

## JUMEAU NUMÉRIQUE DU CANAL A HOULE EN PROFONDEUR INTERMÉDIAIRE

Auteurs : KOZULIC Maxime<sup>1</sup> & LEBRETON Pascal<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centre d'études et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement – Direction Eau Mer et Fleuves, 2 Boulevard Gambetta – 60200 COMPIEGNE, FRANCE, [www.cerema.fr](http://www.cerema.fr)

**RESUME** : *La performance de l'outil de propagation de la houle en mode non-hydrostatique dans le logiciel libre XBeach est étudiée dans ce travail. Il est souhaitable de valider la méthode par rapport aux résultats expérimentaux d'essais en canal à houle. Les différents paramètres d'ajustements, que ce soit la discrétisation spatiale, les options numériques, ainsi que les conditions aux limites du modèle seront mises en concurrence. On cherche ici à se placer dans un contexte d'une utilisation opérationnelle de cet outil par un bureau d'étude, et donc, aucune optimisation des résultats par calage ne sera recherchée pour trouver les résultats du modèle physique.*

**MOTS CLEFS** : Jumeau Numérique, Modélisation, Déferlement, Xbeach, Changement climatique

**ABSTRACT (en anglais)**: *The performance of the non-hydrostatic wave propagation tool in the open source software Xbeach is studied in this work. It is desirable to validate the method against experimental results of wave flume. The different adjustment parameters, whether it is spatial discretization, numerical options, as well as the boundary condition to the model will be compared. The aim here is to place ourselves in a context of operational use of this tool by a design office, and therefore, no optimization of the results by calibration will be sought to find the results of the physical model.*

**KEYWORDS**: Digital twin, Modeling, Surge, Xbeach, Climate changes

## 1. Introduction

Les ouvrages de défense des côtes ou de protection contre les submersions marines sont de plus en plus sollicités dans le contexte du changement climatique. Ces ouvrages sont très souvent implantés en conditions d'eaux très peu profondes ( $\frac{h}{H_{m0,large}} < 1,0$ ), où les conditions de houle, ne devraient pas être calculées de la même manière que celles de l'ingénierie portuaire, car le déferlement des vagues y est très souvent généralisé. L'ingénierie utilise couramment des modèles spectraux à phase moyennée (SWAN 1D, TOMAWAC, ...), qu'on oppose aux modèles à résolution de phase (IH2VOF, Xbeach non-hydrostatique, OpenFOAM). L'approche par les modèles spectraux à phase moyennée présente l'avantage d'un faible temps de calcul. En revanche, leurs algorithmes reposent sur une conservation de la période de la houle, qui exclurait, a priori, leur emploi dans les très faibles profondeurs (cf. Eurotop 2018 p30). Ces modèles, plutôt adaptés aux conditions portuaires, le seraient donc moins dans l'environnement des ouvrages de défense des côtes.

Des calculs avec les modèles à résolution de phase seraient nécessaires pour mieux appréhender le déferlement et notamment l'augmentation de la période dans les très faibles profondeurs et son impact comme le suggère l'Eurotop 2018.

Le projet Jeunepi a pour objet de comparer ces différents modèles de calcul de propagation de houle dans des configurations simples et d'en comparer les résultats avec ceux obtenus en canal à houle dans les zones comportant de très faibles profondeurs. Il doit aussi permettre de sélectionner un logiciel qui pourrait servir de jumeau numérique à un canal à houle physique.

Le travail présenté dans l'article prend place dans ce projet et consiste en la comparaison du logiciel Xbeach avec des essais réalisés en modèle physique.

En présence de déferlements massifs, une méthode dite de « correction de la pression non-hydrostatique » est utilisée et intégrée dans Xbeach. Dans cette méthode, un critère de déferlement est utilisé : la variation temporelle de l'élévation de la surface libre (maxbrsteep). Ce paramètre est spécifique au logiciel et il est difficile à le relier aux critères classiques comme le paramètre d'Iribaren ou la cambrure de la houle.

Dans cette étude, un cas d'ingénierie est présenté, il s'agit de l'évaluation des paramètres spectraux et statistiques en pied d'ouvrage, en absence de l'ouvrage, réalisé à partir d'un modèle avec une géométrie simple. Les résultats sont comparés aux données expérimentales obtenues par le canal à houle de l'ESITC Caen en 2022.

