



# 16<sup>èmes</sup> Journées de l'Hydrodynamique

27-29 novembre 2018 - Marseille



## MODELISATION DU DEFERLEMENT BATHYMETRIQUE DANS SWAN ET COMPARAISON AVEC UN MODELE SPECTRAL PARAMETRIQUE

### *MODELLING OF WAVE BREAKING IN SWAN AND COMPARISON WITH A PARAMETRIC SPECTRAL MODEL*

F. MAZAS<sup>(1)</sup>, T. SAILLOUR<sup>(1)</sup>, L. HAMM<sup>(1)</sup>

*franck.mazas@arteliagroup.com ; thomas.saillour@arteliagroup.com ; luc.hamm@arteliagroup.com*

<sup>(1)</sup> ARTELIA, Echirolles, France

#### Résumé

Le déferlement bathymétrique est l'un des principaux phénomènes de transformation des vagues en zone côtière. Aussi, sa bonne représentation dans les modèles de propagation de la houle est un enjeu important pour les études d'ingénierie côtière. En particulier, le code SWAN, est largement utilisé pour la simulation d'états de mer sur de longues durées. Le déferlement bathymétrique y est traité en simplifiant le modèle paramétrique de Battjes et Janssen (1978), et notamment son équation de fermeture réduite à sa valeur limite en faible profondeur :  $H_m = \gamma h$ . Or, de nombreux travaux ont montré la variabilité du paramètre  $\gamma$ . Nous explorons donc l'intérêt d'implémenter le modèle complet de Battjes et Janssen et ses calibrations dans SWAN et comparons avec le modèle spectral paramétrique 1D HOCOULI, développé par ARTELIA. La comparaison à des mesures (en canal et en nature) montre l'excellente performance de HOCOULI, et valide l'implémentation proposée dans SWAN.

#### Summary

Depth-induced breaking is a major process of nearshore wave transformation; hence its accurate modelling is important for coastal engineering applications. SWAN, a widely used 3<sup>rd</sup>-generation model, used a simplified version of the parametric breaking model of Battjes and Janssen (1978). The closure equation is reduced to  $H_m = \gamma h$ , with  $\gamma$  a constant value of the breaker index. Still, various works have shown the variability of  $\gamma$ . Thus the interest of implementing the total model of BJ78 and the consequent calibrations of  $\gamma$  in SWAN is here explored. The modified version of SWAN is compared with the 1D parametric spectral model HOCOULI developed by ARTELIA. Validation against flume and field measurements show the excellent performance of HOCOULI and validate the proposed implementation in SWAN.

## I – Introduction

Le déferlement bathymétrique est l'un des principaux phénomènes de transformation des vagues en zone côtière. La diminution de la hauteur d'eau a pour effet d'augmenter la hauteur de la vague et de la déstabiliser : la crête de la vague devient de plus en plus pointue tandis que les creux sont de plus en plus étalés. À ce phénomène de levée non-linéaire, il faut ajouter un autre mécanisme dû à la pente des fonds : la différence de vitesse des particules entre la crête et le creux entraîne une dissymétrie entre l'avant et l'arrière de la vague qui 'se penche' en avant jusqu'à son écroulement. On passe alors en régime turbulent, et on peut observer la formation d'un rouleau de déferlement.

Historiquement, le déferlement a d'abord été étudié dans une approche cinématique, vague à vague. En 1893, J. H. Michell a ainsi calculé que dans le cadre de la cinématique des vagues développée par Stokes aux ordres supérieures (1880), valable en eau profonde, la cambrure maximale était de l'ordre de 14 %. Pendant la Seconde Guerre Mondiale, sur la base de nombreux essais en houle régulière, l'ingénieur R. Miche étendit l'expression de la cambrure limite au déferlement aux profondeurs intermédiaires, connue sous le nom de critère de Miche. Ce critère tend vers la cambrure limite de 14 % en eau profonde, et en faible profondeur vers la valeur limite  $(H/h)_b = 0,88$ , où  $h$  est la hauteur d'eau. Ce critère de déferlement (*breaker index*) a par la suite été adapté au cas de la houle aléatoire sur fonds à pente non nulle incluant notamment la cambrure au déferlement et la pente des fonds, de manière à prendre en compte les deux mécanismes causant le déferlement.

Cependant, dans les applications d'ingénierie, et particulièrement pour l'établissement de rejeux d'états de mer de longue durée, l'approche spectrale a peu à peu pris une place prépondérante. Une percée majeure a été réalisée en 1978 par le professeur Battjes qui, avec son étudiant Hans Janssen, a développé un modèle spectral paramétrique de dissipation d'énergie par le déferlement bathymétrique (noté BJ78), regroupant trois équations principales :

- l'équation du taux de dissipation  $D$  :

$$D = \frac{dEc_g}{dx} = \frac{\alpha}{4} \rho g f_{rep} H_m^2 Q_b \quad (1)$$

- l'équation portant sur la fraction de vagues déferlantes  $Q_b$  :

$$\frac{1-Q_b}{-\ln Q_b} = \left( \frac{H_e}{H_m} \right)^2 \quad (2)$$

- une équation de fermeture pour le calcul de la hauteur maximale au déferlement  $H_m$  :

$$H_m = \frac{2\pi\gamma_d}{k_p} \tanh \left( \gamma_s \frac{k_p h}{2\pi\gamma_d} \right) \quad (3)$$

Pour cette dernière équation, Battjes et Janssen ont ainsi cherché à adapter le critère de Miche (valable en houle régulière) pour les houles irrégulières.  $\gamma_d$ , considéré égal à 0,14, est la cambrure limite en eau profonde (où  $H_m \rightarrow \gamma_d/L_0$ ), tandis que  $\gamma_s$  est un nouveau critère valable en faible profondeur (où  $H_m \rightarrow \gamma_s h$ ). Dans un premier temps, Battjes et Janssen fixent sa valeur à  $\gamma_s = 0,8$ . Dans l'équation (1),  $f_{rep}$  est une fréquence représentative, ici la fréquence spectrale moyenne  $f_{0,1}$ .

