_{PM}^{opt} = \left(\frac{2g^2 0,74}{3v^4} \right)^{1/2} \Rightarrow S_{PM}(k_{PM}^{opt}) = \left(\frac{3v^4}{2g^2 0,74} \right)^{3/2} \frac{\beta e^{-3/2}}{2}$$

Les spectres PM générique d'origine, définie par la vitesse du vent:

$$S_{PM}(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp \left[-\beta \left(\frac{g}{\omega U} \right)^4 \right]$$

Paramètres :

W onde de fréquence ($2\pi/s$)

U est la vitesse du vent à 19,4 M dessus de la surface de la mer (m / s)

Alpha contrôle de l'intensité des spectres, la valeur par défaut est $\alpha = 0.0081$

Bêta contrôle le facteur de forme, $\beta = 1.25$

Les spectres PM défini par une fréquence de crête spectrale (ω_p):

$$S_{PM}(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp \left[-\beta \left(\frac{\omega_p}{\omega} \right)^4 \right]$$

où

$$\alpha = 0.0081$$

$$\omega_p = 0.877g/(\pi U_{19.5})$$

$$\beta = 1.25$$

Pour une gamme de conditions typiques de la mer du Nord (où $\alpha = 0,0081$ et $\omega_p = 2\pi/12.4 = 0,5$), mais avec plus ou moins améliorations de pointe les spectres PM a la forme

Spectre de JONSWAP (Joint North Sea Wave Project):

Le JONSWAP (Joint North Sea Wave Project) spectres est une relation empirique qui définit la distribution de l'énergie à une fréquence au sein de l'océan.

Le spectre JONSWAP est effectivement une version limitée de chercher la **Pierson-Moskowitz** spectre, sauf que le spectre des ondes n'est jamais entièrement conçu et pourrait continuer à se développer en raison de la non-linéaires interactions onde-onde pendant un temps très long. Par conséquent, dans le spectre JONSWAP, les vagues ne cesse de croître avec la distance (ou le temps) comme spécifié par l' α (*alpha*) terme, et le pic dans le spectre est plus prononcée, comme spécifié par le γ (*gamma*) terme. Hasselmann (1966) ont à ce dernier de se révéler particulièrement importante car elle conduire à accrues des interactions non linéaires.

Le JONSWAP (Joint North Sea Wave Project) spectres est une relation empirique qui définit la distribution de l'énergie à une fréquence au sein de l'océan.

L'équation sous-jacente est la suivante:

$$S(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp \left[-\beta \frac{\omega_p^4}{\omega^4} \right] \gamma^a$$

où

$$a = \exp \left[-\frac{(\omega - \omega_p)^2}{2\omega_p^2 \sigma^2} \right]$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & \text{if } \omega \leq \omega_p \\ 0.09 & \text{if } \omega > \omega_p \end{cases}$$

$$\beta = \frac{5}{4}$$

α est une constante qui se rapporte à la vitesse du vent et de la longueur du fetch, voir ci-dessous. Les valeurs typiques de la mer du Nord au nord sont de l'ordre de 0,0081 à 0,01

ω est la fréquence de l'onde

ω_p est la crête de l'onde-fréquence

La plupart des problèmes est la littérature sont exprimés dans le formulaire ci-dessus. Cependant, si une vitesse de vent particulière et la longueur du fetch sont connues, alors α et ω_p peut être estimée en utilisant les deux fonctions suivantes.

Pour une gamme de conditions typiques de la mer du Nord (où $\alpha = 0,0081$ et $\omega_p = 2\pi/12.4 = 0,5$), mais avec plus ou moins améliorations de pointe les spectres JONSWAP a la forme

a. formulation de Goda :

Goda a proposé une expression analytique du spectre JONSWAP qui ne dépend que des paramètres internes. Nous opposons les paramètres internes qui caractérisent les vagues comme la hauteur significative et la période du pic du spectre aux paramètres externes qui caractérisent le champ de vent comme la vitesse du vent et la longueur de fetch (**Scimied, 1993**).

Cette formulation et la suivante :

$$S(f) = \alpha_G \left[\frac{H_{1/2}}{T_p^2} \right]^2 f^{-5} e^{\left\{ -\frac{5}{4} (\frac{f}{f_p})^{-4} \right\}} \gamma \left[-\frac{(\frac{f}{f_p} - 1)^2}{2\sigma^2} \right]$$

$$\alpha_G = \frac{0.0624}{0.230 + 0.0336 \gamma - 0.185 (1.9 + \gamma)^{-1}}$$

avec

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_a & f \leq f_p \\ \sigma_b & f > f_p \end{cases}$$

γ Varie entre 1 et 7 sa valeur moyenne est 3,3

$$\sigma_a = 0.07$$

$$\sigma_b = 0.09$$

$S(f)$ et la valeur de spectre d'énergie associée à la fréquence $f.H_{1/3}$ est la hauteur significatif des vagues de l'enregistrement ; T_p est la période de pic

γ est le coefficient de surélévation du pic du spectre.

σ est le paramètre qui caractérise la longueur de pic du spectre.

γ

Chapitre III

Introduction :

Ce chapitre concerne une application du spectre de Pierson-Moskowitz $S_{PM}(f)$, développé à partir des enregistrements du Nord de l'océan atlantique pour des vitesses moyennes de vents allant de 10 à 20 m.s⁻¹, mesuré à une hauteur de 19.5 m (Whitford, 2002). L'application de ce spectre permettra de voir la modulation des fréquences des vagues en réponse aux variations des vitesses du vent.

Application du $S_{PM}(f)$:

Pour ce cas, nous avons pris toute la gamme du vent où ce spectre peut être appliqué (entre 10 et 20 m.s⁻¹).

Dans cette application, l'équation du spectre de Pierson-Moskowitz $S_{PM}(f)$ (détaillée dans le chapitre n°2) est appliquée pour des vagues ayant des fréquences comprises entre 0.03 et 0.3 Hz, correspondant respectivement aux périodes de 33 s et 3 s.

$$S_{PM}(f) = \frac{\alpha_{PM} g^2}{(2\pi)^4 f^5} e^{-1.25(f_p/f)^4}$$

Avec $S_{PM}(f)$ en m².s et f en Hz.

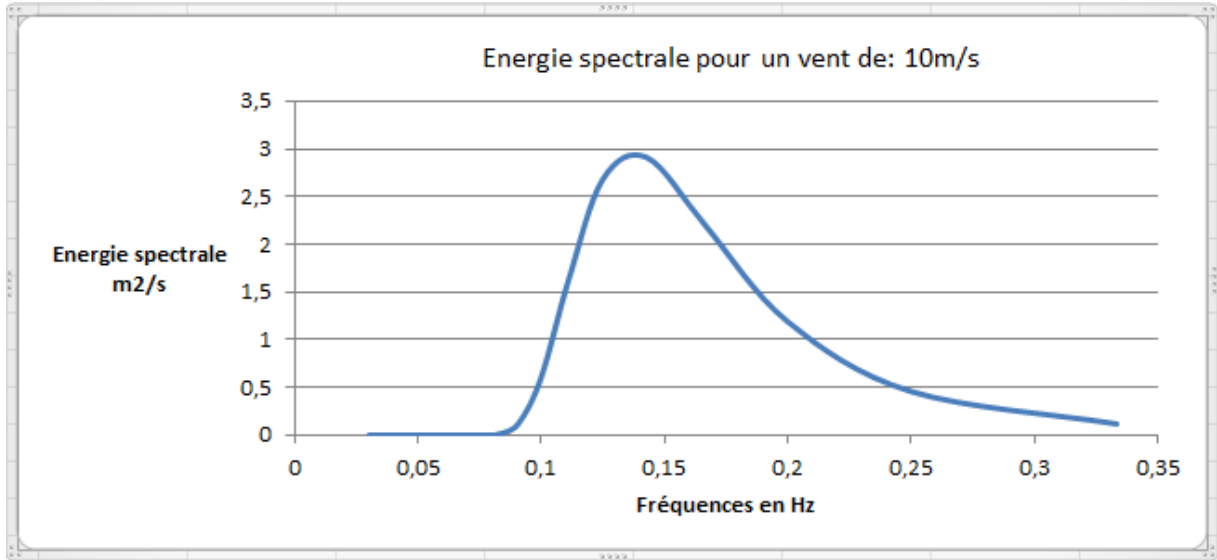


Fig n°2: Densités spectrales des énergies calculées à partir du spectre de Pierson et Moskowitz pour un vent de 10 m.s^{-1}

L'observation de la figure n°2 montre que les vagues générées par des vents ayant une vitesse moyenne de 10 m.s^{-1} ont des fréquences allant d'environ 0.1 à 0.25 Hz avec une fréquence pic d'environ 0.135 Hz correspondant à la période d'environ 7.5 s.

