

## **IMPACT DES VAGUES DEFERLANTES SUR LES ZONES LITTORAUX ET LES STRUCTURES DE PROTECTION CÔTIÈRES**

**Marsi Meluce TIANDRAZA<sup>1</sup>, Ruffin MANASINA<sup>2</sup> et Adolphe RATIARISON<sup>3</sup>**

*<sup>1</sup>Laboratoire de la Dynamique de l'Atmosphère, du Climat et des Océans (DyACO), Science de la Matière et des Structures, Faculté des Sciences, de Technologies et de l'Environnement. Université de Mahajanga*

*<sup>2</sup> Institut Supérieur des Sciences et Technologies de Mahajanga, Université de Mahajanga*

*<sup>3</sup>Laboratoire de la Dynamique de l'Atmosphère, du Climat et des Océans (DyACO), Faculté de Sciences, Université d'Antananarivo*

E-mail : [marsimeluce@gmail.com](mailto:marsimeluce@gmail.com)

### **Résumé :**

Aujourd'hui, les zones côtières mondiales sont fragilisées par des efforts mécaniques des vagues déferlantes. Ce phénomène provoque considérablement la dégradation des ouvrages artificiels de protections côtières pouvant aller jusqu'à la perte de vies humaines. De plus, ces efforts induits par des vagues peuvent déplacer des blocs rochiers sur des distances de plusieurs mètres. L'objectif de ce travail est de quantifier les efforts mécaniques induits par l'impact des vagues sur la structure côtière, afin d'en déduire des modèles exploitables pour la prévention de l'érosion côtière. Les différentes théories des vagues en eau peu profonde et leurs caractérisations sont étudiées pour modéliser les interactions des vagues et structures. Le mécanisme d'érosion de la falaise, les coefficients de réflexion et de transmission des vagues, ainsi que les forces engendrées par l'impact des vagues sur une structure verticale par rapport au fond horizontal de la mer ont été développés. La méthode de détermination de la pression dynamique engendrée par les vagues le long d'un mur vertical est basée sur le modèle de Stokes de la houle en s'appuyant sur les hypothèses simplificatrices utilisées par Stevenson et Hiroi en eau peu profonde. Les résultats des simulations des vagues de hauteur 1 m et de longueur d'onde 10 m, de profondeur 12 m, montre que les vitesses minimale et maximale des vagues sont respectivement 0.9810 et 4.7194 m/s. La pression dynamique de l'impact des vagues sur la falaise est 252.4 kPa. Au moment de l'impact, la valeur de la force de pression est égale à 3.67 10<sup>4</sup> kN. Pendant les simulations, plus que la longueur d'onde soit faible, la valeur de la pression dynamique de l'impact sera importante. La digue verticale, la digue à talus, et la digue mixte sont proposées pour protéger les structures côtières contre l'énergie apportée par les vagues.

**Mots clés :** Energie de vagues, érosion côtière, falaise, digue, coefficient de transmission.

**Abstract :**

Today, the world's coastal zones are weakened by the mechanical forces of breaking waves. This phenomenon causes the degradation of artificial structures of coastal protection that can lead to the loss of life. Moreover, these wave-induced forces can move boulders over distances of several meters. The aim of this work is to quantify the mechanical forces induced by the impact of waves on the coastal structure, in order to deduce exploitable models for the prevention of coastal erosion. The different theories of shallow-water waves and their characterizations are studied to model the interactions of waves and structures. The cliff erosion mechanism, the reflection and transmission coefficients of the wave, and the forces generated by the impact of waves on a vertical structure in relation to the horizontal seabed have been developed. The method of determining the dynamic pressure generated by waves along a vertical wall is based on the Stokes model of the swell based on simplifying assumptions used by Stevenson and Hiroi in shallow water. The results of simulations of waves of 1 m height and 10 m wavelength, depth 12 m, show that the minimum and maximum wave speeds are respectively 0.9810 and 4.7194 m / s. The dynamic pressure of wave impact on the cliff is 252.4 kPa. At the moment of impact, the value of the pressure force is 3.67 10<sup>4</sup> kN. During these simulations, more than the wavelength is small, the value of the dynamic pressure of the impact will be important. The vertical dyke, embankment dyke, and mixed dyke are proposed to protect coastal structures from the wave energy.