## 2. THÉORIE

Dans cette étude, l'outil de modélisation XbeachX v1.23.5526 est utilisé. Les écoulements à surface libre dans les zones côtières sont régis par les équations de Navier Stokes. Dans le cas de l'hydrodynamique et de la modélisation des ondes gravitaires de surface libre, on peut considérer un fluide incompressible, homogène et Newtonien.

L'équation de continuité de la masse pour un fluide incompressible est :

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

Où  $u = [u(x, t), v(x, t), w(x, t)]$  est le vecteur de vitesse.

En considérant un fluide newtonien, le principe de conservation de la quantité de mouvement est donné par les équations de Navier-Stokes pour un fluide incompressible :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla(u \otimes u) = -\frac{1}{\rho} \nabla P + g + \nabla \cdot T \quad (2)$$

Où  $\rho$  est la densité du fluide,  $P(x, t)$  est la pression,  $g = [0, 0, -g]$  est l'accélération de la pesanteur et  $T$  le tenseur des contraintes. On note  $a \otimes b$  le produit tensoriel des vecteurs  $a$  et  $b$ .

### **3. Analyse de la propagation de la houle pour une condition d'eau peu profonde**

Nous cherchons à valider la méthode numérique décrite ci-dessous pour l'évaluation des paramètres spectraux dans le cas d'une tempête avec une période de retour de 100 ans. Cet état de mer conduit à des déferlements fréquents des vagues à l'approche de l'ouvrage. Les résultats numériques seront comparés aux essais expérimentaux.

Pour le cas de la tempête avec une période de retour de 100 ans, l'état de mer au large est modélisé par un spectre de JONSWAP (JOint North Sea WAve Project) paramétriques avec  $H_{m_0} = 8.89 \text{ m}$ ,  $T_p = 11.7 \text{ s}$ ,  $\gamma = 3.3$ .

#### **3.1. Description de la modélisation physique**

Les essais sont réalisés dans le canal à houle installé dans les locaux de l'Ecole Supérieure des Travaux de la Construction de Caen (ESITC Caen). Les caractéristiques du canal (Longueur = 40 m, largeur = 1 m, profondeur = 1,5 m) et les performances de son générateur de houle aléatoire permettent de simuler en similitude, la propagation de la houle et son déferlement.

On s'intéresse au scénario où l'on souhaite évaluer les paramètres de la houle en pied d'ouvrage, qui sont indispensable pour le dimensionnement des ouvrages de protection.

#### **3.2. Description de la modélisation numérique**

##### *Géométrie*

Le profil bathymétrique est présenté dans la Figure. Celui-ci est constitué de deux pentes constantes, ainsi qu'une pente de raccordement. Le niveau d'eau au repos est de 28 m IGN, la profondeur en pied d'ouvrage est de 8.87 m. Le pied de l'ouvrage est donc à la limite des faibles profondeurs des très faibles profondeurs selon les critères de l'Eurotop 2018.