En 1985, Battjes et Stive ont recherché une formulation plus convaincante de  $\gamma_s$ , cherchant à le relier à la cambrure au large, à la pente des fonds ou à d'autres grandeurs classiques. Ils ont abouti au résultat comme quoi seule la cambrure au large influe sur la valeur de  $\gamma_s$ . Cherchant d'abord à calibrer la dissipation d'énergie  $D$ , ils ont ainsi proposé la calibration suivante :

$$\gamma_s = 0,5 + 0,4 \tanh(33S_0) \quad (4)$$

où  $S_0 = H_{e,0}/L_{0,p}$  est la cambrure au large, calculée à partir de la hauteur énergétique  $H_e = H_{m0}/\sqrt{2}$ , la fréquence  $f_{rep}$  étant la fréquence de pic  $f_p$ . Hamm (1995) a validé cette formulation en la confrontant à des mesures en nature et en laboratoire, mais en la bornant à la valeur minimale de 0,6 pour le cas des très faibles cambrures.

En 2007, Janssen et Battjes (JB07) ont amélioré BJ78/BS85 en revoyant l'estimation de  $Q_b$

(considérant  $f_{rep} = f_{01}$ ), ce qui les a amené à reprendre la paramétrisation de  $\gamma_s$  :

$$\gamma_s = 0,39 + 0,56 \tanh(33S_0) \quad (5)$$

On voit ainsi que ce critère de déferlement peut prendre des valeurs typiquement entre 0,55 et 0,9, et que par conséquent l'influence de ce critère peut être prépondérante dans la zone littorale. On voit donc l'intérêt à estimer correctement ce paramètre pour des études d'ingénierie où des calculs instationnaires sur de longues durées (typiquement 25 ans) sont nécessaires (ce critère ne pouvant ainsi être paramétré manuellement pour chaque pas de temps) dans des configurations telles que des ouvrages côtiers en faible profondeur, des zones découvrantes par fort marnage, ou enfin des bathymétries complexes (ridens, barres de déferlement...). L'objet de cette étude est ainsi d'examiner la possibilité d'implémenter un modèle de déferlement intégrant cette variabilité du critère  $\gamma_s$  dans SWAN, un modèle de génération / propagation des états de mer de 3<sup>ème</sup> génération largement utilisé en ingénierie côtière. On souhaite également étudier la performance de modèles spectraux paramétriques unidimensionnels, utiles pour les configurations bathymétriques simples ou les calculs préliminaires.

## **II – Les modèles spectraux de propagation des états de mer**

### **II – 1 Les modèles spectraux paramétriques 1D**

Un modèle spectral paramétrique unidimensionnel permet la modélisation simple de la propagation d'un état de mer, représenté par sa densité spectrale. La dissipation de l'énergie se fait alors uniquement sur le terme de déferlement bathymétrique.

SOGREAH, devenu ARTELIA en 2011, a développé le code HOCOULI sur ce modèle, en s'appuyant sur les travaux de thèse de Hamm (1995). En plus de la propagation de la houle dans la zone côtière et littoral, il permet d'en déduire le calcul du courant et du transit littoraux. Le déferlement bathymétrique  $\gamma$  est représenté à l'aide du modèle de BJ78, calibré par BS85, avec la valeur minimale de  $\gamma_s$  à 0,6 introduite par Hamm (1995).

### **II – 2 Les modèles spectraux de 3<sup>ème</sup> génération**

SWAN est un code de calcul développé et maintenu par l'Université de Technologie de Delft (Pays-Bas), dédié à la modélisation de la propagation et de la génération de la houle en zone côtière. Il a représenté une nouvelle percée majeure en proposant un modèle spectro-angulaire complet prenant en compte notamment les phénomènes de moutonnement, de triades et de quadruplets (Booij et al., 1999). Dans ce contexte, le modèle paramétrique BJ78, retenu pour la modélisation du déferlement bathymétrique et qui prend en compte la cambrure limite au large, doit être adapté. L'équation de fermeture est ainsi réduite à sa valeur limite en faible profondeur :  $H_m = \gamma h$ . La partie eau profonde et sa transition vers l'eau peu profonde par une tangente hyperbolique ainsi que la dualité  $\gamma_d/\gamma_s$  disparaissent :  $\gamma$  est une valeur constante de  $\gamma_s$ , fixée par défaut à 0,73 (valeur moyenne des résultats BS85).

Cette simplification de l'équation de fermeture se justifie par la volonté de restreindre la dissipation au seul déferlement bathymétrique en excluant la dissipation par cambrure limite au large, traitée par ailleurs par les modèles de moutonnement (*whitecapping*). L'implémentation retenue pose cependant deux questions :

- la disparition de la tangente hyperbolique affecte-t-elle la précision du modèle en profondeur intermédiaire ?;
- la constance du paramètre  $\gamma$  est-elle acceptable en mode instationnaire, sur de longues séries où les conditions de houle incidente varient drastiquement entre les houles longues et les mers de vent ?

Il est à noter que depuis la version 41.01 de SWAN, une paramétrisation complexe de  $\gamma$  est

proposée : c'est la paramétrisation  $\beta - kd$ , qui dépend de la pente et de la hauteur d'eau adimensionnelle (Salmon et al., 2015). Celle-ci nécessite cependant le réglage d'un grand nombre de paramètres, ce qui rend son utilisation délicate dans des études d'ingénierie visant à simuler des rejeux sur de longues durées.

### II – 3 Modifications apportées à SWAN

Nous avons ainsi cherché à déterminer si l'implémentation de ces formulations complètes dans SWAN pouvait répondre à ces deux problématiques. Une version modifiée de SWAN 41.20 a donc été créée, permettant l'utilisation des modèles de déferlement suivants :

- modèle Battjes et Janssen (1978) : valeur constante de  $\gamma_s$  (modèle dit BJ78) ou calibration de Battjes et Stive (1985) (modèle dit BS85) ;
- modèle de Janssen et Battjes (2007) avec calibration associée de  $\gamma_s$  (modèle dit JB07).

