

# ANALYSE STATISTIQUE DE LA HOULE SUR LE LITTORAL ALGERIEN

Par :  
D. RAHMANI  
Ingénieur E.N.P. - Magister en Hydraulique .  
Chef de Département à l' E.N.T.P.

## 1 INTRODUCTION

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. 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 et d'en déduire par une analyse statistique les différents paramètres de la houle. Dans cet article nous exposons une méthode d'analyse des enregistrements et les résultats trouvés pour les sites de SKIKDA et d'ARZEW ce qui nous a permis de connaître le régime des houles au cours du temps, l'évolution des tempêtes et l'ajustement aux différentes théories. Cette étude a été réalisée au Laboratoire des Etudes Maritimes (L.E.M).

## 2 DESCRIPTION DES MESURES ET DES METHODES DE DEPOUILLEMENT

Les enregistrements de houle ont été effectués à l'aide d'un houlographe type "DATAWELL", toutes les deux heures sur une durée de 5 minutes, avec une cadence d'échantillonnage de 2 hertz.

Le dépouillement des rouleaux est fait par un digitaliseur et grâce à un programme que nous avons élaboré on a déterminé les paramètres de la houle.

D'après l'évolution de la hauteur maximal de la houle durant la période d'observation, trois tempêtes ont été sélectionnées pour une analyse détaillée sur le site de SKIKDA.

L'agitation peut être représentée par la côte  $Z(t)$  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 :

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

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 pos-

sible de remplacer les moyennes statistiques de la fonction aléatoire  $Z(t)$  par ses moyennes temporelles.

Il en résulte :

$$\bar{Z}(t) = 0 \quad \overline{Z^2}(t) = 1/2 \quad \sum_1^n a_n^2 = m_0$$

( $m_0$  : moment d'ordre zéro du processus).

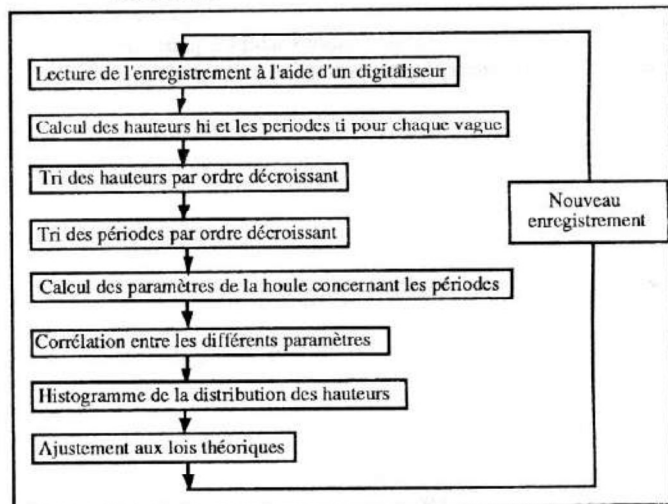
La détermination des vagues individuelles se fait par l'analyse dite "Zero Up Crossing" ou bien les passages successifs par le niveau moyen par valeurs croissantes.

Chaque vague individuelle est caractérisée par :

- sa hauteur  $H_i$  (longueur séparant le plus grand maximum du plus petit minimum atteint par cette vague),
- sa période  $T_i$ .

## 3 ANALYSE DES ENREGISTREMENTS DE HOULE

A l'aide de ce programme que nous avons élaboré, on a étudié les caractéristiques des trois tempêtes et les corrélations existantes entre elles dans les régions de SKIKDA et d'ARZEW.



Durant les périodes d'enregistrement, toutes les tempêtes enregistrées avaient une hauteur maximale inférieure à 8 m sur SKIKDA et à 4 m sur ARZEW.

