

Réflexion de la houle par une plaque immergée en présence d'un courant

V. Rey

Laboratoire de Sondages Electromagnétiques de l'Environnement Terrestre,
UMR-CNRS 6017, Université de Toulon et du Var, BP 132, F-83957 La Garde Cedex, France

R. Capobianco

Laboratoire d'Echanges Particulaires aux Interfaces,
Université de Toulon et du Var, 83162 La Valette du Var Cedex, France.

C. Dulou

Département de Géologie et Océanographie,
UMR 5805 EPOC Université Bordeaux I, avenue des Facultés, 33405 Talence Cedex, France

Résumé

Le but de ce travail expérimental était d'étudier, pour une houle d'incidence normale, l'influence d'un courant homogène dans le sens de propagation de la houle sur le pouvoir de réflexion d'une plaque immergée. Les résultats expérimentaux de réflexion en fonction de la période de la houle (dans un repère fixe) et pour différentes amplitudes ont montré une faible influence du courant d'une part sur les positions des maxima et des minima de réflexion de la houle, et d'autre part sur leur intensité. Les positions des maxima d'énergie réfléchie sont donc peu affectées tandis que l'énergie réfléchie est moindre en présence d'un courant. En outre, les réflexions mesurées pour différentes amplitudes d'ondes de fréquence donnée montrent un comportement des houles correctement décrit par une approche linéaire.

Abstract

The purpose of this experimental work was the study of the influence of an homogeneous current in the incident wave direction on the wave reflecting power of a submerged plate. Results concerning reflection versus the wave period (in a fixed frame) for various amplitudes have shown a weak influence of the current both on the maxima and minima locations and on their amplitude. The locations of the maximum reflected energy are then weakly modified by the current contrary to the energy which is decreased. Moreover, reflections measured for various amplitudes at given frequency show a wave behaviour correctly described by a linear approach.

1. INTRODUCTION

En zone côtière, la houle peut être partiellement réfléchie par des variations rapides du fond. Ce pouvoir de réflexion de variations du fond a conduit à de nombreuses études et à la réalisation d'ouvrages côtiers immergés destinés à protéger des aménagements ou sites naturels de l'impact de la houle par réflexion partielle de son énergie (voir par exemple [8], [9]).

Pour des zones côtières où la profondeur d'eau croît rapidement, des ouvrages de type plaque immergée ont été proposés pour la protection côtière. Les études de leur pouvoir de réflexion en

fonction de la valeur relative de la longueur d'onde de l'onde par rapport à la longueur de la plaque à partir de modèles parfaits et linéaires ont montré la présence de maxima et minima de réflexion [6], [12]. Ce caractère oscillant de l'intensité de l'énergie réfléchi est du à un phénomène d'interférence au dessus de la plaque. Les aspects non-linéaires ont fait l'objets d'études plus récentes (voir [1]). Par ailleurs, des études mettant à profit les effets de dissipation visqueuse sur la transmission de l'énergie ont été menées sur des plaques perforées [5]. En zone côtière, des courants de l'ordre de 10 à 100 cm/s sont souvent observés, induits par la marée ou par le déferlement des houles. Ils ont un effet parfois important sur la vitesse de propagation et la direction de la houle [7], et par conséquent doivent a priori avoir une influence sur l'efficacité des brise-lames.

L'objet de ce travail, réalisé dans le Bassin de Génie Océanique (BGO) FIRST, près de Toulon, France, est l'étude de la réflexion de la houle par une plaque immergée, pour des houles superposées à des courants homogènes et de direction celle de la houle. Le dispositif expérimental et la méthode de calcul du coefficient de réflexion sont présentés dans la section 2. Les résultats concernant le coefficient de réflexion en fonction de la période de la houle sont présentés et discutés dans la section 3.

2. EXPERIENCES ET METHODES DE MESURES

2.1 Dispositif expérimental

Le BGO First a une longueur utile de 24m, une largeur utile de 16m, sa profondeur maximale utile est de 5m et la profondeur de son puits central 10m. Il est équipé d'un générateur de courant, d'un générateur de houle sur toute la largeur et d'un chariot XY mobile selon deux axes perpendiculaires. A l'autre extrémité, un amortisseur de houle de forme parabolique, est perforé pour permettre les études avec superposition d'un courant. Un fond mobile permet d'ajuster la profondeur d'eau à la valeur désirée et d'intervenir rapidement sur l'instrumentation et les maquettes fixées sur le fond.

