

Effet de profondeur finie sur la turbulence d'ondes de gravité : ondes dispersives et solitons

Thibault Leduque, Maxime Kaczmarek, Eric Barthélemy, Hervé Michallet, Nicolas Mordant

Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels, Université Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble-INP
 nicolas.mordant@univ-grenoble-alpes.fr

La théorie de la turbulence faible a été appliquée au cas des ondes de surface de gravité et la prédiction théorique du spectre de Kolmogorov-Zakharov permet de reproduire notamment la décroissance des spectres de vagues mesurés dans l'océan qui décroît avec la fréquence f en $1/f^4$ [1,2]. L'effet de la profondeur finie sur la turbulence d'ondes de surface a été moins étudié du point de vue fondamental. Le fait que la profondeur soit finie modifie plusieurs aspects de la propagation des vagues. D'une part la relation des ondes linéaires est impactée par la profondeur h sous la forme $\omega^2 = gk \tanh(kh)$ où g est l'accélération de la pesanteur. La dispersion des ondes change fortement et dans la limite de très faible profondeur, les ondes sont non dispersives avec $\omega^2 = c^2 k^2$ ($c = \sqrt{gh}$). Par ailleurs la non linéarité est fortement impactée par la profondeur. À amplitude d'onde fixée, les effets non linéaires sont amplifiés quand la profondeur diminue [3]. On peut également atteindre un équilibre entre faible dispersion et faible nonlinéarité qui se traduit par l'émergence de solitons de type KdV [4].

Pour étudier l'effet de la profondeur sur les propriétés statistiques de la turbulence d'onde, nous avons mené deux campagnes de mesures dans le bassin à houle multidirectionnel LHF de la compagnie Artelia à Pont de Claix. Le bassin a une taille de 27 m par 30 m et la profondeur d'eau était 35 cm. Les murs latéraux du bassin étaient verticaux de manière à réfléchir les ondes. Les ondes sont excitées par un ensemble de 60 batteurs indépendants situés le long d'un des murs du bassin et permettant de générer des ondes multidirectionnelles arbitraires. Nous avons excité les ondes avec un spectre aléatoire de type Jonswap caractérisé notamment par son amplitude et sa fréquence principale d'excitation f_p . En diminuant f_p de 1 à 0.1 Hz, nous avons varié l'effet de la profondeur via le paramètre $k_p h$, d'un régime de grande profondeur à un régime de faible profondeur (k_p étant le nombre d'onde des ondes à f_p). Pour mesurer les ondes, nous avons utilisé un système de reconstruction de la surface de l'eau par imagerie stéréoscopique qui a fourni le champ d'élévation du fluide $\eta(x, y, t)$ sur une surface de 180 m² (résolu en temps et en espace) [5].

L'analyse statistique des champs de vagues, notamment via les distributions de hauteurs de vagues et les spectres de Fourier (en fréquence ou en fréquence et vecteur d'onde), montrent un effet très important de la profondeur sur les propriétés statistiques. En particulier, on passe d'un régime de turbulence faible à grande profondeur ($k_p h > 1$) à un régime de gaz de solitons à faible profondeur ($k_p h \ll 1$). Quand $k_p h$ diminue on observe effectivement un renforcement de la nonlinéarité ainsi qu'un effet important sur la directivité des ondes puis une transition claire vers des régimes où des solitons apparaissent dans le champ de vagues. La caractérisation du seuil d'apparition des solitons n'est pas complètement comprise et fait possiblement intervenir des effets de taille finie en sus du nombre d'Ursell qui quantifie le rapport nonlinéarité/dispersion. A noter que la dynamique à 2D des solitons dans un domaine de taille finie est très complexe [6]. Ces changements de dynamique sont pertinents pour les ondes océaniques dans les zones littorales ou plus généralement dans les zones de faible profondeur de type lagune.

Références

1. S. NAZARENKO, *Wave turbulence*, Springer (2011).
2. L. LENAIN, W.K. MELVILLE, *J. Phys. Ocean.*, **47**, 2123 (2017).
3. K. ZHAO, Y. WANG, P.L.-F. LIU, *Costal Engineering*, **188**, 104432 (2024).
4. M. PEYRARD ET T. DAUXOIS, *Physique des solitons*, EDP Sciences (2004).
5. T. LEDUQUE, E. BARTHÉLEMY, H. MICHALLET, J. SOMMERIA, N. MORDANT, *Exp. Fluids*, **65**, 84 (2024).
6. T. LEDUQUE, *Thèse de doctorat* (2024).