

**GENERATION LOCALISEE D'UN ETAT DE MER EXTREME
UNIDIRECTIONNEL DANS UN BASSIN NUMERIQUE .**

17^{èmes} JOURNEES DE L'HYDRODYNAMIQUE JH2020

M. Canard⁽¹⁾, B. Bouscasse⁽¹⁾, and G. Ducrozet^{(1),*}

⁽¹⁾Ecole Centrale de Nantes, LHEEA (ECN et CNRS), France

*Corresponding author: guillaume.ducrozet@ec-nantes.fr

Résumé

Le design des structures offshore nécessite une reproduction réaliste et contrôlée des conditions de houle observées in-situ. Les états de mer sont à cet effet modélisés de façon numérique, à l'aide de solveurs résolvant la propagation des vagues, ou de façon expérimentale, dans des bassins munis d'un générateur de houle. On s'intéresse ici à la génération numérique de champs irréguliers unidirectionnels en grande profondeur dans un environnement de type bassin d'essai. Deux états de mer de référence ont été sélectionnés, l'un peu cambré et l'autre extrême incluant un nombre important d'évènements déferlants. De nombreuses réalisations de ces deux cas ont été générées à l'aide d'un modèle non-linéaire déterministe reproduisant un bassin de houle expérimental. Une méthode itérative permet de contrôler le spectre de houle dans une zone cible du domaine. Les statistiques de hauteur de crête, primordiales pour détecter les évènements extrêmes et caractériser la sévérité du champ de vagues, ont été étudiées et comparées aux distributions de référence. La discrétisation spatiale, le modèle de déferlement, ainsi que le choix de la zone cible influencent de façon significative les caractéristiques statistiques de la houle générée, remettant en question les pratiques industrielles actuelles, principalement focalisées sur le contrôle des spectres de houle en une zone d'intérêt.

Summary

The design of offshore structures requires a realistic and controlled reproduction of the wave conditions observed in-situ. In this respect, the sea states are generated either numerically using wave solvers, or experimentally in dedicated wavetanks. The problem is here addressed from a numerical point of view. We consider long crested irregular waves in a wavetank environment under the deep water assumption. Numerous realizations of two selected reference sea states have been generated using a deterministic nonlinear model reproducing a wavetank environment. The first case exhibits mild conditions while the second one, extreme, includes severe breaking events. A correction iterative procedure has been used to control the wave spectrum at a target location in the numerical tank. As a crucial tool characterizing the severity of the wavefield, the crest height statistics have been analysed and compared to the reference distributions at the position of interest. The spatial discretization, the numerical breaking model, and the location of interest appear to significantly affect the statistical behaviour of the wavefield, questioning the usual wave qualification industry practices mainly focusing on the quality of the spectrum at the target location.

1. Introduction

La sévérité des conditions océaniques impose un dimensionnement scrupuleux des structures offshores, basé sur une reproduction numérique et/ou expérimentale de champs de vagues réalistes. Un grand nombre des procédures actuellement utilisées en ingénierie marine abordent le problème d'un point de vue stochastique. Chaque état de mer de design, généralement unidirectionnel, est réalisé plusieurs fois, dans le but de voir émerger les événements les plus extrêmes qu'il peut contenir. Chaque réalisation est associée à un jeu de phases différent et correspond à une durée de trois heures à l'échelle réelle. Le contrôle qualité de la houle se concentre alors principalement sur le spectre d'énergie obtenu à la position d'intérêt du domaine. En effet, dans le cadre d'un essai effectué dans un bassin muni d'un générateur de houle, qu'il soit numérique ou expérimental, le spectre imposé au début du domaine peut évoluer lorsqu'on s'éloigne du batteur, notamment en présence de déferlement; ce dernier dissipant l'énergie du champ de vagues lors de sa propagation. Des processus itératifs corrigeant les mouvements du batteur ont alors été mis en place de façon à compenser en une zone cible les modifications spatiales du spectre, assurant alors l'apparition de l'état de mer cible au niveau de la zone d'intérêt [1, 2].

Cependant, la densité spectrale d'énergie ne caractérise pas entièrement le champ de vagues, ses propriétés statistiques jouent aussi un rôle crucial. La génération de distributions de hauteurs de crête réalistes se révèle nécessaire dans de nombreux tests de survie. Le contrôle des queues de distributions, directement associées à l'intensité et à la récurrence des événements extrêmes, est particulièrement important. Plusieurs distributions de référence, dépendantes de grandeurs spectrales, ont été construites afin de relier cette quantité d'intérêt au spectre d'énergie. Les distributions des réalisations individuelles (PDSR) ainsi que la distribution d'ensemble des réalisations (PDER) peuvent être étudiées et doivent être distinguées. La convergence statistique ne pourra être atteinte qu'avec la PDER et c'est donc cette grandeur qu'il convient généralement de comparer aux distributions de référence.

La théorie linéaire des ondes dispersives prévoit une distribution de Rayleigh pour les hauteurs de crête [3], considérant l'élévation de surface libre et sa dérivée temporelle comme des variables aléatoires gaussiennes. Toutefois, les effets non-linéaires du second ordre sont à l'origine d'une asymétrie verticale de la houle. La distribution semi-empirique de Forristall [4], largement utilisée comme référence par les sociétés de classification [5], prend en compte ce phénomène. Par ailleurs, ces dernières années, de nombreuses études numériques et expérimentales ont mis en évidence la nécessité de considérer les effets du troisième ordre dans les statistiques associées aux états de mers, notamment dans les configurations unidirectionnelles [6, 7, 8, 9]. Des conditions de houle associées à i) d'importantes cambrures et ii) un spectre étroit en fréquence, sont propices à l'apparition d'instabilités modulationnelles (aussi nommées instabilités de Benjamin Feir). Ces dernières sont à l'origine d'un surplus d'événements extrêmes ce qui se traduit par une augmentation significative des probabilités en queue de distribution par rapport aux prédictions du second ordre [10]. L'indice de Benjamin Feir (BFI), évaluant le ratio entre la cambrure et la largeur spectrale permet de prévoir ce comportement. Ces effets sont plus limités pour les états de mers directionnels [11]. Basé sur de nombreuses simulations numériques, un jeu de références considérant ce phénomène a récemment été construit par Huang & Zhang [12].

