



L'atténuation des vagues par les herbiers de Posidonies, un service écosystémique contre l'érosion côtière

Yann LEREDDE¹, Kamil BEGNY², Héloïse MICHAUD³, Céline JACOB²,
Thibault SCHVARTZ², Sébastien THORIN², Patrick MARSALEIX⁴

1. Géosciences Montpellier, UMR 5243, Université de Montpellier, CNRS, Place E. Bataillon, 34095 Montpellier cedex 5, France. *Yann.Leredde@gm.univ-montp2.fr*
2. Créocéan, agence Languedoc-Roussillon, Les Belvédères – Bâtiment B, 128 avenue de Fès, 34080 Montpellier, France. *montpellier@creocean.fr*
3. SHOM, Météopole, 42 avenue G. Coriolis, 31000 Toulouse, France. *heloise.michaud@shom.fr*
4. SIROCCO Group, Laboratoire d'Aérodynamique, Université de Toulouse, CNRS, 14 avenue E. Belin, 31400 Toulouse cedex, France. *patrick.marsaleix@aero.obs-mip.fr*

Résumé :

Dans la baie d'Aigues-Mortes (Méditerranée Occidentale), les herbiers de Posidonies subissent de fortes pressions anthropiques et ont vu leur population diminuer de moitié depuis 10 ans. Les services écosystémiques rendus, notamment pour la biodiversité, sont toutefois très importants. Dans cette communication, nous nous intéressons au service particulier et parfois ignoré de lutte contre l'érosion côtière. En effet, situés entre 5 et 15 m de profondeur, ces herbiers jouent un rôle non négligeable d'atténuateur de houle. Afin d'évaluer cette atténuation, une approche par modélisation numérique sur la base du modèle WAVEWATCH III a été entreprise. Pour la tempête de janvier 2008, diverses configurations ont été testées. Trois types d'occupation du fond par les herbiers sont étudiées, actuelle, basée sur une cartographie la plus précise possible menée par Créocéan, nulle, illustrant un scénario catastrophe, et densifiée sur l'ensemble des plateaux rocheux. On montre par exemple que pour la tempête de janvier 2008, les hauteurs de vagues sont bien atténuées, l'énergie pouvant être réduite de 25% par la présence des herbiers.

Mots-clés : Posidonies, Atténuation, Erosion, Modèle numérique, Propagation, Vagues.

1. Introduction

Les herbiers marins sont présents dans la plupart des océans et mers du globe, particulièrement dans les zones côtières tropicales et tempérées (KUO & DEN HARTOG, 2006). L'importance des herbiers dans les systèmes côtiers a été reconnue depuis longtemps. Ils forment la base de nombreux réseaux trophiques marins en les plaçant parmi les écosystèmes les plus productifs (DUARTE & CHISCANO, 1999). Pourtant, les herbiers marins ont diminué de façon spectaculaire au cours des trois dernières décennies à un rythme alarmant (SHORT & WYLLIE-ECHEVERRIA, 1996).

La Posidonie (*Posidonia oceanica*) est une espèce marine endémique de la mer Méditerranée. Elle colonise les fonds marins jusqu'à une profondeur de 40 mètres et forme de vastes herbiers qui poussent en structures denses constituées en réseaux de rhizomes appelés mattes (BOUDOURESQUE & MEINESZ, 1982). L'herbier de Posidonies a l'une des croissances les plus lentes dans le monde, son expansion naturelle ou la recolonisation de zones endommagées pouvant être extrêmement longues (SINTES *et al.*, 2006). Aussi, cette espèce est largement protégée dans l'Union européenne (à travers la directive européenne sur les Habitats de 1992, la Convention de Barcelone (1976), et au niveau national en France (décret du 19 juillet 1988, Code de l'environnement). Pourtant, en dépit de ce cadre législatif, la Posidonie est entrée dans la liste rouge de l'UICN des espèces menacées en 2010 (PERGENT *et al.*, 2012). Entre 10% et 30% de son étendue géographique totale a été perdue depuis le début du 20^e siècle (MARBÀ *et al.*, 2014). Cette régression a de nombreuses origines mais reste essentiellement liée à l'aménagement du littoral (ORTH *et al.*, 2006). Cela est illustré dans le cas du golfe d'Aigues-Mortes (GAM) (Méditerranée Nord Occidentale), qui a vu sa population locale de Posidonies diminuer de moitié au cours des 10 dernières années (Créocéan, données non publiées). Dans le même temps, la région souffre de processus d'érosion côtière sévère induite par des tempêtes épisodiques subies au cours des 50 dernières années (GERVAIS *et al.*, 2013). Cette érosion a été récemment soulignée par une étude menée par la Société Sogreah (2011) qui prévoit que 80% des côtes du Languedoc-Roussillon va reculer à une vitesse de plus d'un mètre par an sans structures de protection. Dans cette région, les implications socio-économiques de ce phénomène sont extrêmement importantes notamment vis-à-vis du tourisme développé de manière intensive. Pour préserver ces enjeux, les gestionnaires de ces zones côtières ont abordé la question de l'érosion par des grands travaux d'ingénierie, par exemple, en 2008, par un rechargement massif de sables sur les plages (LEREDDE *et al.*, 2013).

