



Atténuation de la houle par une plaque horizontale immergée: Étude théorique et expérimentale.

M. Chagdali*, J. Brossard**, C. Chahine ***

* *Professeur, Faculté des Sciences Ben M'Sik, L.C. S. M Casablanca*

** *Professeur assistant, Faculté des Sciences Ben M'Sik Casablanca.*

*** *Maître de conférence, Université du Havre, France*

Résumé:

On présente une étude théorique et expérimentale du problème de l'interaction de la houle et de la plaque. La motivation de ce travail consiste en un compte rendu des expériences réalisées dans un canal à houle de l'université du Havre, sur le report d'une partie de l'énergie transmise à des fréquences harmoniques. En effet la houle incidente sur une plaque immergée peut être vue comme une somme de modes caractérisés chacun par sa fréquence, son vecteur d'onde, son amplitude et sa phase. Il est important d'associer à chaque mode un coefficient de réflexion propre qui sera particulièrement intéressant pour analyser le comportement d'ouvrages côtiers, en particulier pour faire le bilan énergétique du fonctionnement d'un tel ouvrage. Une confrontation d'une méthode analytique avec les résultats expérimentaux est aussi présentée. La méthode utilisée est basée sur la théorie linéaire de la houle. Le potentiel est décomposé, sur l'ensemble des fonction propres du domaine, en un potentiel de la houle progressive et un potentiel des modes évanescents. La technique de raccordement des sous domaines d'étude est utilisé pour la résolution du problème de l'interaction houle - plaque. Les résultats qu'on présente confirment l'apport des modes évanescents, pour le calcul des coefficients de réflexion et de transmission, par rapport à la théorie de la houle progressive.

Abstract:

We present a theoretical study and experimental of the problem of the interaction of waters waves and the plate. The motivation of this work consists of a review of experiences realised in a channel of the university of the Havre (France), on the transfer of a part of energy transmit to harmonic frequencies. Indeed the incident water waves on an immersed plate can be seen as a sum of characterised modes each by its frequency, its vector of wave, its amplitude and its phase. It is important to associate with each mode a clean reflection coefficient that will be particularly interesting to analyse the coastal work behaviour, especially to make the energy statement of the functioning of a such work. A confrontation of an analytic method with experimental results is also presented. The used method is based on the linear theory of the water waves. The potential is decomposed, on the totality of clean function of the area, in a potential of the progressive water waves and a potential of modes evanescence. The technique of connection of under areas of study is used for the resolution of the problem of the interaction between water waves and plate. Results that one presents confirm the contribution of modes evanescence, for the calculation of reflection and

transmission coefficients, as compared to the theory of the progressive water waves.

Introduction:

Dans le cas particulier de ce problème, les études théoriques, numériques et expérimentales sont nombreuses et l'efficacité des plaques immergées comme brise - houle est clairement prouvée. Les travaux de Patarapanich 1984 [1] pour l'étude de la plaque comme brise - houle, ont donné la motivation de multiples travaux tant théoriques qu'expérimentales sur ce problème. J.P. Guevel [2] a introduit le phénomène du mur oscillant. D'autres travaux ont prouvés, clairement, l'efficacité de la plaque immergée comme brise-houle. Suite a cela des travaux postérieures ont suscité d'autres interrogations relatives respectivement à l'impact de cet ouvrage sur le site où il est implanté. Relativement à ce problème, on cite les travaux de J. Brossard [3] qui s'est intéressé à l'étude de l'écoulement tourbillonnaire généré en amont et en aval de la plaque. Ces résultats sont approfondies dans les travaux de Boulier [4] par une étude expérimentale et numérique. L'idée des travaux expérimentaux qu'on propose dans ce travail concerne le report d'une partie de l'énergie transmise à des fréquences harmoniques supérieures. On présente une méthode analytique dans le cadre de la théorie linéaire (section I) et ensuite on propose une étude expérimentale basée sur la mesure de la houle par la technique de deux sondes mobiles (section II).

