

Modélisation du clapot sur les estrans lagunaires colonisés par des herbiers : implémentation dans WAVEWATCH III de la dissipation des vagues par la végétation

Arnaud LE PEVEDIC ^{1,2}, Aldo SOTTOLICHIO ², Florian GANTHY ¹

1. Ifremer, LITTORAL, Quai du Commandant Silhouette, 33120 Arcachon, France.
alepeved@ifremer.fr
2. Université de Bordeaux, UMR EPOC 5805, CNRS, Allée Geoffroy Saint-Hilaire, 33615 Pessac, France.

Résumé :

Cet article présente l'ajout d'un nouveau terme source dans le modèle spectral de vagues WAVEWATCH III, afin de prendre en compte la dissipation des vagues par les herbiers. Une calibration préliminaire de ce modèle a été effectuée pour le bassin d'Arcachon. Le modèle a ensuite été utilisé pour comprendre comment la régression des herbiers de zostères naines, ayant lieu depuis 30 ans, a impacté les conditions de vagues. Une augmentation des vitesses orbitales a été observée à l'échelle du bassin pendant cette période, pouvant atteindre 70% dans les zones où les herbiers ont le plus régressé.

Mots-clés :

WAVEWATCH III, Végétation, *Zostera noltei*, Clapot, Modélisation, Bassin d'Arcachon.

1. Introduction

La végétation côtière est reconnue comme une solution efficace pour lutter contre l'érosion littorale, de par sa capacité à stabiliser les sols et à atténuer les vagues (ANDERSON *et al.*, 2011). L'atténuation des vagues par la végétation est un processus complexe qui repose aussi bien sur les caractéristiques des vagues que sur celles des herbiers, telles que leur surface et densité (HOUSER *et al.*, 2015). Cependant, les plantes halophytes subissent une importante régression à l'échelle mondiale (SCHUBERT *et al.*, 2015), leur empêchant de fournir les mêmes services écosystémiques qu'auparavant. Le bassin d'Arcachon, abritant le plus grand herbier de zostères naines d'Europe, subit cette tendance, et il est à prévoir que cette régression ait engendré des modifications sur l'agitation de surface.

L'intégration des herbiers dans un modèle numérique permet de représenter plus fidèlement qu'une simple longueur de rugosité les processus physiques liés à la présence de végétation, grâce à la prise en compte de paramètres biologiques. Alors que l'effet de la végétation a déjà été implémenté dans plusieurs modèles (SUZUKI *et al.*, 2012 ; BACCHI *et al.*, 2014), ce n'est pas encore le cas pour le modèle WAVEWATCH III (ou

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

WW3, TOLMAN, 2002), qui est pourtant largement utilisé par la communauté océanographique littorale. L'objectif de cette étude est, dans un premier temps, de combler ce retard en implémentant l'effet de la végétation dans WW3. Ensuite, cette nouvelle version du modèle sera utilisée dans le bassin d'Arcachon, afin de caractériser l'impact de la régression des herbiers sur les conditions de vagues dans la lagune.

2. Matériel et Méthodes

2.1 Modèle de vagues

WAVEWATCH III (TOLMAN, 2002) est un modèle à phase moyennée qui repose sur la décomposition spectrale de l'état de mer en nombres d'ondes k et directions θ . Dans ce modèle, l'évolution de la densité spectrale est décrite par l'équation d'action des vagues :

$$\frac{\partial N(k,\theta)}{\partial t} + \nabla_x [(C_g + U)N(k,\theta)] + \frac{\partial}{\partial k} \dot{k}N(k,\theta) + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta}N(k,\theta) = \frac{S_{tot}(k,\theta)}{\sigma} \quad (1)$$

avec $N(k,\theta)$ la densité spectrale d'action des vagues, C_g la vitesse de groupe et U la vitesse des courants moyennés sur la verticale. S_{tot} représente le terme source total d'énergie, dans lequel sont regroupés les divers processus induisant une modification de l'énergie des vagues. Parmi eux, le frottement sur le fond, qui est pris en compte à travers le terme source développé par ARDHUIN *et al.* (2003), dont la paramétrisation repose sur la longueur de rugosité de Nikuradse. Le calcul de cette longueur de rugosité fait intervenir le diamètre médian des sédiments (D_{50}), obtenu à partir d'une étude granulométrique réalisée dans le bassin d'Arcachon par BOUCHET (1968). Dans le cadre de cette étude, un nouveau terme source a été implémenté dans S_{tot} , afin de prendre compte la dissipation des vagues par la végétation : S_{veg} .