Cependant, un service écosystémique largement reconnu des habitats benthiques côtiers tels que les herbiers marins est leur contribution à la protection contre l'érosion côtière. Ils agissent comme des zones tampons d'absorption des vagues de tempête (e.g. PAUL & AMOS, 2011). Ils induisent une dissipation d'énergie et réduisent ainsi les contraintes de cisaillement sur les fonds ce qui a des implications importantes en termes de transport de sédiments (KOCH *et al.*, 2006). Les études spécifiques portant sur l'atténuation par les herbiers de Posidonies sont rares et la plupart de celles qui existent ont été réalisées sur des modèles réduits (e.g. MANCA *et al.*, 2012) ou par des études *in situ* (e.g. INFANTES *et al.*, 2012). Ces études démontrent généralement une efficacité des herbiers à réduire la hauteur (de 10 à 60% pour KOFTIS *et al.*, 2013) et l'énergie (jusqu'à 40% pour ELGINOZ *et al.*, 2011) des vagues. Pourtant, ces résultats sont difficilement transposables à des domaines régionaux comme le GAM du fait de la forte variation spatiale de la géométrie des herbiers, du trait de côte, de la bathymétrie et des conditions hydrodynamiques *in situ*. Dans un tel contexte, nous proposons ici une

approche par modélisation numérique permettant d'intégrer toute la complexité de ces différentes variables environnementales et ceci de manière réaliste. L'objectif est au final de contribuer à l'évaluation du service écosystémique rendu par les herbiers de Posidonies en termes d'atténuation des vagues et donc de lutte contre l'érosion côtière. Pour cela, nous utilisons le modèle numérique WaveWatch III (WW3) (TOLMAN, 2014) configuré pour une grille de calcul sur le GAM et pour un épisode de tempête réel, celle de janvier 2008 pour laquelle nous disposons de données suffisantes. Trois types d'occupation du fond par les herbiers sont étudiés, actuelle, basée sur une cartographie la plus précise possible menée par Créocéan, nulle, illustrant un scénario catastrophe, et densifiée sur l'ensemble des plateaux rocheux. A travers cette étude, nous essaierons de mettre en valeur les capacités d'outil de lutte contre l'érosion côtière des herbiers de Posidonies.

2. Matériels et méthodes

Dans cette étude, la méthode utilisée pour estimer l'atténuation des vagues par les herbiers de Posidonies s'appuie sur (1) la sélection d'un site pilote approprié et une période de simulation correspondant à une tempête, (2) une paramétrisation appropriée et une validation des résultats du modèle de vagues WW3 incluant trois scénarios de couverture spatiale par les herbiers de Posidonies, (3) l'évaluation des répercussions de ces trois différentes couvertures spatiales sur la hauteur et l'énergie des vagues.

2.1 Le site d'étude

Le GAM est situé au nord du plateau du golfe du Lion, sur la côte méditerranéenne française. Il couvre la région du Languedoc-Roussillon, de la ville de Sète à la flèche de l'Espiguette. La zone abrite une biodiversité abondante et fragile. Ses lagunes et la zone côtière, avec la présence d'herbiers de Posidonies, sont classés dans le réseau de sites protégés Natura 2000. Cette zone comprend deux fonds rocheux colonisés, les Aresquiers à l'Ouest et le fond marin Carnon-Palavas à l'Est, pour une surface d'environ 25 km² et des profondeurs variant entre 8 et 15 m. Le déclin des herbiers de Posidonies est caractérisé par la partie restante de grande mattes mortes (figure 1).

A l'automne et en hiver, la région est régulièrement confrontée à des événements de tempêtes caractérisées par de fortes vagues induites par des vents violents. Ces tempêtes peuvent avoir un très fort impact sur la morphologie des plages sableuses constituant ce littoral (e.g. MICHAUD *et al.*, 2013). La tempête du 2 au 6 janvier 2008 en est un bon exemple. Elle est choisie comme période de simulation pour tester des effets atténuateurs des herbiers de Posidonies.

