



Etude numérique de l'interaction houle / brise-lames franchissables

Nicolas Garcia, Javier L. Lara, Iñigo J. Losada

Groupe d'Ingénierie Océanographique et Côtière
Université de Cantabrie
Avenida de los Castros s/n, 39005 Santander, ESPAGNE
Tel. +34-942-201810, Fax +35-942-201860
email : garciani@unican.es

Résumé

Les brise-lames franchissables sont conçus pour atténuer l'énergie de la houle incidente, par réflexion, déferlement et dissipation à l'intérieur de l'ouvrage. L'étude développée ici consiste en la simulation du comportement hydrodynamique de ce type de structures au moyen d'un modèle numérique bidimensionnel qui résout les équations de Reynolds. Le modèle, appelé COBRAS (Liu *et al.*¹), inclut un modèle de turbulence k- ϵ et une technique « Volume Of Fluid » pour le suivi de la surface libre. Le modèle numérique, calibré et validé à partir de mesures expérimentales, reproduit avec précision les phénomènes d'interaction houle/structure et permet d'analyser les conditions d'écoulement au voisinage et à l'intérieur de l'ouvrage poreux.

Summary

Low-crested rubble-mound breakwaters are designed to reduce the incident wave energy through a series of wave transformation processes : reflection, breaking, dissipation inside the porous media. The present study consists in the numerical simulation of the hydrodynamic behaviour of this type of structures using a bidimensional numerical model based on the Reynolds equations. The model, named COBRAS (Liu *et al.*¹), includes a k- ϵ turbulence model and a « Volume Of Fluid » technique for free surface tracking. Laboratory tests are conducted to calibrate and validate the numerical data. The model is found to reproduce accurately the wave/structure interaction phenomena and allow the analysis of the flow conditions on and in the structure.

Mots-clés: Brise-lames franchissables, transformation de la houle, déferlement, canal à houle numérique, méthode VOF.

1.Introduction

Les brise-lames en enrochements à faible cote de couronnement sont des ouvrages de plus en plus utilisés en ingénierie côtière pour lutter contre les phénomènes d'érosion et d'inondation. La fonction essentielle de ces ouvrages, par définition fortement franchissables, est de réduire l'énergie de la houle, par réflexion, déferlement sur l'ouvrage et dissipation à l'intérieur du milieu poreux.

L'analyse des phénomènes d'interaction de la houle avec les brise-lames franchissables et plus généralement les digues en enrochements a fait l'objet d'un très grand nombre de travaux de recherche. L'approche expérimentale a longtemps été privilégiée, et s'est orientée vers le développement de formules d'évaluation des coefficients de réflexion et de transmission (e.g. d'Angremond *et al.*²). Certaines grandeurs physiques importantes pour l'étude du

fonctionnement de l'ouvrage, comme l'écoulement à l'intérieur de la structure ou les vitesses sur la crête en conditions de déferlement, restent toutefois difficilement mesurables en laboratoire.

Les modèles analytiques d'évaluation de l'efficacité des brise-lames (e.g. Rojanakamthorn³), obtenus sur la base de nombreuses hypothèses simplificatrices, sont utiles à une analyse préliminaire du comportement de l'ouvrage, mais ne constituent pas des outils fiables de dimensionnement. Les progrès réalisés récemment en capacités de calcul ont permis le développement de « canaux à houle numériques », qui permettent une simulation de plus en plus précise des phénomènes de propagation de la houle et de ses interactions avec des ouvrages côtiers. L'objectif de l'étude présentée dans cet article est de démontrer l'applicabilité d'un modèle numérique bidimensionnel appelé COBRAS (Liu *et al.*¹) à l'analyse du comportement hydrodynamique des brises-lames franchissables. Les caractéristiques principales du modèle numérique sont d'abord brièvement présentées, puis les essais en laboratoire réalisés pour sa calibration et sa validation sont décrits. Une sélection de résultats des simulations numériques et de comparaisons avec les données expérimentales est ensuite commentée.