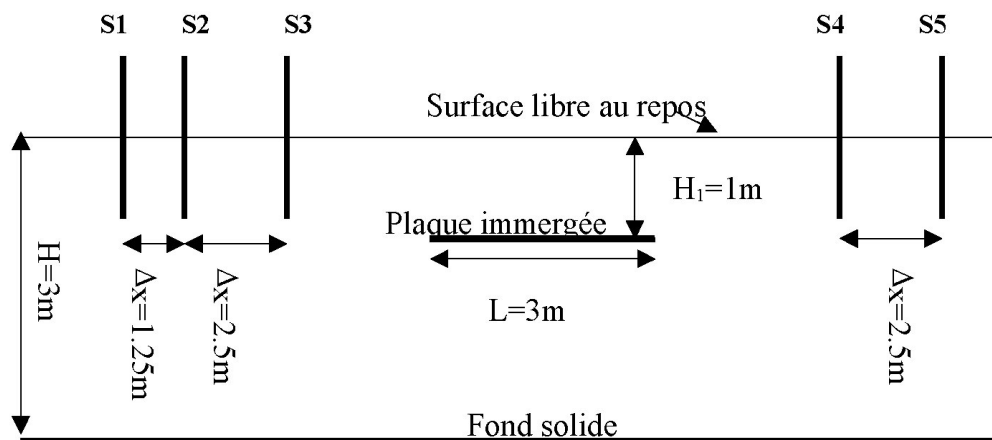


Figure 1: Schéma de l'expérience

Un puit central de cinq mètres de diamètre permet d'étudier des structures par grande profondeur. Le fond du bassin peut également être incliné de $\pm 7\%$ pour les applications de génie côtier par profondeur variable. Pour l'étude réalisée, une paroi a été fixée dans la longueur du bassin, réduisant sa largeur à 2m. Cette paroi était constituée de la juxtaposition de plaques de contreplaqué marine,

d'épaisseur 3cm et de largeur 1.54m, elles étaient maintenues par des fixations au dessus de la surface libre. La profondeur d'eau était constante et égale à 3m. La plaque, en contreplaqué marine d'épaisseur 3cm, était immobile et fixée à 1m de profondeur (voir figure 1).

Le générateur de houle, composé de flotteurs oscillant horizontalement, permet de générer des houles régulières ou irrégulières, dans la direction longitudinale, de hauteur crête à creux maximale 0.8m pour des périodes comprises entre 0.7 et 3.4s. Les houles générées dans le cadre de cette étude étaient régulières de période comprise entre 1.3 et 3.5s, et d'amplitude comprise entre 0.025 et 0.2m selon les périodes.

La génération d'un courant constant et homogène s'effectue grâce à l'action de pompes pilotées à partir de mesures de vitesse de l'eau. Nos études ont été réalisées pour des courants U d'intensités 0, 0.05, 0.1 et 0.2m/s dans le sens de propagation de la houle.

Les mesures de la houle étaient effectuées grâce à cinq Sondes capacitives synchrones, notées S_1 à S_5 . Trois Sondes en amont de la structure et deux en aval permettaient de mesurer ondes réfléchiées et transmises (voir figure1). Leurs espacements étaient tels que $x_3 - x_2 = x_5 - x_4 = 2(x_2 - x_1) = 2.5m$ où x_i , $i = 1, \dots, 5$ sont les positions respectives des sondes S_i . Afin que la mesure de l'onde réfléchiée ne soit pas perturbée par les modes locaux (non propagatifs), les sondes S_1 à S_5 étaient positionnées suffisamment loin de la structure (6m côté amont pour S_3).

Le traitement de Fourier des signaux calibrés permettait d'obtenir au niveau de chacune des sondes l'amplitude, la fréquence et la phase de chaque composante du signal.