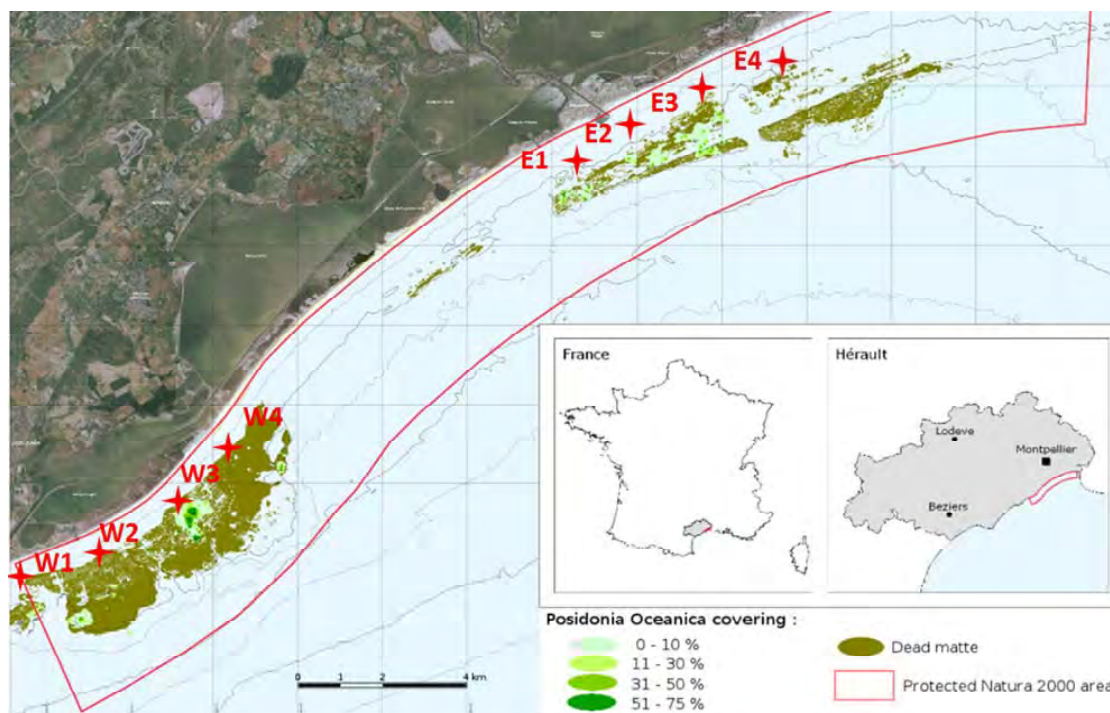


Figure 1. Couverture spatiale des herbiers de *Posidonies* dans le golfe d'Aigues-Mortes. Les points en rouge sont des points de sorties du modèle à l'Ouest (W1 à W4) sur la zone des Aresquiers et à l'Est (E1 à E4) sur la zone de Carnon-Palavas.

2.2 Le modèle numérique WW3 et sa configuration

La modèle WAVEWATCH III (WW3) (TOLMAN & HENDRIK, 2014) est un modèle de génération et d'évolution des états de la mer basé sur l'approche spectrale aussi appelée à phases moyennées. Il est co-développé par une équipe internationale et distribué par la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Ce code calcule l'évolution dans le temps et l'espace de l'énergie des différentes composantes du spectre des vagues, de l'échelle mondiale jusqu'à l'échelle littorale.

Les derniers développements apportés, entre autres par l'Ifremer et le SHOM dans la version 4.18, portent notamment sur l'ajout des paramétrisations des effets du fond (ARDHUIN *et al.*, 2010). Une autre nouveauté porte sur la possibilité d'utiliser des maillages curvilinéaires ou triangulaires, plus adaptés aux études littorales. Enfin, ce modèle est largement répandu et utilisé par la communauté scientifique sur tous les océans du globe (e.g. DELPEY *et al.*, 2010).

L'exécution du modèle se fait ici sur deux grilles de calcul. La plus grande grille a une résolution de 0,1 degré de latitude par 0,1 degré de longitude sur l'ensemble de la Méditerranée. C'est une configuration largement testée précédemment (e.g. MICHAUD *et al.*, 2013). A partir d'un état initial au repos, la simulation sur cette grande grille est exécutée du 15 décembre 2007 au 7 Janvier 2008. Les résultats de cette simulation

servent à la fois de conditions initiales et de conditions aux limites ouvertes d'une simulation à plus haute résolution centrée sur le GAM mais couvrant tout le golfe du Lion (figure 2). On utilise alors une grille de calcul, assez originale, structurée mais utilisant un maillage curviligne bipolaire (BENTSEN *et al.*, 1999) qui permet un raffinement des mailles sur toute une portion de côte (<100m) et une large couverture spatiale (figure 2.). Cette simulation à haute résolution est exécutée sur une courte période permettant des tests de sensibilité (notamment au frottement sur le fond) du 2 janvier au 6 janvier 2008. La bathymétrie (figure 2) est gracieusement fournie par le SHOM. Le forçage atmosphérique est donné par le modèle ECMWF.

