

Cartographie prospective d'évolution du trait de côte et des risques de submersion dans le contexte du changement climatique : une méthode appliquée au littoral du nord de la France

Arnaud Héquette, Marie-Hélène Ruz, Olivier Cohen and François G. Schmitt

Volume 22, Number 3, December 2022

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/1101292ar>

DOI: <https://doi.org/10.4000/vertigo.36442>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec à Montréal
Éditions en environnement VertigO

ISSN

1492-8442 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Héquette, A., Ruz, M.-H., Cohen, O. & Schmitt, F. G. (2022). Cartographie prospective d'évolution du trait de côte et des risques de submersion dans le contexte du changement climatique : une méthode appliquée au littoral du nord de la France. *VertigO*, 22(3), 1–23. <https://doi.org/10.4000/vertigo.36442>

Article abstract

Because climate change will likely have major impacts in low-lying coastal areas, our ability for evaluating predictable consequences of coastal hazards in the future already represents a key issue in coastal risk reduction. This paper presents examples of the application of a method aimed at assessing the future position of the shoreline and at mapping areas that will be at risk of flooding by 2065 with future sea-level rise at two coastal localities of northern France where properties are already threatened by erosion or flooding. Our results show that erosion is the main coastal hazard at one of the two study sites where a large part of a housing estate may disappear by 2065 if no action is taken for limiting coastal erosion. Although marine flooding represents the primary risk at the second study site, coastal erosion will increase the risk of flooding of properties in the future due to the decrease in width of the protective coastal dunes. Comparison of our results with the coastal hazard maps published by the French government shows significant differences that can be explained by the fact that the risk of erosion was not considered in the Coastal Risk Protection Plans (PPRL) of the two municipalities considered in this study, which raises the question of the reliability of areas at risk defined without taking into account future shoreline evolution trends.



Cartographie prospective d'évolution du trait de côte et des risques de submersion dans le contexte du changement climatique : une méthode appliquée au littoral du nord de la France

Arnaud Héquette, Marie-Hélène Ruz, Olivier Cohen et François G. Schmitt

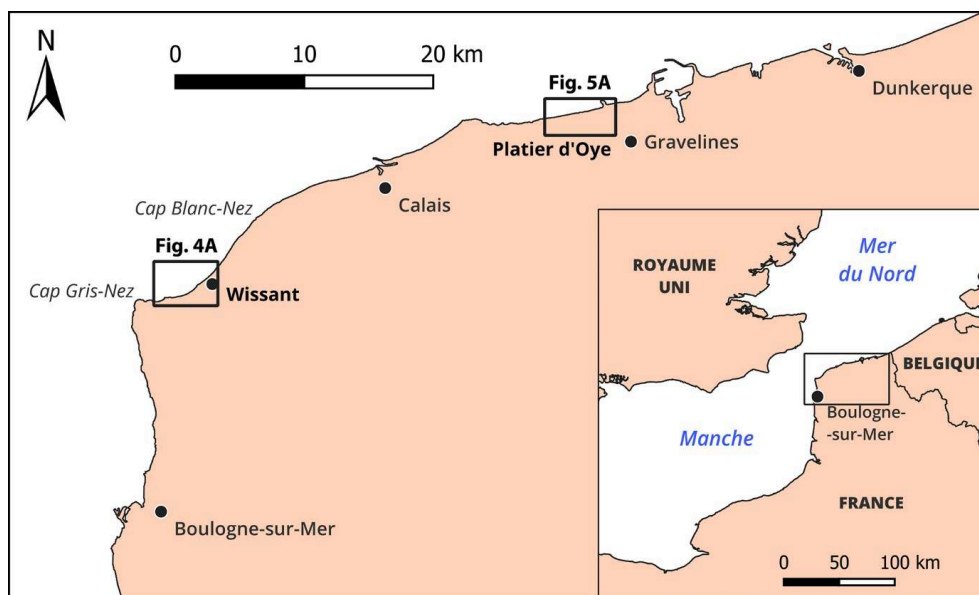
Introduction

- 1 Beaucoup de littoraux sont vulnérables face aux impacts du changement climatique, qui sont susceptibles d'accroître les risques pour les populations côtières pendant les prochaines décennies (Neumann et al., 2015 ; Vousdoukas et al., 2018 ; Kirby et al., 2021). Les conséquences attendues du dérèglement climatique sont, entre autres, une élévation du niveau de la mer qui pourrait atteindre plus de 1 m d'ici la fin du siècle (IPCC, 2021) ainsi qu'une plus grande fréquence des hauts niveaux d'eau (Haigh et al., 2011 ; Wahl, 2017), ce qui accélérerait l'érosion côtière et augmenterait les risques de submersions marines et ce particulièrement sur les côtes basses (Ranasinghe, 2016 ; Hsiao et al., 2021). Celles-ci sont, en effet, considérées comme les côtes les plus vulnérables face au changement climatique, mettant en danger les installations humaines, non seulement en raison de leur faible altitude et de l'augmentation prévue des aléas naturels dans le futur, mais aussi parce que l'occupation croissante de ces espaces par l'homme contribue à l'augmentation de leur vulnérabilité en supprimant des zones tampons (comme des marais maritimes, mangroves, prairies inondables, et *cetera*) qui assurent une protection contre l'érosion et régulent les inondations (Moser et al., 2012 ; Arkema et al., 2013).

- 2 Une proportion importante du littoral français est constituée de côtes basses (marais, plages, dunes côtières) dont certaines ont connu un recul de plusieurs mètres par année pendant les dernières décennies (CEREMA, 2017). Ce recul rapide du trait de côte peut mettre en péril les habitations et autres installations humaines dans plusieurs secteurs où les dunes côtières représentent le seul rempart protégeant des submersions marines des zones basses rétro-littorales dont l'altitude est inférieure au niveau des plus hautes mers. Les perspectives démographiques selon lesquelles la population des départements littoraux devrait croître de plus de 18% entre 2007 et 2040 (INSEE, Horizon 2040), font craindre une aggravation de la vulnérabilité de ces littoraux aux aléas naturels. Face à ces menaces, l'État a prescrit un Plan de prévention des risques littoraux (PPRL) sur plusieurs communes littorales, ce qui suscite une inquiétude auprès des populations riveraines. La publication de cartes d'aléas à l'horizon 2100, montrant de vastes secteurs susceptibles de connaître des submersions marines, interpelle les populations locales et les associations de riverains qui contestent souvent ces documents.

Figure 1. Localisation des sites d'étude à Wissant et au Platier d'Oye

Les rectangles correspondent aux emprises des figures 4A et 5A.



- 3 Deux sites sont particulièrement représentatifs de cette situation sur le littoral du nord de la France : le littoral de la Baie de Wissant et celui du Platier d'Oye (Figure 1) où le recul du trait de côte menace plusieurs biens immobiliers, ce qui cristallise des tensions entre riverains, associations de défense des sites, élus et collectivités territoriales (Herbert et al., 2010 ; Rufin-Soler et al., 2020). Dans le cadre du projet de recherche COSACO¹, ayant associé chercheurs et citoyens, des cartes prospectives du littoral à l'horizon 2065 ont été produites pour ces deux communes littorales afin d'identifier les zones qui seront vraisemblablement les plus à risques dans le futur. L'objectif principal de l'élaboration de ces cartes était de constituer un outil de médiation scientifique auprès des populations riveraines pouvant servir de base pour discuter des solutions qui pourraient être apportées pour faire face à l'augmentation probable des risques d'érosion ou de submersion sur leur territoire pendant les prochaines décennies. Afin que les habitants puissent appréhender facilement cet outil, il était primordial que

l'approche méthodologique adoptée soit compréhensible pour le grand public tout en respectant une rigueur scientifique permettant d'obtenir les résultats les plus plausibles au regard des tendances observées d'évolution du trait de côte et des impacts possibles du changement climatique sur ces littoraux dans le futur. Le but de cet article est de présenter la méthode qui a été développée dans le cadre de ce projet, d'en discuter les avantages et les limites, mais aussi de comparer les résultats obtenus avec les cartes des aléas publiées dans les PPRL qui concernent ces deux communes.

Sites étudiés

- 4 La baie de Wissant, située dans le département du Pas-de-Calais, dans le nord de la France à une vingtaine de kilomètres au nord du port de Boulogne-sur-Mer (Figure 1), est un site emblématique de la région en raison de ses qualités paysagères et de son attrait touristique. La longue plage de sable fin adossée à des dunes côtières est encadrée par les falaises du Cap Gris Nez et du Cap Blanc Nez (Figure 1), classé Grand Site de France en 2011. L'intérêt de ce site tient également au fait que le recul du trait de côte y est extrêmement rapide, atteignant plus de 5 m/an par endroits depuis le milieu du 20^e siècle (Aernouts et Héquette, 2006 ; Zemmour, 2019). Cette érosion menace des habitations situées en arrière de la Dune d'Aval qui se trouve immédiatement au sud du village et de la digue promenade (Figures 2A et B). Le recul du trait de côte risque également d'entraîner la submersion du marais de Tardinghen (Figure 2A), qui fait partie du parc naturel régional des Caps et marais d'Opale créé en 2000, ce qui entraînerait des modifications en matière de biodiversité et d'utilisation du marais.
- 5 Le Platier d'Oye, classé réserve naturelle depuis 1987, est localisé sur la commune d'Oye-Plage (Figure 1). Propriété du Conservatoire du littoral, le Platier d'Oye présente la particularité d'accueillir un lotissement d'environ 150 habitations nommé les Écardines. Ce lotissement dont l'altitude moyenne est de 4 m IGN 69² est situé sous le niveau des hautes mers de vive eau, à une centaine de mètres en arrière d'un cordon dunaire en érosion (Figures 2C et D). Ce cordon dunaire représente l'unique rempart entre la mer et les habitations de la zone rétro-littorale basse. Le recul du trait de côte pose le problème de la vulnérabilité de ce secteur dans le contexte actuel du changement climatique induisant une hausse du niveau de la mer et une possible augmentation de la fréquence des événements extrêmes pouvant provoquer l'érosion du cordon dunaire. Dans le contexte actuel, si l'élévation du niveau de la mer ne représente pas pour l'instant, à elle seule, une menace pour cette côte basse, les phénomènes d'érosion littorale et de submersion marine risquent d'augmenter pendant les prochaines décennies, car les niveaux d'eau extrêmes seront non seulement de plus en plus élevés, mais également plus fréquents (Haigh et al., 2011).
- 6 Ces deux sites côtiers sont exposés à des vagues du sud-ouest venant de la Manche ainsi qu'à des vagues de nord-est formées en mer du Nord. Les vagues sont généralement peu élevées (hauteur modale < 1 m) et même lors des tempêtes leur hauteur au large ne dépasse qu'exceptionnellement 4 m (Ruz et al., 2009 ; Héquette et al., 2019). La hauteur des vagues est cependant encore moindre à la côte en raison de la forte dissipation de leur énergie sur les bancs sableux qui parsèment les fonds de la mer du Nord et de la Manche orientale (Beck et al., 1991 ; Héquette et Aernouts, 2010).