Il convient cependant de rappeler que l'établissement de ces références statistiques se base sur l'ergodicité spatiale du champ de vagues, propriété qui n'est pas assurée dans le cadre d'un essai effectué dans un bassin numérique ou expérimental. En effet, même sans variations spectrales significatives les statistiques évoluent en espace. Les méthodes de génération classiquement utilisées en bassin physique imposent au début du domaine un champ de vagues partiellement cohérent dont les statistiques sont Gaussiennes. L'évolution de ce champ est conditionné par la non linéarité et le caractère cohérent (*i.e.* largeur spectrale) des conditions de houle imposées. Dans le cas d'un état de mer associé à un indice de Benjamin Feir élevé, des structures complexes à l'origine d'événements extrêmes émergent lorsque l'on s'éloigne du batteur, par un mécanisme dit d'autofocalisation [13]. Une zone de transition de plusieurs dizaines de longueurs d'onde est parfois observée avant la convergence spatiale des grandeurs statistiques [10]. La pertinence des distributions de référence varie alors avec la zone d'intérêt. Ce phénomène n'est pas systématiquement pris en compte. Les pratiques actuelles comme celles proposées dans le cadre d'un JIP en cours [1] se basent d'abord sur la qualité du spectre en zone

cible et comparent ensuite les statistiques avec les distributions de Huang et Forristall.

Le travail présenté ici se propose d'étudier l'efficacité et les limites de telles pratiques. Le problème est abordé d'un point de vue numérique, à l'aide du solveur potentiel non-linéaire open-source HOS-NWT développé à l'Ecole Centrale de Nantes [14]. Une correction itérative des mouvements batteur est implémentée de façon à générer un spectre contrôlé à une position cible du bassin numérique. Deux états de mer sont testés. Le premier cas, de cambrure modérée, permet d'étudier le processus dans une configuration simple et maîtrisée. Le second correspond à des conditions extrêmes, induisant la présence significative d'évènements déferlants, qui modifient le spectre lors de son évolution spatiale. Le solveur, basé sur la théorie potentielle, nécessite l'utilisation d'un modèle de déferlement adéquat [15, 16]. Les résultats montrent une évolution des distributions de hauteurs de crête le long du bassin dans le cas non déferlant. Dans le cas déferlant, la variation significative du spectre de houle limite le choix de la position visée. Les pertes d'énergie empêchent la génération du spectre cible loin dans le domaine, malgré l'action du processus itératif. L'influence de la discrétisation spatiale est étudiée. Son impact sur l'efficacité du modèle de déferlement est non négligeable, ce qui entraîne des modifications significatives des distributions de crête.

Cet article est composé de quatre parties. Le bassin de houle numérique est tout d'abord présenté, incluant la modélisation choisie pour les évènements déferlants. Ensuite, la procédure de génération de la houle, permettant le contrôle du spectre cible dans la zone d'intérêt, est détaillée. La troisième partie se concentre sur les caractéristiques du problème : conditions de houle et paramètres numériques. Enfin, les résultats de l'étude sont présentés et discutés.

2. Bassin de Houle Numérique

L'étude présentée dans cet article se base sur la génération numérique de champs de vagues irréguliers unidirectionnels à l'aide du solveur open-source HOS-NWT¹. Cette section présente brièvement le modèle non-linéaire mis en œuvre. On s'intéresse à des conditions de houle diverses, incluant des états de mer extrêmes qui sont propices à l'apparition d'évènements déferlants. Une modélisation spécifique de ce phénomène complexe est nécessaire dans le modèle de propagation de houle utilisé basé sur un formalisme d'écoulement potentiel de fluide parfait.

2.1 Modélisation pseudo-spectrale HOS

Une description détaillée du modèle HOS-NWT peut être trouvée dans [14]. Le domaine de résolution est un rectangle de longueur L_x et de profondeur h . On se place dans l'hypothèse d'un écoulement irrotationnel et d'un fluide isovolume non visqueux. Le potentiel des vitesses $\phi(x, z, t)$ peut alors être introduit, vérifiant à l'intérieur du domaine l'équation de Laplace $\Delta\phi(x, z, t) = 0$. Les frontières verticales sont des murs réfléchissants et des conditions aux limites de glissement sont imposées sur ces derniers ainsi qu'au fond du bassin. Comme il sera vu par la suite, le traitement du batteur et de la plage d'absorption sont isolés. Les conditions de surface libre sont conservées dans leur forme non linéaire. Elles sont exprimées à l'aide du potentiel surfacique $\tilde{\phi}(x, t) = \phi(x, z = \eta, t)$ avec $z = \eta(x, t)$ l'équation décrivant la position de la surface libre [17]. En $z = \eta$,

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = (1 + |\nabla \eta|^2) \frac{\partial \phi}{\partial z} - \nabla \tilde{\phi} \cdot \nabla \eta \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial t} = -g\eta - \frac{1}{2} |\nabla \tilde{\phi}|^2 + \frac{1}{2} (1 + |\nabla \eta|^2) \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \quad (2)$$

Dans ce système d'équations, seul le terme $\frac{\partial \phi}{\partial z}$ évalué en $z = \eta$ reste volumique. Son évaluation efficace est réalisée à l'aide de la méthode itérative High Order Spectral (HOS), basée sur des développements en

¹<https://github.com/LHEEA/HOS-NWT>

série de Taylor [18, 19]. L'ordre de non-linéarité de cette méthode est arbitraire, noté M , et est choisi dans les paramètres d'entrée. La discrétisation spatiale est assurée par une méthode pseudo-spectrale, l'élévation de surface libre et le potentiel de surface sont décomposés sur les modes propres du bassin. Notons que le nombre de points N_x est relié au nombre d'onde maximal résolu k_{max} par la relation $k_{max} = N_x\pi/L_x$. Lors de la génération d'un état de mer irrégulier, le choix de la discrétisation spatiale est généralement effectué en fixant k_{max} à un multiple du nombre d'onde de pic k_p . L'intégration en temps se fait grâce à une méthode de Runge-Kutta à pas de temps adaptatifs, contrôlés à l'aide d'un paramètre de tolérance.

Le bassin de houle numérique modélise également la génération des vagues à l'aide d'un batteur. Pour ce faire, un potentiel additionnel [20] est introduit qui permet de conserver le formalisme pseudo-spectral précédent tout en imposant une condition inhomogène sur une des frontières du domaine $x = 0$. En complément, une plage absorbante est mise en place proche du mur opposé au batteur en $x = L_x$ afin de limiter la présence d'ondes réfléchies. On se réfère à [14] pour plus de détails quant au modèle HOS-NWT.