Les calibrations du critère de déferlement reposant sur la cambrure au large, cela pose un problème pratique d'implémentation. On y remédie en définissant un point de référence à partir duquel on va estimer les conditions au large à l'aide d'un calcul simple de réfraction inverse :

$$H_{m0,0} = \frac{H_{m0,init}}{K_r K_s} = \frac{H_{m0,init}}{\sqrt{\frac{\cos \theta_0}{\cos \theta_{init}}} \sqrt{\frac{c_{g0}}{c_{g,init}}}} \quad (6)$$

où  $H_{m0,init}$  est la valeur de  $H_{m0}$  à ce point de référence. Dans le cas d'un calcul 1D, son choix est évident : il s'agit du premier point (côté large) du profil des fonds. En revanche, dans le cas d'un calcul 2D, et particulièrement pour des bathymétries complexes, ce choix est plus délicat. La solution retenue est de renseigner ce point dans le fichier de calcul à l'aide des indices X et Y de sa position sur la grille de calcul. Par défaut, si ces indices ne sont pas renseignés, le point le plus profond de la grille est retenu.

## III – Validation sur des cas-tests

### III – 1 Méthodologie et présentation des cas-tests

Le principe de la validation consiste à comparer le modèle de déferlement de Battjes et Janssen implémenté dans SWAN (équation (3) simplifiée,  $\gamma_s = 0,73$  constant) avec les modèles modifiés (JB78 originel avec équation (3) complète et  $\gamma_s = 0,8$  constant, JB78 calibré BS85, JB07), ainsi qu'au résultat d'un calcul HOCOULI. Cette comparaison se fait sur les cas-tests 1D suivants :

- test en canal Bar Run 5 de Battjes et Janssen 1978 ;
- tests en canal MS10 et MS40 de Stive 1985 ;
- tests en canal 1C et 2A de la campagne LIP11D de 1993 (Arcilla et al., 1994) ;
- mesures de Bertin et al. (2017) réalisée sur l'île d'Oléron à St-Trojan (France) en février 2017.

Les conditions d'entrée de ces tests sont présentées dans le Tableau 1 ci-après, ainsi que les valeurs associées du critère de déferlement pour les calibrations de BS85 et de JB07. La limitation de 0,6 incluse dans HOCOULI n'a pas été transposée à SWAN, car celle-ci n'a été justifiée par Hamm (1995) que pour un modèle spectral paramétrique.

Tableau 1. Conditions d'entrée pour les cas-tests

Cas-test	Hm0 (m)	Tp (s)	$\gamma_s$ BS85	$\gamma_s$ JB07
<b>BJ78 Bar Run 5</b>	0,202	2,01	0,77	0,76
<b>Stive 1985 MS10</b>	0,183	2,93	0,62	0,56
<b>Stive 1985 MS40</b>	0,192	1,58	0,84	0,86
<b>LIP11D-1C 1993</b>	0,564	8,0	0,55	0,46
<b>LIP11D-2A 1993</b>	0,842	5,0	0,70	0,67

<b>Bertin 2017 - St-Trojan, 04/02/2017 09h35</b>	2,15	11,3	0,60	0,53
<b>Bertin 2017 - St-Trojan, 04/02/2017 09h35</b>	2,86	12,3	0,61	0,54
<b>Bertin 2017 - St-Trojan, 04/02/2017 09h35</b>	6,00	20,0	0,57	0,49

Les calculs SWAN sont réalisés en mode 1D, en 3<sup>ème</sup> génération. Le spectre, de type JONSWAP ( $\gamma = 3,3$ ) est discrétisé en 32 bandes fréquentielles réparties entre  $f_p/2$  et  $3f_p$ . La discrétisation directionnelle est de  $0,5^\circ$  avec un étalement directionnel de  $m = 500$  (exposant de la formule de Pierson). Le frottement, les triades et les quadruplets sont désactivés, à l'exception des triades pour les tests LIP11D. Le calcul du *set-up* est activé. Enfin le moutonnement n'est activé que pour le modèle originel de SWAN, puisque la cambrure limite en eau profonde n'est pas intégrée dans l'équation de fermeture simplifiée.

### III – 2 Résultats

L'évolution de la hauteur significative  $H_{m0}$  pour les différents cas-tests en canal à houle est illustrée sur les Figures 1 à 3. Le modèle originel de SWAN est noté CON, d'après le mot-clé correspondant à utiliser dans le fichier de calcul (pour « constant »).

