

**VALIDATION EXPÉRIMENTALE D'UNE MÉTHODE DE PRÉDICTION
DÉTERMINISTE DE HOULE NON-LINÉAIRE PAR MESURE DU PROFIL DE
VITESSES**

17^{èmes} JOURNEES DE L'HYDRODYNAMIQUE JH2020

M. Huchet^{(1),*}, G. Ducrozet⁽¹⁾, J.-C. Gilloteaux⁽¹⁾, A. Babarit⁽¹⁾, and P. Ferrant⁽¹⁾

⁽¹⁾LHEEA, Centrale Nantes / CNRS, France

*Corresponding author : marion.huchet@ec-nantes.fr

Résumé

L'article porte sur la validation expérimentale d'une méthode de prédiction de houle déterministe et non-linéaire, reposant sur des profils instantanés de vitesse horizontale mesurés en amont de la zone d'intérêt. La méthode est validée en bassin sur de la houle uni-directionnelle irrégulière. Les essais conduits ont pour objectifs de valider la possibilité de reconstruire un profil instantané de vitesse horizontale à partir de vitesses verticales mesurées par ADCP, et d'évaluer la qualité de la houle obtenue par la méthode de prédiction étudiée. L'article présente les modalités d'obtention des mesures en bassin, leur traitement et les résultats obtenus, sur la reconstruction des vitesses horizontales comme sur la prédiction d'élévation de surface libre. Les résultats sont évalués par comparaison avec des simulations numériques de référence ainsi qu'avec des mesures d'élévation de surface libre fournies par des sondes à houle. Malgré des difficultés techniques compliquant la reconstruction précise d'un profil de vitesses horizontales, la méthode permet d'obtenir suffisamment d'informations sur l'état de mer incident pour produire une prédiction de vague de qualité, à condition que les conditions expérimentales soient maîtrisées.

Summary

This paper deals with the experimental validation of a nonlinear, deterministic wave prediction method using horizontal velocity profiles measured upstream the prediction zone. Based on irregular long-crested waves, the experiments aim at validating the possibility of reconstructing an instantaneous horizontal velocity profile from vertical velocities measured with ADCP, as well as assessing the quality of the prediction obtained with the method considered. The article presents the experimental protocol and the post-processing choices, then the results on horizontal velocity reconstruction and on the predicted sea surface elevation. The quality is assessed using reference simulations as well as wave probes measurements. Technical challenges associated with using ADCP in wave tanks make it difficult to reconstruct the horizontal velocity profile with a level of accuracy as high as expected. Nevertheless, under controlled experimental conditions, sufficient information can be gathered on the incoming waves and the method proves able to provide a prediction of satisfying quality.

1. Introduction

Ces deux dernières décennies, l'amélioration conjointe des capacités de calcul numérique et des moyens de mesure de l'état de mer, tant au niveau de l'instrumentation que du traitement du signal, ont ouvert de nouvelles perspectives pour la prédiction déterministe de houle. Les applications potentielles concernent plusieurs domaines du génie océanique, notamment le développement des énergies marines renouvelables : prévoir la houle arrivant sur des systèmes houlomoteurs à un horizon de quelques dizaines de secondes permettrait par exemple d'améliorer significativement la performance de ces machines, via des lois de contrôle adaptées [1]. Dans ce contexte, le travail présenté ici rend compte de la validation expérimentale d'une méthode de prédiction de houle déterministe et non-linéaire, par mesure de vitesses en amont de la zone d'intérêt. L'objectif est de fournir une prédiction fiable à un horizon de quelques périodes pic. L'approche retenue s'appuie, comme d'autres avant elles [2–4], sur la mesure d'un état de mer amont et la propagation non-linéaire des vagues à l'aide d'une méthode de type HOS. L'originalité de la démarche réside dans le fait que contrairement à une formulation HOS classique, le modèle de propagation adopté ici utilise des informations sur l'état de mer incident sous la forme d'un profil instantané de vitesses et non de champs initiaux d'élévation de surface libre et de potentiel surfacique des vitesses, ce qui permet d'exploiter d'autres types de mesures de l'état de mer que les images radar généralement privilégiées dans ce genre de situations [3, 5]. La solution technique choisie pour mesurer les vagues incidentes est l'utilisation de profileurs acoustiques à effet Doppler (ADCP), fournissant la vitesse verticale dans la colonne d'eau en amont de la zone d'intérêt.

Le travail de validation expérimentale présenté ici s'inscrit dans la continuité des vérifications numériques préliminaires déjà réalisées pour cette méthode, et qui ont fait l'objet d'une publication dans l'édition 2018 des Journées de l'Hydrodynamique [6]. Les objectifs de cette étude sont triples. Il s'agit d'abord de valider la capacité d'un ADCP à mesurer des vitesses *instantanées* dues à la propagation de houle en conditions contrôlées, puis de confirmer la possibilité de reconstruire un profil instantané de vitesses horizontales à partir des données récoltées. Enfin, le procédé doit permettre d'évaluer la qualité de la prédiction de houle obtenue avec les informations collectées et la méthode générale mise en œuvre. Pour cela, plusieurs cas de houle irrégulière ont été générés et mesurés dans un des bassins d'essais de l'ECN. Après un exposé succinct de la méthode de prédiction, l'article présente les modalités d'obtention des mesures, leur traitement et les résultats obtenus, sur la reconstruction des profils de vitesse comme sur la prédiction de houle. L'évaluation de la méthode se fait par comparaison avec des simulations numériques de référence pour la reconstruction des vitesses, et avec les mesures d'élévation de surface libre pour la prédiction.

2. Méthode de prédiction

2.1 Hypothèses et principe général

On se place en deux dimensions (houle uni-directionnelle) et en profondeur intermédiaire constante h . L'influence du forçage par le vent, celle des courants et le déferlement sont ignorées. Le domaine spatial considéré, noté \mathcal{D} , est associé au système de coordonnées cartésien (O, x, z) . L'axe vertical (Oz) est orienté vers le haut et l'altitude $z = 0$ correspond au niveau de la surface libre au repos. Les vagues se propagent suivant l'axe horizontal (Ox) , dans le sens des x croissants. La zone d'étude est délimitée horizontalement par les bornes notées $x = x_0$ et $x = x_0 + L_x$, et verticalement par le fond plat en $z = -h$ et par la surface libre notée $\eta(x, t)$. La configuration générale est présentée sur la Figure 1. En supposant le fluide incompressible et non visqueux, et l'écoulement irrotationnel, on se place dans le cadre de la théorie des écoulements potentiels.

La méthode de prédiction proposée, illustrée sur la Figure 1, consiste à mesurer la vitesse de l'écoulement due à la houle dans la colonne d'eau, en un point fixe noté x_0 . Les mesures sont utilisées pour reconstruire le profil de la composante horizontale de la vitesse instantanée en x_0 : $U(x_0, z, t)$. Ce profil est renseigné comme condition limite dans un modèle de vagues déterministe et non-linéaire. Partant d'un état initial au repos, le processus de prédiction se décompose en deux temps : la reconstruction de l'état de mer, puis la prédiction.