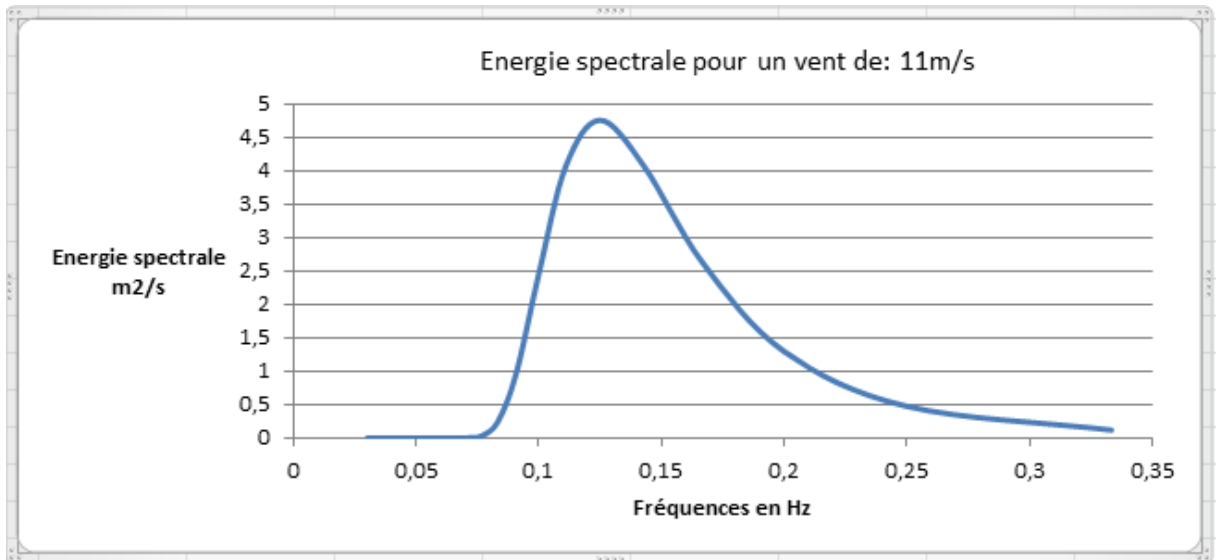


Fig n°3: Densités spectrales des énergies calculées à partir du spectre de Pierson et Moskowitz pour un vent de 11 m.s^{-1}

L'observation de la figure n° 3 montre que les vagues générées par des vents ayant une vitesse moyenne de 11 m.s^{-1} ont des fréquences allant d'environ 0.1 à 0.25 Hz avec une fréquence pic d'environ 0.125 Hz correspondant à la période d'environ 8 s. Le spectre a quasiment la même largeur que celui lié au vent de 10 m.s^{-1} . En revanche, la comparaison des énergies des densités spectrales modélisées par ce vent (11 m.s^{-1}) sont légèrement plus importantes que celles en relation avec le vent de 10 m.s^{-1} . Il convient de souligner que l'ensemble du spectre commence à se déplacer légèrement vers les basses fréquences.

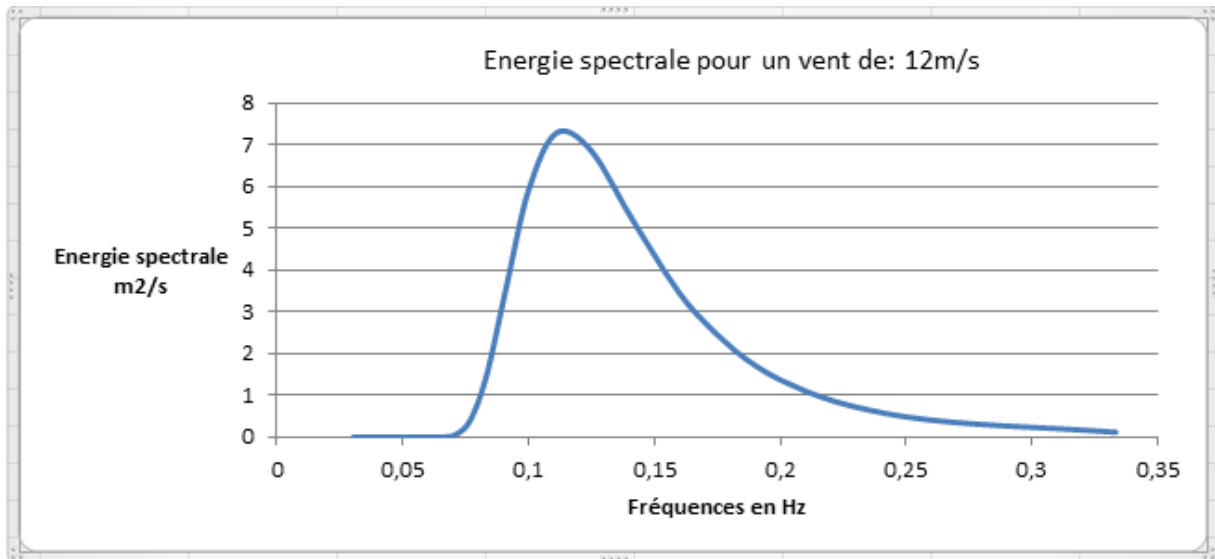


Fig n°4: Densités spectrales des énergies calculées à partir du spectre de Pierson et Moskowitz pour un vent de 12 m.s^{-1}

La figure n°4 illustre les vagues générées par des vents ayant une vitesse moyenne de 12 m.s^{-1} qui se caractérisent par des fréquences allant d'environ 0.07 à 0.25 Hz avec une fréquence pic d'environ 0.115 Hz correspondant à la période d'environ 9 s. Pareillement au cas précédent, le spectre a quasiment la même largeur que celui lié au vent de 11 m.s^{-1} . En revanche, la comparaison des énergies des densités spectrales modélisées par ce vent (12 m.s^{-1}) sont légèrement plus importantes que celles en relation avec le vent de 11 m.s^{-1} .

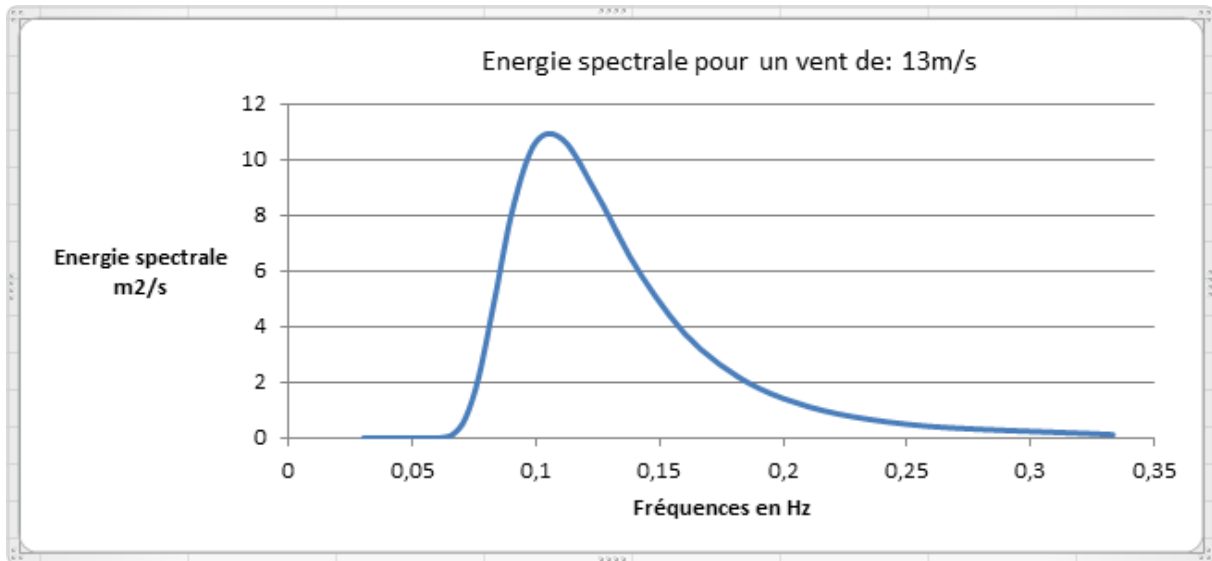


Fig n°5: Densités spectrales des énergies calculées à partir du spectre de Pierson et Moskowitz pour un vent de 13 m.s^{-1}

La figure n°5 illustre les vagues générées par des vents ayant une vitesse moyenne de 13 m.s^{-1} , qui se caractérisent par des fréquences oscillant entre environ 0,065 et 0,23 Hz avec une fréquence pic d'environ 0,105 Hz correspondant à la période d'environ 9,5 s. Pareillement aux cas précédents, les fréquences tendent à se déplacer vers les basses fréquences et les densités spectrales deviennent de plus en plus importantes.