2. Description du modèle numérique

Le modèle utilisé dans le cadre de cette étude, appelé COBRAS (COrnell BReaking waves And Structures), a été développé initialement par le « Los Alamos National Laboratory » (Kothe *et al.*⁴) pour l'étude d'écoulements transitoires à surface libre, puis modifié par les Universités de Cornell et de Cantabrie pour son application à des problématiques spécifiques d'ingénierie côtière. Le modèle résout les équations RANS (Reynolds-Averaged Navier Stokes) bidimensionnelles, qui se basent sur la décomposition du champ des vitesses et des pressions instantanées en une composante moyenne et une fluctuation turbulente. Les effets de la turbulence sont exprimés à l'aide d'un modèle $k-\varepsilon$ non linéaire, adapté à des écoulements turbulents anisotropes. Pour la résolution de l'écoulement à l'intérieur du milieu poreux, le modèle utilise les équations VARANS (Volume-Averaged Reynolds-Averaged Navier Stokes) obtenues par intégration des équations RANS sur un volume de contrôle.

Le modèle COBRAS permet l'utilisation d'un système de génération de la houle interne au domaine de calcul : une augmentation de la pression à l'intérieur d'une zone dite « région source » donne naissance, à la verticale de cette zone, à un train d'ondes gravitaires. Cette méthode permet d'éviter que les ondes réfléchies par la structure étudiée ne perturbent la génération des ondes incidentes. Le suivi de la surface libre est réalisé à l'aide de la méthode VOF (« Volume Of Fluid ») développée par Hirt et Nichols⁵. Cette méthode consiste à déterminer les variations de densité à l'intérieur de chaque cellule de la maille de calcul et permet de représenter des configurations de surface libre multi-connexes. Le système d'équations RANS associé à une technique VOF de suivi d'interface permet de simuler le déferlement de la houle sans critère spécifique d'initiation ou d'arrêt. Une description plus détaillée du modèle numérique est fournie par Lin et Liu⁶, Liu *et al.*¹ ou Hsu *et al.*⁷.

3. Description des essais en laboratoire

Les essais ont été réalisés dans le canal houle-courant de l'Université de Cantabrie à Santander (Espagne). La configuration générale des essais est présentée figure 1. Le canal mesure 24.05 m de long, 0.60 m de large et 0.80 m de haut. La houle est générée à l'aide d'un batteur de type piston incluant un système d'absorption des ondes réfléchies. Les essais portent sur deux structures en enrochements avec une largeur de crête de 25 et 100 cm. La hauteur totale de l'ouvrage (25 cm), la pente des talus (1/2) et les caractéristiques des

matériaux de construction sont identiques dans les deux cas. L'ouvrage, formé d'une carapace à deux couches ($D_{50} = 3.9$ cm) et d'un noyau de gravier tout-venant ($D_{50} = 1.2$ cm), repose sur un faux fond horizontal en acier inoxydable relié au fond du canal du côté du batteur par une rampe en plexiglas de pente 1/20. En bout de canal, une rampe identique représente la plage protégée par le brise-lames et dissipe l'énergie des houles transmises par l'ouvrage. Les essais réalisés incluent un système de recirculation qui permet d'évacuer l'eau accumulée dans la zone protégée par franchissement de l'ouvrage : entre le faux fond et la rampe finale, une ouverture rectangulaire permet à l'eau de circuler sous la rampe, puis d'entrer à l'intérieur d'un tuyau situé sous le canal, pour finalement réintégrer le canal devant le batteur. Aucun système de pompe n'est utilisé : le mécanisme qui force la recirculation de l'eau est le gradient hydraulique qui s'établit entre la zone exposée et la zone de transmission. Le même système de recirculation est implanté et utilisé dans la modélisation numérique présentée dans la section suivante.

L'instrumentation utilisée comporte douze sondes de surface libre de type résistif placées le long du canal et trois capteurs de pression situés à l'intérieur de la structure poreuse au niveau du fond. Des mesures de vitesses par technique laser ont été réalisées au voisinage du talus exposé du brise-lames. Trois valeurs de profondeurs d'eau (30, 35 et 40 cm devant le batteur) et donc de franc-bords (5, 0 et -5 cm respectivement) ont été testées, pour un total de 108 conditions de houle régulière et aléatoire. Les résultats de quatre essais en houle régulière, avec les mêmes conditions de houle incidente mais différentes valeurs de franc-bord et de largeur de crête, sont présentés ci-après.