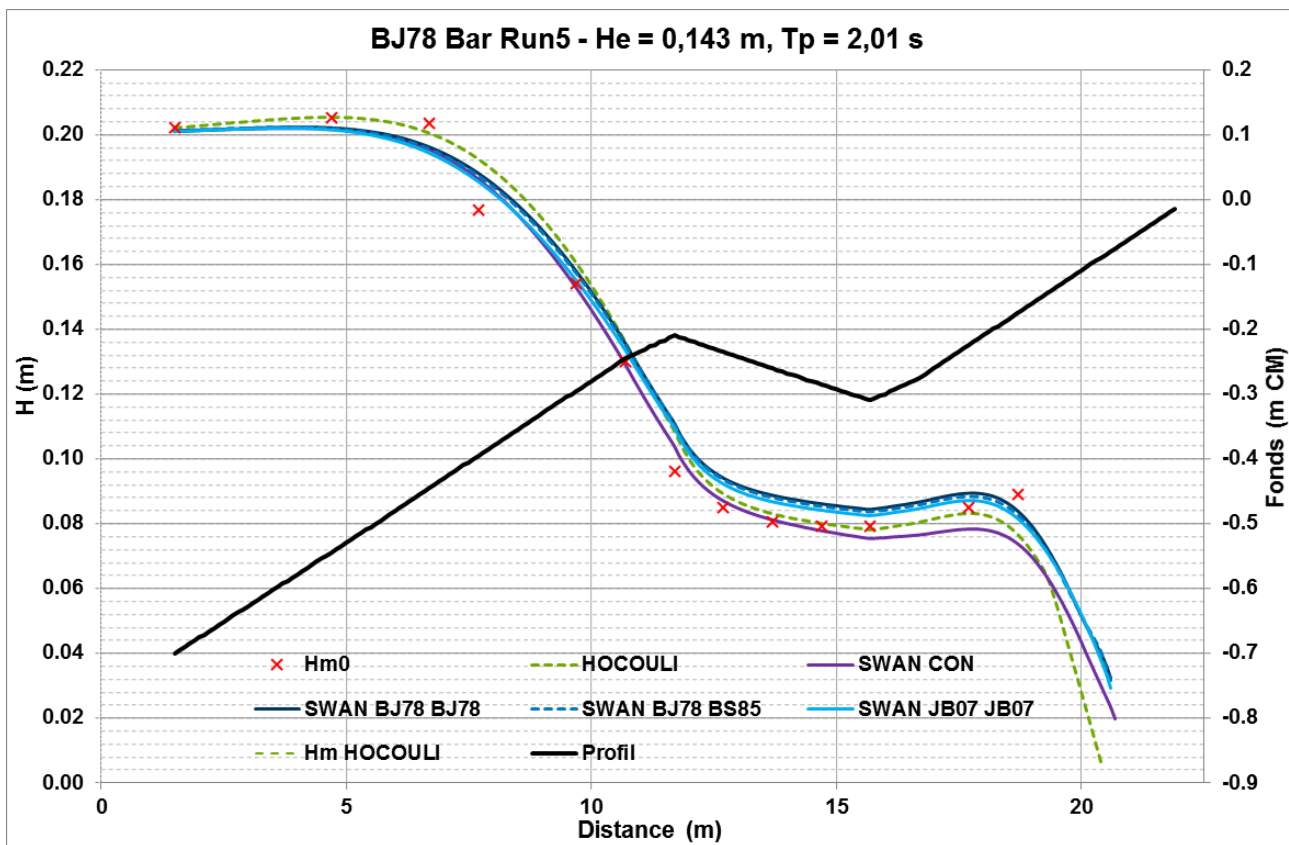


Figure 1. Evolution de  $H_{m0}$  pour le cas BJ78 Bar Run 5

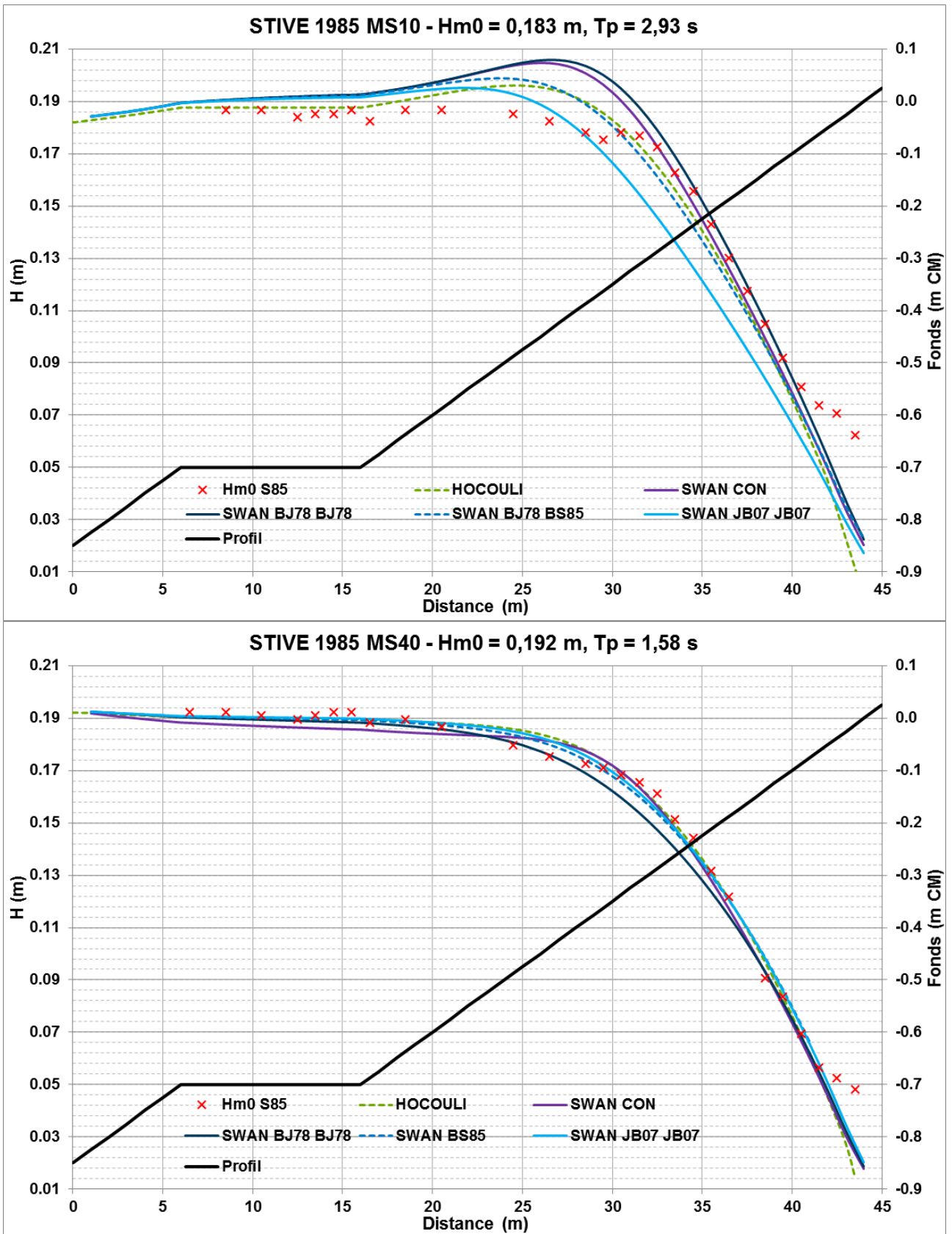


Figure 2. Evolution de  $H_{m0}$  pour les cas MS10 et MS40 de Stive 1985

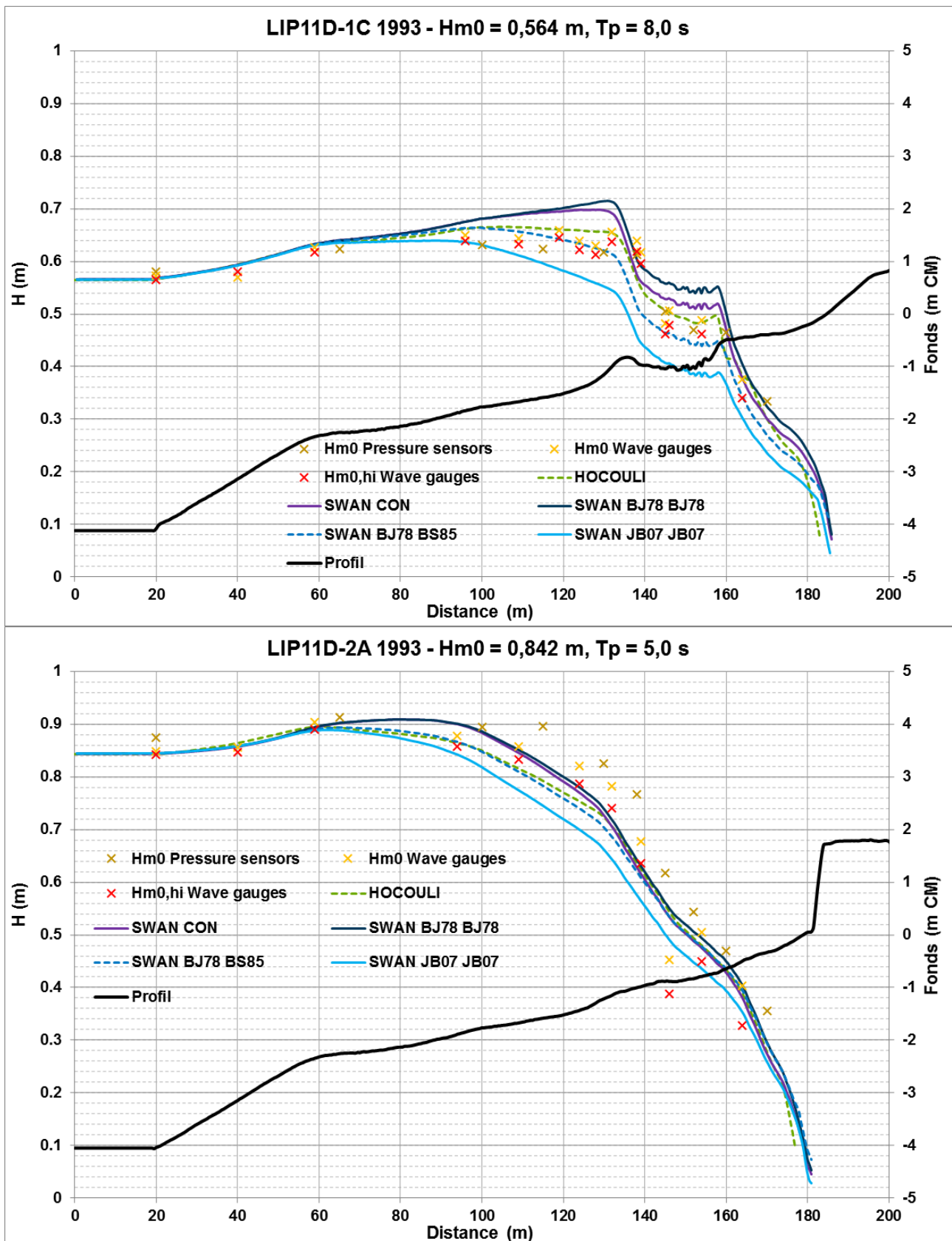


Figure 3. Evolution de  $H_{m0}$  pour les cas 1C et 2A de LIP11D (1993)

Concernant SWAN, il n'est pas facile de faire ressortir un modèle par rapport aux autres. On observe une tendance (non-systématique) à la sous-estimation par le modèle de JB07. L'implémentation dans le code source de SWAN de sa formule modifiée de calcul de la fraction de vagues déferlantes  $Q_b$  étant complexe, il n'est pas totalement exclu que ce modèle ne soit pas totalement correctement implémenté. La comparaison sur le paramètre  $Q_b$ , non présentée ici, montre

que la dissipation d'énergie est nettement plus forte sur ce modèle.

Il est intéressant de comparer les modèles CON et BJ78 d'une part, BS85 et HOCOULI d'autre part. Dans le premier cas,  $\gamma_s$  est constant (0,73 contre 0,80). On peut ainsi s'attendre à des comportements similaires, avec un déferlement plus intense du modèle CON du fait d'un critère plus faible : c'est bien le cas