Offre de stage E4C – Energy4Climate

Vagues extrêmes en mers croisées : évaluation des modèles d'ondes en eau peu profonde

Projet xWAVES

Christos Papoutsellis[1], Michel Benoit[1,2], and Luc Pastur[3]

[1]LHSV, ENPC, Institut Polytechnique de Paris, EDF R&D
[2]LNHE, EDF R&D
[3]IMSIA, ENSTA, Institut Polytechnique de Paris

Laboratoire	Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant (LHSV)
Lieu	EDF Lab Chatou, Chatou (78), Île-de-France
Durée	6 mois
Discipline	Modélisation mathématique, calcul scientifique, hydrodynamique
Niveau	Master 2 ou dernière année d'école d'ingénieur
Contact	christos.papoutsellis@enpc.fr

Contexte

Une *mer croisée* est un état de mer résultant de la superposition de deux systèmes de vagues de directions moyennes distinctes. Cette configuration est fréquente en conditions réelles et elle apparaît lors d'une rotation rapide du vent, ou lorsqu'une houle d'origine lointaine rencontre la mer levée par le vent local. Elle est associée à une part notable des accidents de navires imputés aux conditions météorologiques étant survenue dans de telles situations. L'hypothèse avancée pour l'expliquer est que le croisement de deux trains des vagues favorise l'apparition des vagues de hauteur anormale.

Cet enjeu se pose également pour les installations de production d'énergie en mer. Les parcs éoliens posés sont implantés dans le régime d'eau peu profonde. Le rotor d'une éolienne s'orientant face au vent, c'est la direction des vagues relativement au vent qui gouverne la réponse de la structure, et le désalignement entre les deux est un facteur reconnu du dimensionnement [1]. Une mer croisée ne se ramène pas à un tel angle unique et la structure est sollicitée selon deux directions à la fois. Il en va de même pour les systèmes flottants, pour lesquels la coexistence de deux systèmes de vagues modifie la distribution des hauteurs de crête et les efforts dans les lignes d'ancrage [2].

La capacité à estimer la proportion de vagues extrêmes contenue dans un état de mer croisé présente donc un intérêt direct pour le dimensionnement des installations. Le présent stage porte sur la modélisation de l'état de mer lui-même ; le calcul des efforts exercés sur une structure en constitue l'étape ultérieure.

État de l'art et problématique

L'étude de référence sur ce sujet est celle de [3]. Les auteurs simulent des L'étude de référence est celle de [3], qui simule des mers croisées en eau peu profonde avec l'équation de Kadomtsev–Petviashvili [4], généralisation bidimensionnelle de l'équation de Korteweg–de Vries. Deux spectres de vagues identiques, formant entre eux un angle donné, sont superposés et simulés sur un grand nombre de tirages de phases aléatoires. L'écart de la surface libre à une statistique gaussienne y est maximal pour un angle critique.

Ce résultat se heurte cependant à une limitation de principe : l'équation de Kadomtsev–Petviashvili suppose des vagues se propageant dans des directions voisines, et exclut toute propagation en sens inverse. Les grands angles de croisement, qui portent le résultat, sont donc hors de son domaine de validité. Une étude avec un modèle plus complet reste à mener.

Problématique du stage

> *Dans quelle mesure la superposition de deux systèmes de vagues de directions distinctes modifie-t-elle la statistique des vagues en eau peu profonde, et quel degré de non-linéarité un modèle doit-il retenir pour en rendre compte de manière fiable ?*

Objectifs et programme de travail

Le stage s'appuie sur un code de calcul développé lors d'un stage précédent, qui résout numériquement deux familles de modèles d'ondes en eau peu profonde : les systèmes de Boussinesq [5], faiblement non linéaires, et le système de Serre–Green–Naghdi [6], complètement non linéaire. Contrairement à l'équation de Kadomtsev–Petviashvili, ces modèles ne supposent faible directionnalité, et autorisent donc l'exploration des grands angles de croisement. Les objectifs sont les suivants.

1. **Simuler les mers croisées avec des modèles valables aux grands angles.** Reproduire la configuration de [3] — deux spectres de vagues superposés d'angle variable, ensembles de tirages de phases aléatoires — avec les systèmes de Boussinesq et de Serre–Green–Naghdi, en balayant l'angle entre les deux systèmes ainsi que le degré de non-linéarité. Les indicateurs statistiques usuels (asymétrie, kurtosis, distribution des hauteurs de crête) seront extraits et examinés.
2. **Attribuer les écarts observés.** Les modèles considérés se distinguent par l'ordre auquel ils retiennent la non-linéarité. La comparaison de leurs prédictions permet d'établir dans quelle mesure l'écart à la statistique gaussienne est gouverné par les termes non linéaires d'ordre supérieur. La sensibilité au choix de la condition initiale sera par ailleurs quantifiée, en comparant une superposition linéaire à une montée progressive de la non-linéarité [7], afin de distinguer les effets de modèle des effets de mise en données.

