

2319

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère aux Universités

Ecole Nationale Polytechnique
Département d'hydraulique

Thèse de magister

Thème

Analyse du Régime de Houle sur le Littoral Algerien Etude Experimentale des Dignes A Talus

Soutenu le 11 Juin 1990
par : RAHMANI DOUADI

Devant le jury constitué par :

GAHMOUSSE	Président
GALICHON	Rapporteur
BENBLIDIA	Examineur
BILEK	Examineur
TABET	Invité

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère aux Universités

Ecole Nationale Polytechnique

Département d'hydraulique

Thèse de magister

Thème

Analyse du Régime de Houle sur le Littoral Algerien Etude Experimentale des Dignes A Talus

Soutenu le 11 Juin 1990
par : **RAHMANI DOUADI**

Devant le jury constitué par :

GAHMOUSSE	Président
GALICHON	Rapporteur
BENBLIDIA	Examineur
BILEK	Examineur
TABET	Invité

|| SOMMAIRE ||

PREMIERE PARTIE

<u>CHAPITRE 1</u>	<u>Généralités</u>	1
<u>CHAPITRE 2</u>	<u>Analyse du régime de la houle sur le littoral Algérien</u>	
2.1	Introduction	5
2.2	Recherches bibliographiques	6
2.2.1	Méthodes mathématiques (houle théorique)	
2.2.2	Méthodes de traitement statistique de la houle réelle	
2.2.3	Méthodes d'analyse spectrale de la houle	
2.2.4	Conclusion	
<u>CHAPITRE 3</u>	<u>Analyse des enregistrements de houle</u>	
3.1	Introduction	20
3.2	Description des mesures et méthode de dépouillement	21
3.3	Analyse statistiques de la houle	22
3.3.1	Présentation du programme	
3.3.2	Evolution des tempêtes	
3.3.3	Répartition des hauteurs des vagues et corrélation entres les paramètres	
3.4	Analyse spectrale de la houle	37
3.4.1	Approche par la transformée de FOURIER de la fonction d'autocorrélation	
3.4.2	Approche par la transformation de FOURIER rapide " T.F.R "	
3.5	Conclusion	49

DEUXIEME PARTIE

<u>CHAPITRE 4</u>	<u>Stabilité hydraulique de la carapace des</u> <u>digués à talus</u>	
4.1	Introduction	51
4.2	Recherches antérieures.	52
4.3	Conclusion	53
<u>CHAPITRE 5</u>	<u>Essais sur modèle réduit an canal à houle</u>	
5.1	Introduction à la similitude mécanique	61
5.2	Condition de similitude hydraulique	61
5.3	Dispositif expérimental, équipement utilisé	
5.3.1	Canal à houle	63
5.3.2	Houles générés	
5.3.3	Disposition des sondes de mesures	
5.4	Réalisation du modèle	67
5.4.1	Echelle du modèle	
5.4.2	Configuration du fond	
5.4.3	Choix des matériaux	
5.4.4	Détermination des épaisseurs des couches et du nombre de blocs	
5.4.5	Description des profils	
5.5	Essais effectués	75
5.5.1	Programme d'essai	
5.5.2	Condition d'essai	
5.5.3	Critères d'estimation des dégâts	
5.5.4	Résultats d'essai	
5.6	Analyse des résultats	89
5.6.1	Influence des paramètres dynamiques et géométriques	
5.6.2	Influence de la hauteur	
5.6.3	Influence de la période	
5.6.4	Influence de la pente	
5.6.5	Influence de la taille des blocs	
5.7	Variation des valeurs du coefficient K_d	94
5.8	Conclusion	101

<u>CHAPITRE 6</u>	<u>Conclusion générale</u>	102
<u>CHAPITRE 7</u>	<u>Perspectives de recherches futures</u>	104
<u>CHAPITRE 8</u>	<u>Bibliographie</u>	105
<u>ANNEXE 1</u>	<u>Exemple du traitement statistique de la houle</u>	108
<u>ANNEXE 2</u>	<u>Programmes informatique</u>	
2.1	Etude statistique de la houle	112
2.2	Etude spectrale par la fonction d'autocorrélation	122
2.3	Etude spectrale par la transformée de FOURIER rapide	128

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT D' HYDRAULIQUE

Thèse de magister

* ANALYSE DU REGIME DE HOULE *
* SUR LE LITTORAL ALGERIEN *
* ETUDE EXPERIMENTALE *
* DES DIGUES A TALUS *

Etudiée par : Douadi RAHMANI ; M . A . S
Directeur de thèse : Georgy FARKAS ; E.N.P ALGER
Co-directeur de thèse : Pascal GALICHON ; E.N.T.P.E LYON

المقدمة

في هذه الدراسة اهتمينا بالدرجة الأولى بايجاد مختلف عوامل الأمواج على سواحل الجزائر، ثم ابعاد الدرع و استقرار السد . الجزء الأول يتمثل في تحليل تسجيلات الامواج، وقد تم تحقيقه بانجاز عدة برامج تسمح لنا بايجاد توزيع ارتفاع الأمواج ورسم طيف أما الجزء الثاني يتمثل في دراسة تأثير احجام القطع وزاوية الميل و ارتفاع و دور الامواج على استقرار درع السد . وهذه الدراسة سمحت لنا من جهة بمساهمة لسعرفة نظام الامواج على سواحل الجزائر و من جهة اخرى بايجاد ابعاد قطع لحمائية السدود المنحدرة .

RESUME

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés en premier lieu à la détermination des caractéristiques de houle sur le littoral Algérien, puis au dimensionnement des carapaces et à la stabilité des talus. La première partie consiste donc à analyser les enregistrements de houle. Elle a été réalisée en développant plusieurs programmes, permettant la détermination de la distribution des hauteurs des vagues et du spectre de la houle. La deuxième partie consiste à étudier l'influence des paramètres géométriques (telles que la taille des blocs et la pente du talus), et dynamiques (telles que la hauteur et la période des vagues) sur la stabilité des carapaces. Cette étude a permis de contribuer d'une part à la connaissance du régime de houle sur le littoral Algérien et d'autre part au prédimensionnement rapide et réaliste des carapaces à digues dont les talus sont en blocs cubiques rainurés.

ABSTRACT

In this study two aspects, presented in two parts, one related to the determination of the characteristics of the swell of the sea along the Algerian coast, and the other related to the design of carapaces and the stability of the talus. In the first part the records of the swell have been analysed through the development of different programs, to yield the different parameters of the swell and the distribution of the wave heights and the spectrum of the swell. In the second part the influence of the geometric parameters, such as the size of the blocks and the slope of the talus, and the dynamics of the swell, such as the wave heights and their periodicity, on the stability of the carapaces. This study has contributed on the one hand to a better understanding of the swell along the Algerian coast, and on the other towards quick and optimal design of cubic carapace blocks.

NOTATIONS

t	: [s]	Temps
p, p^*	: [Pa]	Pression
V	: [m/s]	Vitesse d'une particule ; u, v, w ses composantes
x, y, z		Axes d'un repère cartésien orthonormé
D	: [m]	Profondeur du fond
L	: [m], T : [s]	Longueur d'onde et période des vagues
T_p, T_P	: [s]	Période de pointe
H	: [m]	Hauteur des vagues
H_{max}	: [m]	Hauteur maximale des vagues
$H_{1/10}$: [m]	Moyenne du dixième supérieur des vagues
$H_{1/3}$: [m]	Moyenne du tiers supérieur des vagues
H_{moy}	: [m]	Hauteur moyenne des vagues
$T_{Hmax}; T_{H1/10}; T_{H1/3}; T_{moy}$: [s]	Périodes correspondantes
$H_s ; H_S$: [m]	Hauteur significative de la houle
m_0, M_0	:	Moment d'ordre zéro
$M^2; M^4$:	Moments d'ordre 2 et 4
f	: [hz]	Fréquence
$f_p ; F_P$: [hz]	Fréquence de pointe
ω	:	pulsation
α_0	: [rd]	Phase à l'instant initial
R	:	Fonction l'autocorrélation
S	: [m^2s]	Densité spectrale d'énergie
ϵ, ϵ_{PS}	:	Largeur du spectre
W	: [N]	Poids unitaire des blocs de carapace
α	: [rd]	Angle de talus
Γ_s	: [N/m^3]	Poids volumique des blocs
Γ_w	: [N/m^3]	Poids volumique de l'eau de mer
δ	:	Densité des blocs
N_s	:	Nombre de blocs par unité de surface
K_d, K, K_s, K_1		Coefficients adimensionnels
μ, σ_a, σ_b		Constantes
H_1	: [m]	Amplitude de la houle au déferlement
D_n	: [m]	Diamètre nominale des blocs
$H_s / \delta D_n$	[adimensionnel]	Nombre de stabilité
Ψ	[adimensionnel]	Nombre d'Irribarren

1 OPPORTUNITE DE L'ETUDE

L'évolution du trafic maritime en Algérie connaît actuellement un développement des infrastructures portuaires par la construction de nouveaux ports (JENJEN,...) et l'extension des ports existant (BEJAIA...),. Ceci nécessite donc une meilleure connaissance du régime des houles en vue d'optimiser les ouvrages de protection extérieure qui doivent résister aux différentes tempêtes.

La détermination du régime de l'état de la mer consiste à avoir un ensemble de mesures étalées sur la plus longue période possible, pour en déduire par une analyse statistique les différents paramètres de la houle. Dans ce but, l'Office National de Signalisation Maritime a mis en place un programme d'acquisition et de pose de houlographes sur le littoral Algérien .

Dans cette étude, nous exposons une méthode d'analyse des enregistrements ainsi que les résultats obtenus pour les sites de SKIK-DA et d'ARZEW . Ce qui nous a permis de connaître le régime des houles au cours du temps et l'évolution des tempêtes .

La protection des ports contre les houles est assurée par des digues ou des brises-lames qui jouent le rôle de filtres vis-à-vis de la houle . L'énergie générée est dissipée au niveau de la carapace, dont le prédimensionnement des blocs se fait à l'aide de l'une des nombreuses formules proposées [3],[7],[8],[12],[14],[16], dont la plus utilisée est celle d'HUDSON [14] . Le dimensionnement définitif se fait actuellement par approches successives en utilisant de nombreux modèles réduits.

La détermination de la houle de projet est très importante car le poids des blocs à utiliser doit être proportionnel au cube de l'amplitude des vagues.

La formulation de l'action de la houle sur les blocs naturels ou artificiels d'un talus, est très difficile à mettre en équation car la stabilité de celui-ci dépend de l'imbrication et de la forme des blocs et du déferlement des vagues.

L'étude de la stabilité des carapaces est l'objet de la deuxième partie de ce travail . Elle a été réalisée au Laboratoire des Etudes Maritimes, qui porte un intérêt particulier aux carapaces en blocs cubiques rainurés, suite à des nécessités d'ordre technique et économiques. Dans cette partie nous nous limiterons à l'étude de l'influence de paramètres géométriques (la pente du talus et la taille des blocs) et dynamiques (la hauteur et la période de la houle).

2 HYPOTHESES ET EQUATIONS

L'agitation peut être représentée par la côte $Z(t)$ de la surface libre par rapport au niveau moyen instantané. Cette fonction peut être considéré e comme la somme d'un grand nombre de variables aléatoires indépendantes variant sinusoidalement avec le temps soit :

$$Z(t) = \sum a_n \cos(\omega_n t + \alpha_n) \quad (1)$$

C'est la décomposition de la houle réelle en un grand nombre d'ondes monochromatiques indépendantes .

2.1 LOI DE REPARTITION DES HAUTEURS DES VAGUES

La détermination des vagues individuelles se fait par l'analyse dite " Zero Up Crossing " c'est à dire les passages successifs par le niveau moyen du plan d'eau par valeurs croissantes. Chaque vague est caractérisée par sa hauteur H et sa période T . Les hauteurs des vagues suivent généralement la loi de RAYLEIGH [1], ce qui signifie que la probabilité d'occurrence d'une hauteur quelconque H dans l'intervalle $[H, H+dH]$ est égale:

$$F(H) = H/4m_0 \exp (- H^2/8m_0) \quad (2)$$

En conséquence , la probabilité qu'une vague dépasse une hauteur donnée H_0 correspond à l'expression :

$$P(H \geq H_0) = \exp (- H_0^2 / 8m_0) \quad (3)$$

Il est possible d'établir des relations théoriques entre les différentes hauteurs caractéristiques de la tempête [1] . En général, $H_{1/n}$ est la hauteur pour laquelle :

$$P(H \geq H_0) = 1/n \quad \text{d'où} \quad H_{1/n} = \frac{\int_{H_0}^{\infty} H P(H) dH}{1/n} \quad (4)$$

2.2 ANALYSE SPECTRALE DE LA HOULE

2.2.1 Approche par la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation

Pour définir le spectre d'énergie d'un enregistrement de houle c'est à dire la courbe de répartition d'énergie en fonction de la fréquence , on utilise la fonction d'autocorrélation $\{R(t, \tau)\}$ de la côte de la surface libre . Celle-ci décrit la dépendance de la variation de la fonction $Z(t)$ et $Z(t + \tau)$.

$$R(t, \tau) = Z(t) \cdot Z(t + \tau) \quad (5)$$

La densité spectrale d'énergie $S(f)$ d'un processus aléatoire est définie comme étant la transformée de Fourier de $R(\tau)$:

$$S(f) = \int_{-m}^{+m} R(\tau) \exp(-2i\pi f\tau) d\tau \quad (6)$$

$$S(f) = \int_{-m}^{+m} R(\tau) \cos(2\pi f\tau) d\tau - i \int_{-m}^{+m} R(\tau) \sin(2\pi f\tau) d\tau$$

Comme le processus est pair alors $R(\tau) = R(-\tau)$

$$\text{d'où} \quad S(f) = 2 \int_0^{+m} R(\tau) \cos(2\pi f\tau) d\tau \quad (7)$$

Pour déterminer $R(\tau)$, il suffit à partir d'un enregistrement de houle, de discrétiser $Z(t)$ par une suite Z_i de N valeurs également espacées d'un pas δt dans le temps.

La fonction d'autocorrélation est estimée par la relation :

$$R(\tau = p\delta t) = 1/(N-p) \sum_{q=1}^{q=N-p} Z_q \cdot Z_{p+q} \quad (8)$$

Pour que l'estimation de la fonction d'autocorrélation soit correcte, il faut que le pas d'échantillonnage satisfasse le théorème de SHANNON [1] qui s'annonce comme suit :

Un signal continu du spectre borné dans l'intervalle $[-B, +B]$ est complètement déterminé par les valeurs qu'il prend à des instants régulièrement espacés de $1/2B$ secondes.

C'est à dire que la fréquence d'échantillonnage (f_e) doit être supérieure ou égale à la plus haute fréquence (f_{max}) contenue dans ce spectre : $f_e \geq 2 f_{max}$ d'où $\delta t \leq 1/2 f_{max}$ (9)

avec f_{max} fréquence de NYQUIST [1], qui est la fréquence maximale contenue dans le spectre.

L'expression de la densité spectrale d'énergie après discrétisation devient :

$$S(f) = 2\delta t \sum_{p=0}^k R(\tau) \cos(2\pi f \delta t) \quad (10)$$

* Les différents moments statistiques du spectre sont :

$$\# m_n' = \int_0^{\infty} f^n \cdot S(f) df \quad [11] \text{ moment d'ordre } n$$

De ces différents moments du spectre on en déduit :

$$* \text{ La hauteur significative : } H_s = 4 [m_0]^{0.5} \quad (12)$$

$$* \text{ La période moyenne du spectre : } T_m = [m_0 / m_1]^{0.5} \quad (13)$$

$$* \text{ La largeur du spectre : } \epsilon = [1 - m_1^2 / m_0 m_2]^{0.5} \quad (14)$$

2.2.2 - Spectres théoriques

L'approche des dépouillements de mesures de houle par l'analyse spectrale a pris naissance après 1950. Les formes des spectres les plus rencontrées sont peu nombreuses. Différents "spectre types" paramétrés par des variables océano-météorologiques ont été proposés. Les spectres les plus couramment utilisés sont :

a) Spectre de PIERSON-MOSKOWITZ (1964)

Ce spectre a été proposé par PIERSON et MOSKOWITZ [1] en 1964 lors de l'analyse d'un certain nombre d'enregistrements réalisés en Atlantique du Nord. Son expression est la suivante :

$$S_{pm}(f) = A f^{-5} \exp \left[- \frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-4} \right] \quad (15)$$

$$\text{où } A = 0.315 H_s^2 f_p^4$$

b) Spectre de JONSWAP (1969)

Ce spectre a été proposé suite à l'analyse d'un grand nombre de mesures de houle effectuées en mer du Nord dans le cadre d'un projet d'étude intitulé : " Joint North Sea Ways Project " (JONSWAP) [1] mené en 1969 par différents pays d'Europe du Nord.

Il dépend de trois paramètres caractérisant la forme du spectre : τ , σ_a , σ_b . Son expression est la suivante :

$$S_j(f) = A f^{-5} \exp \left[- \frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-4} \right] \tau \exp \left[- \frac{(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2} \right] \quad (16)$$

avec τ : facteur d'amplification du pic

$$\sigma = \sigma_a \quad \text{pour } f < f_p$$

$$\sigma = \sigma_b \quad \text{pour } f > f_p$$

En première approximation les valeurs des paramètres (τ , σ_a , σ_b) sont fixées par K.HASSELMAN (1973) à: $\tau = 3,3$; $\sigma_a = 0,07$; $\sigma_b = 0,09$

2.3 STABILITE DES CARAPACES

Les formules de stabilité sont fondées sur l'hypothèse que la lame d'eau attaque le talus frontalement, et en se déferlant elle produit un jet perpendiculaire à la pente .

La formule la plus usuelle est celle proposée par HUDSON [14], qui est basée sur les résultats de très nombreux essais effectués au laboratoire du " Coastal Engineering Research Centre " à Vicksburg (Etats-unis). Elle exprime le poids du bloc W en fonction de la hauteur des vagues H , l'angles du talus α , du poids volumiques des blocs γ_b et du coefficients adimensionnels Kd .

$$W = \frac{\text{tg}\alpha}{Kd} * \frac{H^3 \cdot \gamma_b}{(\delta-1)^3} \quad (17)$$

3 REALISATION DE L'ETUDE EXPERIMENTALE

3.1 REGIME DE HOULE

Les enregistrements de houle ont été effectués à l'aide de houlographes type "DATAWELL".

Le dépouillement des rouleaux a été fait par un digitaliseur et les enregistrements ont été exploités à l'aide des programmes que nous avons élaborés.

Le programme permet de :

- * Calculer la hauteur et la période de chaque vague.
- * Trier ces hauteurs et ces périodes par valeurs décroissantes.
- * Calculer les paramètres de la houle liés à la hauteur Hmax , H1/10 , H1/3 , Hmoy et les périodes correspondantes.
- * Calculer les paramètres de la houle liés à la période Tmax , T1/10 , T1/3 , Tmoy et les hauteurs correspondantes.
- * Calculer les rapports entre ces paramètres.
- * Déterminer la distribution des hauteurs.
- * Ajuster cette distribution aux lois théoriques de RAYLEIGH et de GAUSS.

Les programmes d'analyse spectrale de la houle ont été établis afin de tracer les différents spectres et de déterminer ces paramètres. Le premier programme utilise la fonction d'autocorrélation et permet de tracer le spectre et de le lisser en utilisant les fenêtres de troncature de "HANNING" [10]. Il donne les paramètres caractéristiques de ce spectre à savoir :

- * La densité spectrale maximale D_{Smax}
- * La fréquence et la période de pointe
- * Les différents moments, la largeur du spectre
- * La hauteur significative

Afin de situer le spectre réel par rapport aux spectres théoriques, le programme intercale 2 spectres théoriques du type JONSWAP et PIERSON-MOSKOWITZ .

Le deuxième programme fait la même chose que le premier , mais pour tracer le spectre il utilise la T.F.R .

La sélection des tempêtes se fait d'après l'évolution de la hauteur maximale de la houle durant la période d'observation .

3.2 STABILITE DES CARAPACES VIS A VIS DES FORCES HYDRODYNAMIQUES

3.2.1 Description du modèle

L'étude de la stabilité des carapaces nécessite des essais sur modèle réduit en canal à houle , ils sont réalisés au niveau du laboratoire du L.E.M .

Les modèles des profils étudiés ont été construits dans un canal à houle de 39 mètres de longueur ; 1,10 mètres de profondeur et 0,6 mètre de largeur . Il est équipé à l'une de ses extrémités d'un générateur de houle et à l'autre d'un amortisseur d'énergie .

La houle irrégulière est générée au moyen d'un batteur plan réglable, suivant un programme prédéfini. Ce dernier utilise une bande perforée d'enregistrements de houle, effectués en nature sur la côte entre Issers et Cap-Djinet. Le réglage de la vitesse de lecture de la bande et l'amplification du signal a permis de produire les périodes et les hauteurs de houle désirées .

Parmi les forces intervenant dans une étude de stabilité des blocs des carapaces, les forces d'inertie et de pesanteur sont prédominantes par rapport aux forces de viscosité. Il en résulte que la loi de similitude de FROUDE est applicable, pour convertir les conditions du modèle vers le prototype.

L'échelle géométrique du modèle a été fixée à $e = 1/50$

3.2.2 Programme d'essai

Les essais sont exécutés avec une attaque frontale des houles . L'étude se rapporte à la stabilité des profils constitués de carapaces en blocs cubiques rainurés de poids correspondant respectivement à 60 ; 33 ; 25 ; 17 ; 15 (tonnes) pour chacune des valeurs de pente suivantes : $4/3$; $3/2$; $2/1$.

Vu les résultats obtenus avec les blocs de 60 et 33 t sur le talus de plus raide pente, ils n'ont pas été testés avec les pentes plus douces qui sont de $3/2$ et $2/1$.

Ainsi 11 profils au total ont été testés .

3.2.3 Conditions d'essais

Lors des essais, l'amplitude significative des houles a été augmentée par paliers progressifs à partir d'une valeur relativement petite et équivalente à 2 à 3 m pour laquelle il n'y a eu aucun dégâts, jusqu'à la valeur maximale réalisable qui varie de 10 à 13m.

A chaque palier, la durée du test est de 10 minutes ce qui correspond à environ 1 heure et 10 minutes à l'échelle réelle.

Après chaque étape les dégâts furent enregistrés sur photographie et par description . Les dégâts n'ont pas été réparés en fin de chaque étape , on a donc enregistré des dégâts cummulés .

Chaque essai contient environ 8 paliers , ce qui simule pour chaque profil testé une tempête d'une durée équivalente à 9 heures et 30 minutes en temps réel .

Les dégâts ont été estimés en fonction du pourcentage des blocs déplacés .

Les franchissements sont estimés visuellement .

Plusieurs autres phénomènes ont été observés et estimés à savoir

- * Les oscillations
- * La tenue de la butée et les déferlement
- * La stabilité du talus arrière et du couronnement

4 RESULTATS DE L'ETUDE

4.1 REGIME DE LA HOULE

4.1.1 Analyse statistique

L'analyse statistique des enregistrements nous montre que les paramètres caractéristiques de la hauteur de houle sont très corrélés entres-eux . Le coefficient de corrélation entre les différentes variables est compris entre 0,891 à 0,987 pour le site de SKIKDA et entre 0,922 et 0,968 pour le site d'ARZEW .Le calcul de régression linéaire a donné les résultats suivants (fig.1.1 à 1.4)

$$\text{Sur SKIKDA } H_{\max} = 1,336 H_{1/3} + 0,079 \quad (18)$$

$$H_{1/10} = 1,786 H_{\text{moy}} - 0,019 \quad (19)$$

$$H_{1/10} = 1,210 H_{1/3} + 0,022 \quad (20)$$

$$H_{1/3} = 1,495 H_{\text{moy}} - 0,043 \quad (21)$$

$$\text{Sur Arzew } H_{\max} = 1,396 H_{1/3} + 0,205 \quad (22)$$

$$H_{1/10} = 1,962 H_{\text{moy}} + 0,010 \quad (23)$$

$$H_{1/10} = 1,555 H_{1/3} - 0,418 \quad (24)$$

$$H_{1/3} = 1,607 H_{\text{moy}} - 0,063 \quad (25)$$

L'analyse des valeurs des hauteurs significatives obtenues par les 4 méthodes différentes nous a permis de constater que celle de TUCKEY-DRAPER [1] donne des valeurs de 19,5 % au dessus de la valeur moyenne, par contre, les autres méthodes donnent des valeurs au dessous de la moyenne :

- * 8,0 % pour la méthode directe
- * 3,0 % par la TFR (transformée de FOURIER rapide)
- * 0,5 % pour la méthode des 2 plus grandes vagues .

La méthode des moindres carrés nous a permis de constater que la distribution des hauteurs suit la loi de RAYLEIGH (1919)

4.1.2 Analyse spectrale

L'allure des spectres montre que la densité spectrale décroît lentement pour les hautes fréquences et augmente rapidement pour les basses fréquences .

Si les tempêtes deviennent plus fortes le maximum d'énergie dans le spectre se situe vers les basses fréquences .

Certains spectres présentent de doubles pics, ce qui correspond probablement à la superposition d'une tempête principale et d'une houle formée par des vents locaux .

Les spectres tracés présentent des pics assez grands, cela signifie que nous avons des groupements de vagues , c'est à dire une concentration d'énergie .

L'allure des spectres obtenus montre qu'ils s'approchent beaucoup plus du type JONSWAP que celui de PIERSON-MOSKOWITZ (Fig 3) c'est à dire que les spectres de la mer méditerranée, qui est une mer presque fermée ressemblent aux spectres de la mer du Nord, qui est une mer fermée.

4.2 ETUDE DE STABILITE

4.2.1 Influence des paramètres principaux (Fig 4.1, 4.2, 4.3, 5.1)

On remarque que le nombre de stabilité $H_s/8D_n$ [16], décroît en fonction du nombre d'IRRIBARREN $\Psi = \text{tg } \alpha / ([2 \pi H_s/g T_m^2])^*$ [16].

Pour la pente 4/3, $H_s/8D_n$ décroît de 4 à 1 pour Ψ variant de 3.5 à 4.5 . Cette plage de Ψ est moins étendue pour la pente 2/1, elle s'étale de 2.4 à 3.0 pour $H_s/8D_n$ variant de 5 à 1 .

Pour la pente 3/2 on remarque que le nombre de stabilité décroît puis croit en passant par un minimum correspondant à $H_s/8D_n = 1,4$ pour $\Psi = 3,95$.

Cet extremum correspond à l'égalité de la période propre de la carapace et de la période des vagues .

4.2.2 Influence de la hauteur de la houle

Le taux de dommages croît avec la hauteur significative de la houle, il s'aggrave d'une manière considérable à partir d'un certain seuil qui est de l'ordre de 10 m .

4.2.3 Influence de la période de la houle

- * Pour les périodes inférieures à 9 s, le taux de dommages est nul
- * Pour les périodes comprises entre 9 et 11 s , les dégâts sont acceptables .
- * Pour les périodes supérieures à 12 s , les dégâts s'aggravent .

4.2.4 Influence de la pente

La pente 3/2 est plus stable que la pente 2/1 , qui est pourtant plus douce et cela pourrait s'expliquer par les valeurs du coefficient d'imbrication des blocs entre-eux.

Celui-ci est plus fort pour les pentes les plus raides .

4.2.5 Influence de la taille des blocs

- * La stabilité est meilleure pour les blocs de plus grande taille.
- * Pour les blocs de 60 t, le taux de dégâts est nul.
- * Pour les blocs de 25 t, les dégâts restent acceptables pour les hauteurs significatives atteignant 12 m environ .
- * Les blocs de 17 t ,les dégâts sont nuls jusqu'aux valeurs des hauteurs significatives suivantes : 8,5 ; 6,5 ; 5,5 m respectivement pour les valeurs de la pente égale à 2/1 ; 3/2 ; 4/3, et s'aggravent rapidement et deviennent inacceptables à partir des valeurs de Hs égales à 11,0 ; 10,0 ; 7,5 m.
- * Enfin pour les blocs de 15 t , les dégâts sont acceptables jusqu'aux valeurs de Hs de l'ordre de 7,5 m .

4.2.6 Variation des valeurs du coefficient de dimensionnement K_d (fig.5)

La valeur de K_d obtenue par MM. HUDSON et JACKSON [13], sur la base des résultats des nombreux essais qui ont été conduits au C.E.R.C , est égale à 8 pour les blocs cubiques rainurés avec lames non déferlantes et avec un taux de dommages compris entre 0 et 5 % .

Les valeurs du coefficient adimensionnel K_d que nous obtenons pour un taux de dommages acceptable , c'est à dire compris entre 1 et 2 % sont supérieurs à 20 .

CORRELATION ENTRE H_{max} ET $H_{1/3}$

COEFFICIENTS KIRDA=0.004 ARZEW=0.003

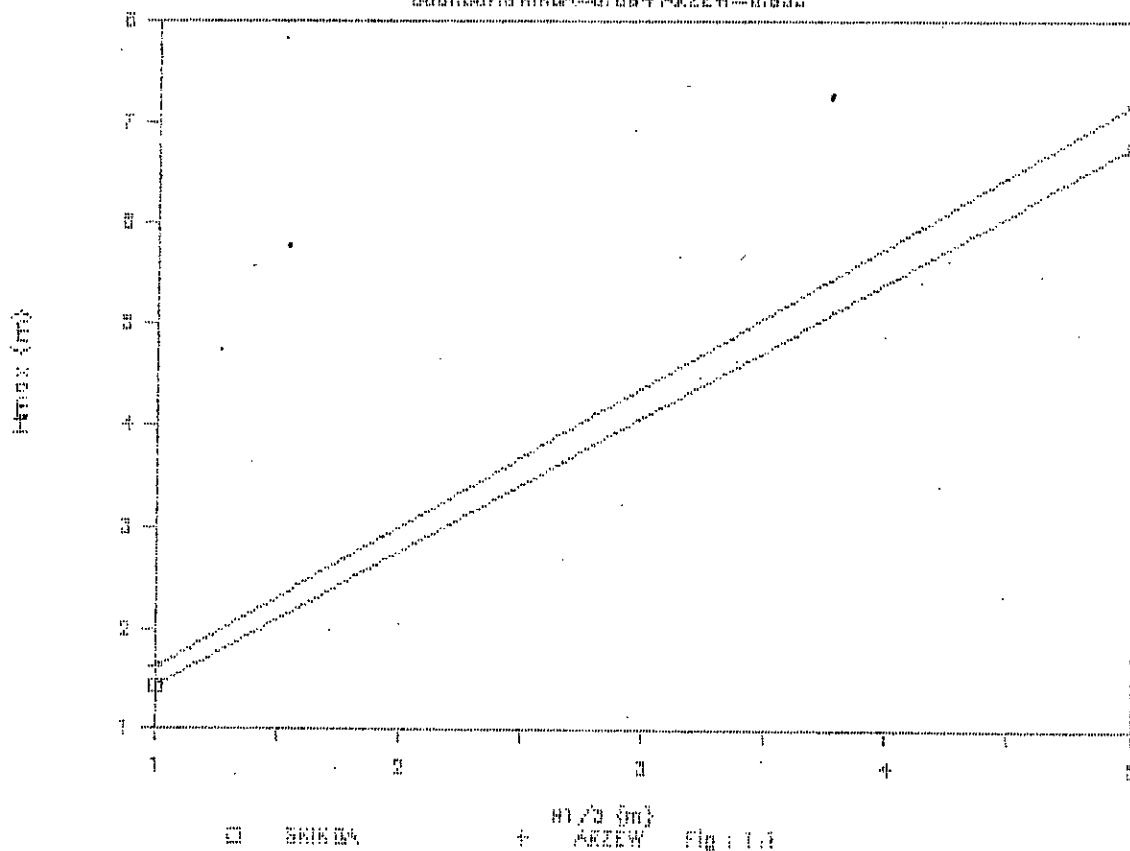


Fig 1.1

CORRELATION ENTRE $H_{1/10}$ ET H_{moy}

COEFFICIENTS KIRDA=0.000 ARZEW=0.004

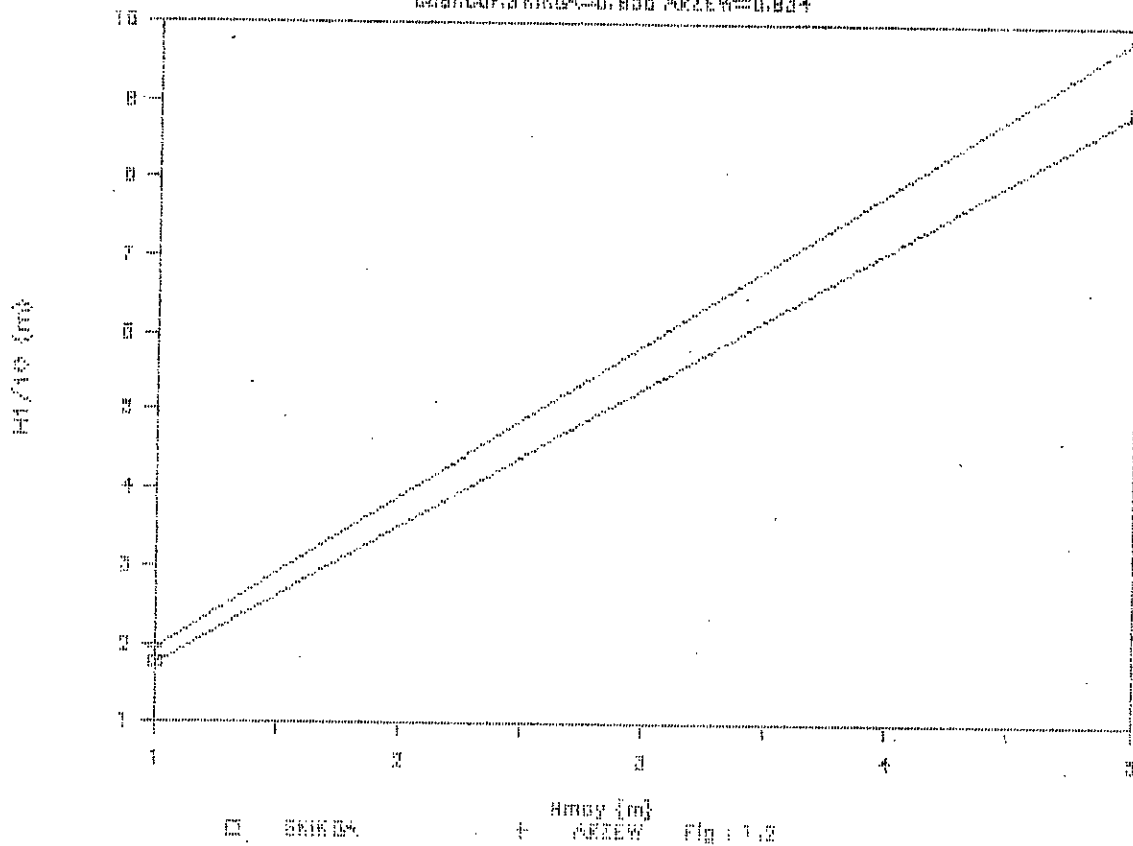
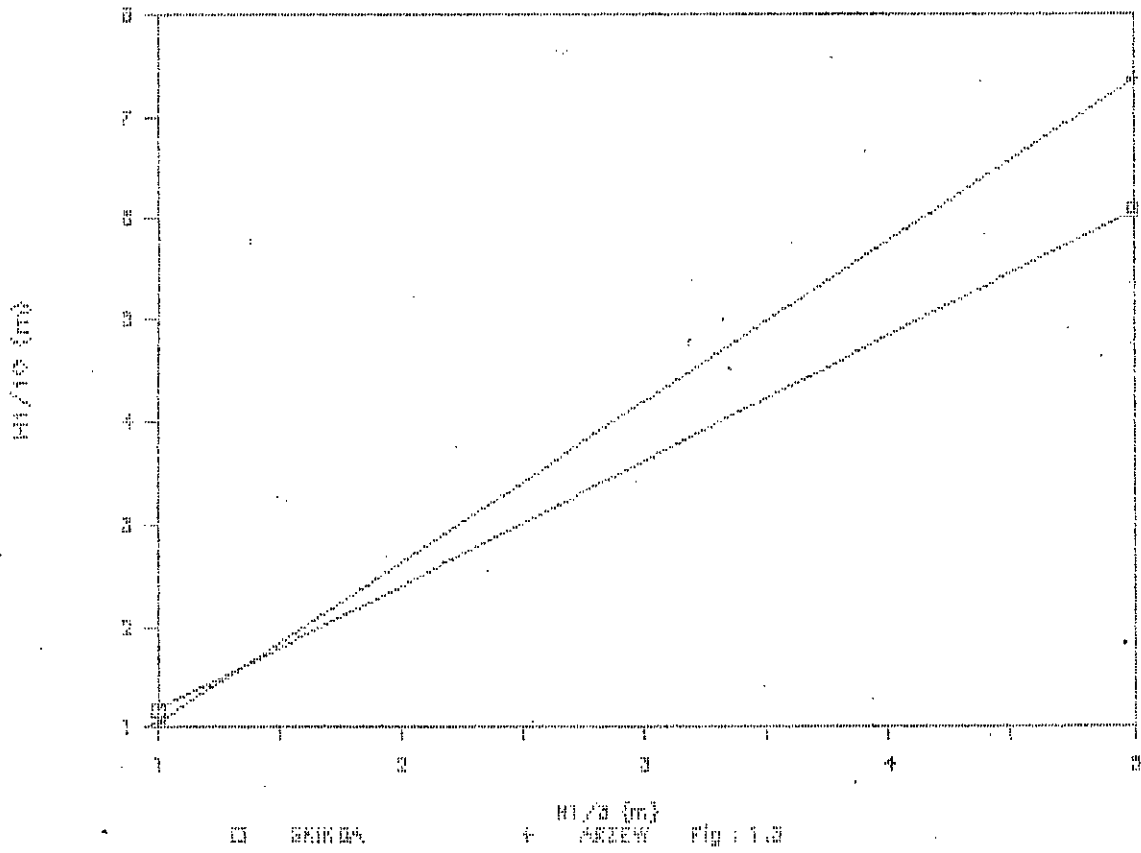