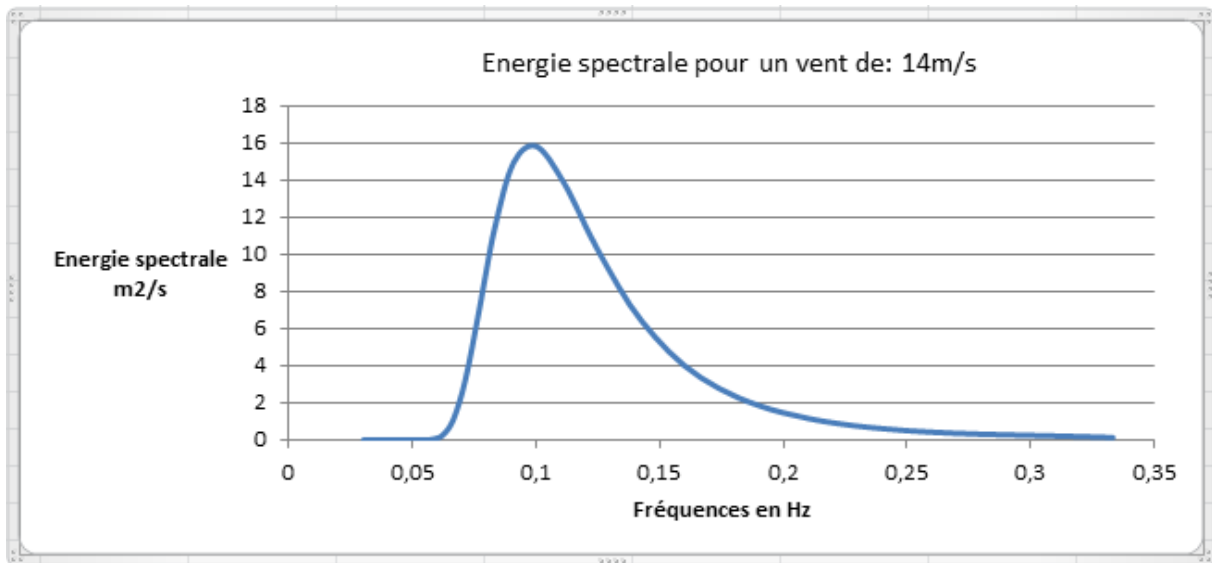


Fig n°6: Densités spectrales des énergies calculées à partir du spectre de Pierson et Moskowitz pour un vent de 14 m.s^{-1}

La figure n°6 montre les résultats de l'application du spectre de Pierson et Moskowitz pour un vent de 14 m.s^{-1} . Cette figure illustre des vagues avec fréquences allant d'entre 0,05 et 0,25 Hz avec une fréquence pic d'environ 0,098 Hz correspondant à la période d'environ 10 s. Par ailleurs, les densités des énergies deviennent augmentent de plus en plus et l'ensemble du spectre se déplace vers les basses fréquences.

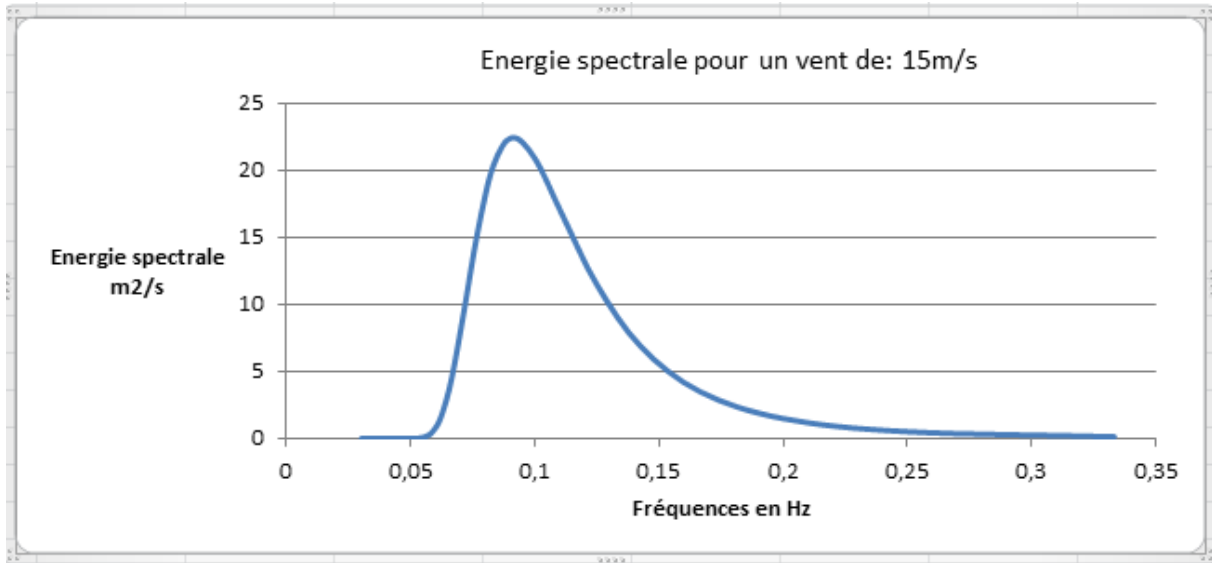


Fig n°7: Densités spectrales des énergies calculées à partir du spectre de Pierson et Moskowitz pour un vent de 15 m.s⁻¹.

L'observation de la figure n°7 montre que le spectre de Pierson et Moskowitz appliqué pour un vent de vitesse moyenne de 15 m.s⁻¹ donne des vagues caractérisées par des fréquences allant d'environ 0.05 et 0.2 Hz avec une fréquence pic d'environ 0.09 Hz correspondant à la période d'environ 11 s. En ce qui concerne le spectre, celui-ci devient de plus en plus énergétique et un déplacement du pic spectral vers les basses fréquences.

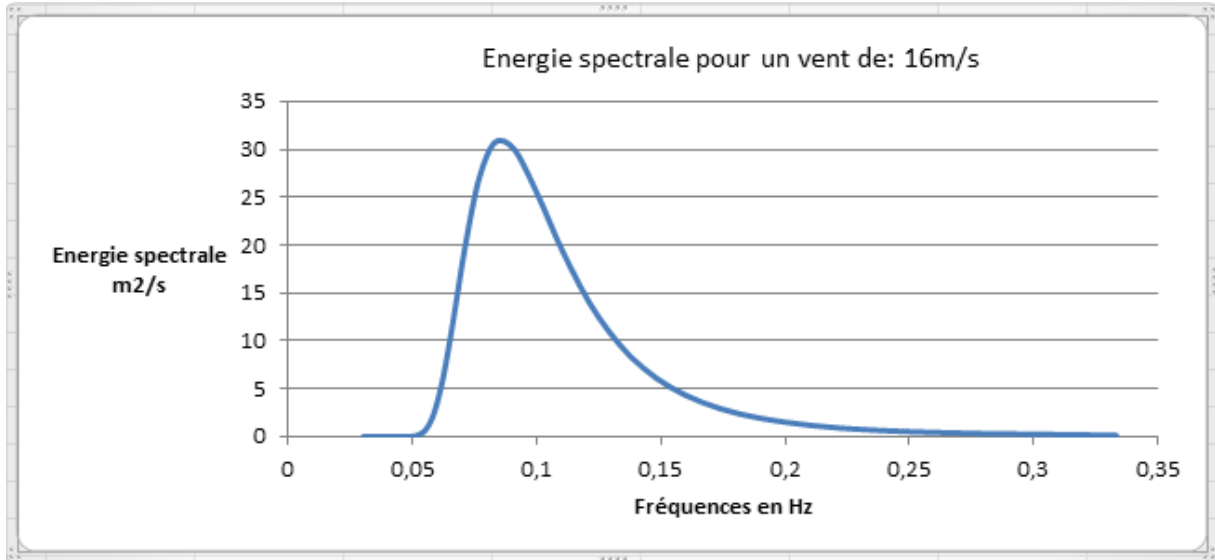


Fig n°8: Densités spectrales des énergies calculées à partir du spectre de Pierson et Moskowitz pour un vent de 16 m.s⁻¹

La figure n°8 montre les estimations spectrales obtenues par l'équation de Pierson et Moskowitz appliquée pour un vent de vitesse moyenne de 16 m.s⁻¹. Celles-ci, montrent la formation des vagues caractérisées par des fréquences allant d'environ 0.05 et 0.2 Hz avec une fréquence pic d'environ 0.085 Hz correspondant à la période d'environ 12 s. Par rapport aux cas précédents, les amplitudes des énergies spectrales augmentent au fur et à mesure que le vent augmente. On observe également que le spectre se déplace vers les basses fréquences.