sur les tests Stive MS10, LIP11D-1C et LIP11D-2A. En revanche, les comportements diffèrent nettement pour les tests BJ78 Bar Run 5 et Stive MS40. La modification de l'équation de fermeture (3) pourrait ainsi être la cause de ces écarts. Concernant BS85 et HOCOULI, on compare ici le même modèle de déferlement implémenté, l'un sur un modèle paramétrique, l'autre sur un modèle spectral complet de 3<sup>ème</sup> génération. Or, si le comportement est assez similaire sur les tests Stive MS10, Stive MS40 et LIP11D-2A, les différences sont assez notables sur BJ78 Bar Run 5 et LIP11D-1C. De façon générale, on note le très bon comportement de HOCOULI pour tous les cas-tests.

L'emplacement des deux points de mesure à St-Trojan de la campagne de février 2017 de Bertin et al. (2017) est indiquée sur la Figure 4, avec l'évolution de  $H_{m0}$  pour trois pas de temps retenus dans la série de mesures. De fortes ondes basse fréquence ont été mesurées durant cette campagne, ce qui se voit notamment par l'écart entre le  $H_{m0}$  total et le  $H_{m0}$  haute fréquence à l'appareil de mesures proche de la plage lors de la tempête du 3 février 2017, lors de laquelle la période de pic a atteint 20 s.