Les trois tempêtes analysées sur le site de SKIKDA présentent

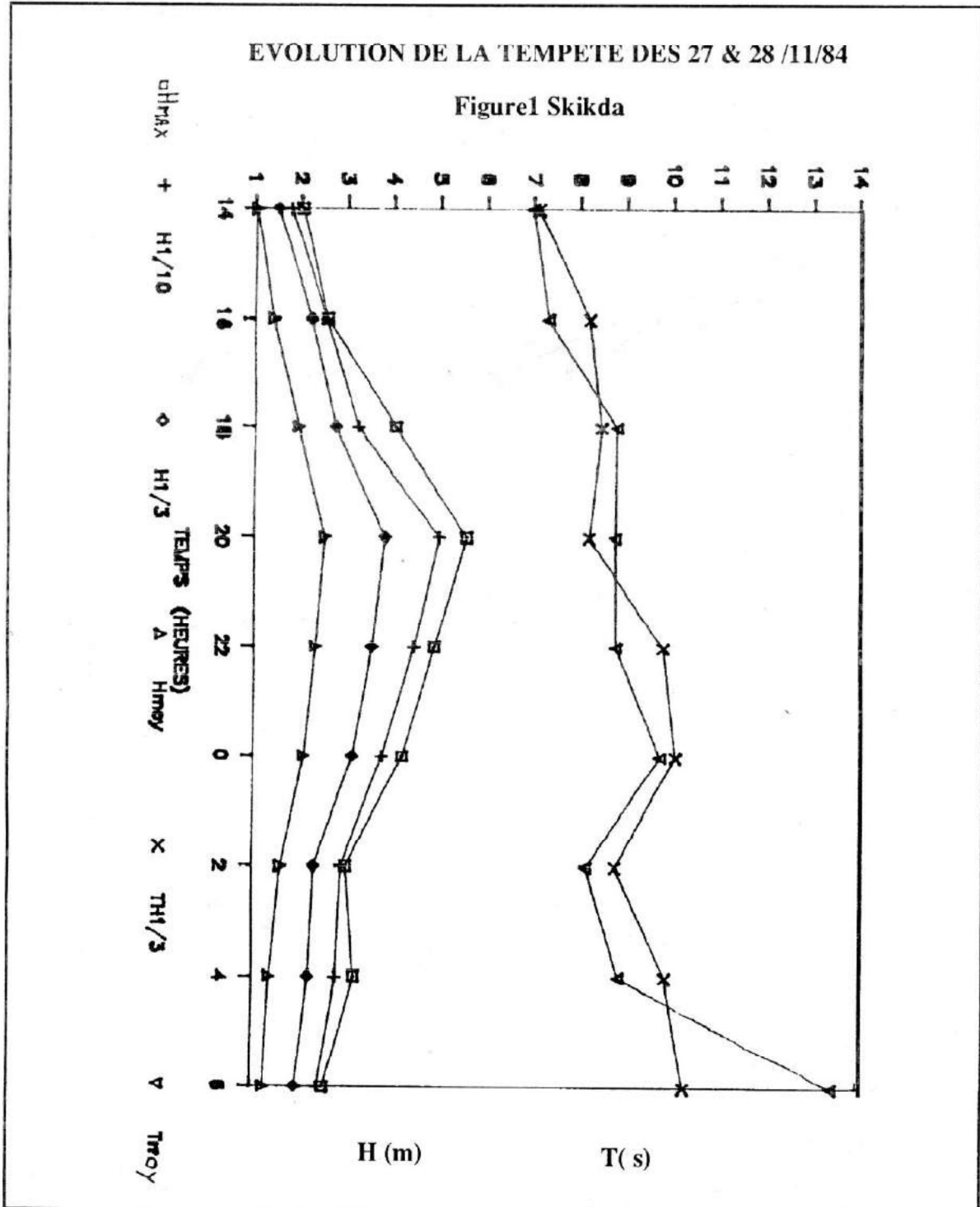
en général une phase de croissance rapide plus ou moins régulière, un palier ou la houle atteint son paroxysme et enfin une phase de décroissance lente généralement irrégulière.

a) **Tempête du 27 et 28 NOVEMBRE 1984 (voir fig. 1) :**  
 Lors de cette tempête le paroxysme est atteint le 27 novembre à 20 h avec :  
 $H_{1/3} = 3,85$  m (moyenne du tiers supérieur des vagues)  
 $T_{H1/3} = 8,24$  s (période relative au tiers supérieur des vagues)

$H_{max} = 5,60$  m (hauteur maximale des vagues)  
 $TH_{max} = 8,80$  s (période de la vague maximale)

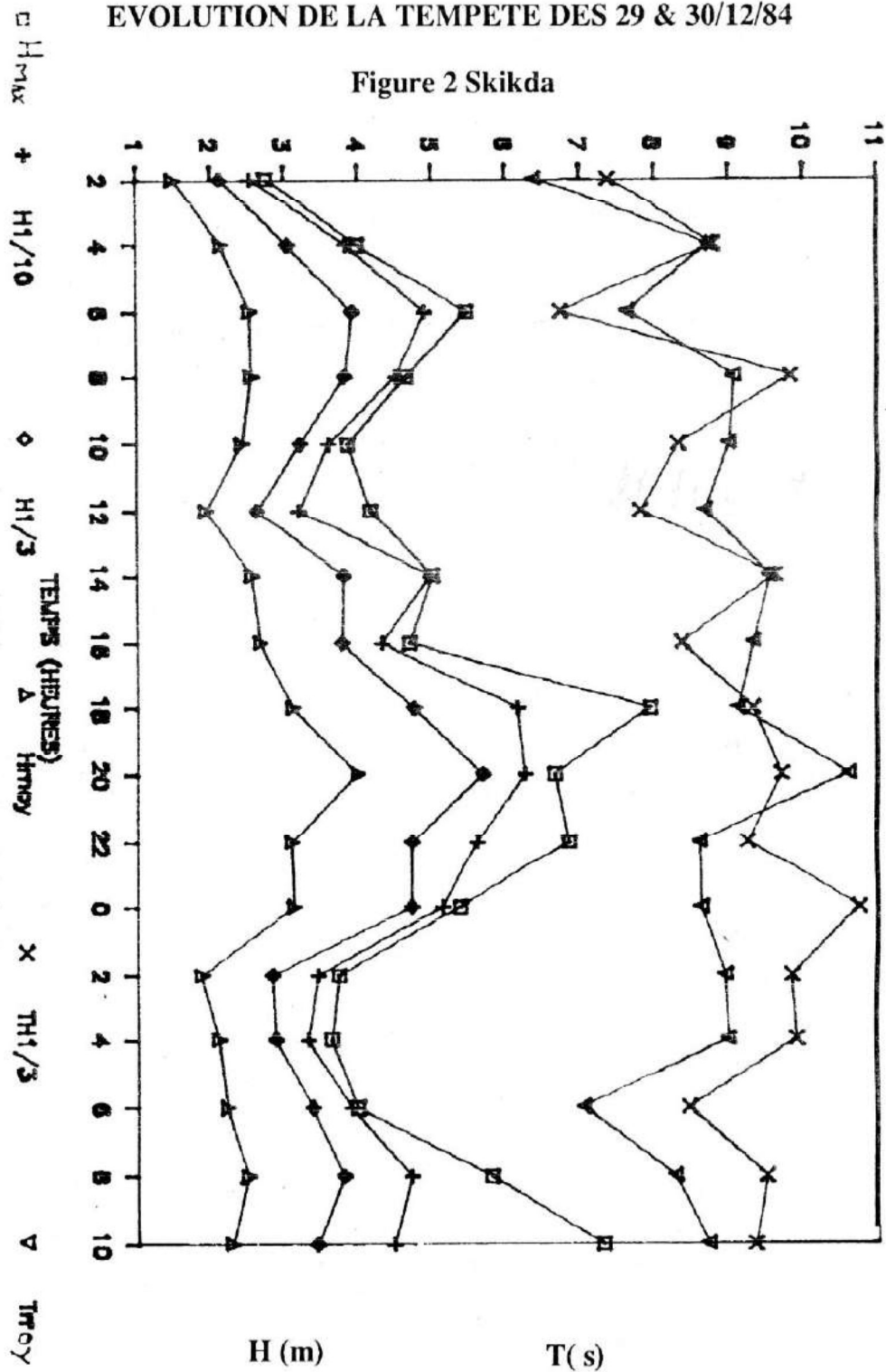
b) **Tempête du 29 et 30 DECEMBRE 1984 (voir fig. 2) :**  
 Le paroxysme est atteint à 18h avec :  
 $H_{1/3} = 4,74$  m  $T_{H1/3} = 9,31$  s  
 $H_{max} = 7,94$  m  $TH_{max} = 7,84$  s