Figure 2. Trait de côte du littoral de Wissant

(A) Photo aérienne verticale du site de Wissant en 2015 ; (B) photographie aérienne oblique du lotissement de la Dune d'Aval en mars 2016 (source: Association « Amis de la Baie de Wissant ») ; (C) Photo aérienne verticale du site du Platier d'Oye en 2015 montrant l'emplacement du lotissement des Écardines ; (D) profil topographique transversal de la plage, du cordon dunaire et de la zone rétro-littorale au Platier d'Oye réalisé à partir de levés topographique LiDAR aéroporté réalisé en 2016 (la localisation du profil est indiquée sur la photographie aérienne C ; le PHMA correspond au niveau des plus hautes mers astronomiques). Voir figure 1 pour la localisation des sites.



- 7 La marée, dont l'amplitude moyenne en période de vive eau est de 5,85 m à Gravelines, à proximité immédiate du Platier d'Oye (Figure 1), et de 7 m à Wissant (Shom, 2017), constitue un autre mécanisme qui module la hauteur des vagues dans la zone côtière, leur hauteur étant nettement plus élevée à marée haute qu'à marée basse en raison d'une moindre dissipation de leur énergie sur le fond dans les faibles profondeurs de l'avant-côte (Héquette et al., 2021). La forte amplitude de la marée le long de ce littoral conditionne également fortement les moments pendant lesquels les niveaux d'eau peuvent être suffisamment élevés pour que de l'érosion et un recul du trait de côte puissent se produire (Chaverot et al., 2008 ; Héquette et al., 2019).

Méthodologie

- 8 Il existe deux grands types de méthodes qui permettent de prévoir ce que pourrait être la configuration future d'un littoral, soit celles fondées sur une approche historique dans laquelle la position future du trait de côte est extrapolée à partir de son évolution passée (Fenster et al., 1993 ; Douglas et al., 1998 ; Brooks et Spencer, 2012 ; Mukhopadhyay et al., 2012 ; Bruno et al., 2018) ou celles basées sur une modélisation probabiliste ou déterministe des processus physiques responsables de l'évolution du littoral (Hanson, 1989 ; Ranasinghe et al., 2012 ; Thiéblemont et al., 2021).

- 9 L'approche par modélisation numérique pour simuler l'évolution future de la position du trait de côte est, en règle générale, un exercice complexe nécessitant des données sur de nombreuses variables environnementales qui sont parfois difficilement disponibles ou inexistantes, ce qui résulte souvent en une très grande schématisation des processus en action (Hanson, 1989 ; Roelvink et al., 2009 ; Vitousek et al., 2017). Plusieurs de ces modèles sont capables de simuler correctement l'érosion de la plage et/ou du front dunaire à l'échelle événementielle (Larson et al., 2004 ; Cohn et al., 2019), ce qui permet d'apprécier la variabilité à court terme du déplacement du trait de côte. Ils peuvent également être utilisés pour évaluer l'érosion future en condition de tempêtes sous l'effet d'une élévation donnée du niveau de la mer (de Winter et Ruessink, 2017 ; Enriquez et al., 2019). Toutefois, si l'on veut être en mesure de prévoir la position future du trait de côte à long terme, il s'avère nécessaire de coupler plusieurs modèles de différentes échelles spatiales et temporelles (van Maanen et al., 2016 ; Karunarathna et al., 2018). Cela rend l'exercice d'autant plus complexe et rend difficile l'application de ces modèles en raison de la multiplicité des processus en jeu et des paramètres dont il faut tenir compte (Le Cozannet et al., 2019), mais également à cause des incertitudes liées à l'évolution des forçages hydro-météorologiques dans l'avenir avec le changement climatique (Toimil et al., 2020).
- 10 Compte tenu de l'objectif du projet dans lequel la médiation scientifique et la science participative occupaient une place importante, une méthode plus accessible pour le grand public, basée sur la cinématique passée du trait de côte, a été privilégiée plutôt qu'une approche par modélisation. À l'instar de nombreuses études consacrées à l'évolution du trait de côte, la méthode qui a été développée repose sur l'utilisation de photographies aériennes verticales qui permettent, une fois orthorectifiées, de disposer de documents suffisamment précis pour identifier et cartographier les différentes positions du trait de côte dans le temps (Crowell et al., 1997 ; Chaverot et al., 2008 ; Birmingham et French, 2017 ; Cowley et al., 2022). Cependant, notre méthode repose également sur l'utilisation de données acquises à l'aide d'un LiDAR (*Laser imaging detection and ranging*) topographique aéroporté ayant permis de représenter une morphologie 3D de l'espace littoral sur laquelle des zones potentiellement à risque de submersion en 2065 ont pu être représentées en tenant compte de l'élévation future du niveau de la mer et du recul du trait de côte.

Détermination de la position du trait de côte en 2065

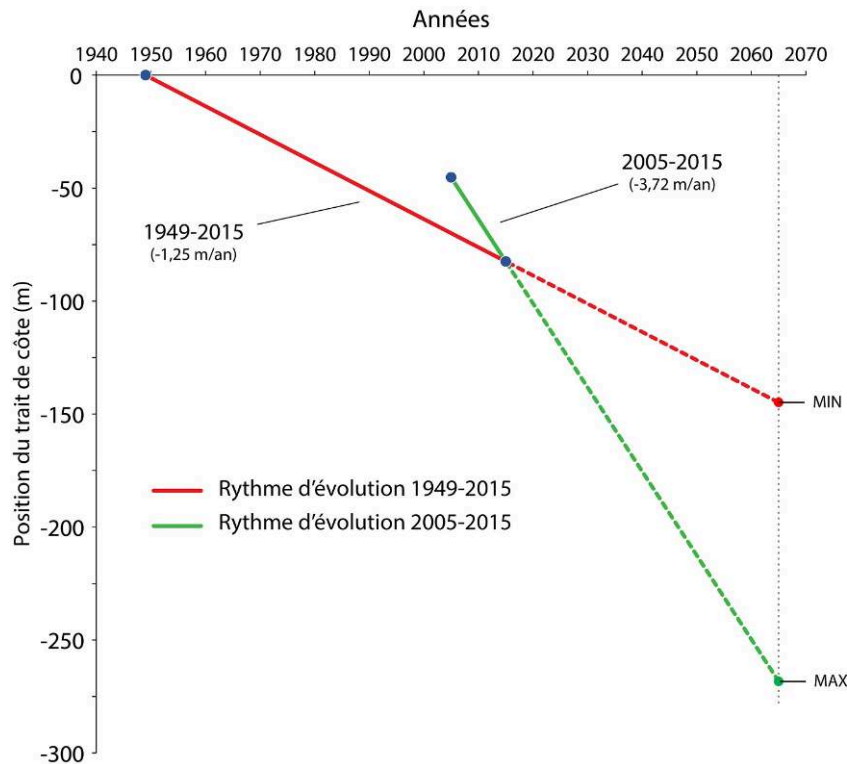
- 11 L'approche utilisée dans la présente étude est basée sur l'analyse de trois séries de photographies aériennes verticales orthorectifiées datant de 1949, 2005 et 2015 afin de retracer l'évolution à moyen long terme et à court terme des deux sites littoraux considérés. Bien qu'il existe des photographies aériennes plus anciennes, datant de la fin des années 1930, leur qualité est trop médiocre pour pouvoir identifier la position du trait de côte avec suffisamment de précision. La délimitation du trait de côte sur les photographies aériennes, même orthorectifiées avec précision, est en effet délicate, en particulier sur les clichés aériens anciens de moindre qualité. Dans notre étude, le trait de côte correspond à la position du pied de dune qui est un indicateur géomorphologique couramment utilisé (Boak et Turner, 2005 ; Del Rio et al., 2013 ; Audère et Robin, 2021). Il peut s'agir de la base de l'escarpement d'un front dunaire érodé ou de la limite externe des dunes embryonnaires, là où l'accumulation éolienne a conduit à de l'accrétion, cette limite correspondant dans ce cas à la limite de la

végétation. Sur les clichés de 2005 et de 2015, la position du pied de dune a été déterminée à l'aide de restitutions 3D de la topographie obtenues à partir de levés LiDAR aéroporté, drapées sur les photographies aériennes. En raison d'une précision horizontale de l'ordre de 1 m des levés LiDAR (voir ci-dessous), la marge d'erreur associée à la position du trait de côte sur ces clichés a été estimée à ± 3 m. Dans le cas des photographies de 1949, la limite de la végétation dunaire a été utilisée, mais avec vérification de la morphologie du front dunaire par stéréoscopie optique. En effet, si la limite de végétation peut constituer un bon indicateur de la position du trait de côte là où elle s'étend jusqu'au pied de dune ou lorsqu'elle le surplombe là où le cordon dunaire a été taillé en falaise, elle se situe parfois en retrait lorsque des siffle-vents ou des cuvettes de déflation se sont développées dans le front dunaire, ce qui nécessite dans ce cas de réajuster la position du trait de côte. En raison du plus grand degré d'incertitude de la position du trait de côte sur la série de photographies aériennes la plus ancienne, la marge d'erreur a été estimée à ± 7 mètres.