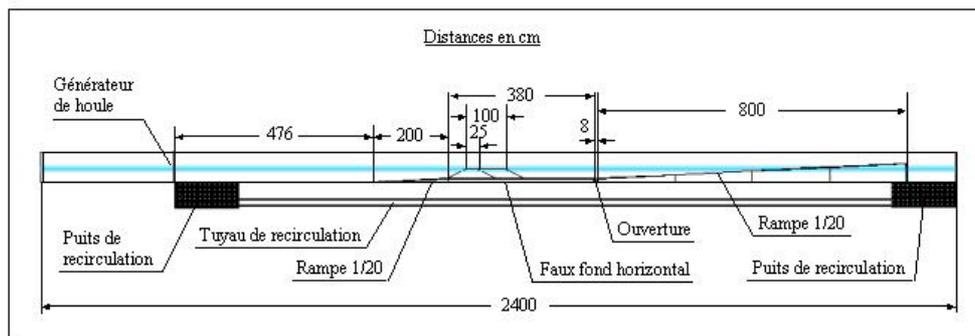


Figure 1. Configuration des essais.

4. Résultats des simulations numériques

L'utilisation du modèle numérique requiert la calibration préalable des paramètres associés aux forces de frottement à l'intérieur du milieu poreux, inclus dans le modèle de fermeture des équations VARANS (voir Hsu *et al.*⁷, pour équations complètes et nomenclature). La calibration consiste à ajuster dans le cas d'un essai particulier les séries temporelles d'évolution de la surface libre. Le modèle est ensuite validé sur les autres essais. Une sélection des résultats obtenus lors des étapes de calibration et de validation est ici présentée, avec le double objectif de vérifier le niveau de performance du modèle et d'analyser l'influence de l'ouvrage sur le champ de houle. Le domaine de calcul considéré comporte 1290 mailles en x et 80 en y, avec une résolution maximale de 1 cm × 1 cm au voisinage de l'ouvrage étudié. Le pas de temps de base est de 10^{-3} s. Avec un PC Pentium 1700 MHz avec Win2000, le temps CPU moyen nécessaire pour simuler une période de houle (1.6 s dans les cas présentés ici) est approximativement de 90 mn.

Les séries temporelles du déplacement de la surface libre au voisinage de l'ouvrage sont représentées figure 2. L'exemple présenté, correspondant à l'essai choisi pour la calibration du modèle, est celui d'une houle de 7 cm de hauteur et 1.6 s de période rencontrant un brise-lames immergé de largeur de crête 100 cm et de franc-bord -5 cm. Le degré de corrélation entre données expérimentales et numériques est très satisfaisant, l'erreur commise étant de l'ordre de 10%. Le modèle reproduit avec précision la déformation de la houle due à la présence du brise-lames. En se propageant sur la rampe initiale l'onde incidente se déforme progressivement (sonde S1), puis perd sa symétrie verticale en rencontrant le talus extérieur du brise-lames (S4 et S5) jusqu'à ce que la limite de stabilité soit atteinte. Le déferlement se produit sur la crête de l'ouvrage (S6 et S7). Une grande partie de l'énergie incidente est dissipée au cours de cette étape de la propagation. La présence de crêtes secondaires dans le champ d'ondes transmis (S8) résulte de transferts d'énergie du mode principal vers des harmoniques de fréquences supérieures au cours du passage sur l'obstacle immergé.

L'onde de pression à l'intérieur de l'ouvrage ainsi que les vitesses des particules sont également correctement simulées, en termes d'amplitude, de forme et de phase (Garcia *et al.*⁸). Les profils de vitesses horizontales et verticales sur la face exposée du brise-lames, correspondant à l'essai présenté figure 2, sont représentés figure 3. Sur le schéma supérieur sont reportées les trois sections considérées, pour un total de 11 points de mesure. Le modèle reproduit correctement les vitesses minimales, moyennes et maximales pour chacune des trois sections. Les profils calculés font apparaître aux sections 5 et 7 la réduction des vitesses à l'intérieur des deux milieux poreux, carapace et noyau, qui forment l'ouvrage.