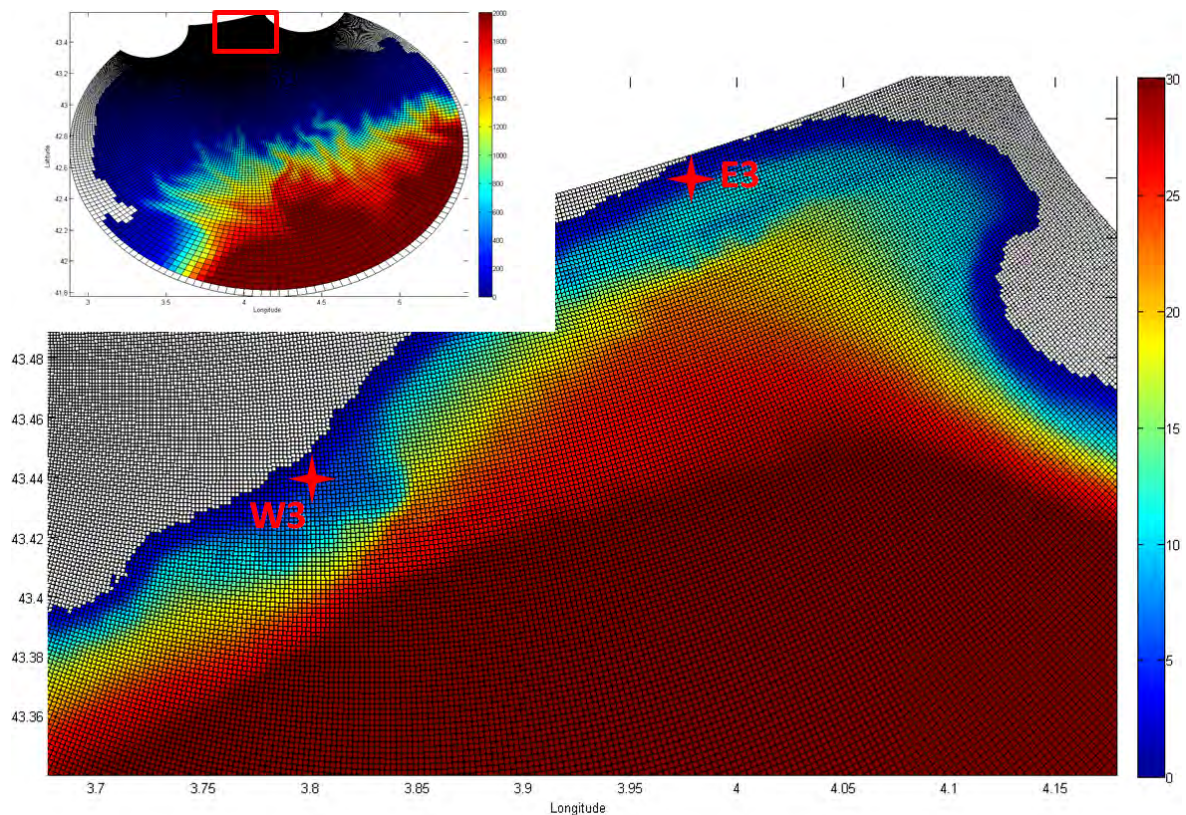


Figure 2. Bathymétrie et grille de calcul centrée sur le GAM et couvrant l'ensemble du golfe du Lion.

Les calculs sont réalisés dans un domaine spectral décomposé en 25 fréquences suivant une série géométrique allant de 0,0345 à 0,3398 Hz et de raison 1,1.

La génération et la dissipation de la densité d'énergie est prise en compte par des termes dits de sources dans l'équation d'évolution de la densité d'action des vagues. Par défaut, la dissipation par frottement sur le fond est paramétrée suivant HASSELMANN *et al.* (1973). ARDHUIN *et al.* (2003) propose toutefois une paramétrisation plus adaptée où le calcul de ce terme source est basé sur le modèle de viscosité turbulente (GRANT & MADSEN, 1979) qui implique l'utilisation d'un coefficient de frottement en fonction de