**Keywords :** wave energy, coastal erosion, cliff, dyke, transmission coefficient

## Nomenclatures

Symbole	Description	Unité
$a$	Amplitude constante de l'onde incidente	m
$a_r$	Amplitude constante de l'onde réfléchi	m
$a_t$	Amplitude constante de l'onde transmise	m
$C$	Célérité de l'onde	$m.s^{-1}$
$d$	Profondeur de la mer	m
$g$	Accélération de pesanteur	$m.s^{-2}$
$H$	Hauteur des vagues de crête à creux	m
$H_b$	Hauteur des vagues déferlantes	m
$h_f$	Hauteur de la falaise	m
$p$	Pression des vagues	kPa
$P$	Puissance des vagues	$W/m^2$
$P_{atm}$	Pression atmosphérique	kPa
$P_{dyn}$	Pression dynamique des vagues	kPa
$P_m$	Pression maximale	kPa
$P_s$	Pression statique	kPa
$t$	Temps	s
$U$	Champ de vitesse	$m.s^{-1}$
$\vec{u}$	Vitesse des vagues	$m.s^{-1}$
$u$	Vitesse horizontale du vague	$m.s^{-1}$
$U_{ech}$	Vitesse d'échappement	$m.s^{-1}$
$w$	Vitesse verticale du vague	$m.s^{-1}$
$\beta$	Angle d'un plan incliné par rapport à l'horizontale	Rad
$\eta$	Élévation de la surface libre	m
$\phi$	Fonction potentielle de vitesse	
$\lambda$	Longueur d'onde de la houle	m
$\rho_f$	Masse volumique de la falaise	$kg.m^{-3}$
$\rho$	Masse volumique de la mer	$kg.m^{-3}$
$\omega$	Pulsation de la houle	$rad.s^{-1}$

### I. INTRODUCTION

L'ensemble des côtes mondiales est aujourd'hui sujet à de fortes contraintes hydrodynamiques lors d'impacts de vagues déferlantes. Ces efforts hydrodynamiques fragilisent considérablement les ouvrages de protections côtiers et par conséquent les zones urbaines. Lors d'impacts, les efforts

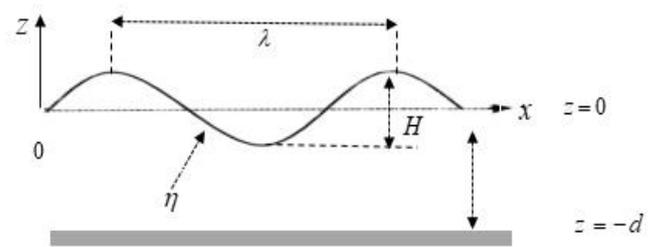
induits par l'action des vagues peuvent déplacer des blocs d'enrochement sur des distances de plusieurs mètres et/ou créer des dommages structurels (fissurations, arrachement) menant à la rupture des digues ou de la falaise [1]. Ces problématiques deviennent désormais un centre de préoccupations majeur des pays littoraux. Les travaux présentés dans cet

article vise de mieux comprendre les efforts mécaniques induits par l'impact des vagues sur la falaise, afin d'en déduire des modèles exploitables dans les outils d'ingénierie contre l'érosion côtière. Après avoir présenté les différentes théories des vagues en eau peu profonde et la modélisation des interactions des vagues et structures, ainsi que les forces engendrées par l'impact des vagues, nous illustrons notre présentation par la méthode de détermination de la pression dynamique engendrée par les vagues le long d'un mur vertical est basée sur le modèle de Stokes de la houle en s'appuyant sur les hypothèses simplificatrices utilisées par Stevenson et Hiroi en eau peu profonde. Enfin, nous présenterons les résultats des simulations obtenus par les vagues déferlantes et les solutions à proposer pour protéger la zone côtière

## II. METHODOLOGIE

### II.1. Modélisation des vagues

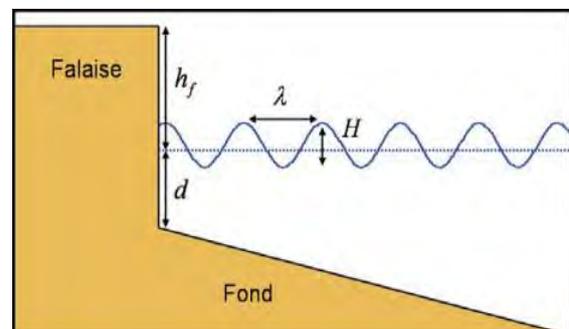
La vague est caractérisée par l'ondulation produite à la surface libre de la mer sous l'effet du vent et d'un courant marin. Tandis que la houle est le mouvement d'ondulation de la mer sans déferlement de vague. En l'absence du vent, les vagues continuent à se propager librement, appelées la houle. La figure 1 montre le modèle des vagues.



