

PROTECTION NATURELLE CONTRE LA SUBMERSION, APPORT DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

par Antoine Mury, Antoine Collin et Dorothée James

EPHE, PSL Université Paris, CNRS LETG, 35800 Dinard, France

antoine.mury@etu.ephe.psl.eu ; antoine.collin@ephe.psl.eu ; dorothee.james@ephe.psl.eu

Cette étude a pour objectif de proposer une méthodologie expérimentale de cartographie du risque de submersion marine, intégrant la protection littorale naturelle offerte par les systèmes écogeomorphologiques du domaine intertidal, par le biais d'une modélisation de l'atténuation des hauteurs significatives des vagues. Ce travail s'appuie sur des données à très haute résolution spatiale : des mesures de vague *in situ*, les imageries satellite WorldView-3 et aérienne LiDAR (Light Detection And Ranging), ainsi que sur l'intelligence artificielle par réseau de neurones artificiels.

Mots clés : cartographie, intelligence artificielle, modélisation spatiale, submersion marine.

The aim of this study is to propose an experimental methodology to map the risk of marine flooding, integrating the nature-based coastal protection offered by ecogeomorphic systems of the intertidal domain through the modelling of hydrodynamic attenuation. This work is carried out using very high spatial resolution data: *in situ* wave measurements, WorldView-3 satellite imagery and airborne LiDAR (Light Detection And Ranging) data, as well as artificial intelligence through an artificial neural network.

Key words: artificial intelligence, mapping, marine flooding, spatial modelling.

Introduction

Les polders, au regard de leurs caractéristiques de zones basses, sont parmi les espaces les plus menacés par la hausse du niveau moyen des mers et l'intensification des tempêtes, prédites comme conséquences du changement global. En effet, ces dernières entraînent un accroissement du risque de défaillance des ouvrages construits par l'Homme pour protéger ces terres gagnées jadis sur la mer, et sur lesquelles l'agriculture et le bâti se sont établis. Les enjeux humains installés en arrière de ces défenses côtières s'en trouvent donc de plus en plus menacés par les assauts de la mer.

Cependant, les systèmes de défense anthropiques, générant des coûts importants lors de leur établissement et de leur entretien (renforcements, rehaussement, etc.), ne sont pas les seuls à offrir une protection aux sociétés littorales. Certains systèmes écogeomorphologiques littoraux offrent également un service écosystémique dit « de protection », notamment en atténuant les hauteurs significatives de vague (Hm_0). C'est le cas notamment des marais littoraux et de certaines structures sédimentaires (Mury *et al.*, 2020 ; Jeanson *et al.*, 2016), qui peuvent remplacer ou venir en soutien aux ouvrages de défense artificiels. Toutefois, cette protection naturelle est encore peu considérée dans les documents de

planification territoriale. L'objectif de cette étude est de proposer une méthodologie de cartographie du risque de submersion marine qui prend en compte cette capacité d'atténuation offerte par la nature, via l'utilisation de différentes sources de données *ad hoc* aux attentes des parties prenantes, car à très haute résolution spatiale.

Cette méthodologie s'articule en trois étapes de modélisation spatiale : 1) la sensibilité des enjeux vis-à-vis de la submersion marine ; 2) la capacité d'adaptation (atténuation hydrodynamique) induite par les systèmes écogeomorphologiques littoraux, à partir d'une combinaison de mesures de vague *in situ*, d'imageries satellite superspectrale et aérienne LiDAR et d'un réseau de neurones artificiels ; 3) le risque à partir des éléments précédemment réalisés.

Cette cartographie du risque de submersion marine, intégrant la capacité d'adaptation du territoire liée aux systèmes écogeomorphologiques littoraux, a pour objectif de permettre une meilleure compréhension du territoire et de mettre en lumière la valeur des systèmes naturels pour les sociétés littorales.

Site d'étude

La présente étude a été réalisée au sein de la baie du Mont-Saint-Michel, au sud de laquelle se trouve

le marais de Dol qui constitue un important polder, séparé de la baie sur environ 36 km par un ouvrage de défense côtière « la digue de la Duchesse Anne », établie entre le XI^e et le XII^e siècle.

Malgré un marnage très important (Archer, 2013), la baie bénéficie d'un régime hydrodynamique dit « de faible énergie », qui a permis le développement d'importantes surfaces de marais littoraux (environ 40 km²) et de dépôts sédimentaires coquilliers, qui constituent une barrière naturelle qui protège le pied de la face nord de la digue et réduit ainsi son risque de rupture à l'occasion d'événements tempétueux. L'analyse s'est concentrée sur une zone d'environ 3 km² dans le secteur de la commune d'Hirel, où se regroupent des enjeux humains (représentés par le cadre bâti), des marais littoraux, des cheniers coquilliers et un estran sablo-vaseux, représentatifs d'une grande partie des systèmes éco-géomorphologiques de la baie (fig. 1).

Matériel et Méthodes

Les mesures des vagues à très haute résolution

Les hauteurs significatives des vagues (H_{m_0}) ont été mesurées *in situ* au cours de quatre marées consécutives entre le 22 et 23 janvier 2019, à l'aide de 17 capteurs de pressions (NKE SP2T10) enregistrant à une fréquence de 2 Hz et répartis le long de transects transversaux (fig. 2). Ces mesures constituent les réponses statistiques à la modélisation de l'atténuation des vagues, induite par les systèmes éco-géomorphologiques littoraux.

Les enregistrements font état de H_{m_0} en amont du site, comprises entre 0.23 m et 0.80 m.

Des valeurs d'atténuation des vagues sont ensuite calculées en %/m à partir des valeurs de H_{m_0} enregistrées par les couples de stations de mesure.

Les données d'imagerie aérienne LiDAR

Pour cette étude, des modèles numériques d'élévation (MNE), de surface (MNS), de hauteur (MNH), d'intensité infrarouge (MNI), de pente (MNP) et de rugosité (MNR) ont été générés à partir d'une campagne d'acquisition aérienne de LiDAR topo-bathymétrique. Elle fut réalisée en 2018 avec un capteur HawkEye-3 (Chiroptera + Deep channel) doté d'une précision horizontale et verticale inférieure à 0.20 m. Les modèles numériques LiDAR ont une résolution spatiale de 0.30 m × 0.30 m. Ces modèles sont utilisés comme prédicteur de la modélisation.

Les données d'imagerie satellite superspectrale WorldView-3

Les 16 bandes spectrales (8 bandes optiques et 8 bandes infrarouges) de l'imagerie WorldView-3 (acquise le 20 février 2019 et fournie par l'Agence spatiale européenne) sont utilisées comme prédicteurs de la modélisation de l'atténuation des hauteurs significatives des vagues, qui permet d'estimer la protection offerte par les écosystèmes littoraux contre le risque de submersion marine.

Les différentes bandes optiques de l'imagerie superspectrale WorldView-3 sont les suivantes : côtière, bleu, vert, jaune, rouge, *red edge*, proche infrarouge 1, et proche infrarouge 2.