2.2 Implémentation de la végétation dans WW3

La formulation du taux de dissipation des vagues aléatoires par les herbiers pour un modèle spectral, développée par MENDEZ & LOSADA (2004), a été transformée en terme source pour le modèle SWAN (BOOIJ *et al.*, 1999), par SUZUKI *et al.* (2012). Ce terme source a alors été adapté pour être implémenté dans WW3 :

$$S_{veg} = -\sqrt{\frac{2}{\pi}} g^2 \widetilde{C}_D b_v N \left(\frac{\bar{k}}{\bar{\sigma}} \right)^3 \frac{\sinh^3 \bar{k}l + 3 \sinh \bar{k}l}{3\bar{k} \cosh^3 \bar{k}h} \sqrt{E_{tot}} F(k,\theta) \quad (2)$$

avec $F(k,\theta)$ la densité spectrale d'énergie, \widetilde{C}_D le coefficient de trainée global, l la hauteur des pieds courbés (d'après LOSADA *et al.*, 2016), ρ la masse volumique de l'eau, g l'accélération de la pesanteur, h la hauteur d'eau, b_v la largeur des pieds et N la densité de pieds. Tout comme WW3, SWAN est un modèle spectral reposant sur l'équation

d'action des vagues. Cependant, SWAN est un modèle spectral en fréquence-direction (σ, θ) , alors que WW3 possède une discrétisation en nombre d'onde-direction (k, θ) . La paramétrisation de SUZUKI *et al.* (2012), utilisant un nombre d'onde moyenné (\tilde{k}) et une fréquence moyennée ($\tilde{\sigma}$) et reposant sur une dissipation uniforme du spectre d'énergie sur toute la plage de fréquences, rend ainsi possible l'implémentation de cette paramétrisation dans le modèle (k, θ) WW3.

Toutefois, l'Eq.2 a été développée pour de la végétation rigide et ne prend pas en compte le caractère flexible de celle-ci. La flexibilité peut être prise en compte à travers le coefficient de traînée (VAN VEELLEN *et al.*, 2020), qui nécessite une calibration *ad hoc* car il est fortement dépendant des caractéristiques d'herbiers et des conditions de vagues. Cette étude n'ayant pas encore fait l'objet d'une calibration pour ce coefficient, le coefficient de traînée défini par PAUL & AMOS (2011) pour des zostères naines est utilisé :

$$\tilde{C}_D = 0.06 \left(\frac{153}{Re_v} \right)^{1.45} \quad (3)$$

Avec, Re_v le nombre de Reynolds pour les herbiers :

$$Re_v = \frac{b_v u_b}{\nu} \quad (4)$$

où ν est la viscosité cinématique de l'eau et u_b la vitesse orbitale sur le fond.

2.3 Description du site d'étude

Le bassin d'Arcachon (figure 1) est une lagune mésotidale de 174km², dont environ 70% de sa surface est intertidale. Son régime de marée est semi-diurne, avec un marnage allant de 0.8m en marées de mortes-eaux à 4.6m en marées de vives-eaux. Il est composé d'un réseau de multiples chenaux principaux, secondaires et internes, reliés à un système de deux passes qui connectent le bassin à l'océan ouvert. La flèche du Cap Ferret sert de barrière naturelle, en empêchant la houle de pénétrer à l'intérieur de la lagune. L'agitation de surface à l'intérieur du bassin correspond donc en grande majorité à du clapot. Le bassin d'Arcachon est extensivement colonisé par les herbiers de zostères naines (*Z. noltei*), qui occupent la majorité des estrans et qui recouvraient environ 50% de sa surface en 1989. Cependant, entre 1989 et 2007 les herbiers de zostères naines ont subi une importante régression de leur surface occupée, qui est passée de 68.5 km² à 45.7 km², soit une régression de 33%.