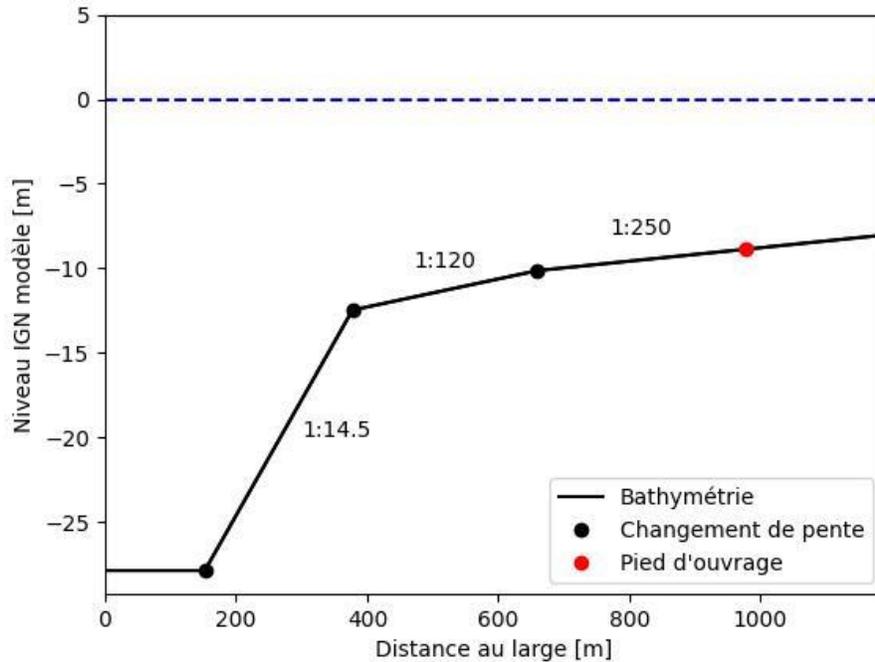


Figure 1. Définition de la bathymétrie en absence d'ouvrage à échelle nature.

Le modèle est réalisé en similitude Froude. L'échelle retenue de  $1/32,83$  nous a permis de modéliser les fonds devant l'ouvrage jusqu'à une distance de 978 m. Les essais ont été réalisés pour une tempête d'une durée nature de 3 heures, cette durée est nécessaire à un échantillon de taille suffisante pour évaluer les paramètres spectraux.

La similitude de Froude entraîne une modification de l'échelle des temps qui est divisée par 5.3 pour les essais en modèle avec une échelle de  $1/32,83$ . Les essais correspondants à 3 heures de tempête nature, ne durent que 31 minutes et 25 secondes.

#### *Méthode de discrétisation spatiale*

Le maillage avec XBeach consiste à définir :

- La discrétisation spatiale dans le sens de propagation de la houle
- La variation du niveau de sol

En effet, dans le mode non-hydrostatique à couche unique, il n'est pas nécessaire d'avoir une discrétisation verticale. Pour obtenir des résultats optimaux, le maillage est uniforme et une étude de sensibilité au maillage a été menée. L'étude de sensibilité au maillage nous a mené à choisir une taille de maille  $\Delta x = 0.04$  à l'échelle du modèle.

#### *Conditions aux limites*

Le générateur de houle aléatoire de XBeach étant imprécis et sensible au paramètre  $\maxbrsteep$ , il est souhaitable de définir les mêmes conditions aux limites la houle incidente que lors des essais expérimentaux. Les essais en modèle réduit nous ont permis d'obtenir une chronologie de l'élévation de la surface libre devant le batteur. Le modèle Xbeach nécessite également d'introduire la vitesse horizontale en surface au même point. Pour ce faire, la méthode d'Airy a

été appliquée à chaque composante sinusoïdale de la variation de la surface libre.

L'élévation irrégulière de la surface libre peut être construite par l'addition de  $n$  ondes linéaires (ondes composantes) de hauteur et période différentes. L'élévation de la surface libre  $\eta(t)$  se décrit donc

$$\eta(t) = \sum_{i=0}^n a_i \cos(\omega_i t + \phi_i) \quad (3)$$

Il est possible de définir les paramètres  $(a_i, \omega_i, \phi_i)$  en utilisant une méthode par transformation de Fourier. Où  $a_i$  est l'amplitude,  $\omega_i$  est la pulsation et  $\phi_i$  la phase de chaque ondes linéaires constituant le signal.

$$a_i = |FFT[\eta_{i,exp}(t)]| \quad (4)$$

Où  $FFT$  est la transformée de fourier rapide.

$$\phi_i = \text{atan2}\left(R\left[FFT[\eta_{i,exp}(t)]\right], I\left[FFT[\eta_{i,exp}(t)]\right]\right) \quad (5)$$

Où  $R$  est la partie réelle et  $I$  est la partie imaginaire d'une grandeur complexe. On définit également la fonction  $\text{atan2}(x, y)$  de la manière suivante.

$$\begin{aligned} \text{atan2}(x, y) = & \left\{ \arctan\left(\frac{y}{x}\right), \text{ si } x > 0 \right. \\ & \arctan\left(\frac{y}{x}\right) + \pi, \text{ si } x < 0 \text{ et } y \geq 0 \\ & \arctan\left(\frac{y}{x}\right) - \pi, \text{ si } x < 0 \text{ et } y < 0 \\ & + \frac{\pi}{2}, \text{ si } x = 0 \text{ et } y > 0 \\ & - \frac{\pi}{2}, \text{ si } x = 0 \text{ et } y < 0 \\ & \text{indéfini, si } x = 0 \text{ et } y = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\omega_i = 2\pi f_i \quad (7)$$