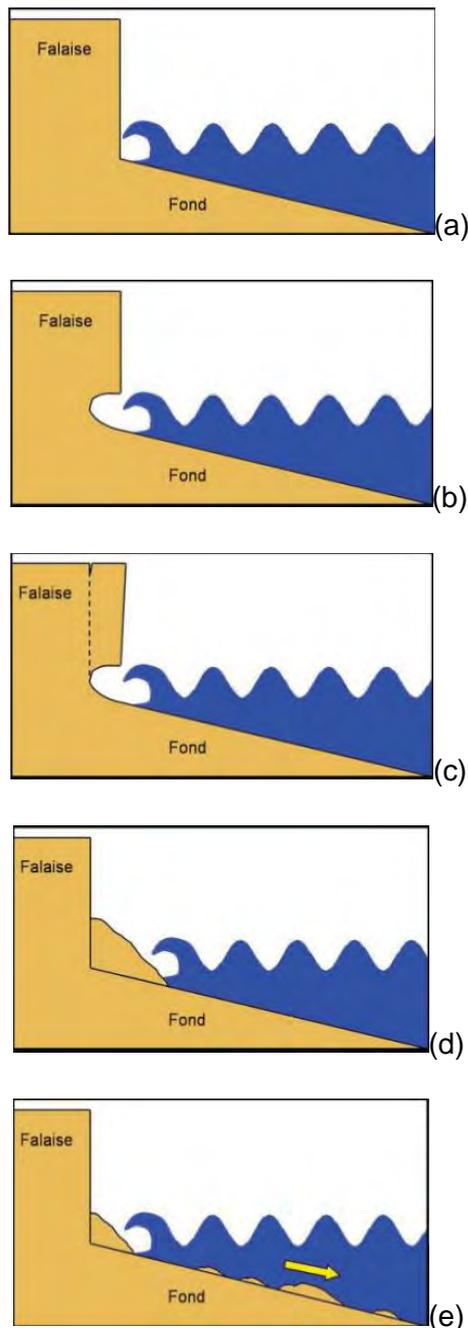
**Figure1** : Représentation des paramètres caractéristiques de la houle

### II.2. Modélisation et mécanismes d'érosion de la falaise

L'effet d'impact des vagues sur la falaise provoque des érosions. Ce phénomène est caractérisé par la hauteur des vagues  $H$  et la hauteur de falaise  $h_f$ . La figure 2 et la figure 3 présentent respectivement les différents paramètres de la falaise verticale engendrés par les vagues et les mécanismes d'érosion



**Figure 2** : Topologie des vagues et de la falaise [2]



**Figure 3:** Cycle d'érosion de la falaise [2]

Le premier processus du cycle d'érosion de la falaise présenté dans la figure 3a montre que les vagues se propagent de façon sensiblement uniforme vers la zone littorale. Au moment de l'impact, l'action mécanique des vagues qui creuse le pied de la falaise en créant un encoche (figure 3b). La figure 3c présente la déstabilisation

d'une partie de la falaise. Les débris issus de l'écroulement sont érodés par abrasion marine où les vagues usent les débris par frottement (figure 3d). Le matériau est ensuite transporté vers le large par les vagues et les courants d'eau. Ce transport charge ainsi la morphologie du fond. Lorsque les débris en pied de falaise sont entièrement évacués, le cycle d'érosion revient à la phase initiale (figure 3e).