2.2 Mesures de la réflexion de la houle

Le coefficient de réflexion R de la houle était mesuré avec une méthode à trois sondes basée sur les moindres carrés. Cette méthode, qui est basée sur celle proposée dans [4] et appliquée ici au cas de houles superposées à un courant de même sens, nécessite la connaissance de l'amplitude et de la phase de l'onde au niveau de chacune des sondes. Elle est basée sur l'hypothèse d'une onde plane linéaire. Le modèle linéaire pour une houle superposée à un courant homogène constant se propageant au dessus d'un fond plat est présenté ci-après. La méthode de calcul du coefficient de réflexion est ensuite détaillée.

2.2.1 Modèle de houle

On considère un écoulement bidimensionnel dans le plan xOz , avec Oz vertical vers le haut, et Ox direction de propagation de la houle incidente. La profondeur d'eau h est constante. On suppose qu'il existe un courant constant U dans la direction Ox . En supposant le fluide non visqueux, incompressible, de mouvement irrotationnel, on recherche l'expression générale du potentiel des vitesses dans l'hypothèse d'une houle infiniment petite se propageant dans la direction Ox de la forme:

$$\Phi = \Phi_c + \Phi_h(x, z, t) \quad (1)$$

tel que $\vec{v} = \vec{\nabla}\Phi$, avec :

$$\Phi_c = Ux \quad (2)$$

et $\Phi_h(x, z, t)$ à déterminer. Les solutions périodiques sont de la forme :

$$\Phi_h(x, z, t) = \phi(x, z)e^{j\omega t} \quad (3)$$

où Φ_h satisfait l'équation de Laplace :

$$\frac{\partial^2 \Phi_h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_h}{\partial z^2} = 0 \quad (4)$$

La combinaison des conditions limites à la surface libre (linéarisée) cinématique et dynamique en $z=0$:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + U \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad (5)$$

et

$$\frac{\partial \Phi_h}{\partial t} + \frac{U^2}{2} + U \frac{\partial \Phi_h}{\partial x} + g\eta = \text{const} \quad (6)$$

permet décrire

$$\frac{\partial^2 \Phi_h}{\partial t^2} + U \frac{\partial^2 \Phi_h}{\partial x \partial t} + g \frac{\partial \Phi_h}{\partial z} - gU \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad \text{en} \quad z = 0 \quad (7)$$

La condition d'imperméabilité au fond (en $z=-h$) est donnée par:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

Loin de la structure, le signal est la résultante de deux ondes planes se propageant dans des sens opposés. La déformée de la surface libre $\eta(x, t)$ est donnée par :

$$\eta(x, t) = \left\{ a^- e^{-jk^-x} + a^+ e^{+jk^+x} \right\} e^{j\omega t} \quad (9)$$

avec a^- et a^+ amplitudes complexes. La solution générale du potentiel (exprimé sous sa forme réduite $\phi(x, z)$) s'écrit comme la somme de deux modes propagatifs et d'une infinité de modes locaux:

$$\begin{aligned} \phi(x, z) = & A^- e^{-jk^-x} \cosh k^-(z+h) + A^+ e^{+jk^+x} \cosh k^+(z+h) \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} (B_n^- e^{-jk_n^-x} \cos k_n^-(z+h) + B_n^+ e^{+jk_n^+x} \cos k_n^+(z+h)) \end{aligned} \quad (10)$$

où k^\pm sont les nombres d'onde des ondes propagatives incidente et rétrograde, et les k_n^\pm sont les nombres d'onde des modes locaux. La courbe enveloppe de l'amplitude des modes locaux décroît exponentiellement quand on s'éloigne de la structure. Ils sont donnés respectivement, d'après les conditions limites de surface, par :

$$(\omega \pm Uk^\pm)^2 = \sigma^\pm = gk^\pm \tanh(k^\pm h) \quad (11)$$

et

$$(\omega \pm jUk_n^\pm)^2 = -gk_n^\pm \tan(k_n^\pm h) \quad (12)$$

où σ^\pm sont les fréquences relatives dans un repère en translation à la vitesse U . Les vitesses de phase C^\pm et de groupe C_g^\pm définies dans le repère en translation sont données par :

$$C^\pm = \frac{\sigma^\pm}{k^\pm} \quad (13)$$

$$C_g^\pm = \frac{1}{2} C^\pm \left[1 + \frac{2k^\pm h}{\sinh 2k^\pm h} \right] \quad (14)$$