la hauteur de rugosité de Nikuradse (K_n). En règle générale, cette rugosité est considérée comme constante ou reliée à la granulométrie variable d'un fond sédimentaire représenté par sa médiane granulométrique d_{50} . Très peu d'alternatives sont disponibles dans la littérature pour caractériser cette rugosité en fonction de l'occupation ou de la végétation rencontrée sur le fond marin et en particulier des herbiers de Posidonies. A partir d'observations in-situ sur l'île de Majorque (Espagne), INFANTES *et al.* (2012) proposent toutefois d'utiliser une valeur de $K_n=0,4$ m. Se basant sur cette étude, celle de DELPEY *et al.* (2014) et suivant les conseils de ARDHUIN (communication personnelle), nous prenons le parti ici de relier cette hauteur de rugosité au taux de recouvrement en herbiers de Posidonies (voir figure 1) noté P_c (en %). $K_n = 0,005 P_c$ sur les fonds rocheux et K_n reste reliée au d_{50} sur les fonds sédimentaires.

Une comparaison des résultats du modèle à des données de bouées de houle présentes dans la zone permet une première validation. On s'assure ainsi de travailler dans un cadre réaliste. Pour la grande grille à basse résolution, on compare les résultats du modèle aux mesures à la bouée Lion de Météo-France (42°6'9" N, 4°42'9" E). Pour la grille à haute résolution, on compare les résultats aux mesures à la bouée de houle de Sète (43°22'15.6" N, 3°46'46.2" E). Dans les deux cas, on obtient des résultats très satisfaisants (par exemple des coefficients de corrélation pour la hauteur significative supérieurs à 0,97).

2.3 Les différents scénarios

La cartographie de la couverture spatiale de la zone par les herbiers de Posidonies (Figure 1) (HOLON & DESCAMP, 2008) sert de base aux trois scénarios suivants :

Scénario 1: sans présence d'herbiers de Posidonies.

Scénario 2: occupation actuelle la plus réaliste possible.

Scénario 3: occupation plus idéaliste extrapolée à l'ensemble du domaine occupé de mattes mortes reflétant ce qu'a pu être le domaine couvert par les herbiers dans le passé, c'est-à-dire la totalité des plateaux rocheux présents dans la zone.

3. Résultats

La figure 3 montre un exemple de résultat de modèle pour le 4 janvier 2008 suivant les 3 scénarios. La zone du plateau des Aresquiers (cerclée en jaune) est la zone de plus forte atténuation due à la présence d'un herbier relativement dense. Dans la zone de Carnon/Palavas (cadre blanc), le rôle des herbiers est quant à lui relativement limité. Dans la zone cerclée en rouge, les vagues subissent une forte réfraction.

En réalité, le champ de vague simulé est relativement hétérogène révélant la compétition entre différents processus physique notamment levée ("shoaling"), réfraction et dissipation. Les bandes de réfraction, notamment très visibles sur le plateau des Aresquiers (cerclage jaune) provoquent de très fortes variabilités des hauteurs de

vagues incidentes à la côte. A titre d'exemple, deux séries temporelles de hauteur significative des vagues sont représentées aux points W3 et E3 (voir positions sur les figures 1 et 2) sur la figure 4.

L'effet des herbiers est très variable mais on voit qu'il existe une valeur seuil de la hauteur significative des vagues en-deçà de laquelle la présence d'herbier n'a pas d'effet. Cette valeur seuil peut varier entre 0,6 m pour W3 dans la zone la plus dense du plateau des Aresquiers et 1,4 m sur la zone moins dense de Carnon-Palavas. En réalité, c'est au moment où les longueurs d'onde des vagues (non montrées) augmentent pour dépasser 30 m que les herbiers situés entre 8 et 15 m de profondeur commencent à être efficaces.

