

Effet de la végétation sur la dissipation des vagues au niveau d'un pré salé

Laura LAVAUD¹, Antoine LECHEVALIER², Thibault COULOMBIER¹,
Xavier BERTIN¹, Kévin MARTINS^{3,1}

1. UMR 7266 LIENSs, CNRS/La Rochelle Université, 2 rue Olympe de Gouges, 17000 La Rochelle, France.
laura.lavaud@univ-lr.fr
2. Unité Territoriale de St-Barthélémy et St-Martin de la DEAL Guadeloupe, 23 rue de Spring – Marigot, 97150 Saint-Martin, Guadeloupe, France.
3. UMR 5805 EPOC, CNRS/Université de Bordeaux, Allée Geoffroy Saint-Hilaire, 33615 Pessac, France.

Résumé :

Cette étude analyse l'effet de la végétation sur l'atténuation des vagues en combinant mesures in-situ et modélisation numérique. Une campagne de mesures a été réalisée sur un pré salé situé dans la Baie de Marennes-Oléron (Côte Atlantique française) en conditions de vagues modérées, caractérisées par des hauteurs significatives et des périodes de pic atteignant 0.65 m et 4 s, respectivement. La zone étudiée comporte deux espèces de plantes principales : la spartine (*Spartina maritima*) et l'obione (*Halimione portulacoides*). L'analyse des données révèle une atténuation de la hauteur des vagues de 1.3%/m, valeur semblable à celles reportées dans la littérature. Un système de modélisation numérique couplé vagues-courant est implémenté à l'échelle des Pertuis Charentais, afin de reproduire les conditions incidentes sur le pré-salé puis d'évaluer l'effet de la végétation sur la propagation des vagues représenté par la formulation de MENDEZ & LOSADA (2004). Les résultats montrent que la prise en compte de la dissipation des vagues par la végétation dans le modèle améliore de 85 % la prédiction de l'évolution de la hauteur des vagues sur le transect instrumenté. Ces résultats mettent en avant le rôle important de la végétation halophile dans l'atténuation de l'énergie des vagues et son potentiel de protection du littoral lors des événements extrêmes.

Mots-clés :

Végétation, Dissipation des vagues, SCHISM, Protection côtière.

1. Introduction

Les effets combinés de l'élévation du niveau de la mer associée au changement climatique et de la croissance démographique dans les zones littorales augmentent les risques de submersions marines. Face à ce constat, les systèmes de protection des côtes doivent s'adapter, en intégrant notamment de nouvelles stratégies de défense. Dans les zones littorales, la végétation halophile peuplant les marais salés et les zones intertidales, ou

Thème 1 – Hydrodynamique côtière

encore les forêts de mangroves, atténuent l'énergie des vagues (DALRYMPLE *et al.*, 1984 ; MENDEZ & LOSADA, 2004 ; MÖLLER, 2006) et peuvent limiter les surcotes (TEMMERMAN *et al.*, 2013). Ces processus suscitent un intérêt croissant dans la communauté scientifique internationale et l'utilisation potentielle de ces écosystèmes comme solution "douce" de protection du littoral est de plus en plus considérée (SUTTON-GRIER *et al.*, 2015). La dissipation des vagues par la végétation dépend du climat de vagues, des caractéristiques des plantes, mais aussi de l'hydrodynamisme local, qui contrôle le type et la répartition de celle-ci. Malgré la multiplicité de facteurs qui rend complexe la compréhension des interactions entre l'hydrodynamique littorale et la végétation, de nombreuses études ont contribué à améliorer ces connaissances grâce au développement de modèles numériques (MENDEZ & LOSADA, 2004 ; SUZUKI *et al.*, 2012 ; VAN ROOIJEN *et al.*, 2015) et à des expérimentations (DUBI & TORUM, 1995 ; MÖLLER, 2006). Cependant, la plupart de ces expérimentations se basent sur des mesures effectuées en laboratoire avec une végétation synthétique, ce qui peut poser le problème de la représentativité des résultats dans le milieu in-situ, particulièrement lors d'évènements extrêmes.