2.2 Modèle de Déferlement

La génération d'état de mer dont la non-linéarité significative est associée à l'apparition d'événements déferlants nécessite l'implémentation dans HOS-NWT d'un modèle de déferlement. En effet, ce phénomène, à l'origine i) de vorticité, ii) d'une dissipation importante d'énergie et iii) d'une surface libre complexe, est incompatible avec le formalisme potentiel de la méthode HOS. On va chercher à modéliser l'effet prépondérant joué par le déferlement sur la dynamique du champ de vagues, à savoir la dissipation d'énergie. La première étape consiste à détecter le déferlement en utilisant un critère [21] basé sur le ratio de la vitesse U_x du fluide à la surface libre sur la vitesse locale de crête C_x :

$$B_x = \frac{U_x}{C_x} > 0.85 \quad (3)$$

Ensuite, la dissipation d'énergie est réalisée en introduisant un terme de dissipation dans les conditions de surface libre, sur une zone spatio-temporelle définie par les caractéristiques de la vague juste avant déferlement.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = (1 + |\nabla \eta|^2) \frac{\partial \phi}{\partial z} - \nabla \tilde{\phi} \cdot \nabla \eta + 2v_{eddy} \nabla \cdot \nabla \eta \quad (4)$$

$$\frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial t} = -g\eta - \frac{1}{2} |\nabla \tilde{\phi}|^2 + \frac{1}{2} (1 + |\nabla \eta|^2) \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 + 2v_{eddy} \nabla \cdot \nabla \eta \quad (5)$$

La paramétrisation du terme de diffusion v_{eddy} et de la zone spatio-temporelle d'application [22] est faite suivant les travaux de référence [22]. Plus de détail sur l'implémentation du modèle dans HOS-NWT peuvent être trouvés dans [15, 16].

3. Procédures de Génération et de Qualification de la Houle

La présente étude s'intéresse à la reproduction d'un spectre de houle donné en un point cible du bassin. Cette section a pour but de décrire la procédure utilisée à cet effet. Celle-ci, adaptée à un environnement de type bassin d'essai peut s'appliquer aussi bien dans un cadre numérique qu'expérimental. Les critères permettant d'apprécier la qualité du champ de vagues seront aussi explicités.

3.1 Génération Itérative d'un Spectre d'énergie en une Zone Cible

Lors de la propagation d'un état de mer en bassin de houle numérique ou expérimental, différents phénomènes physiques peuvent modifier la densité spectrale d'énergie et principalement : i) les transferts non-linéaires

d'énergie entre composantes et ii) les phénomènes dissipatifs, tels le déferlement. En complément, les mouvements batteur sont définis à partir de la fonction de transfert linéaire, ce qui résulte en un contrôle imparfait du champ de vagues généré, notamment lorsqu'il est fortement cambré. La méthode de correction adoptée se base sur une compensation itérative et linéaire des mouvements du batteur. Une première série de réalisations de l'état de mer cible est d'abord générée. La consigne envoyée au batteur est alors directement obtenue à partir de la fonction de transfert, appliquée au spectre cible avec un tirage de phases aléatoires. Le nombre de réalisations doit être suffisamment grand afin d'assurer la convergence statistique du spectre moyen lissé à la position visée (qui constitue la grandeur d'intérêt). Pour l'étude présentée ici, 10 réalisations, correspondant chacune à trois heures à l'échelle réelle, ont été générées pour chaque itération corrective. Les amplitudes de Fourier du mouvement batteur associées à l'itération 0, $A_{entrée}^0(f)$ (f représentant la fréquence), sont ensuite corrigées par un facteur défini comme le ratio des amplitudes de Fourier cibles A_{cible} sur celles obtenues à la position visée $A_{mesure}^0(f)$ (calculée à partir du spectre moyenné sur les 10 réalisations). La procédure est répétée jusqu'à l'obtention du spectre cible au point d'intérêt. De façon générale, la consigne envoyée au batteur à l'itération $n + 1$ s'exprime

$$A_{entrée}^{n+1}(f) = A_{entrée}^n(f) \frac{A_{cible}(f)}{A_{mesure}^n(f)} \quad (6)$$

Avant chaque itération, la correction $C^n(f) = A_{entrée}^n(f)/A_{entrée}^0(f)$ obtenue à partir des 10 réalisations de l'itération précédente est lissée par convolution afin d'assurer un comportement régulier (ce qui est ce à quoi on s'attend physiquement) indépendant de la durée du signal et/ou du nombre de réalisations. Le critère de convergence sera détaillé dans la prochaine sous partie. L'état de mer convergé est réalisé un nombre suffisant de fois afin d'obtenir la convergence des données statistiques d'intérêt. Pour l'étude présentée ici, 100 réalisations ont été générées pour chaque état de mer convergé.

3.2 Évaluation de la Qualité du Champ de Vagues

Les critères présentés dans cette section ont été construits dans le contexte du JIP "Reproducible CFD Modeling Practice for Offshore Applications" [1]. Ils s'appliquent à un ensemble de réalisations d'un état de mer, autour du point cible du domaine. Le but est de qualifier la qualité du champ de vagues généré dans la zone d'intérêt. Le premier critère, servant à définir la convergence du processus correctif présenté précédemment, se base sur la différence relative du spectre obtenu en position cible avec le spectre visé. Elle doit être limitée à 5% dans la gamme de fréquence $f \in [\frac{3}{4}f_p; \frac{3}{2}f_p]$ (f_p représentant la fréquence de pic du spectre cible).

$$\text{Max}_{f \in [0.75f_p, 1.5f_p]} \left(\left| \frac{S(f) - S_{cible}(f)}{S_{cible}} \right| \right) < 5\% \quad (7)$$

$S(f)$ correspondant à la densité spectrale d'énergie obtenue à la position cible, moyennée sur toute les réalisations. Ce spectre est ici lissé par convolution avec une fenêtre unité de longueur fréquentielle $\delta_f = 0.4\nu$, où ν est la largeur spectrale à mi-hauteur. La gamme de fréquence d'évaluation du critère est arbitraire, elle se concentre ici autour du pic, zone à priori d'intérêt de par sa contribution à l'énergie totale du champ de vagues. Toutefois, comme il sera vu par la suite, la queue du spectre semble jouer un rôle important dans l'apparition des événements déferlants [23]. Des variations d'énergie dans cette région peuvent alors avoir des conséquences significatives sur les statistiques de hauteur de crête, sensibles au déferlement [8]. Notons par ailleurs que la correction présentée dans la précédente sous-partie s'applique sur tout le domaine fréquentiel. Seul le critère de convergence est restreint autour de la fréquence de pic.

Les paramètres spectraux sont aussi contrôlés. La hauteur significative des vagues $H_s = H_{m0}$ et la période de pic T_p doivent notamment rester dans une marge d'erreur de 3% par rapport à leur valeur cible. Là encore, les quantités considérées sont obtenues en moyennant sur toutes les réalisations.

La qualification des grandeurs statistiques se base tout d'abord les moments de l'élévation de surface libre (considérée comme une variable centrée réduite) d'ordre 3 dénommé skewness (λ_3) et d'ordre 4 dénommé

kurtosis (λ_4) qui doivent respecter $\lambda_3 > 0$ et $\lambda_4 > 3$. Le skewness caractérise l'asymétrie verticale du champ de vagues et par conséquent l'importance des effets du second ordre. Le kurtosis est quant à lui une mesure de l'importance des queues de la distribution de l'élévation de surface libre. Sa valeur est de 3 pour un champ gaussien et augmente avec la probabilité d'occurrence des événements extrêmes. D'autre part, les distributions de crête, PDER et PDSR sont comparées avec leur référence de Huang respective [12]. Une crête est ici définie comme la hauteur maximale d'élévation de surface libre entre deux passages à zéros. Par la suite, dans un souci de concision, nous nous concentrerons uniquement sur le kurtosis et la PDER.