La vitesse horizontale peut donc être calculée de la manière suivante, à partir de la théorie de Airy. Il faut prendre en compte que XBeach prend en compte une vitesse horizontale moyennée selon la profondeur  $U_x(t) = \frac{1}{H} \int_{-h}^{z_0} u_x dz$

$$U_x(t) = \left\{ \sum_{i=0}^n \frac{\sigma_i a_i \sinh(k_i [z_0 + h])}{k h \sinh(k h)} \cos(\omega_i t + \phi_i) \right.$$

Où  $u_x(t)$  est le vecteur de la vitesse horizontale,  $\sigma_i$  est la fréquence angulaire intrinsèque,  $k_i$  est le nombre d'onde calculé à partir de la relation de dispersion,  $h$  est la profondeur,  $\lambda_i$  est la longueur d'onde et  $z_0$  est le niveau d'eau au repos.

*Calculs*

Le calcul s'effectue en une dizaine de minutes, ce qui est assez faible pour un logiciel à résolution de phase. En revanche, il génère un fichier de sortie très volumineux dans le format NetCDF (de l'ordre de plusieurs Go), qui varie en fonction du nombre de sondes, du nombre de variables à extraire et de la résolution temporelle. Le post-traitement a nécessité la rédaction d'une routine en python, car les outils mis à disposition sur le site du logiciel sont dépendants de l'acquisition d'une licence Matlab que nous n'avons pas.

### 3.3. Résultats

#### *Vérification des paramètres de la houle incidente et comparaison avec les consignes*

Lors de l'essai en canal à houle, trois sondes ont été disposées devant le batteur afin d'évaluer ; selon la méthode de Mansard et Funke, la houle incidentes. La figure 2 compare le spectre théorique de JONSWAP qui a été entré comme consigne avec ces résultats. Il en ressort que les valeurs des paramètres spectraux  $H_{m0}$  et  $T_p$  sont parfaitement respectés même si la répartition fréquentielle s'éloigne un peu de la courbe théorique.

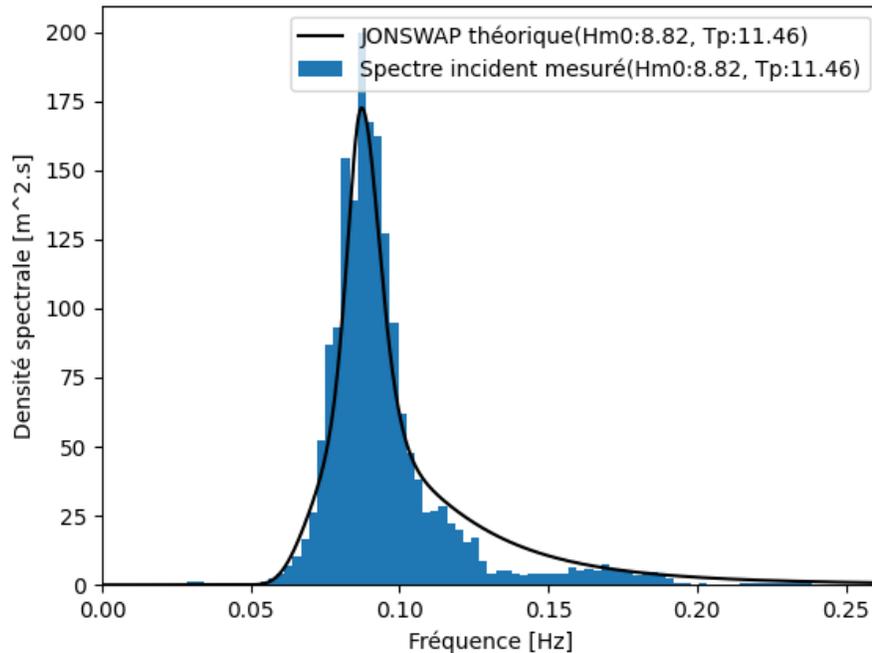


Figure 2. Comparaison du spectre évalué au niveau du batteur lors des modélisations physiques