c) **Tempête du 08 au 10 JANVIER 1985 (voir fig. 3) :**  
 Pour cette tempête le paroxysme a eu lieu le 9 janvier à



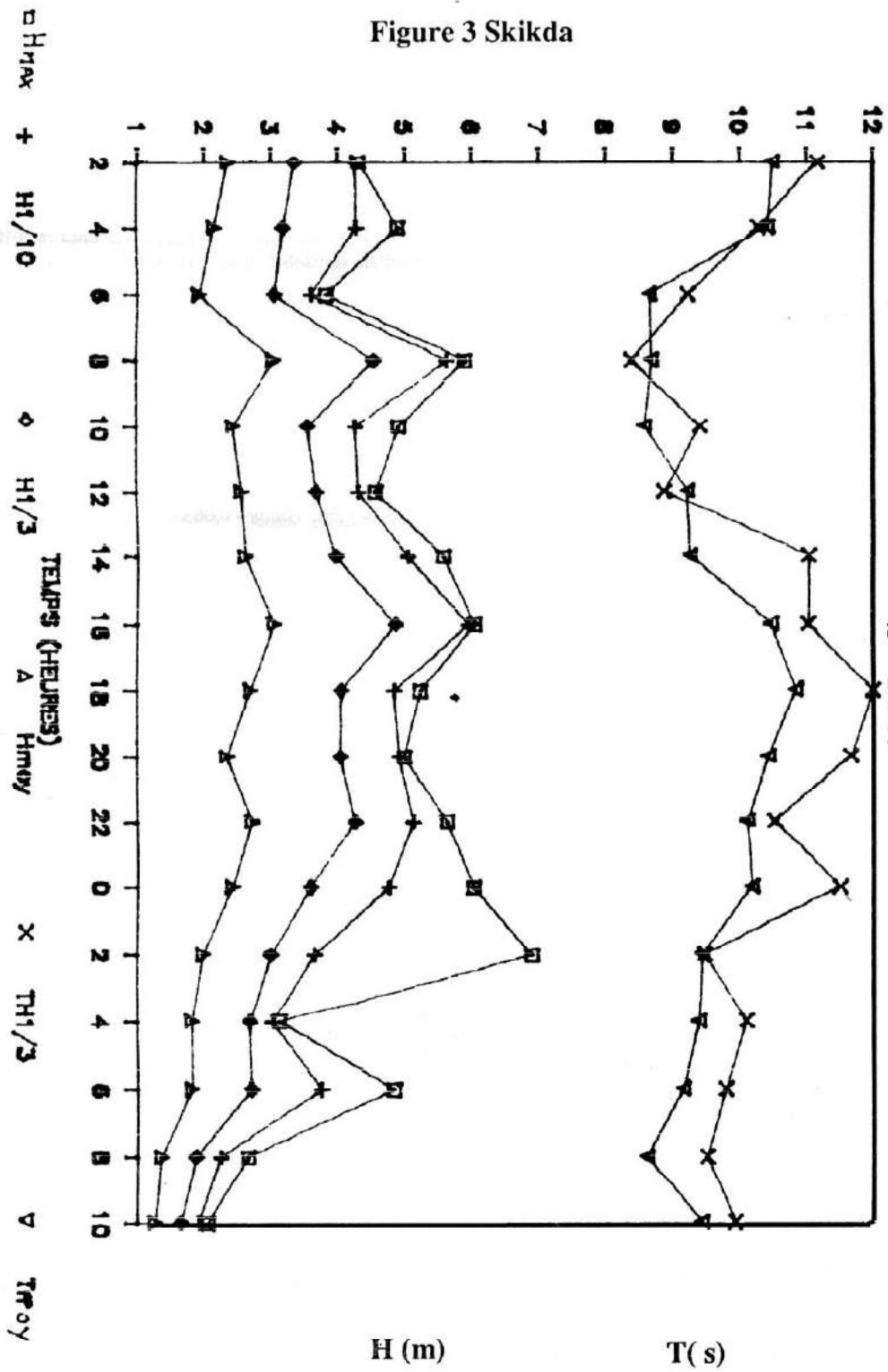
EVOLUTION DE LA TEMPETE DES 29 & 30/12/84