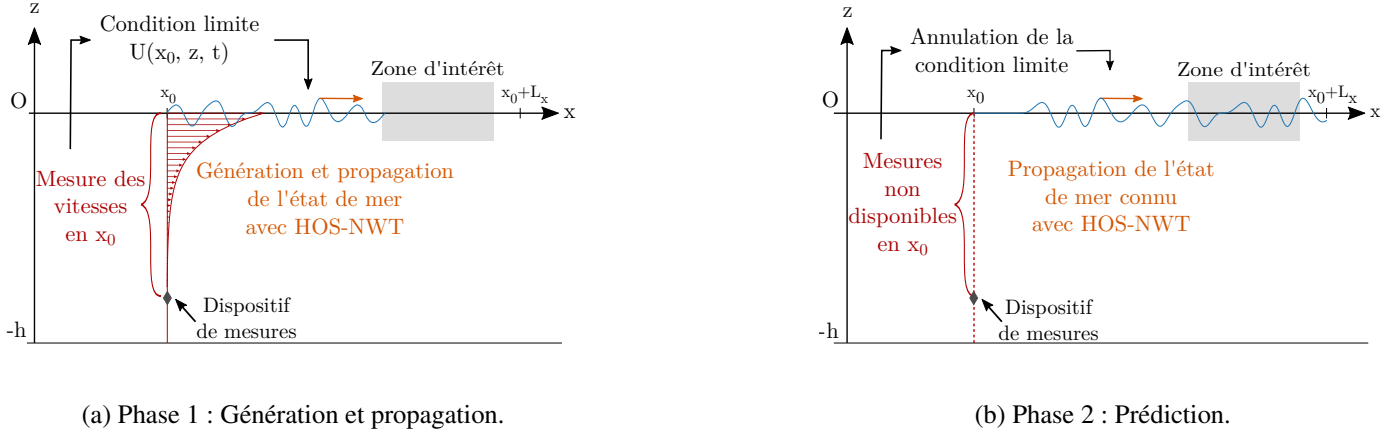


Figure 1. Méthode proposée pour la prédiction déterministe de vagues.

La phase de reconstruction, de durée T et située dans le passé par convention, est présentée sur la Figure 1a. Pour $-T \leq t \leq 0$, les mesures de vitesses obtenues en x_0 dans la colonne d'eau sont actualisées en permanence. Elles fournissent une condition limite au modèle utilisé ici, à savoir HOS-NWT [7], qui génère puis propage la houle incidente à partir de x_0 jusqu'à la zone d'intérêt en aval. Dans un deuxième temps illustré sur la Figure 1b, pour $t > 0$, les mesures de vitesses contenant l'information sur l'état de mer incident en x_0 ne sont plus mises à jour, et la condition limite est mise à zéro : le modèle ne propage alors plus que de l'information collectée avant $t = 0$, marquant le début de la phase de prédiction proprement dite en aval.

2.2 Zone de prédiction accessible

À l'instar d'autres méthodes de prédiction reposant sur la propagation d'informations collectées en amont de la zone d'intérêt, le procédé décrit ici ne peut fournir de reconstruction-prédiction fiable que sur une région finie. La zone de prédiction théorique, notée $\mathcal{D}_{x,t}$, désigne ainsi le domaine spatio-temporel rendu accessible par le calcul déterministe avec les informations dont on dispose. Cette notion est abordée en détail dans de nombreuses publications [8–12], et on se contente ici d'en donner la définition adaptée au contexte de l'étude, à savoir pour de la houle uni-directionnelle, mesurée en amont de la zone d'intérêt en un unique point fixe situé en x_0 , pendant une durée T ($t \in [-T; 0]$). En considérant qu'un état de mer est caractérisé par un spectre de vagues dont la majeure partie de l'énergie est concentrée autour du pic, un choix judicieux de bornes fréquentielles f_{min} et f_{max} permet de restreindre l'étude de la propagation aux composantes comprises entre ces bornes, tout en décrivant correctement l'évolution de l'état de mer. La zone de prédiction théorique, donnée ici pour notre domaine d'étude ($x \geq x_0$ et $t \geq -T$), est alors définie par la double inégalité suivante pour un point quelconque de coordonnées (x_1, t_1) :

$$(x_1, t_1) \in \mathcal{D}_{x,t} \quad \text{si} \quad -T + \frac{x_1 - x_0}{C_{gmin}} \leq t_1 \leq \frac{x_1 - x_0}{C_{gmax}} \quad (1)$$

où $C_{gmin} = C_g(f_{max})$ et $C_{gmax} = C_g(f_{min})$ sont les vitesses de groupe des composantes respectivement les plus lentes et les plus rapides de l'état de mer considéré. Comme évoqué précédemment, pour $t \in [-T; 0]$ la zone de prédiction s'apparente plutôt à une zone de reconstruction. La prédiction proprement dite ne concerne que la partie de la zone pour laquelle $t \in [0; t_{max}]$, avec $t_{max} = T \frac{C_{gmin}}{C_{gmax} - C_{gmin}}$ l'horizon maximal de prédiction. Ici, on choisit f_{min} et f_{max} telles qu'à l'extérieur de ces bornes, l'amplitude de chaque composante est inférieure à 2% de celle au pic du spectre.

2.3 Construction de la condition limite en x_0

Dans la méthode proposée, la difficulté principale consiste à trouver comment obtenir le profil instantané de la vitesse horizontale en x_0 pour alimenter le modèle de propagation des vagues. Il n'existe pas aujourd'hui

de technologie de mesure de l'état de mer capable de fournir ces données directement. C'est la raison pour laquelle un procédé de reconstruction du profil instantané de vitesse horizontale à partir de mesures d'ADCP a été proposé dans [6], dont le principe est brièvement rappelé ici.

Sous l'hypothèse d'écoulement irrotationnel énoncée en 2.1, en tout point du domaine $\partial_z U = \partial_x W$, où U et W sont les composantes horizontale et verticale de la vitesse du fluide, et ∂_x et ∂_z les dérivées partielles par rapport à x et à z . À chaque instant t et en toute profondeur z_0 , la vitesse horizontale en x_0 peut alors s'exprimer en fonction de $\partial_x W(x_0, z_0, t)$ et d'une vitesse horizontale de référence $U(x_0, z_{ref}, t)$ connue à une profondeur arbitraire z_{ref} . On suppose maintenant que deux dispositifs de mesures, espacés de Δx , fournissent des profils instantanés de vitesse verticale W sur toute la colonne d'eau en $x = x_0 \pm \Delta x/2$. À condition que Δx soit petit et que les mesures des deux instruments soient synchronisées, on peut écrire une expression approchée de $\partial_x W$ par différences finies puis en déduire, avec une intégration par méthode des trapèzes, une expression pour la vitesse horizontale :

$$\widehat{U}(x_0, z_0, t) = \frac{1}{\Delta x} \sum_{k=1}^{N_z} \frac{\Delta W(x_0, z_{k-1}, t) + \Delta W(x_0, z_k, t)}{2} \Delta z_k + U(x_0, z_{ref}, t) + O(\Delta x^2) + O(\Delta z^2) \quad (2)$$

avec $\Delta W(x_0, z, t) = W(x_0 + \Delta x/2, z, t) - W(x_0 - \Delta x/2, z, t)$, et z_k les coordonnées des points divisant l'intervalle $[z_{ref}; z_0]$ en N_z sous-intervalles (*a priori* non réguliers) de longueur Δz_k . Dans le cadre de la validation expérimentale, la vitesse horizontale de référence $U(x_0, z_{ref}, t)$ peut être fournie par un ADV, et les profils instantanés de vitesse verticale $W(x_0 \pm \Delta x/2, z, t)$ par deux ADCP installés tête vers le haut.