L'un des objectifs de l'étude consiste à tester les critères précédemment énumérés et à juger de leur pertinence, dans un cas peu cambré maîtrisé et pour un état de mer extrême associé à de forts événements déferlants.

4. Paramètres de l'étude

Lors de cette étude, deux états de mer ont été générés en une position cible d'un bassin de houle numérique. Cette section présente les caractéristiques physiques du champ de vagues généré ainsi que les paramètres numériques du modèle HOS-NWT choisis.

4.1 Houles Générées

Le tableau 1 présente les caractéristiques des états de mer générés, données à l'échelle réelle. Il s'agit de cas de référence dans le monde de l'ingénierie offshore [1]. La houle est unidirectionnelle et la forme des spectres est de type JONSWAP [24].

Nom	H_s (m)	T_p (s)	γ	$\varepsilon = H_s/\lambda_p$
ss6	6	12.25	1.0	2.5%
GOM	17	15.50	2.6	4.5%

Tableau 1. États de mer générés (échelle réelle).

L'état de mer ss6 présente des conditions usuelles de houle, peu violentes. La cambrure associée est de 2.5%, ce qui n'implique pas ou peu d'évènement déferlants. Au contraire, l'état de mer GOM correspond aux conditions de houle avec une période de retour de 1000 ans rencontrées dans le Golfe du Mexique. Il s'agit donc d'un cas extrême. Sa cambrure de 4.5% induit l'apparition de nombreux événements déferlant, influençant de façon significative le champ de vagues, lorsque celui-ci est généré dans un bassin de houle (*i.e.* dans une configuration de propagation seule, sans forçage dû au vent).

4.2 Paramètres numériques

Les états de mer mentionnés précédemment ont été générés dans le bassin numérique HOS-NWT à une échelle 1/100, en similitude Froude. Les caractéristiques du domaine ont été choisies similaires à celles du bassin de génie océanique de l'ECN facilitant la comparaison avec de possibles résultats expérimentaux. La longueur est alors de $L_x = 50m$ et la profondeur de $h = 5m$ ce qui, au vu des caractéristiques des houles générées, nous permet de satisfaire l'hypothèse de grande profondeur ($k_p h \simeq 8.4$ pour la houle la plus longue). Des sondes numériques ont été placées tous les mètres afin d'étudier l'évolution spatiales des grandeurs spectrales et statistiques. Comme indiqué dans le Tableau 2, les positions cibles correspondent à $x = 7m$ et $x = 15m$.

Le Tableau 2 présente également les caractéristiques numériques des simulations réalisées, à savoir la discrétisation et le modèle de déferlement. Pour le cas ss6, on utilise une discrétisation typique pour le modèle HOS-NWT, $k_{max}/k_p = 25$, permettant une résolution précise de l'évolution du champ de vagues, y compris du contenu haute fréquence. Pour cet état de mer modérément cambré, il apparaît que certaines réalisations ne peuvent pas être simulées sur les 3h à échelle réelle en raison de l'apparition d'instabilités numériques. Le taux

d'échecs correspondant est également indiqué dans le Tableau 2. Ces instabilités apparaissent lors de la formation d'évènements cambrés et sont inhérentes à la modélisation pseudo-spectrale mise en oeuvre. Le schéma purement conservatif peut se révéler peu robuste dans sa version originelle qui n'utilise aucune stratégie de filtrage ou autre artifice numérique [25]. Le modèle de déferlement appliqué à cette configuration permet de prévenir l'apparition de ces instabilités, toutes les réalisations étant désormais opérantes. A noter que dans ce cas qui physiquement ne présente pas de déferlement, le modèle est très peu actif, sans modification notable de l'énergie dans l'état de mer.

Pour le cas GOM, l'objectif est d'étudier l'influence de la discrétisation sur les résultats. Il s'agit d'un cas complexe pour le modèle de déferlement utilisé. Ce dernier ne s'est pas révélé totalement adapté à traiter le problème présent, notamment du fait de l'intensité des évènements déferlants, dépassant celle des études précédentes ayant mené à son développement [22, 15, 16]. Par conséquent, la discrétisation est limitée à $k_{max} = 15k_p$ et l'intensité du modèle α est augmentée par rapport à la paramétrisation originelle.

Etat de Mer	Position cible (en λ_p)	Discrétisation (k_{max}/k_p)	Modèle de déferlement	Taux d'échecs (en %)
ss6	3	25	Aucun	34
ss6	3	25	Tian ($\alpha = 0.2$)	0
ss6	6.2	25	Aucun	36
GOM	2	15	Tian ($\alpha = 0.4$)	28
GOM	2	10	Tian ($\alpha = 0.4$)	0
GOM	2	7	Tian ($\alpha = 0.4$)	0
GOM	4.5	7	Tian ($\alpha = 0.4$)	0
GOM	4.5	10	Tian ($\alpha = 0.4$)	0

Tableau 2. Vagues générées et paramètres numériques.

L'ordre de non linéarité de la méthode HOS est fixé à $M = 3$ afin de prendre en compte les effets non-linéaires prépondérants dans la dynamique de ces états de mer. Chaque réalisation a une durée de 1200s. Les 120 premières secondes ne sont pas prises en compte dans l'analyse afin d'attendre l'établissement de l'état de mer. Le bassin de houle est en effet au repos à $t = 0s$. Après l'application de la procédure de correction itérative présentée en troisième partie et donc la convergence du spectre cible dans la zone d'intérêt, chaque cas présenté dans le tableau 2 a été généré un nombre suffisant de fois de façon à obtenir 100 réalisations complètes.

5. Résultats et Discussion

Cette section présente les résultats de l'étude. Deux états de mer ont été générés à l'aide du solveur HOS-NWT dans un domaine similaire au bassin océanique de l'ECN. Pour chacune de ces conditions de houle, deux positions d'intérêt, $x = 7m$ et $x = 15m$ ont été visées à l'aide de la procédure itérative détaillée en partie 3.1. Dans l'analyse des résultats, une attention particulière sera portée aux critères de qualification de la houle définis dans la partie 3.2. Le but étant de mettre en évidence la pertinence de l'approche adoptée pour contrôler le spectre cible à une position donnée, mais également de ses limitations, notamment vis à vis des statistiques du champ de vagues.