2.2.2 Méthode à trois sondes

L'expression théorique de la déformée de la surface libre au niveau de la sonde S_n , basée sur une houle d'Airy (9) est donnée, après un choix arbitraire de l'origine des temps, par :

$$\eta_n = \left\{ a_1 e^{-j(k^-x_1 + \Delta n^-)} + a_1 e^{+j(k^+x_1 + \Delta n^+ + \varphi)} \right\} e^{j\omega t} \quad (15)$$

avec

$$\Delta_n^- = k^-(x_n - x_1) \quad (16)$$

$$\Delta_n^+ = k^+(x_n - x_1) \quad (17)$$

La composante fondamentale de la déformée de la surface libre mesurée par la sonde S_n ($n = 1, 2, 3$) est de la forme:

$$\eta_n^{(m)} = A_n e^{j(\omega t - \varphi_n)} \quad (18)$$

où l'indice supérieur (m) signifie valeur mesurée. La phase φ_n peut être exprimée en fonction de φ_1 , phase pour la sonde S_1 :

$$\varphi_n = \varphi_1 + \delta_n \quad (19)$$

Les amplitude et phase A_n et φ_n sont calculées par analyse de Fourier du signal mesuré par la sonde S_n . Les amplitudes a_i et a_r , et par conséquent le coefficient de réflexion

$$R = \frac{a_r}{a_i} \quad (20)$$

peuvent être calculés à partir des données des sondes S_1 à S_3 par une méthode des moindres carrés, les mesures des sondes étant synchronisées. Les expressions (15) et (18) sont réécrites sous les formes respectives :

$$\eta_n = \left\{ b_i e^{-j\Delta_n^-} + b_r e^{+j\Delta_n^+} \right\} e^{j\omega t} \quad (21)$$

$$\eta_n^{(m)} = B_n e^{j\omega t} \quad (22)$$

avec

$$b_i = e^{-jk^-x_1}$$

$$b_r = e^{+j(k^+x_1+\varphi)} \quad (23)$$

$$B_n = A_n e^{-j\varphi_n}$$

On minimise l'erreur E^2 définie par :

$$E^2 = \sum_{n=1}^3 \left[b_i e^{-j\Delta_n^-} + b_r e^{+j\Delta_n^+} - B_n \right]^2 \quad (24)$$

en écrivant $\frac{\partial E^2}{\partial b_i} = \frac{\partial E^2}{\partial b_r} = 0$, c'est-à-dire le système :

$$\sum_{n=1}^3 e^{-j\Delta_n^-} \left\{ b_i e^{-j\Delta_n^-} + b_r e^{+j\Delta_n^+} - B_n \right\} = 0 \quad (25)$$

$$\sum_{n=1}^3 e^{+j\Delta_n^+} \left\{ b_i e^{-j\Delta_n^-} + b_r e^{+j\Delta_n^+} - B_n \right\} = 0 \quad (26)$$

On en déduit les modules des amplitudes des ondes incidente et réfléchie a_i et a_r :

$$|a_i| = |b_i| = \left| \frac{S_2 S_3 - S_{12} S_4}{S_5} \right| \quad (27)$$

$$|a_r| = |b_r| = \left| \frac{S_1 S_4 - S_{12} S_3}{S_5} \right| \quad (28)$$

avec

$$\begin{aligned}
s_1 &= \sum_{n=1}^3 e^{-2j\Delta_n^-}, & s_2 &= \sum_{n=1}^3 e^{+2j\Delta_n^+} \\
s_{12} &= \sum_{n=1}^3 e^{+j(\Delta_n^+ - \Delta_n^-)} \\
s_3 &= \sum_{n=1}^3 A_n e^{-j(\Delta_n^- + \delta_n)}, & s_4 &= \sum_{n=1}^3 A_n e^{+j(\Delta_n^+ - \delta_n)} \\
s_5 &= s_1 s_2 - s_{12}^2
\end{aligned} \tag{29}$$

Le coefficient de réflexion est alors donné par :

$$R = \frac{|b_r|}{|b_i|} \tag{30}$$

3. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

3.1 Coefficient de réflexion des ondes

On a représenté, sur la figure 2, le coefficient de réflexion de l'onde induit par la plaque plane. Sa valeur théorique en l'absence de courant est présentée en trait plein. Les valeurs calculées à partir des données expérimentales de la déformée de la surface libre aux niveaux des sondes S_1 à S_3 sont représentées respectivement par des cercles (o) pour $U = 0\text{m/s}$, des croix (+) pour $U = 0.05\text{m/s}$, des étoiles (*) pour $U = 0.1\text{m/s}$ et carrés (\square) pour $U = 0.2\text{m/s}$.