2.4 Modèle de propagation

Une fois le profil de vitesse horizontale reconstruit en x_0 à partir des mesures effectuées, la houle est générée et propagée suivant (Ox) grâce au code open-source HOS-NWT^[1]. Il s'agit d'un modèle de bassin de houle numérique déterministe et non-linéaire, reposant sur la méthode HOS. Son fonctionnement est brièvement décrit ici, mais pour plus d'informations on pourra se référer à [7]. Dans le repère défini en 2.1, le domaine de simulation est délimité verticalement par la surface libre en $z = \eta(x, t)$ et le fond plat en $z = -h$, et horizontalement par les sections $x = x_0$ et $x = x_0 + L_x$ avec L_x la taille du bassin. Sous les hypothèses d'écoulement potentiel précédemment énoncées, les équations à résoudre se présentent sous la forme suivante :

$$\Delta \phi = 0 \quad \text{dans } \mathcal{D} \quad (3)$$

$$\partial_z \phi = 0 \quad \text{en } z = -h \quad (4)$$

$$\partial_x \phi = 0 \quad \text{en } x = x_0 + L_x \quad (5)$$

$$\partial_x \phi = U(z, t) \quad \text{en } x = x_0 \quad (6)$$

$$\partial_t \eta = (1 + |\nabla \eta|^2) \partial_z \phi - \nabla \phi^S \cdot \nabla \eta \quad \text{en } z = \eta(x, t) \quad (7)$$

$$\partial_t \phi^S = -g\eta - \frac{1}{2} |\nabla \phi^S|^2 + \frac{1}{2} (1 + |\nabla \eta|^2) (\partial_z \phi)^2 \quad \text{en } z = \eta(x, t) \quad (8)$$

où ϕ est le potentiel des vitesses dans le domaine \mathcal{D} , $\phi^S(x, t) = \phi(x, z = \eta, t)$ le potentiel surfacique et $U(z, t)$ le profil instantané de vitesse horizontale renseigné sur toute la colonne d'eau. L'équation (6) traduit l'imposition de ce flux représentant la cinématique due à la houle et diffère légèrement en cela de la version originelle du code, qui prend en compte une condition de flux nul appliquée sur la paroi mobile du batteur. Les équations de surface libre (7) et (8) sont écrites de façon complètement non-linéaire et ne font intervenir que des quantités surfaciques, à l'exception de $\partial_z \phi$, la vitesse verticale. La détermination de cette vitesse et l'avance en temps des quantités surfaciques η et ϕ^S constituent le cœur de la méthode HOS [13, 14], qui permet une résolution rapide et précise avec un ordre de non-linéarité M arbitraire.

[1]. Disponible à l'adresse : <https://github.com/LHEEA/HOS-NWT>

Le modèle HOS-NWT a été choisi pour ses très bonnes performances numériques et son haut niveau de précision, permettant d'étudier la propagation d'états de mer complexes en tenant compte des non-linéarités, tout en conservant une possibilité d'application en temps réel. Contrairement au formalisme HOS originel [13,14], le modèle HOS-NWT utilise une condition initiale au repos, les vagues étant générées par la condition à la limite inhomogène (6). L'intérêt majeur de la méthode développée ici réside dans cette particularité, car elle permet de s'affranchir de l'étape d'assimilation de données habituellement requise pour initialiser le modèle de propagation avec des champs surfaciques η et ϕ^s , responsable en temps normal de la majeure partie du temps de calcul nécessaire pour obtenir une prédiction [2].

3. Dispositif expérimental et numérique

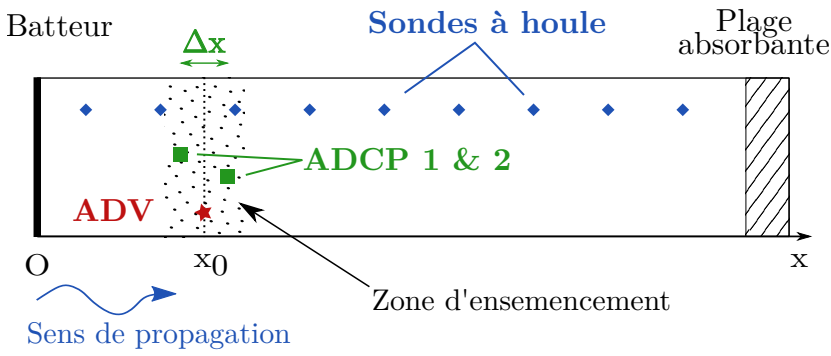
Après de premières vérifications numériques satisfaisantes [6], la méthode de prédiction est validée en houle uni-directionnelle dans le bassin de traction de Centrale Nantes, de dimensions $L = 140\text{m} \times l = 5\text{m} \times P = 3\text{m}$. Il est équipé, à l'une de ses extrémités, d'un batteur à houle uni-directionnel de type volet, et à l'autre d'une plage absorbante. L'origine de l'axe (Ox) est fixé au niveau du batteur au repos, avec x croissant dans le sens de la propagation des vagues, vers la plage absorbante. Lors des essais, la hauteur d'eau au repos est de $h = 2,90\text{m}$.

Les états de mer testés sont des houles irrégulières uni-directionnelles caractérisées par un spectre de Pierson-Moskowitz. Deux périodes de pic sont considérées ici : $T_p = 2\text{s}$ (cas A) et $T_p = 3\text{s}$ (cas B). Pour chaque cas, la hauteur significative est choisie de façon à obtenir une cambrure significative modérée : $\varepsilon_c = H_s/\lambda_p = 1\%$, soit $H_s = 6\text{cm}$ pour le cas A et $H_s = 12\text{cm}$ pour le cas B. Dix tirages de phase ont été réalisés pour chaque état de mer, mais on s'intéresse ici à une seule réalisation par état de mer.

