



HAL
open science

Spatialisation des enjeux côtiers sous l'emprise de l'aléa érosion observé et scénarisé en fonction des changements climatiques en région Pays de la Loire

Morgane Audère

► To cite this version:

Morgane Audère. Spatialisation des enjeux côtiers sous l'emprise de l'aléa érosion observé et scénarisé en fonction des changements climatiques en région Pays de la Loire. Histoire. Nantes Université, 2022. Français. NNT : 2022NANU2027 . tel-04011772v2

HAL Id: tel-04011772

<https://theses.hal.science/tel-04011772v2>

Submitted on 2 Mar 2023

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

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

THÈSE DE DOCTORAT DE

NANTES UNIVERSITÉ

ECOLE DOCTORALE N° 604
Sociétés, Temps, Territoires
Spécialité : *Géographie*

Par

Morgane AUDÈRE

Spatialisation des enjeux côtiers sous l'emprise de l'aléa érosion observé et scénarisé en fonction des changements climatiques en région Pays de la Loire

Thèse présentée et soutenue à Nantes le 13 décembre 2022

Unité de recherche : Littoral Environnement Télédétection Géomatique (LETG), UMR 6554 CNRS

Rapporteurs avant soutenance

Philippe DEBOUDT

Professeur des Universités, Université de Lille

Nathalie LONG

Directrice de recherche (HDR), La Rochelle Université

Composition du jury

Présidente et examinatrice : **Virginie DUVAT**

Professeure des Universités, La Rochelle Université

Examineur : **Stéphane COSTA**

Professeur des Universités, Université de Caen Normandie

Directeur de thèse : **Marc ROBIN**

Professeur des Universités, Nantes Université

Remerciements

J'adresse mes premiers remerciements à mon directeur de thèse Marc ROBIN. Je te remercie tout d'abord pour m'avoir accordé ta confiance et m'avoir offert l'opportunité de consacrer quatre ans à un sujet qui me passionne. Je tiens également à te remercier pour ton suivi et pour t'être aussi bien adapté à moi au fil de ces quatre années.

Je tiens à remercier également les membres de mon Comité de Suivi Individuel, Virginie DUVAT et Séphane COSTA. Merci pour votre bienveillance, votre aide et votre soutien au court de cette thèse.

A mes collègues de couloir et OR2Ciens... Leila, le rayon de soleil de ce couloir, que dis-je, du bâtiment ! J'espère que tu as conscience que notre vie a basculé depuis ton arrivée au laboratoire... Mille mercis pour ta bonne humeur (et c'est un euphémisme), ton enthousiasme (toujours un euphémisme) et ce petit côté... « hilare » ! Davien, je ne te remercie pas pour avoir largement contribué à la hausse de mon taux de glycémie... En revanche, je te remercie pour ta compassion, ta sensibilité, ton empathie, autant de qualités qui m'ont accompagnées ces dernières années... J'ai d'ailleurs une pensée pour les deux collègues qui ont la chance de partager ton bureau. Benjamin, ça fait assez peu de temps, mais je suis bien contente qu'une personne saine de corps et d'esprit rejoigne ce petit groupe ! Et ma chère Manon, qu'est-ce qu'on ferait sans toi... Derrière cette discrétion se cache un bourreau de travail, une infinie gentillesse et surtout une très belle âme. Merci pour ta présence ces derniers mois...

Merci à toi Riwan pour ta bienveillance et ton soutien. Bon... t'es sacrément ronchon mais on s'y fait.. Et enfin merci à toi Martin, j'ai beaucoup évolué à tes côtés. Grâce à toi j'ai appris à prendre du recul sur mon travail, à le questionner. L'apprentissage a été éprouvant mais je te suis reconnaissante pour ce que tu m'as apporté.

A mes chers coloc' de bureau... Juliette, tu resteras à mon humble avis, la personne la plus équilibrée de ce bureau... Attention Guillaume, j'ai adoré tes chemises à motifs, tes bruits de goutte d'eau et tes « boooooomer ! » mais honnêtement... on a quand même partagé des moments de malaises profonds, mélange de premier, second, dixième degré, parfois incompris et souvent mal compris, hein Juliette ? Mais punaise qu'est ce qu'on a ri ! Puis ma « petite » Louise est arrivée, comblant l'immense vide que tu as laissé Guillaume... Ma très chère Louise, tu es venue rajouter un grain de folie, mais aussi de douceur depuis 1 an. Bon si on laisse de côté tes bugs (ou longs moments de réflexion dirons-nous), et ces trucs que tu fais avec ton visage... tu es une boule de tendresse et d'amour. Tu es venue égayer ces derniers mois, tu m'as permis d'écrire les dernières pages de ce manuscrit dans le calme, la bien-

Remerciements

veillance et surtout la bonne humeur. Je suis infiniment reconnaissante d'avoir pu partager ces derniers moments avec toi...

Je tiens également à remercier sincèrement les enseignants-chercheurs de ce laboratoire pour leur soutien et leur bienveillance à mon égard, tout particulièrement ces derniers mois. Mais j'ai une attention particulière pour Mister M&M's.. J'ai pris conscience grâce à toi pour la première fois en Master 1 que j'avais un truc à raconter, que j'avais finalement une place dans ce milieu. Et bien voilà, cette thèse te donne raison (pour une fois...). Donc merci pour tout ça Nico. Je te remercie également pour ton soutien et ton aide (j'espère ne pas avoir laissé traîner de doubles espaces...). Je sais que ça n'a pas été de tout repos, mais ça valait le coup, non ?

Je tiens également à remercier mes amis qui ont malheureusement (ou heureusement) pour eux, vécu une amitié « par intermittence » lors de cette dernière année de thèse. Léa et Adyb, merci pour votre amour et soutien même à distance, voire à très longue distance (hein Léa ?).

Ma chère Mélanie, tu as contribué au maintien - somme toute relatif - de ma bonne santé mentale grâce à ta bonne humeur, ton grain de folie et surtout ton amitié sans faille. Je remercie le jour où tu es devenue nantaise.

Mon cher Paul, ce n'est pas au collègue mais à l'ami que j'adresse ces remerciements. Merci d'avoir été ce soutien, de m'avoir poussée à me surpasser et de m'avoir aidée à relativiser également beaucoup de choses. Merci infiniment...

Enfin, j'adresse mes derniers remerciements à ma famille. A toi mon frère, pour la fierté que tu éprouves à mon égard, celle que j'ai pour toi est un moteur dans ma vie. A vous mes parents, que je chéris profondément et pour qui j'ai une reconnaissance éternelle. Vous m'avez portée et supportée, merci d'être qui vous êtes. Merci à vous pour avoir cru en moi et de m'avoir soutenue dans les moments de doutes et d'incertitudes. Merci pour votre amour.

Sommaire

Remerciements	p.5
Introduction générale	p.11
Partie 1 : État de l’art et présentation du secteur d’étude	p.19
Chapitre 1 : État de l’art sur l’aléa et les enjeux associés	p.21
Chapitre 2 : Présentation du secteur d’étude	p.63
Partie 2 : L’aléa érosion.....	p.91
Chapitre 1 : Assessing Surface Changes between Shorelines from 1950 to 2011	p.93
Chapitre 2 : Assessment of the vulnerability of sandy coasts to erosion for coastal risk mapping (Vendée, W France)	p.115
Chapitre 3 : Projection du trait de côte et estimation de l’incertitude.....	p.139
Partie 3 : Spatialisation des enjeux côtiers	p.165
Chapitre 1 : Évaluation de la vulnérabilité côtière.....	p.167
Chapitre 2 : Évaluation de la prédisposition des enjeux au risque d’érosion	p.183
Conclusion générale.....	p.203
Bibliographie	p.211

Introduction générale

Le littoral est soumis à une pression humaine croissante, du fait de son attractivité mais aussi des opportunités économiques qu'il offre, sans compter sa valeur esthétique et patrimoniale (Péron, 2004). A l'échelle mondiale, 600 millions de personnes vivent dans des zones côtières de faible élévation (situées à moins de 10 mètres au-dessus du niveau moyen de la mer) (Kirezci *et al.*, 2020), ce qui représente environ 31% des littoraux du monde (non gelés) (Luijendijk, 2019). Cette densité humaine à proximité de la frange côtière accentue la vulnérabilité des enjeux face aux risques de submersion marine et d'érosion côtière.

La gestion du risque correspond aux politiques et outils de prévention ainsi qu'aux mesures de protection (Hénaff *et al.*, 2014) propres à chaque pays, du fait de l'absence de gestion standardisée au niveau international (Ferreira *et al.*, 2009). Cependant, le risque lié à l'érosion côtière n'est pas autant considéré que le risque de submersion marine. A titre d'exemple, en Angleterre, la DEFRA (Department for Environment, Food & Rural Affairs and Environment Agency) a la responsabilité nationale globale de la politique de gestion des risques d'inondation et d'érosion côtière (FCERM : Flood and coastal erosion risk management), mais force est de constater que le risque associé à l'érosion côtière et les politiques de gestion (disponibles sur GOV.UK) sont majoritairement tournées vers le risque associé aux inondations. Ce constat est réalisé en 2009 par Ferreira *et al.*, lorsqu'ils comparent les politiques en matière de gestion des risques côtiers instaurées dans neuf pays européens. Aux Etats-Unis, l'Agence fédérale de gestion des urgences (FEMA) est chargée du Programme national d'assurance contre les inondations, l'érosion côtière y semble aussi peu considérée dans les documents réglementaires que dans les pays européens. L'objectif de la FEMA d'élaborer des cartes des risques d'érosion et de les mettre à la disposition du public n'a pas abouti car la volonté politique fait défaut au sein du Congrès américain. En effet, les agents immobiliers côtiers ne sont pas favorables à de telles cartes d'érosion car elles devraient être révélées aux acheteurs potentiels de propriétés (Leatherman, 2018).

En France, si la submersion marine est reconnue comme étant un risque naturel majeur à la fois par la communauté scientifique et les instances décisionnelles, il n'en est pas de même pour l'érosion côtière. Selon la loi « Climat et résilience »¹ publiée le 10 février 2021 par le Ministère de la transition écologique, « l'érosion du trait de côte ne peut être strictement assimilée à un risque majeur dans la mesure où ce phénomène est prévisible. Il est certain qu'il va survenir et il est possible de prévoir son occurrence » . Dans une tribune² parue le 17 juin 2021 dans le journal Le Monde, 39 scientifiques ont pointé les contradictions entre ce projet de loi et les productions antérieures du Ministère, qui considérait jusqu'alors que l'érosion côtière constituait un risque naturel. Ainsi, selon les auteurs, ne pas définir le phénomène d'érosion côtière comme risque majeur impliquerait la non prise en compte de cet aléa dans

1 <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043956924>

2 <http://anel.asso.fr/wp-content/uploads/2021/06/Tribune-Le-risque-d%C3%A9rosion-c%C3%B4ti%C3%A8re.pdf>

les modes de gestion côtière. De même, ils rappellent le caractère quasi indissociable des phénomènes d'érosion côtière et de submersion marine et ce d'autant que l'érosion côtière est susceptible de provoquer une fragilisation des massifs dunaires (pouvant être considérés comme des barrières naturelles) favorisant la création de brèches pouvant entraîner une submersion marine lors d'évènements tempétueux ou lors de périodes de forts coefficients de marée.

De surcroît, et dans un contexte de changement climatique, la problématique de l'érosion côtière devient plus prégnante. L'accélération de l'élévation globale du niveau de la mer, estimée à $\pm 0,23$ m (SSP5-8.5) à l'horizon 2050 et $\pm 0,89$ m (SSP5-8.5) à l'horizon 2100 (GIEC), participe à l'augmentation de la vulnérabilité des littoraux. Tout au long du 20^{ème} siècle, l'élévation globale du niveau de la mer a contribué à l'augmentation de l'érosion et par voie de conséquence, à celle des submersions marines (Nicholls *et al.*, 2007).

Tous les types de côtes sont potentiellement soumis à l'érosion, mais on peut considérer que les côtes basses meubles sont les plus sensibles au regard de ce phénomène (Juigner *et al.*, 2021). Constituées de sédiments fins à grossiers (0,2 mm à 20 cm) elles sont soumises aux processus hydrodynamique tels que la houle, les courants de marée et les courants générés par les forçages météorologiques (Anthony et Orford, 2002), susceptibles d'engendrer le départ temporaire ou définitif d'une partie du stock sédimentaire. Pour mesurer l'érosion côtière il est nécessaire de l'inscrire dans plusieurs temporalités du temps long au temps court. Sur le temps long, on parle d'érosion historique et de nombreuses instances mesurent cette mobilité historique à différentes échelles spatiales, afin d'identifier les secteurs vulnérables.

Ainsi, à l'échelle mondiale, sur le temps long on considère que 24% des côtes sableuses s'érodent à des taux supérieurs à 0,5 m/an et environ 18% à des taux supérieurs à 1 m/an, tandis que 28% progradent et que 48% sont stables (Luijendijk, 2019). Face à ce constat, en 2002, le Parlement Européen et la Commission Européenne lancent le projet EuroSION, piloté par la Direction générale de l'Environnement, afin de fournir une évaluation de l'érosion côtière en Europe (Lenôtre *et al.*, 2009). Le bilan de cette étude, rendue publique en 2004, révèle que 20% des côtes (tous types confondus) sont en érosion. A l'échelle nationale, l'Indicateur National d'Erosion Côtière (INEC) (MEDDE, 2016) est le premier à dresser un bilan de l'évolution historique du trait de côte sur l'ensemble du littoral français. Il révèle qu'à l'échelle de la France métropolitaine, 37% des côtes sableuses sont en érosion, 23% sont en accrétion et 40% sont stables (INEC, 2017). En Pays de la Loire, l'Observatoire Régional des Risques Côtiers (OR2C) recense 21% des côtes sableuses en érosion depuis 1950, 21% en stabilité, 21% en accrétion, 35% correspondant à un littoral fixé et 2% non renseigné.

Sur le temps court, les reculs observés lors de tempêtes peuvent contribuer à accélérer ce processus de manière notable jusqu'à engendrer des érosions ponctuelles qui correspondraient à plusieurs années d'érosion chronique. Mais la définition du terme « tempête »

diffère d'une étude à l'autre, selon les entrées thématiques empruntées. Si de nombreuses études montrent le caractère morphogène de ces événements climatiques (Houser *et al.*, 2008 ; Rangel-Buitrago et Anfuso, 2011 ; Masselink *et al.*, 2016a ; Masselink *et al.*, 2016b ; Burvingt *et al.*, 2017), Chaverot *et al.* (2012) rappellent cependant qu'une tempête à haute énergie se produisant à marée basse, ou pendant une marée de mortes-eaux, ne peut entraîner qu'une érosion très limitée, voire nulle. Ainsi, l'expression « événement extrême », de plus en plus employée au sein de la communauté scientifique et des politiques publiques, permet de considérer les processus climatiques mais aussi hydrodynamiques responsables de l'érosion côtière, tels que le rôle de la marée. Les travaux traitant de ce sujet sont d'ailleurs de plus en plus mis au service de la planification côtière (Callaghan *et al.*, 2009 ; Pender *et al.*, 2015).

En France, ces événements extrêmes suscitent aussi un intérêt particulier des acteurs du littoral et des scientifiques et ce depuis les années 1950 (rapport SREX, IPCC, 2012). Ainsi en région Pays de la Loire, la tempête Xynthia, a marqué les mémoires non seulement du fait de son intensité mais aussi des dégâts qu'elle a engendrés. La submersion due à un phénomène de surcote, a piégé une partie des habitants entraînant le décès de 53 personnes dont 29 sur la commune de La Faute-sur-Mer (Chadenas *et al.*, 2014). Cet événement meurtrier a impacté le territoire national et particulièrement les départements de la Charente-Maritime et de la Vendée (Chauveau *et al.*, 2011). Xynthia n'est pas la seule tempête qui a touché le littoral et l'on peut noter que bien d'autres tempêtes ont également fragilisé le littoral de la région : les tempêtes Lothar et Martin (1999) (Bessemoulin, 2009), Johanna (2008) (Fattal *et al.*, 2010 ; Suanez et Cariolet, 2010 ; Cariolet *et al.*, 2010), Joachim (2011) (Bertin *et al.*, 2015), ou encore la succession des tempêtes de l'hiver 2013/2014 (Blaise *et al.*, 2015 ; Castelle *et al.*, 2015). On retiendra que l'ensemble des travaux scientifiques s'attachent à décrire et analyser les processus météorologiques et hydrodynamiques, permettant d'expliquer l'érosion côtière.

La nécessité grandissante de comprendre les processus en jeu dans les aléas côtiers, à court, moyen et long termes, est intimement liée à la présence d'enjeux sur la frange côtière. En effet, ces phénomènes naturels lorsqu'ils sont susceptibles d'impacter ces enjeux côtiers constituent un risque qui de fait, posent de nombreux questionnements relatifs à l'urbanisation du littoral et sa gestion actuelle et future. Ainsi, à l'échelle nationale, on dénombre 865 communes littorales (communes ayant un accès direct à la mer) susceptibles d'être concernées par ces aléas. Elles représentent 4% de la superficie totale de la France métropolitaine, inégalement réparties entre les régions (Zaninetti, 2006). Or, l'héliotropisme et l'attractivité des littoraux engendrent un risque accru tant pour les personnes que pour les biens mobiliers et immobiliers. Les statistiques montrent en effet qu'entre 1962 et 2016, la population des communes littorales métropolitaines a augmenté de 42% avec un taux d'évolution annuel moyen de +0,5% pour la façade Nord Atlantique – Manche Ouest (communes littorales de Bretagne et des Pays de la Loire). De même, l'urbanisation de ces communes littorales, due à l'attractivité de cet espace, s'intensifie à l'approche du rivage. En 2018, les zones urbanisées (tissus urbains continus et discontinus) situées à moins de 500 m de la

mer occupaient 23% du territoire, soit cinq fois plus que la moyenne métropolitaine. Les secteurs artificialisés (zones urbanisées, zones industrielles ou commerciales et réseaux de communication, espaces verts artificialisés, non agricoles) totalisaient quant à eux 30%. A l'échelle des Pays de la Loire, la surface urbanisée dans la bande des 500 m atteint 64% en Loire-Atlantique contre 31% en Vendée .

Dans ce contexte de vulnérabilité croissante, de nombreux questionnements se posent notamment concernant les politiques publiques en place et leur évolution. En effet, comme le mentionnent Sanson *et al.* (2000), en France, ce sont les tempêtes engendrant des pertes humaines qui génèrent une réelle prise de conscience au sein des services de l'État et des gestionnaires du littoral. En effet, si les tempêtes Lothar et Martin (décembre 1999) ont éveillé les consciences, c'est la tempête Xynthia qui mettra en évidence le manque de préparation et surtout une couverture territoriale insuffisante des Plans de Prévention des Risques Littoraux (PPRL) (Mercier et Chadenas, 2012 ; Chadenas *et al.*, 2014 ; Creach, 2015). C'est dans ce contexte que l'Etat va alors amorcer la réactualisation du cadre réglementaire de prévention et de gestion des risques littoraux et instaurer également, les Plans Submersions Rapides (PSR) dont l'objectif principal est d'assurer la sécurité des personnes en réduisant la vulnérabilité de secteurs ciblés (CESER, 2015).

L'analyse des enjeux dans les documents réglementaires et *a fortiori* dans les PPRL, consiste à les identifier et à les localiser, afin d'aboutir à l'élaboration d'une cartographie opérationnelle (Hénaff et Philippe, 2014). L'analyse de la vulnérabilité des enjeux (description, hiérarchisation) face à l'aléa apparaît donc nécessaire pour appréhender le risque. Elle a fait l'objet de plusieurs travaux en France notamment via l'élaboration d'indices de vulnérabilité fondés sur des analyses économiques (Le Berre *et al.*, 2014), systémiques (Meur-Ferec *et al.*, 2020) et de caractérisations architecturales des logements (Creach *et al.*, 2015). Face aux risques côtiers, deux grandes catégories d'enjeux émergent ; (i) ceux liés à la vulnérabilité humaine, soit une mise en danger directe de la population (essentiellement liée à l'aléa submersion marine) et (ii) ceux liés à la vulnérabilité des biens matériels et des activités (concernée par l'ensemble des aléas) (Le Berre *et al.*, 2014).

Ce travail de recherche s'inscrit ainsi dans l'évaluation de cette vulnérabilité des enjeux face au risque d'érosion. Nous nous interrogeons donc sur la manière de caractériser la vulnérabilité des enjeux soumis à l'érosion côtière. Les principales questions qui découlent de cette problématique sont les suivantes : Comment mesurer et spatialiser les différentes dimensions temporelles de l'aléa érosion ? Quelles sont les incertitudes relatives à cette démarche ? Quels sont les facteurs de vulnérabilité et sont-ils systématiquement les mêmes selon le type d'enjeu ? Les enjeux sont-ils tous caractérisés par le même type de vulnérabilité ? Pour répondre à questionnements, ce manuscrit s'organise en trois parties, dont chacune se compose de chapitres destinés à traiter une hypothèse de recherche.

La première partie s'articule autour de deux chapitres destinés à établir l'état de l'art autour du risque érosion. Le premier chapitre présente l'état des connaissances générales relatives aux processus météo-marins et leur résultante à la côte, montre les méthodes d'analyses ainsi que certaines limites. Le second chapitre présente le site d'études ainsi que les travaux menés sur ce secteur. Ces deux chapitres sont voués d'une part, à montrer que le socle de connaissances reste insuffisant en particulier concernant les méthodes de mesure et/ou d'estimation de ces processus, d'autre part, que la prise en compte des événements extrêmes au sein des politiques publiques tend à être améliorée.

La seconde partie, composée de trois chapitres se concentre sur l'aléa érosion, dans la perspective de spatialiser les enjeux côtiers. Elle s'organise selon une logique temporelle. Le premier chapitre est consacré à l'analyse de l'aléa sur le long terme via la mesure de l'évolution historique du trait de côte depuis 1950. L'accent est porté sur l'analyse des tendances à travers la mesure de cette évolution sur plusieurs périodes. Le second chapitre, axé sur l'analyse de l'aléa à court terme, vise à approfondir les connaissances sur les événements extrêmes à travers l'analyse de deux cas historiques : les tempêtes Lothar et Martin (décembre 1999) et Xynthia (2010). La mesure de leur impact sur les côtes sableuses de Vendée a pour but d'alimenter les réflexions relatives à la prise en compte des événements extrêmes dans les documents réglementaires. Enfin, le troisième chapitre aborde la dimension prospective de l'aléa. Il propose d'une part une estimation de la position future du trait de côte s'appuyant sur les tendances passées d'évolution en intégrant l'impact potentiel de l'élévation du niveau moyen de la mer. D'autre part, il évalue l'incertitude de la démarche, qui suppose l'utilisation de données et méthodes concernées elles-mêmes par des marges d'erreur, quantifiée et reportée sur les différents scénarios de projection.

La troisième et dernière partie aborde la spatialisation des enjeux côtiers en s'appuyant sur deux chapitres. Le premier chapitre propose un Indice de Vulnérabilité Côtière (CVI) afin d'identifier les différents niveaux de vulnérabilité physique des côtes sableuses à l'érosion et ce à l'échelle de la Vendée, en intégrant de nouvelles variables physiques. Le second chapitre s'intéresse à la prédisposition des enjeux au risque d'érosion côtière réalisé dans la continuité de l'article de Juigner *et al.* (2021). Il propose une démarche méthodologique à visée opérationnelle et suggère de nouvelles pistes de réflexion pour la cartographie des risques relatifs au recul du trait de côte dans le cadre de la loi « Climat et résilience » du 22 août 2021.

Partie 1

État de l'art et présentation du secteur d'étude

Le premier chapitre présente la revue des concepts et méthodes à l'échelle internationale concernant l'aléa érosion et les enjeux associés dans leurs dimensions temporelles. Nous nous intéresserons tout d'abord à cet aléa dans sa dimension historique puis dans sa dimension plus instantanée dite « évènementielle ». Enfin, nous proposerons une synthèse des indicateurs constituant les indices de vulnérabilité relatifs aux enjeux côtiers.

Le second chapitre dresse l'état des connaissances sur l'aléa érosion et les enjeux, à l'échelle régionale. Dans un premier temps, nous présenterons les caractéristiques géographiques, morphologiques, climatiques, et hydrodynamiques du secteur d'étude. Puis nous proposerons un inventaire des travaux menés en région autour du risque associé à l'aléa érosion, ainsi que l'intérêt croissant autour de cette problématique.

Chapitre 1

État de l'art sur l'aléa et les enjeux associés

1. Définition des termes du sujet

Dans un premier temps nous nous attacherons à montrer, au travers la revue bibliographique réalisée par Escudero Castillo *et al.*, (2012), la multiplicité des entrées proposées par différents auteurs. Puis, dans un second temps, les éléments constitutifs du risque seront définis.

1.1. Une revue de définitions du risque et de ses éléments constitutifs

Nous présentons dans le Tableau 4 une revue des définitions du risque réalisée par Escudero Castillo *et al.* (2012) afin de montrer la subtilité des termes employés pour en définir la nature.

Tableau 1 : Revue des définitions du risque et de ses éléments constitutifs d'après Escudero Castillo *et al.* (2012)

Article	Auteur	Id	Risque
M. G. Morgan, M. Henrion, in Vulnerability, Risk and Adaptation: A Conceptual Framework (Ed.: N. Brooks), Working Paper 38, Tyndall Centre for Climate Change Research, Norwich 2003.	M. G. Morgan, M. Henrion	1	« Risk involves an “exposure to a chance injury or loss”» <i>Le risque implique une « exposition à une probabilité de blessure ou une perte ».</i>
Department N of Humanitarian Affairs, Internationally Agreed Glossary of Basic Terms Related to Disaster Management, Relief Web Report, UN Department of Humanitarian Affairs, Geneva 1992		2	« Expected losses (of lives, persons injured, property damaged, and economic activity disrupted), due to a particular hazard, for a given area and reference period. Based on mathematical calculations, risk is the product of hazard and vulnerability » <i>Les pertes attendues, dues à un aléa particulier, pour une zone et une période de référence données. Sur la base de calculs mathématiques, le risque est le produit de l'aléa et de la vulnérabilité.</i>
J. Adams, in Vulnerability, risk and adaptation: A conceptual framework (Ed.: N. Brooks), Working Paper 38, Tyndall Centre for Climate Change Research, Norwich 2003.	J. Adams		« Risk is a compound measure combining the probability and magnitude of an adverse effect » <i>Le risque est une mesure composée combinant la probabilité et l'ampleur d'un effet négatif.</i>

<p>I. Kelman, Defining Risk, FloodRiskNet Newsletter 2003, 2, 6–8</p>	<p>I. Kelman</p>	<p>4</p>	<p>« risk = impact of hazard * elements at risk * vulnerability of elements at risk »</p> <p><i>risque = impact de l'aléa * éléments à risque * vulnérabilité des éléments à risque</i></p>
<p>S. de La Cruz-Reyna, in Defining Risk (Ed.: I. Kelman), FloodRiskNet Newsletter 2003, 2, 6–8.</p>	<p>S. de La Cruz-Reyna</p>	<p>5</p>	<p>« risk = hazard * vulnerability * value of the threatened area/ preparedness »</p> <p><i>risque = aléa * vulnérabilité * valeur de la zone menacée / préparation</i></p>
<p>K. Smith, in Defining Risk (Ed.: I. Kelman), FloodRiskNet Newsletter 2003, 2, 6–8</p>	<p>S. de La Cruz-Reyna K. Smith</p>	<p>6</p>	<p>« Risk is the actual exposure of something of human value to a hazard, and is often regarded as the combination of probability and loss »</p> <p><i>Le risque est l'exposition réelle d'un élément de valeur humaine à un aléa, et est souvent considéré comme la combinaison de la probabilité et de la perte.</i></p>
<p>P. Stenchion, Defining Risk (Ed.: I. Kelman), FloodRiskNet Newsletter 2003, 2, 6–8</p>	<p>P. Stenchion</p>	<p>7</p>	<p>« Risk might be defined simply as the probability of the occurrence of an undesired event [but] be better described as the probability of a hazard contributing to a potential disaster. Importantly, it involves consideration of vulnerability to the hazard »</p> <p><i>Le risque peut être défini simplement comme la probabilité de l'apparition d'un événement indésirable [mais] il est mieux décrit comme la probabilité qu'un aléa contribue à une catastrophe potentielle. Il est important de noter qu'il implique la prise en compte de la vulnérabilité à l'aléa.</i></p>
<p>K. Granger, T. Jones, M. Leiba, G. Scott, in Defining Risk (Ed.: I. Kelman), FloodRiskNet Newsletter 2003, 2, 6–8</p>	<p>K. Granger, T. Jones, M. Leiba, G. Scott</p>	<p>8</p>	<p>« Risk means the expected number of lives lost, persons injured, damage to property, and disruption of economic activity due to a particular natural phenomenon, and is consequently the product of specific risk and elements at risk. Total risk can be expressed in pseudo-mathematical form as: risk (total) = hazard x*elements at risk * vulnerability »</p> <p><i>Le risque désigne le nombre attendu pertes humaines, de personnes blessées, de dommages matériels et de perturbations de l'activité économique dus à un phénomène naturel particulier et est donc le produit du risque spécifique et des éléments à risque. Le risque total peut être exprimé en pseudo-mathématique de la manière suivante : Risque (total) = aléa * éléments à risques * vulnérabilité.</i></p>

<p>SO/EC, in Language of Risk – Project Definitions, FLOODsite EU Integrated Project, Research Report T32-04-01, European Community, Brussels 2005.</p>		<p>9</p>	<p>« Risk is the combination of the probability of occurrence of harm and the severity of that harm »</p> <p><i>Le risque est la combinaison de la probabilité de l'occurrence du dommage et la sévérité du dommage</i></p>
<p>D. Crichton, Urban Flood Risk Management – A Tool for Integrated Flood Management, (WMO/GWP Associated Programme on Flood Management), Flood Management Tools Series, World Meteorological Organisation, Geneva 2008.</p>	<p>D. Crichton</p>	<p>10</p>	<p>« Risk is the probability of a loss, and depends on three elements, hazard, vulnerability, and exposure »</p> <p><i>Le risque est la probabilité de perte, et dépend de trois éléments : l'aléa, la vulnérabilité et l'exposition.</i></p>
<p>K. Thywissen, Components of Risk, A Comparative Glossary, UNU Institute for Environment and Human Security, Bonn, Germany 2006</p>	<p>K. Thywissen</p>	<p>11</p>	<p>« Risk is defined as a function of the probability of the hazard, of exposure to the hazard, and the vulnerability of receptors to the hazard »</p> <p><i>Le risque est défini comme la relation entre la probabilité de l'aléa; l'exposition à l'aléa et la vulnérabilité des récepteurs à l'aléa.</i></p>
<p>N. Brooks, Vulnerability, Risk and Adaptation: A Conceptual Framework, Working Paper 38, Tyndall Centre for Climate Change Research, University of East Anglia, Norwich 2003.</p>	<p>N. Brooks</p>	<p>12</p>	<p>« Risk is the probability of hazard occurrence, where hazard = potential threat to humans and their welfare »</p> <p><i>Le risque est la probabilité que l'aléa se produise, où l'aléa = menace potentielle pour les humains et leur bien-être.</i></p>
<p>PCC, in Vulnerability, Risk and Adaptation: A Conceptual Framework (Ed.: N. Brooks), Working Paper 38, Tyndall Centre for Climate Change Research, Norwich 2003.</p>		<p>13</p>	<p>« Risk is function of probability and magnitude of different impacts »</p> <p><i>Le risque est la relation entre la probabilité et la magnitude des différents impacts .</i></p>

<p>B. Gouldby, P. Samuels, Language of Risk – Project Definitions, Floodsite Project Report T32-04-01, FLOODsite Consortium, Oxfordshire, UK 2005</p>	<p>B. Gouldby, P. Samuels</p>	<p>14</p>	<p>« Risk is the probability of harmful consequences, or expected losses (deaths, injuries, property, livelihoods, economic activity disrupted, or environment damaged) resulting from interactions between natural or human-induced hazards and vulnerable conditions »</p> <p><i>Le risque est la probabilité de conséquences néfastes/ dommageables, ou les pertes attendues, résultant des interactions entre les aléas naturels ou anthropiques et des conditions vulnérables.</i></p>
<p>R. Wallingford, in Language of Risk – Project Definitions, FLOODsite EU Integrated Project, Research Report T32-04-01, European Community, Brussels 2005</p>	<p>R. Wallingford</p>	<p>15</p>	<p>« Risk is a combination of the chance of a particular event, with the impact that the event would cause if it occurred. Risk therefore has two components: the chance (or probability) of an event occurring and the impact (or consequence) associated with that event »</p> <p><i>Le risque est la combinaison de la chance qu'un évènement particulier, avec l'impact que l'évènement causerait s'il se réalisait. Le risque a donc deux composantes : la probabilité qu'un évènement se réalise et l'impact associé à cet évènement.</i></p>
<p>Bourrelier P .H.,1997. Les plans de Prévention des Risques Naturels, La Documentation Française.</p>	<p>Bourrelier P.H.</p>	<p>16</p>	<p><i>Le risque est « un évènement dommageable, doté d'une certaine probabilité, conséquence d'un aléa naturel survenant dans un milieu vulnérable. Le donc risque résulte de la conjonction de l'aléa et d'un enjeu, la vulnérabilité étant la mesure des dommages de toutes sortes rapportées à l'intensité de l'aléa ».</i></p>

Si de manière générale, les auteurs consultés s'accordent sur la première composante du risque qu'est l'aléa (2 ; 4 ; 5 ; 6 ; 8 ; 14) et *a fortiori*, sa probabilité d'occurrence (7; 9 ; 10 ; 11 ; 12 ; 13 ; 15), Gouldby et Samuels (2005) dissocient l'aléa naturel de l'aléa anthropique (Tableau 1). Il convient de préciser à cet effet que la traduction du terme « hazard » par « aléa » peut porter à confusion dans certaines définitions. D'après Susan Mayhew dans « A Dictionary of Geography » (2009), qualifie le terme comme le produit de l'interaction entre une société et son environnement (Reghezza-Zitt, 2013). Il est aussi évoqué les termes « éléments » (elements) (4 ; 6 ; 8), ou encore « récepteurs » (receptors) associés à l'aléa (11). Par ailleurs, concernant les enjeux, les termes employés varient et le mot « perte » (losses) revient fréquemment (1 ; 6 ; 8 ; 14). Enfin, le terme de vulnérabilité est largement employé (2 ; 4 ; 5 ; 7 ; 8 ; 10), mais il est rarement précisé à quoi il fait référence. On parle de « vulnérabilité des éléments à risque » (4), « vulnérabilité des récepteurs » (11), « vulnérabilité à l'aléa » (7) ou « conditions vulnérables » (14). L'analyse du risque exige dans un premier temps une connaissance des modalités de l'aléa (Robin, 2002) et de celle des enjeux.

1.2. Définition des termes composant conceptuellement le risque

La formalisation conceptuelle du risque R est donnée par l'expression suivante :

$$R = A * E + V - CRH$$

Avec : A = l'Aléa ; E = les Enjeux ; V = la Vulnérabilité des enjeux ; CRH = la Capacité de Réponse Humaine

Ces composantes sont définies ci-dessous.

1.2.1. L'aléa

D'après Garry *et al.* (1997) « l'aléa est considéré comme un événement d'origine naturelle ou humaine potentiellement dangereux », ou dommageable (Robin, 2002). L'aléa peut être caractérisé par l'étude de sa magnitude, son emprise spatiale, sa durée d'action, son intensité (intensité des dommages potentiels ou observés) et sa probabilité d'occurrence (Hénaff et Philippe, 2014).

- **Les composantes de l'aléa : magnitude, intensité des dommages, durée d'action, probabilité d'occurrence**

La magnitude et l'intensité d'un aléa sont deux termes pour lesquels il existe une confusion terminologique. La notion de magnitude permet d'évaluer la puissance du phénomène au moyen de paramètres physiques généralement indépendants et mesurables (Léone *et al.*, 2010). Elle correspond à sa puissance, qui peut être identifiée comme le « travail » effectué par les processus responsables pour produire, entre autres, les impacts engendrés (Wolman et Miller, 1960). L'intensité d'un aléa décrit les effets constatés ou potentiels d'un phénomène sur différentes catégories d'éléments exposés (Léone *et al.*, 2010).

Par ailleurs, la durée de manifestation des aléas est un critère important de leur évaluation dont dépend souvent l'intensité des dommages induits (Léone *et al.*, 2010). A titre d'exemple et dans le cas d'une tempête, une durée longue augmente ainsi les concomitances temporelles entre son passage et des marées hautes accroît la probabilité d'une hausse des dommages (MacClenahan *et al.*, 2001).

Enfin, l'estimation de la probabilité de l'occurrence (également appelée période de retour ou temps de retour) annuelle (ou de fréquence déterminée) en fonction d'une magnitude de forçage donnée permet le calcul de l'intervalle de temps moyen théorique entre deux événements de même magnitude (Hénaff *et al.*, 2018). Ce paramètre peut être estimé si l'on dispose d'une série statistique suffisamment longue sur l'activité passée (Léone *et al.*, 2010).

1.2.2. *Les enjeux*

Metzger et D'Ercole, (2011) considèrent les enjeux comme « ce que l'on risque de perdre ». Ces éléments exposés, assortis d'une certaine valeur (marchande ou économique, environnementale, stratégique, fonctionnelle, patrimoniale), se caractérisent par différentes formes de vulnérabilités qui les rendent plus ou moins sensibles à l'endommagement (Léone *et al.*, 2010) car inégalement exposés (Creach, 2015). Ainsi, et afin de définir la vulnérabilité des enjeux, il est important de connaître leur degré d'exposition définie par le GIEC (IPCC, 2021), comme la présence de personnes, de moyens de subsistance, d'espèces ou d'écosystèmes, de fonctions, de services et de ressources environnementales, d'infrastructures ou de biens économiques, sociaux ou culturels dans des lieux et des contextes susceptibles d'être affectés. Enjeux et vulnérabilité sont donc intrinsèquement liés mais constituent cependant deux éléments distincts qu'il convient de dissocier lorsqu'on les définit. Ainsi, les enjeux, doivent être listés et quantifiés (MEDDE, 2014) afin de déterminer leur niveau d'exposition à l'aléa et ensuite peuvent être caractérisés en fonction de leur vulnérabilité (Hénaff et Philippe, 2014).

1.2.3. *La vulnérabilité des enjeux*

La vulnérabilité est un ensemble de conditions et de processus résultant de facteurs physiques, sociaux, économiques et environnementaux qui augmentent la susceptibilité d'une communauté à l'impact des aléas (Mahendra *et al.*, 2011). La prise en compte de la vulnérabilité comme composante fondamentale du risque, sera intégrée plus tardivement (Léone et Vinet, 2006) mais fait progressivement l'objet d'analyses pluridisciplinaires et intégrées (Hénaff *et al.*, 2018).

Dans le domaine de la géographie, et notamment celle du risque, la vulnérabilité est abordée sous les angles biophysique et social (Veyret et Reghezza-Zitt, 2005 ; Reghezza-Zitt, 2006). La vulnérabilité biophysique se détermine selon la nature de l'aléa auquel l'enjeu est exposé, sa probabilité, l'exposition et la sensibilité physique des enjeux (Barroca *et al.*, 2013 ; Veyret et Reghezza-Zitt, 2005). Fraser *et al.* (2017), qui emploient le terme de « vulnérabilité physique », précise qu'il s'agit dans ce cas d'éléments tangibles et cartographiables tels que les habitats naturels, l'environnement bâti et les infrastructures. Bien que les bâtiments et les infrastructures soient des constructions humaines et des composantes intégrales du tissu social (Cutter *et al.* 2003), leur exposition aux risques peut être mesurée à l'aide de critères géophysiques (Fraser *et al.*, 2017). Juigner *et al.*, (2021) s'intéressent particulièrement à la « prédisposition », c'est à dire l'étude de facteurs susceptibles de favoriser l'exposition des enjeux au risque d'érosion. Cette prédisposition est caractérisée par la relation spatiale entre l'aléa et les enjeux.

La vulnérabilité sociale exprime quant à elle la capacité d'une société à anticiper l'aléa (Barroca *et al.*, 2013), à répondre à une crise, c'est-à-dire adapter son comportement en conséquence (Meur-Ferec *et al.*, 2020). Elle dépend donc du niveau de préparation d'une société à faire face à la crise et constitue une propriété intrinsèque de cette société, quasi indépendante de l'aléa (Veyret et Reghezza-Zitt, 2005). Contrairement à la vulnérabilité physique, les conditions socio-économiques, culturelles et les modes de gestion sont des éléments souvent intangibles de la vulnérabilité sociale (Fraser *et al.*, 2017). Cette vulnérabilité, caractérisée de variable « latente » par Spielman *et al.* (2020) peut-être, malgré sa complexité et sa difficulté à être quantifiée (Cutter *et al.*, 2003), mesurée indirectement par des procédures statistiques comme l'indice de vulnérabilité sociale (SoVI) (Spielman *et al.* 2020). A titre d'exemple, une maison A construite à 50 m du trait de côte, une maison B à 100 m, sont exposées à l'aléa érosion. Elles sont toutes deux caractérisées par une vulnérabilité de position (distance au trait de côte). La maison A, du fait de sa plus grande proximité au trait de côte présente une vulnérabilité plus importante que la maison B dans un contexte de recul du trait de côte.

1.2.4. *Le risque*

Le risque peut donc se définir comme la possibilité, pour des enjeux humains et non humains, de subir un certain type de dommage lorsqu'ils sont exposés à un phénomène naturel ou anthropique à un moment donné (Batista, 2018) et dans un milieu vulnérable (Robin, 2002). Il est donc une conséquence du croisement entre aléa et enjeux (Deboudt, 2010) et dépend non seulement de facteurs sociaux, mais aussi de facteurs naturels (Léone *et al.*, 2010). A ce titre, Robin (2002) dissocie les risques sociétaux qui correspondent aux risques encourus par la société sur le littoral du fait (i) des aléas météo-marins ; (ii) des comportements sociaux qui peuvent modifier la magnitude de ces aléas et enfin (iii) les risques écosystémiques qui sont les risques que fait peser l'Homme sur la nature. S'il est désormais admis que le risque naît d'une combinaison d'un aléa et d'enjeux, il s'inscrit cependant dans un contexte plus large, incluant la notion de vulnérabilité abordée brièvement dans les définitions précédentes, mais aussi la notion de résilience.

1.2.5. *La résilience*

Comme la vulnérabilité, le concept de résilience fait l'objet de nombreuses définitions (Reghezza-Zitt *et al.*, 2012) recensées en partie par Kane et Vanderlinden (2015). Abordée initialement dans le domaine des sciences et techniques, la résilience est définie comme la capacité d'un objet à revenir à son état initial après déformation des solides du fait d'un choc ou d'une pression continue (Rankine, 1858 ; Mathieu, 1991). Cette notion est plus tard abordée dans les sciences naturelles, sous l'angle écosystémique, et est définie selon Holling (1973), comme étant la mesure de la capacité d'un système à absorber les effets d'une perturbation. On retrouve ensuite la notion de résilience dans les sciences humaines et sociales, d'abord abordée par Adger *et al.* (2005) sous l'angle socio-écologique. Les auteurs

soulignent le lien entre l'Homme et son environnement et remobilisent la définition employée par Holling en 1973, soit la capacité des systèmes socio-écologiques à absorber des perturbations récurrentes telles que les aléas côtiers. Enfin, Welsh (2014) cité par Kane et Vanderlinden (2015), conçoit la résilience dans le sens de gouvernance adaptative, du maintien et de la sécurité des fonctions du système lui permettant de faire face et de se remettre des chocs provenant de son environnement, on parle alors de capacité de réponse humaine (CRH).

Dans cette définition, deux grands axes sont à retenir ; (i) la résilience d'un écosystème, en particulier pour notre cas d'étude celle des massifs dunaires dans un contexte d'érosion côtière et (ii) la résilience d'une société suite, par exemple, à l'impact d'évènements extrêmes comme celui de Xynthia.

2. L'aléa érosion

2.1. L'aléa érosion, un aléa induit

L'aléa, défini précédemment, peut être accompagné d'effets secondaires (ou effets induits) qui sont des « aléas survenant comme une conséquence d'un autre aléa ou d'une catastrophe » (Robin, 2002). Cet emboîtement d'aléas peut être classé selon une filiation entre différents niveaux d'aléas (Figure 1).

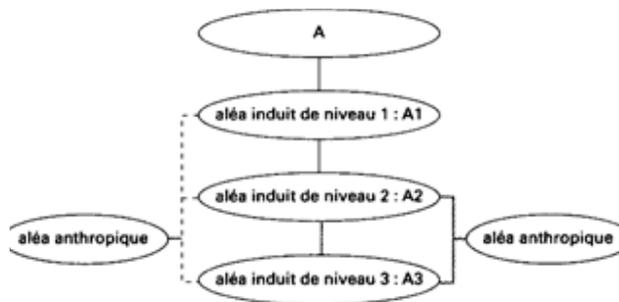


Figure 1 : Schéma conceptuel des aléas côtiers (source : Robin, 2002)

En tête de cette filiation, l'élément appelé « A » constitue le système Terre (Lovelock, 1995). Selon Robin (2002), ce système est susceptible de subir des perturbations d'origines naturelles et anthropiques caractérisées par la modification du climat (niveau A1). En milieu côtier, les aléas induits (A2) par les modifications du climat (A1) sont l'élévation du niveau de la mer (eustatisme) et la modification du régime des perturbations (magnitude, trajectoire, fréquence). Ces aléas (A2) génèrent des aléas induits comme l'augmentation des phénomènes de surcote et la modification des régimes de houles qui, à leur tour, entraînent eux-mêmes des aléas induits (A4), tels que l'érosion côtière et la submersion marine. L'érosion côtière est, de surcroît, un facteur qui favorise le risque de submersion marine.

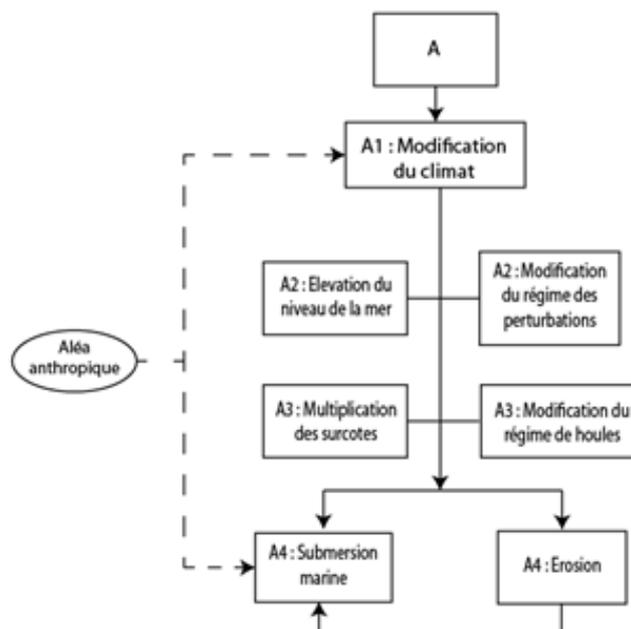


Figure 2 : Emboîtement d'aléas (adaptée de Robin, 2002)

A cela s'ajoute l'intervention de l'Homme sur son environnement. On considère que l'aléa anthropique intervient à deux niveaux (Figure 2) ; d'une part sur les modifications générales du climat, d'autre part sur les aléas érosion et submersion côtière. Les aléas côtiers sont donc induits par les facteurs naturels et anthropiques, en gardant à l'esprit cependant que les aléas naturels responsables de l'érosion et de la submersion sont eux-mêmes – en partie et de façon indirecte – induits par l'aléa anthropique.

2.2. Processus et résultantes de l'aléa érosion

Il est pratique d'établir une distinction entre le transport sédimentaire longitudinal (longshore) et le transport sédimentaire transversal au littoral (cross-shore). En général, le transport longshore est vu comme responsable des changements à long terme du littoral, alors que le transport cross-shore est responsable des variations à court terme (Charlier et Meyer, 1998). Sur toutes les plages « naturelles », les processus et la morphologie sont principalement influencés par les vagues, la marée, les ondes de tempêtes et les divers courants littoraux (Komar, 1983 ; Masselink et Short, 1993 ; Dean et Dalrymple, 2004 ; Miller et Dean, 2004 ; Ciavola et Coco, 2017 ; Toimil *et al.*, 2017).

2.2.1. Processus

- **La tempête**

Dans l'analyse des processus responsables de l'érosion côtière, il convient de distinguer la notion de tempête et celle d'évènement extrême. Selon Météo France, une tempête correspond à la force 10 de l'échelle Beaufort soit des vents moyens de 89 à 117 km/h avec des rafales pouvant atteindre 110 à 150 km/h. Pour l'Organisation Météorologique Mondiale, on parle de tempête lorsque les vents atteignent une vitesse comprise entre 44 et 50 nœuds, soit 87 à 101 km/h. En 2013, Schoenenwald réalise une revue des définitions du terme tempête. Du dictionnaire de géographie au glossaire de climatologie, il met en évidence la pluralité des seuils statistiques employés mais conclut cependant que la tempête est généralement caractérisée par une perturbation atmosphérique et surtout par ses vitesses de vent qui demeurent le critère principal pour la définir. Plusieurs indices de sévérité sont employés pour caractériser les tempêtes, certaines s'appuyant exclusivement sur des données atmosphériques, d'autres intégrant des paramètres météo-marins.

Soubeyroux *et al.* (2017) présentent trois indices basés sur des données et critères atmosphériques largement utilisées pour déterminer la capacité destructrice des tempêtes et dont la vitesse minimum des vents est définie à 100 km/h :

- L'indice de Lamb (1991) exprime une sévérité globale qui repose sur trois variables : surface touchée par la tempête, durée de la tempête et vent maximum observé ;
- le Storm Severity Index (SSI) se base sur les mêmes variables que l'indice de Lamb mais à la particularité d'être calculé sur un pas de temps horaire et à plusieurs échelles

spatiales. En revanche son application n'est possible qu'à partir de 1995, première date de disponibilité des données d'observations horaires ;

- le Storm Severity Index simplifié SSI_s est dérivé du SSI, à la différence que le critère de durée de la tempête n'est pas retenu en raison de l'incertitude de cette variable avant 1995.

Soubeyroux *et al.* (2017) précisent que ces indices de sévérité contribuent à accompagner les compagnies d'assurance notamment pour tenter d'estimer les dommages potentiels et la durée de retour de ces événements sur le territoire national. Les critères et variables utilisés ne sont donc pas automatiquement adaptés à toutes les problématiques, notamment celles concernant le domaine littoral. L'indice de Dolan et Davis (1992) a comme point commun avec deux des indices précédents de prendre en compte la durée de la tempête. En revanche, il ne s'appuie pas sur une variable anémométrique mais hydrodynamique en retenant la hauteur significative des vagues (Hs). La formule de l'indice s'écrit comme suit :

$$Hs^2hr$$

Avec Hs : les houles significatives et hr : la durée de la tempête.

Cette classification de tempêtes repose sur l'analyse d'un échantillon de 28 tempêtes. Cinq classes sont ensuite créées, distinguant les tempêtes faibles, modérées, significatives, sévères et extrêmes. Ce storm power index a été exploité dans plusieurs études (Rangel-Buitrago et Anfuso, 2011a ; Ba et Senechal, 2013 ; Rangel-Buitrago et Anfuso, 2013 ; Anfuso *et al.*, 2016 ; Amarouche *et al.*, 2020). Les auteurs déterminent la durée d'une tempête en fonction de la hauteur significative des vagues. Pour déterminer un seuil significatif de hauteur de vague de 1,5 m, une étude a été menée sur 1 347 tempêtes en Caroline du Nord.

- **L'évènement extrême**

L'évènement extrême est une notion dont la définition varie selon les disciplines, chacune mettant l'accent sur différents aspects, notamment en ce qui concerne les causes et les impacts (McPhillips *et al.*, 2018). Selon le GIEC (2022), l'évènement météorologique extrême est un « phénomène rare observable en un endroit et à un moment particulier de l'année. Même si les définitions du mot rare varient, un phénomène météorologique extrême devrait normalement se produire aussi rarement, sinon plus, que le dixième ou le quatre-vingt-dixième centile de la fonction de densité de probabilité établie à partir des observations ». Ce qui qualifie un évènement extrême également appelé évènement composé par Léonard *et al.* (2018), n'est pas seulement la réalisation d'une tempête mais bien la concomitance de plusieurs facteurs. Selon Chaverot *et al.* (2012), une tempête à haute énergie se produisant à marée basse, ou pendant une marée de mortes-eaux, peut entraîner une érosion très limitée, voire nulle. *A contrario*, une tempête de faible énergie peut entraîner une érosion plus importante du littoral si elle se produit à marée haute, notamment pendant une marée de

vives-eaux. Autrement dit, un évènement peut comporter de multiples aléas simultanés qui, individuellement, peuvent ne pas être considérés comme extrêmes (McPhillips *et al.*, 2018) mais qui conjugués sont susceptibles d'avoir des impacts globaux plus importants (Leonard *et al.*, 2014).

- **Les vagues**

Une vague est caractérisée par une hauteur, une longueur, et une période. Les vagues sont générées par le vent et constituent des agents de transfert d'énergie en se propageant à la surface de l'océan, acheminant cette énergie vers la zone côtière où elle peut être la cause principale de l'érosion ou générer des courants littoraux (Komar, 1983). Les vagues peuvent agir sur des temporalités différentes. Sur le long terme (échelles de temps annuelles ou décennales), l'érosion chronique est le plus souvent associée à des « gradients systématiques » de transport sédimentaire, entraînés par des vagues obliques le long de la côte (longshore) et n'est pas nécessairement associée à l'activité des vagues de tempête (Aagaard et Kroon, 2017). Dans des conditions de tempête de court terme, la formation et les caractéristiques des vagues dépendent principalement de trois facteurs : la vitesse du vent, la durée de la tempête et la zone de fetch sur laquelle la tempête agit. Selon Komar (1983), « la durée [de la tempête] est importante, car plus les vents soufflent depuis longtemps, plus la quantité d'énergie pouvant être transférée aux vagues est importante. La zone de fetch a un effet similaire ; une fois que les vagues ont quitté la zone de la tempête, elles n'acquièrent plus d'énergie supplémentaire, de sorte que plus la zone de fetch est grande, plus les vagues peuvent potentiellement obtenir de l'énergie ».

Enfin, les ondes infragravitaires ou longues ondes sont des oscillations de plus longue période du niveau moyen de l'eau provoqué par la réfraction et le déferlement des trains de vagues incidents à l'approche de la côte (Symonds *et al.*, 1982). Ces vagues s'ajoutent aux autres processus qui participent à élever momentanément le plan d'eau.

- **Les marées**

Les courants de marées engendrent également des transports sédimentaires (van Rijn, 2011) particulièrement sur les côtes macrotidales (Toimil *et al.*, 2017) conjointement avec les vagues qui participent à la mise en suspension des sédiments (Komar, 1983). A l'échelle mondiale, il existe quatre types de marée (Figure 3). Les marées diurnes présentent généralement une marée haute et une marée basse par jour. Les marées semi-diurnes sont caractérisées par deux marées hautes et deux marées basses par jour. Les marées mixtes présentent un mélange

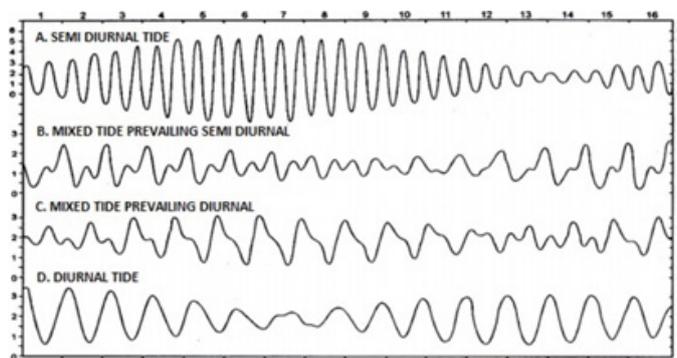


Figure 3 : Types de marées (Masselink *et al.*, 2014)

de comportements diurnes et semi-diurnes. Elles peuvent être composées de deux marées hautes et deux marées basses, mais les amplitudes des marées hautes et basses peuvent varier (Cornett, 2010).

La plupart des bassins océaniques favorisent la résonance des marées partielles semi-diurnes, c'est pourquoi les types de marées semi-diurnes et mixtes semi-diurnes sont les plus courants. Néanmoins, certains bassins océaniques font résonner les marées partielles diurnes, produisant des marées diurnes ou mixtes diurnes. Les marées astronomiques sont produites par l'attraction gravitationnelle combinée de la lune et du soleil agissant sur de grandes masses d'eau produisant des amplitudes de marée accrues appelées marées de printemps (spring tides) (Komar, 1983) qui peuvent contribuer à l'érosion des plages (Toimil *et al.*, 2017). Associées aux ondes de tempête, les marées de printemps font monter le niveau de l'eau, et peuvent également provoquer, conjointement à l'érosion, des phénomènes de submersion marine sur des littoraux de faible élévation (Dean et Dalrymple, 2004). Le modèle de Davis et Hayes (1984) (Figure 4) permet de déterminer le contexte hydrodynamique d'un secteur en fonction de deux paramètres que sont le marnage et la hauteur de la houle. De fait, il est possible de définir si les processus morphogènes sont davantage dominés par la marée ou par les vagues.

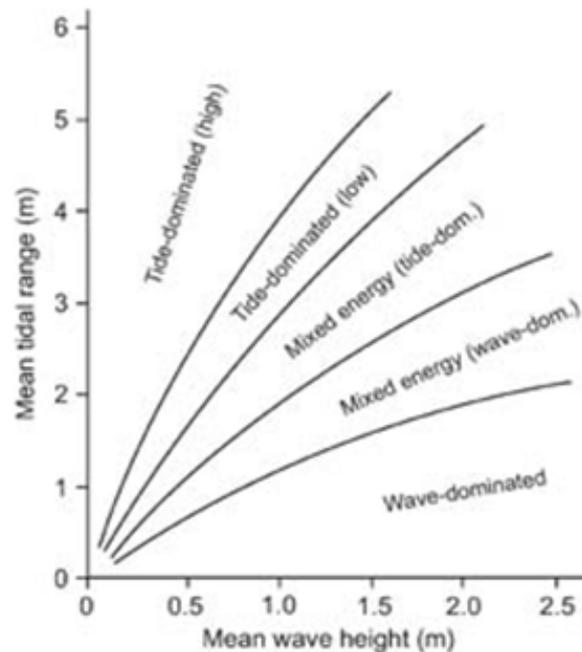


Figure 4 : Relation entre l'amplitude moyenne des marées et la hauteur des vagues délimitant différents champs de dominance des vagues et des marées. (Modifié par Masselink *et al.* (2014) à partir de Davis et Hayes, 1984)

- **Les surcotes de tempête**

L'onde de tempête, parfois appelée « marée météorologique » (Ciavola *et al.*, 2014) est un changement de niveau d'eau généré par des forçages atmosphériques tels que des vents forts et une brusque réduction de la pression atmosphérique (Komar, 1983 ; Flather, 2001). Komar (1983) précise le rôle de chaque facteur dans la variation des niveaux d'eau lors d'une tempête : (i) le vent (surcote anémométrique), en générant de grandes vagues de surface, et en poussant et maintenant l'eau vers la côte ; (ii) les basses pressions (surcote atmosphérique), en contribuant à l'élévation du plan d'eau (-1 hPa = +1 cm). Conjointement à une marée de vives eaux, une surcote de tempête peut générer des niveaux d'eau extrêmes comme cela a été le cas lors de la tempête Xynthia (Feuillet *et al.*, 2012).

- **Élévation du niveau moyen de la mer**

Processus sur un long terme s'inscrivant dans la poursuite de la transgression holocène et amplifié par l'actuelle contribution anthropique, l'élévation du niveau de la mer (eustatisme) est l'une des causes naturelles de l'évolution du littoral (Charlier et Meyer, 1998). Ce phénomène permet aux vagues à haute énergie de remonter plus haut sur la plage voire de redistribuer le sable au large (Leatherman *et al.*, 2000). Cependant, « la vulnérabilité de la côte face à l'élévation du niveau marin n'est pas uniforme dans l'espace en raison des variations de la topographie côtière [...] des mouvements verticaux de la croûte terrestre, du climat des vagues et du régime des marées » (Gornitz, 1991). Selon Kopp *et al.* (2015), les projections locales de l'élévation du niveau de la mer doivent tenir compte des différentes configurations spatiales, des divers processus, ainsi que des corrélations potentielles entre les différents facteurs. Ainsi, les valeurs relatives à la région Pays de la Loire seront présentées dans le Chapitre 2 (Partie 1) consacré à la présentation du secteur d'étude.

2.2.2. *Concomitances de facteurs et périodes de retour*

L'évènement Xynthia illustre parfaitement la notion de concomitance de facteurs. Cette tempête, catégorisée comme « significative » (catégorie 3 sur 5) selon l'indice de Dolan et Davis (1992) ne constitue pas, en tant que telle, un évènement météorologique majeur (Bertin *et al.*, 2012). C'est la concomitance entre la tempête (avec les basses pressions et les houles associées), la marée haute et les forts coefficients qui explique les niveaux d'eau significatifs (Pineau-Guillou *et al.*, 2012) qui en fait un évènement extrême.

En 2012, Feuillet *et al.* proposent de calculer les périodes de retour des concomitances de facteurs météo-marins sur neuf stations du littoral atlantique français et sur une période de 26 ans (1984-2010).

Les variables utilisées dans cette analyse statistique sont (i) la tempête définie selon un vent maximum instantané (VMI) supérieur à 89 km/h, (ii) une marée haute (passage de la tempête dans un temps inférieur à 3 h avant et après la marée et (iii) un fort coefficient de marée (supérieur à 80).

Les principaux résultats montrent qu'il est premièrement, difficile de distinguer une règle générale concernant l'évolution des tempêtes sur la façade atlantique depuis les 40 dernières années. Deuxièmement, que des évènements similaires à Xynthia en termes de concomitance de facteurs demeurent rares lorsqu'on analyse les mesures des neuf stations et enfin que les résultats sont très hétérogènes du fait de la situation géographique de chaque station. La limite principale de ces travaux réside dans la non prise en compte des paramètres liés aux vagues et aux houles tels que les hauteurs de houles significatives (Hs), le wind setup ou encore le wave setup. Les Hs, en plus des vitesses de vent, peuvent être pertinentes pour caractériser les tempêtes. Les paramètres de wind setup et wave runup quant à eux, peuvent participer à caractériser le phénomène de surcote (Feuillet *et al.*, 2012).

En Australie, Callaghan *et al.* (2009) ont mené une étude comparative entre deux méthodes statistiques visant à estimer les volumes d'érosion dus aux tempêtes : la méthode dite « tempête de conception synthétique » (SDS) et la méthode de probabilité conjointe (JPM). La principale hypothèse de l'approche SDS est qu'une période de retour de X années pour la hauteur des vagues près du littoral entraîne une érosion de X années. La limite principale de cette approche est qu'elle ne tient pas compte de la durée de la tempête ni de l'effet d'une succession de tempêtes. La méthode JPM tient compte en revanche de la durée de l'évènement (déterminée sur la base d'un seuil de hauteur significative de vagues) et calcule les périodes de retour en fonction de cette durée. Les résultats de cette étude montrent que la méthode JPM fournit de bonnes estimations du volume érodé notamment pour les périodes de retour inférieures à 10 ans. Concernant les résultats correspondants aux périodes de retour supérieures à 10 ans, les auteurs les considèrent moins fiables en raison de la série temporelle de données trop petite (30 ans) pour ces estimations (Callaghan *et al.*, 2009).

L'analyse des périodes de retour des tempêtes tend depuis quelques temps à être mise en relation avec des indices climatiques. L'étude de Castle *et al.* (2017) a d'ailleurs pour objectif de mesurer le coefficient de corrélation entre les périodes d'agitation caractérisées par la hauteur des houles significatives et les quatre indices climatiques suivants :

- la NAO (North Atlantic Oscillation) ;
- l'indice WEPA (Western Europe Pressure Anomaly) ;
- l'East Atlantic (EA) ;
- Scandinavia (SCAND).

Ces résultats tendent à améliorer les connaissances sur l'occurrence des tempêtes et plus largement comprendre les risques côtiers en Europe occidentale. Nous analyserons plus en détail deux de ces indices dans le chapitre suivant.

2.2.3. Résultante

Par essence, l'érosion d'une plage résulte du fait que la quantité de sable qui quitte la zone est supérieure à celle qui arrive à cet endroit, entraînant un déficit dans l'équilibre sédimentaire (Komar, 1983).

• **Modèle de classification des plages**

Le modèle de classification des plages reconnaît l'existence de morphologies de plage distinctes, et les relie aux paramétrages des conditions environnementales, à savoir le climat des vagues, le régime des marées et les caractéristiques des sédiments de plage (Scott *et al.*, 2011). Selon Masselink *et al.* (2014a), cette classification peut offrir un cadre utile pour examiner la morphodynamique des plages et les changements morphologiques.

Masselink et Short (1993) proposent un modèle de classification des plages qui prend en compte les vagues, les marées et les sédiments en combinant le paramètre d'amplitude de marée relative RTR et la vitesse de chute des sédiments Ω (Figure 5). Les plages sont ainsi

classées en trois catégories : réflexives ($\Omega < 2$ et $3 < RTR < 15$), intermédiaires ($2 < \Omega < 5$ et $3 < RTR < 7$) et dissipatives ($\Omega > 5$ et $3 < RTR < 15$).

Les plages dissipatives larges et en pente douce offrent plus de protection au front dunaire en dissipant l'énergie des vagues pendant le processus de déferlement (Short et Wright, 1981 ; Masselink *et al.*, 2014) notamment lors des tempêtes, contrairement aux plages réflexives (Héquette *et al.*, 2019). Sur les plages réflexives, une partie importante de l'énergie des vagues entrantes est réfléchiée par le littoral et les vagues incidentes se brisent directement sur le front de mer (Masselink *et al.*, 2014).

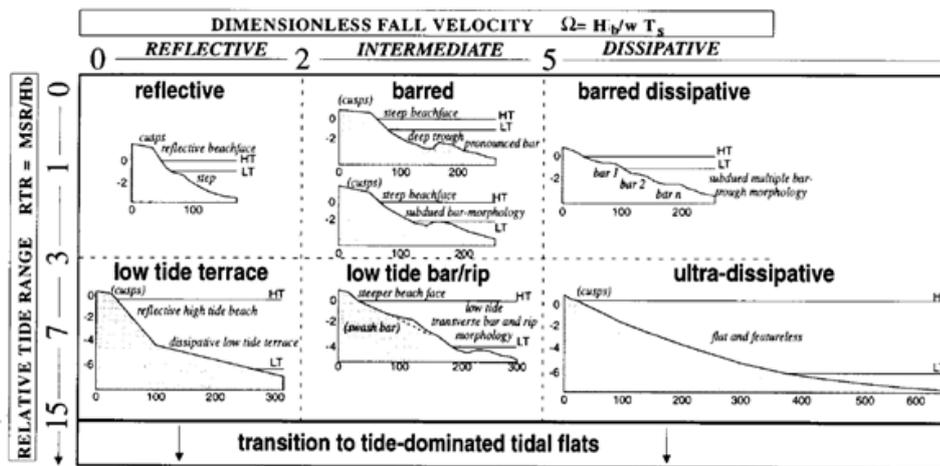


Figure 5 : Classification des plages selon Masselink et Short (1993)

- **Transport longshore**

Les différents processus présentés précédemment agissent sur les transports sédimentaires côtiers longshore et cross-shore, mais l'importance de leur rôle varie selon les environnements micro-, méso- et macro-tidaux (Cartier et Héquette, 2011).

En milieux micro- et méso-tidaux, les transports sédimentaires longshores sont fortement contrôlés par les courants littoraux générés par les vagues caractérisées par une énergie et un angle d'incidence à la côte (Figure 6). En revanche, dans les environnements côtiers macro-tidaux les courants de marée, conjointement aux facteurs météo-marins, jouent un rôle, contrairement aux environnements micro et méso-tidaux (Cartier et Héquette, 2011).