L'objectif de cette étude est donc de quantifier l'effet de la végétation sur la dissipation des vagues en conditions in-situ. Pour ce faire, une campagne de mesures a été réalisée sur un pré salé se développant dans la Baie de Marennes-Oléron (Côte Atlantique française) dans des conditions de vagues modérées. L'analyse des données est complétée par des simulations numériques réalisées avec un système de modélisation couplant un modèle spectral de vagues et un modèle de circulation.

2. Méthodes

2.1 Zone d'étude

La zone d'étude se situe sur la Côte Atlantique française, dans le département de la Charente-Maritime (figure 1). Elle est localisée dans la Baie de Marennes-Oléron, sur l'estran de Brouage. La zone intertidale de la vasière de Brouage est large de 4 km (42 km²) avec une pente moyenne de $\sim 1/800$ et des courants de marée transversaux de $\sim 0.3 \text{ m.s}^{-1}$ à $\sim 0.5 \text{ m.s}^{-1}$ (LE HIR *et al.*, 2000). En amont de la vasière, un pré salé se développe le long du rivage et se compose du bas vers le haut : de spartine maritime, de puccinellie maritime, d'obione et de soude arbustive. Le régime tidal est semi-diurne, macro-tidal, avec un marnage compris entre 1.10 m et 6.60 m. Bien que la vasière de Brouage soit protégée de la houle par l'île d'Oléron, un fetch de plusieurs dizaines de kilomètres peut se développer dans la zone sous l'effet de vents de Nord-Ouest et ainsi générer des vagues pouvant atteindre 1 m (LE HIR *et al.*, 2000).

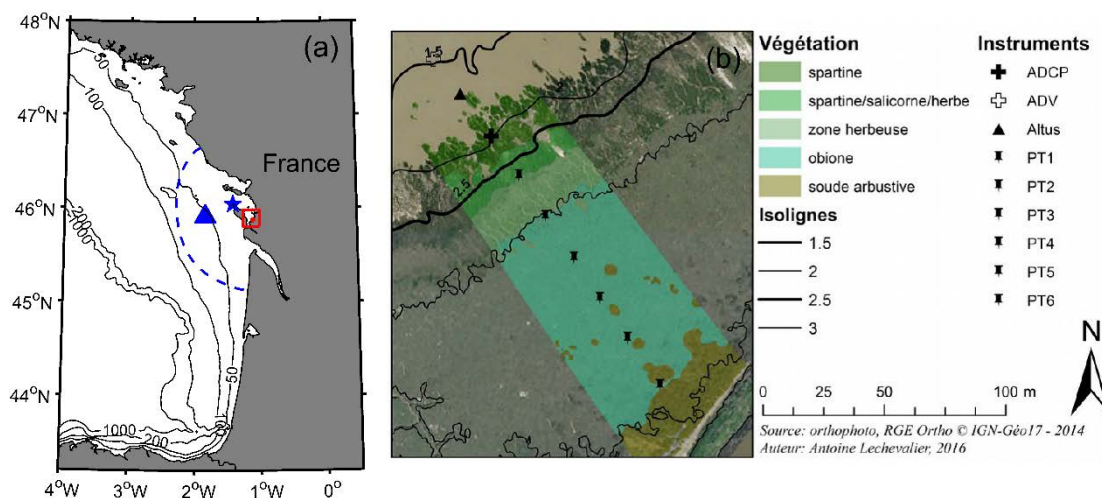


Figure 1. Localisation de la zone d'étude (rouge), de la bouée Oléron Large (triangle bleu), de la station météorologique (étoile bleue) et de la frontière ouverte de la grille de calcul (bleu) (a). Position des capteurs et types de végétation sur la zone d'étude (b).