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

2.4 Description des simulations

Deux configurations d’herbiers ont été sélectionnés : un scénario pré-régression (herbiers dans leur configuration de 1989, figure 1a) et un scénario post-régression (herbiers dans leur configuration de 2012, figure 1b). Ces années sont celles des données disponibles sur le recouvrement des herbiers dans le bassin d’Arcachon. Les caractéristiques d’herbiers sont obtenues à partir des données de GANTHY (2011) et considérées identiques pour les deux scénarios, avec une densité de 73706 m⁻², une largeur de feuilles de 0.00113 m et une longueur de feuilles de 0.126 m. Bien que la saisonnalité joue un rôle important sur les caractéristiques des zostères naines, cette étude se limite à l’impact de la régression des herbiers en conditions estivales (maximum de leur croissance annuelle).

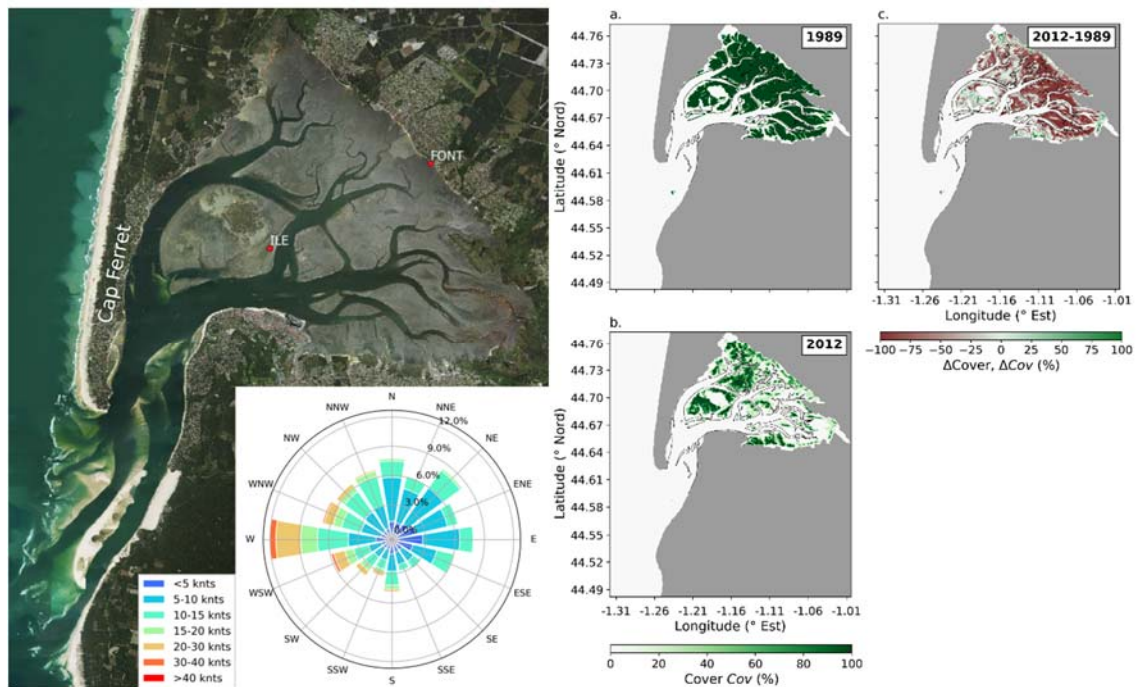


Figure 1. Carte du bassin d’Arcachon avec les points de mesures utilisés pour la calibration du modèle de vagues. Représentation statistique des vents dans le bassin entre 1967 et 2020 (coin inférieur droit). À droite : Cartes de recouvrement des herbiers en configurations pré régression (a) et post régression (b), obtenues à partir de la méthode décrite dans PLUS et al. (2010). (c) Différence pré- et post-régression.

La houle ne pénétrant pas dans le bassin, seul du clapot sera modélisé pour représenter l’agitation de surface. À partir d’une étude statistique des données issues de la station météorologique du Cap Ferret (figure 1), trois scénarios typiques de vent ont été sélectionnés, présentés en Tableau 1. Chaque scénario de vent est simulé avec des herbiers en conditions pré-régression et post-régression, pour un total de 6 simulations. Ces

simulations sont effectuées du 29 Mars au 13 Avril 2020, sur un cycle de marée morte-eau / vive-eau, en utilisant la bathymétrie de 2016.

Tableau 1. Description des scénarios de vents simulés.