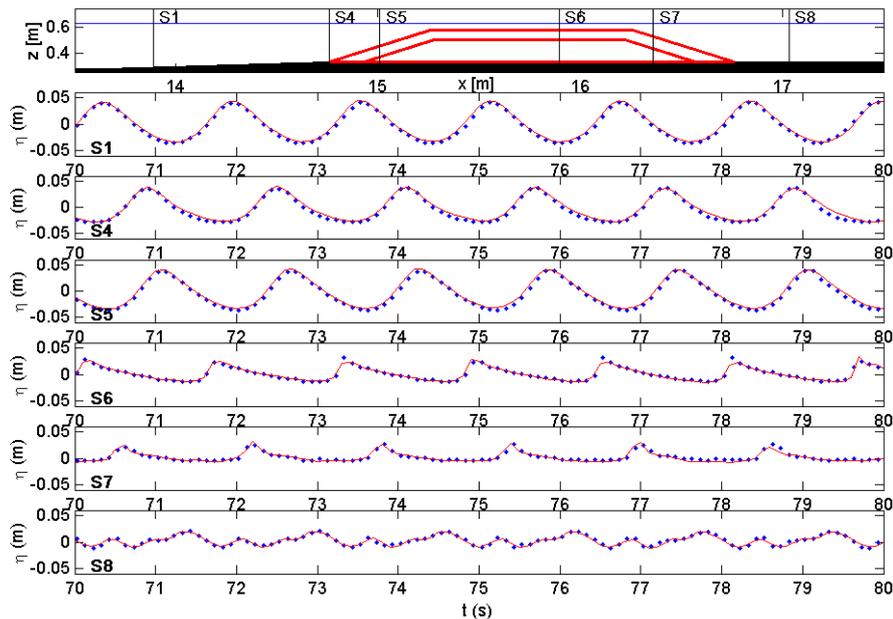


Figure 2. Séries temporelles de déplacement de la surface libre.
 Profondeur d'eau au large = 0.40 m ; hauteur de houle = 0.07 m ; période = 1.6 s.
 Lignes continues : résultats numériques, lignes en pointillé : mesures.

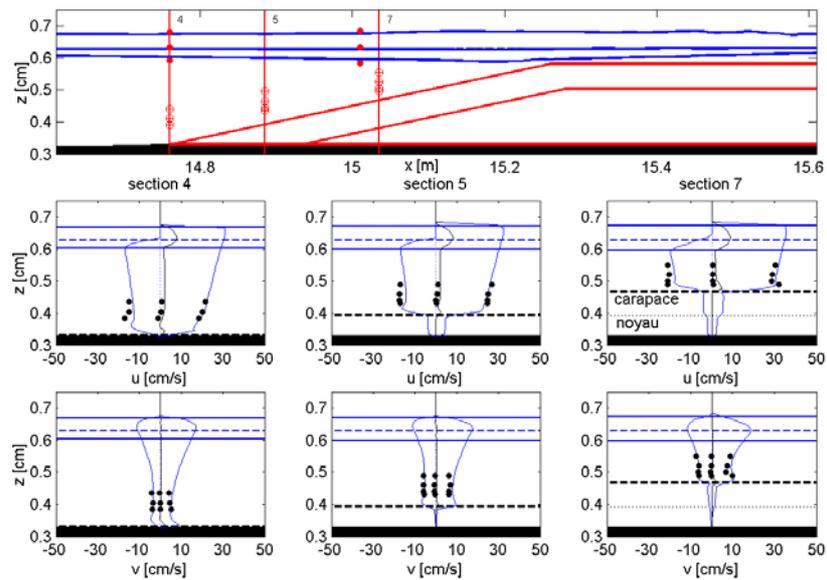


Figure 3. Profils verticaux des vitesses horizontales (u) et verticales (v).
 Profondeur d'eau au large = 0.40 m ; hauteur de houle = 0.07 m ; période = 1.6 s.
 Lignes continues : résultats numériques, points : données expérimentales.

Le modèle COBRAS est capable de reproduire l'interaction houle/structure pour différentes conditions de houle incidente et géométries d'ouvrage. Le modèle est notamment capable de traiter la situation très spécifique d'un ouvrage de franc-bord nul et permet ainsi l'analyse de l'efficacité du brise-lames en fonction du niveau de marée. La figure 4 présente les enveloppes supérieure et inférieure de hauteur de vague et le niveau moyen pour trois valeurs de profondeur d'eau. Pour chacune des trois situations, les valeurs mesurées de variation de hauteur de vague et de niveau moyen sont correctement reproduites. On peut observer la réduction de la hauteur de vague due au déferlement sur la crête du brise-lames immergé ou à la dissipation à l'intérieur de l'ouvrage émergé. La réflexion partielle de l'énergie incidente sur le talus extérieur du brise-lames donne lieu à la formation d'un système d'ondes quasi-stationnaires dans la zone exposée. Le franchissement de l'ouvrage par la houle incidente provoque une surélévation du niveau moyen dans la zone de transmission. Le système de recirculation introduit dans les essais permet d'obtenir des valeurs réalistes de cette surélévation et de pallier le problème d'accumulation d'eau dans la zone protégée, habituellement rencontré dans la modélisation bidimensionnelle des ouvrages franchissables.

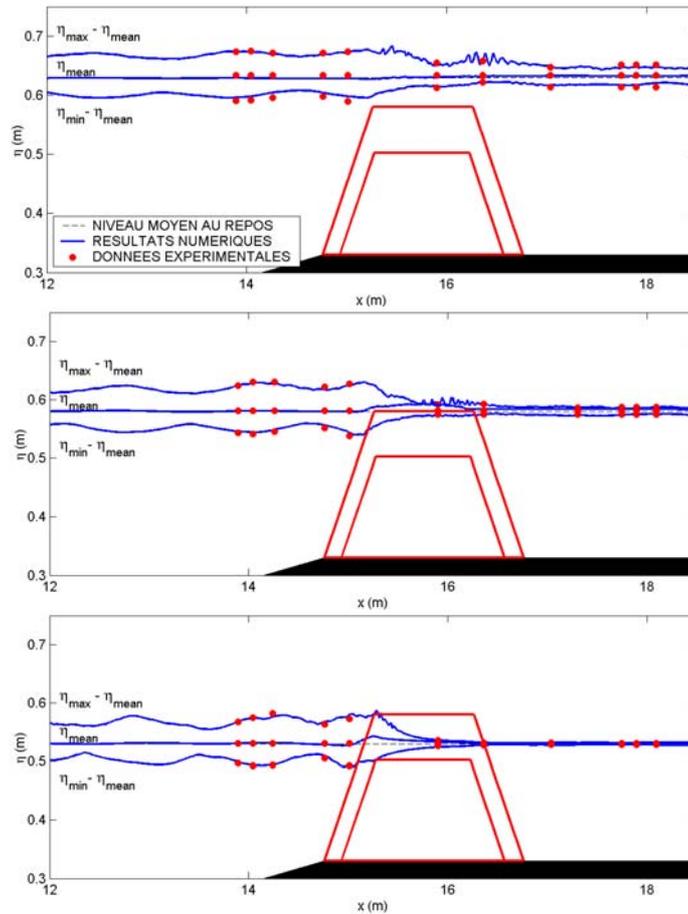


Figure 4. Enveloppes de hauteur de vague et niveau moyen pour trois valeurs de la profondeur d'eau au large : 0.40, 0.35 et 0.30 m.
Hauteur de houle = 0.07 m ; période = 1.6 s.
Lignes continues : résultats numériques, points : données expérimentales.

La capacité du modèle à simuler de façon satisfaisante, en plus du déplacement de la surface libre, le champ des vitesses associé en fait un outil utile à l'analyse des conditions de stabilité de l'ouvrage. Le champ des vitesses moyennes au voisinage du brise-lames, obtenu à partir des résultats numériques, est représenté figure 5. Les deux valeurs de largeur de crête testées en laboratoire sont présentées. Les hauteur et période de houle sont, comme précédemment, de 7 cm et 1.6 s respectivement, pour une profondeur de 40 cm. L'information fournie par le modèle permet d'identifier les structures de l'écoulement (zones d'accélération, tourbillons) susceptibles d'influencer le processus d'affouillement en pied de digue et le déplacement des pièces de l'ouvrage, ainsi que l'influence de la géométrie du brise-lames sur ces structures.

Les résultats numériques de vitesse moyenne autour et à l'intérieur de l'ouvrage présentées figure 5 confirment par ailleurs l'importance du système de recirculation introduit dans les essais. Ce système permet d'éviter qu'un flux de retour dû à la différence de niveaux moyens entre zone protégée et zone exposée ne perturbe l'écoulement sur la crête de l'ouvrage et plus globalement le fonctionnement hydrodynamique du brise-lames.

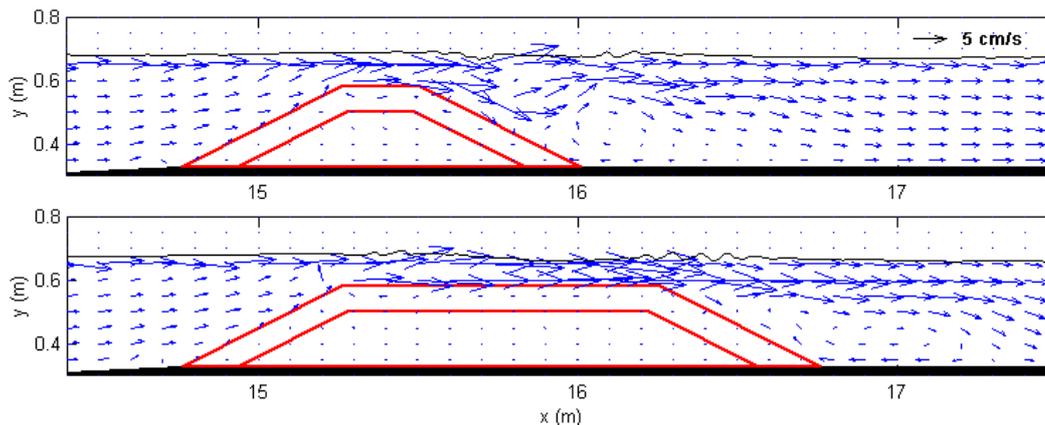


Figure 5. Champ des vitesses moyennes calculé par le modèle pour deux valeurs de la largeur de crête : 25 et 100 cm.
 Profondeur d'eau au large = 0.40 m ; hauteur de houle = 0.07 m ; période = 1.6 s.

5. Conclusions

Une étude numérique de l'analyse de l'interaction houle/structure appliquée aux brise-lames à faible cote de couronnement est proposée. Le modèle utilisé, de type VOF et résolvant les équations RANS en deux dimensions, est calibré et validé à l'aide d'essais en laboratoire incluant un système de recirculation. Ce système permet d'éviter une accumulation d'eau dans la zone de transmission, liée au franchissement du brise-lames par la houle, et donc de modéliser le comportement hydrodynamique de l'ouvrage dans des conditions proches d'une configuration tridimensionnelle.

Le modèle numérique est capable de reproduire de façon satisfaisante les grandeurs physiques mesurées, notamment le déplacement de la surface libre le long du canal et les profils de vitesse sur le talus exposé du brise-lames, quelles que soient les conditions de houle incidente et les caractéristiques géométriques de l'ouvrage. En particulier, le modèle simule correctement la réduction de la hauteur de vague par déferlement sur la crête du brise-lames et par dissipation à l'intérieur du milieu poreux, la génération d'harmoniques d'ordres supérieurs au passage de l'obstacle et la surélévation du niveau moyen dans la zone de transmission, phénomènes influençant directement la morphodynamique des plages protégées par ce type d'ouvrages.

Cette capacité du canal numérique à simuler avec précision les processus d'interaction houle/structure en condition de déferlement, en termes de modification du champ d'ondes local et du champ des vitesses associé, en fait un outil utile au dimensionnement fonctionnel et structurel des brise-lames franchissables.

6. Remerciements

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet de la Communauté Européenne EVK3-CT-2000-41, "Environmental DEsign of LOW-crested coastal defence Structures (DELOS)".

7. Références

1. Liu, P.L.-F, Hsu, T.J., Lin, P.Z., Losada, I.J., Vidal, C., Sakakiyama, T. (2000). The Cornell Breaking Wave and Structure (COBRAS) model.
Proc. Coastal Structures' 99, 169-174.
2. d'Angremond, K., van der Meer, J.W., De Jong, R. J. (1996). Wave transmission at low-crested structures.
Proc. Int. Conf. On Coastal Eng.' 96, 2418-2427.
3. Rojanakamthorn, S., Isobe, M., Watanabe, A. (1990). Modeling of wave transformation on submerged breakwater.
Proc. Int. Conf. On Coastal Eng.' 90, 1060-1073.
4. Kothe, D.B., Mjølness, R.C., Torrey, M.D. (1991). RIPPLE: a computer program for incompressible flows with free surface.
Los Alamos National Laboratory, LA-12007-MS.
5. Hirt, C.W., Nichols, B.D. (1981). Volume of Fluid (VOF) method for dynamics of free boundaries.
J. Computational Physics, 39, 201-225.
6. Lin, P., Liu, P.L.-F. (1998). A numerical study of breaking waves in the surf zone.
J. Fluid Mechanics, 359, 239-264.
7. Hsu, T.-J., Sakakiyama, T., Liu, P.L.-F. (2002). A numerical model for wave motions and turbulence flows in front of a composite breakwater.
Coastal Eng., 46, 25-50.
8. Garcia, N., Lara, J.L., Losada, I.J., 2003. 2-D Numerical analysis of near-field flow at low-crested permeable breakwaters.
Coastal Eng., soumis.