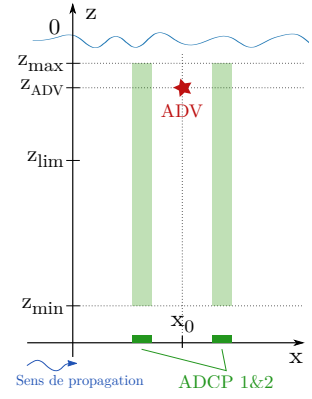
3.1 Montage expérimental

Afin de valider à la fois le principe de reconstruction du profil de vitesse horizontale en x_0 et la méthode de prédiction, le dispositif expérimental mesure l'élévation de surface libre $\eta(x,t)$, la vitesse horizontale en une profondeur ponctuelle : $U(x_0, z_{ref}, t)$, ainsi que deux profils de vitesse verticale dans la colonne d'eau : $W(x_0 \pm \Delta x/2, z, t)$. L'élévation de surface libre est obtenue en différents points du bassin par des sondes à houle disposées tous les 6 m, de $x_{s1} = 6\text{m}$ jusqu'à $x_{s20} = 120\text{m}$. Leur fréquence d'acquisition est fixée à 64 Hz. La mesure de la vitesse horizontale de référence $U(x_0, z_{ref}, t)$, requise pour reconstruire le profil instantané de vitesse horizontale comme décrit en 2.3, est quant à elle assurée par un vélocimètre acoustique à effet Doppler ou ADV, fixé en $x_0 = 20\text{m}$ et $z_{ref} = z_{ADV} = -0,54\text{m}$. L'ADV utilisé est un *Vectrino* (Nortek) dont la fréquence d'acquisition est de 16 Hz. Le corps de l'instrument est fixé sur un pilier immergé dans le bassin, tandis que la tige portant les émetteurs permet de mesurer suffisamment loin de la structure pour que l'écoulement ne soit pas influencé par la présence du pilier. Cette partie du montage expérimental est bien connue et ne présente pas de difficultés particulières.

L'originalité du dispositif réside dans la tentative de mesurer des *profils* de vitesses *instantanées* liées à la houle dans le fluide $W(x_0 \pm \Delta x/2, z, t)$ à l'aide d'ADCP, ce qui représente un détournement de leur utilisation habituelle. Ces instruments sont en effet conçus à l'origine pour mesurer des courants ou des informations *moyennées* comme le spectre de houle. Ici à l'inverse, ce sont les mesures brutes qui sont utilisées, où chaque *ping* est exploité directement. Les profileurs de vitesses sont installés au fond du bassin, tête vers le haut, en $x_{ADCP_{1,2}} = x_0 \pm \frac{\Delta x}{2}$ avec $x_0 = 20\text{m}$. L'espacement dans le sens de propagation des vagues est de $\Delta x = 5\text{cm}$ (et de $\Delta y = 20\text{cm}$ dans la direction transversale). Les deux ADCP utilisés sont des *Signature 1000* (Nortek) dont seul le faisceau vertical, doté d'un mode Haute Résolution, est activé dans le présent montage, les quatre autres faisceaux étant désactivés pour éviter les interférences. En tenant compte de la zone aveugle juste devant l'instrument et de la dégradation du signal près de la surface libre (par réflexion sur l'interface), les mesures de W sont effectuées entre $z_{min} = -2,46\text{m}$ et $z_{max} = -0,08\text{m}$, avec une taille de cellule de mesure $\Delta z = 2\text{cm}$. La fréquence d'acquisition des ADCP est fixée à 8 Hz. La Figure 2 propose une vue schématique du montage général.



(a) Vue de dessus.



(b) Vue de côté (zoom autour de x_0).

Figure 2. Schéma du montage expérimental. Les distances réelles ne sont pas respectées. Les zones de couleur dans la Figure 2b représentent l'étendue des mesures par ADCP.

Le fonctionnement des ADCP et de l'ADV repose sur le fait que les ondes acoustiques émises sont réfléchies par des micro-particules en suspension dans le fluide : il est donc indispensable que le milieu contienne suffisamment de ces particules pour obtenir un retour signal correct. L'eau du bassin étant naturellement trop claire, la turbidité du milieu est augmentée artificiellement à l'aide d'un système qui, avant chaque essai, déverse en pluie au-dessus des instruments un mélange concentré d'eau du bassin et de micro-billes de verre creuses, de diamètre médian $10\ \mu\text{m}$ et de flottabilité très légèrement négative (densité : $1,1\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), leur permettant de couler très lentement. La qualité de l'ensemencement s'est avérée essentielle pour celle des mesures expérimentales en bassin.

Enfin, pour tous les instruments présentés (sondes à houles, vélocimètre, profileurs) le début de l'enregistrement est déclenché par le signal de mise en route du batteur, assurant la synchronisation des données récoltées. La durée des mesures est de 350 s à compter du démarrage du batteur. Elle est suffisamment longue pour inclure le temps d'établissement complet de la houle et la propagation des vagues générées dans la zone d'intérêt, mais reste inférieure à la période de répétition du mouvement batteur qui est ici de 512 s. Après chaque essai, une pause de plusieurs minutes est observée pour laisser au bassin le temps de revenir à l'état de repos.

3.2 Simulations numériques de référence et de prédiction

Chaque essai est reproduit numériquement deux fois : par une simulation de référence et par une simulation de prédiction. La première repose sur une fonctionnalité de la version originelle du bassin de houle numérique HOS-NWT qui permet de modéliser exactement le mouvement batteur imposé physiquement dans les expériences en bassin [7, 15]. Outre les informations surfaciques fournies directement par HOS-NWT, les champs de vitesses de référence $U_{ref}(x, z, t)$ et $W(x, z, t)$, sont calculés dans tout le domaine fluide grâce à une librairie dédiée, Grid2Grid^[2] [16, 17]. Cette simulation de référence permet d'évaluer la qualité du profil de vitesse horizontale $\hat{U}(x_0, z, t)$, reconstruit à partir des mesures d'ADCP et d'ADV. La deuxième simulation, quant à elle, utilise le modèle HOS-NWT de la façon décrite en 2.1, en prenant comme condition limite la vitesse horizontale $\hat{U}(x_0, z, t)$ reconstruite à partir des mesures d'ADCP et d'ADV. Elle produit une prédiction de surface libre $\hat{\eta}(x, t)$. Après une période de reconstruction de l'état de mer de $T_{rec} = 30T_p$ (à laquelle s'ajoute une rampe d'initialisation de la simulation de durée $5T_p$), la condition limite est mise à zéro et HOS-NWT ne propage plus que l'information déjà présente dans le domaine de simulation.

Pour les deux types de simulation, les états de mer sont reproduits en utilisant $N_x = 1024$ modes sur la surface libre, $N_z = 33$ modes sur la profondeur et un ordre de non-linéarité $M = 5$, avec un domaine de

[2]. Disponible à l'adresse : <https://github.com/LHEEA/Grid2Grid>

simulation de longueur $L_x = 140\text{m}$. Il est à noter que les simulations de prédiction sont en fait décalées dans l'espace par rapport aux expériences et aux simulations de référence puisque, en se plaçant dans le référentiel du bassin, la génération des vagues est forcée en $x_0 = 20\text{m}$ dans les simulations de prédiction alors qu'elle se fait en $x = 0$ dans le référentiel de la simulation. Le calcul de la zone de prédiction théorique est adapté en conséquence.