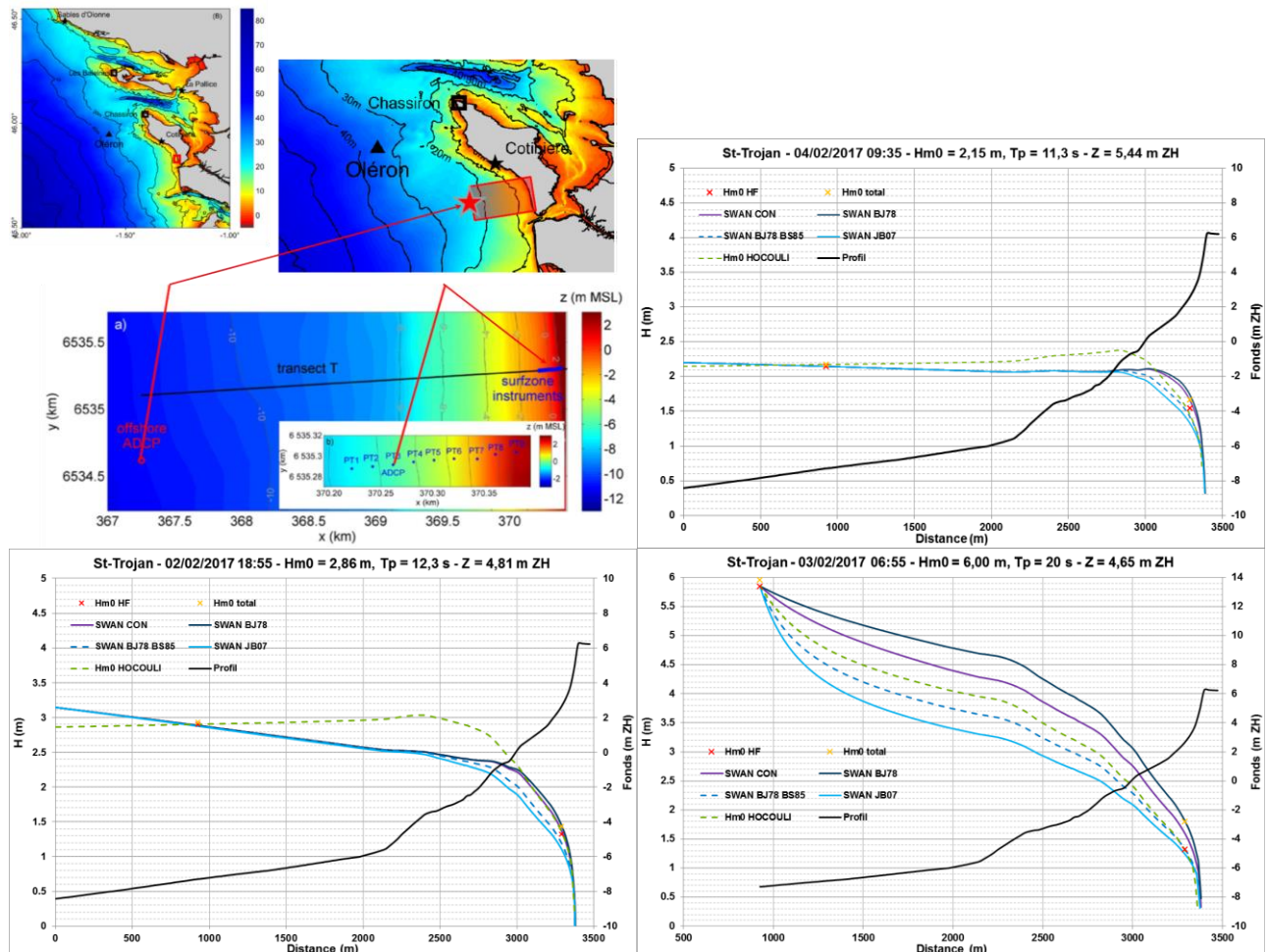


Figure 4. Emplacement des mesures de Bertin et al. (2017) et évolution de  $H_{m0}$  pour 3 pas de temps

On note dans un premier temps la différence entre la propagation calculée par HOCOULI et celle calculée par SWAN (hors déferlement) pour les deux premiers pas de temps. Pour reproduire la mesure du large du 2 février 2017 à 18h55, il a fallu augmenter la valeur de  $H_{m0}$  en entrée du calcul SWAN, la hauteur significative décroissant rapidement. Pour ces deux mesures, les modèles CON et



BJ78 sont un peu au-dessus de la mesure du  $H_{m0}$  haute fréquence, tandis que les modèles BS85 et surtout JB07 tendent à la sous-estimer. Le calcul HOCOULI, quant à lui, s'approche très près de cette valeur. Concernant la tempête du 3 février, la valeur de 6 m, 20 s en début de profil (hauteur d'eau de l'ordre de 12 m) est très difficile à faire atteindre pour l'ensemble des modèles (SWAN et HOCOULI) car le déferlement débute de façon très intense dès le début du calcul. Cependant, à la plage, HOCOULI et les modèles BS85 et JB07 retrouvent remarquablement bien la mesure dans le domaine des hautes fréquences.

#### **IV – Discussions et conclusions**

Les essais de validation ont montré la bonne implémentation des modèles de déferlement complets avec critère de déferlement variable dans le code source de SWAN (sous réserve de vérifications complémentaires pour le modèle JB07). On dispose donc, avec le modèle BJ78 calibré BS85, d'une option fonctionnelle pour réaliser des calculs instationnaires de longue durée permettant de faire déferler de façon différencier les houles longues et les mers de vent jeunes, et ce de façon fiable. Il faut néanmoins poursuivre les comparaisons pour préciser le gain en précision dans la zone littorale.

La comparaison avec un modèle spectral paramétrique simple, reposant sur la réfraction linéaire pour la propagation et le déferlement bathymétrique seul pour la dissipation, a montré par contraste la difficulté à isoler l'effet du déferlement bathymétrique dans un modèle spectral complet de 3<sup>ème</sup> génération, pour lequel il faut paramétrer en outre la discrétisation et la forme de la densité spectro-angulaire, les interactions non-linéaires (triades et quadruplets), et les autres formes de dissipation que sont le frottement sur le fond et le moutonnement (*whitecapping*). La multiplicité des processus à paramétrer peut expliquer en partie la difficulté à conclure sur l'amélioration de la précision.