<i>Évènement</i>	<i>Vitesse de vent</i>	<i>Direction</i>
<i>Tempête</i>	<i>22 m.s⁻¹</i>	<i>Ouest</i>
<i>Brise thermique estivale</i>	<i>9 m.s⁻¹</i>	<i>Nord-Ouest</i>
<i>Anticyclone hivernal</i>	<i>8 m.s⁻¹</i>	<i>Nord-Est</i>

3. Résultats

3.1. Calibration du modèle

Il convient de noter qu'une calibration satisfaisante pourrait être obtenue en utilisant seulement le frottement sur le fond, sans considérer l'effet de la végétation. Toutefois, l'ajout des herbiers dans WW3 est motivé par l'implémentation de ce modèle au sein d'une plateforme de modélisation bio-hydro-sédimentaire, intégrant un module biologique de croissance des zostères permettant de considérer la réponse des herbiers aux perturbations environnementales. Les variations induites sur les herbiers en réponse aux différents stress, ainsi que l'effet de la saisonnalité, ne peuvent pas être pris en compte à travers une simple longueur de rugosité. L'ajout d'un terme de dissipation supplémentaire faisant intervenir les caractéristiques de la végétation est donc nécessaire.

La calibration du modèle (figure 2) a été effectuée en deux points, à savoir un site en milieu de bassin (ILE) et un site en fond de bassin (FONT) (figure 1), où les hauteurs du clapot ont été mesurées par des capteurs de pression. Ces deux points de mesure sont intertidaux, avec une hauteur d'eau variant entre 0 et 3.17m à ILE et 0 et 1.94m à FONT. Pour ces deux sites, la calibration obtenue est très satisfaisante, particulièrement pour les vagues les plus importantes (>0.5m). Les différences qui subsistent entre le modèle et les données proviennent très probablement des mesures de pression *in situ*, et des difficultés inhérentes à la reconstruction de la surface libre en présence de clapot en milieu intertidal. Cependant, ce modèle vise avant tout à calculer les contraintes de cisaillement sur le fond, afin de simuler les flux sédimentaires dans le bassin. On cherche donc principalement à s'assurer que les tendances observées, ainsi que les conditions les plus énergétiques susceptibles de générer de forts événements d'érosion, soient bien reproduites. Sous ces conditions, on peut affirmer que le modèle est correctement calibré.

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

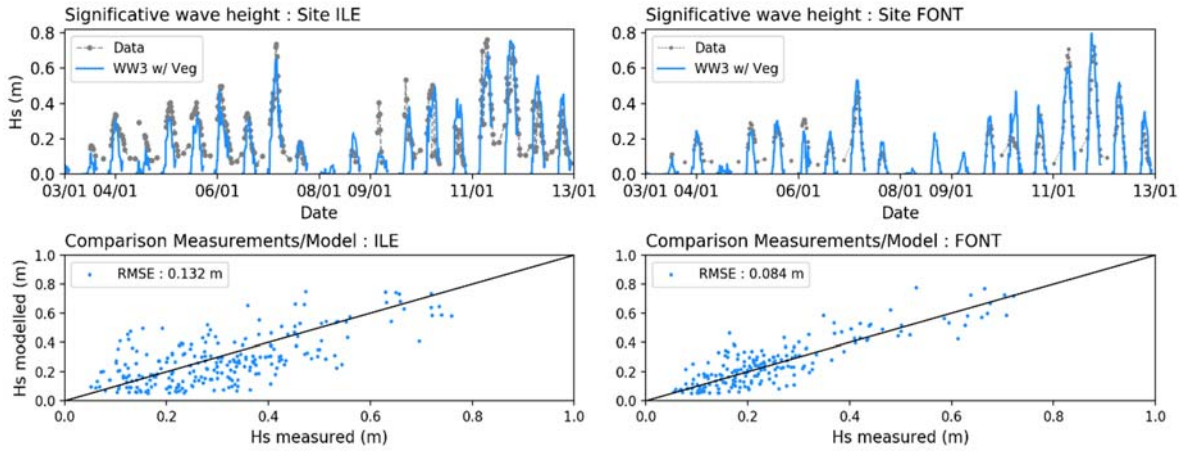


Figure 2. Résultats de calibration du modèle en termes de hauteurs significatives pour les 2 sites de mesures présentés en figure 1.

