

Analyse statistique des hauteurs de la houle sur la côte du Bénin dans le Golfe de Guinée: Puissance énergétique de la houle non-linéaire dans la zone de shoaling

Mathias Adjimon Houekpoheha^{1,2*}, Basile Bruno Kounouhewa^{2,3},
Joël Toyigbé Hounsou^{1†} Bernard Noukpo Tokpohozin^{1,2} et Cossi Norbert Awanou³

¹ Institut de Mathématiques et de Sciences Physiques
IMSP / Université d'Abomey Calavi, 01 B.P. 613, Porto-Novo, République du Bénin

² Centre Béninois de la Recherche Scientifique et Technique
CBRST, 03 B.P. 1665, Cotonou, République du Bénin

³ Laboratoire de Physique du Rayonnement FAST, Université d'Abomey Calavi
01 B.P. 526 Cotonou, République du Bénin

(reçu le 8 Janvier 2015 – accepté le 21 Mars 2015)

Résumé - La forte demande en énergie électrique, à laquelle est soumis le monde, mérite une exploration de toutes les sources d'énergies dont leur valorisation permettra de pallier à la crise énergétique. Le Bénin est un état côtier du Golfe de Guinée qui bénéficie de l'accès à l'océan, qui est le siège d'un perpétuel mouvement de vagues, sources inépuisables d'énergies renouvelables. A travers ce travail, utilisant les mesures de données liées à houle dans les eaux profondes et obtenues auprès de l'IRHOB (Institut de Recherches Halieutiques et Océanographiques du Bénin), nous avons réalisé une étude statistique des hauteurs de la houle afin de déterminer sa hauteur significative. Avec la relation de dispersion des vagues non-linéaire [1-3] et les équations de Boussinesq (Peregrine) [4, 5], nous avons caractérisé les variations des différents paramètres de la houle (hauteur, longueur d'onde, vitesse de groupe) dans la zone de shoaling sur le site d'étude et procéder à l'estimation de la variation de la puissance énergétique de la houle à travers la zone côtière. Enfin, la zone à forte puissance énergétique de ces houles est mise en évidence sur le site, la profondeur locale d'eau au point de déferlement de la houle est évaluée et les résultats obtenus ont permis de justifier le caractère très énergétique qu'acquière ces houles sur cette côte lorsqu'elles sont proches de la plage.

Abstract - The high demand for electrical energy, which is subject to the world, deserves exploration of all energy sources including their valorization will compensate for the energy crisis. Benin is a coastal state in the Gulf of Guinea which has access to the ocean which is the site of a perpetual motion of waves, inexhaustible sources of renewable energy. Through this work, using the swell data measurements in deep water and obtained near the IRHOB (Research Institute of Halieutic and Oceanography of Benin), we conducted a statistical study of the wave heights to determine its significant height. With the dispersion of non linear waves relationship [1-3] and the Boussinesq equations (Peregrine) [4, 5], we characterized the variations of various parameters of the waves (height, wavelength, group velocity) in the shoaling zone on the site study and proceed to estimate the variation of the energy power of waves through the coastal zone. Finally, the highly energy power zone of these waves is highlighted on the site, the local water depth at the point of bathymetric wave breaking is evaluated and the results were used to support the high-energy character acquire these well son this coast when they are close to the beach.

Mots clés: Hauteur de la houle – Puissance énergétique – Shoaling des houles – Point de déferlement - Zone côtière du Bénin.

* mathias.houekpoheha@imsp-uac.org - kbbasile@gmail.com

† joelhounsou@gmail.com - cawanou@gmail.com

1. INTRODUCTION

Les vagues sont des oscillations de la surface de la mer, générées par l'énergie du vent et entretenues par la pesanteur. Sous l'effet d'une perturbation extérieure (vent, fond marin...), le profil d'une houle peut être modifiée. Elle peut être soumise à des mouvements, tels que: le shoaling, le déferlement, la réfraction, la diffraction, [6].

Ces phénomènes, faciles à caractériser pour des vagues régulières, se compliquent pour des vagues naturelles (houles non-linéaires) tout en restant qualitativement analogues. Lorsqu'elles se propagent vers des plus hauts fonds, leurs profils se déforment: leur crête qui est à une profondeur plus importante se déplace plus vite que les creux. Le profil a alors tendance à se cambrer vers l'avant et à s'aplatir vers l'arrière.

Par ailleurs, la lente remontée des fonds produit un raccourcissement de la longueur d'onde et un gonflement de l'amplitude. Les vagues transportent une quantité importante d'énergie qu'elles tirent de la force du vent sur l'ensemble des mers du globe et qui est dissipée par le déferlement au large et sur les côtes: ce sont des sources d'énergie renouvelable.

En réalité, la dynamique marine est une source d'énergie encore peu documentée donc non exploitée au Bénin. L'océan est un milieu riche en flux énergétiques qui peuvent être exploités [7]. La maîtrise des paramètres de la houle et la connaissance des états de mer sont des éléments fondamentaux, tant pour le dimensionnement et la construction d'ouvrages côtiers, pour l'évaluation du transport sédimentaire littoral et l'estimation de la puissance énergétique de la houle que pour la prévision de la navigation maritime et pour la prévention et la lutte contre les catastrophes côtières.

Du fait de la nature aléatoire des vagues, l'état de la mer en général est décrit par des paramètres statistiques, comme la moyenne des hauteurs ($H_m = H_s$) et la moyenne des périodes ($T_m = T_p$). [8]

Dans ce travail, utilisant les mesures de données liées à houle dans les eaux profondes de Juin 2011 à Décembre 2012 et obtenues auprès de l'IRHOB, ces paramètres sont déterminés.

La relation de dispersion des vagues non-linéaire et les équations de Boussinesq (Peregrine) sont exploitées pour décrire les variations de la puissance énergétique de ces houles le long de leur shoaling dans la zone côtière du Bénin. La profondeur locale d'eau au point de déferlement d_b et la zone à forte puissance énergétique sont mises en évidence.

2. MATERIEL ET METHODE

2.1 Présentation du site d'étude et des données exploitées

Le Bénin est un pays de Golfe de Guinée situé entre les parallèles $6^{\circ}15'$ et $12^{\circ}30'$ de latitude Nord d'une part et les méridiens 1° et $3^{\circ}40'$ de longitude Est d'autre part (Fig. 1a-). Il possède une zone littorale d'une longueur de 125 kilomètres et allant de Hilla-Condji à l'Ouest à Kraké à l'Est (Fig. 1b-). Le littoral béninois est plus ou moins linéaire et interrompu en deux endroits, à savoir, la Bouche du Roy et l'embouchure du chenal de Cotonou.