Les tests présentés ici ont en outre montré la très grande robustesse du code HOCOULI, qui reproduit remarquablement bien la hauteur significative  $H_{m0}$  pour des situations très différentes. De par sa simplicité d'utilisation (classeur Excel et macros en VBA) et sa rapidité de calcul (~ 1 s), il est outil particulièrement fiable et pratique pour des calculs préliminaires d'ingénierie. Ainsi, il peut être utilisé pour des calculs préparatoires lors d'essais en modèle physique, comme illustré par les deux exemples suivants.

La Figure 5 montre l'évolution de  $H_{m0}$  sur un essai en canal à houle pour un projet côtier à Merlimont (Pas-de-Calais), dans des conditions centennales (hauteur ~ 5 m, période ~ 12 s). On observe au cours de la propagation le développement d'une composante basse fréquence non négligeable (hauteur significative proche de 1,5 m). Cependant, HOCOULI reproduit fidèlement le domaine des hautes fréquences.

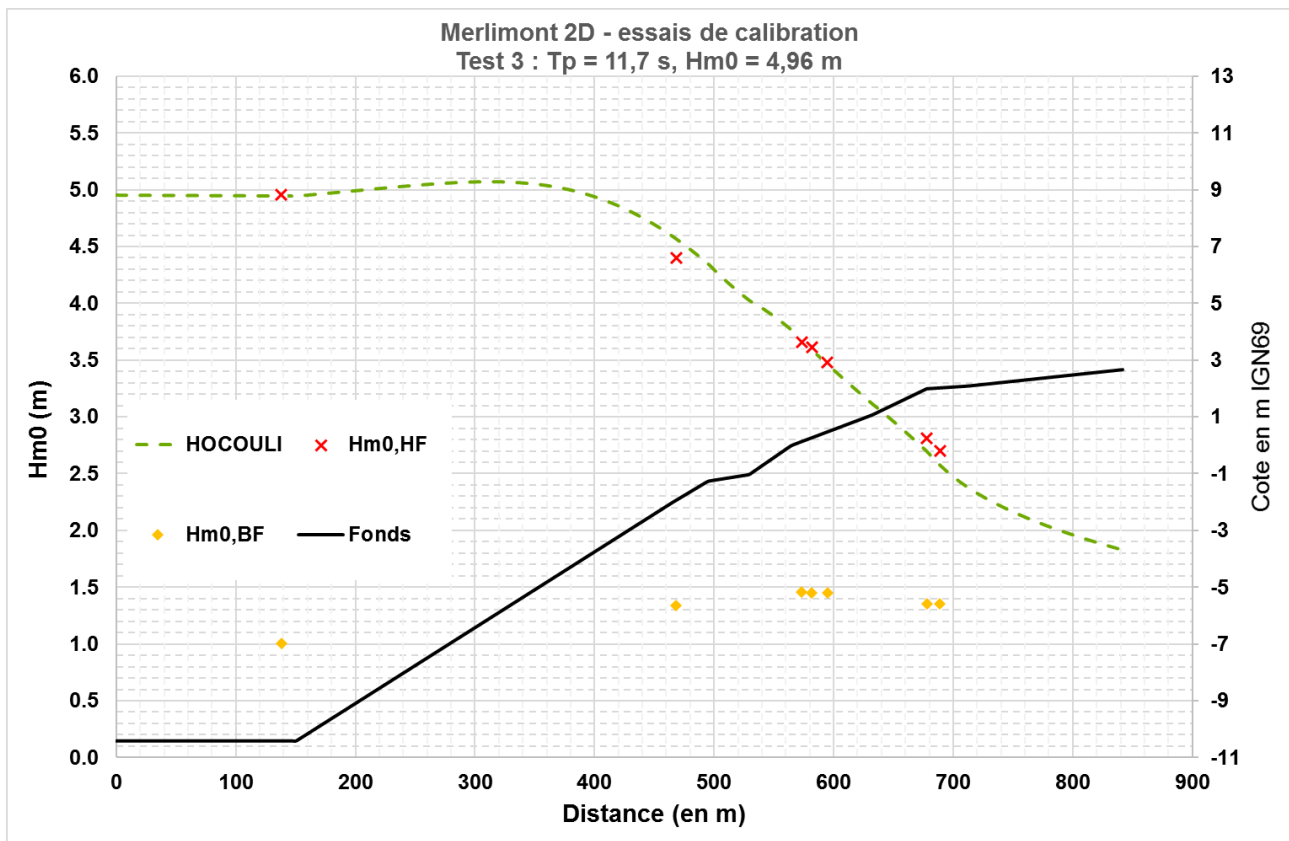


Figure 5. Evolution de  $H_{m0}$  pour l'étude « Merlimont » en canal à houle (ARTELIA, 2018)

La Figure 6 montre les hauteurs de vagues mesurées dans un bassin à houle à l'occasion d'une étude sur l'extension du port de la Cotinière (Charente-Maritime). En plus de la hauteur spectrale, on a mesuré les hauteurs statistiques  $H_{1/3}$ ,  $H_{1/10}$  et  $H_{max}$ . Ces dernières valeurs sont calculées le long d'un profil dans le bassin à l'aide du code REPLA, qui est un code de propagation suivant l'approche vague-à-vague développé chez SOGREAH / ARTELIA suite à la thèse de Hamm (1995). Dans cette approche, chaque composante de la distribution des vagues au large (suivant une loi de Rayleigh) est propagée avec la théorie adaptée en tout point du profil (Stokes 3, cnoïdal 2, etc). La recombinaison après calcul permet d'obtenir les paramètres des vagues dans le domaine temporel.

Là encore, des composantes à basse fréquence importantes se développent dans le bassin. De ce fait, lorsque ces ondes longues élèvent temporairement le niveau de l'eau, le déferlement est retardé et les vagues les plus hautes peuvent se propager plus loin. REPLA ne prenant pas en compte ces phénomènes, on voit ainsi que les hauteurs maximales, particulièrement  $H_{max}$ , sont calculées plus faibles que la mesure. En revanche, malgré une bathymétrie complexe et la présence de ce phénomène, HOCOULI reproduit encore une fois excellentement la hauteur significative spectrale dans le domaine des hautes fréquences,  $H_{m0,h}$ .