1. Étude théorique de l'interaction houle - plaque:

On étudie ici l'écoulement à surface libre, bidimensionnel et irrotationnel d'un fluide supposé non visqueux, incompressible s'écoulant sur un fond horizontal. L'écoulement étant irrotationnel, la vitesse dérive d'un potentiel noté $\varphi(x,y,t)$. Ce potentiel est harmonique vérifiant le système linéaire d'équation classique de la houle . Sa résolution conduit à la forme la plus générale

$$\text{suivante: } \varphi(x,y,t) = \varphi_0(x,y,t) + \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_n(x,y,t)$$

avec $\varphi_0(x,y,t)$ potentiel de la houle progressive et $\varphi_n(x,y,t)$ potentiel du nième mode évanescent [5]. Le potentiel de vitesse étant une fonction bornée, les modes évanescents ne peuvent exister que dans des domaines bornés suivant x . En particulier dans un domaine infini, la solution se réduit à une houle progressive, alors que dans un canal par exemple les modes évanescents $e^{\lambda nx}$ et $e^{-\lambda nx}$ sont conservés car le domaine est borné dans les x positifs et négatifs

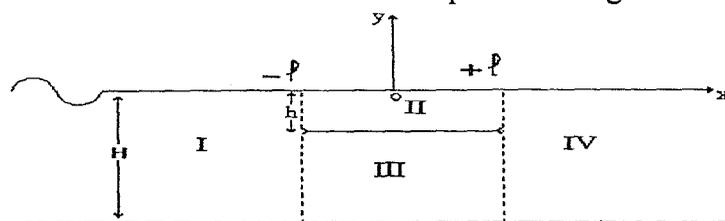


figure 1: Domaine subdivisé dans le cas d'une plaque immergée

est régulière. La structure est une plaque horizontale, de longueur $L=0,25$ m et de largeur $l = 0,30$ m et d'épaisseur faible, immergé dans l'eau d'une hauteur h par rapport à la surface libre. La profondeur d'eau est notée H . La méthode de mesure utilisée est basée sur la technique de mesure par deux sondes mobiles proposée par Brossard et Hemon [7], [9]. Le principe de cette méthode, consiste à déplacer le long du canal à la même vitesse V , mais de sens opposé, les deux sondes de mesure. Cela permet de séparer les modes incidents et les modes réfléchis, par effet Doppler. On ne rappelle par la suite que l'analyse associée à cette technique.

2.1 Analyse de la houle:

Dans un canal les conditions aux limites (batteur, fond, surface libre) sont telles qu'il y a toujours des harmoniques dans la houle générée. L'évolution spatio-temporelle de la surface libre, dans le cas d'une réflexion dans un canal à houle, peut s'écrire d'une manière complète, en séparant les modes incidents et réfléchis, sous la forme [8]:

$$\eta(x, t) = \left\{ \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{\infty} a_{j,l}^{inc} \exp i(\omega_{j,l} t - k_{j,l} x + \varphi_{j,l}^{inc}) \right\} + \left\{ \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{\infty} a_{j,l}^{ref} \exp i(\omega_{j,l} t + k_{j,l} x + \varphi_{j,l}^{ref}) \right\}$$

Dans cette expression, la déformation de la surface libre $\eta(x,t)$ est considérée comme la superposition d'un ensemble de modes incidents, de pulsation $\omega_{j,l}^{inc}$ de nombre d'onde $K_{j,l}^{inc} > 0$, d'amplitude $a_{j,l}^{inc}$ et de phase $\varphi_{j,l}^{inc}$ et d'un ensemble de modes réfléchis de pulsation $\omega_{j,l}^{ref}$, de nombre d'onde $k_{j,l}^{ref} < 0$, d'amplitude $a_{j,l}^{ref}$ et de phase $\varphi_{j,l}^{ref}$. Il convient de noter, qu'on a plusieurs modes de nombre d'onde différents définies comme étant des modes libres et des modes liés[8].