4. Traitement des données

Les mesures obtenues avec l'ADV ainsi que celles des sondes à houle sont de bonne qualité et sont donc simplement traitées par un filtre passe-bas idéal, de fréquence de coupure $f_c = 4\text{Hz}$. Les données des ADCP s'avèrent quant à elles de qualité variable, avec des signaux inexploitablement car trop bruités en-dessous de $z_{lim} \approx -1\text{m}$, probablement à cause d'une moindre présence de micro-particules (malgré le système d'ensemencement) et de la faiblesse des vitesses dans le bas de la colonne d'eau par rapport à la précision de l'instrument. Des points aberrants sont également présents dans les mesures, plus ou moins nombreux suivant la profondeur et l'essai considérés. En l'absence de solution ad hoc, une procédure de détection et remplacement des anomalies est mise en place, où les points aberrants dans les mesures d'ADCP sont identifiés par des règles basées sur des considérations physiques : pour un état de mer et une profondeur donnés, la vitesse instantanée comme le taux de variation entre deux mesures consécutives ne peuvent excéder certaines limites. Chaque point de mesure $W_{ADCP}(z, t)$ d'une série temporelle à une profondeur donnée est examiné, et la mesure est masquée si l'une des deux conditions suivantes est vérifiée :

$$|W_{ADCP}(z, t)| > W_{max}(z) \quad \text{ou} \quad |\Delta^\pm W_{ADCP}(z, t)| > \Delta W_{max}(z)$$

où le symbole \pm signale qu'à la fois la différence entre la mesure courante et la précédente, ainsi que la différence entre la mesure courante et la suivante, dépassent le seuil fixé. Pour chaque profondeur, les seuils des valeurs acceptables pour les amplitudes des vitesses $W_{max}(z)$ et pour leur variation $\Delta W_{max}(z)$ sont établis à partir des simulations de référence reproduisant l'état de mer étudié (cf §3.2), mais pourraient également être estimés à partir des maxima issus de la théorie linéaire.

La proportion de points signalés comme aberrants dans une série temporelle permet de définir une limite z_{lim} en-dessous de laquelle les mesures d'ADCP sont jugées inutilisables. Ici, $z_{lim} = -0,6\text{m}$ pour le cas A ($T_p = 2\text{s}$) et $z_{lim} = -0,98\text{m}$ pour le cas B ($T_p = 3\text{s}$). À chaque profondeur entre z_{lim} et z_{max} , la série temporelle (partiellement masquée) est ensuite complétée grâce à une première spline d'ordre 3, calculée uniquement à partir des mesures fiables. Puis, une deuxième spline d'ordre 3 appliquée verticalement sur chaque profil instantané de vitesse permet de lisser les données. Pour $z \in [z_{lim}; z_{max}]$, la vitesse horizontale reconstruite notée $\hat{U}(x_0, z, t)$ est ensuite obtenue via l'équation (2). Le terme $\Delta W(x_0, z, t) = (W_{ADCP1} - W_{ADCP2})$ est calculé à partir des portions de profils de vitesses verticales post-traitées. La vitesse horizontale U_{ADV} mesurée en $z_{ADV} = -0,54\text{m}$ est utilisée comme référence pour l'intégration en z , qui se fait vers le haut pour $z \in [z_{ADV}; z_{max}]$, et vers le bas pour $z \in [z_{lim}; z_{ADV}]$.

Dans les portions de colonne d'eau pour lesquelles les données de vitesse verticale (W_{ADCP1} ou W_{ADCP2}) sont inexploitablement, le profil de vitesse horizontale \hat{U} est extrapolé à partir de la reconstruction sur $[z_{lim}, z_{max}]$. Dans la partie supérieure de la colonne d'eau ($z > z_{max}$), la vitesse reconstruite est extrapolée au plus proche voisin : à chaque instant, $\hat{U}(x_0, z > z_{max}, t) = \hat{U}(x_0, z_{max}, t)$. Dans la partie inférieure de la colonne d'eau ($z \in [-h; z_{lim}]$), la vitesse est supposée nulle au fond : $\hat{U}(x_0, -h, t) = 0$, et interpolée linéairement à chaque pas de temps entre $z = -h$ et $z = z_{lim}$. Enfin, après le processus de reconstruction, un filtre passe-haut avec une fréquence de coupure $f_c = 0,1\text{Hz}$ est appliqué à la vitesse horizontale, supprimant les éventuelles basses fréquences présentes dans le signal reconstruit qui ne seraient pas utiles à la description de l'état de mer.

5. Résultats

5.1 Reconstruction de la vitesse horizontale

On compare ici la vitesse horizontale reconstruite en x_0 , notée \widehat{U} , à celle fournie par les simulations HOS-NWT de référence, notée U_{ref} . Afin de s'affranchir autant que possible de réflexions parasites dans le bassin physique, on restreint l'analyse à la plage temporelle T_{rec} délimitée par :

- l'instant d'établissement de l'état de mer complet en x_0 : $t_{min} = x_0/C_g(f_{max})$;
- l'instant d'arrivée en x_0 des vagues de fréquence f_p réfléchies par la plage en $x = L_x$, susceptibles de constituer la majeure partie des ondes parasites : $t_{max} = (2L_x - x_0)/C_g(f_p)$.

Cela correspond à une période minimale de reconstruction $T_{rec} \approx 70s \approx 23T_p$ obtenue pour les cas B ($T_p = 3s$).

Pour évaluer la qualité de la reconstruction, on a recours à la corrélation croisée, bien adaptée à la comparaison de signaux temporels car elle permet de caractériser à la fois l'erreur sur l'amplitude et l'erreur sur la phase. Pour chaque profondeur z_0 à laquelle on veut comparer $\widehat{U}(x_0, z_0, t)$ et $U_{ref}(x_0, z_0, t)$, la corrélation croisée normalisée est définie par :

$$C(\tau) = \frac{1}{T_{rec}} \int_0^{T_{rec}} \widehat{U}^*(x_0, z_0, t) U_{ref}^*(x_0, z_0, t + \tau) dt \quad (9)$$

où T_{rec} est la plage temporelle considérée pour la reconstruction, $U_{ref}^* = U_{ref}/\sigma_{U_{ref}}$ est la vitesse horizontale de référence normalisée par son écart-type calculé sur la période de reconstruction, et $\widehat{U}^* = \widehat{U}/\sigma_{\widehat{U}}$ désigne de même la vitesse horizontale reconstruite normalisée. L'équation (9) donne le facteur de corrélation C en fonction d'un délai τ : son maximum C_{max} ainsi que le délai T_s pour lequel il est atteint permettent d'estimer la similitude en forme et amplitude entre les signaux, ainsi que le déphasage éventuel de l'un sur l'autre. La corrélation croisée d'un signal avec lui-même donnera ainsi une amplitude maximale $C_{max} = 1$ pour un déphasage T_s nul. Les profils de corrélation C_{max} sont tracés sur la Figure 3, respectivement pour $T_p = 2s$ (a) et $T_p = 3s$ (b). Le déphasage T_s est nul sur le profil et n'est donc pas reproduit ici. La zone colorée indique la plage de profondeurs sur laquelle les données des ADCP ont été exploitées pour reconstruire la vitesse horizontale. On présente également pour comparaison la corrélation obtenue pour un profil de vitesse horizontale reconstruit à partir de données synthétiques (parfaites) provenant des simulations de référence, utilisées dans la même configuration de mesures que les données expérimentales (*i.e.* restreintes à $z \in [z_{lim}; z_{max}]$). Ce profil représente l'erreur minimale théoriquement atteignable avec la méthode pour une configuration de mesures donnée.