5.1 Etude d'un Cas Non Déferlant

Dans cette première sous partie, on s'intéresse à la génération de l'état de mer ss6 à $x = 3\lambda_p$ et $x = 6.2\lambda_p$. Dans les deux cas, le spectre cible est atteint après seulement une itération. Il est important de noter que l'itération 0 a été effectuée sans modèle de déferlement dans toutes les configurations. Pour la position cible à $x = 3\lambda_p$, les mouvements batteur de l'itération 1 ont ensuite été générés avec et sans modèle de déferlement, afin d'évaluer l'influence de ce dernier pour un état de mer a priori non déferlant. Comme indiqué précédemment, dans

cette configuration le modèle agit comme un traitement des instabilités numériques lors d’une résolution très discrétisée $k_{max} = 25k_p$. La figure 1 présente l’erreur relative du spectre cible pour ces deux configurations.

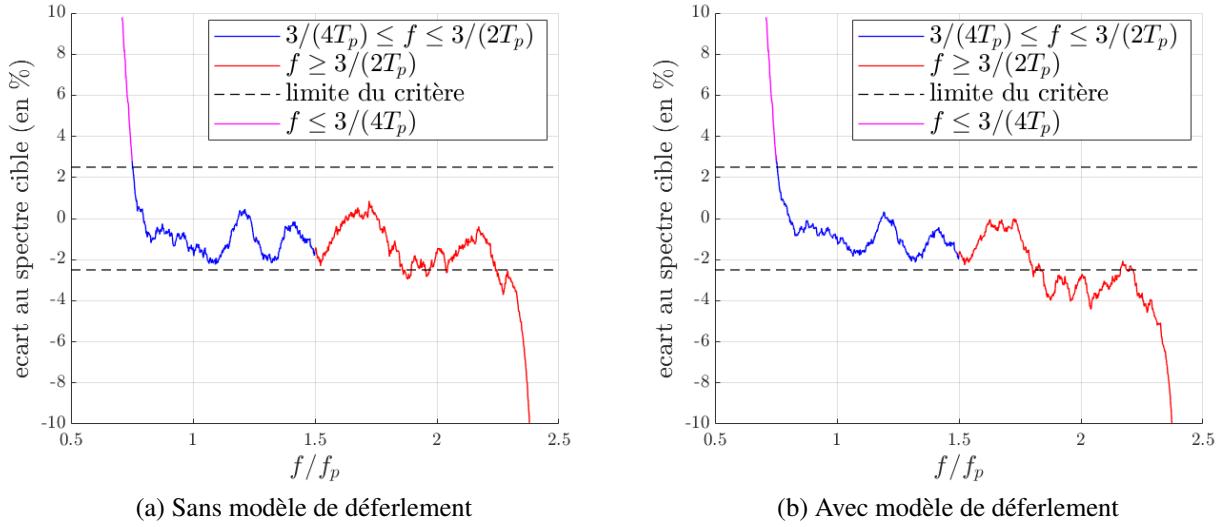


Figure 1. ss6, critère de qualité du spectre de houle à la position d’intérêt, $x = 3\lambda_p$, itération 1.

Il convient tout d’abord de remarquer que dans les deux cas l’erreur est bien dans une marge de 5% dans la gamme de fréquence concernée par le critère introduit en partie 3.2 (partie bleue dans la figure 1). L’influence du modèle de déferlement n’est visible qu’à partir des fréquences $f > 1.75f_p$, où une légère baisse d’énergie est constatée, qui sous forme intégrée donne une diminution négligeable de moins de 0.1% de H_s . Il est possible d’analyser le nombre d’évènements déferlants durant chaque réalisation de 1200s. Il est d’environ 30 évènements où le modèle de dissipation sera activé, ce qui est très faible sur le nombre de vagues totales et à relier avec la faible modification résultante du spectre. Si la sévérité des conditions de houle reste modérée, les interactions entre les différentes composantes du champ provoquent de façon ponctuelle l’émergence de structures plus cambrées, activant le modèle de déferlement. Ce dernier n’est pas nécessaire à la résolution et son influence sur le spectre de houle est quasi nulle. On cherchera par la suite à caractériser sa possible influence sur les statistiques associées à ces deux champs de vagues, qui présentent des spectres identiques. De façon générale, la génération des quantités spectrales cibles semble maîtrisée pour cet état de mer modéré. L’influence de la position cible et des paramètres de résolution numérique est très limitée. Les critères de qualification du spectre restent vérifiés bien au delà de la zone d’intérêt visée par la procédure corrective.

On s’intéresse désormais aux propriétés statistiques du champ de vagues. La figure 2a présente le kurtosis de l’élévation de surface libre le long du bassin pour les différentes configurations générées. Pour un modèle de vagues donné, l’évolution spatiale du kurtosis est identique quelque soit la position visée (alors que les conditions initiales peuvent être légèrement différentes). Cependant, on remarque que le modèle de déferlement tend à restreindre la déviation à la Gaussienne observée. Dans tous les cas, le kurtosis croît sur une zone proche du batteur et longue d’environ trois longueurs d’onde avant de converger. Les non-linéarités à l’oeuvre lors de la propagation sont responsables de l’écart à la gaussianité et donc de l’augmentation de la probabilité d’occurrence des évènements extrêmes. La zone de croissance est courte, les instabilités modulationnelles sont relativement réduites, le spectre étant assez étalé en fréquence ($\gamma = 1$). Ce type d’évolution est largement connu et étudié [7, 11].

Les distributions de hauteur de crêtes (PDER) à la position cible sont présentées dans la figure 2b. Comparons d’abord les deux configurations visant le spectre à $x = 3\lambda_p$ du batteur, l’une avec (courbe cyan) et l’autre sans (courbe noire) modèle de déferlement. Pour ce dernier cas, une déviation aux distributions de référence est observée, en particulier pour les grandes hauteurs de crête (*i.e.* $H_c/H_s > 1.1$). La distribution

de Huang [12] sous-estime le nombre d'évènements extrêmes. Selon les critères introduits dans la partie 3.2, l'état de mer n'est plus qualifié. En présence du modèle de déferlement ce phénomène n'apparaît pas. La distribution associée est en effet parfaitement alignée avec la référence de Huang. La légère dissipation des hautes fréquences précédemment observée se trouve donc avoir une influence significative sur les quantités statistiques.

D'autre part lorsque la zone cible est plus éloignée du batteur (courbe noire pointillée), à un même niveau de probabilité, les évènements sont légèrement plus extrêmes, en accord avec l'évolution du kurtosis précédemment observée. Il convient alors de noter qu'un même spectre qualifié est ici à l'origine de trois distributions différentes, dû au changement i) de la position cible (modification associée à la physique des vagues) et ii) du modèle de vagues (qui constitue un aspect purement numérique). Concernant ce dernier point, la variation du comportement statistique et son importante sensibilité montre qu'il est important de valider expérimentalement les modèles numériques. En effet, le contrôle de la densité spectrale d'énergie à la position cible ne donne pas forcément d'information sur la validité des données numériques obtenues.

