



ELSEVIER

Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Mecanique 331 (2003) 225–230



Une méthode de calcul des coefficients de réflexion et de transmission d'une houle bidimensionnelle en milieu confiné

A new method for the calculation of transmission and reflection coefficients for water waves in a small basin

Gaëlle Duclos, Alain H. Clément

Laboratoire de mécanique des fluides (CNRS UMR6598), École centrale de Nantes, 1, rue de la Noe, BP 92101, 44321 Nantes cedex 3, France

Reçu le 18 décembre 2002 ; accepté après révision le 19 février 2003

Présenté par Évariste Sanchez-Palencia

Résumé

Cet article présente une méthode originale pour estimer l'amplitude de la houle réfléchie et transmise en milieu confiné tel que dans un canal à houle où les signaux à analyser sont de courte durée. Il s'agit d'une extrapolation à 3 sondes de la méthode à 2 sondes de Goda et Suzuki. Ce papier propose également des solutions pour calculer les coefficients de transmission et de réflexion fiables malgré les problèmes liés à l'apparition des harmoniques de houle et aux interférences entre les différentes ondes qui se propagent alors dans le canal. **Pour citer cet article :** *G. Duclos, A.H. Clément, C. R. Mecanique 331 (2003)*. © 2003 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

This paper presents a method to estimate reflected and transmitted wave amplitude spectra in a bounded domain such as a wave tank, when available data signals must be shortened due to interferences and wall effects. This paper extends the well known Goda and Suzuki two-probe method to three probes. The paper also suggests solutions to compute reliable transmission and reflection coefficients in spite of problems linked to higher harmonics and to the interference between different wave trains propagating in the tank. **To cite this article:** *G. Duclos, A.H. Clément, C. R. Mecanique 331 (2003)*. © 2003 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. All rights reserved.

Mots-clés : Ondes ; Analyse de la houle ; Milieu confiné ; Coefficient de réflexion ; Coefficient de transmission

Keywords: Waves; Wave analysis; Bounded domain; Transmission coefficient; Reflection coefficient

Adresse e-mail : Alain.Clement@ec-nantes.fr (A.H. Clément).

Abridged English version

Many studies addressing ocean engineering topics, as for instance breakwater optimization, are performed in wave tanks. These tanks are bounded at one end by a wavemaker and, at the opposite end by a beach which generates spurious reflected waves. Due to these reflections, only short wave data records are available for analysis. When data records are long enough, the usual analysis methods (Goda and Suzuki [1], Mansard and Funke [2]) are very accurate, but with short records, such as those we have to deal with, they rapidly lose their accuracy. Applying the two probe Goda–Suzuki method to a 102.4 s long prototype time series of sea surface record allows us to recover the values of incident and reflected wave amplitude and frequency with an error as small as 2×10^{-8} (Fig. 1). Applying the same method to the same signals but with shorter records of 12.5 s only now gives the results plotted in (Fig. 2) where one can appreciate the loss of accuracy. Furthermore, a new spurious peak appeared which is due to a failure of the method when Δl the distance between the two probes and k_i the wave number satisfy the relation $\sin(k_i \Delta l) = 0$ (cf. Eq. (1)). Using a third wave gauge allows for choosing the best couple of signals for each analyzed frequency and eliminates this high erroneous peak (Fig. 3). Finally, the ‘zero-padding’ technique which consists in adding zeros to the signal is introduced in order to improve the analysis resolution by reducing the frequency step ($\Delta f = 1/T$). In the reported example, the initial frequency step $\Delta f = F_e/N = 0.08$ became $\Delta f = F_e/(N + N') \approx 0.01$. A Hann cosine window was also applied to avoid the effects of a discontinuous transition. Fig. 4 shows the spectra finally obtained by using our method with the initial prototype signal. Frequency peaks are accurate within 2% error, and the maximal amplitudes of both incident and reflected spectra are recovered with less than 1% error.