Modes libres: les harmoniques libres sont ceux produits, en général, par le batteur. Ils correspondent à sa cinématique imparfaite et à son fonctionnement non linéaire. De la même façon, ces harmoniques peuvent être produits par un comportement non linéaire d'une structure soumise à la houle ou par une plage d'amortissement. Ces harmoniques créés en frontière du domaine fluide ont leur pulsation imposée comme étant multiple de la pulsation du fondamental. Cet ensemble de modes libres, indiqué j dans la somme précédente avec $l=1$, est définie tels que $\omega_{j,1} = j \omega_{1,1}$. Leur propagation dans le milieu suit la même équation de dispersion que le mode fondamental: $f(\omega_{j,1}, k_{j,1}) = 0 \quad \forall j=1, 2, \dots$

Ces modes sont dits "libres", car ils se propagent indépendamment du fondamental. En particulier, la célérité du $j^{\text{ème}}$ mode libre est :

$$C_j = \frac{\omega_{j,1}}{k_{j,1}} = \frac{j\omega_{1,1}}{k_{j,1}} \quad \text{où } k_{j,1} \text{ est le nombre d'onde du } j^{\text{ème}} \text{ mode libre.}$$

Modes liés: d'autre part, dans certaines conditions (en particulier faible valeur du rapport profondeur / longueur d'onde ou forte cambrure) la forme de la surface libre s'écarte sensiblement d'une sinusoïde. Il s'agit des harmoniques de Stokes. Restant périodiques, ces perturbations correspondent dans une transformation de Fourier spatiale, à des harmoniques du fondamental. Cette forme de surface libre restant invariante au cours de la propagation (déplacement en bloc), ces

Cette géométrie nous conduit à définir quatre sous domaines indiqués sur la figure 1. Dans chacun des sous domaine, le potentiel est harmonique, vérifiant des conditions limites différentes pour chaque domaine. Le potentiel ϕ_i de la théorie linéarisé au premier ordre est supposé périodique de pulsation w . On cherche donc ϕ_i sous la forme : $\phi_i = \text{Re}\{\phi_i e^{iwt}\}$. Dans chaque domaine, les solutions se décomposent suivant des bases de fonctions propres en y à variables séparées. Le potentiel de l'écoulement, développé sur les bases respectives de chacun des sous domaines, s'écrit :

- Dans la région I $\phi_I(x,y) = (e^{ikx} + R e^{-ikx}) F_0(y) + \sum_{n=1}^{+\infty} R_n e^{Q_n x} F_n(y)$
- Dans la région II $\phi_{II}(x,y) = (A_0 e^{ikx} + B_0 e^{-ikx}) f_0(y) + \sum_{n=1}^{+\infty} (A_n e^{q_n x} + B_n e^{-q_n x}) f_n(y)$
- Dans la région III $\phi_{III}(x,y) = (E_0 + F_0 x) g_0(y) + \sum_{n=1}^{+\infty} (E_n e^{\tau_n x} + F_n e^{-\tau_n x}) g_n(y)$
- Dans la région IV $\phi_{IV}(x,y) = T e^{ikx} F_0(y) + \sum_{n=1}^{+\infty} T_n e^{-Q_n x} F_n(y)$

Où les $K, Q_n, k, q_n > 0$ vérifient les relations de dispersions [5].

Les potentiels tels qu'ils sont définis ci dessus satisfont l'équation de Laplace et toutes les conditions aux limites [5]. Il reste à raccorder les solutions en $x = -1$ et en $x = 1$, ce qui signifie l'égalité des potentiels et de leurs dérivées suivant x . En tenant compte, des conditions d'orthogonalité des fonctions propres $F_n(y)$, $f_n(y)$ et $g_n(y)$, en suivant la méthode adoptée par JANKING [6], respectivement sur les intervalles de définition $[-H,0]$, $[-h,0]$ et $[-H,-h]$, on obtient un système algébrique de $6(n+1)$ équations à $6(n+1)$ inconnues, qu'on peut résoudre numériquement d'une manière classique. Sur la figure 2 on présente les résultats du modèle théorique pour le calcul des coefficients de réflexion, pour $n=0$ (ondes progressives) et pour $n=2$ (ondes progressives et modes évanescents).