### II.3. Equations des vagues

#### II.3.1. Equations de Navier-Stokes

Les vagues sont supposées un écoulement bidimensionnel et incompressible. Les équations générales utilisées pour étudier les vagues sont celles de la continuité et du mouvement, appelées équations de Navier-Stokes [3].

$$\text{Equation de continuité : } \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Equation de mouvement :

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = \vec{g} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \vec{u} \quad (2)$$

Si on néglige les termes dépendant du temps et la houle se propage sur la côte c'est-à-dire soumise de contrainte, nous avons l'équation de Bernoulli.

$$\frac{p}{\rho} + \frac{\partial \phi}{\partial t} + gz + \frac{1}{2} (\overline{\text{grad} \phi})^2 = C(t) \quad (3)$$

On peut dire la supposition de flux irrotationnel va se permettre de moins difficile à résoudre le problème, de telle sorte que l'équation de conservation de masse devient l'équation de Laplace :  $\nabla^2 \phi = 0$ , tandis que l'équation de mouvement vont se réduire à l'équation de Bernoulli en régime non permanent.

### II.3.2. Théorie de Stokes

Trois approximations de la théorie de Stokes pour l'étude de la houle de faible cambrure  $\left(\frac{H}{\lambda} < 1\right)$  peuvent être utilisés [3][4]. Ces approximations sont basées sur la résolution de la fonction de courant, de façon générale, pour de tel développement,  $\xi$  représente la courbe, et on écrit :

$$\begin{aligned}\eta &= \xi \eta_1 + \xi^2 \eta_2 + \xi^3 \eta_3 + \dots \\ \phi &= \xi \phi_1 + \xi^2 \phi_2 + \xi^3 \phi_3 + \dots\end{aligned}\quad (4)$$

Pour les ondes en faible profondeur, les déformés de la surface libre de la mer (profil d'onde) et les pressions dynamiques des trois approximations de Stokes sont exprimées par les relations suivantes.

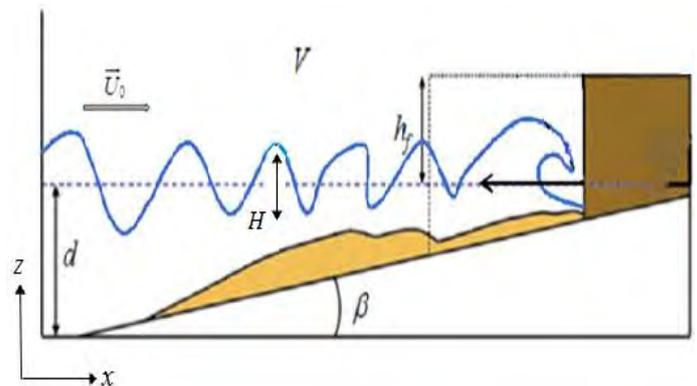
$$\begin{aligned}\eta_1 &= -\frac{H}{2} \sin(kx - \omega t) \\ \eta_2 &= -\frac{H}{2} \sin(kx - \omega t) - \left(\frac{H}{2}\right)^2 k \frac{3 \cosh[2k(z+d)]}{4 \sinh^3(kd) \cosh(2kd)} \sin 2(kx - \omega t) \\ \eta_3 &= -\frac{H}{2} \sin(kx - \omega t) \\ &\quad - \left(\frac{H}{2}\right)^2 k \frac{3 \cosh[2k(z+d)]}{4 \sinh^3(kd) \cosh(2kd)} \sin 2(kx - \omega t) \\ &\quad - \left(\frac{H}{2}\right)^3 k^2 \frac{(24 \cosh^5(kd) + 3) \cosh[3k(z+d)]}{64 \sinh^5(kd) \cosh(3kd)} \sin 3(kx - \omega t)\end{aligned}$$

Pour évaluer les efforts hydrodynamiques engendrés par la houle sur un mur vertical, il est nécessaire en premier temps de résoudre analytiquement les équations provenant du modèle de la houle régulière. Dans un second temps, différentes approches empiriques qui prennent en compte les effets non-linéaires, seront prises en compte.

### II.4. Modélisations interactions vagues et structures

#### II.4.1. Caractérisations

Lors de passage de la houle incidente au mur vertical, l'énergie transportée se divise en deux : une partie se transmet soit à travers l'obstacle s'il est perméable, soit au-dessus s'il est franchissable ; et l'autre partie réfléchi qui se propage en sens inverse de la houle incidente en se superposant. La figure 4 montre le comportement de la houle à l'approche de la falaise. Dans cette figure, une vague de hauteur  $H$  qui se propage suivant un axe  $Ox$  qui est supposé faisant un angle  $\beta$  avec l'axe horizontale, et être réfléchi par un mur vertical d'équation  $x = 0$ .