The method was then used to analyse data from tank testing of a semi-submerged breakwater. Wave records at probes s1 and s2 are given in Fig. 6, and the experimental setup is shown in Fig. 5 (wave period = 1.3 s). The amplitudes of the fundamental and higher harmonics of incident, reflected and transmitted wave trains were determined by using our method in a sliding window (Fig. 7). Due to the delay in wave propagation from probes to the breakwater and back, the incident wave is set up long before the reflected and transmitted waves. Thus it would not be correct to compute the reflection and transmission coefficients by simply dividing by the incident wave amplitude at the same time. For this computation, one must instead move the data window forward by a delay t_1 (with $t_1 = 2d_1/C_g$, where C_g is the group velocity of the fundamental wave, d_1 the distance between the second gauge and the model). Computations of the second harmonics coefficients ($kr_{2\omega} = a_{r_{2\omega}}/a_{i\omega}$ and $kt_{2\omega} = a_{t_{2\omega}}/a_{i\omega}$) of each wave train are based on the same principle, but now moving the data window with the group velocity C_{g2} of the second harmonic. The delay is now $t_2 = d_1/C_g + d_1/C_{g2}$. Fig. 8 shows the evolution of the different wave trains after shifting, and the two bounds t_0 and t_f of the interval of computation of the coefficients (t_f is the time when the wave reflected by the model reaches the probe).

Two improvements of the classical Goda–Suzuki method were proposed in this paper: (i) a multi-probes technique coupled to zero-padding which allows to cope with the short data record limitation; and (ii) a window shifting procedure which permits to account the non-stationarity of the flow.

1. Introduction

De nos jours la protection des ports vis-à-vis de la houle venant du large se fait par des ouvrages de plus en plus complexes capables de s’avérer à la fois peu réfléchissants et très atténuateurs. Pour respecter des cahiers des charges très exigeants, des mesures fiables de la réflexion et de la transmission sont donc nécessaires lors de l’étude de ces ouvrages. Ces études sont le plus souvent réalisées en laboratoire, dans des canaux à houle bidimensionnels équipés à une extrémité d’un dispositif générateur de vagues et à l’autre d’un dispositif amortisseur de type plage artificielle, ou autre. Ce confinement en espace engendre des phénomènes parasites, non présents en milieu ouvert, qui vont perturber l’écoulement. Il s’agit essentiellement des réflexions sur la paroi du générateur : plutôt que de se propager vers l’infini amont, la houle réfléchie par l’ouvrage, se re-réfléchit sur le batteur et se mêle à la

houle incidente. De plus l'écoulement n'étant pas « parfait » à cause notamment de la réflexion sur le modèle de l'ouvrage, il ne reste pas parfaitement bidimensionnel et des réflexions sur les parois latérales peuvent apparaître. Ces phénomènes parasites ne s'établissent qu'après un certain délai pendant lequel le phénomène à analyser est observable isolément. De ce fait, les signaux disponibles à l'analyse (typiquement : les relevés de surface libre, les efforts hydrodynamiques, etc.) sont de courte durée. Or les méthodes classiques d'analyse disponibles dans ce domaine, que ce soient des méthodes deux sondes (Goda et Suzuki [1]) ou trois sondes (Mansard et Funke [2]), sont fiables vis à vis de l'estimation des amplitudes de houle réfléchi et transmise, à condition d'être appliquées à des enregistrements suffisamment longs.

De plus, en milieu confiné comme en milieu ouvert, l'interaction de la houle avec une structure à profil élaboré se révèle être un phénomène très complexe : apparition d'harmoniques supérieures de la houle, interaction non-linéaires entre les différentes ondes. Ces phénomènes sont à prendre en compte lors de calcul de coefficients de réflexion ou de transmission, puisque des transferts d'énergie ont lieu entre les différents modes, ce qui implique que les amplitudes des différentes ondes évoluent au cours du temps.

Ce papier propose une méthode d'analyse qui permet de mettre en évidence ces phénomènes malgré les effets parasites liés au confinement. La méthode est illustrée en utilisant les résultats d'une campagne d'essais sur houle régulière avec un ouvrage de type : digue partielle à profils complexe. C'est une extension de la méthode de Goda et Suzuki [1], adaptée aux échantillons courts, et qui prend en compte la vitesse de propagation de la houle et la création d'harmoniques (Duclos [3]).

