

Modélisation non-linéaire de la cinématique induite par des vagues régulières et irrégulières sur une bathymétrie variable

Michel Benoit, EDF R&D, Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE), France,
michel.benoit@edf.fr

Jie Zhang, Qingdao Innovation and Development Base, Harbin Engineering University, China,
jie.zhang@hrbeu.edu.cn

1. Introduction et présentation succincte du modèle numérique

En zone côtière, les trains de vagues irrégulières subissent de fortes modifications du fait des variations de profondeur d'eau. Ces dernières années, les capacités et la précision des modèles numériques de vagues déterministes (ou à résolution de phase) ont connu des progrès significatifs, en particulier avec le développement de modèles potentiels complètement non-linéaires (*fully nonlinear potential flow*, FNPF). Cette famille de modèles n'introduit aucune hypothèse restrictive concernant le niveau de dispersion et de non-linéarité des vagues, de sorte que ces modèles peuvent être utilisés quelles que soient la profondeur d'eau relative et la cambrure des vagues. Le modèle numérique *whispers3D* résout le problème FNPF en fond variable en approximant le potentiel de vitesse à l'aide d'une approche spectrale sur la verticale, avec pour base des polynômes de Chebyshev de première espèce (Yates & Benoit, 2015 ; Benoit *et al.*, 2017). Il a été validé par rapport à diverses campagnes expérimentales considérant des conditions de vagues non déferlantes régulières et irrégulières (Raoult *et al.*, 2016 ; Zhang *et al.*, 2019 ; Zhang & Benoit, 2021). Récemment, le modèle a été étendu de façon à inclure la dissipation d'énergie due au déferlement (Simon *et al.*, 2019). Dans cette étude, le modèle *whispers3D* est utilisé pour simuler la cinématique induite par les vagues pour des trains de vagues régulières et irrégulières fortement non-linéaires se propageant sur une barre submergée. Cette configuration de bathymétrie provoque de fortes variations du champ de vagues et de la cinématique sous les vagues, du fait des effets combinés de la dispersion et de la non-linéarité.

2. Campagnes expérimentales

Les expériences ont été réalisées dans un canal à vagues à l'Université d'Oslo (Norvège) et sont décrites dans Lawrence *et al.* (2021) pour les cas de vagues régulières, et dans Trulsen *et al.* (2020) pour les cas de vagues irrégulières. La disposition du canal à vagues et du profil du fond marin (barre trapézoïdale immergée sur un fond plat) est la même pour les deux séries d'expériences (figure 1). La profondeur d'eau est de 0,53 m loin de la barre, et 0,11 m au sommet de la barre (d'une longueur de 1,6 m). Les faces inclinées de la barre ont une pente de 1:3,81, chacune couvrant une distance de 1,6 m. De nombreuses sondes à vagues et des courantomètres ont permis de mesurer l'évolution spatiale de l'élévation de surface libre et des vitesses orbitales induites par les vagues, à une élévation $z_0 = -0,05$ m au-dessous du niveau de l'eau au repos (SWL). Deux cas sont sélectionnés et simulés ici : (I) vagues régulières avec une période de $T = 1,43$ s, et une hauteur $H = 0,027$ m de Lawrence *et al.* (2021), et (II) vagues irrégulières avec une période de pic $T_p = 1,1$ s, une hauteur de vague significative $H_s = 0,025$ m, en utilisant un spectre de type JONSWAP avec un facteur de pic $\gamma = 3,3$ (cas appelé « run 3 » dans Trulsen *et al.*, 2020).

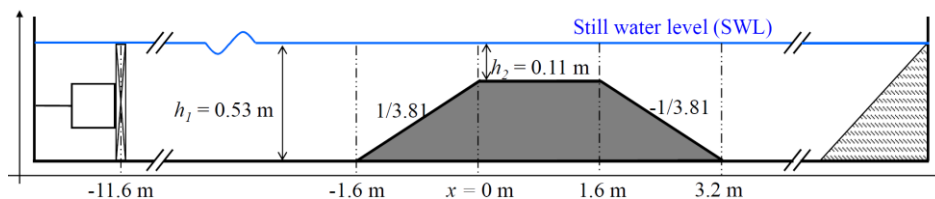


Figure 1 – Schéma du canal à vague des deux campagnes expérimentales (pas à l'échelle).

3. Résultats et discussion

3.1. Méthodes d'analyse et de comparaison

Plusieurs analyses et comparaisons ont été effectuées pour évaluer la précision du modèle concernant à la fois l'élévation de surface libre η , la vitesse horizontale $u(z_0)$, et l'accélération horizontale $ax(z_0)$, portant sur (i) les séries temporelles des signaux en de nombreuses positions, (ii) l'évolution spatiale des amplitudes des harmoniques d'ordres élevés, (iii) les moments statistiques de troisième et quatrième ordre, à savoir l'asymétrie ou skewness (λ_3) et le coefficient de kurtosis (λ_4), (iv) les spectres d'autocorrélation et (v) les distributions statistiques. Quelques extraits de ces résultats sont présentés ci-après. L'ensemble des analyses sera présenté et discuté lors de la conférence.

3.2. Cas de vagues régulières (I)

La comparaison des profils temporels de la vitesse horizontale $u(z_0)$ à 6 abscisses le long du canal pour le cas (I) (Figure 2) montre un très bon accord à toutes les positions. Ceci est confirmé par l'évolution spatiale des amplitudes des harmoniques de $u(z_0)$ obtenues par une analyse de Fourier à chaque nœud du domaine de calcul (Figure 3), avec une reproduction précise des harmoniques jusqu'à l'ordre 6 inclus.