**Figure 4:** Schéma du comportement de la houle à l'approche de la falaise [2]

Les équations de continuité et du mouvement sont non-linéaires selon le modèle de STVENANT en deux dimensions sont suivantes [5][6]:

La solution  $\eta$  d'une onde incidente s'écrit sous la forme suivante.

$$\eta_i(x,t) = a_0 \cos(\omega t - \phi(x)) \quad \text{ou}$$

$$\eta_i(x,t) = a_0 \cos(kx - \omega t) \quad (7)$$

L'équation d'onde réfléchie est :

$$\eta_r = Ra_0 \cos(\omega t + k_0 x + \psi_0) \quad (8)$$

L'onde résultante est obtenue par la superposition de l'onde incidente et de l'onde réfléchie lors de l'impact sur l'obstacle.

$$\eta_{re}(x,t) = a_0 \cos(\omega t - k_0 x) + Ra_0 \cos(\omega t + k_0 x + \psi_0) \quad (9)$$

De la même manière, on peut définir l'onde transmise par la relation 10.

$$\eta_t(x,t) = T_r a_0 \cos(\omega t + k_1(x-L) + \psi_1) \quad (10)$$

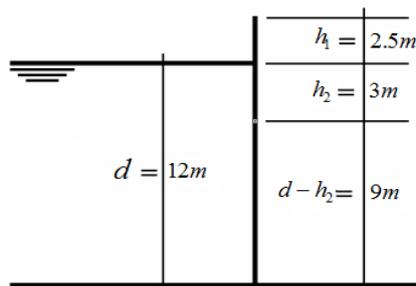
Les coefficients de réflexion et de transmission peuvent être exprimés par les équations (11) et (12).

$$T_r = \pm \frac{2\sqrt{d_0}}{\sqrt{d_0} + \sqrt{d_1}} \quad (11)$$

$$R = \pm \frac{\sqrt{d_0} - \sqrt{d_1}}{\sqrt{d_0} + \sqrt{d_1}} \quad (12)$$

#### II.4.2. Forces générées par les vagues déferlantes sur un mur

Pour faciliter la compréhension des études sur la figure 2, nous allons fixer les valeurs de des paramètres de la falaise montrées dans la figure 5



**Figure 5:** Schéma du mur vertical et de sa partie haute [7].

La pression générée par le système d'ondes est donnée par l'équation:

$$p = -\rho g z - \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} - \frac{1}{2} \rho U^2$$

On constate qu'au passage d'une onde sur un mur vertical de profondeur inclinée d'un angle  $\beta$ , l'expression de la pression sur le mur à l'abscisse  $x = 0$ :

$$p = -\rho g z + \rho g H \frac{\cosh(k(z+d))}{\cosh(kd)} \sin(ky \sin \beta - \omega t) - \frac{1}{2} \rho \frac{\omega^2 H^2}{\sinh^2(kd)} \left[ \sin^2 \beta \cosh^2(k(z+d)) \sin^2(ky \sin \beta - \omega t) + \sinh^2(k(z+d)) \cos^2(ky \sin \beta - \omega t) \right] \quad (13)$$

Naturellement la pression est maximale lorsque l'incidence est perpendiculaire au mur.

Si  $\beta = 0$ , la propagation d'onde a une structure horizontale dans le plan  $(Ox)$  et  $y = 0$ .

Dans ce cas :

$$p = -\rho g z - \rho g H \frac{\cosh(k(z+d))}{\cosh(kd)} \sin(\omega t) - \frac{1}{2} \rho \frac{\omega^2 H^2}{\sinh^2(kd)} \sinh^2 k(z+d) \cos^2(\omega t) \quad (14)$$

La force qui s'applique, par unité de largeur, sur la partie du mur située au-dessus de la côte  $h_f$ , est obtenue par intégration de la pression entre les deux côtes  $z = -h_2$  et  $z = 0$ .

$$F_p = \frac{1}{2} \rho g h_2^2 - \rho g H \frac{\tanh^2(kd)}{k_\infty} \left[ 1 - \frac{\sinh(d-h_2)}{\sinh(kd)} \right] \sin(\omega t) - \frac{1}{2} \rho g H^2 \left[ 1 - \frac{\sinh(d-h_2) \cosh(d-h_2) + kh_2}{\sinh(kd) \cosh(kd)} \right] \cos^2(\omega t) \quad (15)$$