Le calcul théorique en l'absence de courant ($U = 0$) est basé sur une formulation intégrale des conditions de continuité de vitesse et de pression aux abscisses $x = 0$ et $x = L$, il suppose un écoulement potentiel, et des ondes de faible amplitude. Il fait apparaître des maxima et minima de réflexion, qui traduisent un phénomène d'interférence de l'onde au dessus de la plaque, phénomène déjà largement étudié pour la réflexion des ondes de gravité en milieu côtier par des modulations du fond ou des structures immergées (voir par exemple [8] ; [9]; [10], [1] et les articles qui y sont cités). Les fréquences et amplitudes théoriques nominales sont présentées sur la table 1.

Pour les basses fréquences, les amplitudes restent faibles pour éviter des efforts de pressions trop importants sur les structures et parois à l'origine de rupture de la plaque immergée et de la paroi latérale. Les résultats restent assez homogènes aux faibles périodes (inférieures à $T = 2\text{s}$), bien que bruités, ils présentent, par ailleurs, des disparités assez importantes au delà, dans une gamme de période où la réflexion prévue par la théorie (en l'absence de courant) devient importante. Ces bruits et dispersions des résultats peuvent s'expliquer pour partie par les conditions d'expérience et pour partie par la méthode de calcul du coefficient de réflexion.

D'un point de vue expérimental on a pu observer, lorsque la réflexion est assez importante, une mauvaise tenue de la paroi latérale installée qui avait tendance à osciller assez fortement (amplitude de l'ordre de 5cm) dans la direction transversale. Ceci s'explique d'un point de vue des efforts par une différence de pression importante de part et d'autre de ces plaques latérales, due à la présence d'une

onde partiellement stationnaire du côté de l'expérience à cause de la plaque partiellement réfléchissante, et d'une onde progressive de l'autre côté. On observe cependant de façon qualitative que la réflexion mesurée suit la tendance de la courbe théorique.

Période	Amplitude(s) nominale(s) $H = 2a_i$ (en m)
1.254	0.2
1.290	0.0375 0.05 0.2
1.333	0.2
1.379	0.2
1.429	0.2
1.538	0.2
1.587	0.2
1.626	0.2
1.667	0.2
1.739	0.2
1.789	0.05 0.2
1.905	0.2
2.000	0.1 0.2
2.105	0.1
2.220	0.1
2.353	0.05
2.5000	0.05
2.591	0.025 0.0375 0.05
2.857	0.05
3.077	0.05
3.367	0.05

Table 1: Conditions expérimentales pour $U = 0, 0.05, 0.1$ et 0.2 m.s^{-1}

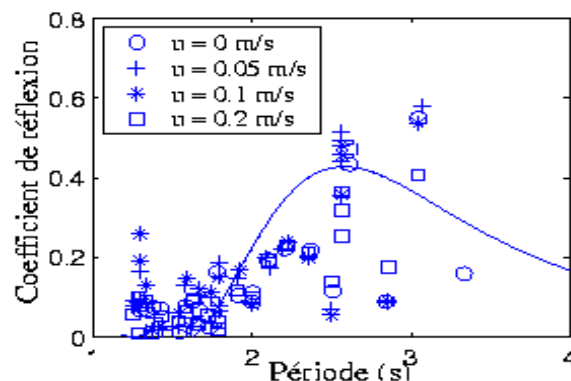


Figure 2. Coefficient de réflexion en fonction de la période

D'un point de vue du traitement des données, un calcul à trois sondes a été choisi afin de minimiser les erreurs, qui proviennent d'une part des incertitudes expérimentales (courant supposé homogène et de valeur donnée, position des capteurs) et des approximations théoriques du signal de houle (notamment