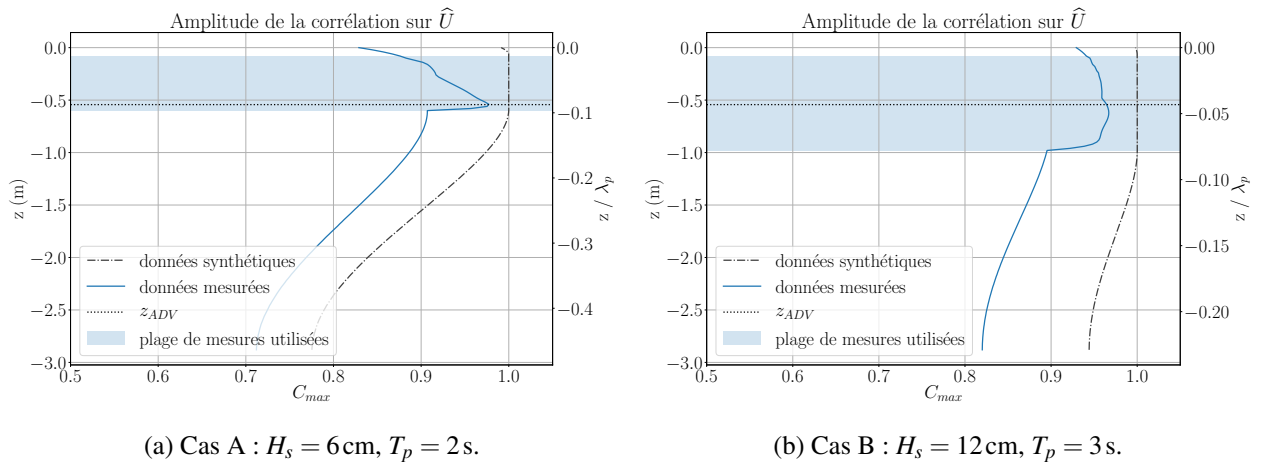
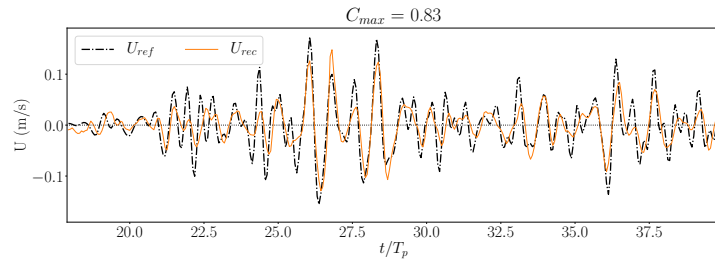


Figure 3. Profils de corrélation pour \widehat{U} pour chaque état de mer.

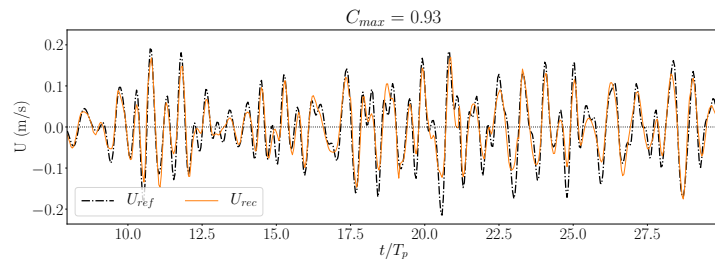
Pour les deux états de mer et dans toute la colonne d'eau, la corrélation obtenue pour la vitesse reconstruite avec des données mesurées est inférieure à celle calculée pour les données synthétiques, soulignant l'importance de la qualité des mesures dans la reconstruction de la vitesse horizontale. Entre $z = -h$ et $z = z_{lim}$, la

faible corrélation est due à la configuration des mesures qui interpole simplement le profil dans cette zone, sans que cela soit très préoccupant car du fait de la décroissance exponentielle des vitesses, les informations cinématiques les plus importantes sont concentrées dans la partie supérieure de la colonne d'eau. Pour $z \in [z_{lim}; z_{max}]$, la corrélation reste stable pour le profil synthétique mais décroît de part et d'autre de $z = z_{ADV}$ pour le profil calculé avec des données réelles, résultat du cumul des erreurs d'approximation sur $\partial_x W$ et d'intégration sur la colonne d'eau.

Enfin, à proximité de la surface libre le décrochage de la corrélation obtenue avec les données expérimentales est plus abrupt pour $T_p = 2$ s que pour $T_p = 3$ s. Les erreurs de mesure sur $W_{ADCP_{1,2}}$ sont susceptibles d'être proportionnellement plus importantes pour les petites amplitudes associées aux vagues courtes ($f > 1$ Hz). Or, ces dernières représentent une plus grande partie de l'énergie présente dans le cas A que le cas B, pouvant expliquer la qualité moindre des profils reconstruits. La Figure 4 présente des séries temporelles de vitesses horizontales reconstruites en $z = 0$ ^[3] pour $T_p = 2$ s et $T_p = 3$ s, illustrant les difficultés plus importantes de reproduction des petites vagues dans le cas A que dans le cas B ainsi qu'une tendance à la sous-estimation de l'amplitude des vitesses. Cependant, elle montre aussi que malgré la dégradation attendue du profil de vitesse horizontal reconstruit à partir de mesures réelles (par rapport à une reconstruction avec des données parfaites), la vitesse obtenue reproduit bien les vagues principales. Une valeur de corrélation assez faible, autour de 80% comme sur la Figure 4a semble ainsi traduire surtout une mauvaise résolution des vagues courtes.



(a) Cas A : $H_s = 6$ cm, $T_p = 2$ s.



(b) Cas B : $H_s = 12$ cm, $T_p = 3$ s.

Figure 4. Séries temporelles de U_{ref} et \hat{U} pour $z = 0$.

La méthode testée permet donc bien de reconstruire un profil de vitesse horizontale à partir de mesures d'ADCP. La qualité du profil dépend de l'étendue de mesures disponibles, elle-même fonction de l'amplitude des vitesses en jeu pour l'état de mer étudié, et pour une application pratique il semble préférable de se rapprocher de la configuration de mesure du cas B.