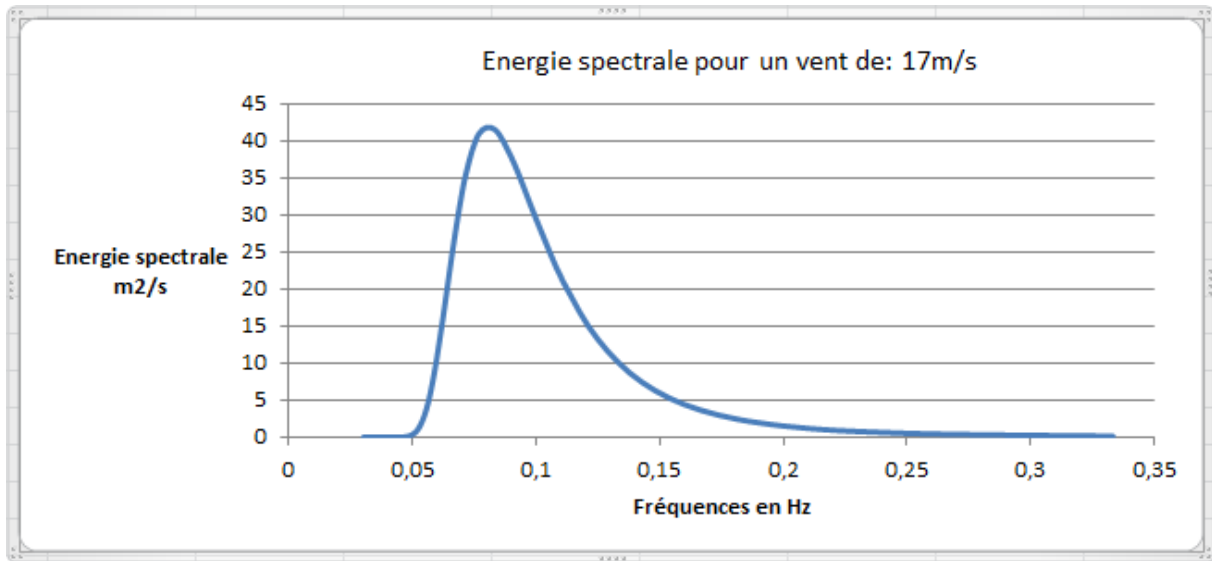


Fig n°9: Densités spectrales des énergies calculées à partir du spectre de Pierson et Moskowitz pour un vent de 17 m.s⁻¹

La figure n°9 montre les estimations spectrales obtenues par l'équation de Pierson et Moskowitz appliquée pour un vent de vitesse moyenne de 17 m.s⁻¹. Les résultats montrent que les vagues générées par ce vent ont des périodes allant d'environ 0.05 à 0.2 Hz avec une fréquence pic d'environ 0.08 Hz correspondant à la période d'environ 12.5 s. Les résultats montrent également que plus le vent (vitesse) augmente plus les énergies spectrales augmentent. Aussi, le spectre devient de plus en plus étroit avec un déplacement vers les basses fréquences.

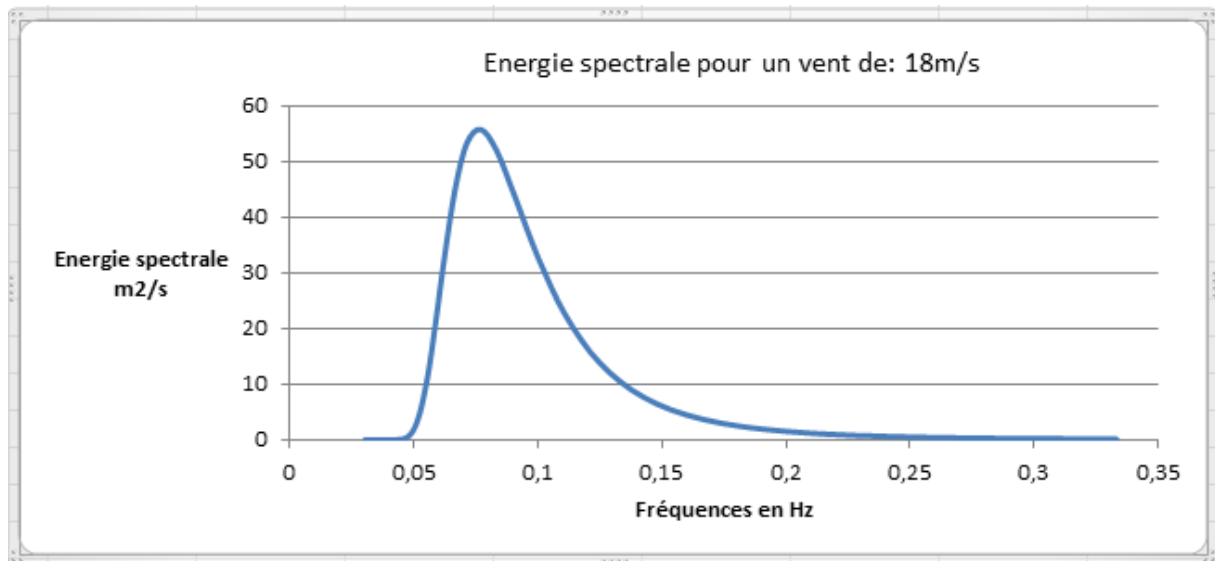


Fig n°10: Densités spectrales des énergies calculées à partir du spectre de Pierson et Moskowitz pour un vent de 18 m.s⁻¹

L'observation de la figure n°10 montre que le spectre de Pierson et Moskowitz appliqué pour un vent de vitesse moyenne de 18 m.s⁻¹ donne des vagues qui se caractérisent par des fréquences allant entre environ 0.05 et 0.15 Hz avec une fréquence pic d'environ 0.075 Hz correspondant à la période d'environ 13 s. Les énergies spectrales deviennent de plus en plus importantes et le spectre se déplace également vers les basses fréquences.

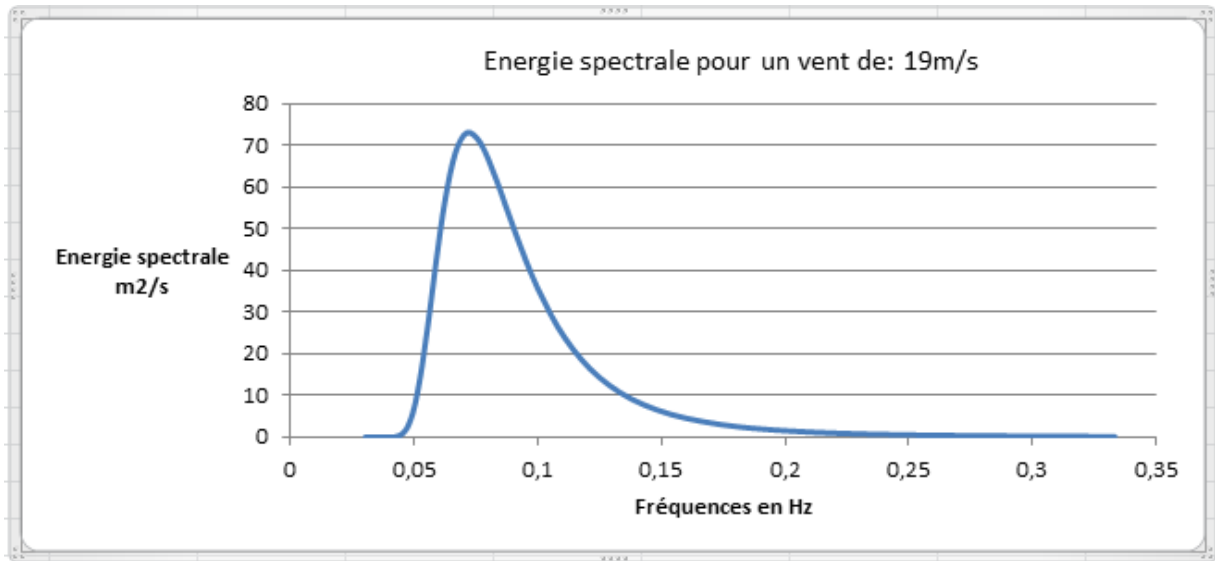


Fig n°11: Densités spectrales des énergies calculées à partir du spectre de Pierson et Moskowitz pour un vent de 19 m.s^{-1}

La figure n° 11 illustre les vagues formées par des vents ayant une vitesse moyenne de 19 m.s^{-1} . Le spectre montre des fréquences allant d'environ 0,05 à 0,17 Hz avec une fréquence pic d'environ 0,072 Hz relative à la période d'environ 14 s. Pareillement aux cas précédents, le spectre a quasiment la même largeur que celui lié au vent de 18 m.s^{-1} . Les énergies spectrales augmentent par rapport aux cas précédents. Les résultats montrent également un déplacement du pic spectral vers les basses fréquences.