En s'appuyant sur les hypothèses simplificatrices utilisées par **Stevenson** et **Hiroi** en eau peu profonde [8]. D'après les travaux d'Hiroi, la pression dynamique engendrée par les vagues déferlantes peut s'écrire :

$$p = +\frac{3}{2}\rho H \quad (16)$$

Au moment de l'impact des ondes, la force de pression exercée sur la partie du mur est exprimée par la relation suivante [9]:

$$F_p = \frac{1}{2}\rho g h_2^2 + \frac{3}{2}\rho g H \left( \frac{5}{4}H + h_2 \right) \text{ si } \frac{5}{4}H < h_1$$

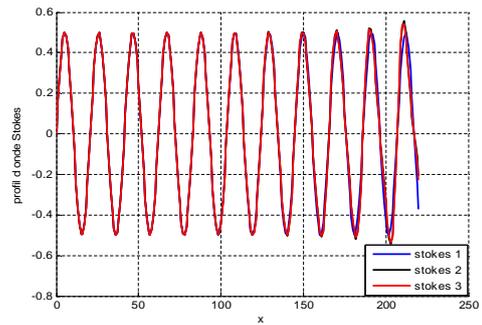
$$F_p = \frac{1}{2}\rho g h_2^2 + \frac{3}{2}\rho g H (h_1 + h_2) \text{ si } \frac{5}{4}H > h_1$$

(17)

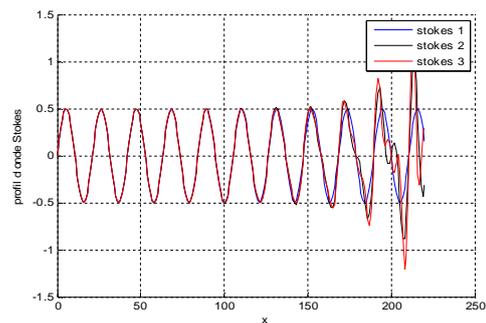
### III. RESULTATS

#### III.1. Simulations des profils d'onde à chaque approximation de Stokes

La **figure 6** montre aussi les déformés de la houle vagues de  $H=1m$  et  $d = 90m$  pour chaque théorie de Stokes. Les observations montrent que les deux courbes se superposent. Néanmoins, nous constatons que la différence est faible. Sur ces figures, lorsque la longueur d'onde est grande, le profil d'onde reste uniforme. Par contre lorsqu'elle est petite donc le profil d'onde apparaitre progressivement.



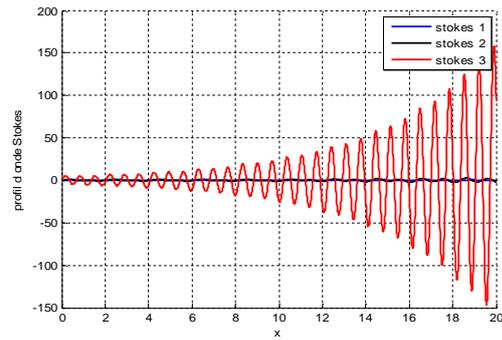
$\lambda = 600m$



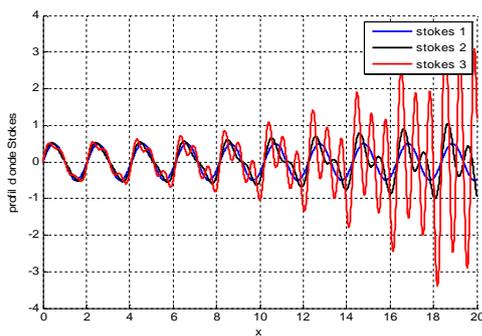
$\lambda = 400m$

**Figure 6** : Propagation des profils d'ondes des vagues avec la variation de longueur d'onde

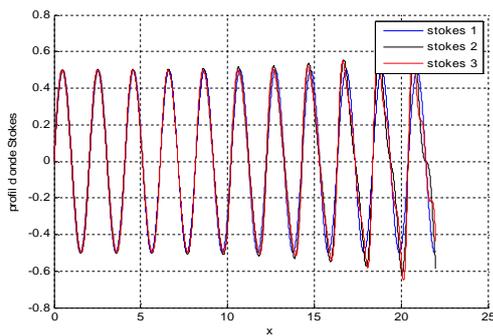
La **figure 7** présente les profils d'ondes des vagues de  $H=1m$  et  $\lambda = 100$  avec la variation de profondeur d'eau. Le profil d'onde est déformé avec la diminution de la profondeur. C'est à dire plus la profondeur augmente, le profil d'onde se propage uniformément. Pour obtenir une pression des vagues à l'impact sur le milieu littoral, il faut avoir de profondeur et/ou de la longueur d'onde petite.