5.2 Prédiction de houle

Le deuxième objectif de la validation expérimentale est d'évaluer la capacité de la méthode à fournir des champs d'élévations de surface libre dans la zone de prédiction théorique, en utilisant les profils de vitesses

[3]. Cette quantité n'a pas de signification physique à certains instants, puisque lorsqu'un creux de vagues passe en x_0 , la vitesse du fluide n'existe pas en $z = 0$: dans ce cas, il s'agit plutôt d'une valeur extrapolée, qu'il reste cependant nécessaire de calculer car dans les simulations de prédiction, la condition limite en x_0 doit être renseignée à chaque instant de $z = -h$ à $z = 0$.

reconstruits à partir des mesures par ADCP. Contrairement à l'analyse de la vitesse reconstruite, restreinte à une plage temporelle limitant la réflexion, dans les simulations de prédiction l'état de mer est généré à partir du repos pendant $30 T_p$ avant de calculer la prédiction. L'influence de la réflexion se fait alors sentir dans les mesures, mais la méthode de prédiction ne permet ici de prendre en compte que la propagation vers les x croissants. En conséquence, la qualité de la vitesse reconstruite estimée ci-dessus ne peut pas être directement rattachée à la qualité de prédiction obtenue. L'élévation de surface libre prédite, notée $\hat{\eta}$, est comparée avec celle mesurée par les sondes lors des expériences, notée η_{ref} , via l'indicateur de corrélation déjà défini en (9) qui devient ici, pour un emplacement quelconque x_1 :

$$C(\tau) = \frac{1}{t_{max} - t_{min}} \int_{t_{min}}^{t_{max}} \hat{\eta}^*(x_1, t) \eta_{ref}^*(x_1, t + \tau) dt \quad (10)$$

où les instants t_{min} et t_{max} désignent respectivement les instants de début et de fin de la zone de prédiction au point considéré. Le calcul n'est effectué que si $t_{max} - t_{min} \geq 1T_p$ et les résultats sont tracés sur la Figure 5.

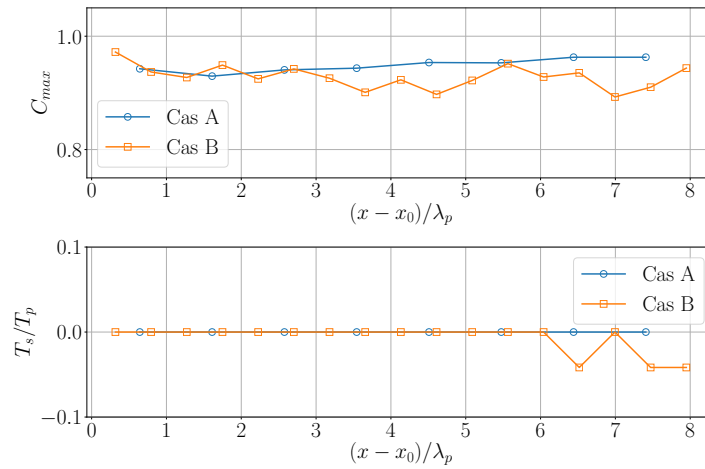
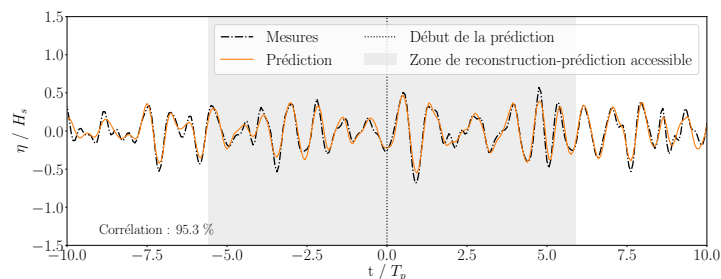


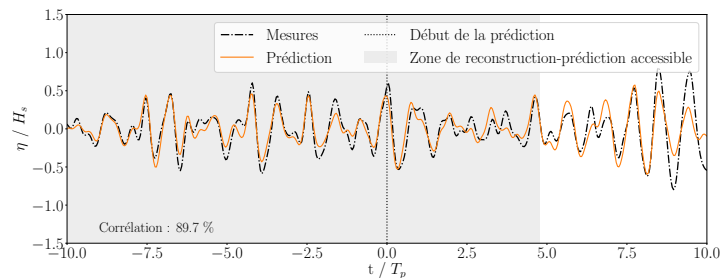
Figure 5. Comparaison de l'élévation de surface libre mesurée et prédite en différents emplacements de sondes, avec l'amplitude de la corrélation (en haut) et le décalage en temps (en bas).

La correspondance est globalement très bonne entre la prédiction et les mesures pour chaque sonde située dans la zone de prédiction théorique, avec un facteur de corrélation supérieur à 0,9 dans la plus grande partie de la zone. Le déphasage est nul sur la quasi-totalité des emplacements étudiés, sauf vers la fin de la zone de prédiction pour $T_p = 3$ s, ce qui peut s'expliquer par deux raisons : d'une part, la faible cambrure des essais réalisés ($\varepsilon_c = 1\%$) limite l'erreur dans le calcul des vitesses de propagation ; d'autre part, la fréquence de sortie des résultats, limitée par la capacité d'échantillonnage des ADCP, est de 8 Hz, entraînant un déphasage minimal détectable de $T_s = 0,125$ s, soit 4 ou 6 % de T_p suivant l'état de mer considéré. Des déphasages plus faibles pourraient donc exister sans pouvoir être mis en évidence avec cette fréquence d'échantillonnage.

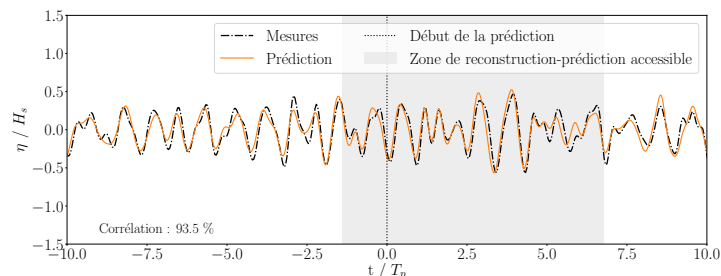
La Figure 6 fournit des exemples de séries temporelles pour accompagner quelques points intéressants sur la Figure 5. La Figure 6a illustre ainsi ce que recouvre une valeur de corrélation élevée ($> 95\%$) associée à un déphasage nul, donnant à voir un très bon accord entre les prédictions et les mesures. La Figure 6b présente quant à elle un cas de corrélation plus faible avec un déphasage nul : si les plus grandes vagues de l'échantillon restent assez bien résolues, l'affaiblissement de la corrélation est probablement dû aux superpositions de plus petites vagues, mal reproduites par la simulation. Enfin, la Figure 6c donne un exemple de corrélation élevée associée à un déphasage non nul : le décalage d'arrivée de la crête est bien visible pour quelques grandes vagues aux alentours de $t/T_p \approx 3$. Dans tous ces exemples, y compris ceux présentant des valeurs de corrélation élevées et une bonne reproduction de la surface libre, on note une moins bonne prise en compte des vagues courtes ainsi qu'une tendance générale à la sous-estimation de l'amplitude des vagues (crêtes et creux) par la prédiction. Ces deux observations sont cohérentes avec le fait que la vitesse fournie en condition limite au code HOS-NWT dans les 10 cm sous la surface est extrapolée par copie de la vitesse reconstruite plus bas, et est donc susceptible d'être sous-estimée (cf Figure 4).