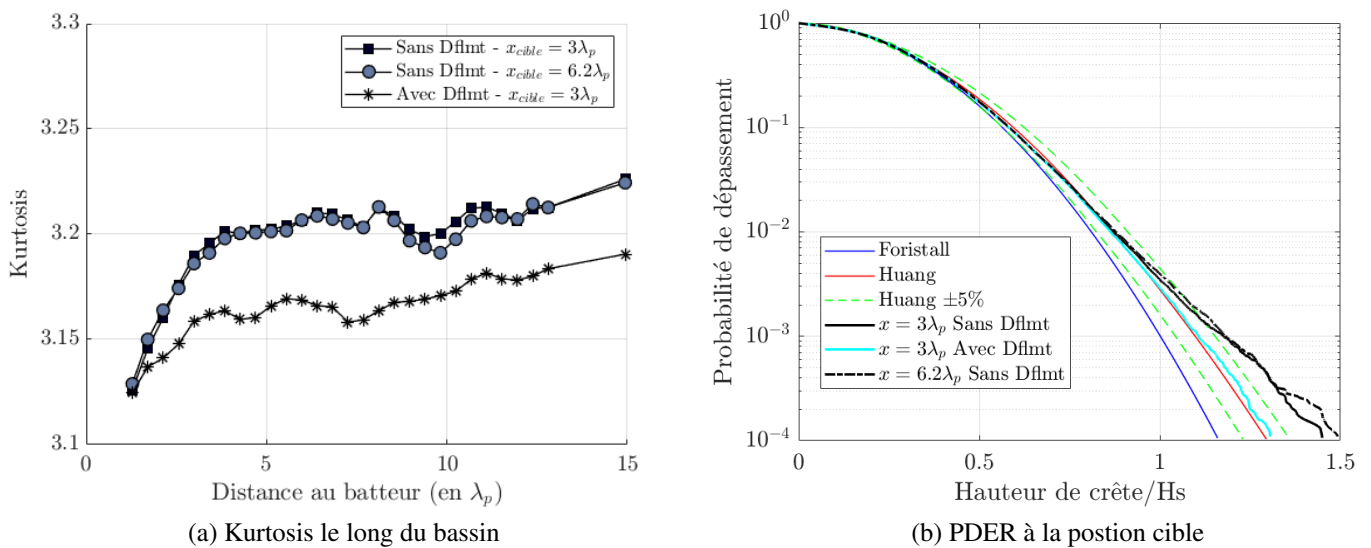


Figure 2. ss6, étude statistique, après convergence du spectre cible.

5.2 Etude d'un Etat de Mer Extrême

On s'intéresse désormais à l'état de mer GOM. Ce dernier correspond à des conditions de houles extrêmes, associées à de nombreux évènements déferlants, modifiant de façon importante le spectre le long du bassin. Entre 4 et 5 itérations sont nécessaires à la convergence du spectre pour les positions $x = 2\lambda_p$ et $x = 4.5\lambda_p$ testées. La figure 3a présente le spectre de houle au cours de la propagation dans le bassin, après convergence de la procédure corrective. La position cible est ici $x = 2\lambda_p$ et la discrétisation spatiale utilisée est $k_{max} = 15k_p$, ce qui correspond à la plus grande résolution permise par la sévérité du champ de vagues. L'évolution spatiale du spectre apparaît clairement. L'énergie des fréquences supérieures à la fréquence de pic est dissipée le long du bassin. La procédure corrective, à l'origine d'un surplus d'énergie généré par le batteur, permet l'obtention du spectre cible à la position visée (spectre rouge dans la figure 3a). Des résultats similaires ont été obtenus pour les configurations sous-discrétisées $k_{max} = 7k_p$ et $10k_p$. Avec ces modèles, que l'on sait moins précis, il est aussi possible d'obtenir un spectre de forme correcte dans la zone d'intérêt. Notons toutefois qu'avec le modèle de déferlement utilisé, la discrétisation influe sur la dissipation d'énergie, cf figure 3b.

La procédure de génération mise en place permet donc avec succès de reproduire les caractéristiques spectrales de cet état de mer extrême à $x = 2\lambda_p$. L'utilisation de positions cibles plus éloignées du batteur est cependant limitée par le manque de robustesse du modèle de déferlement face aux instabilités numériques.

Pour la position cible $x = 4.5\lambda_p$, la résolution est ainsi restreinte à $k_{max} \leq 10k_p$. L'état de mer alors généré respecte les critères de qualification. Toutefois, la pertinence de la physique modélisée, associée à un déferlement atténué, peut être mise en doute.

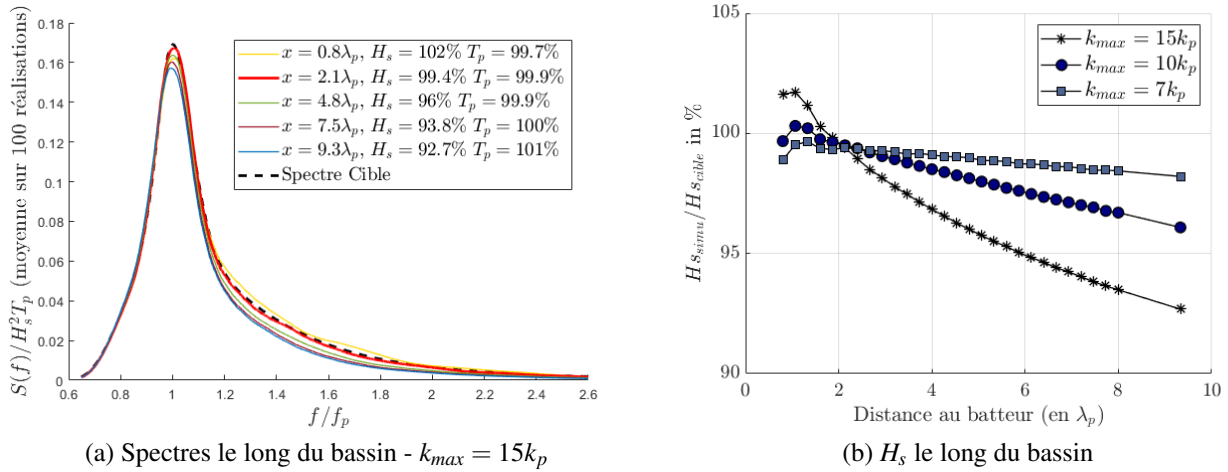


Figure 3. GOM, quantités spectrales le long du bassin, position cible $x = 2\lambda_p$.