hypothèse linéaire), et d'autre part de la méthode elle-même. Les erreurs sur le coefficient de réflexion seront d'autant plus importantes qu'on sera proche des conditions pour lesquelles la méthode n'est pas valable, c'est à dire lorsque le coefficient s_5 , défini dans (29) devient nul. L'expression s_5 peut être réécrite sous la forme :

$$-\frac{s_5}{4} = \left[\frac{e^{j\Delta_3^+} - e^{-j\Delta_3^-}}{2j} \right]^2 + \left[\frac{e^{j\mu\Delta_3^+} - e^{-j\mu\Delta_3^-}}{2j} \right]^2 + \left[\frac{e^{j(\mu\Delta_3^+ - \Delta_3^-)} - e^{-j(\mu\Delta_3^- - \Delta_3^+)}}{2j} \right]^2 \quad (31)$$

avec $\mu = \Delta_2^+ / \Delta_3^+ = \Delta_2^- / \Delta_3^-$. Expression qui s'annule si $e^{-j(\Delta_3^- - \Delta_3^+)} = e^{-j\mu(\Delta_3^- - \Delta_3^+)} = 1$ c'est-à-dire si $(\Delta_3^- + \Delta_3^+) = 6\pi, 12\pi, \text{ etc...}$ Dans le cadre de notre étude expérimentale, $\mu = 1/3$, et les valeurs de la période T correspondantes dans la gamme d'étude sont données dans la table 2.

	U = 0m/s	U = 0.05m/s	U = 0.1m/s	U = 0.2m/s
T(s)	1.2654	1.2674	1.2735	1.3085
$(\Delta_3^- + \Delta_3^+)$	6π	6π	6π	6π

Table 2: Période (et déphasage correspondant) pour laquelle $s_5=0$

En l'absence de courant, l'expression (31) se réduit à :

$$\sin^2(\Delta_3) + \sin^2(\mu\Delta_3) + \sin^2(\Delta_3 - \mu\Delta_3) = 0 \quad (32)$$

expression trouvée par Isaacson [3] et qui s'annule pour $\Delta_3 = 3\pi, 6\pi, \text{ etc...}$

3.2 Influence du courant sur la réflexion, en amplitude et en énergie

La courbe théorique montre la présence de maxima et de minima (réflexion nulle), que l'on peut expliquer par un phénomène d'interférence au dessus de la plaque. En effet, au niveau des discontinuités du milieu (bord d'attaque, $x = 0$, et bord de fuite, $x = L$), l'onde est partiellement réfléchi, ce qui induit des aller-retour de l'onde au dessus de la plaque. L'onde incidente aura tendance à être fortement réfléchi lorsqu'en $x = 0$, l'interférence sera constructive c'est-à-dire que les ondes incidentes en amont de la plaque et réfléchies par la plaque (réfléchi par le bord de fuite) seront en phase; elle sera complètement transmise dans le cas contraire. Nous avons représenté, sur la figure 3, la phase relative de l'onde réfléchi après un aller-retour au dessus de la plaque dans l'approximation d'une onde plane, c'est-à-dire en négligeant les déphasages supplémentaires induits par les modes locaux. On constate qu'en l'absence de courant, la réflexion est maximale pour $T \approx 1.4 \text{ s}$ et $T \approx 2.3 \text{ s}$, et minimale pour $T \approx 1.3 \text{ s}$ et $T \approx 1.7 \text{ s}$. Ces résultats sont en bon accord avec les extrema observés sur la figure. 2 pour le calcul théorique.

Les données expérimentales sont bruitées à cause des incertitudes énoncées dans le paragraphe précédent. Cependant, on observe sur la figure. 2 que le coefficient de réflexion mesuré en l'absence de courant est globalement en bon accord avec le calcul théorique, et que les résultats expérimentaux

pour des courants U non nuls restent similaires aux résultats sans courant, en intensité et d'un point de vue de la position des extréma.