#### *Influence du paramètre maxbrsteep sur le déferlement et sur les paramètres évalués*

Des sondes numériques ont aussi été disposées au même endroit dans le modèle numérique Xbeach. Mais il apparaît comme la figure 3 l'illustre que la concordance entre les consignes et la houle incidente évaluée est beaucoup moins bonne. La hauteur de houle incidente évaluée est de l'ordre de 10 % plus élevée que la consigne. La méthode d'évaluation des vitesses horizontales précédemment présentée n'est peut-être pas compatible avec le fonctionnement de Xbeach. En revanche, la documentation du logiciel ne nous a fourni aucune indication pour

calculer ces vitesses. Notons que la comparaison de la figure 3 a été faite en retenant la valeur par défaut de maxbrsteep qui est de 0,4.

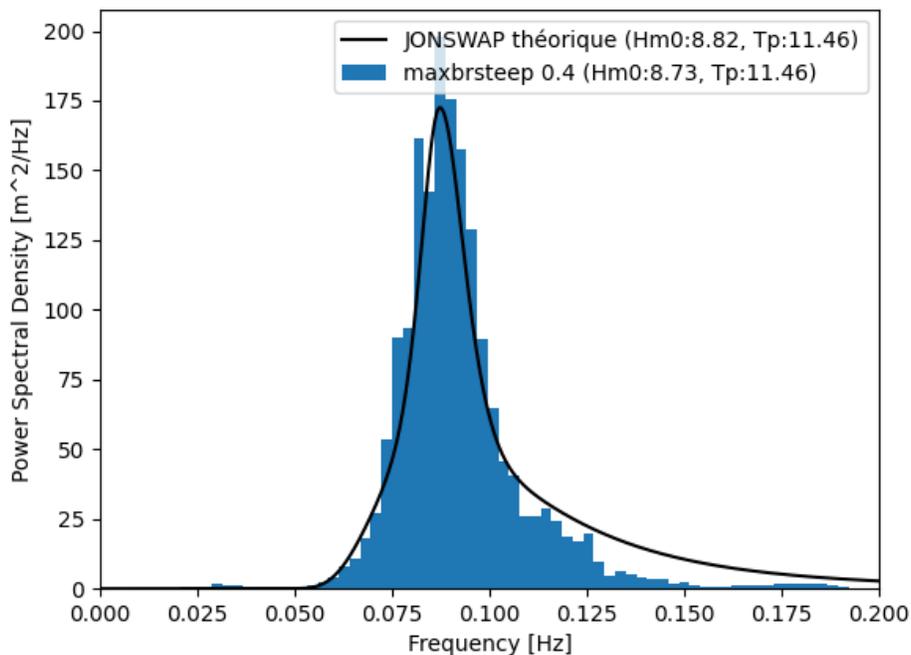


Figure 3. Comparaison du spectre évalué au niveau du batteur lors des modélisations numériques avec maxbrsteep = 0.4

#### *Influence du choix du paramètre maxbrsteep sur les paramètres spectraux devant le batteur*

Comme indiqué précédemment, la valeur par défaut du paramètre maxbrsteep est de 0,4, mais la documentation du logiciel autorise le choix de valeurs comprises entre 0,3 et 0,9. Nous avons donc fait varier ce paramètre dans cette fourchette par pas de 0,1 afin d’apprécier l’impact sur les résultats.

Le premier tableau fournit les hauteurs incidentes calculées à partir des résultats de Xbeach devant le batteur avec les méthodes des trois sondes. Il apparaît que la hauteur de la houle  $H_{m0}$  augmente avec la valeur du paramètre maxbrsteep et varie de l’ordre de 4 % au maximum.

maxbrsteep	$H_{m0,incident}$ au batteur	$H_{m0,incident}$ au batteur exp	$T_{p,incident}$ au batteur	$T_{p,incident}$ au batteur exp
0.3	8.544	8.899	11.46	11.46
0.4	8.727		11.46	
0.5	8.888		11.46	
0.6	8.979		11.46	

0.7	9.007		11.46	
0.8	9.000		11.46	
0.9	9.017		11.46	

Tableau 1. Paramètres spectraux au niveau de batteur évalué par méthodes numériques et par modélisation physique

*Influence du choix du paramètre maxbrsteep sur les paramètres spectraux à 350 m de l'ouvrage*