Figure 2 Skikda



EVOLUTION DE LA TEMPETE DES 9 & 10/01/85

Figure 3 Skikda



16 h avec :  
 $H_{1/3} = 4,87 \text{ m}$     $TH_{1/3} = 11,03 \text{ s}$   
 $H_{\max} = 6,06 \text{ m}$     $TH_{\max} = 15,04 \text{ s}$

Les figures (1), (2) et (3) illustrent l'évolution des trois tempêtes au cours du temps.

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 régulière, la phase de décroissance était plus lente et plus régulière.

Les valeurs caractéristiques de la tempête sont :

$H_{\max} = 3,92 \text{ m}$     $TH_{\max} = 6,84 \text{ s}$   
 $H_{1/3} = 3,00 \text{ m}$     $TH_{1/3} = 7,27 \text{ s}$

#### 4 LOI DE REPARTITION DES VAGUES

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 :

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

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

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

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

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

d'où :

$$H_{1/n} = \frac{H_0 \int_{H_0}^{\infty} H P(H) dH}{P(H \geq H_0) = 1/n} \quad (3.1)$$

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

$$H_{\text{moy}} = \int_{H_0}^{\infty} H P(H) dH = 2,5066 \text{ m} \quad (3.2)$$

$$H_{1/3} = \int_{H_0}^{\infty} H P(H) dH = 4(m_0)^{1/2} \quad (3.3)$$

où  $H_0$  est défini par :

$$\int_{H_0}^{\infty} P(H) dH = 1/3$$

$$\text{d'où :} \\ H_{1/3} = [8 m_0 \ln 3]^{1/2} = 1,6 H_m \quad (3.3)$$

$$H_{1/10} = 2,03 H_m = 1,27 H_s \quad (3.4)$$

$$H_{\max} / H_s = (0,5[2 \ln N]^{1/2} + C / 2 \ln N) \quad (3.5)$$

où :

$C = 0,57722$  est la constante d'Euler

$N =$  nombre de vagues

Les histogrammes des hauteurs de vague ont été tracés avec intercalation des loi de RAYLEIGH et de GAUSS dans le but de les ajuster à une loi théorique. Ils montrent que la distribution des hauteurs concordait avec une loi de RAYLEIGH (fig. 4 pour SKIKDA et fig. 5 pour ARZEW). L'analyse statistique des enregistrements a permis de voir que les différentes variables de la houle sont très fortement corrélées entre elles. Le coefficient de corrélation entre différentes variables est compris entre 0,891 et 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 des résultats suivants :

Sur SKIKDA :

$$H_{\max} = 1,336 H_{1/3} + 0,079 \quad (4.1)$$

$$H_{1/10} = 1,186 H_{\text{moy}} - 0,019 \quad (4.2)$$

$$H_{1/10} = 1,210 H_{1/3} + 0,022 \quad (4.3)$$

$$H_{1/3} = 1,495 H_{\text{moy}} - 0,043 \quad (4.4)$$

Sur ARZEW :

$$H_{\max} = 1,396 H_{1/3} + 0,205 \quad (4.5)$$

$$H_{1/10} = 1,962 H_{\text{moy}} + 0,010 \quad (4.6)$$

$$H_{1/10} = 1,555 H_{1/3} - 0,418 \quad (4.7)$$

$$H_{1/3} = 1,607 H_{\text{moy}} - 0,063 \quad (4.8)$$

#### 5 ANALYSE SPECTRALE DE LA HOULE

##### 5.1 Approche de la transformée de Fourier de la fonction 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 côte de la surface libre. Elle décrit la dépendance et la valeur de la fonction  $Z(t)$  à un instant  $t$  et à un autre instant  $t + \tau$ . Elle est définie par :

$$R(t, \tau) = Z(t) \cdot Z(t + \tau) \quad (5.1)$$

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  $R(\tau)$ :

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R(\tau) \exp(-2i \pi f \tau) d\tau \quad (5.2)$$