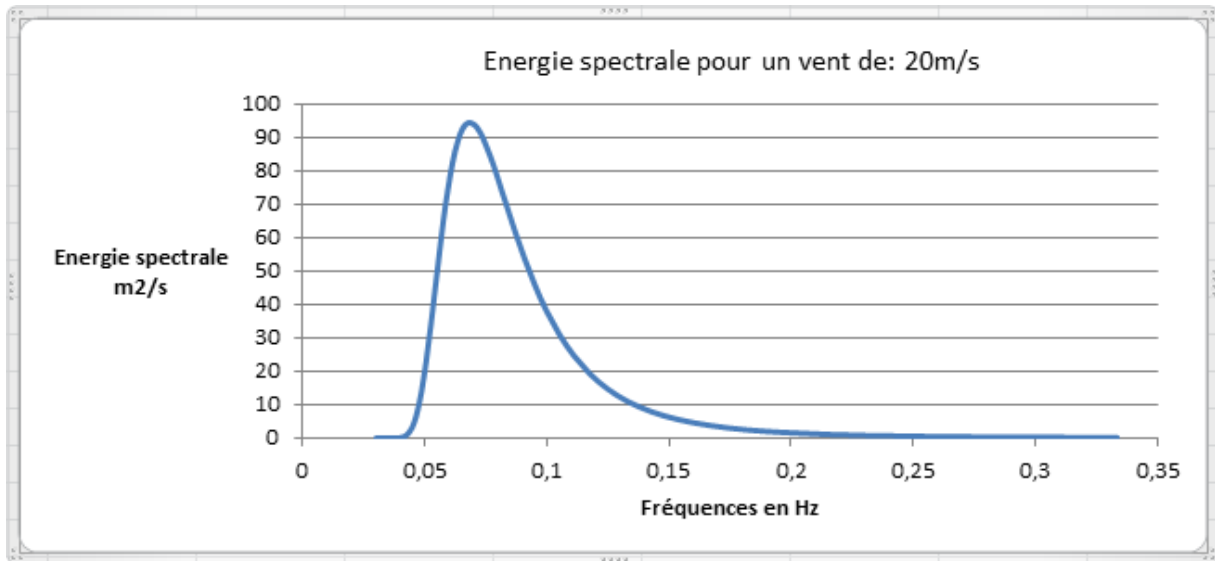


Fig n°12: Densités spectrales des énergies calculées à partir du spectre de Pierson et Moskowitz pour un vent de 20 m.s⁻¹

Les résultats du dernier test du modèle de Pierson et Moskowitz appliqué au vent ayant une vitesse moyenne de 20 m.s⁻¹ sont représentés sur la figure n° 12. Ces résultats montrent la génération des vagues ayant des fréquences comprises entre environ 0,07 et 0,25 Hz avec une fréquence pic d'environ 0,066 Hz qui correspond à la période d'environ 11 s. Les énergies des densités spectrales sont plus importantes que celles des neuf cas précédents. Les résultats montrent également un léger déplacement du pic spectral vers les basses fréquences.

Conclusion :

Le spectre de Pierson et Moskowitz $S_{PM}(f)$ se base essentiellement sur les données des vents mesurés pour prédire les vagues qui peuvent être formées sous son action. Le $S_{PM}(f)$ appliqué pour les vitesses de vents allant de 10 à 20 $m.s^{-1}$ montre clairement que le vent est le principal facteur qui module aussi bien les énergies spectrales que les fréquences des vagues. L'augmentation de la vitesse du vent s'accompagne avec l'augmentation des densités des énergies spectrales. L'application du spectre $S_{PM}(f)$ montre que les énergies spectrales passent de 3 à environ 95 $m^2.s$ respectivement pour des vents de 10 et 20 $m.s^{-1}$. Ces résultats montrent également qu'au fur et à mesure que la vitesse moyenne du vent augmente, le spectre se déplace vers les basses fréquences.

Conclusion

Conclusion :

L'objet de ce travail est la description de deux méthodes spectrales permettant l'étude de l'état de la mer à savoir les spectres de Pierson et Moscowitz $S_{PM}(f)$ et de JONSWAP qui dépendent, entre autres, du forçage du vent qui s'exerce sur la surface de la mer. L'exemple appliqué dans ce travail a permis l'observation des variations des énergies spectrales en fonction des fréquences et ce, en réponse à l'augmentation des vitesses du vent. Cette application s'est basée sur le spectre de Pierson et Moscowitz $S_{PM}(f)$. Ce dernier, appliqué pour des vitesses de vents allant de 10 à 20 m.s^{-1} , a montré que le vent est le principal facteur qui module aussi bien les énergies spectrales que les fréquences des vagues.

Les résultats ont montré que les densités des énergies spectrales augmentent avec l'augmentation des vitesses du vent. Les résultats ont également montré que l'augmentation de la vitesse du vent s'accompagne par le déplacement de l'ensemble du spectre vers les basses fréquences.

Il convient toutefois de noter que l'étude (théorique) de l'état de la mer doit prendre en considération les conditions dans lesquelles le spectre est développé. A titre d'exemple, le spectre de Pierson et Moscowitz a été développé à partir des enregistrements du Nord de l'océan atlantique pour des vitesses moyennes de vents allant de 10 à 20 m.s^{-1} , mesuré à une hauteur de 19.5 m (**Whitford, 2002**).

Enfin, la fiabilité de ces méthodes dépend, entre autres, des tests de validation *in situ*, à partir des données de vagues et de houles issues des instruments de mesures tels que les houlographes.

Bibliographie

Références bibliographiques

- Bachelier.E., Modélisation électromagnétique des états de surface et de volume des sols. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, 1999
- Boithias.L. Propagation des ondes radioélectriques dans l'environnement terrestre. Collection Technique et scientifique des télécommunications, 1983.
- Besse.S., Étude théorique de radars géologiques : analyses de sols, d'antennes et interprétation des signaux. Thèse de doctorat, Faculté des Sciences et Techniques de Limoges, 2004.
- Bonnefille, R., 1992, Cours d'hydraulique maritime, Editions Masson, 208 p.
- Chevalier C., 1995, La houle réelle dans une mer formée, modélisation appliquée au spectre de Pierson-Moskowitz, Mémoire D.E.A., Université de Nantes.
- Dennis J. Whitford ,Teaching ocean wave forecasting using computer-generated visualization and animation FPart 1: sea forecasting.
- Elodie Gagnaire-Renou, amélioration de la modélisation spectrale des états de mer par un calcul quasi-exact des interactions non-linéaires vague-vague .
- Johnson.J., R. Shin, J. Eidson, L. Tsang et J. Kong, « A method of moments model for VHF propagation », IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 45, p. 115–125, January 1997.
- Johnson.J., L. Tsang, R. Shin, K. Pak, C. Chan, A. Ishimaru et Y. Kuga, « Backscattering enhancement of electromagnetic waves from two-dimensional perfectly conducting random rough surfaces : a comparison of Monte Carlo simulations with experimental data », IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 44, p. 748–756, May 1996.
- Harrington.R., « The method of moments in electromagnetics », Journal of Electromagnetic waves and Applications, vol. 1, no. 3, p. 179–200, 1987.
- Hasselmann K et al, measurements of wind-wave growth and swell, 1973 .
- SCHMIED.L., sea state cycles « the ocean surface », D.Reidel publishing company, 1985.
- Holthuijsen, Practical Methods for Observing and Forecasting Ocean Waves by means of Wave Spectra and Statistics. Naval Oceanographic (2007).
- Gagnaire-Renou, Prediction of wave height and period for a constant wind velocity using the JONSWAP , 2009.
- GODA.Y. , Random seas and design of Maritime Structures, University of Tokyo press, 1985
- Kapp.D. et G. Brown, « A new numerical method for rough-surface scattering calculation », IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 44, p. 711–721, May 1996.
- Karlsson T., 1969, Refraction of a continuous ocean wave spectra, Proc. ASCE, 95 (WW4), p. 437-448.
- Longuet-Higgins, 1952

Références bibliographiques

- Pierson W.J. & Moskowitz L., 1964, A proposed spectral form for July developed wind seas based on the similarity of S.A. Kitaigorodskii, *Journal of Geophysical Research*, 69, p. 5181-5190.
- Saillard.M., P. Forget, G. Soriano, M. Joelson, P. Broche et P. Currier, « Sea surface probing with L-band Doppler radar : experiment and theory », Elsevier Science, vol. C.R. Physique (6),
- Soriano.G. et M. Saillard, « Modelization of the scattering of electromagnetic waves from the ocean surface », *Progress in electromagnetics research*, vol. x, no. 4, p. 102–128, 2003.
- Scimid, 1993
- Simon.J, Extension des méthodes multipoles rapides : résolution pour des seconds membres et applications aux objets diélectriques. Thèse de doctorat, Université de Versailles, 2003
- Toporkov.J., R. Marchand et G. S. Brown, « On the discretization of the integral equation describing scattering by rough conducting surfaces », *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 46, p. 150–161, January 1998.
- Valenzuela.G., « Microwave sensing of the ocean surface », *The ocean surface wavebreaking, turbulent mixing, and radio probing*, p. 233–244, 1985.
- Whitford, 2002.
- Zhao.Z., L. Li, J. Smith et L. Carin, « Analysis of the scattering from very large three dimensional rough surfaces using MLFMM and ray-based analyses », *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 47, June 2005.