Les différentes bandes infrarouges de l'imagerie WorldView-3 sont les suivantes : infrarouge à ondes courtes 1 (SWIR), SWIR2, SWIR3, SWIR4, SWIR5, SWIR6, SWIR7 et SWIR8.

Ces 16 bandes spectrales, d'une résolution spatiale originale de 1.25 m, ont été corrigées géométriquement et radiométriquement (pour plus de détails, voir Collin *et al.*, 2019) 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).

Identification des enjeux

L'identification du cadre bâti, utilisé comme représentation des enjeux humains sur le territoire, a été réalisée par l'intermédiaire d'un algorithme de classification supervisée (« maximum de vraisemblance ») appliquée aux 6 modèles numériques issus de l'imagerie LiDAR et aux 8 bandes optiques de l'imagerie WorldView-3. Le choix de cette méthode d'identification du cadre bâti par télédétection à partir de l'imagerie satellite est justifié par la volonté de recourir dans le cadre de cette étude à des sources de données disponibles sur l'ensemble du globe, indépendamment de la disponibilité ou non de bases de données locales.

Analyse de l'exposition des enjeux au risque de submersion marine

En accord avec la littérature portant sur l'exposition, il a été choisi d'évaluer l'exposition de ce cadre bâti face au risque de submersion marine, à partir de deux indicateurs que sont : 1) la distance au trait de côte, et 2) l'élévation du sol (Martínez-Graña *et al.*, 2016).

L'ensemble des valeurs de distance au trait de côte et d'élévation utilisées dans cette étude ont fait

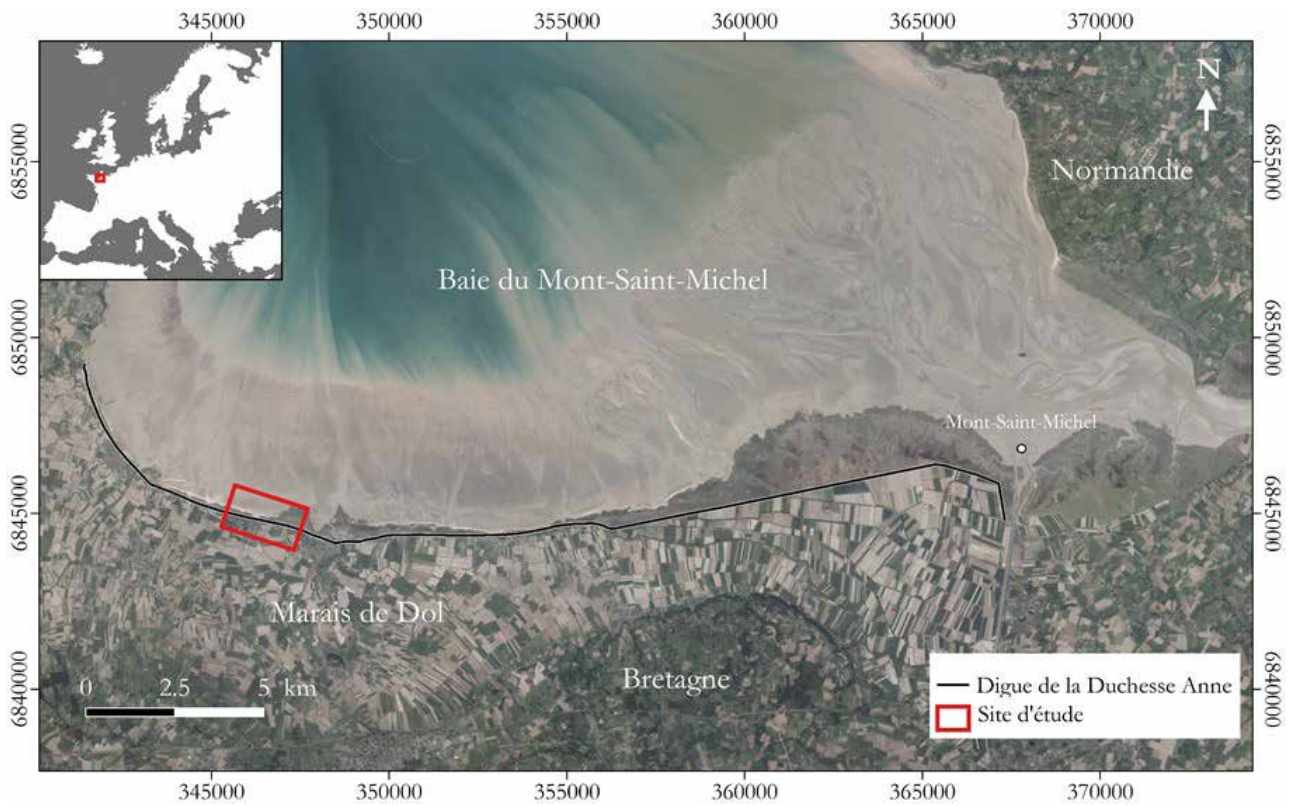


Figure 1 : Localisation du site d'étude au sein de la baie du Mont-Saint-Michel (Mury, A., 2020)