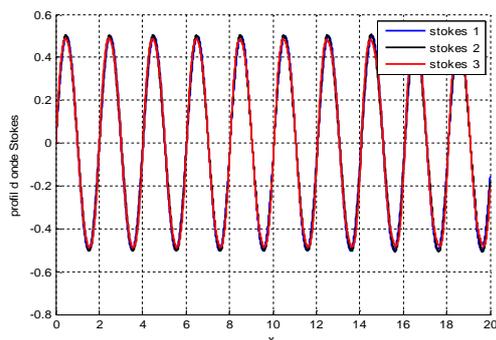
$d = 3$



$d = 6$



$d = 12$

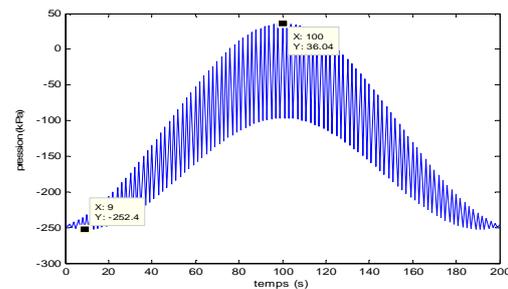


$d = 20$

**Figure 7 :** Propagation des profils d'ondes avec la variation de la profondeur d'eau d

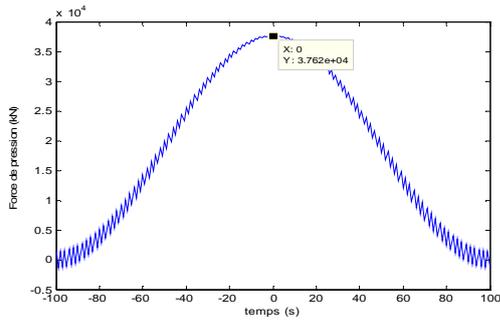
### III.2. Pressions des vagues sur mur vertical

La figure 8 nous donne la pression dynamique de vagues de hauteur 1m, de profondeur 12m et de longueur d'onde 10 m. Dans ce cas, les vagues qui frappent sur la partie supérieure de la falaise avec son enveloppe. D'après cette figure, le maximum de cette pression est de  $252.4 \text{ kPa}$ . Il est à noter que les forces des vagues frappent le mur par rapport à la verticale suivant l'axe z.



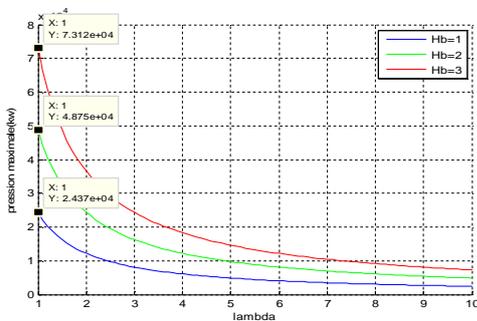
**Figure 8:** Pression à l'impact des vagues de hauteur  $H=1\text{m}$  de profondeur  $d=12\text{m}$ .

La *figure 8* montre la variation de pression exercée pendant qu'elle rencontre un obstacle. Nous avons observé que la force augmente jusqu'à ce qu'elle atteigne sa valeur maximale puis elle descend à sa valeur initiale. Cette force varie de 0 à  $4.10^4 \text{ kN}$ . Au moment de l'impact, la valeur de la force de pression est égale  $3.762 \cdot 10^4 \text{ kN}$ .