2. Estimation des amplitudes de houle réfléchi et transmise

2.1. La méthode de Goda et Suzuki et ses limites

La méthode d'analyse de Goda et Suzuki [1], d'usage courant pour ce type de problématique expérimentale, est une méthode spectrale qui permet de séparer le spectre de houle incidente du spectre de houle réfléchi. Elle nécessite l'utilisation de deux sondes proche l'une de l'autre. Les amplitudes de la houle incidente et de la houle réfléchi sont fonction des coefficients de Fourier (A_{ki} , B_{ki}) des relevés des deux sondes et s'écrivent :

$$a_{Ri}^{Ii} = \frac{1}{2|\sin k_i \Delta l|} [(A_{2i} - A_{1i} \cos k_i \Delta l \mp B_{1i} \sin k_i \Delta l)^2 + (B_{2i} - B_{1i} \cos k_i \Delta l \pm A_{1i} \sin k_i \Delta l)^2]^{1/2} \quad (1)$$

avec Δl la distance entre les 2 sondes.

En résolvant (1) pour chaque fréquence discrète ω_i , on obtient séparément les spectres d'amplitude de la houle incidente et de la houle réfléchi. Le pas de fréquence (Δf) étant l'inverse de la durée de mesure (temps = $1/\Delta f$), la précision est d'autant meilleure que cette durée est importante. Le résultat de cette méthode est présenté sur la Fig. 1 pour un signal de houle prototype dont l'équation à la sonde i , s'écrit :

$$\eta_i(t) = \sum_{j=1}^4 a_j \cos(k_j x_i - \omega_j t) + \sum_{j=1}^4 a_{4+j} \cos(k_j x_i + \omega_j t)$$

avec $a_1 = 0,02$, $a_2 = 0,005$, $a_3 = 0,003$, $a_4 = 0,005$, $a_5 = 0,01$, $a_6 = 0,01$, $a_7 = 0,004$, $a_8 = 0,002$, $\omega_1 = 4,3$ rad/s, $\omega_2 = 7$ rad/s, $\omega_3 = 10$ rad/s et $\omega_4 = 17$ rad/s. Les deux sondes utilisées, s1 et s2, sont distantes de 0,27 cm, et les enregistrements de surface libre ont une durée de 102,4 s (soit 8192 dt, avec dt = 0,0125 s). Avec une telle durée d'enregistrement, la méthode délivre les valeurs des fréquences et des amplitudes incidentes et réfléchies à environ 2×10^{-8} près.

Lorsqu'il s'agit d'analyser des données d'essais réels, il devient impossible de prendre des signaux aussi longs à cause des interférences évoquées plus haut. Les signaux exploitables ont une durée de l'ordre de 12,5 s ($N = 1024$ pts), $\Delta\omega$ est alors voisin de 0,5 rad/s et la même méthode conduit aux résultats présentés sur la Fig. 2.

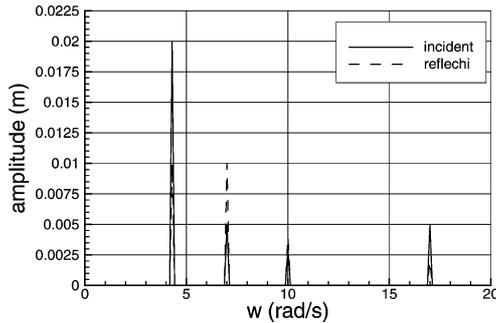


Fig. 1. Spectres obtenus avec la méthode 2 sondes appliquée à des signaux longs.

Fig. 1. Spectra obtained by applying 2 gauge method to long signals.