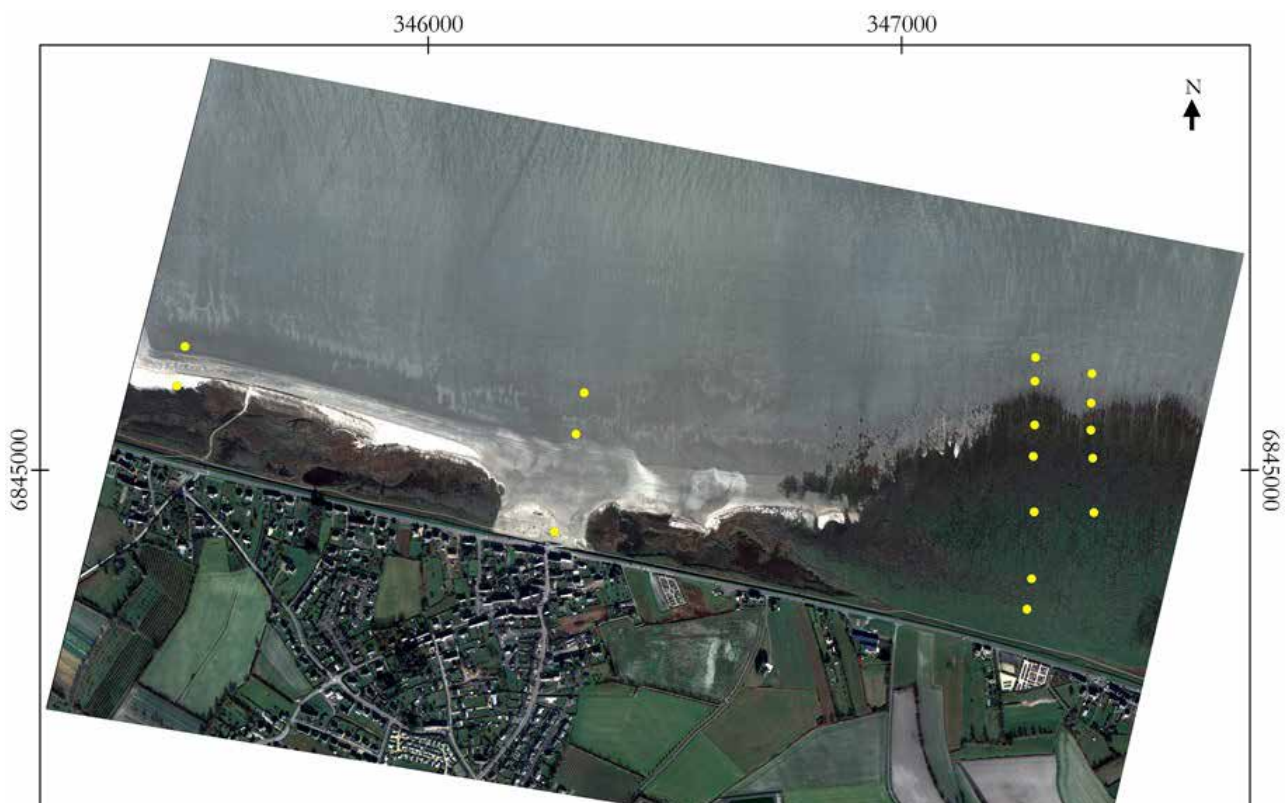


Figure 2 : Localisation des stations de mesure des hauteurs significatives des vagues (H_{m0}) sur le site d'étude (Mury, A., 2020)

l'objet d'une normalisation entre 0 et 1 à partir des valeurs minimales et maximales observées sur la zone d'étude.

Cartographie des enjeux en fonction de leur distance au trait de côte

L'indicateur du trait de côte qui a été sélectionné pour évaluer la distance des enjeux par rapport au trait de côte est la face nord de la digue de la Duchesse Anne. Il a été numérisé par photo-interprétation par un opérateur unique à une échelle de 1:500e avec une précision de 0.30 m à partir de l'imagerie RVB WorldView-3. Les valeurs normalisées de distance au trait de côte ont été appliquées en tout point des éléments du cadre bâti.

Cartographie des enjeux en fonction de l'élévation du sol

Les valeurs d'élévation du sol ont été extraites du MNE issu de l'imagerie LiDAR et appliquées aux éléments du cadre bâti.

Analyse de la vulnérabilité des enjeux au risque de submersion marine

Dans le cadre de cette méthodologie expérimentale, la vulnérabilité des enjeux face au risque de submersion marine a été considérée comme la combinaison de la sensibilité des enjeux et de la capacité d'adaptation du site.

Cartographie de la sensibilité des enjeux

Pour cette étude, deux facteurs de sensibilité des enjeux ont été considérés : 1) la présence ou non d'ouvrage de protection anthropique, et 2) la hauteur des bâtiments (et donc la possibilité théorique d'un espace refuge). Sur la zone d'étude, le facteur de sensibilité lié à la protection par un ouvrage de défense est considéré constant en raison de la présence d'une digue offrant une protection homogène sur le linéaire côtier. L'indice de sensibilité est donc dans le cas présent le seul reflet de la hauteur du bâti ; hauteur qui est extraite du MNH, résultant de la soustraction du MNE au MNS.

Cartographie de la capacité d'adaptation du site – modélisation par réseau de neurones artificiels

La capacité d'adaptation du site, définie ici comme étant le potentiel du site à se préserver par lui-même d'éventuels dommages liés à l'aléa submersion marine, est évaluée à travers une modélisation spatiale de l'atténuation des Hm_0 par les systèmes éco-géomorphologiques naturels.

Cette modélisation est réalisée en utilisant les valeurs calculées d'atténuation des Hm_0 (cf. les mesures de vague à très haute résolution) et des prédicteurs des

imageries LiDAR et WorldView-3, par l'intermédiaire d'un réseau de neurones artificiels.

Afin de déterminer les prédicteurs des imageries à utiliser pour la modélisation par réseau de neurones artificiels, la corrélation de chacun d'eux (6 MN LiDAR + 16 bandes WorldView-3) avec les valeurs d'atténuation calculées a été quantifiée, puis n'ont été retenus que les prédicteurs affichant des coefficients de corrélation (Pearson) supérieurs ou égaux à 0.60.

Ce faisant, la modélisation de l'atténuation des Hm_0 utilisée dans le cadre de cette étude se basera sur les cinq prédicteurs suivants : PIR1, PIR2, SWIR1, MNE, MNS (tableau 1).

	Coefficient de corrélation (Pearson)
Atténuation	1.00
PIR1	0.6396
PIR2	0.6711
SWIR1	0.6432
MNE	0.6164
MNS	0.6224

Tableau 1. Coefficients de corrélation des prédicteurs de l'imagerie retenus pour la modélisation (Mury, A., 2020).

Le réseau de neurones artificiels (fig. 3) est un modèle non-linéaire qui minimise les moindres carrés en cherchant à prédire la réponse d'atténuation des Hm_0 $h(X)$, à partir de la somme pondérée (w_i fonction d'activation basée sur une tangente hyperbolique, k) des i neurones, n_i , résultant eux-mêmes d'une pondération des prédicteurs, X (Heermann et Khazenie, 1992 ; Collin, Dubois *et al.*, 2018) :

$$h(X) = k (\sum_i w_i n_i(X))$$

La précision de la modélisation de l'atténuation des Hm_0 est évaluée par l'intermédiaire de son coefficient de détermination, R^2 .

Afin d'être spatialement « projetées » sur le cadre bâti, les valeurs d'atténuation modélisées de Hm_0 représentant la protection offerte par les systèmes éco-géomorphologiques littoraux ont été moyennées par secteurs de 30 m x 600 m (environ 200 000 pixels / secteur).