2.2 Campagne de mesures et caractérisation de la végétation

La campagne de mesures a été réalisée du 8 au 11 mars 2016 en période de vive-eau, sur un transect de 160 m de long perpendiculaire à la bathymétrie (figure 1), avec une pente moyenne de 0.8 %. Un courantomètre ADV, un altimètre Altus, un profileur de courant ADCP ainsi que six capteurs de pression (PT) mesurant à 4 Hz, ont été déployés avec un espacement d'environ 20 m. Les PT ont été placés à la surface de l'estran, dans des tubes en inox enfoncés de 0.80 m. L'ADCP et l'ADV, également équipés de capteurs de pression mesurant à 2 et 16 Hz respectivement, ont été disposés dans des structures en inox vissées dans l'estran. La position des instruments ainsi que la topographie ont été relevées au GNSS différentiel. Des vents forts de Nord-Ouest ont été enregistrés dans les Pertuis Charentais pendant la campagne avec une vitesse maximale de $17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (rafales à $24 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) le 9 mars, permettant de développer des vagues de l'ordre de 0.65 m sur la zone d'étude. Afin de représenter la dissipation des vagues par la végétation dans le modèle, il est nécessaire d'en définir les caractéristiques (tableau 1). Plusieurs mesures ont été effectuées sur la zone d'étude, puis moyennées.

Tableau 1. Caractéristiques des principaux végétaux présents sur la zone d'étude.

	<i>Spartine</i>	<i>Obione</i>
Hauteur (m)	0.27 ± 0.05	0.80 ± 0.20
Densité (plants.m ⁻²)	990 ± 10	680 ± 10
Aire d'un plant par unité de hauteur (m)	0.032 ± 0.002	0.03 ± 0.01

Thème 1 – Hydrodynamique côtière

2.3 Analyse des données

Les signaux de pression au fond issus des différents capteurs ont d'abord été corrigés des variations de la pression atmosphérique mesurée à la station météorologique de Chassiron (figure 1). Chaque signal est organisé en échantillons de 15 min pour les PT et l'ADV, et en échantillons de 8 min 30 s pour l'ADCP. Une analyse spectrale par transformée de Fourier discrète est ensuite aliqualée aux échantillons afin de calculer les spectres de densité d'énergie ($E_p(f)$). Un fenêtrage de Hann est utilisé ainsi qu'une aroche par sous-blocs : 10 sous-blocs sont considérés pour les PT et l'ADV et 5 pour l'ADCP (soit 20 et 10 degrés de liberté respectivement). Les spectres de densité d'énergie sont ensuite corrigés de l'atténuation de la pression avec la profondeur d'après la théorie linéaire pour obtenir des spectres d'élévation de la surface libre ($E(f)$). La hauteur significative spectrale (H_{m0}) et la période moyenne des vagues (T_{m02}) sont alors calculées comme suit :

$$H_{m0} = 4\sqrt{m_0} \quad (1)$$

$$T_{m02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (2)$$

Où m_n sont les moments d'ordre n :

$$m_n = \int_{f_{min}}^{f_{max}} f^n E(f) df \quad (3)$$

Dans l'équation (3), f_{min} , fixée à 0.04 Hz, correspond à la fréquence de coupure entre les bandes infra-gravitaire et gravitaire. f_{max} , fixée à 0.5 Hz, est la fréquence de coupure haute, définie comme la fréquence maximale au-delà de laquelle l'atténuation du signal avec la profondeur ne peut plus être corrigée.

2.4 Système de modélisation

2.4.1 Description du système de modélisation

Dans cette étude, les simulations numériques sont réalisées avec le système de modélisation SCHISM (ZHANG *et al.*, 2016). Il réalise le couplage complet entre un modèle de circulation hydrodynamique 3D et le modèle spectral de vagues WWMII (ROLAND *et al.*, 2012) qui résout l'équation de conservation de l'action des vagues. Les deux modèles partagent la même grille non structurée et décomposition du domaine pour la parallélisation. Le modèle de circulation est basé sur l'utilisation de schémas semi-implicites et d'une méthode Eulérienne-Lagrangienne pour résoudre l'advection, ce qui permet de s'affranchir des contraintes de stabilité numérique.