Le tableau suivant compare les grandeurs totales de la houle (houle incidente et réfléchie) à 350 m de l'ouvrage. La profondeur d'eau y est de 12,2 m et ( $\frac{h}{H_{m_0}} = 1.4$ ) ce qui correspond au domaine des faibles profondeurs. La hauteur augmente également avec le paramètre maxbrsteep, mais de manière très sensible, car les valeurs obtenues varient du simple jusqu'à 1.8 fois la valeur minimale. La période de pic varie faiblement avec le paramètre maxbrsteep. La valeur la plus proche de  $H_{m_0}$  est obtenue à 1.5 % près pour maxbrsteep = 0.3. Pour maxbrsteep = 0,4, la hauteur est évaluée par excès de 20 %.

maxbrsteep	$H_{m_0,total}$ à 350 m	$H_{m_0,total}$ à 350 m exp	$T_{p,total}$ à 350 m	$T_{p,total}$ à 350 m exp
0.3	6.059	6.147	11.83	12.22
0.4	7.281		11.83	
0.5	8.981		13.1	
0.6	10.07		12.22	
0.7	10.48		13.1	
0.8	10.68		13.1	
0.9	10.79		13.1	

Tableau 2. Paramètres spectraux à 350 m de l'ouvrage évalué par méthodes numériques et par modélisation physique

*Influence du choix du paramètre maxbrsteep sur les paramètres spectraux en pied d'ouvrage*

Le tableau suivant compare les grandeurs totales au pied de l'ouvrage. Nous avons vu que les conditions en ce point sont à la limite du domaine des faibles profondeurs et des très faibles profondeurs. La variation de la hauteur  $H_{m_0}$  augmentent également et de manière très sensible (simple au double) avec le paramètre maxbrsteep. La variation de la période n'est pas monotone. Le paramètre par défaut de maxbrsteep fournit une évaluation par défaut de la hauteur  $H_{m_0}$  à 6%.

maxbrsteep	$H_{m_0,total}$ en pied d'ouvrage	$H_{m_0,total}$ en pied d'ouvrage exp	$T_{p,total}$ en pied d'ouvrage	$T_{p,total}$ en pied d'ouvrage exp
0.3	4.899	5.946	13.58	13.1
0.4	6.316		13.1	
0.5	8.101		13.1	
0.6	8.574		13.58	
0.7	8.79		13.58	
0.8	9.035		13.58	
0.9	9.133		13.58	

Tableau 3. Paramètres spectraux en pied d'ouvrage évalué par méthodes numériques et par modélisation physique

#### 4. CONCLUSION

Les valeurs par défaut du paramètre maxbrsteep (0,4) fournissent une estimation proche de la hauteur  $H_{m_0}$  mesurée en canal devant le batteur. L'écart le plus important se situe pour la mesure de la hauteur  $H_{m_0}$  à une distance de 350 m de l'ouvrage qui est évalué en excès 20%.. L'écart observé reste limité à 6 % pour l'évaluation de ce paramètre en pied d'ouvrage. En revanche, il paraît très hasardeux de faire varier ce paramètre sans essais physique de calage en raison des importantes variations qu'il induit sur la hauteur de la houle notamment. Il est cependant étonnant de constater une meilleure estimation par le logiciel des hauteurs à la limite des faibles et des très faibles profondeurs qu'au droit du batteur. Cet article décrit le type de comparaisons qui seront réalisées dans le cadre du projet Jeunepi.

## 5. REFERENCES

- Van der Meer J.W , Ammsp N.W.H, Bruce T., De Rouck J., Kortenhuis A., Pullen T., Schüttrumpf H., Troch P. and Zanuttigh B., 2015. *EurOtop. Manual on wave overtopping of sea defences and related structures . An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application.* [www.overtopping-manual.com](http://www.overtopping-manual.com).
- Smit P.B., Stelling G.S., Roelvink D., van Thiel de Vries J., McCall R., Zwinkels A. van Dongeren C. and Jacobs R. 2018. *Xbeach : Non-hydrostatic model. Validation, verification and model description.* Delft University of Technology and Deltares.
- Roelvink D., Dongered A.V., McCall R., Hoonhout B., Rooijen A.V., Geer P.V., Vet L., Nederhoof K.. 2015. *Xbeach Manual. Model description and reference guide to functionalities.* Deltares.