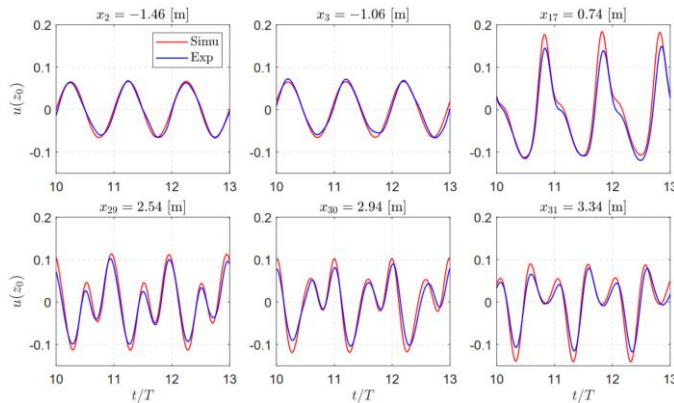


Figure 2 – Comparaison des séries temporelles de la vitesse horizontale $u(z_0)$ mesurée et simulée à 6 positions pour l'essai en vagues régulières (I).

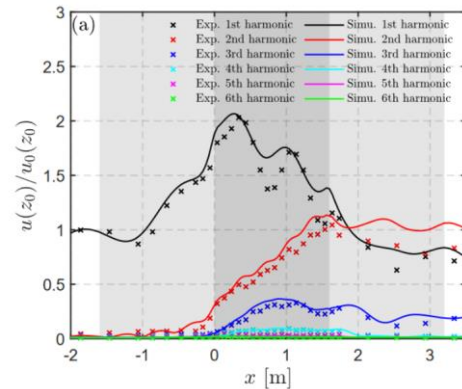


Figure 3 – Evolution spatiale des amplitudes des 6 premiers harmoniques de $u(z_0)$ mesurée et simulée pour l'essai en vagues régulières (I)

3.3. Cas de vagues irrégulières (II)

Pour le cas des vagues irrégulières (II), nous présentons la comparaison du spectre de puissance de $u(z_0)$ sur la figure 4, et l'évolution spatiale de la skewness de $u(z_0)$ sur la figure 5. Comme pour les vagues régulières, les deux figures confirment l'excellent comportement du modèle dans la simulation de toutes les caractéristiques non-linéaires de la transformation au passage de la barre immergée.

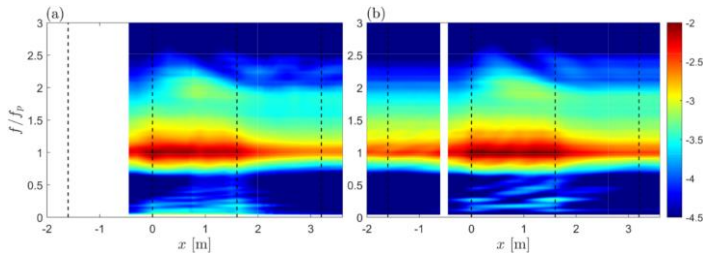


Figure 4 – Evolution spatiale du spectre de la vitesse horizontale $u(z_0)$ dans l'expérience (a) et la simulation (b) pour l'essai en vagues irrégulières (II).

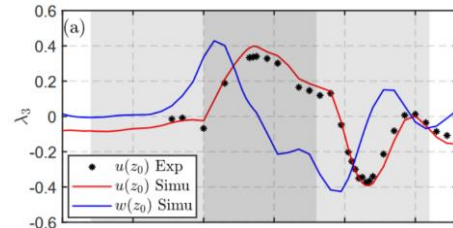


Figure 5 – Evolution spatiale de la skewness de $u(z_0)$ mesurée et simulée pour l'essai en vagues irrégulières (II).

Références

- Benoit M., Raoult C., Yates M.L. (2017) Analysis of the linear version of a highly dispersive potential water wave model using a spectral approach in the vertical. *Wave Motion*, 74, 159-181.
- Lawrence C., Gramstad O., Trulsen K. (2021) Variational Boussinesq model for kinematics calculation of surface gravity waves over bathymetry. *Wave Motion*, 100, 102665.
- Raoult C., Benoit M., Yates M.L. (2016) Validation of a fully nonlinear and dispersive wave model with laboratory non-breaking experiments. *Coastal Engineering*, 114, 194-207.
- Simon B., Papoutsellis C.E., Benoit M., Yates M.L. (2019) Comparing methods of modeling depth-induced breaking of irregular waves with a fully nonlinear potential flow approach. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, 5, 365-383.
- Trulsen K., Raustøl A., Jorde S., Rye L.B. (2020) Extreme wave statistics of long-crested irregular waves over a shoal. *Journal of Fluid Mechanics*, 882, R2.
- Yates M.L., Benoit M. (2015) Accuracy and efficiency of two numerical methods of solving the potential flow problem for highly nonlinear and dispersive water waves. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 77, 616-640.
- Zhang J., Benoit M. (2021) Wave-bottom interaction and extreme wave statistics due to shoaling and de-shoaling of irregular long-crested wave trains over steep seabed changes. *Journal of Fluid Mechanics*, 912, A28.
- Zhang J., Benoit M., Kimmoun O., Chabchoub A., Hsu H.-C. (2019) Statistics of extreme waves in coastal waters: large scale experiments and advanced numerical simulations. *Fluids* 4, 99.