Annex

ANNEX

T	F	B	c	Spm
3	0,33333333	0,12178414	0,964785338	0,117495552
4	0,25	0,51319736	0,892880436	0,458223884
5	0,2	1,56615406	0,75834438	1,187684129
6	0,16666667	3,89709247	0,563496364	2,195997436
7	0,14285714	8,42315241	0,345537385	2,910514054
8	0,125	16,4223156	0,163189765	2,679953816
9	0,11111111	29,5935459	0,054813342	1,622121165
10	0,1	50,1169299	0,011963646	0,599581223
11	0,09090909	80,7138168	0,001533911	0,123807778
12	0,08333333	124,706959	0,000103337	0,012886904
13	0,07692308	186,080652	3,23732E-06	0,000602403
14	0,07142857	269,540877	4,12972E-08	1,11313E-05
15	0,06666667	380,575436	1,85859E-10	7,07335E-08
16	0,0625	525,514099	2,5298E-13	1,32945E-10
17	0,05882353	711,588737	8,83333E-17	6,2857E-14
18	0,05555556	946,99347	6,64019E-21	6,28822E-18
19	0,05263158	1240,9448	8,92331E-26	1,10733E-22
20	0,05	1603,74176	1,76123E-31	2,82456E-28
21	0,04761905	2046,82603	4,15048E-38	8,49531E-35
22	0,04545455	2582,84214	9,39292E-46	2,42604E-42
23	0,04347826	3225,69751	1,62458E-54	5,24041E-51
24	0,04166667	3990,62269	1,69093E-64	6,74787E-61
25	0,04	4894,23143	8,25174E-76	4,03859E-72
26	0,03846154	5954,58088	1,45539E-88	8,66621E-85
27	0,03703704	7191,23166	7,076E-103	5,0885E-99
28	0,03571429	8625,30806	7,157E-119	6,1731E-115
29	0,03448276	10279,5582	1,1245E-136	1,1559E-132
30	0,03333333	12178,414	2,0274E-156	2,4691E-152
31	0,03225806	14348,0515	3,0666E-178	4,4E-174
32	0,03125	16816,4512	2,8144E-202	4,7328E-198
33	0,03030303	19613,4575	1,1215E-228	2,1997E-224

Tab n° 1 : Densités spectrales des énergies calculées à partir du spectre de Pierson et

Moscowitz. Pour un vent de : 10 m/ S

ANNEX

T	F	B	c	Spm
3	0,33333333	0,12178414	0,975811552	0,11883837
4	0,25	0,51319736	0,92553142	0,474980283
5	0,2	1,56615406	0,827841482	1,296527297
6	0,16666667	3,89709247	0,675857724	2,633880047
7	0,14285714	8,42315241	0,483933742	4,076247662
8	0,125	16,4223156	0,289906978	4,760943877
9	0,11111111	29,5935459	0,137607582	4,072296301
10	0,1	50,1169299	0,048658078	2,438593493
11	0,09090909	80,7138168	0,011963646	0,965631556
12	0,08333333	124,706959	0,001895329	0,236360662
13	0,07692308	186,080652	0,000177985	0,033119554
14	0,07142857	269,540877	9,04846E-06	0,002438929
15	0,06666667	380,575436	2,25799E-07	8,59335E-05
16	0,0625	525,514099	2,48965E-09	1,30835E-06
17	0,05882353	711,588737	1,08389E-11	7,71287E-09
18	0,05555556	946,99347	1,65302E-14	1,5654E-11
19	0,05263158	1240,9448	7,77807E-18	9,65216E-15
20	0,05	1603,74176	9,87368E-22	1,58348E-18
21	0,04761905	2046,82603	2,93534E-26	6,00813E-23
22	0,04545455	2582,84214	1,76123E-31	4,54899E-28
23	0,04347826	3225,69751	1,82479E-37	5,88622E-34
24	0,04166667	3990,62269	2,77301E-44	1,10661E-40
25	0,04	4894,23143	5,21183E-52	2,55079E-48
26	0,03846154	5954,58088	1,01422E-60	6,03925E-57
27	0,03703704	7191,23166	1,69837E-70	1,22133E-66
28	0,03571429	8625,30806	2,01926E-81	1,74167E-77
29	0,03448276	10279,5582	1,39625E-93	1,43529E-89
30	0,03333333	12178,414	4,5662E-107	5,5609E-103
31	0,03225806	14348,0515	5,7017E-122	8,1808E-118
32	0,03125	16816,4512	2,1788E-138	3,664E-134
33	0,03030303	19613,4575	2,0274E-156	3,9765E-152

Tab n° 2 : Densités spectrales des énergies calculées à partir du spectre de Pierson et

Moscowitz. Pour un vent de : 11 m/ S

ANNEX

T	F	B	c	Spm
3	0,333333333	0,12178414	0,982859986	0,119696758
4	0,25	0,51319736	0,946825445	0,485908321
5	0,2	1,56615406	0,875115217	1,370565249
6	0,16666667	3,89709247	0,75834438	2,955338173
7	0,14285714	8,42315241	0,599015154	5,045595938
8	0,125	16,4223156	0,417175436	6,850986671
9	0,111111111	29,5935459	0,246504027	7,294928247
10	0,1	50,1169299	0,11831608	5,929638677
11	0,09090909	80,7138168	0,043938314	3,546429008
12	0,08333333	124,706959	0,011963646	1,491949949
13	0,07692308	186,080652	0,002251751	0,419007249
14	0,07142857	269,540877	0,000274793	0,074067825
15	0,06666667	380,575436	2,02901E-05	0,007721912
16	0,0625	525,514099	8,41588E-07	0,000442266
17	0,05882353	711,588737	1,81121E-08	1,28884E-05
18	0,05555556	946,99347	1,85859E-10	1,76008E-07
19	0,05263158	1240,9448	8,31407E-13	1,03173E-09
20	0,05	1603,74176	1,47469E-15	2,36502E-12
21	0,04761905	2046,82603	9,38561E-19	1,92107E-15
22	0,04545455	2582,84214	1,92972E-22	4,98416E-19
23	0,04347826	3225,69751	1,14806E-26	3,70329E-23
24	0,04166667	3990,62269	1,76123E-31	7,02842E-28
25	0,04	4894,23143	6,17693E-37	3,02313E-33
26	0,03846154	5954,58088	4,36843E-43	2,60122E-39
27	0,03703704	7191,23166	5,46696E-50	3,93141E-46
28	0,03571429	8625,30806	1,05701E-57	9,11704E-54
29	0,03448276	10279,5582	2,7425E-66	2,81917E-62
30	0,03333333	12178,414	8,25174E-76	1,00493E-71
31	0,03225806	14348,0515	2,4754E-86	3,55172E-82
32	0,03125	16816,4512	6,33278E-98	1,06495E-93
33	0,03030303	19613,4575	1,1757E-110	2,306E-106

Tab n° 3 : Densités spectrales des énergies calculées à partir du spectre de Pierson et