Deux prolongements sont envisagés si l'avancement du stage le permet : le passage à un modèle d'ordre plus élevé [8] et l'introduction d'une variation de profondeur [9].

Méthodologie et moyens

Les simulations reposent sur une méthode pseudo-spectrale de Fourier en deux dimensions horizontales. Les développements sont réalisés en Python ou Julia, à partir du code existant. L'étude prend la forme d'une campagne de simulations paramétrée, suivie d'un post-traitement statistique. Le stage mobilise ainsi la modélisation asymptotique, à travers une hiérarchie de modèles et l'examen de leurs domaines de validité, les méthodes spectrales, et l'analyse statistique de données de simulation.

Déroulement prévisionnel

- *Prise en main* (5 semaines) : étude des articles de référence, appropriation du code existant, mise en place de cas tests de validation.
- *Mise en place de la configuration* (4 semaines) : génération des états de mer croisés, choix des paramètres de l'étude, premières simulations et vérifications.
- *Campagne de simulations et analyse* (10 semaines) : simulations avec les modèles de Boussinesq et de Serre–Green–Naghdi, extraction des indicateurs statistiques, comparaison aux résultats publiés et interprétation.
- *Synthèse et rédaction* (4 semaines) : rédaction du rapport, préparation de la soutenance, mise en ordre des livrables (scripts reproductibles, jeux de données).

Profil recherché

Master 2 (modélisation mathématique, mécanique des fluides, calcul scientifique) ou dernière année d'école d'ingénieur. Sont attendues des bases solides en équations aux dérivées partielles et en méthodes numériques, ainsi qu'une pratique de la programmation scientifique en Python ou Julia. Des connaissances en hydrodynamique des vagues et en statistiques constituent un atout, sans être exigées : les modèles utilisés seront présentés en début de stage.

Modalités pratiques et candidature

Le stage se déroulera sur le site EDF Lab Chatou, situé sur l'Île des Impressionnistes à Chatou (78) et accessible en transports en commun (plan d'accès). Le ou la stagiaire effectuera 35 heures hebdomadaires réparties sur 5 jours ; le stage sera gratifié conformément à la réglementation en vigueur. Les candidatures, constituées d'un curriculum vitae, d'un relevé de notes et d'une lettre de motivation, sont à adresser à christos.papoutsellis@enpc.fr.

Références

[1] T. Fischer, P. Rainey, E. Bossanyi, and M. Kühn. Study on control concepts suitable for mitigation of loads from misaligned wind and waves on offshore wind turbines supported on monopiles. *Wind Engineering*, 35(5) :561–573, 2011.

[2] L. Barj, S. Stewart, G. Stewart, M. Lackner, J. Jonkman, A. Robertson, and D. Matha. Wind/wave misalignment in the loads analysis of a floating offshore wind turbine. In *32nd ASME Wind Energy Symposium, National Harbor, MD*, 2014. NREL/CP-5000-61043.

[3] A. Toffoli, M. Onorato, A. R. Osborne, and J. Monbaliu. *Non-Gaussian Properties of Shallow Water Waves in Crossing Seas*, pages 53–69. Springer Netherlands, Dordrecht, 2008.

[4] B. B. Kadomtsev and V. I. Petviashvili. On the stability of solitary waves in weakly dispersing media. *Soviet Physics Doklady*, 15 :539–541, 1970.

[5] J. L. Bona, M. Chen, and J.-C. Saut. Boussinesq equations and other systems for small-amplitude long waves in nonlinear dispersive media. I. Derivation and linear theory. *Journal of Nonlinear Science*, 12 :283–318, 2002.

[6] D. Lannes and F. Marche. A new class of fully nonlinear and weakly dispersive Green–Naghdi models for efficient 2D simulations. *Journal of Computational Physics*, 282 :238–268, 2015.

[7] D. G. Dommermuth. The initialization of nonlinear waves using an adjustment scheme. *Wave Motion*, 32 :307–317, 2000.

[8] Ch. E. Papoutsellis and M Benoit. On a high-order shallow-water wave model with canonical non-local Hamiltonian structure. *Physica D : Nonlinear Phenomena*, 479 :134691, 2025.

[9] J. Zhang, M. Benoit, and Y. Ma. Equilibration process of out-of-equilibrium sea-states induced by strong depth variation : Evolution of coastal wave spectrum and representative parameters. *Coastal Engineering*, 174 :104099, 2022.