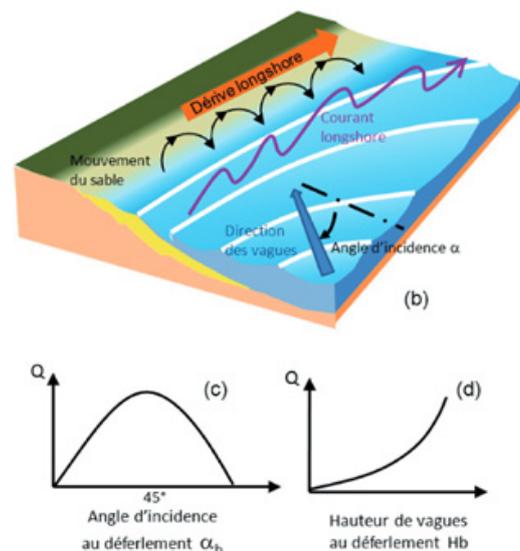


Figure 6 : Schéma des mécanismes induisant le transport longshore des sédiments (Charles et al. ; 2012).

- **Transport cross-shore**

En général, les tempêtes sont le facteur le plus important qui contrôle le mouvement du littoral à court terme ; les gradients de transport longshore dominant la position du littoral à plus long terme (Ciavola *et al.*, 2014).

Le long de la plupart des côtes, on observe une variation saisonnière des niveaux d'énergie des vagues : la hauteur des vagues supérieure à la moyenne annuelle pendant les tempêtes hivernales entraîne un changement saisonnier des circulations hydrodynamiques (Ciavola *et al.*, 2017) et donc des profils de plage (Figure 7) (Komar, 1983). A leur arrivée à la côte, les vagues de tempête entraînent principalement des processus transversaux (cross-shore) (Charlier et Meyer, 1998 ; Aagaard et Kroon, 2017). Selon Aagaard et Kroon (2017), « les gradients du transport sédimentaire cross-shore sont dans la plupart des cas beaucoup plus importants que les gradients du transport longshore ; les directions et les magnitudes du transport cross-shore sont très variables, changeant rapidement sous différentes conditions de vagues puisque plusieurs mécanismes de transport interagissent ».

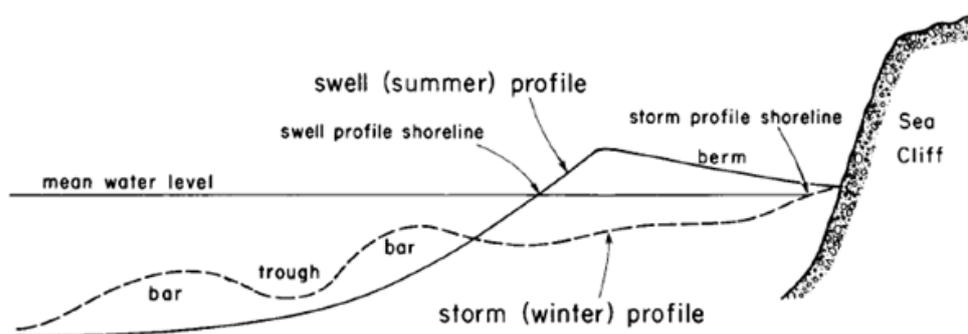


Figure 7 : Changements du profil de la plage provoqués par les vagues de tempête à haute énergie par rapport aux vagues de houle à plus faible énergie (Komar *et al.*, 1983).

2.2.4. Relation spatio-temporelle entre processus et résultante

Les processus qui façonnent les côtes sableuses peuvent être examinés selon des échelles de temps différentes (Dean et Dalrymple, 2004). L'évolution morphologique des côtes sableuses couvre un large éventail d'échelles temporelles et spatiales, avec des tendances à long terme, une grande variabilité interannuelle et saisonnière et des changements rapides à l'échelle d'une forte tempête ou d'un groupe de tempêtes (Castelle et Chaumillon, 2019).

Cowell et Thom (1994) regroupent les échelles de temps (Figure 8) sur lesquelles les processus côtiers opèrent en quatre classes qui se chevauchent :

- les **échelles de temps instantanées** : elles intègrent les évolutions morphologiques s'effectuant sur un pas de temps de quelques heures à quelques semaines (Dehouk, 2006). Elles concernent l'évolution de la morphologie au cours d'un seul cycle, par exemple, la formation et la destruction des rides de vagues par les grandes vagues, et la migration vers la terre d'une barre intertidale au cours d'un seul cycle de marée (Cowell et Thom, 1994).

- les **échelles évènementielles** : elles prennent en considération les évolutions sur un pas de temps de quelques mois à quelques années (Dehouk, 2006). Ces échelles concernent l'évolution des côtes par des processus sur des périodes allant de celles des vagues/marées individuelles à celles des saisons (Cowell et Thom, 1994).
- les **échelles de temps de « l'ingénierie »** : il s'agit d'échelles de temps allant de plusieurs années à plusieurs siècles comprenant notamment le recul du trait de côte à long terme. Les ingénieurs et les gestionnaires du littoral sont surtout concernés par les processus qui opèrent à ces échelles de temps (Cowell et Thom, 1994).
- les **échelles de temps géologiques** : ces échelles de temps considèrent les évolutions morphologiques opérant sur quelques centaines d'années à des centaines de milliers d'années, intégrant notamment les fluctuations millénaires du niveau marin (Dehouk, 2006).

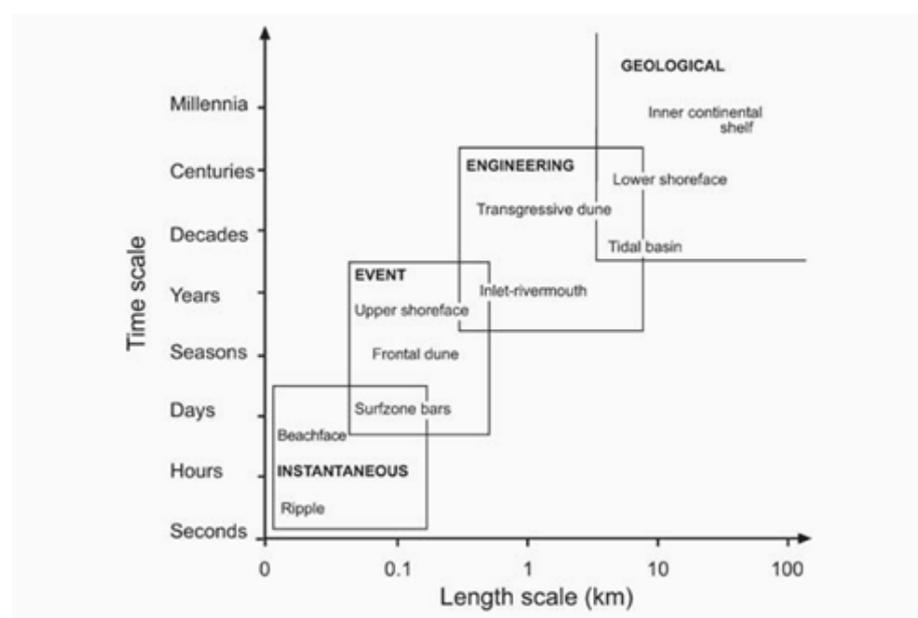


Figure 8 : Définition spatio-temporelle des processus côtiers

2.3. Quel trait de côte ?

2.3.1. *Quel(s) indicateur(s) de position du trait de côte ?*

La recherche fondamentale autour des risques côtiers et la gestion du littoral requiert des informations sur la position passée, actuelle et future (projection) du trait de côte. Cette connaissance sur le trait de côte est nécessaire pour évaluer l'élévation du niveau de la mer (Leatherman *et al.*, 2000), créer des zones d'aléa dans le cadre de documents réglementaires tels que les PPR (MEDDE, 2014), ou encore pour formuler des politiques visant à réguler l'urbanisation côtière telle que la loi « littoral » de 1986 relative à l'aménagement, la protection et la mise en valeur du littoral.

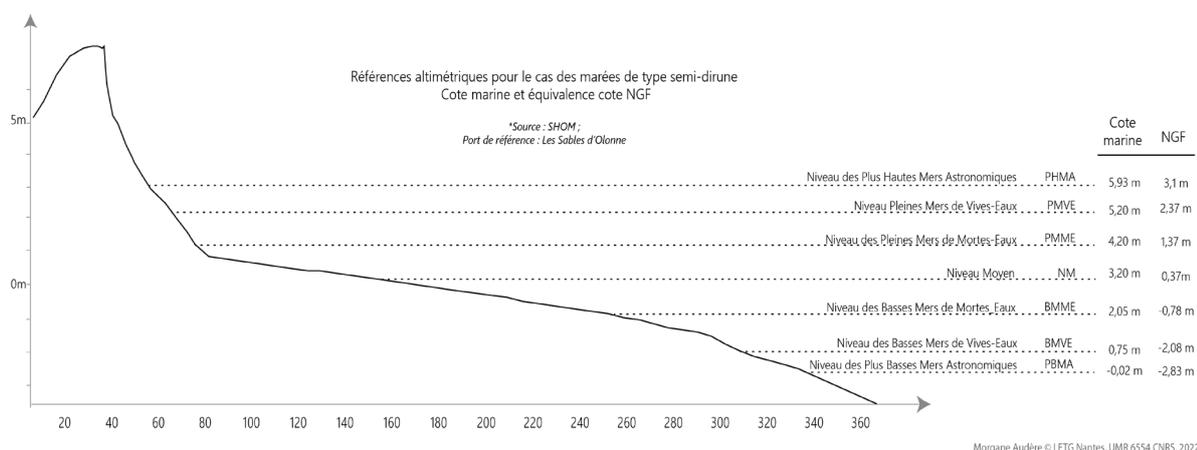


Figure 9 : Références altimétriques pour les marées de type semi-diurne

En raison de la nature dynamique du trait de côte, l'utilisation d'indicateurs, exploités pour représenter la position d'un trait de côte, permet d'opérer un suivi à la fois temporel et spatial. Boak et Turner (2005) distinguent (i) les indicateurs fondés sur le système de référence des marées comme la PHMA, le NM, par exemple (Figure 9) de ceux (ii) fondés sur une caractéristique côtière discernable visuellement telles que la limite de végétation, la laisse de haute mer ou encore la limite de zone d'humectation (Figure 10).

La ligne des hautes eaux (High Water Line) constitue l'indicateur le plus couramment utilisé (Douglas et Crowl, 2000 ; Moore *et al.*, 2006 ; Hanslow, 2007 ; Del Rio *et al.*, 2013). La ligne des hautes eaux, souvent identifiable sur les photographies aériennes, représente l'étendue vers l'intérieur des terres de la dernière marée haute et est identifiable par un contraste visuel entre la plage intertidale humide et la plage supratidale sèche (Moore *et al.*, 2006). Si la HWL est largement utilisée pour observer la dynamique de la limite terre-mer, même à une échelle historique (Pajak et Leatherman, 2002), elle n'est en revanche pas adaptée pour quantifier l'érosion ou l'accrétion, que ce soit à court ou long terme. Crowell *et al.* (2018) soulignent d'ailleurs les limites de cet indicateur en évoquant (i) la difficulté d'identifier cette ligne sur des images aériennes de mauvaise qualité, (ii) le fait qu'il ne soit pas toujours le plus représentatif de la mobilité du trait de côte sur le long terme.

Selon Pajak et Leatherman (2002), l'utilisation de la ligne des hautes eaux pour déterminer la position du trait de côte permet d'utiliser l'enregistrement le plus long possible pour déterminer les taux d'érosion, contrairement à tout autre indicateur, et de produire des prédictions plus fiables de ces taux. Ils précisent pourtant que cette ligne (HWL) peut facilement se confondre avec les lignes « de tempête/débris », de laisse de mer ou encore d'humectation (ou maxima runup) (Figure 10). Enfin, ils soulignent que la position de cette ligne est affectée par les marées astronomiques, les changements saisonniers des plages, et les surcotes de tempêtes.

Par ailleurs, les auteurs suivants affirment que d'autres indicateurs morphologiques se révèlent être plus pertinents que la ligne des hautes eaux (Morton, 1993) : celle de la laisse de haute mer (Hanslow, 2007) ou celle de la plus haute marée astronomique (Splinter *et al.*, 2018) pour évaluer les évolutions du trait de côte à long terme. Parmi ces indicateurs, les plus courants sont les suivants : l'escarpement d'érosion (Morton, 1993 ; Hanslow, 2007), la limite de végétation (Morton, 1993 ; Zuzek *et al.*, 2003 ; Maiti et Bhattacharya, 2009 ; Blaise *et al.*, 2014 ; Stéphan *et al.*, 2018 ; Juigner *et al.*, 2021) ou encore le pied de dune (Pye et Blott, 2008 ; Maiti et Bhattacharya, 2009 ; Lira *et al.*, 2016 ; Robin *et al.*, 2019 ; Juigner *et al.*, 2021). Le constat est le même pour l'analyse de l'évolution du trait de côte lors de tempêtes (court terme), l'indicateur « pied de dune » se révèle être le plus adapté et le plus robuste dans ce type de cas (Esteves *et al.*, 2012, Splinter *et al.*, 2018).

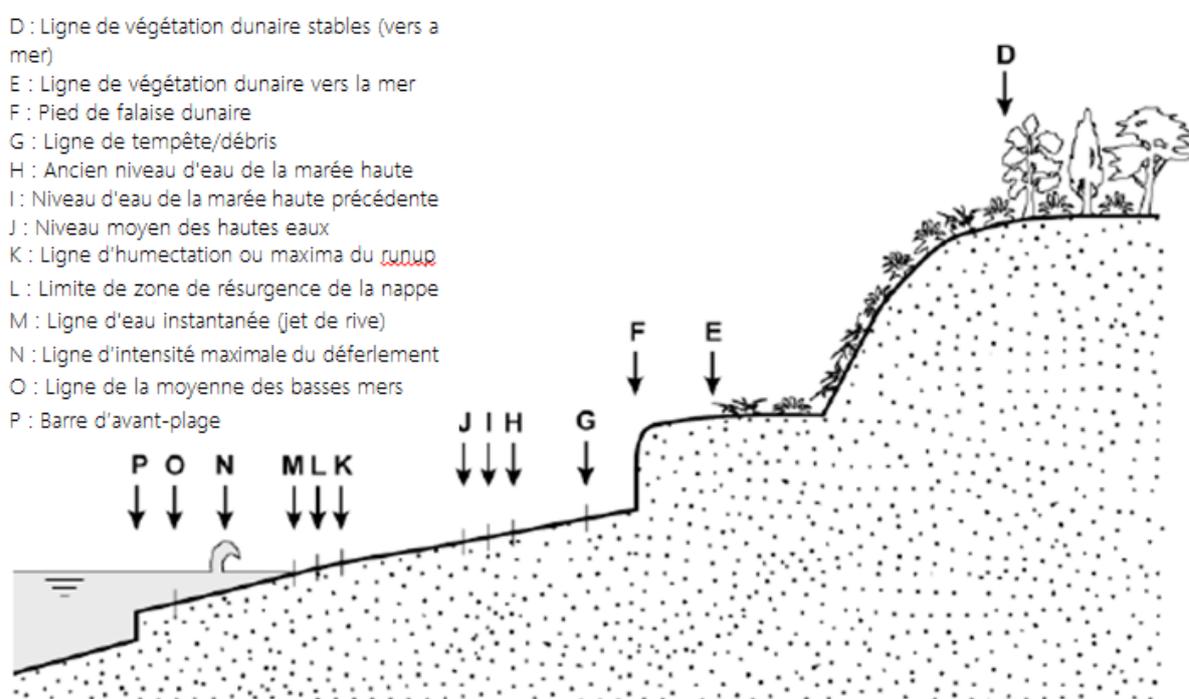


Figure 10 : Limites morphologiques sur les côtes sableuses (source : Boak et Turner, 2005)

2.3.2. Le choix d'indicateurs étroitement lié à la donnée exploitée

Si le choix de l'indicateur de position du trait de côte varie selon les entrées thématiques adoptées, il varie également, de manière toutefois plus contraignante, selon le type de données disponibles. Smith *et al.* (2020) soulignent cette limite à travers une enquête, réalisée en ligne et distribuée à des géomorphologues à qui il était demandé d'identifier la position du pied de dune sur trois supports différents : (i) un profil « plage-dune » transversal bidimensionnel, (ii) une photographie aérienne, et (iii) une image oblique. Une des conclusions de cette démarche révèle que l'identification de la position du pied de dune est biaisée par le type de données utilisées. Dans le premier cas, le profil bidimensionnel, dépourvu d'information « visuelle », incite l'opérateur à utiliser un indicateur strictement morphologique : la position du pied de dune. Dans les deux autres cas, les vues aériennes et obliques

peuvent quant à elles également permettre de spatialiser le pied de dune. Cependant, cette donnée suppose une limite notable car le pied de dune est identifiable essentiellement sur les côtes en érosion (Robin *et al.*, 2019). Ainsi, l'information visuelle qu'offrent ces images peut introduire un biais dans l'interprétation dès lors que l'exercice porte sur un secteur en accrétion, celui-ci étant caractérisé par la présence d'avant-dunes embryonnaires. Le pied de dune étant plus difficilement identifiable, l'opérateur tend davantage à identifier une limite de végétation (Figure 11). A l'inverse, si le choix de l'indicateur se porte sur la limite de végétation, celui-ci ne sera visible que sur des photographies aériennes, au même titre que pour l'indicateur « ligne des hautes eaux ».

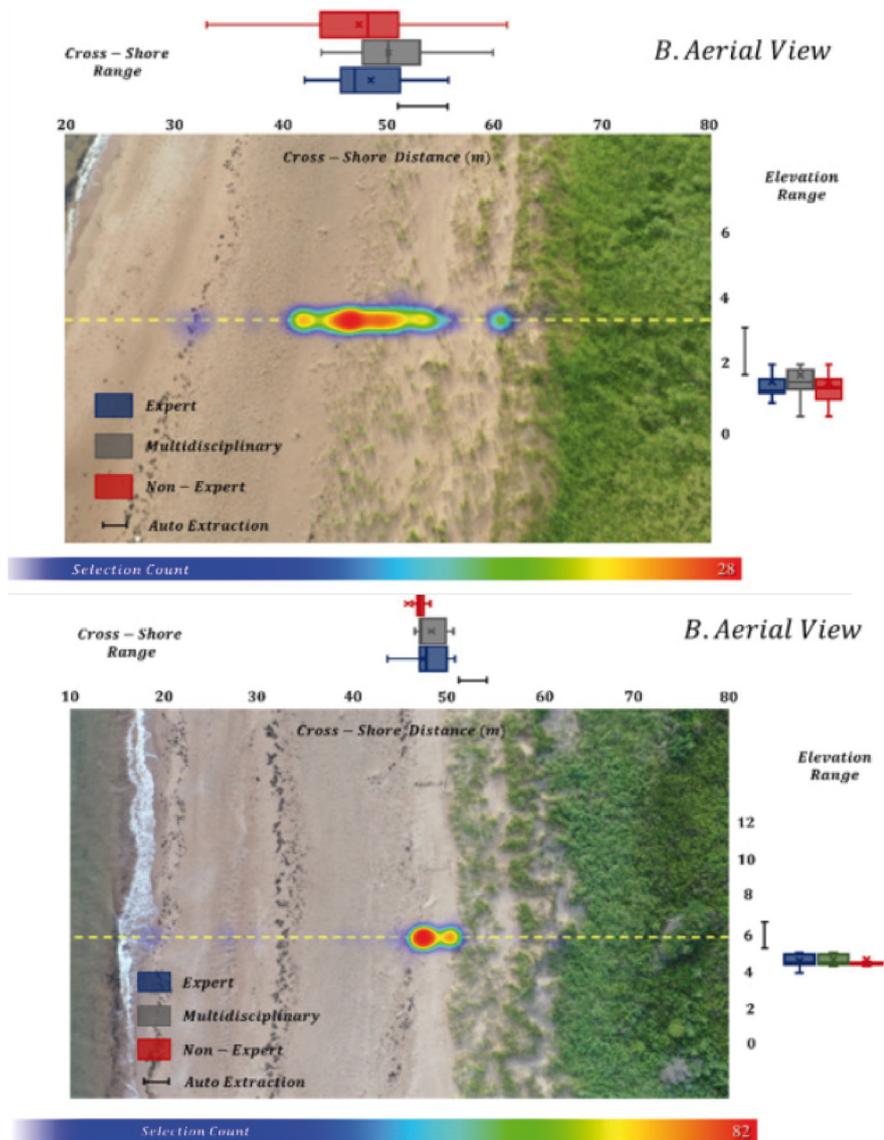


Figure 11 : Incertitude de la position du trait de côte selon une étude de Smith *et al.*, 2020. Note : « Le " point chaud " indique le nombre de sélections faites par tous les répondants, allant du bleu (faible nombre de sélections) au rouge (nombre élevé de sélections). Les diagrammes en boîte et en moustache indiquent la gamme des valeurs pour les sélections de pied de dune horizontal et vertical des groupes d'experts, multidisciplinaires et non experts » (Smith *et al.*, 2020).

Par ailleurs, l'ensemble de ces indicateurs ne peuvent pas être utilisés avec tous les types de données. Par conséquent, l'utilisation de ces indicateurs varie en fonction des sources de données disponibles et de l'approche utilisée (Yousef *et al.*, 2013; Juigner, 2017).

2.4. Mesurer l'érosion

Le choix des données et des méthodes de mesure de l'érosion varient selon le type de processus en action (cf. section 2.2.1), de la temporalité étudiée et de la disponibilité même de la donnée (Juigner *et al.*, 2013). Par ailleurs, l'évolution d'une côte sableuse peut s'appréhender de plusieurs manières ; *(i)* en mesurant l'évolution linéaire du trait de côte (en m ou m/an), *(ii)* son évolution verticale (élévation) ou bien *(iii)* en mesurant l'évolution du stock sédimentaire (en m³). Dans les deux cas, les données et les méthodes inhérentes varient également. A suivre, sont présentées les types de données et leurs méthode(s) associée(s), toutes deux discutées en fonction des temporalités long terme (historique)/court terme (évènementielle).

2.4.1. La temporalité

La temporalité, avec la composante spatiale, permet d'appréhender les différents processus et leurs conséquences sur la mobilité des côtes sableuses. La définition de la temporalité, à travers les court, moyen et long termes, varie selon les auteurs. Le « terme » peut correspondre soit *(i)* au pas de temps séparant chaque trait de côte soit, *(ii)* à l'enveloppe temporelle globale de l'analyse de la mobilité du trait de côte.

Dans le premier cas, Stéphan *et al.* (2019) entendent par « termes » les pas de temps utilisés dans l'étude pour l'analyse de l'évolution du trait de côte. Pour le long terme, notre étude est menée entre 1949-1952 et 2006-2009, soit une période d'environ 60 ans. De même, le moyen terme couvre la même période mais avec des mesures intermédiaires basées sur un intervalle de trois à cinq ans. L'analyse sur le court terme est en revanche réalisée sur une période plus récente (entre 1998 et 2017), appuyée par des données allant du mensuel à l'annuel.

Dans le second cas, la notion de « terme » est relative à l'emprise temporelle globale qui varie systématiquement entre les auteurs. Pour le long terme, l'emprise temporelle peut s'étendre de quelques dizaines d'années (*e.g.* Saxena *et al.*, 2013 ; Moussaid *et al.*, 2015 ; Cellone *et al.*, 2016) à plus de 100 ans (Houser *et al.*, 2008 ; Hapke *et al.*, 2009 ; Kabuth *et al.*, 2013). A l'image de la notion de long terme, celle de court terme peut aller de quelques heures (durée d'une tempête) (Musereau *et al.*, 2007 ; Fattal *et al.*, 2010 ; Suanez et Cariolet, 2010 ; Blaise *et al.* 2015 ; Suanez *et al.*, 2016) à plusieurs années (Philibert *et al.*, 2014 ; Stéphan *et al.*, 2019).

2.4.2. Les données LiDAR / photogrammétriques

La technologie LiDAR est développée dans les années 70 mais gagne en performance surtout à partir des années 90 (Brock et Purkis, 2009). Dans les études côtières, le LiDAR aéroporté associé au GNSS, fournit des données topographiques de la plage continues, à haute résolution, sur de vastes zones (Sallenger Jr. *et al.*, 2003) et en trois dimensions (Pye et Blott, 2016) à partir desquelles de nombreuses métriques morphologiques peuvent être dérivées (Brock *et al.*, 2004, Saye *et al.*, 2005). Lorsqu'une série chronologique de données LiDAR est disponible, une analyse des changements volumétriques peut être effectuée en soustrayant deux modèles numériques d'élévation (MNE) pour créer un MNE de différence (Wheaton *et al.*, 2010).

La disponibilité des ensembles de données LiDAR permet de s'affranchir des procédures traditionnelles qui prennent du temps sur des plages de plusieurs kilomètres de long (Baptista *et al.*, 2008). Cette donnée offre également la possibilité d'extraire des profils bidimensionnels, permettant ainsi de travailler sur l'évolution de profils de plage (Tableau 3). Une des limites associées à cette donnée est liée aux marées qui contraignent fortement les levés sur les estrans (Populus et Deshoux, 2004). Il est donc fortement recommandé de procéder à l'acquisition des données LiDAR pendant les conditions de marée basse de vives-eaux, sauf en cas d'utilisation d'un LiDAR bi-fréquence permettant des relevés topo et bathymétriques, afin de capter la zone intertidale (Brennan et Webster, 2006) et d'éviter les difficultés concernant la détermination du niveau zéro ainsi que le calcul de la pente de la plage (Raji *et al.*, 2011). Du fait de son manque de profondeur historique cette donnée ne peut être utilisée que sur un court terme permettant des acquisitions pré- et post-tempête donnant l'accès à des bilans associés aux événements extrêmes.

Enfin, la disponibilité de la donnée constitue également une limite. Ainsi pour l'analyse de la succession de tempêtes de l'hiver 2013/2014, Burvingt *et al.* (2017) sont par exemple confrontés à l'absence de données en 2013 (pré-tempêtes). Selon les secteurs, la donnée la plus proche de l'hiver 2013/2014 date de 2010 ou 2012. Il y a donc un à trois ans d'écart entre la donnée pré-tempête et l'évènement, rendant « l'attribution de la différence de morphologie aux tempêtes de 2013/14 potentiellement problématique ». En ce qui concerne la photogrammétrie, qui permet d'effectuer des mesures de distance, de surface et d'altitude, elle apparaît au début des années 2000 pour ce type d'application, plus tardivement que le LiDAR. L'exploitation du LiDAR n'a réellement pris son essor qu'à partir de 2005 (Tableau 2). Avant cette date, l'outil « est expérimental ou n'est utilisé que par quelques organisations qui ont les moyens techniques et financiers de l'utiliser » (Cohen et Héquette, 2020). L'utilisation de drones pour la photogrammétrie s'est vue davantage exploitée à partir de 2014/2015. A partir de 2016/2017, ces deux techniques (ainsi que le GNSS) sont presque égales en termes de citations dans la littérature : bien que l'utilisation des drones ait commencé tardivement, elle est maintenant aussi courante que celle du GNSS et du LiDAR (Cohen et Héquette, 2020).

Tableau 2 : Inventaire de travaux reposant sur une donnée LiDAR / photogrammétrique

Travaux	Etendue de la zone d'étude	Etendue temporelle	Nombre de dates couvertes	Type de donnée ou résolution	
Revell <i>et al.</i> , 2002	14 km	Type de donnée ou résolution	2 (1997 oct -1998 avr)		Evènementiel
Houser <i>et al.</i> , 2008	11 km	Mai 2004 – sept. 2004 (4 mois) (Tempête Ivan)	Mai 2004 – sept 2004 (4 mois)	< 1m	Evènementiel
Long <i>et al.</i> , 2016	2 km	Juin 2015 - Oct. 2015	3 mois : 16 juin, 28 sept, 2 oct	17 cm	Evènementiel
Burvingt <i>et al.</i> , 2017	157 plages	2013-2014 (Tempêtes hiver 2013-2014)	2010 ou 2012, 2014		Evènementiel
Crapoulet <i>et al.</i> , 2017	env. 12 km	2008-2014	4 (2008, 2011, 2012, 2014)	25 cm (plani-metrique)	Moyen/long terme
Le Mauff <i>et al.</i> , 2018	env 11,5 km	2008-2013	3 (2008, 2010, 2013)	< 1m	Moyen/long terme
Splinter <i>et al.</i> , 2018	3,6 km	6 jours (tempête)	14/06/2011 ; 15/06/2011 ; 16/06/2011 ; 17/06/2011 ; 19/06/2011	25 cm (plani-metrique)	Evènementiel
Héquette <i>et al.</i> , 2019	7 km	2008-2016	7 (May 2008, Mar 2011, Sep 2011, Nov2012, Dec2013, Jan 2014, May 2016)	17 cm (plani-metrique)	Moyen/long terme
Nicolae Lerma <i>et al.</i> , 2019	230 km	2011-2017 (6 ans)	4 (2011, 2014, 2016, 2017)	10 cm (plani-metrique)	Moyen/long terme
Pollard <i>et al.</i> , 2020	10 km	2003-2015 (12 ans)	6 (2003, 2006, 2008, 2011, 2014, 2015)		Moyen/long terme
Robin <i>et al.</i> , 2020	4 km	2011-2018(9 ans)	5 (2011, 2014, 2016, 2017, 2018)		Moyen/long terme et évènementiel
Robin <i>et al.</i> , 2020		2012-2014 (tempêtes 2013-2014)	2 (2012-2014)	17 cm (plani-metrique)	Evènementiel

Tableau 3 : Avantages et inconvénients relatifs aux techniques d'acquisition LiDAR et photogrammétriques (source : Cohen et Héquette, 2020)

Technique	Avantages	Inconvénients
Photogrammétrie	<ul style="list-style-type: none"> - Adapté aux zones d'étude petites à moyennes (temps de temps de vol et portée limitée) - Campagne de mesure facile à organiser (en fonction des réglementations locales) - Haute répétabilité - Haute densité de mesure - Mesures de haute précision - Fournir des orthophotographies complètes pour photo-interprétation 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensible aux conditions météorologiques - Temps de traitement des données long et grande puissance de calcul requise - Enorme quantité de données à stocker - Fournit le DSM, difficile à calculer - MNT
LiDAR	<ul style="list-style-type: none"> - Adapté aux grandes zones d'étude (grande portée de vol) - Densité de mesure moyenne fournit un MNT 	<ul style="list-style-type: none"> - Campagne de mesure difficile à organiser - Faible répétabilité - Précision moyenne des mesures - Sensible aux conditions météorologiques - Temps de traitement des données long et grande puissance de calcul requise - Enorme quantité de données à stocker

2.4.3. Les images aériennes / satellitaires

Une image aérienne ou satellitaire est transformée en un produit orthophotographique après rectifications géométriques et reprojection dans un système de coordonnées planimétriques. L'orthophotographie est un support fiable pour la numérisation du trait de côte par photo-interprétation et pour son analyse diachronique. L'étude de l'évolution du trait de côte est un sujet qui a été largement abordé dans la littérature scientifique (Dolan *et al.*, 1991 ; Morton *et al.*, 2005 ; Boak and Turner, 2005 ; Hapke *et al.*, 2006 ; Del Rio *et al.*, 2013 ; Moussaid *et al.*, 2015 ; Cellone *et al.*, 2016).

L'analyse diachronique de photographies aériennes verticales est la méthode la plus appropriée pour étudier la dynamique spatio-temporelle des côtes sableuses (Kabuth *et al.*, 2013) à différents pas de temps (Stéphan *et al.*, 2019). Une fois les différents traits de côte numérisés sur la base des orthophotographies, leur exploitation est réalisée dans un SIG par des outils de calcul automatisé des taux d'évolution (*e.g.* DSAS, Mobi TC) (Juigner *et al.*, 2013). Le Digital Shoreline Analysis System v4.2 (DSAS) est une extension gratuite du logiciel

ArcGis, développé depuis le début des années 1990 par l'US Geological Survey (Thieler *et al.*, 2009). Cet outil permet de mesurer la distance entre plusieurs polygones (traits de côte) et de calculer des statistiques d'évolution telles que la régression linéaire (LRR), la régression linéaire pondérée (WLR) et/ou la distance entre deux dates (EPR).

Par ailleurs, l'exploitation de l'outil demande la mise en place, au préalable, d'un protocole méthodologique qui s'appuie sur (i) la fréquence temporelle souhaitée (court, moyen ou long terme), (ii) l'étendue spatiale de la zone d'étude, (iii) et la disponibilité des données. La précision des résultats dépend de l'espacement des transects. Ce dernier varie considérablement selon les auteurs et l'étendue de la zone d'étude (Tableau 4). En effet, l'espacement des transects dépend de l'étendue des plages : de quelques kilomètres (Aernouts et Héquette, 2006 ; Suanez *et al.* 2010), à plusieurs centaines de kilomètres (Hapke *et al.*, 2009), voire plusieurs milliers de kilomètres (Mentaschi *et al.*, 2018 ; Luijendijk *et al.*, 2018).

De plus, selon le type de données (photographie aérienne ou satellitaire) l'espacement des transects varie. Les photographies aériennes dont la résolution spatiale est fine permettent de resserrer les transects. En effet, les images aériennes ont une résolution plus fine (entre 10 cm et 1 m) que les images satellitaires (entre 0,3 m et 1 km) (Lillesand *et al.*, 2015).

Tableau 4 : Inventaire de travaux reposant sur l'utilisation de transects

	Espacement des transects (m)	Étendue de la zone d'étude (km)	Étendue temporelle	Nombre de dates couvertes	Type de donnée raster utilisée
Barman <i>et al.</i> , 2014	1000 m	67 km	38 ans		Satellitaire
Luijendijk <i>et al.</i> , 2018	500 m	world	33 ans		Satellitaire
Judge <i>et al.</i> , 2003	300 m	35 km	événementiel		Aérienne
Saxena <i>et al.</i> , 2013	300 m	42 km	39 ans		Satellitaire
Mentaschi <i>et al.</i> , 2018	250 m	world	32 ans		Satellitaire
Aernouts et Héquette, 2006	100 m	4,1 km	51 ans	3 dates	Aérienne
El Abdellaoui et Ozer, 2007	100 m	4,8 km	25 ans	3 dates	Satellitaire/ Aérienne
Quang <i>et al.</i> , 2021	100 m	125 km	29 ans	2 dates	Satellitaire
Halouani <i>et al.</i> , 2007	50 m	5,7 km	38 ans	3 dates	Aérienne

Hapke <i>et al.</i> , 2009	50 m	800 km	145 ans (120 ans : « T-sheets » + aériennes et 25ans LiDAR	6 dates (dont 2 issues du LiDAR	Aérienne/Li- DAR
Suarez <i>et al.</i> , 2010	50 m	2 km	57 ans	5 dates	Aérienne
Houser <i>et al.</i> , 2008	20 m	11 km	120 ans 1 an	3 dates Pré-post tem- pête	Aérienne
Audère et Robin, 2021	20 m	400 km	Evènementiel	4 dates	Satellite/Aérienne
Moussaid <i>et al.</i> , 2015	20 m	20 km	40 ans	3 dates	Aérienne
Cellone <i>et al.</i> , 2016	20 m	30 km	70 ans	8 dates	Satellite/Aérienne
Stéphan <i>et al.</i> , 2018	20 m	7 km	65 ans	19 dates	Aérienne
Faye <i>et al.</i> , 2008	10 m	7 km	51 ans	3 dates	Aérienne

En France, c'est l'IGN qui couvre tous les trois ans l'ensemble du territoire national à une résolution de 25 cm. Qui plus est, l'institut est amené à réaliser en urgence des prises de vue aériennes de territoires touchés par des risques naturels afin d'évaluer les dégâts et adapter les modèles de prévision (ign.fr). Ces campagnes ponctuelles augmentent le nombre d'images mises à disposition et permettent, sur certains secteurs, d'augmenter la fréquence de la donnée. Concernant les suivis de plages et l'exploitation des photographies aériennes, Stéphan *et al.*, (2018), dans la Baie de Goulven, longue de 7 km, rassemblent des photographies aériennes sur 19 dates pour une étude menée sur 65 ans, soit une image tous les 3 à 4 ans en moyenne. En comparaison, les travaux menés par Robin *et al.* (2019) à l'échelle de la région Pays de la Loire s'étendent sur près de 400 km de côtes. Dans cette étude, les auteurs disposent d'une couverture aérienne étendue : 1950's (1950, 1952), 1970's (1968, 1971), 1990's (1989, 1990), 2000 et 2010's (2011-2012) et cinq dates de photos aériennes ont été prises en compte avec une couverture temporelle homogène. Hapke *et al.* (2009) présentent quant à eux une étude sur 800 km avec trois ou quatre dates réparties sur les décennies suivantes : 1800's (cartographie ancienne), 1920's-1930's et 1950's-1970's. Ces trois exemples illustrent ainsi la variabilité de la disponibilité des données selon l'étendue de la zone d'étude et peut constituer une limite notable pour les études portant sur des secteurs de plusieurs dizaines ou centaines de kilomètres. Cependant, elle offre la possibilité d'identifier un certain nombre d'indicateurs de position du trait de côte tels que la limite de végétation, la laisse de haute mer ou encore la limite de zone d'humectation souvent relative à la dernière marée haute, également appelée (High Water Line).

Enfin, il apparaît que la méthode consistant à exploiter les images aériennes est essentiellement employée pour des analyses d'évolution du trait de côtes sur le long terme. La fréquence des campagnes aériennes permet en effet de rassembler une collection de trait de côte pour réaliser des analyses diachroniques de son évolution. Il est en revanche plus rare que cette méthode soit utilisée pour évaluer l'érosion liée à un phénomène ponctuel. Au final, plusieurs facteurs entrent en compte lors de la mise en place de la méthode d'évaluation de l'érosion et c'est le paramètre temporel, qui peut correspondre soit à l'étude d'un évènement ponctuel (court terme) soit à une étude historique (long terme) qui a une incidence sur le choix de la donnée. L'emprise spatiale de la zone d'étude peut également influencer le choix de la donnée. Les zones d'étude peu étendues ont l'avantage de rassembler davantage de données et permettre une diversification des méthodes d'analyse. De fait, les définitions du trait de côte et les méthodes d'analyse de la mobilité des côtes sableuses dépendent essentiellement, des outils de traitement de données et surtout des données disponibles (Juigner *et al.*, 2013).

2.4.4. Les profils de plage bidimensionnels

Par rapport aux relevés LiDAR aéroportés qui fournissent des données topographiques en trois dimensions, les relevés de profils de plage ne fournissent qu'une donnée discrète en deux dimensions (Le Mauff *et al.*, 2018). Les mesures topographiques sont traditionnellement réalisées avec des techniques au sol telles que le GNSS ou les stations totales et ne sont rentables en termes de coût et de temps que sur les petites plages accessibles (Baptista *et al.*, 2008).

Par ailleurs, des relevés topographiques répétés sont nécessaires pour suivre les changements morphologiques des plages (Thom et Hall, 1991), des contraintes humaines ou matérielles peuvent alors s'ajouter aux autres limites.

Les relevés topographiques sont surtout utilisés pour réaliser des suivis morphologiques pré- et post-tempête, notamment pour la surveillance de secteurs peu étendus (Blaise *et al.*, 2015 ; Robin *et al.*, 2020 ; Zemmour et Ruz, 2021). Mais lorsque l'étendue du secteur est faible des campagnes de relevés régulières sur le long terme peuvent être mises en place (Stéphan *et al.*, 2019) et générer de la donnée à plus haute résolution spatiale et avec des marges d'erreurs limitées (Tableau 5). Ainsi, les travaux de Suanez *et al.* (2010) sur la plage du Vougot située en Bretagne, longue d'environ 2 km (Tableau 6), ont permis de réaliser sur la période 2005-2009, 72 relevés de terrain avec une acquisition de près de 42 000 points localisés en X, Y, Z grâce à un GNSS.

Tableau 5 : Avantages et inconvénients de la technique d'acquisition par GNSS (Source : Cohen et Héquette, 2020)

Technique	Avantages	Inconvénients
GNSS	<ul style="list-style-type: none"> - Campagne de mesure très facile à organiser - Haute répétabilité - Pas vraiment sensible aux conditions météorologiques - Mesures de haute précision - Temps de traitement des données court - Quantité faible à moyenne de données à stocker - Fournir des MNT 	<ul style="list-style-type: none"> - Convient aux zones d'étude petites à moyennes - Fournit uniquement des mesures topographiques - Faible densité de mesures - Mesures qui prennent du temps

Tableau 6 : Inventaire de travaux reposant sur l'utilisation de profils bidimensionnels

Travaux	Étendue de la zone d'étude	Étendue temporelle	Fréquence	
Thom et Hall, 1991	5,5 km	1972-1988 (16 ans)	Mensuel	Moyen / long terme
Battiau-Queney <i>et al.</i> , 2003	16 km	1993-2000	Avant et après tempête	Évènementiel
Maspataud <i>et al.</i> , 2011		1993-2000	Avant et après tempête	Évènementiel
Blaise <i>et al.</i> , 2015	10 plages	2013-2014	2 à 6 profils par secteur entre oct 2013 et avr 2014	Évènementiel
Stéphan <i>et al.</i> , 2019	11 plages	2003-2018	Bimensuel à semi-annuel	Court terme
Robin <i>et al.</i> , 2020	4 km	2011-2018 / 2013-2014	Bimensuel	Moyen / long terme et évènementiel
Zemmour et Ruz, 2021	< 6 km	2014-2018	Mensuel	Moyen terme

2.5. Estimer l'érosion

2.5.1. Les approches empiriques

Lorsque les mesures et les observations de terrain n'existent pas ou sont trop lacunaires pour être interprétables, des formules empiriques peuvent être mis en œuvre (Desmazes *et al.*, 2018). D'après Larson *et al.* (2004), « la théorie du profil d'équilibre suppose que le profil de la plage tend vers un état d'équilibre défini par les conditions de vagues et de niveau

d'eau, ce qui détermine géométriquement la réponse de la dune ». Le premier modèle se basant sur cette théorie est développé par Bruun (1954) dans le but d'estimer le recul d'un profil plage-dune en fonction de l'élévation du niveau marin (Figure 12).

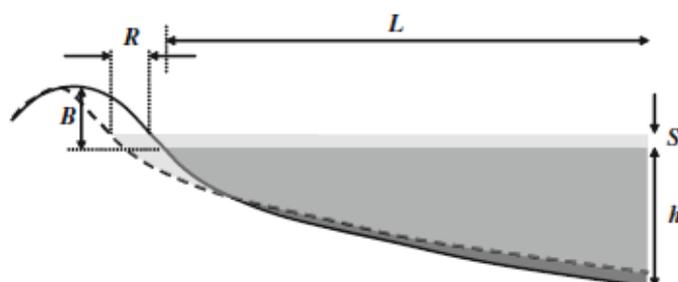


Figure 12 : Schéma de principe montrant la règle de Bruun pour le recul des côtes où h = profondeur de fermeture, L = distance horizontale du trait de côte à la profondeur h , B = estimation de l'élévation de la dune dans la zone érodée, S = élévation du niveau de la mer et R = étendue horizontale du recul côtier.

Ranasinghe *et al.* (2007) réalisent une étude visant à tester la loi de Bruun en montrant l'incertitude majeure associée à l'estimation de la pente de profil. L'application de quatre formules empiriques largement utilisées en Australie (Ranasinghe *et al.* 2007) a donné lieu à des estimations du profil de pente dont l'incertitude peut faire varier les estimations de recul d'environ 500% (Ranasinghe et Stive 2009).

Plus récemment, Durand et Heurtefeux (2006) proposent une nouvelle méthode pour estimer le recul côtier lié à l'élévation du niveau de la mer :

$$R = r + ((E21 - E20)) / P$$

Avec :

R = valeur de recul prévue en 2050 ;

r = valeur du recul prévu par la régression linéaire ;

$E21$ = valeur d'élévation du niveau marin prévue d'ici 2050 selon le scénario du Conservatoire, soit 22 cm ;

$E20$ = valeur moyenne annuelle d'élévation du niveau marin au 20^{ème} siècle, soit 0,13 cm, multipliée par la durée de la prévision (48 ans) soit 6,24 cm (0,13 * 48) : cette valeur est à déduire car déjà prise en compte dans la prévision par la régression linéaire ;

P = pente du bas de plage et de la partie supérieure de l'avant-plage en%, depuis le haut de la berme jusqu'à la 1^{ère} barre pré-littorale, située à environ -1 m.

A la différence de la méthode de Bruun, cette équation qui ne nécessite pas de connaître la profondeur de fermeture, exige de préciser les paramètres présentés ci-dessus et de mesurer leur incertitude. Cette dernière est liée à la première variable (r , soit le recul historique mesuré), mais aussi relative à la seconde variable ($E21$) et cela dépend tout d'abord du choix du scénario SSP du GIEC mais aussi de la marge d'erreur propre à chaque scénario. Elle requiert également de connaître la pente de plage, variable dont la mesure varie selon les limites hautes et basses retenues.

En 1968, le modèle Bruun est ensuite adapté par Edelman, afin d'évaluer le phénomène

d'érosion pendant une tempête. Ce modèle permet de donner un aperçu du comportement d'une côte sableuse en conditions de tempête et se base en partie sur des hypothèses car les données d'observation et la connaissance des processus sont encore incomplètes à cette période. Le modèle d'Edelman est à son tour amélioré par Dean (1977), Van de Graaff (1977) puis Vellinga (1986), en ajustant la forme du profil final grâce à des essais réalisés dans un canal à houle. L'approche initiée par Vellinga (1986) a été également reprise et simplifiée par Hallermeier et Rhodes (1988) pour l'appliquer au littoral américain dans le cadre de l'élaboration d'une assurance contre les inondations menée par la FEMA (1988).

Le principe de la règle FEMA ou règle des « 50 m² », basée sur l'analyse de 38 tempêtes, consiste à évaluer la capacité d'un front dunaire à résister à un niveau d'eau centennal. La section de 50 m² est délimitée par une ligne horizontale correspondant au niveau centennale statique et une ligne verticale correspondant à la ligne de crête (Figure 13). Une section transversale d'au moins 50 m² est nécessaire pour considérer la dune comme résistante (Figure 13-A). En dessous de cette valeur, le « réservoir » n'est plus considéré comme suffisant pour que la dune résiste, auquel cas, on considère que la dune est très fragilisée dans son rôle protecteur des zones basses à l'arrière (Figure 13-C). Les méthodes empiriques d'estimation d'évolution du profil de plage lors de tempêtes – dont certaines sont présentées ci-dessus – sont basées sur des formules relativement simples à appliquer (Desmazes *et al.*, 2014). Cependant, ces méthodes ne permettent pas de prendre en compte tous les paramètres hydro-sédimentaires de la zone littorale contrairement aux modèles numériques développés par la suite.

2.5.2. Les modèles numériques

En 1989, le modèle SBEACH est l'un des premiers modèles à être développé. Il a l'avantage de mieux prendre en compte les processus physiques générant du transport sédimentaire cross-shore. Cependant, il s'appuie encore, au même titre que les modèles empiriques présentés dans la section précédente, sur l'hypothèse simplifiée du « profil d'équilibre » (Larson et Kraus, 1989). Des modèles 3D sont également développés pour simuler l'évolution

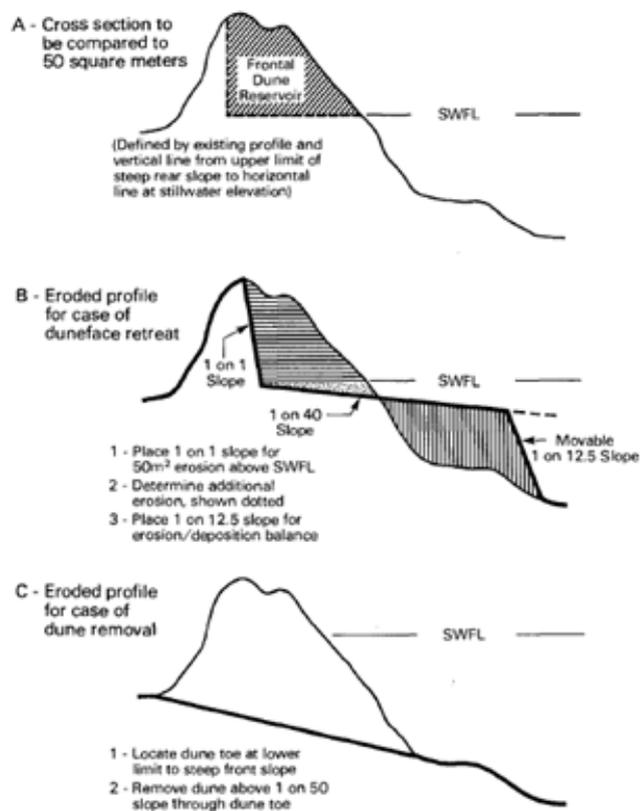


Figure 13 : Principe de la règle de la FEMA (Hallermeier et Rhodes, 1988).

morpho-sédimentaire d'une plage. Parmi eux, on trouve TELEMAC (Hervouet et Villaret, 2004) ou encore Mike 21 (DHI). Afin d'intégrer le rôle des processus longshores dans le transport sédimentaire et l'érosion, Roelvink *et al.* (2009) développent le modèle XBEACH, qui à ce jour semble le plus adapté pour la simulation de l'ensemble des processus complexes littoraux. D'après Desmazes *et al.* (2014), la particularité de ce modèle « réside dans l'amélioration de la modélisation du jet de rive qui prend en compte les effets des ondes infragravitaires. La circulation littorale dans la frange côtière est également calculée par le modèle ce qui lui permet d'évaluer le transport sédimentaire et les évolutions morphologiques : érosion, ensablement, submersion de dunes ». Les modèles XBeach, SBeach, Telemac sont les plus couramment utilisés et ont fait leur preuve dans la communauté scientifique (Roelvink *et al.*, 2009 ; Maspataud *et al.*, 2010 ; Corbella et Stretch, 2012b ; Pender *et al.*, 2015 ; Afentoulis *et al.*, 2017; Le Mauff, 2018).

En conclusion, l'aléa érosion dépend d'une part de la compréhension des processus météorologiques et leur résultante à la côtes et d'autre part de la donnée qui a une place prépondérante à chaque étape du processus d'analyse de l'aléa érosion. Sa disponibilité, sa résolution spatiale ou encore sa résolution temporelle influencent grandement les choix méthodologiques et par conséquent les résultats. Les marges d'incertitude, concernant les données ou les méthodes d'analyse, sont donc essentielles pour rendre compte des biais relatifs à ces deux éléments.

3. Les enjeux

L'aléa engendre un risque s'il rencontre des enjeux. La présence ou non d'enjeux ainsi que leur niveau de vulnérabilité face à cet aléa font d'eux une composante majeure dans l'étude du risque. La protection des enjeux s'inscrit dans la réalisation des programmes de prévention des risques littoraux.

3.1. La prévention des risques en région

3.1.1. *Historique de la prévention des risques littoraux*

Depuis le début du XX^{ème} siècle, en France, la politique de protection du paysage constitue un des éléments significatifs du droit de l'environnement car elle met en place des mesures spécifiques de protection et de sauvegarde. On assiste alors à l'émergence d'un véritable droit du paysage qui regroupe un certain nombre de principes et de normes devant être pris en compte lors d'opérations d'aménagements. Le droit permet ainsi d'agir légitimement sur des territoires jugés à risques. C'est en croisant une volonté de sauvegarde ou de pérennisation de l'environnement avec des outils législatifs opérationnels que l'on peut évoquer la notion de gestion intégrée de ces espaces naturels. En déterminant des zonages de protection, ce n'est pas la préservation des espaces naturels qui est priorisée mais bien la défense des biens et des personnes face à ce risque.

Perherin (2017) réalise dans ses travaux, un historique précis de la prévention des risques en France. Concernant la prévention des risques littoraux, la défense contre la mer a longtemps été assurée par les propriétaires. C'est finalement le développement rapide de l'urbanisation qui fait émerger les préoccupations sur la protection de la nature et des paysages du fait du développement récent et rapide de l'urbanisation littorale dès les années 1970. La loi « Littoral » du 3 janvier 1986 relative à l'aménagement, la protection et la mise en valeur du littoral, interdit l'urbanisation dans la bande des 100 mètres afin de protéger les espaces naturelles du littoral. Cette loi fut intégrée dès 1979 au code de l'urbanisme sous forme de directive (Directive Ornano) mais elle n'était pas encore opposable aux documents d'urbanisme. De cette loi « Littoral » a découlé des plans d'exposition aux risques naturels prévisibles (PER) dont « le bilan de la mise en œuvre – au milieu des années 1990 – est quasi nul pour les territoires littoraux » car on dénombre seulement « trois PER prescrits en 1985 pour trois communes du littoral du Calvados (Villers-sur-Mer, Houlgate et Auberville, situées le long des falaises des Vaches Noires) et approuvés en 1993 » (Deboudt, 2010a). De plus, les tempêtes de 1999 ont généré une prise de conscience et conduit Météo-France à mettre en place les cartes de vigilance le 1^{er} Octobre 2001 (Schoenenwald, 2013). C'est finalement la loi Barnier du 2 février 1995, relative au renforcement de la protection de l'environnement et à la prévention des risques naturels, qui institue le Plan de Prévention des Risques Littoraux (PPRL), présenté dans la section suivante.

3.1.2. *Les Plans de Prévention des Risques Littoraux*

Les PPRL sont élaborés par les Directions Départementales des Territoires et de la Mer (DDTM) Loire-Atlantique et Vendée, services déconcentrés de l'Etat (Figure 14). D'un point de vue juridique, ce document est une servitude d'utilité publique annexée au Plan Local d'Urbanisme (PLU). De ce fait, il agit en addition des réglementations existantes et s'impose au PLU. Il permet une maîtrise de l'urbanisation en délimitant les zones exposées aux risques et, en fonction de cette évaluation, d'y interdire, ou d'y autoriser sous prescriptions particulières les constructions ou aménagements.

Pour l'élaboration de la cartographie de l'aléa, une première phase se rapporte à l'analyse du fonctionnement du littoral et consiste à collecter le maximum de données relatives à l'aléa via des études de terrain ; d'analyser des événements naturels (Perherin, 2017) et de recenser « les connaissances techniques et historiques des phénomènes rencontrés et de leur impact sur le territoire » (MEDDE, 2014). Il s'agit également d'analyser le fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral (MEDDE, 2014), en faisant appel à des bureaux d'études tels que SOGREAH (2012) pour les côtes sableuses de la Loire-Atlantique et Geos-DHI (2008) pour le littoral vendéen.

La seconde étape appelée « caractérisation et la qualification de l'aléa », repose sur la délimitation de l'aléa de référence incluant (i) l'évaluation du taux moyen annuel de recul du trait de côte Tx (en m/an) et (ii) le recul maximum lié à un événement tempétueux majeur

L_{max} (en m). Ainsi, la zone soumise à aléa érosion est celle d'une évolution historique à échéance 100 ans (ou 2100 selon les PPRL) à laquelle est ajoutée le recul maximum lié à un événement extrême. La largeur de la zone d'aléa L_r est définie comme suit :

$$L_r = 100T_x + L_{max}$$

La qualification de l'aléa érosion est sans équivoque car systématiquement classé en « aléa fort ».

En parallèle de l'aléa, l'analyse des enjeux est également réalisée afin d'évaluer le risque global relatif à l'érosion côtière. Selon le Guide méthodologique des Plans de Prévention des Risques Littoraux (2014), la notion d'enjeux « est associée aux conséquences des inondations sur la santé humaine, l'environnement, les biens, dont le patrimoine culturel, et l'activité économique ».

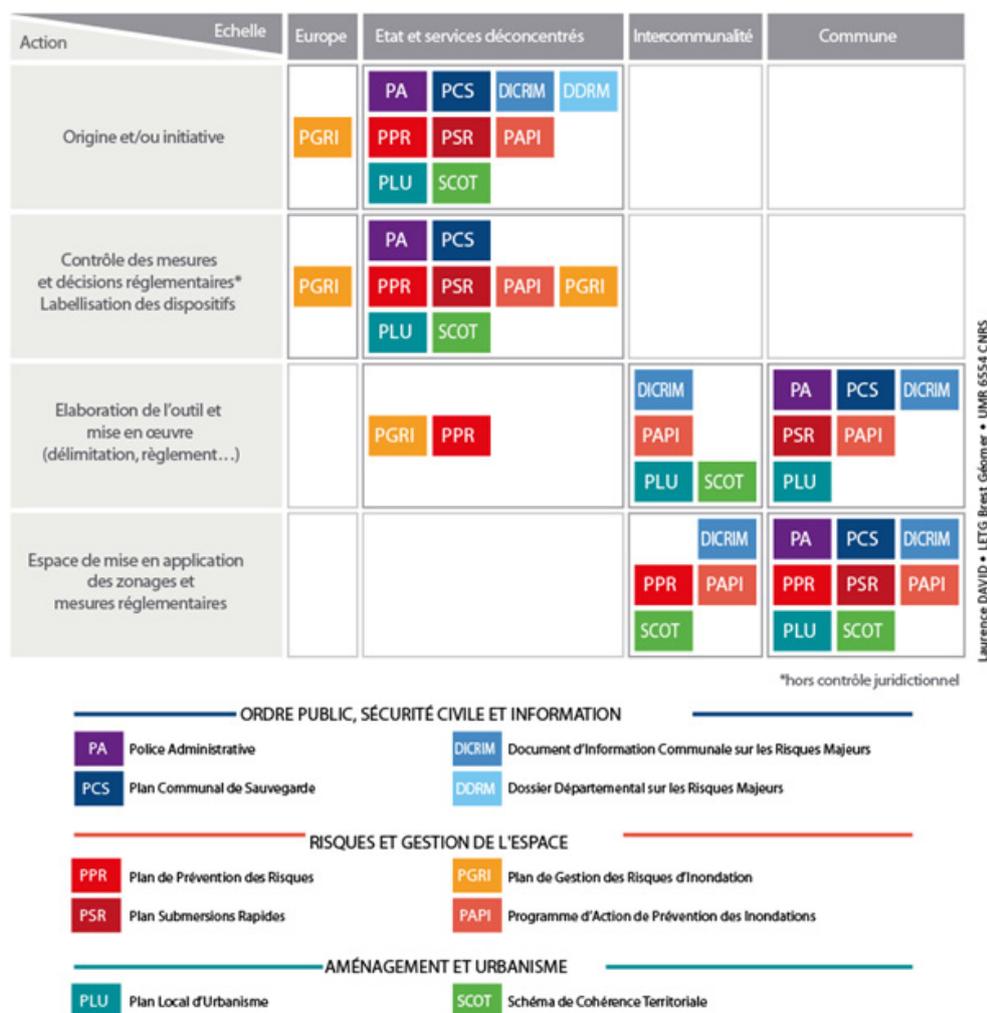


Figure 14 : Matrice multi-scalaire des principaux instruments de gestion des risques côtiers (Hénaff et Philippe, 2014 ; élaboré par Meur-Ferec et Rabuteau)

Comme le mentionnent Hénaff et Philippe en 2014 dans le guide méthodologique pour la gestion des risques d'érosion et de submersion marines, la classification des enjeux dans les textes officiels et notamment dans les Plans de Prévention des Risques Littoraux, est inspirée de la Directive européenne « inondation » de 2007¹. En effet, le guide méthodologique des PPRL (MEDDE, 2014) axe la catégorisation des enjeux essentiellement en fonction de l'aléa submersion marine. L'érosion côtière et la submersion marine sont étroitement liées. Le phénomène de surcote associé à l'action des vagues lors d'un événement tempétueux sont susceptibles de provoquer ou d'aggraver l'érosion côtière, qui pourra à son tour participer à favoriser la submersion de la zone côtière (Dawson *et al.*, 2009 ; Drejza *et al.*, 2014). Pour autant, la classification des enjeux n'est pas de même nature dans les deux cas, notamment vis-à-vis de leur priorité face aux différents aléas.

Au sein de ces documents réglementaires, nous pouvons identifier huit catégories d'enjeux (Hénaff et Philippe, 2014) organisées de la manière suivante selon le guide méthodologique Plans de Préventions des Risques Littoraux (2014) :

- **les enjeux incontournables** avec : (i) le bâti : cet enjeu peut être représenté sous la forme de zone urbanisée (plus ou moins détaillée) ; (ii) les activités économiques ; (iii) les enjeux humains considérés soit comme la population en tant que telle ou bien représentée par les infrastructures qu'elle fréquente ;
- **les enjeux complémentaires** avec : (iv) les milieux naturels, également spatialisés de manière hétérogène en fonction des documents. Cela peut concerner les espaces végétalisés (décrit avec plus ou moins de précision) et/ou les habitats fauniques ; (v) les établissements vulnérables tels que les hôpitaux, les écoles, les maisons de retraite, *etc.*) ; (vi) le patrimoine culturel ; (vii) les réseaux ; (viii) les équipements stratégiques (mairie, gendarmerie, services de secours, casernes militaires, *etc.*).

Selon Hénaff et Philippe (2014), il existe trois familles de méthodes pouvant être mobilisées pour caractériser les enjeux et évaluer leur vulnérabilité (du plus simple au plus complexe) :

- l'Identification : cartographier les enjeux ;
- la Hiérarchisation : établir leur vulnérabilité ;
- l'Évaluation économique : évaluer leur valeur.

La méthode employée dans les PPRL consiste à identifier les enjeux et les localiser, elle correspond par conséquent à la première catégorie.

3.2. Les méthodes de classification des enjeux

Comme évoqué précédemment, on distingue une vulnérabilité sociale et une vulnérabilité physique Fraser *et al.* (2017). La première se définit par la « capacité d'adaptation mise en œuvre pour réduire ou éliminer les effets néfastes de ces aléas sur le système » (Drejza *et*

1 : <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000523817/>

al., 2015). Dès les années 90, ces questions de vulnérabilité socio-économique, de capacité d'adaptation et de réduction de la vulnérabilité commencent à être abordées par Cutter (1996), Klein et Nicholls (1999) puis Boruff *et al.* (2005), et encore plus récemment par Nguyen *et al.* (2016).

La seconde vulnérabilité fait davantage référence au degré d'exposition de l'enjeu à l'aléa. Selon Adger (2006) l'exposition se définit par la nature et le degré de stress environnemental ou sociopolitique. Drejza *et al.* (2015) intègrent la notion d'aléa en définissant l'exposition d'une infrastructure comme la potentialité qu'un enjeu puisse être affecté par cet aléa. Fraser *et al.* (2017) suggèrent de distinguer l'aléa érosion historique de l'aléa érosion instantané lié à une tempête afin d'affiner l'analyse de l'exposition. Ils évaluent ainsi l'exposition des enjeux en mesurant (*i*) la distance entre la structure et le rivage, (*ii*) la vitesse d'évolution du trait de côte la plus probable et (*iii*) l'événement maximal de recul mesuré lors d'une tempête.

Les travaux à l'échelle internationale portent majoritairement sur la vulnérabilité globale des espaces côtiers, et ces derniers sont axés sur les processus physiques, donc sur l'aléa. *A contrario*, il existe peu de travaux sur la caractérisation des enjeux, c'est-à-dire leur fonction, leur spatialisation vis-à-vis de l'aléa, leur rôle ou encore l'impact qu'ils subissent au regard de l'aléa (aggravant, neutre ou atténuant).

Cependant on observe qu'au cours des dernières décennies, les travaux tendent désormais à intégrer progressivement de « nouveaux » paramètres comme celui notamment des enjeux ainsi que la notion de vulnérabilité côtière (Hénaff *et al.*, 2018). C'est dans cette perspective qu'Angignard *et al.* (2013) proposent une classification des différents types de vulnérabilité. Ils distinguent la vulnérabilité physique (qui concerne les dégâts matériels affectant les constructions tels que les bâtiments, infrastructures), environnementale, économique, sociale, sanitaire, culturelle, institutionnelle. Si, comme évoqués précédemment les travaux propres aux enjeux sont encore peu nombreux, les indices de vulnérabilité côtière ont en revanche fait l'objet de nombreuses études. Les premiers travaux menés sur l'analyse de la vulnérabilité de ces espaces, axés principalement sur les caractéristiques physiques, tendent progressivement vers l'intégration de la notion d'enjeux (Hénaff *et al.*, 2018).

3.3. Les indices de vulnérabilité côtière

L'exposition croissante des enjeux incite la communauté scientifique à se questionner sur le niveau de vulnérabilité des littoraux face aux aléas côtiers et aux impacts du changement climatique.

Les approches visant à déterminer la vulnérabilité peuvent aider à identifier et prioriser les secteurs les plus vulnérables, ce qui équivaut à mettre en place une stratégie de surveillance qui peut être utilisée pour planifier des mesures préventives ou adaptatives (Martins *et al.*,

2017). En 2016, Nguyen *et al.* dressent la revue des nombreux travaux réalisés sur les indices de vulnérabilité côtière en montrant les divers aléas susceptibles de toucher les littoraux (sécheresse, feux de forêt, élévation du niveau de la mer, submersion marine liée aux ondes de tempête, ou encore érosion). Ce travail met en évidence le large spectre de variables pouvant être mobilisées pour définir les indices de vulnérabilité côtière tout en alertant le lecteur sur les échelles spatio-temporelles choisies dans chacune des études. La diversité des secteurs (type de côte, emprise spatiale) laisse supposer que les intervalles des variables varieront et par voie de conséquence le degré de vulnérabilité souvent propre à chaque secteur. Cette diversité d'emprise spatiale joue également un rôle sur le type de variable mobilisée : à petite échelle la variable sera plutôt générale, à grande échelle la variable plus précise sera adaptée au site concerné (Juigner, 2017), s'appuyant même parfois sur des mesures de terrain (Nguyen *et al.*, 2016).

Dès la fin des années 1980 Gornitz et Kanciruk (1989) proposent un indice de vulnérabilité dont les variables ont été par la suite très largement reprises dans de nombreuses publications. Cet indice est composé de sept variables : le relief (élévation), la lithologie, le type de côte (des côtes rocheuses aux côtes sableuses), le changement relatif du niveau marin, l'évolution du trait de côte, le marnage moyen et la hauteur maximum des vagues significatives. Ces sept variables doivent être adaptées en fonction des types de côte soit en jouant sur les seuils, soit en ajoutant d'autres variables.. Pour des sites d'études couvrant plusieurs types de côtes des auteurs comme Abuodha et Woodroffe (2010), López Royo *et al.* (2016), Zhu *et al.* (2019) ou Boumpoulis *et al.* (2021), conservent sensiblement les mêmes classifications que Gornitz. Lorsque les travaux portent sur un seul type de côte comme les littoraux sableux, les auteurs tels que Bagdanavičiūtė *et al.* en 2015, Bonetti *et al.* (2018) ou Kantamaneni *et al.* (2018) adaptent leur indice, en modifiant les intervalles de classement de certaines variables. Par ailleurs, si la majorité des auteurs conservent la variable « hauteur significative des houles » ou « hauteur significatives maximum des houles », d'autres choisissent la hauteur moyenne des vagues (Boruff *et al.*, 2005 ; Abuodha et Woodroffe, 2010) ; Bagdanavičiūtė *et al.*, 2015). Cette distinction peut pourtant avoir un impact notable sur l'évaluation de la vulnérabilité côtière.

Enfin, on trouve également dans la littérature scientifique de nouvelles variables visant à affiner les indices de vulnérabilité. Premièrement, ceux intégrant la catégorie « morphologie », avec les hauteurs et/ou largeurs des plages (Granja *et al.*, 2014; Bagdanavičiūtė *et al.*, 2015), des avants dunes (Bonetti *et al.*, 2018) et/ou des dunes (Kantamaneni *et al.*, 2018 ; Rangel-Buitrago *et al.*, 2020). En ce qui concerne la catégorie « hydrodynamique », on observe peu de nouvelles variables depuis le premier modèle de Gornitz (1989). L'angle d'incidence des vagues à la côte (aussi appelé « exposition de la côte aux vagues », « orientation de la côte » ou « exposition aux vagues ») est intégré de plus en plus aux indices de vulnérabilité côtière car il constitue un facteur déterminant pour définir la sensibilité d'une côte sableuse face aux processus hydrodynamiques (Abuodha et Woodroffe, 2010; Sousa *et al.*, 2013 ; Martins et al, 2017, de Andrade *et al.*, 2019).