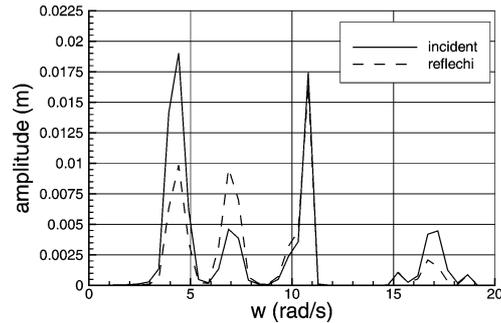


Fig. 2. Spectres obtenus avec la méthode 2 sondes appliquée à des signaux courts.

Fig. 2. Spectra obtained by applying 2 gauge method to short signals.

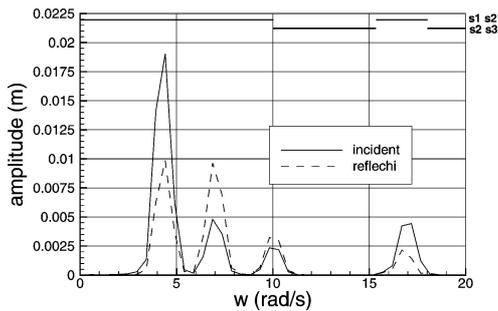


Fig. 3. Spectres obtenus avec la méthode 3 sondes appliquée à des signaux courts.

Fig. 3. Spectra obtained by applying 3 gauge method to short signals.

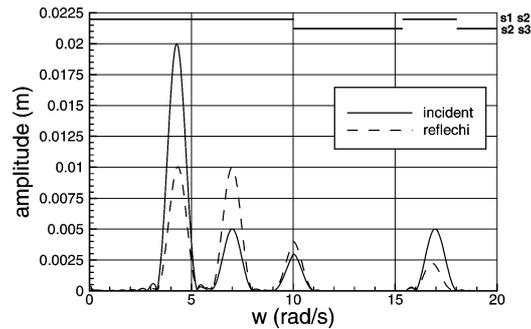


Fig. 4. Spectres obtenus avec la méthode 3 sondes appliquée à des signaux courts complétés de zéros.

Fig. 4. Spectra obtained by applying 3 gauge method to short signals supplemented with zeros.

Les spectres présentent des pics d'amplitude élevée qui sont les singularités de la méthode et qui se produisent lorsque (cf. (1)) $\sin(k_i \Delta l) = 0$ (ou $\Delta l = n\lambda_i/2$) où k_i et λ_i sont, respectivement, le nombre d'onde et la longueur d'onde correspondant à la fréquence discrète f_i et n est un entier. Les valeurs des fréquences critiques étant liées à la distance entre les sondes, l'utilisation d'une troisième sonde, fournissant deux autres jeux d'écartement différent, permet d'éviter ces singularités. Il convient alors de passer d'un jeu de sondes à l'autre au voisinage des fréquences critiques du premier jeu. Le résultat de cette substitution est présenté sur la Fig. 3 sur laquelle on a mentionné, pour chaque fréquence, le jeu de sondes utilisé. On voit que l'utilisation de trois sondes permet de s'affranchir des singularités mais que les erreurs sur l'estimation des amplitudes et des pulsations restent importantes.

Pour améliorer maintenant la résolution il faut diminuer le pas de fréquence, et cela est possible en utilisant la technique du « zéro-padding » [4] qui consiste à ajouter des zéros au signal disponible. Le pas de fréquence passe ainsi de $\Delta f = Fe/N$ à $\Delta f = Fe/M$ ($M = 8192 = N + N'$, $N' =$ le nombre de zéros ajouté). Il n'y a évidemment pas de création d'information : avec N échantillons temporels, il n'y a que N descriptions fréquentielles indépendantes, les autres sont interpolées. Nous avons choisi d'utiliser la fenêtre de Hann ($p(k) = 0.50 + 0.50 \cos(2\pi k/N)$) pour que la transition se fasse sans discontinuité. Le résultat de cette analyse est présenté sur la Fig. 4. Avec cette technique, on voit que les raies se sont élargies, mais qu'elles restent bien centrées sur la pulsation à estimer (erreur $< 2\%$), l'amplitude maximale étant pour sa part exacte à 1 % près.