On s'intéresse désormais aux caractéristiques statistiques du champ de vagues. La figure 4a présente l'évolution du kurtosis le long du bassin. La position cible est $x = 2\lambda_p$. Quelque soit la résolution spatiale, la probabilité d'occurrence des événements extrêmes augmente le long de la propagation. Il s'agit du même comportement que celui observé avec l'état de mer ss6 et reporté dans la littérature [7]. Toutefois, l'état stationnaire ne semble ici pas atteint avant une distance d'au moins huit longueurs d'onde. Le spectre étant plus non-linéaire et plus étroit en fréquence, le phénomène d'auto-focalisation associée à l'instabilité modulationnelle est plus présent [10]. On remarque que pour les faibles résolutions spatiales, les valeurs de kurtosis sont plus élevées. On en déduit que le modèle de déferlement, moins actif pour ces configurations, limite l'émergence d'évènements extrêmes. Ce phénomène peut s'expliquer naturellement par le caractère local du modèle utilisé qui s'active pour les évènements les plus cambrés, propices au déferlement et généralement associés à une hauteur de crête élevée. Il convient de noter que pour les trois configurations présentées les paramètres du modèle numérique diffèrent et que donc la physique résolue n'est pas la même.

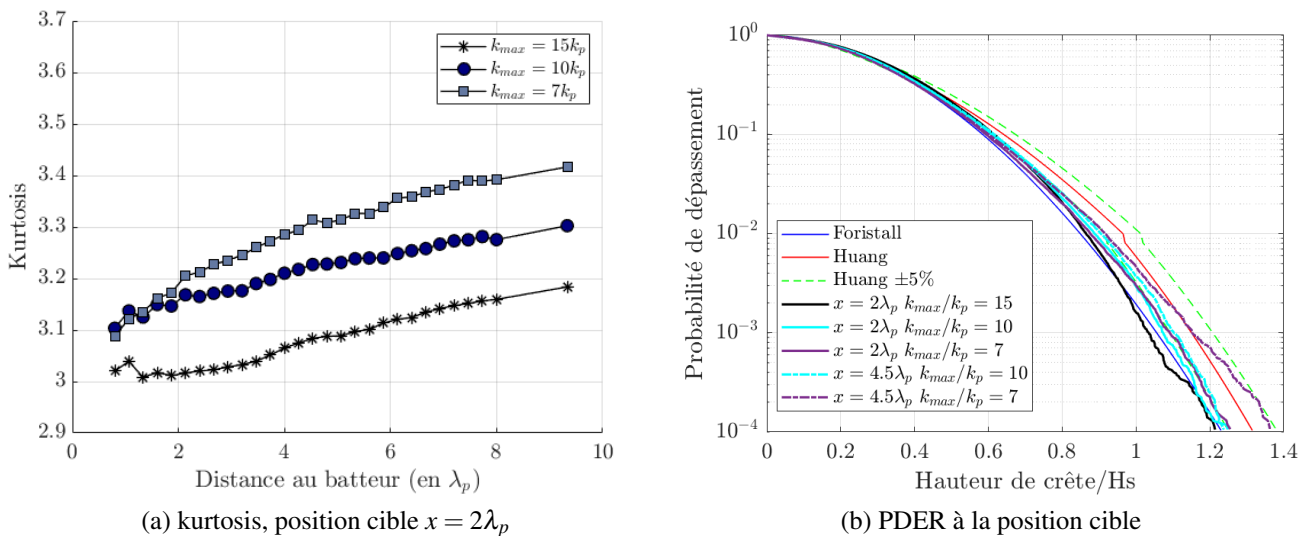


Figure 4. GOM, étude statistique après convergence du spectre cible.

La figure 4b présente les distributions de crête pour les cinq configurations générées (cible à 2 puis $4.5\lambda_p$ et discrétisation spatiale variant de $k_{max} = 15$ à $7k_p$). On rappelle que les instabilités numériques limitent à $k_{max} = 10k_p$ la résolution des configurations visant le spectre cible à $x = 4.5\lambda_p$. Pour la position cible proche du batteur, les distributions présentées sont assez similaires. Les effets du troisième ordre semblent limités, les statistiques étant proches des prévisions de Forristall. La diminution de la résolution spatiale est à l'origine d'une légère augmentation des hauteurs de crête à un même niveau de probabilité. Ce phénomène est en accord avec les valeurs de kurtosis précédemment analysées. La comparaison des configurations ($x_{cible} = 2\lambda_p$, $k_{max}/k_p = 7$ ou 10) et ($x_{cible} = 4.5\lambda_p$, $k_{max}/k_p = 7$ ou 10) permet d'étudier l'influence de la position cible. Plus on s'éloigne du batteur, plus les queues des distributions de crêtes se décalent vers la droite (*i.e.* nombre d'évènements extrêmes plus important). Le phénomène est notamment marqué pour le cas de très faible discrétisation $k_{max}/k_p = 7$. Cette observation est là aussi cohérente avec l'analyse du kurtosis le long du bassin. Pour plusieurs configurations, incluant le cas le plus fiable a priori (cible à $x = 2\lambda_p$ et $k_{max} = 15k_p$), la distribution de crête est en dehors de l'intervalle de 5% entourant la courbe de Huang. Le champ de vagues n'est alors pas qualifié suivant les critères établis par l'ingénierie offshore [1]. Des résultats expérimentaux récents reprenant la même configuration tendent à confirmer les résultats numériques présents à savoir que la référence de Huang surestime la probabilité des évènements extrêmes pour cet état de mer fortement déferlant pour des positions cibles proche du batteur. Cette étude expérimentale, complétant les travaux numériques présentés ici, est l'objet d'un article en cours de préparation.

Comme cela avait déjà été observé pour l'état de mer ss6, les différentes configurations présentées montrent qu'à la position cible, un même spectre de vague peut être associé à des statistiques différentes, dépendant i) du modèle numérique choisi et ii) de la position cible. Les implications sont significatives dans le choix de la méthodologie de design des structures en mer. La validation du modèle de vague et des statistiques associées ainsi que le choix des paramètres numériques apparaissent comme une première étape cruciale.

6. Conclusion

Une procédure de correction itérative permettant la génération d'un spectre de vagues donné à une position cible d'un bassin numérique a été implémentée avec succès, pour des conditions de houle modérées et extrêmes. Le comportement statistique obtenu après convergence d'un même spectre dans la zone d'intérêt diffère selon i) la physique des vagues (modification de la position cible au batteur) et ii) le modèle numérique (présence d'un modèle de déferlement et modification de la discrétisation spatiale). Il convient donc de faire attention à la méthodologie utilisée. Pour les deux états de mer étudiés, le phénomène d'auto-focalisation associée à l'instabilité modulationnelle est à l'origine d'une augmentation de la probabilité d'occurrence des évènements extrêmes le long du bassin, rendant les distributions de hauteur de crête à la position cible dépendantes de la distance au batteur. Ce phénomène physique connu et étudié [7, 10] est d'autant plus prononcé pour des conditions de houle associées à i) des plus fortes cambrures et ii) un spectre étroit en fréquence. La prise en compte de ce phénomène dans le choix de la méthodologie de design des structures en mer apparaît donc nécessaire. Toutefois, il est tout d'abord crucial de se concentrer sur la validité du modèle numérique utilisé. Pour l'état de mer modéré étudié, l'ajout d'un modèle de déferlement, efficace pour traiter les instabilités numériques, modifie significativement la distribution de crête à la position cible, malgré l'obtention d'un spectre qualifié. D'autre part, pour l'état de mer extrême, le modèle de déferlement utilisé est sensible à la discrétisation spatiale, ce qui est aussi à l'origine de comportements statistiques différents. Ces observations montrent l'important de valider expérimentalement les modèles numériques. Le contrôle de la densité spectrale d'énergie à la position cible ne donne pas forcément d'information sur la validité des données numériques obtenues. Des travaux expérimentaux récents reprenant la même configuration compléteront cette étude numérique. L'établissement et la validation d'un modèle de déferlement plus robuste et plus adapté aux états de mer extrêmes sont aussi sujets à des études en cours [26].