Si jusqu'ici la majeure partie des indices de vulnérabilité côtière reposent essentiellement sur des critères morphologiques et hydrodynamiques, on constate désormais une intégration croissante de critères socio-économiques. En effet, Boruff *et al.* (2005) proposent un indice de vulnérabilité social (CSoVI) combiné au CVI de Gornitz et Kanciruk (1989). Les variables les plus récurrentes dans la catégorie socio-économique, illustrant le volet humain, sont la densité de population (McLaughlin *et al.*, 2002 ; Lins-de-Barros et Muehe, 2013 ; Kunte *et al.*, 2014 ; Nguyen *et al.*, 2016 ; Martins *et al.*, 2017 ; Awang *et al.*, 2017) et le niveau de revenu (Lins-de-Barros et Muehe, 2013 ; Nguyen *et al.*, 2016 ; Zhu *et al.*, 2019). La densité de population, qui est la variable la plus utilisée dans la catégorie socio-économique, peut révéler selon Kunte *et al.* (2014), des impacts négatifs ou *a contrario* positif de cette population sur l'environnement côtier.

Lins-de-Barros et Muehe (2013), dans l'étude sur la vulnérabilité portant sur la côte Est de l'État de Rio de Janeiro au Brésil, proposent d'utiliser le niveau de revenu en expliquant sa pertinence. Il conclut que la cartographie du revenu mensuel moyen montre la grande variabilité du statut économique de la population du front de mer et en déduit son niveau de capacité financière à faire face aux catastrophes. Par conséquent, l'auteur intègre le paramètre de résilience à son indice. De même, selon Zhu *et al.* (2019), le revenu fiscal (PIB/habitant) illustre la capacité d'une population à réduire les catastrophes sociales et économiques dues à l'érosion côtière. Concernant les biens immobiliers, les routes peuvent être qualifiées par leur absence ou leur présence (McLaughlin *et al.*, 2002) ou bien par leur valeur relative (Zhu *et al.*, 2019). D'autres variables sont également utilisées telles que le type de construction, l'activité de la population, la densité de touristes, ou encore l'héritage culturel (McLaughlin *et al.*, 2002 ; Lins-de-Barros et Muehe, 2013 ; Kunte *et al.*, 2014 ; Martins *et al.*, 2017 ; Zhu *et al.*, 2019).

L'indice de vulnérabilité est communément défini comme la racine carrée du produit des variables divisé par le nombre de variables. Cependant, certains scientifiques proposent des variantes – outre le choix des variables – en suggérant une pondération des variables. Les méthodes de pondération, également appelées méthodes de classement, expriment la contribution et le poids relatif des variables individuelles dans le système d'évaluation (Nguyen, 2016). Cependant, tous les auteurs ne choisissent pas d'appliquer une pondération, ne posant pas d'hypothèse *a priori* quant à l'importance de chaque variable et considérant ainsi qu'elles peuvent apporter une contribution égale à la vulnérabilité globale (Abuodha et Woodroffe, 2010). Pourtant, la pondération permet d'éviter la surestimation ou la sous-estimation de l'influence des variables sur la vulnérabilité. Elle nécessite une connaissance approfondie des processus en jeu sur le site étudié. Ainsi, l'Analytical Hierarchical Process (AHP) est largement utilisé afin de définir le poids des facteurs dans les changements du trait de côte (Yin *et al.*, 2012 ; Bagdanavičiūtė *et al.*, 2015 ; Awang *et al.*, 2017 ; Bonetti *et al.*, 2018). Mais cette méthode nécessite l'intervention de dire d'« expert ». D'autres études, plus rares emploient des méthodes statistiques comme la régression linéaire multiple (Boruff *et al.*, 2005) pour évaluer le poids des variables dans la vulnérabilité de l'espace côtier, permettant de tendre vers une approche plus objective.

4. Conclusion

Les définitions des termes du sujet, abordées dans un premier temps, sont fondamentales pour inscrire ces travaux dans un cadre scientifique robuste. Les éléments de compréhension de l'aléa érosion sont présentés à travers (i) les notions de processus et résultante et (ii) les méthodes de mesure et d'estimation de l'aléa, montre la complexité liée à ces démarches. En effet, il apparaît que la méthode employée et par conséquent les résultats, sont fortement dépendants de la donnée. La disponibilité, la résolution spatiale ou encore la résolution temporelle de la donnée peuvent impacter les choix méthodologiques. Cependant, il s'agit d'une contrainte qui tend à s'effacer en raison notamment des développements technologiques grandissants des moyens d'acquisition de données.

Enfin, la présentation des travaux menés sur les enjeux côtiers révèlent la nécessité de bien maîtriser l'ensemble des éléments inhérents à l'aléa avant d'étudier les enjeux. Cette partie met également en évidence que les travaux sur les enjeux côtiers demeurent moins fournis que ceux menés sur les aléas. C'est davantage à travers les indices de vulnérabilité côtière que s'exprime la recherche sur la sensibilité et l'exposition des enjeux humains et environnementaux à l'aléa érosion.

Le chapitre suivant est destiné à présenter les caractéristiques générales du secteur d'étude en recensant les connaissances et travaux menés autour des problématiques soulevées en introduction et d'en déduire les éléments qu'il reste à approfondir.

Chapitre 2

Présentation du secteur d'étude

1. Présentation physique du secteur d'étude

1.1. Caractéristiques géomorphologiques et hydrodynamiques du littoral des Pays de la Loire

1.1.1. Types de côtes en région

Le littoral de la région Pays de la Loire s'étend sur près de 400 km entre la baie de Pont Mahé au Nord et la baie de l'Aiguillon au Sud (Figure 1). Il est composé de trois grands types de côtes : les côtes rocheuses (111 km) ; les zones côtières basses et les dunes protégées par des ouvrages de défense contre la mer (135 km dont 49 km d'ouvrages de défense contre la mer adossés aux dunes) ; les dunes littorales naturelles (120 km) (Robin *et al.*, 2019).

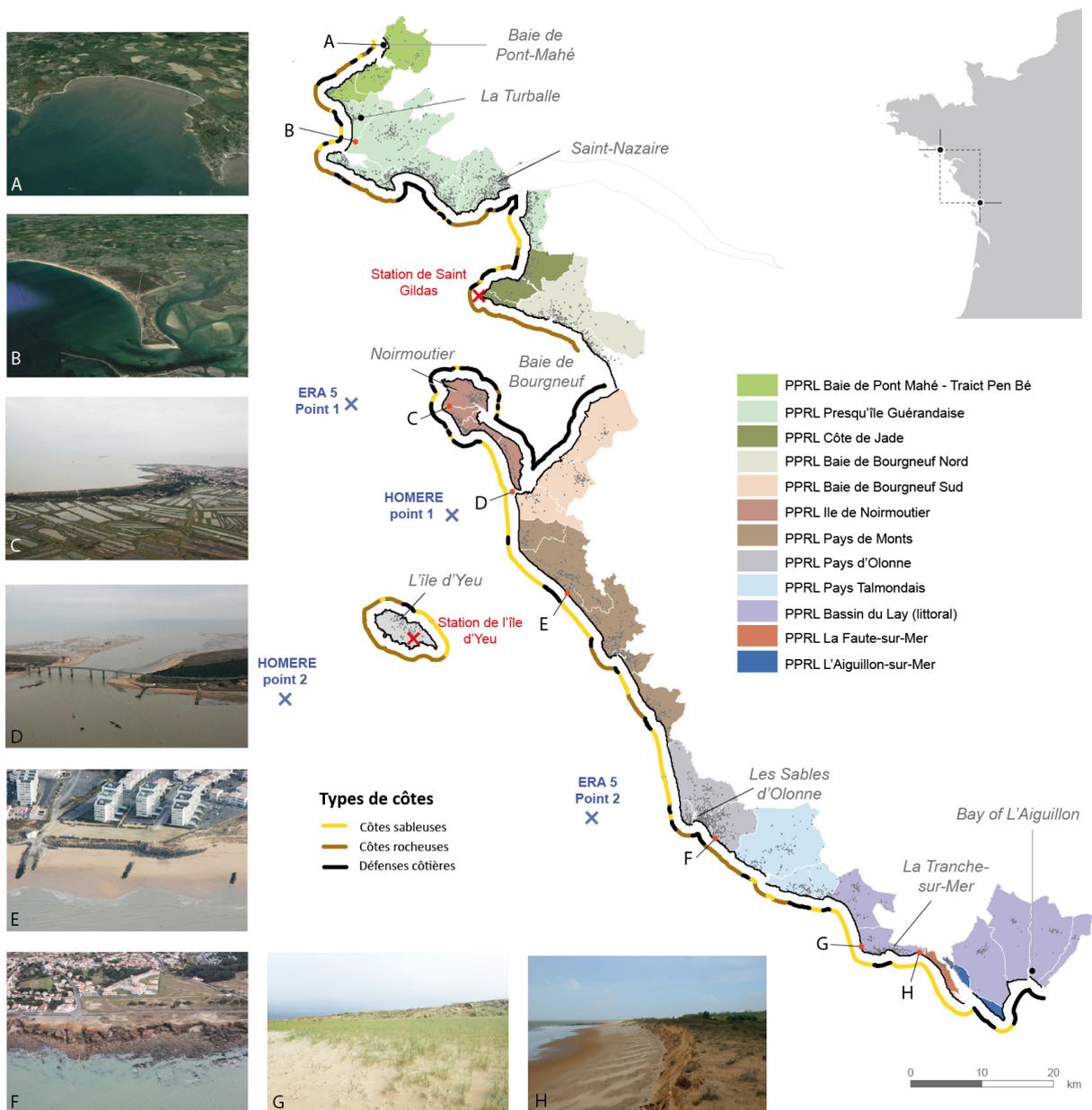


Figure 1 : Localisation du secteur d'étude



En ce qui concerne les ouvrages de protection, Kerguilic *et al.* (2019) (Annexe 1) distinguent les ouvrages transversaux tels que les épis (Figure 2-a, 2-b) et longitudinaux tels que les brise-lames, perrés, murs, enrochements, remblais (Figure 2-c) et les ouvrages de protection contre la submersion marine telles que les digues (Figure 2-d).

Figure 2 : Types d'artificialisation de littoraux sableux

1.1.2. Côtes sableuses dunaires

Dans le cadre de nos travaux, les espaces sur lesquels nous portons notre intérêt sont les systèmes plage-dune. Les plages en pied de falaise et en pied de remblai ne sont pas intégrées à cette étude.

De plus, notre analyse de l'aléa érosion se concentre essentiellement sur la zone d'impact de la mer (Figure 3), c'est-à-dire jusqu'au pied de la dune blanche. Nous verrons dans les prochains chapitres que lorsque la partie dunaire est intégrée à l'analyse des processus côtiers, c'est à travers son rôle de réservoir sédimentaire.

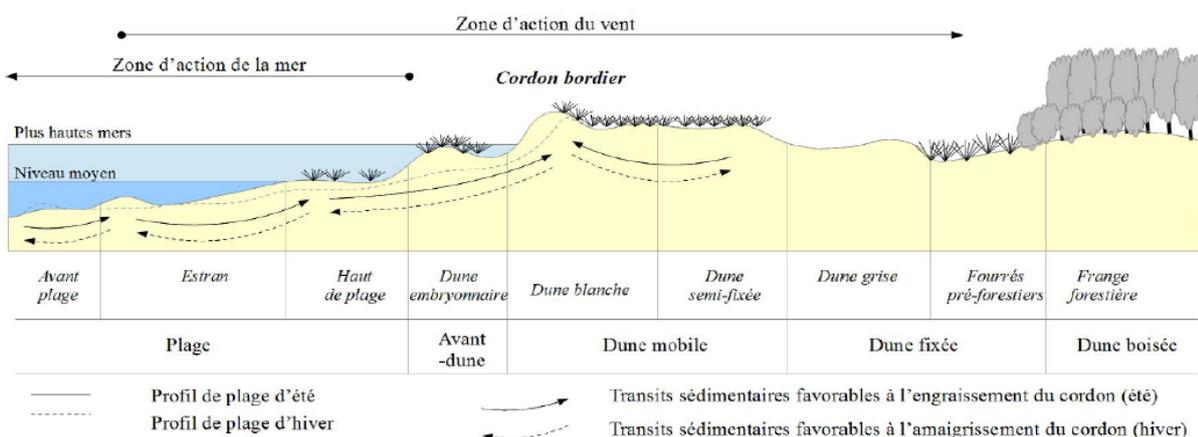


Figure 3 : Structure et dynamique d'un système plage-dune (Roche *et al.*, 2015)

Selon Juigner et Robin (2018), les massifs dunaires, hors dunes perchées, représentent environ 140 km en région Pays de la Loire. Ces espaces font l'objet d'une large description au sein des travaux de Barrière (1999), Dupont (2005) et Juigner (2017). L'appréhension des processus côtiers sur les côtes sableuses dépend entre autres des caractéristiques morphologiques des plages. La classification des plages (Figure 4) via les indices ζb et ϵ montre que

ces plages sont de type intermédiaire. Cependant, ces deux indices basés sur la pente de plage ne tiennent pas compte de l'amplitude des marées. Afin d'intégrer l'action des marées, les indices morphodynamiques Ω et RTR sont calculés. Dès lors que l'indice RTR est supérieur à 3, on considère que la marée a un effet significative sur la morphologie des plages. Ces deux indices révèlent que les plages vendéennes sont de type « low tide bar and rip », c'est à dire des plages caractérisées, entre autres, par la présence de barres sous-marines liées à l'action des marées, ou « ultra-dissipative » dont le profil est particulièrement plat et sans relief.

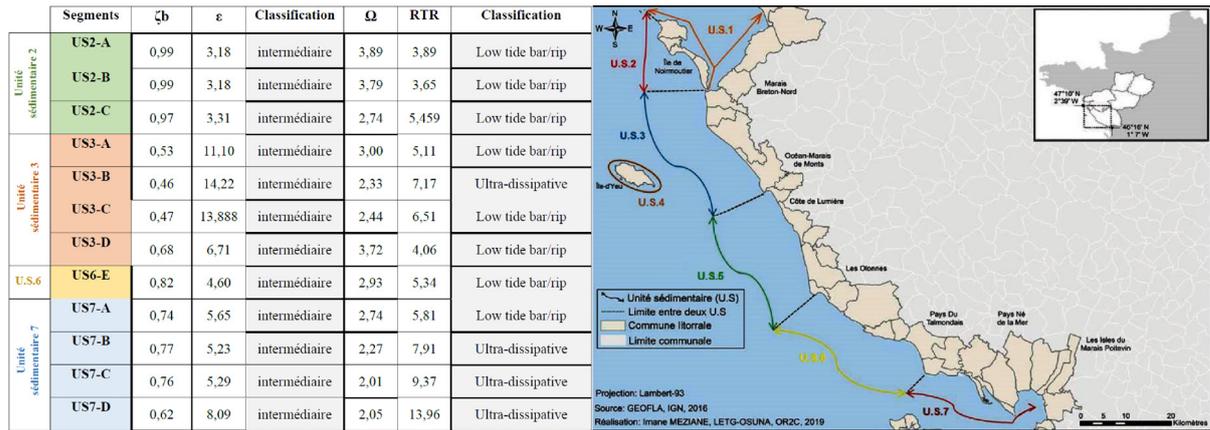


Figure 4 : Classification des plages en Vendée (source : Meziane, 2019).

1.2. Les conditions météo-marines

1.2.1. Marée

En Pays de la Loire, la marée est de type semi-diurne, caractérisée par deux pleines mers par jour (Figure 5). L'amplitude de la marée est de 2,3 m en période de mortes-eaux, de 4,80 m en période de vives-eaux pouvant atteindre 6,3 m lors des plus fortes marées astronomiques (PHMA) au marégraphe de Saint Gildas (Vendée), et respectivement 2,45 m, 5 m et 6,61 m au marégraphe de Saint Nazaire (Loire-Atlantique) (Figure 5, Tableau 1). Dès lors que le marnage excède 4 m, nous sommes dans un environnement macrotidal (Davies, 1964).

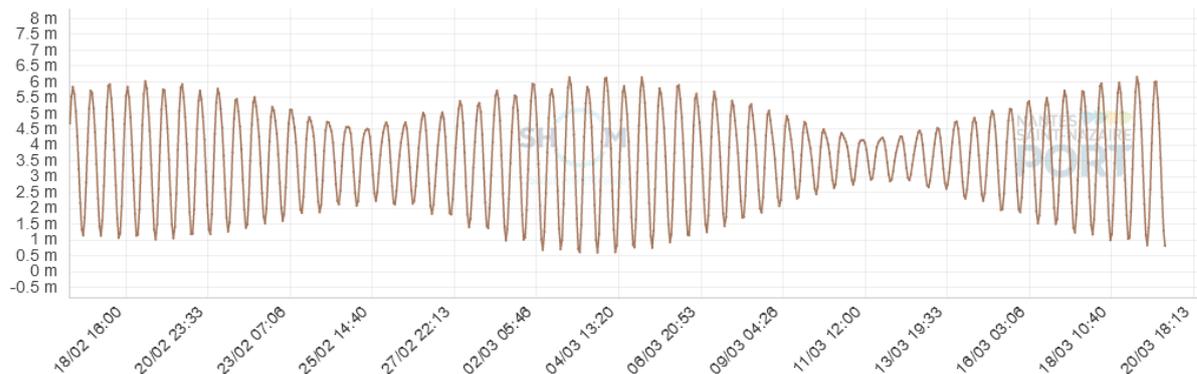


Figure 5 : Marées prédites au port de Saint Nazaire (SHOM, 2022)

Tableau 1 : Cotes des niveaux marins (en m) sur quatre observatoires des marées en Pays de la Loire. Références altimétriques du SHOM (2017)

Ports	PHMA	PMVE	PMME	NM	BMME	BMVE	PBMA	Marnage vives-eaux
Saint-Nazaire	06,59	05,85	04,65	0,57	00,20	00,85	-00,02	06,61
Pointe Saint Gildas	06,33	05,65	04,50	03,44	02,15	00,85	00,06	06,27
Bouée de Fromentine	05,85	05,15	04,15	03,17	02,00	00,75	00,01	05,84
Les Sables d'Olonne	05,93	05,20	04,20	03,20	02,05	00,75	-00,02	05,95

1.2.2. Les vagues

Il existe plusieurs sources de données pour analyser les caractéristiques des vagues, chacune d'entre elles étant issues de mesures *in situ* ou de simulations de réanalyses (Le Mauff, 2018). Les premiers travaux destinés à décrire et analyser le climat de vagues aux abords de notre secteur d'étude sont menés par Butel *et al.* (2002). Cette étude s'appuie sur les données mesurées *in situ* par une bouée située à environ 4 km au SO de l'île d'Yeu (46,691° Nord, 2,4275° Ouest) à 33 m de profondeur et sur une période qui s'étend du 24 juillet 1998 au 15 janvier 1999. Les paramètres exploités sont les hauteurs significatives des vagues, les périodes moyennes des vagues et leur direction moyenne, ceci à une fréquence temporelle tri-horaire voire horaire en cas de tempête.

Les analyses révèlent que sur cette période, la hauteur significative des vagues (H_s) s'élèvent à 1,81 m en moyenne, avec un minimum à 0,22 m en été et atteignant un maximum de 8,88 m en période automnale. On observe une valeur maximum moins importante en hiver (6,3 m). En revanche les hauteurs moyennes sont similaires : de l'ordre de 2,15 m en hiver et 2,16 m en automne. La période moyenne annuelle des vagues est de 5,89 s, le maximum atteignant 12,1 s en hiver. Enfin, elles proviennent majoritairement du secteur ONO, mais les vagues les plus hautes proviennent en revanche du secteur OSO

En France, le CEREMA gère des bouées dites CANDHIS (Centre d'Archivage National des Données de Houles *In situ*) dans le domaine proche côtier et a produit un rapport d'analyse des données en 2022 intitulé « Candhis : analyses 2002 des états de mer. tome 1 - Mer du nord, Manche et Atlantique » (Kergadallan *et al.*, 2022). Les campagnes réalisées au large des côtes de la région Pays de la Loire sont présentées dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Campagnes de mesure des états de mer au large du littoral de la région Pays de la Loire.

Id	Dates de la campagne	Profondeur (m)	Localisation
08501	15/09/1992 - 10/06/1998	47	46°40,000' N
			02°25,000' O
08502	06/06/1998 - 03/02/2000	32	46°41,450' N
			02°25,650' O
08503	31/07/2000 - 21/01/2005	32	46°41,450' N
			02°25,650' O
08504	21/06/2005 - 30/04/2022	14	46°49,993' N
			02°17,700' O
04401	02/06/1999 - 31/12/2006	17	47°09,200' N
			02°20,300' O
04402	03/04/2003 - 02/07/2003	17	47°23,800' N
			02°40,600' O
04403	01/04/2008 - 30/04/2022	30	47°14,340' N
			02°47,220' O

Les données d'observation sont toutefois souvent discontinues dans le temps et sont également assez récentes. Les méthodes de réanalyse peuvent alors pallier ces problématiques en offrant une donnée continue et disponible sur de grandes plages temporelles. Parmi les bases de données de réanalyse, celle d'HOMERE est une réanalyse d'états de mer, simulée par l'Ifremer à l'aide du modèle WAVEWATCH III dans le cadre du projet MARC (Modélisation et Analyse pour la Recherche Côtière) (Boudière *et al.*, 2013) couvrant la Manche et le Golfe de Gascogne de 1994 à 2012 (Le Mauff, 2018).

Une autre base de données de réanalyse, ERA5, fournit des estimations horaire, et ce dès 1950, d'un grand nombre de variables climatiques atmosphériques, terrestres et océaniques. Celles-ci reposent sur de grandes quantités d'observations historiques traitées par des systèmes avancés de modélisation et d'assimilation de données (ECMWF). Dans le cadre de nos travaux, la base de données ERA5 a été retenue. Deux points au plus proche de la côte ont été extraits (Figure 1), dont un situé à 15 km à l'Ouest de l'île de Noirmoutier et l'autre à 15 km à l'Ouest des Sables d'Olonne.

Entre 1950 et 2022, au large de Noirmoutier, les houles sont essentiellement caractérisées par des directions de secteur O (39,5%) puis, de façon moins significative, du secteur ONO (23%) et du secteur OSO (15,2%) (Figure 6). Ce sont les houles de secteurs O qui caractérisent les saisons hivernales (40,4%), les houles les plus fortes provenant des secteurs O et OSO. Au large du littoral des Sables d'Olonne, les houles sont principalement partagées entre les secteurs O (35,7%) et ONO (32,8%) entre 1950 et 2022 (Figure 6). Lors des sai-

sons hivernales, la majorité des houles sont de secteur O (36,8%) et ONO (28,5%). Les hauteurs de houles significatives les plus importantes proviennent du secteur O et OSO.

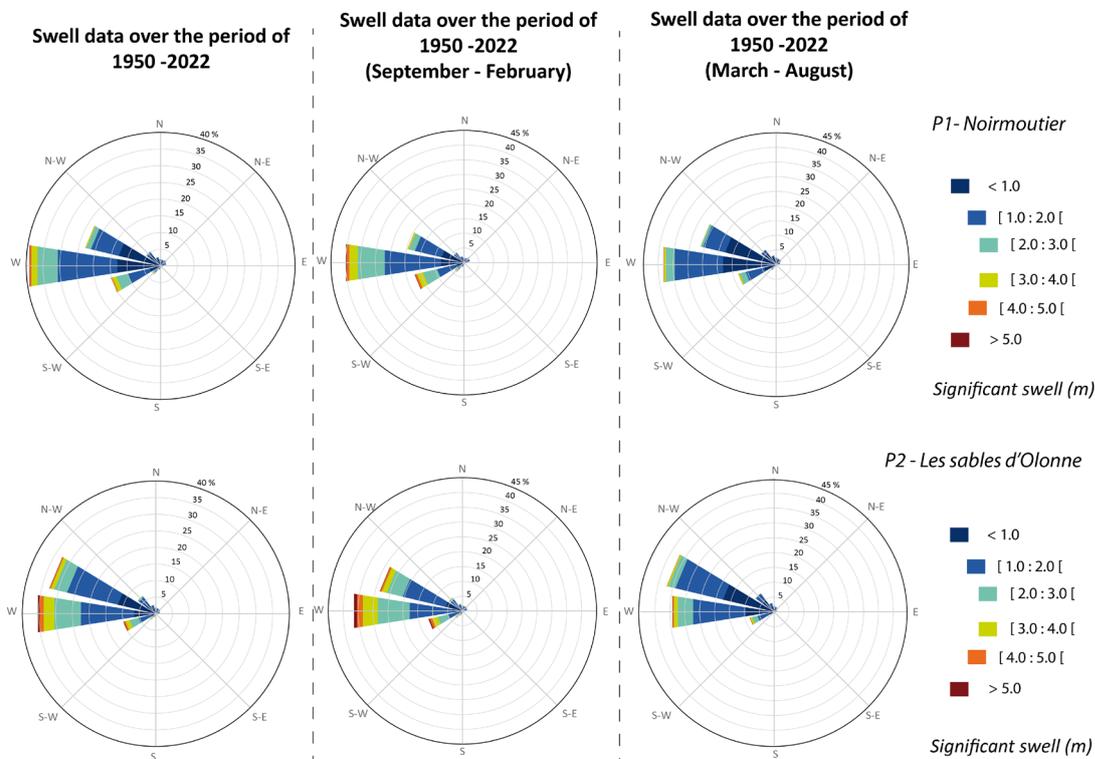


Figure 6 : Pourcentage et direction des houles sur la période 1950-2022 (Source : ERA5)

1.2.3. Le vent

Afin de décrire les conditions de vent en région sur une longue période, les données de réanalyse ERA5 sont également utilisées.

Pour les deux points d'extraction, les caractéristiques de vent sont similaires. Entre 1950 et 2022, 44% des vents sont répartis entre le secteur NO et SO au large de Noirmoutier, et 48% au large des Sables d'Olonne (Figure 7). On retrouve également une tendance au secteur NE, mais les vents les plus forts proviennent essentiellement de l'OSO et du SO. A noter enfin que la tendance des vitesses de vent est stable depuis 1950.

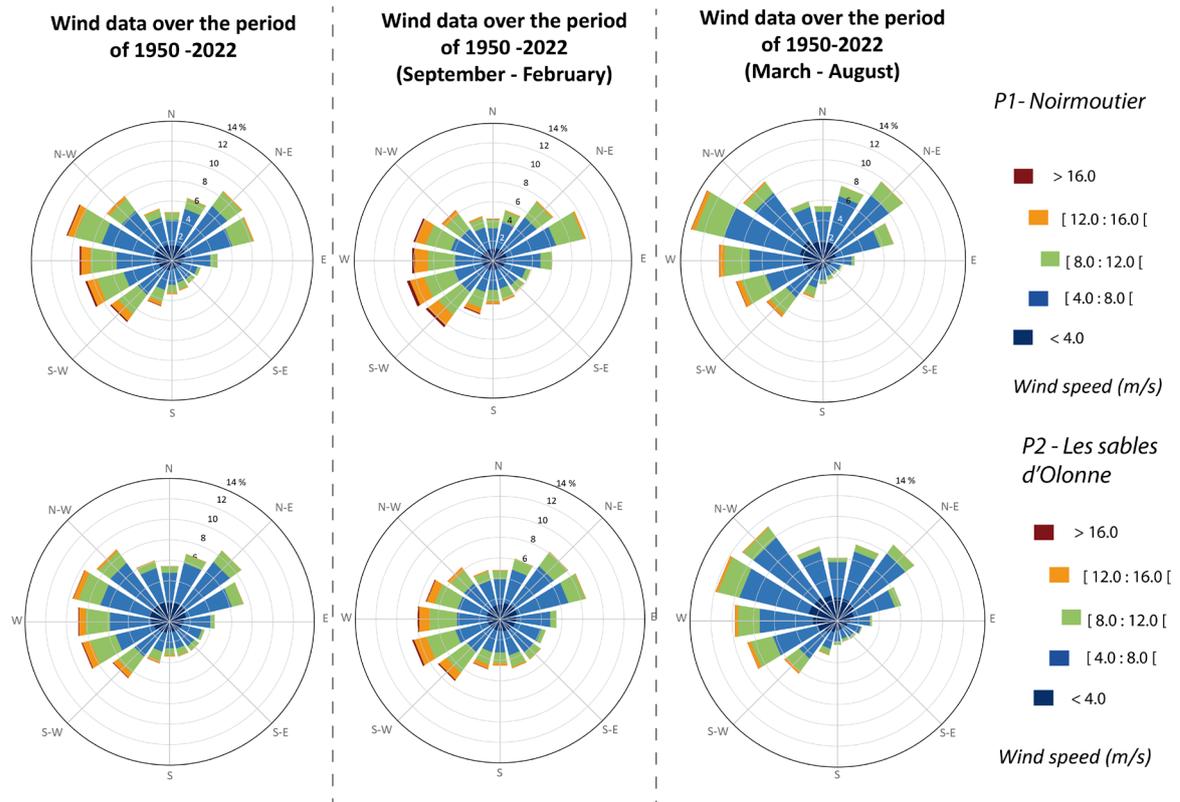


Figure 7 : Pourcentage et direction des vents sur la période 1950-2022 (Source : ERA5)

1.2.4. Les tempêtes répertoriées par Météo-France en région Pays de la Loire

Les critères utilisés pour définir une tempête selon Météo-France permettent de dresser un historique de celles-ci en région Pays de la Loire, depuis 1980 (Figure 5 et Tableau 1). Le critère de détection d'une tempête pour Météo-France repose sur une surface impactée supérieure à 2% du territoire sur lequel les vents maximums instantanés quotidiens doivent dépasser à la fois le seuil de 100 km/h et le percentile 98 local (Soubeyroux *et al.*, 2017). La durée des tempêtes, présentée dans ce tableau, est donc relative à ce critère. L'heure de début (et de fin) de la tempête est fixée au moment durant lequel plus (moins) de 1 % du territoire est touché au cours des trois dernières heures (Soubeyroux *et al.*, 2017). Cependant, il faut souligner que cette durée (horaires) correspond au territoire national car « non applicable à des échelles infra-nationales » (Météo-France). Les vitesses de vent maximales quotidiennes se présentent sous la forme d'intervalles et correspondent aux valeurs enregistrées sur l'ensemble de la région, si bien que les maximums ne correspondent pas toujours à ceux de la partie littorale.

Nom de la tempête	Date	Durée (h)	Vitesse de vent maximale quotidienne
-------------------	------	-----------	--------------------------------------

Tableau 3 : Inventaire des tempêtes caractérisées par des vents supérieurs à 120 km/h depuis 1982 (Source : Météo France)

-	07/11/1982	55	140 km/h - 160 km/h
-	10/12/1982	27	> 160 km/h
-	15/10/1983	8	120 km/h - 140 km/h
-	23/01/1984	33	120 km/h - 140 km/h
-	23/11/1984	18	120 km/h - 140 km/h
	1985		
-	24/03/1986	15	140 km/h - 160 km/h
-	19/12/1986	29	120 km/h - 140 km/h
-	08/10/1987	6	120 km/h - 140 km/h
«L'Ouragan»	16/10/1987	27	140 km/h - 160 km/h
-	12/11/1987	7	120 km/h - 140 km/h
-	02/01/1988	13	120 km/h - 140 km/h
-	03/01/1988	17	120 km/h - 140 km/h
-	22/01/1988	17	120 km/h - 140 km/h
-	30/01/1988	10	120 km/h - 140 km/h
-	01/02/1988	7	120 km/h - 140 km/h
-	04/02/1988	10	120 km/h - 140 km/h
-	10/02/1988	45	140 km/h - 160 km/h
-	25/02/1989	23	140 km/h - 160 km/h
-	14/12/1989	5	120 km/h - 140 km/h
-	17/12/1989	33	120 km/h - 140 km/h
Daria	25/01/1990	17	120 km/h - 140 km/h
-	31/01/1990	11	120 km/h - 140 km/h
Herta	03/02/1990	18	140 km/h - 160 km/h
-	02/11/1990	20	120 km/h - 140 km/h
-	13/02/1990	26	120 km/h - 140 km/h
-	27/02/1990	50	120 km/h - 140 km/h
	1991		
-	12/03/1992	7	120 km/h - 140 km/h
-	12/04/1992	9	120 km/h - 140 km/h
-	13/09/1993	18	140 km/h - 160 km/h
-	04/01/1994	12	120 km/h - 140 km/h
-	22/01/1995	19	120 km/h - 140 km/h
-	09/07/1995	9	120 km/h - 140 km/h
-	07/02/1996	30	140 km/h - 160 km/h
	1997		
-	01/02/1998	8	120 km/h - 140 km/h
-	01/04/1998	16	120 km/h - 140 km/h
-	13/01/1998	9	120 km/h - 140 km/h

-	19/01/1998	11	120 km/h - 140 km/h
-	12/12/1999	14	120 km/h - 140 km/h
Lothar	26/12/1999	22	> 160 km/h
Martin	27-28/12/1999	28	> 160 km/h
Oratia	30/10/2000	13	120 km/h - 140 km/h
	2001		
-	02/03/2002	4	120 km/h - 140 km/h
-	13/11/2002	7	120 km/h - 140 km/h
Calvann	02/01/2003	14	120 km/h - 140 km/h
	2004		
	2005		
-	23/10/2006	7	120 km/h - 140 km/h
Véra	08/12/2006	12	120 km/h - 140 km/h
	2007		
Johanna	03/10/2008	18	120 km/h - 140 km/h
Quinten	10/02/2009	17	140 km/h - 160 km/h
-	26/02/2010	9	120 km/h - 140 km/h
Xynthia	28/02/2010	27	140 km/h - 160 km/h
-	14/12/2011	4	120 km/h - 140 km/h
Joachim	16/12/2011	32	140 km/h - 160 km/h
	2012		
Dirk	24/12/2013	36	120 km/h - 140 km/h
Qumaira	07/02/2014	15	120 km/h - 140 km/h
Tini	13/02/2014	11	120 km/h - 140 km/h
	2015		
Suzanna	09/02/2016	14	120 km/h - 140 km/h
Ulrika	13/02/2016	11	120 km/h - 140 km/h
Egon	12/01/2017	14	120 km/h - 140 km/h
Kurt	03/02/2017	6	120 km/h - 140 km/h
Leiv	04/02/2017	14	120 km/h - 140 km/h
Zeus	06/03/2017	24	140 km/h - 160 km/h
Ana	12/11/2017	17	140 km/h - 160 km/h
Carmen	01/01/2018	18	120 km/h - 140 km/h
Eleonor	01/03/2018	44	120 km/h - 140 km/h
Gabriel	29/01/2019	10	120 km/h - 140 km/h
Freya	04/03/2019	15	120 km/h - 140 km/h
Amelie	11/03/2019	15	120 km/h - 140 km/h
-	13/12/2019	40	120 km/h - 140 km/h
Fabien	22/12/2019	33	120 km/h - 140 km/h
Dennis	16/02/2020	15	120 km/h - 140 km/h

Alex	02/10/2020	6	140 km/h - 160 km/h
Bella	27/12/2020	8	120 km/h - 140 km/h
	2021		

....

Ce tableau montre que quelques années sont caractérisées par des conditions météorologiques plus énergétiques, notamment en 1988 (7 tempêtes), 1990 (6 tempêtes), 1998 et 2017 (5 tempêtes). On observe également quelques années sans tempêtes : 1985, 1991, 1997, 2001, 2004, 2005, 2007, 2012, 2015 et 2021.

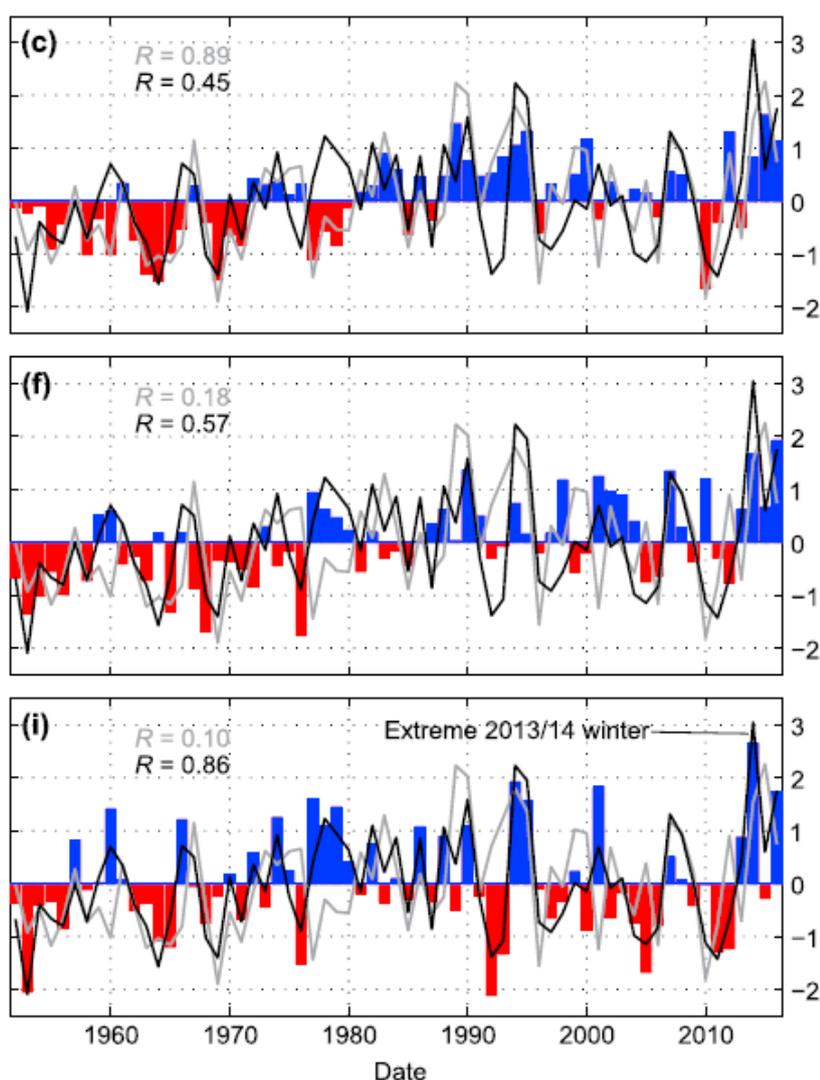


Figure 8 : Séries temporelles des indices correspondants avec superposition de Hs normalisés en moyenne hivernale simulés aux bouées SC (Ecosse, noir) et BI (Gascogne, gris) avec le coefficient de corrélation correspondant (Castelle *et al.*, 2017)

Depuis quelques années, certains auteurs tentent d'expliquer l'activité morphogène des côtes en s'appuyant sur l'analyse d'indices climatiques (Rangel-Buitrago et Anfuso, 2013 ; Anfuso *et al.*, 2016 ; Castelle *et al.*, 2017 ; Stéphan *et al.*, 2018). Les travaux menés par Castelle *et al.* (2017) tendent à démontrer la relative influence de l'Oscillation Nord Atlantique dont le gradient de pression est mesuré entre Lisbonne (Portugal) et Reykjavik (Irlande), sur les conditions de houle dans le Golfe de Gascogne par rapport à celle de l'indice WEPA basé sur le gradient de pression entre les stations Valentia (Irlande) et Santa Cruz de Tenerife (îles Canaries). En effet l'indice de corrélation varie respectivement de 0,45 à 0,89 pour la bouée située au sud du Golfe de Gascogne (Figure 8). Si la compréhension de l'origine et de la fréquence des tempêtes, et plus largement des événements morphogènes, est un point essentiel dans l'étude des aléas littoraux, l'estimation de leur période de retour, abordée dans la section suivante, prend également tout son sens dans un contexte de gestion intégrée du trait de côte.

1.2.5. Période de retour d'évènements extrêmes en région

Les travaux de Feuillet *et al.* (2012) nous permettent d'approfondir les caractéristiques des tempêtes en région Pays de la Loire à travers l'étude de deux stations Météo-France : Montoir-de-Bretagne (44) et l'île d'Yeu (85). Dans leurs travaux, ils s'intéressent à l'analyse des concomitances de facteurs et à leur période de retour en associant « les données de tempête avec l'occurrence de pleine mer lors de fortes marées astronomiques » et en estimant « des temps de retour de cette conjonction d'éléments à partir de lois de probabilité conditionnelle ».

A Montoir, entre 1957 et 2009, il n'a été observé que 13 jours pendant lesquels le vent est supérieur à 118,8 km/h (catégorie ouragan), soit 0,24 j/an alors qu'à la station de l'île d'Yeu sur la période 1959-2010, on compte 142 jours (soit 2,73 j/an) (Tableau 4).

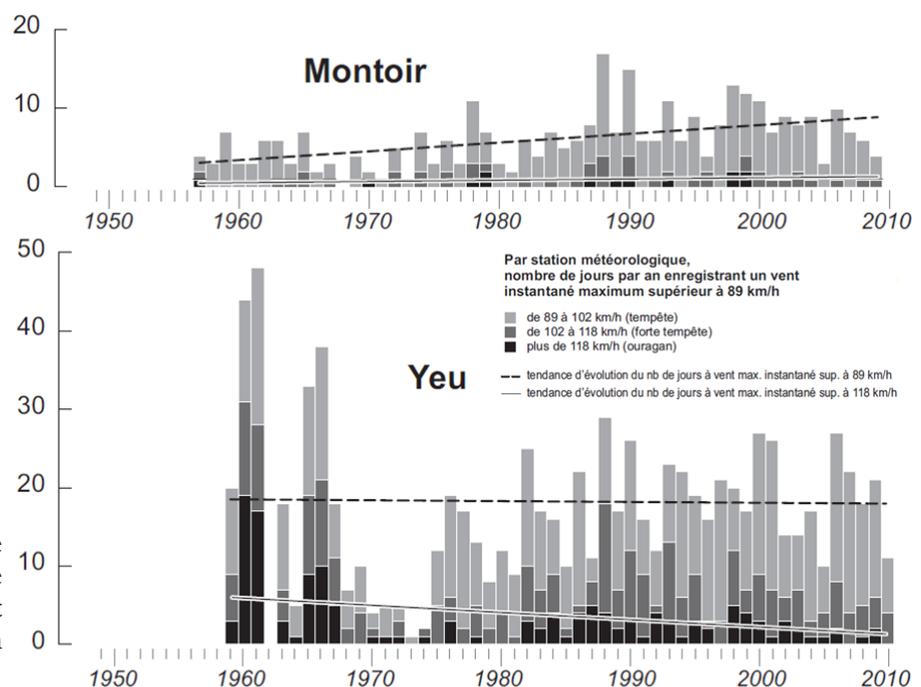


Figure 9 : Inventaire des jours de tempête pour neuf stations de la façade atlantique et tendances d'évolution (Feuillet *et al.*, 2012).

Tableau 4 : Analyse fréquentielle des événements de vent supérieur à 118,8 km/h associés à un coefficient de marée supérieur ou égal à 80 et 100 et à la pleine mer sur les neuf stations de la façade atlantique française (Feuillet *et al.*, 2012)

	Nombre de jours à vent maximum instantané (VMI) > ou = à 118,8 km/h	Nombre de jours à vent maximum instantané (VMI) > ou = à 118,8 km/h et coefficient de marée > ou = à 80	Nombre de jours à vent maximum instantané (VMI) > ou = à 118,8 km/h et coefficient de marée > ou = à 100
Montoir (1957-2009)	13	5	0
Yeu (1959-2010)	142	61	12
	Situations caractérisées ord des VMI > ou = à 118,8 km/h, des coefficients de marée > ou = à 80 et une différence horaire entre vent maximum et pleine mer inférieure ou égale à trois heures	Situations caractérisées ord des VMI > ou = à 118,8 km/h, des coefficients de marée > ou = à 100 et une différence horaire entre vent maximum et pleine mer inférieure ou égale à trois heures	
Montoir (1984-2009)	1	0	
Yeu (1984-2010)	13	2 (1984, 2008)	

Lorsqu'on observe l'inventaire des jours de tempête pour neuf stations de la façade atlantique et leurs tendances d'évolution (Feuillet *et al.*, 2012), ces dernières diffèrent entre la station de Montoir et celle de l'île d'Yeu. Pour la première l'évolution est positive lorsqu'il s'agit des vents supérieurs à 118 km/h, alors qu'*a contrario* pour l'île d'Yeu celle-ci est légèrement négative. De même, la tendance d'évolution du nombre de jours où les vitesses de vent sont comprises entre 89 et 102 km/h est quasi nulle pour Montoir et négative pour l'île d'Yeu (Figure 9). Ainsi, sur la période 1984-2009/2010, la station de Montoir n'enregistre pas de tempêtes marquantes comme celle de Xynthia survenue plus tardivement, alors qu'à l'île d'Yeu les tempêtes de novembre 1984 et mars 2008 sont passées au moment d'une pleine mer de vives-eaux. Ces résultats, comme le soulignent les auteurs sont à moduler du fait que la station de l'île d'Yeu, comme la plupart des îles, est soumise à une plus grande exposition aux fortes conditions météorologiques.

2. L'occupation du sol

2.1. Les données mobilisables pour l'identification des enjeux

Dans les Plans de Prévention de Risques Littoraux, élaborés à partir des Guides méthodologiques de 1997 ou de 2014, l'identification des enjeux repose sur les cartes topographiques fournies par l'IGN à 1/25 000 voire 1/10 000 (Hénaff et Philippe, 2014). Mais on peut noter que ces cartes, pourtant très complètes, ne permettent pas d'avoir une vision exhaustive des enjeux.

Depuis l'ouverture des données publiques, l'identification des enjeux tend à s'appuyer sur les cartographies d'occupation du sol, qui s'avèrent nombreuses en fonction du type d'enjeu mais sont parfois insuffisantes. Ainsi, CORINE Land Cover qui est un référentiel européen qui permet de décrire l'occupation du sol à l'échelle nationale, mais a une échelle de restitution de seulement 1/100 000 qui ne la rend pas pertinente pour la description des enjeux littoraux. L'Inventaire permanent du littoral (Ipli) a une échelle de restitution plus fine, de 1/25 000. Par ailleurs, la BD MOS (Modes d'Occupation du Sol) est plus précise (1/5 000) mais la dernière mise à jour en région Pays de la Loire remonte à 2016. La base de données TERUTI LUCAS a pour objectif de suivre l'évolution de l'occupation et de l'usage du sol à l'échelle nationale. La donnée, acquise par des enquêteurs se déplaçant sur des points d'observation prédéterminés, est ensuite extrapolée statistiquement aux différentes échelles de restitution. Enfin, l'OCS GE (occupation et usage du sol à grande échelle) constituée d'une base de donnée vectorielle, présente une échelle de restitution allant jusqu'à 1/2 500. Elle rassemble actuellement les données suivantes :

- BD TOPO pour les éléments structurants (bâti, réseaux routiers, ferré, hydrographique) qui permettent en particulier de définir une ossature partitionnant le territoire (routes principales et réseau ferré non souterrain) ;
- BD Forêt pour les zones arborées ;
- RPG (Registre Parcellaire Graphique) pour des classes agricoles.

L'OCS GE apparaît donc comme une base de données pertinente pour l'identification à haute résolution des enjeux côtiers.

2.2. Les espaces artificialisés

Le littoral, de manière générale, est soumis à une pression humaine croissante du fait de son attractivité (opportunités économiques, valeur esthétique). Selon Zaninetti (2006), en 1936 le littoral était l'espace le plus urbanisé du territoire français et recensait déjà 10% de la population totale. En région Pays de la Loire en 2011, le taux d'artificialisation des communes littorales est de 18% .

En Loire-Atlantique, selon Chupin et Pottier (2012), le premier facteur de l'urbanisation tient aux premiers bains de mer et à l'arrivée du chemin de fer sur les côtes du département au début du 19^{ème} siècle. Le deuxième facteur de cette urbanisation littorale est lié aux

congrès payés et à l'essor de l'automobile. Ces éléments déclencheurs amplifient à la fois les activités touristiques (implantation de campings, activités de loisirs et de résidences secondaires) ainsi que le développement massif des résidences permanentes.

En 1962, le littoral (communes littorales et rétro-littorales) de la Loire-Atlantique (soit 6,5% de la surface du département), concentrait déjà 21% des logements du département. Les secteurs géographiques définis par Pottier (2007) (Figure 10), voient leur nombre de logements construits doubler, voire tripler entre 1962 et 2005. Et en 60 ans (1936-1999), la population a été multipliée par 1,84 contre 1,72 dans l'ensemble du département. Cette étude montre enfin qu'avec près de 25% d'occupation urbaine du sol en 1999, le littoral de Loire-Atlantique est le 4ème littoral départemental urbanisé de France derrière les Alpes maritimes avec 53%, le Nord 45 % et les Pyrénées Atlantiques 38%.

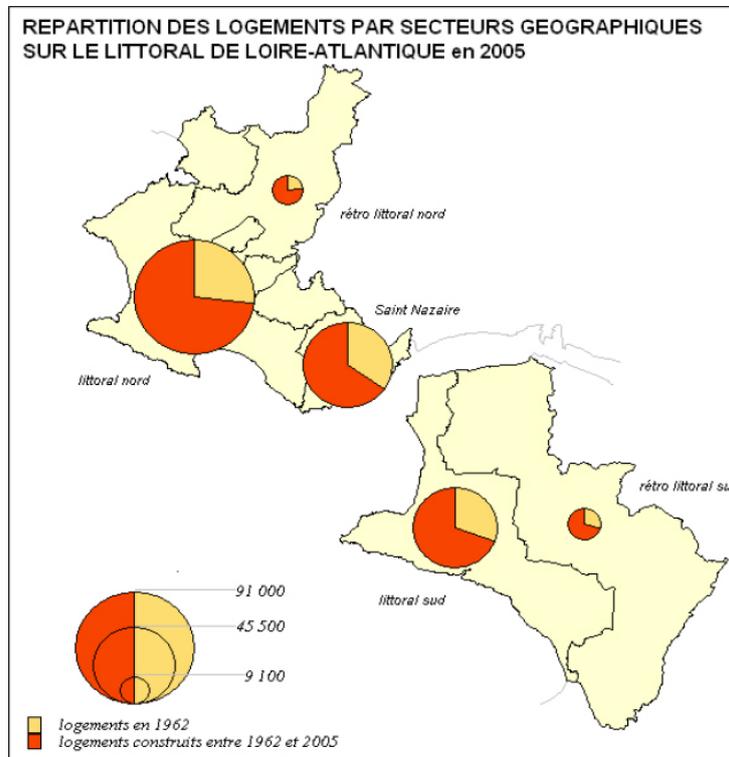


Figure 10 : Répartition des logements par secteurs géographiques sur le littoral de Loire-Atlantique en 2005 (Pottier, 2007)

Selon une étude plus récente (Chupin et Pottier, 2012), en 2009, l'urbanisation littorale représente 14% de la surface urbanisée du département, soit 8% de la surface totale de la Loire-Atlantique. A plus grande échelle, l'urbanisation occupe 28% des surfaces communales, le double de ce qui est observé à l'échelle de l'ensemble du littoral français à cette même date. Selon le département de la Loire-Atlantique, « 15,7% des territoires littoraux sont artificialisés en 2016 contre 13,6% en 1999 ». De plus, entre 2013 et 2018, sur le littoral, l'ensemble des résidences secondaires et des logements vacants évolue à un rythme identique à celui des résidences principales, soit 7%.

En Vendée, les années 70 sont marquées également par un phénomène d'urbanisation massive. Les équipements touristiques et les aménagements liés à cette nouvelle attractivité (lotissements, propriétés secondaires) se localisent essentiellement sur les dunes littorales (Renard, 1972). Ainsi, sur les communes de Jard-sur-Mer, Brétignolles et Saint-Hilaire de Talmont, l'auteur décrit le paysage balnéaire de l'époque comme une urbanisation « anarchique » et livre son inquiétude quant à la maîtrise future de l'urbanisation de ces littoraux. Cet essor du tourisme littoral (et des aménagements associés) conjugué à « un contexte de régulation bien timide, le plus souvent exonérée de contraintes d'urbanisation » (Chauveau *et al.*, 2011), a mené ces trente dernières années à une urbanisation croissante et quasi continue dans le temps. En outre, Struillou et Hutten (2021) précisent que la loi « Littoral »

a provoqué, au moins dans un premier temps, un coup d'arrêt de l'urbanisation sur le littoral », mais, selon le Bilan de la loi Littoral et des mesures en faveur du littoral établi en 2007, « l'artificialisation des terres a été trois fois plus forte dans les communes littorales qu'en moyenne en métropole, et touche plus particulièrement la bande située entre 500 et 2 000 mètres du rivage » (DIACT, 2007 ; Lang, 2012).

2.3. Considération des espaces dunaires dans les politiques publiques

Au sein du premier chapitre il a été évoqué les notions d'enjeux « incontournables » et « complémentaires » proposés dans le Guide méthodologique des PPRL (2014). Les milieux naturels, considérés comme enjeux complémentaires, font toutefois l'objet d'un intérêt particulier de la part de certains organismes ayant mis en évidence le rôle prépondérant des massifs dunaires dans la protection contre les risques côtiers (Debaine et Robin, 2012). En effet, considérer les cordons dunaires comme entité de protection contre les aléas naturels nécessite la mise en place d'un cadre de gestion et de suivi adapté de ces massifs qui sont complexes dans leurs dynamiques spatiales et temporelles (Debaine et Robin, 2012 ; Roche *et al.*, 2015). Le Conservatoire du littoral, établissement public créé en 1975, a d'ailleurs un rôle important dans la préservation des sites côtiers présentant un intérêt paysager ou écologique et donc de fait, sur les espaces dunaires. La maîtrise du foncier, ligne directrice de cet organisme, consiste à acquérir des parcelles littorales afin d'empêcher l'urbanisation ou de déconstruire des aménagements lorsque cela est possible et nécessaire (Clus-Auby *et al.*, 2006). Afin de préserver ou de rendre aux espaces littoraux leur valeurs écologique, sociale, économique et culturelle, le Conservatoire du littoral travaille de concert avec les collectivités, les services de l'Etat ou encore des associations afin d'élaborer une convention de gestion et entamer les actions de protection ou de restauration des sites concernés.

L'impact de la tempête Xynthia du 28 février 2010 va renforcer l'intérêt porté à ces espaces et rappeler à la communauté littorale que ses territoires, notamment les côtes basses meubles, pouvaient être dramatiquement exposés aux aléas côtiers (Juigner, 2017). Cet événement a donc amorcé la réactualisation du cadre réglementaire des Plans de Prévention des Risques Littoraux actuellement tous approuvés (Figure 1), et l'instauration des Plans Submersions Rapides. De plus, l'Office National des Forêts (ONF), en collaboration avec des scientifiques, largement impliqué dans le suivi et la protection des dunes dans le cadre de la mission d'intérêt général de contrôle de l'érosion dunaire, publie en 2018, un Guide technique sur la gestion des dunes et des plages associées (Gouguet, 2018). En plus d'expliquer le rôle fondamental des cordons dunaires dans les transits des systèmes plage-dune et leur capacité de protection contre les aléas côtiers, ce guide pointe la relative prise en compte des cordons pour la prévention des risques littoraux. Cela est dû au caractère spatio-temporel évolutif de ces espaces et aux difficultés à évaluer l'évolution du volume sédimentaire mobilisable lors d'événements extrêmes. Pour ces raisons, les documents réglementaires ont quelques difficultés à les prendre en compte et notamment pour ce qui concerne la cartographie de l'aléa. Par ailleurs, c'est au sein de la compétence Gestion des Milieux Aquatiques et Prévention des Inondations (GEMAPI), confiée aux EPCI depuis 2018 que l'on trouve cette notion

d'ouvrages naturels pour les dunes. En effet, la GEMAPI intègre la gestion des ouvrages qu'ils soient naturels ou artificiels de défense contre la mer destinés à protéger les territoires des effets des aléas côtiers. Selon Gougnet (2018), « l'objectif est donc de favoriser la bonne coordination des actions appelées à être mises en œuvre sur un même territoire en faveur de la prévention des risques d'inondation et de submersion marine, de la gestion des milieux aquatiques et de la gestion du trait de côte ».

2.4. L'exposition des enjeux

La spatialisation des enjeux ne consiste pas seulement à identifier géographiquement et/ou à délimiter les aménagements et activités situés dans la bande côtière. Elle nécessite également, et surtout, une évaluation de leur vulnérabilité face aux aléas côtiers.

En 2018, Juigner et Robin réalisent une étude sur la robustesse des cordons dunaires, soit leur capacité à résister à la submersion marine. Pour évaluer cette robustesse, les indicateurs employés sont (i) la sensibilité à la submersion du cordon de 1^{ère} ligne (altitude et assise du cordon), (ii) une évaluation de la sensibilité à l'érosion côtière du cordon de 1^{ère} ligne (volume du cordon et évolution du trait de côte) et (iii) une évaluation de la sensibilité à la submersion de l'arrière-dune (zone basse, assise du cordon de 2^{ème} ligne) (Figure 11). L'article révèle que les massifs dunaires à sensibilité globale élevée représentent 11% du linéaire total. Ils sont caractérisés par un cordon de 1^{ère} ligne bas, étroit, avec un faible volume sédimentaire et de ce fait marqué par un recul du trait de côte historique (Juigner et Robin, 2018). A travers le prisme de l'aléa érosion, il est possible de remobiliser ces indicateurs pour évaluer la capacité d'un cordon dunaire à faire face à un événement extrême. En effet, ces massifs dunaires sont des barrières naturelles dont les différentes caractéristiques permettent d'évaluer leur capacité à résister à l'érosion côtière, notamment lorsque surviennent ces événements extrêmes. Cette étude a l'avantage de proposer une évaluation fine des caractéristiques des massifs dunaires et propose une résolution spatiale à grande échelle (segmentation du littoral par boîtes de 25 m de large sur 400 m de profondeur).

Si encore aujourd'hui la majorité des travaux scientifiques se concentrent seulement sur la submersion marine ou l'érosion côtière, il est important de rappeler que ces deux aléas sont intrinsèquement liés. Afin de mesurer la vulnérabilité d'un territoire ou d'autres entités spatiales (*e.g.* bâti, ouvrages), l'approche indicielle est une méthode fréquemment utilisée (Gornitz, 1991 ; Thieler et Hammar-Klose, 2000 ; Kunte *et al.*, 2014 ; Bagdanavičiūtė *et al.*, 2015 ; Creach, 2015 ; López Royo *et al.*, 2016 ; Juigner *et al.*, 2017 ; Juigner *et al.*, 2021). Elle a pour avantage premier d'agréger plusieurs variables (physiques ou sociétales) et de produire une synthèse spatialisée de la vulnérabilité mesurée. En région, plusieurs travaux ont employé cette méthode pour caractériser la vulnérabilité liée aux risques de submersion marine et d'érosion côtière. En effet, suite à la tempête Xynthia, qui a mis en évidence la grande vulnérabilité des villes côtières aux submersions et inondations, une grande partie des travaux scientifiques se sont donc concentrés sur le risque de submersion marine (Creach, 2015). Un indice de vulnérabilité face à la submersion marine a ainsi été élaboré. L'indice de Vul-

néralité intrinsèque extrême (V.I.E.) basé sur les enseignements tirés de Xynthia (Creach *et al.*, 2015). Il s'agit d'un indice de vulnérabilité permettant de caractériser l'exposition des bâtiments résidentiels à une vulnérabilité « extrême » selon quatre critères : (i) la profondeur d'eau potentielle, (ii) la distance aux défenses contre les inondations, (iii) la typologie architecturale des bâtiments et (iv) la proximité d'un point de secours. Les résultats issus de l'indice amènent Creach *et al.*, (2015) à la conclusion qu'au-delà de l'effet de la tempête-même, c'est l'augmentation de l'implantation humaine dans les zones basses et ce depuis les années 1950, qui est un facteur prédominant de l'accroissement de la vulnérabilité. De plus, il révèle que l'architecture des habitations (majoritairement de plain-pied) est incompatible avec le risque submersion marine (Creach *et al.*, 2015).

<p>Sensibilité à la submersion du cordon de 1^{ère} ligne (S1)</p> <p>(i1) altitude minimum du cordon de 1^{ère} ligne en m</p> <p>(i2) assise du cordon de 1^{ère} ligne en m²</p>	<p>Définitions :</p> <p>(i1) altitude minimum de la crête, (i2) emprise au sol du cordon de 1^{ère} ligne au niveau de la cote de l'aléa de référence</p> <p>Usages :</p> <ul style="list-style-type: none"> - capacité à faire obstacle face à une élévation du niveau marin - risque de rupture (brèche), surverse ou franchissement par paquets de mer 	
<p>Sensibilité à l'érosion côtière du cordon de 1^{ère} ligne (S2)</p> <p>(i3) volume du cordon de 1^{ère} ligne en m³</p> <p>(i4) évolution du trait de côte en m²</p>	<p>Définitions :</p> <p>(i3) volume du cordon au dessus de la cote de l'aléa de référence, (i4) évolution historique du trait de côte</p> <p>Usages :</p> <ul style="list-style-type: none"> - risque de destruction ou de brèche du cordon lié au recul du front dunaire - capacité de résilience du cordon de 1^{ère} ligne 	
<p>Sensibilité à la submersion de l'arrière-dune (S3)</p> <p>(i5) emprise des zones basses en m²</p> <p>(i6) assise du cordon de 2^{ème} ligne en m²</p>	<p>Définitions :</p> <p>(i5) surfaces intradunaires et rétro-littorales situées sous la cote de l'aléa, (i6) emprise au sol du cordon de 2^{ème} ligne au niveau de la cote de l'aléa de référence</p> <p>Usages :</p> <ul style="list-style-type: none"> - présence de zones potentiellement submersibles - capacité de limiter la propagation d'une submersion marine 	
<p>Exposition à la submersion des enjeux non-humains (E1)</p> <p>(i7) emprise des enjeux en zones basses en m²</p> <p>(i8) hauteur d'eau potentielle</p>	<p>Définition :</p> <p>(i7) emprise totale des enjeux situés dans les zones basses établies par la cote de l'aléa de référence, (i8) hauteur d'eau potentielle (maximum) au droit des enjeux</p> <p>Usages :</p> <ul style="list-style-type: none"> - présence d'enjeux potentiellement exposés à la submersion marine - hauteur d'eau pouvant affecter les enjeux 	

Figure 11 : Définition, usage et schématisation des indicateurs (i1 à i8) mesurés dans chaque boîte de 25*400 m pour l'évaluation de la protection dunaire contre la submersion marine (Juigner et Robin, 2018).

L'aléa érosion ayant suscité un intérêt plus tardif que la submersion marine, les travaux s'appliquant à définir la vulnérabilité des enjeux face à l'érosion sont peu nombreux en région et sont essentiellement menés par l'Observatoire Régional des Risques Côtiers des Pays de la Loire.

Une première étude menée par Juigner *et al.* (2017) proposent un indice visant à évaluer la vulnérabilité des enjeux en mesurant leur exposition au risque d'érosion sur l'ensemble du littoral des Pays de la Loire. Cet indice s'appuie sur trois indicateurs : (i) la distance la plus courte entre la construction du littoral (ii) la surface de la construction de la première ligne et (iii) l'érosion côtière le long des côtes sableuses. L'agrégation de ces indicateurs est réalisée dans des unités spatiales (boîtes) de 30*100 m, permettant de calculer ainsi l'indice d'exposition des enjeux présents dans chaque boîte. Les résultats sont ensuite classés selon quatre degrés d'exposition : faible, modéré, fort, très fort.

En 2021, Juigner *et al.* proposent un nouvel indicateur de prédisposition au risque d'érosion appliqué sur la partie Nord du littoral vendéen et la côte ouest de la Manche. Cette étude, basée sur la même démarche géomatique que l'indice produit en 2017, remobilise la variable relative à l'évolution du trait de côte et intègre la distance entre le trait de côte et les constructions, les routes carrossables et les campings situés dans la bande des 100 m ainsi que la présence/absence d'ouvrages de protection.

Ces deux travaux reposent sur une même méthodologie transposable sur d'autres territoires (Juigner *et al.* 2021). La méthode par « boîtes » permet l'agrégation des variables spatialisées puis une synthèse à l'échelle du ou des territoires étudiés. Enfin, elle garantit la possibilité d'intégrer d'autres variables pour affiner l'analyse spatiale. Les travaux portés sur la vulnérabilité des enjeux face au risque érosion sont relativement récents et demeurent peu nombreux. Des pistes restent encore à explorer, notamment sur la caractérisation des enjeux côtiers, l'intégration des reculs instantanés liés à des événements extrêmes, l'amélioration des méthodes de pondération des variables encore très souvent basés sur des « dires d'experts » et non sur des méthodes statistiques.

De surcroît, dans le cadre de l'application de la loi « Climat et Résilience » de 2021, l'Etat octroie quatre ans aux EPCI (s'inscrivant volontairement dans cette démarche) pour réaliser la cartographie des zones exposées au recul du trait de côte aux horizons 30 ans et 100 ans. De fait, les besoins concernant la production de méthodes de projection d'évolution du trait de côte ou encore d'évaluation de l'exposition des enjeux à cet aléa, se font de plus en plus pressants. C'est dans ce contexte que les EPCI, soumis à cette nouvelle législation, sont susceptibles de faire appel à divers organismes tels que les bureaux d'études ou les observatoires du littoral, afin de les accompagner dans la production de ces cartographies.

3. Les acteurs de l'observation du littoral en région

Les actions d'observation du littoral sont essentiellement réalisées par des structures telles que les observatoires, l'ONF, le BRGM, le CEREMA ou des bureaux d'études. Ces actions peuvent être à l'initiative des services de l'Etat qui souhaitent tendre vers une gestion intégrée des risques littoraux. La mise en place de conventions pluriannuelles permet de soutenir les programmes d'actions de prévention des risques naturels côtiers et d'instaurer des partenariats avec les structures d'observation du littoral telles que l'OR2C depuis 2016 ou encore le BRGM. Les services de l'Etat sont également acteurs dans la mise à disposition de données via plusieurs plateformes telles que GEOPAL , SIGLOIRE , GéoVendée par exemple et renvoient également vers le site de l'OR2C, également actif dans la production et la mise à disposition de données.

3.1. L'Observatoire régional des risques côtiers (OR2C)

Le suivi du trait de côte, en région est réalisé grâce à des partenariats entre plusieurs observatoires. Plus localement, des structures existent pour collecter des informations sur l'évolution morphologique côtière des territoires. Ces structures apparaissent comme les plus à même de capitaliser sur plusieurs années les données nécessaires à une bonne compréhension des phénomènes côtiers (CEREMA, 2016). Depuis 2016, l'OR2C porte son action sur l'ensemble du littoral régional, soit de la baie de Pont-Mahé au nord (Loire-Atlantique) à la baie de l'Aiguillon au sud (Vendée). Il s'inscrit dans une déclinaison régionale des outils de la Stratégie Nationale de Gestion du Trait de Côte (SNGTC), en tenant compte de la dynamique territoriale engagée au niveau régional entre l'État, les conseils départementaux de Loire-Atlantique et de Vendée, et le Conseil régional. En amont de sa création, plusieurs initiatives locales étaient engagées notamment à travers les observatoires de l'île de Noirmoutier (depuis 1999) et du Pays de Monts (depuis 2009). L'émergence de l'observatoire a ensuite permis de rassembler les acteurs locaux pour tendre vers une démarche régionale, notamment à travers le partenariat entre de nombreuses structures chargées de produire, traiter, gérer ou encore diffuser les données relatives aux suivis du trait de côte. A ce titre, la gouvernance de l'OR2C est originale car elle associe des établissements publics (*e.g.* SHOM, IGN, ONF), des centres de recherche (*e.g.* IFSTTAR, CEREMA, Université de Nantes), des instances décisionnelles (ex : État, régions et départements), et des instances opérationnelles (ex : gestionnaires de PAPI). Trois parmi les gestionnaires de PAPI prennent également en charge des observatoires côtiers locaux (*e.g.* Île de Noirmoutier , les Pays de Monts et Saint-Gilles-Croix-de-Vie) (Kerguillec *et al.*, 2019).

3.1.1. L'acquisition de données aéroportées

L'observatoire engrange de la donnée, que ce soit via les structures locales de suivi du trait de côte ou bien grâce à ses propres campagnes de mesures. Ainsi l'une de ses principales missions est d'acquérir les données manquantes et d'actualiser celles existantes le plus souvent en collaboration avec les structures partenaires. Il s'agit d'une part de produire de

la donnée brute telle que des levés LiDAR topo-bathymétrique (Figure 12), des levés de plages au GNSS, de la photogrammétrie, ou encore des relevés granulométriques (Kerguillec *et al.*, 2019).

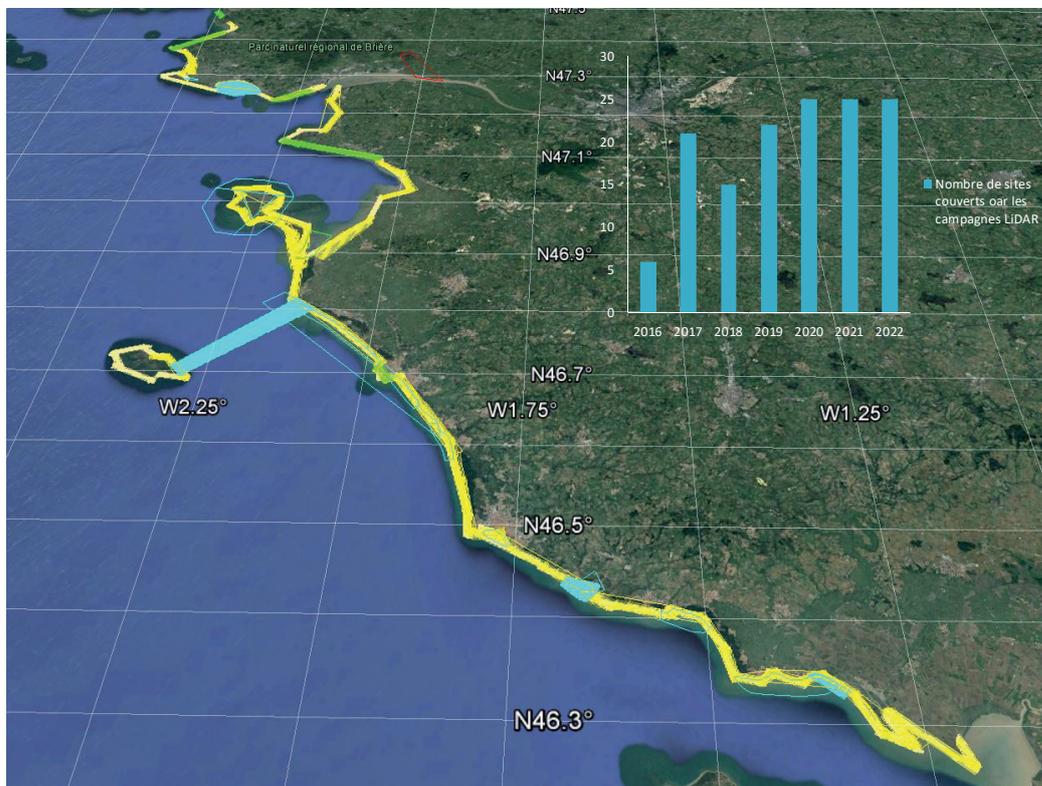


Figure 12 : Campagnes aéroportées en Pays de la Loire OSUNA - OR2C

Une fois ces données brutes collectées, elles sont traitées puis analysées afin de produire des données statistiques, des cartographies thématiques, des rapports d'études (essentiellement destinés aux partenaires de l'observatoire mais aussi à destination des collectivités), ou encore des articles dans des revues scientifiques. Grâce à l'analyse des rythmes d'évolution du trait de côte sur le long terme et à l'étude du comportement des côtes sableuses lors d'événements tempétueux extrêmes, l'OR2C et ses partenaires viennent consolider la connaissance scientifique appliquée aux risques côtiers. Cependant, du fait que le littoral soit étendu sur près de 400 km, il est difficile d'avoir une donnée homogène sur l'ensemble du territoire, d'où le choix de moduler la fréquence des relevés et de se concentrer sur certains secteurs considérés comme plus vulnérables.

3.1.2. Un nouveau moyen d'observation participatif : le principe CoastSnap

CoastSnap est un système d'imagerie côtière participatif à faible coût né en Australie, entièrement basé sur des photographies de smartphones fournies par les citoyens (Harley *et al.*, 2018). Cette nouvelle démarche participative a notamment été importée en France : Nouvelle Aquitaine, Bretagne et plus récemment en Pays de la Loire. Le principe consiste à déposer un smartphone sur un support en acier, orienté stratégiquement vers la plage (Figure 13). Une fois récoltées et

compilées, ces données sont vouées à apporter une compréhension de la dynamique d'une plage sur plusieurs saisons. Ce système est désormais déployé à Noirmoutier (deux sites), Pornichet (un site) et Saint-Jean-de-Monts (un site). Une technique similaire, Vigie du littoral, est mise en place à Saint Brévin-les-Pins sur neuf sites.



Figure 13 : Dispositif CoastSnap. Plage des Dames, commune de Noirmoutier-en-île (Source : OR2C)

3.2. L'observation du littoral à l'échelle locale

Les observatoires locaux ont pour objectif la connaissance accrue de leur territoire. Ils peuvent réaliser des suivis à la fois réguliers et fréquents, permettant ainsi de produire de l'information à grande échelle et de cibler les secteurs les plus vulnérables face aux aléas naturels et anthropiques.

3.2.1. *L'observatoire du littoral de l'île de Noirmoutier*

L'observatoire du littoral de l'île de Noirmoutier créé en 1999 par la Communauté de Communes de Noirmoutier a pour mission principale de réaliser un suivi des plages et dunes de l'île dans un contexte de zones basses et donc vulnérables. La proximité de l'observatoire vis-à-vis de son territoire permet de réaliser des campagnes de relevés au GNSS de profils plage/dune d'une grande précision.

L'analyse de l'évolution du trait de côte est réalisée sur une période longue. La mobilité du trait de côte a ainsi été évaluée depuis 1832 (sur la base du Cadastre Napoléonien) jusqu'à l'actuel (Figure 14) afin de rendre compte des transports sédimentaires dominants à l'échelle de l'île. Enfin, des bilans annuels des aspects géomorphologiques et des enjeux exposés sont également réalisés pour chaque secteur considéré « à profil érosif ». L'évolution de chaque profil étudié est ensuite décrite et analysée, avec un rappel des actions menées (rechargement de plage, remontée du sable en partie haute de la plage, ...), permettant d'une part de faire un diagnostic de l'« état de santé » de la plage et de suggérer des préconisations en termes de surveillance et de gestion.

Enfin, l'observatoire suit des événements extrêmes avant/après tempête afin de quantifier précisément l'impact érosif des houles de tempêtes sur ses côtes sableuses. Ces suivis réguliers permettent également de relever des phénomènes d'érosion ponctuels résultants d'évènements de faibles intensités, qui peuvent toutefois mettre en lumière la vulnérabilité de certains secteurs.

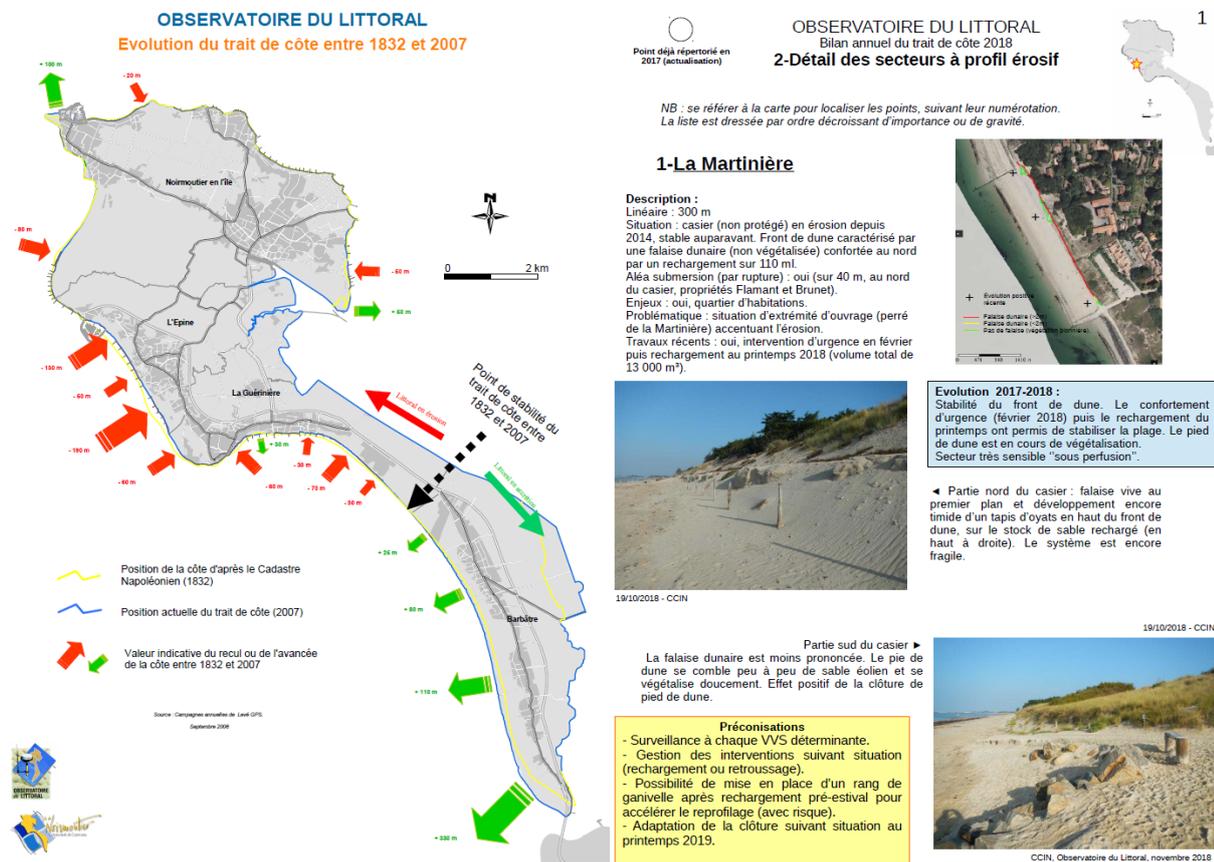


Figure 14 : Fiche thématique produite par l'observatoire du littoral de l'île de Noirmoutier présentant l'évolution du trait de côte entre 1832 et 2007 (à gauche) et la caractérisation de secteurs spécifiques (à droite)

3.2.2. L'observatoire du Littoral du Pays de Monts

L'Observatoire du Littoral du Pays de Monts (OLPM) est créé en 2009 à l'initiative de la Communauté de Communes Océan-Marais de Monts (Vendée, France). Sa création découle d'un constat flagrant du manque de données sur son littoral (Le Guern *et al.*, 2014). L'observatoire couvre un linéaire côtier d'environ 20 km réparti sur trois communes (La Barre-de-Monts, Notre-Dame-de-Monts et Saint-Jean-de-Monts). Les actions menées par l'observatoire visent à améliorer la connaissance des phénomènes relatifs à l'environnement littoral afin de participer aux réflexions de gestion prévisionnelle de cet espace. Il mène ses actions en partenariat avec le BRGM, l'ONF et Nantes Université (OR2C), tel que l'acquisition de données, le suivi régulier de l'évolution du trait de côte ou encore la production de cartographies statistiques et thématiques sur l'évolution du littoral sur un court et long termes (Figure 15).

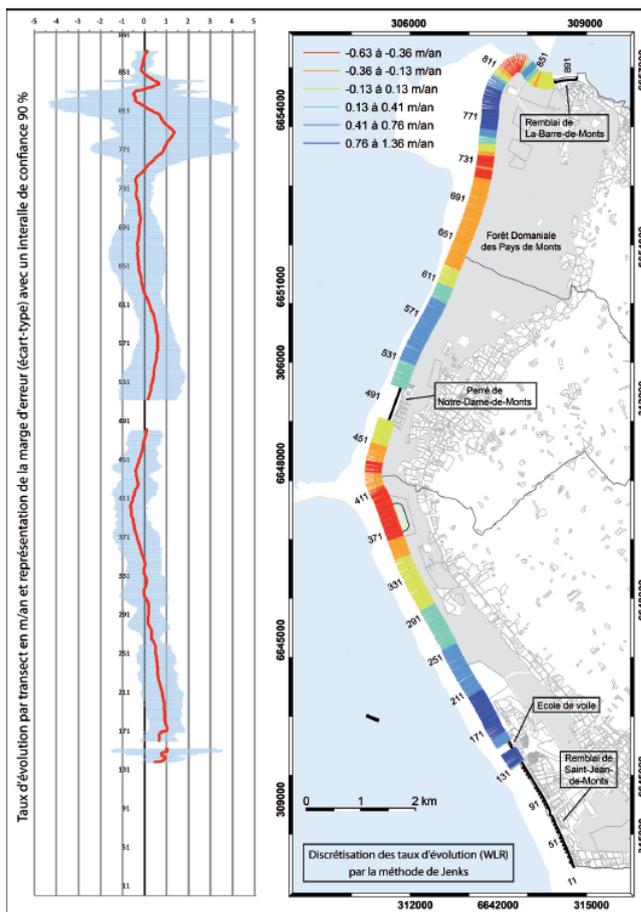


Figure 15 : Cartographie de l'aléa érosion côtière du Pays de Monts sur le long terme (11 à 891 : numéro de transect créé avec DSAS ; à gauche, représentation graphique des taux d'évolution en rouge, et de la marge d'erreur en bleu). (Juigner *et al.*, 2013)

3.2.3. Pays de Saint-Gilles-Croix-de-Vie Agglomération

La communauté d'agglomération du Pays de Saint-Gilles-Croix-de-Vie se charge d'étudier l'évolution du littoral à travers des relevés et suivis de terrain réalisés sur 24 zones sensibles plusieurs fois par an et sur l'ensemble du littoral deux fois par an. La structure assure aussi un suivi de tous les ouvrages hydrauliques (enrochement, perré, digues, *etc...*) afin de recenser les centaines d'ouvrages répartis sur les 32 km de littoral (www.payssaintgilles.fr).

Partie 1

Conclusion

L'état des connaissances autour des notions de processus, de résultante ainsi que des méthodes de mesure et d'estimation de l'aléa, souligne la complexité liée à ces démarches. En effet, les méthodes utilisées et les résultats associés, sont fortement dépendants de la donnée. La disponibilité, la résolution spatiale ou encore la résolution temporelle de la donnée sont des paramètres susceptibles d'impacter les choix méthodologiques et d'augmenter les incertitudes. Par ailleurs, la présentation des travaux menés sur les enjeux côtiers en région révèlent tout d'abord la nécessité de connaître l'aléa érosion à travers ses rythmes, et la spatialisation des secteurs les plus sensibles. Nous avons également mis en évidence que les travaux sur les enjeux côtiers demeurent moins fournis que ceux réalisés sur les aléas. C'est davantage à travers les indices de vulnérabilité côtière que s'exprime la recherche sur la sensibilité et l'exposition des enjeux à l'érosion.

Le second chapitre présente les démarches amorcées en région. Il s'agit de travaux axés sur l'observation et réalisés les services cartographiques au sein des collectivités locales. Mais les problématiques relatives à la donnée relèvent aussi de l'emprise spatiale lors de l'acquisition. Si à l'échelle locale la donnée est fréquente, l'homogénéité de la donnée à l'échelle régionale est en revanche difficile à obtenir. Les acquisitions de l'Observatoire Régional des Risques Littoraux à l'échelle régionale tendent cependant à réduire difficulté.

Partie 2

L'aléa érosion

La partie 2 a pour objectif d'appréhender l'aléa érosion à l'échelle de la région. Il se compose de trois chapitres, chacun se concentrant sur une dimension temporelle particulière.

Le premier chapitre se focalise sur l'aléa érosion inscrit sur le long terme. L'évolution du trait de côte est ainsi évaluée sur plusieurs périodes afin d'identifier des tendances. Il vise également à mettre en évidence des secteurs touchés de manière récurrente par des reculs côtiers depuis les années 1950.

Le second chapitre se concentre en revanche sur l'aléa érosion à court terme. Il s'agit de mesurer les reculs intervenus suite aux événements extrêmes de décembre 1999 (Lothar et Martin), et de février 2010 (Xynthia) et de les agréger afin de construire un L_{max} à l'échelle de la Vendée spatialisé tous les 20 m.

Enfin, le troisième chapitre aborde la dimension prospective de l'aléa érosion. Il repose essentiellement sur la mesure de l'incertitude relative à cet exercice et intègre l'estimation du recul lié à l'élévation du niveau marin aux horizons 30 ans et 100 ans. Cette démarche permet de caractériser l'aléa dans son ensemble, et d'identifier les secteurs vulnérables au vu des observations réalisées à l'échelle d'étude.

Chapitre 1

Assessing Surface Changes between Shorelines from 1950 to 2011

Robin M., Juigner M., Luquet F. and Audère M., 2019. Assessing surface changes between shorelines from 1950 to 2011: The case of a 169-km sandy coast, Pays de la Loire (W France). In: Castelle, B. and Chaumillon, E. (eds.), *Coastal Evolution under Climate Change along the Tropical Overseas and Temperate Metropolitan France*. Journal of Coastal Research, Special Issue No. 88, pp. 122–134. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.

Cet article vise à mettre en évidence l'évolution de la côte sableuse des Pays de la Loire. Aucune synthèse globale n'a été faite sur l'évolution de cette côte et ses taux de changement à différentes périodes de temps. De plus, à notre connaissance, aucune recherche synthétique n'a été réalisée en utilisant cette méthodologie qui permet de dégager des statistiques de surface par unité de temps. L'évolution du littoral a été mesurée sur différentes périodes depuis 1950 : de 1950 à 2010, les périodes intermédiaires étant 1950-1970, 1970-1990, 1990-2010 et enfin 1990-2000 et 2000-2010. Ces dates sont parmi les seules à permettre une couverture complète par des photographies aériennes. Les photographies sont utilisées pour analyser finement les changements sur des périodes de 60 à 10 ans, afin de cibler les taux de changement non linéaires. Notre méthodologie est rigoureusement appliquée comme suit : (1) nous créons une base de données de photographies aériennes exhaustives, (2) nous définissons et numérisons le littoral, (3) nous estimons les marges d'erreur, (4) nous calculons une segmentation régulière du littoral par unité de surface (qui sont régulièrement espacées de 25 m le long de la côte), (5) nous intersectons les littoraux et ces unités spatiales pour mesurer les surfaces entre chaque littoral à l'intérieur de chaque unité spatiale. Diverses statistiques linéaires et surfaciques exprimant les taux d'érosion ou d'accrétion sont ensuite calculées pour chacune des 6 652 unités spatiales. Les statistiques globales sont présentées au niveau régional. Elles sont ensuite présentées plus en détail au niveau des cellules sédimentaires, et enfin au niveau des unités spatiales constituant les cellules sédimentaires. Cette approche nous permet de présenter un bilan sédimentaire global à différentes échelles à travers (i) les taux d'évolution convertis en mètres linéaires (ii) et surtout la mise en évidence de l'évolution des surfaces entre ces rivages. Ceci nous conduit à estimer précisément les secteurs en accrétion, en érosion et stables ou insignifiants par période. Il apparaît que la région des Pays de la Loire possède une côte sableuse qui est le plus souvent en accrétion sédimentaire même si certains secteurs locaux sont en érosion chronique depuis 60 ans.

1. Introduction

The global coastal zone has been characterized for half a century by an increase in various types of coastal risks. This is mainly caused by the rising density in this sensitive and covered area (Small, 2003). This results in a significant urban sprawl in hazards areas (Dickson, 2012) while Climate Change, sea level rise and an increase in storminess are topical scientific preoccupations (Cazenave *et al.*, 2014). The French coastline is no exception to this rule. Seaside agglomerations have to deal with increasing anthropogenic pressures (Zaninetti, 2006, Le Berre *et al.*, 2016) and sometimes a major erosion problem (Deboudt, 2010). Hence the need for studying the rate of erosion in order to fully anticipate the increasing risk of urbanization's exposure to this hazard and prevent catastrophes from happening.

At the European scale, the 2004 EUROSION project aimed to build a European geographical database on coastal erosion, thus updating the 1990 CORINE project (Lenôtre *et al.*, 2004). This database was the first source of coastal erosion knowledge in France at a national scale. Nevertheless, the need to improve its accuracy has led to the creation of a new database at the national level called the National Indicator of Coastal Erosion, which was produced by Cerema with about a 70-year time step and a 200m spatial sampling in metropolitan France (Cerema, 2018).

Yet a more precise database has been set up in the Pays de la Loire region in 2017. It aimed to analyse the risk of exposure of urbanisation to coastal erosion hazards (Juigner *et al.*, 2017). This base is much more accurate than the Cerema base because even though the time step is the same, the spatial sampling is of 30m instead of 200m.

However, two dates which are 70 years apart are not sufficient to accurately estimate a rate of coastal erosion. The dynamics of the shoreline is indeed very sensitive to extreme events or cumulative stormy events over a season. It has been the case in the winter of 2013-2014, which was particularly energetic on the French coast (Masselink *et al.*, 2016). From one year to the next, the shoreline can retreat and enter a period of resilience for a few years before returning to an eroding phase. This can be assessed by using precise mapping like LiDAR (Le Mauff *et al.*, 2018). It is therefore necessary to establish statistics per intermediate period in order to have a better location and understanding of the coastal sections and the layout of the segments in erosion and accretion, as it has been done in the Aquitaine region for example (Castelle *et al.*, 2018).

Three initial conditions are required so as to provide accurate statistics on the shoreline evolution with errors margins as low as possible. First, sufficiently accurate geometric documents for each date have to be used. This is the case with aerial photographs (Chaaban *et al.*, 2012). Secondly, the aerial photographs have to be as close in time as possible. They also need to cover all the study area without any spatial gap. Finally, a reliable common and correctly visible reference shoreline has to be chosen for each date (Boak and Turner, 2005). Despite being widely accepted by authors (see the review in Boak and Turner, 2005), the selected shoreline is nevertheless discussed as it is commonly used as a reliable geoindicator (Morton *et al.* 1993). It provides relevant information on the historical and current sedimentary dynamics of sandy coasts (Hapke *et al.* 2006) and it is also a relevant marker of erosion due to its sensitivity to natural and anthropic stress.

This paper aims to address for the first time long, medium and short-term shoreline changes along the 169 km of sandy coast of the Pays de la Loire region. There are various methods to achieve this using GIS tools. The discrete approach was first developed in 1995 with the SHOREGRID application (Duffy and Dickson, 1995) and fully worked with the development of the Digital Shoreline Analysis System (Thieler *et al.*, 2009). Although regular grid-based surface approaches have already been used (e.g. in Pendelton, 2004), the first full use by box deployment is recent (Barone *et al.*, 2009, Depellegrin *et al.*, 2010 and Debaine and Robin, 2012). It was adapted into a segmentation process on the Pays de la Loire shoreline in 2017 (Juigner *et al.*, 2017) in order to precisely assess the exposure of urbanization to the risk of long-term coastal erosion.

We propose to use the latter on the exposure of urbanisation to the risk in the same regional area (Juigner *et al.*, 2017). This method intends to address this sandy coastline's changes over various periods of time and at different scales so as to quantify the rate of surface change over the longest historical period possible. This methodology is based on the surface calculation of erosion and accretion, and given the margins of error, within a spatial unit which has been called a "box" for convenience sake (Juigner *et al.*, 2017). This surface approach is more accurate than the generally used transect approaches (Thieler *et al.*, 2009, Aiello *et al.*, 2013, Judge *et al.*, 2003). Addressing the change at various periods of time thus makes it possible to map surface accretion and erosion in a new spatial unit (square meters per meter per year) of all the concerned shoreline sections and also the contrasting changes of each section (erosion then accretion and inversely). In this paper, 169 km of western France sandy coast are studied using a diachronic analysis of georeferenced aerial photographs through three periods of time (since 1950) and three spatial scales (regional scale, sediment cells and within sediment cells). The regional setting study site is presented in Section 2 before the explanation of the method which is in Section 3. Results are presented in Section 4 and a discussion conclusion is drawn in Section 5.

2. Regional setting

The coastline of the Pays de La Loire region stretches for nearly 400 km from the bay of Pont Mahé to the north and the Bay of l'Aiguillon to the south. It is currently composed of 3 main types of coast: the rocky coasts from low rocky backshores to cliffs height up to 20m (111 km); the low lying coastal areas and dunes protected by sea defences (135 km including 49km corresponding to sea defences in front of dunes, the remainder corresponding to sea defences along sea marshes) and the natural coastal sand dunes (120 km).

This study area (Juigner *et al.*, 2017) is located on the mid-Atlantic French coast and is generally orientated along a NW-SE axis (Fig. 1). Situated on the meridional margin of the Massif Armoricaïn, the coast, located between the Bay of Pont Mahé and les Sables d'Olonne, is characterized by a succession of moles, rocky cliffs (including the islands) and marshes barred by dune systems, bays and estuaries because it is part of an ancient crystalline massif which has been largely altered by orogenic cycles and marine transgressions (Le Corre *et al.* 1991). The coast from the south of les Sables d'Olonne to the Bay of L'Aiguillon is part of the northern margin of the sedimentary Bassin Aquitain. It is characterized by the presence of a large low-lying area occupied by the largest French Atlantic wetland (the Marais

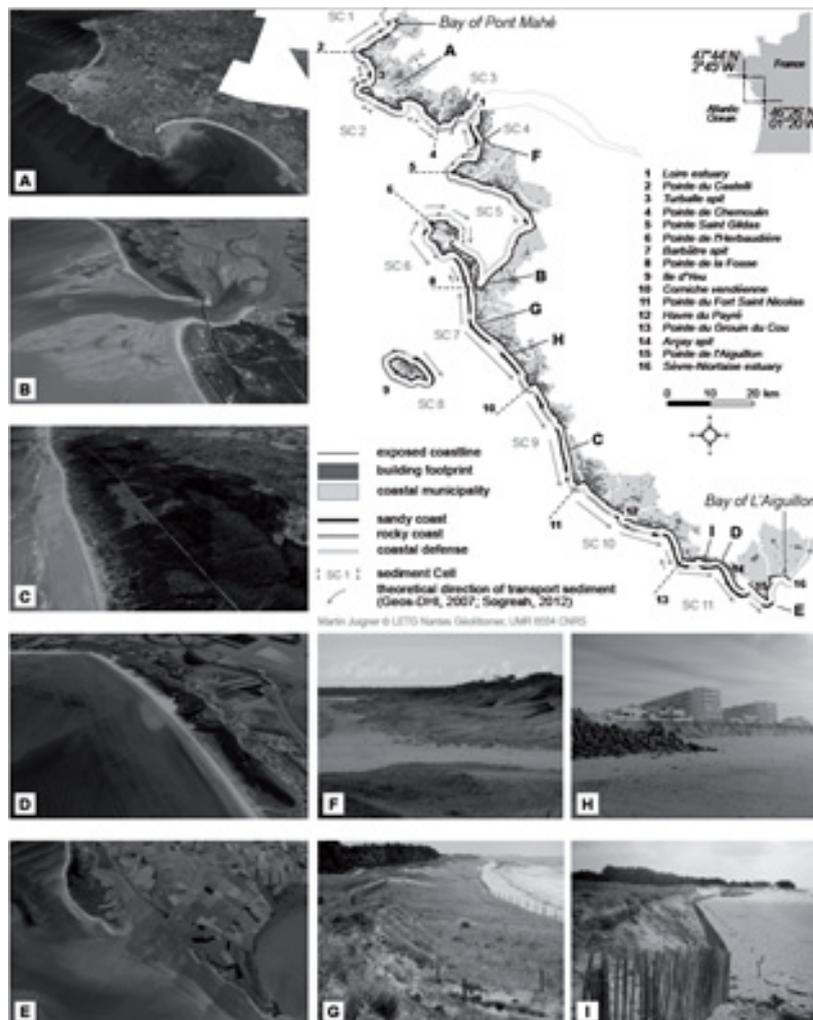


Figure 1 : Location map of the Pays de la Loire Region along the French Atlantic coast. Five oblique aerial photographs (from A to E) illustrate the types of coasts and four ground photographs (F to I) illustrate the beach-dune contacts. A: double tombolo of the Guérande peninsula with two sandy spits. B: Fromentine inlet between the island of Noirmoutier (top) and the mainland (bottom). Baie de Bourgneuf on the right. C: Extensive sand dune system with the Olonne forest. D: Dune separating the sea from the Belle Henriette lagoon. E: Arçay sand spit, Lay estuary and Aiguillon sand spit. F: beach dune contact in an accreting coastline (Saint Brévin les Pins). G: beach contact in an area in low erosion. Vegetated foredune before an old dune cliff (Saint Jean de Monts). H: beach dune contact with urban stakes at the back in an eroding coastline. Sea defences in the foreground (Saint Hilaire de Riez). I: Beach dune contact in an eroding dune with a sharp cliff. Fences against wind (La Tranche sur Mer).

Poitevin) whose western border is composed of large barrier systems and sand spits. The regional shoreline is subjected to a mesotidal and macrotidal semi-diurnal tide. It is also exposed to the marine weather influences of the North Atlantic. From 1999 to 2010, the winds which were recorded on Noirmoutier and Yeu Islands came from the WNW and SW sectors, with the most violent winds mainly coming from the W and SW sectors (Juigner *et al.* 2012). The main orientation of the waves is W to NW and the higher swells come

from the W and SW sectors (Geos-DHI 2007). The stormy conditions mainly occur from November to March with a SW orientation.

The 169 km coastal sandy dunes present long term contrasted mobility. The National Geographic Institute website "Go back in time" (<https://remonterletemps.ign.fr/>) highlights this mobility over the last two centuries thanks to two historical documents: the Cassini map (18th century) and the military map "carte d'état-major" (1820-1866). The Cassini map is geometrically imprecise, unlike the other which is more detailed. Thus, the comparison between these historical documents and recent aerial photographs shows that several coastal areas have notably or significantly changed: the Arçay spit in the south has increased significantly (more than 4 km to the southeast), a characteristic which has been studied recently (Allard *et al.*, 2008). The Payré estuary has also changed profoundly, as has the Jaunay estuary in Saint Gilles-Croix-de-Vie. The southern part of the Barbâtre Spit in Noirmoutier has also developed seaward over nearly 200m to the southwest over a length of 2.5 km, as well as the narrow Moutiers spit which grew over a distance of 200 m. No other significant change on the rest of the natural sandy coast is highlighted through this simple visual comparison. In total, nearly 8 to 10 km (out of the 169 km) have undergone significant to highly significant changes over the last 2 centuries. The remaining area does not present enough discernible modifications to be mapped from these documents with approximate geometry.

According to the results of the National Indicator of Coastal Erosion (Cerema, 2018), the rocky coast has an imperceptible sensitivity to the coastline retreat in the long term in this area (the whole change rate is lower than the ± 0.25 m/y uncertainty: 90% of the change rates are null, the 90th percentile of the negative values is equal to -0.15 and the maximum value is -0.20). The sandy coasts are affected by various long-term trends in shoreline position changes (from $+5.1 \pm 0.25$ m/y to -1.5 ± 0.25 m/y).

A modeling of sediment balance was carried out by two consulting firms in 2007 for the Vendée department and in 2012 for the Loire-Atlantique department (Geos-DHI, 2007 and SOGREAH, 2012). The presence of homogeneous sediment cells highlighted and the direction of sediment transits was estimated. The limits of these sediment cells are shown in Figure 1 and the direction of the sediment transit is indicated.

In the regional shoreline entirety,

Table 1 : Presentation of the sediment cells

cells (SC)	simplified shoreline (km)	SC sandy shoreline (km)	units	
SC 1	14.2	3.5	134	Bay of Pont Mahé Pointe du Castelli
SC 2	41.8	22.4	854	Pointe du Castelli - Pointe de Chemoul
SC 4	22.7	14.2	547	Loire estuary – Poir Saint Gildas
SC 5	81.4	17.0	648	Pointe Saint Gildas Pointe de l'Herbaudi
SC 6	23.7	22.9	887	Pointe de l'Herbaudie Pointe de la Fosse
SC 7	32.7	27.2	1 071	Pointe de la Fosse - Corniche Vendéenne
SC 8	26.9	6.7	256	Yeu Island
SC 9	29.9	19.9	784	Corniche Vendéenne Pointe du Fort Sair Nicolas
SC 10	36.8	13.3	524	Pointe du Fort Sair Nicolas – Pointe de Grouin du Cou
SC 11	55.9	21.8	847	Pointe du Grouin du () -Sèvre Niortaise estu

eleven sediment cells, which are presented in figure 1 and in table 1 below, are distinguished. Four cells are present in Loire-Atlantique but only 3 of the 4 are used in this study (the eliminated one –SC 3 Fig. 1- is made up of rocky coastline without a dune section which explains why it was excluded from this study and from table 1). The other seven cells are in Vendée. Table 1 presents the sediment cells which are given a number. The total approximate length of each cell is evaluated with a line simplifying the shoreline, not considering cuts into shoreline (estuaries, coastal inlet). Then, we present the accurate length of the studied shoreline, the number of spatial units, and the geographical name of the sediment cell limits.

These eleven sedimentary cells are based on the morphological partitioning of the coastline of the Pays de la Loire between rocky points, estuaries, or coastal inlet. Cell 1 corresponds to the south of the Vilaine Bay which is under the influence of a coastal river called the Vilaine. Cell 2 stretches between the rocky points of Castelli and Chemoulin and corresponds to the entire morphological sector explaining the double tombolo of the Guérande Peninsula with its two sandy spits. Cell 3 is not taken into account. Cell 4 corresponds to the northern and southern shores of the outer Loire Estuary. Cell 5 corresponds to the Bourgneuf Bay back of Noirmoutier Island. Cell 6 corresponds to the western side of Noirmoutier Island, between Herbaudière Rocky Point and Fromentine Inlet (an inlet between Bourgneuf Bay and the sea), south of Barbâtre Spit. Cell 7 stretches between Fromentine Inlet and Corniche Vendéenne Rocky Point. Cell 8 corresponds to Yeu Island. Cell 9 stretches between Corniche Vendéenne and Fort Nicolas Rocky Points. Cell 10 stretches between Fort Saint Nicolas Point and the Grouin du Cou Rocky Point. Cell 11 stretches between south of Grouin du Cou Point and Sèvre Niortaise Estuary.

In order to respect the continuity of these two studies, the paper seeks to synthesize the dynamics of the shoreline at various scales while respecting the limits of these sediment cells.

3. Methods

3.1. Aerial Photograph Database

The collected data concern the 169 km of the beach / dune shoreline (with and without coastal defenses) of the Pays de la Loire region (Table 2).

All available data could not be used for reasons of completeness, availability and data quality. Four constraints have been set for quality data: 1) the need for spatial completeness across the entire regional shoreline; 2) The shortest airborne acquisition period. We aim to produce a complete coverage of the study area, which may make it necessary to compile several dates of aerial photography recording. The complete set of aerial photographs may have sometimes been acquired in several months. We have set the representative acquisition period for each period at a maximum of 3 consecutive years, with a criterion of absence of significant storm during the acquisition period of airborne surveys ; 3) a visual quality and an appropriate scale for the digitization of the shoreline; 4) an identical time interval between airborne campaigns within the 60-year study period.

Table 2 : Characteristics of the aerial photographs survey dataset from 1950 to 2012.

Registration Year	Source	Colour Data	Georeferenced photographs	Aerial photographs scale	Pixel size (m)	Ground Control point RMS error (m)
1950	IGN	B&W	-	1:25 000	0.5	6
1952	IGN	B&W	-	1:25 000	0.5	6
1968	IGN	B&W	71, 72, 73, 74, 76, 143, 145, 131, 161, 162, 163, 164, 169, 171, 107	1:33 600	0.7	3.6
1971	IGN	B&W	444, 536, 587, 590, 670, 668, 667, 674, 663, 141, 75, 135, 664, 665, 658, 709, 678, 708	1:24 500	0.6	3.3
1989	IGN	B&W	127, 69, 2, 62, 63, 61, 58, 69, 68, 49, 28, 59, 72, 54, 101, 32, 40	1:30 000	0.7	3.8
1990	IGN	Colour	829, 826, 824, 823, 1096, 1099, 1257, 2286, 2281, 2279, 2278, 1835, 1838, 1839, 1832, 1841, 1842, 1843, 1964, 1966, 121, 123, 132, 135, 351, 349, 356, 536	1:20 400	0.6	2.9
2000	IGN, MEDDE	Colour	-	1:25 000	0.5	1.2
2011	IGN, MEDDE	Colour	-	-	0.5	1.2
2012	IGN, MEDDE	Colour	-	-	0.5	1.2

These four constraints only permit us to use five series of aerial photographs spaced from ten to twenty years apart over the last 60 years. Three series of photographs were already georeferenced (the 1950 series, the 2000 series and the 2010 series). Two series, which had already been digitized but not georeferenced, were collected (the 1970 series and the 1990 series).

The repositories were downloaded from the Geopal and Geolittoral platforms (BD ORTHO History 1950, ortholittorale 2000 and ortholittorale v2) thanks to the National Geographic Institute (IGN) and the Ministry of the Environment. The images of the 1970s and 1990s were downloaded from the IGN's aerial photo website, and georeferenced using the ArcGIS 10.2.2 toolbox. Each image was corrected using between fifteen and twenty calibration points common to the ortholittorale v2. Then, we applied a second-degree polynomial. Finally, we used the RGF93 / Lambert 93 (EPSG 2154) projection system.

3.2. Shoreline Detection and Digitalization

In this study the manually 2D digitized shoreline corresponds to the contact between the beach and the dune. Gaillot and Chaverot (1999) consider this shoreline to be a good proxy of erosion and accretion on macrotidal coasts. More specifically, the indicator depends on the type of beach - dune contact. Using both the typology of shorelines presented in the synthesis of Boak and Turner (2005) and the one about beach/dune contacts, we classified shorelines in 4 types: a) the dune is eroding, beach-dune contact is highly visible on aerial photographs and corresponds to a topographic break: this shoreline is the established dune erosion scarp. This shoreline also corresponds to the seaward dune vegetation line. b) The dune is stable or in accretion, the shoreline is between the foredune and the beach. Low and pioneer vegetation is then visible on aerial photographs. c) In few cases, no dune vegetation occurs along the shoreline but the slope changes between the dune and the beach which leads us to identify the shoreline thanks to a change in grey level on aerial photographs. d) If sea defences have been installed along the dune, then the shoreline corresponds to the foot of the seaward edge of the dune protection structure. This is a 2D surface mobility indicator. It is not possible to deduce a 3D mobility that would require further investigation, such as the use of airborne LiDAR (Le Mauff *et al.*, 2018). This means that a coastal segment may appear stable over time, for example along a sea defence bordering the dune, but that the beach volume at this location may obviously vertically raise or decrease according to sediment mobility.

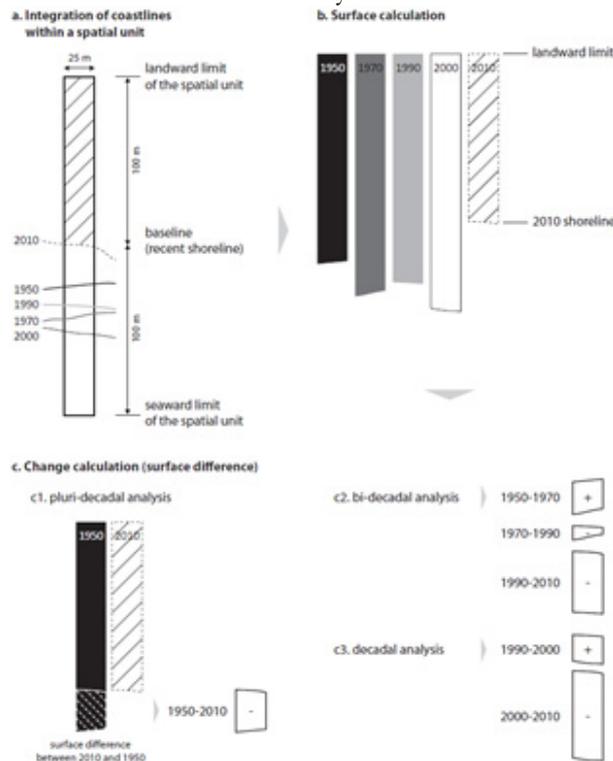


Figure 2 : Method to retrieve the surface changes between shorelines.

3.3. Spatial Units (boxes) and Surfaces Computation

Surface analysis of historic shoreline mobility is conducted using spatial units (called "boxes" here) similar to those deployed by Debaine and Robin (2012) and Juigner *et al.* (2017). In this article, boxes of 25 * 100 m were deployed along the sandy coasts of the Pays de la Loire region. These boxes were created as part of the OR2C (see acknowledgments section at the end). We used a Python program related tool and processed it in the ArcGIS 10.2 environment (Juigner *et al.*, 2017) for this analysis.

Figure 2 shows how we obtained the information: step a) Fig.2: the baseline is the 2010 shoreline. A landward line and a seaward line at 100m far from the baseline are delimitating a 25m wide spatial unit. These two lines are beyond the maximum regional shoreline mobility over the 60-year study period on either side of the baseline. Then, each shoreline cuts the spatial unit so that the surface between the shoreline and the landward limit of the spatial unit is retrieved (step b., Fig. 2). Finally (step c. Fig. 2) these surfaces are subtracted to each other in order to only keep the surfaces between the shorelines.

Crossing the boxes and the shorelines permits us to calculate a surface in square meters, which is specific to each box for each date of the analysis. The surface difference (between two shorelines at two given dates) supplies information on the positive or negative evolution of the shoreline. This is why an area gained on the sea is considered as accretion and an area lost on land is considered as erosion.

3.4. Assessment of the Uncertainty

The uncertainty on the shoreline's position involves potential location errors. These errors may accumulate when there is a comparison of the position of two shorelines at two different times. It is therefore necessary to precisely estimate this margin of error, in order to retrieve the significant mobility beyond and below this margin. The uncertainty on the shoreline's position is measured from three sources of error (Dada *et al.*, 2016, Moussaid *et al.*, 2015). The first one is the pixel size of aerial images (E_p , Table 3). The second is the precision of the orthorectification or georeferencing process (RMS errors, E_o , Table 3). The last one is the accuracy of manual shoreline digitization (E_d , Table 3). E_d is given by comparison between two successive manual digitization of one shoreline seen on both the same aerial photograph and operator. The uncertainty on the shoreline's position (E_{sp} , Table 3) is equal to the square root of the sum of squared errors (Fletcher *et al.*, 2003) and is expressed in meters (m). This uncertainty expressed in surface unit (E_{sp}^2 in table 3) is obtained by multiplying the value of the uncertainty by the width of the boxes, here 25 m, and is calculated in square meters (m^2).

Table 3 : Calculation of the uncertainty of shoreline positions uncertainty. $ESP(m) = (E_p^2 + E_o^2 + E_d^2)^{0.5}$ and $ESP^2 (m^2) = ESP*25$

Year	1950	1952	1968	1971	1989	1990	2000	2011	2012
Ep - Error pixel = pixel size (m) see Table 2	0.5	0.5	0.7	0.6	0.7	0.6	0.5	0.5	0.5
Eo - Error orthorectification = RMS errors (m) see Table 2	6	6	3.6	3.3	3.8	2.9	1.2	1.2	1.2
Ed - Error digitization (m)	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	4.3	4.3	4.3	4.3
Esp - shoreline position uncertainty (m)	7.1	7.1	5.2	5.0	5.4	5.2	4.4	4.4	4.4
Esp ² - shoreline position uncertainty in surface (m ²)	177	177	130	125	134	129	111	111	111

Except for the year 2000, we had to use two dates to obtain each period's shoreline because of the lack of perfectly homogeneous regional data. Thus, the uncertainty and the time step slightly vary from one sector to another. Table 4 presents a summary (in m²) of the uncertainties related to this variability.

The values are calculated by taking the square root of the squared surface uncertainties' sum (Esp² in table 3).

The evolution surfaces with values lying within an interval defined by the uncertainty will be considered stable or non-significant because of (i) errors inherent in the method or (ii) real stability of the shoreline (e.g. an erosion of 150 m² detected into a box of 25m width for the period 1950-1971 will be considered as non-significant because of the uncertainty of ± 216.5 m² for this period, table 4).

Table 4 : A calculation of the uncertainty I (in m²) by pairwise of dates. $I = \sqrt{(\text{Esp}^2\text{a}) + (\text{Esp}^2\text{b})}$ with a = date a and b = date b.

Year	1950	1952	1968	1971	1989	1990	2000
1968		219.7					
1971	216.5	216.5					
1989				183.2			
1990			183.8				
2000					174	170.6	
2011	208.8				174	170.6	157.1
2012	208.8	208.8				170.6	157.1

Figure 3 shows an example of the method applied to a 3.5 km zoomed extract. For readability purposes, the extract was put at the individual mapping scale of spatial units. This example shows La Turballe sand spit which is the northern part of the double tombolo of the Guérande peninsula (Figure 1). In the background and on the left side of the figure, we can see the boxes' deployment on a black and white 2010 orthophotograph extract. Two shorelines of 1950 and 2010 are superimposed on the boxes. Then, from right to left, the six periods are presented. They display surfaces in accretion (in light grey), erosion (in dark grey) or of little significance because of they are falling into the margin of error (in white). Thresholds are chosen to reduce the display of recorded dynamics to 3 classes: the two thresholds correspond to the positive and negative margins of error. Between these two, there are the stable or non-significant values. The significant accretion class is above the positive value of error. The significant erosion value is below the negative value of error. The period from 1950 to 2010 is, for example, represented by 3 classes with the 2 thresholds of positive (+ 209 m²) and negative error margin (-209 m²) on both sides. The erosion class is therefore between the maximum erosion value registered for this spit (-513 m²) and the negative margin of error -209 m²; the non-significant dynamic class ranges from -209 m² to +209 m² and the accretion class ranges from +209 m² to the maximum accretion value of the spit +665 m².

4. Results

The results concern 169 km of sandy coasts in the Pays de la Loire region, with and without protection and sometimes with low rocky backshore and small sand dunes. We will first present the regional global surface sediment balance, then the global sediment cell balance, and finally inside the sediment cells' results for the most dynamic.

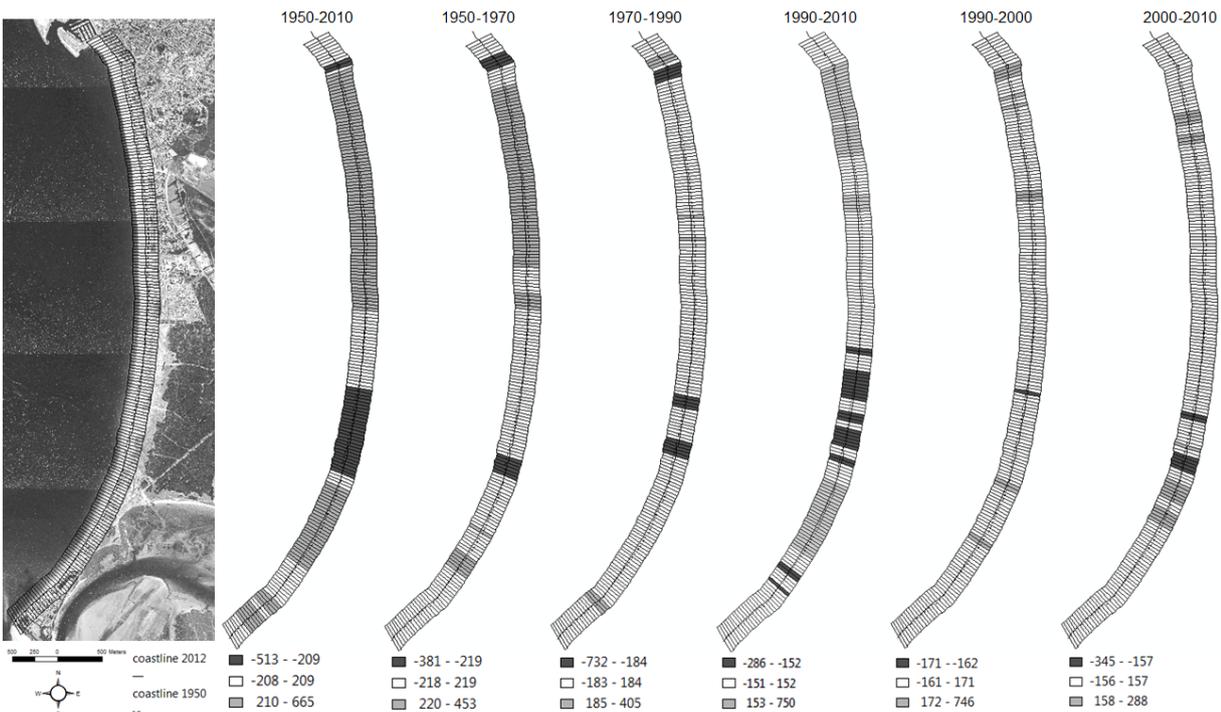


Figure 3 : A zoom showing the example of La Turballe sand spit (in CS 2). The values in m2 are commented on in the text (in dark grey: erosion, in light grey: accretion, in white: stable or non-significant values). See Figure 5 for an overview of the study area, where only the erosion part is represented.

4.1. Regional Surfaces Sediment Balance

Table 5 presents the main results which were calculated at the regional level. Firstly, the regional average uncertainty margin is presented in square meters per box. The regional total length of the coastal linear (expressed in meters) is presented. It is characterized by an absence of significant change because it falls within the uncertainty margin. The total regional area is expressed in square meters. It is characterized by a significant absence of change either because of their stability, or because they are within the uncertainty margin. Secondly, we present the regional total length of the linear in accretion, then in erosion (in meters). Thirdly, the regional accreting surfaces are presented in various units: square meters, square meters per year, square meters per linear meter, and square meters per linear meter per year. Finally, the eroding surfaces are also presented with the same units.

Period 1950-2010: 45 km of coast have accreted, 78.1 km have not changed or insignificantly because of the margin of uncertainty, and 45.7 km have eroded. There are 2.78 km² of accreting surface and 1.11 km² of eroding surface corresponding respectively to an accretion of 1.03 m²/m/y and an erosion of -0.406 m²/m/y.

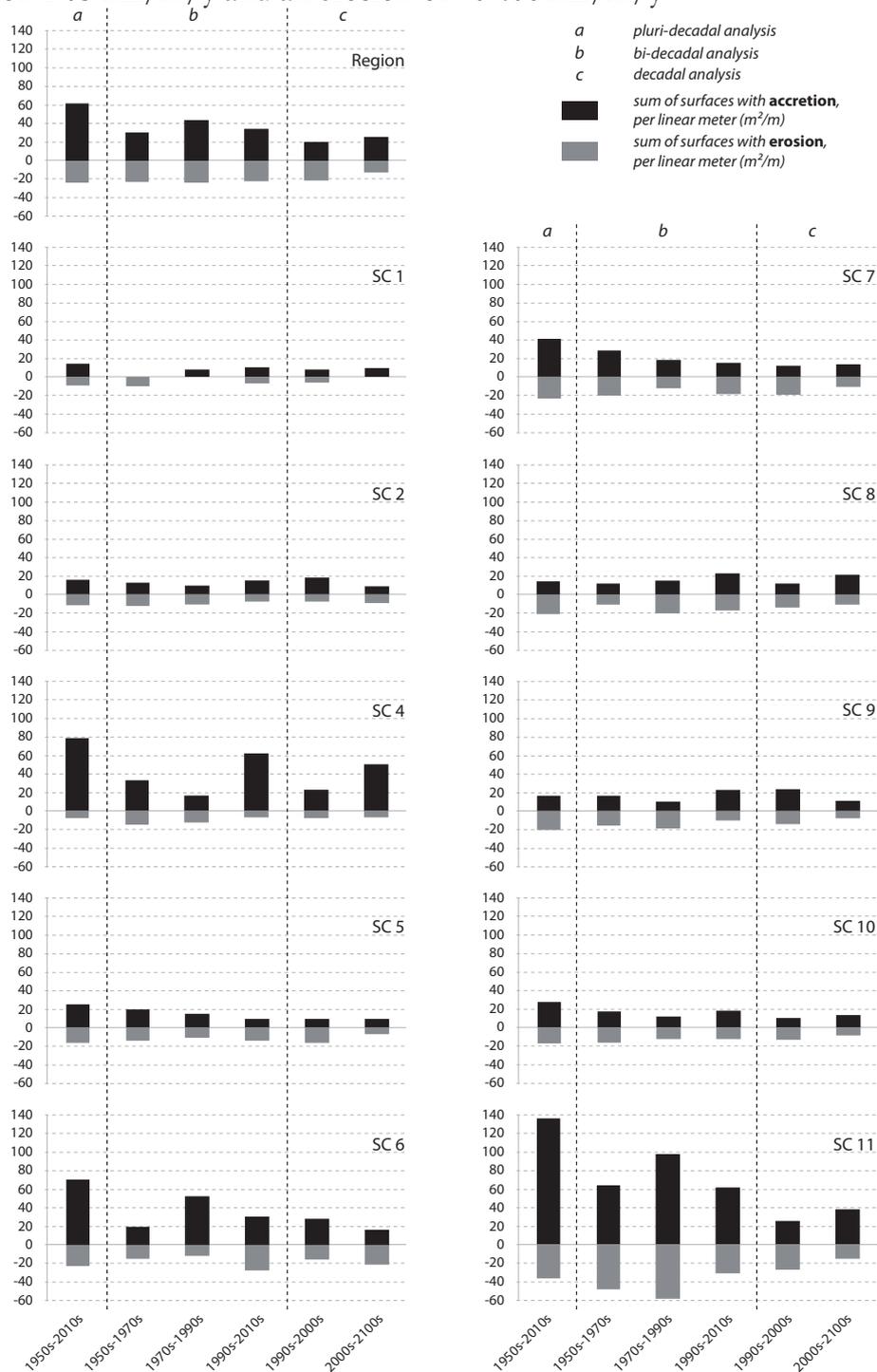


Figure 4 : Results of sediment cell changes. The values indicated are in m²/m. There are the sums of surfaces in erosion and in accretion per period and per sedimentary cell (m²). This sum is divided by the width of the box (m²/m)

Table 5 : Regional results for the 169km shoreline under study

	1950-2010	1950-1970	1970-1990	1990-2010	1990-2000	2000-2010
Uncertainty (m ² /box)	208.8	218.7	183.8	174.01	170.6	157.1
Shoreline no significant change (m)	78,159	100,178	106,167	109,615	121,915	118,510
Area no significant change (m ²)	32,340	-33,896	21,972	19,042	77,894	-42,692
Shoreline accretion (m)	45,079	25,163	38,443	37,753	31,913	30,282
Shoreline erosion (m)	45,732	43,628	24,359	21,601	15,142	20,177
Area accretion (m ²)	2,788,384	759,397	1,682,534	1,305,993	630,790	768,650
Area accretion/year (m ² /y)	46,473	37,970	84,127	65,300	63,079	76,865
Area accretion/shoreline (m ² /m)	61.9	30.2	43.8	34.6	19.8	25.4
Area accretion/shoreline/year (m ² /m/y)	1.03	1.51	2.13	1.73	1.98	2.54
Area erosion (m ²)	-1,113,318	-1,028,716	-577,110	-679,833	-323,152	-254,730
Area erosion/year (m ² /y)	-18,565	-51,436	-28,856	-23,992	-32,315	-25,473
Area erosion/shoreline (m ² /m)	-24.4	-23.6	-23.7	-22.2	-21.3	-12.6
Area erosion/shoreline/year (m ² /m/y)	-0.406	-1.18	-1.18	-1.11	-2.13	-1.26

Over the three periods of 1950-1970 / 1970-1990 / 1990-2010, eroding surfaces have regularly decreased. Correlatively, the accreting surfaces have sharply increased with a peak from 1970 to 1990. Surface values trends are confirmed by linear values trends.

The two periods of 1990-2000 / 2000-2010 are characterized on the one hand by a sharp increase in accreting surfaces and correlatively a sharp decrease in eroding surfaces. On the other hand, the accreting shoreline has decreased whereas the eroding shoreline has increased by more than 5 km.

Results are computed into one measurement unit (m²/m/year) in order to summarize the results and to compare timescale. This enables us to highlight a large asymmetry between eroding and accreting trends along the regional shoreline. The overall trend over the 1950-2010 period is accretion (1.03 m²/m/year) compared to erosion (-0.4 m²/m/year). The variability is significant for accretion at the 20-year timescale (1.51, then 2.13 and 1.73 m²/m/year) while low for erosion (-1.18 then -1.18 and -1.11 m²/m/year). For the last two 10-year periods (1990-2000/2000-2010), accreting areas increase (1.98 to 2.54) while eroding areas decrease (-2.13 to -1.26 m²/m/year).

4.2. Sediment Cell and Sediment Budget

The evolution of sediment cells is presented in figure 4. These results are presented in m²/m in order to harmonize the comparison between cells of different sizes.

When looking at the 1950-2010 balance sheet, the 30 m²/m threshold value (i.e. accretion (+30 m²/m) or erosion (-30 m²/m)) divides the sediment cells into 2 sets: a very dynamic set and the other which is significantly less dynamic.

Below +/-30 m²/m, we find the SC 1, 2, 5, 8, 9 and 10. There is a good balance of weak erosion / weak accretion dynamics for SC 1 and 2 and a fairly good but stronger balance

for the others. Overall, accretion slightly dominates for SC 1, 2, 5 and 10, while erosion is slightly predominant for SC 8 and 9.

SC 4, 6, 7 and 11 are above +/-30 m²/m. For these 4 cells, the accretion largely dominates the erosion. This is particularly the case for SC 11, which reaches a record rate of more than 130 m²/m for the 1950-2010 period and SC 4, whose balance favours accretion (80 m²/m in accretion against less than 10 m²/m in erosion).

4.3. Sediment Cell Surfaces and Sediment Balances

The figures 5 and 6 detail the results within sediment cells. In addition, Table 6 shows a significant statistic.

The maximum erosion and accretion values (expressed in square meters) were recorded within the box presenting the maximum mobility in each sediment cell. We discovered several trends including the 4 most active sediment cells.

SC 4 clearly shows regular accretion regardless of the period considered. The resultant south-north drift coupled with its position on the south bank of the Loire estuary explains this natural tendency to accretion. The maximum local accretion of this cell in a box is 7 191 m² for the 1950-2010 period. SC 6 shows accretion's prevalence on the Barbâtre spit in the south of Noirmoutier Island. The 1971-1990 period was highly favourable to accretion. While accretion also dominated in both the earlier and subsequent periods, it was less remarkable.

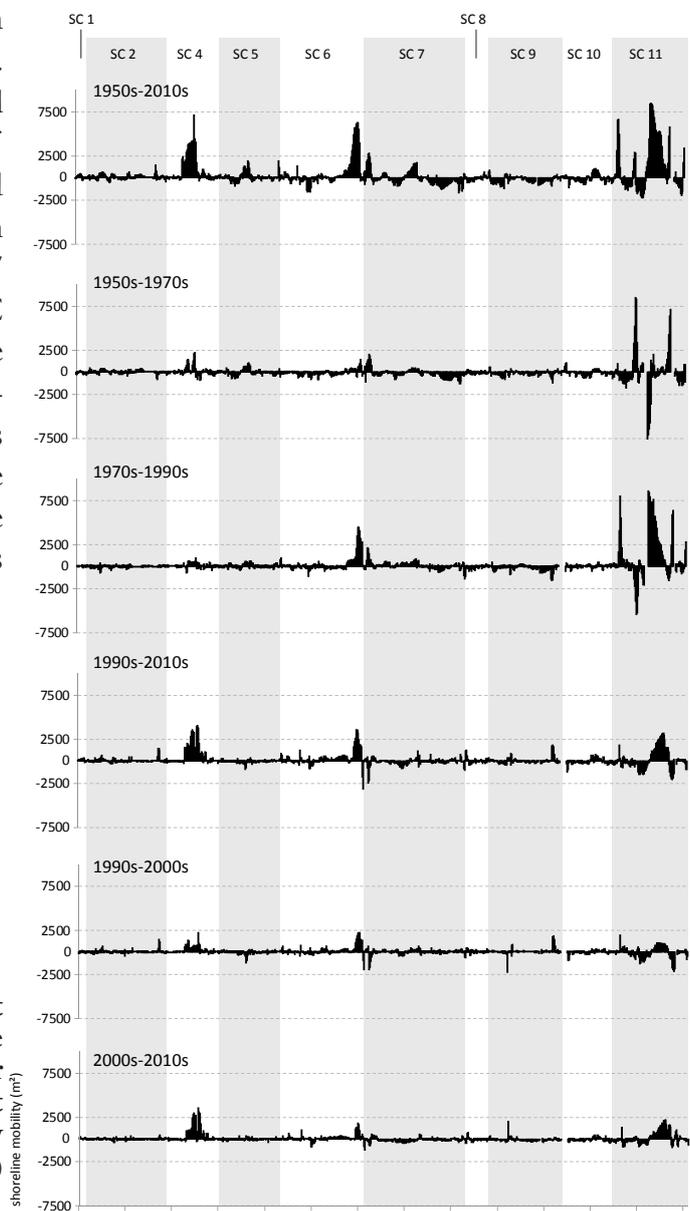


Figure 5 : Trends inside each sediment cell. Surfaces in m² in erosion (negative value) or accretion (positive value) per period for all boxes inside all sediment cells along the 169 km of the sandy dune coastline (from box 1 to box 6501)

SC 7 presents a more contrasted balance sheet with sub-cells either in erosion or in accretion according to the sectors. SC 11 presents the strongest contrast according to the periods with strong accretion of the Arcay spit (a maximum of 8 509 m² for a box downstream of the spit for 1950-2010 period), the strong erosion of the base of this spit at the level of the Belle-Henriette lagoon (a maximum recorded at -7 538 m² for the period 1950-1970). It should be noted that in the less active cells, some sectors are locally particularly active. The global statistics, however, tend to mask them. This is the case of the small spit along Le Havre du Payré (within SC 10), which has strongly decreased and almost disappeared over the most recent period.

Table 6 : Maximum value in square meters for erosion and accretion in one box of each sediment cell for each date. Note: the same box does not always present the maximum value for each date. For example: the box in SC 11 presents the erosion maximum value (-2 292 m²) for the 1950-2010 period and an accretion of 674 for 1950-1970, an erosion of -1 943 for 1970-1990, an erosion of -1 022 for 1990-2010, an erosion of -406 for 1990-2000 and of -619 for 2000-2010. This highlights the sections' spatial mobility (whether in erosion or accretion) along this sand spit.

Accretion Max (m ²)	1950-2010	1950-1970	1970-1990	1990-2010	1990-2000	2000-2010
SC1	495	-	213	374	215	330
SC2	1 432	502	405	1 508	1 433	516
SC4	7 191	2 254	985	4 102	2 279	3 553
SC5	1 991	1 108	622	393	337	455
SC6	6 324	1 473	4 472	3 608	2 282	1 903
SC7	2 813	2 088	2 139	1 159	713	604
SC8	489	365	490	1 245	488	813
SC9	869	631	489	1 860	1 836	2 023
SC10	1 077	1 134	533	788	426	555
SC11	8 509	8 517	8 610	3 247	1 948	2 239
Erosion Max (m ²)	1950-2010	1950-1970	1970-1990	1990-2010	1990-2000	2000-2010
SC1	-278	-329	-	-181	-178	-
SC2	-513	-866	-732	-286	-424	-345
SC4	-227	-898	-743	-269	-175	-301
SC5	-903	-742	-433	-928	-1 177	-325
SC6	-1 639	-856	-1 117	-3 159	-1 968	-1 236
SC7	-1 703	-1 317	-684	-2 502	-1 998	-704
SC8	-1551	-446	-1 425	-1 021	-671	-439
SC9	-1235	-1 258	-1 588	-462	-2 235	-313
SC10	-1150	-655	-548	-1 171	-952	-410
SC11	-2292	-7 538	-5 410	-2 098	-2 144	-965

5. Discussion conclusion

This work is based on a surface approach of the dynamics of the shoreline. The interest of the surface approach is threefold. It permits us: 1) To have precise erosion and accretion surfaces without resorting to interpolation as in a discrete approach. 2) To produce statistics on erosion and accretion at various scales on demand by aggregating adjacent small space units: from the spatial unit's region to intermediate scales: sediment cells and also inside sediment cells in this paper, and, if necessary, administrative units (municipalities, departments and any other aggregation on demand). 3) This approach integrates and extends the transect approach because the values per transect are automatically found on both sides of a box. We can therefore extract erosion or accretion rates either in linear meters per year (m/y) or in square meters per year (m²/y) or even in square meters per year and per linear meters (m²/m/y) which constitute the finest possible measurements for this kind of proxy of the erosion/accretion rate (see Table 5).

The resulting balance is complete thanks to the use of several spatial scales. We can navigate the database from the spatial unit scale (25m along the shoreline) to the regional scale (169 km of coast): the example of La Turballe spit presented in figure 3 can be replaced at various scale levels by consulting the database: at the scale of the sedimentary SC 2, the 1950-2010 report shows an accretion of 95 551 m² and an erosion of -12 341 m² for a non-significant change within the margin of error of 19 763 m². This assessment concerns SC 2 in its entirety, that is to say the spit of La Turballe, the urbanized spit of La Baule (double tombolo of the Guérande peninsula) and small beach-dune systems between the point of Castelli and La Turballe, between La Baule and the point of Chemoulin, and between La Turballe and La Baule. We can therefore zoom in on each sediment sub-cell: La Turballe's spit presents an overall sediment balance between 1950 and 2010 of 41 656 m². This balance is distributed as follows: 50 181 m² in accretion, -9 675 m² in erosion and 1 151 m² not are significant because it falls into the margin of error of +/- 208.8 m². We quickly noticed that the contribution of the dynamics of La Turballe's spit to the overall sediment balance of SC 2 is significant: 52.5% of the accretion of SC 2 and 78.3% of the erosion of SC 2. It is therefore sufficient to place the erosion/accretion information's spatial extraction limits to obtain the results: this may be of interest to space management, whatever the spatial dimension: communities or other urban projects.

The sediment balance is on the other hand completed by using a set of aerial photographs to obtain periods of fairly regular evolution. If we have a look at the visual example of La Turballe in figure 3, one can see that, over time, some sectors which are in erosion can pass into accretion or the opposite. La Turballe's spit is characterized by the littoral drift (oriented north to south) which built up in the long term (over 10 centuries). Over the last 60 years of the studied period, this drift has been disrupted by the extension of La Turballe's harbour. The artificialization of the tip of the spit and the successive sea defences that rise from the tip to the last third of the spit have also disrupted its dynamics. The evolution observed at various times is therefore complex: the trend over 60 years is the upstream and downstream accretion or stability of the spit and an erosion zone in the central part. The reading of the 20-year period is contrasted. The 1950-1970 period is marked by overall accretion of

the upstream part and stability or slight erosion of the downstream part whereas stability dominates over the the spit (apart from a few small areas of erosion (in the center) or accretion (upstream and downstream)) from 1970 to 1990. Furthermore, a more marked trend appears in the 1990-2010 period: the upstream and downstream accretion and erosion of the middle part of the spit. The final two 10-year periods show less mobility: 1990-2000 is fairly stable, as well as 2000-2010, where more erosion or accretion sectors emerge, showing the beginning of a sectorized evolution. This finer approach therefore makes it possible to determine trends within SC and to delimit the evolution of homogeneous sub-cells.

Overall, there are imbalances between accretion and erosion. Some sediment cells are globally in accretion, which means that new sediment arrival occurs within these cells. Hence the unbalance of the erosion / accretion ratio (even if this is not a 3D approach the surface approach shows enough differences not to incriminate a measurement differential between the presented 2D of this paper through the proposed proxy and 3D).

New sources of sediment must be precisely identified to understand this overall accretion trend. Firstly, the sedimentary stocks on the shallow waters are to be inventoried thanks to an ongoing OR2C project. Offshore surveys and airborne Lidar bathymetry are already conducted each year in order to retrieve stock mobility with new methodologies (Launeau, 2019). Secondly, the turbidity of the Loire River has been studied (Ciffroy *et al.*, 2003) but the sandy fraction is less well known. It can be noticed, however, that the very high accretion (which has been identified in this study on the south coastline of the outer Loire estuary) is related to the inputs from the Loire. Finally, influences of harbours and sea defences disrupting sedimentary transits are to benefit from further studies so as to have a better understanding of erosion. For example we can wonder if there is a relation between the recent erosive cycle observed on Veillon's sand spit (Havre du Payré, Fig. 1) and Bourgenay Harbour opened in 1985 and located upstream sediment drift or if it is part of a natural cycle over one century, as the consultation of older documents seems to indicate: The 1830-1860 staff map lead us to see a development of the sand spit but we more recently observed an increasing erosion and a disappearance for the last 20 years.

Within a sub-cell there may be a balanced sediment budget: for example, Figure 5 shows three case studies and in particular the case of the Barbâtre sand spit. It has been in chronic accretion for several centuries and is in the early stages of erosion at its end. It is necessary to distinguish between natural processes and the role of anthropic management. One has to consider the impacts of the Fromentine inlet which is maintained by dredging for navigation and the Noirmoutier bridge piers which could also play a role. This case raises the question of the dynamics of coastal sections near the tidal inlets and the dynamic of the sand spit. The sections near the inlets are more dynamic than the others, as shown in Castelle *et al.* 2018 for the Aquitaine coast. On the Pays de la Loire coast, the sections near the inlets are very dynamic for those that are not fixed. Indeed, some sections on either side of the inlets are completely or partially fixed by coastal defences (La Turballe spit, La Baule spit in SC 2 fig. 1, Moutiers spit in SC 5, Aiguillon spit in SC 11) Others are not fixed (Barbâtre spit in SC 6, Veillon spit, Havre du Payré in SC 10, Arçay spit in SC 11). As seen previously, the Veillon spit has almost disappeared in about ten years. Arçay Spit is in rapid elongation (Allard *et al.*, 2008) while Barbâtre spit ending at the Pointe de la Fosse is similar

to the Pointe of Gatseau which borders the Maumusson inlet 140 km to the south (Bertin *et al.*, 2004) : in a long term, the dynamics are similar but not in the same proportions. The width measurement of the Maumusson inlet is 2250m and that of Fromentine inlet 800m on the 1830-1860 staff map. The current width Maumusson inlet is 1750m and that of Fromentine inlet 500m. The westward accretion of the Gatseau spit is 1000m over the last 1.5 century and 150m for the Barbâtre spit. However, since the 2000s, there has been a strong erosion of around 10m/year for Gatseau spit and 5m/year for the Barbâtre spit. If the trend is the same, the spatial configuration differs in size, explaining the orders of magnitude: the island of Oleron which partially closes the Antioch and Maumusson pertuis has an area of 174 km² for a length of 30km, while the island of Noirmoutier which partially closes the bay of Bourgneuf has an area of 49km² for a length of 18km. The dynamics of the tidal inlets at each site is explained by these spatial configurations. In addition, the role of sea level rise (of about $+1.03 \pm 0.05$ mm/year between 1863 and 2014 observed at Saint Nazaire tide gauge -Loire estuary-, Ferret, 2016) and the north atlantic wave regime change (Bertin, 2013) can help to explain this shared dynamic trend at a regional scale.

Indeed, the role of climate change and storms frequency must certainly be taken into account in interpreting the results of this study on a fine scale, which is also a work in progress within the framework of the OR2C. Strong storms occur quite regularly in this region. Those leaving traces through sedimentological or dendrochronological indicators and supported by historical documentation have recently been highlighted over a short half-century period (Pouzet, Robin *et al.*, 2018). Similar works has been carried out on the very long term of the Holocene in the same region (Pouzet, Maanan *et al.*, 2018). We do not really see any changes in storm patterns from these two studies. Extreme events sometimes cause very significant erosion with geomorphic storm response displaying considerable spatial variability, which is attested by numerous publications (e. g. Masselink, Scott, 2016, Le Mauff, 2018). We can also suspect the role of average storms with a cumulative effect of less energetic forcings on the coastal sediment balance. The trends identified at this time scale in this study cannot yet be properly explained without a feedback on the cumulative effects of the different forcings and the consideration of site-specific conditions with a necessary higher frequency of observations (Le Mauff, 2018). Hence improvement in wave climate variations knowledges (swells and storm surges) as suggest by Allard (2008) about an Arçay spit study, while taking into account the sites conditions seems to be a key factor to explain these various morphological evolutions, of which three case studies are presented Figure 5. The 2D global observation approach in this study provides precise knowledge of global surface balances and it would also be eminently complementary to observing other proxies of sediment mobility to be found *(i)* in shallow foreshore water or *(ii)* on beaches or *(iii)* along beach/dune contact, using 3D and other modelling approaches. In this way, this study is the first global assessment of the 2D evolution of erosion and accretion surfaces along the Pays de la Loire coast. It is published in the context of the OR2C. One of their goals is to produce regular assessments by integrating, in addition to this historical study, a more frequent monitoring of regional erosive trends and to create methods to explore these trends. This assessment is necessary to understand the changes in order to develop coping strategies when areas may be threatened (Juigner, 2017). However, compared to

others countries in the world (e.g. Esteves *et al.*, 2002), the overall assessment shows that, apart from a few high-risk sectors, the Pays de la Loire is not really a region where the risk associated with erosion is a crucial issue over a short or medium term. This study is the first to discover this and it enables us to target more precisely and to monitor sectors with real risks and identified stakes.

Chapitre 2

Assessment of the vulnerability of sandy coasts to erosion (short and medium term) for coastal risk mapping (Vendée, W France)

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 & Coastal Management*, 201, 105452

Suite à l'analyse sur le long et moyen terme de l'évolution du trait de côte réalisé au sein de chapitre précédent, nous proposons de nous inscrire dans une temporalité plus courte à travers l'étude de l'impacts d'évènements extrêmes sur les côtes sableuses de Vendéennes. L'aléa est évalué (i) à long terme en mesurant l'évolution historique du trait de côte entre 1950 et 2016 (ii) à court terme en mesurant les reculs instantanés dus à des événements extrêmes. La méthode appliquée dans ce document est basée sur les recommandations du guide méthodologique pour les Plans de Prévention des Risques Littoraux (MEDDE, 2014). Dans les PPRL, la zone d'aléa érosion s'écrit comme suit : « $L_r = 100 T_x + L_{max}$ » avec L_r = la largeur de la zone d'aléa, T_x = le taux de recul annuel moyen, L_{max} = la valeur du recul maximal liée à un événement extrême. Nous proposons les recommandations suivantes comme définir le paramètre L_{max} en considérant plus d'une tempête (avec deux cas : (i) Lothar/Martin (1999) et Xynthia (2010)), (ii) faire la projection à l'horizon 2050 au lieu de 2100 dans le PPRL, (iii) mettre à jour les données utilisées pour définir la zone d'aléa érosion dans les cartes de risque du PPRL.

1. Introduction

On a global scale, sandy coastlines are, as a result of climate change, increasingly exposed to the risks of coastal flooding and erosion (Nicholls *et al.*, 2007). Projected changes in climate would result in sea level rise, increased storminess in mid-latitudes, and changes in wave conditions with higher waves and storm surges (Ranasinghe, 2016). According to Luijendijk *et al.* (2018), 24% of the world's sandy coasts have an erosion rate of more than 0.5 m/year and about 16% of more than 1 m/year. On the other hand, 27% of sandy coasts are undergoing accretion and about 18% have an accretion rate over 1 m/year. In France, 23% of sandy coasts are accreting, 40% are stable and 37% are eroding (CEREMA, 2018).

In Vendée, sandy coasts represent 40% of the coastline, i.e. 109 km. According to the results of the National Erosion Indicator (CEREMA, 2018), 27% of the Vendée coastline is historically retreating at an average rate of 0.1–0.5 m/year and 7% of 0.5–1.5 m/year 21% of the coastline is accreting (over 0.1 m/year) and 48% is not significantly changing. Over the last 70 years, and despite significant erosion, the phenomenon of accretion remains predominant on the sandy coasts of Vendée (Robin *et al.*, 2019).

However, the erosion mechanism is not only characterized by average historical retreat speeds (Fenster *et al.*, 2001). Indeed, instantaneous erosion during storms is an important phenomenon and it has to be precisely quantified in order to manage these coastal areas more easily (Callaghan *et al.*, 2009). The Vendée coast has been impacted by numerous high intensity winter storms such as Lothar and Martin (1999), Johanna (2008), Xynthia (2010) or Joachim (2011). More recently, the 2013/2014 winter, for which 22 storms were recorded, has also been the subject of several studies showing the morphogenic impact of this succession of storms (Blaise *et al.*, 2015; Masselink *et al.*, 2015, 2016). All these events have highlighted the fragility of this coastline by causing instant retreats of dune barriers, marine submersions, sometimes leading to significant material damage and even human casualties (Mercier and Chadenas, 2012; Fattal *et al.*, 2010; Bertin *et al.*, 2012; Castelle *et al.*, 2015).

Thus, understanding the environmental processes and conditions that cause short-term shoreline mobility is important to protect the coasts, prevent damage and to understand the causes of chronic beach retreat (Wright and Short, 1983).

Over the past 30 years, various strategies have emerged to manage coastal risk. At the European scale, coastal erosion, and its link with climate change, was included for the first time in the 2002 Recommendation of the European Parliament and of the Council of the European Union, in the “Integrated Coastal Zone Management strategies” section. Following this recommendation, the EuroErosion project (2002–2004) was the first program to take stock of the situation of erosional coastal zones at the European scale. In the same way as in the United States, as part of the implementation of FEMA's coastal erosion management program (Leatherman, 2003), EuroErosion project gave a lot of impetus to

implement a coastal erosion policy and thus highlighted the need to consolidate knowledge on coastal erosion, to anticipate and to integrate it into management strategies (European Commission, 2004) forming a guideline for the implementation of regulations on national and local scales. Numerous studies have since recalled and insisted on the importance of an integrated and future-oriented coastal erosion management strategy (Marchand *et al.*, 2011; Rangel *et al.* 2018).

In France, there is a whole arsenal of measures to prevent and manage the risks linked to coastal erosion. The 1986 coastal law (loi "Littoral") for the development, protection and enhancement of the coastline prohibits urbanisation in the 100m strip from the upper limit of the shoreline in order to protect natural coastal areas. It indirectly reduces the number of issues subjected to coastal erosion. Thus, the Barnier law of February 2, 1995 relating to the reinforcement of environmental protection and the prevention of natural risks instituted the Coastal Risk Prevention Plan (PPRL). This spatial planning document, enforceable against third parties, is annexed to the Local Urban Planning Plan (PLU in French). It applies to the EPCI (a public establishment of cooperative urban areas) and limits or even prohibits urbanisation when the hazard and the stakes are high. Despite the pressures mentioned above, storm Xynthia was about to reveal the lack of PPRL on the coastal towns of Vendée. The sector of La Faute-sur-Mer, which would end up being the most affected, would be the first to get its PPRL in 2012. In 2017, all the towns along the Vendée coast, apart from Yeu Island, got an approved PPRL.

A methodological guide was published in 1997 (Garry *et al.*, 1997) and updated in 2014 so as to help drawing up these PPRL (MEDDE, 2014). This guide offers food for thought concerning the methods determining the shoreline retreat hazard applied in the PPRL as well as ways of improving the methodology. The erosion hazard zone, built with a precautionary approach, aims to protect the stakes related to this phenomenon. This hazard zone (L_r) written as follow: " $L_r = 100 T_x + L_{max}$ ". It results from the analysis of historical dynamics (T_x), projected to a 100-year horizon (100), to which is added the maximum retreat due to an extreme event (L_{max}) (DDTM 85, 2015). The first parameter ($100 T_x$) aims at extrapolating the historical trends of the shoreline evolution in the future in order to know the shoreline position on a 100-year horizon. The second parameter (L_{max}) is strategically added to define the most vulnerable areas during an extreme event.

There are several methods to measure the retreat due to an extreme event. The need to measure this erosion phenomenon during a storm was raised as early as 1968 by T. Edelman, 1968 in the Netherlands who used a dune equilibrium model. In 2014, Ciavola *et al.*, 2014 list and detail the principles and evolutions of empirical models for estimating dune retreat: 1) a first dune equilibrium model was created by Edelman in 1968. It was independent of time and pre-storm profile, and the post-storm profile's shape depended on wave and sediment properties. This method was then taken up and improved in other studies: DUROS method (Dean (1977); Van de Graaff (1977); Vellinga (1986)); 2) more advanced models taking into account the pre-storm profile and simulating the temporal evolution. It was

particularly developed by Kriebel and Dean (1993); 3) a model estimating the potential retreat of the dune front was defined by Hallermeier and Rhodes, 1988 (also called Median Dune Erosion). This model related the erosion cross-sectional area which was relative to the return period of an extreme water level (FEMA, 2003). However, this model did not take into account beach morphodynamics such as beach slopes and run-up consequences. These three empirical approaches are the first of three existing methods estimating the retreat related to an extreme event. The second method is based on designing and using numerical models. These tools allow the simulation of hydrodynamic processes in order to better understand the morphological dynamics between the foreshore, the beach and the dune during extreme events. The XBeach, SBeach, Telemac models are the most commonly used (Roelvink *et al.*, 2009; Maspataud *et al.*, 2010; Corbella and Stretch, 2012b; Pender *et al.*, 2015). Finally, the third method is known as observation and measurement method. It consists in quantifying the impact of storms by measuring, using transects perpendicular to the shoreline, the distance between the pre-storm and post-storm shoreline which have been previously digitized on a database of aerial images. This method is more often used to assess historical trends in shoreline mobility (Houser *et al.*, 2008; Thieler *et al.*, 2009; Moussaid *et al.*, 2015; Cellone *et al.*, 2016), than to assess the impact of a storm (Harley *et al.*, 2017).

We suggest using the last method to assess the impacts of the storms of December 1999 (Lothar and Martin) and February 2010 (Xynthia). In Vendée, Xynthia is considered as the reference storm in the PPRL because of the exceptional water levels measured through La Rochelle's tide gauge. Indeed, the local rise in water levels was due to the concomitance between the storm, which happened during a high spring tide (Pineau-Guillou *et al.*, 2010). However, in meteorological terms, Xynthia was not as exceptional as Lothar, Martin (1999) or Klaus storms (2009) (Bertin *et al.*, 2012; Genovese *et al.*, 2013). This implies that other storms such as Lothar and Martin may have had a more significant impact than Xynthia. It also aims to show that considering other extreme events could affect the erosion hazard zones of the PPRL. This work aims to improve the definition of the erosion hazard in PPRL maps by showing the relevance of including the impacts at least two extreme events for the definition of L_{max} and to provide leads to improve the realization of the erosion hazard bands of the PPRL.

First, the study area will be presented, then the method of realization of the erosion hazard zone will be explained. In a third part the results will be presented and then discussed in the last section by taking into account a specific example of « La Tranche-sur-Mer ».

2. Study area

The Vendée coastline is located on the French mid-Atlantic coast and is generally oriented along a NW-SE axis (Robin *et al.*, 2019). It stretches for nearly 276 km from the bay of Bourgneuf to the Aiguillon cove. The Vendée coast is composed of 109 km of sandy coast, 64 km of rocky coast and 103 km of sea defences. The erosional sandy coasts are generally characterized by eroding cliffs (Fig. 1- G). The foredunes are representative of accretion (or healing) sectors (Fig. 1- F). In some areas, such as Noirmoutier, dunes play an essential role and are the only barrier between the sea and the low areas (Fig. 1-A). Other sectors are more characterized by important seasonal sedimentary dynamics. The outlet of the Goulet de Fromentine (Fig. 1-B), is the part of the mouth whose morphology is the most dynamic (Le Mauff, 2018).

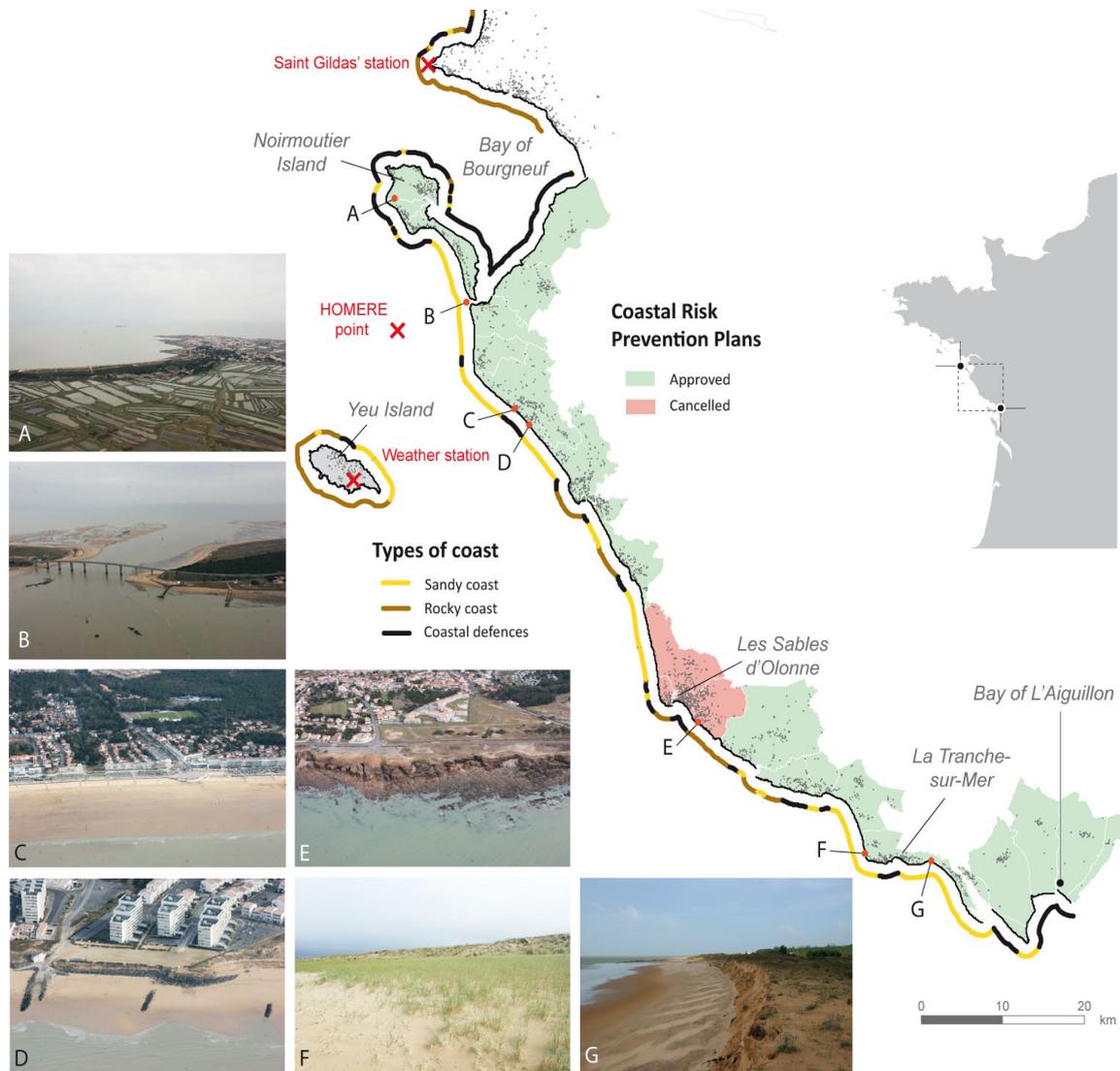


Figure 1 : Location map of Vendée (W France department). The map shows the location of the different types of coasts (illustrated by seven photographs) as well as the current status of the Coastal Risk Prevention Plans. (HOMERE point: X 309753.801597; Y 6658415.559416).

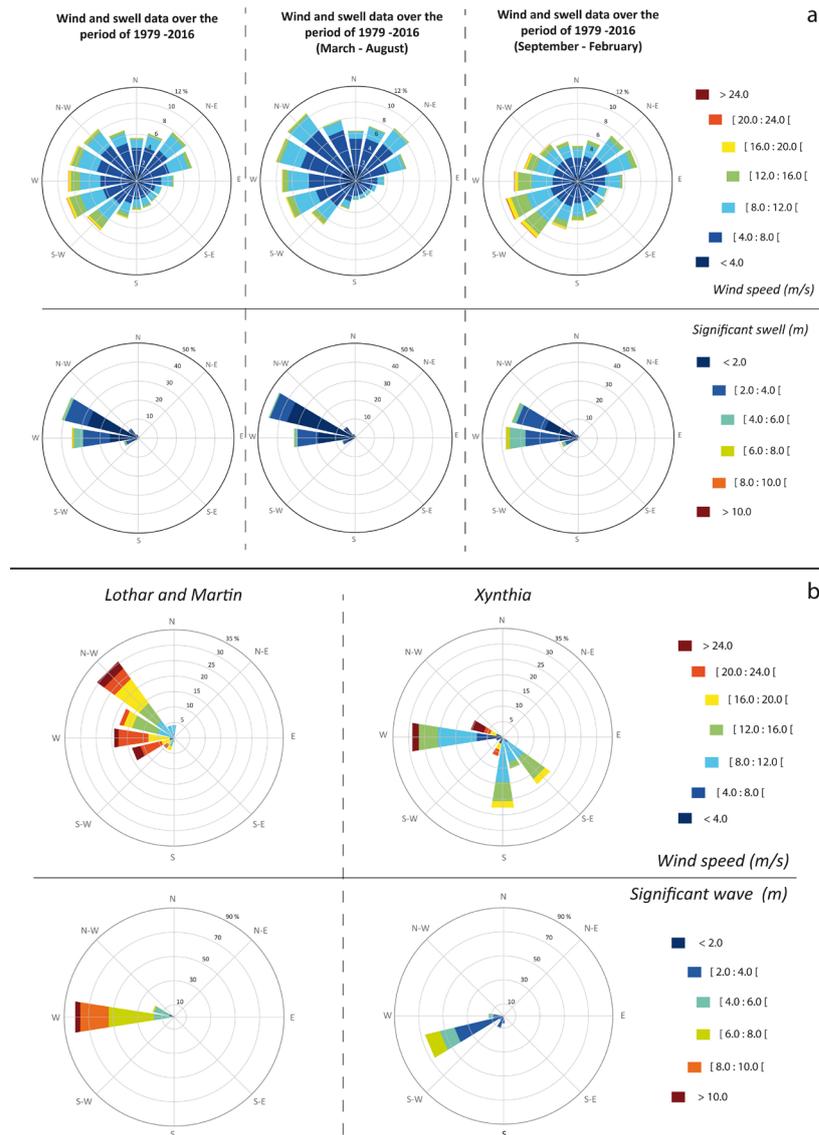


Figure 2 : a: Percentage and direction of wind and wave data over the 1979–2016 period (annual and seasonal), b: Wind and wave data during storms Lothar & Martin and Xynthia.

The Vendée coast is exposed to the North Atlantic marine weather patterns. Tides are semi-diurnal with a range varying from 2.3 m during neap tides to 4.80 m during spring tides and reach up to 6.3 m during highest astronomical tides (from tide gauge of Saint Gildas) (SHOM, 2017). According to the coast classification developed in Davies (1964), the coast can be considered macro-tidal. Concerning the hydrodynamic parameters, between 1979 and 2016, an annual predominance of winds from the NW to SW sectors (about 42%) was observed with a W to SW trend (about 25%) in the winter period (September to February). The strongest winds are mainly from the S-SW sector (Fig. 2-a).

Table 1 : List of significant storms since 1979.

Date	Storm name	Duration (h)	Wind	Waves	Atmospheric pressure (min) (hPa)	Maximum water level (St Gildas' station)	Storm surge (m)	Power index (Hs ² hr)	Storm class (Dolan and Davis, 1992)				
			Speed (mean/hr)	Dir	Hs (mean/hr)	Hs max	Tp (peak)	Dir					
December 15, 1979	–	18	19	W	9.4	10.2	16.9	W	1001.1	5.3	0.7	1590.48	4
November 23, 1984	–	18	14.5	WSW	7.3	8.6	16.1	W	1001.4	6.3	1.1	959.22	4
November 24, 1984	–	15	18.1	W	9.4	10	16.9	W	994	5.6	0.5	1325.4	4
March 24, 1986	–	27	16.5	SW	5.9	7	12.4	SW	980.8	–	–	939.87	4
October 15, 1987	–	27	16.5	SW	5.9	7	12.4	SW	980.8	–	–	939.87	4
October 16, 1987	–	27	16.5	SW	5.9	7	12.4	SW	980.8	–	–	939.87	4
December 26, 1999	Lothar	22	19.4	W	7.9	8.7	14.5	W	993.6	6.5	1.1	1373.02	4
December 27, 1999	Martin	28	17.8	WNW	7	10.4	14.7	WNW	969.6	5.4	1.2	1372	4
December 28, 1999	–	28	17.8	WNW	7	10.4	14.7	WNW	969.6	5.4	1.2	1372	4
February 09, 2009	Quintin	17	18.5	W	7	9.1	13.5	W	988.6	5.6	0.7	833	3
February 10, 2009	–	17	18.5	W	7	9.1	13.5	W	988.6	5.6	0.7	833	3
February 27, 2010	Xynthia	27	15	SW	3.9	5.9	10.5	SW	971.8	6.9	1.1	410.67	3
February 28, 2010	–	27	15	SW	3.9	5.9	10.5	SW	971.8	6.9	1.1	410.67	3
December 15, 2011	Joachim	32	21.2	WNW	7.9	10.1	14.5	W	990.3	5.5	1	1997,12	4
December 17, 2011	–	32	21.2	WNW	7.9	10.1	14.5	W	990.3	5.5	1	1997,12	4
December 23, 2013	Dirk	36	13.7	SW	6.5	7.9	15	WSW	986.6	5	0.8	1521	4
December 25, 2013	–	36	13.7	SW	6.5	7.9	15	WSW	986.6	5	0.8	1521	4
February 06, 2014	Quimaira	48	16.2	WSW	6.1	9.6	17.5	WSW	991.7	4.9	1.3	1786	4
February 08, 2014	–	48	16.2	WSW	6.1	9.6	17.5	WSW	991.7	4.9	1.3	1786	4

Concerning the wave climate, the majority of the significant wave between 1979 and 2016 comes from the NW (40%) and W (35%) sectors (Fig. 2-a). In the winter period, the significant swells mainly come from the W sector (38%). The observation is the same for the highest Hs (above 4m). The inventory of the most relevant storm events has been achieved for the whole survey period (1979–2016). The most notable storms in terms of sea-weather conditions since 1979 are listed in Table 2. For each event, the hydrodynamic and meteorological characteristics and the storm index, according to Dolan and Davis in 1992 (Table 1), were calculated. This index takes into account significant wave heights (hs) and storm duration (hr).

The waves and wind data come from the HOMERE database (Accensi and Maisondieu, 2015) whose extraction point is located between the islands of Yeu and Noirmoutier (Fig. 1). Atmospheric pressure data come from the meteorological record station (METEO FRANCE) on Yeu island. The water levels measured are from tide gauge of Saint-Gildas (Loire-Atlantique department) because tide gauges of Vendée (L'Herbaudière, Les Sables d'Olonne, La Rochelle-La Palice) did not operate during one of the two storms.

In this paper, we chose to study the storms Lothar (December 26–27, 1999) and Martin (December 27–28, 1999) and Xynthia (February 2010). The December 1999 storms were unusually violent and caused a lot of damage on the coastline of the Pays de la Loire and especially in Vendée. These storms are often mentioned together as they hit the French coasts two days apart. Nevertheless, we note Lothar crossed France at a rather northerly position than Martin (Ulbrich et al., 2001), causing less damage in Vendée. However, as we are unable to differentiate precisely the impact of each storm, we will combine both storms and refer to the event of December 1999.

The significant wave average over the duration of these events is 7.9 m for Lothar and 7 m for Martin with maximum heights of 8.7 m and 10.4 m respectively (Table 1). Lothar peaked at mid-tide, Martin at low tide, both during a phase of decreasing tidal range from spring to neap tide. These storms lasted 22 and 28 h respectively. According to the severity index of Dolan and Davis (1992), both of them are classified as category 4, or “severe” storms.

Storm Xynthia, which occurred during the night of 27–28 February 2010, caused significant swells (over 27 h) of 3.9 m on average with a maximum height measured at 5.9 m. According to the severity index, Xynthia is classified as a category 3 or “significant” storm, with a lower storm surge than Martin (Table 1). However, this storm surge, combined with high tide (Table 1), generated extreme water levels.

These two events were chosen for 1) the available data. Indeed, both events are sufficiently documented (archives, aerial images, feedback, photographs, forcing data) to carry out this work. 2) Their morphogenic character. Beyond the numerous damage and human casualties, their impact on sandy coasts makes them suitable study objects for measuring L_{max} . The December 1999 storms were chosen for their particularly intense meteorological conditions manifested by strong waves, high water level and storm surge (Table 1, Fig. 2-b) as well as Xynthia considered as a “reference storm” in Vendée, characterized by extreme water levels and a particularly high storm surge (Table 1, Fig. 2-b).

3. Method

3.1. Data

The aerial images are produced by the French institute of geographic and forest information (IGN). Their resolution varies between 0.5 and 1 m depending on the date of the aerial images. These images have been georeferenced and then mosaicked over the entire departmental coastline. The analysis of the historical evolution of the shoreline was carried out over a period of 66 years, using aerial images from 1950 (BD ORTHO Historique) and 2016 (BD ORTHO). For the short term analysis of the shoreline’s mobility evolution, the before and after storm aerial images were taken 14 months apart for Lothar and Martin and 10 months apart for Xynthia. The 2010 photographs were also produced by the IGN as part of the “Xynthia feedback” conducted by the Directorate General for Risk Prevention (DGPR) (Table 2).

Table 2 : Characteristics of the aerial photographs survey dataset for the Lothar & Martin and Xynthia storms.

Events	Date of flight campaigns	Number of georeferenced images	Resolution	Scale	Data	Source
Lothar et Martin	From 06/19/1999 to November 07, 1999	25	1	1/30000	Aerial images	"Go back in time" (IGN)
	From 07/30/2000 to January 08, 2000	-	0.5	1/25000	OrthoLittorale	Geolittoral (IGN)
Xynthia	September 07, 2009	-	0.2	1/25000	BD ORTHO	Géovendée
	April 03, 2010	70	0.2	1/10000	Aerial images	Geolittoral (IGN)

3.2. Shoreline detection

The before and after storm aerial images are mosaicked. Then shorelines are digitized. The shoreline changes are measured using a vegetation line and/or a morphological line both strongly related depending on the context. After an erosive storm event, the selected line is a morphological line. The edge of the dune -as the erosion reference feature (ERF)- is always selected in such a context because it is highly relevant. The line corresponds to the toe of a nearly vertical dune cliff carved by erosion processes, which clearly demarcates the vegetated dune (which comes until the top dune cliff) from the backshore (Crowell *et al.*, 1991; Zuzek *et al.*, 2003; Boak and Turner, 2005; Suarez *et al.*, 2010). After a recovery period, the limit between backshore and dune is different because dune recovery process associated with sediment supply on the backshore build a foredune with pioneer vegetation. In such a context, the foredune vegetation line proxy is chosen which also correspond to the morphological line between foredune and backshore in such a sedimentary accretion context.

The shorelines have been digitized at a scale of 1:1000 in order to achieve a good level of accuracy. When the shoreline is artificial, the marker used is the base of the structure. These structures are built to protect currently non-relocatable assets situated in the coastal strip and potentially subject to erosion.

3.3. Measurement of the retreat due to an extreme event

The evaluation of the maximum retreat related to an extreme event (L_{max}), consists of measuring the distance between the shorelines before and after a storm using an extension of the ArcGis 10.5 software (Digital Shoreline Analysis System (DSAS) (Thieler *et al.*, 2009). The transects are generated at a right angle from the shoreline and the spacing is variable according to the authors. It is generally less than 100 m (Aernouts and Héquette, 2006; Hapke *et al.*, 2006; Abdellaoui, 2007; Faye *et al.*, 2008). The spacing of the transects in this study is 20 m (Houser *et al.*, 2008; Moussaid *et al.*, 2015; Cellone *et al.*, 2016) as this distance is best suited to small beaches in the study area. 5000 transects are thus implemented along the Vendée coastline. Finally, the distance between the oldest and the most recent shoreline (pre and post storm) is measured for each transects using the Net Shoreline Measurement (NSM) method in DSAS.

3.4. Assessment of the uncertainties

3.4.1. *Uncertainty of the shoreline position*

The uncertainty on the shoreline's position involves potential location errors. These errors may accumulate when there is a comparison between the positions of two shorelines at two different times (Robin *et al.*, 2019). A margin of uncertainty has therefore been calculated. The accuracy with which the position of the shoreline is determined depends on the quality of the images (image resolution or "pixel error"), the quality of the georeferencing (orthorectification error) and the accuracy and regularity with which the shoreline has been digitized (digitization error). The final result corresponds to an interval in which it is impossible to define whether the sandy coastline portion is stable or whether the error is related to the uncertainty of the method. The overall position error for a shoreline is calculated by taking the square root of the sum of the squares of each error (Fletcher *et al.*, 2003; Hapke *et al.*, 2006). The overall error for both events is estimated to be 2.8m. When the evolution rates are calculated between two dates and over a longer period (more than one year), these values can be annualized by calculating the square root of the sum of the squares of the global error for each date, divided by the time passed between these two dates (Faye *et al.*, 2008; Bagdanavičiūtė *et al.*, 2012; Oyedotun, 2014; Cellone *et al.*, 2016; Dada *et al.*, 2016; Fossi Fotsi *et al.*, 2019; Robin *et al.*, 2019).

3.4.2. *Temporal uncertainty*

Temporal uncertainty is related to the gap between pre-storm and post-storm aerial images. For the December 1999 event, almost 14 months separate the aerial images before the storm (June 19, 1999) and after the storm (August 01, 2000) (Fig. 3-A). Wave and wind conditions recorded during these 14 months show that both Lothar and Martin storms are the only most severe events. We therefore assume that the results in terms of measured retreats on the aerial photographs are mainly caused by the impact of both storms.

The time between the passage of the storms and the images, taken either immediately afterwards or a few months later, interferes little with the measurement of the setback because resilience is taken into account. In fact, aerial images sometimes reveal markers of resilience such as the formation of benches or the re-growth of vegetation on the fore dune. However, when the actual traces of storm impact (notch formation or erosion cliffs) are visible, these markers are used to digitize the post-storm shoreline.

This observation is also available for the storm Xynthia. The 2009 and 2010 aerial campaigns were carried out 10 months apart. The highest wind speeds were indeed recorded during Xynthia (Fig. 3-B). Concerning the wave climate, a few days before the storm hit, we observe two set of wave whose heights exceed those measured during the storm. In spite of these important values, these sets of wave occurred during neap tides so the impact on the coast was definitely not significant.

3.5. Projection of the shoreline to 2050

3.5.1. Assessment to historical mobility of the shoreline

The historical evolution of the shoreline was measured between 1950 and 2016. The 1950 shoreline was digitized from IGN aerial photographs recorded in 1950 and supplemented with a few 1952 photographs to provide aerial continuity over the entire area (Robin *et al.*, 2019).

The shoreline position indicators selected are the same as for Lmax. However, the digitization scale for the 1950s is set at 1:2500 due to the poor quality of the aerial photographs. The transect method is also used in this case in order to measure an average annual change between two dates. On each transect, the EPR (End Point Rate) method is used (Thieler *et al.*, 2009).

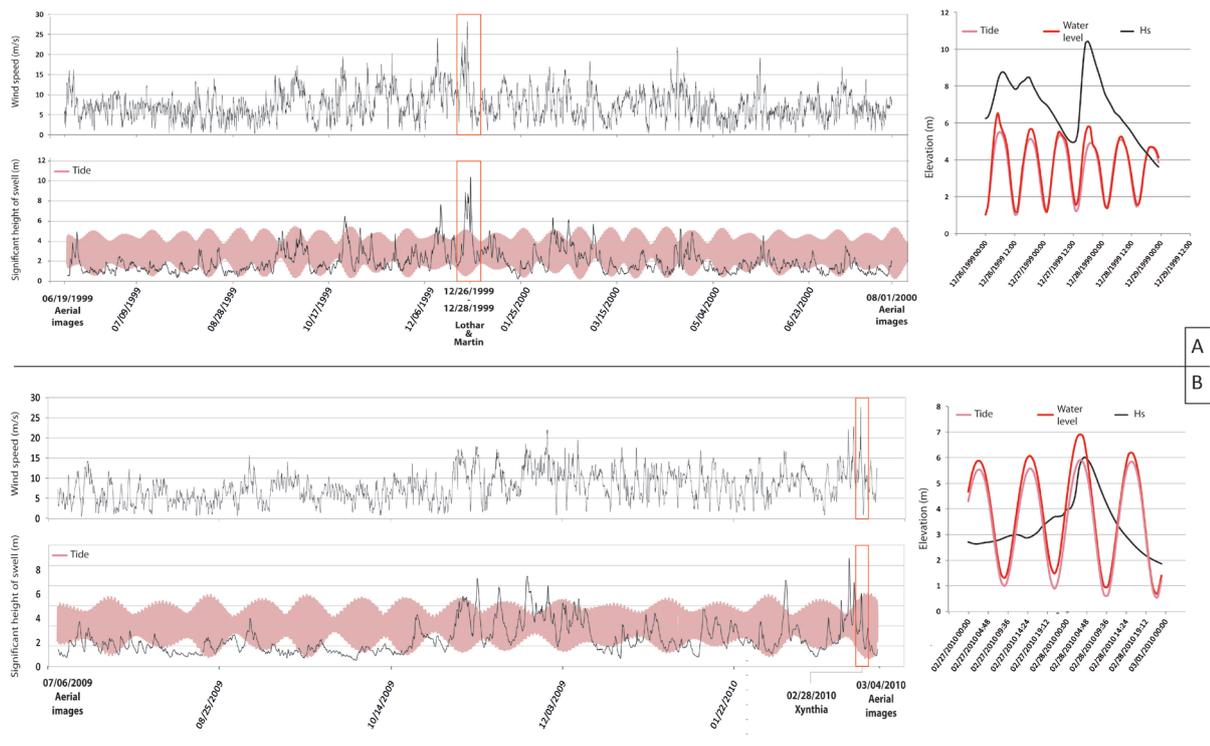


Figure 3 : Hydrodynamic characteristics over the period between the two aerial images for A) Lothar and Martin, B) Xynthia.

3.5.2. Projection to 2050

The projection to 2050 is based on the observation of shoreline evolution between 1950 and 2016. This approach, based on the one applied in the PPRL, consists in carrying back the current shoreline linearly towards the back of the range, taking into account the historical evolution value of each transect. This historical evolution integrates the various processes that explain the observed dynamics: hydrodynamic and climatic factors (the role

of tides, the impact of extreme events), long-term sea level rise (eustatism), and human intervention.

To the value of the historical evolution calculated on each transect is then added the maximum measured retreat value linked to an extreme event (L_{max}). This addition (value of the historical evolution and L_{max}) corresponds to the value of the projection to 2050 on each transect. Finally, the line connecting each point on each transect corresponding to the value of the 2050 projection delimits the erosion hazard strip.

For all of Vendée, two scenarios have been carried out. The first one is the projection of the current shoreline to 2050 to which the retreat values measured after the storms Lothar and Martin are added. The second scenario also consists of projecting the shoreline to the year 2050, but this time taking into account the retreat values generated by the storm Xynthia. By comparing these two scenarios, we will be able to determine which of them shows the most significant retreat.

The IPCC's work published in 2019 (Oppenheimer *et al.*, 2019) justifies the choice of a projection to 2050 by the small divergence of RCP scenarios. Indeed, the average divergence in the projection of sea level rise by 2100 is 33 cm between RCP 2.6 and RCP 8.5, whereas by 2050 it is only 4 cm. The uncertainty is therefore lower by 2050: the risk of obtaining an erroneous shoreline positioning in 2050 is therefore much lower than trying to position the shoreline in 2100 with a much higher risk of error.

In this paper, the projection of the current shoreline is calculated by multiplying an average annual rate of shoreline change (accretion or erosion) by the number of years between 2016 and 2050 (i.e. 34 years). In the PPRL, only negative average annual rates of shoreline change are projected, thus corresponding to an erosive trend.

In areas where the shoreline is “fixed” by sea defences, we consider that the shoreline will be the same in 2050. However, a storm like Xynthia can have an overflow effect and bring sand behind the structure (Fig. 4), which should not to be confused with a retreat of the shoreline. In areas where the shoreline is “fixed” by coastal protection works, we consider that the shoreline will remain the same in 2050. In addition, the State ensures that the owners, managers and operators of these protection structures meet the regulatory requirements and thus guarantee a certain level of reliability.

Nevertheless, the ante and post-storm shoreline remain digitized at the base of the structure. On the other hand, simple walls delimiting property lines are not considered to be sea defences. They were moreover destroyed by wave action during Xynthia (Fig. 5). In this case, we take into account the retreat behind these property lines.



Figure 4 : The shoreline's retreat and damage on protection works in the aftermaths of Xynthia. La Tranche-sur-Mer – South of the Clémenceau beach.



Figure 5 : Oblique aerial and ground photographs following Xynthia. Town of la Tranche-sur-Mer. Left: 2009. Right: 2010.

3.5.3. Erosion hazard

In PPRL, the erosion hazard strip defined on the 100-year horizon is composed of two elements: the historical retreat of the shoreline to which is added the maximum retreat due to an extreme event (DDTM 85, 2015). The 2050 projection from 2016 onwards will therefore be written as follows:

$$L_r = 34 * T_x + L_{max}$$

with L_r = the width of the hazard zone, 34 is the number of years between the “current” shoreline used in this study (2016) and the 2050 horizon, T_x = the average annual retreat rate, L_{max} = the value of the maximum retreat following an extreme event. The parameter

L_{max} retained for all sections of the coastline is thus based on two steps: (i) on the section-by-section comparison of the setback observed for each storm and (ii) from which the L_{max} for all storms compared is retained. The L_{max} value corresponds to the strongest setback resulting from the comparison of the setback of the various storms. Thus, the L_{max} for a given section can come from the Xynthia storm impact which is stronger than the Lothar one and for the next section, the L_{max} can come from the Lothar storm impact if this one is stronger than the Xynthia one (Fig. 6-a). The historical retreat and L_{max} are calculated for each transect. The final result is transcribed as a hazard zone according the PPRL method (pink shaded area, Fig. 6-c).

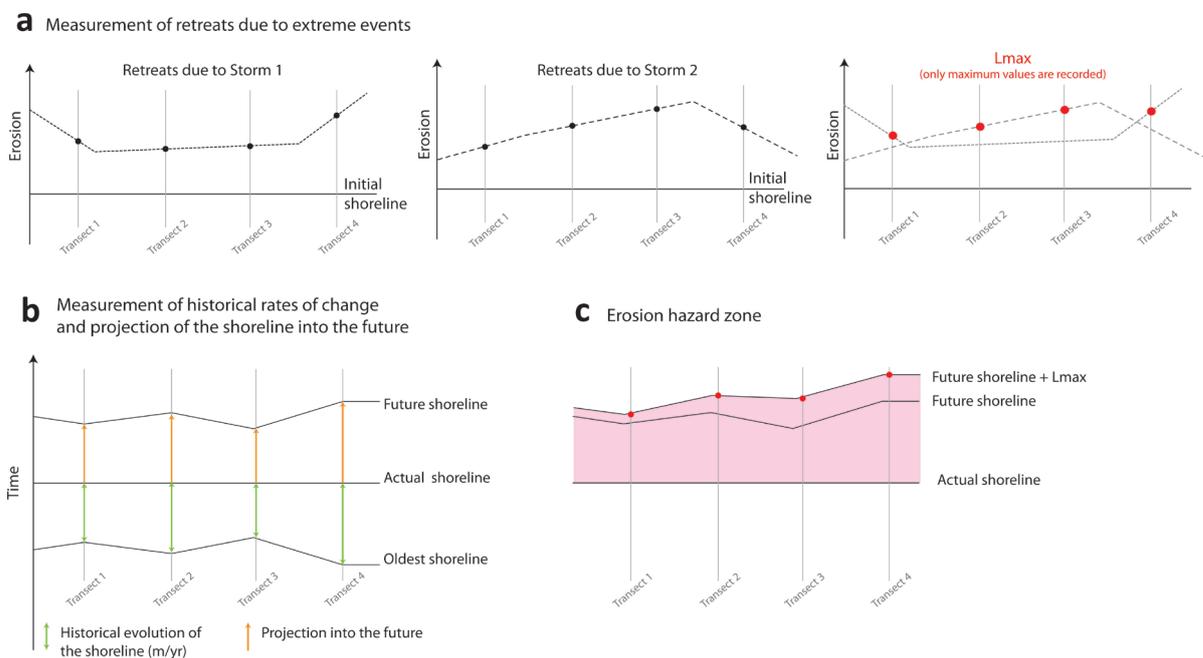


Figure 6 : Steps of the realization of the “erosion hazard” zone.

4. Results

4.1. Impact of the two storms on the Vendée shoreline

Over all the sandy coasts of Vendée, 43.2% (i.e 41 km) of the sandy coastline were eroded during storm Xynthia. Regardless of the range of erosion, Xynthia was more morphogenic than Lothar and Martin (Fig. 7-a). The most remarkable erosion values are measured in the town of La Tranche-sur-Mer (up to 40 m) (Fig. 12). In addition, some towns saw much of their shoreline retreat during the Xynthia storm, as in Saint-Jean-de-Monts, where 90% of the coastline eroded as a result of the storm with retreat values of up to -12m .

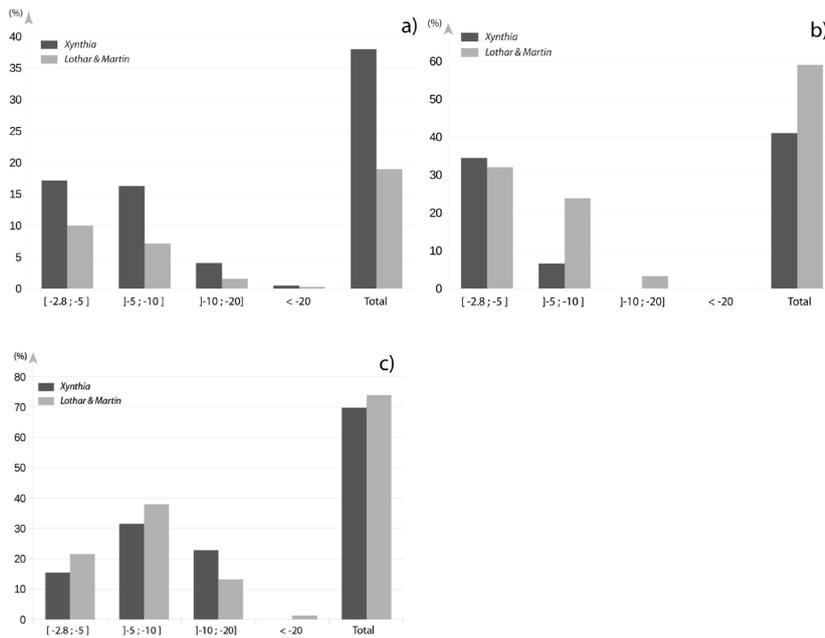


Figure 7 : Percentage of the shoreline impacted by storms per erosion phase on sandy coast of a) Vendée, b) Noirmoutier-en-île, c) La Faute-sur-Mer.

Even if the storm's most serious consequences have not been found in Vendée, the impact of Lothar and Martin remains consequential. Indeed, as far as our study area is concerned, the 1999 storms caused retreats over 20.5 km, i.e. 21.6% of the sandy coasts of Vendée.



4.2. The uneven effects of the two events on sandy coasts

The results show an uneven impact of the storms on the sandy coasts of the Vendée. Some sectors were more affected during Xynthia than during Lothar and Martin as is the case for the local council community "Océan Marais de Monts". This local community includes the coastal towns of La Barre-de-Monts, Notre-Dame-de-Monts and Saint-Jean-de-Monts. Its coastline is particularly exposed to storms. The impact of Xynthia on this sandy coast was greater than Lothar's and Martin's, both in terms of length of the eroded shoreline and the distance of landwards retreat (cross-shore).

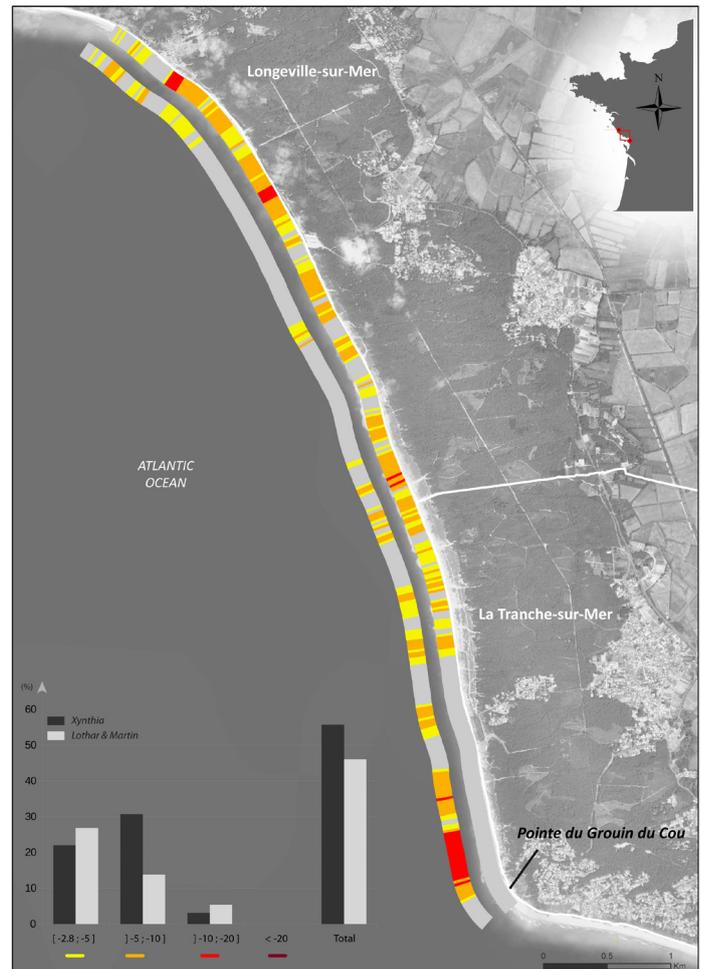
Figure 8 : Retreats measured during both events on the local council community "Océan Marais de Monts". Left strip: Lothar and Martin (December 1999) Right strip: Xynthia (February 2010).

On this coast, the retreats due to Xynthia were measured over 9.5 km, i.e. 68.7% of the three towns' coastline against 23% for Lothar and Martin. Much of the retreats measured during this storm are of less than 5 m and constitute 50.4% of the eroded coastline. It is also observed that 26.8% of the erosion values are between 5 m and 10 m and 1.3% between 10 m and 20 m after Xynthia (Fig. 8). Generally speaking, Lothar and Martin have impacted the coastline three times less than Xynthia; 22.8% of the coastline was hit against 68.5% in 2010.

Despite Xynthia's undeniable impact, some areas were nevertheless more affected by the storms Lothar and Martin as in the town Noirmoutier-en-île. Approximately 30% of the sandy coasts of the town eroded after the 1999 storms, i.e. almost 1.5 km. Retreat values of less than 5 m are equivalent for both storms. We note that retreats between 10 m and a maximum retreat value reaching 19.7 m were measured only during Lothar and Martin whereas the retreat values did not exceed 6 m following of Xynthia. In addition, erosion values measured between 5 m and 10 m are observed on 11.8% of the town's sandy coasts after Lothar and Martin against 3.3% after Xynthia (Fig. 7-b).

In the sector located in both Longeville-sur-Mer and La Tranche-sur-Mer, 56% of this sector has retreated following Xynthia against 46.5% in December 1999 (Fig. 9). However, in the area of the Grouin du Cou tip, in the southern part of the sector, Lothar and Martin caused the most significant retreats of up to 13 m, whereas no significant retreats were measured following Xynthia. Although Xynthia affected a larger portion of this area, the percentage of retreats between 10 m and 20 m is higher (5.3%) for Lothar and Martin than after Xynthia (3.1%). We have previously noted that the two extreme events studied had different at department scale. However, some sectors suffered a similar impact both in terms of eroded coastline and depth of retreat. This is the case of La Faute-sur-Mer, one of the most severe impacted sectors in this department (Fig.

Figure 9 : Retreats measured during both events on La Pointe du Grouin du Cou. Left strip: Lothar and Martin (December 1999). Right strip: Xynthia (February 2010).



7-c). This section of the coastline was particularly sensitive to the storms Lothar, Martin and Xynthia. Its coastline was affected to the same extent by both events: 70% by Xynthia and 74% by Lothar and Martin. The retreat values exceeded 20 m in the northern part of the town during the storms of December 1999, whereas they did not exceed 10 m during Xynthia.

4.3. Consequences on projection scenarios

The study of the two extreme events Lothar & Martin and Xynthia, added to the historical evolution of the shoreline, makes it possible to compare the hazard strip for each scenario and to see which one has the greatest impact. This approach also aims to target vulnerable and erosional areas. In the example of La Tranche-sur-Mer (Fig. 10-a), the most important hazard strip corresponds to the Xynthia scenario and is therefore selected. In this sector, there is a difference of up to 11 m between the two scenarios. For the Xynthia scenario, the hazard strip extends over a maximum of 36 m compared to 28 m for the Lothar and Martin scenario, starting from the 2016 shoreline.

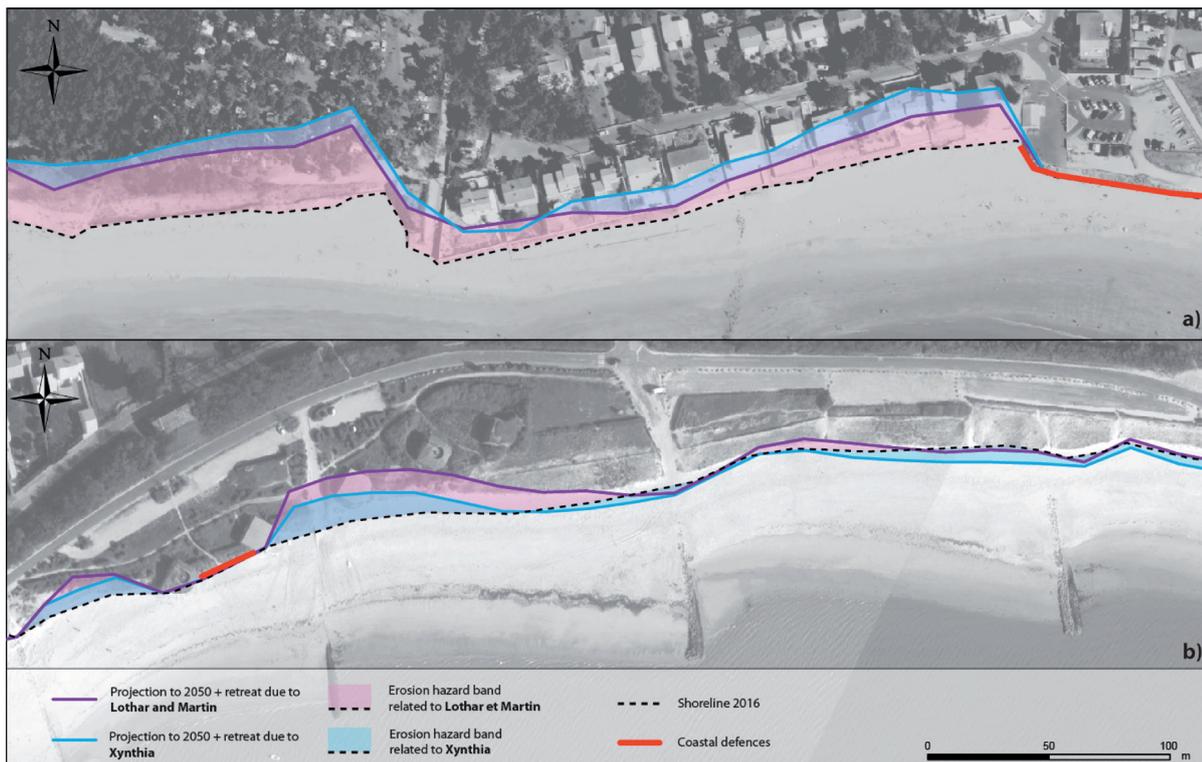


Figure 10 : Projection to 2050 with both scenarios (Lothar & Martin/Xynthia) a) La Tranche-sur-Mer, b) La Guérinière – Noirmoutier island.

In other areas, Xynthia is not the most morphogenic storm. This reveals the importance of taking into account another more impactful event such as the storms Lothar and Martin. In the sector of La Guérinière (Noirmoutier Island) (Fig. 10-b), the retreats measured are greater after the December 1999 storms than after Xynthia. The “Lothar and Martin”

scenario is therefore the most relevant scenario to be taken into account. A difference of up to 9 m between the two scenarios is observed. For the Lothar and Martin scenario, the hazard strip extends to a depth of 20 m compared to 12 m for the Xynthia scenario. In the eastern part of this area, the shorelines' projections to 2050 are located « in front of » the initial coastline. These sectors's evolution trends have been positive since 1950. Therefore, they won't be in a situation of erosion by 2050.

4.4. A Lmax definition based on two extreme events

Noting that the December 1999 storms sometimes caused greater retreats than Xynthia, it seems relevant to take both events into account to define Lmax at a department level. Fig. 12 shows the sectors that were most sensitive to either storm. These results can provide necessary information to analyse and explain the responses of the beaches to extreme events. For example, the 1999 storms caused greater retreats than Xynthia in the northern part of La Faute-sur-Mer, with an average retreat of 18m and a maximum retreat of 25m (box, Fig. 11) compared to an average of 10m and a maximum retreat of 15m after Xynthia.

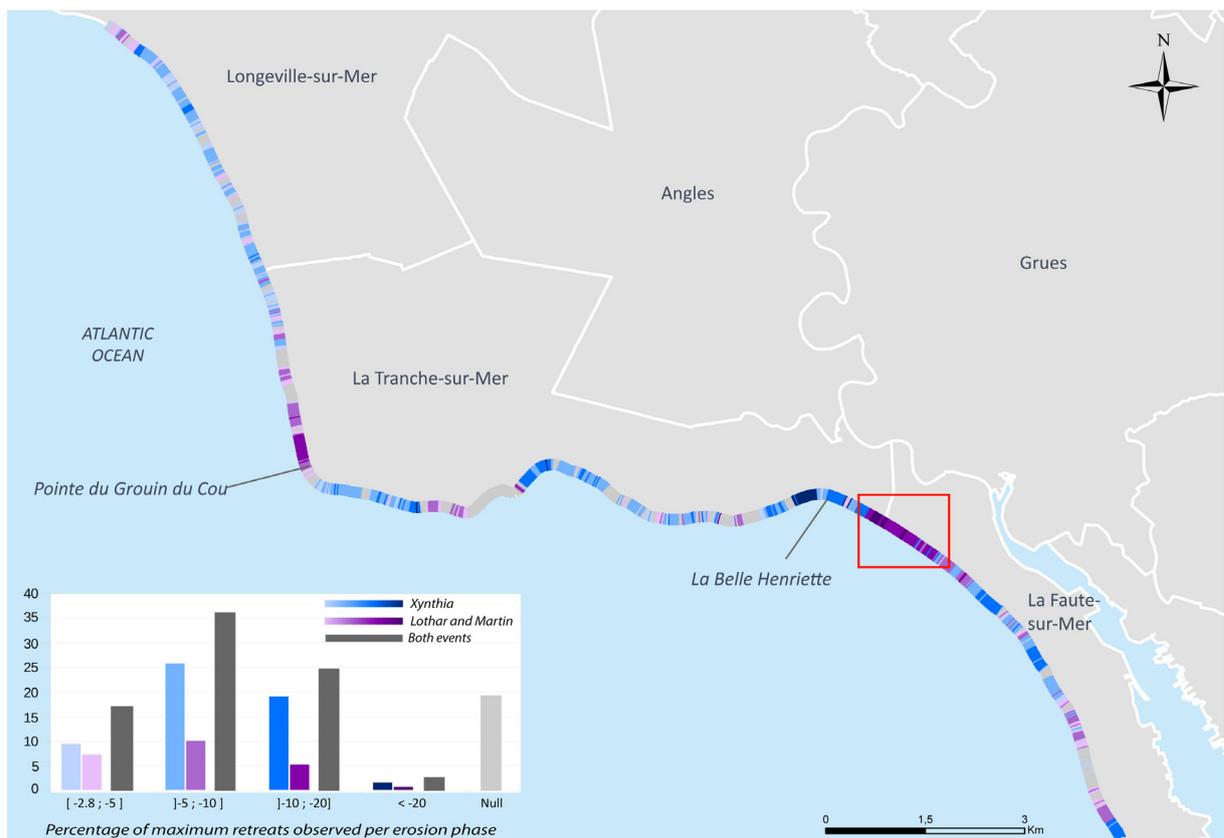


Figure 11 : Maximum retreat due to extreme events (Lmax) in south of Vendée.

Fig. 12 shows, on the one hand, the maximum retreat value measured during the two events and, on the other hand, the percentage of sandy coasts impacted per town and per urban area, indicating the zones covered by a PPRL in the department. This table also includes the values for Yeu Island, which does not have a PPRL. We note that of the fourteen

towns, four (Noirmoutier-en-île, l'Épine, la Guérinière and la Faute-sur-Mer) show a higher maximum retreat value for Lothar and Martin than for Xynthia. In most cases, the town or urban area with the highest retreat value also has the greatest impact. La Barre de Mont is an exception since, while the maximum retreat was measured after Xynthia, it was Lothar and Martin that affected a larger portion of the sandy coasts in this town (50.8% compared to 46.2% in Xynthia).

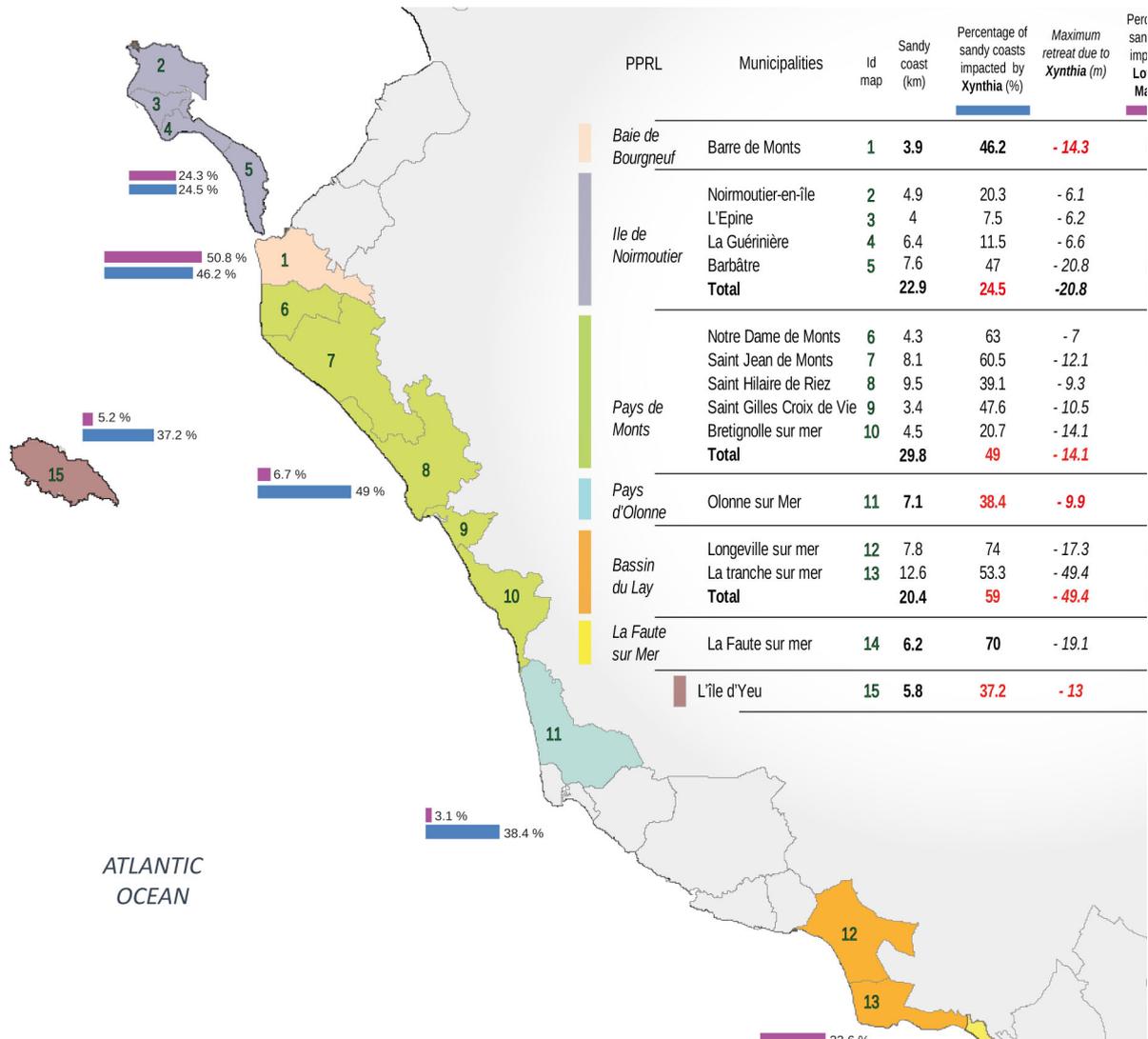


Figure 12 : Summary of the impact of storms per town and urban area.

5. Discussion

In various studies, the shoreline's projection to a given point in time is estimated only according to the historical dynamics of the shoreline. The works of Pereira *et al.* (2013) and Mukhopadhyay *et al.* (2012), offer methods for projecting the shoreline at various times based on the historical evolution in the Northwest coast of Portuga and on Puri Coast, Bay of Bengal. In various more recent studies, the shoreline's projection to a given location in

future time is estimated according to the historical dynamic of the shoreline and sea level rise. Durand and Heurtefeux (2006) proposed a mathematical approach to fix the future shoreline location (site of Lido, in the Mediterranean Sea). This study was taken up by Suanez *et al.* (2007) and Cariolet *et al.* (2012) and applied to a few sites in Brittany). Other studies, on the contrary, only focus on the analysis of extreme events and their impact on sandy coasts. These works are mainly based on numerical and/or statistical modelling methods aiming to estimate erosion following a storm as proposed by Callaghan *et al.* (2009) or Corbella and Stretch (2012a). In this study, the originality is the computation of the L_{max} taking into account observations of shoreline location before/after an extreme event. This L_{max} can be added to a projection of a future shoreline taking into account the historical trend of the shoreline motion as recommended in the PPR or even be added to the historical trend coupled with the future sea level rise as recommended in studies already mentioned. The projection of the shoreline to which this L_{max} is added thus allows the spatialization of a truly exhaustive erosion risk hazard strip.

The impact of the two extreme events studied differs from one sector to another. This can be explained in particular by the different characteristics of each storm (waves, winds, and atmospheric pressure), the tidal conditions at the time of impact (tidal coefficients, time of tide), the morphodynamic and anthropogenic context (presence/absence of coastal defences, type of beach sediments, orientation and slope of the beaches). The work of Pereira *et al.* (2013) shows that coastline projection scenarios vary according to storm types. This work supports the idea that taking into account a single event is not sufficient to define the vulnerability of a sandy coast to extreme events. Indeed, this would be tantamount to considering only one category of storm.

As these extreme retreat values have a direct impact on the elaboration of the erosion hazard strip, it is fundamental to question the possibility of taking into account several extreme events. In Vendée, a 2007 study (DHI, 2007) considered the following L_{max} values for the South Vendée sector (towns of Longeville-sur-Mer, La Tranche-sur-Mer and La Faute-sur-Mer): a maximum retreat of 20m applied to the entire South Vendée coastline (including behind the longitudinal structures) and an exceptional value of 35m in La Belle Henriette sector (Fig. 11). These values are therefore included in the Coastal Risk Prevention Plans. Thus, contrary to the PPRL, which maintains a single L_{max} value of 20 m along the entire coastline, we suggest keeping a retreat value calculated every 20 m in order to qualify the impact of storms on this shoreline, as shown in Fig. 7-c.

Concerning the use of aerial images for the evaluation of L_{max} , two biases can be mentioned. Firstly, the before and after storm aerial images used are spaced several months apart (14 months for Lothar and Martin and 10 months for Xynthia) on account of availability and spatial completeness. Therefore, this time interval does not allow for the measurement of regression due to a storm alone. Within a few months, other smaller events may affect the coastline and contribute to the shoreline's mobility. In addition, the time between the storms' occurrence and the images taken either immediately after or a few months later can

generally affect the measurement of storm impact. However, even if traces of resilience are visible, we take into account the markers of storms' impact (formation of erosion notches or cliffs) as soon as possible.

Then, the shots following Xynthia were taken after the breach-filling work on the beach of La Belle Henriette. This work damaged part of the upper beach and the vegetated dune. As a result, the high retreat values measured in this area must be taken with caution.

This work aims to improve the definition of the erosion hazard in PPRL maps based on observations. This land use planning document is legally rely on against third parties. It aims at protecting natural coastal area and above all limiting or even prohibiting urbanisation when the hazard is high. It therefore seems necessary to highlight the weakness in the method applied in the PPRL and to propose other approaches to improve this protection zoning and ultimately encourage its updating. With this in mind, we compare our results with those of the PPRL in order to highlight the differences between the PPRL's 100-year hazard strip and this study's projection to 2050. Choosing 2050 allows us to reduce the uncertainty (see Method) and is well taken into account in the comparison of the results. This comparison therefore shows significant differences, particularly on the Clémenceau beach in La Tranche-sur-Mer. Depending on the method chosen, the erosion hazard may be underestimated or overestimated. Thus, in this sector, the PPRL zoning "100-year horizon" underestimates the erosion hazard when compared to our hazard zone "2050 horizon».

Four elements explain these differences: 1) The time frame used to define the historical evolution of the shoreline in this sector is 31 years in the PPRL (1975–2006) whereas it is 66 years in this paper (1950–2016). Consequently, the historical dynamics of the PPRL, between 1975 and 2006, do not take into account the accretion that occurred on Clémenceau beach (between 0m and +0.70 m/year). Conversely, for the period considered here (from 1950 to 2016), we observe an average erosion rate of 0.20 m/year 2) The choice of the earliest date for both of the selected methods also conditions the analysis of the historical dynamics of the shoreline. To this end, in La Tranche-sur-Mer, urbanisation in the coastal strip began in the 1960s and contributed to the fixation of the shoreline. Consequently, a shoreline digitized in 1975 takes into account the property lines and thus biases the measurement of the historical evolution of the shoreline. 3) The difference between the two approaches is also due to the value of L_{max} . Indeed, in La Tranche-sur-Mer, the L_{max} used in the PPRL is 20 m for the entire coastline. With the method chosen in this article, we averaged all the transects' L_{max} values in this range and obtained a retreat of 8.2m during Xynthia. The maximum retreat is 12.4m. 4) The initial shoreline from which the projection to 2050 is made is also different (2006 in PPRL and 2016 in this paper). As a result, the shoreline between these two dates varies from 10 to 15 m on the whole beach (Fig. 13). Consequently, it would probably be appropriate to update the hazard zoning with more recent data.



Figure 13 : Comparison of erosion hazard zones by 2050 and 2120. Clémenceau beach, La Tranche-sur-Mer.

6. Conclusion

This paper provides new proposals regarding the creation of erosion risk bands based upon observation, which could be considered in the revision of a PPRL if necessary, as a revision is expected in any case when a change in the level of risk is observed (MEDDE, 2014). Three suggestions are thus put forward: i) updating the risk zoning using more recent data and taking into account observed trends, whether erosion or accretion; ii) studying the impact of several storms to define an observed and measured L_{max} at any point along the shoreline in order to propose a L_{max} locally calculated in steps of 20m corresponding to the maximum change actually caused by the strongest of the extreme events studied; iii) proposing shorter term (2050) shoreline projections (2050) that are reasonable in the context of climate change to reduce the margin of uncertainty. Greater precision in terms of spatialization of erosion risk may thus justify the updating of these regulatory coastal strips.

Chapitre 3

Projection du trait de côte et estimation de l'incertitude

1. Introduction

Les deux premiers chapitres de cette partie ont été consacrés à la mesure de l'aléa érosion à long et court termes. Après l'analyse de l'aléa observé, ce chapitre s'inscrit dans la continuité des deux précédents en proposant une analyse prospective de l'aléa. Actuellement, la nécessité de prédire l'évolution du littoral dans un temps futur s'inscrit de plus en plus dans les stratégies de gestion des communes littorales, d'autant plus que cet exercice est précisé dans la loi n°2021-1104 (dite « Climat et résilience ») du 24 août 2021 dans son article L.121-22-2. La projection d'un trait de côte à une échéance donnée se compose de (i) l'extrapolation des tendances passées de l'évolution du trait de côte et (ii) l'estimation du recul lié à l'élévation du niveau marin. Chacun de ces deux paramètres induit des incertitudes, qu'elles soient liées aux choix méthodologiques ou à la donnée (Douglas et al, 1998). Une première partie est ainsi dédiée à la mesure de l'incertitude liée à la projection du trait de côte via l'extrapolation des tendances passées. L'exercice consiste donc à projeter des tendances passées à une date pour laquelle la position du trait de côte est connue. La seconde partie repose sur l'évaluation de l'incertitude liée à l'estimation du recul intégrant l'élévation du niveau marin. Cette incertitude dépend de deux paramètres : la pente de plage et le choix relatif aux scénarios d'élévation du niveau moyen de la mer régionalisés issus des travaux du GIEC. L'objectif sous-jacent de ce chapitre est de qualifier mais aussi quantifier l'incertitude liée à l'estimation de la position future du trait de côte.

2. Méthode

2.1. Méthode de projection du trait de côte

Dans cette section, la méthode de projection des tendances passées vise deux objectifs : (i) estimer l'incertitude de l'exercice en mesurant la distance entre le trait de trait de côte projeté à l'horizon 2019 et celui extrait des images aériennes de 2019, et (ii) estimer la position du trait de côte à l'horizon 2050.

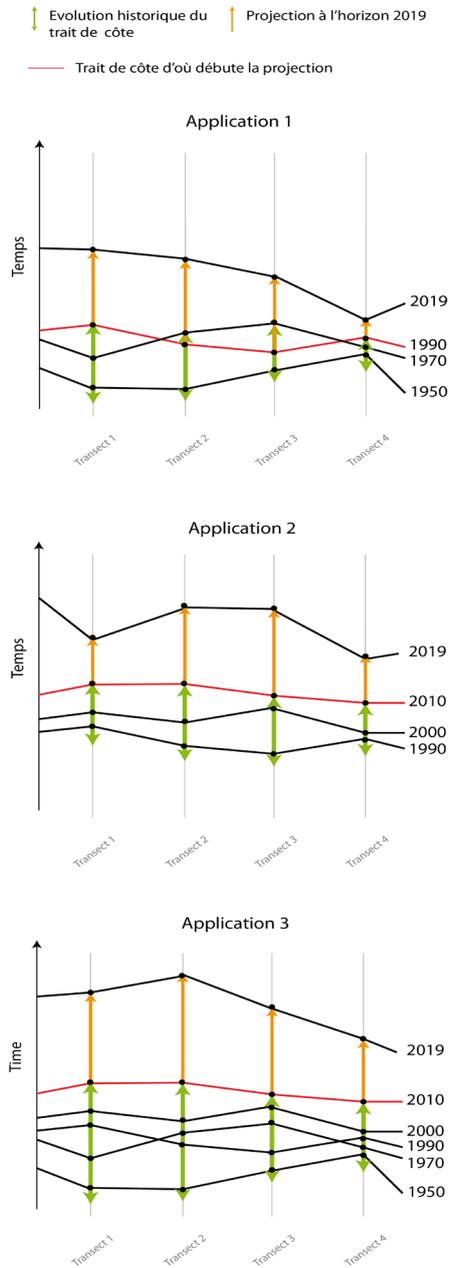
2.1.1. Etape 1 - méthode de projection du trait de côte

La méthode par transect, utilisée pour mesurer l'évolution historique du trait de côte ainsi que le recul lié à une tempête, est également utilisée pour projeter la position future du trait de côte.

Un contrôle de l'homogénéité géomorphologique est d'abord entrepris afin de s'assurer que la profondeur théorique du recul côtier se fait dans le cordon dunaire et qu'aucune plateforme rocheuse en pente ou micro-falaise ne soit mis en évidence par ce recul, qui *de facto* réduirait le rythme de recul du trait de côte (contact plage/structure rocheuse et plus plage/dune). On utilise pour ce faire l'enveloppe dunaire de la BD Charm 50 du BRGM.

La projection du trait de côte est ensuite calculée en multipliant un taux annuel moyen d'évolution du trait de côte (accrétion ou érosion) par le nombre d'années de projection. Dans cette section, il s'agit soit d'une projection à 29 ans entre 1990 et 2019, soit d'une projection à 9 ans entre 2010 et 2019 (Tableau 1).

1 Mesure de l'évolution historique et projection à l'horizon 2019



2 Mesure de la distance entre les traits de côte numérisés et projetés en 2019

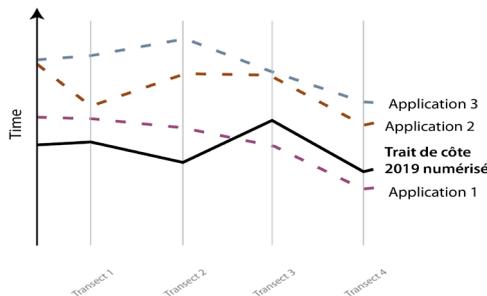


Tableau 1 : Caractéristiques des choix méthodologiques des applications 1, 2 et 3

Applica-tion	Date des traits de côte	Nombre d'années de projec-tion	Méthode statistique
1	1950 1990 1970	29 ans	LRR
2	1990 2010 2000	9 ans	LRR
3	1950 2000 1970 2010 1990	9 ans	EPR
			LRR

Étant donné que les données et choix méthodologiques influent sur le résultat final, divers exercices de projection sont réalisés en modifiant les paramètres suivants (en repartant des réflexions de Douglas *et al.*, 2018) :

- Le nombre d'années de projection.
- Méthode statistique pour la mesure du taux d'évolution : End Point Rate (EPR) et Linear Regression Rate (LRR)

Concernant l'estimation de la position du trait de côte à l'horizon 2050, nous (i) appliquerons la méthode de projection exposée précédemment, basée sur les tendances d'évolution comprise entre 1950 et 2019 à laquelle nous ajouterons (ii) l'estimation du recul lié à l'élévation du niveau marin, dont la méthode est présentée dans la section suivante.

Figure 1 : Méthode de projection du trait de côte et mesure de distance entre les traits de côte numérisés et projetés.

2.1.2. *Étape 2 - l'estimation du recul du trait de côte dû à l'élévation du niveau marin*

Il existe au moins deux façons de reprojeter le trait de côte en tenant compte du changement climatique et donc de l'élévation du niveau de la mer : la méthode dérivée de l'approche de Bruun reprise et adaptée par Durant et Heurtefeux (2006), et une méthode plus récente proposée par Ranasinghe et al (2012). Cette dernière prend en compte notamment l'impact des tempêtes sur l'évolution du trait de côte et des périodes de résilience sur une période longue et propose une extrapolation sur une période équivalente dans le futur, aboutissant à une position probabiliste du trait de côte. Plus complexe à mettre en oeuvre et peu testée, elle présente des marges d'incertitudes fondées sur la définition des événements morphogènes, leur impact à la côte, la non prise en compte d'une succession d'évènements peu morphogènes dont le cumul peut aboutir à des processus d'érosion sévère. Nous avons privilégié l'approche dérivée de Bruun qui, bien que présentant des incertitudes, se base sur une séquence de positions du trait de côte intégrant en quelque sorte tous les processus aboutissant à leur localisation et plus facile à justifier.

La position future du trait de côte, en plus de l'analyse des tendances passées, prend en compte l'érosion potentielle due à l'élévation du niveau marin. Afin d'estimer cette variable, Durand et Heurtefeux (2006) proposent l'équation suivante :

$$\mathbf{R} = \mathbf{r} + \mathbf{[(E21-E20)/P]}$$

Avec :

R = valeur de recul prévu à une échéance donnée ;

r = valeur du recul prévu par la régression linéaire ;

E21 = valeur d'élévation du niveau marin prévue d'ici l'échéance donnée (en cm) ;

E20 = valeur moyenne annuelle d'élévation du niveau marin au 20^{ème} siècle (en cm), multipliée par la durée de la prévision (cette valeur est à déduire car déjà prise en compte dans la prévision par la régression linéaire) ;

P = pente du bas de plage et de la partie supérieure de l'avant-plage en%.

La variable « r » est issue de la régression linéaire présentée dans la section précédente et multipliée par le nombre d'années de projection, soit 31 ans. La seconde variable « E21 » repose sur le choix du scénario parmi les cinq proposés par le GIEC. Dans le cadre de nos travaux nous comparons un scénario optimiste (SSP1-2.6) et pessimiste (SSP5-8.5) que l'on peut retrouver régionalisé et régulièrement mis à jour sur le site web de la NASA (<https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>) (Figure 2).

La valeur moyenne annuelle d'élévation du niveau marin au 20^{ème} siècle (E20) étant déjà prise en compte dans la régression linéaire, nous choisissons donc de retenir une valeur d'élévation moyenne cohérente avec la période de notre régression linéaire réalisée sur la période 1950-2019. La tendance calculée au marégraphe de Saint-Nazaire sur la période 1950-2014 est équivalente à 0,159 cm/an soit 10,18 cm (Ferret, 2016).

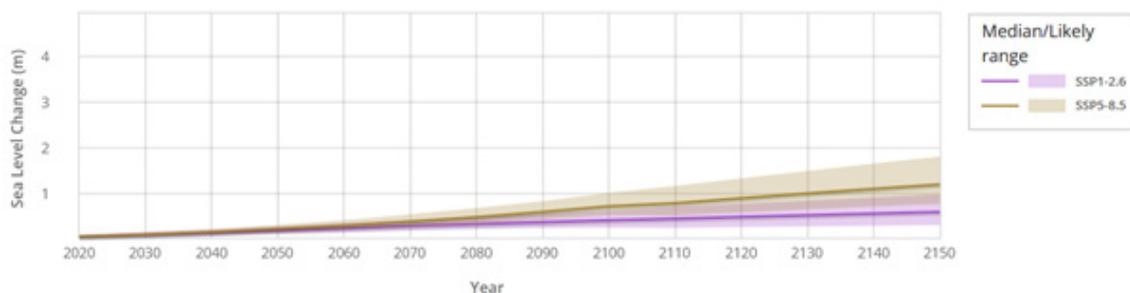


Figure 2 : Projection de l'élévation du niveau marin selon différents scénarios

Enfin, la pente de plage est une des variables qui peut faire varier considérablement la valeur de recul final (Ranasinghe et Stive 2009). Dans le cadre de ces travaux, elle est extraite à l'aide d'un raster de pente, entre la PHMA moyenne régionale soit 3,1 m NGF (Tableau 2) et la valeur la plus basse pouvant être extraite du LiDAR 2019, soit 1 m NGF.

Tableau 2 : Niveaux d'eau relatifs aux Plus Hautes Mers Astronomiques

Station/port de mesure	PHMA (mètre NGF)
Saint Nazaire	3,4
L'Herbaudière (Noirmoutier)	3,1
Saint-Gilles-Croix-de-Vie	3,1
Les Sables d'Olonne	3,1

2.1.3. Etape 3 - Mesure de l'incertitude

L'incertitude relative à l'estimation du recul du trait de côte dû à l'élévation du niveau marin est fournie pour les trois premières variables composant l'équation de Durand et Heurtefeux (2006) dans le Tableau 3.

L'incertitude de la position du trait de côte est mesurée en fonction de l'erreur pixel, l'erreur d'orthoréctification et l'erreur de numérisation. Cette incertitude est égale à la racine carrée de la somme des erreurs au carré (Fletcher *et al.*, 2003). L'incertitude relative à l'élévation moyenne annuelle du niveau marin depuis 1950 est fournie par Ferret (2016). Enfin, L'incertitude relative à l'estimation de l'élévation future du niveau marin est réalisée par le GIEC.

En nous basant sur les résultats du comparatif entre le trait de côte 2019 numérisé et celui projeté, nous proposons également de produire une marge d'erreur relative cette fois-ci aux divers exercices de projection. L'estimation de cette incertitude repose sur la valeur moyenne annualisée des écarts entre les deux traits de côte, rapportée au nombre d'années de projection.

Tableau 3 : Incertitude des variables relatives à l'estimation du recul du trait de côte dû à l'élévation du niveau marin.

Variable	Source	Incertitude	Incertitude par échéance de projection		
			2050	2120	
Incertitude de la position du trait de côte	Travaux de thèse	1950-2019	2050	2120	
		15 cm/an	4,65 m	15,15 m	
Incertitude relative à l'élévation moyenne annuelle du niveau marin depuis 1950 (E20)	Ferret (2016)	1950 - 2014	2050	2120	
		0,022 cm/an	0,68 cm	2,22 cm	
Variable	Source	Prévision	Incertitude par échéance de projection		
Elévation future du niveau marin (E21)		2050	2120	2050	2120
	GIEC SSP1-2.6	19 cm	49 cm	9 cm	28 cm
	GIEC SSP5-8.5	23 cm	89 cm	8 cm	40 cm

3. Résultats

3.1. Les écarts entre trait de côte projeté et trait de côte connu

Pour chacune des trois applications (Tableau 1), les taux d'évolution ont été mesurés avec les méthodes statistiques EPR et LRR (Figure 3). Pour les applications 1 et 2, composées toutes deux de trois traits de côte, la différence entre les résultats des deux méthodes (EPR et LRR) sont imperceptibles. Le coefficient de corrélation relatif à chacune des deux Applications est identique et il est de 0,99. Pour l'application 3, qui inclut cinq traits de côte, le coefficient de corrélation diminue sensiblement et atteint 0,96.

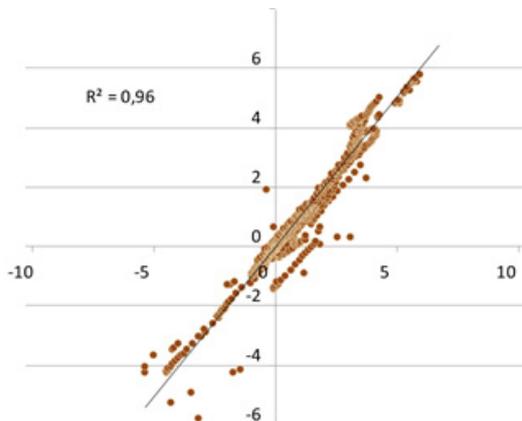


Figure 3 : Taux d'évolution du trait de côte mesurés avec les méthodes EPR et LRR

Pour la suite de la démarche, nous retenons donc les quatre cas suivants :

- application 1 : LRR
- application 2 : LRR
- application 3 : EPR et LRR

Les deux méthodes statistiques sont conservées pour l'application 3 afin de quantifier les potentiels écarts liés à la projection du trait de côte.

3.2. Résultats par application et sur l'ensemble du secteur d'étude

- **Application 1**

L'application 1 consiste à mesurer l'évolution moyenne annuelle du trait de côte entre 1950 et 1990 et de projeter le trait de côte à l'horizon 2019, soit à une échéance de 29 ans. Les valeurs d'écart entre les deux traits de côte seront présentées en valeur absolue. Dans ce cas, la moyenne des écarts entre le trait de côte projeté et le trait de côte « réel » est de 22 m et la valeur maximale atteint plus de 200 m (Tableau 4). Ces valeurs fortes sont observées sur des secteurs à forte dynamique hydro-sédimentaire tels qu'au Goulet de Fromentine, au Sud de l'île de Noirmoutier ou encore au niveau de la flèche d'Arcay.

Les écarts supérieurs à 25 m rassemblent 31,76%, soit la part la plus importante des transects du secteur d'étude pour cette classe. En plus de réunir des écarts importants, cette application présente un écart type de 27,3, illustrant une forte hétérogénéité dans la répartition des individus. Les valeurs sont très écartées de la moyenne, ce qui explique la répartition des transects sur les classes extrêmes (0 à 5 mètres et > 25 mètres). Malgré tout, la moyenne des écarts rapportée au nombre d'année de projection, s'avère la plus faible parmi l'ensemble des applications.

Tableau 4 : Ecarts statistiques entre le trait de côte projeté et le trait de côte réel

	A1	A2	A3 LRR	A3 EPR
Moyenne (m)	± 22,07	± 10,24	± 11,00	± 11,25
Moyenne annuelle (m/an)	± 0,76	± 1,13	± 1,2	± 1,2
Maximum (m)	208,38	125,35	109,19	108,88
Ecart type (m)	27,27	13,07	13,81	13,77

- **Application 2**

Dans le cas présent, le taux d'évolution est mesuré entre 1990 et 2010 puis est extrapolé à 9 ans pour produire une ligne à l'horizon 2019. La moyenne des écarts entre les traits de côtes projetés et connus est de 10,2 m, il s'agit de la valeur la plus basse parmi les applications présentés. Sur l'ensemble des transects, la majorité se trouve dans la classe où les écarts sont inférieurs à 5 m (39,6%).

- **Application 3 ERP et LRR**

Cette dernière application se compose des résultats issus des méthodes EPR et LRR. De manière générale, les résultats des deux méthodes sont très proches. Ils se rapprochent également de l'application 2 mais enregistrent cependant des écarts maximums moins importants. La moyenne des écarts est cependant plus faible pour les résultats de la régression linéaire que pour l'EPR. La répartition des résultats dans les classes est également similaire (Tableau 5). Le coefficient de corrélation (Figure 3), qui est de 0,89, explique cette similarité.

Tableau 5 : Classification des distances (en%) entre les traits de côte réel et projeté pour chaque application

	A1 : 1950-1990	A2 : 1990-2010	A3 LRR : 1950-2010	A3 EPR : 1950-2010
0 à 5	19,68	39,57	37,80	36,33
5 à 10	18,72	21,92	25,11	24,95
10 à 15	13,28	14,34	10,57	11,16
15 à 20	9,54	8,25	7,67	7,95
20 à 25	7,01	4,75	4,69	5,01
> 25	31,76	11,17	14,16	14,61
	100	100	100	100

- **Conclusion**

Au regard de l'analyse de l'ensemble des applications, c'est la première qui rassemble la majorité des transects pour lesquels les écarts entre le trait de côte projeté et le trait de connu sont les plus importants. En effet, on retrouve dans les trois classes dont les écarts sont supérieurs à 15 mètres, les parts les plus importantes des 3 applications (Tableau 5 : encadré rouge). A l'inverse, l'application 2 rassemble la majorité des écarts les plus faibles. La part des écarts inférieurs à 5 mètres représente 39,6% (Tableau 5 : encadré jaune), que ce soit au regard des autres classes (lecture verticale) ou des autres applications (lecture horizontale). Cependant l'application 3 EPR et LRR regroupe respectivement 36,3% et 37,8% des transects dont les écarts sont inférieurs à 5 mètres. Sur l'ensemble des résultats, il apparaît que la première application se détache particulièrement des deux autres en présentant des résultats moins concluants qui seront discutés en section 4.

3.3. Focus sur trois zones d'intérêt

Les trois sites ont été sélectionnés pour le caractère original de leurs résultats. Ces derniers permettront de discuter en section 4 de l'exercice de projection du trait de côte et d'en aborder les limites.

- **Secteur 1 : secteur de l'hippodrome au sud du pont d'Yeu, commune de Saint-Jean-de-Monts**

Entre 1950 et 1990, le secteur de l'hippodrome connaît une stabilité sur l'ensemble du linéaire. Il est en revanche caractérisé par un taux d'évolution significatif essentiellement sur la période 1990-2010 avec des vitesses moyennes de recul comprises entre un et deux mètres par an. En considérant l'ensemble de la période, une portion de plus de 200 m est caractérisée par un recul moyen annuel compris entre 0,5 m et 1 m, le reste se situant entre -0,5 m et +0,5 m par an, soit en stabilité (Figure 4a).

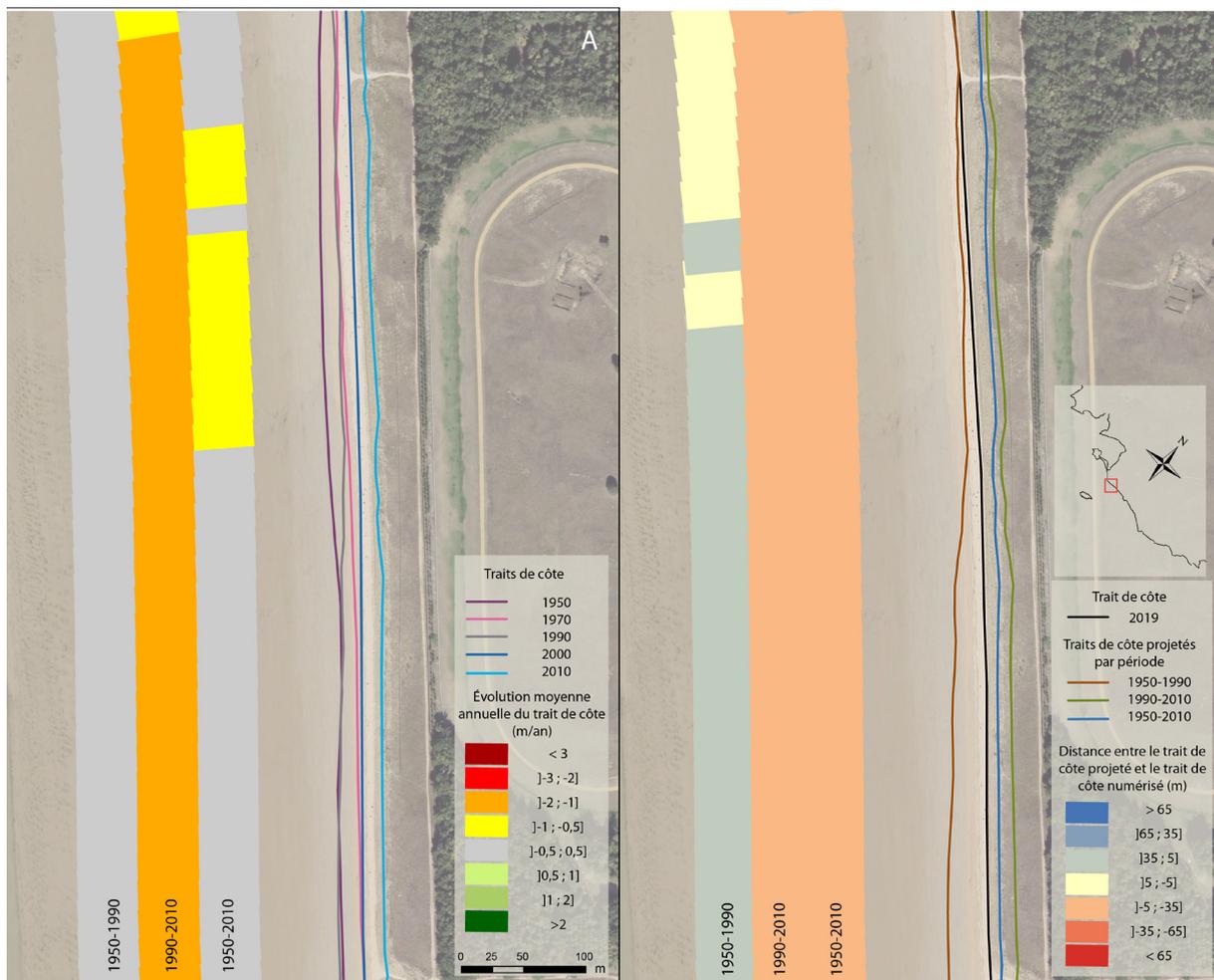


Figure 4 : Evolution historique du trait de côte (à gauche) et projection du trait de côte selon les applications A1, A2, A3 (à droite) Secteur de l'hippodrome au sud du pont d'Yeu, commune de Saint-Jean-de-Monts.

Le trait de côte est projeté sur la base du taux d'évolution historique et à partir du trait de côte 2010 pour les applications 2 et 3 et 1990 pour l'application 1. Lorsque le taux est négatif, le trait de côte est donc projeté vers l'intérieur des terres, et inversement. Les valeurs, qu'elles soient positives ou négatives, représentent donc la distance qui sépare le trait de côte connu du trait de côte projeté. Nous parlerons de projection « optimiste » (valeurs positives) lorsque le trait de côte projeté se trouve « côté mer » par rapport au trait de côte réel et « pessimiste » (valeurs négatives) lorsque le trait de côte se trouve « côté terre » par rapport au trait de côte réel.

Dans ce premier cas (Figure 4-b), les écarts les plus importants mesurés sont relatifs à la projection issue de la période 1950-1990. Au sud du secteur, on note un écart positif de 30 m entre le trait de côte projeté et le trait de côte connu en dépit des taux d'érosion faibles sur cette période. Les projections issues des applications 2 et 3 révèlent tous deux des écarts compris entre -5 m et -35 m. Plus précisément une moyenne de 20 m pour l'application 1 et 11 m pour l'application 2.

• **Secteur 2 : plage des Ovaires et plage des Conches, île d'Yeu**

Au Sud-Est de l'île d'Yeu sur les plages de la Grande Conche et des Ovaires (Figure 5-a), les taux d'évolution du trait de côte varient selon les périodes considérées. La période 1950-1990 est caractérisée par une forme de stabilité notamment aux extrémités et d'une tendance à l'érosion de l'ordre de -0,5 m/an à -1,8 m/an aux points d'inflexion de la côte.

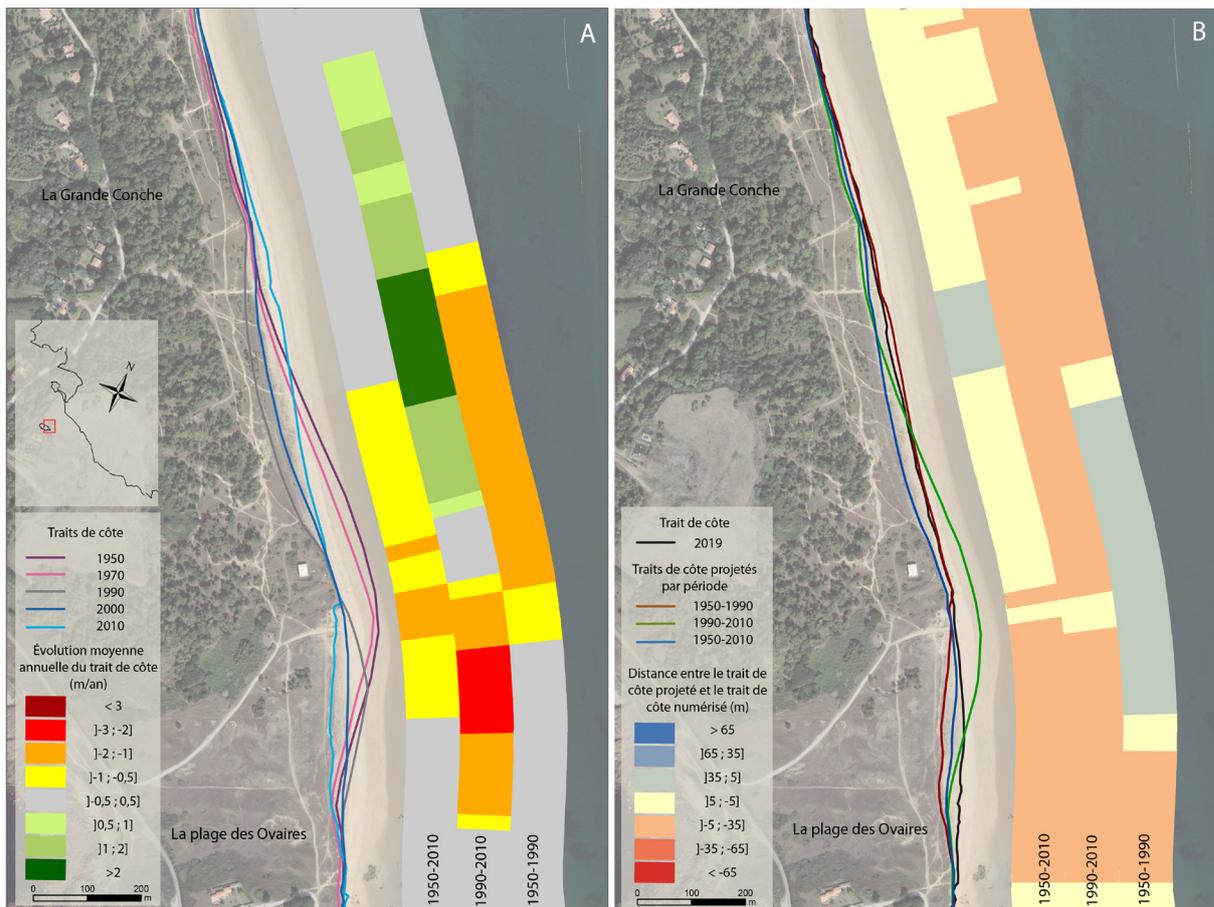


Figure 5 : Evolution historique du trait de côte (à gauche) et projection du trait de côte selon les applications A1, A2, A3 (à droite) Plage des Ovaires et plage des Conches, île d'Yeu.

Entre 1990 et 2010, deux tendances se dégagent. La plage des Ovaires connaît une accrétion atteignant 2,5 m/an alors que la plage de la Grande Conche subit des reculs jusqu'à 2,4 m/an. Sur la période complète, on observe une stabilité globale avec toutefois une tendance à l'érosion entre la plage des Ovaires et la Plage de la Grande Conche.

Entre 1950 et 1990, la différence entre les deux traits de côte est variable sur l'ensemble du secteur avec d'une part une projection pessimiste aux extrémités du secteur (jusqu'à -18,7 m), d'autre part une projection optimiste (entre 7,45 m et 34,5 m) au centre (Figure 5-b). Les écarts sont en revanche plus homogènes sur l'ensemble du secteur entre 1990 et 2010. La quasi-totalité des valeurs mesurées reflètent une projection pessimiste de la position du trait de côte de 2019 ; atteignant jusqu'à 20,9 m de différence avec le trait de côte réel. Enfin, sur

l'ensemble de la période 1950-2010, les résultats révèlent que cette application montre des valeurs faibles sur une grande partie du site avec des distances inférieures à 5 m et produit ainsi la projection la plus proche du trait de côte connu par rapport aux deux autres applications.

• **Secteur 3 : Goulet de Fromentine, la Barre-de-Monts**

Sur la période 1950 – 1990 le secteur nord de la Barre de Monts est en forte accrétion avec une évolution moyenne du trait de côte supérieure à 2 m par an sur la façade Ouest (Figure 6-a).

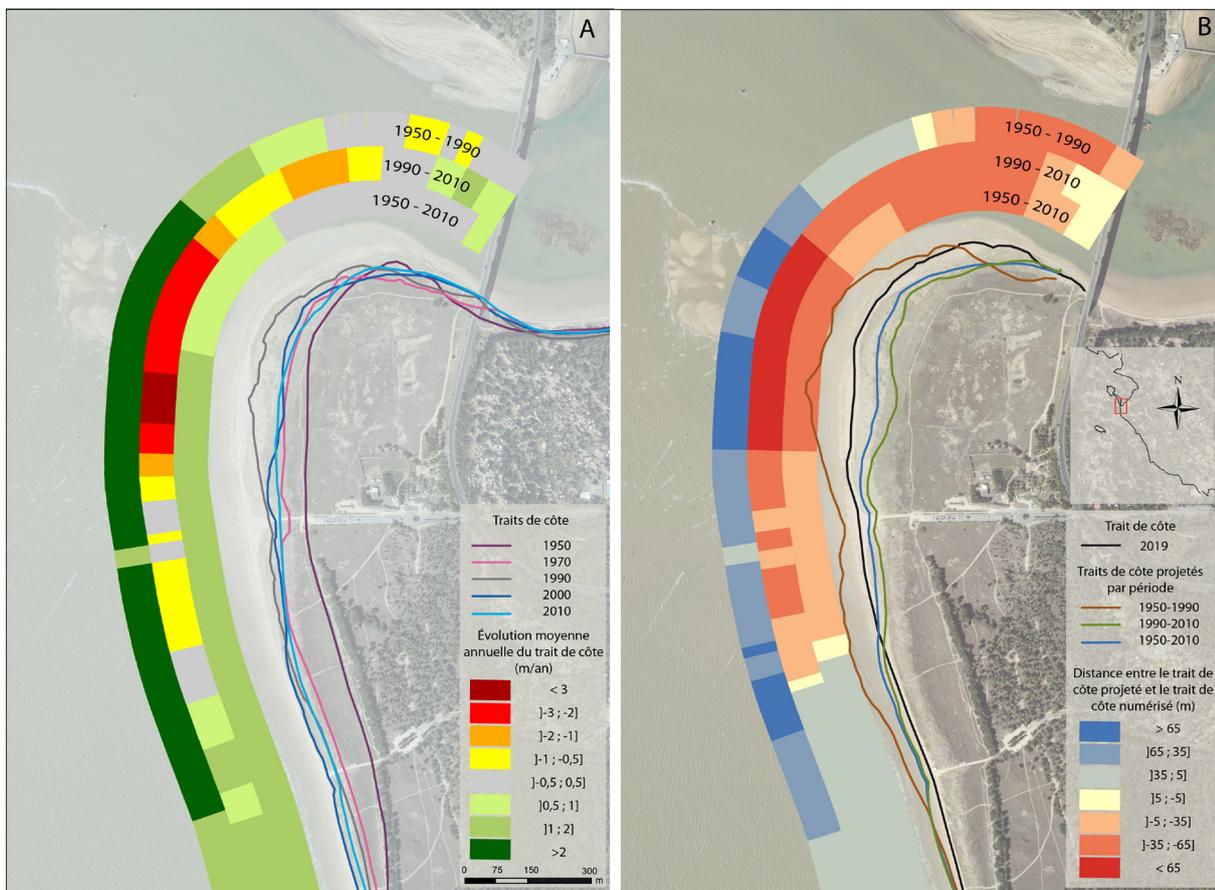


Figure 6 : Evolution historique du trait de côte (à gauche) et projection du trait de côte selon les applications A1, A2, A3 (à droite) Goulet de Fromentine, la Barre-de-Monts

Sur la période 1990 – 2010, l'évolution moyenne du trait de côte est également supérieure à 2 m par an sur environ 500 m, mais la tendance s'inverse sur la période considérée car elle se caractérise par une phase érosive. Enfin, entre 1950 et 2010, on observe une tendance à l'accrétion avec une avancée du trait de côte comprise entre 0,5 m et 2 m par an. En conclusion, malgré la phase érosive observée entre 1990 et 2010, ce secteur enregistre une tendance d'évolution globale positive.

Pour ce troisième secteur, le trait de côte projeté qui s'éloigne le plus du trait de côte connu est celui projeté sur la base des taux d'évolution de la période 1950-1990 avec une distance maximale (en accrétion) de 103 m (Figure 6-b). La projection issue de la période 1990-2010 enregistre également de fortes différences avec la position du trait de côte réel (-92,7 m), en érosion cette fois, et découlant des taux d'évolution négatifs mesurés sur cette période. Enfin, le trait de côte projeté sur la base de la période complète (1950-2010) est celui qui se rapproche le plus du trait de côte connu.

Les valeurs moyennes mesurées sur l'ensemble du secteur d'étude montrent que l'application 2 (1990-2010) produit une moyenne des écarts inférieure aux applications 1 et 3. Le cas du secteur du Goulet de Fromentine diverge de ces valeurs moyennes car il s'agit de la projection issue de l'application 3 (1950-2010) qui produit les écarts les moins importants au regard des deux autres. La valeur maximale enregistrée est également plus basse que les autres projections (-53,4 m).

3.4. Estimation de la position future du trait de à l'horizon 2050

3.4.1. *Évolution historique du trait de côte*

La projection de la position future du trait de côte repose sur l'évolution historique du trait de côte et l'estimation de son recul futur lié de l'élévation du niveau marin.

La mobilité historique du trait de côte sur la période 1950-2019 est très équilibrée à l'échelle du secteur d'étude avec 48% d'érosion et 52% d'accrétion. Les tendances érosives sont en moyenne plus faibles (0,3 m/an) que les tendances à l'accrétion (+0,8 m/an). La partie sud de Noirmoutier ainsi que la Pointe d'Arcay (Figure 7), deux secteurs qui se démarquent par leur vitesse d'évolution supérieures à 4 m/an, sont caractérisés par une dynamique sédimentaire propre aux flèches sableuses. A l'inverse, les secteurs à forte dynamique érosive sont plus ponctuels et identifiés sur de faibles distances. Ces fortes évolutions négatives sont nettement impactées par les effets d'évènements extrêmes Lothar et Martin, et surtout Xynthia, tel qu'observé dans les résultats du précédent (Partie 2 Chapitre 2).

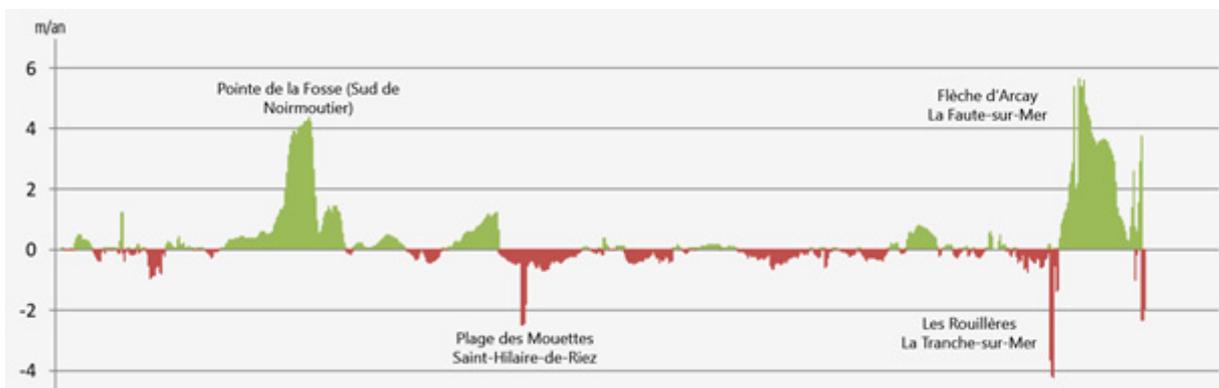


Figure 7 : Évolution historique de la position du trait de côte entre 1950 et 2019 du Nord au Sud (de gauche à droite)

3.4.2. *Pentes de plages*

Ensuite, pour estimer les valeurs de recul liées à l'élévation du niveau marin selon la formule de Durand et Heurtefeux (2006), trois paramètres sont nécessaires : la pente de plage, la valeur d'élévation passée du niveau marin et l'estimation de son élévation future. Les valeurs d'élévation du niveau marin passé et futur, requis pour cette estimation sont présentées dans le Tableau 3. Les pentes de plage sont quant à elle mesurées et décrites ci-après.

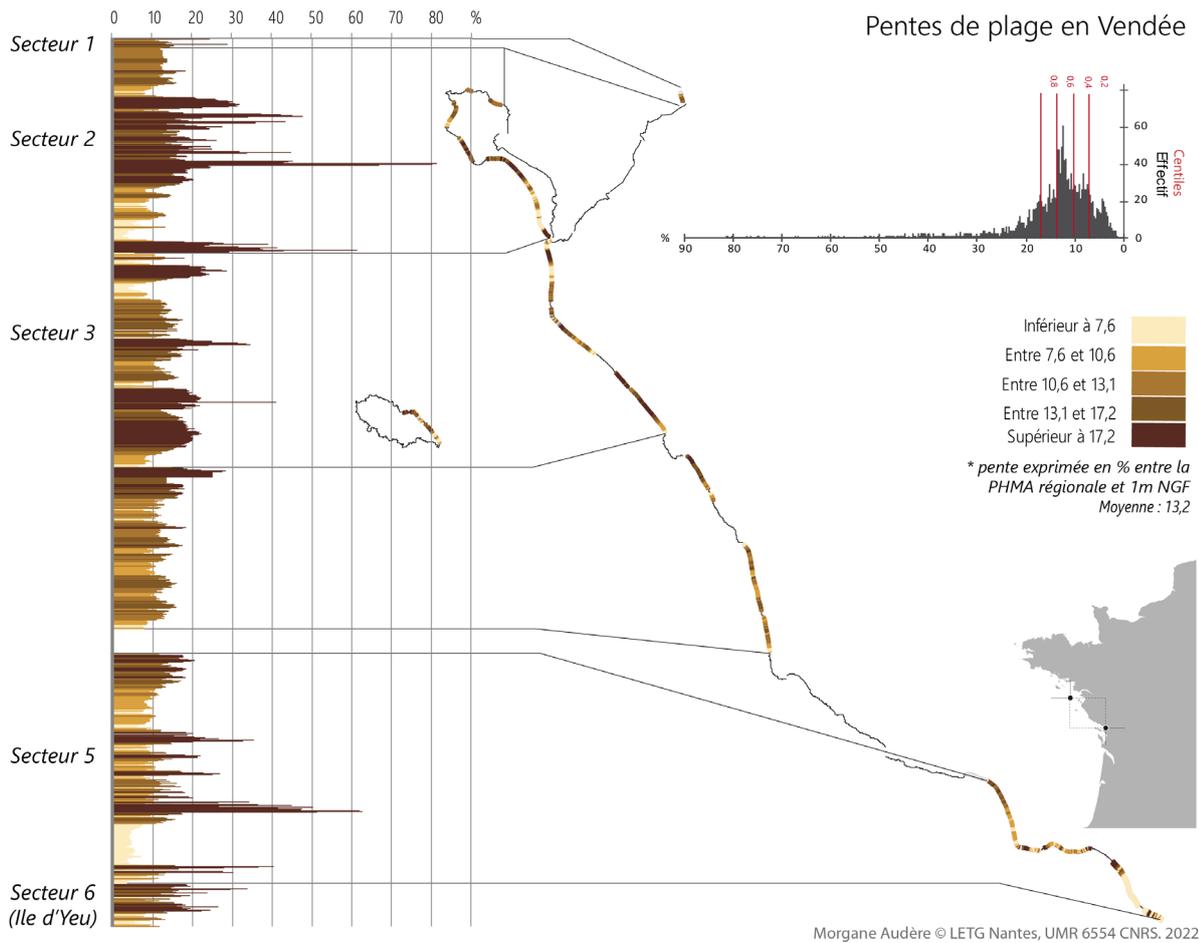


Figure 8 : Pentes de plages en Vendée

A l'échelle du secteur d'étude, la pente de plage est relativement hétérogène (Figure 8). La moyenne est de 13,2%. Noirmoutier présente des pentes significatives sur la partie nord-ouest qui tendent à diminuer vers le sud de l'île excepté pour la partie extrême sud (pentes supérieures à 17,2) caractérisée par une forte dynamique sédimentaire. Sur le secteur 3, les pentes sont particulièrement fortes au Sud du Goulet de Fromentine (Nord du secteur 3) ainsi qu'au Sud du Pays de Monts (supérieures à 17,2). Le secteur 4 est sensiblement plus homogène dans l'ensemble, avec des pentes d'en moyenne 11%. Le secteur 5 est particulièrement hétérogène, caractérisé par de fortes pentes au Nord (plage des Conches) et le long du littoral de La Tranche-sur-Mer et des pentes qui diminuent fortement le long de la flèche

d'Arcay (inférieures à 7,6%). Enfin, l'île d'Yeu présente essentiellement des pentes fortes, supérieures à 17,2%.

3.4.3. Estimation des reculs liés à l'élévation du niveau marin aux horizons 2050 et 2120

Sur l'ensemble du secteur, en intégrant la valeur d'élévation passée du niveau marin depuis 1950 (1,59 mm/an), la moyenne des reculs liés à l'élévation du niveau marin à l'horizon 2050 varie entre 1,5 m et 1,9 m (Tableau 6) entre les deux scénarios GIEC retenus. A titre indicatif, à l'horizon 2120 la moyenne des reculs liés à l'élévation du niveau marin varie entre 3,4 m ± et 7,5 m.

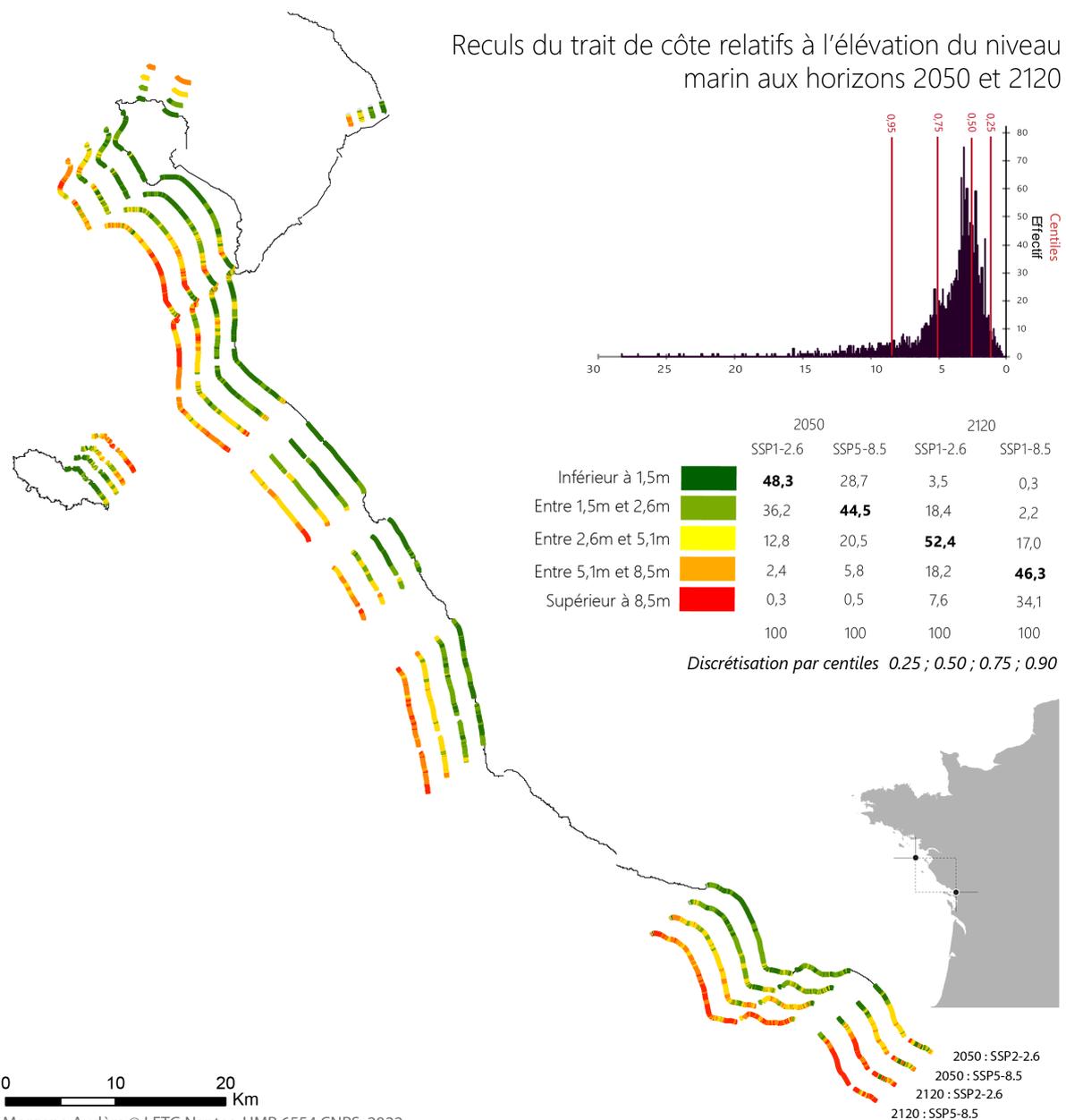


Figure 9 : Reculs liés à l'élévation du niveau marin aux horizons 2050 et 2120

Tableau 6 : Moyenne des reculs aux échéances 2050 et 2120 selon les scénarios SSP1-2.6 et SSP5-8.5

Moyenne des reculs (élévation depuis 1950 : +1,59 mm)			
2050 SSP1-2.6	1,5 m	2120 SSP1-2.6	3,4 m
2050 SSP5-8.5	1,9 m	2120 SSP5-8.5	7,5 m

Ensuite, en intégrant la valeur d'élévation passée du niveau marin depuis 1836 (1,03 mm/an), la moyenne des reculs liés à l'élévation du niveau marin à l'horizon 2050 s'avère plus forte que dans le cas précédent, variant de 1,6 m à 2 m selon les scénarios. Il en est de même pour les estimations à l'horizon 100 ans, les moyennes étant comprises entre 4 m et 8,1 m.

Les résultats de ces estimations sont spatialisés et récapitulés par classe d'érosion pour les quatre scénarios en Figure 9. Dans les trois variables utilisées pour estimer ces reculs, seule la pente reste constante sur chaque transect dans les quatre cas. Ce sont donc (i) le nombre d'années de projection et (ii) le choix du scénario GIEC pour l'élévation futur du niveau marin, qui modulent les résultats. Ainsi, plus nous augmentons le nombre d'années de projection et choisissons un scénario GIEC pessimiste, plus les estimations de reculs sont importants. A titre d'exemple, 76,8% des transects ont une valeur de recul inférieure à 2,3 m à l'horizon 2050 avec un scénario optimiste, alors qu'à l'horizon 2120, c'est au-delà de 4,5 m de recul que sont rassemblés 81,6% des transects.

3.4.4. Estimation de la position du trait de côte à l'horizon 2050

La spatialisation du trait de côte projeté à l'horizon 2050 n'était pas lisible à cette échelle de restitution, les résultats sont exprimés en distance séparant le trait de côte 2019 du trait de côte 2050. L'estimation de la position du trait de côte à l'horizon 2050 est représentée en Figure 10 par la distance qui sépare le trait de côte 2019 du trait de côte futur. Le scénario GIEC retenu pour la présentation des résultats est le SSP-5.8.5.

On remarque que les résultats de la projection sont fortement corrélés à l'évolution historique du trait de côte avec un coefficient de corrélation de 0,93. L'élément faisant sensiblement varier cette corrélation est donc le recul lié à l'élévation du niveau marin. En effet, les valeurs de recul sont appliquées même lorsque la projection du trait de côte est en accrétion. Par ailleurs nous proposons d'appliquer une marge d'incertitude qui repose sur les projections réalisées en section 3.2. Nous avons décidé d'opter pour le scénario le plus pessimiste en sélectionnant la valeur relative à l'application 3 LRR (Tableau 4) équivalente à 1,2 m/an de marge d'incertitude. Une fois multipliée par le nombre d'années de projection, elle constitue l'incertitude relative à la position du trait de côte à l'horizon 2050, soit en moyenne $\pm 37,2$ m.

En définitive, selon nos résultats la part de l'érosion à l'horizon 2050 serait de 56% contre 44% pour l'accrétion. Avec une accrétion maximum estimée à 145 m et une érosion maximum estimée à -129 m. La moyenne de l'érosion est évaluée à -9,5 m et la moyenne d'accrétion à 26,1 m.

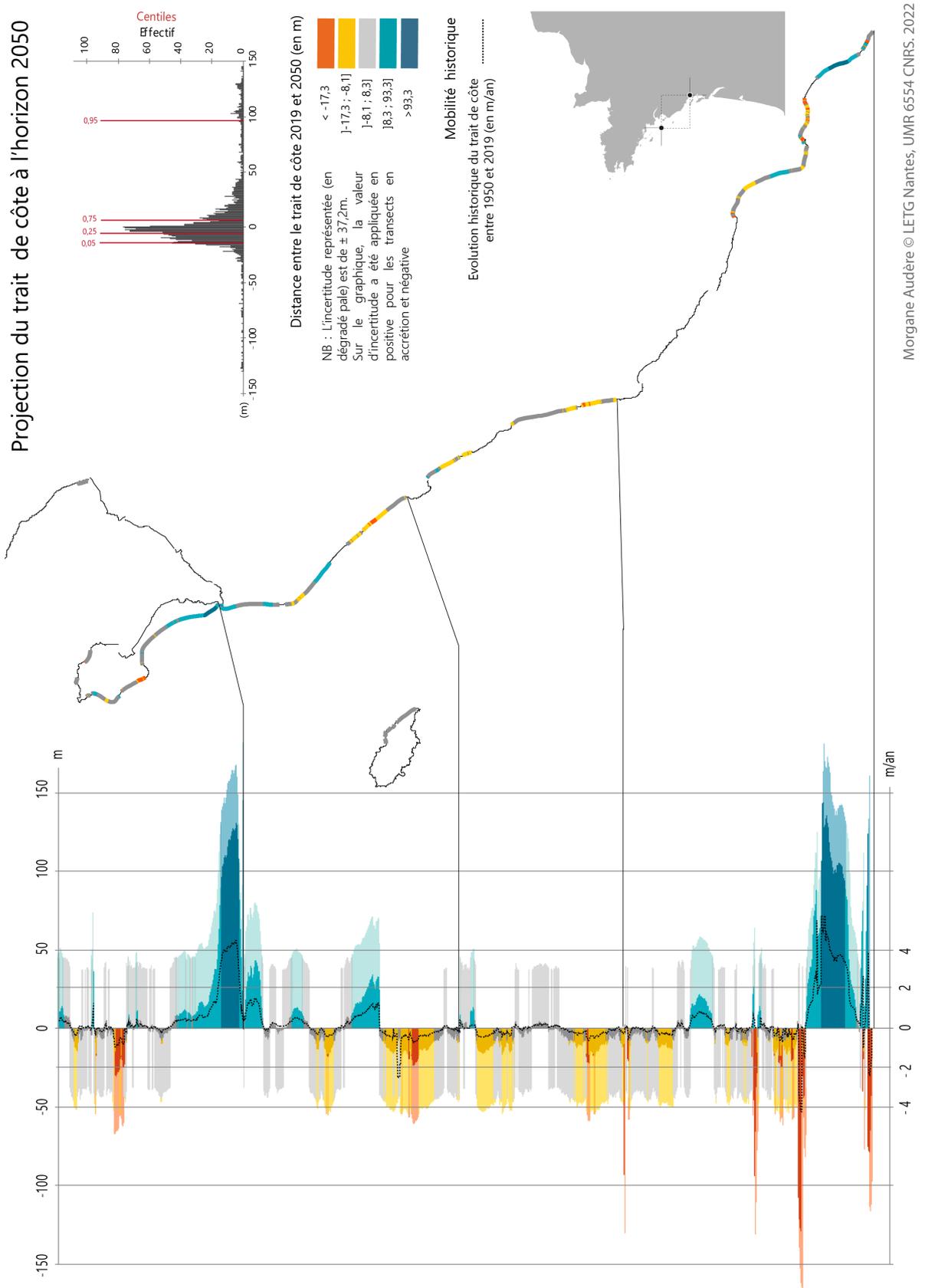


Figure 10 : Projection du trait de côte à l'horizon 2050 et incertitude associée

4. Discussion et limites

4.1. Les incertitudes relatives à la projection du trait de côte

4.1.1. *Le choix de la méthode statistique*

Les tendances d'évolution passées du trait de côte sont généralement mesurées soit par la méthode EPR soit par la méthode LRR. La première consiste à calculer l'évolution moyenne annuelle entre le trait de côte le plus ancien et le trait de côte le plus récent. La seconde est une régression linéaire qui intègre une pluralité de traits de côte. Sur la période 1950-2010 qui inclue cinq traits de côte, il est montré une forte corrélation entre les résultats issus de la méthode EPR et ceux de la méthode LRR avec un coefficient de corrélation de 0,89. Le même exercice est réalisé sur les périodes plus courtes (A1 : 1950-1990 et A2 : 1990-2010) et toutes deux sont composées de trois traits de côte. Les résultats montrent que la régression linéaire devient dans ce cas moins pertinente. En effet, les résultats issus des deux méthodes sont caractérisés par un coefficient de corrélation de 0,998, signifiant que la méthode EPR – n'imposant que l'utilisation de deux traits de côte – est aussi adaptée que la régression linéaire lorsque la collection de traits de côte est réduite. Au vu des résultats de l'application 3 (période 1950 à 2010), la comparaison entre les résultats des deux méthodes sont tellement proches qu'ils ne nous permettent pas de définir celle qui est la plus adaptée pour l'exercice de projection.

4.1.2. *Le nombre d'années de projection*

Par ailleurs, les résultats mettent en évidence que les valeurs issues des applications 2 et 3 sont particulièrement proches. Elles ont pour point commun de réaliser une projection à 9 ans alors que la projection pour l'application 1 est de vingt-neuf ans. En conséquence, plus le nombre d'années de projection est élevé, plus l'incertitude quant à la position du trait de côte projeté, augmente. Des deux cas où la projection est réalisée à neuf ans, celui basé la période récente (1990-2010) s'avère être la plus proche de la réalité. Nous pouvons faire l'hypothèse que cette période récente est la plus représentative pour projeter à l'horizon 2019.

4.1.3. *Point de départ de la projection*

Chaque période présentée dans les applications 1, 2 et 3 est caractérisée par une tendance d'évolution du trait de côte différente, qui influence sa position future après projection. Mais le trait de côte à partir duquel la projection est réalisée varie selon ces périodes (1990 pour l'application 1 et 2010 pour les applications 2 et 3). Nous observons à travers les exemples les conséquences suivantes : sur le secteur de l'hippodrome, le taux d'évolution de la période 1950-1990 révèle une stabilité (entre -0,5 et 0,5 m/an) alors que l'écart entre les traits de côte projeté et réel est en moyenne de +16 m sur ce secteur (Figure 4-b). De

même, sur le secteur de l'île d'Yeu, une partie du littoral est en érosion entre 1950 et 1990 et l'écart entre les deux traits de côte est en moyenne de +23 m (Figure 5-b). Ces résultats s'expliquent par la position du trait de côte à partir duquel la projection est réalisée, qui dans ce cas, varie considérablement, selon les endroits, entre 1990 et 2010. La distance moyenne entre le trait de côte de 1990 et celui de 2010 sur l'ensemble du site d'étude est d'environ 11 m et la distance maximum mesurée entre ces deux traits de côte est de 154 m (sud de Noirmoutier).

Afin de quantifier l'incertitude de la position du trait de côte en 2050, nous proposons de nous appuyer sur les résultats de l'application 3-LRR car elle repose sur la même collection de traits de côte historiques que l'exercice de projection à 2050. Sa projection est réalisée sur 9 ans, celle à 2050 l'est sur 31 ans. Dès lors, deux possibilités sont envisagées. La première serait d'utiliser la valeur d'écart relative à l'application 3-LRR, mesurée sur chaque transect et rapportée au nombre d'années de projection (9 ans) afin d'obtenir une valeur annuelle. Cette dernière valeur serait ensuite projetée sur 31 ans afin d'obtenir la valeur d'incertitude de position du trait de côte en mètre, à l'horizon 2050. La seconde possibilité est d'utiliser la valeur moyenne des écarts relative à l'application 3-LRR et de l'appliquer pour chaque transect en respectant la même démarche que la précédente. Les résultats de l'application 3-LRR présentent des écarts moyens de 11 m sur 9 ans, soit une incertitude moyenne de 1,2 m/an. Ainsi, l'incertitude relative à la position du trait de côte en 2050 peut être estimée à ± 37 m ($1,2 \text{ m/an} * 31 \text{ ans}$).

Les résultats de la première démarche peuvent être très variables d'un transect à l'autre et devront être analysés avec précaution. En effet, la variabilité des écarts de l'application 3-LRR (écart-type de 13,8 m) met en évidence l'incertitude de la méthode de projection principalement car ces écarts sont intrinsèquement liés à la position du trait de côte à partir duquel la projection est réalisée, c'est-à-dire le trait de côte 2019. Nous préconisons par conséquent d'appliquer la valeur moyenne de ces écarts, représentative de l'ensemble des écarts issus de cet exercice de projection.

4.2. Les incertitudes liées à l'estimation de l'érosion due à l'élévation du niveau marin

4.2.1. L'élévation future du niveau marin

Cet exercice met en évidence que l'estimation de la position du trait de côte à long terme accroît les incertitudes. En effet, si les valeurs des deux scénarios à 2050 sont sensiblement proches (Figure 9), celles issues de la projection à 2120 accusent des écarts plus significatifs. Par ailleurs, les projections d'élévation du niveau marin à La Rochelle sont estimées par le GIEC sur la base des enregistrements compris entre 1995 et 2014. Nous pouvons effectivement nous demander dans quelle mesure l'élévation moyenne du niveau marin sur une période récente est adaptée pour une estimation future.

4.2.2. *La pente*

La pente est un paramètre susceptible de faire varier considérablement les estimations de recul (Ranasinghe et Stive, 2009). Durand et Heurtefeux (2006) propose une équation adaptée au milieu microtidal. Pour ce secteur, la pente correspond donc à la pente du bas de plage et de la partie supérieure de l'avant-plage en%, depuis le haut de la berme jusqu'à la 1^{ère} barre pré-littorale, située à environ -1 m. Toute la difficulté réside à nouveau dans l'étendue du site d'étude et la disponibilité de la donnée à cette échelle. La campagne d'acquisition des données topographiques de 2019 n'ayant pas été réalisée à marée basse, il n'a pas été possible d'extraire une isoligne inférieure à 1 m NGF sur l'ensemble de la région, limite levée en 2021-2022 avec la mise en place systématique par l'OR2C de campagnes topobathymétriques avec lidar bi-fréquence permettant d'étendre donc cette limite à la partie inférieure de la zone intertidale. Malheureusement, les données ont été livrées trop tard pour l'exercice effectué dans cette thèse.

4.3. Limites de la démarche

L'analyse des nombreuses incertitudes inhérentes à la démarche de projection montre bien la complexité d'une définition de la position future du trait de côte. Pourtant, il s'agit d'une donnée qui est intégrée de plus en plus aux documents de gestion et de planification du territoire littoral et est appelée à être intégrée dans les PLUI et être source d'actualisation des PPR (cf. loi « Climat et résilience »). Cette information permet d'évaluer les espaces côtiers les plus à risque face au phénomène d'érosion. Les limites de cet exercice sont intrinsèquement liées aux nombreuses incertitudes et tendent à alerter quant à l'exercice de projection du trait de côte à long terme.

En effet, premièrement, le manque de donnée disponible constitue une des contraintes les plus récurrentes dans les travaux portant sur l'analyse de l'évolution de littoral. D'après Durand et Heurtefeux (2006) « il faudrait théoriquement disposer d'un échantillon minimal de trente données d'évolution passée couvrant un laps de temps au moins deux fois supérieur à la durée de la prévision. [...] En pratique, ces conditions ne sont jamais réunies ». L'étendue de notre site d'étude ne permet effectivement pas de rassembler ces conditions sur la période 1950-2019. Il faudrait en conséquence un maximum de traits de côte afin de définir si la régression linéaire est plus pertinente que les méthodes des « points extrêmes » (EPR).

Deuxièmement, la projection linéaire du trait de côte ne permet pas de rendre compte de la dynamique future du littoral. En effet, si on considère que l'impact des événements extrêmes est intégré dans l'évolution historique du trait de côte au même titre que l'effet de l'élévation du niveau marin, on ne peut cependant pas anticiper les événements futurs. Pourtant le recul lié à un événement extrême peut parfois dépasser l'érosion prévue à l'horizon 2050 voire 2120.

Pour conclure, l'estimation du recul lié à l'élévation du niveau marin est un exercice empreint d'incertitudes, et les méthodes d'estimation proposées (Bruun, 1962 ; Durand et Heurtefeux, 2006) si elles sont adaptées à des environnements littoraux spécifiques, ne peuvent être appliquées de manière universelle.

4.4. Les pistes explorées

L'impact potentiel d'évènements extrêmes dans le futur constitue une des incertitudes les plus notable dans la projection du trait de côte. Notre incapacité à prédire la fréquence et la puissance d'évènements morphogènes se traduit dans les marges d'incertitudes présentées dans ce chapitre.

Deux pistes ont été explorées pour tenter d'appréhender ces évènements extrêmes. Premièrement, une modélisation d'un évènement extrême de type Xynthia a été réalisée par l'OR2C, dans le cadre d'une convention entre Nantes Université et la DREAL (OR2C-Université de Nantes, 2021). Un modèle régional a été constitué puis 16 modèles locaux et ce sur 16 sections côtières sensibles, afin d'analyser finement la résultante potentielle de cette tempête. L'objectif est de simuler, avec la suite du logiciel MIKE (DHI), la propagation des niveaux d'eau et celle de l'énergie des houles à la côte et de spatialiser les transits sédimentaires (Figure 11).