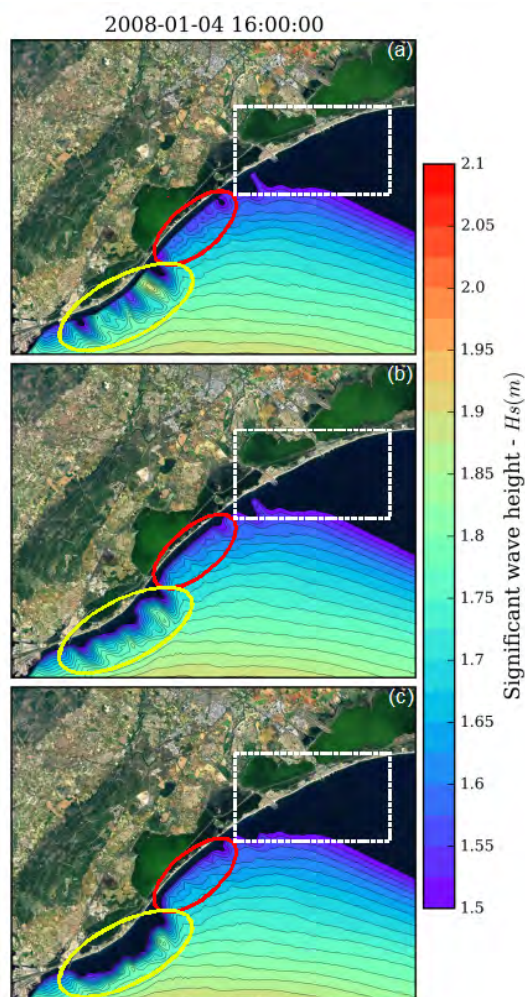


Figure 3. Hauteur significative des vagues le 4 janvier 2008 à 16h suivant les 3 scénarios (de haut en bas).

Aussi, l'atténuation due aux herbiers commence au montant de la tempête le 2 janvier 2008 (vers 6h pour le scénario 3 et 15h pour le scénario 2). A l'apex de la tempête, le 4

janvier à 0h, l'atténuation relative entre le scénario 2 et le scénario 1 est faible, entre 2 et 4% suivant les points de contrôles (W1 à W4 et E1 à E4 dont la position est représentée sur la figure 1) ; pour le scénario 3, l'atténuation atteint 9%.

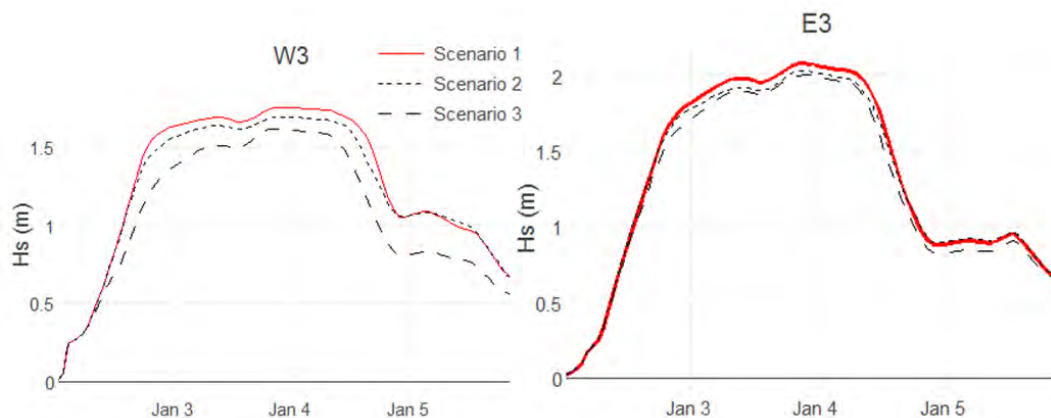


Figure 4. Hauteur significative des vagues en fonction du temps aux points W3 (zone Ouest des Aresquiers) et E3 (zone Est de Carnon-Palavas) suivant les 3 scénarios.

Au tombant de la tempête, le 4 janvier vers midi, on note les plus fortes atténuations pouvant atteindre 20% au point W3 alors qu'elles restent relativement faibles au point E3 (10%).

Ces analyses de résultats du modèle en terme de hauteurs des vagues suivant les 3 scénarios peuvent être conduites en terme d'énergie des vagues. Les taux d'atténuations apparaissent alors comme plus importants, entre 5 et 10% pour le scénario 2 comparé au scénario 1, pouvant atteindre 30% pour le scénario 3 comparé au scénario 1.

4. Conclusion

Ces résultats sont préliminaires mais quoiqu'il en soit, la réduction de la hauteur des vagues est observable dans tous les scénarios. Elle est évidemment plus élevée avec l'augmentation de l'épaisseur et la densité de l'herbier. Les taux d'atténuation obtenus sont cohérents avec les taux d'atténuation de l'énergie obtenu par ELGINOZ et al. (2011). Compte tenu de la répartition spatiale de la hauteur des vagues (figure 3), il est clair que les herbiers de Posidonies agissent comme des barrières naturelles qui réduisent l'énergie des vagues incidentes.

En tant que tel, la Posidonie pourrait potentiellement être utilisée comme un outil de bioingénierie pour faire face aux processus d'érosion. Dans le cas d'une zone comme le golfe d'Aigues-Mortes, ceci est à mettre en relation avec les travaux importants de lutte contre l'érosion, notamment de rechargements massifs des plages (LEREDDE et al., 2013), travaux susceptibles d'avoir un impact négatif sur les herbiers de Posidonies.

Les résultats de modélisation obtenus ici montrent principalement la très forte variabilité spatiale des hauteurs de vagues et des processus qui transforment ces vagues,

notamment par dissipation sur le fond. Ceci constitue le résultat principal de notre étude par rapport à des études en laboratoire (e.g. MANCA *et al.*, 2012).