La zone côtière du Benin se trouve entre $6^{\circ}15'$ et $6^{\circ}23'$ de latitude Nord. Elle s'inscrit dans le bassin sédimentaire côtier dont les terrains les plus anciens remontent au Crétacé (fin de l'ère secondaire). Le climat est de type subéquatorial avec deux saisons sèches et deux saisons pluvieuses altérées. [9]

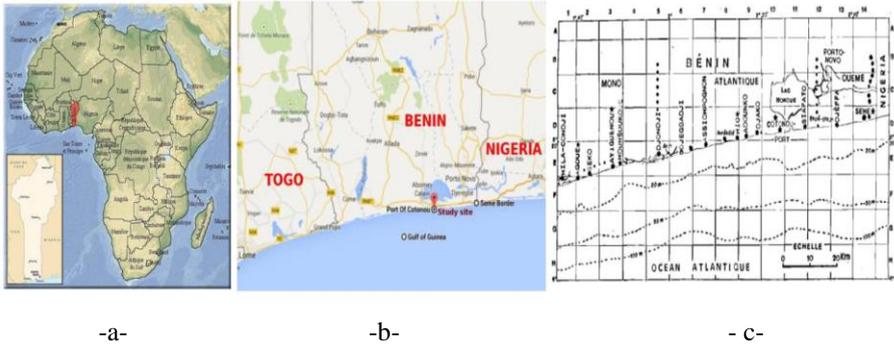


Fig. 1: Situation géographique et Carte bathymétrique de la zone côtière du Bénin

La carte bathymétrique (Fig. 1c) obtenue auprès du CBRST (Centre Béninois de la Recherche Scientifique et Technique), montre l'évolution de la profondeur locale d'eau dans la zone côtière du Bénin et permet de prévoir la pente moyenne et la variabilité macroscopique du fond marin.

Cette carte relève que le fond marin dans la zone côtière est presque plat et incliné. C'est un fond à faible pente $p = \tan\beta$, tel que $0.001 < \tan\beta \leq 0.1 \Rightarrow \tan\beta \approx \beta$. La moyenne de cette pente dans la zone est $\beta_m \approx 100/2000 = 0.05$.

Au Bénin, les houles sont régulières. Elles possèdent une longueur d'onde d'environ $L_0 \approx 200$ m dans les eaux profondes et leur période T oscille entre 10 s et 18 s avec une valeur moyenne stable $T_m = 12$ s [10]. Ces valeurs sont presque confirmées par la station satellitaire de prévision la Méduse-Benin qui indique $8s \leq T \leq 16s$. Pour une houle donnée, seule sa période reste pratiquement constante le long de sa propagation $T \approx T_0 = \text{cst}$, jusqu'au point de déferlement bathymétrique. [11]

Dans les eaux profondes ($d \geq L_0/2 \Rightarrow \mu \geq 1/2$), tous les paramètres qui caractérisent la houle sont constants en absence de toute autre perturbation. [11]

Dans cette zone littorale, l'intensité de la pesanteur et la masse volumique de l'eau de mer valent respectivement $g = 9.79$ N/kg et $\rho = 1025$ kg/m³. [12]

Les mesures de données relatives à la hauteur de la houle et à direction de propagation en 2012, sont obtenues auprès du CRHOB (Centre de Recherches Halieutiques et Océanographiques du Bénin) actuel IRHOB (Institut de Recherches Halieutiques et Océanographiques du Bénin).

Elles sont effectuées à pas de temps de cinq minutes de façon régulière sur tous les mois de l'année 2012 et nous ont permis à travers ce travail de définir les variations de la hauteur de la houle dans les eaux profondes ainsi que les directions principales de propagation de ces houles le long d'une année.

2.2 Choix du modèle et du critère de déferlement

Dans la zone côtière, pour un fond marin presque plat, la propagation d'une houle en dimension 1, est modélisée par le système d'équations ci-après [4, 5, 13, 14]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + \varepsilon u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = \alpha' D + O(\alpha^2) \end{cases} \text{ avec } \begin{cases} h = \eta + d ; u = u(x, t) \\ \eta = \eta(x, t) = H/2 \cos(kx - \omega t + \varphi) \\ d = d(x) ; H = H(d) \end{cases} \quad (1)$$

- $D = 0$, on a les équations de 'shallow water', obtenues à partir des théories d'Airy ou de Stokes et qui permet de caractériser les houles pour une bathymétrie constante.

$$-D = \frac{h}{2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(h \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \right) - \frac{h^2}{6} \cdot \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \cdot \partial t}, \text{ on parle de la théorie de Boussinesq}$$

proposée par Peregrine en 1967. Elle prend en compte la faible non-linéarité, la faible dispersion des houles longues de faible amplitude qui se propage sur une bathymétrie variable [15].

$$-D = \frac{1}{3h} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left[h^3 \left(\frac{\partial^3 u}{\partial x \cdot \partial t} + \varepsilon u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \varepsilon \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right) \right], \text{ il s'agit des équations de}$$

Serre ou de Green-Naghdi [5]. Prenant en compte les effets dispersifs et non-linéaires, elles généralisent presque les équations de 'shallow water' et de Peregrine (Boussinesq) avec une forte dominance des effets non-linéaires.

Les paramètres de non-linéarité ε , de l'effet dispersif α , la cambrure S de la houle et le paramètre du train de vagues μ sont définis par: [16]

$$\varepsilon = \frac{a}{d} ; \alpha = \mu^2 = \left(\frac{d}{L_0} \right)^2 \text{ et } S = \frac{\varepsilon}{\alpha} = \frac{\varepsilon}{\mu^3} = \frac{aL_0}{d^3} \text{ avec } a = \frac{H}{2} \quad (2)$$

Lorsque $\varepsilon \ll 1$ et $\alpha \ll 1$ avec $S = O(1)$, elle est dite de Stokes et on a:

$$\eta \ll d \Rightarrow h = \eta + d \approx d \quad (3)$$

Pour une houle, de longueur d'onde L , on définit trois zones de propagation: les eaux profondes lorsque $d > \frac{L}{2}$; la zone de shoaling si $\frac{L}{25} \leq d \leq \frac{L_0}{2}$ et les zones de Surf et de Swash pour $0 \leq d \leq \frac{L}{25}$. [6]

Sur le site d'étude, les mesures itératives faites donnent:

- Dans les eaux profondes, la hauteur moyenne régulière de la houle est $H_0 = 2a_0 = 1 \text{ m}$, sa période moyenne est $T = 12 \text{ s}$ et sa longueur d'onde $L_0 = 200 \text{ m}$ à une position où la profondeur locale d'eau est $d_0 = 130 \text{ m}$ environ.
- Dans la zone côtière où la profondeur locale d'eaux est $d_c = 50 \text{ m}$, la hauteur crête à creux de la houle est $H_c = 2a_c = 1.2 \text{ m}$.