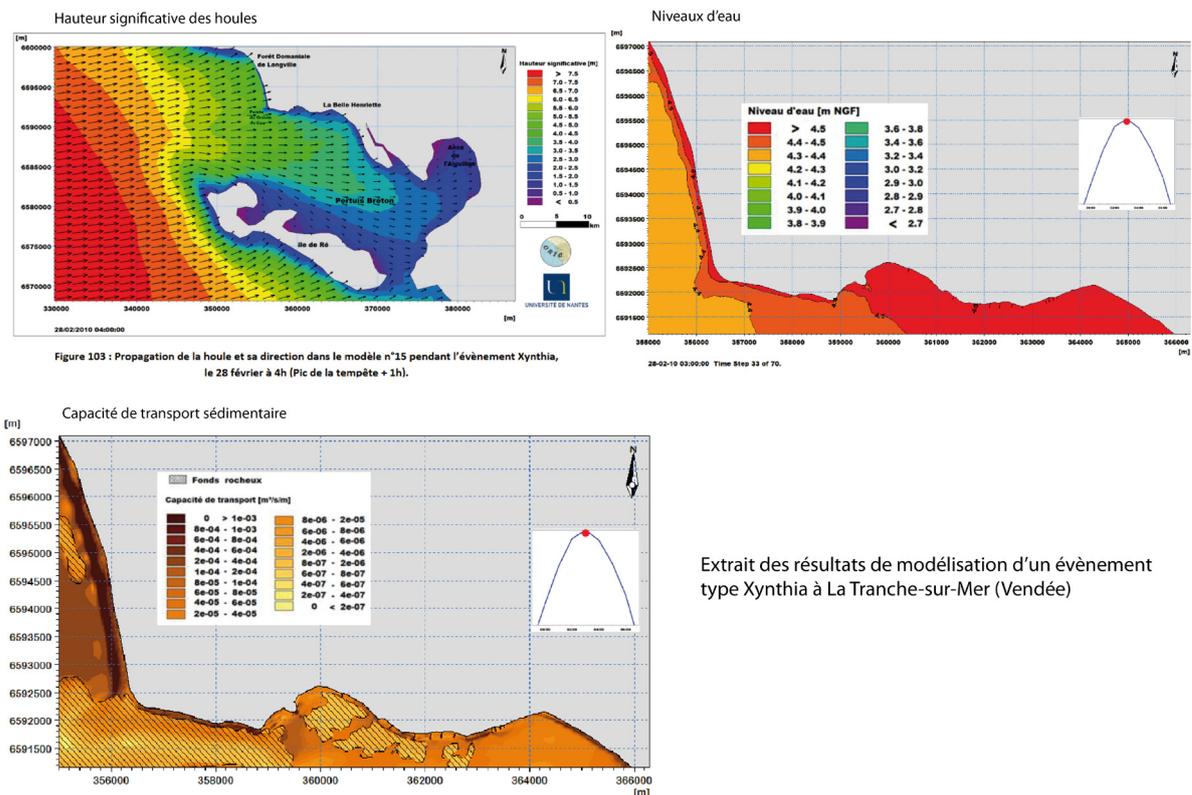


Figure 11 : Extrait des résultats de modélisation d'un évènement types Xynthia (source : Université de Nantes - OR2C)

Deuxièmement, il s'agit d'exploiter une partie de la base de données de réanalyse ERA 5 en nous concentrant sur les paramètres de houle (direction, hauteur significative, période), de vent (direction et vitesse) et de pression atmosphérique. On projette de compléter cette base par des variables géomorphologiques régionalisées : métriques dérivées des MNT/MNS topobathymétriques LiDAR, granulométrie des sédiments, orientation des segments

côtiers, marqueurs du trait de côte à diverses dates, ouvrages complétés à partir de la BD Ouvrage du Cerema. L'analyse des rapports entre les divers éléments de cette base devrait servir à l'édification d'un catalogue de situations types répondant à une typologie de tempêtes régionalisées susceptible d'être mobilisé en situation de crise pour forcer une modélisation à la volée adossée à une alerte VVS de météoFrance, service proposé aux collectivités territoriales en cours de production au sein de l'OR2C (à la demande de la DREAL Pays de la Loire).

5. Conclusion

Ce chapitre s'inscrit dans la continuité des deux chapitres précédents portant sur l'analyse historique et l'évaluation de l'impact d'évènements extrêmes. Il remobilise les deux premiers chapitres et les exploite pour traiter la dimension future de l'aléa. Il réunit ainsi les réflexions relatives aux différentes temporalités de l'aléa érosion et vise à mettre en évidence la complexité de la démarche prédictive. Cette complexité est caractérisée par la quantification des incertitudes relatives aux différentes étapes de l'exercice.

L'incertitude est relative à la donnée mais aussi aux choix méthodologiques. Ce chapitre révèle ainsi la diversité des paramètres susceptibles d'impacter la position du trait de côte projeté que nous rappelons ci-dessous :

- la méthode statistique mesurant l'évolution historique du trait de côte ;
- la période historique retenue pour la projection du trait de côte ;
- le nombre de traits de côte utilisé pour la projection ;
- la date à partir de laquelle la projection est réalisée ;
- le choix du scénario GIEC d'élévation futur du niveau marin ;
- la valeur d'élévation passée du niveau marin ;
- les marges d'incertitude liées aux données ;
- l'impossibilité de prédire l'occurrence des évènements météo-marins morphogènes.

Les résultats produits dans ce chapitre mettent en évidence un large éventail de sources d'incertitude et alerte sur l'exercice de projection du trait de côte à long terme, notamment lorsqu'il est réalisé dans le cadre des documents réglementaires tels que les Plans de Préventions des Risques Littoraux ou pour l'insertion des lignes de projection dans les PLUI comme évoqué dans la loi « Climat et résilience ».

Partie 2

Conclusion

Le premier chapitre propose une synthèse du bilan sédimentaire linéaire et surfacique à l'échelle de la région, des cellules sédimentaires et enfin au niveau des unités spatiales (20 * 100 m). Ce travail permet d'estimer précisément les secteurs en accrétion, en érosion et stables ou insignifiants, par période. Il apparaît que la région des Pays de la Loire possède une côte sableuse qui est le plus souvent en accrétion sédimentaire même si certains secteurs locaux sont en érosion chronique sur la période 1950-2010. Le bilan sédimentaire est également réalisé sur les périodes intermédiaires suivantes : 1950-1970, 1970-1990, 1990-2010 et enfin 1990-2000 et 2000-2010. Cette approche plus fine permet donc de déterminer des tendances au sein des cellules sédimentaires et de délimiter l'évolution de sous-cellules homogènes Cette démarche a également un objectif opérationnel et est susceptible d'intéresser les gestionnaires des territoires littoraux, quelle que soit la dimension spatiale : collectivités ou autres projets urbains.

Le second chapitre apporte de nouvelles propositions concernant la création de bandes de risque d'érosion basées sur l'observation, qui pourraient être prises en compte dans la révision d'un PPRL si nécessaire, car une révision est attendue dans tous les cas lorsqu'un changement du niveau de risque est observé (MEDDE, 2014). Trois suggestions sont ainsi avancées : i) actualiser le zonage du risque à l'aide de données plus récentes et en tenant compte des tendances observées, qu'il s'agisse d'érosion ou d'accrétion ; ii) étudier l'impact de plusieurs tempêtes pour définir un L_{max} observé et mesuré en tout point du littoral afin de proposer un L_{max} calculé localement par pas de 20 m ; iii) proposer des projections du trait de côte à plus court terme (2050) que dans les PPRL, approche plus raisonnable dans le contexte du changement climatique pour réduire la marge d'incertitude.

Le troisième et dernier chapitre clos la Partie 2 en remobilisant les résultats deux chapitres précédents pour s'intéresser enfin à la dimension future de l'aléa. Il réunit ainsi les réflexions relatives aux différentes temporalités de l'aléa d'érosion et vise à mettre en évidence la complexité de la démarche prédictive. Les résultats produits dans ce chapitre mettent en évidence un large éventail de source d'incertitude et alerte sur l'exercice de projection du trait de côte à long terme, notamment lorsqu'il est réalisé dans le cadre des documents réglementaires tels que les Plans de Préventions des Risques Littoraux ou pour la cartographie du risque lié au recul du trait de côte prévu par la loi Climat et Résilience du 24 août 2021.

L'étude des diverses dimensions temporelles de l'aléa apporte une amélioration des connaissances quant à la dynamique sédimentaire observée et scénarisée en région, et contribue à la mesure et la spatialisation de vulnérabilité physique du littoral et des enjeux côtiers qui font l'objet de la dernière partie.

Partie 3

Spatialisation des enjeux côtiers

La troisième et dernière Partie a pour objectif de croiser les deux composantes du risque : l'aléa, étudié dans l'ensemble de la Partie 2 et les enjeux, traités dans cette dernière partie. Les deux chapitres suivants visent à répondre à la problématique centrale de cette thèse relative à la spatialisation des enjeux côtiers sous l'emprise de l'aléa érosion. Nous abordons donc dans cette ultime partie la vulnérabilité côtière au recul du trait de côte et la spatialisation des enjeux côtiers à travers leur prédisposition au risque d'érosion.

Tout d'abord, nous présentons au sein de ce premier chapitre un nouvel indice de vulnérabilité des côtes sableuses à l'érosion. La construction de cet indice, à travers l'agrégation des variables qui caractérisent la sensibilité de ces espaces à l'érosion, constitue ainsi la première étape pour la spatialisation des enjeux.

Enfin, pour clore cette partie, le dernier chapitre est destiné à porter une réflexion sur les enjeux côtiers et leur exposition à l'aléa en évaluant leur prédisposition au risque d'érosion à travers l'analyse de variables physiques. Il remobilise ainsi l'ensemble des travaux menés au cours de cette thèse.

Chapitre 1

Évaluation de la vulnérabilité côtière

1. Introduction

Les indices de vulnérabilité côtière sont généralement de deux natures ; soit ils intègrent une dimension socio-économique et physique, soit ils reposent exclusivement sur des variables physiques. Les travaux présentés dans ce chapitre s'inscrivent dans la deuxième catégorie. La multiplicité des indices que l'on recense dans la bibliographie internationale tient à la diversité des types de côtes et des caractéristiques hydrodynamiques associées. Ils permettent notamment de cibler les zones littorales les plus à risque et réaliser un porter-à-connaissance pour les gestionnaires du littoral.

Ce chapitre tend à définir cette vulnérabilité propre aux côtes sableuses régionales à la fois en remobilisant des variables mesurées et analysées en Partie 2 et en proposant de nouvelles variables. Ces variables, une fois discrétisées peuvent être combinées en un indice de vulnérabilité côtière à fondement physique qui peut être calculé en faisant soit la somme soit la racine carrée du produit des variables divisé par leur nombre (Gornitz, 1991). Ce type d'indice a été largement repris par la suite pour établir la sensibilité des littoraux sableux à l'élévation du niveau de la mer (*e.g.* Thieler E.R., Hammar-Klose E.S., 1999, National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise: Preliminary Results for the U.S. Atlantic Coast, U.S. Geological Survey Open-File Report 99-593. Nous calculerons donc les deux indices afin de les étudier dans leur construction, les comparer et de poser leurs avantages et limites respectifs au regard de l'évaluation de la vulnérabilité physique des cordons dunaires exposés.

2. Méthode

2.1. Choix des variables

La première phase de construction de l'indice de vulnérabilité réside dans le choix des variables. Afin de caractériser la sensibilité des côtes sableuses à l'érosion en région, les variables suivantes sont retenues (Tableau 1).

Tableau 1 : Liste des variables composant les indices de vulnérabilité côtière

Variable 1	Tendances historiques de mobilité du trait de côte
Variable 2	Recul lié à un événement extrême (Lmax)
Variable 3	Recul lié à l'élévation du niveau marin
Variable 4	Altitude du trait de côte
Variable 5	Volume disponible entre le niveau de la PHMA et le trait de côte
Variable 6	Volume du cordon dunaire

2.1.1. Remobilisation de variables

Une partie de ces variables est produite dans les chapitres précédents dont la référence est présentée dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Référence des variables de vulnérabilité élaborée dans les chapitres précédents

Variable	Référence
Évolution historique du trait de côte	Partie 2 – Chapitre 1
L _{max}	Partie 2 – Chapitre 2
Recul lié à l'élévation du niveau marin	Partie 2 – Chapitre 3

Ces trois variables ont en commun de caractériser la mobilité transversale du trait de côte. Ce qui les distingue en revanche est la dimension temporelle qu'il est essentiel de considérer lors de l'analyse des résultats. Contrairement aux autres variables, ces trois premières sont soit le résultat d'observations à court ou long terme soit d'une estimation du recul futur. La variable 3 est issue de la projection de la régression linéaire à l'horizon 2050 (Partie 2, Chapitre 3). Par ailleurs, si l'élévation du niveau moyen de la mer est souvent intégrée aux CVI comme variable hydrodynamique, nous faisons le choix dans ce chapitre d'appréhender cette variable à travers le recul qu'elle est susceptible de provoquer (variable 3).

2.1.2. Nouvelles variables morphologiques

Les variables suivantes ne sont pas la mesure d'une évolution mais les caractéristiques morphologiques à un moment précis, celui-ci correspondant à la date d'acquisition de la donnée.

La variable « altitude du trait de côte » est la différence en Z (en cote NGF) entre l'altitude du trait de côte et celle de la PHMA (qui se situe en moyenne à 3,1m NGF en région). L'élévation du trait de côte correspond à une ligne numérisée sur l'orthophotographie de 2019, attribuée de sa cote NGF par croisement avec le MNT 2019 (par pas de 20 m). La comparaison altimétrique de l'élévation du trait de côte à celle de la PHMA permet ainsi de cibler les zones basses.

La PHMA constitue le niveau statique maximum du référentiel marégraphique. Nous partons donc de l'hypothèse qu'un niveau d'eau supérieur à la PHMA est considéré comme particulièrement élevé et est susceptible de mobiliser les sédiments du haut de plage, voire de la dune. La mesure de ce volume sédimentaire situé entre la PHMA et le trait de côte a pour objectif d'estimer le volume potentiellement mobilisable lorsque les niveaux d'eau dépassent le niveau de la PHMA, celui-ci pouvant être considéré comme une zone tampon avant que la dune soit impactée.

Le volume de la dune est également un indicateur pertinent pour évaluer la vulnérabilité des côtes sableuses (Hallermeier et Rhodes, 1988). Si cette variable est largement utilisée dans l'étude du risque de submersion car considérée comme rempart naturel (Roche *et al.*, 2015), elle l'est moins dans l'analyse de l'érosion côtière. Elle endosse pourtant le rôle de réservoir dans le système plage-dune, de ce fait la mesure de son volume permet d'évaluer sa capacité à résister à des niveaux d'eau extrêmes (Juigner et Robin, 2018). Chaque variables est mesurée tous les 20 m.

2.2. Discretisation des variables et calcul des indices de vulnérabilité

La deuxième phase pour la construction de l'indice de vulnérabilité côtière consiste à classer les variables via une méthode de discretisation statistique (Figure 1). Dans une logique d'homogénéité, toutes les variables sont classées selon la méthode des quantiles. Cette méthode a tendance à limiter le poids des valeurs extrêmes (Lahousse et Piédanna, 1998). Or, pour la construction d'un indice de vulnérabilité à l'érosion côtière, les valeurs fortes voire extrêmes nous intéressent particulièrement. L'intérêt des valeurs extrêmes est de prioriser, d'un point de vue opérationnel, les secteurs les plus exposés à l'aléa. Ainsi, pour pallier cette caractéristique propre à cette méthode de discretisation, nous introduisons les centiles afin de créer des classes plus en phase avec nos objectifs. Le choix des centiles est donc motivé par la connaissance fine de la donnée traitée et s'appuie ainsi sur une approche plus thématisée.

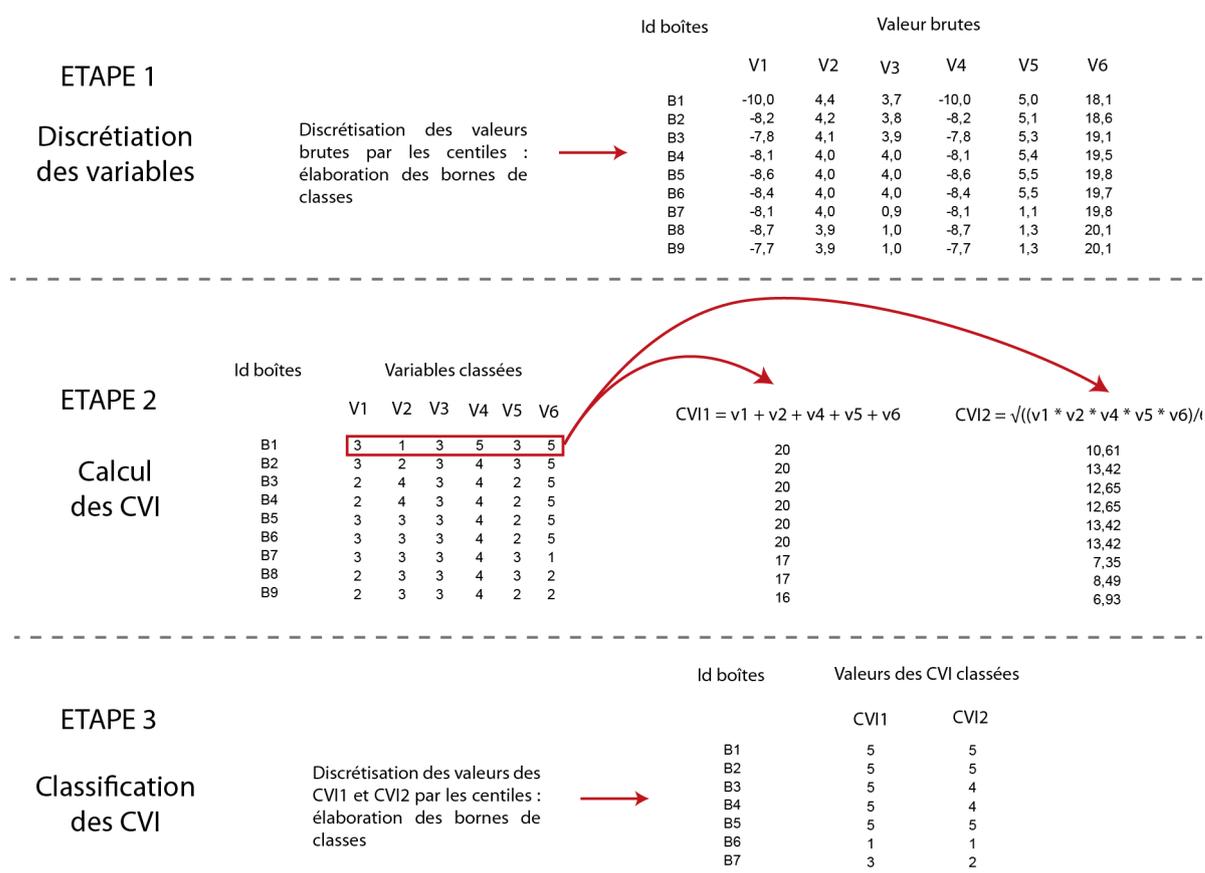


Figure 1 : Méthode de construction de l'indice de vulnérabilité côtière

Pour la première étape, les variables sont synthétisées dans des boîtes de 20 m de large (dimension longitudinale) par 150 m de longueur (dimension transversale). Les valeurs brutes propres à chaque variable sont discrétisées en cinq classes de vulnérabilité selon la méthode des quantiles qui repose exclusivement sur l'effectif de la série statistique, afin que

ces variables puissent être comparées (Figure 1). Les séries statistiques sont discrétisées par les quantiles/centiles suivants : 0,25 ; 0,5 ; 0,75 ; 0,90 afin de porter davantage notre intérêt sur les classes à forte vulnérabilité. Les classes 1 à 3 sont donc chacune composée de 25% de la série, la classe 4 de 15% et la classe 5 de 10%, pour ne cibler que les secteurs à forte vulnérabilité et très forte vulnérabilité (Tableau 3).

Tableau 3 : Classification des variables pour l'indice de vulnérabilité

Classes CVI	Volume de la plage (m³)	Volume de la dune (m³)	Altitude du trait de côte (m)	Evolution historique du trait de côte (m/an)	Lmax (m)	Recul lié à l'élévation du niveau marin (m)	Centiles
1	>= 426,8	>= 6066,7	>= 2	>= 0,4	>= -2	>= 1,3	0,25 0,50 0,75 0,90
2	] 426,8 : 184,8 ]	] 6066,7 : 4223,1 ]	] 2 : 1,3 ]	] 0,4 : 0 ]	] -2 : -3,7 ]	] -1,3 : -1,7]
3	] 184,8 : 68,9 ]	] 4223,1 : 2544,1 ]	] 1,3 : 0,7 ]	] 0 : -0,2 ]	] -3,7 : -6 ]	] -1,7 : -2,4]
4	] 68,9 : 22,3 ]	] 2544,1 : 1514 ]	] 0,7 : 0 ]	] -0,2 : -0,4 ]	] -6 : -8,8 ]	] -2,4 : -3,7]
5	<22,3	<1514	<0	<-0,4	< -8,8	< -3,7	

La seconde étape consiste à calculer les indices de vulnérabilité. Le premier indice de vulnérabilité est calculé comme la somme des variables, le second comme la racine carrée du produit des variables classées divisé par leur nombre :

$$CVI_1 = v1 + v2 + v3 + v4 + v5 + v6$$

$$CVI_2 = \sqrt{((v1 * v2 * v3 * v4 * v5 * v6) / 6)}$$

Enfin, la 3^{ème} et dernière étape repose sur la discrétisation des résultats des deux CVI. La méthode de discrétisation précédemment citée est à nouveau appliquée, reposant également sur les mêmes quantiles/centiles. Chaque boîte se trouve ainsi dotée d'une valeur de vulnérabilité de 1 à 5 propre à chaque variable et d'une valeur de vulnérabilité globale de 1 à 5 pour chacun des deux indices.

3. Résultats

3.1. Classification et spatialisation des variables

La répartition des boîtes dans les cinq classes est supposée être plus ou moins équivalente aux intervalles de classes relatifs à la discrétisation par les centiles. La série statistique doit donc se scinder de la manière suivante : 25% par classe pour les trois premières classes, 15% pour la classe 4 et 10% pour la classe 5. Cette répartition est assez bien respectée pour les volumes de plage et de dune (Figure 2) ainsi que pour le recul lié à l'élévation du niveau marin (Figure 3). En revanche, elle l'est moins bien pour la variable « évolution historique

du trait de côte » qui rassemble 50% des effectifs dans la classe 3 au lieu de 25%, pour la variable « altitude du trait de côte » dont la classe 5 regroupe seulement 2,7% des effectifs ou encore la classe 1 qui rassemble 32,4% (Figure 2). On note également que la classification fonctionne bien sur les distributions statistiques dissymétriques (recul lié à l'élévation du niveau marin, Lmax, volume de plage). A l'inverse, elle est moins efficace sur les distributions symétriques (altitude du trait de côte) et plus particulièrement sur les distributions symétriques centrées 0 (évolution historique du trait de côte). La variable « volume de dune » fait figure d'exception avec une distribution fidèle à la classification attendue.

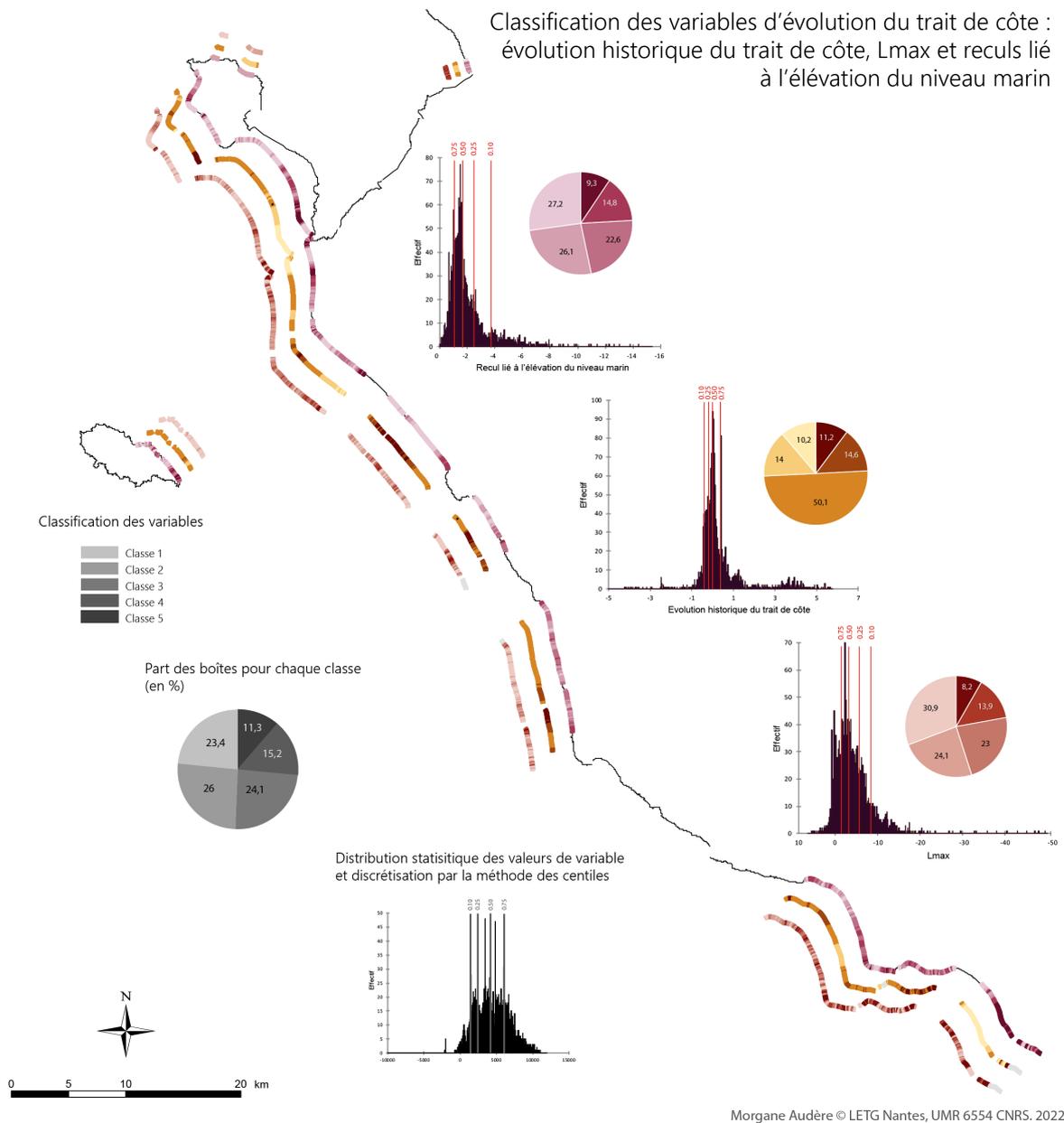


Figure 2 : Classification des variables d'évolution du trait de côte : évolution historique, Lmax et reculs lié à l'élévation du niveau marin

Concernant les variables d'évolution du trait de côte (Figure 2), on note une forte hétérogénéité spatiale de la vulnérabilité relative au Lmax. Cependant, le secteur du sud Vendée, et dans une moindre mesure au Pays-de-Monts, sont particulièrement caractérisés par les classes 3, 4 et 5 de vulnérabilité. Ensuite, les secteurs pour lesquels la vulnérabilité relative aux reculs liés à l'élévation du niveau marin est la plus élevée (classes 4 et 5) sont plus ciblés, situés notamment sur la commune de Barbâtre à Noirmoutier, et la flèche d'Arcay sur la commune de l'Aiguillon-sur-Mer. Enfin, la vulnérabilité liée à l'érosion historique est essentiellement identifiée sur la commune de Saint-Jean-de-Monts puis plus ponctuellement au Sud de Saint-Gilles-Croix-de-Vie, au Nord des Sables d'Olonne également, ainsi qu'à La Tranche-sur-Mer.

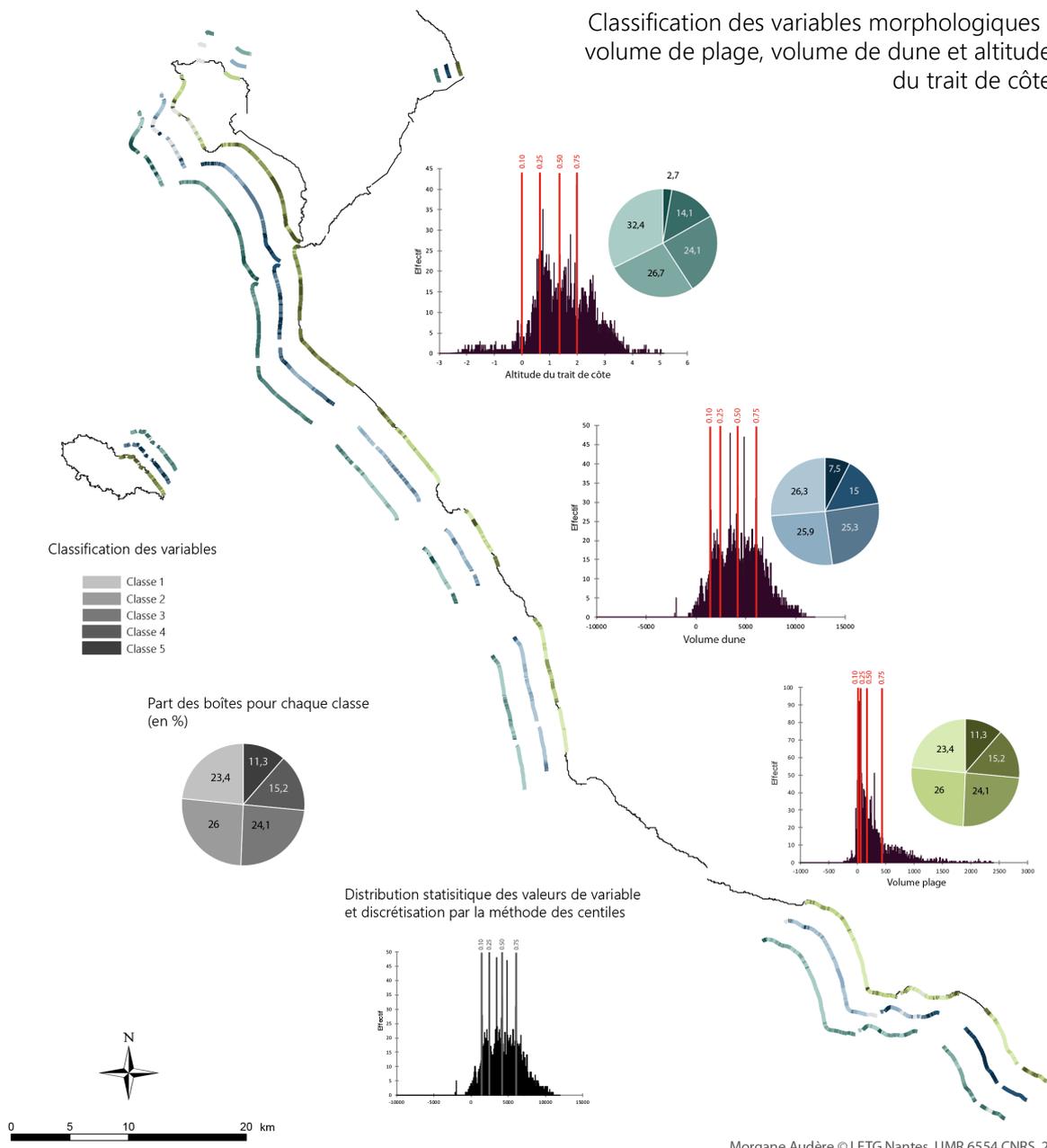


Figure 3 : : Classification des variables morphologiques : volume de plage, volume de dune et altitude du trait de côte

Les variables morphologiques sont davantage corrélées du point de vue spatial. Pour les trois variables, la vulnérabilité forte à très forte se concentre sur la partie nord du site d'étude, soit des Moutiers-en-Retz jusqu'au Sud de Saint-Jean-de-Monts. Au Sud du secteur d'étude, particulièrement sur la flèche d'Arcay, la vulnérabilité est surtout liée aux faibles volumes de dune. Le reste du secteur d'étude affiche une faible vulnérabilité globale, caractérisée par un trait de côte élevé et des volumes du système plage-dune conséquents.

3.2. Comparaison des indices de vulnérabilité

La répartition des boîtes dans les classes de vulnérabilité présentée dans le Tableau 4 révèle une plus grande hétérogénéité pour le CVI1 que pour le CVI2. Le CVI1 présente en effet quelques écarts notamment concernant la classe 3 dont les effectifs sont supérieurs à ceux attendus (28,9% pour 25%), ce qui est, dans une moindre mesure, également le cas pour la classe 5 (12,9% pour 10%). Par ailleurs, les classes 1, 2 et 4 rassemblent des effectifs inférieurs à ceux attendus par la discrétisation (22% et 23,1% pour 25% et 13,2% pour 15%).

Tableau 4 : Répartition des boîtes dans les classes de vulnérabilité côtière

	CVI1			CVI2			Part des classes par centile (%)
	Nombre de boîtes	Classification	Part (%)	Nombre de boîtes	Classification	Part (%)	
CLASSE 1	891	< 12	22	1010	< 2,74	25	25
CLASSE 2	933	[12 ; 15[	23,1	991	[2,74 ; 4,47[	24,5	25
CLASSE 3	1168	[15 ; 18[	28,9	1033	[4,47 ; 8,22[	25,5	25
CLASSE 4	533	[18 ; 20[	13,2	578	[8,22 ; 12[	14,3	15
CLASSE 5	522	> 20	12,9	435	> 12	10,7	10

La Figure 4 nous permet d'identifier plus en détail le nombre de boîtes dont la classe diffère entre les deux indices. Dans l'ensemble, le coefficient de corrélation est de 0,86, l'absence de corrélation totale étant expliquée par une différence de classification entre les deux indices. Au total, 922 boîtes soit 22,8% des entités ne sont pas classées de la même

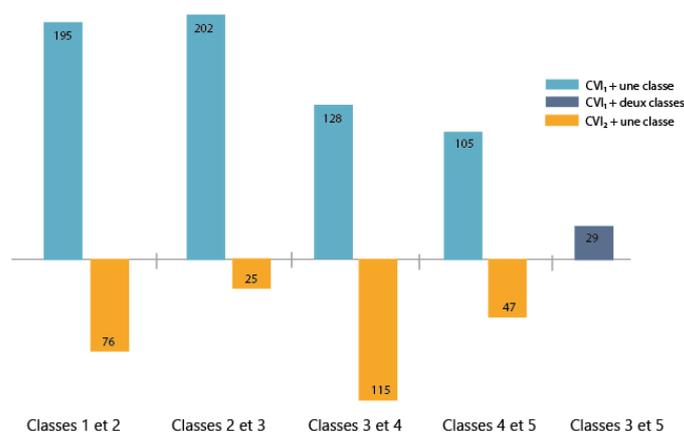


Figure 4 : Différence de classification entre le CVI1 et le CVI2. Lire : 195 boîtes sont en classes 2 pour le CVI1 quand ces mêmes boîtes sont en classe 1 pour le CVI2

manière entre les deux CVI. Pour le CVI1, 630 boîtes se situent dans une classe supérieure à celle du CVI2 et 263 dans le cas inverse. On note également que 29 boîtes situées en classe 3 dans le CVI2 se trouvent en classe 5 dans le CVI1. Les différences relevées illustrent donc que le CVI1 est plus « pessimiste » que le CVI2 au vu du nombre de boîtes identifiées dans une classe supérieure.

A l'échelle du secteur d'étude, les deux indices de vulnérabilité côtière mettent globalement en évidence la même information (Figure 5), soit une vulnérabilité faible à modérée au centre de la Vendée, de Saint-Hilaire-de-Riez aux Sables d'Olonne, des secteurs intermédiaires dans le sud Vendée et dans la partie nord de l'île de Noirmoutier ainsi qu'une forte vulnérabilité générale au Sud de l'île de Noirmoutier et sur le littoral du Pays-de-Monts.

On observe pourtant des variations entre les deux indices, notamment au Sud de l'île de Noirmoutier, illustrant un CVI1 plus « pessimiste » que le CVI2. On constate, dans une moindre mesure, une situation similaire au Sud du Pays-de-Monts, qui reste malgré tout

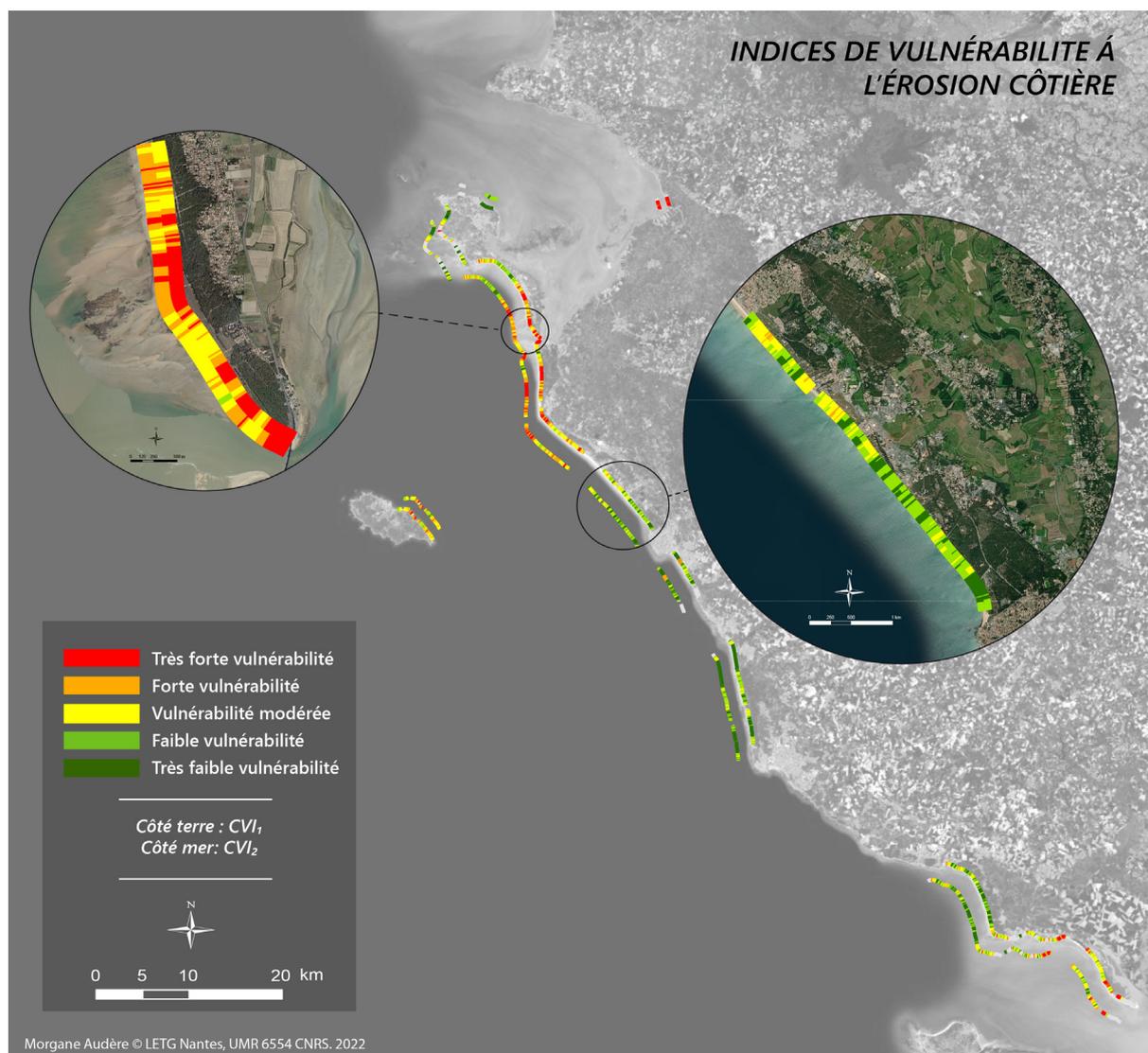


Figure 5 : Indices de vulnérabilité à l'érosion côtière

3.3. Influence des variables dans les indices de vulnérabilité

La part des variables est analysée dans un premier temps de manière générale à l'échelle des cinq classes de vulnérabilité des deux indices. Dans un second temps, nous nous concentrons sur les classes 1 et 5, les classes intermédiaires étant caractérisées davantage par une hétérogénéité dans les valeurs de classification des variables. Cette hétérogénéité ne permet pas, par conséquent, d'attester de l'influence déterminante d'une ou plusieurs variables.

Pour chaque classe de CVI, la part de chaque variable (en %), et ce pour chaque boîte, a été mesurée, puis une moyenne de ces parts a été calculée pour chaque variable et au sein de chaque classe de vulnérabilité. Pour les trois premières classes de vulnérabilité la variable « évolution historique du trait de côte » représente la variable dont le poids est le plus important (Tableau 5), démontré par ailleurs dans le Tableau 6. Pour les classes 4 et 5, il s'agit du volume de plage qui est davantage représenté pour des valeurs de classes élevées.

Tableau 5 : Moyenne du poids de chaque variable dans l'indice final (en%)

Classes de CVI	CVI	Volume dune	Volume plage	Evolution historique du trait de côte	Lmax	Altitude du trait de côte	Recul lié à l'élévation du niveau marin
Classe 1	CVI1	12,8	13,2	30,2	13,4	10,3	20,1
	CVI2	12,4	12,6	31,2	13,4	10,2	20,3
Classe 2	CVI1	14,9	14,8	25,4	16,8	11,5	16,6
	CVI2	15,6	14,4	24,3	18,0	11,3	16,4
Classe 3	CVI1	16,1	15,1	20,3	18,3	13,2	17,0
	CVI2	17,2	16,0	18,1	16,9	14,6	17,1
Classe 4	CVI1	18,3	20,1	14,7	14,4	18,1	14,4
	CVI2	18,0	20,4	14,5	13,8	18,6	14,8
Classe 5	CVI1	18,7	19,6	12,1	15,2	17,9	16,5
	CVI2	17,6	19,5	13,4	15,5	17,3	16,7

Ensuite, pour analyser plus en détail l'influence des variables (Tableau 6) au sein de la classe 1, il est nécessaire de nous concentrer sur les variables qui sont davantage caractérisées par des valeurs basses. Ce sont en effet ces valeurs basses qui vont entraîner la classification des boîtes dans cette classe à très faible vulnérabilité. Pour cette classe, les variables morphologiques (les volumes et l'altitude du trait de côte) rassemble 69% des valeurs 1 (ou classe 1) au sein du CVI1. Les valeurs de classe sont également largement représentées par les variables de volume de dune et de plage avec respectivement 20,4% et 22%, mais aussi par la variable « recul lié à l'élévation du niveau marin » rassemblant 20,7% des valeurs 2. Les valeurs présentées pour le CVI2 suivent cette même tendance.

Concrètement, cela signifie qu'une majeure partie du littoral identifié en classe 1 est caractérisée par des volumes de plage et de dune globalement conséquents mais aussi par un trait de côte élevé, c'est-à-dire peu sensible aux niveaux d'eau extrêmes.

Concernant la classe de CVI à très forte vulnérabilité (classe 5), les variables qui ont une influence significative sont essentiellement le volume de la plage et celui de la dune, constituant respectivement 32% et 22,6% de la classe 5 du CVI1 et 34,7% et 20% du CVI2 (Tableau 6). La variable « altitude du trait de côte » représente à elle seule 35,9% de la classe 4 pour le CVI1 et 35,5% pour le CVI2. Ceci signifie également que les classes à très forte vulnérabilité sont particulièrement caractérisées par des zones basses.

Tableau 6 : Part des boîtes par classe et par variable des classes 1 et 5 pour les deux CVI

Classe des CVI	Classe des variables	Volume dune	Volume plage	Evolution historique du trait de côte	Lmax	Altitude du trait de côte	Recul lié à l'élévation du niveau marin	
Classe 1	CVI1							
	Classe 5	0	0	97,8	2,2	0	0	100
	Classe 4	2,2	0,0	63,0	5,7	0,0	29,1	100
	Classe 3	2,7	8,1	52,5	13,4	0,3	22,9	100
	Classe 2	20,4	22,0	9,0	16,0	11,8	20,7	100
	Classe 1	21,8	18,7	0,7	19,7	28,5	10,6	100
	CVI2							
	Classe 5	1,8	0,0	75,3	7,2	0,0	15,7	100
	Classe 4	10,9	2,2	45,0	18,9	0,0	22,9	100
	Classe 3	3,1	8,9	49,6	13,6	0,8	24,0	100
	Classe 2	21,0	24,3	7,1	15,2	12,7	19,7	100
Classe 1	21,4	19,0	1,6	18,7	27,5	11,8	100	
Classe 5	CVI1							
	Classe 5	22,6	32,0	4,9	14,5	7,6	18,5	100
	Classe 4	16,8	15,1	3,8	11,5	35,9	16,8	100
	Classe 3	20,2	7,3	28,4	19,0	14,2	10,9	100
	Classe 2	0,8	11,4	37,0	26,0	4,3	20,5	100
	Classe 1	0,8	4,5	44,5	25,7	0,4	24,2	100
	CVI2							
	Classe 5	20	34,7	6,7	15,6	3,6	19,5	100
	Classe 4	15,2	17,7	4,4	10,7	35,5	16,6	100
	Classe 3	21,8	7,5	26,6	19,1	12,7	12,3	100
	Classe 2	0,8	7,7	34,7	28,6	3,9	24,3	100
Classe 1	0	0	56,9	23,1	0	20	100	

4. Discussion

4.1. Apport et questionnement sur les variables

Tout d'abord, les variables « volumes de plage » et « élévation du trait de côte » reposent toutes deux sur une même mesure : la hauteur comprise entre l'altitude de la PHMA et celle du trait de côte. La variable de volume intègre cependant la distance entre les deux niveaux, permettant ainsi de mesurer cette volumétrie. Même si elle intègre la variable « élévation du trait de côte », elle ne permet cependant pas de délivrer la même information. La variable « volume de plage » peut indiquer un volume faible mais à une altitude supérieure à la PHMA ou au contraire un volume conséquent mais à faible altitude. Néanmoins, cette variable ne nous indique pas si une boîte est en zone basse ou non, information que nous délivre la variable « élévation du trait de côte ». Par ailleurs, l'altitude du trait de côte est majoritairement plus élevée que celle de la PHMA, mais dans le cas contraire, nous intégrons les valeurs négatives (trait de côte inférieur à la PHMA) dans la classe de vulnérabilité la plus forte.

Ensuite, l'emprise utilisée pour mesurer le volume de plage se situe entre la position du trait de côte et une profondeur de 50 m depuis celui-ci. Cette mesure étant réalisée sur plusieurs dizaines de kilomètres, nous avons fait le choix de conserver une seule ligne de profondeur pour une question de temps de traitement et d'homogénéité pour les comparaisons. Mais de nombreux cordons dunaires ont une emprise supérieure à 50 m, ce qui fait que l'intégralité de cette emprise n'est donc pas pris en compte. Cette valeur a été retenue afin d'intégrer au mieux les systèmes dunaires de faible profondeur en limitant les zones artificialisées proches du littoral volume (Figure 6).

Pour la variable L_{max} , nous avons fait le choix de conserver les valeurs positives. Ces valeurs correspondent à l'éboulement d'une section de la dune après le passage d'un tempête, en l'occurrence celui de Lothar et Martin ou bien de Xynthia. Si le trait de côte post-tempête est numérisé en aval du trait de côte pré-tempête, cela signifie que la dune a été impactée mais que le système plage-dune n'a pas subi un impact assez significatif pour qu'il soit considéré en érosion.

4.2. Les limites de la classification des indices

Les distributions statistiques des variables et celles des indices varient entre « symétrique » et « dissymétrique » (Figure 7). Or, les méthodes de discrétisation s'adaptent généralement à l'une ou l'autre configuration. De plus, les méthodes de discrétisation ne sont pas toutes appropriées pour la comparaison cartographique.

La méthode des quantiles, déclinée en centiles pour nos travaux, est initialement plus adaptée aux distributions dissymétriques mais demeure assez souple du fait des divers choix de centiles possibles. Par ailleurs, le principe de discrétisation par effectifs égaux à l'avantage de (i) bien se prêter à l'exercice de comparaison et (ii) créer des classes d'effectifs égaux ba-

sées sur le classement des individus et non sur les valeurs qui leur sont associées (Lahousse et Piédanna, 1998). La différence entre les deux indices réside essentiellement dans le fait que le CVI2, dont le résultat correspond à la racine carrée du produit des variables classées divisé par leur nombre, a l'avantage d'élargir la gamme des valeurs (Gornitz, 1991) au regard du CVI1. En effet, le CVI1, dont le résultat est une somme des variables, est malgré tout plus difficile à classer du fait des valeurs entières variant de 7 à 28 (Figure 7). Le Tableau 4 met d'ailleurs en évidence que le CVI1 respecte mal les intervalles imposés par la classification des centiles.

5. Conclusion

Les résultats fournis par les deux indices à l'échelle du secteur d'étude montrent globalement les mêmes tendances de vulnérabilité à l'érosion, les plus fortes étant spatialisées essentiellement au Sud de Noirmoutier, sur le littoral du Pays-de-Monts et dans le Sud de la Vendée sur les communes de La Tranche-sur-Mer et de L'Aiguillon-sur-Mer. Les limites inhérentes au calcul des deux indices créent toutefois des différences de classification sur des secteurs comme celui situé au sud de Noirmoutier. Le CVI1 apparaît d'ailleurs comme plus « pessimiste » que le CVI2. Par ailleurs, ce qui explique essentiellement la forte vulnérabilité à l'érosion côtière sont des volumes de plage et de dune faibles ainsi qu'une faible altitude du trait de côte illustrant des secteurs situés en zone plutôt basse.

De manière générale, nous soulignons la précaution avec laquelle il faut interpréter les indices. Les variables sont très diversifiées, représentant pour certaines (*i*) exclusivement des paramètres morphologiques à une date donnée (volumes de plage et de dune, élévation du trait de côte), pour d'autres une dynamique sédimentaire observée, inscrite dans une dimension temporelle passée et longue (évolution historique du trait de côte) ou courte (L_{max}) ou bien une estimation des tendances futures (recul lié à l'élévation du niveau marin). Les variables morphologiques étant le résultat de mesures à une date donnée, en l'occurrence 2019 dans ces travaux, l'indice présenté intègre en partie cette limite. Il peut s'agir également d'une perspective de mise à jour de l'indice reposant elle-même sur la mise à jour des données utilisées. Par ailleurs, ces variables morphologiques, peu exploitées dans le cadre de l'estimation de la vulnérabilité à l'érosion côtière, apportent des informations essentielles sur la capacité d'une côte sableuse à faire face à la problématique de reculs côtiers et particulièrement lors d'événements extrêmes. Sekovski *et al.* (2020) expriment d'ailleurs l'intérêt de prendre en considération les différentes caractéristiques de la dune car « le volume des dunes, l'élévation de la base des dunes, la hauteur des dunes, la santé des dunes, la continuité le long des côtes et entre les côtes des dunes, *etc...*, sont également essentiels pour déterminer le rôle des dunes comme protection contre l'intrusion d'eau (Sallenger, 2000 ; Armaroli *et al.*, 2012). Cependant, ces auteurs sont confrontés comme souvent à la difficulté qu'est le traitement de ce type de variable et la reproductibilité de la méthode sur des zones d'étude étendues et n'intègre finalement pas ces paramètres dans leur analyse.

Les perspectives sont nombreuses, tant liées à la donnée qu'aux méthodes qui peuvent être envisagées par la suite. Pour rappel, les éléments présentés dans les précédents chapitres, des perspectives sont à envisager concernant l'acquisition de données. Dans la mesure du possible, il serait judicieux d'augmenter la collection de traits de côte pour l'évaluation de la mobilité historique du trait de côte ou encore de mesurer l'impact d'évènements extrêmes futurs afin de compléter les connaissances sur leur impact à la côte et intégrer cette donnée au Lmax régional.

Par ailleurs, de nombreux auteurs (Gornitz, 1991 ; Thieler et Hammar-Klose, 2000 ; Abuodha et Woodroffe, 2010 ; Kunte *et al.*, 2014 ; Bagdanavičiūtė *et al.*, 2015 ; López Royo *et al.*, 2016) intègrent une ou plusieurs variables hydrodynamiques à leur indice de vulnérabilité. D'une part, sur un territoire de cette étendue, utiliser des variables hydrodynamiques telles que le marnage moyen, la hauteur des houles significatives ou encore l'élévation du niveau moyen de la mer n'est pas pertinent. Ces variables fonctionnent pour la comparaison de sites à l'échelle mondiale entre lesquels ces variables varient. A l'échelle de notre site d'étude, aucune de ces variables varient de manière assez significative pour les intégrer à l'indice de vulnérabilité côtière. Cependant, l'intégration de ce type de variable pourrait être bénéfique dès lors que l'on connaît leur rôle précis sur l'érosion côtière. Or, aucune étude en région n'a encore permis d'identifier ce rôle. Des recherches ont été entamées dans le cadre de cette thèse sur la possibilité de modéliser un évènement extrême connu (via Mike 21, DHI) afin d'identifier le rôle des divers facteurs hydrodynamiques. Même si ces recherches n'ont pas abouti à des résultats probants du fait notamment du manque de données nécessaires, elles méritent d'être approfondies. Des variables tels que l'angle d'incidence des houles à la côte ou de manière plus générale, les conditions de propagation des houles à la côte, pourraient être intégrées à l'indice afin de définir les secteurs les plus exposés à ces forçages hydrodynamiques.

Chapitre 2

Évaluation de la prédisposition des enjeux au risque d'érosion

1. Introduction

La spatialisation des enjeux soumis à l'aléa érosion constitue l'ultime étape de la démarche générale de cette thèse. Une démarche a été publiée dans Juigner *et al.* (2021) (Annexe 2) qui consiste « à spatialiser un indicateur de prédisposition au risque concernant les enjeux (urbanisation et réseaux routiers) associés à l'érosion côtière, dans la bande des 100 m ». Nous proposons dans ce chapitre de préciser la réflexion amorcée dans cet article et de développer un cas d'étude prenant en compte la variabilité de la configuration spatiale d'enjeux urbains exposés à l'érosion en Vendée, tout en focalisant sur les deux composantes de cet enjeu : le bâti et la parcelle foncière. Cette question fait sens dans le contexte de la cartographie des enjeux exposés au recul du trait de côte aux horizons 30 ans et 100 ans telle que précisée dans la loi « Climat et résilience » (LOI n° 2021-1104 du 22 août 2021) portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets.

Juigner *et al.* (2021) retiennent donc trois variables de prédisposition au risque d'érosion : (i) l'évolution historique du trait de côte, (ii) la distance minimum du bâti au trait de côte et (iii) la présence/absence d'ouvrages de protection. Dans le cadre de ce chapitre, nous remobiliserons les deux premières, auxquelles nous ajouterons une dimension volumétrique. Nous y intégrerons de plus, des scénarios de position du trait de côte faisant suite à un événement extrême (L_{max}) et celui estimé à l'horizon 2050. Dans le cadre de la loi « Climat et résilience », les communes qui souhaitent s'engager dans la démarche devront produire une cartographie locale du risque relatif à l'érosion côtière. Notre démarche scientifique a ainsi également une portée opérationnelle car nous proposons d'apporter des éléments de réflexion d'un point de vue méthodologique, susceptible d'être remobilisés dans l'élaboration des cartographies du risque.

Le site d'étude, long d'environ 550 mètres, donc de faible étendue, est destiné à mettre en lumière la démarche méthodologique proposée. Il se situe sur la commune de La Tranche-sur-Mer, sur le secteur de la plage de Clémenceau (Figure 1). Ce site rassemble trois configurations spatiales représentatives de l'organisation de l'espace côtier vendéen. Une première section se caractérise par une bande de parcelles bâties et non bâties située en retrait d'un cordon dunaire d'une profondeur moyenne de 50 mètres. Une deuxième section rassemble quatre parcelles séparées du trait de côte par un cordon dunaire de faible dimension. Enfin, la troisième section est constituée de parcelles bâties situées derrière un perré, ouvrage longitudinal de protection contre les aléas côtiers.



Figure 1 : Localisation du site d'étude. Commune de La Tranche-sur-Mer, Vendée

2. Méthode

2.1. Données

La synthèse des données mobilisées dans ce chapitre est présentée dans le tableau 1. Le trait de côte 2019 est numérisé à partir de la BD ORTHO 2019 à l'échelle 1 : 2 500. Les marqueurs de position du trait de côte sont le pied de dune et la limite de végétation dunaire lorsque le premier marqueur n'est pas identifiable. Les traits de côte historiques ont été numérisés dans le cadre de l'OR2C. Ils sont exploités dans ce chapitre pour réaliser une projection du trait de côte à l'horizon 2050. Le bâti correspond aux constructions indifférenciées de la BD TOPO de l'IGN. Les ouvrages de protection sont issus de la Cartographie nationale des ouvrages et aménagements littoraux réalisée par le Cerema. Enfin, le Modèle Numérique de Terrain est issu du LiDAR de l'OR2C acquis en 2019.

Tableau 1 : Inventaire des données utilisées

Type	Source	Date
Trait de côte récent	Partie 2, Chapitre 3	2019
Traits de côte historiques	OR2C	1950s, 1970s, 1990s, 2000, 2010
Traits de côtes Lmax	Partie 2, Chapitre 2	1999, 2000, 2009, 2010
Ouvrage de protection	CEREMA	2012
Bâti	BD TOPO IGN	2010
Parcelle	BD PARCELLAIRE IGN	2013
LiDAR	OR2C	2019

2.2. Démarche

Le bâti à l'arrière d'un cordon dunaire est une entité spatiale qui peut perdre sa protection naturelle en cas d'érosion du cordon. Dès lors qu'il est fortement menacé par le recul du trait de côte, cet enjeu, contrairement à la parcelle, devient complètement inexploitable. L'exemple le plus documenté en France métropolitaine en secteur dunaire est le cas de l'immeuble « Le Signal » situé sur la commune de Soulac-sur-Mer en Gironde (Lambert *et al.*, 2018). L'immeuble, situé à environ 200 mètres du rivage en 1960, a subi au fil des années une perte progressive de sa protection naturelle par érosion chronique de l'espace dunaire le séparant du trait de côte, érosion aggravée par l'hiver 2013/2014 caractérisé par la succession d'une vingtaine de tempêtes. Le maire de la commune a dû appliquer en 2014 une procédure d'expropriation vis-à-vis des habitants de l'immeuble menacé d'effondrement par le recul inexorable du trait de côte. Une parcelle foncière peut subir le même sort, toutefois, du fait de sa configuration spatiale, comme évoqué précédemment, l'érosion peut ne menacer qu'une partie de la parcelle ne rendant pas toute sa surface impropre à un usage même résidentiel. Là encore, tout dépend de la position du bâti dans la parcelle et de la forme de la parcelle.

Dans le cadre de ces travaux, ces deux objets d'études sont donc étudiés sous l'angle de la prédisposition au risque d'érosion. Cette dernière est caractérisée par (i) une distance minimum entre l'enjeu et le trait de côte, (ii) un volume dunaire et (iii) la présence/absence d'ouvrage. Les variables « distance minimum au trait de côte » et « volume dunaire » sont mesurées sur le MNT 2019. Nous précisons que ces deux variables sont relativement indépendantes (coefficient de corrélation de 0,44) apportant une information différente propre à chacune. Par ailleurs, la variable « évolution historique du trait de côte » exploitée dans Juigner *et al.*, (2021) est remobilisée dans ce chapitre sous une autre forme. Elle n'est plus considérée comme une variable de prédisposition mais est simplement mobilisée pour projeter le trait de côte à l'horizon 2050 (Partie 2, Chapitre 3).

L'étude de la prédisposition est réalisée en deux temps. Premièrement, elle est mesurée à une date connue qui correspond à la date de production du MNT, soit 2019 (Tableau 1). Dans cette configuration, l'évaluation de la prédisposition est un constat à une date donnée. Deuxièmement, la prédisposition est mesurée après simulation d'un recul futur du trait de côte. Ce scénario consiste à confronter les enjeux à un recul du trait de côte après un événement extrême (Lmax) et/ou à un recul du trait de côte estimé à l'horizon 2050 (Partie 2, Chapitre 3) auquel on ajoute le Lmax (Partie 2, Chapitre 2) et que nous nommerons « Projection 2050 + Lmax ».

2.2.1. Démarche pour l'entité « parcelle »

La prédisposition des parcelles est évaluée (i) par la présence ou absence d'ouvrage de protection et (ii) par les caractéristiques de la dune (profondeur et volume de dune). La profondeur de la dune correspond dans le cas présent à la variable « distance minimum au trait de

côte » évoquée précédemment. Par ailleurs, nous considérons qu'en présence d'un ouvrage de protection contre l'érosion côtière, le trait de côte est fixé. Cet aspect sera nuancé en discussion de ce chapitre.

La méthode consiste à mesurer la distance minimum entre la parcelle (représentée par un polygone) et le trait de côte. Cette distance est mesurée à partir d'un raster de distance de résolution de 1 mètre. Le pixel entièrement inclus dans le polygone et doté de la plus faible valeur de distance est retenu (Figure 2).

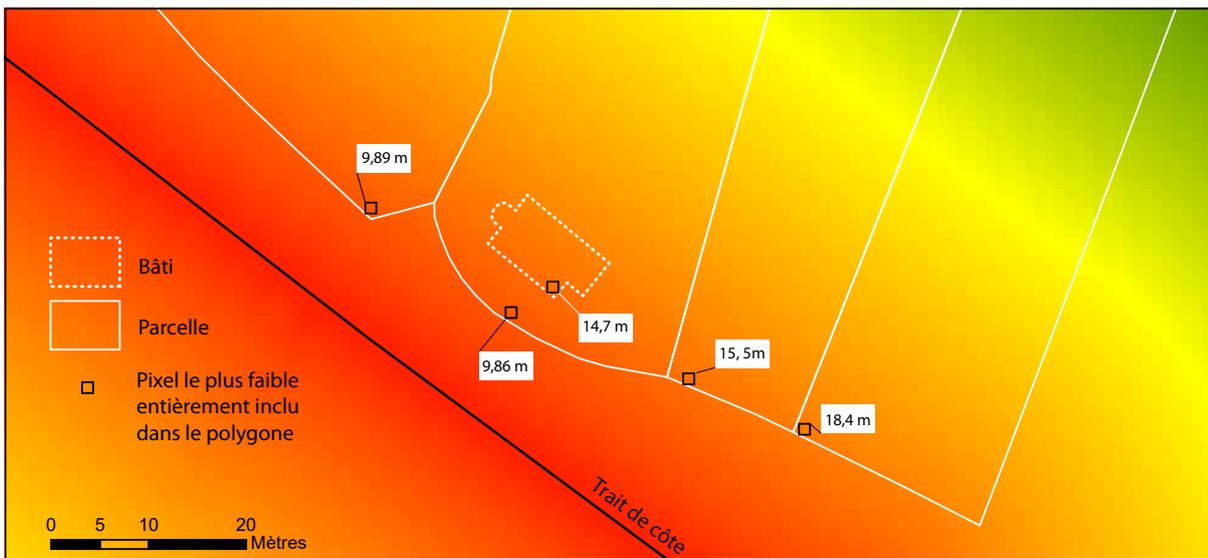


Figure 2 : Méthode pour la mesure de la distance minimum au trait de côte extraite d'un raster de distance

Ensuite, pour affiner le raisonnement suivi dans l'article de Juigner *et al.* (2021), nous intégrons une variable de volume dunaire qui permet d'estimer le stock sédimentaire disponible. Pour ce faire, le secteur dunaire faisant office de tampon est numérisé, ses limites étant définies d'une part par la limite des parcelles et le trait de côte 2019, d'autre part, par la largeur des entités de segmentation, soit 20 m. La mesure du volume est ensuite effectuée au-dessus de la valeur d'altitude du trait de côte et au sein de chaque polygone. La valeur de volume est ensuite attribuée à la parcelle adjacente. La prédisposition au risque d'érosion des enjeux non protégés par un ouvrage est donc caractérisée par la profondeur minimum de la dune entre la parcelle et le trait de côte ainsi que par son volume.

La même méthode est redéployée dans le cadre de la deuxième partie de la démarche. Dans un premier temps, le scénario consiste à estimer la position du trait de côte à l'horizon 2050 et à y ajouter le recul L_{max} . Dans un second temps, nous réitérons les mesures de distance et de volume en fonction de ce nouveau trait de côte.

2.2.2. Démarche pour l'entité « bâti »

A l'instar de la démarche appliquée pour les parcelles, la prédisposition du bâti s'appuie sur (i) la distance minimum au trait de côte et (ii) sur l'absence/présence d'ouvrage de protection. La mesure de la distance minimum entre le bâti et le trait de côte est déclinée en 3 étapes. Comme pour les parcelles, nous réalisons les mesures à partir du trait de côte 2019 ainsi que du trait de côte « projection 2050 + Lmax » mais nous proposons également de réaliser ces mesures seulement sur le trait de côte Lmax, c'est-à-dire sans appliquer la projection du trait de côte à l'horizon 2050.

Par ailleurs, la variable « volume dunaire » n'est pas intégrée dans l'approche « bâti » car elle consisterait à mesurer le volume de sable présent au sein de la parcelle. Cependant une parcelle est susceptible d'être en partie ou totalement artificialisée, modifiant potentiellement la remobilisation des sédiments. La prédisposition du bâti ne se basera par conséquent que par la variable « distance minimum au trait de côte ».

2.2.3. Classification des variables

En travaillant à l'échelle du département de la Vendée, Juigner *et al.* (2021) recensent 2568 enjeux dans la bande des 100 m, leur permettant une plus grande souplesse quant au choix des méthodes de discrétisation. La présente démarche n'étant qu'au stade exploratoire, nous assumons dans un premier temps l'exploitation d'un faible nombre d'individus. La majorité des discrétisations statistiques repose ici sur la méthode de Jenks. Le faible effectif (28 bâtis et 34 parcelles) restreint le choix de la méthode de discrétisation car le risque de classe vide est plus élevé, notamment pour les méthodes d'amplitude égale et standardisée (écart-type). Par ailleurs, la méthode des seuils observés malgré sa simplicité d'application n'est pas retenue non plus car l'interprétation des classes qui en découlent reste « éminemment subjective » (Lahousse et Piédanna, 1998). La méthode de Jenks est finalement retenue car les classifications se rapprochent fortement des classes qui auraient été créées selon la méthode des seuils observés et apparaît la plus adaptée au regard des autres méthodes. De plus les variables ne sont pas comparables entre elles car la première démarche (distance minimum et volume en 2019) exprime des résultats en valeur brut, la seconde (différence de distance et de volume entre 2019 et 2050), en pourcentage de perte. La méthode de Jenks n'est d'ailleurs pas adaptée pour l'exercice de comparaison.

Une exception est faite pour la classification des variables concernant le bâti. Les mesures des distances du bâti aux trois traits de côte (2019, Lmax, 2050+Lmax) sont directement comparables car il s'agit d'une même variable et les trois distances sont exprimées dans une même unité. Le choix s'est donc porté sur la méthode des quantiles/centiles, discrétisant la distribution statistique en classe/tranches de 20 m via les centiles suivants : 0,20 ; 0,40 ; 0,60 ; 0,80. Cette méthode nous permet d'identifier les constructions qui changent de classe de prédisposition entre chaque mesure.

2.2.4. Calcul de la prédisposition globale

La prédisposition globale du bâti est calculée en prenant en compte les trois niveaux de prédisposition relatifs aux mesures de distance aux trois traits de côte. Celle de la parcelle est calculée en intégrant les quatre mesures de prédisposition soit (i) la distance minimum entre la parcelle et le trait de côte 2019, (ii) le volume disponible entre la parcelle et le trait de côte 2019, (iii) le pourcentage de perte potentielle de distance entre 2019 et 2050 et (iv) le pourcentage de perte de volume entre 2019 et 2050. Chaque variable est dotée d'une valeur de prédisposition située entre 1 et 5. Sur le même principe que pour la construction de l'indice de vulnérabilité côtière (Partie 3, Chapitre 1), la prédisposition globale des enjeux est calculée comme la racine carrée du produit des variables classées, divisé par leur nombre et retranscrite en 4 classes pour chacun des deux types d'enjeu

3. Résultats

3.1. Prédisposition du bâti face au risque d'érosion

Comme cela est précisé dans la méthode, le bâti situé en retrait d'un ouvrage de protection a un niveau de prédisposition nul. Les résultats sont synthétisés en Annexe 3. Pour les autres constructions, nous observons deux cas de figure : soit le bâti demeure dans un même niveau de prédisposition dans les trois situations, soit sa prédisposition augmente (Figure 3).

