

Offre de stage E4C – Energy4Climate

Simulation d'états de mer aléatoires en zone côtière – rWAVES

Christos Papoutsellis¹, Michel Benoit^{1,2}, Guillaume Coulaud^{1,2}, Marissa Yates¹, and Luc Pastur³

¹LHSV, ENPC, Institut Polytechnique de Paris, EDF R&D

²LNHE, EDF R&D

³IMSIA, ENSTA, Institut Polytechnique de Paris

Contexte et motivation. La transition énergétique s'appuie pour partie sur des systèmes en mer — fixes ou flottants — pour l'éolien et l'énergie houlomotrice. Dans ce cadre, la prévision des états de mer et la modélisation réaliste des interactions houle–fond deviennent centrales pour la production, le design, la fiabilité et la durabilité des installations. En eaux peu profondes, les états de mer présentent des statistiques *non gaussiennes* qui exigent des campagnes de calcul *en ensemble* afin d'obtenir des statistiques robustes des mouvements et des chargements ou efforts. Concevoir, dimensionner et optimiser ces systèmes requiert donc des modèles capables de restituer la non-linéarité et la dispersion, tout en restant suffisamment économiques pour l'analyse en ensemble.

Des travaux fondés sur des théories idéalisées [1], des simulations non-linéaires [2, 3] et des observations in situ [4] mettent déjà en évidence des écarts significatifs des statistiques gaussiennes. Néanmoins, la compréhension reste incomplète pour les régimes fortement non linéaires et les interactions houle–fond en *deux dimensions horizontales* (2DH). Mieux comprendre ces mécanismes est essentiel pour évaluer la ressource, réduire les incertitudes de conception des systèmes houlomoteurs/éoliens flottants et améliorer leur fiabilité.

Ce stage porte sur la modélisation numérique et l'analyse statistique d'états de mer aléatoires en 2DH, via des modèles d'ondes de complexité/fidélité variables. Nous établirons des *critères de validité* selon le régime de vague et les niveaux de non-linéarité/dispersion, pour des calculs en ensembles fiables et efficaces. Une attention particulière sera portée à la stabilité de la solution numérique (schémas en temps) afin de permettre des simulations de longue durée. Dans la continuité des projets E4C sur le déferlement [5], nous capitaliserons sur les développements existants pour traiter les cas fortement non-linéaires.

Objectifs : Dans ce stage, nous étudierons des états de mer aléatoires à l'aide de modèles d'ondes — des plus classiques aux plus récents [6] — afin de quantifier les écarts au comportement gaussien induits par la non-linéarité et d'évaluer leur impact sur les statistiques de vagues (élévation de surface libre, hauteur de crête, hauteur significative), déterminantes pour l'estimation de l'énergie exploitable et des efforts sur les structures. Les objectifs principaux sont :

- Générer des conditions initiales (élévation & vitesses ou potentiel de vitesse) réalistes de mers directionnelles à partir de spectres d'ondes en tenant compte la compatibilité des champs initiaux avec les variables de chaque modèle.
- Réaliser des simulations avec montée en complexité : du modèle de Boussinesq faiblement non linéaire au modèle complètement non-linéaire de Green–Naghdi [7], et, le cas échéant, vers des cas plus exigeants nécessitant des modèles avancés, tels que le modèle d'ordre élevé récent de [8]. Analyser les spécificités



FIGURE 1 – Statoil's Hywind floating turbine, Norway, 2009

numériques afin d’optimiser le coût de calcul : choix d’intégrateurs temporels, critères de stabilité et parallélisation.

- Quantifier et expliquer la non-gaussianité (asymétrie, kurtosis, distributions de crêtes/creux, bispectre/triades) et établir des relations vers des métriques d’ingénierie, afin de proposer des critères de validité et de choix de modèle selon les régimes de houle étudiés.

Les solutions numériques seront obtenues par des méthodes spectrales de type Fourier (domaine spatial carré, avec conditions de périodicité latérales) en s’appuyant sur le framework [DEDALUS](#) qui permet une définition déclarative des EDP, une discrétisation spectrale haute précision et une exécution parallèle (MPI) adaptée aux calculs en ensembles. Les schémas temporels disponibles couvrent des intégrateurs explicites de type Runge–Kutta et des approches semi-implicites/IMEX adaptées.

Déroulement du stage : Le stage dure 5-6 mois et se déroulera en quatre étapes. D’abord, une phase d’état de l’art et de familiarisation (4 semaines) consacrée à une revue bibliographique ciblée sur la modélisation des états de mer aléatoires, ainsi qu’à la prise en main des outils numériques. Ensuite, une phase de définition des cas et de simulations numériques (10 semaines) au cours de laquelle l’étudiant(e) sélectionnera et validera une configuration de référence, précisera les paramètres d’entrée (spectres directionnels, niveaux de non-linéarité/dispersion), définira une stratégie d’échantillonnage pour l’analyse en ensembles et conduira des campagnes de simulations. Le cadre principal sera celui d’une profondeur finie constante ; des variations de fond pourront être explorées ultérieurement, si le temps le permet. Puis, une phase de post-traitement et d’analyse (6 semaines) : extraction des indicateurs statistiques (PDF, skewness, kurtosis), analyse de phase (bispectre/triades), estimation des probabilités de dépassement et comparaison à des lois statistiques de références publiées dans la littérature. Enfin, une phase de synthèse et de rédaction (4 semaines) dédiée à la consolidation des résultats, à la rédaction du rapport de stage, à la préparation de la présentation finale et à la mise en ordre des livrables (scripts reproductibles, jeux de données).

Profil recherché : Master 2 ou élève ingénieur, avec bases en méthodes numériques des EDP, hydrodynamique, vagues et ondes de surface, et programmation.

Informations Pratiques : Le stage se déroulera au Laboratoire d’Hydraulique Saint-Venant (LHSV), sur le site EDF Lab Chatou, situé sur l’Île des Impressionnistes à Chatou (78, Île-de-France). Le site est accessible en transports en commun. Le [plan d’accès](#) est disponible en ligne. Le/la stagiaire effectuera 35 heures hebdomadaires sur 5 jours. Le stage sera gratifié conformément à la réglementation en vigueur. Les candidatures (CV, relevé de notes, lettre de motivation) sont à envoyer à christos.papoutsellis@enpc.fr.

Références

- [1] 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.
- [2] A. Toffoli, M. Benoit, M. Onorato, and E. M. Bitner-Gregersen. The effect of third-order nonlinearity on statistical properties of random directional waves in finite depth. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 16(1) :131–139, 2009.
- [3] J. Zhang, Y. Ma, and M. Benoit. Kinematics of nonlinear waves over variable bathymetry. Part II : Statistical distributions of orbital velocities and accelerations in irregular long-crested seas. *Coastal Engineering*, 193 :104589, 2024.
- [4] A. Nieto-Reyes. On the non-gaussianity of the height of sea waves. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(12), 2021.
- [5] S. Mohanlal, J. C. Harris, M. L. Yates, and S. T. Grilli. Simulation of depth-limited breaking waves in a 3d fully nonlinear potential flow model. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 150(4) :04024007, 2024.
- [6] G. Coulaud, M. Teles, and M. Benoit. A comparison of eight weakly dispersive Boussinesq-type models for non-breaking long-wave propagation in variable water depth. *Coastal Engineering*, 195 :104645, 2025.
- [7] 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.
- [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.