Fig 1.2

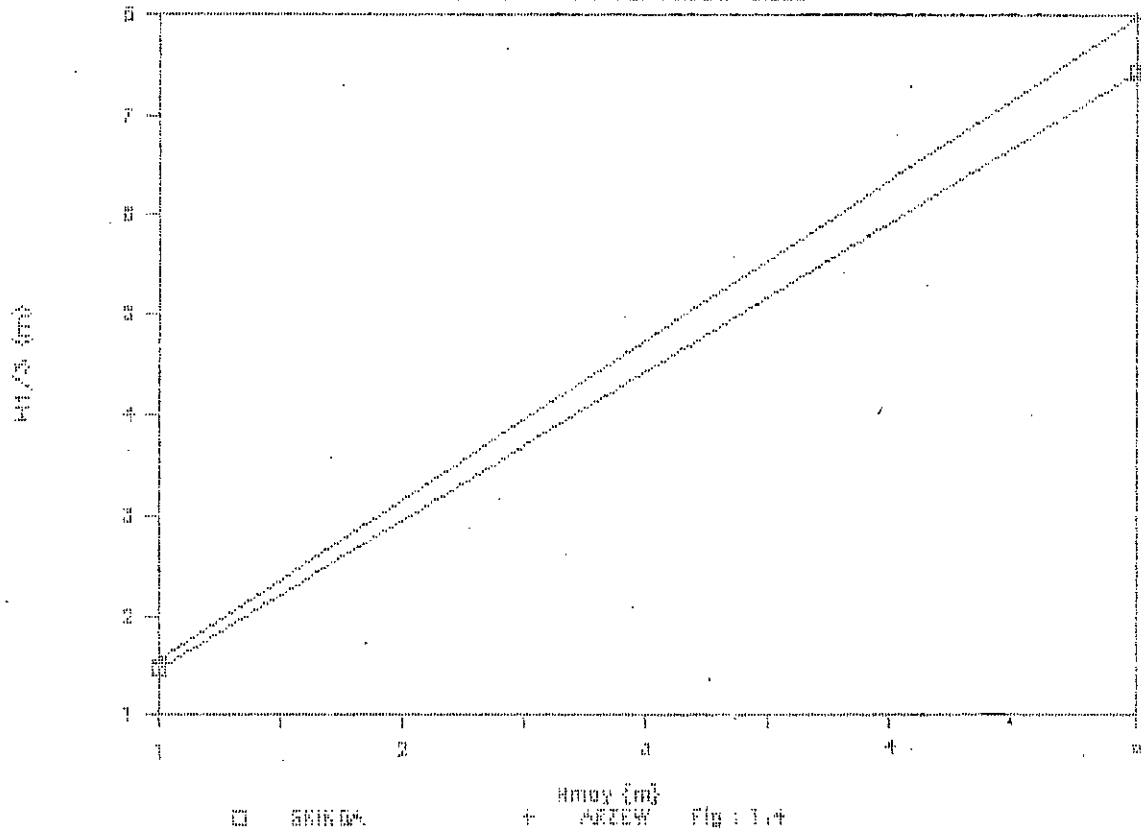
CORRELATION ENTRE H1/10 ET H1/3

Corr.Coeff: RINDA=0.887 ARZEW=0.834



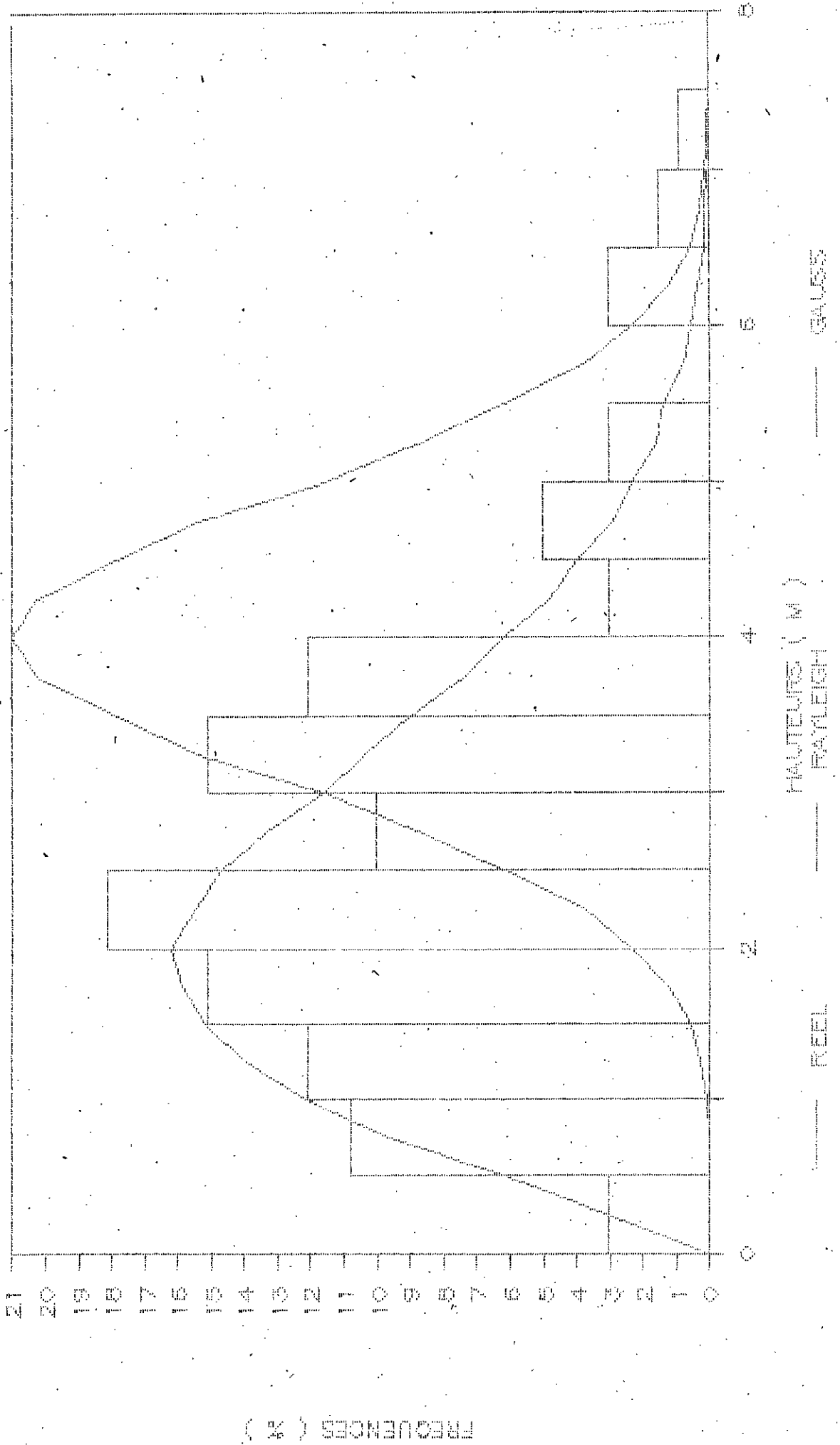
CORRELATION ENTRE H1/3 ET Hmoy

Corr.Coeff: RINDA=0.837 ARZEW=0.838



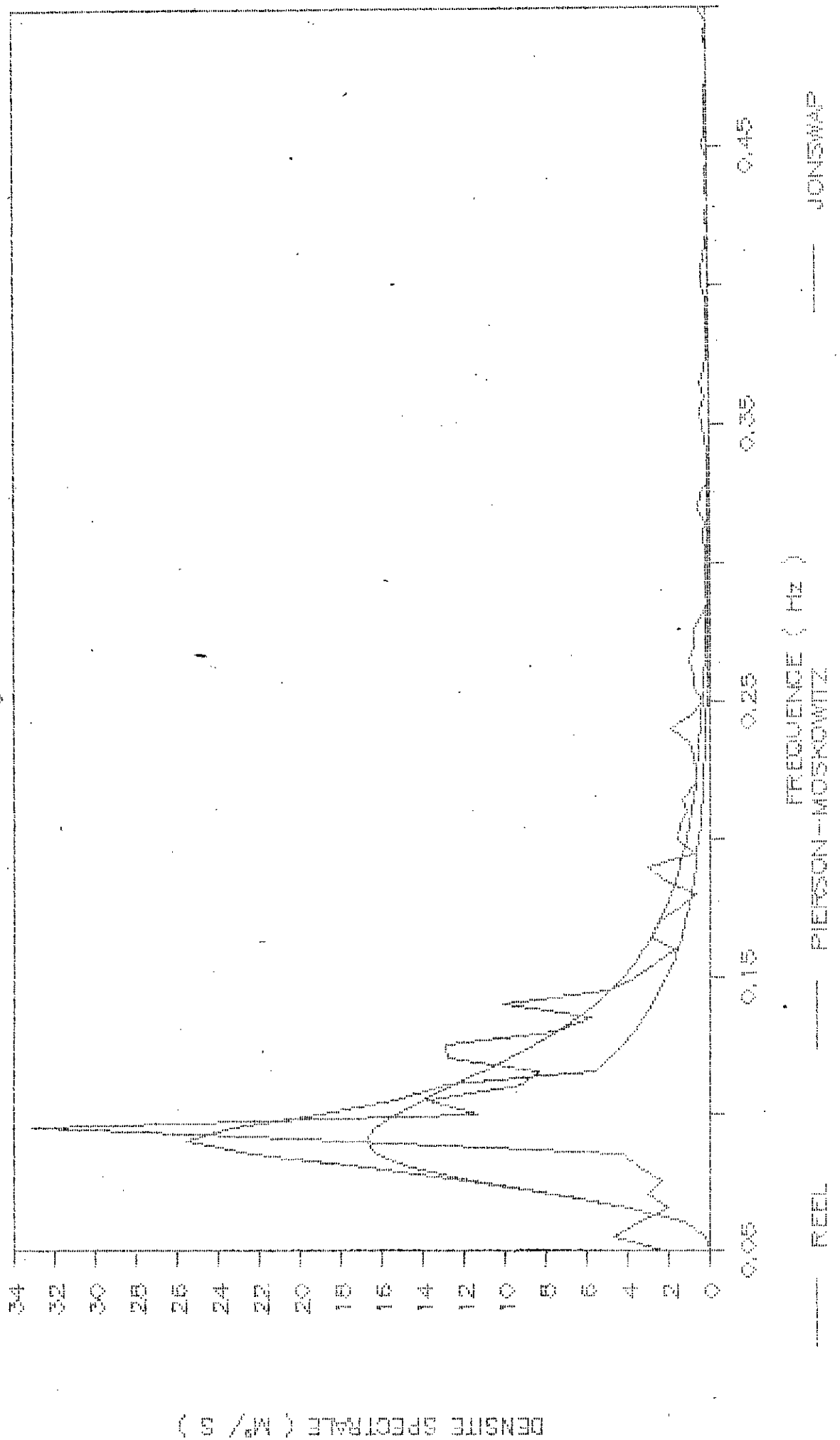
DISTRIBUTION DES HAUTEURS

FIG : 2



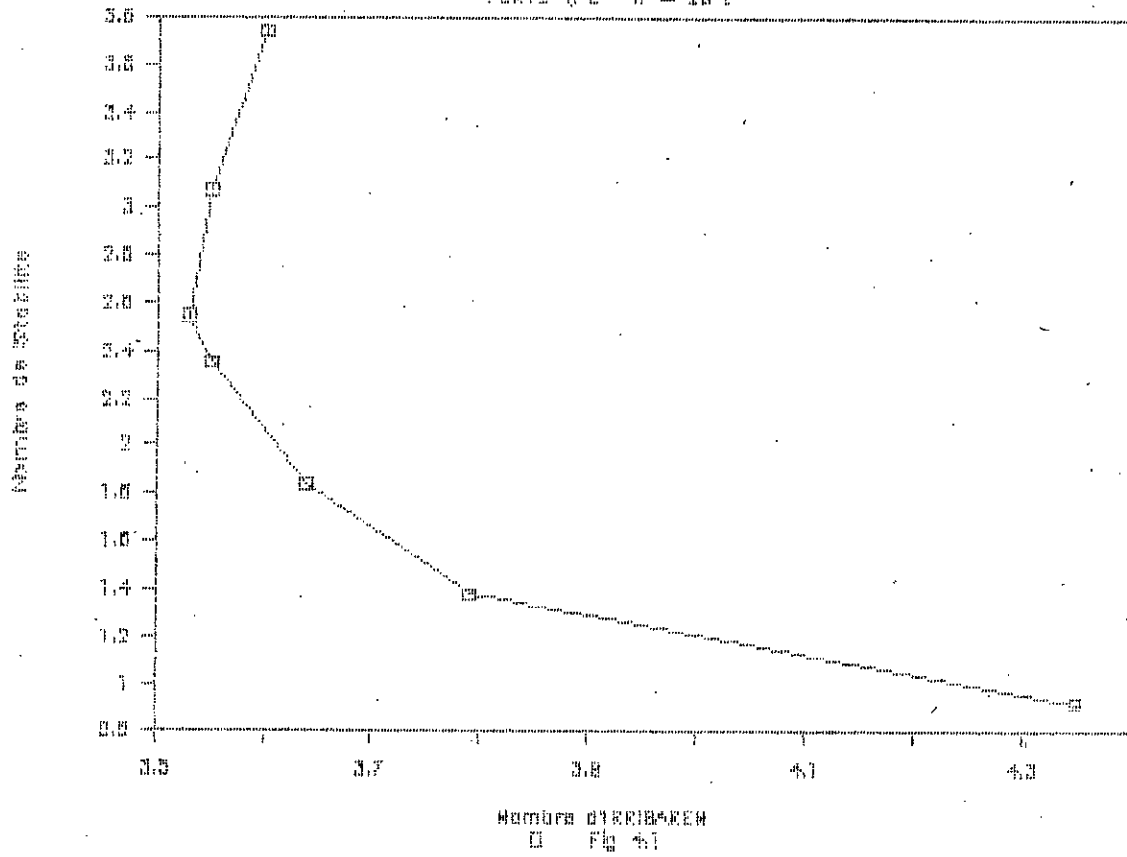
REPARTITION SPECTRALE D'ENERGIE

Fig 13



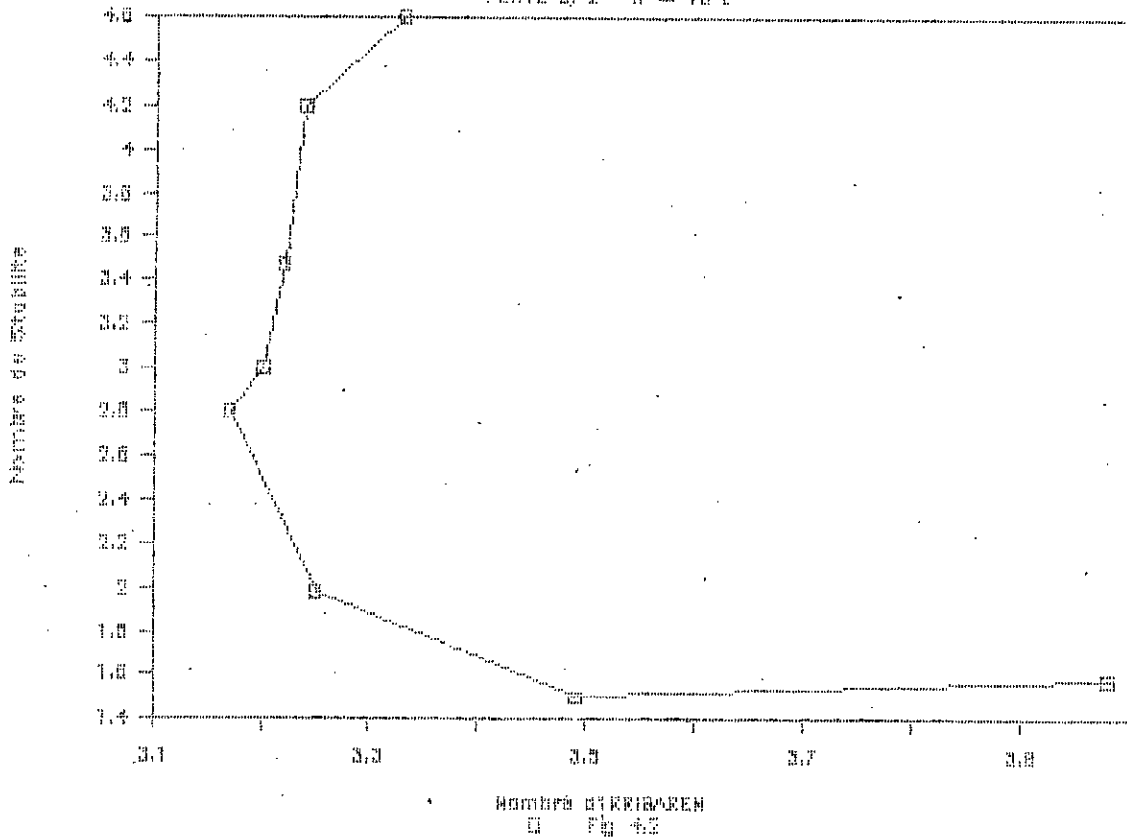
Nbre de stabil en fct Nbre d'ERRIBAREN

PENTE 4/3 W = 20 t



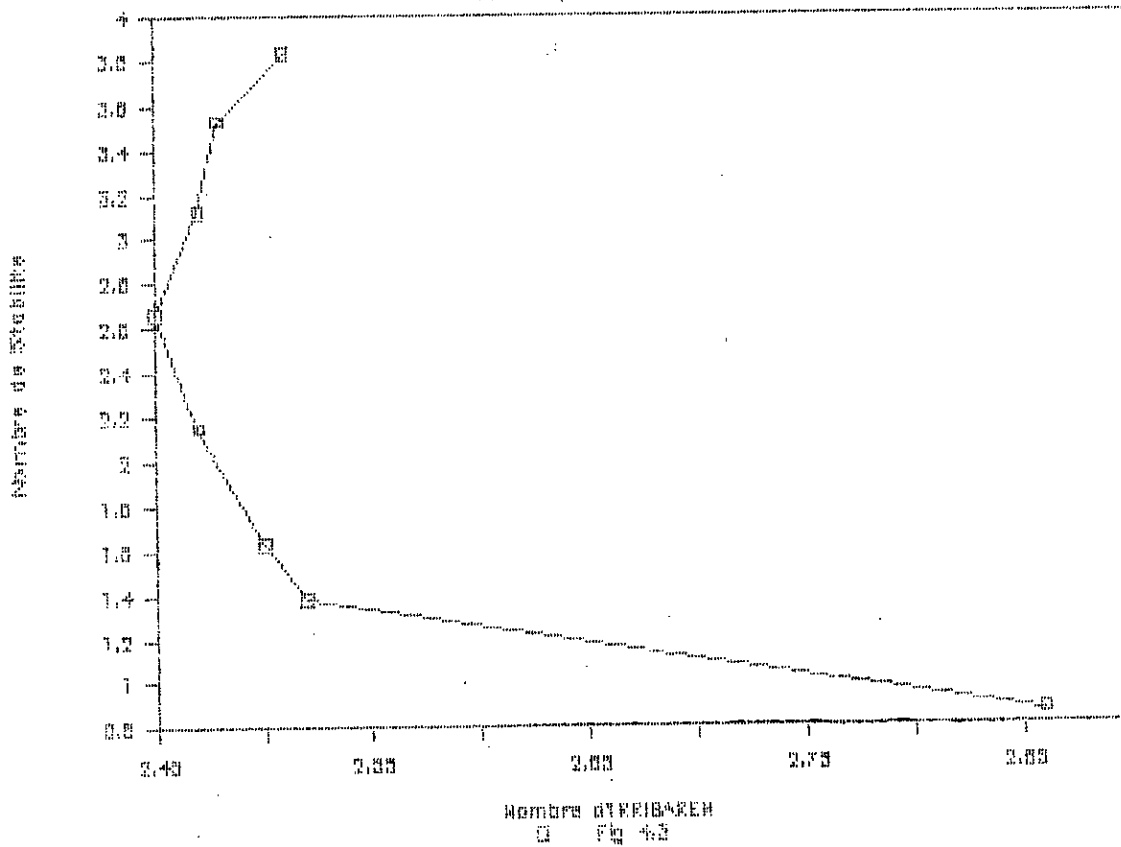
Nbre de stabil en fct Nbre d'ERRIBAREN

PENTE 3/2 W = 10 t



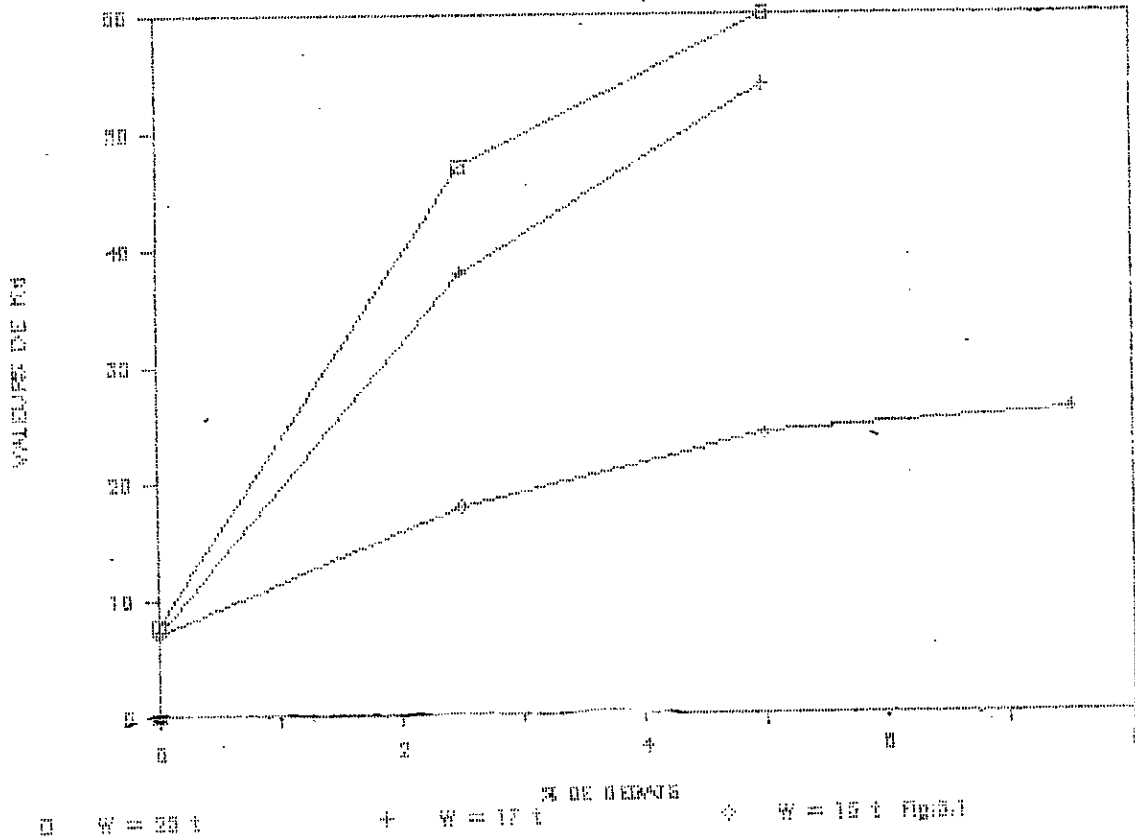
Nbre de stabil en fct Nbre d'IRRIBAREN

PENTE 2/1 W = 20 t



VARIATION DE KA EN FONCTION DU % DE DEGRATS

PENTE = 4/3



5 CONCLUSIONS

La première partie de cette étude a été réalisée en développant plusieurs programmes qui sont actuellement utilisés par le L.E.M . Elle a permis de constater que la distribution des hauteurs des vagues suit la loi de RAYLEIGH , d'établir des relations entre les différents paramètres caractéristiques des vagues et ceci pour deux sites différents : Skikda et Arzew . L'analyse spectrale des enregistrements de houle sur les deux sites nous montre que ces spectres ont une allure se rapprochant du spectre théorique du type JONSWAP .

La deuxième partie de cette thèse nous a permis d'analyser l'influence des paramètres géométriques et dynamiques sur la stabilité des carapaces et d'établir des relations entre ces différents paramètres. Ces relations permettent une approche réaliste du prédimensionnement des carapaces de digues à talus .

On constate que pour une pente égale à $3/2$, la stabilité est assurée, et que pour des périodes inférieures à 9 s le taux de dommage est nul, alors que pour celles supérieures à 13 s les dégâts sont considérables . On a établi des graphes donnant les variations du coefficient adimensionnel K_d en fonction du pourcentage de dégâts pour les différentes valeurs de la pente et de la taille des blocs . Cette étude a permis, d'une part de contribuer à la connaissance du régime de houle sur le littoral algérien et d'autre part à un prédimensionnement optimal des carapaces de digues à talus en blocs cubiques rainurés .

Après une analyse d'une quinzaine de rapports de stabilité, on constate que la formule de prédimensionnement de VAN DER MEER [16] donne de meilleurs résultats que celle d'HUDSON.

Cette étude ouvre une large perspective sur l'avenir qui se résume sur les principaux axes suivants :

- * Connaissance profonde du régime de houle sur le littoral algérien.
- * Formulation théorique des spectres de houles sur les côtes algériennes
- * Comportement dynamique des carapaces sous l'effet des sollicitations cycliques dûes à la houle .

6 BIBLIOGRAPHIE PARTIELLE

- [1] P.ARISTAGHES : " Théories de la houle-Houle réelle-Pro-
pagation de la houle " STCPMVN-Mars-1985
- [2] R.BONNEFILE : " Cours d'hydraulique maritime de
l'ENSTA " Masson-1980
- [3] E.CASTRO : "diques de escollera",Revista de Obras
Publicas, Abril de 1933
- [4] DAUBET-CAHOUE : "Approche numérique de la houle par les
équations de NAVIER-STOKES"
Annales des ponts et chaussées N° 32 & 33 .
- [5] A.GRAILLOT : " Travaux Maritimes " - ENPC - Paris -1985
- [6] G.GRANCINI ; L.IOVENITTI ; G.L.DEFILIPPI ; A.MELILI :
" Analysis of oceanographic problems concerning
submarine pipeline projects : Surveying activity and
computing methodology " - Congress Panamericano De
Ingenieria Del Petroleo - 1978
- [7] R.Y.HUDSON et R.A.JACKSON : "Design of tribar and
tetrapod cover-layers for rubble-mound breakwaters",
W.E.S Miscellaneous Paper 2-296 Vicksburg, 1959
- [8] R.IRIBARREN : "una formula para el calculo de diques de
escolera"Revista de Obras Publicas, 1938
- [9] J.LARRAS : "L'équilibre sous-marin d'un massif de
matériaux soumis à la houle", Le Genie Civil 15/9/1952
- [10] J.LIFERMANN : " Les méthodes rapides de transformation
du signal " - Fourier,Walsh,Hadamard,Haar-Masson
- [11] " Paramètres des états de la mer " : Association
Internationale de Recherches Hydrauliques et du Congés
de Navigation - (A.I.R.H & A.I.P.C.N)
Bulletin N° 52 - Bruxelles - Janvier 1986
- [12] G.G.RYBTCHEVSKY : " Calculation of stability of pro-
tective elements for rubble-mound structures under wave
action" Gidrotechnitchescole Stroitelstvo n° 11 , 1964
- [13] R.SILVESTER : " Coastal Engineering " Elsevier-1974
- [14] Shore protection manual - Volume II - Coastal Enginee-
ring Research Center - Departement of the Army Corps
of Enginneers - 1984
- [15] François-Marc TURPIN : " Quelques problèmes posés par
le traitement statistique des données de la houle en
vue du dimensionnement des structures " Revue technique
du service des phares et balises - N° 67 - 1985
- [16] VAN DER MER : " Deterministic and Probabilistic Design
of Breakwater Armor Layers " - Journal of Waterway ,
Port , Coastal , and Ocean Engineering Janvier 88

CHAPITRE 1

GENERALITES

Le développement des infrastructures portuaires nécessite une connaissance profonde du régime des houles. Ceci permet d'optimiser le dimensionnement des ouvrages de protection extérieur qui doivent résister aux différentes tempêtes.

Depuis le XIX^e siècle la houle théorique a été abondamment étudiée par de nombreux mathématiciens. Ce n'est que pendant la dernière trentennale qu'ont été développées les mesures directes en mer.

La recherche sur la dynamique des vagues a augmenté d'une manière considérable ces dernières années, principalement en raison du développement extraordinaire de l'activité en milieu marin et la croissance du tonnage individuel des navires (550.000 Tonnes de Port en Lourd, 414 m de long, 63 m de largeur, 28,5 m de tirant d'eau pour le "BATILUS") [1].

Des progrès importants ont été déployés pour la réalisation des instruments de mesures et des équipements de laboratoire .

Ils ont permis de développer les techniques de simulation au laboratoire et de bien mener les études sur le terrain, ce qui a apporté une meilleure compréhension de la dynamique des vagues et de l'interaction océan/atmosphère.

L'environnement contrôlé des laboratoires permet de mesurer des paramètres de vagues difficilement détectable en mer.

Vue sa situation géographique et historique l'Algérie accorde un grand intérêt au développement de ses infrastructures côtières. L'objet de ce travail est d'analyser le régime de houle sur le littoral Algérien et l'optimisation du dimensionnement de carapace des digues à talus.

Il est réalisé avec le soutien du L.E.M . Il comporte tout d'abord une première partie portant sur l'analyse des enregistrements de houle sur les sites Algériens. Elle a permis d'une part de définir plus précisément les paramètres caractéristiques des houles et d'autre part de connaître la répartition spectrale de l'énergie de ces houles.

Ces deux éléments ont été utilisés pour l'étude de l'optimisation de dimensionnement des carapaces qui est l'objet de la deuxième partie de l'étude.

La première partie s'articule en trois points essentiels:

- * Théories de la houle et méthodes d'analyses
- * Analyse statistiques et spectrales des enregistrements de houles sur le littoral Algérien (Skikda,Arzew)
- * Analyse et interprétation des résultats

Le dimensionnement d'une carapace se fait actuellement par approche successives nécessitant de nombreux modèles physiques . après un calcul approché a l'aide de formules simples .

Ces formules de prédimensionnement font appel à la notion de la vague de projet ou hauteur significative de la houle,déterminée par une analyse statistique.

De nombreuses catastrophes ont affectées plusieurs ouvrages portuaires à travers le monde, sont en partie dûes à une méconnaissance des houles et leur conséquence sur le comportement des carapaces et aussi aux choix adéquats du type de blocs. Exemples : Sines (Portugal) en dolos, Tripoli (Libye) en tétrapodes, en Algérie plusieurs dégâts survenus sur de nombreuses digues ces dernières années : Anzew, Skikda, Bethioua, El-kala, Oran .

Suite à des réflexions d'ordres techniques et économiques la L.E.M a marqué une préférence pour les carapaces en blocs cubiques rainurés.

L'objet de la deuxième partie de ce travail est l'étude paramétrique d'une carapace en blocs cubiques rainurés d'une digue à talus (fig:1) sur modèle réduit en canal à houle.

Cette étude se limite à la variation de quelques paramètres principaux tels que: pente du talus, taille des blocs, hauteur et période de la houle.

Après la présentation des différentes méthodes de prédimensionnement des blocs de la carapace, on a passé à la description du canal et des essais réalisés et on a terminé avec l'analyse et l'interprétation des résultats des essais.

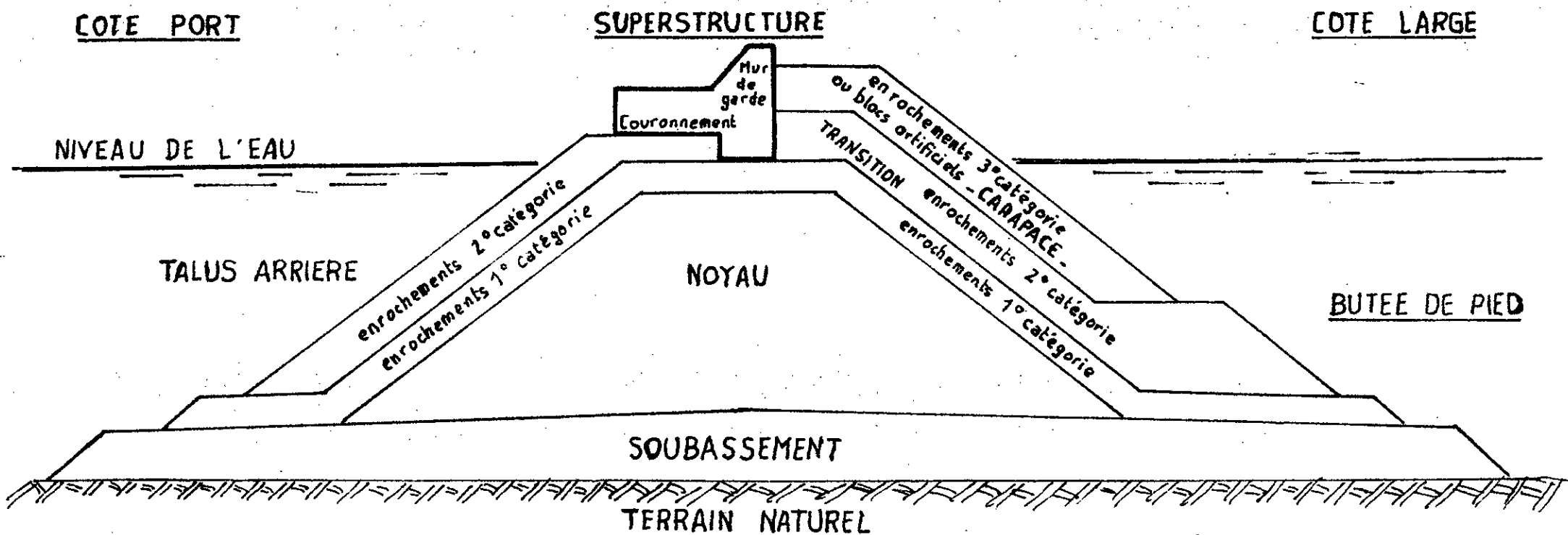


Fig:1 Constitution d'un profil de digue à talus

CHAPITRE 2

ANALYSE DU REGIME DE LA HOULE SUR LE LITTORAL ALGERIEN

2.1 INTRODUCTION

La mer est un milieu très complexe toujours agité dans laquelle se superposent plusieurs mouvements ondulatoires qui sont :

- * Les marées dont l'amplitude peut atteindre une quinzaine de mètres (océans) et de période variant de 12 heures à 18 ans.
- * Les seiches d'amplitude pouvant atteindre quelques décimètres et de période variant de quelques dizaines de secondes à quelques minutes, se produisant dans certains ports (port d'Alger) . .
- * La houle d'amplitude atteignant une trentaine de mètres et de période variant de 3 à 25 secondes .

La connaissance du régime de houles ne relève pas seulement d'un simple souci de recherche purement théorique, mais est nécessaire d'une part pour le bon dimensionnement d'un ouvrage marin vis-à-vis des efforts exercés par la houle, d'autre part pour une bonne exploitation des bassins avec un niveau d'agitation maximum admissible.

La détermination du régime exceptionnel de l'état de la mer consiste à avoir un ensemble de mesures étalées sur une période la plus longue possible afin de permettre une extrapolation dans le temps, et d'en déduire par une analyse statistique les différents paramètres de la houle .

Ce chapitre est consacré à la recherche bibliographique sur les méthodes d'analyse de la houle théorique et réelle il se divise comme suit :

- * Présentation des méthodes mathématiques d'analyse de la houle théorique .
- * Présentation des méthodes d'analyse statistiques de la houle réelle .
- * Présentation des méthodes d'analyse spectrales .

2.2 RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES

2.2.1 Méthodes mathématiques d'analyse de la houle théorique

L'étude théorique de la houle consiste à décrire ce phénomène physique très complexe au moyen des formules mathématiques .

De nombreux modèles mathématiques ont été développés, depuis le XIX^e siècle par de nombreux mathématiciens pour traduire les caractéristiques physiques de ce type d'écoulement à surface libre qui est la houle.

Les études classiques les plus connues sont relatives à des houles régulières cylindriques. Des études récentes tenant compte à la fois des effets non linéaires et des phénomènes liés à la viscosité pour des houles irrégulières ont été établis grâce au progrès réalisés dans les méthodes de résolution numérique des équations de NAVIER-STOKES régissant d'une façon générale les écoulements des fluides newtoniens incompressibles.

De nombreuses solutions analytiques et numériques sont développées en se basant sur l'une ou plusieurs hypothèses suivantes :

- * Fluide parfait, incompressible.
- * Mouvement nul en profondeur infinie ou parallèle au fond en profondeur finie .
- * Pression constante à la surface libre et égale à la pression atmosphérique et la distribution verticale est hydrostatique .
- * Ecoulement irrotationnel d'où l'existence d'un potentiel de vitesse .

A) Solution de GERSTNER

Les équations du mouvement sont formulées à partir des équations générales de l'hydrodynamique, on suppose que le fluide est parfait, incompressible d'où les équations suivantes :

$$\text{équation dynamique : } dV/dt + 1/\Gamma \text{ grad } p^* = 0 \quad [2.1]$$

$$\text{équation de continuité : } \text{div } V = 0 \quad [2.2]$$

Γ : masse volumique du fluide

La solution de GERSTNER se rapporte à une houle rotationnelle se propageant à une profondeur infinie .

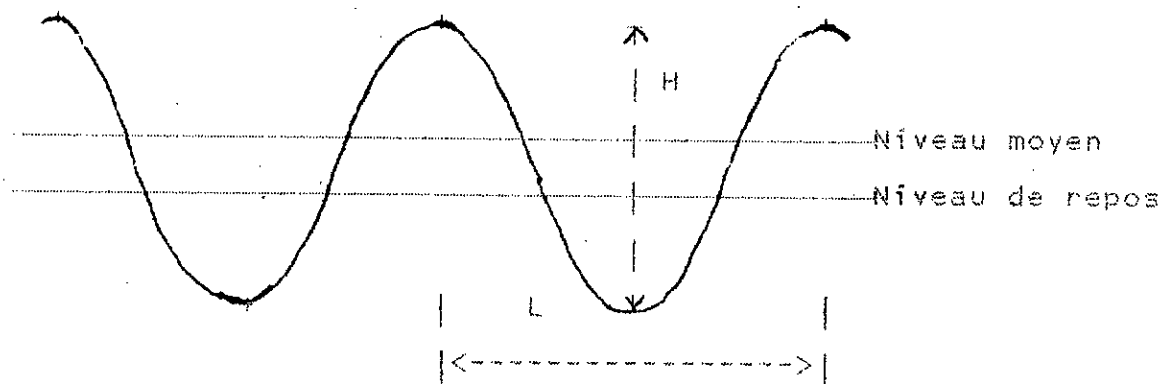
Le mouvement est défini par les équations suivantes :

$$X = a - L/2\pi \exp(-2\pi b/L) \cos 2\pi(t/T - a/L) \quad [2.3]$$

$$Z = b - L/2\pi \exp(-2\pi b/L) \sin 2\pi(t/T - a/L) \quad [2.4]$$

a et b étant des paramètres liés à la position de repos de la particule fluide .

Un point P de coordonnées (X,Z) appartenant à la surface libre du fluide décrit une trochoïde fig 2.1 :



Cette solution tient compte de la surévation du niveau moyen par rapport au niveau de repos et donne une solution approchée représentant assez bien la réalité . L'inconvénient de cette solution découle du fait qu'elle a un rotationnel de sens contraire à celui que devrait produire l'action du vent générateur de la houle .

B) Solutions irrotationnelles de première approximation

(Théorie de STOKES)

Cette solution est basée sur les mêmes hypothèses que la solution de Gerstner ,mais elle s'intéresse aux deux cas de profondeur finie et infinie .

1°) Profondeur infinie

Le mouvement est décrits par les équations suivantes :

$$X = X_0 - H/2 \exp(- 2\pi Z_0/L) \cos 2\pi(t/T - X_0/L) \quad [2.5]$$

$$Z = Z_0 - H/2 \exp(- 2\pi Z_0/L) \sin 2\pi(t/T - X_0/L) \quad [2.6]$$

Avec (X,Z) coordonnées d'une particule fluide à un instant quelconque qui a les coordonnées X_0, Z_0 au repos .

Cette solution ne tient pas compte de la surélévation du niveau moyen par rapport au niveau de repos, elle est moins exacte que celle de GERSTNER .

2°) Profondeur finie

Le phénomène est définis par les équations suivantes :

$$X = X_0 - H/2 \frac{\operatorname{Ch}[2\pi(D - Z_0)/L]}{\operatorname{Sh}[2\pi D/L]} \cos 2\pi(t/T - X_0/L) \quad [2.7]$$

$$Z = Z_0 - H/2 \frac{\operatorname{Sh}[2\pi(D - Z_0)/L]}{\operatorname{Sh}[2\pi D/L]} \sin 2\pi(t/T - X_0/L) \quad [2.8]$$

Où D : profondeur du fond sous la surface libre supposée constante .

Les solutions de Stokes sont incomplète et ne décrivent pas exactement le phénomène, en négligeant les termes du second ordre en H .

C) Solution numérique approchée par les équations de NAVIER-STOKES

Des solutions numériques approchées sont développées en utilisant le calcul sur ordinateur même lorsque les systèmes d'équations deviennent plus complexes par le nombre d'inconnues ou de dimensions.

Plusieurs approches ont été utilisées afin de trouver une solution à ce phénomène moyennant un certain nombre d'hypothèses, par exemple sur la répartition verticale de pression ou de vitesses afin d'établir des équations, telle que les équations de SAINT-VENANT (1871) dont lesquelles l'accélération verticale est négligées devant la pesanteur, ou les équations de BOUSSINESQ (1877) qui en tiennent compte, reprises par SERRE (1953) en tenant compte du fond et du frottement.

Les simulations numériques des écoulements consistent à discrétiser le milieu continu fluide et de trouver la vitesse et la pression en chaque noeuds formant le maillage.

Les équations utilisées dans cette approche numérique sont:

$$\text{Equation dynamique: } \frac{d\vec{v}}{dt} + \frac{1}{\rho} \text{grad } P = \nu \Delta \vec{v} - g \vec{Z} \quad [2.9]$$

$$\text{Equation de continuité: } \text{Div } \vec{v} = 0 \quad [2.10]$$

Equation exprimant les conditions aux limites :

$$\text{en surface } p^* = g \tau \quad [2.11]$$

$$\frac{dt}{dt} + u \frac{dt}{dx} = w \quad [2.12]$$

$$\text{avec } Z = \tau (X , t)$$

$$\text{au fond } \vec{v} \cdot \vec{n} = 0 \quad [2.13]$$

Le problème qui est posé consiste à résoudre numériquement les équations de NAVIER-STOKES ce qui a fait l'objet d'un très grand nombre de publications .¹²

On se contente d'évoquer les résultats d'une méthode de résolution développée au Laboratoire Nationale d'Hydraulique de France (L.N.H) en utilisant la méthode des différences finies basées sur le principe des pas fractionnaires pour la propagation d'une houle courte .

La houle a une amplitude suffisamment faible pour quelle soit bien représentée par la résolution linéaire de Stokes au premier ordre .

$$\tau = H - A \sin(kX - wt) \quad [2.14]$$

$$u = -Aw \operatorname{Ch}(kZ) / \operatorname{Sh}(kZ) \sin(kX - wt) \quad [2.15]$$

$$w = Aw \operatorname{Sh}(kZ) / \operatorname{Sh}(kZ) \cos(kX - wt) \quad [2.16]$$

$$P / \Gamma g = H - A \operatorname{Ch}(kZ) / \operatorname{Ch}(kZ) \sin(kX - wt) \quad [2.17]$$

avec $k = 2\pi/L$ et $w = 2\pi/T$

Les résultats obtenues sont très proche de la solution théorique .

2.2.2 Méthodes de traitement statistique de la houle réelle

La modélisation mathématique de la houle est insuffisante pour représenter ce phénomène physique très complexe, donc pour représenter avec un maximum de détails l'état de la mer, il est nécessaire d'étudier statistiquement des enregistrements de houle et d'en déduire par les différentes méthodes d'analyse les paramètres caractérisant cet enregistrement, le plus important étant l'amplitude qu'on appelle aussi vague de projet ou hauteur significative de la houle, qui est un facteur déterminant pour l'élaboration d'un projet maritime.

1°) Méthode directe

Cette méthode consiste à déterminer l'amplitude et la période de chaque vague d'un enregistrement, on l'appelle aussi méthode d'analyse vague par vague.

Une vague est définie comme étant deux passages successifs par zéro par valeurs croissantes :

(Zéro Up Crossing : Z.U.C) . fig:2.2

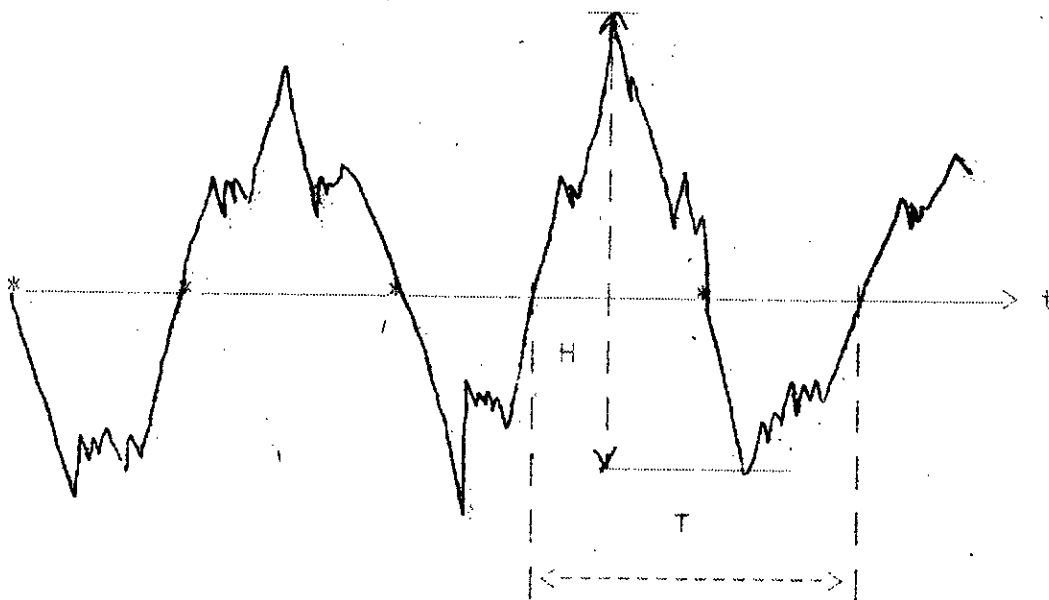


Fig:2.2 Vague définie par passage par zéro par valeurs croissantes (A.I.P.C.N) & (A.I.R.H) [11]

On classe les amplitudes de toutes ces vagues et en déduit les paramètres de la houle à savoir :

- * H_{max} & TH_{max} : hauteur maximale des vague et sa période correspondante .
- * $H_{1/10}$ & $TH_{1/10}$: moyennes du dixième supérieure des amplitudes des vagues et de leurs périodes correspondantes .
- * $H_{1/3}$ & $TH_{1/3}$: moyennes du tiers supérieure des amplitudes des vagues et de leurs périodes correspondantes .
- * H_{moy} & TH_{moy} : hauteur et période moyenne des vagues .

En suite on classe les périodes des vagues et on détermine les même paramètres concernant les périodes et les hauteurs correspondantes à savoir :

- * T_{max} & HT_{max} : période maximale des vague et sa hauteur correspondante .
- * $T_{1/10}$ & $HT_{1/10}$: moyennes du dixième supérieure des périodes des vagues et de leurs hauteurs correspondantes .
- * $T_{1/3}$ & $HT_{1/3}$: moyennes du tiers supérieure des périodes des vagues et de leurs hauteurs correspondantes .

2°) Méthode de TUCKEY-DRAPER

C'est une méthode très simple permettant une approche de la hauteur significative H_s de la houle par un calcul manuel dont le principe est le suivant :

Soient A et B les deux plus grandes amplitudes positives, C et D les deux plus grandes amplitudes négatives d'un enregistrement de N_z vagues (nombre de passages par zéro par valeurs ascendantes).

La hauteur significative est donnée par l'expression suivante :

$$H_s = 2 ([m_{0+}]^{0.5} + [m_{0-}]^{0.5}) \quad [2.18]$$

Avec m_{0+} et m_{0-} donnés par les relations suivantes :

$$(A + C)/[m_{0+}]^{0.5} = 2[2\theta]^{-0.5}(1 + 0.289/\theta - 0.241/\theta^2) \quad [2.19]$$

$$(B + D)/[m_{0-}]^{0.5} = 2[2\theta]^{-0.5}(1 - 0.0211/\theta - 0.103/\theta^2) \quad [2.20]$$

Où $\theta = \ln N_z$

3°) Méthode des deux plus grandes vagues

Cette méthode consiste à mesurer les deux plus grandes amplitudes positives $H_{\max 1}$ et $H_{\max 2}$ dans un enregistrement de N vagues .

La probabilité de dépassement vaut respectivement $1/N$ et $2/N$

L'hypothèse de la loi de RAYLEIGH nous donne :

$$P (H_{\max 1}) = 1/N = \exp (- H^2_{\max 1} / 8m_{01}) \quad [2.21]$$

$$P (H_{\max 2}) = 2/N = \exp (- H^2_{\max 2} / 8m_{02}) \quad [2.22]$$

A partir de ces équations on tire les valeurs de m_{01} et m_{02}

$$m_{01} = H^2_{\max 1} / (8 \ln N) \quad [2.23]$$

$$m_{02} = H^2_{\max 2} / (8 \ln(N/2)) \quad [2.24]$$

D'où la hauteur significative :

$$H_s = 4.0039 \left[\frac{(m_{01} + m_{02})}{2} \right]^{0.5} \quad [2.25]$$

2.2.3 Méthodes d'analyse spectrale de la houle

L'analyse spectrale a pour but de calculer l'énergie contenue dans chaque bande de fréquence .