Ce découpage en secteurs tous les 30 m de linéaire côtier permet de prendre en considération le fait que la progression des vagues n'est pas strictement perpendiculaire par rapport au trait de côte. Le choix de la longueur de 600 m semble arbitraire mais permet néanmoins de couvrir une bonne représentativité des différents systèmes éco-géomorphologiques au

Données en entrée

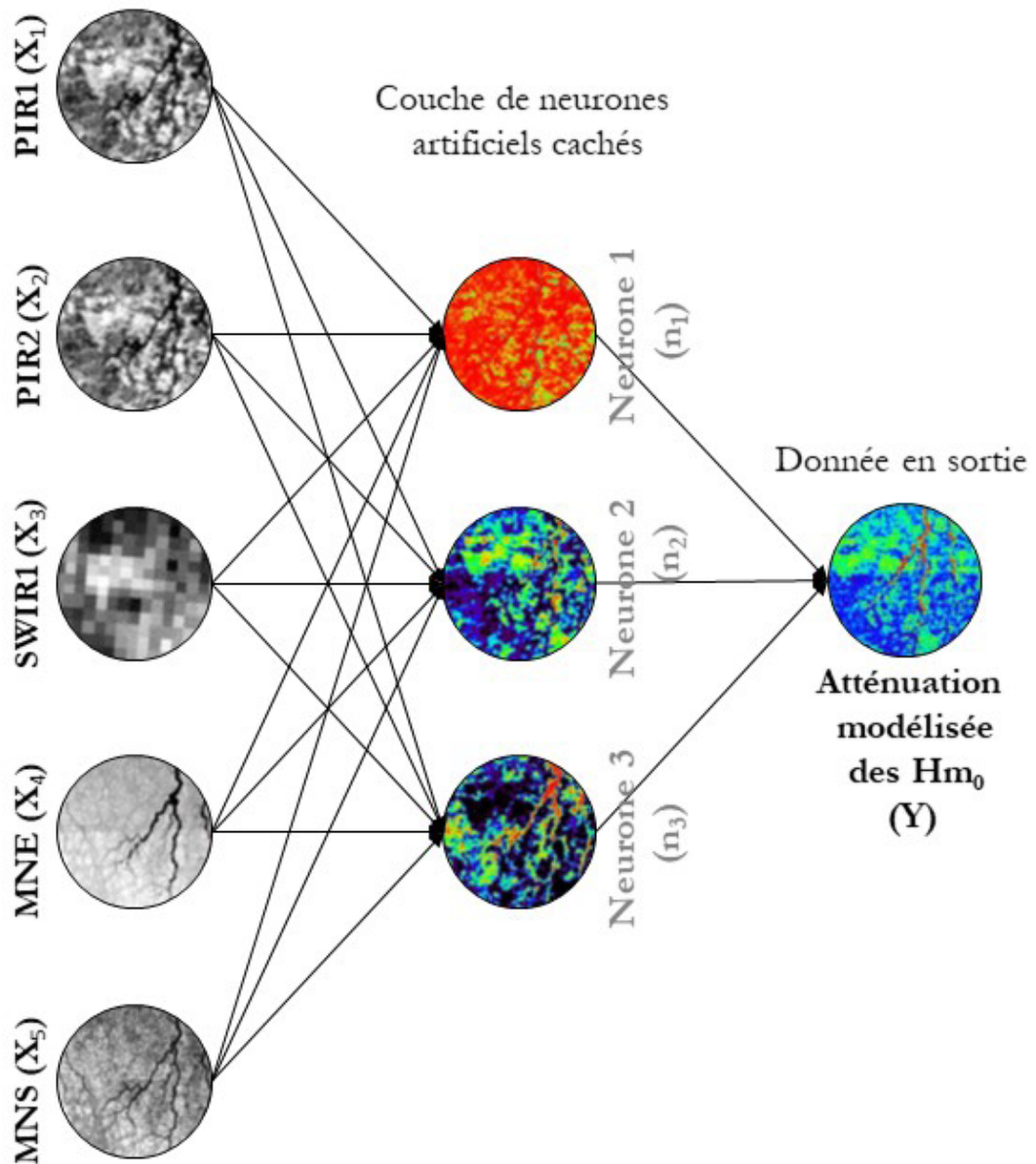


Figure 3 : Schéma conceptuel de la modélisation basée sur 5 prédicteurs des imageries WorldView3 (PIR1, PIR2, SWIR1) et LiDAR (MNE, MNS) et une couche cachée de trois neurones (n_1 , n_2 , n_3), permettant de prédire l'atténuation (Y) des Hm0 sur le site d'étude (Mury, A., 2020)

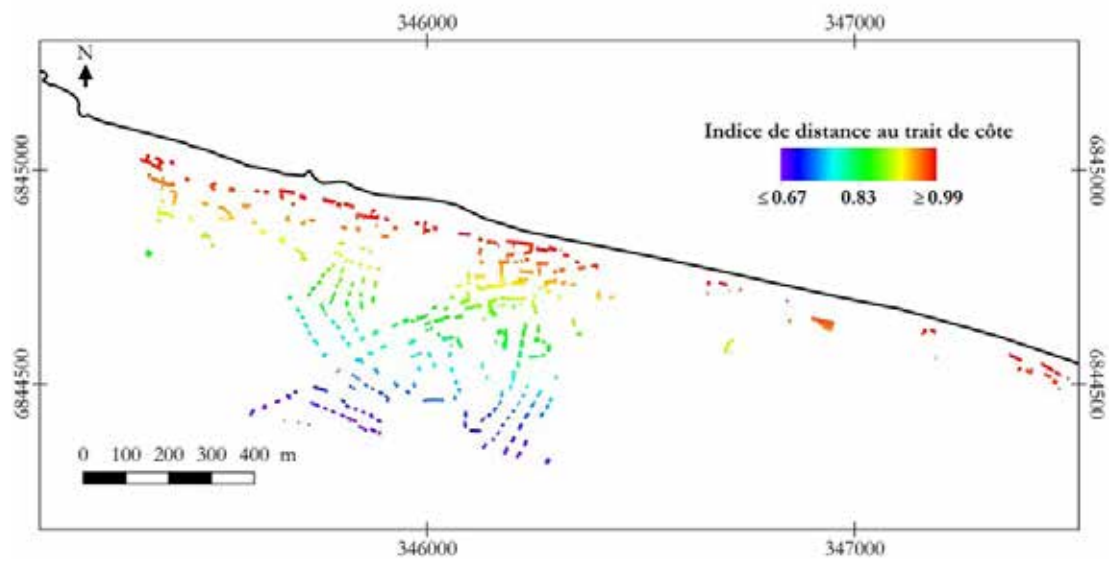


Figure 4 : Cartographie de l'indice de distance des éléments du cadre bâti par rapport au trait de côte (Mury, A., 2020)

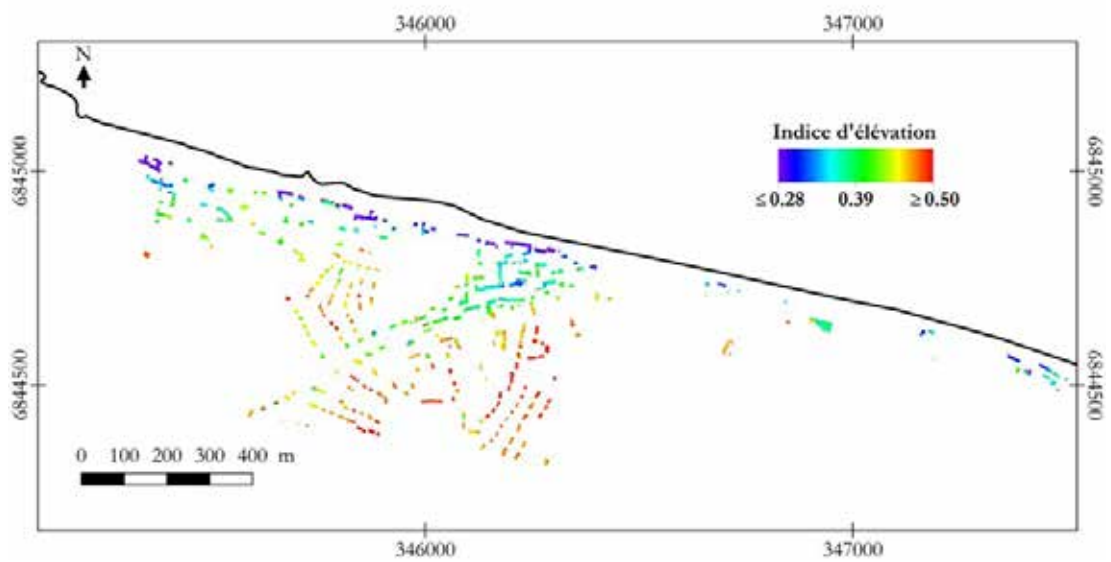


Figure 5 : Cartographie de l'indice d'élevation des éléments du cadre bâti (Mury, A., 2020)

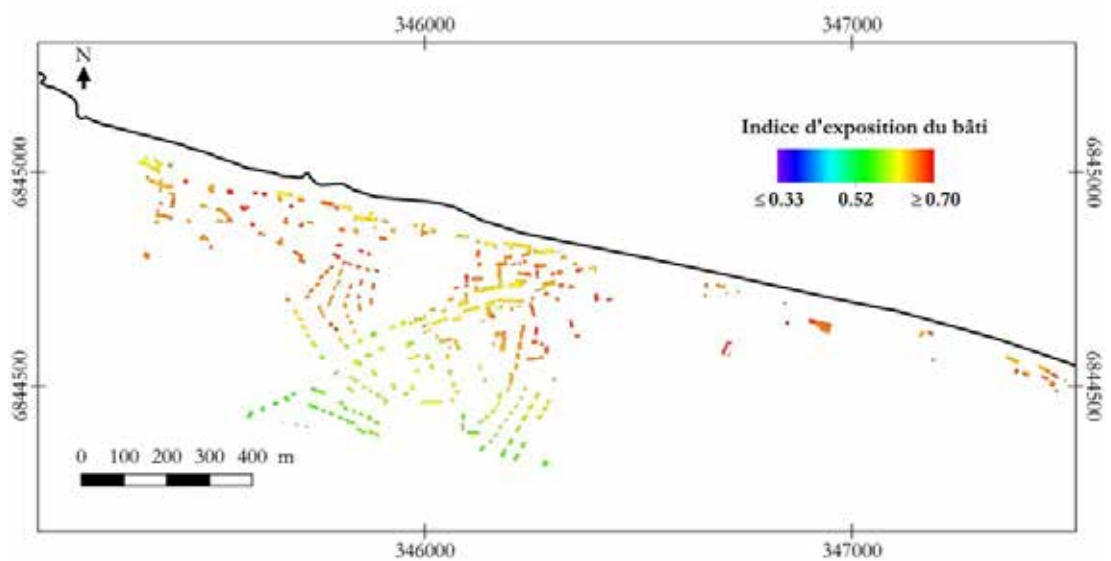


Figure 6 : Cartographie de l'indice d'exposition des éléments du cadre bâti (Mury, A., 2020)

sein de la modélisation. La réalisation de secteurs d'une longueur supérieure à celle ici employée ne modifierait pas la représentativité des résultats obtenus, mais nuirait néanmoins à la lisibilité des variations du service de protection offert par les différents secteurs de la zone d'étude.

Résultats

Le risque se définit comme la combinaison de trois facteurs : l'aléa, l'exposition, et la vulnérabilité (Crichton, 1999).

$$\text{Risque} = \text{Aléa} \cap \text{Exposition} \cap \text{Vulnérabilité}$$

Cartographie de l'exposition des enjeux au risque de submersion marine

L'exposition des enjeux au risque de submersion marine est évaluée et cartographiée grâce à la combinaison des deux facteurs d'exposition (distance au trait de côte et élévation) précédemment présentés, à partir du calcul suivant :

$$\text{Exposition} = (\text{distance au trait de côte} + \text{élévation}) / 2$$

En ce qui concerne l'analyse des distances des éléments du cadre bâti au trait de côte, plus un bâtiment est proche du trait de côte, plus son indice sera proche de 1. Sur la zone d'étude cet indice est compris entre 0.67 et 0.99 (fig. 4).

Pour l'indice d'élévation, plus un bâtiment est situé dans une zone basse, plus son indice sera proche de 1. Cet indice est ici compris entre 0.28 et 0.50 (fig. 5).

L'exposition des enjeux, ici le cadre bâti, est l'une des principales composantes du risque et est également évaluée par l'intermédiaire d'un indice entre 0 et 1. Plus cet indice est proche de 1, plus l'enjeu concerné est exposé au risque de submersion marine. Sur le secteur de Hirel, cet indice est compris entre 0.33 et 0.70 (fig. 6).

Cartographie de la vulnérabilité des enjeux face au risque de submersion marine

La vulnérabilité des enjeux face au risque de submersion marine est évaluée et cartographiée grâce à la combinaison des deux facteurs de vulnérabilité (sensibilité du bâti et capacité d'adaptation), à partir du calcul suivant :

$$\text{Vulnérabilité} = (\text{sensibilité du bâti} - \text{capacité d'adaptation}) / 2$$

Première composante de la vulnérabilité des enjeux considérée dans le cadre de cette étude, la sensibilité

du bâti ici représentée par la hauteur des bâtiments. Plus l'indice de sensibilité est proche de 1, plus le bâtiment sera considéré comme sensible au risque de submersion marine. Dans le cas présent cet indice est compris entre 0.71 et 0.90 (fig. 7).

Afin de prendre en compte la protection naturelle offerte par les systèmes écotopographiques du site dans l'analyse du risque de submersion, une modélisation de l'atténuation des Hm_0 a été réalisée à partir de mesures *in situ* des Hm_0 , des imageries LiDAR et WorldView-3, par l'intermédiaire d'un réseau de neurones artificiels composé de trois neurones. Cette modélisation, affichant un coefficient de détermination R^2 de 0.9978 et une erreur de 0.0225 %/m, met en évidence la capacité des systèmes écotopographiques à agir sur les Hm_0 . Les valeurs d'atténuation modélisées sur le site d'étude montrent des variations allant d'une augmentation des Hm_0 de 1.14%/m à une réduction de celles-ci de 2.76%/m (fig. 8).

Afin de pouvoir transposer cette capacité d'atténuation des Hm_0 , les valeurs d'atténuation en %/m sont moyennées au sein des compartiments de 30 m x 600 m. Les valeurs moyennes d'atténuation des différents secteurs de la zone d'étude sont comprises entre -0.21 %/m (augmentation des Hm_0) et 1.43 %/m (fig. 9).

L'intégration de la modélisation de l'atténuation des Hm_0 par les systèmes écotopographiques en tant que facteurs de protection du bâti, permet d'obtenir des valeurs de capacité d'adaptation du bâti. Dans cette analyse, les valeurs moyennes d'atténuation des Hm_0 font l'objet d'une normalisation (de 0 à 1) avant d'être appliquées au bâti situé derrière la digue de la Duchesse Anne. Plus l'indice est proche de 1, plus la protection offerte par les systèmes écotopographiques est forte. Sur le site d'étude, les valeurs de l'indice de capacité d'adaptation appliqué au cadre bâti, sont comprises entre 0.01 et 0.94 (fig. 10).

L'indice de vulnérabilité du bâti (fig. 11) est la combinaison des indices de sensibilité du bâti (fig. 7) et de capacité d'adaptation (fig. 10). Plus l'indice est proche de 1, plus l'élément du cadre bâti est vulnérable face à la submersion marine. Sur la zone d'étude, cet indice est compris entre 0.14 et 0.65.

Cartographie du risque de submersion marine intégrant la protection naturelle

La dernière étape de la cartographie du risque de submersion marine intégrant la protection naturelle offerte par les systèmes littoraux consiste en une

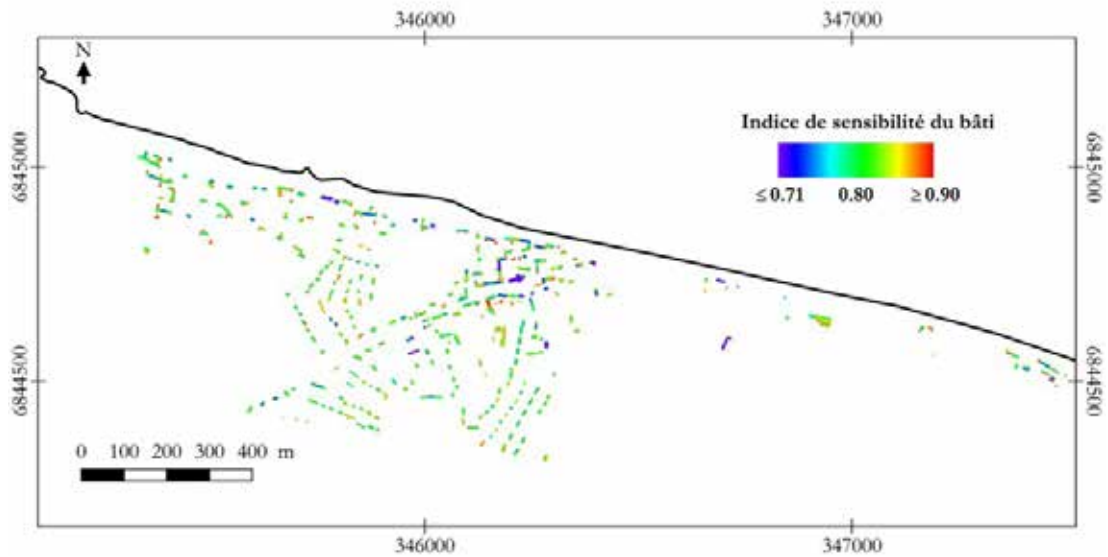


Figure 7 : Cartographie de l'indice de sensibilité des éléments du cadre bâti (Mury, A., 2020)

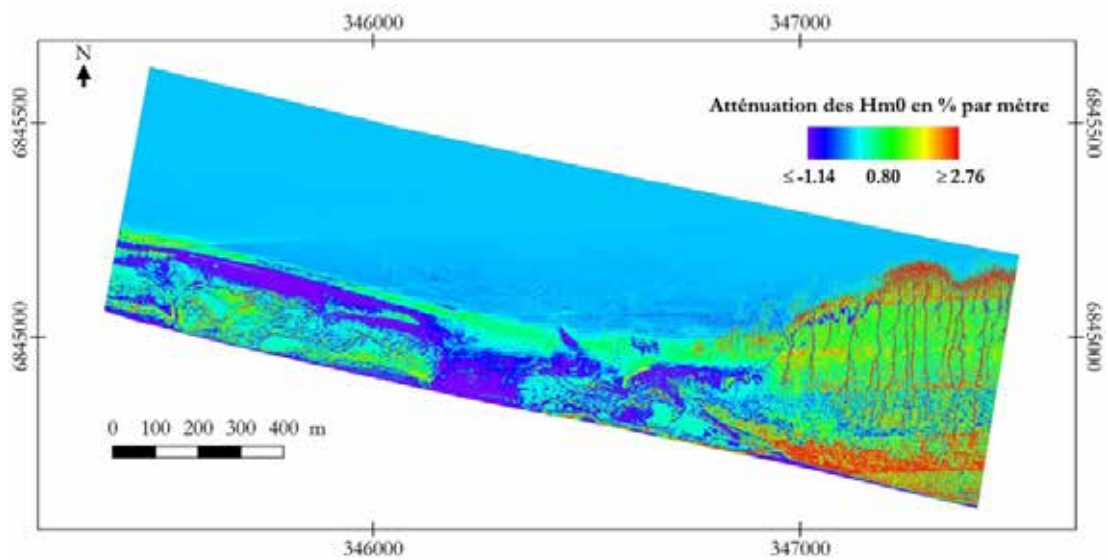


Figure 8 : Modélisation par réseau de neurones artificiels de l'atténuation des hauteurs significatives des vagues par les systèmes éco-géomorphologiques (Mury, A., 2020)

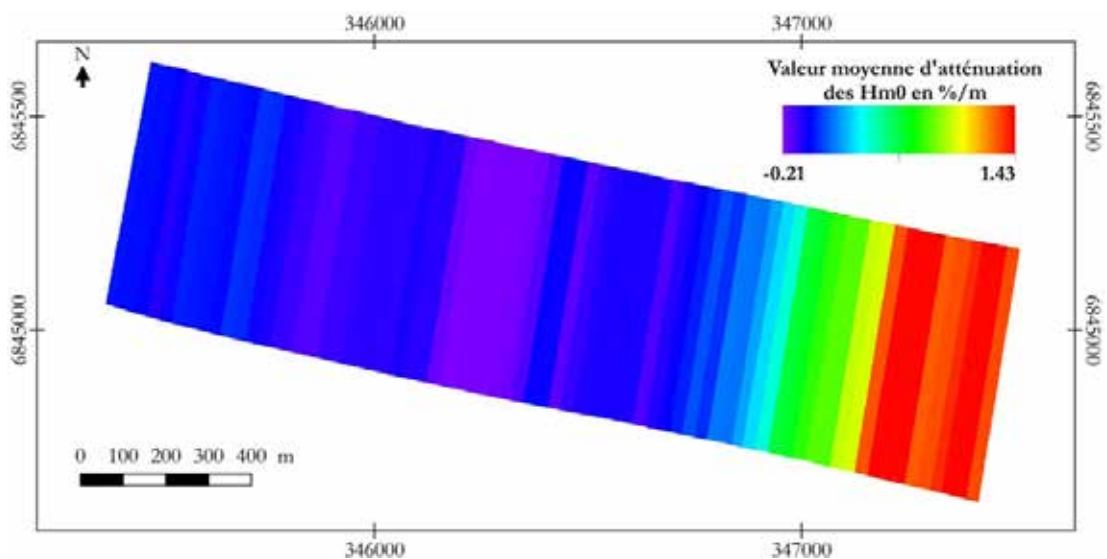


Figure 9 : Cartographie des valeurs moyennes d'atténuation des Hm0 par secteur de 30 m × 600 m (Mury, A., 2020)

combinaison des différentes composantes du risque, à savoir l'exposition du cadre bâti et la vulnérabilité de celui-ci.

Dans cette étude l'indice de risque du cadre bâti, est compris entre 0.29 et 0.84 (fig. 12). Plus cet indice de risque est proche de 1, plus le bâtiment est considéré comme étant à risque au regard de l'aléa submersion marine.

Discussion

La réalisation de la modélisation de l'atténuation des Hm0 permet de mettre en évidence les différents degrés de protection qu'offrent les systèmes écogéomorphologiques (en fonction de leur nature et de leur état) aux enjeux présents sur le territoire.

Ainsi, il apparaît que les secteurs dont les systèmes écogéomorphologiques ont été préservés des modifications anthropiques, les secteurs est et ouest de la zone d'étude, présentant respectivement un marais maritime développé et des cheniers coquilliers, offrent une protection nettement supérieure face au risque de submersion marine que les secteurs fortement anthropisés (partie centrale de la zone d'étude) sur lesquels les systèmes écogéomorphologiques ont été dégradés de manière importante voire supprimés pour la pratique de diverses activités (aménagement d'aire de pratique du char à voile et espace de stationnement dans le cadre de la zone étude).

De manière théorique, le bâtiment le moins « à risque » vis-à-vis du risque de submersion marine, est un bâtiment situé à distance du trait de côte, sur une zone topographiquement élevée, disposant de plusieurs étages (donc susceptible de fournir un espace « refuge ») et protégé par des systèmes écogéomorphologiques atténuateurs développés et non dégradés par l'action anthropique. Dans le cas de la zone d'étude, le bâtiment disposant le plus de ces critères présente un indice de risque de 0.29.

A contrario, toujours de manière théorique, le bâtiment le plus « à risque » est situé à proximité du trait de côte, dans une zone topographiquement basse, ne disposant pas d'étage et situé dans un secteur où les systèmes écogéomorphologiques sont inexistant, soit de manière naturelle soit en raison de leur suppression par l'action anthropique. Sur la zone d'étude, le bâtiment le plus « à risque » et regroupant donc le plus de ces critères négatifs, présente un indice de 0.84. Cette méthodologie de télédétection à l'état de l'art, intégratrice du potentiel protecteur des systèmes écogéomorphologiques littoraux, a pour objectif de proposer un nouvel outil d'aide à la décision pour les

gestionnaires afin que soit mieux pris en compte le service écosystémique de protection contre le risque naturel de submersion marine dans les plans d'aménagement. L'utilisation de la très haute résolution spatiale permet une reproduction fidèle de la réalité du terrain, avec la prise en considération des spécificités du site d'étude, notamment les variations de surface, de rugosité, de pente ou de couvert végétal, susceptibles d'atténuer les Hm0 (Collin, Lambert *et al.*, 2018).

Cette méthodologie présente néanmoins certaines limites, parmi lesquelles en premier lieu la considération du cadre bâti comme unique représentation des enjeux du territoire, et ce bien que la notion d'enjeux soit plus complexe que ne le laisse apparaître ce seul aspect « matériel ». L'intégration de composantes sociales à cette analyse (densité de population, critères de vulnérabilité sociale, etc.) offrirait une vision plus complète du risque de submersion marine, d'autant que les éléments tels que la perception et la culture du risque sont des facteurs majeurs de l'étude de la vulnérabilité (Aerts *et al.*, 2018).

Une autre limite affichée par cette étude réside dans le choix méthodologique des secteurs de 30 m × 600 m, qui reste relativement arbitraire. D'autres dimensions de secteurs ou d'autres méthodologies de « projection » pourraient être appliquées à l'occasion d'étude futures.

Conclusion

L'utilisation de différentes sources de données à très haute résolution spatiale (imageries, mesures de vague) et de l'intelligence artificielle permet de dresser un diagnostic relativement complet du territoire et de ses composantes, à travers l'étude de l'exposition et la vulnérabilité des enjeux face au risque de submersion marine. Ces études préliminaires des composantes du risque permettent de mettre en lumière les différents degrés d'exposition et de vulnérabilité des enjeux face à un aléa afin de dresser une cartographie innovante du risque de submersion marine qui prend en considération le service écosystémique de protection offert par les éléments naturels du site d'étude.

Sur le territoire choisi pour cette étude de cas, les éléments du cadre bâti les plus exposés au risque de submersion ont un indice d'exposition de 0.70, les éléments les plus vulnérables ont un indice de vulnérabilité de 0.86, sur des échelles de 0 à 1, où 1 représente la valeur du point du territoire le plus exposé ou le plus vulnérable. L'élément du cadre bâti qui présente l'indice de risque le plus élevé, calculé à partir de la combinaison des deux indices précédents, a une valeur de 0.84 (fig. 12).

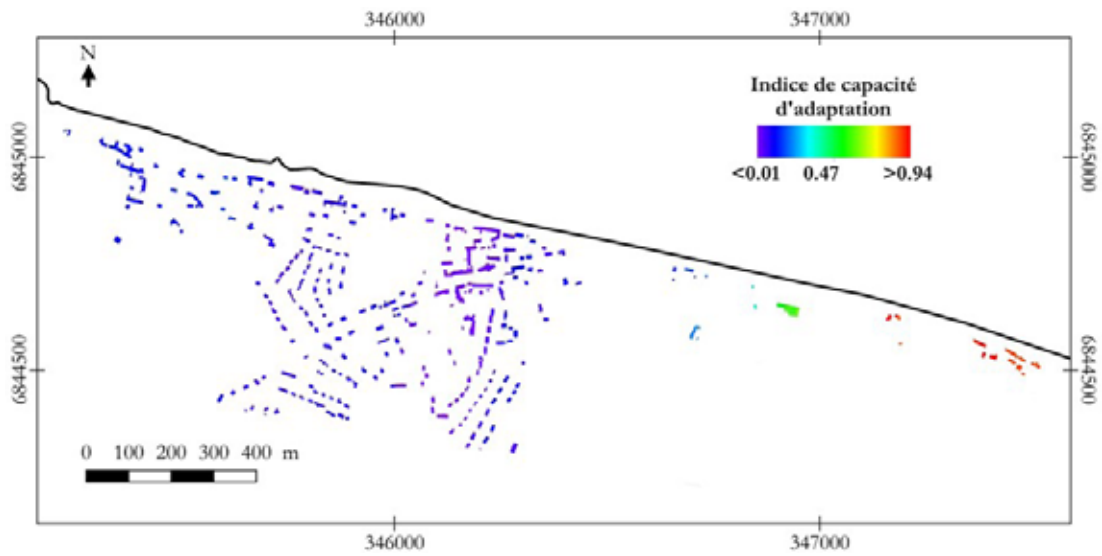


Figure 10 : Cartographie de l'indice de capacité d'adaptation du bâti (Mury, A., 2020)