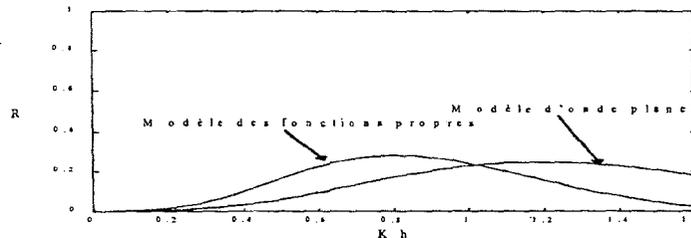


figure2: Coefficient de réflexion pour une plaque immergée: $h/H = 0.5$, $l/h = 1.333$ avec: h est la profondeur d'immersion, H est la profondeur d'eau, l est la demi longueur de la plaque et k est le vecteur d'onde. On peut constater l'apport des modes évanescents dans la correction du coefficient de réflexion.

2. Étude expérimentale:

L'expérience a été menée dans un canal à houle de longueur 9,5m et de largeur 0,3m. Il est équipé d'un générateur à houle de type volet. La houle générée

harmoniques se propagent donc à la même célérité que le fondamental auquel ils sont associés, d'où leur appellation de modes "liés".

On aura alors pour chacun de ces modes libres ($l = 1$), un ensemble de modes liés $k_{j,l} = lk_{j,1}$.

A partir des équations précédentes, la pulsation de chaque mode (j,l): $\omega_{j,l} = j\omega_{1,1}$.

Famille de coefficients de réflexion: pour le mode (j,l), les amplitudes $a_{j,l}^{inc}$ et $a_{j,l}^{ref}$

permettent d'associer à ce mode un coefficient de réflexion : $r_{j,l} = \frac{a_{j,l}^{ref}}{a_{j,l}^{inc}}$

L'ensemble des coefficients de réflexion $r_{j,l}$ se substitue au coefficient de réflexion du mode fondamental. Remarquons que cet ensemble permet d'appréhender les effets linéaires de réflexion. En particulier ce jeu de coefficients permet de quantifier le transfert d'énergie du fondamental aux harmoniques.

2.2. Variables expérimentales:

Nous désirons exprimer les coefficients de réflexion et de transmission en fonction du produit sans dimension Kh où K est le nombre d'onde et h la profondeur d'immersion de la plaque. Nous exprimons ainsi les caractéristiques de réflexion et transmission en fonction du paramètre de dispersion associé à l'immersion de la plaque. Matériellement nous faisons varier la fréquence f de la rotation alternée du batteur. La longueur d'onde L et donc le nombre d'onde K sont déterminés, loin de la plaque, par la hauteur H . Il est quasiment impossible de prédire l'amplitude de la houle se propagent dans le canal connaissant l'amplitude de mouvement du batteur à cause des multi - réflexions entre la plaque et le batteur. Seule une méthode itérative, nécessitant beaucoup de mesures de surface libre, permettrait de fixer, pour chaque fréquence, une amplitude voulue. Nous avons choisi de fixer l'amplitude de mouvement du batteur pour des plages de variation de la fréquence avec comme critère l'absence d'instabilités de surface.

La profondeur d'eau, $H=0,188$ m, et la plage de variation de la fréquence de 1,006(Hz) à 2,269 (Hz) conduisent à une variation de longueur d'onde de 1,2 m à 0,3 m. La plage d'amortissement d'une longueur limitée à 2m doit avoir une efficacité décroissante lorsque la longueur d'onde croît. La méthode de mesure avec les deux sondes permet de déterminer le coefficient de réflexion de la plage d'amortissement. Comme attendu, l'efficacité de la plage est moins grande pour les grandes longueurs d'onde mais elle reste admissible puisque le coefficient de réflexion reste inférieur à 5%.

2.3. Réflexion et transmission du mode fondamental:

La méthode expérimentale utilisée permet de déterminer simultanément les amplitudes des modes fondamentaux incidents et réfléchis par la plaque ainsi que l'amplitude du mode fondamental transmis en aval de la plaque. Nous pouvons définir les coefficients de réflexion et de transmission associés au mode fondamental par les rapports: $R=A_{0\ ref}/A_{0\ inc}$. Et $T=A_{0\ tr}/A_{0\ inc}$. Où $A_{0\ ref}$ et $A_{0\ tr}$ sont les amplitudes des modes fondamentaux réfléchis et transmis respectivement. La figure 3 présente l'évolution de ces deux coefficients en fonction du produit Kh .

Pour cette immersion de la plaque le coefficient de transmission varie en fait assez peu alors que la variation du coefficient de réflexion est sensible. Donc il semble que les composantes en réflexion et en transmission ne sont pas corrélées. L'intensité de transmission est liée sans doute à l'immersion et à la longueur de la plaque mais reste constante lorsque la longueur d'onde varie alors que la réflexion est surtout déterminée (dans sa variation) par le rapport entre la longueur de la plaque et la longueur d'onde.

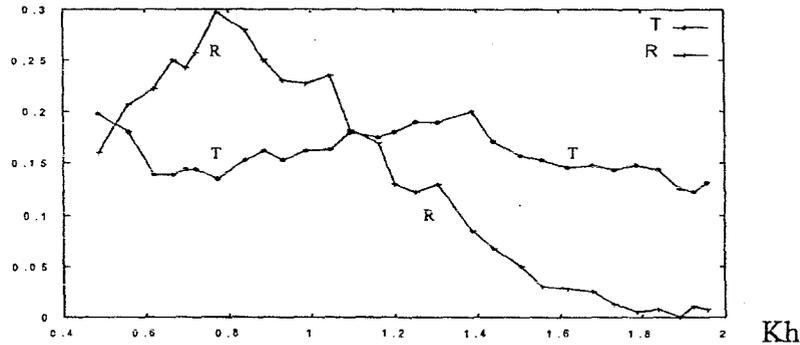


Figure 3 - Coefficients de réflexion et de transmission en fonction de Kh

2.4. Analyse des harmoniques :

2.4.1 Modes Liés: Les modes liés ont des amplitudes d'autant plus grandes que le rapport longueur d'onde sur hauteur d'eau est grand et que l'amplitude du mode fondamental est grand. Rappelons que ces modes sont des harmoniques spatiaux et temporels du mode fondamental auquel ils sont associés et qu'ils ont la même célérité que celui-ci. Ces harmoniques ne traduisent pas le fonctionnement non linéaire de la plaque immergée. La figure 4 montre que les amplitudes des premiers harmoniques incidents et transmis sont fortement corrélés et d'amplitudes très voisines. On remarque d'autre part que ces modes sont très peu réfléchis, leurs longueurs d'onde étant petite, ces modes ont une propagation quasiment en milieu à grande profondeur. Ils ne voient pas la plaque.

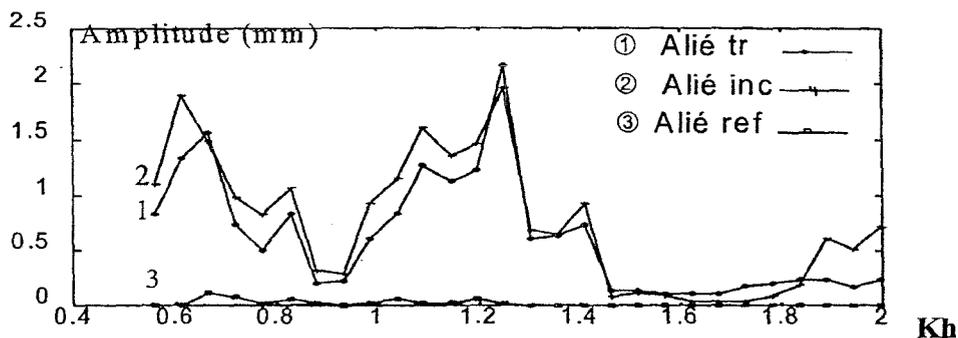


Figure 4- Propagation du premier harmonique lié

2.4.2 Modes libres: Comme pour les modes liés, les modes libres ont d'assez faibles longueurs d'onde donc ils sont, dans leur propagation peu sensibles aux variations de hauteur d'eau. Par conséquent, les modes libres incidents, qui sont des harmoniques temporels du mode fondamental, doivent être transmis en aval de la plaque sans autre affaiblissement que celui dû à la viscosité. De la même la

réflexion de ces modes doit être faible. Notons que ces modes sont produits essentiellement par la cinématique du batteur, imparfaitement sinusoïdale, par le couplage entre le batteur et le milieu fluide. La figure 5 montre les évolutions des amplitudes des premiers harmoniques libres incidents, réfléchis et transmis.

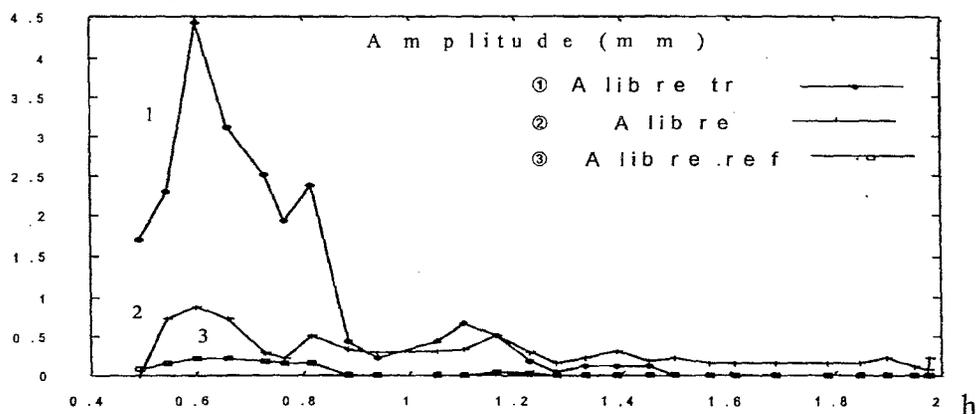


Figure 5 - Propagation du premier harmonique libre

Cette figure montre que l'amplitude du premier harmonique libre est faible devant celle du mode fondamental incident (en moyenne de l'ordre de 3%). L'amplitude du mode libre se propageant de la plaque vers le batteur (noté $A_{\text{libre ref}}$) reste faible bien que s'amplifiant un peu entre les valeurs 0,5 et 0,8 de Kh , valeurs correspondant aux plus grandes longueur d'onde de l'harmonique (entre 0,38 m et 0,2 m). Le fait le plus remarquable est les grandes valeurs d'amplitude du mode dit transmis. Entre les valeurs 0,5 et 0,9 de Kh l'amplitude du mode se propageant de la plaque vers la plage (noté $A_{\text{libre tr}}$) est nettement plus importante que celle du mode incident provenant du batteur. Cette caractéristique est la signature d'un fonctionnement non linéaire de l'ouvrage puisqu'il y a transfert d'énergie du mode fondamental vers des harmoniques. En négligeant l'énergie transmise, au sens propre, de l'amont vers l'aval par le premier harmonique libre on peut exprimer un taux de production d'harmonique par le rapport des amplitudes $A_{\text{libre tr}} / A_0$ inc. (figure 6).