L'approche des dépouillements des mesures de houle par l'analyse spectrale a pris naissance après 1950 , avec les travaux de LONGUET-HIGGINS puis ceux de SAINT-DENIS et PIERSON en 1953 . Les formes de spectre les plus couramment rencontrées lors d'une analyse spectrale des enregistrements sont assez peu nombreuses . Différents " spectre typez " paramétrés par des variables océano-météorologiques ont été proposés . Les spectres les plus couramment utilisés sont :

A) Spectre de PIERSON-MOSKOWITZ (1964)

Ce spectre est proposé en 1964 par PIERSON et MOSKOWITZ en analysant un certain nombre d'enregistrements réalisés en Atlantique du Nord , son expression est la suivante :

$$S_{pm}(f) = A f^{-5} \exp \left[- \frac{4}{\pi} \left(\frac{f}{f_p} \right)^4 \right] \quad [2.26]$$

où $A = 0.315 H_s^2 f_p^4$

Par simple intégration on obtient les moments d'ordre 0 et 2

$$m_0 = \int_0^{\infty} S(f) df = \frac{A}{5} f_p^{-4} \quad [2.27] , \quad m_2 = \frac{A}{2} \int_0^{\infty} f^2 S(f) df = \frac{A}{2} \left(\frac{\pi}{5} \right)^{1/2} f_p^{-2} \quad [2.28]$$

B) Spectre de JONSWAP (1969)

Ce spectre a été proposé en analysant un grand nombre de mesures de houle effectuées en mer du Nord dans le cadre d'un projet d'étude intitulé : " Joint North Sea Ways Project " (JONSWAP) mené en 1969 par différents pays d'Europe du Nord.

Il dépend de trois paramètres caractérisant la forme du spectre : τ , σ_m , σ_b . Son expression est la suivante :

$$S_j(f) = A f^{-5} \exp \left[- \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-4} \tau \right] \exp \left[- \frac{(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2} \right] \quad [2.29]$$

avec $\sigma = \sigma_m$ pour $f < f_p$

$\sigma = \sigma_b$ pour $f > f_p$

En première approximation les les valeurs des paramètres (τ , σ_m , σ_b) sont fixées par K. HASSELMAN (1973) à :

$$\tau = 3.3 ; \sigma_m = 0.07 ; \sigma_b = 0.09$$

La comparaison entre ces deux spectres est illustrée par la figure 2.3 .

Le degré d'aplatissement du spectre de JONSWAP dépend de la valeur du paramètre τ .

Le spectre de PIERSON-MOSKOWITZ est un cas particulier du spectre de JONSWAP pour $\tau = 1$.

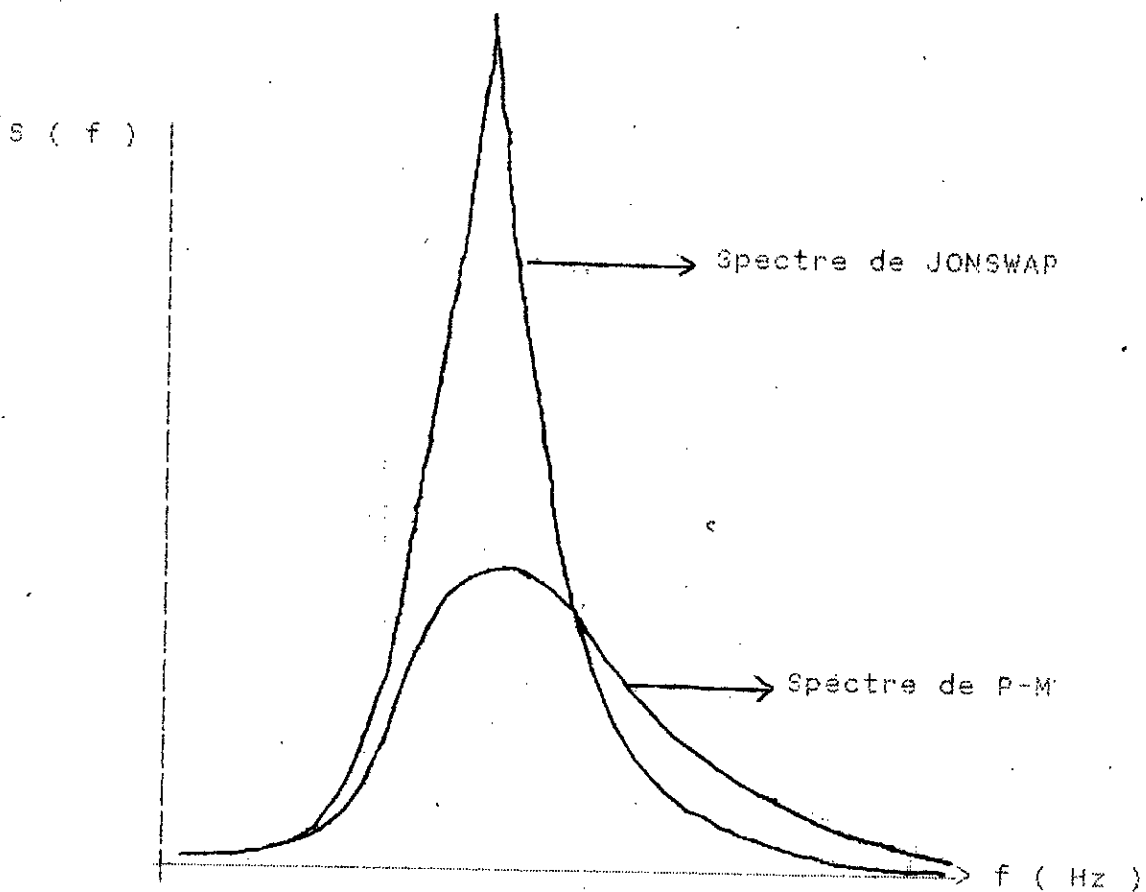


Fig : 2.3 Spectre de JONSWAP et de PIERSON-MOSKOWITZ

C) Autres formes de spectres

* Spectre I S S C (International Ship Structures Congress)

$$S(f) = 0.11(2\pi/Tz)^4 H_s f^{-5} \exp[0.44(2\pi/Tz)^4 f^{-4}] \quad [2.30]$$

* Spectre I T T C (International Towing Tank Conference)

$$S(f) = 8.10 \cdot 10^3 g^{-2} f^{-5} \exp(-3.11/H_s^2 f^{-4}) \quad [2.31]$$

avec $T_p = 5.001 H_s^{0.5}$

* Spectre de NEUMANN

$$S(f) = H_s^2 (27/128\pi) * (2\pi/Tz) f^{-5} \exp[-1.5(2\pi/Tz) f^{-2}] \quad [2.32]$$

avec $T_p = 0.55 H_s + 7.54$

* Spectre de DARBYSHIRE-SCOTT

$$S(f) = 0.214 H_s^2 \exp\left[-\frac{(f-f_p)^2}{|0.065(f-f_p)+0.26|}\right]^{0.5} \quad [2.33]$$

avec $T_p = 0.55 H_s + 7.54$

* Spectre de DARBYSHIRE-SCOTT modifié par WIEGEL

$$S(f) = 0.300 H_s^2 \exp\left[-\frac{(f-f_m)^2}{|0.03534(f-f_m)+0.26|}\right]^{0.5} \quad [2.34]$$

avec $T_p = 0.69 H_s + 8.48$

2.2.4 Conclusion

La formulation théorique du spectre est difficile, vu la complexité des phénomènes à représenter et les états de mer auxquelles il s'applique (mer complètement développée , mer en voie de formation) .

Donc le tracé du spectre réel est nécessaire pour la connaissance de l'état de la mer , c'est l'objet du chapitre suivant qu'on aborde avec la description des mesures de houle et des méthodes de dépouillement . Ensuite on passe à l'analyse statistique des enregistrements de houle qui nous a permis de déterminer le régime et l'évolution des tempêtes et on termine avec l'analyse spectrale par deux approches différentes : la fonction d'autocorrélation et la transformé de FOURIER rapide .

CHAPITRE 3

ANALYSE DES ENREGISTREMENTS DE HOULE

3.1 Introduction

La connaissance du régime de houle sur le littoral algérien nécessite des observations systématiques de l'état de la mer. Dans cette optique un programme de pose de houlographes sur plusieurs sites a été mis en place par l'Office National de Signalisation Maritimes (O.N.S.M) ,dont quelques uns sont déjà fonctionnels .

Cette partie de l'étude consiste à analyser les mesures de houle recueillies sur le site de Skikda et Arzew , elle est réalisée au sein du L.E.M avec l'aide des stagiaires de l'E.N.T.P .

Elle a permis d'obtenir le régime de la houle et l'évolution des tempêtes au cours du temps sur les deux sites étudiés , les différents paramètres de la houle et la corrélation entre eux , ainsi que les distributions réelles et théoriques des amplitudes des vagues .

Cette première partie se termine par le tracé des spectres réels en utilisant la fonction d'autocorrélation et la transformé de FOURIER rapide , avec intercalation des spectres des deux spectres théoriques les plus utilisés qui sont du type JONSWAP et PIERSON-MOSKOWITZ .

3.2 Description des mesures et méthodes de dépouillement

Les enregistrements de houle ont été effectués à l'aide de houlographes type "DATAWELL", toutes les deux heures pendant 5 minutes avec une cadence d'échantillonnage de 2 Hz et les enregistrements étaient réalisés en continu lorsque la hauteur des vagues dépassait 2.5 à 3.0 mètres environ.

Le dépouillement des rouleaux est fait à l'aide d'un digitaliseur et par un programme qu'on a élaboré on a déterminé les paramètres de la houle ainsi que son régime en cours du temps.

D'après l'évolution de la hauteur maximale de la houle durant les périodes d'observation, trois tempêtes ont été sélectionnées pour une analyse détaillée sur le site de Skikda et aucune tempête sérieuse n'a été enregistrée sur Arzew.

La détermination des vagues individuelles se fait par l'analyse dite "Z.U.C" définie en [2.2.2].

Chaque vague individuelle est caractérisé par :

- * Sa hauteur H_i (longueur séparant le plus grand maximum du plus minimum atteint par cette vague)
- * Sa période T_i de l'ordre de 08 à 20 secondes en méditerranée
- * Sa longueur d'onde L

3.3 Analyse statistique de la houle

3.3.1 Présentation du programme

Les enregistrements sélectionnés ont été analysés à l'aide d'un programme qu'on a élaboré .

Ce programme permet de calculer la hauteur H_i et la période T_i de chaque vague , ensuite il fait le tri des hauteurs et il détermine les paramètres caractéristiques de la houle : H_{max} , TH_{max} ; $H_{1/10}$, $TH_{1/10}$; $H_{1/3}$, $TH_{1/3}$; H_{moy} , TH_{moy} et il refait le même procédé avec les périodes en calculant les valeurs de : T_{max} , HT_{max} ; $T_{1/10}$, $HT_{1/10}$; $T_{1/3}$, $HT_{1/3}$.

Après cette étape il calcule les rapports entre ces différents paramètres afin de les comparer aux valeurs données par la théorie .

Dans l'étape qui suit , il détermine la valeur de la hauteur significative par la méthode des deux plus grandes vagues et par la méthode de TUCKEY-DRAPER .

Et enfin le programme se termine par le tracé des histogrammes des hauteurs des vagues avec l'intercalation de la loi de GAUSS et celle de RAYLEIGH , afin de déterminer la loi de distribution des hauteurs des vagues .

Le programme ainsi que quelques fichiers de résultats sont présentés en annexes .

3.3.2 Evolution des tempêtes

Durant la période d'observation sur le site de Skikda qui s'étale de novembre 1984 à février 1985, trois tempêtes ont été sélectionnées et retenues pour une analyse détaillée. Durant cette période de mesure, toutes les tempêtes enregistrées avaient une hauteur maximale inférieure à 8 m.

Les trois tempêtes analysées présentent en générale une phase de croissance rapide et plus ou moins régulière, un palier où la houle atteint son paroxysme et enfin une phase de décroissance lente généralement irrégulière.

A) Tempête du 27 et 28 novembre 1984

Cette tempête présente une phase de croissance régulière jusqu'à 20 h du 27 novembre où elle atteint son paroxysme et une phase de décroissance régulière jusqu'au 28 à 2 h, puis une décroissance irrégulière et lente jusqu'à 6 h, fig:3.1
Les paramètres de houle de cette tempête sont :

$H_{max} = 5.60 \text{ m}$	$TH_{max} = 8.80 \text{ s}$
$H_{1/3} = 3.85 \text{ m}$	$TH_{1/3} = 8.24 \text{ s}$
$H_{1/10} = 5.02 \text{ m}$	$TH_{1/10} = 10.09 \text{ s}$

B) Tempête du 29 au 30 décembre 1984

Cette tempête présente 2 pics, fig:3.2, le premier est atteint le 29 à 6 h avec :

$H_{max} = 5.47 \text{ m}$	$TH_{max} = 7.76 \text{ s}$
$H_{1/3} = 3.92 \text{ m}$	$TH_{1/3} = 6.74 \text{ s}$
$H_{1/10} = 4.91 \text{ m}$	$TH_{1/10} = 7.40 \text{ s}$

Le deuxième pic est atteint à 18 h du même jour, il représente le paroxysme de cette tempête avec :

$H_{max} = 7.94 \text{ m}$	$TH_{max} = 7.84 \text{ s}$
$H_{1/3} = 4.74 \text{ m}$	$TH_{1/3} = 9.31 \text{ s}$
$H_{1/10} = 6.16 \text{ m}$	$TH_{1/10} = 10.05 \text{ s}$

Entre les 2 pics la tempête présente un minimum atteint le 29 à 10 h avec :

$H_{max} = 3.86 \text{ m}$	$TH_{max} = 7.12 \text{ s}$
$H_{1/3} = 3.21 \text{ m}$	$TH_{1/3} = 8.81 \text{ s}$
$H_{1/10} = 3.60 \text{ m}$	$TH_{1/10} = 7.99 \text{ s}$

C) Tempête du 08 au 10 janvier 1985

L'évolution très complexe de cette tempête ne permet pas de distinguer la phase de croissance et la phase de décroissance , fig:3.3 .

Toute-fois en faisant abstraction de certaines irrégularités on peut dire que cette tempête évolue d'une façon très lente. Son paroxysme est atteint le 09 à 16 h avec :

Hmax = 6.06 m	THmax = 10.28 s
H1/3 = 4.87 m	TH1/3 = 11.03 s
H1/10 = 5.97 m	TH1/10 = 10.36 s

L'évolution de la période pendant ces trois tempêtes est très irrégulière comme l'illustre les figures : 3.1;3.2;3.3

Sur le site d'Arzew la période d'observation s'étale du 19 décembre 1985 au 23 janvier 1987 avec des interruptions . Durant cette période , la plus grande tempête a été enregistrée le 30 et 31 mai 1986 . Elle a atteint son paroxysme le 30 mai à 16 h après une phase de croissance irrégulière , la phase de décroissance était plus lente et plus régulière .

Les valeurs caractéristiques de la tempête sont :

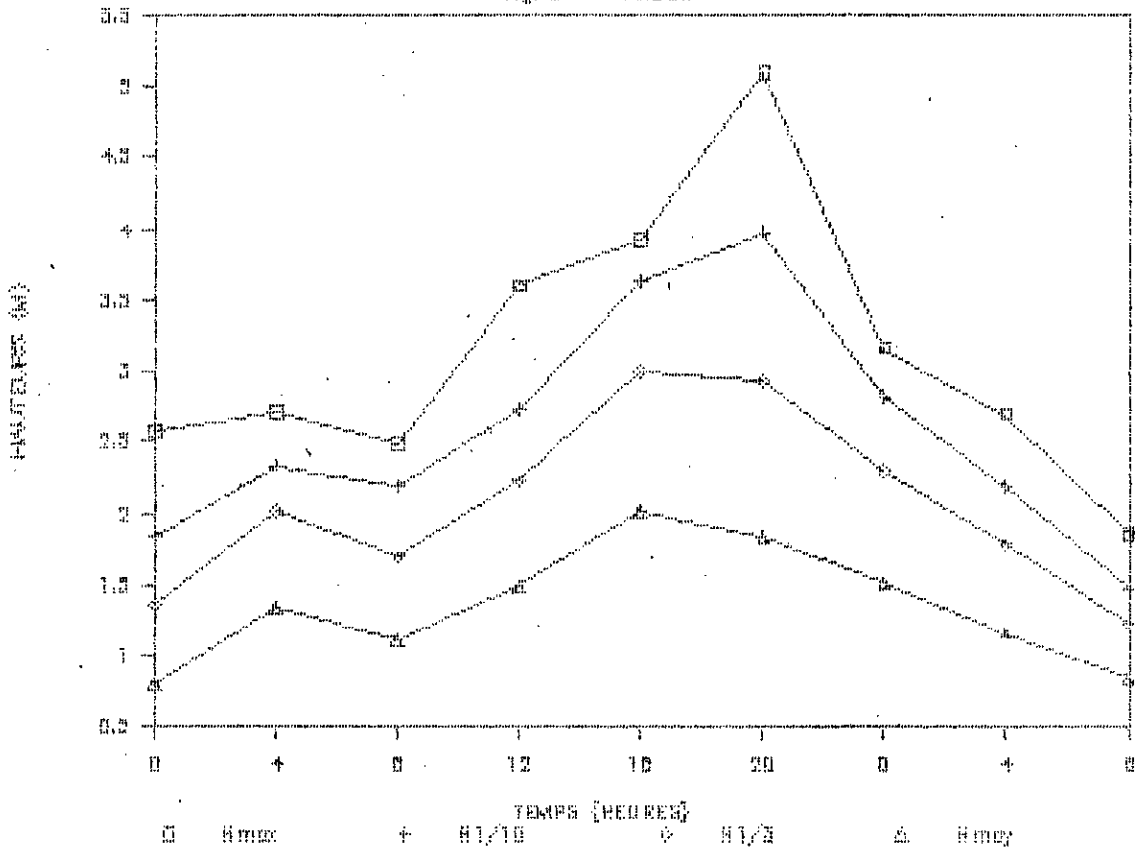
Hmax = 3.92 m	THmax = 6.84 s
H1/3 = 3.00 m	TH1/3 = 7.27 s
H1/10 = 3.63 m	TH1/10 = 7.59 s

L'évolution de ces tempêtes est la même que celles analysées par M.François MARENDET entre avril 81 et juillet 83 [15].

A part cet enregistrement qui de l'ordre d'une tempête annuelle , aucun autre enregistrement n'a donné des valeurs du même ordre pendant la période d'observation .

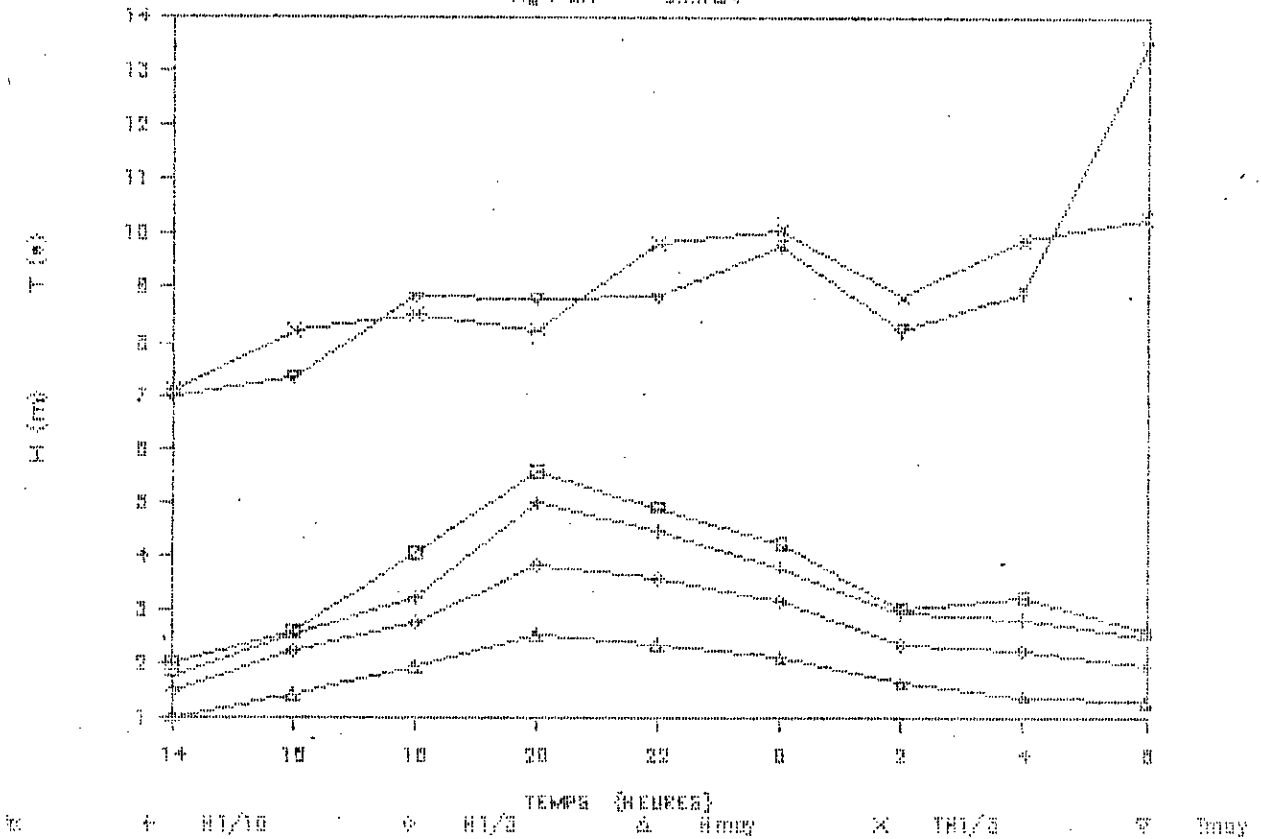
EVOLUTION DE LA TEMPÉTR DU 30 & 31/5/66

Fig. 3 ANZEM

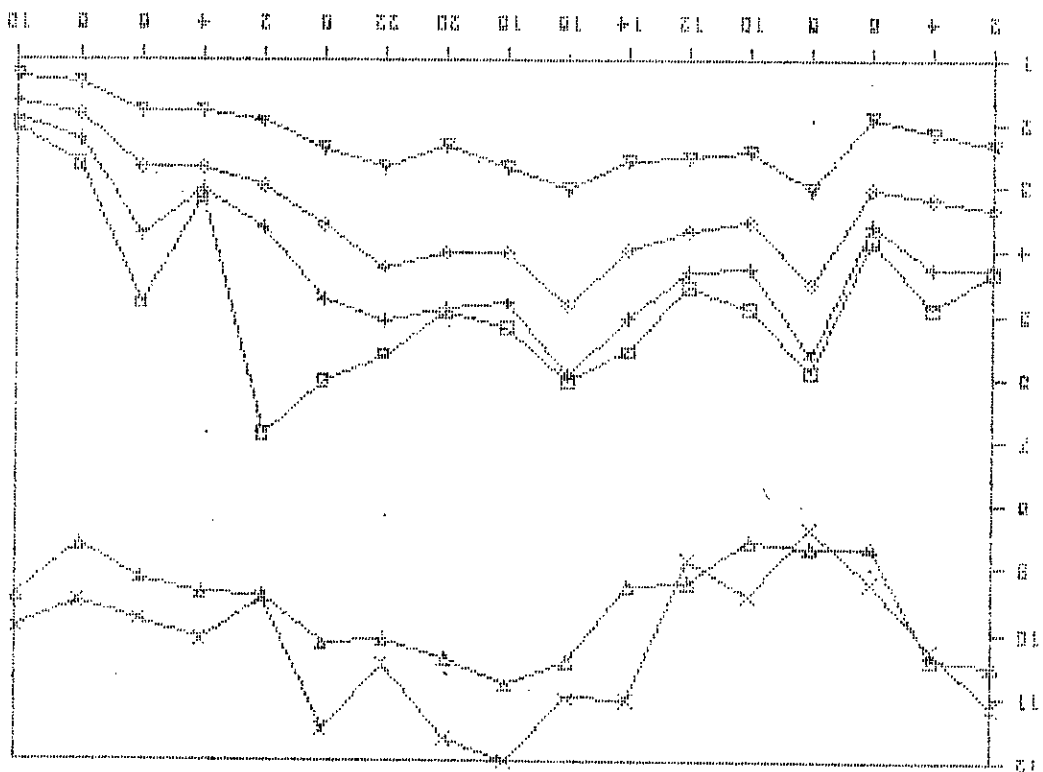


EVOLUTION DE LA TEMPÉTR DU 27&28/11/64

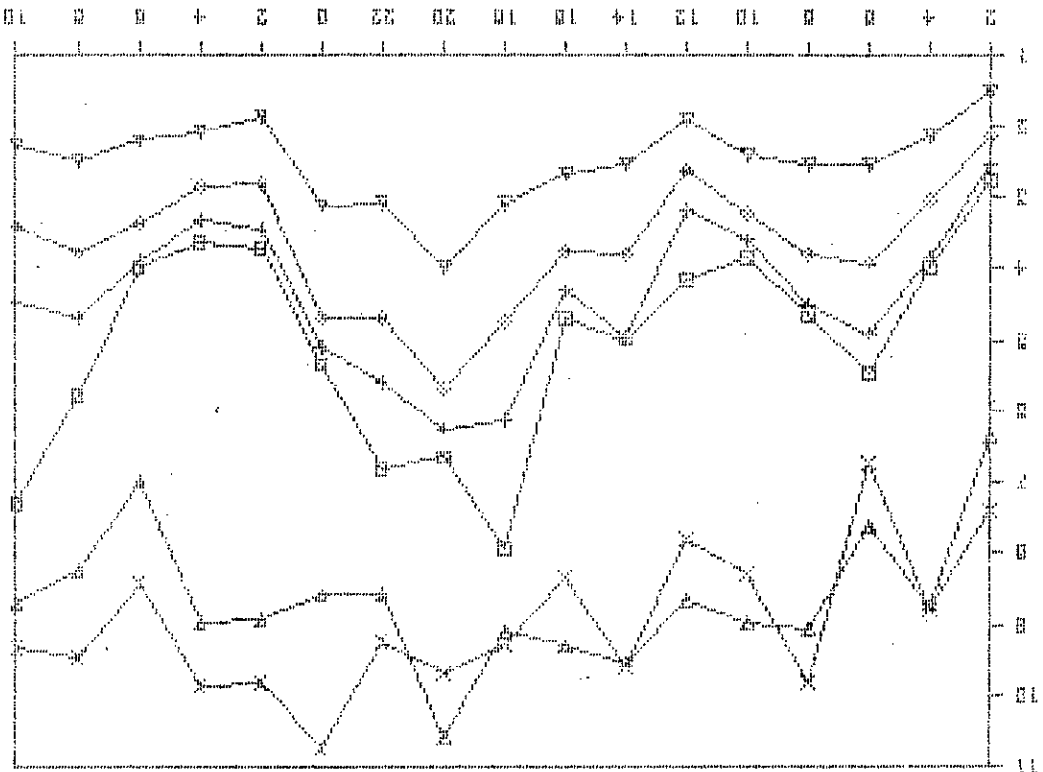
Fig. 3.1 SSKIDA



TEMPERATURE (TEMPERATURE) °C / °F



TEMPERATURE (TEMPERATURE) °C / °F



3.3.3 Répartition des hauteurs des vagues

L'agitation peut être représentée par la cote $Z(t)$ de la surface libre par rapport au niveau moyen instantané. Cette fonction peut être considérée comme la somme d'un grand nombre de variables aléatoires indépendantes variant sinusoidalement avec le temps soit :

$$Z(t) = \sum a_n \cos(\omega_n t + \alpha_n) \quad [3.1]$$

C'est la décomposition de la houle réelle en un grand nombre d'ondes monochromatiques indépendantes entre-elles. Le processus est supposé ergotique c'est à dire qu'il est possible de remplacer les moyennes statistiques de la fonction aléatoire $Z(t)$ par ses moyennes temporelles. Il en résulte :

$$\bar{Z}(t) = 0 \quad ; \quad \overline{Z^2(t)} = 0.5 \sum^n a_n^2 = m_0$$

(m_0 : moment d'ordre zéro du processus)

Selon la théorie, les hauteurs des vagues suivent généralement la loi de RAYLEIGH. Ce qui signifie que la probabilité d'occurrence de la hauteur H dans l'intervalle $[H, H+dH]$ est égale à :

$$F(H) = H/4m_0 \exp(-H^2/8m_0) \quad [3.2]$$

En conséquence, la probabilité qu'une vague dépasse une hauteur H_0 donnée correspond à :

$$P(H \geq H_0) = \exp(-H_0^2/8m_0) \quad [3.3]$$

Il est possible d'établir des relations théoriques entre les différentes hauteurs caractéristiques de la tempête. En général $H_{1/n}$ est la hauteur pour laquelle :

$$P(H \geq H_0) = 1/n \quad \text{d'où} \quad H_{1/n} = \frac{H_0}{\sqrt{P(H \geq H_0)}} \quad [3.4]$$

$P(H \geq H_0) = 1/n$

La hauteur moyenne des vagues est donnée par l'expression :

$$H_{moy} = H_o \left[\frac{0.57722}{N} + \frac{1}{N} \right] = 2,5066 \text{ m} \quad [3.5]$$

$$H_{1/3} = H_o \left[4(mo)^* \right] \text{ où } H_o \text{ est défini par } H_o \left[\frac{0.57722}{N} + \frac{1}{N} \right] = 1/3$$

$$\text{d'où } H_{1/3} = [0.57722 \text{ Ln } 3]^* = 1.6 \text{ Hm} \quad [3.6]$$

$$H_{1/10} = 2.03 \text{ Hm} = 1.27 \text{ Hs} \quad [3.7]$$

$$H_{max} / H_s = (0.5 [2 \text{ Ln } N]^* + C / 2 \text{ Ln } N) \quad [3.8]$$

où C = 0.57722 constante d'Euler

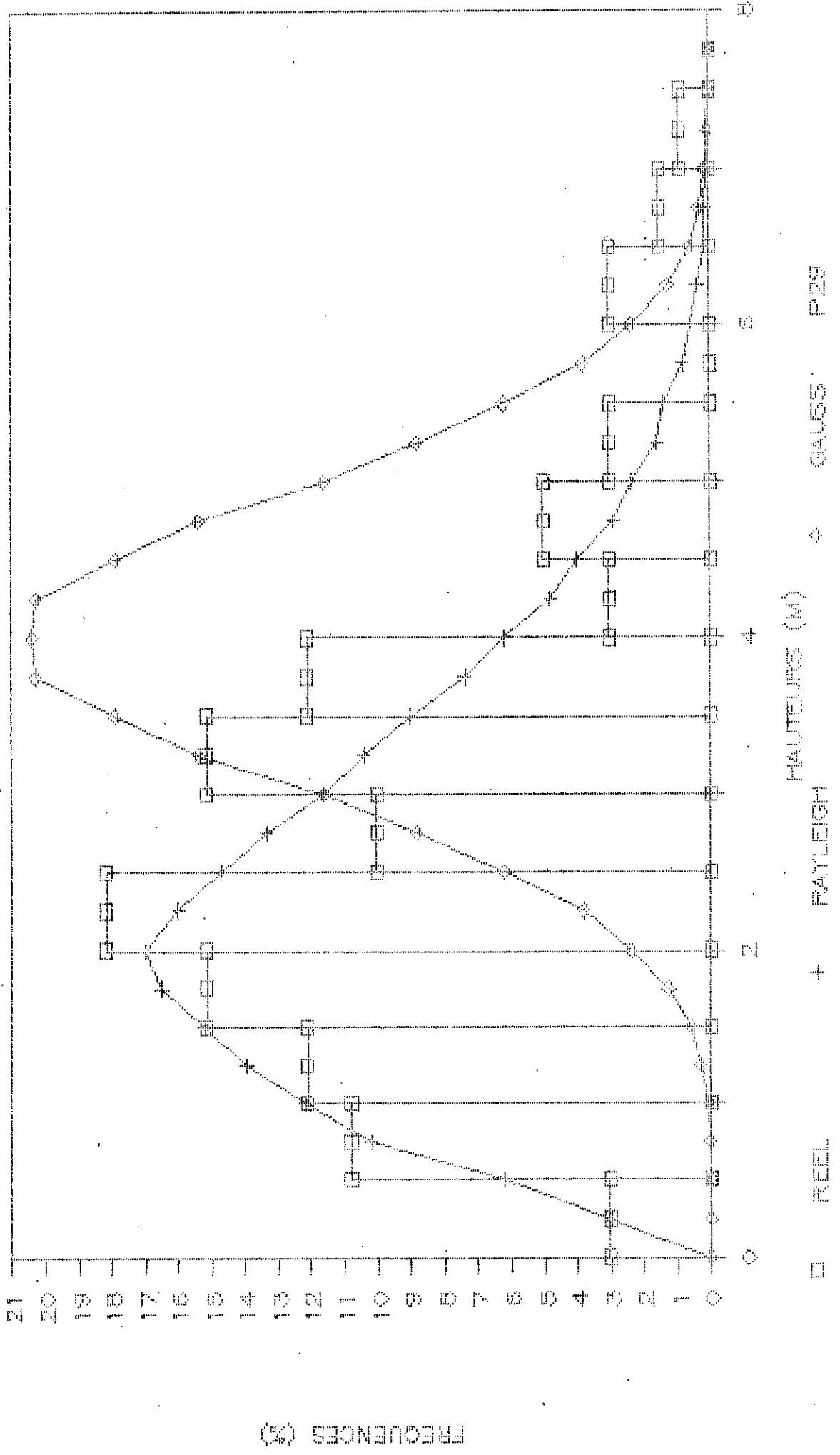
N : nombre de vagues

Différents recherches ont été menées pour étudier sur un grand nombre d'enregistrements la distribution des hauteurs des vagues en traçant des histogrammes , les corrélations existant entre les différents paramètres caractéristiques d'un enregistrement , afin de tirer une loi de répartition des hauteurs des vagues .

Dans ce but des histogrammes des hauteurs des vagues ont été tracés avec intercalation des courbes de GAUSS et de RAYLEIGH pour chaque enregistrement . La méthode des moindres carrés nous a permis de constater que la répartition des hauteurs suit la loi de RAYLEIGH . Cette constatation se confirme sur les trois sites étudiés pour les enregistrements de plus de 5 minutes: Skikda fig:3.4 ; Arzew fig:3.5 ; Béjaïa fig:3.6 . La durée d'enregistrement est très importante , les fig:3.6 et 3.5 représentent des histogrammes pour des échantillons de 127 vagues d'une durée de 20 mn environ et de 40 vagues d'une durée de 6mn environ , la distribution de RAYLEIGH se remarque plus facilement sur le premier échantillon que sur le second .

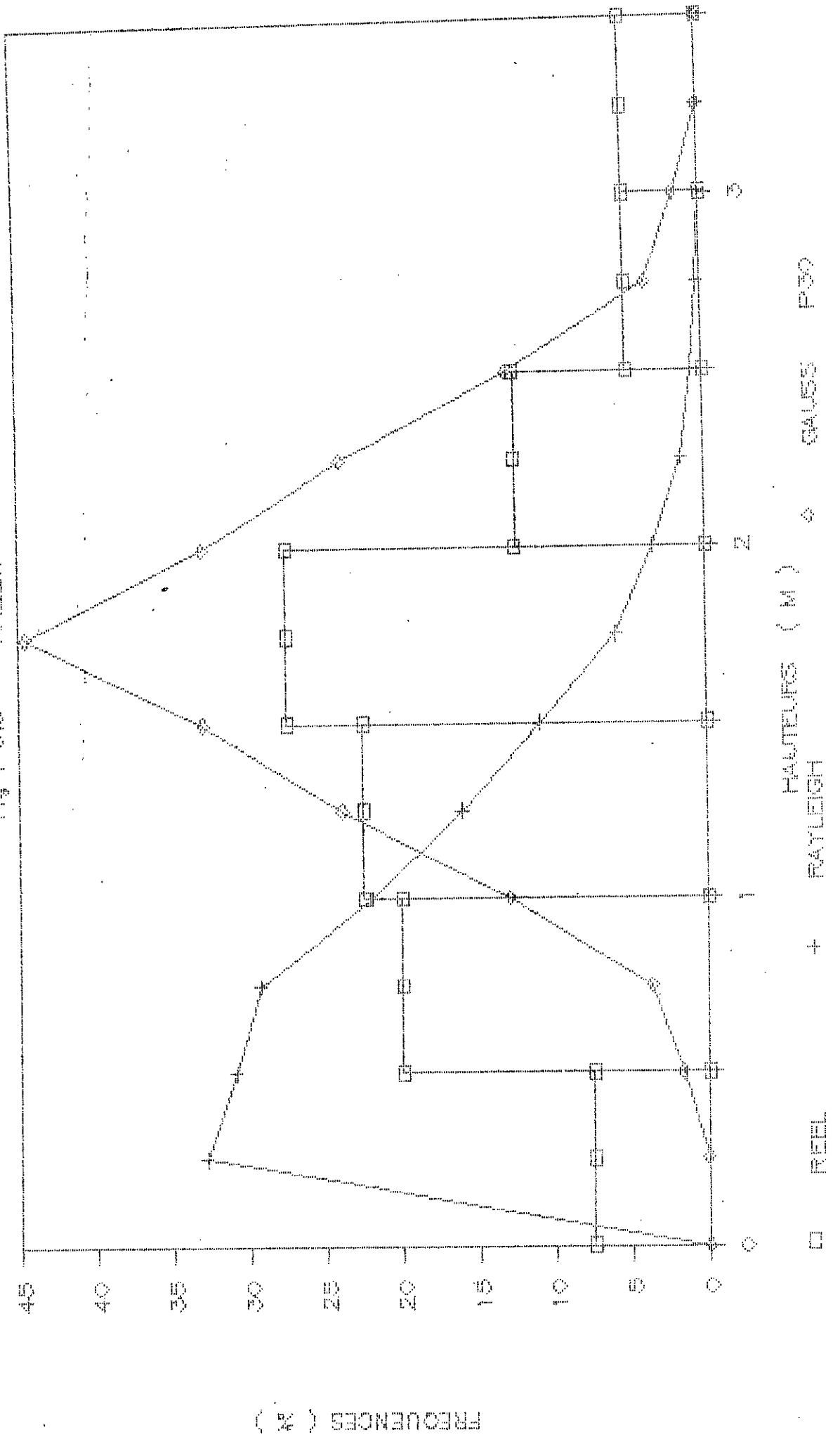
DISTRIBUTION DES HAUTEURS DES VAGUES

FIG : 3.4 SKKDA



DISTRIBUTION DES HAUTEURS DES VAGUES

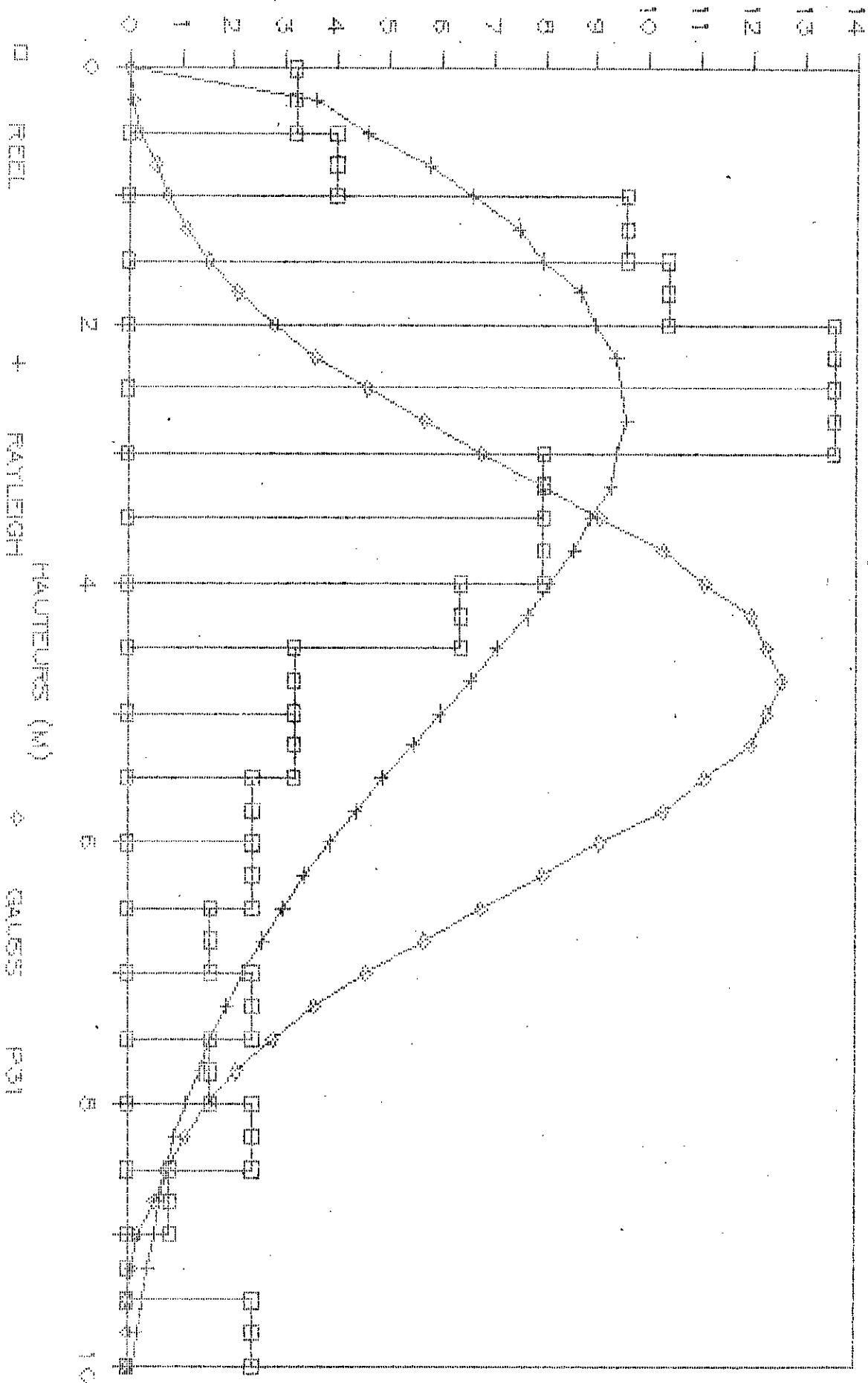
FIG : 3.15 ARZEW



FREQUENCES (%)

DISTRIBUTION DES HAUTEURS DES VAGUES

FIG. 316 BELMIA



Les rapports entre les différents paramètres de la houle ont été calculés | valeur |

	théorique	Skikda	Arzew	Béjaïa	Biarritz
$H_{max}/H_{1/3}$	1.60	1.34	1.56	1.56	1.58
$H_{1/10}/H_{1/3}$	1.27	1.21	1.25	1.32	--
$H_{1/10}/H_{moy}$	2.03	1.79	1.96	2.22	--
$H_{1/3}/H_{moy}$	1.60	1.50	1.54	1.68	1.66

L'analyse statistique des enregistrements a permis de constater que les différents paramètres des hauteurs de houle sont fortement corrélés entre-eux . Les coefficients de corrélation sont compris entre 0.891 et 0.987 pour le site de Skikda et entre 0.922 et 0.968 pour Arzew .