Dans cette étude, le modèle de circulation est utilisé en mode 2DH barotrope et le pas de temps est fixé à 60 s. Il est couplé à WWMII, avec un pas de temps de 600 s, utilisé dans cette étude avec une formulation implicite. Le déferlement bathymétrique est calculé d'après le modèle de BATTJES & JANSSEN (1978) pour lequel les paramètres γ et α ont été fixés à 0.55 et 0.035 respectivement. La valeur de 0.035 pour α correspond à 40 fois β , la pente de la vasière de Brouage. PEZERAT *et al.* (2020) montrent qu'au niveau des

fonds en pente faible, cette paramétrisation adaptative améliore la prédiction des vagues par rapport à une valeur de α par défaut (proche de 1). La grille de calcul couvre la zone des Pertuis Charentais, avec une résolution de 1300 m à la frontière océanique jusqu'à 5 m dans la zone d'étude (figure 1). Dans le modèle de circulation, la marée est forcée à la frontière océanique par le modèle de marées globale FES 2014 (LYARD *et al.*, 2017). L'ensemble du domaine est forcé par les champs de vent à 10 m et de pression atmosphérique au niveau de la mer issus du système de réanalyse CFSR (SAHA *et al.*, 2014). WWMII est aussi forcé par les champs de vent CFSR et par des séries temporelles de spectres directionnels à la frontière océanique, calculées dans une application régionale du modèle spectral WaveWatchIII.

2.4.2 Implémentation de la dissipation des vagues par la végétation

Les vagues se propageant dans une zone végétalisée subissent une perte d'énergie due au travail qu'elles exercent sur les végétaux. Afin de tenir compte de la dissipation des vagues par la végétation dans le système de modélisation, le modèle de MENDEZ & LOSADA (2004) est adapté au modèle spectral de vagues WWMII comme suit (voir aussi SUZUKI *et al.*, 2012) :

$$S_{ds,veg}(\sigma, \theta) = \frac{D_{tot}}{E_{tot}} E(\sigma, \theta) \quad (4)$$

Avec

$$D_{tot} = - \frac{1}{2g\sqrt{\pi}} \tilde{C}_d b_v N \left(\frac{g\tilde{k}}{2\tilde{\sigma}} \right)^3 \frac{\sinh^3 \tilde{k}ah + 3\sinh \tilde{k}ah}{3\tilde{k} \cosh^3 \tilde{k}h} H_{rms}^3 \quad (5)$$

où H_{rms} est la hauteur quadratique des vagues, $E_{tot} = H_{rms}^2/8$ et $E(\sigma, \theta)$ la densité d'énergie totale et discrète des vagues, avec σ la fréquence relative et θ la direction de propagation des vagues. g est l'accélération de la pesanteur, h la hauteur d'eau, \tilde{C}_d le coefficient de traînée, b_v l'aire d'un plant par unité de hauteur, N la densité des plants, $\alpha.h$ la hauteur des plants, \tilde{k} le nombre d'onde moyen et $\tilde{\sigma}$ la fréquence relative moyenne.

3. Résultats et discussion

3.1 Caractérisation des conditions incidentes à l'ADV

L'analyse des données expérimentales à l'ADV montre que la hauteur des vagues H_{m0} incidente (début du transect instrumenté) a atteint 0.65 m à la marée haute du 9 mars après-midi, pour une période moyenne comprise entre 3 et 4 s (figure 2). Le modèle reproduit de manière raisonnable les hauteurs d'eau, H_{m0} et T_{m02} avec des erreurs normalisées de 10 %, 16 % et 20 % respectivement (figure 2). Ces résultats suggèrent également que le modèle capture correctement l'état de mer bimodal caractérisé par une houle de Nord-Ouest (Période de pic T_p de 10 s et H_{m0} atteignant 5 m mesurés à la bouée Oléron Large, voir figure 1 pour sa localisation) et une mer de vent générée localement par des vents de Nord-Ouest atteignant 17 m.s⁻¹.