(a) Cas A. η en $x = 54$ m i.e. à $5,5 \lambda_p$ en aval de x_0 .



(b) Cas B. η en $x = 78$ m i.e. à $4,6 \lambda_p$ en aval de x_0 .



(c) Cas B. η en $x = 102$ m i.e. à $6,5 \lambda_p$ en aval de x_0 .

Figure 6. Comparaison de séries temporelles pour $\eta_{ref}(t)$ et $\hat{\eta}(t)$, en divers emplacements de la zone de prédiction.

6. Conclusion

Suite à des études numériques prometteuses, les essais en houle uni-directionnelle présentés ici ont permis d'évaluer la faisabilité générale d'une méthode de prédiction déterministe de houle en deux dimensions. Les expériences ont validé la possibilité d'utiliser des mesures instantanées d'ADCP pour reconstruire un profil de vitesse horizontale, tant que la configuration de mesure est adaptée au cas d'études. Ce profil reconstruit, malgré ses lacunes en ce qui concerne les vagues courtes, permet d'obtenir une prédiction de houle de qualité satisfaisante après un traitement assez rustique, laissant espérer d'autres améliorations en adaptant le post-traitement. Il convient cependant de signaler que les résultats présentés ici sont partiels et doivent être consolidés par l'étude de plusieurs réalisations par état de mer. Cette étude, non présentée ici par manque de place, souligne l'importance des conditions expérimentales dans la qualité des mesures, influençant elle-même celle des profils de vitesse et de la prédiction obtenue. Les difficultés rencontrées étant principalement liées à l'utilisation d'ADCP en bassin, il pourrait être intéressant de tester le dispositif en milieu ouvert afin d'évaluer sa sensibilité en conditions réelles. Cela soulèverait d'autres difficultés techniques dues à la multi-directionnalité de l'état de mer mais permettrait également de confronter le système à des houles plus cambrées. C Enfin, le présent travail gagnerait également à être étendu à des houles multi-directionnelles.

Remerciements

Ce travail a bénéficié du soutien financier de l'ADEME (projet S3). Merci à Félicien Bonnefoy, Laurent Davoust, Simon Delvoe, Boris Horel, Anne Levesque, Arnaud Merrien, Jérémy Ohana, Jérémy Waiss et Matthieu Weber pour

leur aide dans la préparation et la conduite des essais.

Références

- [1] H.-N. Nguyen, G. Sabiron, P. Tona, M. M. Kramer, and E. V. Sanchez, “Experimental Validation of a Nonlinear MPC Strategy for a Wave Energy Converter Prototype,” in *Volume 6 : Ocean Space Utilization ; Ocean Renewable Energy*, (Busan, South Korea), pp. V006T09A019–V006T09A019, American Society of Mechanical Engineers, June 2016.
- [2] E. Blondel-Couprie, F. Bonnefoy, and P. Ferrant, “Experimental validation of non-linear deterministic prediction schemes for long-crested waves,” *Ocean Engineering*, vol. 58, pp. 284–292, Jan. 2013.
- [3] P. Naaijen and A. P. Wijaya, “Phase Resolved Wave Prediction From Synthetic Radar Images,” in *Proceedings of the 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2014*, vol. Volume 8A : Ocean Engineering, (San Francisco, California, USA), p. V08AT06A045, ASME, June 2014.
- [4] N. Köllisch, J. Behrendt, M. Klein, and N. Hoffmann, “Nonlinear real time prediction of ocean surface waves,” *Ocean Engineering*, vol. 157, pp. 387–400, June 2018.
- [5] N. Desmars, Y. Perignon, G. Ducrozet, C.-A. Guérin, S. T. Grilli, and P. Ferrant, “Phase-Resolved Reconstruction Algorithm and Deterministic Prediction of Nonlinear Ocean Waves From Spatio-Temporal Optical Measurements,” in *Proceedings of the 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2018*, vol. Volume 7B : Ocean Engineering, (Madrid, Spain), p. V07BT06A054, American Society of Mechanical Engineers, June 2018.
- [6] M. Huchet, J.-C. Gilloteaux, A. Babarit, G. Ducrozet, Y. Perignon, and P. Ferrant, “Prédiction déterministe de houle par mesure du profil de vitesse horizontale,” in *16èmes Journées de l’Hydrodynamique*, (Marseille, France), Nov. 2018.
- [7] 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, July 2012.
- [8] G. Wu, *Direct simulation and deterministic prediction of large-scale nonlinear ocean wave-field*. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [9] E. Blondel, F. Bonnefoy, and P. Ferrant, “Deterministic non-linear wave prediction using probe data,” *Ocean Engineering*, vol. 37, pp. 913–926, July 2010.
- [10] P. Naaijen, K. Trulsen, and E. Blondel-Couprie, “Limits to the extent of the spatio-temporal domain for deterministic wave prediction,” *International Shipbuilding Progress*, vol. 61, pp. 203–223, Jan. 2014.
- [11] Y. Qi, G. Wu, Y. Liu, and D. K. P. Yue, “Predictable zone for phase-resolved reconstruction and forecast of irregular waves,” *Wave Motion*, vol. 77, pp. 195–213, Mar. 2018.
- [12] F. Fucile, G. Bulian, and C. Lugni, “A probabilistic approach for the quantification of prediction error in deterministic phase-resolved wave forecasting,” *Ocean Engineering*, vol. 163, pp. 718–736, Sept. 2018.
- [13] D. G. Dommermuth and D. K. P. Yue, “A high-order spectral method for the study of nonlinear gravity waves,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 184, pp. 267–288, Nov. 1987.
- [14] 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.
- [15] F. Bonnefoy, G. Ducrozet, D. Le Touzé, and P. Ferrant, “Time domain simulation of nonlinear water waves using spectral methods,” in *Advances in Numerical Simulation of Nonlinear Water Waves*, vol. 11 of *Advances in Coastal and Ocean Engineering*, pp. 129–164, World Scientific, Apr. 2010.
- [16] G. Ducrozet, F. Bonnefoy, D. Le Touzé, and P. Ferrant, “Development of a fully nonlinear water wave simulator based on Higher Order Spectral theory,” (Longyearbyen, Norway), p. 4, 2005.
- [17] Y. M. Choi, M. Gouin, G. Ducrozet, B. Bouscasse, and P. Ferrant, “Grid2Grid : HOS Wrapper Program for CFD solvers,” *arXiv :1801.00026 [physics]*, Dec. 2017. arXiv : 1801.00026.