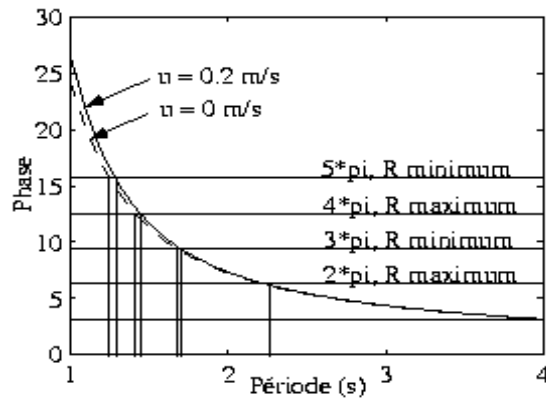


Figure 3. Phase de l'onde après un aller-retour au dessus de la plaque

En ce qui concerne les positions des extréma, elles sont en bon accord avec les calculs de phase présentés figure. 3, qui montraient une faible influence du courant sur l'évolution de la phase après un aller-retour de l'onde au dessus de la plaque. Cette faible différence de phase, malgré l'écart important entre les nombre d'onde k^- et k^+ s'explique par une compensation des effets Doppler dans les directions incidente et rétrograde. Ce résultat montre qu'une structure conçue pour réfléchir un maximum d'énergie pour une gamme de fréquence donnée, restera efficace en présence d'un courant, puisque les périodes de réflexion maximales (ou minimales) sont très peu dépendantes de l'intensité du courant.

En ce qui concerne l'amplitude, on observe qu'elle n'est pas significativement affectée par le courant (pas de tendance à l'augmentation ou à la diminution en comparaison des incertitudes). Cependant, l'intérêt de la structure est sa capacité à réfléchir une partie de l'énergie de la houle, qui n'est plus simplement donnée par le rapport du carré des amplitudes réfléchi et incidente, mais par une expression faisant apparaître un paramètre d'effet Doppler. La conservation du flux d'énergie moyenne E_t de la houle à travers le plan yOz , normal à sa direction de propagation, est donné dans le repère en translation à la vitesse U par :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{E(U + C_g^-)}{\sigma^-} \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{E(-U + C_g^+)}{\sigma^+} \right] = 0 \quad (33)$$

Le taux τ d'énergie réfléchi est donné par :

$$\tau = \frac{a_r^2 \sigma^- (C_g^+ - U)}{a_i^2 \sigma^+ (C_g^- + U)} \quad (33)$$

qu'on peut écrire sous la forme $\tau = \frac{a_r^2}{a_i^2} K_d$, où K_d est un coefficient de Doppler. Ce coefficient est

présenté en fonction de la période pour les différentes valeurs expérimentales du courant sur la figure 4. Il fait apparaître une énergie réfléchie d'autant plus faible que le courant est important, pour un rapport donné entre les amplitudes réfléchie et incidente.

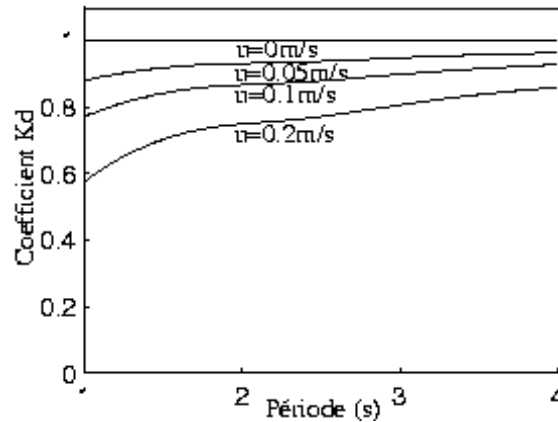


Figure 4. Coefficient K_d en fonction de la période

4. DISCUSSION ET CONCLUSION

Les expériences présentées et analysées dans ce travail ont été menées dans un bassin d'essai qui présentait l'avantage de générer des houles superposées à des courants. Ce travail a permis de montrer qu'en présence d'un courant superposé à une houle incidente, l'énergie réfléchie par une structure immergée de type plaque plane est inférieure à celle mesurée en l'absence de courant, mais que sa plage d'efficacité reste inchangée. L'étude du processus d'interférence au dessus de la plaque, basé sur la théorie linéaire des ondes, supposées planes, nous donne une information quantitative des maxima et minima de réflexion, comme déjà observé par Patarapanich [6] en l'absence de courant. Le poids des modes locaux sur l'évolution de la phase de l'onde au voisinage des discontinuités reste donc très inférieur à celui observé pour des obstacles rectangulaires immergés [10], où l'étude, basée sur l'approximation onde plane, ne permettaient qu'une estimation qualitative de la position des extréma. En outre, les résultats pour différentes amplitudes à fréquence donnée (voir table 1) montrent une faible influence de l'amplitude sur le coefficient de réflexion, ce qui, d'une part, conforte les études théoriques basées sur des houles linéaires (ou composées de la superposition linéaire de houles linéaires) et d'autre part nous permet de conforter l'hypothèse linéaire sur laquelle est basée la méthode d'analyse des signaux de houle mesurés au niveau des sondes.

En ce qui concerne l'expérience, nous avons observé le problème de mouvement transversal de la fausse paroi latérale du bassin, qui a considérablement perturbé l'onde réfléchie par la plaque lorsque cette réflexion était importante. Cependant, les résultats sont restés suffisamment consistants pour une analyse quantitative de la réflexion de la houle par la plaque immergée. Quant à la méthode de mesure, elle a montré qu'elle était beaucoup plus précise que la méthode à deux sondes (non présentée ici, voir par exemple[2]), pour laquelle de fortes disparités entre résultats (sondes S_1 à S_3 utilisées 2 à 2)

pouvaient être observées, notamment lorsqu'au moins une des trois distances $x_j - x_i$ était proche des conditions de divergence de la méthode $((k^- + k^+)(x_j - x_i) = 2n\pi$, n entier).

Enfin l'analyse présentée concernait des houles monochromatiques. Une estimation des effets non-linéaires à l'origine de transferts énergétiques entre différentes composantes du spectre est envisagée pour des houles dichromatiques et aléatoires. Le but sera alors d'essayer de distinguer les transferts dus aux interactions onde-onde et ceux provenant des interactions onde-plaque, avec génération d'harmoniques.

Remerciements. Les auteurs remercient le Conseil Général du Var pour son aide financière qui a permis la réalisation des expériences au BGO First.

REFERENCES

1. Brossard J. and Chagdali, M., Experimental investigation of the harmonic generation by waves over a submerged plate, Coastal Engineering., 42, pp. 277-290, (2001).
2. Goda Y. and Suzuki Y., Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments, Proc. 15th Coastal Engrg. Conf., 1, pp. 828-845, (1976).
3. Isaacson M., Measurement of regular wave reflection, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering., 117 (6), pp. 553-569, (1991).
4. Mansard E. P. D. and Funke E. R., The measurement of incident and reflected spectra using a least square method. Proc. 17th Coastal Engrg. Conf., 1, pp. 154-172, (1980).
5. Molin B., Betous P., Atténuation de la houle par une dalle immergée et perforée, 4^{ème} Journées de l'Hydrodynamique, 1-3 mars, Nantes, France, (1993).
6. Patarapanich M., Maximum and zero reflection from submerged plate, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering., 110 (2), pp. 171-181, (1984).
7. Phillips O. M., The Dynamics of the Upper Ocean Cambridge University Press, 2nd edition, (1977).
8. Rey V., Propagation and local behaviour of normally incident gravity waves over varying topography, European Journal of Mechanics B/Fluids, 11, pp. 213-232, (1995).
9. Rey V., A note on the scattering of obliquely incident surface gravity waves by cylindrical obstacles in waters of finite depth, European Journal of Mechanics B/Fluids, 14 (1), pp. 207-216, (1995).
10. Rey V., Belzons, M. and Guazzelli, E. Propagation of surface gravity waves over a rectangular submerged bar, J. Fluid Mech., 235, pp. 453-479, (1992).
11. Rey V., Guazzelli, E. and Mei, C. C. Resonant reflection of surface gravity waves by one-dimensional doubly sinusoidal beds, Physics of Fluids, 8 (6), pp. 1525-1530, (1996).
12. Sturova V., Propagation of plane surface waves over an underwater obstacle and a submerged plate, Journal of applied mechanics and technical physics, 32 (3), pp. 453-479, (1991).