Thème 1 – Hydrodynamique côtière

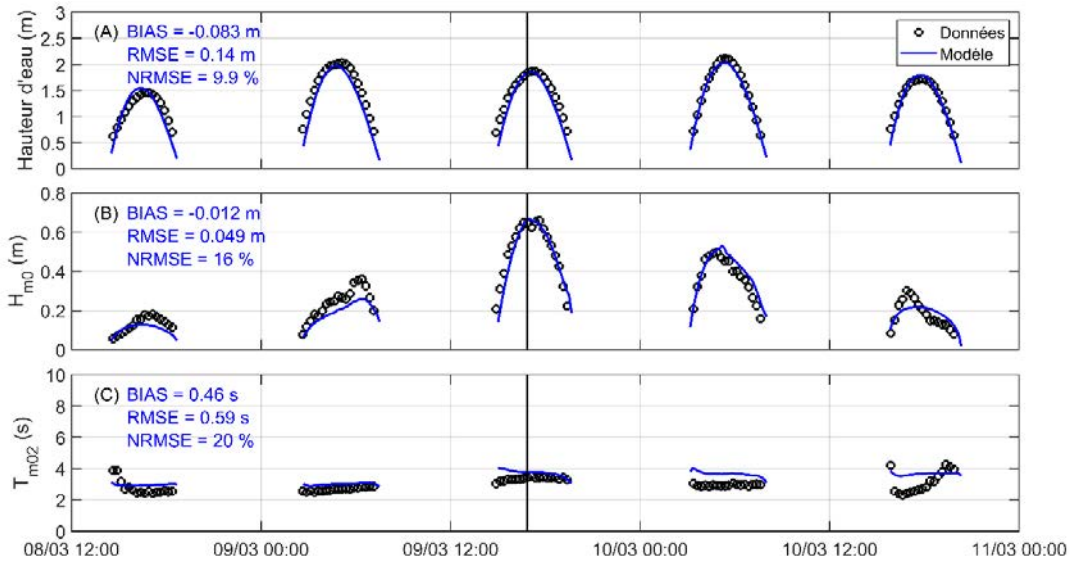


Figure 2. Comparaison de la hauteur d'eau (A), de H_{m0} (B) et T_{m02} (C) mesurés et modélisés à l'ADV. La ligne verticale définit le pas de temps présenté sur la figure 3.

3.2 Evolution des vagues sur le transect étudié

L'analyse des données montre que la hauteur des vagues est réduite de 1.3 %/m sur les 50 premiers mètres de la zone végétalisée (de $x=30$ à 80 m sur la figure 3), valeur semblable à celles reportées dans la littérature (MÖLLER, 2006 ; MÖLLER & SPENCER, 2002), puis complètement atténuée après 70 m (< 0.05 m).