- 12 À partir des traits de côte identifiés sur les photographies aériennes des différentes années, des rythmes d'évolution du trait de côte ont été calculés pour les périodes 1949-2015 et 2005-2015 au niveau de radiales perpendiculaires au rivage espacées de 50 m selon la méthode EPR (*End Point Rate*) qui est une des plus fréquemment utilisées dans ce type d'approche (Dolan et al., 1991 ; Chaverot et al., 2008 ; Mukhopadhyay et al., 2012 ; Audère et Robin, 2021). La plus longue période entre les clichés retenus est de 66 ans (1949 à 2015), ce qui a permis d'estimer une tendance à long terme de l'évolution du trait de côte minimisant l'influence de fluctuations à court terme. L'évolution du trait de côte entre 2005 et 2015 a également été analysée afin d'identifier de possibles variations récentes dans la dynamique du trait de côte, car dans le contexte de la hausse future du niveau marin, des rythmes de recul plus rapides observés pendant les années récentes sont vraisemblablement plus appropriés pour évaluer la position future du trait de côte qu'une tendance à long terme qui serait plus lente.
- 13 Les rythmes calculés pour les deux périodes d'analyse ont ensuite été projetés sur 50 ans à partir de la position du trait de côte en 2015 le long des radiales de mesures pour obtenir une estimation de sa position en 2065 (Figure 3). Bien que nos mesures aient fréquemment révélé une accélération des vitesses de recul du trait de côte pendant la période 2005-2015, à certains endroits, le rythme de recul entre 1949 et 2015 peut cependant parfois être supérieur au rythme calculé sur la période 2005-2015 en raison d'un ralentissement localisé de l'érosion. Dans ce cas, c'est le rythme d'évolution le plus élevé calculé sur la période 1949-2015 qui est utilisé pour projeter la position future du trait de côte, car le ralentissement de l'érosion côtière peut être un phénomène local temporaire. C'est donc toujours le rythme le plus élevé qui est considéré comme le plus adéquat et qui a été utilisé pour estimer la position future du trait de côte, car en matière de prévention des risques, il convient d'envisager le niveau d'aléa le plus fort.

Figure 3. Rythmes d'évolution du trait de côte

Exemple des rythmes d'évolution du trait de côte à partir de positions antérieures au niveau d'une radiale et projections de sa position en 2065. Les traits continus correspondent aux rythmes d'évolution mesurés et les traits pointillés à la projection de la position du trait de côte en 2065 à partir de sa position en 2015 en appliquant les rythmes mesurés.



Détermination des niveaux d'eau lors d'une tempête centennale en 2065

- 14 Il existe de nombreuses incertitudes concernant les niveaux d'eau extrêmes qui pourront être atteints dans les prochaines années avec le changement climatique, car les estimations de ces hauts niveaux d'eau peuvent varier considérablement en fonction de l'ampleur de l'élévation future du niveau moyen de la mer, mais aussi des méthodes statistiques de calcul des niveaux extrêmes à partir de données marégraphiques (Wahl et al., 2017).
- 15 Un haut niveau d'eau de période de retour de 100 ans a été estimé à partir de chaque série de données marégraphiques horaires enregistrées dans les ports de Boulogne-sur-Mer (du 20/11/1941 au 28/09/2016), Calais (du 03/05/1941 au 25/11/2016) et Dunkerque (du 06/06/1956 au 28/10/2016) qui sont situés à proximité des sites étudiés (Figure 1). La méthode utilisée pour estimer les temps moyens de retour fait appel à la probabilité de dépassement :

$$F(x) = \Pr(X > x) \quad (1)$$

- 16 F étant une fonction de distribution cumulée, $\Pr$ étant la probabilité qu'un niveau d'eau de hauteur X dépasse une valeur seuil donnée (x). Plus précisément, pour N points de mesure, et n_o occurrences d'événements supérieurs à un seuil donné s , on peut noter $p = \Pr(X > x) = F(s) = n_o/N$ et on peut alors obtenir une estimation du temps moyen de retour à l'aide de :

$$T_0 = \frac{\tau}{p} = \frac{\tau N}{n_0} \quad (2)$$

τ étant le pas de temps (soit 1 heure dans ce cas-ci).

- 17 Ensuite, un ajustement de la courbe obtenue permet d'extrapoler les temps de retour pour des durées supérieures à celles disponibles à partir des mesures. Pour plus de détails sur la méthode utilisée, le lecteur pourra consulter Schmitt et al. (2018).
- 18 Ces hauts niveaux d'eau de période de retour centennale correspondent chacun à un niveau de surcote de tempête de même période de retour au niveau de chaque station marégraphique. Toutefois, sur les côtes ouvertes à l'extérieur des bassins portuaires où sont mesurées les marées, les niveaux d'eau sont encore plus élevés lors des événements de tempête en raison de surcotes dues aux vagues (*wave set-up*) qui se superposent aux surcotes marégraphiques dues au vent et aux variations de pression atmosphérique (c'est-à-dire les surcotes anémométrique et barométrique). La surcote due aux vagues lors de conditions de tempête a été calculée à partir de la méthode de Stockdon et al. (2006), qui est une des méthodes les plus largement utilisées pour évaluer cette surélévation du niveau d'eau à la côte. Pour des plages dissipatives à très faible pente comme celles qui caractérisent le littoral des sites étudiés (pente < 1,5%), Stockdon et al. (2006) préconisent d'utiliser l'équation suivante pour estimer la valeur maximale de surcote due aux vagues :

$$\eta = 0,016 (H_0 L_0)^{1/2} \quad (3)$$

où η est la surcote due aux vagues et H_0 et L_0 correspondent respectivement à la hauteur et à la longueur d'onde de la houle au large.

- 19 Des valeurs de H_0 de 5 m et de L_0 de 126 m (correspondant à une période de 9 s) ont été retenues pour des houles de très forte tempête (> 99^e centile) en se basant sur les statistiques de houles mesurées au niveau d'une bouée au large de Boulogne-sur-Mer³. Pour de telles conditions de houle, la surcote due aux vagues est de 0,4 m, valeur qui a ensuite été ajoutée au niveau d'eau marégraphique centennale afin d'évaluer le niveau maximum pouvant être atteint sur la côte lors d'une tempête ayant une probabilité d'occurrence de 100 ans.
- 20 L'estimation d'un haut niveau d'eau de tempête en 2065 devait aussi tenir compte de l'élévation future du niveau de la mer. Plusieurs projections du niveau de la mer associées à différents scénarios de concentrations de gaz à effet de serre pouvaient être considérées. Le scénario RCP6.0, l'un des quatre scénarios de concentrations de gaz à effet de serre du 5^{ème} rapport du GIEC (2013), a été choisi en tant que scénario « modéré » de concentrations futures de gaz à effet de serre et pour lequel l'estimation de la hausse du niveau de la mer entre 2015 et 2065 est d'un peu plus de 20 cm (IPCC, 2013). Compte tenu de l'ensemble de ces facteurs, le niveau d'eau qui pourrait être atteint lors d'une tempête centennale serait de 5,8 m IGN69 à Wissant et de 5,5 m au Platier d'Oye en 2065.

Cartographie prospective des zones à risques d'érosion et de submersion marine

- 21 Des levés topographiques du littoral ont été réalisés en décembre 2016 sur chacun des sites étudiés à l'aide d'un LiDAR topographique aéroporté (LiDAR Leica ALS60), ce qui a permis d'obtenir une restitution détaillée du relief de la zone côtière comprenant l'estran, les dunes côtières et l'espace rétro-littoral. La précision planimétrique de ces levés a été comprise entre 10 et 17 cm avec une précision altimétrique inférieure à 10 cm, cette précision étant moindre cependant en présence de végétation. Les densités des points de mesure au sol varient de 1,3 à 1,4 points/m² pour l'ensemble des levés. Les données topographiques acquises ont été utilisées pour réaliser des modèles numériques de terrain (MNT) avec le logiciel Surfer® (Golden Software) après filtrage de l'écho LiDAR correspondant au sursol (végétation, bâtiment ou autre objet). Les MNT ont été obtenus par triangulation avec interpolation linéaire (triangulation de Delaunay) en utilisant une grille de maille carrée de 1 mètre.
- 22 Les MNT obtenus ont constitué les documents de base pour la cartographie des zones à risques de submersion marine en fonction des hauts niveaux d'eau de tempête centennale calculés pour 2065, mais en tenant compte également des zones susceptibles d'avoir été érodées d'ici cette date. Cette approche permet de distinguer les zones de franchissement possible des dunes côtières par la mer le long du trait de côte projeté pour 2065 (Figure 4 pour l'exemple de Wissant). Les zones situées sous cette altitude de franchissement à l'arrière des dunes sont ainsi considérées comme des zones à risque de submersion lors d'une tempête centennale à l'horizon 2065. Ceci ne signifie cependant pas que toute la zone serait effectivement inondée lors d'un tel événement, car cela dépend de la largeur de la dune ou des brèches qui se formeraient dans la dune bordière ainsi que de la période de temps pendant laquelle ce haut niveau d'eau serait atteint à marée haute, ce qui déterminerait les volumes d'eau qui pourraient envahir la zone basse rétro-littorale.

Résultats

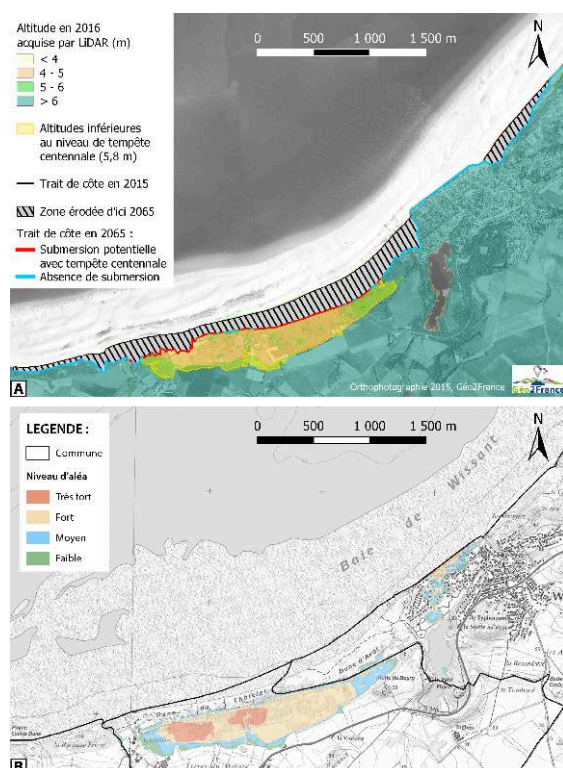
Cartographie prospective du littoral de la baie de Wissant en 2065

- 23 La projection des rythmes de recul du trait de côte les plus élevés sur le littoral de la baie de Wissant fait apparaître un recul conséquent du trait de côte à l'horizon 2065. La position du trait de côte serait, en effet, comprise entre 120 et 160 m à l'arrière de sa position en 2015 sur la majeure partie du littoral et pourrait même atteindre plus de 200 m par endroits (Figure 4A). Le recul maximum du trait de côte est observé au niveau de la partie est du marais de Tardinghen ainsi qu'au droit du lotissement de la Dune d'Aval où un tel recul en 50 ans aurait comme conséquence de faire disparaître presque entièrement ce lotissement.
- 24 Sur une grande partie du littoral à l'ouest du village de Wissant, les rythmes de recul du trait de côte pendant la période 1949-2015 ont été supérieurs à 2 m/an avec des rythmes maximums d'environ 4,5 m/an mesurés au niveau des dunes protégeant la partie est du marais de Tardinghen des incursions marines. C'est toutefois entre 2005 et 2015 que les rythmes de recul les plus rapides ont été observés au niveau du lotissement de la Dune d'Aval avec des rythmes de l'ordre de 5 m/an. La projection du

trait de côte en 2065 tient donc compte de cette accélération de l'érosion dans ce secteur du littoral plutôt que la tendance à long terme mesurée entre 1949 et 2015.

Figure 4. Cartes prospectives du littoral de Wissant

(A) Carte prospective du littoral de Wissant en 2065 montrant les zones à risque de submersion lors d'une tempête centennale (altitudes en m IGN69) ; (B) Carte des aléas du PPRL de Wissant montrant les zones à risque de submersion pour un niveau d'eau de période de retour centennale en 2100.



- 25 L'analyse de la cinématique du trait de côte dans le secteur de la Dune d'Amont, située à l'est du village de Wissant (Figure 2), révèle l'importance de considérer plusieurs périodes pour projeter la position future du rivage. Dans ce secteur, le trait de côte a eu tendance à progresser vers la mer à un rythme moyen de 0,8 m/an entre 1949-2015, ce qui s'explique vraisemblablement par des apports sédimentaires venant des secteurs en érosion situés plus à l'ouest ayant favorisé le développement d'accumulations éoliennes en haut de plage. Cette progradation du rivage, qui avait déjà été observée dans des travaux précédents (Aernouts et Héquette, 2006 ; Chaverot et al., 2008), ne s'est cependant poursuivie que jusqu'à la fin du 20^e siècle, car depuis les années 2000 la Dune d'Amont est au contraire caractérisée par de l'érosion et un recul du front dunaire avec les rythmes de recul du trait de côte > 1 m/an entre 2005 et 2015. La prise en compte de ces rythmes de recul récents a conduit à projeter la position du trait de côte en 2065 à une distance généralement comprise entre 80 et 100 m à l'arrière de sa position en 2015 (Figure 4A), alors que l'utilisation des rythmes mesurés sur la période 1949-2015 aurait mené à une projection du trait de côte à plusieurs dizaines de mètres à l'avant de sa position actuelle. Cette dernière éventualité paraît peu plausible compte tenu de l'érosion actuelle des dunes côtières et des impacts probables de l'élévation du niveau de la mer pendant les prochaines décennies.
- 26 Grâce au MNT dérivé des données LiDAR, il est possible de distinguer, le long du trait de côte de 2065, les altitudes supérieures ou inférieures au niveau d'eau maximum lors

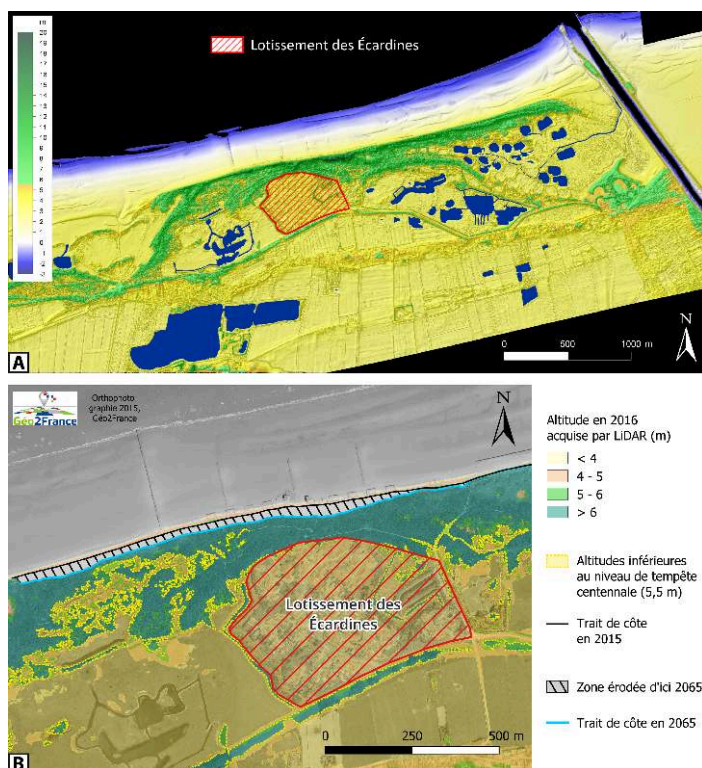
d'une tempête centennale (5,8 m), ce qui permet de mettre en évidence les secteurs où un franchissement par la mer serait susceptible de se produire lors d'un tel événement. La carte prospective du littoral montre que la submersion pourrait se produire sur une longueur de côte quasi ininterrompue d'environ 2,3 km le long du marais de Tardingen, ce qui conduirait à l'inondation, au moins partielle, de ce marais littoral dont l'altitude est en majeure partie inférieure à 5 m IGN (Figure 4A) et donc nettement moindre que le niveau de tempête centennale à l'horizon 2065. La cartographie que nous avons réalisée fait par ailleurs ressortir que, mise à part cette zone humide de faible altitude, aucun autre secteur du littoral de la baie de Wissant ne serait à risque de submersion marine.

Cartographie prospective du littoral du Platier d'Oye en 2065

- 27 Le contexte géomorphologique et les aléas littoraux sont foncièrement différents au Platier d'Oye comparativement au site de Wissant. Le Platier d'Oye étant un polder et les altitudes y étant par conséquent plus faibles qu'à Wissant, les zones situées sous le niveau de tempête centennale en 2065 y sont beaucoup plus étendues (Figure 5A). Comme on peut le voir sur le MNT réalisé à partir des données topographiques LiDAR de 2016, la quasi-totalité des terrains à l'arrière du massif dunaire est située sous ce niveau de tempête, y compris le lotissement des Écardines qui est donc potentiellement à risque de submersion, non seulement en cas de formation de brèche dans le cordon dunaire, mais aussi par entrée de la mer via des points bas situés de part et d'autre du massif dunaire.
- 28 L'analyse de la cinématique du trait de côte au Platier d'Oye depuis 1949 a montré que l'érosion dunaire concerne essentiellement la partie centrale du massif dunaire à proximité du lotissement des Écardines (Figure 5B). On peut estimer que sur l'ensemble du front dunaire, le trait de côte a reculé à un rythme moyen de 0,5 m/an entre 1949 et 2015, les rythmes de recul les plus élevés, de l'ordre de 0,7 m/an, ayant été mesurés au droit du lotissement. Pendant la période 2005-2015, cependant, le trait de côte a reculé à un rythme nettement inférieur ($< 0,1$ m/an), possiblement grâce à des aménagements souples sur le haut de plage qui avaient pour but de favoriser l'accumulation éolienne. Ce sont donc les rythmes de recul du trait de côte de la période 1949-2015 qui ont été utilisés dans ce cas pour projeter la position future du trait de côte. Comme c'est au niveau du lotissement des Écardines que les rythmes de recul les plus forts ont été mesurés, c'est aussi à cet endroit que la position du trait de côte en 2065 est le plus en retrait par rapport à sa position de 2015 (Figure 5B). Contrairement à ce qui a été établi pour Wissant, la carte prospective du littoral du Platier d'Oye en 2065 ne montre pas de zones de franchissement du cordon dunaire par la mer lors d'une tempête centennale (Figure 5B). Toutefois, la position du trait de côte en 2065 est très proche (< 10 m) de certaines zones présentant des altitudes inférieures à ce haut niveau d'eau le long des dunes situées légèrement à l'ouest du lotissement (Figure 5B). Comme nos projections de traits de côte pour 2065 représentent des positions minimales en termes de recul à cette date, on ne peut pas exclure la possibilité de la formation d'une brèche dans le cordon dunaire à cette échéance et ainsi d'un risque accru de submersion du lotissement des Écardines, situé à proximité immédiate.

Figure 5. Cartes prospectives du littoral du Platier d'Oye

(A) Carte des zones à risque de submersion au Platier d'Oye en 2065 lors d'une tempête centennale (en jaune, altitudes inférieures au haut niveau d'eau de tempête de 5,5 m IGN69); (B) Carte prospective du littoral du Platier d'Oye en 2065 dans le secteur du lotissement des Écardines montrant les zones à risque de submersion lors d'une tempête centennale.



Discussion

Limites de la méthode

- 29 De nombreux travaux ont souligné les limites des différentes méthodes de prévision de la position du trait de côte (Crowell et al, 1997 ; Douglas et Crowell, 2000 ; Durand et Heurtefeux, 2006 ; Goncalves et al., 2012). Une des limites souvent évoquée concernant les méthodes basées sur une analyse rétrospective de la cinématique du trait de côte est le manque de données disponibles et surtout de jeux de données sur des temps suffisamment longs pour pouvoir obtenir des rythmes d'évolution du trait de côte significatifs (c'est-à-dire, supérieurs à la marge d'erreur) et pouvant être considérés comme représentatifs d'une tendance à long terme (Dolan et al., 1991 ; Crowell et al., 1997 ; Durand et Heurtefeux, 2006 ; Chaverot et al., 2008 ; Birmingham et French, 2017). Notre étude est basée sur l'analyse de photographies aériennes datant de 1949 à 2015, soit une période de mesure de l'évolution de la position du trait de côte de 66 ans. Ceci a permis d'estimer une tendance évolutive à long terme qui intègre *de facto* les effets des tempêtes historiques, mais aussi de l'élévation contemporaine du niveau marin qui, d'après les données marégraphiques enregistrées à Dunkerque depuis le début des années 1950, s'est élevé à un rythme moyen de l'ordre de 1,8 mm/an (Haigh et al., 2009), ce qui représente une hausse de près de 12 cm pour la période considérée.

- 30 Une autre limite de la méthode d'extrapolation historique est la difficulté de prise en compte de la variabilité à court terme de la position du trait de côte. En effet, comme les prises de vues des photographies aériennes sont généralement espacées de plusieurs années, les évolutions à court terme entre deux dates de prises de vue sont par conséquent inconnues, ce qui peut occulter des mouvements rapides du trait de côte qui ont pu avoir lieu entre ces dates et donc masquer des rythmes d'évolution plus rapides que ceux ayant été établis sur des périodes plus longues (Dolan et al., 1991).
- 31 Les images satellites étant acquises avec une fréquence nettement plus élevée que celles des campagnes de photographies aériennes, elles peuvent, par conséquent, être utilisées pour analyser la variabilité à court terme du trait de côte (Duarte et al., 2018 ; Vos et al., 2019 ; Castelle et al., 2021), mais aussi pour projeter sa position dans le futur (Mukhopadhyay et al., 2012 ; Sousa et al., 2018). Cependant, même si la résolution et donc la précision des images ont augmenté ces dernières années, la précision de la détermination de la position du trait de côte à partir d'images satellites reste inférieure à celle qui peut être déterminée à l'aide de photographies aériennes (Garcia-Rubio et al., 2015 ; Castelle et al., 2021). En outre, l'ampleur des mouvements du trait de côte sur des pas de temps courts est souvent inférieure aux capacités de résolution des capteurs et les résultats obtenus sont donc fréquemment inférieurs à la marge d'erreur. Le recours à la télédétection pour analyser la variabilité à court terme du trait de côte n'a pas été considéré pertinent pour notre étude en raison du caractère modéré du recul du trait de côte sur le site du Platier d'Oye depuis les années 1990 (moyenne < 0,1 m/an), ce qui ne permettait pas d'évaluer avec suffisamment de précision les mouvements du trait de côte sur des pas de temps courts (annuel à infra-annuel) à l'aide d'images satellites.
- 32 Plusieurs travaux récents, et notamment le guide méthodologique des PPRL (MEDDE, 2014), préconisent d'ajouter un recul maximum ($L_{\max}$) correspondant au recul observé suite à un événement extrême, à la tendance à long terme pour estimer la position du trait de côte dans le futur. Dans la méthode qu'ils proposent, Audère et Robin (2021) suggèrent de considérer l'impact de plusieurs tempêtes pour estimer la valeur de $L_{\max}$ qu'il faudrait ajouter au rythme moyen mesuré sur une période de plusieurs décennies. Des mesures réalisées immédiatement avant et après tempêtes ne sont cependant pas toujours disponibles, ce qui ne permet pas dans ce cas d'apprécier l'impact d'un événement de tempête particulier. Afin de pallier ce manque de données et de tenter de considérer les impacts possibles d'événements morphogéniques majeurs, la méthode que nous avons développée prend en compte deux rythmes de recul du trait de côte : (1) un rythme moyen à long terme mesuré sur la période la plus longue possible en fonction des données disponibles (66 ans dans notre cas) et (2) un rythme mesuré sur une période récente plus courte (10 ans) qui représente une mesure qui intègre une variabilité annuelle à décennale pouvant révéler des rythmes d'évolution du trait de côte plus élevés. Comme le rythme le plus élevé des deux est toujours retenu pour projeter la position future du trait de côte, une valeur de recul maximum est, de fait, intégrée dans notre méthode de calcul du recul futur du trait de côte. Notre méthode s'approche ainsi de l'approche présentée par Le Cozannet et al. (2019), dans laquelle une estimation de la variabilité du trait de côte à l'échelle interannuelle à décennale doit s'ajouter à une tendance à l'échelle multi-décennale pour projeter la position future du trait de côte.

- 33 En outre, nos mesures de la cinématique du trait de côte entre 2005 et 2015 représentent une évaluation de la variabilité interannuelle intégrant les effets de tempêtes majeures récentes comme celles qui ont eu lieu pendant l'automne-hiver 2013-2014, période parmi les plus tempétueuses des dernières décennies sur l'ouest de l'Europe (Masselink et al., 2016), et qui ont eu des impacts considérables sur les littoraux du nord de la France (Crapoulet et al., 2017 ; Zemmour et Ruz, 2021). La période 2005-2015 a également été caractérisée par un rythme d'élévation du niveau de la mer de plus de 3 mm/an en raison de l'accélération de la hausse du niveau marin pendant les dernières décennies (Cazenave et al., 2014 ; Ablain et al., 2017). Par conséquent, les positions de trait de côte projetées à partir des rythmes de recul de la période 2005-2015 intègrent non seulement les effets de tempêtes majeures, mais aussi ceux de cette accélération du rythme d'élévation du niveau de la mer. Toutefois, toutes les projections climatiques fondées sur les différentes hypothèses de concentration de gaz à effet de serre prévoient la poursuite de cette accélération pendant les prochaines décennies (IPCC, 2021). De ce fait, notre méthode sous-estime probablement le recul que devrait subir d'ici 2065 le littoral des deux communes étudiées. Les positions de trait de côte projetées doivent, par conséquent, être considérées comme des positions minimales à cet horizon en l'absence de toute intervention humaine pour limiter l'érosion.
- 34 Une méthode qui a été couramment employée pendant des années pour estimer le recul du trait de côte sous l'effet de la hausse du niveau marin est l'application de la règle de Bruun (1962). Cependant, la règle de Bruun, qui est une approche essentiellement basée sur la géométrie du profil côtier, a été fortement critiquée ces dernières années dans la communauté scientifique en raison du caractère extrêmement simplificateur, et même en partie erronée, des hypothèses sur lesquelles elle est basée (Cooper et al., 2020). De fait, de nombreux auteurs considèrent aujourd'hui que les projections de position du trait de côte auxquelles la règle de Bruun aboutit sont entachées d'une telle marge d'incertitude qu'elles ne peuvent pas être appliquées à des cas concrets (Cooper et Pilkey, 2004 ; Ranasinghe et Stive, 2009 ; Cooper et al., 2020). En outre, les marges d'erreur des prévisions de position future du trait de côte augmentent également en raison d'autres incertitudes comme celles liées à l'augmentation plus ou moins rapide du niveau marin dans l'avenir ou à une possible évolution de la pente du profil côtier, ces variables influençant fortement les projections de position du trait de côte lorsque l'on applique une méthode comme celle de Bruun. Dans leur étude visant à évaluer l'incertitude des projections futures du trait de côte sous l'effet de l'élévation du niveau marin, Le Cozannet et al. (2019) estiment que cette incertitude peut atteindre 40% dans les projections du trait de côte à l'horizon 2100 lorsque l'on utilise une méthode basée sur la règle de Bruun.
- 35 Sur le littoral du nord de la France, la hausse du niveau marin depuis le milieu du 20^{ème} siècle ne semble pas avoir été le facteur déterminant de l'évolution du trait de côte, car si certains secteurs ont connu une forte érosion qui s'est soldée par un important recul du trait de côte, comme en baie de Wissant (Aernouts et Héquette, 2006), d'autres sont restés relativement stables ou ont même connu une forte avancée du trait de côte pendant la même période (Chaverot et al., 2008 ; Zemmour, 2019) alors qu'ils ont connu sensiblement la même élévation du niveau marin. Ceci est notamment le cas à l'est de Calais (Figure 1) où le développement rapide de dunes côtières a occasionné une avancée du trait de côte de plusieurs centaines de mètres par endroits depuis les

années 1940, ceci étant dû à d'importants apports de sédiments des petits fonds liés à l'accroissement à la côte d'un banc de sable (Héquette et Aernouts, 2010 ; Ruz et al., 2017a). Plusieurs études ont montré que c'est surtout le bilan sédimentaire qui conditionne l'évolution du trait de côte le long des littoraux dunaires du nord de la France que ce soit à l'échelle événementielle (Crapoulet et al., 2017), pluri-annuelle (Ruz et al., 2017b ; Héquette et al., 2019), pluri-décennale ou même séculaire (Héquette et Aernouts, 2010). L'application de la règle de Bruun ne semble donc pas pouvoir donner des résultats fiables le long de ce littoral.

Comparaison avec la cartographie des aléas des Plans de prévention des risques littoraux (PPRL)

- 36 La comparaison des cartes produites dans notre projet avec celles des PPRL adoptés pour ces communes montre plusieurs similitudes, mais aussi d'importantes différences. Au Platier d'Oye, la carte des aléas qui figure dans le PPRL (DDTM, 2017) repose sur une hypothèse de niveau d'eau ayant une probabilité d'occurrence de 100 ans en 2100 d'une hauteur de 5,51 m, ce qui correspond presque exactement au haut niveau de tempête de période de retour centennale en 2065 de 5,5 m utilisé dans notre étude pour cartographier les zones à risque de submersion. Cependant, l'approche adoptée dans le PPRL simule une submersion par une brèche fictive qui se formerait dans le cordon dunaire dans sa forme actuelle, c'est-à-dire sans faire varier la position du trait de côte à l'horizon 2100, ce qui est peu vraisemblable. À l'inverse, notre méthodologie tient compte de l'évolution récente du trait de côte pour projeter sa position future et ainsi esquisser ce que pourrait être la configuration du littoral dans l'avenir suite à une érosion probable. Ce n'est qu'à partir de cette morphologie possible du littoral dans le futur que les zones à risques de submersion lors d'une tempête de période de retour centennale sont distinguées. Dans le cas du Platier d'Oye, nos résultats suggèrent que sous l'effet de l'érosion marine, le cordon dunaire n'aurait plus que quelques mètres de largeur en 2065 à environ 300 m à l'ouest du lotissement des Écardines (Figure 5B), ce qui constituerait une zone de faiblesse où une brèche serait la plus susceptible de se former en cas de tempête conjuguée à un haut niveau d'eau. Or, c'est au droit du lotissement, là où se concentrent les enjeux, qu'une brèche est simulée dans le PPRL, dans un secteur où le cordon dunaire est (et serait dans le futur) nettement plus large et donc beaucoup moins sujet à la formation d'une brèche pouvant conduire à une submersion marine.
- 37 Dans leur analyse de l'aléa de submersion marine d'une commune de la côte nord de la Bretagne à l'horizon 2100, Cariolet et al. (2012) soulignaient déjà qu'il était important de prendre en compte l'érosion du trait de côte dans la cartographie des risques littoraux, ce qui n'était pas considéré dans le Plan de prévention des risques (PPR) de cette localité. Ces auteurs insistaient également sur le fait que l'élévation future du niveau marin n'était pas prise en compte dans le PPR, ce qui conduisait à une sous-estimation des zones à risque de submersion marine. Si de nos jours la cartographie de l'aléa submersion des PPRL intègre la hausse future du niveau de la mer, il n'en demeure pas moins que l'absence de prise en compte de l'érosion côtière dans l'évaluation des risques futurs de submersion conduit à une cartographie des risques incomplète, voire erronée, car elle se fait en fonction de la configuration actuelle de la zone littorale et non pas de celle qu'elle est susceptible d'avoir dans l'avenir. Le cas de Wissant est très révélateur à cet égard, car ne considérer que les risques de submersion

amène seulement à identifier un marais maritime à faibles enjeux comme une zone d'aléa fort à très fort (Figure 4B) et non pas un lotissement pourtant déjà très menacé par le recul du trait de côte à l'heure actuelle et qui est voué à disparaître dans les prochaines décennies si aucune mesure n'est prise pour stopper ou limiter l'érosion du littoral sur ce site (Figure 4B).

- 38 On peut donc s'interroger sur la démarche des services de l'État lorsque la prévention des risques littoraux dans l'avenir (c'est-à-dire, en prenant en compte l'élévation future du niveau marin d'ici la fin du 21^e siècle) est envisagée en ne considérant que le risque de submersion marine et pas le risque d'érosion. Ne pas prendre en compte l'érosion côtière dans une démarche prospective revient à considérer que la morphologie du littoral ne variera pas pendant les prochaines décennies, ce qui est peu vraisemblable et induit forcément un biais dans la caractérisation des zones à risque de submersion. En effet, la simulation de phénomènes de submersion marine dans le futur avec un niveau marin plus élevé que l'actuel, mais en se basant sur la morphologie actuelle de la zone côtière conduit inévitablement à des résultats irréalistes, car la morphologie du littoral ne sera certainement plus la même. À quoi peut donc servir de simuler des submersions par des brèches au travers de dunes côtières qui dans certains cas n'existeront même plus ?

Conclusion

- 39 L'application de la méthode présentée ici a conduit à estimer le recul futur du trait de côte de deux sites du littoral du nord de la France et à évaluer les risques de submersion marine en 2065 en prenant non seulement en compte l'élévation future du niveau de la mer, mais en considérant aussi la morphologie que pourrait avoir le littoral à cette date. Ainsi, l'identification de zones de submersion par de hauts niveaux d'eau lors d'une tempête centennale ne repose pas sur les altitudes actuelles des cordons dunaires qui protègent les zones basses rétro-littorales du franchissement par la mer, mais sur les altitudes qu'aurait le cordon bordier en 2065 suite au recul du trait de côte. Notre approche rejoint ainsi celle de Pollard et al. (2019) qui soulignent qu'on ne peut dissocier submersion marine et érosion, car les risques de submersion dans l'avenir dépendront nécessairement de la position future du trait de côte.
- 40 Les cartographies auxquelles on a pu aboutir ont mis en évidence des situations très contrastées entre les deux communes étudiées en matière de risque et de vulnérabilité. À Wissant, le risque est essentiellement lié à un phénomène d'érosion du cordon dunaire qui menace de plus en plus des habitations situées à très peu de distance à l'arrière de la dune. En raison d'un rythme de recul très élevé du trait de côte dans ce secteur, la probabilité que l'érosion finisse par atteindre les habitations pendant les prochaines années y est par conséquent très élevée. Cette érosion du cordon dunaire touche également d'autres secteurs de la baie de Wissant, ce qui à terme augmentera les risques de submersion marine, mais ceci ne concerne qu'un marais où les enjeux sont environnementaux plutôt qu'humains ou économiques. La situation est sensiblement différente au Platier d'Oye où c'est le risque de submersion qui menace un lotissement situé sous le niveau des hautes mers et uniquement protégé des invasions marines par un unique cordon dunaire. Le risque d'érosion n'est cependant pas absent, car l'évolution future du trait de côte devrait conduire à créer des zones de faiblesse, car peu élevées, dans le cordon dunaire par lesquelles des franchissements par la mer

pourraient facilement avoir lieu à l'horizon 2065 lors de hauts niveaux de tempêtes. La comparaison de nos cartes prospectives avec les cartes des aléas des PPRL de ces deux communes fait nettement ressortir que la non-prise en compte de l'érosion côtière dans l'évaluation des risques littoraux dans le futur conduit à simuler des risques de submersion marine sur des topographies irréalistes de la zone côtière. Ce biais pourrait pourtant aisément être corrigé en appliquant une méthodologie comme celle que nous avons développée et qui pourrait facilement être mise en œuvre au niveau de collectivités locales ou régionales.

Cet article présente des résultats du projet de recherche COSACO « Quel littoral dans cinquante ans ? Co-construction de stratégies d'adaptation au changement climatique en Côte d'Opale » financé par la Fondation de France en réponse à l'Appel à projet de 2016 « Quels littoraux pour demain ? ». Les données topographiques LiDAR ayant servi à la réalisation des cartes prospectives du littoral à l'horizon 2065 ont été acquises par le CIRCLE (Contrôle, Innovation et Recherche en Cartographie Laser de l'Environnement) de l'Université de Caen grâce au financement de la Fondation de France. Les données marégraphiques ont été fournies par le Service hydrographique et océanographique de la Marine (Shom). Nous remercions Denis Marin pour son aide dans la réalisation des figures. Nous tenons également à remercier les deux réviseurs anonymes dont les commentaires et suggestions ont contribué à améliorer la qualité du manuscrit.

BIBLIOGRAPHIE

- Ablain, M., Legeais, J.F., Prandi, P. Marcos, M., Fenoglio-Marc, L., Dieng, H.B., Benveniste, J. et Cazenave, A., 2017, Satellite altimetry-based sea level at global and regional scales, *Surveys in Geophysics*, 38, pp. 7-31.
- Aernouts, D., Héquette, A., 2006, L'évolution du rivage et des petits fonds en Baie de Wissant pendant le XX^e siècle, Pas-de-Calais, France, *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 12, pp. 49-64.
- Arkema, K.K. , Guannel, G., Verutes, G., Wood, S.A., Guerry, A., Ruckelshaus, M., Kareiva, P., Lacayo, M. et Silver, J.M., 2013, Coastal habitats shield people and property from sea-level rise and storms, *Nature Climate Change*, 3, pp. 913-918.
- Audère, M., Robin, M., 2021, Assessment of the vulnerability of sandy coasts to erosion (short and medium term) for coastal risk mapping (Vendée, W France), *Ocean and Coastal Management*, 201, 105452, [En ligne] URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0964569120303598>
- Beck, C., Clabaut, P., Dewez, S., Vicaire, O., Chamley, H., Augris, C., Hoslin, R. et Caillot, A., 1991, Sand bodies and sand transport paths at the English Channel-North Sea border: morphology, dynamics and radioactive tracing, *Oceanologica Acta*, 11, pp. 111-121.
- Boak, E.H. et Turner, I.L., 2005, Shoreline definition and detection: a review, *Journal of Coastal Research*, 21, pp. 688-703.

- Brooks, S.M. et Spencer, T., 2012, Shoreline retreat and sediment release in response to accelerating sea-level rise: measuring and modelling cliffline dynamics on the Suffolk Coast, UK. *Global and Planetary Change*, 80-81, pp. 165-179.
- Bruno, D. E., Barca, E., Goncalves, R.M., Queiroz, H., Berardi, L. et Passarella, G., 2018, Linear and evolutionary polynomial regression models to forecast coastal dynamics: Comparison and reliability assessment, *Geomorphology*, 300, pp. 128-140.
- Bruun, P., 1962, Sea-level rise as a cause of shore erosion, *Journal of the Waterways and Harbors Division*, 88, pp. 117-130.
- Burmingham, H. et French, J., 2017, Understanding coastal change using shoreline trend analysis supported by cluster-based segmentation, *Geomorphology*, 282, pp. 131-149.
- Cariolet, J.-M., Suanez, S., Meur-Férec, C. et Postec, A., 2012, Cartographie de l'aléa de submersion marine et PPR : éléments de réflexion à partir de l'analyse de la commune de Guissény (Finistère, France), *Cybergeo*, 586, [En ligne] URL : <https://journals.openedition.org/cybergeo/25077>
- Castelle, B., Masselink, G., Scott, T., Stokes, C., Konstantinou, A., Marieu, V et, Bujan, S., 2021, Satellite-derived shoreline detection at a high-energy meso-macrotidal beach, *Geomorphology*, 383, [En ligne] URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169555X2100115X>
- Cazenave, A., Dieng, H.B., Meyssignac, B., von Schuckmann K., Decharme, B. et Berthier E., 2014, The rate of sea-level rise, *Nature Climate Change*, 4, pp. 358-361.
- CEREMA (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement), 2017, *Spécification technique de l'indicateur national de l'érosion côtière*, [En Ligne] URL : <http://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/strategie-nationale-de-gestion-integree-du-trait-r434.html>
- Chaverot, S., Héquette, A. et Cohen, O., 2008, Changes in storminess and shoreline evolution along the northern coast of France during the second half of the 20th century, *Zeitschrift für Geomorphologie*, Suppl. 52, pp. 1-20.
- Cohn, N., Ruggiero, P., García-Medina, G., Anderson, D., Serafin, K.A. et Biel, R., 2019, Environmental and morphologic controls on wave-induced dune response, *Geomorphology*, 32, pp. 108-128.
- Cooper, J.A.G., Pilkey, O.H., 2004, Sea-level rise and shoreline retreat: time to abandon the Bruun Rule, *Global and Planetary Change*, 43, pp. 157-171.
- Cooper, J.A.G., Masselink, G., Coco, G., Short, A. D., Castelle, B., Rogers, K., Anthony, E., Green, A. N., Kelley, J.T., Pilkey, O. H. et Jackson, D.W.T., 2020, Sandy beaches can survive sea-level rise, *Nature Climate Change*, 10, pp. 993-995.
- Cowley, D., Harris, D.L., Moss, P.T. et Shulmeister, J., 2022, Beach narrowing on prograding coasts: examples from the tropics to subtropics of eastern Australia, *Geomorphology*, 401 : 108110, [En ligne] URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169555X22000034>
- Crapoulet, A., Héquette, A., Marin, D., Levoy, F. et Bretel, P., 2017, Variations in the response of the dune coast of Northern France to major storms as a function of available beach sediment volume, *Earth Surface Processes and Landforms*, 42, pp. 1603-1622.
- Crowell, M., Douglas, B.C. et Leatherman, S., 1997, On forecasting future U.S. shoreline positions: A test of algorithms, *Journal of Coastal Research*, 13, pp. 1245-1255.

- DDTM, 2017. *Plan de Prévention des Risques Littoraux (PPRL) de Oye-Plage à Gravelines – Note de présentation*, Direction Départementale des Territoires et de la Mer du Nord et Direction Départementale des Territoires et de la Mer du Pas-de-Calais, 150 p.
- de Winter, R.C., Ruessink, B.G., 2017, Sensitivity analysis of climate change impacts on dune erosion: case study for the Dutch Holland coast, *Climatic Change*, 141, pp. 685-701.
- Del Río L., Gracia, F.J. et Benavente, J., 2013, Shoreline change patterns in sandy coasts. A case study in SW Spain, *Geomorphology*, 196, pp. 252-266.
- Dolan, R., Fenster, M.S. et Holme, S.J., 1991, Temporal analysis of shoreline recession and accretion, *Journal of Coastal Research*, 7, pp. 723-744.
- Douglas, B.C., Crowell, M., 2000, Long-term shoreline position prediction and error propagation, *Journal of Coastal Research*, 16, pp. 145-152.
- Douglas, B.C., Crowell, M. et Leatherman, S.P., 1998, Considerations for shoreline position prediction, *Journal of Coastal Research*, 14, pp. 1025-1033.
- Duarte, C.R., De Miranda, F.P., Landau, L., Souto, M.V.S., Sabadia, J.A.B., Da Silva, C.A., Rodrigues, L.I.D.C., Damasceno, A.M., 2018, Short-time analysis of shoreline based on RapidEye satellite images in the terminal area of Pecem Port, Ceara, Brazil, *International Journal of Remote Sensing*, 39, pp. 4376-4389.
- Durand, P., Hortefeux H., 2006, Impact de l'élévation du niveau marin sur l'évolution future d'un cordon littoral lagunaire : une méthode d'évaluation, exemple des étangs de Vic et de Pierre Blanche (littoral méditerranéen, France), *Zeitschrift für Geomorphologie*, 50, pp. 221-244.
- Enriquez, A.R., Marcos, M., Falqués, A. et Roelvink, D., 2019, Assessing beach and dune erosion and vulnerability under sea level rise: A case study in the Mediterranean Sea, *Frontiers in Marine Science*, 6 : 4, [En ligne] URL : <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2019.00004/full>
- Fenster, M.S., Dolan, R. et Elder, J.F., 1993, A new method for predicting shoreline positions from historical data, *Journal of Coastal Research*, 9, pp. 147-171.
- Garcia-Rubio, G., Huntley, D. et Russell, P., 2015, Evaluating shoreline identification using optical satellite images, *Marine Geology*, 359, pp. 96-105.
- Goncalves, R.M., Awange, J.L., Krueger, C.P., Heck, B., et Coelho, L., 2012, A comparison between three short-term shoreline prediction models, *Ocean & Coastal Management*, 69, pp. 102-110.
- Haigh, I., Nicholls, R. et Wells, N., 2009, Mean sea level trends around the English Channel over the 20th century and their wider context, *Continental Shelf Research*, 29, pp. 2083-2098.
- Haigh, I., Nicholls, R. et Wells, N., 2011, Rising sea levels in the English Channel 1900 to 2100, *Proceedings of ICE-Maritime Engineering*, 164, pp. 81-92.
- Hanson, H., 1989, GENESIS - A Generalized Shoreline Change Numerical Model, *Journal of Coastal Research*, 5, pp. 1-27.
- Héquette, A., Aernouts, D., 2010, The influence of nearshore sand bank dynamics on shoreline evolution in a macrotidal coastal environment, Calais, Northern France, *Continental Shelf Research*, 30, pp. 1349-1361.
- Héquette, A., Ruz, M.H., Zemmour, A., Marin, D., Cartier, A. et Sipka, V., 2019, Alongshore variability in coastal dune erosion and post-storm recovery, northern coast of France, *Journal of Coastal Research*, SI 88, pp. 25-45.

- Héquette, A., Cartier, A. et Schmitt, F.G., 2021, The effects of tidal translation on wave and current dynamics on a barred macrotidal beach, northern France, *Journal of Marine Science and Engineering*, 9, 909, [En ligne] URL : <https://www.mdpi.com/2077-1312/9/8/909>
- Herbert, V., Maillefert, M. et Meur-Ferec, C., 2010, Risques d'érosion et dynamiques d'action collective sur la côte d'Opale (de Wissant à Wimereux), Dans : O. Petit et V. Herbert (Eds.), *Risque environnemental et action collective: application aux risques industriels et d'érosion côtière dans le Pas de Calais*, Lavoisier, Paris, p. 95-125.
- Hsiao, S.C., Chiang, W.S., Jang, J.H., Wu, H.L., Lu, W.S., Chen, W.B. et Wu, Y.T., 2021, Flood risk influenced by the compound effect of storm surge and rainfall under climate change for low-lying coastal areas, *Science of the Total Environment*, 764, 144439, [En ligne] URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720379705>
- IPCC, 2013, *Climate change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, T.F. Stocker et al. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, 1535 p.
- IPCC, 2021, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, 2391 p.
- Karunaratna, H., Brown, J., Chatzirodou, A., Dissanayake, P. et Wisse, P., 2018, Multi-timescale morphological modelling of a dune-fronted sandy beach, *Coastal Engineering*, 136, pp. 161-171.
- Kirby, J.A., Masselink, G., Essex, S., Poate, T. et Scott, T., 2021, Coastal adaptation to climate change through zonation: A review of coastal change management areas (CCMAs) in England, *Ocean & Coastal Management*, 215, 105950, [En ligne] URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0964569121004336>
- Larson, M., Erikson, L. et Hanson, H., 2004, An analytical model to predict dune erosion due to wave impact, *Coastal Engineering*, 51, pp. 675-696.
- Le Cozannet, G., Bulteau, T., Castelle, B., Ranasinghe, R., Wöppelmann, G., Rohmer, J., Bernon, N., Idier, D., Louisor, J. et Salas-y-Mélia, D., 2019, Quantifying uncertainties of sandy shoreline change projections as sea level rises, *Scientific Reports*, 9, 42, [En ligne] URL : <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37017-4>
- Masselink, G., Scott, T., Poate, T., Russell, P., Davidson, M. et Conley, D., 2016, The extreme 2013/2014 winter storms: hydrodynamic forcing and coastal response along the southwest coast of England, *Earth Surface Processes and Landforms*, 41, pp. 378-391.
- MEDDE, 2014, *Guide méthodologique : Plan de prévention des risques littoraux*, Ministère de l'Écologie, du Développement durable, et de l'Énergie, Direction Générale de la Prévention des Risques, La Défense, 169 p.
- Moser, S.C., Williams, S.J. et Boesch, D.F., 2012, Wicked challenges at land's end: Managing coastal vulnerability under climate change, *Annual Review of Environment and Resources*, 37, pp. 51-78.
- Mukhopadhyay, A., Mukherjee, S., Mukherjee, S., Ghosh, S., Hazra, S. et Mitra, D., 2012, Automatic shoreline detection and future prediction: A case study on Puri Coast, Bay of Bengal, India, *European Journal of Remote Sensing*, 45, pp. 201-213.
- Neumann, B., Vafeidis, A.T., Zimmermann, J., et Nicholls, R.J., 2015, Future coastal population growth and exposure to sea-level rise and coastal flooding - A global assessment, *PLoS One*, 10, 3, e0118571, [En ligne] URL : <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0131375>

- Pollard, J.A., Spencer, T. et Brooks, S.M., 2019, The interactive relationship between coastal erosion and flood risk, *Progress in Physical Geography*, 43, pp. 574-585.
- Ranasinghe, R., 2016, Assessing climate change impacts on open sandy coasts: A review, *Earth-Science Reviews*, 160, pp. 320-332.
- Ranasinghe, R., Stive, M.J.F., 2009, Rising seas and retreating coastlines, *Climatic Change*, 97, pp. 465-468.
- Ranasinghe, R., Callaghan, D. et Stive, M.J.F., 2012, Estimating coastal recession due to sea level rise: beyond the Bruun rule, *Climatic Change*, 110, pp. 561-574.
- Roelvink, D., Reniers, A., van Dongeren, A., van Thiel de Vries, J., McCall, R. et Lescinski, J., 2009, Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands, *Coastal Engineering*, 56, pp. 1133-1152.
- Rufin-Soler, C. Ruz, M.H., Deboudt, P. et Révillon, R., 2020, Comment vivre avec des conflits d'usages au sein d'un espace naturel protégé exposé à des risques littoraux ? L'exemple du Platier d'Oye (Côte d'Opale, France), *Vertigo*, 20, 1, [En ligne] URL : <https://journals.openedition.org/vertigo/27769>
- Ruz, M.-H., Héquette, A., Marin, D., Sipka, V., Crapoulet, A. et Cartier, A., 2017a, Development of an incipient foredune field along a prograding macrotidal shoreline, northern France, *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 23, pp. 37-50.
- Ruz, M.H., Héquette, A. et Marin, D., 2017b, Development of large nebkhas along an accreting macrotidal coastline, Northern France, *Aeolian Research*, 24, pp. 1-14.
- Ruz et al., Héquette, A., et Maspataud, A., 2009, Identifying forcing conditions responsible for foredune erosion on the northern coast of France, *Journal of Coastal Research*, SI 56, pp. 356-360.
- Schmitt, F. G., Crapoulet, A., Héquette, A. et Huang, Y., 2018, Nonlinear dynamics of the sea level time series in the Eastern English Channel, *Natural Hazards*, 91, pp. 267-285.
- Shom, 2017. *Références Altimétriques Maritimes - Ports de France métropolitaine et d'outre-mer*, Service hydrographique et océanographique de la marine, Brest, 118 p.
- Sousa, W.R.N., Souto, M.V.S., Matos, S.S., Duarte, C.R., Salgueiro, A.R.G.N.L. et Silva N.C.A., 2018, Creation of a coastal evolution prognostic model using shoreline historical data and techniques of digital image processing in a GIS environment for generating future scenarios, *International Journal of Remote Sensing*, 39, p. 4416-4430.
- Stockdon, H.F., Holman, R.A., Howd, P.A. et Sallenger Jr., A.H., 2006, Empirical parameterization of setup, swash, and runup, *Coastal Engineering*, 53, pp. 573-588.
- Thiéblemont, R., Le Cozannet, G., Rohmer, J., Toimil, A., Alvarez-Cuesta, M. et Losada, I.J., 2021, Deep uncertainties in shoreline change projections: an extra-probabilistic approach applied to sandy beaches, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21, pp. 2257-2276
- Toimil, A., Camus, P., Losada, I.J., Le Cozannet, G., Nicholls, R.J., Idier, D. et Maspataud, A., 2020, Climate change-driven coastal erosion modelling in temperate sandy beaches: Methods and uncertainty treatment, *Earth-Science Reviews*, 202, 103110, [En ligne] URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012825219303861>
- van Maanen, B., Nicholls, B., French, J., Barkwith, A., Bonaldo, D., Burningham, H., Murray, A.B., Payo, A., Sutherland, J., Thornhill, G., Townend, I., van der Wegen, M. et Walkden, M., 2016, Simulating mesoscale coastal evolution for decadal coastal management: a new framework integrating multiple, complementary modelling approaches, *Geomorphology*, 256, pp. 68-80.

Vitousek, S., Barnard, P.L., Limber, P., Erikson, L. et Cole, B., 2017, A model integrating longshore and cross-shore processes for predicting long-term shoreline response to climate change, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 122, pp. 781-806.

Vos, K., Harley, M.D., Splinter, K.D., Simmons, J.A. et Turner, I.L., 2019, Sub-annual to multi-decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery, *Coastal Engineering*, 150, pp. 160-174.

Vousdoukas, M.I., Mentaschi, L., Voukouvalas, E., Bianchi, A., Dottori, F., et Feyen, L., 2018, Climatic and socioeconomic controls of future coastal flood risk in Europe, *Nature Climate Change*, 8, pp. 776-780.

Wahl, T., Haigh, I.D., Nicholls, R.J., Arns, A., Dangendorf, S., Hinkel, J. et Slangen, A.B.A., 2017, Understanding extreme sea levels for broad-scale coastal impact and adaptation analysis, *Nature Communications*, 8, 16075, [En ligne] URL : <https://doi.org/10.1038/ncomms16075>

Zemmour, A., 2019, *Étude de l'évolution des littoraux dunaires de la Côte d'Opale à différentes échelles de temps: analyse de leur capacité de régénération post-tempête*, Thèse de doctorat, Université du Littoral Côte d'Opale, Wimereux, 283 p.

Zemmour, A., Ruz, M.H., 2021, Impacts des séries de tempêtes de 2013 à 2018 sur l'évolution récente des cordons dunaires du nord de la France, *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 27, pp. 37-52.

NOTES

1. Projet COSACO : « CO-construction de Stratégies d'Adaptation au changement climatique en Côte d'Opale ». Pour plus d'informations, voir le site internet de l'Université du littoral de la Côte d'Opale [en ligne] URL : <https://cosaco.univ-littoral.fr/>
2. Le zéro IGN69 correspond au niveau de référence des cartes topographiques en France.
3. Pour plus d'informations, voir le site internet de CANDHIS-Cerema [en ligne] URL : <http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/>

RÉSUMÉS

Le changement climatique étant susceptible d'avoir des impacts majeurs sur les côtes basses, notre capacité à évaluer les conséquences des aléas littoraux dans le futur est un élément essentiel dans la prévention des risques littoraux. Cet article présente des exemples de l'application d'une méthode destinée à estimer la position future du trait de côte et à cartographier les zones à risque de submersion à l'horizon 2065, en prenant en compte l'élévation future du niveau marin, au niveau de deux communes du littoral du nord de la France où des habitations sont déjà menacées par l'érosion ou la submersion marine. Les résultats obtenus montrent que l'érosion représente le risque majeur sur un des deux sites étudiés où la majeure partie d'un lotissement pourrait disparaître d'ici 2065 si rien n'est fait pour limiter l'érosion du littoral. Bien que la submersion marine constitue la principale menace sur le deuxième site d'étude, c'est l'érosion côtière qui augmentera, à terme, les risques de submersion

des habitations en réduisant la largeur du cordon dunaire qui en assure la protection. La comparaison de nos résultats avec les cartes des aléas produites par les services de l'État fait apparaître des différences sensibles qui s'expliquent par le fait que le risque d'érosion n'a pas été pris en compte dans les Plans de prévention des risques littoraux (PPRL) des deux communes considérées, ce qui pose la question de la validité de zones à risque définies sans prendre en compte l'évolution future probable du trait de côte.

Because climate change will likely have major impacts in low-lying coastal areas, our ability for evaluating predictable consequences of coastal hazards in the future already represents a key issue in coastal risk reduction. This paper presents examples of the application of a method aimed at assessing the future position of the shoreline and at mapping areas that will be at risk of flooding by 2065 with future sea-level rise at two coastal localities of northern France where properties are already threatened by erosion or flooding. Our results show that erosion is the main coastal hazard at one of the two study sites where a large part of a housing estate may disappear by 2065 if no action is taken for limiting coastal erosion. Although marine flooding represents the primary risk at the second study site, coastal erosion will increase the risk of flooding of properties in the future due to the decrease in width of the protective coastal dunes. Comparison of our results with the coastal hazard maps published by the French government shows significant differences that can be explained by the fact that the risk of erosion was not considered in the Coastal Risk Protection Plans (PPRL) of the two municipalities considered in this study, which raises the question of the reliability of areas at risk defined without taking into account future shoreline evolution trends.

INDEX

Keywords : risques littoraux, changement climatique, cartographie prospective, érosion côtière, submersion marine

AUTEURS

ARNAUD HÉQUETTE

Professeur de géographie, Université Littoral Côte d'Opale, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, Wimereux, France, courriel : arnaud.hequette@univ-littoral.fr

MARIE-HÉLÈNE RUZ

Professeure de géographie, Université Littoral Côte d'Opale, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, Wimereux, France, courriel : ruz@univ-littoral.fr

OLIVIER COHEN

Maître de conférences en géographie, Université Littoral Côte d'Opale, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, - Wimereux, France, courriel : olivier.cohen@univ-littoral.fr

FRANÇOIS G. SCHMITT

Directeur de recherche CNRS en océanographie physique, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, Wimereux, France, courriel : francois.schmitt@cnrs.fr