3.2. Impacts de la régression des herbiers

L'impact de la régression est évalué sur les vitesses orbitales sur le fond générées par les vagues. Sur les estrans, une nette tendance à l'augmentation de ces vitesses est observée pour chaque scénario (figure 3), avec une augmentation plus importante dans les zones où les herbiers ont le plus régressé. En effet, dans le fond du bassin, où la régression peut excéder les 80% (figure 1c), les vitesses orbitales vont jusqu'à doubler dans le cas d'une tempête type (figure 3a) et peuvent augmenter d'environ 70% dans le cas d'une brise thermique (figure 3b). Ces résultats témoignent donc d'une corrélation positive entre la régression des herbiers et l'augmentation des vitesses orbitales dans le bassin d'Arcachon.

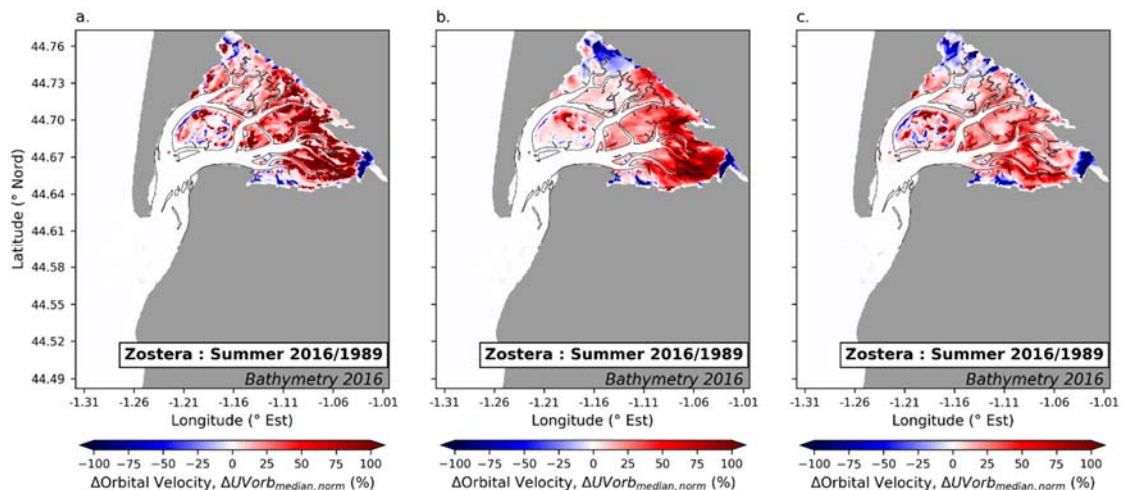


Figure 3. Impacts de l'évolution du recouvrement des herbiers de zostères naines sur l'évolution des vitesses orbitales dans le cas d'une tempête (a), d'une brise thermique estivale (b) et d'un anticyclone d'hivernal (c).

De plus, certains estrans sur lesquels le recouvrement des herbiers n'a pas évolué, voire légèrement augmenté, accusent également une augmentation des vitesses orbitales, pouvant atteindre les 20%, comme c'est le cas au niveau de l'île aux Oiseaux (ILE). Cela témoigne de l'impact de la régression des herbiers sur les vagues à l'échelle du bassin et non seulement dans les zones où les herbiers ont régressé. Cette tendance est également visible dans les chenaux (figures 3b et c), où les vitesses orbitales ont augmenté de l'ordre de 30% dans les chenaux internes et jusqu'à 10% dans les chenaux secondaires, dans le cas d'un anticyclone hivernal (figure 3c).

Les vitesses orbitales impactent fortement les contraintes de cisaillement sur le fond et leur accroissement devrait donc générer un renforcement de l'érosion du fond sédimentaire. Les risques d'érosion sont d'autant plus importants, que la capacité des herbiers à stabiliser les sols est amoindrie par leur régression. Les trois régimes de vents étudiés étant les plus énergétiques et les plus fréquents au cours d'une année (figure 1), il est fortement probable que la régression des herbiers ait engendré une augmentation des flux d'érosion tout au long de l'année.

4. Conclusions et perspectives

Cette étude a consisté à implémenter l'effet de la végétation dans le modèle WAVEWATCH III. Néanmoins, des étapes de calibration supplémentaires sont requises, en particulier la paramétrisation du coefficient de trainée, afin de mieux caractériser les interactions vagues-herbiers dans le bassin. Ce modèle a d'ores et déjà été couplé à la plateforme bio-hydro-sédimentaire MARS3D - MUSTANG - WW3 de l'Ifremer, qui sera utilisée afin d'étudier le rôle des herbiers sur les flux sédimentaires dans le bassin d'Arcachon.