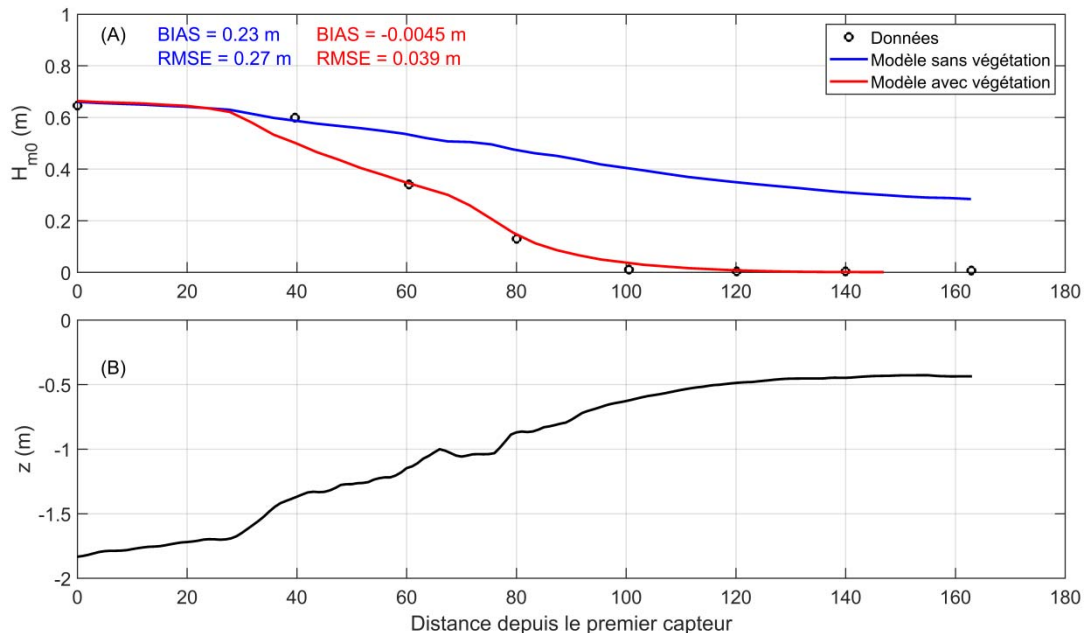


Figure 3. Comparaison de H_{m0} mesuré et modélisé, avec (rouge) et sans (bleu) la dissipation des vagues par la végétation, le long du transect à marée haute le 09/03 après-midi (A). Cote du fond par rapport à la surface libre (B).

Afin d'étudier l'effet de la végétation sur la propagation des vagues, deux simulations numériques ont été réalisées en prenant en compte, ou sans le terme de dissipation des vagues par la végétation. Nous considérons dans le modèle que le transect est composé uniquement des deux espèces de plantes principales de l'estran : la spartine (de $x=30$ à 75 m sur la figure 3) et l'obione (de $x=75$ m jusqu'en haut de l'estran). Selon la formulation de MENDEZ & LOSADA (2004) pour calculer C_d , celui-ci est égal à 0.09 pour la spartine et 0.54 pour l'obione. Les résultats révèlent que l'évolution de H_{m0} est correctement reproduite par le modèle qui tient compte de la végétation avec une erreur quadratique moyenne de 0.04 m et un biais inférieur à 0.01 m. A l'inverse, le modèle sans végétation fournit une prédiction inexacte de l'évolution de H_{m0} avec une erreur de l'ordre de 0.30 m et un biais de 0.20 m (Figure 3). Cette analyse montre que le modèle est capable de reproduire de manière satisfaisante l'atténuation des vagues par la végétation et que celle-ci peut avoir un rôle prépondérant dans la dissipation des vagues dans les zones littorales propices au développement de végétation halophile.

4. Conclusion et perspectives

Cette étude a pour objectif d'examiner la dissipation des vagues par la végétation. Le système de modélisation SCHISM-WWMII est aliéné aux mesures réalisées sur un pré salé situé dans la Baie de Marennes-Oléron. La prise en compte de la dissipation des vagues par la végétation dans le modèle améliore de 85 % la prédiction de l'évolution de la hauteur des vagues sur le transect instrumenté par rapport à une simulation excluant ce processus. Ce résultat montre alors l'influence importante de la végétation sur la propagation des vagues. Un autre effet de la végétation sur l'hydrodynamique littorale a été identifié par DEAN & BENDER (2006), qui montrent que la propagation des vagues à travers la végétation peut induire une diminution du niveau moyen, résultant de la propagation de vagues non-linéaires sur un fond très rugueux. L'analyse de nos données expérimentales suggère un phénomène similaire, avec un abaissement du niveau moyen de l'ordre de 0.05-0.10 m. Ces valeurs sont toutefois proches de la marge d'erreur associée à notre protocole expérimental. Cette étude confirme la capacité de la végétation à atténuer l'énergie des vagues et incite à approfondir l'analyse de son action potentielle sur les surcotes. De nouvelles mesures seront réalisées à l'hiver 2020/2021 en conditions plus énergétiques pour vérifier ces résultats.

5. Références bibliographiques

- BATTJES J. A., JANSSEN J.P.F.M. (1978). *Energy loss and set-up due to breaking of random waves*. Coastal Engineering Proc., pp 569-587. <https://doi.org/10.9753/icce.v16.32>
- DALRYMPLE R. A., KIRBY J.T., HWANG P.A. (1984). *Wave diffraction due to areas of energy dissipation*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. 110(1), pp 67-79. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1984\)110:1\(67\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1984)110:1(67))

Thème 1 – Hydrodynamique côtière

- DEAN R.G., BENDER C.J. (2006). *Static wave setup with emphasis on damping effects by vegetation and bottom friction*. Coastal engineering, Vol. 53(2-3), pp 149-156. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.10.005>
- DUBI A., TØRUM A. (1995). *Wave damping by kelp vegetation*. In Coastal Engineering 1994, pp 142-156. <https://doi.org/10.1061/9780784400890.012>
- LE HIR P., ROBERTS W., CAZAILLET O., CHRISTIE M., BASSOULLET P., BACHER C. (2000). *Characterization of intertidal flat hydrodynamics*. Continental shelf research, Vol. 20(12-13), pp 1433-1459. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(00\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(00)00031-5)
- LYARD F., CARRERE L., CANCEM M., GUILLOT A., PICOT N. (2017) *FES2014, a new finite elements tidal model for global ocean*, submitted in Ocean Dynamics.
- MENDEZ F.J., LOSADA I.J. (2004). *An empirical model to estimate the propagation of random breaking and nonbreaking waves over vegetation fields*. Coastal Engineering, Vol. 51(2), pp 103-118. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2003.11.003>
- MÖLLER I. (2006). *Quantifying saltmarsh vegetation and its effect on wave height dissipation: Results from a UK east coast saltmarsh*. Estuarine Coastal Shelf Sci., Vol. 69, pp 337–351. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2006.05.003>
- MÖLLER I., SPENCER T. (2002). *Wave dissipation over macro-tidal saltmarshes: Effects of marsh edge typology and vegetation change*. Journal of Coastal Research, Vol. 36(sp1), pp 506-521. <https://doi.org/10.2112/1551-5036-36.sp1.506>
- PEZERAT M., MARTINS K., BERTIN X. (2020). *Modelling storm waves in the nearshore area using spectral models*. Journal of Coastal Research, in press.
- ROLAND A., ZHANG Y.J., WANG H.V., MENG Y., TENG Y-C., MADERICH V., BROVCHENKO I., DUTOUR-SIKIRIC M., ZANKE U. (2012). *A fully coupled 3D wave-current interaction model on unstructured grids*. Journal of Geophysical Research: Oceans, Vol. 117(C11). <https://doi.org/10.1029/2012JC007952>
- SAHA S., MOORTHY S., X. WU., J. WANG., S. NADIGA., P. TRIPP, D. BEHRINGER., HOU Y.-T., CHUANG H.-Y., IREDELL M., EK M., MENG J., YANG R.Q., PEÑA MENDEZ M., VAN DEN DOOL H., ZHANG Q., WANG W., CHEN M., BECKER E. (2014). *The NCEP climate forecast system version 2*. Journal of climate, Vol. 27(6), pp 2185-2208. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00823.1>
- SUTTON-GRIER A.E., WOWK K., BAMFORD H. (2015). *Future of our coasts: The potential for natural and hybrid infrastructure to enhance the resilience of our coastal communities, economies and ecosystems*. Environmental Science & Policy, Vol. 51, pp 137-148. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.04.006>
- SUZUKI T., ZIJLEMA M., BURGER B., MEIJER M.C., NARAYAN S. (2012). *Wave dissipation by vegetation with layer schematization in SWAN*. Coastal Engineering, Vol. 59(1), pp 64-71. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.07.006>
- TEMMERMAN S., DE VRIES M., BOUMA T.J. (2012). *Coastal marsh die-off and reduced attenuation of coastal floods: A model analysis*. Global and Planetary Change, Vol. 92, pp 267-274. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.06.001>

*XVI^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil
Le Havre 2020*

VAN ROOIJEN A.A., MCCALL R. T., VAN THIEL DE VRIES J. S. M., VAN DONGEREN A. R., RENIERS A. J. H. M., ROELVINK J. A. (2016). *Modeling the effect of wave-vegetation interaction on wave setup*. Journal of Geophysical Research: Oceans, Vol. 121(6), pp4341-4359. <https://doi.org/10.1002/2015JC011392>

ZHANG Y.J., FEI Y., STANEV E.V., GRASHORN S. (2016). *Seamless cross-scale modeling with SCHISM*. Ocean Modelling, Vol. 102, pp 64-81. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2016.05.002>

Thème 1 – Hydrodynamique côtière