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

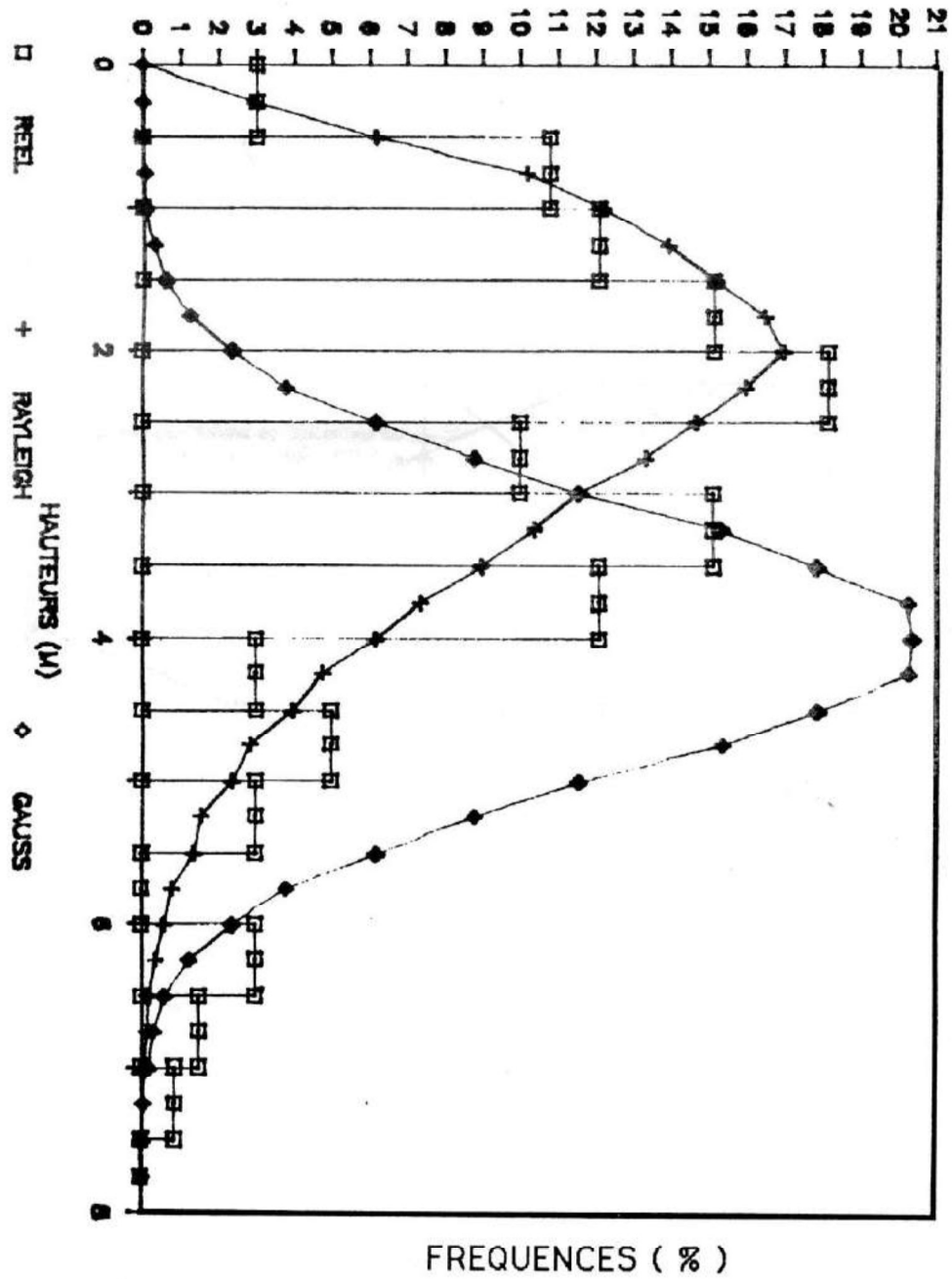
Comme le processus est pair : alors  $R(\tau) = R(-\tau)$

d'où :