Le calcul de régression linéaire a donné les résultats sui-

vants: Skikda $H_{max} = 1.336 H_{1/3} + 0.079$ [3.9] fig:3.7
 $H_{1/10} = 1.786 H_{moy} - 0.019$ [3.10] fig:3.8
 $H_{1/10} = 1.210 H_{1/3} + 0.022$ [3.11] fig:3.9
 $H_{1/3} = 1.495 H_{moy} - 0.043$ [3.12] fig:3.10
 Arzew $H_{max} = 1.396 H_{1/3} + 0.205$ [3.13] fig:3.11
 $H_{1/10} = 1.962 H_{moy} + 0.010$ [3.14] fig:3.12
 $H_{1/10} = 1.555 H_{1/3} - 0.418$ [3.15] fig:3.13
 $H_{1/3} = 1.607 H_{moy} - 0.063$ [3.16] fig:3.14

Ces résultats se rapprochent de ceux qui ont été trouvé par M. François-Marc TURPIN sur l'analyse de 2044 enregistrements de BIARRITZ qui a donné les résultats suivants :

$$H_{moy} = 0.6 H_{1/3} + 0.006 \quad \text{et} \quad H_{max} = 1.58 H_{1/3} + 0.180$$

Les coefficients de corrélations entre les différents paramètres sont compris entre 0.9109 et 0.9985 [5].

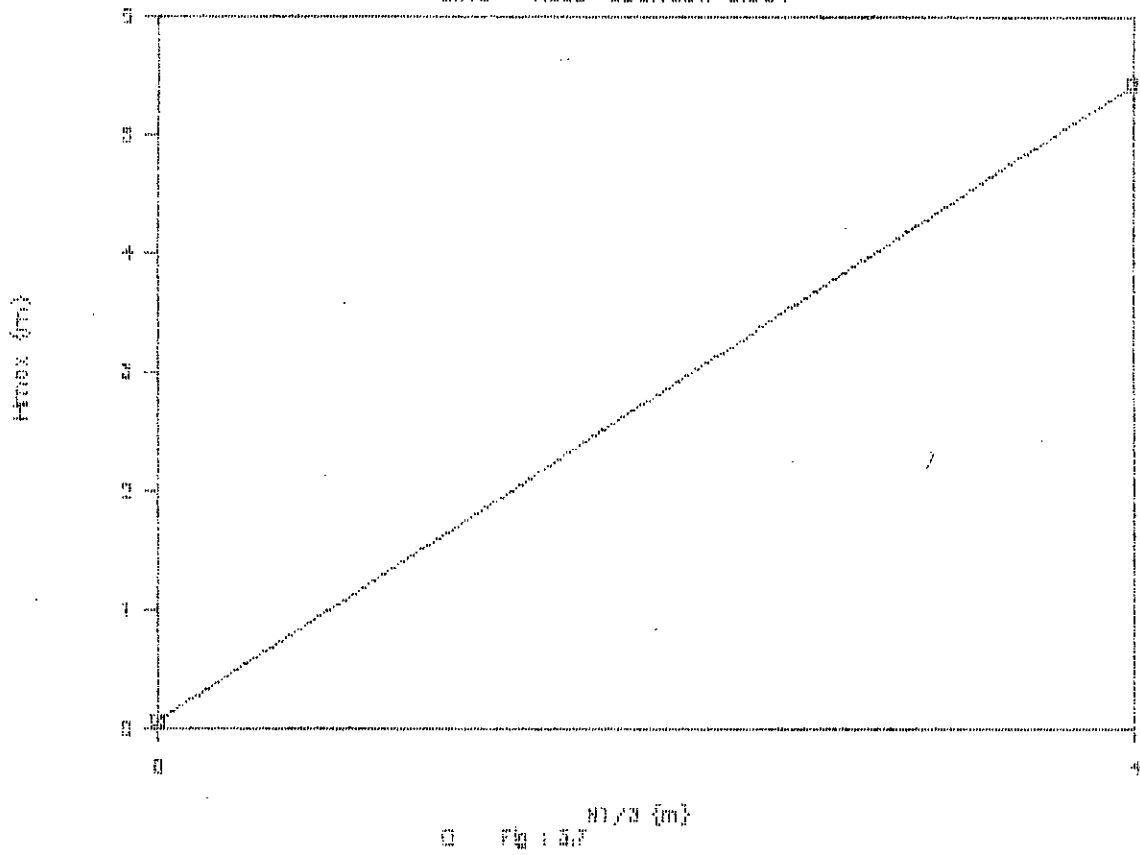
Ils confirment aussi l'importance de la durée d'échantillonnage , pour les enregistrements de 20 mn on a :

$$H_{1/3} / H_{moy} = 1.68 \quad \text{Béjaïa} \quad H_{1/3} / H_{moy} = 1.66 \quad \text{Biarritz}$$

$$H_{max} / H_{1/3} = 1.56 \quad \quad \quad H_{max} / H_{1/3} = 1.58$$

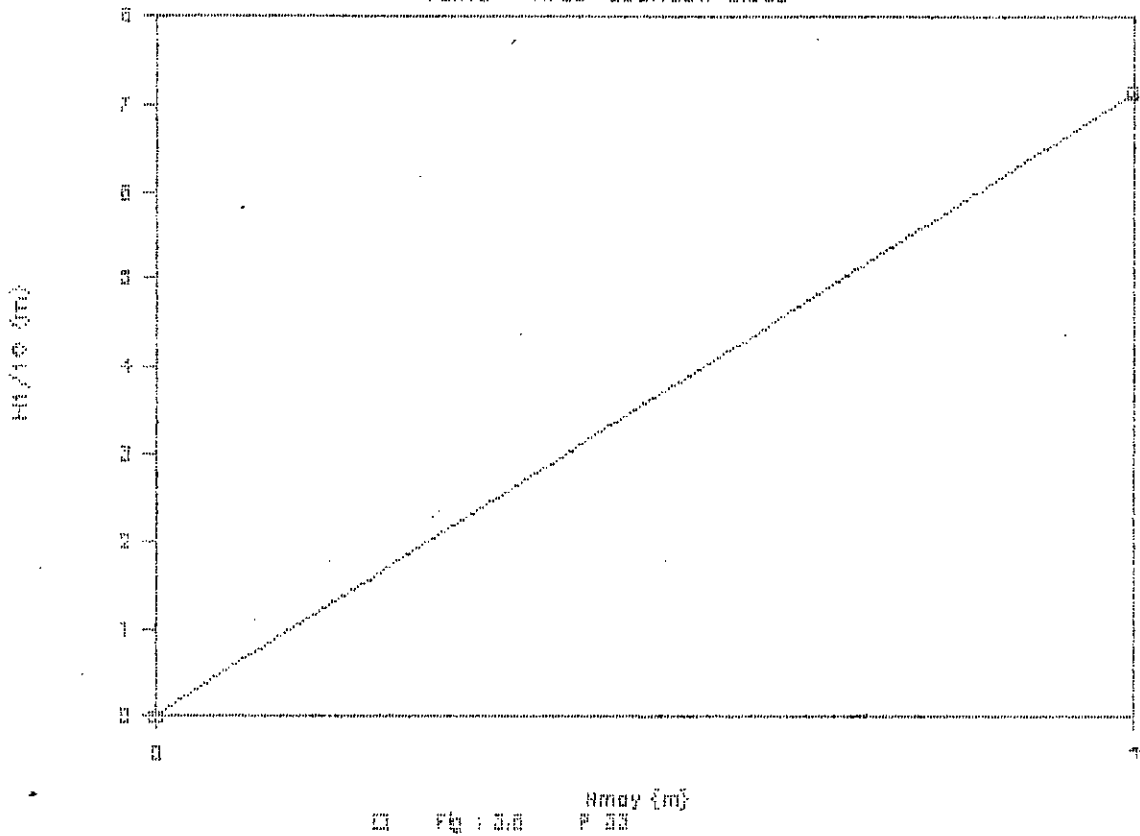
CORRELATION ENTRE Hmax ET H1/3

PENTE = 1.333 COEF. CORR = 0.994



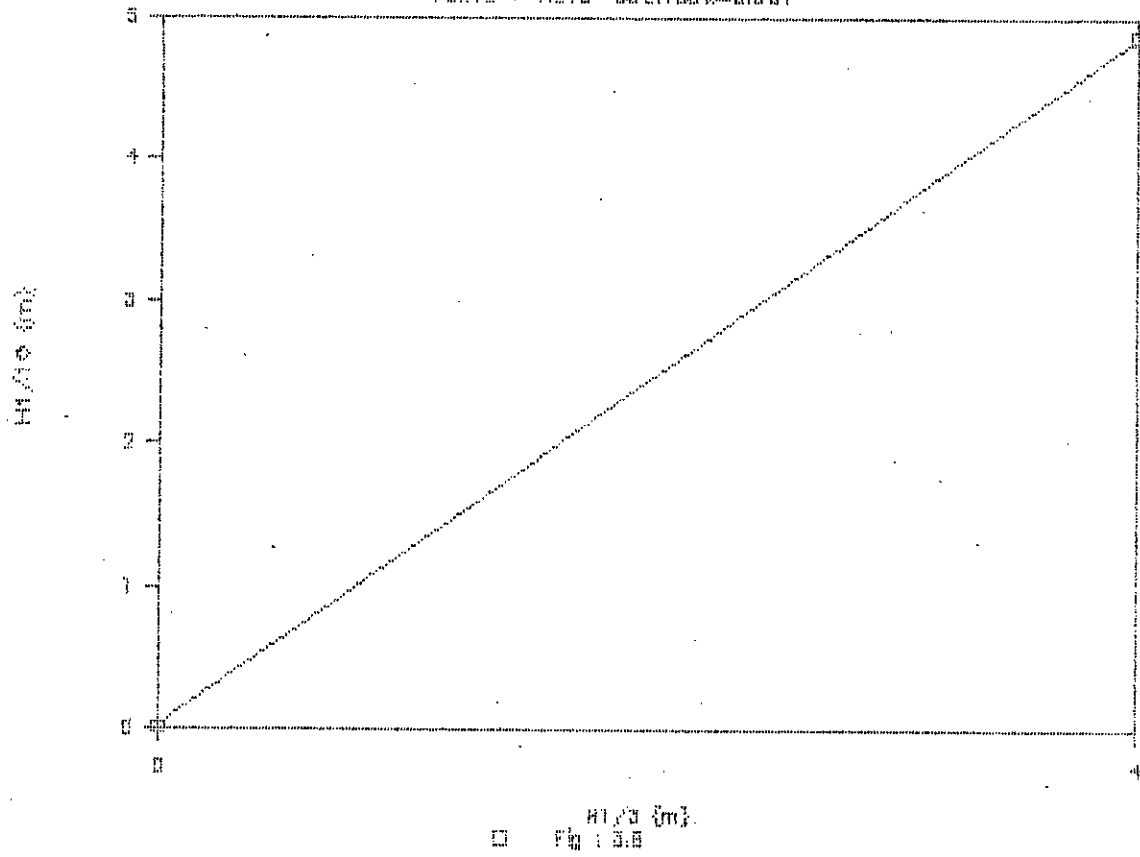
CORRELATION ENTRE H1/10 ET Hmoy

PENTE = 1.333 COEF. CORR = 0.993



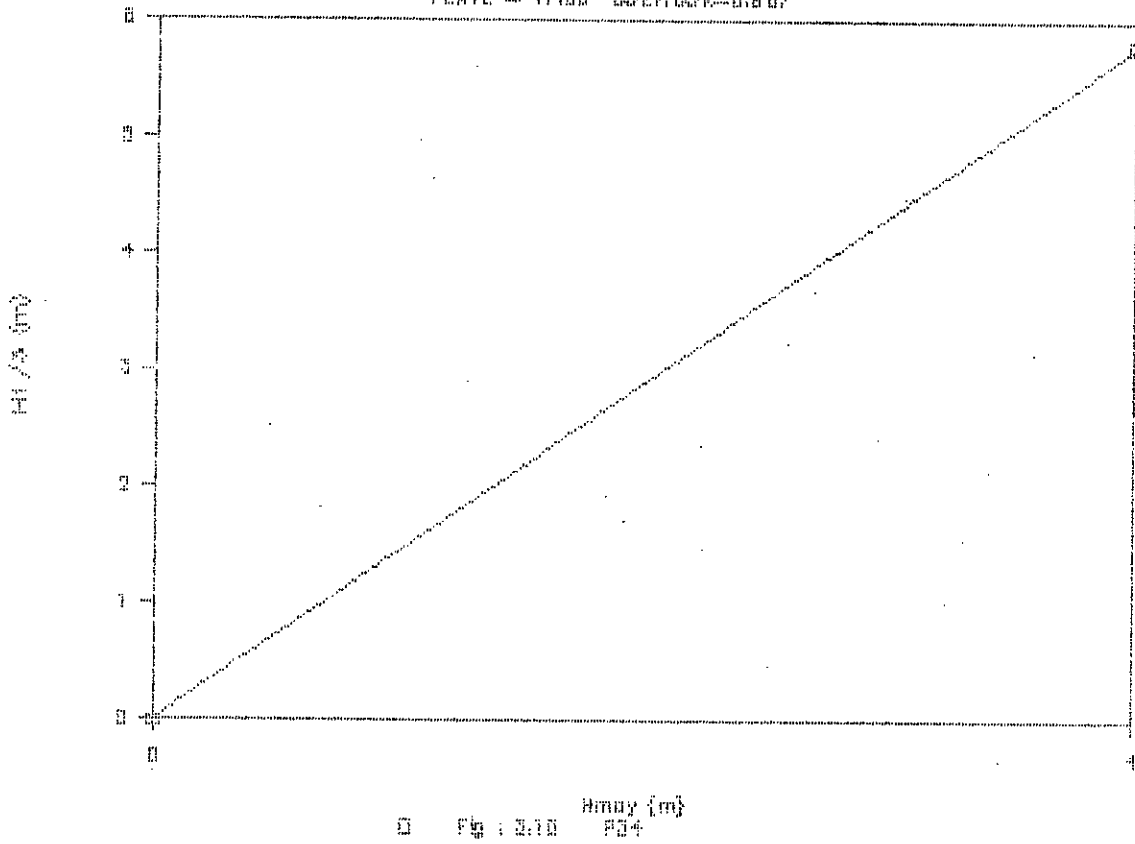
CORRELATION ENTRE H1/10 ET H1/3

PENTE = 1,210 COEFF.CORR=0,881



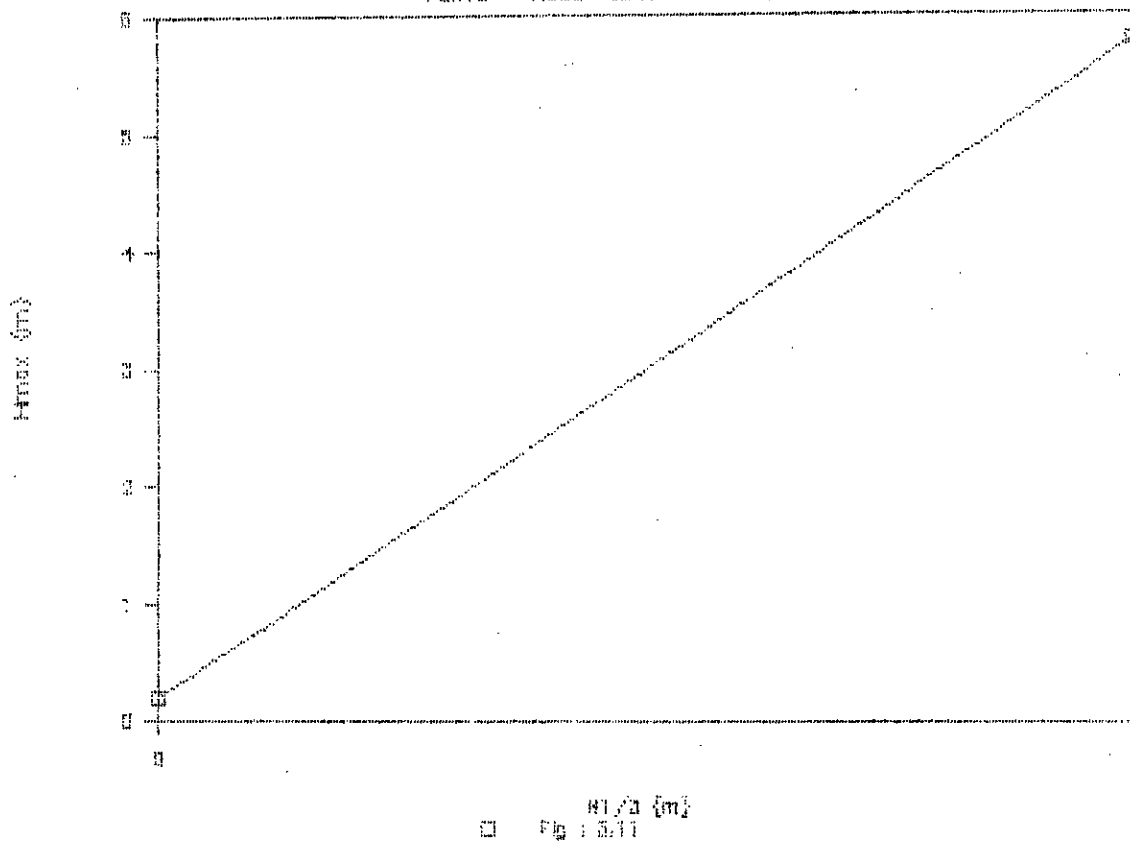
CORRELATION ENTRE H1/3 ET Hmoy

PENTE = 1,488 COEFF.CORR=0,887



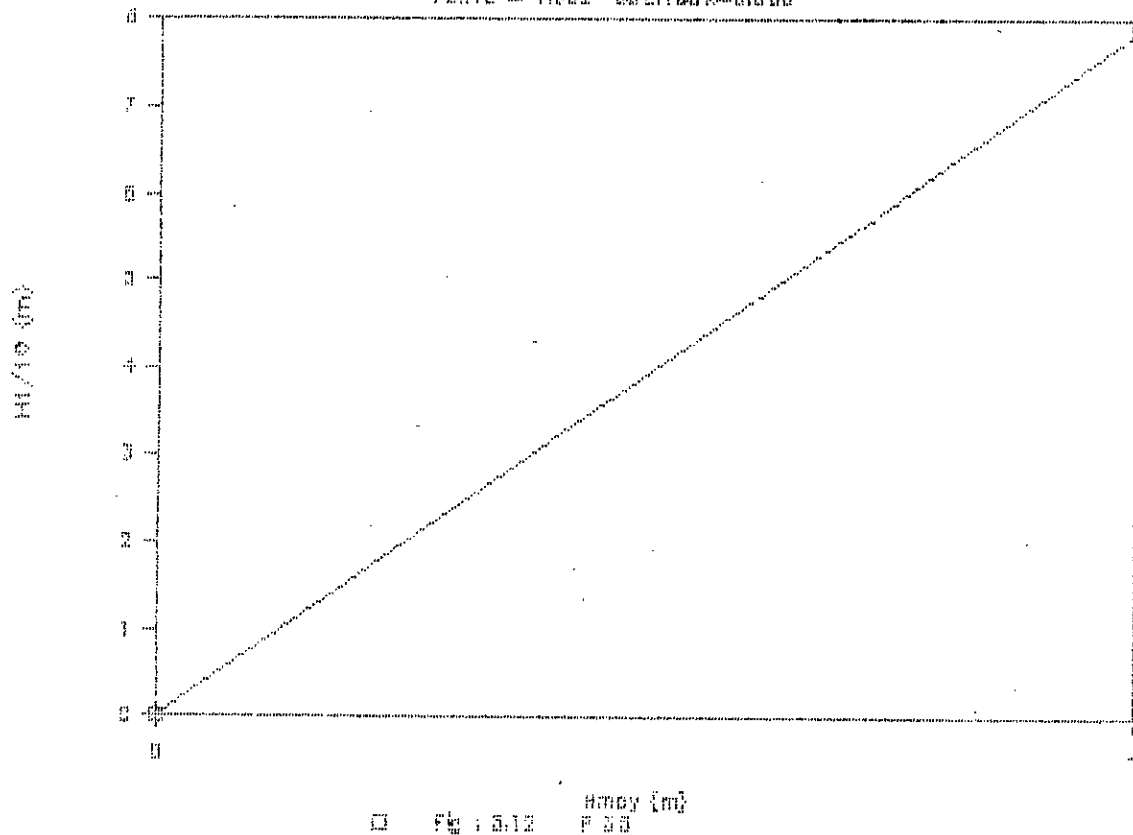
CORRELATION ENTRE Hmax ET H1/3

PENTE = 1.000 COEF. COR = 0.999



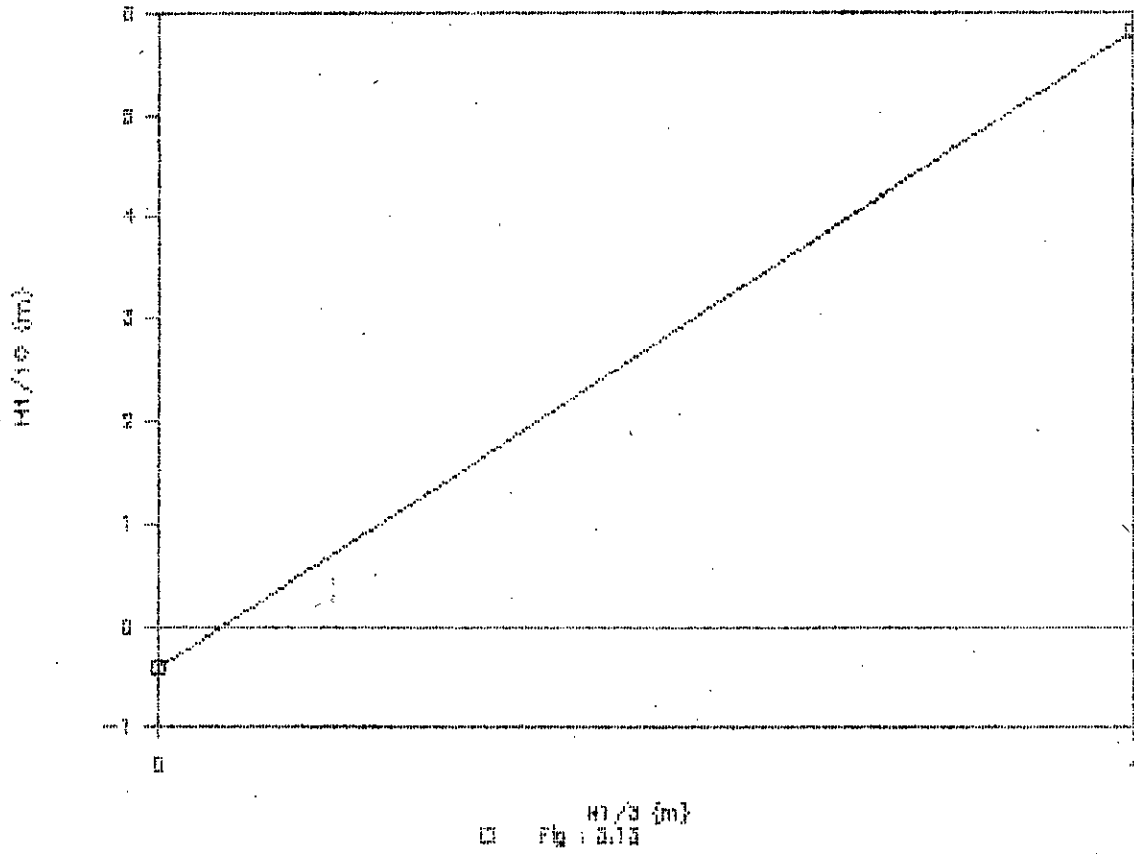
CORRELATION ENTRE H1/10 ET Hmoy

PENTE = 1.000 COEF. COR = 0.999



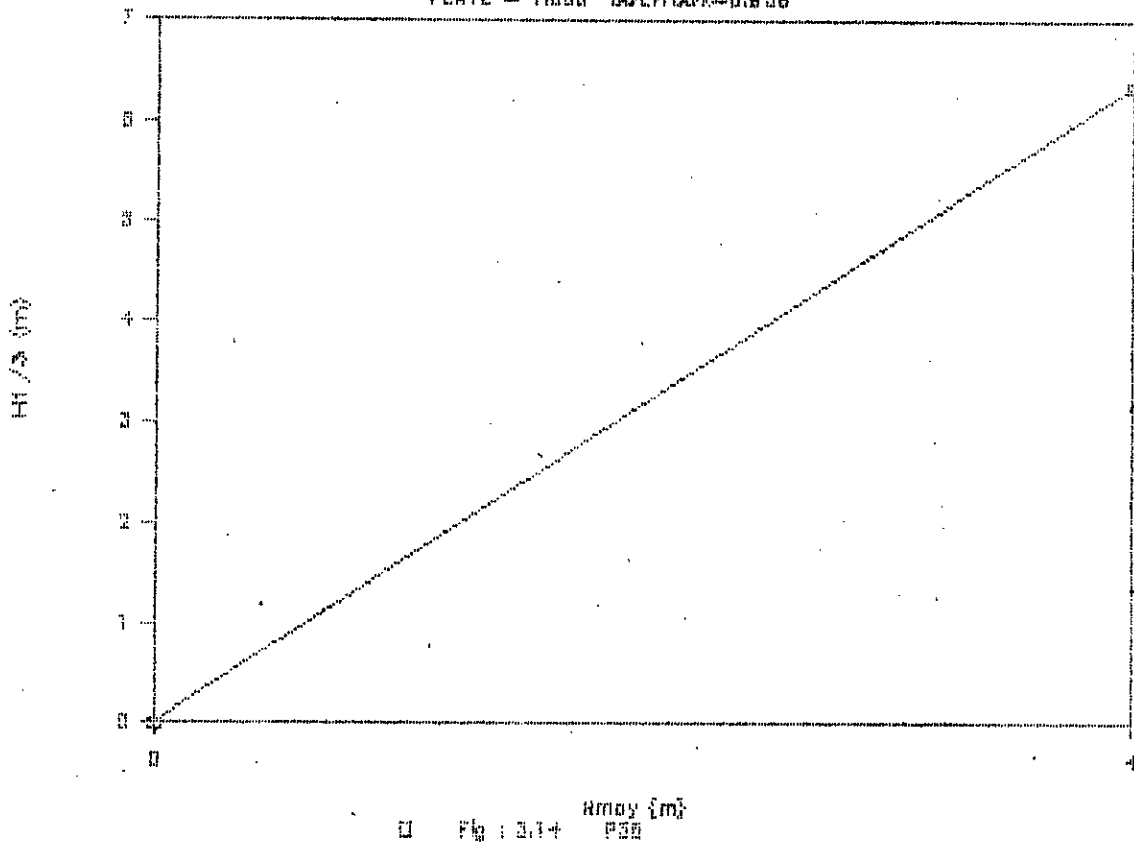
CORRELATION ENTRE H1/10 ET H1/3

PENTE = 1.000 COEF. CORR = 0.834



CORRELATION ENTRE H1/3 ET Hmoy

PENTE = 1.000 COEF. CORR = 0.838



3.4 Analyse spectrale

3.4.1 Approche par la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation

Pour définir le spectre d'énergie d'un enregistrement de houle c'est à dire la courbe de répartition d'énergie en fonction de la fréquence, on utilise la fonction d'autocorrélation de la cote de la surface libre. Elle décrit la dépendance de la valeur de la fonction $Z(t)$ à un instant t et à un autre instant $t + \tau$

Elle est définie par :

$$R(t, \tau) = Z(t) \cdot Z(t + \tau) \quad [3.15]$$

Comme le processus $Z(t)$ est supposé stationnaire alors $R(t, \tau)$ est indépendante de t .

La densité spectrale d'énergie $S(f)$ d'un processus aléatoire est définie comme étant la transformée de Fourier de $R(\tau)$:

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R(\tau) \exp(-2i\pi f\tau) d\tau \quad [3.16]$$

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R(\tau) \cos(2\pi f\tau) d\tau - i \int_{-\infty}^{+\infty} R(\tau) \sin(2\pi f\tau) d\tau$$

Comme le processus est paire alors $R(\tau) = R(-\tau)$

$$\text{d'où } S(f) = 2 \int_0^{+\infty} R(\tau) \cos(2\pi f\tau) d\tau \quad [3.17]$$

Pour déterminer $R(\tau)$, il suffit, à partir d'un enregistrement de houle de discrétiser $Z(t)$ par une suite Z_i de N valeurs également espacées d'un pas δt dans le temps.

La fonction d'autocorrélation est estimée par la relation :

$$R(\tau = p\delta t) = 1/(N-p) \sum_{q=1}^{N-p} Z_q \cdot Z_{p+q} \quad [3.18]$$

Pour que l'estimation de la fonction d'autocorrélation soit correcte, il faut que le pas d'échantillonnage satisfasse le théorème de SHANNON :

$$t \leq 1 / 2 f_{\max} \quad [3.19]$$

avec f_{\max} fréquence de NYQUIST qui est la fréquence maximale contenue dans le spectre.

Dans la pratique la période minimale de la houle détectable est de 2 secondes, ce qui nous donne une fréquence maximale

$$f_{\max} = 1 / T = 0.5 \text{ Hz} \quad \text{d'où} \quad t = 1 \text{ seconde}$$

On discrétise l'enregistrement selon le pas $t = 1s$ et on relève les cotes $Z(p\delta t)$ avec p variant de 0 à $N-1$ fig:3.15

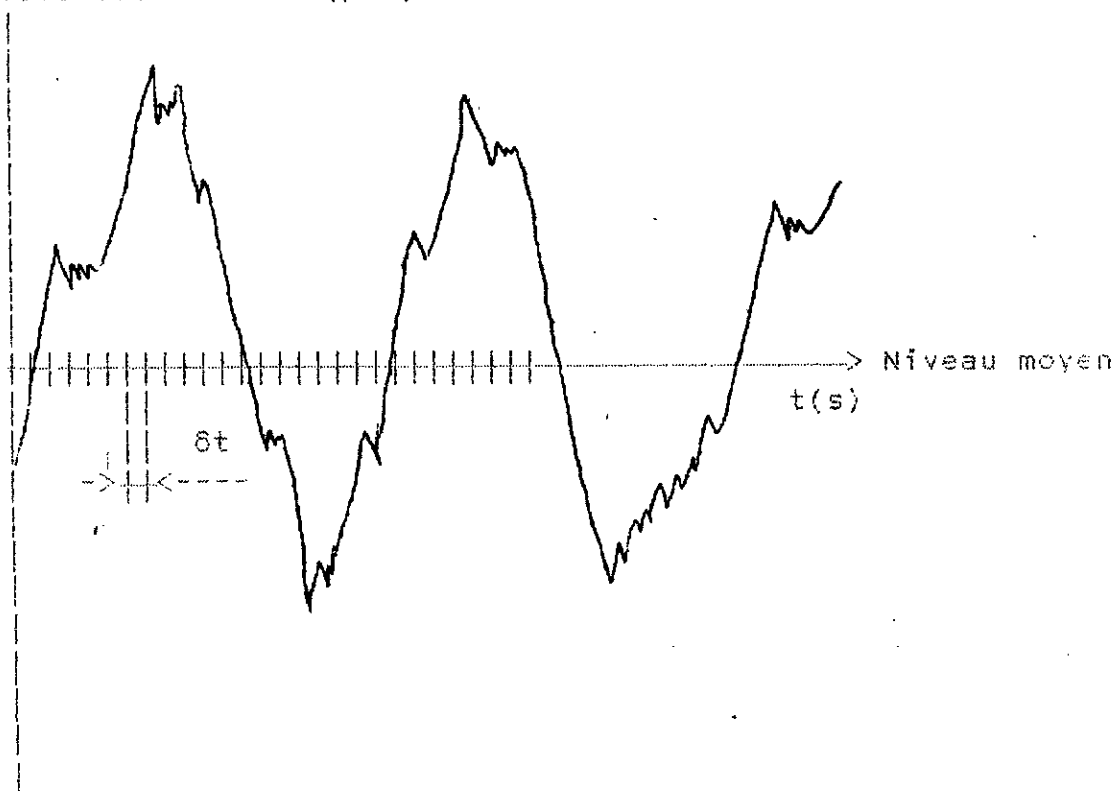


Fig: 3.15 Discrétisation d'un enregistrement

L'expression de la densité spectrale d'énergie après discrétisation devient :

$$S(f) = 2\delta t \sum_{p=0}^{N-1} R(\tau) \cos(2\pi f \delta t) \quad [3.20]$$

avec $R(\tau = p \delta t)$ évaluée par la formule [3.18]

$$R(\tau = 0 \delta t) = 1/N \sum_{p=0}^{N-1} Z_p$$

$$R(\tau = 1 \delta t) = 1/(N-1) \sum_{p=0}^{N-1} Z_{p+1} Z_p \quad \text{etc}$$

Après avoir tracer le spectre on a déterminé les paramètres qui lui correspondent à savoir :

- * La fréquence de pointe correspondant au pic du spectre
- * Les différents moments du spectre :

- # $m_n' = \int_0^{\infty} |f|^n \cdot S(f) df$ [3.21] moment d'ordre n
- # $m_0 = \int_0^{\infty} S(f) df$: moment d'ordre zéro, qui représente l'énergie totale du système des vagues.
- # $m_2' = \int_0^{\infty} |f|^2 \cdot S(f) df = m_2 / 4\pi^2$: moment d'ordre 2 nous renseigne sur la largeur du spectre.
- # $m_4' = \int_0^{\infty} |f|^4 \cdot S(f) df = m_4 / 16\pi^4$: moment d'ordre 4 nous renseigne sur le degrés d'applatissement du sommet du spectre.

A partir de ces différents moments du spectre on en déduit :

* La hauteur significative : $H_s = 4 [m_0]^{0.5}$ [3.22]

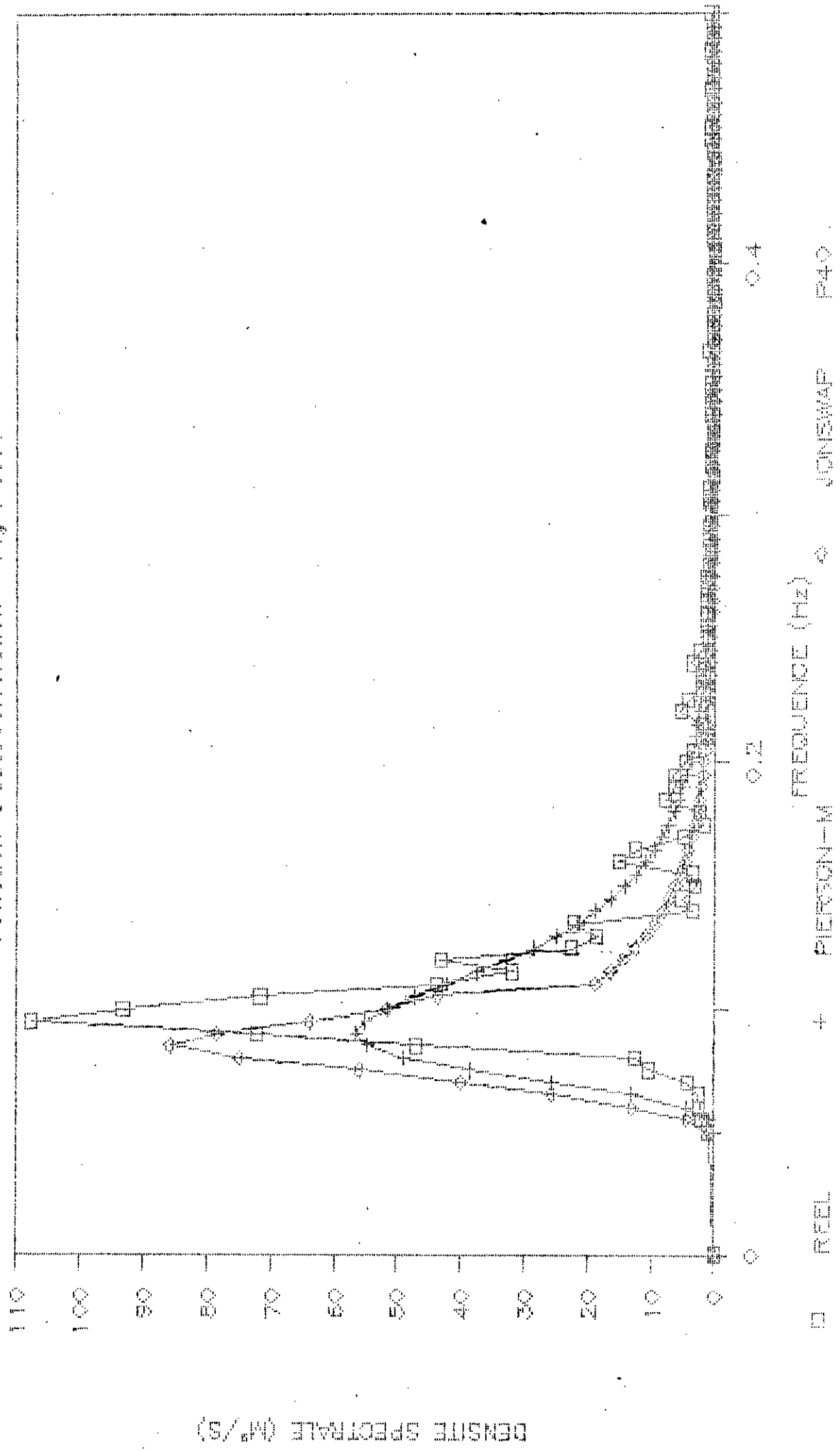
* La période moyenne du spectre : $T_m = [m_0 / m_2']^{0.5}$ [3.23]

* La largeur du spectre : $\sigma = [1 - m_2'^2 / m_0 m_4']^{0.5}$ [3.24]

Les figures: 3.16 et 3.17 illustrent les spectres des différentes tempêtes sur les sites de Skikda et Arzew avec intercalation des spectres théoriques type JONSWAP et PIERSON-MOSKOWITZ .

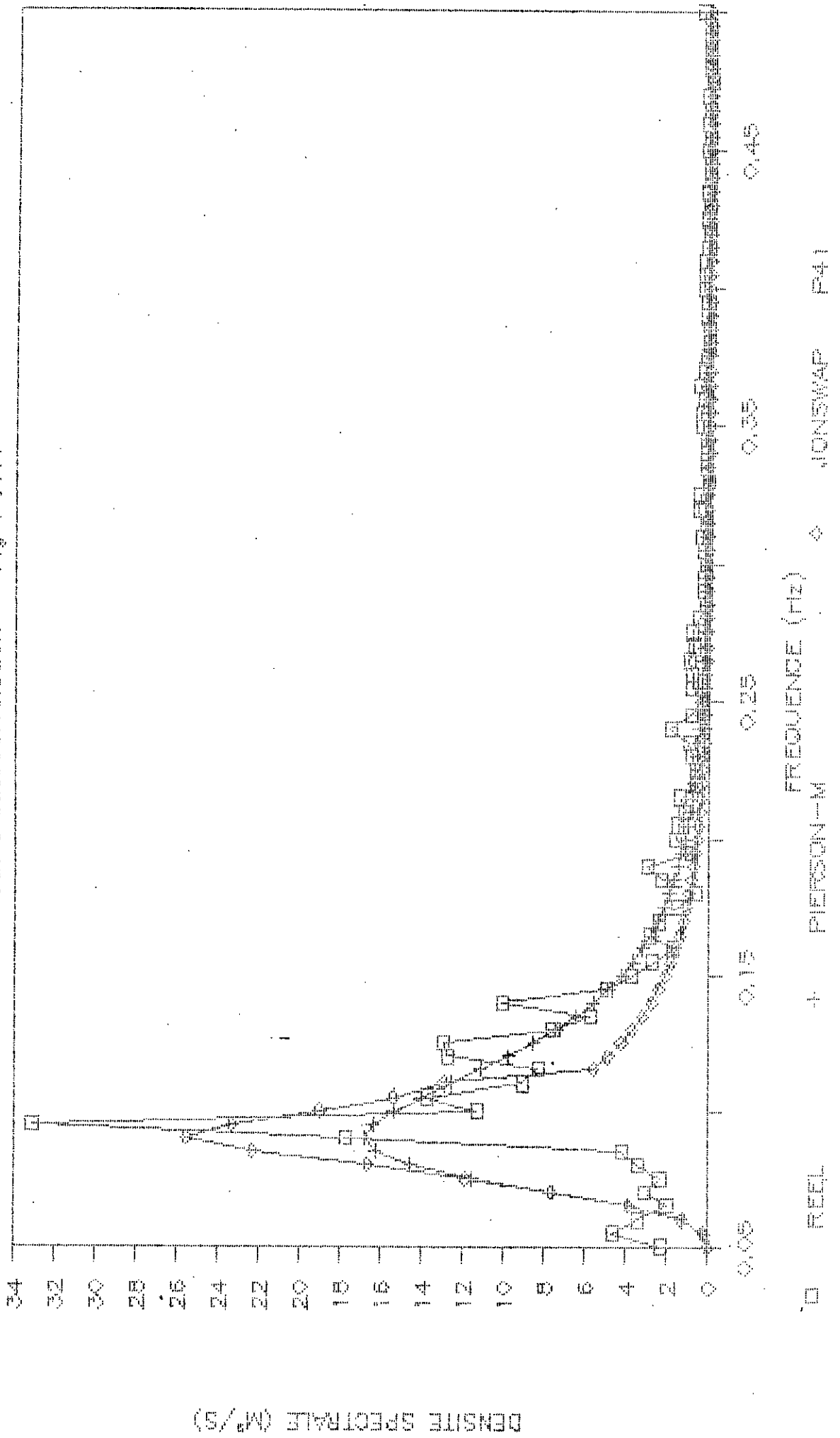
REPARTITION SPECTRALE DE L'ENERGIE

Fonction d'autocorrélation Fig : 3.16



REPARTITION SPECTRALE DE L'ENERGIE

Faith d'autocorrélation Fig : 3.17



3.4.2 Approche par la transformation de FOURIER rapide (TFR)

La transformation de FOURIER rapide (T.F.R) est la simplification de la transformation de FOURIER discrète (T.F.D) qui est la représentation fréquentielle des suites temporelles périodiques possédant les propriétés fondamentales suivantes :

#Le signal et son spectre sont des suites périodiques finies

#LES périodes du signal et les périodes du spectre contiennent le même nombre d'échantillons .

Pour discrétiser un signal il suffit de lui faire subir les trois opérations suivantes :

- * Un échantillonnage impulsionnel en le multipliant par un peigne de DIRAC dont la période T_1 satisfait le critère de NYQUIST .
- * Une limitation de la durée selon les capacités de mémoire des calculateurs en multipliant par une fenêtre de troncature de durée T_0 finie et suffisamment grande pour que son spectre puisse être assimilé à une impulsion de DIRAC et on obtient ainsi une suite tronquée de N échantillons tel que $N = T_0 / T_1$.
- * Une périodisation en convoluant la suite avec un peigne de DIRAC .

L'une des grandes raisons de l'usage de plus en plus répandu de la transformation de FOURIER discrète provient des simplifications de calcul numériques dues à l'algorithme de la transformation de FOURIER rapide (T.F.R) .

Propriétés de la T.F.D

Soit un signal représenté par une suite $x(k)$, sa T.F.D est une autre suite ayant pour expression :

$$X(n) = \sum_k x(k) \exp(-j 2\pi nk / N) \quad [3.25]$$

L'exponentielle $W^{nk} = \exp(-j 2\pi nk / N)$ constitue le noyau de la T.F.D caractérisé par trois propriétés :

1°) Périodicité : $W^{(rN+n)k} = W^{(rN)k} W^{nk} = W^{nk}$ avec r entier

2°) Conjugaison : $W^{(rN-n)k} = W^{(rN-k)k} = W^{nk}$

3°) Orthogonalité : $W^{(n'-n)k} = N$ si $n'-n = rN$
 $= 0$ autrement

L'expression de la T.F.D est : $X(n) = \sum_k x(k) W^{nk}$ [3.26]

Les T.F.D sont généralement de nature complexe :

$$\begin{aligned} X(n) &= \sum_k x(k) \exp(-j 2\pi nk / N) \\ &= \sum_k x(k) \cos(2\pi nk / N) - j \sum_k x(k) \sin(2\pi nk / N) \\ &= A(n) + j B(n) \end{aligned} \quad [3.27]$$

Algorithme de la T.F.R

L'ensemble des méthodes permettant d'accélérer le calcul de la T.F.D constitue la transformation de FOURIER rapide notée T.F.R en langue française et F.F.T en langue anglaise (fast FOURIER transformation).

Elle est essentiellement caractérisée par le concept d'états intermédiaire entre le signal et sa transformée .
 Le produit nk de l'expression [3.26] peut être développé par 2 méthodes différentes :

- La première méthode constituant l'algorithme de COOLEY , on développe nk aux dépens de k , c'est à dire qu'on effectue la décimation temporelle de nk
- La deuxième méthode constituant l'algorithme de SANDERSON , on développe nk aux dépens de n , dans ce cas on effectue une décimation fréquentielle .

Algorithme de COOLEY

Considérons un signal $x(k)$ et son spectre $X(n)$ dont chacune de leurs périodes est définie sur $N = 2^r$ points (r entier)
 k est noté au moyen de r digits binaires $k_0, k_1, k_2, \dots, k_{r-1}$
 nous disposons ainsi de 2 modes de notation :

- binaire $k = (k_{r-1}, k_{r-2}, \dots, k_1, k_0)$
- décimale $k = 2^{r-1}k_{r-1} + 2^{r-2}k_{r-2} + \dots + 2k_1 + k_0$

On utilise les même notation pour n .

Le développement de nk selon k donne :

- le 1^o terme de Wn^{nk} se réduit à Wn^{C_0}
 avec $C_0 = n_{r-1} \cdot 2^{r-1} \cdot k_{r-1}$
- le 2^o terme est égale à Wn^{C_1}
 avec $C_1 = (2n_{r-1} + n_{r-1}) \cdot 2^{r-2} \cdot k_{r-1}$

- le dernier terme est égale à $Wn^{C_{r-1}}$
 avec $C_{r-1} = (2^{r-1}n_{r-1} + 2^{r-2}n_{r-1} + \dots + 2n_{r-1} + n_{r-1}) \cdot k_0$

D'où l'expression de la T.F.D :

$$X(n) = \sum_{k_0} \sum_{k_1} \dots \sum_{k_{r-1}} x_{r-1}(k_{r-1}, k_{r-2}, \dots, k_0) Wn^{cn} Wn^{c^2 n} \dots Wn^{c^{r-1} n} \quad [3.27]$$

Pour simplifier cette formulation, on définit "r" signaux intermédiaires qui nous permettent de passer par récurrence du signal à son spectre.

* 1^{er} état intermédiaire :

$$X_{1c}(n_0, k_{r-2}, \dots, k_1, k_0) = \sum_{k_{r-1}=0} x_c(k_{r-1}, k_{r-2}, \dots, k_0) Wn^{cn}$$

* 2^{er} état intermédiaire :

$$X_{2c}(n_0, n_1, k_{r-3}, \dots, k_1, k_0) = \sum_{k_{r-2}=0} X_{1c}(n_0, k_{r-2}, \dots, k_0) Wn^{c^2 n}$$

* Le r^{er} état intermédiaire qui est le dernier :

$$X_{rc}(n_0, n_1, \dots, n_{r-1}) = \sum_{k_{r-1}=0} x_{r-1}(n_0, n_1, \dots, k_0) Wn^{c^{r-1} n}$$

Ces r - 1 états intermédiaire caractérisant la méthode de COOLEY peuvent être considérés comme résultat de la substitution des indices $k_{r-1}, k_{r-2}, \dots, k_0$ par n_0, n_1, \dots, n_{r-1} .

La T.F.D est la résultante du renversement des indices du dernier signal intermédiaire :

$$X(n_{r-1}, n_{r-2}, \dots, n_0) = X_{rc}(n_0, n_1, \dots, n_{r-1})$$

Pour un calcul de N échantillons la T.F.D exige N^2 opérations par contre la T.F.R elle ne demande que N opérations pour chaque signal intermédiaire et leur nombre est de $r = \log_2 N$ donc la T.F.R exige $N \log_2 N$ opérations.

Les figures 3.18 et 3.19 illustrent les spectres des différentes tempêtes tracés par la méthode de la T.F.R sur les sites de SKIKDA et d'ARZEW.

3.4.3 Présentation des programmes

Deux programmes ont été établis afin de tracer les différents spectres .

Le premier programme utilise la fonction d'autocorrélation permet de tracer le spectre et de le lisser en utilisant les fenêtres de troncature de "HANNING" et il donne les paramètres caractéristiques de ce spectre à savoir :

- * La densité spectrale maximale DS_{max}
- * La fréquence et la période de pointe
- * Les différents moments
- * La largeur du spectre
- * La hauteur significative

Afin de situer le spectre réel par rapport aux spectres théoriques le programme intercale 2 spectres théoriques du type JONSWAP et PIERSON-MOSKOWITZ .

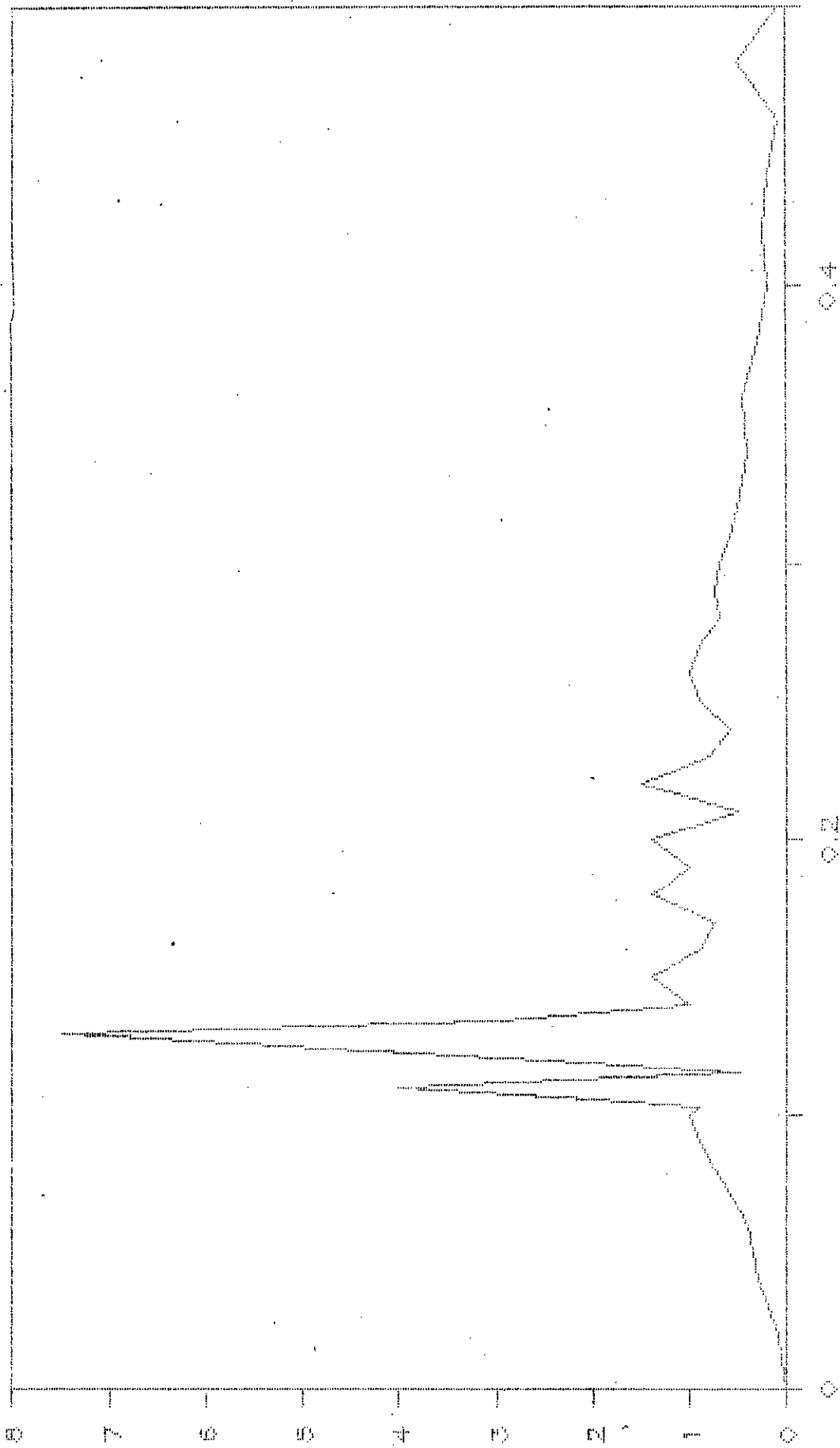
Le deuxième programme fait la même chose que le premier, mais pour tracer le spectre il utilise la T.F.R .

LES listings des 2 programmes sont en annexes .

Les résultats du traitement des enregistrements à l'aide des 2 programmes sont sur des Listings de fichiers résultats . L'analyse de ces résultats est présentée dans ce rapport .

REPARTITION SPECTRALE DE L'ENERGIE

SPECTRE TRACE A PARTIR DE LA TFR



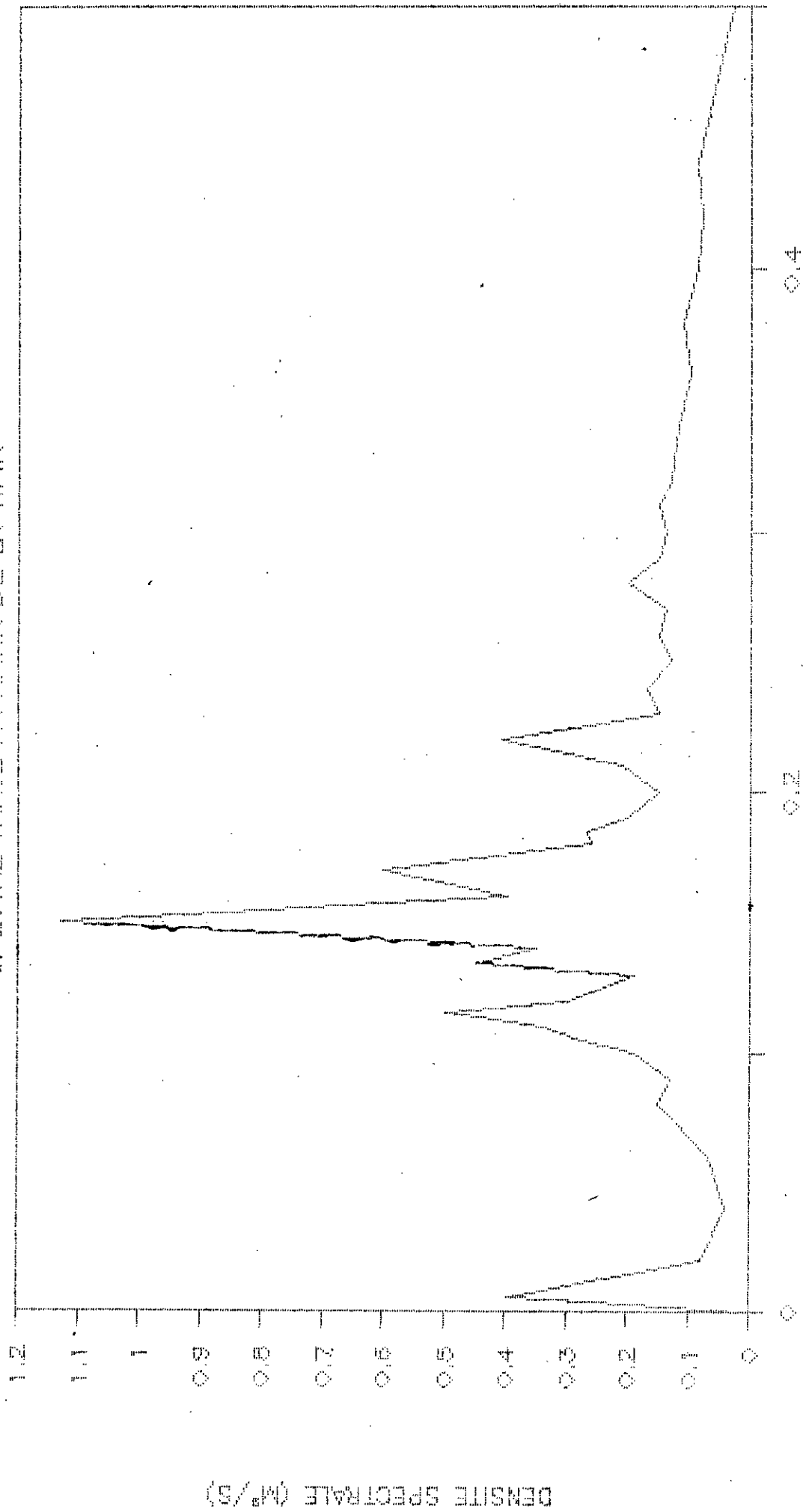
FREQUENCE (Hz)

Fig : 3.18 P47

DENSITE SPECTRALE (µV²/Hz)

REPARTITION SPECTRALE DE L'ENERGIE

SPECTRE TRACE A PARTIR DE LA T.F.R



FREQUENCE (HZ)

FIG : 3.19 P48

3.5 Conclusion

3.5.1 Analyse statistique

L'étude de la répartition des vagues nous a permis de constater que la distribution des hauteurs suit la loi de RAYLEIGH .

L'étude de la corrélation entre les différents paramètres de la houle nous a conduit à établir des relations qui nous permettent d'en déduire les paramètres de la houle en connaissant l'un d'entre-eux .

L'analyse statistique des enregistrements nous montre que les paramètres caractéristiques de la hauteur de houle sont très corrélés entres-eux .

L'analyse des valeurs des hauteurs significatives obtenues par les 5 méthodes différentes nous a permis de constater que la méthode de TUCKEY-DRAPER donne des valeurs de 19.5 % au dessus de la valeur moyenne par contre, les autres méthodes donnent des valeurs au dessous de la valeur moyenne :

* 8.0 % pour la méthode directe

* 3.0 % par la TFR

* 0.5 % pour la méthode des 2 plus grandes vagues .

3.5.2 Analyse spectrale

L'allure des spectres montrent que la densité spectrale décroît lentement pour les hautes fréquences et augmente rapidement pour les basses fréquences, ce qui est conforme à l'hypothèse théorique du mécanisme de formation des vagues :

L'action du vent sur la surface libre entraîne la formation des vagues de faibles amplitudes et périodes donc de hautes fréquences au début et avec l'augmentation du fetch ces vagues deviennent de plus en plus grandes jusqu'à une valeur limite qui est fonction de la vitesse du vent et de la profondeur de la mer. Par conséquent, la bande des hautes fréquences contient des vagues relativement jeunes.

Si les tempêtes deviennent plus fortes le maximum d'énergie dans le spectre se situe vers les basses fréquences.

Certains spectres présentent des doubles pics, ce qui correspond probablement à la superposition d'une tempête principale et d'une houle formée par des vents locaux.

Les spectres tracés présentent des pics assez grand, cela signifie que nous avons des groupements de vagues, c'est à dire une concentration d'énergie.

L'allure des spectres obtenus montre qu'ils sont beaucoup plus du type JONSWAP que de PIERSON-MOSKOWITZ, c'est à dire que les spectres méditerranéens, qui est une mer presque fermée ressemblent aux spectres de la mer du Nord, qui est une mer fermée.

CHAPITRE 4

Stabilité hydraulique de la carapace des digues à talus

4.1 Introduction

La protection des ports contre les houles est assurée par des digues ou des brises-lames qui sont soumis à l'action directe de la mer. Les digues forment des filtres vis-à-vis de la houle qui est considérée comme le phénomène excitateur de l'agitation dans le port.

L'énergie est dissipée au niveau de la carapace dont le dimensionnement des blocs qui la constituent se fait à l'aide de l'une des nombreuses formules en fonction des houles agissantes sur les digues.

Ces formules sont dégagées des nombreux travaux de laboratoire effectués au cours des trente dernières années et de l'examen de nombreux ouvrages existants.

Le comportement des éléments constituant la carapace est à analyser.

La stabilité du bloc de la carapace la plus critique est atteinte lorsque la houle provoque des forces d'ascension et de descente essayant de le déplacer de sa position initiale. La force la plus importante s'appliquant sur le bloc de la carapace est celle provoquée par la force de traînée qui est due à l'ascension de la houle. Les descentes des vagues entraînent un écoulement vers l'extérieur de la carapace avec formation des sous pression provoquant des forces orientées vers le bas de la pente. Ces forces sont maximales au dessus du niveau moyen des eaux.

Les forces tendant à pousser sur le talus sont induites par l'ascension de la houle ou par l'impact du déferlement plongeant qui entraîne la projection de masses d'eau contre le talus dont les vitesses se transforment en pressions considérables et brutales donnant des contraintes très élevées irrégulièrement réparties sur le talus .

Ces forces sont maximales au niveau moyen ou légèrement au dessus . Quand la descente (Run down) rencontre une nouvelle vague déferlante , un remous se forme sous ce déferlement qui provoque des grandes forces de soulèvement tendant à arracher ou tirer les blocs hors de leur place .

La force la plus importante pour la stabilité du bloc de carapace est provoquée par la houle , le poids du bloc est proportionnel au cube de l'amplitude des vagues , d'où l'importance de l'étude du régime de la houle qui a fait l'objet de la première partie de cette étude .

L'objet de la deuxième partie est l'étude de la stabilité des carapaces de digues à talus afin d'optimiser leur dimensionnement . Elle comporte 2 chapitres , le premier est consacré à la recherche bibliographique , quant au deuxième , il décrit les essais réalisés sur modèle réduit en canal à houle et les résultats de ces essais et leurs interprétations .

4.2 Recherches antérieures

De nombreux auteurs ont proposés des formules empiriques de stabilité hydraulique, basées sur les résultats d'études expérimentales en laboratoire.

Ces formules donnent le poids unitaire des blocs de la carapace soumis aux forces hydrodynamiques dues à la houle et aux forces statiques.

Forme générale des formules de stabilité

La formulation de l'action de la houle sur les blocs naturels ou artificiels d'un talus est très difficile à mettre en équation car la stabilité hydraulique dépend de l'imbrication des blocs et de leur forme, du déferlement des vagues sur le talus qui provoque des variations de pressions brutales et rapides.

Les différents types d'actions auxquelles sont soumis les blocs de carapace sont :

- * Actions statiques : poids des blocs, précontrainte due au tassement des sous-couches, aux effets de coin etc
- * Actions dynamiques : forces dues à l'action des vagues, chocs lors de la mise en place ou pendant les oscillations des blocs, actions fluctuantes lors des séismes
- * Actions chimiques : réaction des sulfates, etc
- * Actions thermiques : différences de température pendant la prise, gel-dégel

Parmi ces actions, les plus critiques pour les blocs lancés sont les actions statiques et dynamiques, par contre, pour les blocs de formes massives ce sont les actions dynamiques et thermiques.

Divers auteurs ont proposé des formules dont la forme générale est :

$$W = K * \frac{H^2 \cdot \Gamma_w}{(\delta - 1)} f(\alpha) \quad [4.1]$$

avec

- W : poids unitaire des blocs
- H : hauteur de la houle
- α : angle du talus
- Γ_w : poids volumique des blocs
- δ : densité des blocs par rapport à l'eau de mer
- K : coefficient tenant compte de l'imbrication et de la forme des blocs et d'autres paramètres qui n'apparaissent pas dans la formule .

Les formules de stabilité ont été établies à partir des conditions d'équilibre d'un bloc soumis au système de forces suivant :

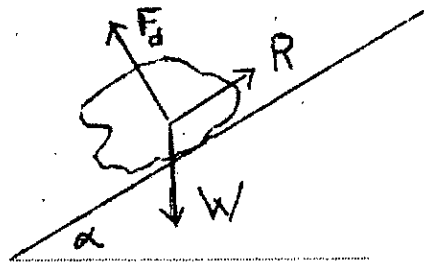


fig:4.1 schéma statique des forces

- * W : poids du bloc de composantes W_x et W_y
- * F_d : forces dynamiques dues à l'action de la houle
- * R : forces de frottement entre les blocs

Les formules de stabilité sont fondées sur l'hypothèse que la lame d'eau attaque le talus frontalement , et en se déferlant elle produit un jet perpendiculaire à la pente .

1°) Formule d'IRRIBARREN (Espagne) (1938)

L'une des plus anciennes formules est proposée par M. le professeur IRRIBARREN en 1938 :

$$W = \frac{K \quad H_1^3 \cdot \gamma_w}{(\cos \alpha - \sin \alpha)^3 \quad (\delta - 1)^3} \quad [4.2]$$

- * H_1 : amplitude de la houle au déferlement
- * γ_w : poids spécifique de l'eau de mer
- * K : coefficient en fonction de la forme des blocs

2°) Formule d'HUDSON (Etats-Unies) (1958-1959)

C'est l'une des formules la plus utilisée pour le dimensionnement des blocs de carapace .

Elle est basée sur les résultats de très nombreux essais effectués au laboratoire du C.E.R.C à Vicksburg (Etats-Unies).

$$W = \frac{\text{tg} \alpha \quad H^3 \cdot \gamma_w}{K_d \quad (\delta - 1)^3} \quad [4.3]$$

- * K_d : coefficient de stabilité adimensionnel qui varie essentiellement avec :- la forme des blocs
 - la rugosité de la carapace
 - le degrés d'accrochage obtenu lors de la pose des blocs

" C.E.R.C " Coastal Engineering Research Center

3°) Formule de LARRAS (France) (1952)

Cette formule proposée par M. l'Ingénieur générale des ponts et chaussées LARRAS doit être appliquée pour des profondeurs D supérieures ou égales aux profondeurs de déferlement.

$$W = \frac{K \cdot \left| \frac{2\pi H/L}{\sin h \cdot 4\pi D/L} \right|^2}{L \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha)^2} \cdot \frac{H^3 \cdot \Gamma_w}{(\delta - 1)^2} \quad [4.4]$$

où L : longueur d'onde de la houle
 K : coefficient en fonction de la forme des blocs
 H : est l'amplitude de la houle pour la profondeur D ,
 calculée à partir des formules suivantes :

$$H = H_p \left[L_p / L \right]^*$$

$$L \coth(2\pi D / L) = L_p \coth(2\pi D_p / L_p)$$

D_p , L_p et H_p profondeur , longueur d'onde et hauteur des lames au pied de la digue .

4°) Formule d'IRRIBARREN modifiée par NOGALES (Espagne)

Cette formule a la même expression que la formule originale d'IRRIBARREN , elle est modifiée en 1950 par NOGALES en remplaçant H₁ par H₁' et les valeurs de m sont différentes de celles de la formule originale .

$$W = \frac{K \cdot H_1' \cdot \Gamma_w}{(\cos \alpha - \sin \alpha)^2 \cdot (\delta - 1)^2} \cdot \frac{\pi H_1 / L}{\text{sh}^2(2\pi D / L)} \quad [4.5]$$

avec $H_1' = H_1 \frac{1}{\text{sh}^2(2\pi D / L)}$ D < 0.06 L

5°) Formule d'IRRIBARREN modifiée par HUDSON (1955)

Elle est fondé sur l'hypothèse que la lame se brise sur le talus en l'attaquant frontalement, ainsi que le bloc, et produit un jet perpendiculaire à la pente. Le bloc est en équilibre instable si les forces de frottement sont égales à la composante du poids déjaugé suivant la pente du talus.

$$W = \frac{K' f^2 H^3 \gamma_w}{(f \cos \alpha - \sin \alpha)^2 (\delta - 1)^2} \quad [4.6]$$

avec f : coefficient de frottement du bloc
 K' : coefficient adimensionnel dépendant de l'angle du talus α et du rapport D_p / L

Divers autres formules ont été proposées à travers le monde afin de déterminer le poids des blocs de la carapace dont quelques unes sont données par le tableau suivant :

Pays Auteurs Références	Formule générale	Valeurs numériques des coefs
<u>Espagne</u> Castro (17)	$W = \frac{0.704 H^3 \cdot \Gamma_m}{(\cot \alpha + 1)^2 [\cot \alpha - 2/\Gamma_m] * (\delta - 1)^2}$	$\Gamma_m = 2.65$
<u>Espagne</u> Iribarren (18, 19, 20)	$W = \frac{K H^3 \cdot \Gamma_m}{(\cos \alpha - \sin \alpha)^2 (\delta - 1)^2}$	$K = 0.023$ pour $D \leq 0.05 L$
<u>Espagne</u> Iribarren (21)	$W = \frac{K H^3 \cdot \Gamma_m}{(\mu \cos \alpha - \sin \alpha)^2 (\delta - 1)^2}$	$K = 0.43$ $\mu = 2.38$
<u>Etats-unis</u> Mathews (non pub1)	$W = \frac{0.0149 H^3 \cdot \Gamma_m \cdot T}{(\cos \alpha - 0.75 \sin \alpha)^2 (\delta - 1)^2}$	$T = 2.5 H$
<u>Etats-unis</u> Epstein (22)	$W = \frac{K H^3 \cdot \Gamma_m}{(\mu - \tan \alpha)^2 (\delta - 1)^2}$	$K = K(\alpha, \mu, D/L)$
<u>Etats-unis</u> Hickson (23)	$W = \frac{0.0162 H^3 \cdot \Gamma_m \cdot T}{\tan^2 [45^\circ - \alpha/2] (\delta - 1)^2}$	$T = 2.5 H$
<u>Etats-unis</u> Hudson (24, 25)	$W = \frac{1 H^3 \cdot \Gamma_m}{Kd \cot \alpha (\delta - 1)^2}$	voir 5.7
<u>France</u> Larras (26)	$W = \frac{K \cdot \left[\frac{2\pi H/L}{\sin h \cdot 4\pi Z/L} \right]^2 H^3 \cdot \Gamma_m}{(\cos \alpha - \sin \alpha)^2 (\delta - 1)^2}$	$K = 0.0152$ avec $Z = H/2$ et $H/L < 0.1$

Pays Auteurs [†] Références	Formule générale	Valeurs numériques des coefs
<u>France</u> Beaudevin (27)	$W = K \cdot K_{\omega} \left[\frac{1}{\cotg \alpha - 0.8} - 0.15 \right] \frac{H^3 \cdot \Gamma_{\omega}}{(\delta - 1)^3}$	$K = 0.10$ $K_{\omega} = 2.5$
<u>Suède</u> Hedar (28)	$W = \frac{K}{(\cos \alpha - \sin \alpha)^2} \frac{H^3 \cdot \Gamma_{\omega}}{(\delta - 1)^3}$	$K = 0.015$
<u>Suède</u> Hedar (29)	$W = \frac{K \cdot K_1^2}{(\mu \cos \alpha - \sin \alpha)^2} \frac{H^3 \cdot \Gamma_{\omega}}{(\delta - 1)^3}$	$K = 0.1113 \cdot 10^{-3}$ $\mu = 1.11$ $K_1 = K_1(\alpha)$
<u>Norvège</u> Svee (30)	$W = \frac{K}{\cos^3 \alpha} \frac{H^3 \cdot \Gamma_{\omega}}{(\delta - 1)^3}$	$K = 0.12$
<u>U.R.S.S</u> SN-92-60 (31)	$W = \frac{K}{[1 + \cotg^3 \alpha]^*} \frac{H^3 \cdot \Gamma_{\omega} \cdot L}{(\delta - 1)^3}$	$K = 0.025$ $L = 20 H$
<u>U.R.S.S</u> Ryhtchevs- ky (32)	$W = \frac{K}{(\cos^3 \alpha \cdot [\cotg^3 \alpha]^*)} \frac{H^3 \cdot \Gamma_{\omega} \cdot L}{(\delta - 1)^3}$	$K = 0.015$ $L = 20 H$
<u>U.R.S.S</u> Metelicyna (33)	$W = \frac{K \cdot K_{\omega}}{\cos^3(23^\circ + \alpha)} \frac{H^3 \cdot \Gamma_{\omega}}{(\delta - 1)^3}$	$K = 0.015$ $K_{\omega} = 1.5$
<u>U.R.S.S</u> Goldschte- in (34)	$W = 0.3 \cdot K \cdot \frac{\text{tg}^3 \alpha}{(\delta - 1)^3} \frac{H^3 \cdot \Gamma_{\omega}}{(\delta - 1)^3}$	$K = 1.40$ pour $H < 5 \text{ m}$

4.3 Conclusion

Les formules de prédimensionnement ne donnent qu'une approche de la taille des blocs , le dimensionnement définitif est fait à l'aide d'essais hydrauliques tridimensionnel en bassin et bidimensionnel en canal à houle .

Le chapitre suivant présente les essais systématiques réalisés sur modèle réduit en canal à houle .

Il est abordé par une brève introduction à la similitude mécanique , ensuite on décrit les conditions de similitude hydraulique et le dispositif expérimental ainsi que le modèle réalisé .

Après on passe à la présentation des essais effectués et on termine par l'analyse des résultats .

Elle nous a permis de tirer des conclusions sur le comportement des blocs de carapace suivant l'influence des paramètres dynamiques tels que la hauteur et la période de la houle sollicitant l'ouvrage et les paramètres géométriques tels que la pente du talus et la taille des blocs .

CHAPITRE 5

Essais sur modèle réduit en canal à houle

5.1 Introduction à la similitude mécanique

Afin de résoudre certains problèmes d'engineering , il est nécessaire d'introduire certaines hypothèses simplificatrices pour permettre à la théorie de proposer une solution qui doit être corrigée ou confirmée par l'expérience .

La recherche expérimentale pose un problème dans l'édification d'une synthèse des résultats obtenus surtout quand le nombre de grandeurs variables est élevé comme en travaux maritimes . Pour cette raison , on se limite dans cette étude de stabilité hydraulique des carapaces , à faire varier uniquement la pente du talus et la taille des blocs ainsi que la hauteur et la période de la houle .

5.2 Condition de similitude hydraulique

Le mouvement d'un fluide réel dans un champs de pesanteur est régit par l'équation de NAVIER-STOCKES dans la projection sur l'axe verticale :

$$\frac{\delta p}{\rho \delta z} = -g - \left(u \frac{\delta u}{\delta x} + v \frac{\delta v}{\delta y} + w \frac{\delta w}{\delta z} \right) + \nu \left(\frac{\delta^2 u}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 v}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 w}{\delta z^2} \right) - \frac{\delta w}{\delta t} \quad [5.1]$$

où P : pression

u, v, w : composantes de la vitesse

ν : viscosité cinématique

Si on désigne par n_L l'échelle des longueurs

n_r	"	"	masses spécifiques
n^ν	"	"	viscosités cinématiques
n_v	"	"	vitesse
n_F	"	"	forces
n_t	"	"	temps
n_p	"	"	pressions
n_a	"	"	accélérations

Un mouvement ne peut être semblable à celui-ci que s'il vérifie l'équation :

$$\frac{n_p}{n_r n_L} \frac{\delta p}{\Gamma \delta z} = -n_a g - \frac{n_v^2}{n_L} \left(u \frac{\delta w}{\delta x} + v \frac{\delta w}{\delta y} + w \frac{\delta w}{\delta z} \right) - \frac{n_v}{n_t} \frac{\delta w}{\delta t} +$$

$$\frac{n_t n_v}{n_L} \left[\frac{1}{L} \frac{\delta}{\delta z} \text{Laplacien } V + \frac{1}{3} \frac{\delta}{\delta z} (\text{grad } V) \right] \quad [5.2]$$

Parmi les forces intervenant dans une étude de stabilité les forces d'inertie et de pesanteur sont prédominantes par rapports aux forces de viscosité .

Les deux équations précédentes deviennent :

$$0 = -g - \left(u \frac{\delta w}{\delta x} + v \frac{\delta w}{\delta y} + w \frac{\delta w}{\delta z} \right) \quad [5.3]$$

$$0 = -n_a g - \frac{n_v^2}{n_L} \left(u \frac{\delta w}{\delta x} + v \frac{\delta w}{\delta y} + w \frac{\delta w}{\delta z} \right) \quad [5.4]$$

Ces 2 équations ne sont vérifiées que si la relation suivante soit vérifiée :

$$n_m = n_v^2 / n_L \quad \text{condition de REECH et FROUDE}$$

Il en résulte que la loi de similitude de FROUDE est applicable pour convertir les conditions du modèle vers les conditions en nature .

Les échelles dérivées de l'échelle géométrique selon la loi de FROUDE sont comme suit :

Echelle des temps	:	$n_t = [n]_{L^{\frac{1}{2}}}$
" " vitesses	:	$n_v = [n]_{L^{\frac{1}{2}}}$
" " masses	:	$n_m = n_L^3 \Gamma$
" " forces	:	$n_F = n_L^3$
" " accélérations	:	$n_a = n_g = 1$

5.3 Dispositif expérimental équipement utilisé

5.3.1 Canal à houle

Les modèles des profils étudiés ont été construit dans un canal à houle de 39 mètres de longueur ; 1.10 mètres de profondeur et 0.6 mètres de largeur .

Il est équipé à l'une de ces extrémité d'un générateur de houle et à l'autre d'un amortisseur d'énergie . Fig:5.1

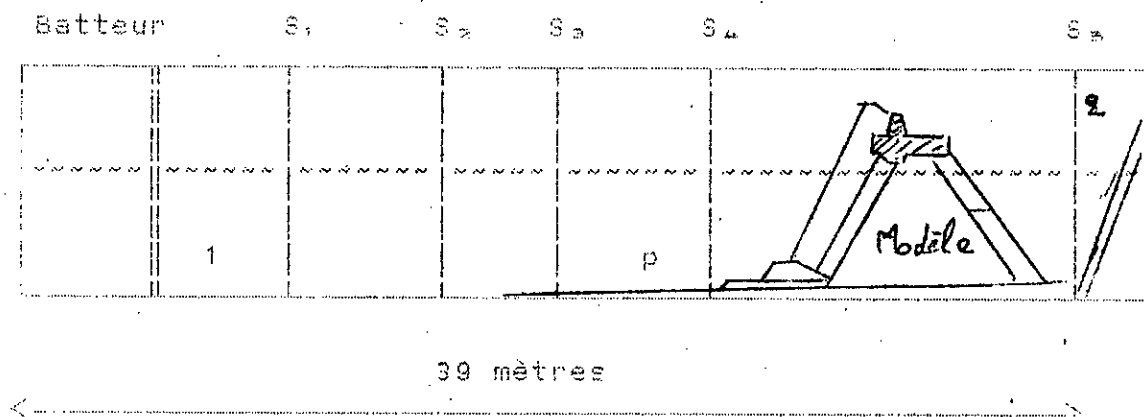


Fig:5.1 Schéma du canal à houle

- * 1 : Fond du canal
- * 2 : Amortisseur d'énergie
- * S : Sondes de mesures
- * p : Pente de fond devant l'ouvrage = 1.5 %

5.3.2 Houles générées

La houle irrégulière est générée au moyen d'un batteur à plan réglable suivant un programme prédéfini en fonction des caractéristiques des houles désirées en utilisant une bande perforée des enregistrements de houle effectués en nature sur la cote entre Issers et Cap-Djinet .

Le réglage de la vitesse de lecture de la bande et l'amplification du signal permis de produire les périodes et les hauteurs de houle désirées .

Le spectre de l'enregistrement en nature utilisé pour cette étude est représenté sur la figure :5.2

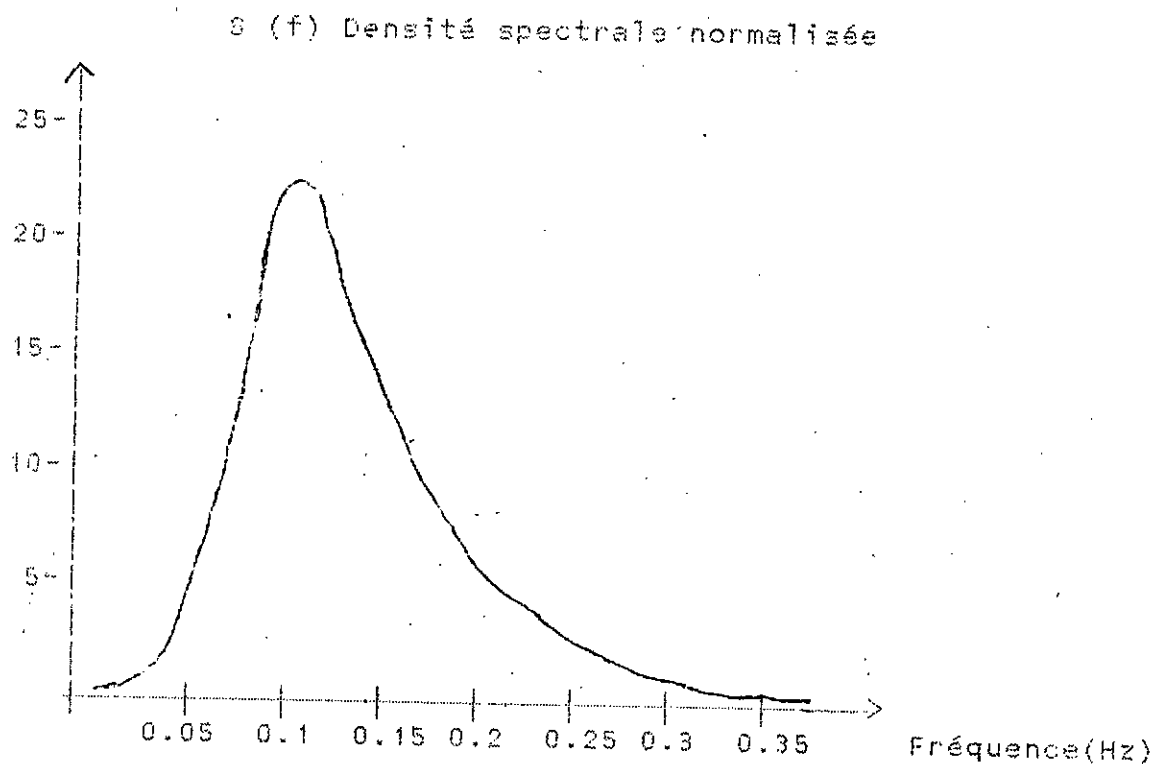


Fig 5.2

Les paramètres caractéristiques de la houle sont :

- * $H_s = 3.46$ m
- * $H_{max} = 6.56$ m
- * $T_p = 10.2$ s

Ces valeurs sont semblables aux valeurs des paramètres de houle des enregistrements analysés en première partie de cette étude , mais le rapport $H_{max} / H_s = 1.89$ pour cet enregistrement est assez élevé par rapport aux autres qui est de 1.34 pour Skikda et de 1.56 pour Arzew et de 1.56 pour Béjaïa . Quant au spectre il présente une allure semblable à ceux de Skikda et d'Arzew , les périodes de pic sont du même ordre de grandeur .

La période de pointe f_0t variée dans le modèle dans la gamme de 8 à 15 s ainsi que la hauteur significative .

La relation entre H_s et T_p utilisée pendant les essais est donnée par le tableau suivant :

H_s (m)	3.5	4.3	5.4	7.0	7.8	8.9	10	11
T_p (s)	8	9	10	11	12	13	14	15

5.3.3 Disposition des sondes de mesures

Les sondes de mesures du niveau de la surface libre ont été implantées afin d'enregistrer la houle dans le canal .

Ces capteurs de houle sont basés sur le principe de conductivité électrique entre 2 électrodes .

L'acquisition des données et la digitalisation des mesures sont réalisées et le traitement des enregistrements sont effectués directement par micro-processeur DHI (Multichannel Wave Analyzer III) , relié directement à 5 capteurs dont 4 à l'amont de l'ouvrage pour mesurer la houle qui le sollicite .

La hauteur significative dérivant du spectre d'énergie de la houle est définie comme suit : $H_s = 4 * R.M.S$ [5.5]
 (" R.M.S " = Root Mean Square = Ecart type)

$$R.M.S = \sqrt{\frac{1}{T_{total}} \int_0^{T_{total}} h^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T_{total}} \int_0^{T_{total}} \sum h_i^2 \delta t} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum h_i^2} \quad [5.6]$$

$T_{total} = m \delta t =$ durée totale d'essai

5.4 Réalisation du modèle

5.4.1 Echelle du modèle

L'échelle du modèle a été choisie de telle façon qu'un bon compromis fût trouvé entre les facilités du canal à houles, les éléments de la carapace qui sont disponibles dans le stock du laboratoire et la précision de mesure nécessaire.

En générale l'échelle géométrique varie entre 1/20 et 1/70 de telle manière à avoir un nombre de REYNOLDS suffisamment élevé pour respecter le régime d'écoulement.

L'échelle géométrique du modèle est fixée à $N_l = 50$.

D'après la loi de similitude de FROUDE les autres échelles sont :

$$N_v = [50]^* \quad \text{pour les vitesses}$$

$$N_m = [50]^3 \quad \text{pour les masses}$$

$$N_F = [50]^3 \quad \text{pour les forces}$$

$$N_a = N_g = 1 \quad \text{pour les accélérations}$$

5.4.2 Configuration du fond

La configuration du fond devant les ouvrages à étudier correspond à une situation réelle considérée lors d'une étude antérieure (nouveau port de Skikda). La pente du fond marin a été fixée à 1.5 % pour tous les profils étudiés.

Ces fonds ont été construits en sable recouvert d'une couche de mortier de ciment.

5.4.3 Choix des matériaux

Les matériaux de construction qui ont été utilisés pour la construction des profils ont été déterminés par la conversion des grandeurs en nature en appliquant la loi de similitude de FROUDE, en introduisant une compensation de la distorsion due à la masse volumique de l'eau de mer qui est $\rho_w = 1.025 \text{ g/cm}^3$ et l'eau douce utilisée en canal qui est $\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$ en agissant sur la densité des blocs et le poids des enrochements en modèle.

Cette correction est faite en appliquant le théorème de π de BUCKINGHAM et la formule de stabilité d'HUDSON :

$$W = f(H_s, \Gamma_s, \delta, \sigma)$$

Les dimensions de chacun de ces paramètres sont :

W	H _s	Γ _s
M	L	M/L ³

Où M : masse

L : longueur

Paramètres respectifs H, Γ_s ayant L en commun

$$\pi = W * H_s^a * \Gamma_s^b = M L^a (M/L^3)^b = M^0 L^0$$

$$\implies a = -3 \quad \text{d'où} \quad \pi = W * H_s^{-3} * \Gamma_s^{-1}$$

$$b = -1$$

On obtient un nombre adimensionnel N appelé nombre de stabilité :

$$N = H_s^3 * \Gamma_s / (W * (\delta - 1)) \quad [5.7]$$

qui doit être égale en nature et en modèle on obtient ainsi les valeurs suivantes :

Tableau des correspondances nature-modèle

Nature (T)	Modèle (Ga)
0.0 - 0.5	00.00 - 03.44
0.5 - 2.0	03.44 - 13.76
2.0 - 5.0	13.76 - 34.40
5.0 - 8.0	34.40 - 55.10
15	117
17	133
25	195
33	260
60	468

5.4.4 Détermination des épaisseurs des couches et du nombre de blocs mis en place

Les épaisseurs des carspaces et des sous-couches sont estimées par la formule [12] :

$$e = n K_e (W/\Gamma_s)^{1/3} \quad [5.8]$$

où n : nombre de couches

e : épaisseur du bloc

W : poids du bloc

Γ_s : poids spécifique du bloc

K_e : coefficient dépendant de la forme des blocs
dénomé coefficient de couche

Le nombre de blocs par unité de surface est calculé par l'expression suivante :

$$N_s = n K_m (1-p)(\Gamma_s/W)^{2/3} \quad [5.9]$$

où p : porosité de la carapace égale à 47%

Les valeurs de e , de N_s et le nombre de blocs mis en place sont données par le tableau suivant :

W (t)	e (m)	Ns	nombre de blocs de carapace					
			pente=4/3		3/2		2/1	
15	4.11	.08344	440	449*	480	486*	530	571*
17	4.28	.07660	404	419*	442	460*	534	543*
25	4.87	.05930	313	305*	342	344*	413	420*
33	5.35	.04899	258	269*	282	-	340	-
60	6.50	.03310	175	174*	190	-	230	-

* : Nombre réel de blocs mis en place

5.4.5 Description des profils

11 profils de digues à talus furent construits et étudiés au cours des essais .

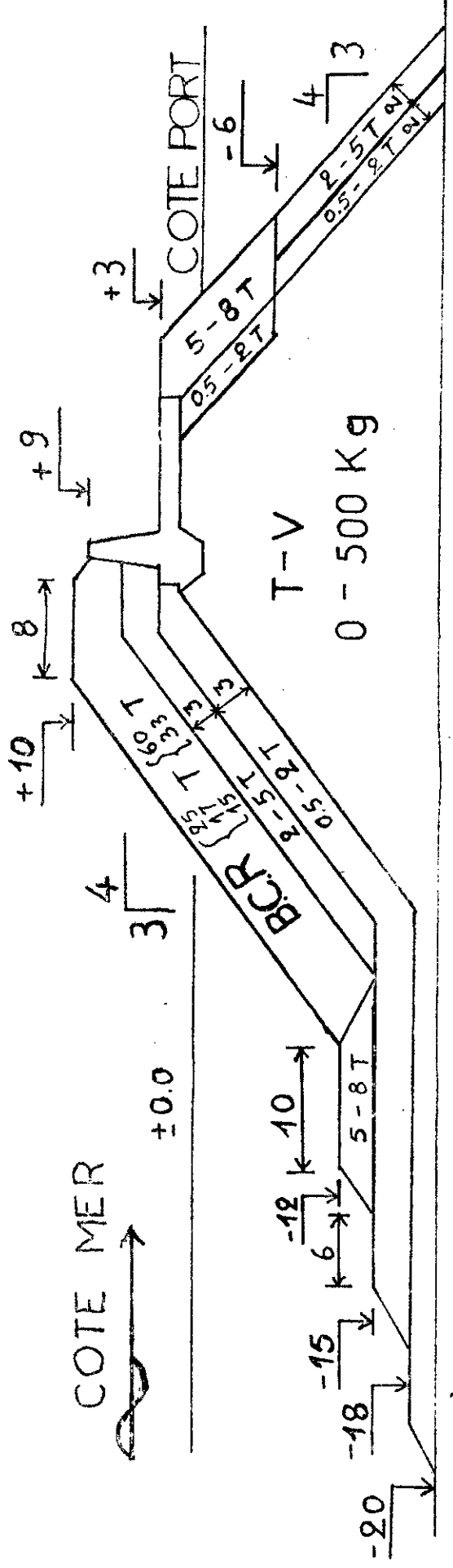
Le noyau et le soubassement sont en tout venant (0-500 Kg), ils sont fondée à -20.00 m de profondeur .

Le noyau est protégé du côté large par une carapace en blocs cubiques rainurés arasés à +10.00 m reposant sur 2 sous-couches d'épaisseur 3 m chacune en enrochement de poids s'étalant respectivement entre 0.5 à 2.0 t et 2.0 à 5.0 t .

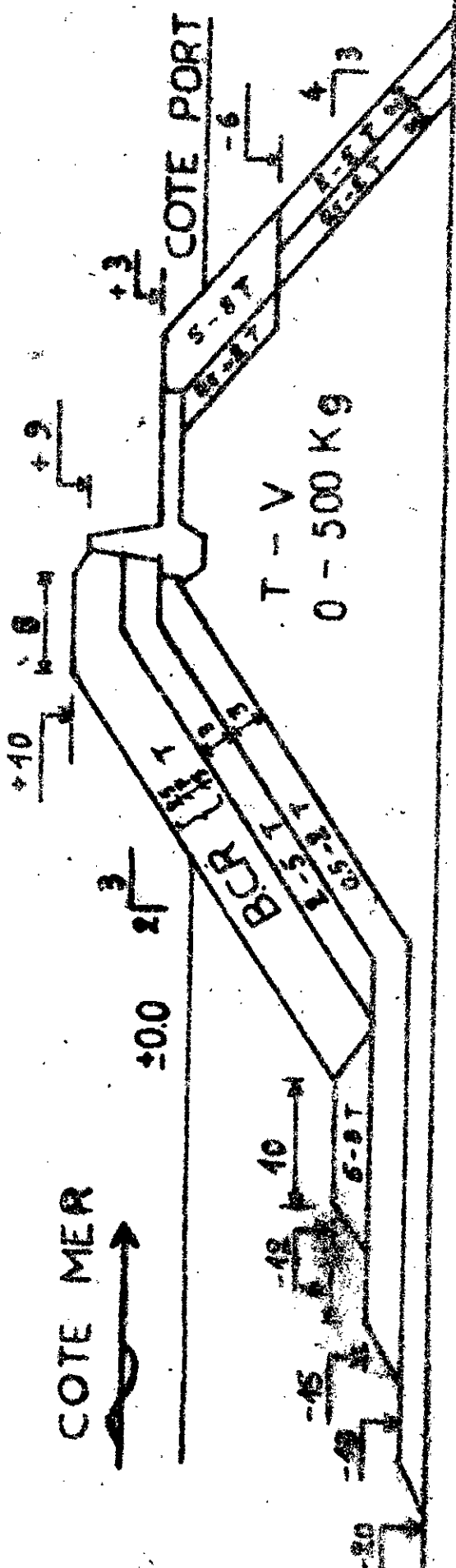
La butée de pied de largeur 5 m , arasée à -12 m est constituée d'enrochement de 5.0 à 8.0 t reposant à -15 m sur la première sous-couche qui elle même repose sur le soubassement à -18 m .

Du côté port le noyau est protégé par 2 sous-couches en enrochement de poids variant respectivement de 0.5 à 2.0 t et de 2.0 à 5.0 t et de 2 m d'épaisseur chacune jusqu'à la cote -6 m et au dessus par 2 couches la première de poids 0.5 à 2.0 t , d'épaisseur 2 m et la deuxième de 5.0 à 8.0 t d'épaisseur 4 m .

Le couronnement de 14 m de largeur est munis d'un mur de garde dont la cote supérieur est à + 9 m et d'une bache assurant un meilleur encastrament de celui-ci : Fig:5.3



<p>ECHELLE: 1:500</p>	<p>ESSAIS SUR MODELE REDUIT EN CANAL A HOULE</p>
<p>FIGURE: 5.3 a</p>	<p>PROFILS N° 1,2,3,4,5 PENTE 4/3</p>

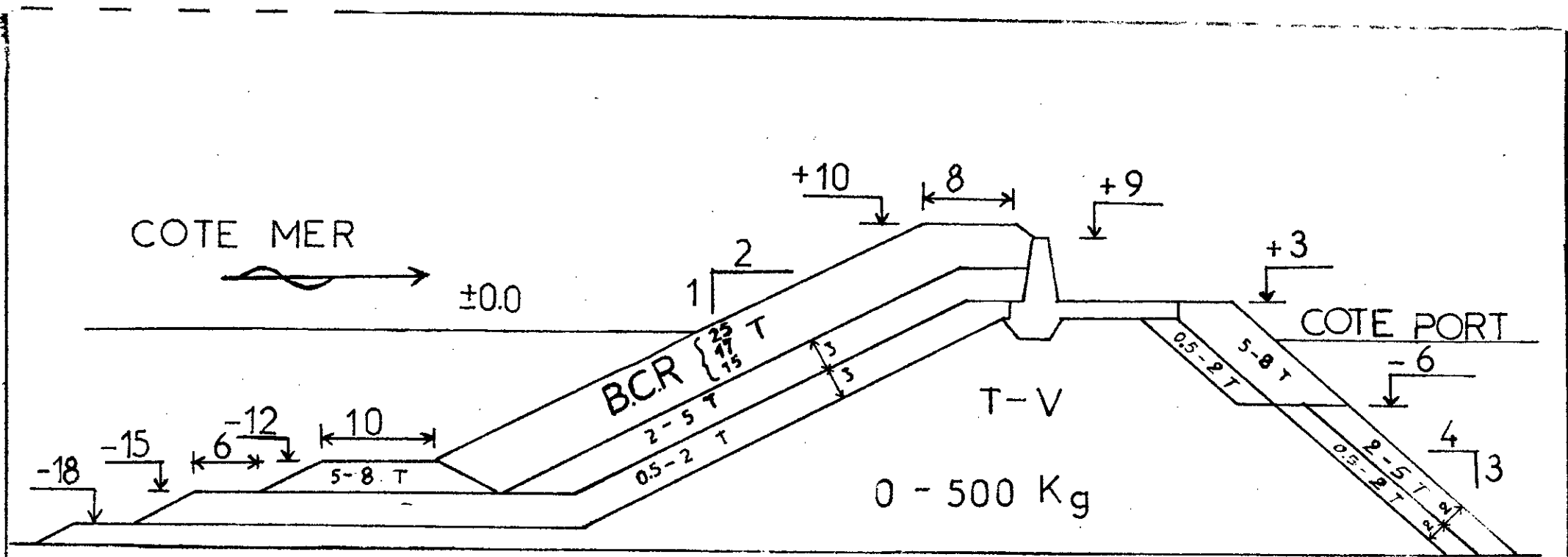


ESSAIS SUR MODELE REDUIT EN CANAL A HOULE

PROJET N° 318 PARTIE 3.1

ECHELLE: 4:500

FIGURE 5.3



ESSAIS SUR MODELE REDUIT EN CANAL A HOULE

ECHELLE: 1:500

PROFILS N° 9; 10; 11 PENTE 2/1

FIGURE: 5.3 c

5.5 Essais effectués

5.5.1 Programme d'essai

Les essais sont exécutés avec une attaque frontale des houles . L'étude se rapporte à la stabilité des profils constitués de carapaces en blocs cubiques rainurés de taille respectivement de 60 ; 33 ; 25 ; 17 ; 15 tonnes pour chacune des valeurs de pente suivantes : $4/3$; $3/2$; $2/1$.

Vue les résultats obtenus avec les blocs de 60 et 33 t sur un talus de pente $4/3$, alors ils n'ont pas été étudiés avec les pentes plus douces qui sont de $3/2$ et $2/1$.

Donc 11 profils au total ont été testés afin d'étudier leur comportement du point de vue stabilité hydraulique .

5.5.2 Conditions d'essais

Lors des essais , l'amplitude significative des houles a été augmentée par paliers progressifs à partir d'une valeur relativement petite de l'ordre de 2 à 3 m où il n'y avait pas encore des dégâts , jusqu'à la valeur maximale réalisable qui varie de 10 à 13 m .

Chaque palier , la durée du test est de 10 minutes ce qui correspond à environ 1 heure et 10 minutes en nature .

Après chaque étape les dégâts furent enregistrés sur photographie et par description . Les dégâts ne furent pas réparés avant la prochaine étape , donc on a enregistré des dégâts cumulatifs .

Chaque essai contient environ 8 paliers , ce qui simule pour chaque profil testé une tempête d'une durée équivalente à 9 heures et 30 minutes en nature .

Tous les essais ont été exécutés avec une attaque frontale des houles .

5.5.3 Critère d'estimation des dégâts sur la carapace

Les critères d'estimation des dégâts diffèrent suivant le type de blocs constituant la carapace .

Pour les carapaces en enrochements les dégâts sont estimés en fonction de la surface érodée .

Pour les blocs élancés tels que les tétrapodes qui risquent de se casser au moindre mouvement , alors même les oscillations , sont considérées comme étant des dégâts .

Par contre les blocs cubiques rainurés qui sont des blocs compacts les oscillations ne sont pas prise en compte lors des estimations des dégâts parce que les blocs ne risquent pas de se casser .

Les dégâts sont estimés en fonction du pourcentage des blocs qui chutent hors de la carapace rajouté du pourcentage des blocs qui se déplacent tout en restant sur la carapace affecté d'un coefficients pris égal à 0.5 et cela est dûe au fait qu'il contribue à la dissipation de l'énergie des vagues d'une part,puisque'il est encore sur la carapace et d' autre part il laisse un vide à sa place initiale,ce qui diminue le facteur d'imbrication entre les blocs voisins.

Les franchissements sont estimés visuellement et sont classés en 5 niveaux qui sont :

- * A : pas de franchissement
- * B : quelques franchissements
- * C : franchissement assez important
- * D : franchissement important
- * E : franchissement très important

5.5.4 Résultats des essais

Lors de l'étude plusieurs paramètres hydrauliques ont été observés et estimés à savoir :

- * Les dégâts sur la carapace
- * Les oscillations
- * La tenue de la butée
- * La stabilité du talus arrière et du couronnement
- * Les franchissements et les déferlements

Les résultats des essais sont présentés sur les tableaux suivants :

Résultats d'essai du profil N° : 1

Pente		Poids des blocs en (t)		Nombre de blocs			Observations
4/3		60		174			
Description d'essai			Stabilité observée				
Test N°	Hs (m)	Tp (s)	Nbre vague	C	D	F	
1	3.43	8	559	0	0	A	oscillation d'un bcr
2	5.30	9	507	0	0	B	oscil d'un bcr
3	6.67	10	452	0	0	B	oscil de 2 bcr , chute de 2 enr de la butée
4	8.57	11	423	0	2	B	oscil de 6 bcr, chute de qlq enr du tapis de pied butée commence s'étaler.
5	9.05	12	402	0	2	C	oscil de 4 bcr, butée continue à s'étaler, défer sur la carapace
6	11.08	13	351	0	2	D	début d'érosion du talus arrière, butée complt étalée, défer import, RunDown jusqu'à -9.0 m

Observations :

- * Les dégâts sont cumulatifs
- * C = nombre de blocs ayant chutés hors de la carapace
- * D = nombre de blocs déplacés mais restent sur la carapace
- * F = franchissement ; complt = complètement
- * bcr = bloc cubique rainuré ; oscil = oscillation ;
- * enr = enrochement ; s/c = sous-couche
- * défer = déferlement ; crp = carapace ; t-a = talus arrière
- * deplt = déplacement ; impnt = important
- * qlq = quelques ; cournt = couronnement

Résultats d'essai du profil N° : 2

Pente		Poids des blocs en (t)			Nombre de blocs		
4/3		33			269		
Description d'essai				Stabilité observée			Observations
Test N°	Hs (m)	Tp (s)	Nbre vague	C	D	F	
1	2.81	8	538	0	0	A	oscil d'un bcr
2	4.22	9	513	0	1	A	oscil de 12 bcr
3	5.48	10	461	0	1	B	qlq oscil de bcr, butée et tapis de pieds commencent à s'étaler
4	7.17	11	417	1	1	B	butée continue à s'étaler, début de défer, oscil de qlq bcr
5	7.34	12	394	1	2	C	les grosses vagues balatoute la crp, début d'érosion du t-a, défer, butée continue à s'étaler
6	9.05	13	346	1	2	D	défer important, t-a continu à s'éroder, butée complètement étaler
7	10.61	14	312	2	2	E	érosion du t-a, agitation importante à l'intérieur défer très important sur la crp

Résultats d'essai du profil N° : 3							
Pente		Poids des blocs en (t)			Nombre de blocs		
4/3		25			305		
Description d'essai				Stabilité observée			Observations
Test N°	Hs (m)	Tp (s)	Nbre vague	C	D	F	
1	2.81	8	545	0	0	A	oscil d'un bcr
2	4.22	9	510	0	0	A	oscil de 2 bcr
3	5.62	10	461	0	0	B	début d'érosion de la butée et du tapis de pieds, oscil de 6 bcr
4	7.18	11	424	0	0	C	butée continue à s'éroder, défer sur la crp oscil de 5 bcr
5	7.80	12	403	1	1	C	début d'érosion du t-a deplt avec retour en place d'1 bcr, défer, tassement d'ensemble de la crp
6	9.36	13	366	1	1	D	butée complt étaler, érosion du t-a, important défer, balayage de toute la crp par les vagues
7	11.40	14	327	2	2	E	aggravation d'érosion sur le t-a, léger deplt du couronnement, très important défer

Résultats d'essai du profil N° : 4							
Pente		Poids des blocs en (t)			Nombre de blocs		
4/3		17			419		
Description d'essai				Stabilité observée			Observations
Test N°	Hs (m)	Tp (s)	Nbre vague	C	D	F	
1	2.35	8	562	0	0	A	oscil d'un bcr
2	3.91	9	507	0	0	B	oscil de 4 bcr
3	5.15	10	458	0	0	B	oscil de 6 bcr
4	6.72	11	420	3	1	C	défer, début d'érosion de la butée et du tapis de pieds, qlq oscil bcr
5	7.10	12	394	4	2	D	défer import, butée continue à s'étaler, début d'érosion du t-a
6	8.43	13	349	15	4	E	t-a continue à s'éroder butée complt étalée, balayage de toute la crp par les grosses vagues
7	10.30	14	328	49	4	E	aggravation des dégâts sur t-a, chute de 2 bcr au pieds du t-a et d'1 bcr sur le couronnement

Résultats d'essai du profil N° : 5							
Pente		Poids des blocs en (t)			Nombre de blocs		
4/3		15			449		
Description d'essai				Stabilité observée			Observations
Test N°	Hs (m)	Tp (s)	Nbre vague	C	D	F	
1	2.66	8	543	0	0	A	oscil d'un bcr
2	5.00	10	448	0	0	B	début d'érosion de la butée et du tapis de pieds, oscil de qlq bcr
3	6.70	11	410	3	2	B	la butée continue de s'étaler, qlq défer, déplacement avec retour de 2 bcr
4	7.65	12	389	7	2	C	début d'érosion du t-a défer, la butée continue de s'étaler, Run-Down très important
5	8.90	13	348	48	7	D	le t-a continue à s'éroder, butée et tapis de pieds complt étalés, important défer
6	10.46	14	329	95	17	E	léger déplt du couronnement, aggravation dégâts sur t-a jusqu'à érosion du t-v, ruine de la crp

Résultats d'essai du profil N° : 6							
Pente		Poids des blocs en (t)			Nombre de blocs		
3/2		25			344		
Description d'essai				Stabilité observée			Observations
Test N°	Hs (m)	Tp (s)	Nbre vague	C	D	F	
1	4.05	9	488	0	0	A	oscil d'un bcr
2	5.15	10	450	0	0	B	oscil d'un bcr
3	7.02	11	416	0	0	B	butée commence à s'éta- ler, début d'érosion du t-a ,qlq oscil de bcr
4	7.33	12	390	0	0	C	le t-a continue de s'é- roder, la butée s'élale davantage, qlq défer
5	8.74	13	343	0	0	D	butée de pieds complt étalée, t-a continue de s'éroder, important défer balayage de toute la crp
6	10.61	14	313	0	0	E	aggravation d'érosion du t-a , balayage de toute la crp par les grosses vagues, très import défer
7	11.70	15	306	1	0	E	érosion du t-a jusqu'au t-v, déplt du couronnement de 25 cm(nature)+ rotati- on de 15° autour de l'arrête de la bêche

Résultats d'essai du profil N° : 7

Pente		Poids des blocs en (t)			Nombre de blocs		
3/2		17			460		
Description d'essai				Stabilité observée			Observations
Test N°	Hs (m)	Tp (s)	Nbre vague	C	D	F	
1	2.81	8	547	0	0	A	pas de dégâts
2	3.02	9	452	0	0	B	oscil de 3 bcr
3	4.68	10	358	0	0	B	oscil de 3 bcr
4	5.77	11	429	1	0	C	début d'érosion du t-a chute d'un bcr vers le pieds du t-a , oscil de qlq bcr
5	7.49	12	394	1	0	D	la butée s'étale encore le t-a s'érode davantage balayage de toute la crp par les grosses vagues
6	10.14	13	342	7	2	E	la butée compti étalée aggravation de dégâts sur t-a, érosion du t-v sous cournt, léger deplt
7	10.92	14	335	10	5	E	impt défer sur la crp l'érosion du t-a s'aggra-ve, entrainnement de qlq enr de la butée vers crp
8	10.61	15	316	14	7	E	érosion du t-v sous le cournt qui est en porte à faux, rotation de 20°, chute de 2 bcr vers t-a

Résultats d'essai du profil N° : 8

Pente		Poids des blocs en (t)			Nombre de blocs		
3/2		15			486		
Description d'essai				Stabilité observée			Observations
Test N°	Hs (m)	Tp (s)	Nbre vague	C	D	F	
1	2.66	8	544	0	0	A	oscil d'un bcr
2	3.90	9	513	0	0	B	oscil de 2 bcr
3	5.15	10	454	0	0	B	oscil de 6 bcr
4	7.34	11	412	1	0	C	début d'érosion de la butée de pieds ainsi que du t-a, qlq oscil de bcr
5	7.80	12	386	2	2	C	butée continue à s'étaler, le t-a s'érode davantage, qlq défer, balayage de la crp par les vagues
6	9.05	13	347	6	3	D	butée complt étalée, impt défer sur la crp, t-a continue à s'éroder
7	10.92	14	330	14	3	E	aggravation des dégâts sur le t-a, défer très impt, Run-Down impt
8	12.02	15	306	28	5	E	l'érosion du t-a s'aggrave jusqu'à la formation d'1 tapis d'eau limitant l'effet des franchist

Résultats d'essai du profil N° : 9							
Pente		Poids des blocs en (t)			Nombre de blocs		
2/1		25			420		
Description d'essai				Stabilité observée			Observations
Test N°	Hs (m)	Tp (s)	Nbre vague	C	D	F	
1	2.66	8	568	0	0	A	pas de dégâts
2	4.22	9	512	0	0	B	oscil d'un bcr
3	4.99	10	478	0	0	B	oscil de 2 bcr
4	6.55	11	417	0	0	B	oscil de qlq bcr
5	8.11	12	379	0	0	C	début d'érosion du t-a oscil de qlq bcr défer sur la crp
6	9.52	13	347	0	0	C	balayage de toute la crp par les vagues, la butée commence à s'étaler, le continue à s'éroder
7	10.77	14	325	1	1	D	la butée continue à s'étaler, le t-a s'érode encore, défer, deplt d'un bcr avec retour en place
8	11.70	15	308	3	1	E	la butée et tapis de pi- eds complt étalés, aggra- vation de l'érosion du t-a , défer impt

Résultats d'essai du profil N° : 10

Pente		Poids des blocs en (t)			Nombre de blocs		
2/1		17			543		
Description d'essai				Stabilité observée			Observations
Test N°	Hs (m)	Tp (s)	Nbre vague	C	D	F	
1	2.49	8	562	0	0	A	pas de dégâts
2	4.06	9	505	0	0	A	oscil de 2 bcr
3	4.99	10	479	0	0	B	oscil de qlq bcr
4	6.55	11	418	0	0	C	début d'érosion du t-a entraînement de qlq enr de la butée sur la crp oscil de qlq bcr
5	7.96	12	379	0	0	C	le t-a continue à s'é- roder ,le tapis et butée de pieds commencent à s' étaler,défer sur la crp
6	9.36	13	347	0	2	D	dégarnissement de la par- tie supérieure du t-a butée continue de s'éta- ler,défer plongeant
7	10.50	14	326	5	2	E	aggravation des dégâts sur t-a,balayage de l'en- semble de la crp par les vagues,impt défer
8	11.39	15	305	15	2	E	butée et tapis de pieds complt étalés,dégarnisse- ment jusqu'à -3 m de la partie supérieure du t-a

Résultats d'essai du profil N° : 11

Pente		Poids des blocs en (t)			Nombre de blocs		
2/1		15			571		
Description d'essai				Stabilité observée			Observations
Test N°	Hs (m)	Tp (s)	Nbre vague	C	D	F	
1	4.06	8	510	0	0	A	pas de dégâts
2	4.99	9	462	0	0	B	oscil de qlq bcr
3	6.40	10	418	1	1	B	oscil de qlq bcr
4	7.65	11	385	1	1	C	butée et tapis de pieds commencent à s'étaler, début d'érosion du t-a défer plongeant sur crp
5	9.21	12	339	4	3	D	aggravation des dégâts sur le t-a, la butée continue de s'étaler, balayage de toute la crp
6	10.20	13	323	10	4	E	dégarnissement de la partie supérieur du t-a jusqu'à 3 m, beaucoup de défer sur la crp
7	11.23	14	298	88	24	E	formation d'un tapis d'eau à l'arrière, butée et tapis de pieds complt étalés, défer impt sur la crp

5.6 Analyse des résultats des essais

5.6.1 Influence des paramètres principaux

On entend, par paramètres principaux, les paramètres dynamiques qui sont la hauteur et la période de la houle et les paramètres géométriques qui se limitent dans cette étude à la taille des blocs et la pente du talus. Pour étudier l'influence de ces grandeurs, on a analysé les variations du nombre de stabilité $H_s/\delta D_n$ qui fait intervenir la hauteur significative de la houle et la taille des blocs en fonction du nombre d'IRRIBARREN Ψ qui englobe simultanément la pente du talus, la période de la houle, ainsi que sa hauteur. * H_s : hauteur significative de la houle

* D_n : diamètre nominal des blocs égale à $(W/r_s)^{1/3}$

$$* \Psi = \text{tg } \alpha / ([2 \pi H_s / g T_m^2]^*) \quad [5.10]$$

Sur les figures 5.4 ; 5.5 ; 5.6 sont représentées les variations de $H_s / \delta D_n = f(\Psi)$.

On remarque que le nombre de stabilité décroît en fonction du nombre d'IRRIBARREN pour la pente 4/3, $H_s / \delta D_n$ décroît de 4 à 1 pour Ψ variant de 3.5 à 4.5, fig:5.4.

Cette plage de Ψ est moins large pour la pente 2/1, elle s'étale de 2.4 à 3.0 pour $H_s / \delta D_n$ variant de 5.0 à 1.0, fig:5.6.

Pour la pente 3/2 on remarque que le nombre de stabilité décroît, puis il croît en passant par un minimum correspondant à $H_s / \delta D_n = 1.4$ pour $\Psi = 3.95$, fig:5.5.

Cet extremum correspond à l'égalité de la période propre de la carapace et de la période des vagues.

Les résultats de la figure 5.5 représentant les variations de $H_s / \delta D_n = f(\Psi)$ pour la pente 3/2 sont conformes avec ceux trouvés par M. VAN DER MER [16].

Par contre pour les pentes 4/3 et 2/1 la gamme des résultats ne permet pas de confirmer ce résultat.

5.6.2 Influence de la hauteur de la houle

En général le taux de dommages croît avec la hauteur significative de la houle mais les dommages commencent à partir d'un certain seuil qui varie suivant la pente et le poids des blocs .

Pour un poids des blocs bien déterminé les résultats d'essais montrent que pour un même taux de dommages la hauteur significative est plus faible pour la pente la plus forte à savoir $\cot\alpha = 4/3$.

Ce taux de dommages s'accroît rapidement pour une petite variation de la hauteur significative .

Les figures 5.7 ; 5.8 ; 5.9 illustrent les variations de H_s en fonction du taux de dommages pour les blocs de poids respectifs 25 , 17 et 15 tonnes respectivement pour chacune des 3 pentes étudiées .

Sur les figures 5.10 ; 5.11 ; 5.12 sont représentées aussi les variations de la hauteur significative en fonction du taux de dommages mais en fixant la pente respectivement égale à $4/3$; $3/2$ et $2/1$.

Le taux de dommages est plus grand pour le poids des blocs faible . Le taux de dommages varie sensiblement en fonction de H_s mais cette variation s'aggrave d'une manière considérable à partir d'un certain seuil de la hauteur significative qui est de l'ordre de 10 m environ .

5.6.2 Influence de la hauteur de la houle

En général le taux de dommages croît avec la hauteur significative de la houle mais les dommages commencent à partir d'un certain seuil qui varie suivant la pente et le poids des blocs .

Pour un poids des blocs bien déterminé les résultats d'essais montrent que pour un même taux de dommages la hauteur significative est plus faible pour la pente la plus forte à savoir $\cot\alpha = 4/3$.

Ce taux de dommages s'accroît rapidement pour une petite variation de la hauteur significative .

Les figures 5.7 ; 5.8 ; 5.9 illustrent les variations de H_s en fonction du taux de dommages pour les blocs de poids respectifs 25 , 17 et 15 tonnes respectivement pour chacune des 3 pentes étudiées .

Sur les figures 5.10 ; 5.11 ; 5.12 sont représentées aussi les variations de la hauteur significative en fonction du taux de dommages mais en fixant la pente respectivement égale à $4/3$; $3/2$ et $2/1$.

Le taux de dommages est plus grand pour le poids des blocs faible . Le taux de dommages varie sensiblement en fonction de H_s mais cette variation s'aggrave d'une manière considérable à partir d'un certain seuil de la hauteur significative qui est de l'ordre de 10 m environ .

5.6.3 Influence de la période de la houle

Au cours des essais qui ont été effectués , le couple hauteur-période a été augmenté par paliers successifs de durée constante . La période correspondant au pic du spectre fut variée de 8 à 15 s . La période moyenne quant à elle variait de 7 à 14 s et elle est calculé comme étant le rapport de la durée totale du test sur le nombre de vagues ayant sollicité l'ouvrage .

Le pourcentage de dégâts a été calculé pour chaque palier c'est à dire pour chaque valeur de la période moyenne , les résultats sont représentés sur le graphe de la fig:5.16. Les essais ont montré que :

- * Pour les périodes inférieures à 9 s le taux de dommages est nul vu que les amplitudes des vagues sont faibles donc elles ne peuvent pas engendrées encore des dégâts .
- * Pour les périodes comprises entre 9 et 11 s , les dégâts commencent à apparaître , mais ils sont acceptables et cela quelque soit la taille des blocs et la valeur de la pente .
- * Pour les périodes supérieures à 12 s , on remarque qu'avec la pente $4/3$ on obtient un taux de dégât supérieur à celui obtenu avec la pente $3/2$ qui est lui même supérieur au taux obtenu avec la pente $2/1$ et cela pour la même valeur de la période et quelque soit le poids des blocs .
- * Pour la même valeur de la période les blocs de 25 t se comportent mieux du point de vue stabilité , que les blocs de 17 t et ces derniers se comporte mieux que les blocs de 15 t et cela pour toutes les valeurs de la pente .
- * Pour la valeur de la pente égale à $4/3$ et le poids des blocs de 15 et 17 t , on observe la ruine brutale de l'ouvrage pour les période voisines à 13 s .

- * Pour la pente 2/1 avec des blocs de 25 t on obtient des dégâts acceptables même pour les périodes légèrement supérieures à 14 s .
- * Pour les autres valeurs de la pente et du poids des blocs on obtient des dégâts considérables à partir des périodes de 13 s .

5.6.4 Influence de la pente

En général les dégâts sont nuls ou faibles pour les hauteurs significatives inférieures à 8 m et cela pour toutes les valeurs de la pente . Pour les hauteurs significatives supérieures à 8 m le taux de dommages s'aggrave rapidement surtout pour la pente 4/3 .

On remarque que la pente 3/2 est plus stable que la pente 4/3 , et aussi que la pente 2/1 et cela s'explique par les valeurs du coefficient d'imbrication des blocs entres-eux qui est plus fort avec les pentes les plus raides .

Donc il existe un optimum entres les forces destabilisatrices qui sont dûent au poids des blocs et qui sont décroissante en fonction de la valeur de $\cot\alpha$, et les forces stabilisatrices de frottements dûes à l'imbrication des blocs entres-eux .

Cette optimum est atteint pour la pente 3/2, qui est plus stable et le volume des matériaux est plus petit que pour la pente 2/1 .

Cette constatation s'illustre sur les figures 5.7 à 5.12 où on remarque que pour la valeur de la pente égale à 3/2 la carapace peut recevoir des hauteurs de lames plus grandes qu'avec les autres valeurs de la pente avec un même taux de dommages .

5.6.5 Influence de la taille des blocs

Pour étudier l'influence de la taille des blocs , on a tracé des courbes représentant les variations de Hs en fonction du pourcentage de dégât pour les différentes valeurs du poids des blocs sur le même graphe pour chaque valeur de la pente, figures : 5.7 ; 5.8 ; 5.9 , on a tiré les constatations suivantes :

- * La stabilité est meilleure pour les grands blocs.
- * Pour les blocs de 60 t et la pente 4/3 on obtient un taux de dommages presque nul même pour les hauteurs de lames de valeurs de l'ordre de 11 m , par contre pour les blocs de 33 t , pour la même valeur de la pente on obtient des dégâts mais ils sont acceptables , avec le même ordre de grandeur de la hauteur des lames .
- * Pour les blocs de 25 t , les dégâts restent acceptables pour toutes les valeurs de la pente même pour les hauteurs significatives atteignant 12 m environ . Le pourcentage de dégât est inférieur à 1 % pour les 3 valeurs de la pente .
- * Les blocs de 17 t se comportent mieux avec les pentes douces qu'avec les pentes raides . En effet , les dégâts sont nuls jusqu'aux valeurs des hauteurs significatives suivantes : 8.5 ; 6.5 ; 5.5 m respectivement pour les valeurs de la pente égale à 2/1 ; 3/2 ; 4/3 . Les dégâts s'aggravent rapidement et deviennent inacceptables à partir des valeurs de Hs égales à 11.0 ; 10.0 ; 7.5 m respectivement pour les pentes de valeurs égales à 2/1 ; 3/2 ; 4/3 . Mais toute fois les blocs de 25 et 17 t sont plus stables que les blocs de 15 t .
- * Enfin pour les blocs de 15 t , les dégâts font leurs apparition à partir de la hauteur voisine de 7 m et restent acceptables jusqu'aux valeurs de Hs de l'ordre de 7.5 m pour la pente 4/3 et de l'ordre de 9.5 m pour les 2 autres valeurs de la pente . puis les dégâts s'aggravent rapidement et deviennent inacceptables .

5.7 Variation des valeurs du coefficient Kd

Le prédimensionnement des blocs de la carapace se fait à l'aide de l'une des formules présentées en 4.2 , la plus usuelle est celle proposée par HUDSON :

$$W = \frac{\gamma_s H_s^3}{K_d(\delta - 1)^3 \cot \alpha} \quad [5.11]$$

Kd est un coefficient adimensionnel tenant compte de tous les autres paramètres n'apparaissant pas dans la formule de stabilité , c'est à dire autres que la hauteur significative de la houle , les poids spécifiques des blocs et de l'eau , la pente du talus , donc des paramètres tels que la porosité de la digue , de la forme des blocs , de la manière de poser les blocs , de la rugosité de la carapace etc ...

La valeur de Kd obtenue par MM. HUDSON et JACKSON , sur la base des résultats des nombreux essais qui ont été conduits au C.E.R.C , est égale à 8 pour les blocs cubiques rainurés avec lames non déferlante et avec un taux de dommages compris entre 0. et 5 % et défini comme étant le volume de blocs de carapace déplacés de la zone de la digue soumise à un soulèvement actif de blocs de carapace pour la hauteur de la houle considérée [9] .

Lors des essais effectués on constate que les valeurs de K_d sont plus petites pour les blocs de 15 t et cela quelque soit le taux de dommages et la valeur de la pente .

Pour les blocs de 17 t , les valeurs de K_d sont plus petites que celles correspondants au blocs de 25 t pour un taux de dommages relativement faible et ceci est valable pour les 3 valeurs de la pente .

Lorsque le pourcentage de dommages est supérieure à 1 % , les valeurs de K_d pour les blocs de 17 t avec la pente 3/2 sont supérieures à celle de K_d correspondant aux blocs de 25 t pour les pentes 2/1 et 4/3 .

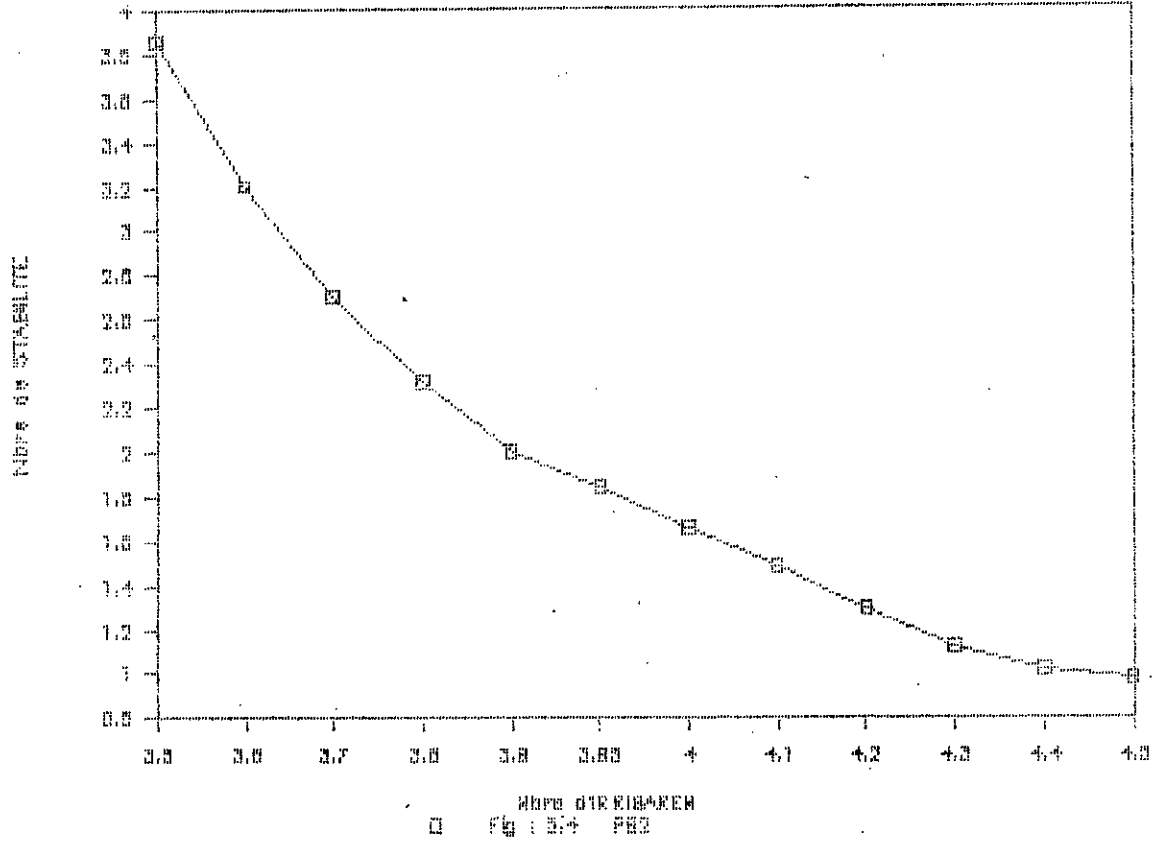
La variation de K_d en fonction de la pente est très régulière , pour tous les poids des blocs , pour un taux de dommages supérieur à 0.5 % les valeurs de K_d correspondant à la pente 2/1 se situent entre celles correspondant aux pentes 4/3 et 3/2 .

Dans tous les cas étudiés on a constaté que :

- * pour le critère d'absence de dommages c'est à dire le % de dégâts compris entre 0 et 1 % et franchissements limités, les valeurs de K_d restent supérieures à 13 .
- * pour un taux de dommages acceptable , c'est à dire compris entre 1 et 2 % , les valeurs de K_d sont supérieures à 20 .
- * pour un taux de dommages égale à 0 % , les valeurs moyennes de K_d sont de 5 ; 17 ; 18 respectivement pour les blocs de 15 ; 17 ; 25 tonnes .

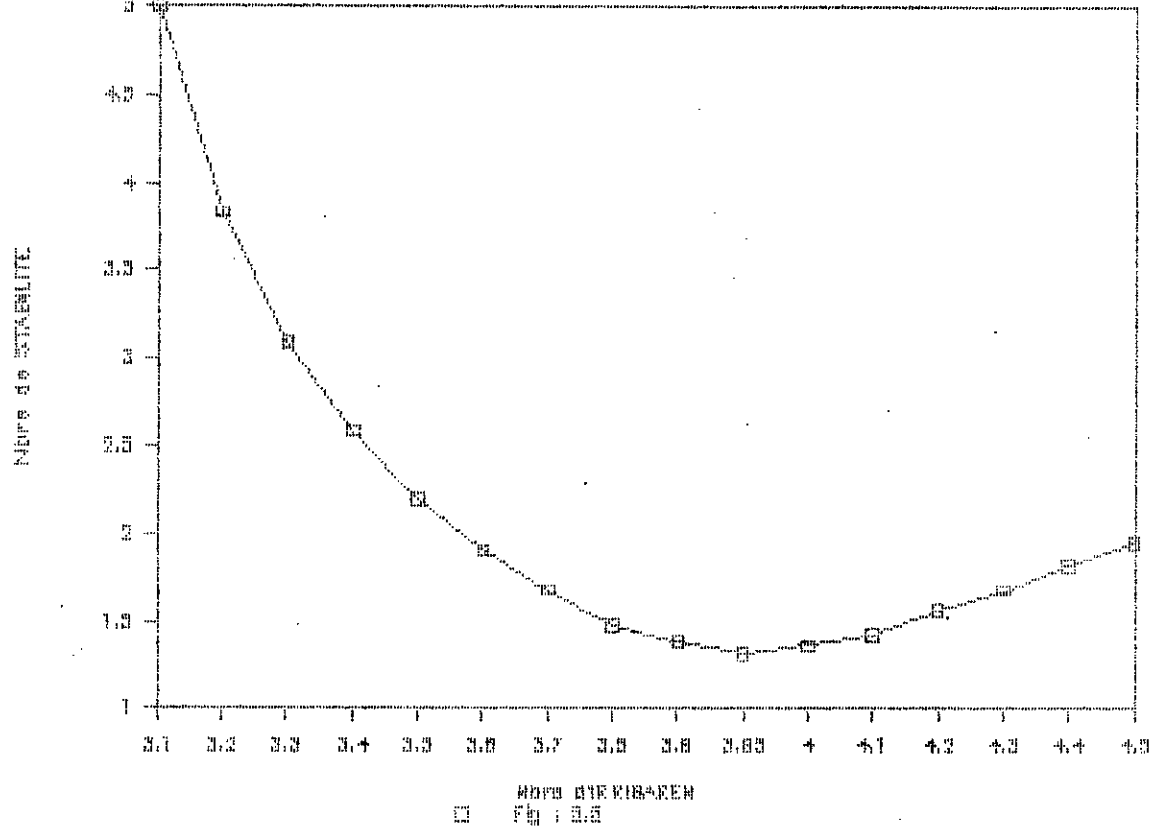
Nbre de Stabilité = f(Nbre d'IRRIBAREN)

PENTE = 1/2



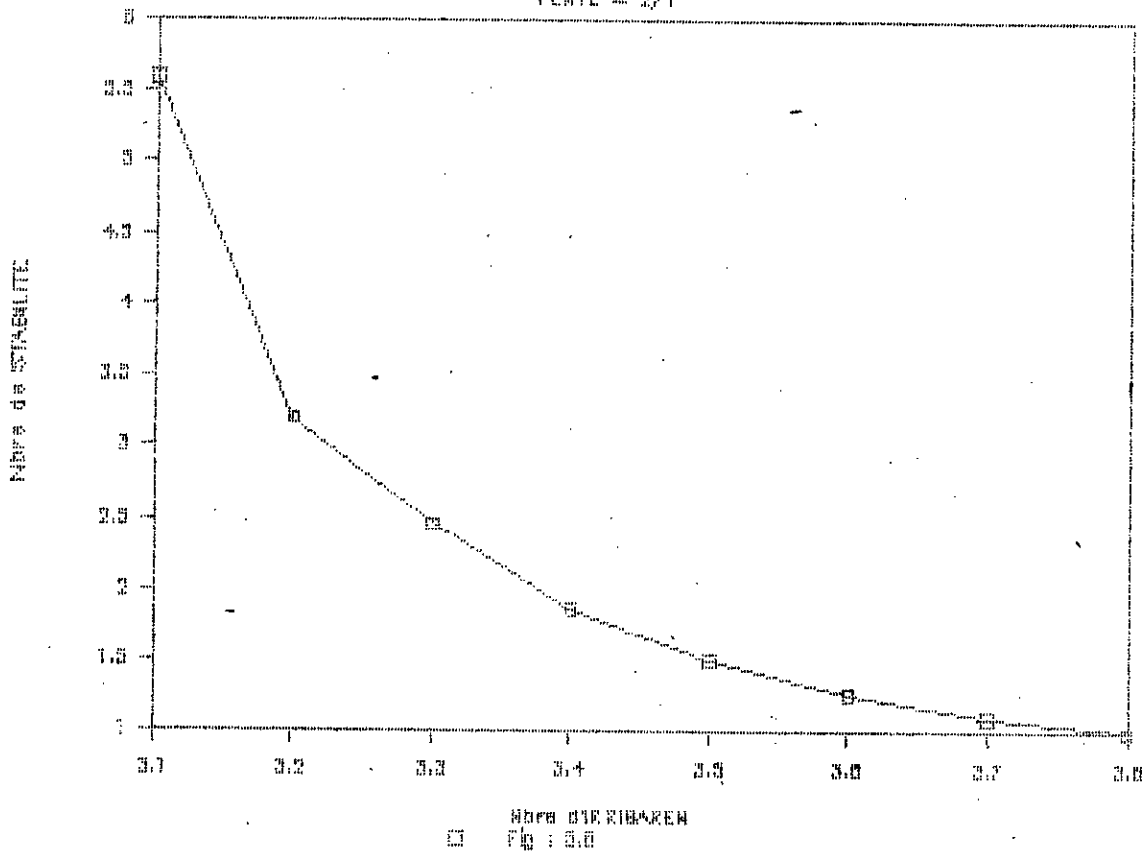
Nbre de Stabilité = f(Nbre d'IRRIBAREN)

PENTE = 1/2



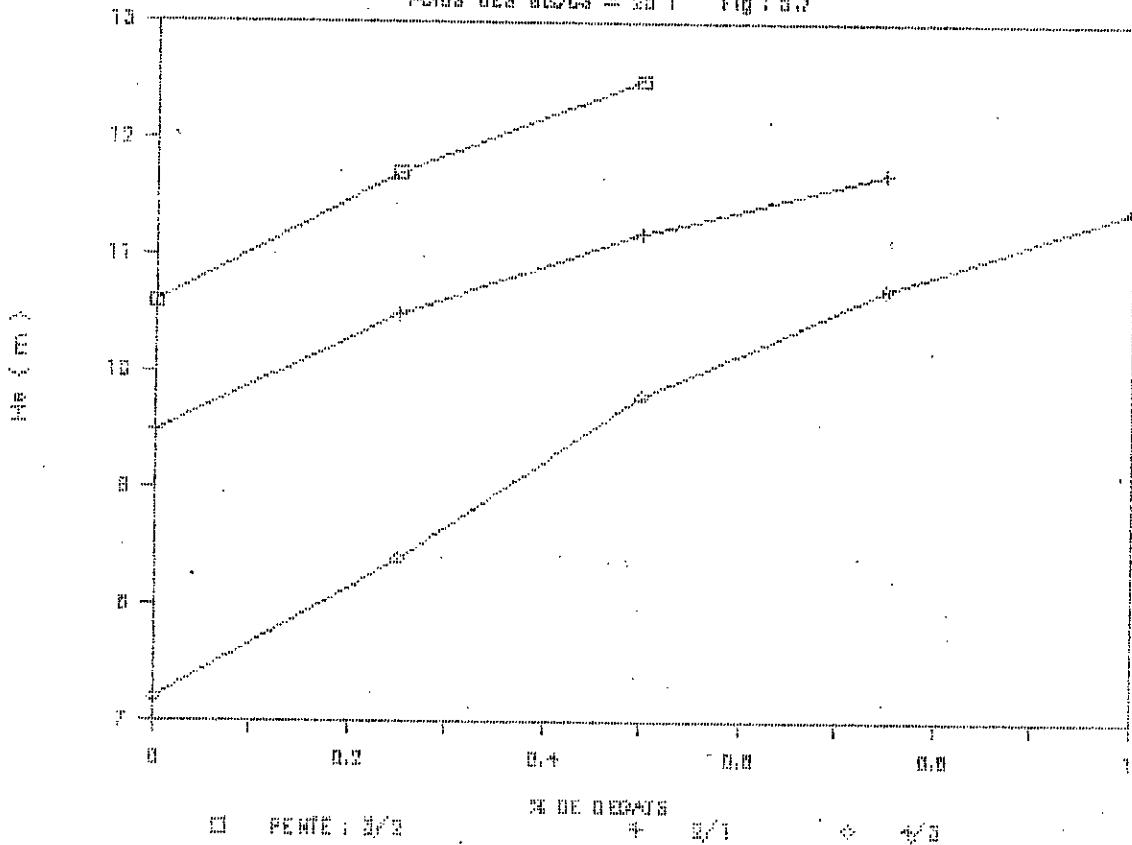
Nbre de Stabilité = f(Nbre d'IRRIBARRN)

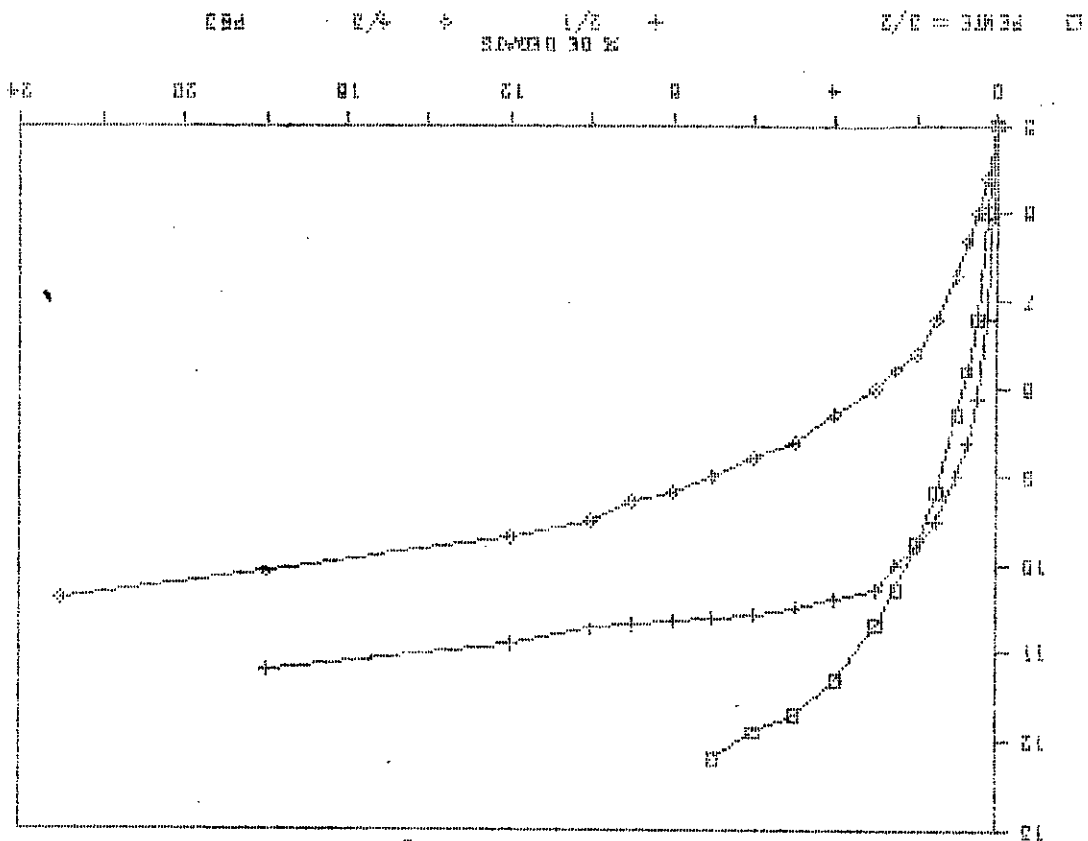
PENTE = 2/1



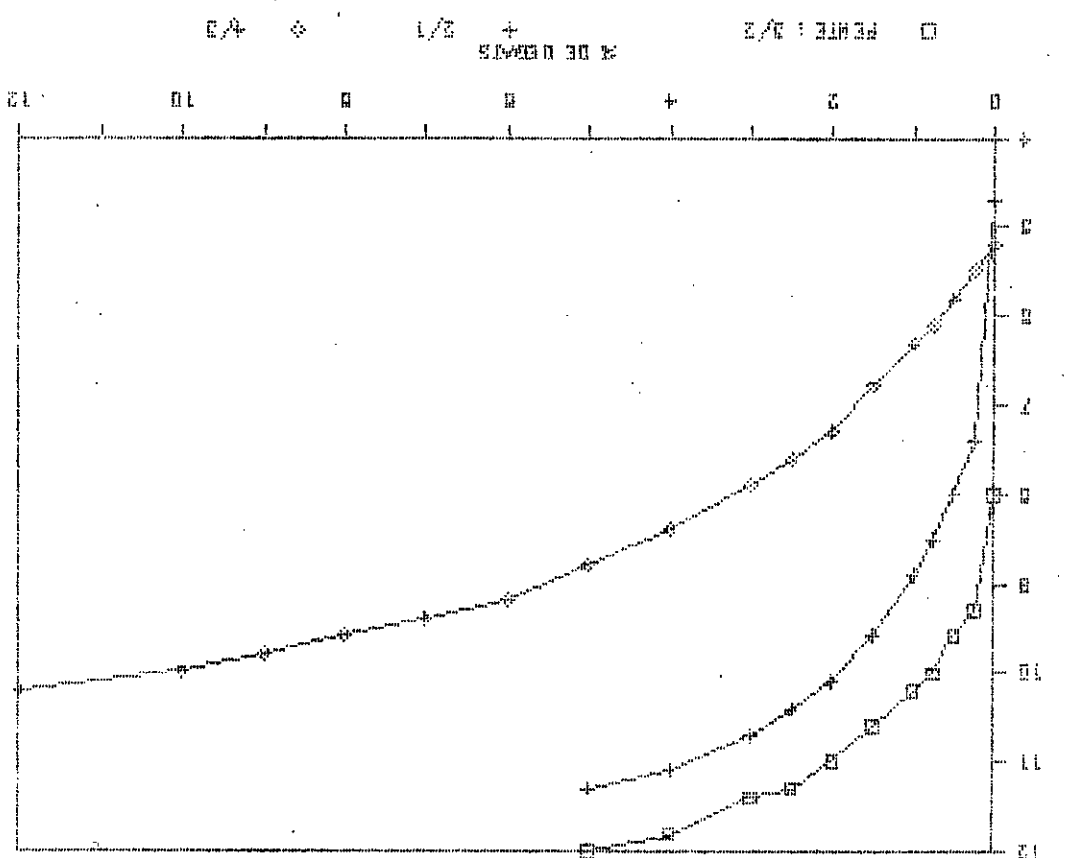
VARIATION DE Hs EN FCTN DU % DE DEGRATS

POIDS DES BLOCS = 20 T Fig: 3.7





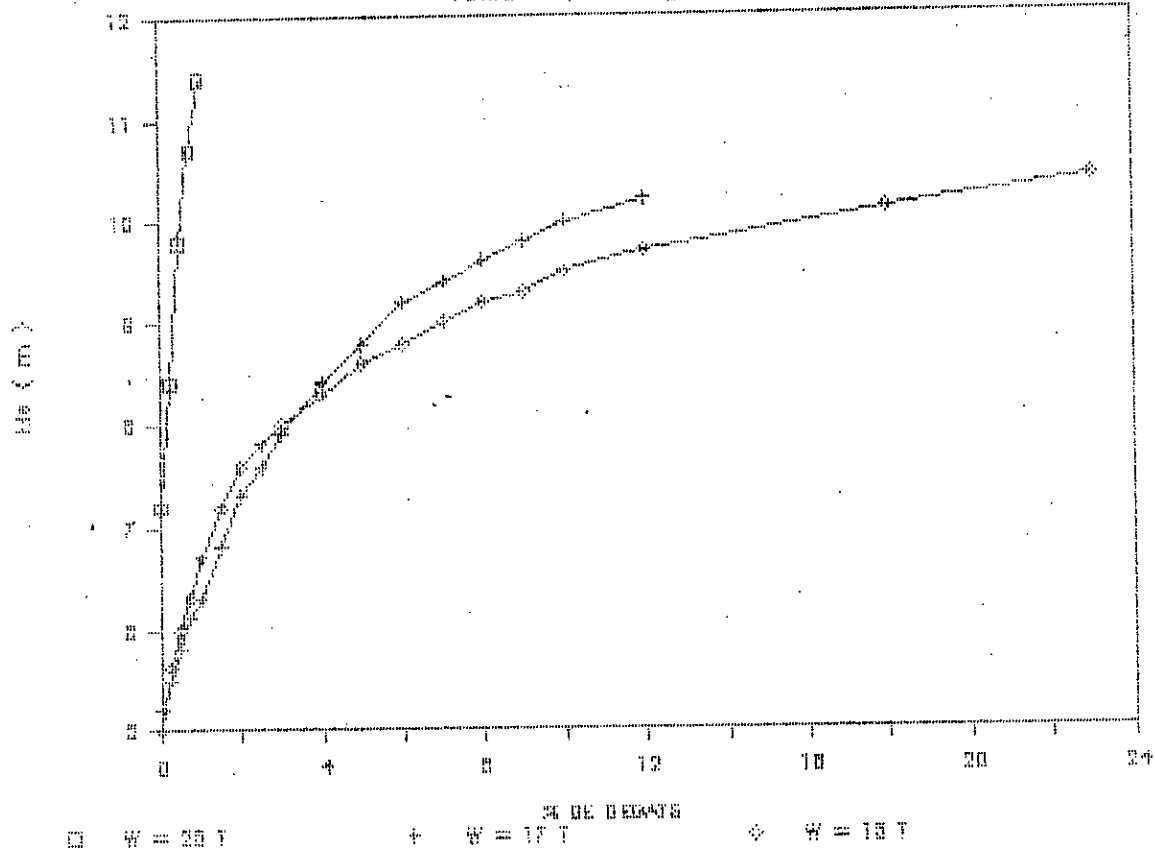
VARIATION DE HS EN FONCTN DU % DE DREGLATS
 PONDUS DES BLOCS = 12 T Fig : 9/B



VARIATION DE HS EN FONCTN DU % DE DREGLATS
 PONDUS DES BLOCS = 12 T Fig : 9/B

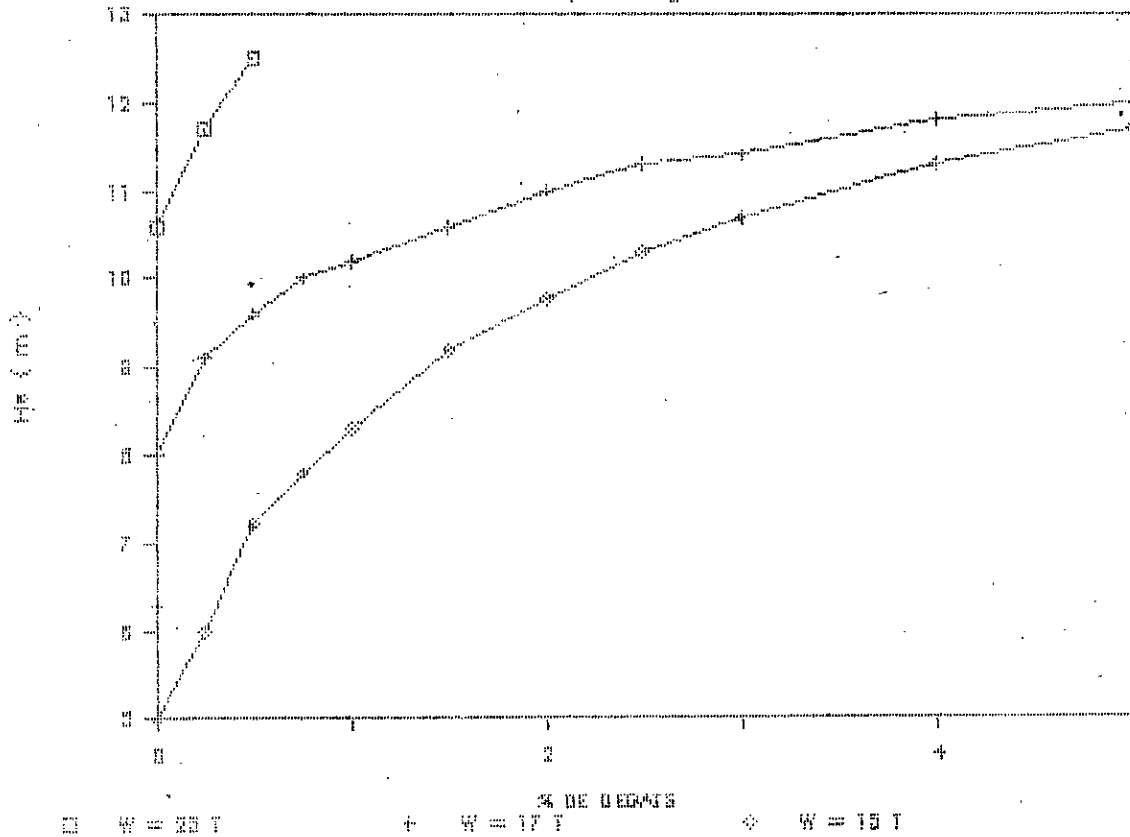
VARIATION DE H_s EN FCTN DU % DE DEGATS

PENTE = 4/3 FIG : 0.10



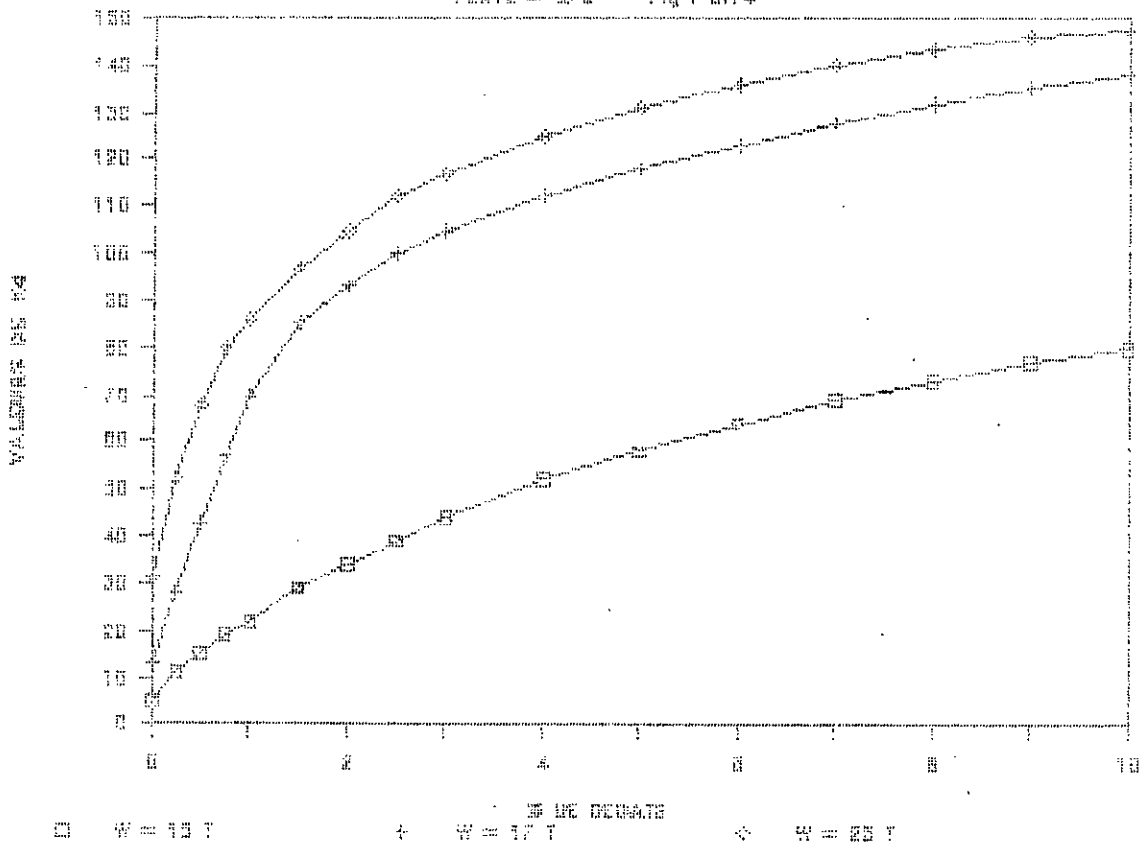
VARIATION DE H_s EN FCTN DU % DE DEGATS

PENTE = 3/2 FIG : 0.11



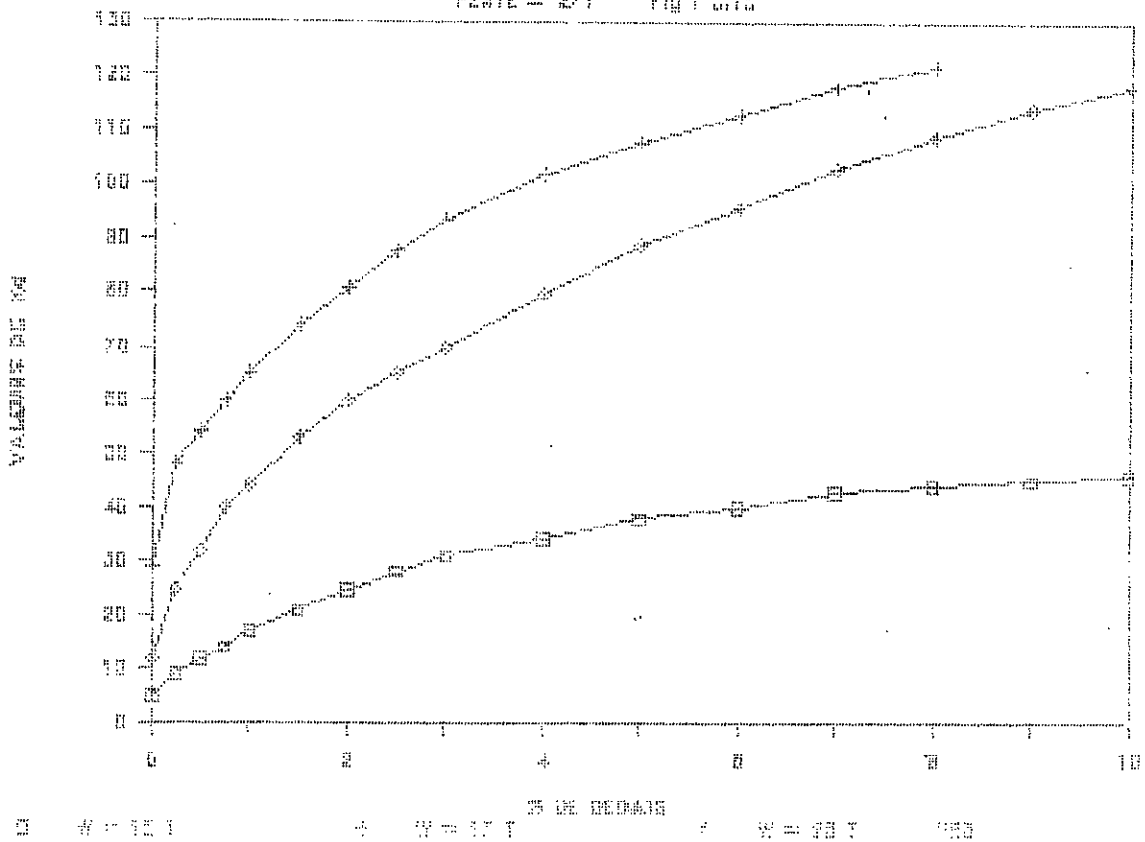
VARIATION DE K_d EN FCTN DU % DE DEGATS

PENTE = 2/3 FIG 1 0114



VARIATION DE K_d EN FCTN DU % DE DEGATS

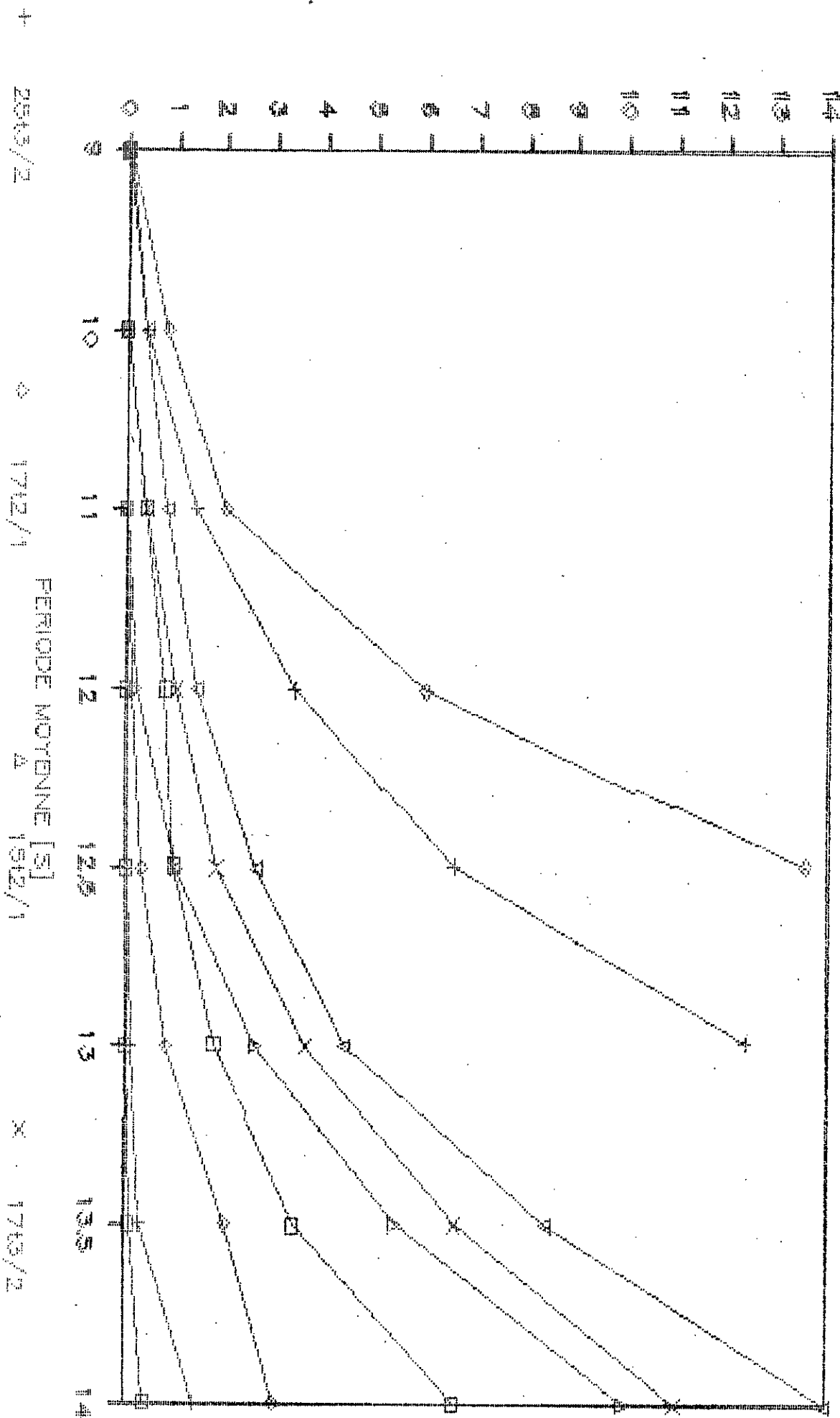
PENTE = 2/3 FIG 1 0115



% DE DEGATS

% DEGATS EN FONCTION DE LA PERIODE MOY

Fig : 5.16 P.96



5.8 Conclusion

Ces essais ont permis d'étudier les variations et les relations entre certains paramètres de digues à talus .

Ces relations permettent une approche rapide et plus réaliste du prédimensionnement des carapaces de digues à talus.

En effet la formule de prédimensionnement de HUDSON donne des poids des blocs égales à 35 ; 46 ; 52 tonnes pour des valeurs de la pente respectivement égales à 2/1 ; 3/2 ; 4/3 pour une hauteur significative égale à 8.2 m , avec une valeur de K_d égale à 8 pour le critère d'absence de dommages et franchissements limités [9].

Ces valeurs sont un peu trop élevées par rapport aux résultats des essais où on a constaté que les blocs de 17 t peuvent résister à ce seuil de houle et sans dommages avec les pentes 2/1 et 3/2 , par contre avec la pente 4/3 on ne peut atteindre cette valeur de la hauteur significative , avec le même critère de dommages qu'avec des blocs de 25 t .

Donc pour les trois valeurs de la pente , la protection de la carapace est assurée avec des blocs de poids plus petits que ceux donnés par la formule de HUDSON dans les mêmes circonstances de houle et même seuil de dommages .

L'analyse d'une quinzaine de rapports de stabilité des digues étudiés par le L.E.M ou par des laboratoires étrangers nous a permis de constater que la formule d'HUDSON donne des poids des blocs surdimensionnés de 77 % par rapport au poids trouvés après les essais sur modèle , par contre la formule de VAN DER MEER, elle donne des résultats à 13 % près par excès .

CHAPITRE 6

CONCLUSION GENERALE

Cette étude a été réalisée avec le soutien du Laboratoire des Etudes Maritimes, qui a mis à notre disposition les enregistrements de houle, le centre de calcul, ainsi que le canal à houle .

La première partie de cette étude consiste à analyser les enregistrements de houle sur le littoral algérien, elle a été réalisée en développant plusieurs programmes qui sont fonctionnels au niveau du L.E.M .

Elle a permis de constater que la distribution des hauteurs des vagues suit la loi de RAYLEIGH , d'établir des relations entre les différents paramètres caractéristiques des hauteurs de vagues et ceci pour deux sites différents : Skikda et Arzew .

L'analyse spectrale des enregistrements de houle sur les deux sites nous montre que ces spectres ont une allure se rapprochant beaucoup plus du spectre théorique du type JONSWAP .

La deuxième partie de cette étude consiste à étudier l'influence des paramètres géométriques (pente du talus et taille des blocs) et dynamiques (hauteurs et périodes de houle) sur la stabilité des carapaces et d'établir des relations entres-eux .

On constate que pour une valeur de la pente égale à $3/2$ la stabilité est meilleure , pour des période inférieures à 9 s le taux de dommage est nul , supérieures à 13 s les dégâts sont considérables .

On a établi des graphes donnant les variations du coefficient adimensionnel K_d en fonction du pourcentage de dégâts pour les différentes valeurs de la pente et de la taille des blocs .

Cette étude a permis d'une part de contribuer à la connaissance du régime de houle sur le littoral algérien et d'autre part un prédimensionnement sérieux , rapide et réaliste des carapaces de digues à talus en blocs cubiques rainurés .

CHAPITRE 7

PERSPECTIVES DE RECHERCHES FUTURES

Cette étude ouvre une large perspective sur l'avenir qui se résume sur les axes principaux suivants :

- * Connaissance profonde du régime de houle sur le littoral algérien .
- * Formulation théorique du spectre sur les côtes algériennes
- * Comportement dynamique des carapaces sous l'effet des sollicitations cycliques d'ent à la houle .
- * Influence des paramètres de la houle (hauteur , période) sur la stabilité des digues à talus .
- * Modélisation mathématique du comportement des blocs de carapace de digues à talus .

CHAPITRE 8

Bibliographie

- [1] J.CHAPPON - " Travaux maritimes " Tome 1
Eyrolles-1984
- [2] R.BONNEFILE - " Cours d'hydraulique maritime de
l'ENSTA " Masson-1980
- [3] J.LARRAS - " Physique de la houle et des lames "
Eyrolles-
- [4] P.ARISTAGHES - " Théories de la houle-Houle réelle-Pro-
pagation de la houle " STCPMVN-Mars-1985
- [5] François-Marc TURPIN - " Quelques problèmes posés par
le traitement statistique des données de la houle en
vue du dimensionnement des structures " Revue technique
du service des phares et balises - N° 67 - 1985
- [6] DAUBET-CAHOUET -"Approche numérique de la houle par les
équations de NAVIER-STOKES"
Annales des ponts et chaussées N° 32 & 33 .
- [7] R.SILVESTER - " Coastal Engineering " Elsevier-1974
- [8] G.GRANCINI ; L.IOVENITTI ; G.L.DEFILIPPI ; A.MELILI -
" Analysis of oceanographic problems concerning
submarine pipeline projects : Surveying activity and
computing methodologie " - Congress Panamericano De
Lngenieria Del Petroleo - 1978
- [9] Shore protection manual - Volume II - Coastal Enginee-
ring Research Center - Departement of the Army Corps
of Enginneers - 1984
- [10] F.MARENDET - " Cours de Travaux Maritime " ENTTP
- [11] " Paramètres des états de la mer " - Association
Internationale de Recherches Hydrauliques et du Congés
de Navigation - (A.I.R.H & A.I.P.C.N)
Bulletin N° 52 - Bruxelles - Janvier 1986

- [12] A.GRAILLOT - " Travaux Maritimes " - ENPC - Paris -1985
- [13] M.BELLANGER - " Traitement numérique du signal]-Théorie et pratique " - Masson - Paris 1980
- [14] J.LIFERMANN - " Les méthodes rapides de transformation du signal " - Fourier,Walsh,Hadamard,Haar-Masson
- [15] F.MARENDET - " Connaissance du régime de la houle en Algérie (Exemple de la région de Skikda) " -Avril-1985
- [16] VAN DER MER - " Deterministic and Probabilistic Design of Breakwater Armor Layers " - Journal of Waterway , Port , Coastal , and Ocean Engineering Janvier 88
- [17] CASTRO (E):"diques de escollera",Revista de Obras Publicas, Abril de 1933
- [18] IRIBARREN (R):"una formula para el calculo de diques de escolera"Revista de Obras Publicas, 1938
- [19] IRIBARREN (R):"Obras maritimas oleaje y diques " Editorial Dossat , Madrid 1954
- [20] IRIBARREN (R) et NOGALES (C):"Generalizacion de la formula para el calculo de los diques de escolera y comprobacion de sus coeficientes"Revista de Obras Publicas,Mayo 1950
- [21] IRIBARREN (R):"Formule pour la calcul des digues en enrochements naturels ou éléments artificiels" XXI Intenat.Navig.Congress.Sect.(I.N.C.S) II-1 ,Stockholm, 1965 .
- [22] EPSTEIN (H) et TYRREL (F) : "Design of rubble-mound break-waters",XVII I.N.C.S.II-4 ,Lisbone, 1949
escolera"Revista de Obras Publicas, 1938
- [23] HICKSON (R) et RODOLF (F.W) : "Design and construction of jetties" Proceedings of first Conference on Coastal Engineering , Long Beach. 1951
- [24] HUDSON (R.Y) : "Design of quarry-stone cover layers for rubble-mound breakwaters" W.E.S Reseach Report 2.2 Vicksburg, 1958

- [25] HUDSON (R.Y) et JACKSON (R.A) : "Design of tribar and tetrapod cover-layers for rubble-mound breakwaters", W.E.S Miscellaneous Paper 2-296 Vicksburg, 1959
- [26] LARRAS (J) : "L'équilibre sous-marin d'un massif de matériaux soumis à la houle", Le Génie Civil 15/9/1952
- [27] BEAUDEVIN (C) : "Stabilité des digues à talus à carapace en vrac", La Houille blanche mai-juin 1955
- [28] HEDAR (P.A) : "Design of rock-fill breakwaters " XVIII I.N.C.S II-1, Rome 1953
- [29] HEDAR (P.A) : "Rules for the design for rock-fill breakwaters and revetements", XXI I.N.C.S II-1 Stockholm, 1956
- [30] SVEE (R), TRÄETERBERG (A) et TRUM (A) : " The stability properties of the Svee blocks ", XXI I.N.C.S II-1 Stockholm , 1956
- [31] SN . 92-60 -- "Technical prescriptions for the determination of wave action on maritime and river structure and banks " , 1960 (in Russian)
- [32] RYBICHEVSKY (G.G) : " Calculation of stability of protective elements for rubble-mound structures under wave action" *Gidrotechnicheskoe Stroitelstvo* n° 11 , 1964
- [33] METELICZYNA (G.G) : " Determination of the weight of quarry-run and concrete blocks as protective layer for constructions under wave action" *Gidrotechnicheskoe Stroitelstvo* n° 5 , 1965 (in Russian)
- [34] GOLDSCHTEIN (M.N) et KONONENKO (P.S) : " Investigations concening filters and stone revetements on slopes of earth dams ", *Trudy soviestchanija podnimanie bieriegov morieji vodochranilistch*, T.1, Odessa, 1959 (in Russian)

ANNEXE 1

* EXEMPLE DU TRAITEMENT STATISTIQUE DE LA HOULE PAR *
* LE PROGRAMME HOULE.FOR *

Nom du fichier traité :H310500.RES

CALCUL DES HAUTEURS ET PERIODES

H(1)= 1.62	T(1)= 1.72
H(2)= 1.42	T(2)= 1.86
H(3)= .48	T(3)= .67
H(4)= 2.02	T(4)= 1.32
H(5)= 2.32	T(5)= 1.57
H(6)= .99	T(6)= .71
H(7)= 1.83	T(7)= 1.34
H(8)= 2.51	T(8)= 2.18
H(9)= 3.07	T(9)= 1.47
H(10)= .27	T(10)= .44
H(11)= 2.15	T(11)= 1.50
H(12)= 1.78	T(12)= 2.03
H(13)= 2.36	T(13)= 1.82
H(14)= 1.56	T(14)= 1.69
H(15)= 1.02	T(15)= 1.92
H(16)= 1.21	T(16)= 1.85
H(17)= 1.62	T(17)= 1.53
H(18)= .51	T(18)= .66
H(19)= 1.77	T(19)= 1.72
H(20)= 1.92	T(20)= 1.94
H(21)= 1.42	T(21)= 1.48
H(22)= 1.10	T(22)= 1.61
H(23)= .49	T(23)= .40
H(24)= 1.41	T(24)= 1.05
H(25)= 1.59	T(25)= 1.33
H(26)= 2.03	T(26)= 1.46
H(27)= 3.17	T(27)= 1.43
H(28)= 1.38	T(28)= 1.94
H(29)= 1.25	T(29)= 2.16
H(30)= 1.99	T(30)= 1.27
H(31)= .80	T(31)= .97
H(32)= 2.57	T(32)= 1.34
H(33)= .96	T(33)= 1.28
H(34)= .60	T(34)= 1.32
H(35)= .87	T(35)= 1.20
H(36)= .94	T(36)= 1.18
H(37)= 1.40	T(37)= 1.38
H(38)= 1.54	T(38)= 1.01
H(39)= .62	T(39)= 1.12
H(40)= 1.89	T(40)= 1.44

TRI DES DONNEES

HAUTEURS

PERIODES

HAUTEUR(1)=	3.17	PERIODE(1)=	2.18
HAUTEUR(2)=	3.07	PERIODE(2)=	2.16
HAUTEUR(3)=	2.57	PERIODE(3)=	2.03
HAUTEUR(4)=	2.51	PERIODE(4)=	1.94
HAUTEUR(5)=	2.36	PERIODE(5)=	1.94
HAUTEUR(6)=	2.32	PERIODE(6)=	1.92
HAUTEUR(7)=	2.15	PERIODE(7)=	1.86
HAUTEUR(8)=	2.03	PERIODE(8)=	1.85
HAUTEUR(9)=	2.02	PERIODE(9)=	1.82
HAUTEUR(10)=	1.99	PERIODE(10)=	1.72
HAUTEUR(11)=	1.92	PERIODE(11)=	1.72
HAUTEUR(12)=	1.89	PERIODE(12)=	1.69
HAUTEUR(13)=	1.83	PERIODE(13)=	1.61
HAUTEUR(14)=	1.78	PERIODE(14)=	1.57
HAUTEUR(15)=	1.77	PERIODE(15)=	1.53
HAUTEUR(16)=	1.62	PERIODE(16)=	1.50
HAUTEUR(17)=	1.62	PERIODE(17)=	1.48
HAUTEUR(18)=	1.59	PERIODE(18)=	1.47
HAUTEUR(19)=	1.56	PERIODE(19)=	1.46
HAUTEUR(20)=	1.54	PERIODE(20)=	1.44
HAUTEUR(21)=	1.42	PERIODE(21)=	1.43
HAUTEUR(22)=	1.42	PERIODE(22)=	1.39
HAUTEUR(23)=	1.41	PERIODE(23)=	1.34
HAUTEUR(24)=	1.40	PERIODE(24)=	1.34
HAUTEUR(25)=	1.38	PERIODE(25)=	1.33
HAUTEUR(26)=	1.25	PERIODE(26)=	1.32
HAUTEUR(27)=	1.21	PERIODE(27)=	1.32
HAUTEUR(28)=	1.10	PERIODE(28)=	1.28
HAUTEUR(29)=	1.02	PERIODE(29)=	1.27
HAUTEUR(30)=	.99	PERIODE(30)=	1.20
HAUTEUR(31)=	.96	PERIODE(31)=	1.18
HAUTEUR(32)=	.94	PERIODE(32)=	1.12
HAUTEUR(33)=	.87	PERIODE(33)=	1.05
HAUTEUR(34)=	.80	PERIODE(34)=	1.01
HAUTEUR(35)=	.62	PERIODE(35)=	.97
HAUTEUR(36)=	.60	PERIODE(36)=	.71
HAUTEUR(37)=	.51	PERIODE(37)=	.67
HAUTEUR(38)=	.49	PERIODE(38)=	.66
HAUTEUR(39)=	.48	PERIODE(39)=	.44
HAUTEUR(40)=	.27	PERIODE(40)=	.40

Calcul de Hs par la methode de DUKEY-DRAPER

HS= 2.59

* METHODE DIRECTE *

HAUTEUR MAX , ET PERIODE MAX

HMAX= 3.17

THMAX= 1.43

TMAX= 2.18

HTMAX= 2.51

HDIX ,(THDIX) ET TDIX ,(HTDIX)

HDIX= 2.83

THDIX= 1.61

TDIX= 2.08

HTDIX= 1.87

Hs ,(THs) ET TS ,(HTs)

HS= 2.30

THS= 1.55

TS= 1.88

HTS= 1.61

HMOY ET TMOY

HMOY= 1.51

TMOY= 1.41

HS PAR LA METHODE DES 2 PLUS GRANDES VAGUES

HS= 2.42

RAPPORTS ENTRE LES DIFFERENTS PARAMETRES

A 1= 1.12

A 2= 1.38

A 3= 2.10

A 4= 1.23

A 5= 1.97

A 6= 1.52

B 1= .89

B 2= .93

B 3= 1.02

B 4= 1.04

B 5= 1.05

B 6= 1.16

B 7= 1.55

B 8= 1.11

B 9= 1.14

B10= 1.10

B11= 1.48

B12= 1.33

HISTOGRAMME DE LA DUSTRICTION DES HAUTEURS

I	Classe	I	Freq	I	%:(CL)	I	Fr.Cum	I	%:(Cum)	I
I	.00 -- .50	I	3	I	7.50	I	3	I	7.50	I
I	.50 -- 1.00	I	8	I	20.00	I	11	I	27.50	I
I	1.00 -- 1.50	I	9	I	22.50	I	20	I	50.00	I
I	1.50 -- 2.00	I	11	I	27.50	I	31	I	77.50	I
I	2.00 -- 2.50	I	5	I	12.50	I	36	I	90.00	I
I	2.50 -- 3.00	I	2	I	5.00	I	38	I	95.00	I
I	3.00 -- 3.50	I	2	I	5.00	I	40	I	100.00	I

CORRELATION DE LA DISTRIBUTION A UNE LOI DE RAYLEIGH

Densite de probabilite f(h):

f(h)=(h/(4Mo))*EXP(-h**2/(8Mo))

h= .75	f(h)= .65.96
h= 1.25	f(h)= 58.84
h= 1.75	f(h)= 32.26
h= 2.25	f(h)= 11.98
h= 2.75	f(h)= 3.04
h= 3.25	f(h)= .55

CORRELATION DE LA DISTRIBUTION A UNE LOI DE GAUSS

Densite de probabilite

f(h)=1/SQRT(2*PI*Mo)*EXP(-h**2/(2*Mo))

h= .00	f(h)= .04
h= .75	f(h)= 7.32
h= 1.25	f(h)= 47.75
h= 1.75	f(h)= 89.21
h= 2.25	f(h)= 47.75
h= 2.75	f(h)= 7.32
h= 3.25	f(h)= .32

Fichier:H310500.DAT

Fin du traitement STATISTIQUE .

ANNEXE 2
PROGRAMMES INFORMATIQUE

```

C          *****
C          * ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE *
C          *****
C          *****
C          * Etude statistique de la HOULE *
C*****
C * Programme en FORTRAN 77. *
C * Nom du programme:HOULE.for *
C * Le fichier des données type ---.DAT comporte une suite *
C * de deux variables X(i) et Y(i), la première est en *
C * centimètres la seconde en mètres. *
C * Le fichier des résultats type ----.RES comporte les *
C * paramètres de la HOULE(Hs,Hmax,Hmoy,Tmoy,.....etc.)*
C * obtenus par trois méthodes différentes: *
C * -Méthode de TUKEY-DRAPPER. *
C * -Méthode directe. *
C * -Méthode des deux plus grandes vagues. *
C * Le fichier des résultats type ----.HIS comporte les va-*
C * leurs nécessaires pour l'établissement des HISTOGRAMMES*
C * de distribution des hauteurs, ainsi que pour le calage*
C * de courbes théoriques GAUSS et RAYLEIGH. *
C * -La vitesse est donnée en Cm/s. *
C * -La valeur de Mo est tirée de l'analyse SPECTRALE. *
C * NOTA:-Les unités des résultats -Hauteur en mètres. *
C * -Période en secondes.*
C * -La variable EG est utilisée comme repère pour le tracé.*
C * -Les histogrammes sont tracés par le programme TRACE.BAS*
C*****
C* DECLARATION ET DIMENSIONNEMENT DES TABLEUX *
C*****
REAL Mo
INTEGER Q
COMPLEX C,H,T,D1,D,DD,J
CHARACTER*20 FIC1,FIC2,FIC3
COMMON /A/ ND
COMMON /B/ D
DIMENSION Y(500),YT(500,2),S1(500),X(500),PP(500)
DIMENSION XT(500,2),S(500),T(500),HH(500)
DIMENSION CT(500),FA(500),FC(500),RO(10)
DIMENSION H(500),T1(500),C(500),T2(500)
J=CMPLX(0.,1.)
C*****
C* LECTURE DES DONNEES *
C*****
WRITE(*,*) ' DONNER: '
WRITE(*,40)
40 FORMAT(5X,' - LE NOM DE VOTRE FICHER DE DONNEES: ', $)
READ(*,41) FIC1

```

```

41  FORMAT(A20)
    WRITE(*,42)
42  FORMAT(5X,' - LE NOM DE VOTRE FICHER RESULTAT:',$)
    READ(*,41) FIC2
    WRITE(*,10)
10  FORMAT(5X,' - LE NOM DE VOTRE FICHER DU GRAPHE:',$)
    READ(*,41) FIC3
    WRITE(*,78)
78  FORMAT(5X,' - LA VITESSE DE L'ENREGISTREMENT(Cm):',$)
    READ(*,*) VK
    WRITE(*,89)
89  FORMAT(5X,'LA VALEUR DE Mo DE L'ANALYSE SPECTRALE:',$)
    READ(*,*) Mo
    WRITE(*,*) CHAR(7)
    WRITE(*,*)' -- Patientez SVP ... --'
    OPEN(2,FILE=FIC1,STATUS='OLD')
    OPEN(3,FILE=FIC2,STATUS='NEW')
    OPEN(4,FILE=FIC3,STATUS='NEW')
33  I=I+1
    READ(2,*,END=999) X(I),Y(I)
    GO TO 33
999 CLOSE(2)
C
*****
C*                               Methode de TUKEY.DRAPPER                               *
C*****
    N=I
    DO 399 I=1,N
399  PP(I)=Y(I)
C    TRI DES DONNEES
    DO 300 K=1,N
    DO 300 L=1,N-K
    IF (PP(L).LT.PP(L+1)) THEN
    D=PP(L+1)
    PP(L+1)=PP(L)
    PP(L)=D
    ELSE
    ENDIF
300  CONTINUE
    H1=PP(1)+PP(2)
    H2=ABS(PP(N)+PP(N-1))
    NZ=INT(FLOAT(N)/3.)
    NZ=ALOG(FLOAT(NZ))
    W1=H1/2./SQRT(2.*NZ)*1./{(1.+0.289/(NZ)-.247/(NZ)**2.)}
    W2=H2/2./SQRT(2.*NZ)*1./{(1.-0.211/(NZ)-.103/(NZ)**2.)}
    HS=2.*(W1+W2)
C *****
C *                               CALCUL DES HAUTEURS ET DES PERIODES                               *
C *****

```

```

WRITE(3,51)
WRITE(3,270) FIC1
270 FORMAT(10X,'Nom du fichier traité :',A20)
WRITE(3,51)
WRITE(3,19)
WRITE(3,49)
N=I-1
C DETERMINATION DU NOMBRE DE VAGUES
ND=INT(FLOAT(N)/3.)
DO 50 I=1,ND
C CALCUL DES HAUTEURS
YT(I,1)=Y(3*I-2)
YT(I,2)=Y(3*I-1)
S1(I)=ABS(YT(I,1))+ABS(YT(I,2))
H(I)=S1(I)+J*I
C CALCUL DES PERIODES
XT(I,1)=X(3*I)
XT(I,2)=X(3*I-3)
C *****
C * VITESSE DE DEROULEMENT DU ROULEAU (VK) en cm/s *
C *****
T1(I)=(XT(I,1)-XT(I,2))/VK
T(I)=T1(I)+J*I
REH=REAL(H(I))
RET=REAL(T(I))
WRITE(3,43) I,REH,I,RET
43 FORMAT(1X,'H(',I3,')=',F6.2,27X,'T(',I3,')=',F6.2)
50 CONTINUE
C*****
C* PARTIE RELATIVE AUX TITRES *
C*****
57 FORMAT(1X,53(1H*),/
+,4X,' HS PAR LA METHODE DES 2 PLUS GRANDES VAGUES')
85 FORMAT(1X,'RAPPORTS ENTRE LES DIFFERENTS PARAMETRES ')
52 FORMAT(1X,' TRI DES DONNEES
+/,,' HAUTEURS PERIODES')
54 FORMAT(1X,' HDIX ,(THDIX) ET TDIX ,(HTDIX) ')
53 FORMAT(1X,' HAUTEUR MAX , ET PERIODE MAX ')
55 FORMAT(1X,' Hs ,(THs) ET TS ,(HTs)')
56 FORMAT(1X,' HMOY ET TMOY ')
51 FORMAT(1X,'*****')
49 FORMAT(1X,'-----')
19 FORMAT(1X,' HAUTEURS ET PERIODES ')
254 FORMAT(1X,'HISTOGRAMME DE LA DISTRIBUTION DES HAUTEURS')
280 FORMAT(1X,'CORRELATION DE LA DISTR A 1 LOI DE RAYLEIGH')
281 FORMAT(1X,'CORRELATION DE LA DISTRIBU A 1 LOI DE GAUSS')
350 FORMAT(1X,' Hs par la methode de DUKEY-DRAPER')
C*****
C*PARTIE D'AFFECTATION ET DE RENVOI VERS LES SOUS-PROGRAMMES*
C*****

```

```

CALL CALL1(H)
CALL CALL1(T)
WRITE(3,51)
WRITE(3,52)
WRITE(3,49)
DO 70 I=1,ND
  REH=REAL(H(I))
  RET=REAL(T(I))
  WRITE(3,51) I,REH,I,RET
  FORMAT(1X,'HAUTEUR(',I3,')=',F6.2,15X,
+ 'PERIODE(',I3,')=',F6.2)
70 CONTINUE
WRITE(3,51)
CALL CALL2(H,HMAX,THMAX,T1)
CALL CALL2(T,TMAX,HTMAX,S1)
WRITE(3,*)
*****
* METHODE DIRECTE *
*****
WRITE(3,*)
WRITE(3,*)
WRITE(3,51)
WRITE(3,53)
WRITE(3,49)
WRITE(3,62) HMAX,THMAX,
FORMAT(1X,'HMAX=',F6.2,30X,'THMAX=',F6.2)
WRITE(3,100) TMAX,HTMAX
FORMAT(1X,'TMAX=',F6.2,30X,'HTMAX=',F6.2)
CALL CALL3(H,T1,HDX,THDX)
CALL CALL3(T,S1,TDIX,HTDIX)
WRITE(3,51)
WRITE(3,54)
WRITE(3,49)
WRITE(3,63) HDIX,THDX,
FORMAT(1X,'HDIX=',F6.2,30X,'THDX=',F6.2)
WRITE(3,101) TDIX,HTDIX
FORMAT(1X,'TDIX=',F6.2,30X,'HTDIX=',F6.2)
CALL CALL4(H,HS,THS,H1,TR,T1)
CALL CALL4(T,TS,HTS,HT,SA,S1)
WRITE(3,51)
WRITE(3,55)
WRITE(3,49)
WRITE(3,64) HS,THS
FORMAT(1X,'HS=',F6.2,34X,'THS=',F6.2)
WRITE(3,102) TS,HTS
FORMAT(1X,'TS=',F6.2,34X,'HTS=',F6.2)
CALL CALL5(H,T1,HMOY,TMOY)
WRITE(3,51)

```



```

WRITE(3,56)
WRITE(3,49)
WRITE(3,65) HMOY, TMOY
65 FORMAT(1X, 'HMOY=', F6.2, 'TMOY=', F6.2)
C *****
C * CALCUL DE HS PAR LA METHODE DES DEUX PLUS GRANDES VAGUES*
C *****
ABC=FLOAT(ND)/2.
HMAX2=REAL(H(2))
HM1=HMAX**2/(8.*LOG(FLOAT(ND)))
HM2=HMAX**2/(8.*LOG(ABC))
HMM=(HM1+HM2)/2.
VS=4.*(HMM)**0.5)
WRITE(3,51)
WRITE(3,57)
WRITE(3,49)
WRITE(3,66) VS
66 FORMAT(1X, 'HS=', F6.2)
C *****
C * CALCUL DES R/PORPTS ENTRE LES DIFFERENTS PARAMETRES *
C *****
A1=HMAX/HOIX
A2=HMAX/HS
A3=HMAX/HMOY
A4=HOIX/HS
A5=HOIX/HMOY
A6=HS/HMOY
B1=THMAX/THDIX
B2=THMAX/THS
B3=THMAX/TMOY
B4=THDIX/THS
B5=TMAX/TDIX
B6=TMAX/TS
B7=TMAX/TMOY
B8=TDIX/TS
B9=THDIX/TMOY
B10=THS/TMOY
B11=TDIX/TMOY
B12=TS/TMOY
WRITE(3,51)
WRITE(3,85)
WRITE(3,49)
WRITE(3,201) A1,A2,A3
WRITE(3,202) A4,A5,A6
WRITE(3,203) B1,B2,B3
WRITE(3,204) B4,B5,B6
WRITE(3,205) B7,B8,B9
WRITE(3,205) B10,B11,B12

```

```

201  FORMAT(1X,'A 1=',F6.2,11X,'A 2=',F6.2,12X,'A 3=',F6.2)
202  FORMAT(1X,'A 4=',F6.2,11X,'A 5=',F6.2,12X,'A 6=',F6.2)
203  FORMAT(1X,'B 1=',F6.2,11X,'B 2=',F6.2,12X,'B 3=',F6.2)
204  FORMAT(1X,'B 4=',F6.2,11X,'B 5=',F6.2,12X,'B 6=',F6.2)
205  FORMAT(1X,'B 7=',F6.2,11X,'B 8=',F6.2,12X,'B 9=',F6.2)
206  FORMAT(1X,'B10=',F6.2,11X,'B11=',F6.2,12X,'B12=',F6.2)
C *****
C *  HISTOGRAMME DE LA DISTRIBUTION DES HAUTEURS DES VAGUES *
C *  pour des classes variants de 0.5 m *
C *****
      WRITE(3,51)
      WRITE(3,254)
      WRITE(3,49)
      WRITE(3,255)
255  FORMAT(1X,'I Classe I Freq I %:(CL) I Fr.Cum I%(Cum)I')
257  FORMAT(1X,'I-----I-----I-----I-----I-----I')
      WRITE(3,51)
      PA=0.5
      Q=0
      FA(0)=0.
      FC(0)=0.
      DO 150 I=0,ND
      L=INT(FLOAT(ND))-I
251  IF(REAL(H(L)).GE.PA) THEN
      Q=Q+1
      BB=PA-0.5
      PB=BB+0.5
      PA=PA+0.5
      FA(Q)=(FLOAT(I))-FC(Q-1)
      K=INT(FA(Q))
      PR=FA(Q)*100./(FLOAT(ND))
      FC(Q)=(FLOAT(I))
      N=INT (FC(Q))
      PC=(FLOAT(I))*100./(FLOAT(ND))
      IF(REAL(H(L)).GE.PA) THEN
      FA(Q)=(FLOAT(I))-FC(Q-1)
      K=INT(FA(Q))
      PR=FA(Q)*100./(FLOAT(ND))
      N=I
      PC=(FLOAT(I))*100./(FLOAT(ND))
      WRITE(3,256) BB,PB,K,PR,N,PC
      WRITE(4,*) PR
      GOTO 251
      ELSE
      ENDIF
      WRITE(3,256) BB,PB,K,PR,N,PC
      WRITE(4,*) PR
256  FORMAT(1X,'I ',F5.2,' -- ',F5.2,' I ',I3,' I '
+,F5.2,' I ',I6,' I ',F6.2,' I ')
      WRITE(3,257)

```

```

        ELSE
        ENDIF
150  CONTINUE
        M=ND-N
        PR=M*100/ND
        PC=100.
        WRITE(3,256) PB,PA,M,PR,ND,PC
        WRITE(4,*) PR
        EG=10000.
        WRITE(4,*) EG
        WRITE(3,51)
C *****
C * CORRELATION DE LA DISTRIBUTION A UNE LOI DE RAYLEIGH *
C *****
        WRITE(3,51)
        WRITE(3,280)
        WRITE(3,49)
        WRITE(3,*) ' Densite de probabilite f(h): '
        WRITE(3,*) ' f(h)=(h/(4*Mo))*EXP(-h**2/(8*Mo)) '
        W=0.
        WRITE(4,*) W
        NC=Q+1
        DO 12 I=2,NC
        HH(I)=FLOAT(I)*0.5-0.25
        F=EXP(-HH(I)**2/(8.*Mo))
        F=(HH(I)/(4.*Mo))*P*100
        WRITE(3,14)HH(I),F
14  FORMAT(10X,'h=',F6.2,9X,'f(h)=',F7.2)
        F=F*0.5
        WRITE(4,*)F
12  CONTINUE
        WRITE(4,*) EG
C *****
C * CORRELATION DE LA DISTRIBUTION A UNE LOI DE GAUSS *
C *****
        WRITE(3,51)
        WRITE(3,281)
        WRITE(3,49)
        WRITE(3,*) ' Densite de probabilite '
        WRITE(3,*) ' f(h)=1/SQRT(2*PI*Mo)*EXP(-h**2/(2*Mo)) '
        NC=Q+1
        HM=(HH(NC)+0.25)/2.
        DO 13 I=1,NC
        HG=HH(I)-HM
        G=100.*(1./((SQRT(6.28318*Mo))))*EXP(-HG**2/(2.*Mo))
        WRITE(3,15)HH(I),G
15  FORMAT(10X,'h=',F6.2,9X,'f(h)=',F7.2)
        G=G*0.5
        WRITE(4,*)G
13  CONTINUE
        WRITE(3,51)

```

```

WRITE(3,*) ' Fichier: ', FIC1
WRITE(3,*) ' Fin du traitement STATISTIQUE. '
WRITE(3,*) ' voir Histogramme PAGE SUIVANTE.'
WRITE(3,51)
WRITE(4,*) EG
C *****
C * Partie nécessaire pour le tracé de l'histogramme en
C * utilisant le programme TRACE4.BAS
C *****
WRITE(4,*) HMAX
WRITE(4,*) TMAX
WRITE(4,*) EG/10
WRITE(4,*) HMAX
WRITE(4,*) HDIX
WRITE(4,*) HS
WRITE(4,*) HMOY
WRITE(4,*) EG/10
WRITE(4,*) EG
WRITE(4,*) EG
C *****
STOP
END
C *****
C *
C * TRAITEMENT ET TRI DES DONNEES
C *****
SUBROUTINE CAL1(C)
COMMON /A/ ND
COMMON /B/ D
DIMENSION C(500)
DO 2 K=1,ND
DO 3 L=1,ND-K
IF(REAL(C(L)).LT.REAL(C(L+1))) THEN
D=C(L+1)
C(L+1)=C(L)
C(L)=D
ENDIF
CONTINUE
CONTINUE
RETURN
END
*
* *****
*
* *****
SUBROUTINE CAL2(C,CMAX,CTMAX,T2)
COMPLEX C
DIMENSION C(500), T2(500)
CMAX=REAL(C(1))
K=AIMAG(C(1))
CTMAX=T2(K)
RETURN
END

```

END

RETURN

CTMAX=T2(K)

K=AIMAG(C(1))

CMAX=REAL(C(1))

DIMENSION C(500), T2(500)

COMPLEX C

SUBROUTINE CAL2(C,CMAX,CTMAX,T2)

* CALCUL DE HAUTEUR MAX , ET PERIODE MAX

END

RETURN

CONTINUE 2

CONTINUE 3

ENDIF

C(L)=D

C(L+1)=C(L)

D=C(L+1)

IF(REAL(C(L)).LT.REAL(C(L+1))) THEN

DO 3 L=1,ND-K

DO 2 K=1,ND

DIMENSION C(500)

COMMON /B/ D

COMMON /A/ ND

COMPLEX C,D

SUBROUTINE CAL1(C)

C *****

C * TRAITEMENT ET TRI DES DONNEES

C *****

END

STOP

C *****

C *****

WRITE(4,*) EG

WRITE(4,*) EG/10

WRITE(4,*) HMOY

WRITE(4,*) HS

WRITE(4,*) HDIX

WRITE(4,*) HMAX

WRITE(4,*) EG/10

WRITE(4,*) TMAX

WRITE(4,*) HMAX

C *****

C * utilisant le programme TRACE4.BAS

C *****

WRITE(4,*) EG

WRITE(3,51)

WRITE(3,*) ' voir Histogramme PAGE SUIVANTE.'

WRITE(3,*) ' Fin du traitement STATISTIQUE. '

WRITE(3,*) ' Fichier: ', FIC1

C *****

C * CALUL Hdix , THdix ET Tdix , HTdix *

C *****

SUBROUTINE CAL3(C,T2,CDIX,CTDIX)

COMPLEX C

COMMON /A/ ND

DIMENSION C(500) ,T2(500)

NR=INT(FLOAT(ND)/10.)

HD=0.

TD=0.

DO 80 L=1, NR

HD=HD+REAL(C(L))

K=INT(AIMAG(C(L)))

TD=TD+T2(K)

80 CONTINUE

CDIX=HD/FLOAT(NR)

CTDIX=TD/FLOAT(NR)

RETURN

END

C*****

C* CALCUL H_s ,(TH_s) ET T_s ,(HT_s) *

C*****

SUBROUTINE CAL4(C,CS,CTS,H,TA,T2)

COMPLEX C

COMMON /A/ ND

DIMENSION C(500),T2(500)

NT=INT(FLOAT(ND)/3.)

H=0.

TA=0.

DO 60 L=1, NT

H=H+REAL(C(L))

K=INT(AIMAG(C(L)))

TA=TA+T2(K)

60 CONTINUE

CS=H/(FLOAT(NT))

CTS=TA/(FLOAT(NT))

RETURN

END

C*****

C* CALCUL DE H_{moy} ET DE T_{moy} *

C*****

SUBROUTINE CAL5(C,T2,CMOY,CTMOY)

COMPLEX C

COMMON /A/ ND

DIMENSION C(500),T2(500)

NP=INT(FLOAT(ND))

TV=0.

HV=0.

DO 90 L=1, NP

HV=HV+REAL(C(L))

K=INT(AIMAG(C(L)))

```
TV=TV+T2(K)
90 CONTINUE
CMOY=HV/(FLOAT(NP))
CTMOY=TV/(FLOAT(NP))
RETURN
END
```

C *****FIN*****

```

C          *****
C          *   ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE   *
C          *****
C          *   ETUDE SPECTRALE DE LA HOULE PAR *
C          *   LA FONCTION D'AUTOCORRELATION  *
C          *****
C *
C *          Programme en FORTRAN 77.
C *          Nom du programme :AUTO.FOR
C * Le fichier des données type ---.SPC comporte une suite
C * de deux variables X(i) et Y(i), la première est en
C * centimètres la seconde en mètres. Les points sont
C * relevés avec un pas d'échantillonnage vérifiant
C * le théorème de SHANNON.
C * Le fichier des résultats type ---.SPR comporte les
C * valeurs de l'énergie spectrale pour les différentes
C * fréquences continues dans la bande retenue en vertu
C * du critère de NYQUIST, ainsi que tous les paramètres
C * caractérisant le SPECTRE d'énergie à savoir :
C * fp:fréquence de pointe, Tp:periode de pointe, Mo, etc
C *
C *   NOTA: * Unités:
C *          - Densité spectrale :m2s.
C *          - Fréquence :hz
C *          - Hauteur :m.
C *          - Période :s.
C *          - Moment d'ordre zéro :m2
C * Le spectre sera tracé par le programme SPECTRE.BAS
C *****
C *   DECLARATION ET DIMENSIONNEMENT DES TABLEAUX.
C *****
      COMPLEX JI,C,SS,SD,AB
      INTEGER FM
      CHARACTER*20 FCH1,FCH2
      DIMENSION X(500),Y(500),R(1210),SD(1210),C(1210)
      DIMENSION SP(1210),SPM(1210),B(5),ZZ(1210)
      JI=CMPLX(0.,1.)
      EG=10000
C *****
C *
C *          LECTURE DES DONNEES
C *****
      WRITE(*,*)' DONNER:'
      WRITE (*,1024)
1024  FORMAT(5X,' - LE NOM DE VOTRE FICHIER DE DONNEES:',$)
      READ(*,1026)FCH1
1026  FORMAT(A20)
      WRITE(*,42)
102  FORMAT(5X,' - LE NOM DE VOTRE FICHIER DE RESULTAT:',$)
      READ(*,1026)FCH2
      WRITE(*,45)
105  FORMAT(5X,' - LA VITESSE DU ROULEAU (EN cm/mn):',)$
      READ(*,*) VITESSE

```

```

WRITE(*,47)
47  FORMAT(5X,' - LE PAS DE L'ECHANTILLON (en s):',$(
    READ(*,*) PAS
    WRITE(*,*) CHAR(7)
    WRITE(*,*)'
                                -- PATIENTEZ SVP ...
    OPEN(2,FILE=FCH1,STATUS='OLD')
    OPEN(3,FILE=FCH2,STATUS='NEW')
    I=0
33  I=I+1
    READ(2,*,END=999) X(I),Y(I)
C ***** Multiplication par 1000 pour surmonter *****
C ***** le problème de la précision. *****
    X(I)=X(I)*1000.
    Y(I)=Y(I)*1000.
    GOTO 33
999  CLOSE(2)
    X(0)=0.
    Y(0)=0.
    WRITE(*,*)' SAISIE DES DONNEES TERMINEE '
C *****
C *          CALCUL DE LA FONCTION D'AUTOCORRELATION          *
C *****
C *          CALCUL DES ORDONNEES INTERPOLEES                  *
C *          TRANSFORMATION DU PAS EN CENTIMETRES             *
C *****
    PAS=.01666667*VITESSE*PAS
    write(*,*)' pas (en Cm) sur le ROULEAU:',PAS
    PI=3.141592654
C *****          CALCUL DE LA DUREE D'ECHANTILLON          *****
    GRT=X(I-1)/100.
C *****          CALCUL DE LA FREQUENCE MAXIMALE 1/FM      *****
    FM=GRT/20/PAS
C *****          INTERPOLATIONS          *****
    N=I-1
    PAS=PAS*1000.
    J=0
    XI=0.
    DO 31 I=1,N
    T=X(I)-XI
    IF (T.LT.PAS) GOTO 31
    NP=INT(T/PAS)
    DO 35 K=1,NP
    J=J+1
    DX=FLOAT(K)*PAS-(X(I-1)-XI)
    ZZ(J)=(Y(I-1)+(Y(I)-Y(I-1)))/(X(I)-X(I-1))*DX)/1000.
35  CONTINUE
    XI=FLOAT(J)*PAS
31  CONTINUE
    WRITE(*,*)' Interpolations terminées .'

```



```

C *****
C *          CALCUL DES VALEURS R( $\tau$ ) AVEC  $\tau=k.pas$           *
C *****
      N=J
      IF (MOD(N,2).EQ.0) THEN
      N=N-1
      ELSE
      ENDIF
C ****          CALCUL DE LA MOITIEE DES R( $\tau$ ) VU LA PARITE          ****
      JJ=NINT(FLOAT(N)/2.)
      DO 2 K=0,JJ-1
      S=0.
      DO 3 I=1,N-K
      S=S+ZZ(I)*ZZ(I+K)
3      CONTINUE
      RR=S/(FLOAT(N)-FLOAT(K))
C *****
C *          FENETRE DE TRONCATURE "Hanning"          *
C *****
      RR=RR*.5*(1.+COS(2.*PI*(K*PAS/100)/GRT))
      R(K)=RR
2      CONTINUE
      WRITE(*,*) .CHAR(7)
      WRITE(*,*) ' suite des calculs ...'
C *****
C *          CALCUL & TRACE DU SPECTRE          *
C *****
      PAS=PAS/1000.
C          CALCUL DES DENSITES SPECTRALES S(f)=SD(LF)
      DO 6 LF=0,FM
      SS=CMPLX(0.,0.)
      DO 8 I=0,JJ
      SIF=R(I)*COS(2.*PI*(FLOAT(LF)/GRT)*FLOAT(I)*PAS*10.)
      SS=SS+SIF
8      CONTINUE
      SD(LF)=SS*2.*PAS*10.
      SD(LF)=CABS(SD(LF))
      C(LF)=SD(LF)+JI*LF
      WRITE(3,2111)LF,REAL(C(LF))
2111  FORMAT(1X,I4,F15.7)
      6      CONTINUE
      WRITE(3,*) 1,EG
C *****
C *          CALCUL DE LA FREQUENCE DE POINTE # DENSITE D'ENERGIE MAX*
C *****
C *****          TRI DES FREQUENCES          *****
      DO 20 LFF=0,FM-1
      DO 9 LF=0,FM-1-LFF
      IF (REAL(C(LF)).LT.REAL(C(LF+1))) THEN
      AB=C(LF+1)
      C(LF+1)=C(LF)

```

```

      C(LF)=AB
      ELSE
      ENDIF
      9  CONTINUE
      20 CONTINUE
C *****          PERIODE DE POINTE          *****
      TP=GRT/AIMAG(C(0))
C *****          DENSITE MAXIMALE           *****
      R1=REAL(C(0))
C *****          POSITION DE LA FREQUENCE     *****
      R2=AIMAG(C(0))
C *****          FREQUENCE DE POINTE       *****
      R3=R2/GRT
      WRITE(*,1555)R1,R3,TP
      WRITE(*,*)' N° DE LA FREQUENCE: ',AIMAG(C(0))
1555  FORMAT(1X,'DSMAX=',F6.2,10X,'FPOINTE=',F6.2,10X,'
      +TPOINTE=',F6.2)
C *****
C *          CALCUL DE M0,M2,M4 # HS,TMS,EPS          *
C *****
C *****  CALCUL DES DIFFERENTS MOMENTS M(IEXP)=B(IEXP) *****
      DO 17 IEXP=0,4,2
      B(IEXP)=0.0
      DO 16 LF=0,FM-1
      BA=(SD(LF)+SD(LF+1))*((1./GRT)/2.)
      BB=BA*((1/GRT*LF)**IEXP)
      B(IEXP)=B(IEXP)+BB
16  CONTINUE
      WRITE(*,*)' M',IEXP,'=',B(IEXP)
17  CONTINUE
      WRITE(*,*)' Mo=',B(0)
      WRITE(*,*)' Ro=',R(0)
C *****          CALCUL DES AUTRES PARAMETRES          *****
      ZMOYEN=2.*(B(2)/B(0))**0.5
      ZMAXI=(B(4)/B(0))**0.5
C *****          CALCUL DE HS          *****
      G=(B(0))**0.5
      HS=4.*G
C *****          CALCUL DE TMS          *****
      TMS=(B(0)/B(2))**0.5
      D=B(2)**2/(B(0)*B(4))
C *****          CALCUL DE ε          *****
      EPS=(1.-D)**0.5
C *****          CALCUL DU COEFFICIENT DE GODA          *****
      DO 5551 I=1,FM-1
      BE=(SD(I)+SD(I+1))*(1/GRT/2.)
      BBE=BE*(1/GRT*I)
5551  CONTINUE
      QPP=PI*(1.-BBE**2/(B(0)*B(2)))
      QP=(2./QPP)**0.5

```

```

C *****
C *          CALCUL DES SPECTRES THEORIQUES          *
C *****
C *          CALCUL DES DATAS .PIERSON.M.          *
C *****
      A=0.315*(HS**2)*(R3**4)
      BSP=-1.25*(R3**4)
      DO 2001 I=1,FM
      PMI=1/GRT*FLOAT(I)
      RJUP=BSP/(PMI**4)
      PPO=EXP(RJUP)
      SPM(I)=(A/(PMI**5))*PPO
      PC=FLOAT(I)
      WRITE(3,*)PC,SPM(I)
2001  CONTINUE
      WRITE(3,*) 1,EG
C *****
C *          CALCUL DES DATAS JONSWAP          *
C * LES VALEURS DE  $\sigma$  PROPOSEES PAR HASSELMANN SONT : *
C *          F $\leq$ Fp: $\sigma$ =0.07 F $\geq$ Fp: $\sigma$ =0.09 *
C *****
C *****          F $\leq$ Fp          *****
      G1=0.07
      MD=R2
      DO 2010 I=1,MD
      WI=1/GRT*FLOAT(I)
      DOUS=BSP/(WI**4)
      SJI=(A*((WI)**(-5)))*EXP(DOUS)
      GD=2.*((G1*R3)**2)
      XPI=(WI-R3)**2/GD
      XP1=EXP(-XPI)
      SJ=SJI*((3.30)**XP1)
      AC=FLOAT(I)
      WRITE(3,*)AC,SJ
2010  CONTINUE
C *****
C *          CALCUL DES DATAS # JONSWAP # F>FP          *
C *****
      G2=0.09
      MI1=R2+1
      DO 2013 I=MI1,FM
      WL=1/GRT*FLOAT(I)
      DOUL=BSP/(WL**4)
      SJT=(A*((WL)**(-5)))*EXP(DOUL)
      XPT=((WL-R3)**2)/(2.*((G2*R3)**2))
      XP2=EXP(-XPT)
      SJ=SJT*((3,3)**XP2)
      EC=FLOAT(I)
      WRITE(3,*)EC,SJ
2013  CONTINUE
      WRITE(3,*) 1,EG

```

```

C *****
C *   TRANSFERS DES DIFFERENTS PARAMETRES POUR *
C *   LE TRACE DU SPECTRE *
C *****

WRITE(3,*)1,R1
WRITE(3,*)1,R3
WRITE(3,*)1,TP
WRITE(3,*)1,B(0)
WRITE(3,*)1,B(2)
WRITE(3,*)1,B(4)
WRITE(3,*)1,TMS
WRITE(3,*)1,HS
WRITE(3,*)1,EPS
WRITE(3,*)1,ZMOYEN
WRITE(3,*)1,ZMAXI
WRITE(3,*)1,BBE
WRITE(3,*)1,QP
WRITE(3,*)1,R1
WRITE(3,*) .,EG
CLOSE(3)

*****
WRITE(*,*) CHAR(7)
STOP
END

C ***** FIN *****

```

```

C          *****
C          *   ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE *
C          *****
C          * ANALYSE SPECTRALE DE LA HOULE *
C          * PAR LA TRANSFORMEE DE FOURIER *
C          *           RAPIDE (T.F.R)           *
C          *****
C *          Programme en FORTRAN 77 *
C *          Nom du programme : TFR.FOR *
C * Le fichier des données type ---.SPC comporte une suite *
C * de deux variables X(i) et Y(i), la première est en *
C * centimètres la seconde en mètres. Les points sont *
C * relevés avec un pas d'échantillonnage vérifiant *
C * le théorème de SHANNON . *
C * Le fichier des résultats type ----.SPT comporte les *
C * valeurs de l'énergie spectrale pour les différentes *
C * fréquences continues dans la bande de fréquences *
C * retenue en vertu du critère de NYQUIST, ainsi que tous *
C * les paramètres caractérisant le SPECTRE d'énergie: *
C * fp:fréquence de pointe, Tp:période de pointe,Mo,... *
C * NOTA: * Unités: *
C *          - Densité spectrale :m2s. *
C *          - Fréquence :hz *
C *          - Hauteur :m. *
C *          - Période :s. *
C *          - Moment d'ordre zéro :m2 *
C ** La variable EG ne sert que pour repère dans le fichier *
C * résultat. *
C ** Le spectre sera tracé par le programme SPECTRE4.BAS *
C *****
C          *   CALCUL DE LA DENSITE SPECTRALE *
C          *   PAR LA TRANSFORMEE DE FOURIER *
C          *   RAPIDE -TFR- (FFT) *
C *****
C *          DECLARATIONS ET DIMENSIONNEMENTS DES TABLEUX *
C *****
C *          ORDRE DE LA TRANSFORMEE :N *
C *          PUISSANCE DE DEUX :N1 *
C *          S:TABLEAU DES NBR A TRANSFORMER *
C *          W:COEF DE LA TRANSFORMEE *
C *          TYPE DE LA TRANSFORMEE:INVERSE SI INV=FALSE *
C *****
          COMPLEX S,W,WO,WOO,AA,BB,SO,JI
          CHARACTER*20 FCH1,FCH2
          LOGICAL INV
          DIMENSION W(1025)
          DIMENSION K(12),KK(14),IM(12),SD(1048),B(4)
          DIMENSION X(500),Y(500),ZZ(2050),R(1048)
          IMP=3
          INV=.TRUE.

```

```

      JI=CMPLX(0.,1.)
      EG=10000.
C *****
C *** LECTURE DES DONNEES ***
C *****
      WRITE(*,*) ' DONNER: '
      WRITE (*,1024)
1024  FORMAT(' - LE NOM DE VOTRE FICHER DES  DONNEES: ', $)
      READ(*,1026) FCH1
1026  FORMAT(A20)
      WRITE(*,42)
42    FORMAT(' - LE NOM DE VOTRE FICHER DE RESULTATS: ', $)
      READ(*,1026) FCH2
      WRITE(*,48)
48    FORMAT(' - LA VITESSE D'ENRGISTREMENT(EN cm/mn): ', $)
      READ(*,*) VITESSE
      WRITE(*,47)
47    FORMAT(' - LE PAS D'ECHANTILONNAGE (EN s): ', $)
      READ(*,*) PAS
      WRITE(*,*) CHAR(7)
      WRITE(*,*) '          -- PATIENTEZ SVP ... --'
      OPEN(2,FILE=FCH1,STATUS='OLD')
      OPEN(3,FILE=FCH2,STATUS='NEW')
      I=0
33    I=I+1
      READ(2,*,END=999) X(I),Y(I)
      X(I)=X(I)*1000.
      Y(I)=Y(I)*1000.
      S(I)=CMPLX(0.,0.)
      GOTO 33
999  CLOSE(2)
      X(0)=0.
      Y(0)=0.
      WRITE(*,*) ' SAISIE DES DONNEES TERMINEE '
C *****
C * TRANSFORMATION DU PAS EN CENTIMETRES (SUR LE ROULEAU) *
C *****
      PAS=.016666667*VITESSE*PAS
      WRITE(*,*) ' PAS EN Cm: ', PAS
C  CALCUL DE L'EXPOSANT DU DEUX(II faut que N=2n)
      IW=(X(I-1)/1000/PAS)
      DO 500 KN=1,15
      JW=2**KN
      IF (JW.GT.IW) GOTO 600
500  CONTINUE
600  N=2**(KN)
      WRITE(*,*) ' NOMBRE DE POINTS A INTERPOLER: ', N
      N1=KN

```

```

C *****
C *          CALCUL DES ORDONNEES INTERPOLEES          *
C *****
C   CALCUL DU PAS AFIN D'AVOIR N=20
   PAS=X(I-1)/1000./N
   GRT=X(I-1)/100.
   PI=3.141592654
   PAS=PAS*1000.
C   CALCUL DES INTERPOLATIONS
   J=0
   XI=0.
   DO 31 I=1,N
   T=X(I)-XI
   IF (T.LT.PAS) GOTO 31
   NP=INT(T/PAS)
   DO 35 JK=1,NP
   J=J+1
   DX=FLOAT(JK)*PAS-(X(I-1)-XI)
   ZZ(J)=(Y(I-1)+(Y(I)-Y(I-1))/(X(I)-X(I-1))*DX)/1000.
35  CONTINUE
   XI=FLOAT(J)*PAS
31  CONTINUE
   WRITE(*,*)'   Interpolations terminées .'
   N=J
C   CALCUL DE LA FONCTION D'INTERPOLATION R(t) AVEC t=JK.PAS
   JJ=NINT(FLOAT(N)/2.)
   DO 2 JK=0,JJ-1
   TS=0.
   DO 3 I=1,N-JK
   TS=TS+ZZ(I)*ZZ(I+JK)
3.  CONTINUE
   RR=TS/(FLOAT(N)-FLOAT(JK))
C *****
C *          FENETRE DE TRONCATURE DE "Hanning"          *
C *****
   RR=RR*.5*(1.+COS(2.*PI*(JK*PAS/100.)/GRT))
   R(JK)=RR
2   CONTINUE
   WRITE(*,*) CHAR(7)
C   FONCTION A TRANSFORMER
   DO 46 JK=1,JJ
   S(JK)=R(JK-1)
46  CONTINUE
   WRITE(*,*) CHAR(7)
   WRITE(*,*) '   SUITE DES CALCULS ...'
C *****
   CALL TFR(S,N,N1,INV)
   NN=IW/2

```

```

      IF(INV)GOTO 70
      FLN=FLOAT(N)
      DO 80 I=1,NN
80    S(I)=S(I)/FLN
70    CONTINUE
C *****
C * PARTIE DE CALCUL DE S(f) ET DES DIFFERENTS PARAMETRES *
C * Mo,Hs.... AINSI QUE L'IMPRESSION DES RESULTATS *
C *****
C    CALCUL DES S(f) ET DE S(f)max
      TT=0.
      DO 50 I=1,NN
      I1=I-1
      TR=CABS(S(I))
      TT=AMAX1(TT,TR)
      SD(I1)=TR
50    WRITE(IMP,200) TR
      WRITE(*,*)' I=',I
200   FORMAT(E20.4)
      WRITE(IMP,*) EG
C    CALCUL DE MO,M2,M4 # HS,TMS,EPS
      .....
C    CALCUL DES DIFFERENTS MOMENTS M(IEXP)=B(IEXP)
      WRITE(*,*)'CALCUL DES # MOMENTS M(IEXP)=B(IEXP)'
      DO 17 IEXP=0,4,2
      B(IEXP)=0.0
      DO 16 LF=0,NN-1
      BA=(SD(LF)+SD(LF+1))*((1./GRT)/2.)
      BB=BA*((1/GRT*LF)**IEXP)
      B(IEXP)=B(IEXP)+BB
16    CONTINUE
      WRITE(*,*)'M',IEXP,'=',B(IEXP)
17    CONTINUE
C    CALCUL DES AUTRES PARAMETRES
      ZMOYEN=2.*(B(2)/B(0))**0.5
      ZMAXI=(B(4)/B(0))**0.5
C    CALCUL DE Hs
      G=(B(0))**0.5
      HS=4.*G
C    CALCUL DE TMS
      TMS=(B(0)/B(2))**0.5
C    CALCUL DE e
      D=B(2)**2/(B(0)*B(4))
      EPS=(1.-D)**0.5
      TRANSFERS DES RESULTATS POUR LE TRACE
      WRITE(IMP,*) TT
      WRITE(IMP,*)B(0)
      WRITE(IMP,*)B(2)
      WRITE(IMP,*)B(4)
      WRITE(IMP,*)TMS
      WRITE(IMP,*)HS

```



```

WRITE(IMP,*)EPS
WRITE(IMP,*)EG
WRITE(IMP,*) TT
CLOSE(3)
C *****
WRITE(*,*) CHAR(7)
C *****
STOP
END
C *****
C *
C * PARTIE DE CALCUL *
C *****
SUBROUTINE TFR(S,N,N1,INV)
C S:TABLEAU DES NOMBRES A TRANSFORMER
C N:ORDRE E LA TRANSFORMEE
C TYPE DE TRANSFORMEE :INVERSE SI INV=FALSE
COMPLEX S(2048)
LOGICAL INV
COMPLEX W,W0,W0C,AA,BB,SO
DIMENSION W(1025)
DIMENSION K(12),KK(14),JM(12)
C INVERSION BINAIRE
N2=2**(N1-1)
IM=N1/2+0.1
SING=1
IF (INV) SING=-1.
DO 100 I=1,IM
IM1=N1-I
DO 81 I1=1,IM1
81 JM(I1)=2
DO 82 I1=IM1,12
82 JM(I1)=1
J12M=JM(12)
J11M=JM(11)
J10M=JM(10)
J9M=JM(9)
J8M=JM(8)
J7M=JM(7)
J6M=JM(6)
J5M=JM(5)
J4M=JM(4)
J3M=JM(3)
J2M=JM(2)
J1M=JM(1)
DO 100 J12=1,J12M
K(12)=J12-1
DO 100 J11=1,J11M
K(11)=J11-1
DO 100 J10=1,J10M
K(10)=J10-1
DO 100 J9=1,J9M

```

```

      K(9)=J9-1
      DO 100 J8=1,J8M
      K(8)=J8-1
      DO 100 J7=1,J7M
      K(7)=J7-1
      DO 100 J6=1,J6M
      K(6)=J6-1
      DO 100 J5=1,J5M
      K(5)=J5-1
      DO 100 J4=1,J4M
      K(4)=J4-1
      DO 100 J3=1,J3M
      K(3)=J3-1
      DO 100 J2=1,J2M
      K(2)=J2-1
      DO 100 J1=1,J1M
      K(1)=J1-1
      NBP=N1-2*I
      DO 90 I1=1,NBP
90    KK(I1+I)=K(I1)
      KK(I)=1
      KK(N1+1-I)=0
      IF(I.EQ.1)GOTO 94
      IM1=I-1
      DO 92 I1=1,IM1
      KK(I1)=K(NBP+I1)
92    KK(N1+1-I1)=KK(I1)
94    KT1=1
      KT2=2***(N1-1)
      KT=KK(1)
      KI=KK(1)*KT2
      DO 105 J=2,N1
      KT1=KT1*2
      KT2=KT2/2+0.1
      KT=KT+KK(J)*KT1
105   KI=KI+KK(J)*KT2
      SO=S(KT+1)
      S(KT+1)=S(KI+1)
      S(KI+1)=SO
100   CONTINUE

```

```

C *****
C *                                     CALCUL DES EXPONENTIELLES *
C *****

```

```

      A=2.*3.14159265/N
      B=COS(A)
      C=SING*SIN(A)
      WO=CMPLX(B,C)
      WOO=WO
      W(2)=WO
      DO 190 I=2,N2
      WOO=WOO*WO

```

```

190     W(I+1)=W00
        W(1)=1
C *****
C *           ALGORITHME DE CALCUL RAPIDE *
C *****
        DO 80 I=1,N1
        ND=2**(N1-I)
        NP1=2**(I-1)
        NP=2*NP1
        DO 80 KD=1,ND
        KDO=(KD-1)*NP
        DO 80 J=1,NP1
        JO=J+KDO
        NEXP=1+(J-1)*ND
        AA=S(JO)
        BB=S(JO+NP1)*W(NEXP)
        S(JO)=AA+BB
        S(JO+NP1)=AA-BB
80     CONTINUE
        IF(INV)GOTO 112
        FLN=FLOAT(N)
        DO 110 I=1,N
110     S(I)=S(I)/FLN
112     CONTINUE
        RETURN
        END
C ***** FIN *****

```