Moscowitz. Pour un vent de : 12 m/ S

ANNEX

T	F	B	c	Spm
3	0,333333333	0,12178414	0,987526488	0,120265064
4	0,25	0,51319736	0,961106178	0,493237155
5	0,2	1,56615406	0,907690757	1,421583563
6	0,16666667	3,89709247	0,81805039	3,188018013
7	0,14285714	8,42315241	0,689309535	5,806159267
8	0,125	16,4223156	0,530080594	8,705150806
9	0,111111111	29,5935459	0,361783731	10,70646347
10	0,1	50,1169299	0,212327675	10,64121122
11	0,09090909	80,7138168	0,103435679	8,348688458
12	0,08333333	124,706959	0,040223596	5,016162365
13	0,07692308	186,080652	0,011963646	2,226203111
14	0,07142857	269,540877	0,002597937	0,700250152
15	0,06666667	380,575436	0,000391716	0,14907736
16	0,0625	525,514099	3,88571E-05	0,020419959
17	0,05882353	711,588737	2,39382E-06	0,001703417
18	0,05555556	946,99347	8,6136E-08	8,15702E-05
19	0,05263158	1240,9448	1,69622E-09	2,10492E-06
20	0,05	1603,74176	1,7065E-11	2,73678E-08
21	0,04761905	2046,82603	8,1575E-14	1,6697E-10
22	0,04545455	2582,84214	1,71682E-16	4,43429E-13
23	0,04347826	3225,69751	1,46854E-19	4,73706E-16
24	0,04166667	3990,62269	4,69564E-23	1,87385E-19
25	0,04	4894,23143	5,14275E-27	2,51698E-23
26	0,03846154	5954,58088	1,76123E-31	1,04874E-27
27	0,03703704	7191,23166	1,71542E-36	1,2336E-32
28	0,03571429	8625,30806	4,30583E-42	3,71391E-38
29	0,03448276	10279,5582	2,51452E-48	2,58482E-44
30	0,03333333	12178,414	3,07281E-55	3,74219E-51
31	0,03225806	14348,0515	7,0412E-63	1,01028E-58
32	0,03125	16816,4512	2,70102E-71	4,54216E-67
33	0,03030303	19613,4575	1,54277E-80	3,0259E-76

Tab n° 4 : Densités spectrales des énergies calculées à partir du spectre de Pierson et

Moscowitz. Pour un vent de : 13 m/ S

ANNEX

T	F	B	c	Spm
3	0,33333333	0,12178414	0,99071145	0,120652942
4	0,25	0,51319736	0,970937096	0,498282356
5	0,2	1,56615406	0,930525453	1,457346216
6	0,16666667	3,89709247	0,861300926	3,356569351
7	0,14285714	8,42315241	0,75834438	6,387650292
8	0,125	16,4223156	0,623817432	10,24452673
9	0,11111111	29,5935459	0,469593149	13,89692644
10	0,1	50,1169299	0,315974558	15,83567477
11	0,09090909	80,7138168	0,185114595	14,94130551
12	0,08333333	124,706959	0,091723079	11,43850627
13	0,07692308	186,080652	0,037235433	6,928793624
14	0,07142857	269,540877	0,011963646	3,224691717
15	0,06666667	380,575436	0,002930818	1,115397293
16	0,0625	525,514099	0,000525921	0,276378638
17	0,05882353	711,588737	6,62284E-05	0,047127402
18	0,05555556	946,99347	5,59175E-06	0,005295354
19	0,05263158	1240,9448	3,0159E-07	0,000374256
20	0,05	1603,74176	9,87265E-09	1,58332E-05
21	0,04761905	2046,82603	1,85859E-10	3,80422E-07
22	0,04545455	2582,84214	1,9013E-12	4,91076E-09
23	0,04347826	3225,69751	9,95898E-15	3,21246E-11
24	0,04166667	3990,62269	2,50991E-17	1,00161E-13
25	0,04	4894,23143	2,85207E-20	1,39587E-16
26	0,03846154	5954,58088	1,36553E-23	8,13118E-20
27	0,03703704	7191,23166	2,56721E-27	1,84614E-23
28	0,03571429	8625,30806	1,76123E-31	1,51912E-27
29	0,03448276	10279,5582	4,08644E-36	4,20068E-32
30	0,03333333	12178,414	2,96361E-41	3,60921E-37
31	0,03225806	14348,0515	6,19187E-47	8,88413E-43
32	0,03125	16816,4512	3,42548E-53	5,76044E-49
33	0,03030303	19613,4575	4,59932E-60	9,02086E-56

Tab n°5: Densités spectrales des énergies calculées à partir du spectre de Pierson et
Moscowitz. Pour un vent de : 14 m/ S

ANNEX

T	F	B	c	Spm
3	0,333333333	0,12178414	0,992943602	0,120924782
4	0,25	0,51319736	0,977867831	0,501839191
5	0,2	1,56615406	0,946825445	1,482874513
6	0,16666667	3,89709247	0,892880436	3,479637623
7	0,14285714	8,42315241	0,810659594	6,828309309
8	0,125	16,4223156	0,699008652	11,47934068
9	0,111111111	29,5935459	0,563496364	16,67585553
10	0,1	50,1169299	0,417175436	20,9075521
11	0,09090909	80,7138168	0,278040878	22,44174046
12	0,08333333	124,706959	0,163189765	20,35089929
13	0,07692308	186,080652	0,082336485	15,32122681
14	0,07142857	269,540877	0,034786956	9,376506651
15	0,06666667	380,575436	0,011963646	4,553069913
16	0,0625	525,514099	0,003248784	1,707281733
17	0,05882353	711,588737	0,000674317	0,479836324
18	0,05555556	946,99347	0,000103337	0,097859924
19	0,05263158	1240,9448	1,12708E-05	0,013986472
20	0,05	1603,74176	8,41588E-07	0,00134969
21	0,04761905	2046,82603	4,12972E-08	8,45282E-05
22	0,04545455	2582,84214	1,27567E-09	3,29485E-06
23	0,04347826	3225,69751	2,37116E-11	7,64865E-08
24	0,04166667	3990,62269	2,5298E-13	1,00955E-09
25	0,04	4894,23143	1,47469E-15	7,21747E-12
26	0,03846154	5954,58088	4,46146E-18	2,65661E-14
27	0,03703704	7191,23166	6,64019E-21	4,77512E-17
28	0,03571429	8625,30806	4,59899E-24	3,96677E-20
29	0,03448276	10279,5582	1,39915E-27	1,43827E-23
30	0,03333333	12178,414	1,76123E-31	2,1449E-27
31	0,03225806	14348,0515	8,62258E-36	1,23717E-31
32	0,03125	16816,4512	1,54004E-40	2,58981E-36
33	0,03030303	19613,4575	9,39292E-46	1,84228E-41

Tab n° 6 : Densités spectrales des énergies calculées à partir du spectre de Pierson et

Moscowitz. Pour un vent de : 15 m/ S

ANNEX

T	F	B	c	Spm
3	0,33333333	0,12178414	0,992943602	0,120924782
4	0,25	0,51319736	0,977867831	0,501839191
5	0,2	1,56615406	0,946825445	1,482874513
6	0,16666667	3,89709247	0,892880436	3,479637623
7	0,14285714	8,42315241	0,810659594	6,828309309
8	0,125	16,4223156	0,699008652	11,47934068
9	0,11111111	29,5935459	0,563496364	16,67585553
10	0,1	50,1169299	0,417175436	20,9075521
11	0,09090909	80,7138168	0,278040878	22,44174046
12	0,08333333	124,706959	0,163189765	20,35089929
13	0,07692308	186,080652	0,082336485	15,32122681
14	0,07142857	269,540877	0,034786956	9,376506651
15	0,06666667	380,575436	0,011963646	4,553069913
16	0,0625	525,514099	0,003248784	1,707281733
17	0,05882353	711,588737	0,000674317	0,479836324
18	0,05555556	946,99347	0,000103337	0,097859924
19	0,05263158	1240,9448	1,12708E-05	0,013986472
20	0,05	1603,74176	8,41588E-07	0,00134969
21	0,04761905	2046,82603	4,12972E-08	8,45282E-05
22	0,04545455	2582,84214	1,27567E-09	3,29485E-06
23	0,04347826	3225,69751	2,37116E-11	7,64865E-08
24	0,04166667	3990,62269	2,5298E-13	1,00955E-09
25	0,04	4894,23143	1,47469E-15	7,21747E-12
26	0,03846154	5954,58088	4,46146E-18	2,65661E-14
27	0,03703704	7191,23166	6,64019E-21	4,77512E-17
28	0,03571429	8625,30806	4,59899E-24	3,96677E-20
29	0,03448276	10279,5582	1,39915E-27	1,43827E-23
30	0,03333333	12178,414	1,76123E-31	2,1449E-27
31	0,03225806	14348,0515	8,62258E-36	1,23717E-31
32	0,03125	16816,4512	1,54004E-40	2,58981E-36
33	0,03030303	19613,4575	9,39292E-46	1,84228E-41

Tab n° 7 : Densités spectrales des énergies calculées à partir du spectre de Pierson et