3. Estimation des coefficients de réflexion et transmission

Différents coefficients de transmission et de réflexion pourront être calculés pour les différentes harmoniques. Tout d'abord les coefficients relatifs au fondamental, notés kt_ω et kr_ω , sont les rapports des amplitudes de pulsation ω des houles transmises et réfléchies. Les coefficients relatifs à la $n^{\text{ième}}$ harmonique, notés $kt_{n\omega}$ et $kr_{n\omega}$, sont respectivement les rapports de l'amplitude de la houle transmise (respectivement réfléchie) de pulsation $n\omega$ à l'amplitude de la houle incidente de pulsation ω .

La Fig. 7 montre l'évolution dans le temps des amplitudes de différentes composantes des houles incidente, réfléchie et transmise, pour un essai réalisé en bassin. Le montage expérimental est présenté sur la Fig. 5, la période de la houle est ici $T = 1.3$ s, les relevés des sondes s1 et s2 sont donnés sur la Fig. 6. Cette évolution (Fig. 7) a été obtenue après déplacement de la fenêtre temporelle; le résultat obtenu pour chaque fenêtre est tracé au temps qui correspond au début de la fenêtre. Bien entendu, la composante en ω de la houle réfléchie et de la houle transmise générées par l'interaction avec l'ouvrage s'établissent après le passage de la houle incidente au niveau des sondes. Ce décalage correspond, dans le cas de la houle réfléchie par exemple, au temps que met le fondamental pour se propager des sondes amont jusqu'à la maquette et revenir, et dans le cas de la houle transmise au temps qui est nécessaire pour que le fondamental se propage des sondes amont jusqu'aux sondes aval. La Fig. 7 montre également que l'amplitude incidente est perturbée par l'arrivée de l'onde réfléchie. Ainsi, les fenêtres utilisées pour le calcul de l'amplitude incidente en ω et de l'amplitude réfléchie en ω doivent être décalées d'environ

$$t1 = \frac{2 * d1}{Cg}$$

où $d1$ est la distance entre la sonde du milieu et la maquette et Cg la vitesse de groupe du fondamental. Pour les mêmes raisons, les fenêtres utilisées pour le calcul des amplitudes réfléchie et transmise en 2ω doivent être décalées d'environ

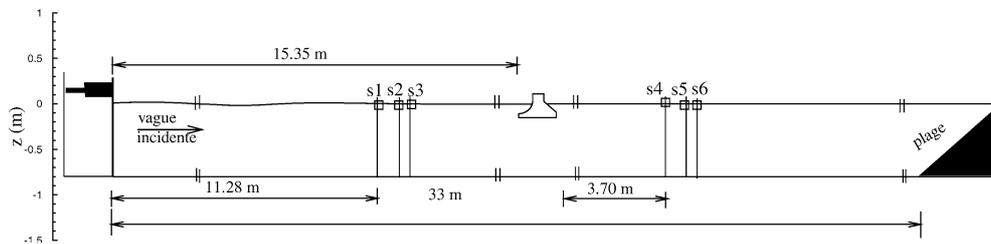


Fig. 5. Le montage expérimental.

Fig. 5. The experimental set-up.

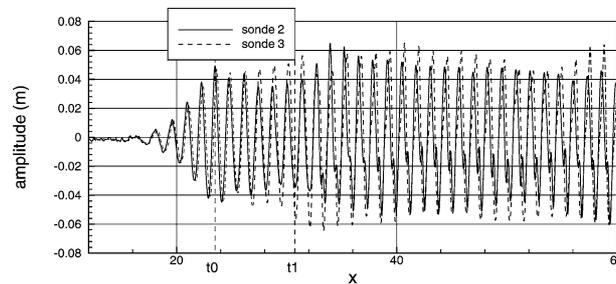


Fig. 6. Elévations aux sondes s1 et s2.

Fig. 6. Wave elevation at gauges s1 and s2.

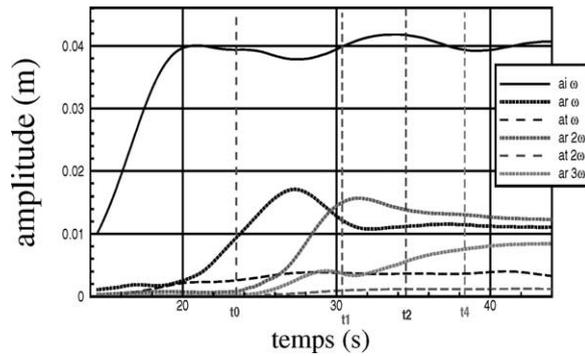


Fig. 7. Résultats de l'analyse d'un essai expérimental.

Fig. 7. Analysis results of an experimental test.

$$t2 = \frac{d1}{Cg} + \frac{d1}{Cg2}$$

avec $Cg2$ la vitesse de groupe de cette composante en 2ω . La Fig. 8 présente les amplitudes des différentes composantes avec le décalage qui leur est propre. Ainsi, les amplitudes réfléchies et les amplitudes transmises tracées à l'instant t , correspondent aux amplitudes évaluées en utilisant la fenêtre qui commence à $t + t1$ pour les composantes en ω ($t + t2$ pour les composantes en 2ω , et ainsi de suite), appliquée respectivement aux sondes amont et aux sondes aval.

Les différents coefficients de transmission et de réflexion sont alors calculés à partir des amplitudes mesurées entre $t0$ et tf , temps à partir duquel la houle incidente est perturbée par la réflexion.

4. Conclusion

Une méthode d'analyse de la houle polychromatique bidimensionnelle en milieu confiné a été développée. Basée sur les travaux de Goda et Suzuki, elle a été complétée par :

- La technique multi-sondes avec « zéro-padding » qui lui a été associée afin de prendre en compte le confinement propre aux essais en canal sans perte globale de précision ;
- La correction par les vitesses de groupe qui a été utilisée pour recaler dans le temps les phénomènes instationnaires qui se produisent lors de la propagation de la houle, et lors de son interaction avec l'ouvrage (création de sur-harmoniques).

Ainsi cette méthode permet d'estimer les amplitudes et les pulsations de la houle incidente, réfléchiée et transmise avec précision aux différents ordres même lorsque les relevés de surface libre disponibles sont de courte durée.

Références

- [1] Y. Goga, Y. Suzuki, Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments, in: Proc. 10th Coastal Engineering Conference, Vol. 1, American Society of Civil Engineers, 1976, pp. 828–845.
- [2] E.P. Mansard, E.R. Funke, The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method, in: Proc. 17th Coastal Engineering Conference, Vol. 1, American Society of Civil Engineers, 1980, pp. 154–172.
- [3] G. Duclos, Étude et amélioration des performances hydrodynamiques d'une digue partielle. Ph.D. École Centrale de Nantes – LMF/DHN, Univ. Nantes, France, 2002.
- [4] S.L. Marple Jr., Digital Spectral Analysis, in: Signal Processing Serie, Prentice-Hall, 1987, p. 43.

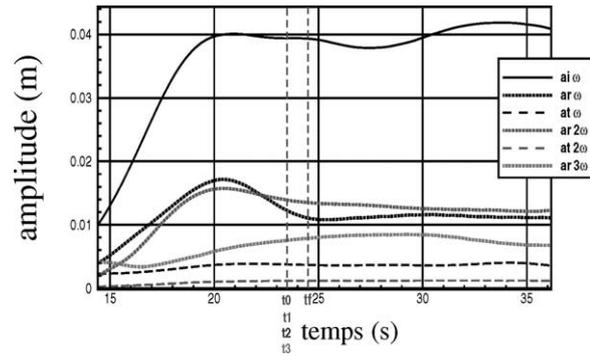


Fig. 8. Résultats de l'analyse d'un essai expérimental, en tenant compte des vitesses de groupe.

Fig. 8. Analysis results of an experimental test according for group velocities.