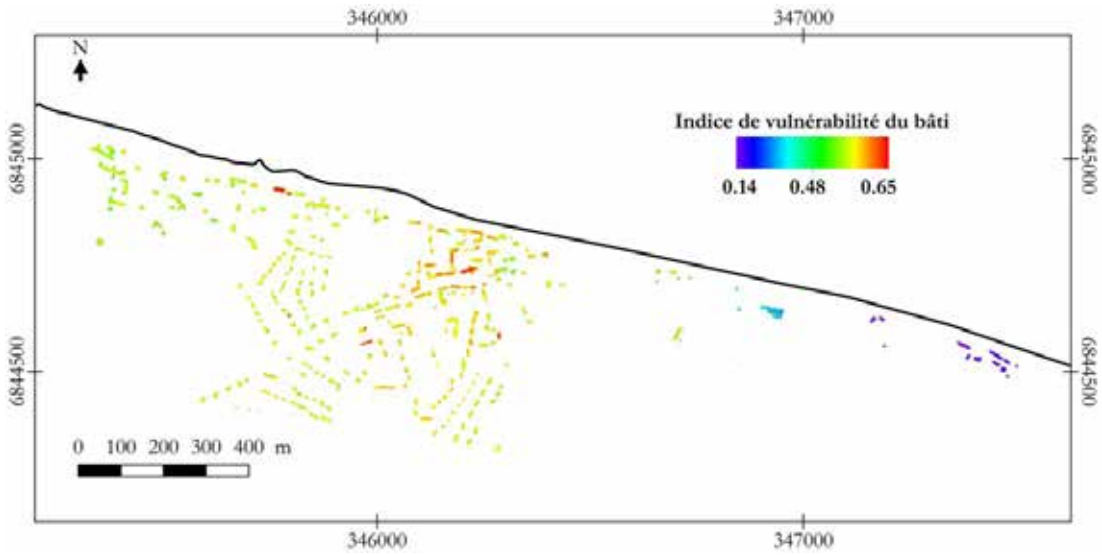


Figure 11 : Cartographie de l'indice de vulnérabilité du bâti (Mury, A., 2020)

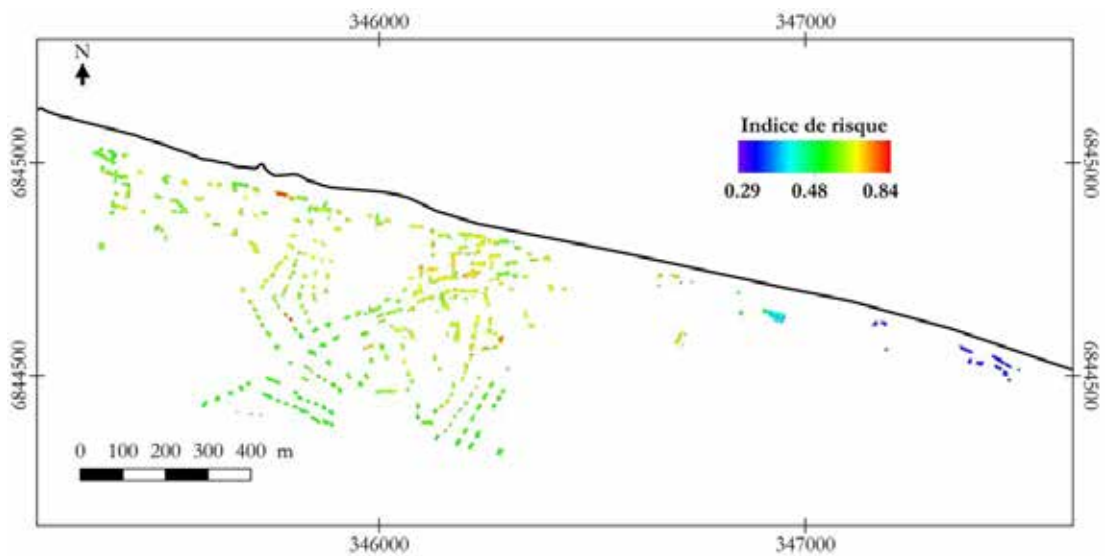


Figure 12 : Cartographie du risque de submersion marine, considérant la protection naturelle offerte par les systèmes éco-géomorphologiques (Mury, A., 2020)

Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence spatiale européenne (ESA) pour les données d'imagerie satellite

WorldView-3 ainsi que le Service hydrographique et océanographique de la marine (Shom) pour les données d'imagerie aérienne LiDAR.

Bibliographie

Aerts, J.C.J.H., Botzen, W.J., Clarke, K.C., *et al.*, (2018). « Integrating human behaviour dynamics into flood disaster risk assessment ». *Nature Climate Change*, 8, p. 193-199.

Archer, A.W., (2013) "World's highest tides: Hypertidal coastal systems in North America, South America and Europe." *Sediment. Geol.*, 1-25, 284-285.

Collin, A., Dubois, S., Ramambason, C., Etienne, S., (2018). « Very high resolution mapping of emerging biogenic reefs using airborne optical imagery and neural network: the honeycomb worm (*Sabellaria alveolata*) case study ». *International journal of remote sensing*, 39(17), p. 5660-5675.

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.

Collin, A.M., Andel, M., James, D., Claudet, J., (2019). "The superspectral/hyperspatial worldview-3 as the link between spaceborne hyperspectral and airborne hyperspatial sensors: the case study of the complex tropical coast." *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, XLII-2/W13, p. 1849-1854.

Crichton, D. (1999) "The risk triangle", dans Ingleton, J. (ed.), *Natural Disaster Management*, London, Tudor Rose, p. 102-103.

Heermann, P.D. et Khazenie, N., (1992). "Classification of multispectral remote sensing data using a back-propagation neural network". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 30(1). p. 81-88

Jeanson, M., Etienne, S., Collin, A. (2016). « Wave attenuation and Coastal Protection by Shelly Ridges: Mont-Saint-Michel Bay, France », *Journal of Coastal Research*, 75, p. 398-402.

Mury, A., Collin, A., Jeanson, M., Etienne, S., (2020), "Wave attenuation service by intertidal coastal ecogeosystems in the Bay of Mont-Saint-Michel, France: Review and meta-analysis". dans *Estuaries and coastal zones in times of global change: Proceeding of ICEC-2018*, Nguyen, K.D., Guillou, S., Gourbesville, P. and Thiébot, J., Springer.