Remerciements

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre de la Chaire Hydrodynamique et Structure Marines CENTRALE NANTES - BUREAU VERITAS. Les auteurs souhaitent remercier les acteurs du JIP en cours "Reproducible CFD Modeling Practice for Offshore Applications" [1], qui ont contribué à la méthodologie et au choix des conditions de houle.

References

- [1] N. P. Workgroup, "Year 1 report," tech. rep., JIP on Reproducible CFD Modeling Practice for Offshore Applications, 2019.
- [2] M. Canard, G. Ducrozet, and B. Bouscasse, "Generation of 3hr long-crested waves of extreme sea states with hsnwt solver," in *ASME 2020 39th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2020.
- [3] M. S. Longuet-Higgins, "On the statistical distribution of the height of sea waves," *JMR*, vol. 11, pp. 245–266, 1952.
- [4] G. Z. Forristall, "Wave crest distributions: Observations and second-order theory," *Journal of physical oceanography*, vol. 30, no. 8, pp. 1931–1943, 2000.
- [5] D. N. Veritas, "Environmental conditions and environmental loads, recommended practice dnv-rp-c205," 2010.
- [6] P. Petrova, Z. Cherneva, and C. G. Soares, "Distribution of crest heights in sea states with abnormal waves," *Applied Ocean Research*, vol. 28, no. 4, pp. 235–245, 2006.
- [7] M. Onorato, A. R. Osborne, M. Serio, L. Cavaleri, C. Brandini, and C. Stansberg, "Extreme waves, modulational instability and second order theory: wave flume experiments on irregular waves," *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, vol. 25, no. 5, pp. 586–601, 2006.
- [8] I. Karpadakis, C. Swan, and M. Christou, "Laboratory investigation of crest height statistics in intermediate water depths," *Proceedings of the Royal Society A*, vol. 475, no. 2229, p. 20190183, 2019.
- [9] L. Shemer, A. Sergeeva, and D. Liberzon, "Effect of the initial spectrum on the spatial evolution of statistics of unidirectional nonlinear random waves," *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol. 115, no. C12, 2010.
- [10] P. A. Janssen, "Nonlinear four-wave interactions and freak waves," *Journal of Physical Oceanography*, vol. 33, no. 4, pp. 863–884, 2003.
- [11] M. Onorato, L. Cavaleri, S. Fouques, O. Gramstad, P. A. Janssen, J. Monbaliu, A. R. Osborne, C. Pakoz characterised by statistical properties, giving an efficient overview of extreme events. di, M. Serio, C. Stansberg, *et al.*, "Statistical properties of mechanically generated surface gravity waves: a laboratory experiment in a three-dimensional wave basin," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 627, pp. 235–257, 2009.
- [12] Z. J. Huang and Y. Zhang, "Semi-empirical single realization and ensemble crest distributions of long-crest nonlinear waves," in *ASME 2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2018.
- [13] F. Copie, S. Randoux, and P. Suret, "The physics of the one-dimensional nonlinear schrödinger equation in fiber optics: rogue waves, modulation instability and self-focusing phenomena," *Reviews in Physics*, vol. 5, p. 100037, 2020.
- [14] G. Ducrozet, F. Bonnefoy, D. Le Touzé, and P. Ferrant, "A modified high-order spectral method for wavemaker modeling in a numerical wave tank," *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, vol. 34, pp. 19–34, 2012.
- [15] B. R. Seiffert, G. Ducrozet, and F. Bonnefoy, "Simulation of breaking waves using the high-order spectral method with laboratory experiments: Wave-breaking onset," *Ocean Modelling*, vol. 119, pp. 94–104, 2017.
- [16] B. R. Seiffert and G. Ducrozet, "Simulation of breaking waves using the high-order spectral method with laboratory experiments: wave-breaking energy dissipation," *Ocean Dynamics*, vol. 68, no. 1, pp. 65–89, 2018.

- [17] V. E. Zakharov, “Stability of periodic waves of finite amplitude on the surface of a deep fluid,” *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, vol. 9, no. 2, pp. 190–194, 1968.
- [18] D. G. Dommermuth and D. K. Yue, “A high-order spectral method for the study of nonlinear gravity waves,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 184, pp. 267–288, 1987.
- [19] B. J. West, K. A. Brueckner, R. S. Janda, D. M. Milder, and R. L. Milton, “A new numerical method for surface hydrodynamics,” *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol. 92, no. C11, pp. 11803–11824, 1987.
- [20] Y. Agnon and H. B. Bingham, “A non-periodic spectral method with application to nonlinear water waves,” *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, vol. 18, no. 3, pp. 527–534, 1999.
- [21] X. Barthelemy, M. Banner, W. Peirson, F. Fedele, M. Allis, and F. Dias, “On a unified breaking onset threshold for gravity waves in deep and intermediate depth water,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 841, pp. 463–488, 2018.
- [22] Z. Tian, M. Perlin, and W. Choi, “An eddy viscosity model for two-dimensional breaking waves and its validation with laboratory experiments,” *Physics of Fluids*, vol. 24, no. 3, p. 036601, 2012.
- [23] E. Buldakov, D. Stagonas, and R. Simons, “Extreme wave groups in a wave flume: Controlled generation and breaking onset,” *Coastal Engineering*, vol. 128, pp. 75–83, 2017.
- [24] G. J. Komen, L. Cavaleri, M. Donelan, K. Hasselmann, S. Hasselmann, and P. Janssen, “Dynamics and modelling of ocean waves,” *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*, by GJ Komen and L. Cavaleri and M. Donelan and K. Hasselmann and S. Hasselmann and PAEM Janssen, pp. 554. ISBN 0521577810. Cambridge, UK: Cambridge University Press, August 1996., p. 554, 1996.
- [25] G. Ducrozet, F. Bonnefoy, and Y. Perignon, “Applicability and limitations of highly non-linear potential flow solvers in the context of water waves,” *Ocean Engineering*, vol. 142, pp. 233–244, 2017.
- [26] B. R. Seiffert and G. Ducrozet, “A comparative study of wave breaking models in a high-order spectral model,” in *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, vol. 57748, p. V07BT06A050, American Society of Mechanical Engineers, 2017.