Dans ce travail, la nouvelle version de WAVEWATCH III a été utilisée pour évaluer l'impact de la régression des herbiers sur les vitesses orbitales des vagues dans le bassin. Ces vitesses ont fortement augmenté sur les estrans où les herbiers ont régressé. De plus, l'effet local du déclin des herbiers est visible à l'échelle globale du bassin d'Arcachon, avec des conditions de vagues qui peuvent être affectées sur les estrans où aucune régression n'est notable, mais qui peuvent également induire des modifications de l'agitation de surface jusque dans les chenaux.

5. Remerciements

Ce travail fait partie du projet ARCADE, financé par la Région Nouvelle Aquitaine, le SIBA et le PNMBA. Un support financier de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne a été apporté pour la thèse d'A. Le Pevédic. Nous remercions le BRGM pour son soutien dans cette étude, particulièrement Alexandre Nicolae-Lerma pour son expertise et Paul Bayle pour son aide dans l'analyse des données issues des capteurs de pression.

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

6. Références bibliographiques

- ANDERSON M.E., SMITH J.M., MCKAY S.K. (2011). *Wave dissipation by vegetation*. U.S. ERDC/CHL CHETN-I-82. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center.
- ARDHUIN F. O'REILLY W. C., HERBERS T.H.C, JESSEN P. F. (2003). *Swell Transformation across the Continental Shelf. Part I: Attenuation and Directional Broadening*. Journal of Physical Oceanography 33, 1921-1939
- BACCHI V., GAGNAIRE-RENOU E., DURAND N., BENOIT M. (2014). *Wave energy dissipation by vegetation in TOMAWAC*, 21st Telemac & Mascaret User Club.
- BOUCHET J. M. (1968). *Etude océanographique des chenaux du bassin d'Arcachon*. Thèse Doctorat d'Etat, Université Bordeaux I, 168 pp.
- BOOIJ N., RIS R.C., HOLTHUIJSEN L.H. (1999). *A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation*. Journal of Geophysical Research 104 (C4), 7649–7666.
- GANTHY F. (2011). *Rôle des herbiers de Zostères (Zostera noltii) sur la dynamique sédimentaire du Bassin d'Arcachon*. Thèse de doctorat, Univ. Bordeaux I, 284 p.
- HOUSER C., TRIMBLE S., MORALES B. (2015). *Influence of Blade Flexibility on the Drag Coefficient of Aquatic Vegetation*. Estuaries and Coasts 38:569-77.
- LOSADA I.J., MAZA M., LARA J.L. (2016). *A New Formulation for vegetation-induced damping under combined waves and currents*. Coastal Engineering 107:1-13.
- 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 51:103-118.
- PAUL M., AMOS C.L. (2011). *Spatial and seasonal variation in wave attenuation over Zostera Noltii*. Journal of Geophysical Research 116:C08019. doi: 10.1029/2010JC006797.
- PLUS M., DALLOYAU S., TRUT G., AUBY I., DE MONTAUDOUIN X., EMERY E., NOËL C., VIALA C. (2010). *Long-term evolution (1988–2008) of Zostera Spp. meadows in Arcachon Bay (Bay of Biscay)*. Estuarine, Coastal and Shelf Science 87:357-366.
- SCHUBERT P.R., HUKRIEDE W., KAREZ R., REUSCH T.B.H. (2015). *fug Mapping and modeling eelgrass Zostera Marina distribution in the western Baltic Sea*. Marine Ecology Progress Series 522:79-95.
- SUZUKI T., ZIJLEMA M., BURGER B., MEIJER M.C., NARAYAN S. (2012). *Wave dissipation by vegetation with layer schematization in SWAN*. Coastal Engineering 59(1):64-71.
- TOLMAN H.L. (2002). *Distributed-memory concepts in the wave model WAVEWATCH III*. Parallel Computing 28:35-52.
- VAN VEELLEN T.J., FAIRCHILD T.P., REEVE D.E, KARUNARATHNA H. (2020). *Experimental study on vegetation flexibility as control parameter for wave damping and velocity structure*. Coastal Engineering 157:103648.