Moscowitz. Pour un vent de : 16 m/ S

ANNEX

T	F	B	c	Spm
3	0,33333333	0,12178414	0,994544712	0,121119772
4	0,25	0,51319736	0,982859986	0,504401152
5	0,2	1,56615406	0,958669871	1,501424709
6	0,16666667	3,89709247	0,916197286	3,570505544
7	0,14285714	8,42315241	0,850315179	7,162334349
8	0,125	16,4223156	0,75834438	12,45377074
9	0,11111111	29,5935459	0,642050692	19,00055664
10	0,1	50,1169299	0,508985319	25,50878155
11	0,09090909	80,7138168	0,372037884	30,02859756
12	0,08333333	124,706959	0,246504027	30,74076759
13	0,07692308	186,080652	0,145318492	27,04095974
14	0,07142857	269,540877	0,074692829	20,13277074
15	0,06666667	380,575436	0,032748798	12,4633879
16	0,0625	525,514099	0,011963646	6,287064806
17	0,05882353	711,588737	0,003551182	2,526981331
18	0,05555556	946,99347	0,000833891	0,789688982
19	0,05263158	1240,9448	0,000150575	0,186855562
20	0,05	1603,74176	2,02901E-05	0,032540074
21	0,04761905	2046,82603	1,97685E-06	0,004046275
22	0,04545455	2582,84214	1,34708E-07	0,000347931
23	0,04347826	3225,69751	6,20027E-09	2,00002E-05
24	0,04166667	3990,62269	1,85859E-10	7,41694E-07
25	0,04	4894,23143	3,4928E-12	1,70946E-08
26	0,03846154	5954,58088	3,95489E-14	2,35497E-10
27	0,03703704	7191,23166	2,5889E-16	1,86174E-12
28	0,03571429	8625,30806	9,38561E-19	8,09538E-15
29	0,03448276	10279,5582	1,80227E-21	1,85265E-17
30	0,03333333	12178,414	1,75035E-24	2,13165E-20
31	0,03225806	14348,0515	8,19624E-28	1,176E-23
32	0,03125	16816,4512	1,76123E-31	2,96177E-27
33	0,03030303	19613,4575	1,65029E-35	3,23679E-31

Tab n° 8 : Densités spectrales des énergies calculées à partir du spectre de Pierson et

Moscowitz. Pour un vent de : 17 m/ S

ANNEX

T	F	B	c	Spm
3	0,33333333	0,12178414	0,995716907	0,121262527
4	0,25	0,51319736	0,986525839	0,506282458
5	0,2	1,56615406	0,967422912	1,51513332
6	0,16666667	3,89709247	0,933628503	3,638436608
7	0,14285714	8,42315241	0,880529361	7,416833005
8	0,125	16,4223156	0,804887965	13,21812417
9	0,11111111	29,5935459	0,70632795	20,90274862
10	0,1	50,1169299	0,588656439	29,50165347
11	0,09090909	80,7138168	0,46031466	37,15375308
12	0,08333333	124,706959	0,333261875	41,56007497
13	0,07692308	186,080652	0,220141828	40,96413507
14	0,07142857	269,540877	0,130587459	35,19865815
15	0,06666667	380,575436	0,068379491	26,02355456
16	0,0625	525,514099	0,03102894	16,30614545
17	0,05882353	711,588737	0,011963646	8,513195967
18	0,05555556	946,99347	0,003837976	3,634538329
19	0,05263158	1240,9448	0,001001884	1,243282197
20	0,05	1603,74176	0,000207869	0,333368697
21	0,04761905	2046,82603	3,34388E-05	0,068443487
22	0,04545455	2582,84214	4,06328E-06	0,010494814
23	0,04347826	3225,69751	3,62905E-07	0,00117062
24	0,04166667	3990,62269	2,3151E-08	9,2387E-05
25	0,04	4894,23143	1,02384E-09	5,01089E-06
26	0,03846154	5954,58088	3,04257E-11	1,81173E-07
27	0,03703704	7191,23166	5,8819E-13	4,22981E-09
28	0,03571429	8625,30806	7,15193E-15	6,16876E-11
29	0,03448276	10279,5582	5,28165E-17	5,4293E-13
30	0,03333333	12178,414	2,28462E-19	2,7823E-15
31	0,03225806	14348,0515	5,57523E-22	7,99937E-18
32	0,03125	16816,4512	7,38365E-25	1,24167E-20
33	0,03030303	19613,4575	5,09846E-28	9,99985E-24

Tab n° 9 : Densités spectrales des énergies calculées à partir du spectre de Pierson et

Moscowitz. Pour un vent de : 18 m/ S

ANNEX

T	F	B	c	Spm
3	0,33333333	0,12178414	0,996590792	0,121368952
4	0,25	0,51319736	0,989264847	0,50768811
5	0,2	1,56615406	0,973993584	1,525424005
6	0,16666667	3,89709247	0,946825445	3,689866309
7	0,14285714	8,42315241	0,903726668	7,612227461
8	0,125	16,4223156	0,841397525	13,81769569
9	0,11111111	29,5935459	0,75834438	22,44209925
10	0,1	50,1169299	0,655990478	32,87622877
11	0,09090909	80,7138168	0,539410854	43,53790884
12	0,08333333	124,706959	0,417175436	52,02468003
13	0,07692308	186,080652	0,299944602	55,81388721
14	0,07142857	269,540877	0,197967351	53,36029331
15	0,06666667	380,575436	0,11831608	45,0281937
16	0,0625	525,514099	0,063098595	33,15920108
17	0,05882353	711,588737	0,029560373	21,03482818
18	0,05555556	946,99347	0,011963646	11,32949493
19	0,05263158	1240,9448	0,004109513	5,099678896
20	0,05	1603,74176	0,001175873	1,885797256
21	0,04761905	2046,82603	0,000274793	0,562452544
22	0,04545455	2582,84214	5,13706E-05	0,13268223
23	0,04347826	3225,69751	7,51696E-06	0,024247443
24	0,04166667	3990,62269	8,41588E-07	0,003358461
25	0,04	4894,23143	7,03979E-08	0,000344544
26	0,03846154	5954,58088	4,29197E-09	2,55569E-05
27	0,03703704	7191,23166	1,85859E-10	1,33656E-06
28	0,03571429	8625,30806	5,56541E-12	4,80034E-08
29	0,03448276	10279,5582	1,12075E-13	1,15209E-09
30	0,03333333	12178,414	1,47469E-15	1,79594E-11
31	0,03225806	14348,0515	1,23056E-17	1,76561E-13
32	0,03125	16816,4512	6,31415E-20	1,06182E-15
33	0,03030303	19613,4575	1,92972E-22	3,78485E-18

Tab n°10 : Densités spectrales des énergies calculées à partir du spectre de Pierson et
Moscowitz. Pour un vent de : 19m/ S

ANNEX

T	F	B	c	Spm
3	0,33333333	0,12178414	0,997252907	0,121449587
4	0,25	0,51319736	0,991343568	0,508754904
5	0,2	1,56615406	0,978997813	1,533261398
6	0,16666667	3,89709247	0,956940593	3,729285979
7	0,14285714	8,42315241	0,921694639	7,763574414
8	0,125	16,4223156	0,870135906	14,28964645
9	0,11111111	29,5935459	0,800258323	23,68248144
10	0,1	50,1169299	0,712045169	35,6855178
11	0,09090909	80,7138168	0,608213836	49,09126008
12	0,08333333	124,706959	0,494492425	61,66664659
13	0,07692308	186,080652	0,3790939	70,54204032
14	0,07142857	269,540877	0,271264512	73,11687448
15	0,06666667	380,575436	0,17919234	68,19620315
16	0,0625	525,514099	0,107992462	56,75156114
17	0,05882353	711,588737	0,058631129	41,72125121
18	0,05555556	946,99347	0,028293273	26,79354505
19	0,05263158	1240,9448	0,011963646	14,84622467
20	0,05	1603,74176	0,004366372	7,002532644
21	0,04761905	2046,82603	0,001353792	2,770976867
22	0,04545455	2582,84214	0,000350672	0,905729654
23	0,04347826	3225,69751	7,45687E-05	0,240535955
24	0,04166667	3990,62269	1,27807E-05	0,051002911
25	0,04	4894,23143	1,73211E-06	0,008477356
26	0,03846154	5954,58088	1,81949E-07	0,001083428
27	0,03703704	7191,23166	1,45093E-08	0,00010434
28	0,03571429	8625,30806	8,59583E-10	7,41417E-06
29	0,03448276	10279,5582	3,69946E-11	3,80289E-07
30	0,03333333	12178,414	1,13008E-12	1,37626E-08
31	0,03225806	14348,0515	2,392E-14	3,43206E-10
32	0,03125	16816,4512	3,42212E-16	5,75479E-12
33	0,03030303	19613,4575	3,22522E-18	6,32578E-14

Tab n° 11 : Densités spectrales des énergies calculées à partir du spectre de Pierson et
 Moskowitz. Pour un vent de : 20m/ S