**Figure 8:** Force de la pression

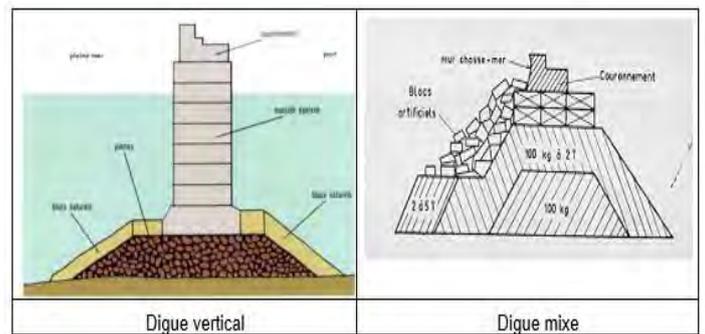
Sur la **figure 9**, montre la pression maximale en fonction de la longueur d'ondes. A chaque hauteur des vagues on voit que sa pression augmente de façon relative des vagues. Lorsque que la longueur d'onde est petite suivant la hauteur des vagues croissantes, donc la pression obtenue est importante. Par contre si elle est élevée, cette pression devient faible. La courbe en bleu présente des vagues déferlantes de hauteur 1m dont la pression maximale vaut  $2.437 \cdot 10^4$  kPa, en vert de hauteur 2m dont la pression maximale est de  $4.875 \cdot 10^4$  kPa et en rouge de hauteur 3m dont la pression maximale est de  $7.312 \cdot 10^4$  kPa.



**Figure 9 :** Pression maximale des vagues en fonction de la longueur d'onde

### III.3. Ouvrages de protection contre la houle

Afin de protéger les côtes des effets destructeurs de la houle, nous avons proposé des dispositifs capables de dissiper l'énergie des vagues. L'idéal est d'obtenir une dissipation aussi progressive que possible afin d'éviter une trop grande turbulence, comme par exemple de faire mourir les vagues sur un plan incliné de pente très douce [8][10]. La figure 10 présente les ouvrages de protections côtières (digue vertical, digue à talus et digue mixte).



**Figure 10 :** Ouvrages de protections côtières [11]

#### IV. CONCLUSION

Cet article a été consacré d'une part, à la modélisation efforts mécaniques induits par l'impact des vagues déferlantes et d'autre part à la proposition des modèles exploitables dans les outils d'ingénierie contre l'érosion côtière. Nous avons développé les équations analytiques des interactions vagues et structure. A partir de la résolution et les résultats obtenus, nous avons trouvés la valeur des pressions égale 252.4 kPa et les vagues sont perpendiculaire au mur vers le fond, la valeur de la pression est égale à 305 kPa. La force engendrée au moment de l'impact est égale à  $3.67 \cdot 10^4$  kN. Nous parlons les ouvrages classiques sur l'application en ingénierie, destinée à la réalisation des structures de protection côtière ou de lutte contre l'érosion côtière. En perspective, nous pouvons envisager d'utiliser le modèle de la houle irrégulière pour étudier l'impact des vagues déferlantes sur les structures côtières.

#### REFERENCES

- <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-houlomotrice-ou-energie-des-vagues>, Consulté le 27 mars 2017.
- CAPLAIN BASTIEN, Étude expérimentale de l'érosion d'un massif de sable cohésif par une houle monochromatique. Doctorat de l'INP de Toulouse, spécialité Dynamique des fluides, p.11-12-13 (2011).
- C. ARISTAGHES et P. ARISTAGHES: théories de la houle, houle réelle, propagation de la houle ; Notice PM • N° 85; Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviales ; 01 Octobre 1985
- M. DUVAL. Étude du déferlement d'une onde de Stokes et de la dissipation associée par simulation directe. Doctorat de l'INP de Toulouse, France, spécialité Dynamique des Fluides, le 14 décembre 2007.
- BENNY LAUTRUP: "Stokes waves" May 11, 2011
- [Hydrodynamique Marine, Option "Science de l'eau et Environnement" et Mastère "Hydraulique"](#), Strasbourg (ENGEES), année 1988/1999
- [JEAN BOUGIS, Ouvrages de défense des littoraux](#), Ingénieur Conseil. 06650 Opio, [Octobre 2000](#)
- DANIEL CAMINADE, Ouvrages de protection contre la houle, Ingénieur civil des Ponts et Chaussées. Docteur en Génie civil, Université du Havre
- MOKRANI C. Impacts de vagues déferlantes sur un obstacle vertical. Modèle théorique et estimation numérique des pics de pression. Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, p.46-47-48, le 13 février 2012
- <http://www.shf-hydro.org/59-vagues-de-faible-amplitude-theorie-line-aire-97.html>