$$S(f) = 2 \int_0^{+\infty} R(\tau) \cos(2 \pi f \tau) d\tau \quad (5.3)$$

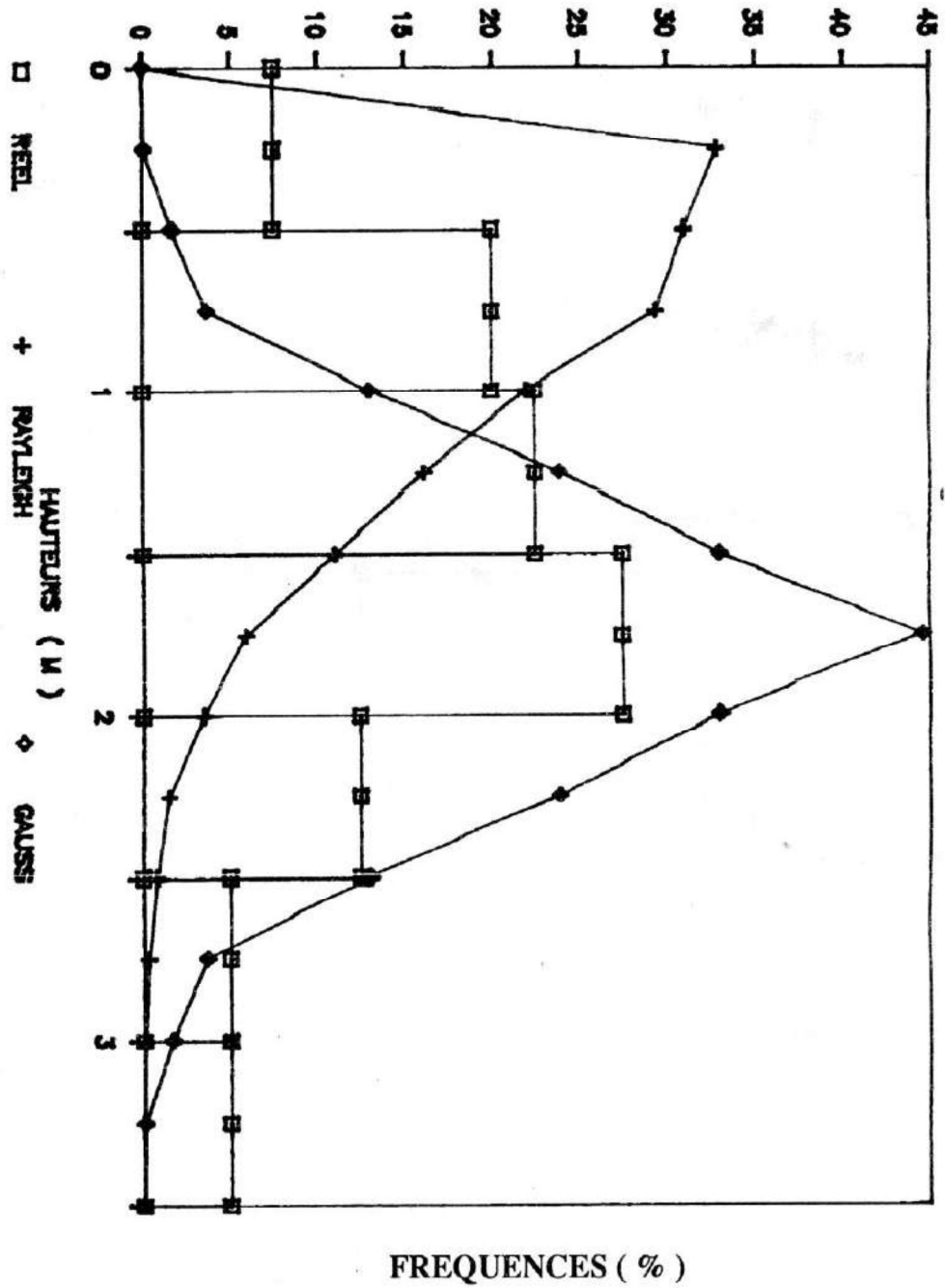
# DISTRIBUTION DES HAUTEURS DES VAGUES

Figure 4 Skikda



# DISTRIBUTION DES HAUTEURS DES VAGUES

Figure 5 Arzew



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  $\delta t$  dans le temps.  
La fonction d'autocorrélation est estimée par la relation :

$$R(\tau = p\delta t) = 1/(N-p) \sum_{q=1}^{q=N-p} Z_q Z_{p+q} \quad (5.4)$$

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

$$t \leq 1/2 f_{max} \quad (5.5)$$

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 :

$$f_{max} = 1/T = 0,5 \text{ Hz}$$

$$\text{d'où : } t = 1 \text{ seconde}$$

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

$$S(f) = 2 \delta t \sum_{p=0}^{\kappa} R(\tau) \cos(2\pi f \delta t) \quad (5.6)$$

avec  $R(\tau = p \delta t)$  évaluée par la formule (5.7)

$$R(\tau = 0 \delta t) = 1/N \sum_{q=1}^{N-1} Z_q^2 \quad (5.7)$$

$$R(\tau = 1 \delta t) = 1/(N-1) \sum_{q=1}^{N-1} Z_{q+1} Z_q, \text{ etc ...}$$

Après avoir tracé 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 :

Moment d'ordre  $n$  :

$$m'_n = \int_0^{\infty} f^n S(f) df \quad (5.8)$$

Moment d'ordre zéro, qui représente l'énergie totale du système des vagues :

$$m_0 = \int_0^{\infty} S(f) df$$

Moment d'ordre 2, qui nous renseigne sur la largeur du spectre :

$$m'_2 = \int_0^{\infty} f^2 S(f) df = m_2 / 4 \pi^2$$

Moment d'ordre 4, qui nous renseigne sur le degré d'aplatissement du sommet du spectre :

$$m'_4 = \int_0^{\infty} f^4 S(f) df = m_4 / 16 \pi^4$$

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

\* La hauteur significative :

$$H_s = 4 (m_0)^{1/2} \quad (5.9)$$

\* La période moyenne du spectre :

$$T_m = (m_0 m'_2)^{1/2} \quad (5.10)$$

\* La largeur du spectre :

$$\epsilon = (1 - m'^2 / (m_0 m'_4))^{1/2} \quad (5.11)$$

Les figures 6 et 7 représentent l'évolution au cours du temps des spectres des tempêtes analysées sur SKIKDA et ARZEW.

## 5.2 Spectres théoriques

Les formes de spectre  $S(f)$  couramment rencontrées lors d'une analyse spectrale des enregistrements sont assez peu nombreuses. Différents "Spectres - Types" paramètres 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 en 1964 en analysant un certain nombre d'enregistrements réalisés en Atlantique du Nord, son expression est la suivante :

$$S_{pm}(f) = A f^{-5} \exp \left[ -\frac{5}{4} \left( \frac{f}{f_p} \right)^{-4} \right] \quad (5.12)$$

où :  $A = 0,315 H_s^2 f_p^4$

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

$$m_0 = \int_0^{\infty} S(f) df = \frac{A}{5} f_p^{-4} \quad (5.13)$$

$$m'_2 = \frac{A}{2} (\pi/5)^{1/2} f_p^{-2} \quad (5.14)$$

### 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 :  $\tau$ ,  $\sigma_a$ ,  $\sigma_b$ .

Son expression est la suivante :

$$S_j(f) = A f^{-5} \exp \left[ -\frac{5}{4} \left( \frac{f}{f_p} \right)^{-4} \right] \tau \exp \left[ -\frac{(f-f_p)^2}{2 \sigma^2 f_p^2} \right] \quad (5.15)$$

avec :

$$\begin{aligned}\sigma &= \sigma_a & \text{pour } f < f_p \\ \sigma &= \sigma_b & \text{pour } f < f_p\end{aligned}$$

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

L'analyse spectrale a été faite en élaborant un programme permettant de calculer le spectre et ses paramètres, à savoir la densité spectrale maximale, la fréquence de pointe et la hauteur significative, comme il permet aussi de décaler les spectres théoriques type JONSWAP et PIERSON-MOSKOWITZ en vue d'établir une forme théorique du spectre. Ces deux spectres théoriques et les spectres réels de chacune des trois tempêtes sont représentés sur les figures 6 et 7 pour les sites de SKIKDA et d'ARZEW.

### 5.3 Conclusion

#### 5.3.1 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 de 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 entre eux.

L'analyse des valeurs des hauteurs significatives obtenues par les 4 méthodes différentes nous a permis de constater que la méthode de TUCKEY-DRAPPER 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% pour la TFR (transformée de FOURIER rapide),
- \* 0.5% pour la méthode des 2 plus grandes vagues.

#### 5.3.2 Analyse spectrale

L'allure des spectres montre que la densité spectrale décroît lentement pour les autres 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 de 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 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 sont beaucoup plus du type JONSWAP que de PIERSON-MOSKOWITZ, c'est à dire que les spectres méditerranéens, ressemblent aux spectres de la mer du Nord.

### 6 RECOMMANDATIONS

Ce travail ouvre une large perspective pour la connaissance et l'approfondissement de l'étude des conditions de houle sur le littoral algérien en particulier et sur le bassin méditerranéen en général.

Une implantation de houlographes sur un maximum de sites est recommandée pour permettre des analyses futures sur une base de données plus importante.

### 7 BIBLIOGRAPHIE

- (1) R. BONNEFILE - "Cours d'hydraulique maritime de l'ENSTA" (Masson - 1980)
- (2) J. CHAPON - "Travaux Maritimes" Tome 1 (Eyrolles 1984)
- (3) J. LARRAS - "Physique de la houle et les lames"
- (4) P. ARISTAGHES - "Théories de la houle - Houle réelle propagation de la houle" S.T.C.P.M.V.N, Mars 1985
- (5) FRANCOIS-MARC TURPIN "Quelques problèmes posés par le traitement statistique les données de houle en vue du dimensionnement des structures", Revue technique du service des phares et balises N°67, 1985
- (6) R - SILVESTRE "Coastal Engineering" (R - SILVESTRE - 1974)
- (7) 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 Ingeniería Del Petrole (1987)
- (8) C.E.R.C : "Shore protection Manual" (édition 84)
- (9) F. Marendet "cours de Travaux Maritimes" E.N.T.P
- (10) Bulletin N°52 (Janvier 1986) "Paramètres des états de mer" "Association Internationale de Recherches Hydrauliques" Bruxelles 1986
- (11) A. GRAILLOT "Travaux Maritimes" Tome I E.N.P.C Paris 1982.

# REPARTITION SPECTRALE DE L'ENERGIE

DENSITE SPECTRALE ( M<sup>2</sup>/S )