Notre approche par modélisation numérique devrait être améliorée dans deux directions principales. La première consisterait à améliorer la paramétrisation du terme de source par frottement sur le fond, par exemple en suivant la méthodologie proposée par CHEN *et al.* (2007). La seconde consisterait à investiguer d'autres tempêtes que celle spécifiquement étudiée ici.

Enfin, le site d'étude choisi peut prêter à caution. En effet, les secteurs occupés par les herbiers de Posidonies y sont fortement réduits (figure 1) par rapport à d'autres secteurs en Méditerranée. Toutefois, cette dégradation du milieu naturel provoque une véritable prise de conscience des services écosystémiques apportés par de tels milieux naturels. Les services pour la biodiversité sont généralement bien reconnus et nous espérons avoir contribué ici à illustrer le service écosystémique d'atténuation des vagues et in fine de lutte contre l'érosion côtière.

5. Références bibliographiques

- 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*. J. Phys. Oceanogr., Vol. 33(9), pp 1921–1939. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0485\(2003\)033<1921:STATCS>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0485(2003)033<1921:STATCS>2.0.CO;2)
- ARDHUIN F., ROGERS E., BABANIN A.V., FILIPOT J.F., MAGNE R., ROLAND A., VAN DER WESTHUYSEN A., QUEFFEULOU P., LEFEVRE J.M., AOUF L., COLLARD F. (2010). *Semiempirical dissipation source functions for ocean waves. Part I : Definition, calibration, and validation*. Journal of Physical Oceanography, Vol. 40, pp 1917–1941. <http://dx.doi.org/10.1175/2010JPO4324.1>
- BENTSEN M., EVENSEN G., DRANGE H., JENKINS D. (1999). *Coordinate Transformation on a Sphere Using Conformal Mapping*. Mon. Weather Rev., Vol. 127(12), pp 2733–2740. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1999\)127<2733:CTOASU>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1999)127<2733:CTOASU>2.0.CO;2)
- BOUDOURESQUE C.F., MEINESZ A. (1982). *Découverte de l'herbier de posidonie*. Cahier, Parc natio., Vol. 4, 80 p.
- CHEN S.N., SANFORD L.P., KOCH E.W., SHI F., NORTH E.W. (2007). *A Nearshore Model to Investigate the Effects of Seagrass Bed Geometry on Wave Attenuation and Suspended Sediment Transport*. Estuaries and coasts, Vol. 30(2), pp 296–310. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02700172>
- DELPEY M.T., ARDHUIN F., COLLARD F., CHAPRON B. (2010). *Space-time structure of long ocean swell fields*. Journal of Geophysical Research, Vol. 115, C12037. <http://dx.doi.org/10.1029/2009JC005885>
- DELPEY M.T., ARDHUIN F., OTHEGUY P., JOUON A. (2014). *Effects of waves on coastal water dispersion in a small estuarine bay*. J. Geophys. Res. Oceans, Vol. 119, pp 70–86. <http://dx.doi.org/10.1002/2013JC009466>