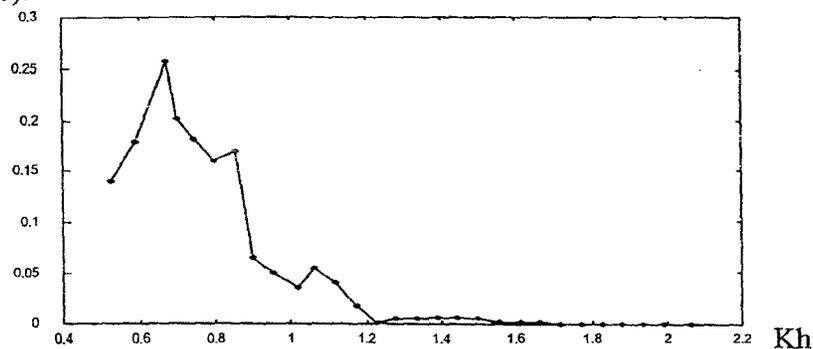


Figure 6 - Production d'harmonique par la plaque

Ainsi pour les valeurs maximales, l'amplitude du premier harmonique produit par la plaque peut atteindre 25% de l'amplitude du mode fondamental d'où un transfert d'énergie non négligeable du fondamental vers le premier harmonique. l'une des conséquences de cette observation est que le coefficient de transmission

défini par le simple rapport de l'amplitude du mode fondamental transmit sur l'amplitude du mode fondamental incident ne permet pas de quantifier complètement la capacité de transmission de l'ouvrage. Nous pouvons calculer le coefficient de transmission comme le rapport entre l'énergie totale transmise sur l'énergie totale incidente; de même pour le coefficient de réflexion. De là nous pouvons estimer la dissipation.

La figure 7 présente, respectivement les coefficients de réflexion de transmission et de dissipation:

$$r = (L_0 A_{0\text{ref}}^2 + \frac{L_0}{2} A_{\text{lié ref}}^2 + L_{\text{libre}} A_{\text{libre ref}}^2) / (L_0 A_{0\text{inc}}^2 + \frac{L_0}{2} A_{\text{lié inc}}^2 + L_{\text{libre}} A_{\text{libre inc}}^2)$$

$$t = (L_0 A_{0\text{tr}}^2 + \frac{L_0}{2} A_{\text{lié tr}}^2 + L_{\text{libre}} A_{\text{libre tr}}^2) / (L_0 A_{0\text{inc}}^2 + \frac{L_0}{2} A_{\text{lié inc}}^2 + L_{\text{libre}} A_{\text{libre inc}}^2)$$

$$d = [1 - r^2 - t^2]^{\frac{1}{2}}$$

où L_0 , $\frac{L_0}{2}$, L_{libre} sont des longueurs d'onde du fondamental et des harmoniques lié et libre respectivement.

Ces évolutions sont néanmoins très voisines de celles vues sur la figure 3; en effet l'énergie des harmoniques restent ici assez faible devant l'énergie du mode fondamental. Dans le cas d'une immersion moins importante la différence doit être plus sensible.

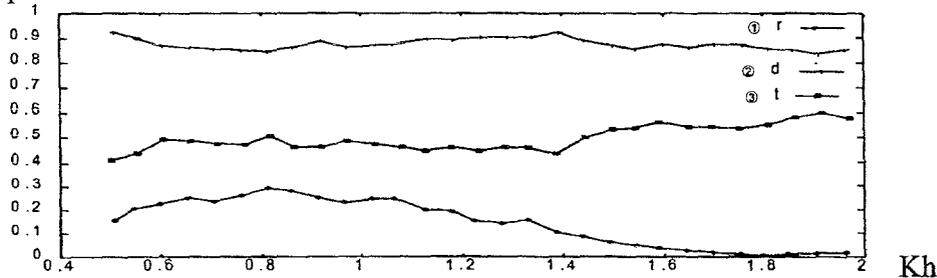


Figure 7-Coefficients de réflexion, de transmission et de dissipation.

2.5. Mécanisme de production d'harmonique:

Le mécanisme de production d'harmonique peut s'expliquer en grande partie par la génération du tourbillon aux deux bords (amont et aval, relativement au sens de propagation de la houle) de la plaque. L'analyse de ce phénomène, pour une plaque immergée, a été initié par J.Brossard [3] puis approfondi par B. Boulier [4] et [5]. Des visualisations par bulles d'hydrogène réalisées par B. Boulier lors de ses travaux de thèses [p 107 à 109] montrent très clairement la formation, sur une période de la houle, de deux tourbillons contrarotatifs en amont et de deux tourbillons contrarotatifs en aval. La cinématique des allées tourbillonnaires ainsi formées vérifie globalement une symétrie ponctuelle par rapport au centre de la plaque.

Les tourbillons formés au bord amont plongent vers le fond et les tourbillons formés au bord aval remontent à la surface libre. Les premiers perturbent assez peu la surface libre mais peuvent atteindre le fond et provoquer un affouillement; ils sont dans tous les cas une source de dissipation. Les deuxièmes interagissent

fortement avec la surface libre en aval de la plaque avant de trop diffuser. Ces structures tourbillonnaires contrarotatives sont encore très concentrées quand elles rencontrent la surface libre; ce sont elles qui provoquent sa déformation sous forme d'harmoniques.

3. Conclusion:

Vu nos résultats expérimentaux, la méthode de mesure de déformation de la surface libre par deux sondes mobiles, permet une mesure complète des harmoniques par la discrimination des modes libres et des modes liés cependant on n'a pas pris en compte les composantes issues de couplage entre les différents modes. Mais cette technique évite a priori l'utilisation des relations de dispersion théorique, elle peut être donc étendue directement pour traiter ces couplages. Pour ce qui est de l'approche théorique linéaire et au premier ordre, le fait d'existence des harmoniques supérieurs astreint la validité aux hypothèses qu'elle contient à savoir la linéarité de l'écoulement, l'absence de tourbillon et de courant.

Bibliographie:

- [1] Patarapanich, M. « Forces and Moment on a Horizontal Plate Due to Wave Scattering. » J. Coastal Eng., 8:279-301
- [2] E. Landei et J.M. Manzone P. Guevel. « Le phénomène d'un mur d'eau oscillant et son application pour protéger un site côtier soumis à l'action de la houle ». PIANC AIPCN, 52, 1986
- [3] J. Brossard - «Propagation d'une onde sur une plaque immergée» - 1^{ère} Journées Génie Civil-Génie Côtier - Le Havre - 1990.
- [4] B .Boulier - «Evolution spatio-temporelle de structures tourbillonnaires dans la houle» - Thèse de l'Université du Havre - 1996.
- [5]B.MOLIN et P.BETOUS, Atténuation de la houle par une dalle horizontale immergée et perforée. Quatrièmes journées de l'hydrodynamique 1-2-3 mars 1993, p.387-400 (Nantes)
- [6] Jiankang Wu and Philip L.-F. Liu « Interactions of obliquely incident waves with two vertical obstacles » Joseph DeFrees Hydraulics Laboratory, School of Civil and Environmental Engineering. Applied Ocean Research, 1988, Vol.10, No.2 pp 66-
- [7] J. Brossard et A. Hémon- «Analyse spectrale par effet doppler de la propagation de la houle» - Comptes Rendus à l'Académie des Sciences - t.320, série II b, pp 171-176 - 1995.
- [8] B .Boulier, A. Hémon, E. Rivoalen et J. Brossard - «Etude expérimentale et numérique de l'écoulement au voisinage d'une plaque immergée dans la houle» - 6^{ème} Journées hydrodynamique - Nantes - 1997.
- [9] J. Brossard, A. Hémon et E. Rivoalen - «Mesure de la houle par une ou deux sondes mobiles» - 6^{ème} Journées hydrodynamique - Nantes - 1997.