Site d'étude	Lieux de propagation	Paramètre de non-linéarité	Paramètre d'effet dispersif	Cambrure de la houle
Golfe de Guinée (Cotonou)	Eaux profondes $d_0 = 130 \text{ m}$	$\varepsilon_0 = 0.004$	$\alpha_0 = 0.423$	$S_0 = 0.009 \approx O(1)$
	Zone côtière $d_c = 50 \text{ m}$	$\varepsilon_c = 0.012$	$\alpha_c = 0.0625$	$S_c = 0.196 \neq O(1)$

- $\varepsilon_0 \ll 1$; $\alpha_0 < 1$ et $S_0 = O(1)$: les houles dans le Golfe de Guinée à Cotonou, sont des vagues de Stokes.
- $\varepsilon_0 \ll 1$; $\varepsilon_c > \varepsilon_0$: les effets non-linéaires même s'ils demeurent négligeables, croissent dans la zone côtière.
- $\alpha_0 \ll 1$; $\alpha_c > \alpha_0$: l'effet dispersif décroît dans la zone côtière et $\alpha \rightarrow O(1)$ lorsqu'on évolue vers la plage.
- $S_c > S_0$ et $S_c \neq O(1)$: la théorie d'Airy, ne tenant compte des effets non-linéaires, ne permet pas de mieux caractériser ces houles dans la zone côtière de ce site.

Somme toute, les vagues dans le Golfe de Guinée à Cotonou, sont des houles de Stokes ($\eta \ll d$), faiblement non-linéaire ($\varepsilon \ll 1$) et faiblement dispersives ($\alpha < 1$). L'utilisation des équations de Boussinesq (Peregrine), dans la suite, permettra de mieux caractériser les variations de leur hauteur et de leur longueur d'onde au cours de leur propagation dans la zone côtière.

Kaminsky et Kraus ont mené en 1993 une étude comparative basée sur une analyse de travaux antérieurs (409 cas) couvrant une gamme importante de cambrures de houle et de pentes de plage, proposent d'utiliser pour une pente $\tan \beta \leq 0.1$, l'indice de déferlement ci-dessous qui prend en compte le nombre d'Irraben. [17]

$$\gamma = \frac{H_b}{d_d} = 1.2 \left(\tan \beta \sqrt{\frac{L_0}{H_0}} \right)^{0.27} \quad (4)$$

Sur le site d'étude, $0.001 < \tan \beta \leq 0.1$, ce critère est choisi pour déterminer le lieu de déferlement de ces houles.

2.3 Hauteur et longueur d'onde des vagues dans la zone de shoaling

En tenant compte des conditions précédentes ($\eta \ll d, \varepsilon \ll 1$ et $\alpha < 1$), les équations de Peregrine (Boussinesq) qui correspondent aux sites d'étude sont:

$$\begin{cases} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(du)}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = \alpha \left[\frac{d}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(d \frac{\partial u}{\partial t} \right) - \frac{d^2}{6} \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \right] \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(du)}{\partial x} = 0 & (i) \\ \frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = \alpha \frac{d^2}{3} \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} & (ii) \end{cases} \quad (5)$$

En remplaçant (ii) dans la dérivée de (i) par rapport à temps t , on obtient:

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left[-g\mu L_0 \frac{\partial \eta}{\partial x} + \mu^5 \frac{L_0^3}{3} \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \cdot \partial t^2} \right] = 0 \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \eta = \eta(x,t) = \eta_a e^{-i\omega t} \\ \eta_a = \frac{H(x)}{2} e^{i(kx + \phi)} \\ d = -\beta x = \mu L_0 \\ \alpha = \mu^2 \end{cases} \quad (6)$$

A la limite des eaux profondes et de la zone de shoaling où $\mu = \frac{1}{2}$, on a:

$$H \left(\mu = \frac{1}{2} \right) \approx H_0 \quad \text{et} \quad L \left(\mu = \frac{1}{2} \right) \approx L_0 \quad (7)$$

L'équation de la tangente au fond marin est $d = -x \tan \beta = \mu \cdot L_0$, [16, 18, 19], or sur le site d'étude, $\tan \beta \approx \beta$, ainsi on a:

$$d = -\beta \cdot x = \mu \cdot L_0 \quad (8)$$

En faisant le changement de variable $\mu = -\frac{\beta}{L_0} \cdot x$ et utilisant l'approximation précédente $\mu^5 = \sqrt{\alpha^5} = O(1)$, l'équation précédente devient:

$$\frac{\partial^2 \eta_a}{\partial \mu^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial \eta_a}{\partial \mu} + \frac{2\pi}{\beta^2 \cdot \mu} \eta_a = 0 \quad (9)$$

La solution générale de cette équation est $\eta_a = A Y_0(z)$, où $z = \frac{2}{\beta} \sqrt{2\pi\mu}$ et $Y_0(z)$ est la fonction de Bessel modifiée de deuxième espèce et dont la formule asymptotique complexe est $Y_0(z) = \sqrt{\frac{2}{\pi z}} e^{-i(z - \pi/4)}$. Des conditions aux limites précédentes, on obtient:

$$\begin{cases} H = H_0 \left(\frac{1}{2\mu} \right)^{1/4} = H_0 \left(\frac{2d}{L_0} \right)^{-1/4} \\ L = L_0 (2\mu)^{1/2} = L_0 \left(\frac{2d}{L_0} \right)^{-1/2} \end{cases} \Rightarrow kd = \pi \sqrt{2\mu} \quad (10)$$

2.4 Vitesse de groupe des vagues

Les houles devenant non-linéaires sous l'effet du shoaling (levée de la houle), de la réfraction, de la réflexion, de la diffraction... induits par l'effet perturbatif du fond marin, la relation de dispersion des vagues proposée par Dalrymple *et al.* [1-3] afin d'améliorer de la capacité angulaire:

$$\omega^2 = g \cdot k \cdot \tan h \left[k \cdot \left(d + \frac{H}{2} \right) \right] \quad (11)$$

De cette relation de dispersion non -linéaire, la vitesse de groupe $C_g = \frac{\partial \omega}{\partial k}$ [20]

des vagues est:

$$C_g = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2k \left(d + \frac{H}{2} \right)}{\sinh \left[2k \left(d + \frac{H}{2} \right) \right]} \right) \sqrt{\frac{g}{k} \tan h \left[2k \left(d + \frac{H}{2} \right) \right]} \quad (12)$$

$$C_g(\mu) = C_{g0} \left(1 + \frac{2k \left(\sqrt{2\mu} + \frac{H_0}{2L_0(2\mu)^{3/4}} \right)}{\sinh \left[2\pi \left(\sqrt{2\mu} + \frac{H_0}{2L_0(2\mu)^{3/4}} \right) \right]} \right) \sqrt{\sqrt{2\mu} \tanh \left[\pi \left(\sqrt{2\mu} + \frac{H_0}{2L_0(2\mu)^{3/4}} \right) \right]} \quad (13)$$

où $\begin{cases} L_0 = gT^2/2\pi \\ C_{g0} = gT/4\pi \end{cases}$

2.5 Puissance énergétique de la houle

La moyenne de l'énergie totale E d'une houle de hauteur H par unité de longueur est: [21]

$$\langle E \rangle = \frac{1}{8} \rho \cdot g \cdot H^2 \quad (14)$$

La puissance énergétique P par unité de longueur d'une houle est le produit de la moyenne de son énergie totale et de sa vitesse de groupe; $P = \langle E \rangle \cdot C_g$ [21]

Dans les eaux profondes (au large: $\mu \geq \frac{1}{2}$), on a:

$$P_0 = \langle E \rangle_0, C_{g0} = \frac{1}{2} \rho \cdot g \cdot H_0^2 \cdot C_{g0} = \frac{\rho \cdot g^2}{32 \pi} H_0^2 T \quad (15)$$

Dans la zone de shoaling ($\mu_b \leq \mu \leq \frac{1}{2}$), on a:

$$P = \langle E \rangle \cdot C_g = P_0 \left(\frac{1}{2\mu} \right)^{1/2} \left(1 + \frac{2\pi \left(\sqrt{2\mu} + \frac{H_0}{2L_0(2\mu)^{3/4}} \right)}{\sinh \left[2\pi \left(\sqrt{2\mu} + \frac{H_0}{2L_0(2\mu)^{3/4}} \right) \right]} \right) \sqrt{\sqrt{2\mu} \tanh \left[\pi \left(\sqrt{2\mu} + \frac{H_0}{2L_0(2\mu)^{3/4}} \right) \right]} \quad (16)$$

2.6 Profondeur locale d'eau au point de déferlement et variations des paramètres de la houle

En utilisant les résultats obtenus avec la théorie de Boussinesq et le critère de déferlement de Kaminsky et Krauss (1993), la profondeur locale d'eau d_b et la hauteur H_b de la houle au point de déferlement sont:

$$\begin{cases} d_b = \frac{H_0^{0.908} \times L_0^{0.092}}{1.33 (\tan\beta)^{0.216}} \\ H_b = 0.903 H_0 (L_0 / H_0)^{0.227} \times (\tan\beta)^{0.054} \end{cases} \Rightarrow \mu_b = \frac{d_b}{L_0} = \frac{H_0^{0.908} \times L_0^{-0.918}}{1.33 (\tan\beta)^{0.216}} \quad (17)$$

Soient $\delta = \frac{L}{L_0} : K_s = \frac{H}{H_0}$; $\delta_2 = \frac{C_g}{C_{g0}}$ et $\chi = \frac{P}{P_0}$, les coefficients qui traduisent respectivement les variations de la longueur d'onde, de la hauteur crête à creux, de la

vitesse de groupe et de la puissance énergétique disponible de la houle jusqu'au point de déferlement.

$$\delta = L/L_0 = \begin{cases} \text{Isi}\mu \geq I/2 \\ \sqrt{2\mu} \text{si}(I/2) \leq \mu \leq \mu_b \end{cases} ; K_s = H/H_0 = \begin{cases} \text{Isi}\mu \geq I/2 \\ \left(\frac{1}{2}\right)^{1/4} \text{si}(I/2) \leq \mu \leq \mu_b \end{cases}$$

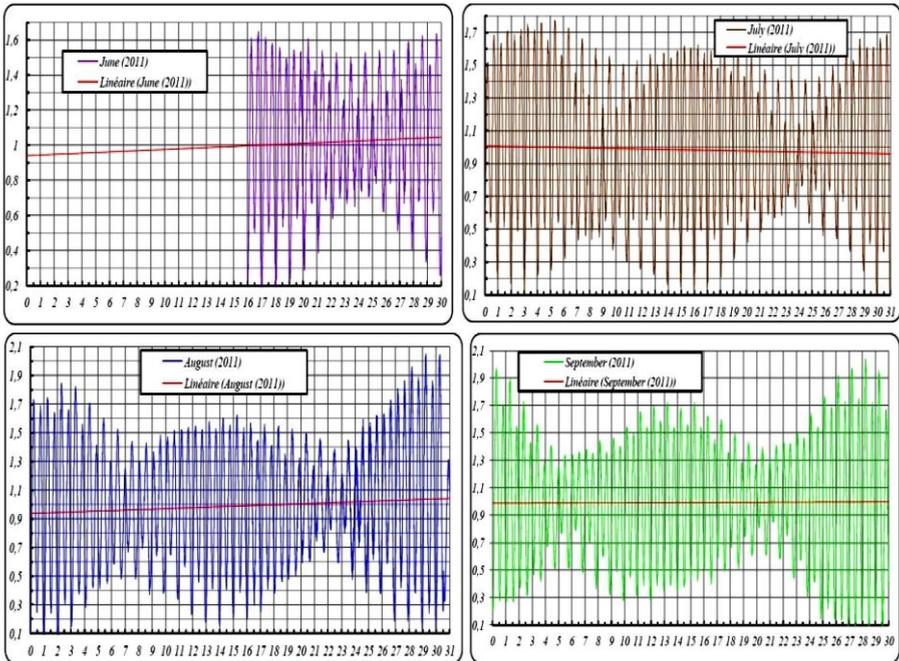
$$\chi = P / P_0 = K_s^2 \cdot \delta_2$$

$$\delta_2 = C_g/C_{g_0} = \left(1 + \frac{2\pi \left(\sqrt{2\mu} + \frac{H_0}{2L_0(2\mu)^{3/4}} \right)}{\sinh \left[2\pi \left(\sqrt{2\mu} + \frac{H_0}{2L_0(2\mu)^{3/4}} \right) \right]} \right) \sqrt{\sqrt{2\mu} \tanh \left[\pi \left(\sqrt{2\mu} + \frac{H_0}{2L_0(2\mu)^{3/4}} \right) \right]}$$

3. RESULTATS, ANALYSE ET DISCUSSION

3.1 Présentation des résultats

Les courbes de la figure 1 montrent les variations journalières et mensuelles des hauteurs de houle dans les eaux profondes du Golfe de Guinée au Bénin de Juin 2011 à Décembre 2012.



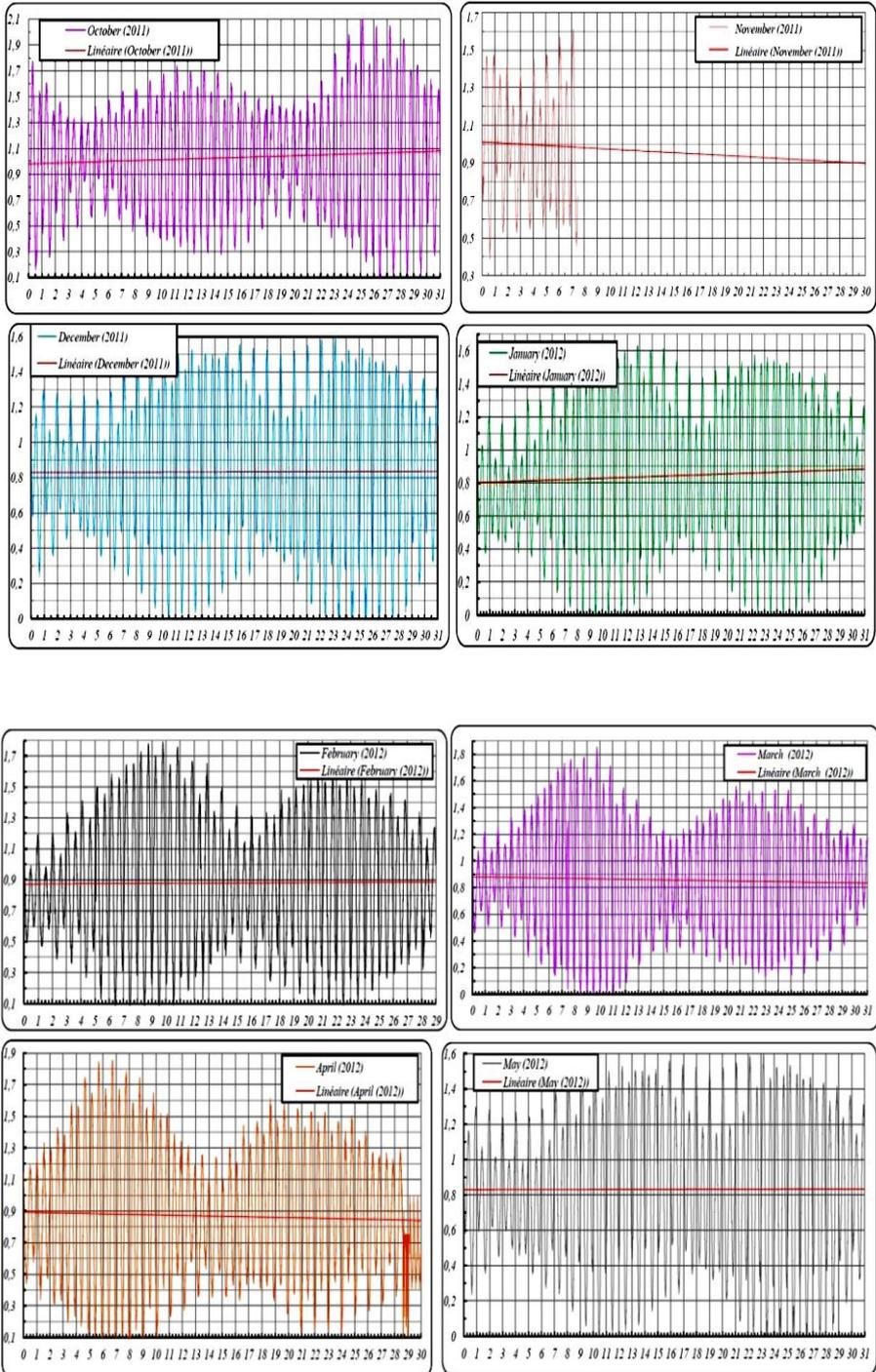


Fig. 2: Représentations statistiques des hauteurs de la houle dans les eaux profondes de la zone côtière du Bénin de 2011 à 2012

Les courbes de la figures 2 montrent les variations des paramètres de la houle du large (eaux profondes) jusqu’au point de déferlement.

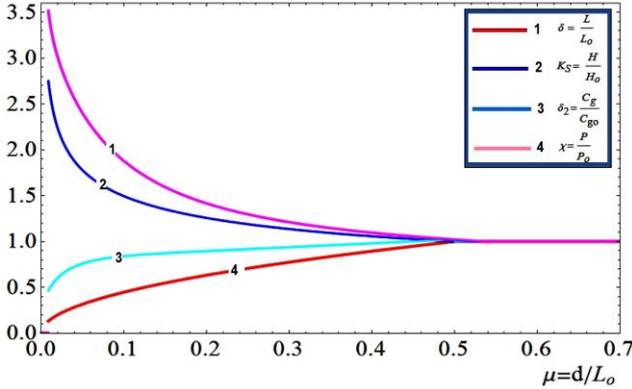


Fig. 3: Variations des paramètres caractéristiques de la houle sur le site d’étude

Les diagrammes des figures 4, montrent respectivement les variations de la puissance énergétique disponible des houles dans les eaux profondes pour $0.5\text{ m} \leq H_s \leq 1.4\text{ m}$ et $10\text{ s} \leq T \leq 16\text{ s}$ d’une part (Fig. a-) et dans la zone de shoaling en fonction de la profondeur locale d’eau et de la pente du fond marin pour $H_0 = 1\text{ m}$ et $T = 12\text{ s}$ d’autre part (Fig. b-).

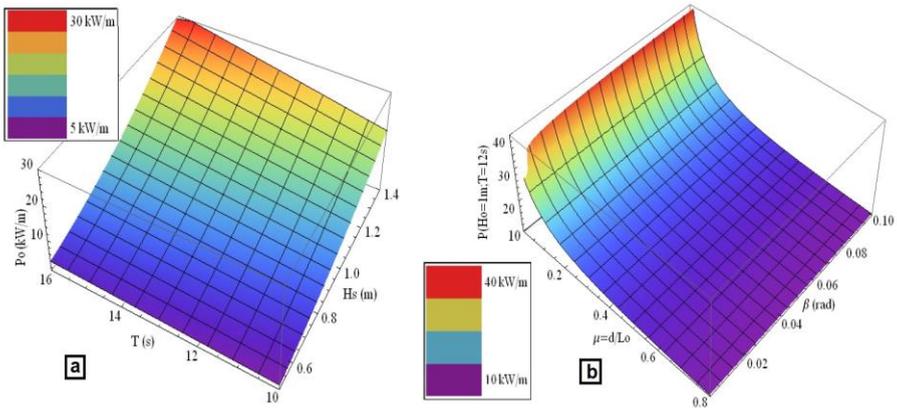


Fig. 4: Variations de la puissance énergétique de la houle dans la zone côtière du Bénin dans le Golfe de Guinée

Quant aux diagrammes de la figure 5, ils mettent en évidence les variations de la profondeur locale d’eau d_b au point de déferlement bathymétrique de la houle sur la côte du Bénin.

3.2 Analyse et discussion des résultats

De l’analyse de ces courbes de la figure 2, il ressort que les valeurs extrêmes de ces hauteurs, leur moyenne et leur valeur significative, au cours de chacun des mois de mesures effectives, sont présentées dans le **Tableau** ci-après.

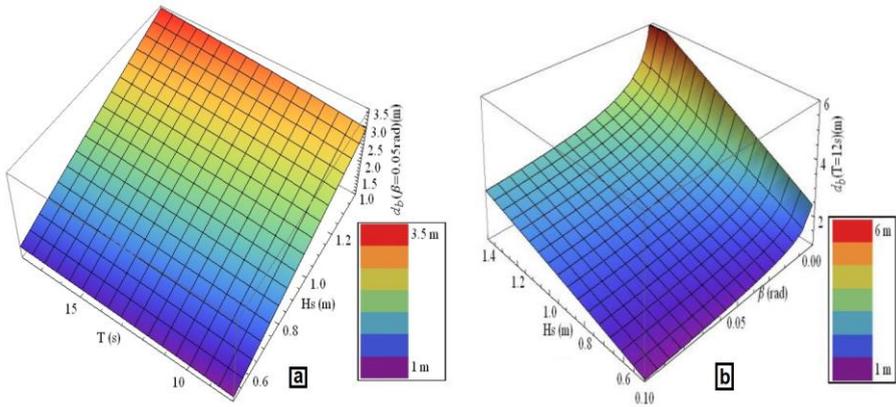


Fig. 5: Variations de la profondeur locale d'eau d_b au point de déferlement de la houle

Année	Mois	Valeurs des hauteurs de houle (m)			
		Hauteur Minimale H_{\min}	Hauteur Maximale H_{\max}	Hauteur Moyenne H_m	Hauteur significative (valeurs fréquentes) H_s
2011	Juin	0.15	1.65	1.02	$0.6 \leq H_s \leq 1.50$
	Juillet	0.20	1.70	0.95	$0.65 \leq H_s \leq 1.50$
	Août	0.10	1.05	1.02	$0.5 \leq H_s \leq 1.55$
	Septembre	0.10	2.10	1.01	$0.5 \leq H_s \leq 1.40$
	Octobre	0.10	2.05	1.05	$0.5 \leq H_s \leq 1.35$
	Novembre	0.40	1.60	0.95	$0.6 \leq H_s \leq 1.30$
	Décembre	0.05	1.60	0.83	$0.4 \leq H_s \leq 1.20$
2012	Janvier	0.05	1.65	0.82	$0.4 \leq H_s \leq 1.20$
	Février	0.10	1.80	0.88	$0.4 \leq H_s \leq 1.30$
	Mars	0.05	1.85	0.86	$0.4 \leq H_s \leq 1.25$
	Avril	0.10	1.85	0.88	$0.4 \leq H_s \leq 1.35$
	Mai	0.05	1.60	0.83	$0.35 \leq H_s \leq 1.2$
	Juin	---	---	---	---
	Juillet	---	---	---	---
	Août	---	---	---	---
	Septembre	---	---	---	---
	Octobre	---	---	---	---
	Novembre	0.10	2.10	1.05	$0.6 \leq H_s \leq 1.6$
	Décembre	0.10	1.80	0.90	$0.4 \leq H_s \leq 1.40$
	Bilan		0.02	2.1	1

Ces résultats montrent que la moyenne des hauteurs de houle au Bénin est d'environ $H_m = 1 \text{ m}$. Les variations de cette hauteur sont cycliques au cours de chaque mois. Elles sont très importantes entre les cinquièmes et les quinzièmes jours d'une part et entre les vingtièmes et les vingt huitièmes de chacun des mois de décembre, janvier, février, mars, avril et mai d'autre part. Cependant, cette variation intense, pour les autres mois, s'observe entre les dixièmes et les vingtièmes jours d'une part et entre les vingt cinquièmes et les cinquièmes jours du mois suivant.

Les hauteurs des houles au Bénin varient de façon presque sinusoïdale au cours de chaque journée. Elles possèdent deux valeurs maximales et deux valeurs minimales qui apparaissent respectivement aux environs de 06 h et de 18h GMT d'une part puis autour de 00h et de 12h, d'autre part. Le caractère aléatoire que présente l'apparition de ces valeurs démontre la complexité du phénomène qu'est la houle ; ainsi, la détermination de leur valeur moyenne ou de leur valeur significative sont nécessaires pour l'évaluation de la puissance énergétique disponible dans les eaux profondes du site d'étude.

Les intervalles qui caractérisent les hauteurs significatives, révèlent que la période de fortes houles dans la zone côtière du Bénin dans le Golfe de Guinée s'étend de Juin à Décembre. Leurs valeurs les plus fréquentes (hauteur significative) varient en générale entre 0.5 m et 1.4 m.

Toutes les courbes, de la figure 2, montrent que tous les paramètres des vagues dans les eaux profondes, en dehors de tout obstacle, sont constants.

La courbe $K_s = H / H_0$ de la figure 3 représente les variations de la hauteur dans les eaux profondes et dans la zone de shoaling. Elle est constante dans les eaux profondes ($K_s \approx 1$) et croît strictement dans la zone de shoaling ($1 \leq K_s \leq 2.8$) et cette amplification s'arrête au point de déferlement. La hauteur crête à creux de la houle, constante dans les eaux profondes, est strictement croissante dans la zone de shoaling. Cette hauteur, qui croît strictement lorsque la profondeur locale d'eau diminue, reste proportionnelle à $(d^{-1/4})$: ce qui coïncide avec les résultats obtenus pour le shoaling des ondes de gravité subharmoniques [22].

A partir des mesures effectuées, pour ($d_c = 50 \text{ m}$; $H_c = 1.2 \text{ m}$), $\mu = 0.25$ et $K_{S_c} = H / H_0 = 1.19$ or la courbe de $K_s = H / H_0$ donne $K_s = H / H_0 = 1.21$ pour $\mu = 0.25$. Ainsi, on a $K_{S_c} \approx K_s$: ce résultat montre que la théorie de Peregrine (Boussinesq) permet de mieux modéliser les variations de la hauteur crête à creux des houles dans la zone de shoaling de la zone côtière étudiée.

Les courbes $\delta = L / L_0$ et $\delta_2 = C_g / C_{g_0}$ de la figure 3, décroissent toutes dans la zone de shoaling, lorsque la profondeur locale d'eau diminue. Mais la décroissance est plus accentuée dans le cas de δ et faible pour δ_2 . Dans la zone côtière du Golfe de Guinée à Cotonou, la longueur d'onde des houles diminue lorsque la profondeur locale d'eau diminue et reste proportionnelle à la racine carrée de cette dernière ($L \approx \sqrt{d}$). L'évolution de la courbe δ_2 de la figure 3, montre que la vitesse de groupe décroît strictement dans la zone de shoaling.

La courbe $\chi = P / P_0$ de la figure 3 traduit les variations de la puissance énergétique des houles. Dans les eaux profondes, cette courbe montre que cette grandeur est constante. Dans la zone de shoaling, elle s'amplifie lorsque la profondeur locale d'eau diminue et cette amplification s'arrête au point de déferlement. Elle montre

que $1 \leq \chi \leq 3.5$, la puissance énergétique peut être amplifiée 3,5 fois avant le déferlement.

Quant aux digrammes de la figure 4, ils montrent que la puissance énergétique disponible dans les eaux profondes varie entre 5 kW/m et 30 kW/m lorsque $0.5\text{m} \leq H_s \leq 1.4\text{m}$ et $10\text{s} \leq T \leq 16\text{s}$, avec une valeur très fréquente de 12 kW/m.

Pour $H_0 = 1\text{ m}$ et $T = 12\text{ s}$, $0.001 \leq \beta \leq 0.1$ et $\mu_b \leq \mu \leq 0.5$ (Fig. 3), elle s'amplifie jusqu'à la valeur de 40 kW/m avant le déferlement.

Les digrammes de la figure 5, montrent que la profondeur locale d'eau au point de déferlement est une fonction croissante de la hauteur et de la période de la houle puis une fonction décroissante de la pente du fond marin.

- Pour $\tan\beta = 0.05$, lorsque $0.5\text{m} \leq H_s \leq 1.4\text{m}$ et $10\text{s} \leq T \leq 16\text{s}$, cette profondeur locale d'eau au point de déferlement oscille entre 1 m et 3.5 m.
- Pour $T = 12\text{ s}$, lorsque $0.5\text{m} \leq H_s \leq 1.4\text{m}$ et, $0.001 \leq \tan\beta \leq 0.1$ elle varie entre 1 m et 6 m; la diminution de la pente du fond marin augmente la profondeur locale d'eau au point de déferlement.

Somme toute, la profondeur locale d'eau au point de déferlement dans la zone côtière du Bénin est comprise fréquemment entre 1 m et 4 m. Elle est une fonction croissante de la hauteur et de la période de la houle mais une fonction décroissante de la pente du fond.

4. CONCLUSION

Dans les eaux profondes de la zone côtière du Bénin, les valeurs instantanées de la hauteur des houles oscillent entre 0.1 m et 2 m avec une forte dominance des valeurs situées entre 0.5 m et 1.4 m. Leur période varie entre 10 s et 16 s. La valeur moyenne des hauteurs de la houle est de 1 m environ et celle de la période est de 12 s.

Dans une journée, cette hauteur varie de manière presque sinusoïdale; elle prend deux valeurs maximales et deux valeurs minimales qui apparaissent respectivement aux environ de 06h et de 18h GMT d'une part puis autour de 00h et de 12h d'autre part. La puissance énergétique disponible des houles sur ce site, varie entre 5 kW/m et 30 kW/m dans les eaux profondes (au large) avec une valeur fréquente de 12 kW/m environ.

Dans la zone de shoaling, elle s'amplifie et sa valeur oscille entre 10 kW/m et 40 kW/m avant le déferlement des vagues. Cette amplification s'intensifie dans la zone où la profondeur locale d'eau varie entre 3m et 8m environ. Quant à la profondeur locale d'eau au point de déferlement, elle oscille entre 1m et 4m environ.

Il ressort de tout ce qui précède qu'il existe en permanence un potentiel énergétique de houle exploitable dans la zone côtière du Bénin. L'exploitation de cette énergie renouvelable, avec un convertisseur installé dans les zones où la profondeur locale d'eau varie entre 3 m et 10 m dans la direction sud-sud-est, serait pour le Bénin et même pour la sous-région, une solution adéquate pour contribuer à la résolution de la crise énergétique.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier sincèrement les autorités du Centre de Recherches Halieutiques et en et Océanographiques du Bénin (CRHOB) actuel IRHOB (Institut de Recherches Halieutiques et Océanographiques du Bénin) pour avoir accepté de mettre gracieusement à notre disposition les données relatives à la houle que nous avons utilisées et sans lesquelles nous ne pourrions aboutir à l'élaboration de ce travail.

REFERENCES

- [1] J-I. Lee, Y-T. Lee, J-K. Kim and J-K. Lee, '*Stem waves along vertical wall : Comparison between monochromatic and random waves*', Journal of Coastal Research, SI 56, pp 991-994, ICS 2009.
- [2] J. Bougis, '*Modèle d'approche de la houle par une méthode de réfraction - diffraction en coordonnées curvilignes*', Revue Paralia, VIII^{ème} Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, Compiègne, pp 55-64, Septembre 2004.
- [3] A.V. Babanin, '*Breaking of Ocean Surface Waves*', Acta physica slovacica, Vol. 59, N°4, pp. 305 – 535, 2009.
- [4] F. Chazel, '*Influence de la Topographie sur les Ondes de Surfaces*', Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux I, (Ecole doctorale de Mathématiques et Informatiques), 2007.
- [5] D. Lannes and P. Bonneton '*Derivation of Asymptotic Two-Dimensional Time-Dependent Equations for Surface Water Wave Propagation*', Physics of Fluids, Vol. 21, pp. 1 - 9, 2009.
- [6] G.V. Panchang, R.B. Pearce, G. Wei and B. Cushman-Roisin, '*Solution of the Mild-Slope Wave Problem By Iteration*', Applied Ocean Research, Vol. 13, N°4, pp. 187 – 199, 1991.
- [7] B. Kounouhewa, B.N. Tokpohozin, M.A. Houekpoheha, C.N. Awanou et B. J. Chabi-Orou, '*Simulation du Potentiel Energétique des Courants Marins Internes au Port Autonome de Cotonou en République du Bénin et son Impact sur le Fond Marin*', Journal de La Recherche Scientifique de l'Université de Lomé, Togo, Série E, Vol. 16, N°3, pp. 175 - 185, 2014.
- [8] S. Abadie, R. Butel, H. Dupuis et C. Brière, '*Paramètres Statistiques de la Houle au Large de la Côte Sud-Aquitaine*', C.R. Geoscience, Vol. 337, pp. 769 - 776, 2005.
- [9] M.A. Houékpohéha, B. Kounouhewa, B.N. Tokpohozin et C.N. Awanou, '*Estimation de la Puissance Energétique Eolienne à Partir de la Distribution de Weibull sur la Côte Béninoise à Cotonou dans le Golfe de Guinée*', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 17, N°3, pp. 489 – 495, 2014.
- [10] G.C.E. Dégbé, M.L. Oyédé et R. Laïbi, '*Mise en Valeur des Zones Littorales et Risques Environnementaux: Quelles Stratégies pour un Développement Durable en Afrique de l'Ouest et du Centre*', Journées internationales du dragage, Gabon, Libreville, 1-3 décembre, 2010.
- [11] N. Sénéchal, '*Etude de la Propagation des Vagues au-dessus d'une Bathymétrie Complexe en Zone de Surf*', Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux I, 2003.

- [12] J.C. Ascione et P. Gauffrès, '*Modélisation des Etats de Mer pour la Recherche de Sites d'Exploitation Houlomotrice: Application à l'Île de la Réunion*', Revue Paralia, IX^{ème} Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, Brest, 12-14 Septembre 2006.
- [13] P. Catalán and M.C. Haller, '*Remote Sensing of Breaking Wave Phase Speeds with Application to Non-Linear Depth Inversions*', Coastal Engineering, Vol. 55, pp 93 – 111, 2008.
- [14] M. Tissier, '*Etude Numérique de la Transformation des Vagues en Zone Littorale, de la Zone de Levée aux Zones de Surf et de Jet de Rive*', Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux I, (Ecole Doctorale Sciences et Environnements), 2011.
- [15] K.A. Belibassakis, Ch.N. Stefanakos, A. Bratsos and A.M. Prospathopoulos, '*Numerical Simulation of Weakly Nonlinear Wave Propagation Invariable Bathymetry Regions*', Proceedings of ICNAAM, (International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematical), 10-14 September 2004, Chalkis, Greece, Wiley-Vcl, pp. 38 – 41, 2004.
- [16] N. Sénéchal, P. Bonneton et H. Dupuis, '*Paramétrisation de l'Energie des Vagues en Zone de Surf Interne: Profil de Plage 'Plane' et Profil de Plage à Barres*', Revue Paralia, VIII^{ème} Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, Compiègne, 7-9 Septembre 2004, Session 1: Hydrodynamique Côtère, pp. 13 - 20, 2004.
- [17] F. Sabatier, '*Fonctionnement et Dynamiques Morpho-Sédimentaires du Littoral du Delta du Rhône*', Thèse de Doctorat, Université de Aix-Marseille III, 2001.
- [18] C.P. Tsai, H.B. Chen and M.J. Huang, '*Wave Shoaling on Steep Slopes and Breaking Criteria*', Proceedings of The Twelfth (2002) International Offshore and Polar Engineering Conference, Kitakyushu, Japan, pp. 617 - 621, May 26-31, 2002.
- [19] I.I. Didenkulova and E.N. Pelnovsky, '*Run-up of Long Wave on a Beach: The Influence of the Incident Wave Form*', Oceanologiya (Marine Physics), Vol. 48, pp. 5 – 10, 2008.
- [20] I.B. Abbasov, '*Numerical Simulation of Nonlinear Surface Gravity Waves Transformation under Shallow-Water Conditions*', Applied Mathematics, Vol. 3, pp 135 - 141, 2012.
- [21] A. Babarit, J.M. Rousset, H. Mouslim, J. Aubry, H. Ben Ahmed et B. Multon, '*La Récupération de l'Energie de la Houle, Partie 1 : Caractérisation de la Ressource et Bases de l'Hydrodynamique*', Revue 3EI, pp. 17 - 25, 2009.
- [22] J.A. Battjes, H.J. Bakkenes, T. Janssen and A.R. van Dongeren, '*Shoaling of Sub Harmonic Gravity Waves*', Journal of Geophysical Research, Vol. 109, C02009, pp. 1 - 5, 2004.