- DUARTE C.M., CHISCANO C.L. (1999). *Seagrass biomass and production: A reassessment*. *Aquat. Bot.*, Vol. 65(1–4), pp 159–174. [http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3770\(99\)00038-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3770(99)00038-8)
- ELGINOZ N., KABDASLI M., TANIK A. (2011). *Effects of Posidonia Oceanica Seagrass Meadows on Storm Waves*. *J. Coast. Res.*, Vol. SI 64, pp 373–377.
- GERVAIS M., BALOUIN Y., CERTAIN R. (2013). *The major control parameters of storm morphological evolution on a microtidal barred beach*. *Coastal Dynamics 2013*. 24-28 juin 2013, Arcachon, France.
- GRANT W.D., MADSEN O.S. (1979). *Combined wave and current interaction with a rough bottom*. *J. Geophys. Res.*, Vol. 84(C4), 1797 p.
- HASSELMANN K., BARNETT T.P., BOUWS E., CARLSON H., CARTWRIGHT D.E., ENKE K., JEWING A., GIENAPP H., HASSELMANN D.E., KRUSEMAN P., MEERBURG A., MULLER P., OLBERS D.J., RICHTER K., SELL W., WALDEN H. (1973). *Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)*. *Erg anzuungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Reihe A(8)*, 12, 95 p.
- HOLON F., DESCAMP P. (2008). *Etude cartographique du milieu marin du site Natura 2000 FR910 1413 "Posidonie des côtes Palavasiennes"*. Rapport final.
- INFANTES E., ORFILA A., SIMARRO G., TERRADOS J., LUHAR M., NEPF H. (2012). *Effect of a seagrass (Posidonia oceanica) meadow on wave propagation*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol. 456, pp 63–72. <http://dx.doi.org/10.3354/meps09754>
- KOCH E W., SANFORD L.P., CHEN S., SHAFER D.J., SMITH J.M. (2006). *Waves in Seagrass Systems: Review and Technical Recommendations Engineer Research and Development Center Waves in Seagrass Systems: Review and Technical Recommendations*. US Army Corps of Engineers.
- KOFTIS T., PRINOS P., STRATIGAKI V. (2013). *Wave damping over artificial Posidonia oceanica meadow: A large-scale experimental study*. *Coast. Eng.*, Vol. 73, pp 71–83. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.10.007>
- KUO J., DEN HARTOG C. (2006). *Seagrass morphology, anatomy, and ultrastructure dans Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation*, Springer N., pp 51–87.
- LEREDDE Y., MICHAUD H., BERTHEBAUD E., LAUER-LEREDDE C., MARSALEIX P., ESTOURNEL C., GUERINEL B., THORIN S., SCHVARTZ T., RICHARD C. (2013). *Beach nourishment and sedimentary plumes in the bay of Aigues-Mortes (Languedoc-Roussillon, France). Storm impacts on sedimentary hydrodynamics*. *Coastal Dynamics 2013*. 24-28 juin 2013, Arcachon, France.
- MANCA E., CÁCERES I., ALSINA J.M., STRATIGAKI V., TOWNEND I., AMOS C.L. (2012). *Wave energy and wave-induced flow reduction by full-scale model Posidonia oceanica seagrass*. *Cont. Shelf Res.*, Vol. 50–51, pp 100–116. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2012.10.008>

- MARBÀ N., DÍAZ-ALMELA E., DUARTE C.M. (2014). *Mediterranean seagrass (Posidonia oceanica) loss between 1842 and 2009*. Biol. Conserv., Vol. 176, pp 183-190. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocon.2014.05.024>
- MICHAUD H., ROBIN N., ESTOURNEL C., MARSALEIX P., LEREDDE Y., CERTAIN R., BOUCHETTE F., (2013). *3D Hydrodynamic modelling of a microtidal barred beach (Sète, NW Mediterranean Sea) during storm conditions*. Coastal Dynamics 2013. 24-28 juin 2013, Arcachon, France.
- ORTH R.J., CARRUTHERS T.J.B., DENNISON W.C., DUARTE C.M., FOURQUIREAN J.W., HECK K.L., HUGHES R., KENDRICK G., KENWORTHY W.J., OLYARNIK S., SHORT F.T., WAYCOTT M., WILLIAMS S.L. (2006). *A Global Crisis for Seagrass Ecosystems*. Bioscience, Vol. 56(12), pp 987-996. [http://dx.doi.org/10.1641/0006-3568\(2006\)56\[987:AGCFSE\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1641/0006-3568(2006)56[987:AGCFSE]2.0.CO;2)
- PAUL M., AMOS C.L. (2011). *Spatial and seasonal variation in wave attenuation over Zostera noltii*. J. Geophys. Res. Ocean., Vol. 116(8), pp 1–16.
- PERGENT B.G., BAZAIRI H., BIANCHI C.N., BOUDOURESQUE C.F., BUIA M.C., CLABAUT P., HARMELIN-VIVIEN M., MATEO M.A., MONTEFALCONE M., MORRI C., ORFANIDIS S., PERGENT-MARTINI R., SEMROUD R., SERRANO O., VERLAQUE M. (2012). *Mediterranean Seagrass Meadows: Resilience and Contribution to Climate Change Mitigation, A Short Summary*. Gland, Switzerland and Málaga, Spain: IUCN. 40 p.
- SHORT F.T., WYLLIE-ECHEVERRIA S. (1996). *Natural and human-induced disturbance of seagrasses*. Environ. Conserv., Vol. 23(1), pp 17-27. <http://dx.doi.org/10.1017/S0376892900038212>
- SINTES T., MARBÀ N., DUARTE C.M. (2006). *Modeling Nonlinear Seagrass Clonal Growth: Assessing the Efficiency of Space Occupation across the Seagrass Flora*. Estuaries and Coasts, Vol. 29(1), pp 72–80. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02784700>
- SOGREAH (2011). *Actualisation de l'aléa érosion en Languedoc-Rousillon*. Rapport BRGM.
- TOLMAN H.L., HENDRIK L. (2014). *User manual and system documentation of WAVEWATCH III, version 4.18*. Technical report, MMAB Contribution n 316.

Thème 6 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes