HAL
open science

Prospective 2050: étude de cas sur l'évolution du service écosystémique de protection côtière

Antoine Mury, Antoine Collin, Dorothée James

To cite this version:

Antoine Mury, Antoine Collin, Dorothée James. Prospective 2050: étude de cas sur l'évolution du service écosystémique de protection côtière. SAGEO 2021, May 2021, La Rochelle, France. hal-03414804

HAL Id: hal-03414804

https://hal.science/hal-03414804v1

Submitted on 4 Nov 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Prospective 2050 : étude de cas sur l'évolution du service écosystémique de protection côtière

Antoine Mury[1], Antoine Collin[1], Dorothée James[1]

1. EPHE, PSL Université Paris, CNRS LETG,
15 Boulevard de la Mer, 35800 Dinard, France
antoine.mury@etu.ephe.psl.eu

RÉSUMÉ. Face aux changements environnementaux, induits par le changement climatique global, et notamment face la hausse du niveau moyen des mers, prévue et déjà observé à travers le monde par le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), certains systèmes écogéomorphologiques font preuve de résilience et d'adaptation. C'est le cas notamment des marais littoraux, qui grâce à leur capacité à piéger les sédiments, parviennent à s'exhausser progressivement, en suivant le rythme de hausse du niveau marin. Cependant, il convient de s'interroger au sujet de l'aptitude de ces derniers à maintenir leurs niveaux de services écosystémiques face à ces changements environnementaux, et tout particulièrement leur capacité de protection contre le risque naturel de submersion marine. Ainsi, cette étude vise à modéliser de manière heuristique et prospective le service écosystémique de protection côtière assuré par les systèmes écogéomorphologiques de la baie du Mont-Saint-Michel à l'horizon 2050, dont la topographie future a été simulée à partir des taux de sédimentation recensés dans la littérature.

ABSTRACT. Facing the environmental changes resulting from global climate change, and particularly the rise in mean sea levels, predicted and already observed worldwide by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), some ecogeomorphological systems are showing resilience and adaptation. This is especially the case, in certain geographical contexts, of salt marshes, which, thanks to their capacity to trap sediments, manage to rise gradually, following the sea level rise rhythm. However, questions need to be asked about their ability to maintain their levels of ecosystem services in the face of these environmental changes, particularly their ability to protect against the natural risk of marine flooding. Thus, this study aims to model, in a heuristic and prospective manner, the ecosystem service of coastal protection provided by the ecogeomorphological systems of the Bay of Mont-Saint-Michel by 2050, whose future topography was simulated from the sedimentation rates identified in the literature.

MOTS-CLÉS : Submersion marine, service écosystémique, modélisation, adaptation, prospective.

KEYWORDS: Marine flooding, ecosystem service, modelling, adaptation, prospective

1. Introduction

Les marais littoraux sont des systèmes écogéomorphologiques complexes, remplissant de nombreuses fonctions écosystémiques, notamment en matière de support pour la biodiversité (McOwen *et al*., 2017), de fourniture de matière première, de séquestration du dioxyde de carbone atmosphérique (Mcowen *et al*., 2017) ou encore de régulation face aux risques de submersion marine (Mury *et al*., 2020) et d'érosion côtière. Or ces systèmes, et les fonctions qui y sont associées, se trouvent, de par leur situation géographique, à l'interface entre terres et mers, menacés par les changements environnementaux globaux, parmi lesquels la hausse du niveau moyen des mers (IPCC, 2014).

Néanmoins, les marais littoraux disposent d'un atout non-négligeable pour faire face à ces changements et ainsi s'adapter à ces modifications des conditions environnementales : leur capacité naturelle à s'exhausser en captant les sédiments (Stumpf, 1983 ; Allen, 2000 ; French, 2006 ; Détriché *et al*., 2011 ; McKee *et al.*, 2012).

En effet, si le phénomène d'accrétion est un processus naturel au sein des baies, en raison de la dissipation de l'énergie qui s'y produit et de l'apport en matériel sédimentaire d'origine continentale par les fleuves côtiers, ce phénomène s'accroît en présence de surfaces de marais littoraux. Ceci s'explique par les caractéristiques éco-physiologiques des espèces végétales qui constituent les marais, et qui, par l'intermédiaire de leurs systèmes caulinaires et racinaires, présentent des capacités de piégeage et de fixation des sédiments en suspension lors des épisodes d'immersion qui les affectent, permettant ainsi l'élévation des sols (Stumpf, 1983).

Ce phénomène d'accrétion a notamment été quantifié en baie du Mont-Saint-Michel, par Détriché *et al.* (2011) pour les surfaces de marais littoraux, sur la période 1999-2005 et par Berger et Caline (1991), ainsi que par Larsonneur (1989), pour les surfaces sablo-vaseuses. Ces études réalisées en baie du Mont-Saint-Michel, font état de taux de sédimentation variables en fonction du gradient altitudinal et de la nature biogéomorphologique des sites d'observation. Ainsi, pour les surfaces de marais littoraux, trois taux ont été quantifiés, dépendant de la physiographie des observations : le bas schorre (3,45-38,11 mm/an), le moyen schorre (> 4,91 mm/an), et le haut schorre (>1,35 mm/an). Pour les surfaces sablo-vaseuses, deux taux moyens ont été déterminés par des méthodes de datation au ^{210}Pb (Berger et Caline, 1991), venant corroborer les analyses cartographiques réalisées par Larsonneur (1989), avec respectivement environ 4,5 mm/an et 15 mm/an, pour la slikke (vase) et la frange sablo-vaseuse du marais.

Ces taux de sédimentation, peuvent être comparés aux tendances régionales mesurées entre 1970 et 2016 en matière de hausse du niveau marin, qui font état d'une hausse annuelle comprise entre 2 et 3 mm, inférieure donc aux 3,3 mm/an prédits sur cette même période à l'échelle globale (IPCC, 2014). La comparaison de ces taux d'élévation, du niveau marin, d'une part, et des systèmes

écogéomorphologiques, d'autre part, mettant en évidence une vitesse d'accrétion du marais supérieure à la vitesse de hausse du niveau marin, permet de dresser l'hypothèse d'une résilience des systèmes écogéomorphologiques littoraux de la baie du Mont-Saint-Michel face à cette hausse du niveau marin. Se pose néanmoins la question de l'évolution des fonctions écosystémiques, notamment de protection côtière, dans ce futur contexte local.

Cette étude vise donc à modéliser de manière exploratoire et prospective, à l'horizon 2050, la capacité d'atténuation des vagues par les systèmes écogéomorphologiques côtiers de la baie du Mont-Saint-Michel, dont l'élévation future a été simulée à partir des taux de sédimentation précédemment évoqués. L'objectif étant *in fine* d'observer les effets de cette modification topographique sur l'évolution du service écosystémique de protection.

2. Matériels et méthodes

2.1. Site d'étude

Cette étude a été réalisée sur un site d'environ 3 km² dans la partie occidentale de la baie du Mont-Saint-Michel, présentant des enjeux humains (bâtiments, axes de communications) ainsi que des systèmes écogéomorphologiques (marais littoraux, cheniers coquilliers, estran sablo-vaseux) représentatifs du paysage de la baie et susceptibles de fournir un service écosystémique de protection contre la submersion marine (FIGURE 1).

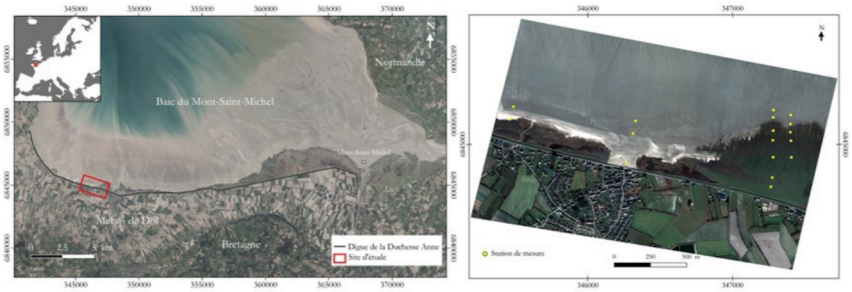

FIGURE 1. *Situation géographique générale du site d'étude et localisation des stations de mesure des hauteurs significatives des vagues.*

2.2. Mesure des vagues à très haute résolution et calcul des atténuations

2.2.1. Méthodologie d'acquisition des mesures de vagues

Les hauteurs significatives des vagues (Hm_0) ont été acquises *in situ* à l'occasion d'une campagne de mesure de quatre cycles de marées consécutifs entre les 22 et 23

janvier 2019, à l'aide de 17 capteurs de pressions (NKE SP2T10) réparties sur 4 transects transversaux (FIGURE 1) et enregistrant à une fréquence de 2 Hz.

2.2.2. Méthodologie de calcul des atténuations

À partir des valeurs de Hm_0 acquises lors de la campagne de mesure *in situ*, des valeurs d'atténuation sont calculées en %/m pour chaque paire de stations de mesure. Ces valeurs d'atténuation constituent les réponses statistiques à la modélisation de l'atténuation des vagues, induite par les systèmes écogéomorphologiques littoraux.

2.3. Données d'imageries spatioportées superspectrales WorldView-3 et aéroportées LiDAR

2.3.1. Données originales

Les 16 bandes spectrales de l'imagerie passive satellite WorldView-3 (WV-3) (acquise le 20 février 2019), ainsi que les produits dérivés de l'imagerie active LiDAR (*Light Detection And Ranging*, acquise entre le 2 mai et le 4 juillet 2018) sont utilisées comme prédicteurs de la modélisation de l'atténuation des Hm_0, qui permet d'estimer la protection offerte par les systèmes écogéomorphologiques littoraux contre le risque de submersion marine.

Les 16 bandes spectrales de l'imagerie satellite, d'une résolution spatiale originale de 1.20 m, ont été corrigées géométriquement et radiométriquement avant d'être affinées à une résolution spatiale de 0,30 m par l'intermédiaire d'une procédure de *pan-sharpening* (Gram-Schmidt) basée sur la finesse de la bande panchromatique (résolution spatiale 0,30 m × 0,30 m, cf. Mury et *al.*, 2020b). Des modèles numériques de surface (MNS) et d'élévation (MNE) sont réalisés à partir des données de l'imagerie LiDAR avec une résolution spatiale de 0,30 m × 0,30 m et une précision verticale inférieure à 0,2 m.

2.3.2. Données simulées

Afin d'observer les effets de l'évolution de la topographie du site sur le service d'atténuation des vagues, à l'horizon 2050, les valeurs des MNS et MNE dérivés de l'imagerie LiDAR ont été modifiées de manière à simuler l'élévation des systèmes écogéomorphologiques à partir des taux annuels recensées au sein de la littérature. Pour chaque secteur du site, préalablement identifié par photo-interprétation, a été attribué un taux d'accrétion annuelle (FIGURE 2), lequel est ensuite multiplié par 32 (nombre d'années entre les deux dates) pour simuler l'élévation prévisionnelle entre 2018 et 2050.

Prospective 2050

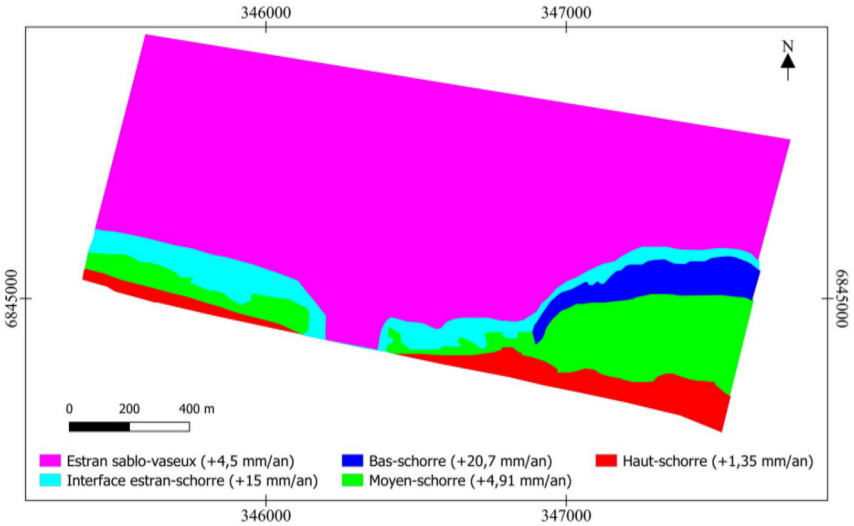

FIGURE 2. *Valeurs d'accrétion sédimentaire par secteurs géographiques.*

2.4. Modélisation spatiale de l'atténuation des Hm_0

De manière à évaluer le service écosystémique de protection contre la submersion marine, deux modélisations spatiales de l'atténuation des Hm_0 sont réalisées, à partir des valeurs d'atténuation calculées précédemment pour chaque paire de capteurs (cf. 2.2.) : utilisant (1) des prédicteurs spectraux et topographiques originaux, puis (2) utilisant les modèles numériques simulés (cf. 2.3.), par l'intermédiaire de régressions linéaires multiples, tel que :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \ldots + \beta_n X_n \quad (1)$$

Où, Y est la valeur d'atténuation, β_0 une constante, β_1 la valeur du coefficient qui est propre à X, la valeur du prédicteur.

2.4.1. Corrélation des prédicteurs avec les valeurs d'atténuation

Préalablement à la réalisation des modélisations spatiales, une sélection des cinq prédicteurs les plus corrélés avec les valeurs d'atténuation est réalisée afin de conserver un équilibre statistique, au sein de la modélisation, entre le nombre de prédicteurs et le nombre de réponses statistiques (les valeurs d'atténuation).

2.4.2. Conception des compartiments d'évaluation

Afin de pouvoir comparer aisément les capacités d'atténuation des Hm_0 quantifiées à travers les deux modélisations spatiales, les valeurs d'atténuation en %/

m sont moyennées au sein des compartiments de 30 m × 600 m orientés en fonction des houles dominantes affectant le site d'étude.

2.4.3. Taux global d'évolution du service de protection côtière

L'évolution du service d'atténuation des vagues, sous-jacente à l'évolution de la topographie, à l'horizon 2050, peut être étudiée par l'intermédiaire du taux global d'évolution calculé tel que :

$$Tx = \frac{(Modélisation\ prospective - Modélisation\ originale)}{Modélisation\ originale} \quad (2)$$

Cette manipulation a pour objectif de mettre en évidence les compartiments dont les valeurs d'atténuation moyennes offertes par les éco- et géo-systèmes sont les plus affectées par les changements de topographie attendus d'ici 2050. Cela vise ainsi à observer la variabilité dans le temps du service d'atténuation des Hm_0 induit par les éco- et géo-systèmes du site d'étude.

2.4.4. Évolution de la capacité adaptative des enjeux

La capacité protectrice des éco- et géo-systèmes littoraux peut être abordée en tant que *proxy* de la capacité adaptative, qui constitue l'une des composantes de la vulnérabilité des enjeux (Mury *et al.*, 2020). La transposition de cette composante, depuis les modèles moyennés, aux éléments du cadre bâti (identifiés préalablement par un algorithme de classification supervisée (« maximum de vraisemblance »), permet donc d'estimer un premier degré de vulnérabilité des enjeux face à l'aléa submersion marine. De manière à pouvoir être comparées de manière diachronique, ces valeurs de capacité adaptative des enjeux font l'objet d'une standardisation entre 0 et 1.

3. Résultats

3.1. Corrélation des prédicteurs avec les valeurs d'atténuation

Cinq prédicteurs des imageries ont été sélectionnés pour la modélisation spatiale de manière que le nombre de prédicteurs de la modélisation soit inférieur à la moitié du nombre de valeur d'atténuations calculées à partir des mesures *in situ*. Les cinq prédicteurs des imageries affichant les coefficients de corrélations les plus proches de 1 sont, en ordre croissant, SWIR1, PIR1, PIR2, MNE et MNS (TABLE 2). C'est donc la combinaison de ces prédicteurs, spectraux et topographiques, qui est utilisée pour la modélisation spatiale de l'atténuation des Hm_0.

TABLE 1. Coefficients de corrélation entre les prédicteurs de la modélisation et les valeurs d'atténuation.

Prédicteurs	Coefficient de corrélation (Pearson)

Prospective 2050

PIR 1	0,66
PIR 2	0,69
SWIR 1	0,65
MNE	0,71
MNS	0,73

3.2. Modélisation spatiale de l'atténuation des Hm_0

3.2.1. Modélisation originale

La modélisation spatiale de l'atténuation des Hm_0 réalisée à partir des prédicteurs spectraux PIR1, PIR2, SWIR1 et des prédicteurs topographiques MNE et MNS originaux issus de l'imagerie LiDAR, affiche un coefficient de détermination R^2 de 0,70 et fait état de valeurs d'atténuation comprises entre -1,25 et 1,88%/m (FIGURE 3a).

Cette modélisation permet l'élaboration d'un modèle présentant des valeurs d'atténuation moyennées comprises entre 0,02 et 0,77%/m (FIGURE 3b).

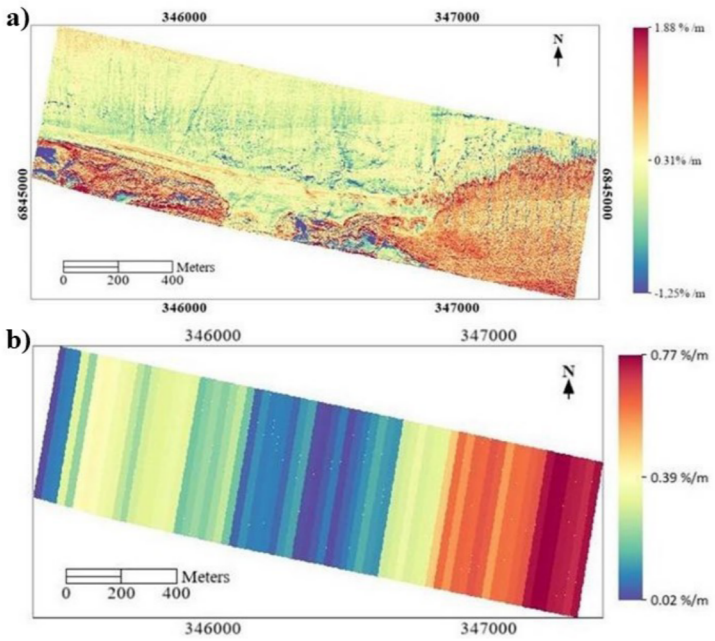

FIGURE 3. a) *Modélisation spatiale originale de l'atténuation des Hm_0 et b) modèle moyenné associé.*

3.2.2. Modélisation prospective

La modélisation spatiale prospective de l'atténuation des Hm_0, réalisées à partir des prédicteurs spectraux PIR1, PIR2, SWIR1 et des MNS et MNE simulés, présente quant à elle des valeurs d'atténuation entre -1,35 et 1,79%/m (FIGURE 4a).

Le modèle « à compartiments » réalisé à partir de la modélisation prospective présente des valeurs moyennes d'atténuation des Hm_0 comprises entre -0,10 et 0,64%/m (FIGURE 4b).

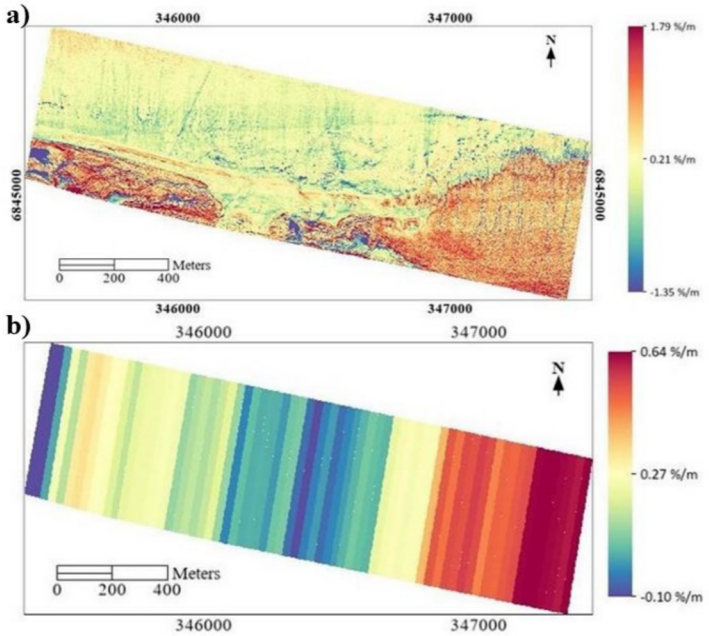

FIGURE 4. *a) Modélisation spatiale prospective de l'atténuation des Hm_0 et b) modèle moyenné associé.*

3.3. Évolution 2018-2050 du service de protection côtière

L'étude du taux global d'évolution entre les deux modélisations, montre des valeurs comprises entre -2,60 et 2,60% sur le site d'étude (FIGURE 5a). Lorsque ce taux est étudié par l'intermédiaire du modèle basé sur les valeurs moyennées, les valeurs d'évolution contenues dans les compartiments entre 2018 et 2050 sont comprises entre -1,12% et 0,78% (FIGURE 5b).

Prospective 2050

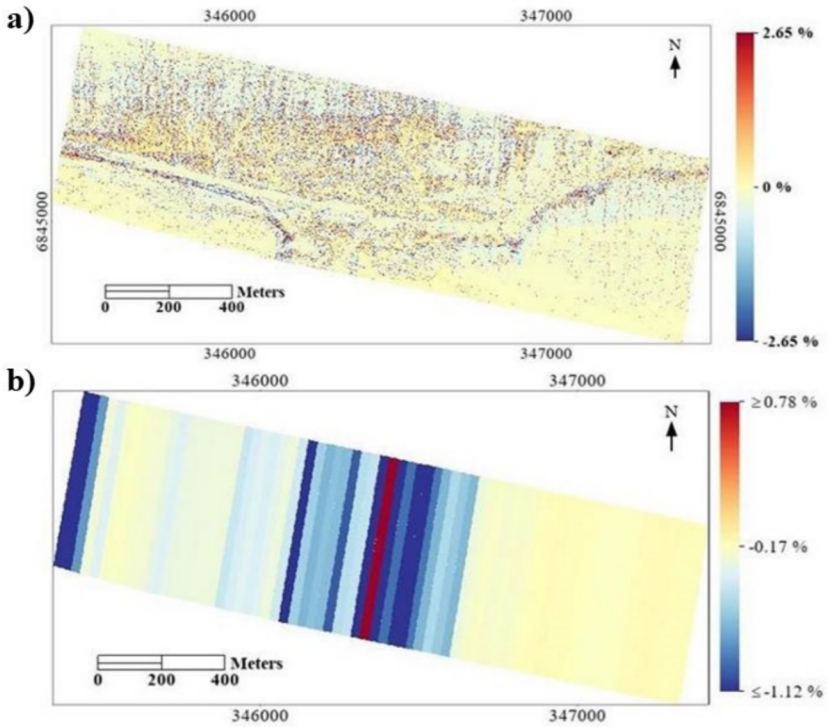

FIGURE 5. a) *Modélisation spatiale du taux global d'évolution et b) modèle moyenné associé.*

3.4. Évolution de la vulnérabilité des enjeux

L'application des différents modèles « à compartiments » dont les valeurs ont été standardisées, de 2018 et 2050, successivement, sur les enjeux situés en retrait du trait de côte, fait état de valeurs comprises entre 0,18 et 0,92 pour 2018 (FIGURE 6a), entre 0,18 et 1 pour 2050 (FIGURE 6b). Le taux global d'évolution entre les modélisations, appliqué aux enjeux, est également standardisé et présente des valeurs entre 0 et 1 (FIGURE 6c).

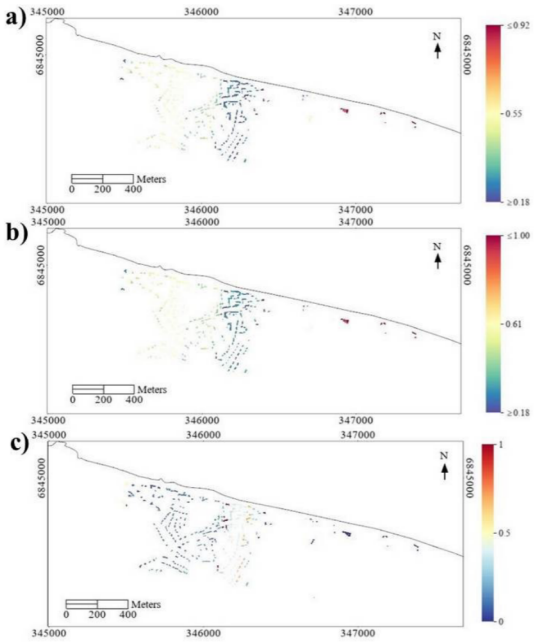

FIGURE 6. *Application des modélisations sur les enjeux, à partir a) du modèle original, b) du modèle prospectif, et c) du modèle de taux global d'évolution.*

4. Discussion/conclusion

4.1. Corrélation des prédicteurs avec les valeurs d'atténuations

La présence des bandes spectrales PIR1, PIR2 et SWIR1 de l'imagerie WV-3 et des MNE et MNS dérivés de l'imagerie LiDAR, parmi les prédicteurs présentant les meilleures corrélations avec les valeurs d'atténuation des Hm_0, s'explique par leurs capacités respectives à fournir des informations sur les caractéristiques éco-physiologiques des communautés végétales de notre site d'étude, ainsi que sur les caractéristiques topographiques du site, qui sont les principaux éléments régissant la circulation des eaux. En effet, les bandes spectrales PIR1 et PIR2 sont particulièrement adaptées pour caractériser la structure anatomique des feuilles et sont utilisées, comme un indicateur du volume de la végétation (Collin *et al.*, 2018). La bande spectrale SWIR1, quant à elle, révèle l'absorption de la lumière par l'eau, et permet de déterminer l'état de santé et de développement de la végétation (Collin *et al.*, 2018). S'agissant des modèles numériques de surface et d'élévation dérivés de l'imagerie LiDAR, leurs fortes corrélations (0,73 et 0,71, respectivement) avec les

Prospective 2050

valeurs d'atténuation, s'expliquent par leur capacité à fournir des informations attenantes à la topographie du site, la rugosité de la surface et les pentes.

4.2. Modélisation spatiale de l'atténuation des Hm_0

Les modélisations spatiales de l'atténuation des Hm_0, réalisées sur le site d'étude, mettent en évidence la capacité de protection qu'offrent les systèmes écogéomorphologiques littoraux face aux vagues et à l'aléa submersion marine.

Ainsi, pour le modèle réalisé à partir des données originales, les valeurs d'atténuation des Hm_0 sont comprises entre -1,25%/m et 1,88%/m sur l'ensemble du site d'étude (FIGURE 3a). La modélisation prospective présente, quant à elle, des valeurs sensiblement similaires, entre -1,35%/m et 1,79% (FIGURE 4a), venant ainsi confirmer l'hypothèse d'un maintien de la capacité de protection offerte par les systèmes écogéomorphologiques, à l'horizon 2050. Ces modélisations spatiales permettent la mise en lumière du rôle protecteur joué par les marais littoraux qui présentent les valeurs d'atténuations les plus importantes du site d'étude.

Ce rôle des systèmes écogéomorphologiques, et spécialement du marais littoral, dans l'atténuation des vagues, est tout particulièrement observable à travers les modèles « à compartiments », avec des compartiments présentant des valeurs d'atténuation supérieures sur les secteurs présentant systèmes écogéomorphologiques. Cette représentation des valeurs d'atténuation moyennées, permet ainsi, au-delà des valeurs, d'identifier spatialement les secteurs du site d'étude qui bénéficient d'une capacité de protection moindre de la part des systèmes écogéomorphologiques. Ainsi, sur le site d'étude, il apparaît, à l'analyse des différents modèles, originaux comme prospectifs, que les secteurs offrant un service d'atténuation des vagues plus restreint se localisent sur les secteurs présentant peu ou pas de végétation et une faible topographie, et qui ne présentent donc pas de marais littoral développé.

4.3. Évolution 2018-2050 du service de protection côtière

L'étude du taux global d'évolution du service d'atténuation des Hm_0, entre les modélisations originales et prospectives, notamment par l'intermédiaire du modèle « à compartiments », met en relief deux constats.

En premier lieu, ce taux global d'évolution montre la capacité d'adaptation des systèmes écogéomorphologiques, qui par leur potentiel à s'exhausser naturellement, parviennent à maintenir un service écosystémique performant, bien qu'en léger recul, en matière d'atténuation des Hm_0. Ceci est tout particulièrement tangible sur les secteurs de marais littoraux à l'Est et à l'Ouest de la zone d'étude. En second lieu, ce taux global d'évolution permet d'observer l'accroissement des inégalités, à l'horizon 2050, entre les secteurs bénéficiant d'un service de protection performant de la part des systèmes écogéomorphologiques et ceux bénéficiant d'un service moindre, et dont les taux globaux d'évolution sont les plus négatifs.

Ainsi les enjeux identifiés comme étant ceux présentant une capacité adaptative moindre avec la modélisation originale (FIGURE 6a), le restent avec la modélisation

prospective 2050 (FIGURE 6b). Néanmoins les taux globaux d'évolution entre les deux modélisations, originale et prospective, font état d'un recul plus important du service de protection dont bénéficient les enjeux situés derrière les secteurs ne présentant pas de marais littoraux et de cheniers développés (FIGURE 6c).

Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence spatiale européenne pour la fourniture des données d'imagerie satellite superspectrale WorldView-3, ainsi que le Service hydrographique et océanographique de la marine pour la fourniture des données d'imagerie LiDAR.

Références

Allen, J.R.L. (2000). Morphodynamics of Holocene salt marshes: a review sketch from the Atlantic and Southern North Sea coasts of Europe. *Quaternary Science Reviews* 19, p. 1155–1231.

Berger, G., Caline, B. (1991). Estimation of sedimentation rates in the Bay of Mont-Saint-Michel (France) by 210 Pb dating technique. A pilot study. Ocenianologica acta, Proceedings of the International Colloquium on the environment of epicontinental seas, Lille, 20-22 March 1990, vol. sp. n°1, p. 137-142.

Détriché, S., Susperregui, A-S., Feunteun, E., Lefeuvre, J-C, Jigorel, A. (2011). Interranual (1999-2005) morphodynamic evolution of macro-tidal salt marshes in Mont-Saint-Michel Bay (France). Continental Shelf Research, 31, p. 611-630.

French, J. (2006). Tidal marsh sedimentation and resilience to environmental change: exploratory modelling of tidal, sea-level and sediment supply forcing in predominantly allochtonous systems. *Marine Geology* 235, p. 119–136.

Collin, A. ; Lambert, N. ; Etienne, S. (2018). Satellite-based salt marsh elevation, vegetation height, and species composition mapping using the superspectral WorldView-3 imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 39(17), p. 5619-5637.

McKee, K.; Rogers, K.; Saintilan, N. (2012). Response of salt marsh and mangrove wetlands to changes in atmospheric CO2, Climate, and sea level. *Global change and the function and distribution of wetlands*, p. 63-96.

Mcowen C.J.; Weartherdon, L.V.; Van Bochove J-W.; Sullivan, E., Blyth S.; Zockler, C.; Stanwell-Smith, D.; Kingston, N.; Martin, C.S.; Spalding, M.; Fletcher, S. (2017). A global map of saltmarshes. *Biodiversity data journal* 5, e11764.

Mury, A., Collin, A., Jeanson, M., James, D., Gloria, H., Pastol, Y., Etienne, S. (2020a), Mapping nature-based marine flooding risk using VHR wave, airborne LiDAR and satellite imagery: the case study of the Dol March (Bay of Mont-Saint-Michel, France), *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 95, p. 743-747.

Mury, A., Collin, A., James, D. (2020b), Protection naturelle contre la submersion, apport de l'intelligence artificielle, *Comité français de cartographie, numéro spécial « Cartorisk »*, soumis.

Stumpf, R. (1983). The process of sedimentation on the surface of a salt marsh. *Estuarine, Coastal and shelf science* 17, 5, p495-508.