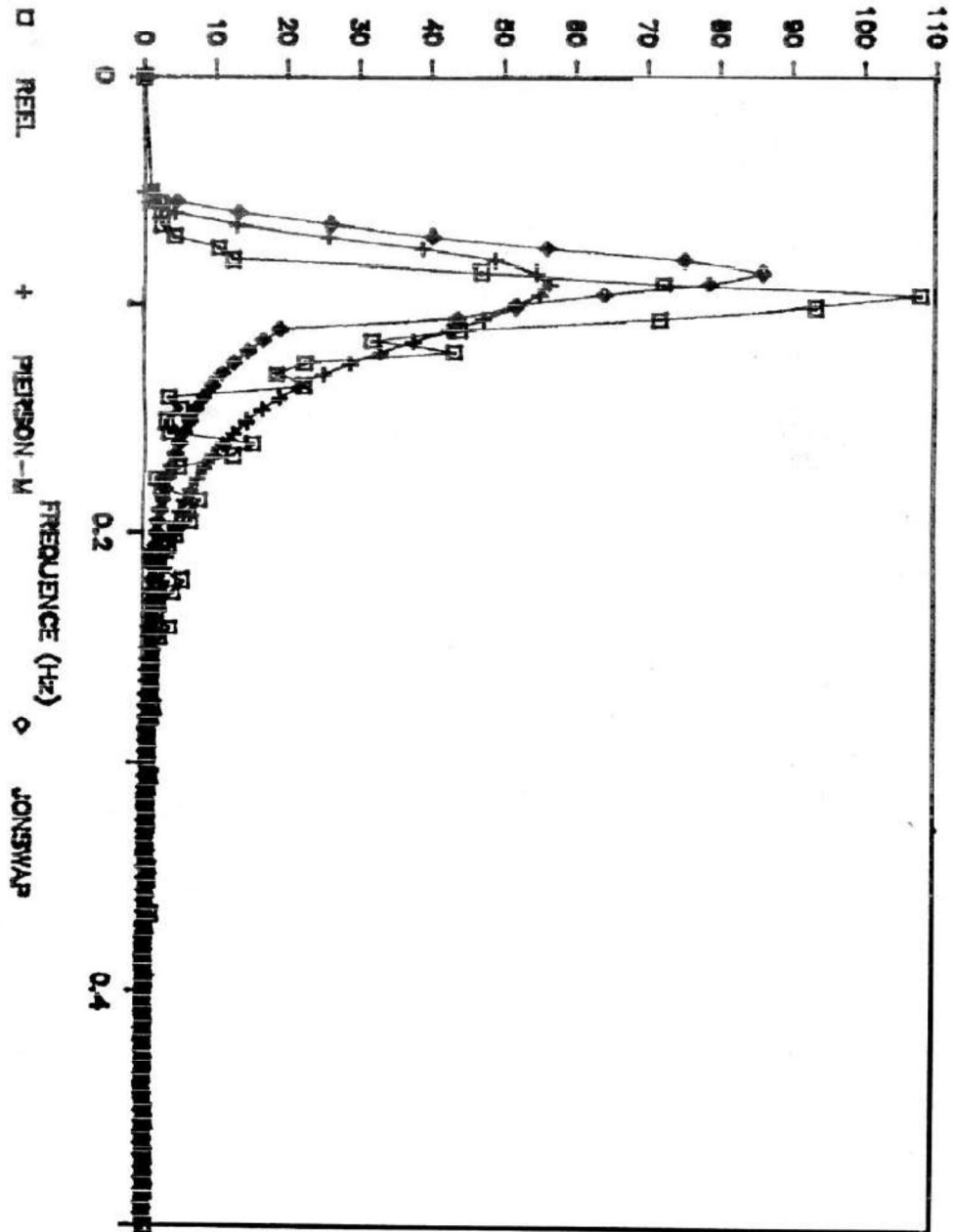


Figure 6 Fonction d'autocorrélation

# REPARTITION SPECTRALE DE L'ENERGIE

DENSITE SPECTRALE ( $M^2/S$ )

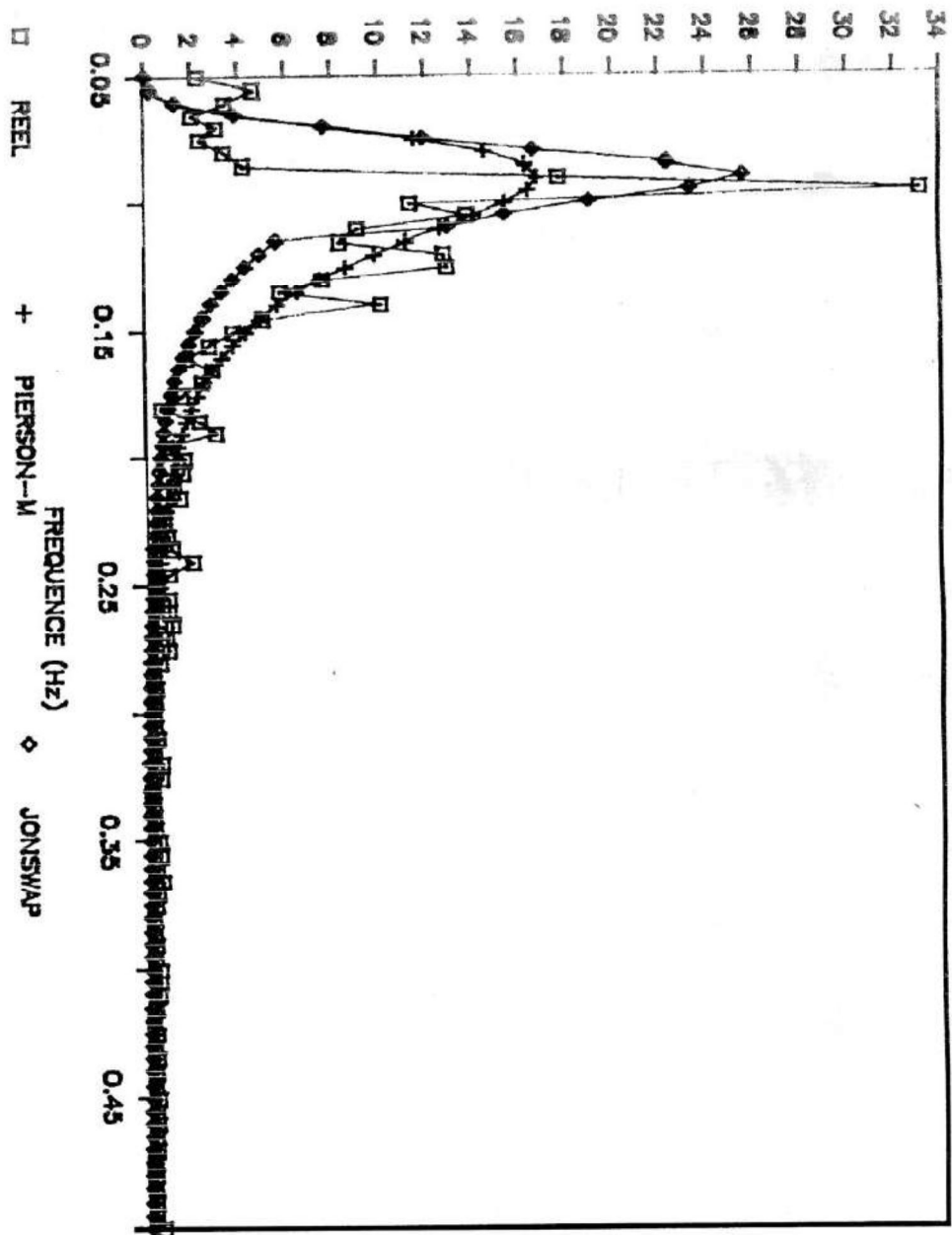


Figure 7 - Fonction d'autocorrélation