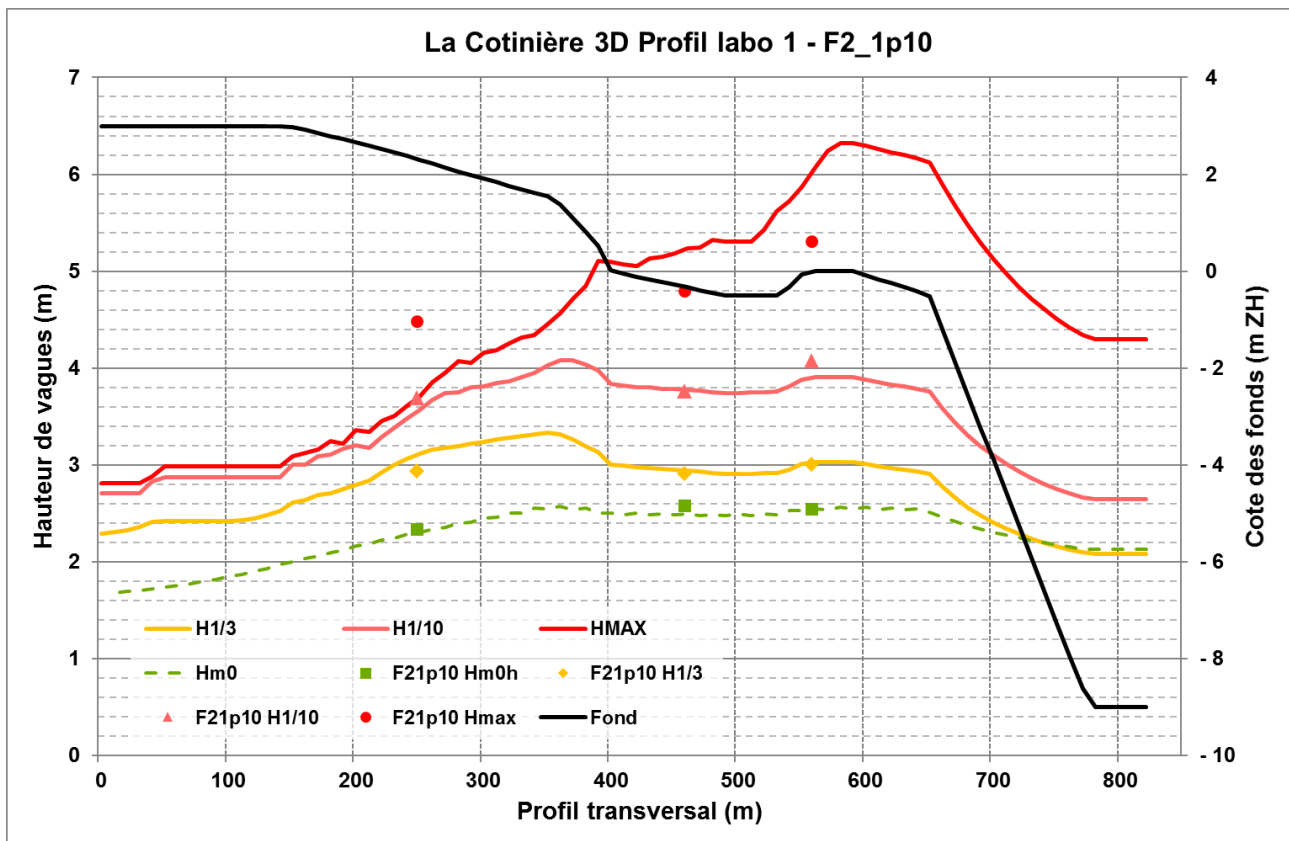


Figure 6. Evolution des hauteurs de vagues spectrale et statistiques pour l'étude « La Cotinière » en bassin à houle (ARTELIA, 2018)

On peut ainsi conclure l'étude en soulignant la robustesse du modèle de Battjes et Janssen (1978) calibré par Battjes et Stive (1985), avec la limite inférieure de Hamm (1995) pour un modèle spectral paramétrique unidimensionnel. Son implémentation dans un code spectral complet de 3<sup>ème</sup> génération tel que SWAN fournit un outil opérationnel pour affiner la modélisation du déferlement bathymétrique dans des applications d'ingénierie, et particulièrement dans un cadre instationnaire, bien que le grand nombre de phénomènes physiques pris en charge par un tel modèle nécessite une meilleure compréhension des conséquences d'un tel changement sur l'un des termes de la dissipation d'énergie.

## Références

- [1] A.S. Arcilla, J.A. Roelvink, B.A. O'Connor, A. Reniers, and J.A. Jimenez. 1994. The Delta flume '93 experiment. In *Proceedings of Coastal Dynamics '94*, ASCE, 488-502, 1994.
- [2] A. Apotsos, B. Raubenheimer, S. Elgar, and R.T. Guza. Testing and calibrating parametric wave transformation models on natural beaches. *Coastal Engineering*, 55(3), 224-235, 2008.
- [3] J. A. Battjes and J. P. F. M. Janssen. Energy loss and set-up due to breaking of random waves. In *Coastal Engineering 1978* (pp. 569-587), 1978.
- [4] J. A. Battjes and M.J.F. Stive. Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 90(C5), 9159-9167, 1985.
- [5] X. Bertin, A. de Bakker, T. Chataigner, and T. Guérin. Energy transfers and reflection of infragravity waves at a dissipative beach under extreme storm conditions. Présentation aux XBEACH Days, Delft, 2017.

- [6] N. R. R. C. Booij, R. C. Ris, and L.H. Holthuijsen. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of geophysical research: Oceans*, 104(C4), 7649-7666, 1999.
- [7] L. Hamm. *Modélisation numérique bidimensionnelle de la propagation de la houle dans la zone de déferlement*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier (Grenoble), 1995.
- [8] T.T. Janssen and J.A. Battjes. A note on wave energy dissipation over steep beaches. *Coastal Engineering*, 54(9), 711-716, 2007.
- [9] J.E. Salmon, L.H. Holthuijsen, M. Zijlema, G.P. van Vledder, and J.D. Pietrzak. Scaling depth-induced wave-breaking in two-dimensional spectral wave models. *Ocean Modelling*, 87, 30-47, 2015.