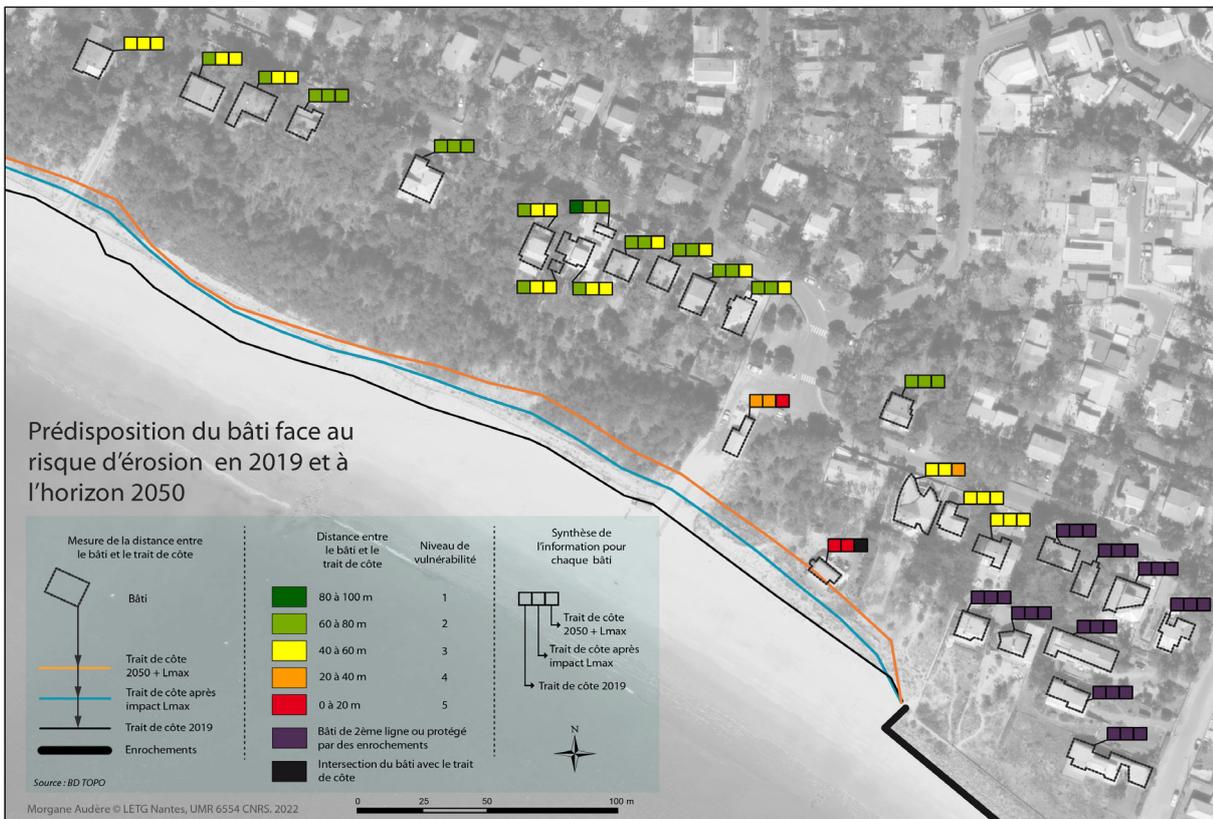


Figure 3 : Prédisposition du bâti face au risque d'érosion en 2019 et à l'horizon 2050

Six entités sont concernées par la première configuration et ne voient pas leur niveau de prédisposition augmenter. Trois d'entre elles restent à une distance comprise entre 60 et 80 mètres et ce quel que soit le trait de côte, trois autres demeurent à une distance comprise entre 40 et 60 mètres. Six autres constructions sont caractérisées par le passage dans la classe supérieure de prédisposition dès la deuxième configuration, c'est-à-dire dans le cas d'un recul lié à un évènement extrême. Enfin, sept constructions ont un niveau de prédisposition qui augmente dès lors que l'on projette le trait de côte à l'horizon 2050.

De manière générale, la majorité des entités sont à une distance caractérisée par une prédisposition faible à moyenne en considérant l'impact potentiel d'un évènement extrême et la position estimée du trait de côte à l'horizon 2050. Deux constructions sont en revanche caractérisées par un niveau de prédisposition fort à très fort dès 2019. L'un se retrouverait à une distance égale ou inférieure à 20 m dans la dernière configuration, l'autre serait même susceptible dans le troisième cas de ne plus avoir de zone tampon le séparant du trait de côte.

3.2. Prédisposition de la parcelle au risque d'érosion en 2019

La prédisposition de la parcelle au risque d'érosion est évaluée sous l'angle de la profondeur de dune et de son volume. Les parcelles situées en retrait d'un ouvrage de protection ou en 2ème ligne sont considérées comme non vulnérables.



Figure 4 : Prédisposition de la parcelle au risque d'érosion en 2019 : Profondeur de la dune

Concernant les autres parcelles, en dépit d'une discrétisation en cinq classes, deux groupes se distinguent. Quatre parcelles sont identifiées comme ayant une très forte prédisposition au risque d'érosion car situées à une distance inférieure à 18,4 m du trait de côte 2019. Les autres parcelles sont distantes d'au moins 39 m, la plus éloignée du trait de côte se trouvant à environ 5 m. Le volume de dune disponible au droit de chaque parcelle suit environ la même tendance que la variable de profondeur de dune. Les quatre parcelles les plus proches du trait de côtes disposent par conséquent de volumes plus faibles que les autres parcelles. Concernant les parcelles plus en retrait, certaines sont caractérisées par un niveau de prédisposition au risque d'érosion parfois deux fois supérieur (classe 2 à 4) entre la variable de profondeur et celle de volume. Nous observons trois cas de figure :

- La dune est profonde, le volume est maximal.
- La profondeur est plus faible, le volume également.
- La profondeur est plus faible mais le volume reste conséquent (le volume se trouve dans une classe de prédisposition inférieure à celle de la profondeur de la dune).

La variable de profondeur de dune ne permet donc pas à elle seule d'évaluer la prédisposition d'une parcelle au risque d'érosion, le volume apporte une information sur le stock disponible entre la parcelle et le trait de côte, stock qui peut hypothétiquement être mobilisé en cas d'évènement extrême.

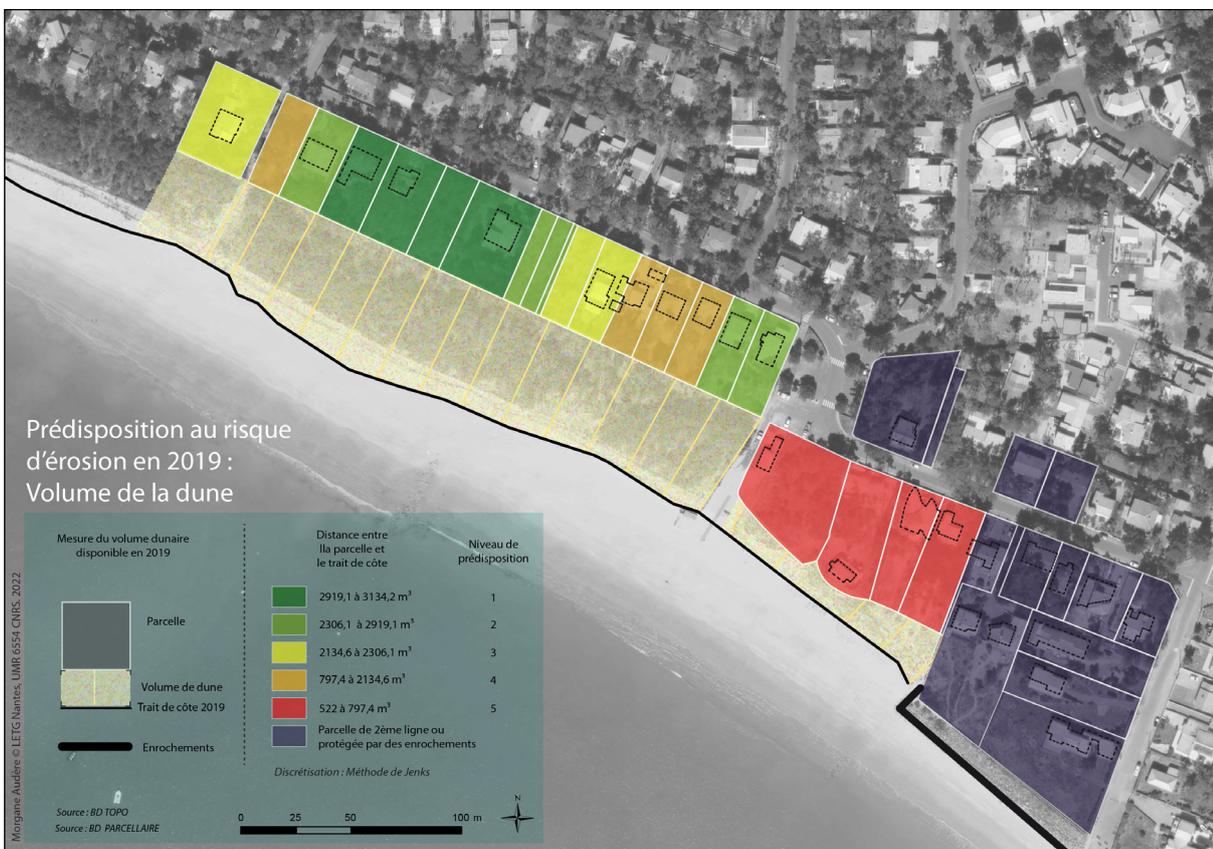


Figure 5 : Prédisposition de la parcelle au risque d'érosion en 2019 : Volume de la dune

3.3. Prédisposition de la parcelle au risque d'érosion à l'horizon 2050

Dans le cadre de ce scénario, la moyenne du recul sur ce secteur est de 14,8 m (Figure 5). Plus précisément, on estime le recul issu des tendances passées à près de 3 m, le recul lié à l'élévation du niveau marin à environ 2,2 m et un recul lié à l'impact d'un événement extrême à 8,3 m en moyenne.

Les résultats de recul sont ici rapportés à la distance totale qui sépare initialement la parcelle du trait de côte 2019, ils sont exprimés en pourcentage de perte. La majorité des parcelles subiraient un recul du front de dune inférieur à 40%, y compris les deux parcelles accolées dont le niveau de prédisposition est de 5. En revanche, la parcelle de niveau 5 située à proximité du trait de côte subirait un recul de près de 70%. On remarque par ailleurs que les parts de recul des classes 1 à 4 sont comprises entre 21% et 37%, soit une différence de seulement 16 points. Enfin, trois parcelles se trouvent dans une catégorie isolée. Une d'entre elles serait simplement au contact de ce trait de côte 2020 et observerait un recul équivalent à 90% de la profondeur de dune initiale, les deux autres connaîtraient en revanche la perte d'une partie de leur superficie. Ces deux parcelles perdent environ 186 m² et 123 m² soit respectivement 8,4% et 9,3% de leur superficie totale.

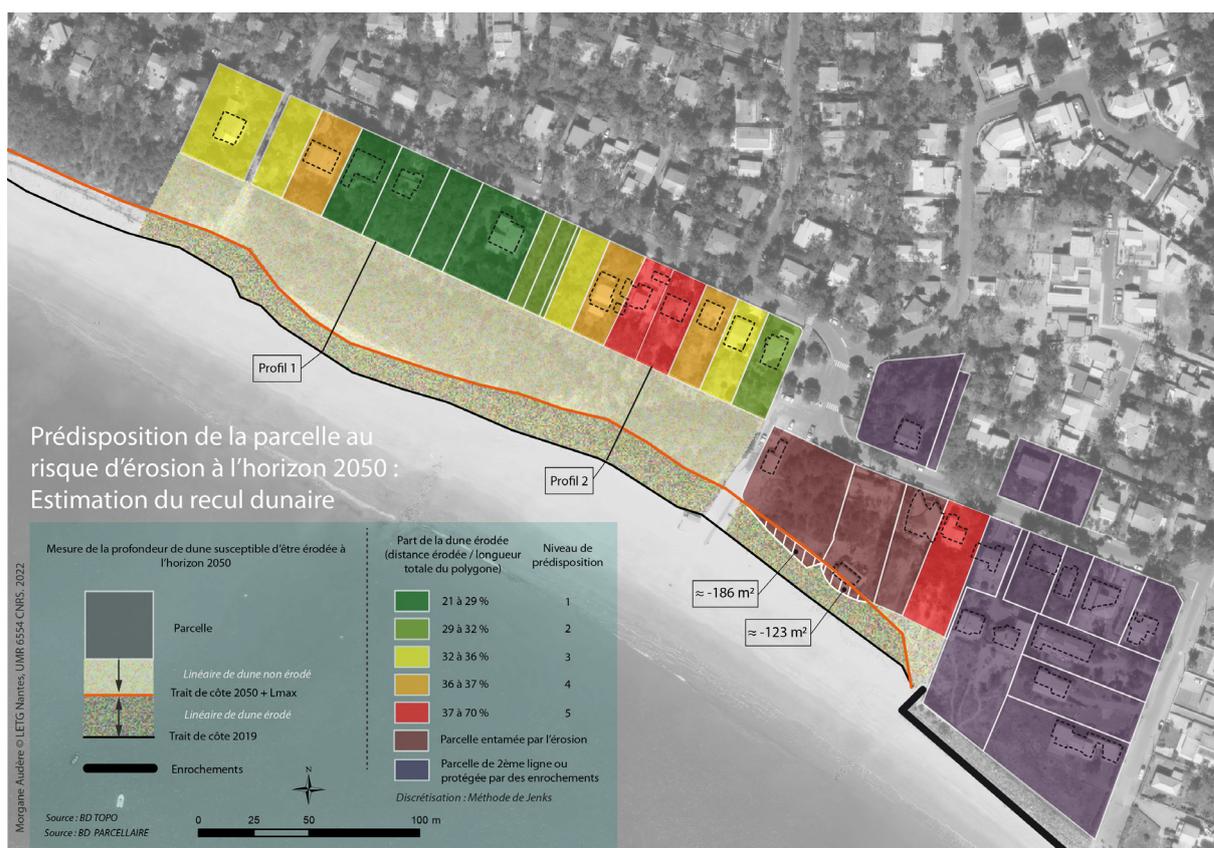


Figure 6 : Prédisposition de la parcelle au risque d'érosion à l'horizon 2050 : Estimation du recul dunaire

Les résultats relatifs à la variable volume sont également exprimés en pourcentage de perte. Contrairement aux parts de reculs dunaires présentées précédemment, les pertes de volume correspondant aux classes 1 à 4 sont davantage hétérogènes et réparties entre 5% à 35%, soit 30 points de différence.

Deux profils ont été tracés afin d'expliquer la différence de vulnérabilité entre la variable de recul dunaire et celle de volume. La parcelle devant laquelle est tracé le profil n°2 (Figure 6, Figure 7) est caractérisée par une prédisposition de niveau 5 pour le recul dunaire mais se situe en catégorie 4 pour la variable volume. Le profil topographique révèle un massif dunaire qui s'élève en moyenne à 8,2 m. La partie potentiellement érodée à l'horizon 2050 est la section la plus volumineuse du profil et équivaut à environ 742 m³ soit près de 35% du volume total. A l'inverse, le Profil n°1 met en évidence une perte de volume faible au regard du volume total disponible dans le polygone de mesure ce qui permet à la parcelle de rester dans un niveau de prédisposition très faible.

Concernant les quatre parcelles les plus proches du trait de côte en 2019, une d'entre elles dispose d'une prédisposition de niveau 5 car le volume érodé constitue 70% du volume total au droit de celle-ci. Deux autres, au même titre que pour la variable de profondeur de dune, ne sont plus caractérisées par une prédisposition dès lors qu'elles sont susceptibles d'être érodées à l'horizon 2050.

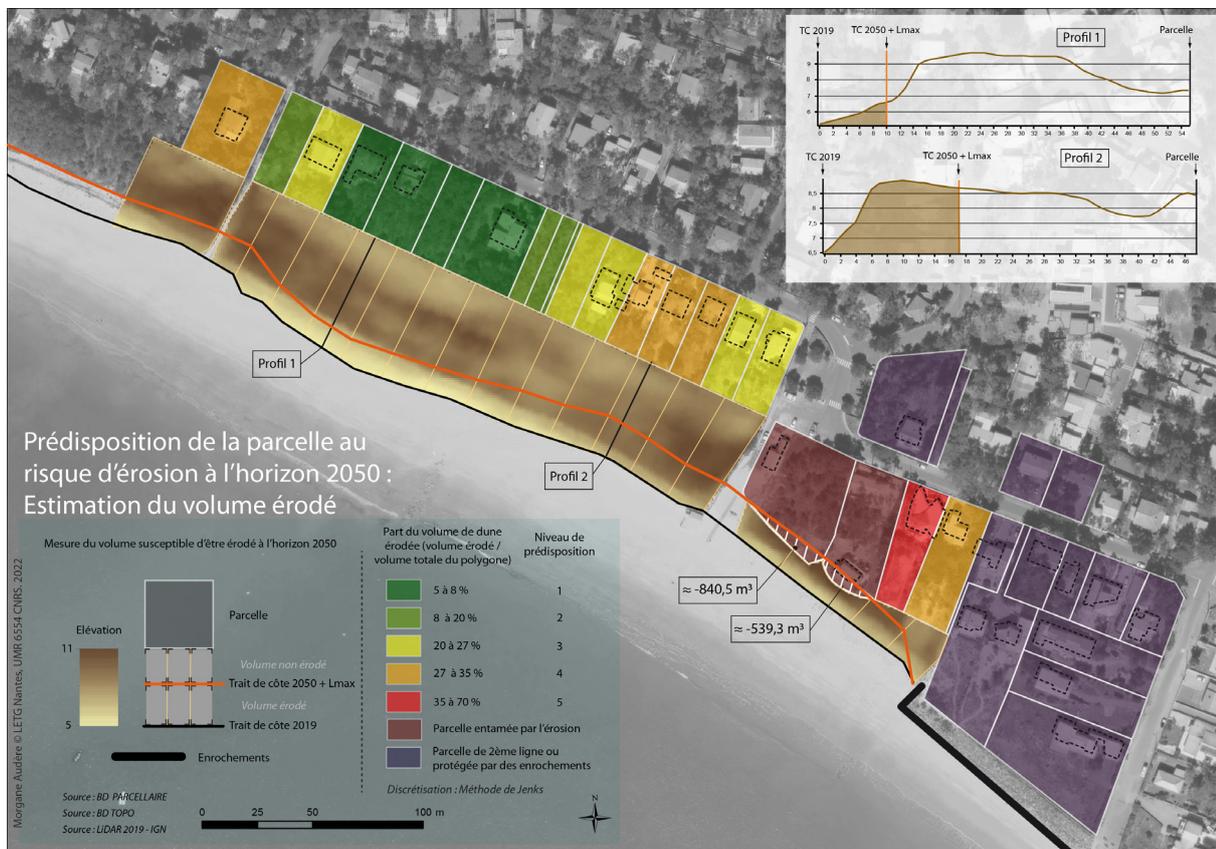


Figure 7 : Prédisposition de la parcelle au risque d'érosion à l'horizon 2050 : Estimation du volume érodé

3.4. Prédisposition globale

La Figure 8 synthétise l'ensemble des résultats décrits précédemment et illustre la prédisposition globale d'une part pour le bâti, d'autre part pour les parcelles. Nous constatons que selon la nature de l'enjeu, la prédisposition est susceptible de varier. Deux cas de figure sont redondants :

- Le bâti est caractérisé par une prédisposition équivalente à la ou les parcelles auxquelles il est associé.
- Le bâti est caractérisé par une prédisposition supérieure à la ou les parcelles auxquelles il est associé.

Trois cas font figure d'exception et sont caractérisés par un bâti moins prédisposé au risque que la parcelle à laquelle il est associé. Ceci s'explique par la localisation du bâti, situé essentiellement en fond de parcelle. Finalement, trois parcelles sont caractérisées par une très forte prédisposition lorsque que l'ensemble des résultats sont agrégés. L'information à retenir est le caractère prioritaire du bâti, structure qui devient inutilisable dès lors qu'elle est touchée par l'érosion. Dans les faits, nous pourrions même considérer une vulnérabilité maximum à une certaine distance du trait côte comme cela a été le cas pour l'immeuble « Le Signal ». La prédisposition au risque d'érosion de la parcelle s'appréhende davantage comme une perte progressive de sa surface, plus ou moins rapide, et dont l'usage peut être affecté à court, moyen ou long terme selon la progression de l'aléa.

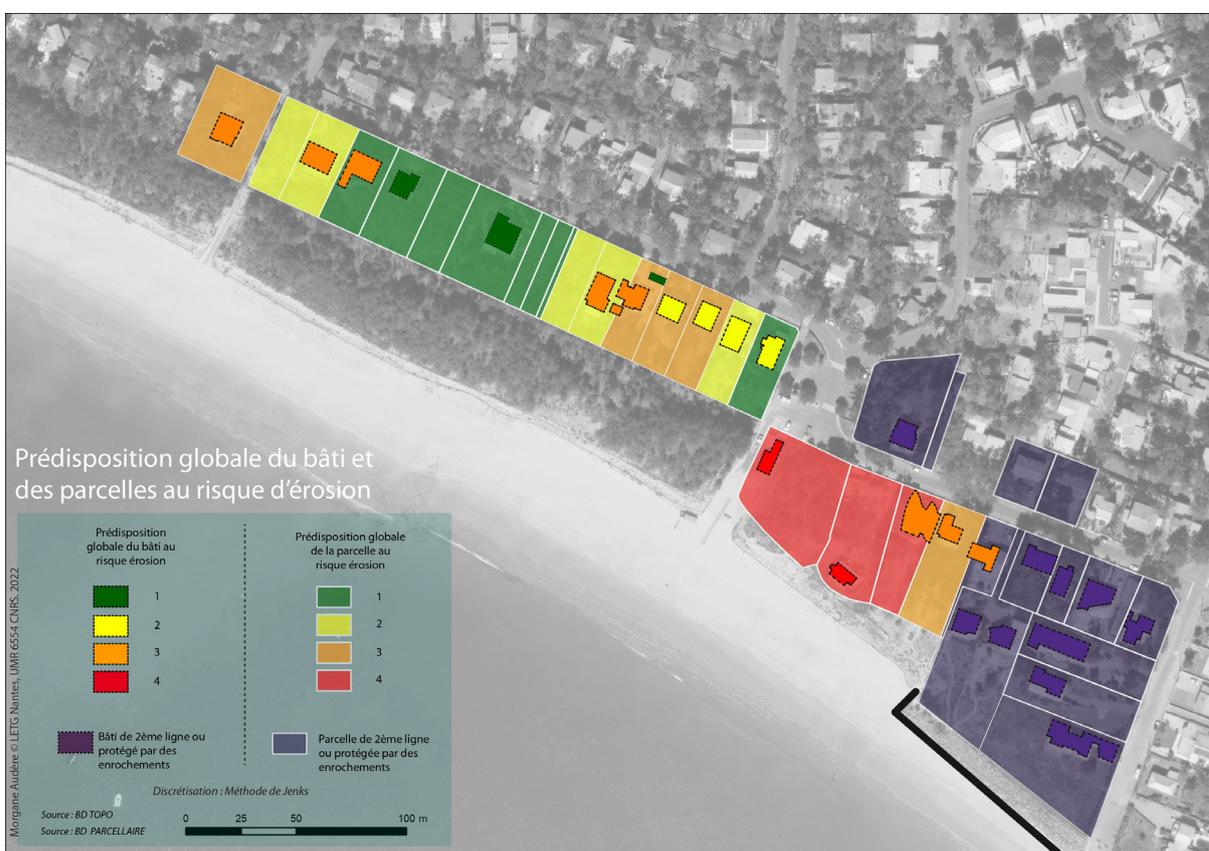


Figure 8 : Prédisposition globale du bâti et des parcelles au risque d'érosion

4. Discussion

Un premier élément de discussion concerne les variables mobilisées pour définir la prédisposition au risque du bâti et celle de la parcelle. La prédisposition du bâti est caractérisée exclusivement par la variable de distance contrairement au parcellaire pour lequel une variable de volume a été ajoutée. Il a été montré précédemment que lorsqu'un recul dunaire est important, si le stock sédimentaire est conséquent, la prédisposition de la parcelle tend à baisser. La prise en compte de la variable volume de dune est donc susceptible de moduler le niveau de prédisposition de la parcelle contrairement à celle du bâti, uniquement caractérisée par une variable de distance au trait de côte. Par ailleurs, le cordon dunaire faisant office de protection est délimité par le trait de côte 2019 et les limites de parcelles. Comme cela a été évoqué dans le cadre de la projection du trait de côte (Partie 2 ; Chapitre 3), le choix du marqueur du trait de côte détermine le résultat de la projection et induit une incertitude.

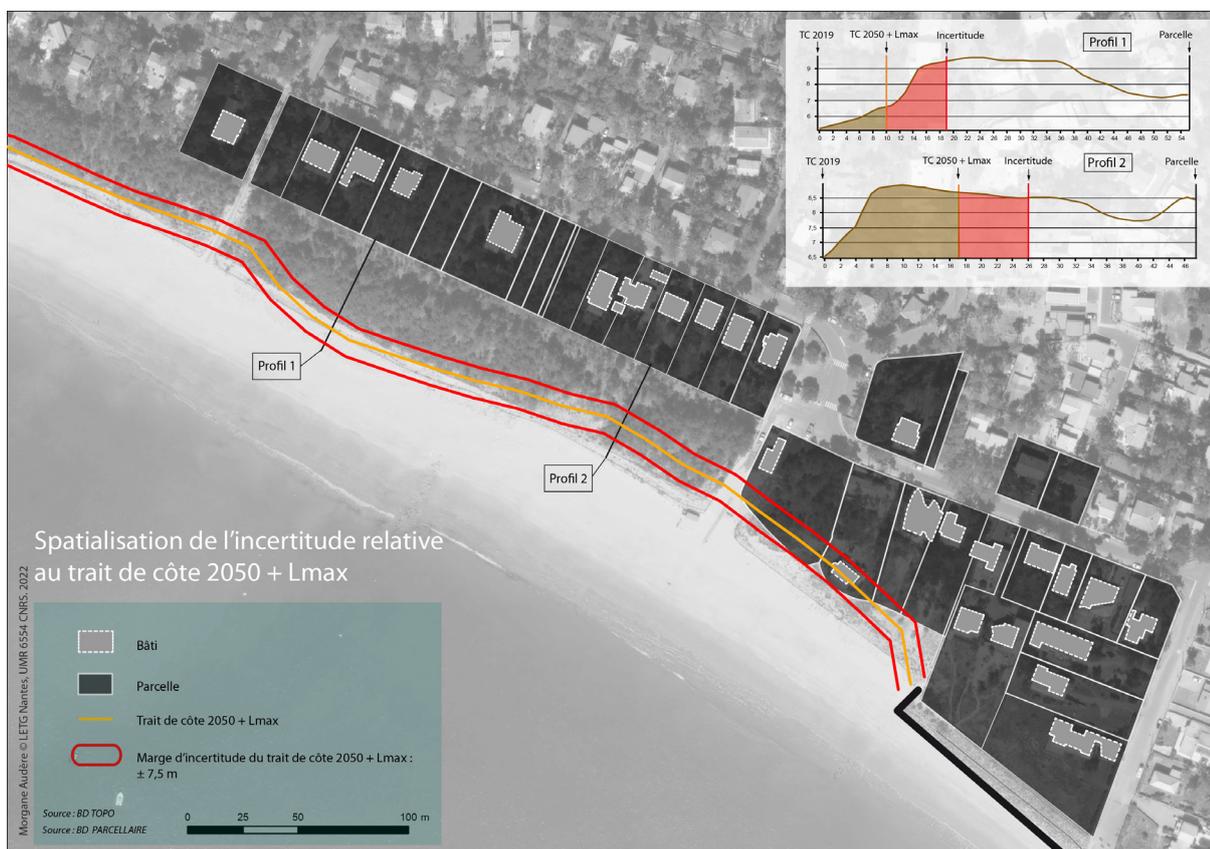


Figure 9 : Spatialisation de l'incertitude relative au trait de côte 2050 + Lmax

Ainsi si nous cumulons les valeurs d'incertitude inhérentes au « trait de côte 2050 + Lmax » (incertitude de la position du trait de côte de l'opérateur, l'incertitude associées à l'élévation moyenne annuelle du niveau marin depuis 1950, l'incertitude des projections du GIEC à l'horizon 2050 et l'incertitude associée au Lmax), nous obtenons une marge globale d'incertitude de $\pm 7,5$ m . La Figure 9 permet de visualiser l'emprise spatiale que représente cette marge d'erreur. A titre d'exemple nous remobilisons les profils utilisés dans la Figure 7 afin

de montrer, dans le cadre d'un scénario pessimiste, l'impact sur les mesures de distance et de volume. On constate ainsi que l'on serait confronté à une éventuelle sous-estimation des mesures et plus largement du calcul de prédisposition à l'horizon 2050.

Enfin, nous avons considéré les ouvrages de protection, au même titre que le Cerema, comme ouvrage de substitution au trait de côte. Cependant, nous avons pu constater que lors de la tempête Xynthia, de nombreux perrés n'ont pas permis de contenir l'impact des forçages météo-marins. A la Tranche-sur-Mer, certaines propriétés ont été touchées par des reculs et affaissement d'une partie de leur parcelle, et ce malgré la présence d'ouvrage de protection (Figure 10).

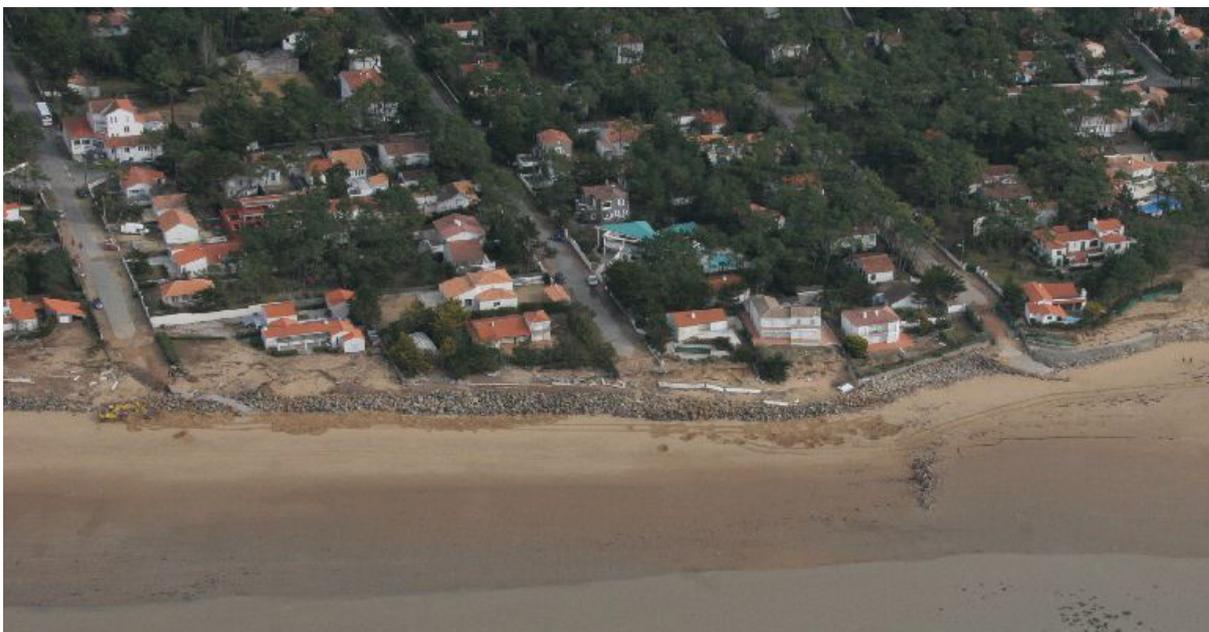


Figure 10 : Photographie oblique aérienne du littoral de la Tranche-sur-Mer prise le 4 mars 2010 après le passage de la tempête Xynthia. Source : DREAL Pays de la Loire

Considérer les ouvrages de protection comme fixant le trait de côte soulève donc certaines interrogations notamment dans le cadre de l'évaluation du risque. Ce sujet ne semble aujourd'hui pas résolu dans l'exercice à venir de cartographie de l'érosion dans le cadre de la loi climat résilience : un guide de recommandations pour la cartographie de l'érosion rédigé dans le cadre de cette loi sous la responsabilité du BRGM et du Cerema (2022) suggère de faire des scénarios, certains considérant les ouvrages comme fixes, d'autres suggérant une projection en considérant les ouvrages comme transparents. Il incombera donc *a priori* aux collectivités territoriales étant entrées dans le dispositif de la loi de choisir et financièrement d'assumer la prise en compte ou non de certains ouvrages : la notion de fixation du trait de côte avec financement associé fera donc l'objet d'un choix assumé.

5. Conclusion

Deux informations principales ressortent de l'analyse des résultats. D'une part, dissocier la prédisposition au risque d'érosion en 2019 et en 2050 relève de deux approches différentes. La première est un état des lieux reposant sur un nombre plusieurs variables, qui relève d'un constat à une date donnée. La marge d'incertitude relative à cette démarche repose donc seulement sur la donnée exploitée. La marge d'incertitude relative à l'estimation de la prédisposition à l'horizon 2050 dans la seconde démarche est plus conséquente du fait essentiellement des méthodes de projection du trait de côte (Partie 2, Chapitre 3).

Enfin, nous avons constaté également que l'érosion mesurée en mètres linéaire ne suffit pas à caractériser l'état du cordon dunaire. Ainsi, l'intégration de la variable « volume » permet d'enrichir la caractérisation d'un cordon dunaire pour l'évaluation de la prédisposition des enjeux à l'érosion.

Par ailleurs, des perspectives peuvent être envisagées concernant l'évaluation de la prédisposition des enjeux au risque d'érosion, notamment par l'exploitation de données LiDAR. Une variable pourrait être intégrée, intégrant le calcul du bilan sédimentaire entre deux dates (Le Mauff *et al.*, 2018) permettant d'identifier la dynamique du cordon dunaire sur une période donnée, et ce sur le long terme ou suite à un événement morphogène.

Dans ces travaux, la perte de dune a été traitée exclusivement sous l'angle d'objet de protection ou de réduction du risque pour les enjeux anthropiques. Il serait également intéressant de considérer l'érosion dunaire comme une réduction du service rendu à la société en tant que réservoir de biodiversité, à travers les bénéfices récréatifs, touristiques, esthétiques et plus généralement, culturels qu'elles procurent (Debaine, 2012).

Pour conclure, nous rappelons que l'objectif de ce travail est de présenter une méthodologie exploratoire. Le choix d'un secteur de faible étendue permet d'une part de présenter cette méthode, d'autre part de manipuler précisément les métriques pour bien comprendre le processus cartographique, enfin, de s'adapter à une échelle cohérente pour les communes qui devront réaliser leur cartographie du risque d'érosion dans le cadre de la loi « Climat et résilience ». Cependant, une des perspectives principales envisagée est le déploiement de la méthode pour réaliser, au même titre que Juigner *et al.* (2021), une synthèse à l'échelle régionale couvrant le niveau opérationnel qui reste l'échelle communale ou celle des intercommunalités.

Partie 3

Conclusion

La comparaison de deux méthodes de calcul d'Indice de Vulnérabilité Côtière (CVI) montre globalement les mêmes tendances de vulnérabilité à l'érosion à l'échelle de la région, exceptée au sud de Noirmoutier, sur le littoral du Pays-de-Monts et dans le sud de la Vendée sur les communes de La Tranche-sur-Mer et de L'Aiguillon-sur-Mer. Nous avons également mis en évidence que les nouvelles variables intégrées à l'indice (volume de plage, volume de dune et altitude du trait de côte) expliquent particulièrement la forte vulnérabilité des côtes sableuses à l'érosion. Les variables morphologiques, peu exploitées de manière générale dans le cadre de l'estimation de la vulnérabilité à l'érosion côtière, apportent des informations essentielles sur la capacité d'une côte sableuse à faire face à la problématique de reculs côtiers et particulièrement lors d'évènements extrêmes.

La variable «volume de dune» est justement remobilisée dans le dernier chapitre, en plus de la distance des enjeux au trait de côte, pour estimer la prédisposition du bâti et des parcelles au risque d'érosion en 2019 et à l'horizon 2050. Nous avons constaté également que l'érosion mesurée en mètres linéaire ne suffit pas à caractériser l'état du cordon dunaire. Ainsi, l'intégration de la variable « volume » permet d'enrichir la caractérisation d'un cordon dunaire pour l'évaluation de la prédisposition des enjeux à l'érosion. Par ailleurs, ce chapitre propose une méthodologie exploratoire réalisée à une échelle cohérente pour la cartographie du risque d'érosion dans le cadre de la loi « Climat et résilience » qui seront produites par les communes littorales volontaires.

Conclusion générale

Cette thèse se positionne entre apport opérationnel et scientifique. Dans un contexte où la gestion intégrée du trait de côte s'inscrit de plus en plus dans les priorités des services de l'état et des acteurs du littoral, nous proposons des pistes de réflexion pour l'amélioration de la cartographie de risque d'érosion. Ces travaux apportent également de nouvelles connaissances quant aux dynamiques des côtes sableuses en région, à court, moyen et long terme. Les réponses aux questions soulevées en début de manuscrit, relatives à la spatialisation des enjeux côtiers soumis à l'aléa érosion, sont formalisées au sein de cette conclusion générale.

1. Principaux résultats

1.1. Démarche générale pour répondre à la problématique

Pour répondre à la problématique générale, la thèse s'articule autour de trois axes : l'état des connaissances autour de l'aléa érosion des côtes sableuses et des enjeux associés, une démarche exclusivement centrée sur l'étude de l'aléa en région, et une approche spatiale de la prédisposition des enjeux au risque d'érosion.

Concernant l'étude de l'aléa à l'échelle régionale, nous instaurons premièrement une démarche qui repose sur l'observation de l'évolution passée du trait de côte réalisée sur le long terme (évolution historique) et sur le court terme (impact d'évènements extrêmes). L'évolution du trait de côte est ainsi évaluée sur plusieurs périodes afin d'identifier des tendances d'évolution et pour mettre en évidence des secteurs touchés de manière récurrente par des reculs côtiers depuis les années 1950. Les mesures de reculs relatifs à un évènement extrême mettent en évidence la vulnérabilité côtière observée lors des tempêtes de décembre 1999 (Lothar et Martin), et de février 2010 (Xynthia). Cette approche est destinée à actualiser le L_{max} à l'échelle de la Vendée et de proposer des pistes d'amélioration pour la cartographie du risque des Plan de Prévention des Risques Littoraux (PPRL). La seconde démarche repose sur la l'exercice de projection du trait de côte à l'horizon 2050 et l'estimation des incertitudes associées. Une première étape consiste à projeter des tendances passées à une date pour laquelle la position du trait de côte est connue et de le comparer au trait de côte réel. Une seconde partie repose sur l'évaluation de l'incertitude liée au recul relatif à l'élévation du niveau marin.

L'analyse de la vulnérabilité côtière et de la prédisposition des enjeux au risque d'érosion repose sur l'analyse de variables physique. L'indice de vulnérabilité côtière développé sur les côtes sableuses de la Vendée permet de cibler les secteurs les plus sensibles à l'érosion. Cet indice a d'ailleurs participé à la sélection du site d'étude pour la mesure de la prédisposition des enjeux au risque d'érosion. Cette prédisposition est estimée en analysant des variables physiques telles que la distance de l'enjeu au trait de côte ou encore le stock sédimentaire disponible au droit de l'enjeu. Dans le cadre de la loi « Climat et résilience », nous proposons d'apporter des éléments de réflexion d'un point de vue méthodologique, susceptibles d'être remobilisés dans l'élaboration des cartographies du risque.

1.2. Principaux résultats et apports de la thèse

Une synthèse du bilan sédimentaire linéaire et surfacique à l'échelle de la région, des cellules sédimentaires et enfin au niveau des unités spatiales (20 * 100 m) est d'abord proposée (Partie 2, Chapitre 1). Ce travail permet d'estimer précisément les secteurs en accrétion, en érosion et stables ou insignifiants, par période de 20 ans entre 1950 et 2010. Il apparaît que la région des Pays de la Loire possède une côte sableuse assez stable (78,1 km en évolution non significative) avec globalement une part en accrétion équivalente à l'érosion (respectivement 45 km et 45,7 km). Il souligne également que les tendances peuvent varier entre 1950 et 2010 et que l'évolution du trait de côte n'est pas linéaire au sein des cellules sédimentaires. L'exemple de la cellule sédimentaire SC6 (Pointe de l'Herbaudière – Pointe de la Fosse, île de Noirmoutier) est caractérisé par une augmentation des surfaces en accrétion et corrélativement une diminution des surfaces en accrétion entre les périodes 1950-1970 et 1970-1990. A l'inverse, pour la période 1990-2010, cette même cellule sédimentaire est caractérisée par une augmentation des surfaces en érosion et une diminution des surfaces en accrétion.

Le second chapitre (Partie 2) suggère une actualisation du L_{max} (recul maximum lié à un évènement extrême) pris en compte dans les cartographies du risque des PPRL. La mesure des reculs provoqués par les tempêtes de 1999 démontre que la tempête Xynthia de février 2010 n'a pas été la plus morphogène sur littoral de Vendée. Par exemple, les tempêtes de décembre 1999 ont provoqué des reculs plus importants que Xynthia dans la partie nord de La Faute-sur-Mer, avec un recul moyen de 18 m et un recul maximal de 25 m contre une moyenne de 10 m et un recul maximal de 15 m après Xynthia. Nous suggérons également une actualisation du zonage du risque à l'aide de données plus récentes et en tenant compte des tendances observées, qu'il s'agisse d'érosion ou d'accrétion. Enfin, nous mettons en évidence qu'il serait préférable de réaliser des projections du trait de côte à plus court terme (2050) que dans les PPRL pour réduire la marge d'incertitude.

Nous mettons également en évidence un large éventail de source d'incertitude relative à la projection du trait de côte et alertons sur les limites de cet exercice à moyen et long terme (Partie 2, Chapitre 3). La projection du trait de côte à une date connue puis la comparaison de sa position et le trait de côte réel révèlent des écarts compris entre 10 et 20 mètres. A cela s'ajoute les incertitudes relatives aux données, à l'élévation moyenne du niveau marin, ou encore à l'impossibilité de prédire l'occurrence des évènements météo-marins morphogènes. Des précaution doit surtout être prises lorsque la projection est réalisée dans le cadre des documents réglementaires tels que les PPRL ou pour la cartographie du risque lié au recul du trait de côte prévu par la loi Climat et Résilience du 24 août 2021. Nous avons démontré au sein de ce chapitre que le recul du trait de côte n'est pas « anticipable » ou « prévisible » au vue des incertitudes relatives à la projection du trait de côte et de notre incapacité à prévoir l'impact d'évènements extrêmes et à appréhender la totalité des interactions entre tous les phénomènes physiques qui induisent l'érosion.

Nous proposons également un bilan de la vulnérabilité côtière à l'échelle de la Vendée en considérant les variables (i) d'évolution historique du trait de côte, (ii) de recul lié à un événement extrême, (iii) de l'estimation du recul lié à l'élévation future du niveau marin, (iv) d'altitude du trait de côte, (v) de volume de plage et (vi) de volume de dune. Une comparaison entre deux méthodes de calcul d'Indice de Vulnérabilité Côtière (CVI) est réalisée pour mettre en évidence la variabilité des résultats issus des choix méthodologiques. Les résultats de cette comparaison montrent une similitude globale à l'échelle de la région avec un coefficient de corrélation de 0,86 entre les deux indices. Quelques différences marquées sont cependant au Sud de Noirmoutier, sur le littoral du Pays-de-Monts et dans le Sud de la Vendée sur les communes de La Tranche-sur-Mer et de L'Aiguillon-sur-Mer. Il apparaît également que les nouvelles variables intégrées à l'indice (volume de plage, volume de dune et altitude du trait de côte) sont celles qui expliquent le plus les secteurs à très forte vulnérabilité. Ces variables morphologiques apportent des informations essentielles sur la capacité d'une côte sableuse à faire face à la problématique de reculs côtiers et particulièrement lors d'événements extrêmes.

Enfin, le constat dans le Chapitre 1 (Partie 3) selon lequel la variable « volume » apporte une plus-value à la caractérisation de la vulnérabilité côtière est renforcé dans le dernier chapitre (Chapitre 2, Partie 3). En effet, la mesure de la profondeur de la dune ne suffit pas à caractériser l'état du cordon dunaire, la prise en compte du volume permet d'estimer l'état du stock sédimentaire au droit des enjeux. Par ailleurs, ce chapitre propose une méthodologie exploratoire (nouvelles variables, réflexion sur les enjeux) tout en abordant l'incertitude relative à l'estimation de la prédisposition à l'horizon 2050. Enfin, cette méthode est appliquée à une échelle qui semble cohérente (nous suggérons un maximum de 1 : 5 000 pour une bonne visibilité du bâti et des parcelles cadastrales) pour la cartographie du risque d'érosion dans le cadre de la loi « Climat et résilience » qui seront produites par les communes littorales volontaires.

1.3. Limites

Comme évoqué régulièrement dans ces travaux, la donnée constitue souvent un frein lorsque le territoire étudié est étendu. La recherche d'homogénéité à l'échelle régionale rend plus complexe l'acquisition de la donnée à haute fréquence. Cela constitue une limite notamment dans l'étude des événements extrêmes, caractérisés généralement par une courte durée (quelques heures à quelques jours) et pour lesquels il faudrait tendre vers des mesures plus rapprochées (avant et après événement) afin de mesurer la résultante précise de ces événements. Or, nous nous sommes justement heurtés à ce problème lors des mesures d'érosion relative aux tempêtes Lothar et Martin ainsi qu'à Xynthia (un écart entre les images aériennes de, respectivement, quatorze et dix mois), induisant une incertitude supplémentaire dans la caractérisation des événements extrêmes. Cette limite relative à la donnée s'observe également sur le long terme. En effet, la collection de traits de côte dont nous disposons en région (à ± 2 ans d'intervalle) n'est pas négligeable (1950's, 1970's, 1980's, 2000, 2010's, 2020's) mais demeure encore insuffisante notamment lorsqu'il s'agit de

réaliser des projections du trait de côte. Selon Durand et Heurtefeux (2006), il faudrait disposer d'un échantillon minimal de trente traits de côte couvrant, de plus, un laps de temps au moins deux fois supérieur à la durée de la prévision.

Par ailleurs, pour compléter le travail sur l'aléa, l'analyse sur la capacité de résilience des côtes sableuses après l'impact d'un événement extrême permettrait d'approfondir les connaissances sur le fonctionnement des côtes sableuses régionales et d'améliorer la mesure de la vulnérabilité physique des cordons dunaires et par extrapolation, des enjeux côtiers. Nous pouvons émettre l'hypothèse que les secteurs historiquement en accrétion sont dotés d'une meilleure capacité de cicatrisation que ceux en érosion chronique, cependant, mesurer la vitesse de cicatrisation pourrait apporter une connaissance supplémentaire sur le niveau de vulnérabilité des côtes sableuses.

Enfin, la prise en compte des ouvrages de protection contre les aléas côtiers est une question qui se pose de plus en plus. Au sein du dernier chapitre (Partie 3, Chapitre 2), nous avons exposé cette limite en nous appuyant sur un exemple concret : les effets de la tempête Xynthia sur le littoral de La Tranche-sur-Mer. La Figure 10 de ce même chapitre montre les dégâts provoqués en arrière des ouvrages, au sein même des propriétés privées, illustrant la difficulté de continuer à considérer ces ouvrages comme fixant le trait de côte. Cette prise en compte stricte des ouvrages comme se substituant au trait de côte constitue donc une des limites de ce travail.

2. Perspectives de recherche

Cette thèse a fait l'objet de nombreux choix qui ont permis de construire une réflexion, un argumentaire et d'amener des réponses à la fois opérationnelles et scientifiques autour de du risque d'érosion. Mais ces même choix ont également conduit à fermer certaines portes, qui font l'objet dans cette ultime section de perspectives de recherche.

2.1. Étude de la résultante des événements extrêmes via la modélisation numérique

La modélisation hydrosédimentaire constitue une des pistes de recherche de cette thèse car elle pourrait tendre vers une meilleure compréhension du rôle des forçages météo-marins dans la résultante d'événements morphogènes. En effet, en plus d'estimer la capacité de transport sédimentaire d'un événement, la modélisation pourrait, une fois le modèle calibré, nous permettre de définir précisément, au moyen par exemple d'une analyse factorielle discriminante, l'influence des niveaux d'eau, des hauteurs de houle ou encore de l'angle d'incidence des houles à la côte dans l'érosion des côtes sableuses lors d'un événement extrême. A ce stade, nous n'avons pas encore de mesures assez précises caractérisant un événement extrême qui nous permettrait de calibrer le modèle et valider cette méthode. Le faisceau d'observatoires répartis sur le littoral régional exerce une veille constante pour prévenir d'un éventuel événement extrême susceptible de toucher les côtes sableuses de la région.

2.2. Etude des concomitances de forçages météo-marins : exploitation de données de réanalyses

Nous avons soulevé en discussion du chapitre traitant de la projection du trait de côte et des incertitudes associées (Partie 2, Chapitre 3), l'intérêt de poursuivre les réflexions autour des périodes de retour des événements extrêmes. La première étape nécessite de définir un seuil au-dessus duquel on considère la variable (vent, houle, pression atmosphérique) comme étant extrême. Une fois ces seuils définis, l'objectif serait double :

- Identifier les « rendez-vous manqués », autrement dit les situations lors desquelles les forçages météorologiques (vent, houle, pression atmosphérique) sont extrêmes, mais ne sont pas concomitants avec une marée haute à fort coefficient. Cette démarche a pour objectif de comptabiliser et caractériser tous les événements météorologiques extrêmes ayant eu lieu sur le littoral de la région.
- Identifier les concomitances entre les variables météorologiques et les niveaux d'eau et d'en estimer la période de retour

Notre difficulté à anticiper l'impact d'événements extrêmes pourrait faire l'objet d'une nouvelle démarche en région. Depuis quelques années, certains auteurs tentent d'expliquer la mobilité des littoraux sableux en étudiant les indices climatiques (Rangel-Buitrago et Anfuso, 2013 ; Anfuso *et al.*, 2016 ; Castelle *et al.*, 2017 ; Stéphan *et al.*, 2018). Les travaux menés par Castelle et al. (2017) et présentés au sein du Chapitre 2 (Partie 1), tendent à démontrer l'influence marquée de l'indice WEPA au regard de l'ONA, sur les hauteurs de houles significatives. Ainsi, poursuivre cette démarche pourrait contribuer à améliorer nos connaissances sur les événements extrêmes qui impactent notre littoral et tenter d'anticiper éventuellement des périodes plus morphogènes.

Pour conclure, cette thèse participe à l'amélioration des connaissances relatives à l'aléa dans ses diverses temporalités, et préconise une certaine vigilance quant à sa dimension prospective, notamment lorsqu'elle est intégrée au sein des cartographies du risque associées aux documents réglementaires. Cette consolidation du socle des connaissances autour de l'aléa érosion en région contribue ainsi une meilleure prise en compte des enjeux qui y sont associés. L'apport de ces travaux s'inscrit également dans un registre opérationnel, notamment à travers la construction d'un observatoire tempête en cours de structuration. Son objectif est de servir à l'édification d'un catalogue de situations types, répondant à une typologie de tempêtes régionalisées. Cet inventaire, en cours de production au sein de l'OR2C (à la demande de la DREAL Pays de la Loire), serait susceptible d'être mobilisé pour forcer une modélisation numérique adossée à une alerte « Vigilance Vague Submersion » (VVS) de Météo France, afin d'accompagner les collectivités territoriales en cas de risque érosion/submersion potentiel et, de manière plus générale, de contribuer à la prévention des risques côtiers.

Bibliographie

Aagaard, T., et Kroon, A. (2017). Sediment transport under storm conditions on sandy beach. In *Coastal Storms : Processes and Impacts* (Vol. 1 45 63, p. 275). John Wiley & sons Ltd.

Abdellaoui, J. E. E. (2007). Etude diachronique et historique de l'évolution du trait de côte de la baie de Tanger (Maroc). *Téledétection : Revue de Recherche et d'Application en Téledétection*, 7, 154 171.

Abuodha, P. A. O., et Woodroffe, C. D. (2010). Assessing vulnerability to sea-level rise using a coastal sensitivity index: a case study from southeast Australia. *Journal of Coastal Conservation*, 14(3), 189 205. <https://doi.org/10.1007/s11852-010-0097-0>

Adger, W. N., Hughes, T. P., Folke, C., Carpenter, S. R., & Rockström, J. (2005). Social-Ecological Resilience to Coastal Disasters. *Science*, 309(5737), 1036 1039. <https://doi.org/10.1126/science.1112122>

Aernouts, D., & Héquette, A. (2006). L'évolution du rivage et des petits-fonds en baie de Wissant pendant le XXe siècle (Pas-de-Calais, France). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 12(vol. 12-n° 1), 49 64. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.477>

Afentoulis, V., Eleftheria, K., Eleni, S., Evangelos, M., Archontia, L., Christos, M., & Vasiliki, T. (2017). Coastal Processes Assessment Under Extreme Storm Events Using Numerical Modeling Approaches. *Environmental Processes*, 4(3), 731 747. <https://doi.org/10.1007/s40710-017-0253-8>

Allard J., Bertin X., Chaumillon E., Pouget F., (2008). Sand spit rhythmic development: A potential record of wave climate variations? Arçay Spit, western coast of France. *Marine Geology* : 253 : pp. 107-131.

Amarouche, K., Akpınar, A., Çakmak, R. E., Houma, F., & Bachari, N. E. I. (2020). Assessment of storm events along the Algiers coast and their potential impacts. *Ocean Engineering*, 210, 107432. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107432>

Anfuso, G., Rangel-Buitrago, N., Cortés-Useche, C., Iglesias Castillo, B., & Gracia, F. J. (2016). Characterization of storm events along the Gulf of Cadiz (eastern central Atlantic Ocean): STORMS ALONG THE CADIZ GULF. *International Journal of Climatology*, 36(11), 3690 3707. <https://doi.org/10.1002/joc.4585>

Angignard, M., Greiving, S., Bailly, B., Delachenal, M., & Glon, M. (2013). Indicateurs de vulnérabilité d'un territoire au changement climatique. Angers, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME), n ISBN, 978-2.

Anthony, E. J., & Orford, J. D. (2002). Between Wave- and Tide-Dominated Coasts: the Middle Ground Revisited. *Journal of Coastal Research*, 36, 8-15. <https://doi.org/10.2112/1551-5036-36.sp1.8>

Awang, A., Ghani, A. T. A., Abdullah, L., & Ahmad, M. F. (2017). Global weights of coastal erosion risk factors using AHP method: A case study of Setiu Wetlands. *AIP Conference Proceedings*, 1870(1), 050014. <https://doi.org/10.1063/1.4995924>

Ba, A., & Senechal, N. (2013). Extreme winter storm versus Summer storm: morphological impact on a sandy beach. *Journal of Coastal Research*, 65, 648-653. <https://doi.org/10.2112/SI65.110.1>

Bagdanavičiūtė, I., Kelpšaitė, L., & Soomere, T. (2015). Multi-criteria evaluation approach to coastal vulnerability index development in micro-tidal low-lying areas. *Ocean & Coastal Management*, 104, 124-135. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.12.011>

Baptista, P., Bastos, L., Bernardes, C., Cunha, T., & Dias, J. (2008). Monitoring Sandy Shores Morphologies by DGPS—A Practical Tool to Generate Digital Elevation Models. *Journal of Coastal Research*, 24(6 (246)), 1516-1528. <https://doi.org/10.2112/07-0861.1>

Barman, N. K., Chatterjee, S., & Khan, A. (2014). Trends of Shoreline Position: An Approach to Future Prediction for Balasore Shoreline, Odisha, India. *Open Journal of Marine Science*, 05(01), 13. <https://doi.org/10.4236/ojms.2015.51002>

Barone, D.A., Farrell, S.C., Koch, R.V., Howard, B.S., Gruver, M.H., (2009), Beach-dune system susceptibility assessment, Long Beach Island, Ocean County, New Jersey (version 1.0): National Oceanic and Atmospheric Administration, Coastal Services Center, Charleston, South Carolina, 1 CD-ROM disk

Barrère P., (1999). Variété des systèmes dunaires des côtes françaises de l'Atlantique et de la Manche, In Gérard Bernard (dir.), 1999, *Le littoral. Problèmes et pratiques de l'aménagement*, éditions BRGM - Manuels et méthodes, 32, pp. 93-117.

Barroca, B., DiNardo, M., & Mboumoua, I. (2013). De la vulnérabilité à la résilience : mutation ou bouleversement ? *EchoGéo*, 24. <https://doi.org/10.4000/echogeo.13439>

Batista, C. M. (2018). Coastal Risk. In C. W. Finkl & C. Makowski (Éds.), *Encyclopedia of Coastal Science* (p. 1-12). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48657-4_408-1

Battiau-Queney, Y., Billet, J. F., Chaverot, S., & Lanoy-Ratel, P. (2003). Recent shoreline mobility and geomorphologic evolution of macrotidal sandy beaches in the north of France. *Marine Geology*, 194(1), 31-45. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(02\)00697-7](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(02)00697-7)

Bertin X, Chaumillon E., Weber N. and Tesson M., (2004). Morphological evolution and coupling with bedrock substratum at a mixed energy tidal inlet: the Maumusson inlet, France. *Marine Geology*, 204, pp. 187-202.

- Bertin, X., Bruneau, N., Breilh, J.-F., Fortunato, A. B., & Karpytchev, M. (2012). Importance of wave age and resonance in storm surges: The case Xynthia, Bay of Biscay. *Ocean Modelling*, 42, 16-30. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2011.11.001>
- Bertin X., Prouteau E., Leterel C., (2013), A significant increase in wave height in the North Atlantic Ocean over the 20th century, *Global and Planetary Change*, 106, pp. 77-83.
- Bertin, X., Li, K., Roland, A., & Bidlot, J.-R. (2015). The contribution of short-waves in storm surges: Two case studies in the Bay of Biscay. *Continental Shelf Research*, 96, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.01.005>
- Bessemoulin, P. (2009). Les tempêtes exceptionnelles de 1999 : caractérisation météorologique et lien éventuel avec le changement climatique. In Y. Birot, G. Landmann, & I. Bonhême, *La forêt face aux tempêtes* (Quae, p. 37-46).
- Blaise, E., Suanez, S., Schroetter, J.-M., & Palvadeau, E. (2014). Evolution mi-séculaire des côtes sédimentaires du département du Finistère. XIIIèmes JNGCGC, Dunkerque, 237-246. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2014.026>
- Blaise, E., Suanez, S., Stéphan, P., Fichaut, B., David, L., Cuq, V., Autret, R., Houron, J., Rouan, M., Floc'h, F., Arduin, F., Cancouët, R., Davidson, R., Costa, S., & Delacourt, C. (2015). Bilan des tempêtes de l'hiver 2013-2014 sur la dynamique de recul du trait de côte en Bretagne. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 21(3), 267-292. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.11104>
- Boak, E. H., & Turner, I. L. (2005). Shoreline Definition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research*, 688-703. <https://doi.org/10.2112/03-0071.1>*
- Bonetti, J., Rudorff, F. de M., Campos, A. V., & Serafim, M. B. (2018). Geoindicator-based assessment of Santa Catarina (Brazil) sandy beaches susceptibility to erosion. *Ocean & Coastal Management*, 156, 198-208. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.08.009>
- Boruff, B. J., Emrich, C., & Cutter, S. L. (2005). Erosion Hazard Vulnerability of US Coastal Counties. *Journal of Coastal Research*, 21(5 (215)), 932-942. <https://doi.org/10.2112/04-0172.1>
- Boumpoulis, V., Apostolopoulos, D., Depountis, N., & Nikolakopoulos, K. (2021). The Importance of Geotechnical Evaluation and Shoreline Evolution in Coastal Vulnerability Index Calculations. *Journal of Marine Science and Engineering*, 27. <https://doi.org/10.3390/jmse9040423>
- Brennan, R., & Webster, T. L. (2006). Object-oriented land cover classification of lidar-derived surfaces. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 32(2), 162-172. <https://doi.org/10.5589/m06-015>
- BRGM et Cerema, (2022). *Recommandations pour l'élaboration de la carte locale d'exposition au recul du trait de côte*. Co-edition BRGM et Cerema. ISBN : 978-2-7159-2791-9 et 978-2-37180-566-8

- Brock, J. C., & Purkis, S. J. (2009). The Emerging Role of Lidar Remote Sensing in Coastal Research and Resource Management. *Journal of Coastal Research*, 10053, 1-5. <https://doi.org/10.2112/SI53-001.1>
- Bruun, P. (1954). *Coast Erosion and the Development of Beach Profiles*. U.S. Beach Erosion Board.
- Butel, R., Dupuis, H., & Bonneton, P. (2002). Spatial Variability of Wave Conditions on the French Atlantic Coast using In-Situ Data. *Journal of Coastal Research*, 36 (10036), 96-108. <https://doi.org/10.2112/1551-5036-36.sp1.96>
- Burvingt, O., Masselink, G., Russell, P., & Scott, T. (2017). Classification of beach response to extreme storms. *Geomorphology*, 295, 722-737. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.07.022>
- Callaghan, D. P., Nielsen, P., Short, A., & Ranasinghe, R. (2008). Statistical simulation of wave climate and extreme beach erosion. *Coastal Engineering*, 55(5), 375-390. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2007.12.003>
- Callaghan, D. P., Roshanka, R., & Andrew, S. (2009). Quantifying the storm erosion hazard for coastal planning. *Coastal Engineering*, 56(1), 90-93. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2008.10.003>
- Cariolet, J.-M. (2011). Quantification du runup sur une plage macrotidale à partir des conditions morphologiques et hydrodynamiques. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 17(vol. 17-n° 1), 95-109. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.9315>
- Cartier, A., & Héquette, A. (2011). Variation in longshore sediment transport under low to moderate conditions on barred macrotidal beaches. *Journal of Coastal Research*, 64, 6.
- Castelle, B., Marieu, V., Bujan, S., Splinter, K. D., Robinet, A., Sénéchal, N., & Ferreira, S. (2015). Impact of the winter 2013–2014 series of severe Western Europe storms on a double-barred sandy coast: Beach and dune erosion and megacusp embayments. *Geomorphology*, 238, 135-148. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.006>
- Castelle C., Guillot B., Marieu V., Chaumillon E., Hanquiez V., Bujan S., Poppeschi C., (2018). Spatial and temporal patterns of shoreline change of a 280-km high-energy disrupted sandy coast from 1950 to 2014: SW France, *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 200 (2018) pp. 212-223.
- Castelle, B., & Chaumillon, E. (2019). Coastal Change in Tropical Overseas and Temperate Metropolitan France Inferred from a National Monitoring Network: A Summary from the Current Special Issue. *Journal of Coastal Research*, 88(sp1), 3. <https://doi.org/10.2112/SI88-002.1>
- Cazenave, A., Dieng, H.-B., Meyssignac, B., von Schuckmann, K., Decharme, B., Berthier, E., (2014). The rate of sea-level rise. *Nat. Clim. Change* 4, pp. 358-361. <https://doi.org/10.1038/nclimate2159>.

- Cellone, F., Carol, E., & Tosi, L. (2016). Coastal erosion and loss of wetlands in the middle Río de la Plata estuary (Argentina). *Applied Geography*, 76, 37-48.
- Chaaban, F., Darwishe, H., Battiau-Queney, Y., Louche, B., Masson, E., Khattabi, J.E., Carlier, E., (2012). Using ArcGIS® modelbuilder and aerial photographs to measure coastline retreat and advance: north of France. *J. Coast. Res.* 285, pp. 1567-1579.
- Chadenas, C., Creach, A., & Mercier, D. (2014). The impact of storm Xynthia in 2010 on coastal flood prevention policy in France. *Journal of Coastal Conservation*, 18(5), 529-538. <https://doi.org/10.1007/s11852-013-0299-3>
- Charlier, R. H., & Meyer, C. P. D. (1998). *Coastal Erosion: Response and Management*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/BFb0011384>
- Chauveau, E., Chadenas, C., Comentale, B., Pottier, P., Blanloeil, A., Feuillet, T., Mercier, D., Pourinet, L., Rollo, N., Tillier, I., & Trouillet, B. (2011). Xynthia : leçons d'une catastrophe. *Cybergeo : European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.23763>
<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.09.014>
- Chaverot, S., Héquette, A., & Cohen, O. (2012). Evolution of Climatic Forcing and Potentially Eroding Events on the Coast of Northern France. 1-11. [https://doi.org/10.1061/40855\(214\)27](https://doi.org/10.1061/40855(214)27)
- Chupin, O., et Pottier, P. (2012). 10 ans d'évolution de l'occupation du sol dans les territoires de Loire-Atlantique (1999-2009). *Cahiers nantais*, 12.
- Cerema, (2018). Indicateur national de l'érosion côtière, Spécification technique du produit (version 1.0 – janvier 2018). website Géolittoral [<http://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/specif-tech-carto-indicateur-erosion.pdf>].
- CETMEF-SHOM, (2012). Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique). [En ligne] <https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/statistiques-niveaux-marins-extremes-cotes-france-manche>
- Ciavola, P., Ferreira, O., Van Dongeren, A., Van Thiel de Vries, J., Armaroli, C., & Harley, M. D. (2014). Prediction of Storm Impacts on Beach and Dune Systems. In *Hydrometeorological Hazards Interfacing Science and Policy* (Wiley Blackwell, p. 227-252). Philippe Quevauviller.
- Ciavola, P., & Coco, G. (Éds.). (2017). *Coastal Storms : Processes and Impacts* (Wiley Blackwell). John Wiley & sons Ltd.
- Clus-Auby, C., Paskoff, R., & Verger, F. (2006). Le patrimoine foncier du Conservatoire du littoral et le changement climatique: scénarios d'évolution par érosion et submersion. *Annales de géographie*, 2006/2 n° 648, 115-132. <https://doi.org/10.3917/ag.648.0115>
- Ciffroy P., Reyss J.-L., Siclet F., (2003). Determination of the residence time of suspended particles in the turbidity maximum of the Loire estuary by ⁷Be analysis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 57 (2003) pp. 553-568.

Ciavola, P., Ferreira, O., Van Dongeren, A., Van Thiel de Vries, J., Armaroli, C., & Harley, M. D. (2014). Prediction of Storm Impacts on Beach and Dune Systems. In *Hydrometeorological Hazards Interfacing Science and Policy* (Wiley Blackwell, p. 227-252). Philippe Quevaucommuner.

Cohen, O., & Héquette, A. (2020). Recent Advances in Coastal Survey Techniques: From GNSS to LiDAR and Digital Photogrammetry - Examples on the Northern Coast of France. In *Spatial Variability in Environmental Science: Patterns, Processes, and Analyses* p. 91-113

Corbella, S., & Stretch, D. D. (2012a). Multivariate return periods of sea storms for coastal erosion risk assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(8), 2699-2708. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-2699-2012>

Corbella, S., & Stretch, D. D. (2012b). Predicting coastal erosion trends using non-stationary statistics and process-based models. *Coastal Engineering*, 70, 40-49. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.06.004>

Cornett, A. (2010). OES-IA Guidance on Assessing Tidal Current Energy Resources. 3rd International Conference on Ocean Energy, 6 October, Bilbao, 1-7.

Cowell, P. J., & Thom, B. G. (1994). Morphodynamics of coastal evolution. In *Coastal evolution: Late Quaternary Shoreline Morphodynamics* (Vol. 1, 548, p. 33-86). Cambridge University Press.

Crapoulet, A., Héquette, A., Marin, D., Levoy, F., & 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(11), 1603-1622. <https://doi.org/10.1002/esp.4098>

Creach, A. (2015). Cartographie et analyse économique de la vulnérabilité du littoral atlantique français face au risque de submersion marine. Thèse de Géographie. Université de Nantes.

Creach, A., Pardo, S., Guillotreau, P., & Mercier, D. (2015). The use of a micro-scale index to identify potential death risk areas due to coastal flood surges: lessons from Storm Xynthia on the French Atlantic coast. *Natural Hazards*, 77(3), 1679-1710. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1669-y>

Crowell, M., Leatherman, S. P., & Douglas, B. (2018). Erosion: Historical Analysis and Forecasting. In C. W. Finkl & C. Makowski (Éds.), *Encyclopedia of Coastal Science* (p. 1-7). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48657-4_138-2

Cutter, S. L. (1996). Vulnerability to environmental hazards. *Progress in Human Geography*, 20(4), 529-539. <https://doi.org/10.1177/030913259602000407>

Cutter, S. L., Boruff, B. J., & Shirley, W. L. (2003). Social Vulnerability to Environmental Hazards *: Social Vulnerability to Environmental Hazards. *Social Science Quarterly*, 84(2), 242-261. <https://doi.org/10.1111/1540-6237.8402002>

Dada, O.A.; Li, G.; Qiao, L.; Ding, D.; Ma, Y., and Xu, J. (2016) Seasonal shoreline behaviours along the arcuate Niger Delta coast: Complex interaction between fluvial and marine processes. *Continental Shelf Research*, 122, 51-67.

- Davies, J. L. (1964). A morphogenic approach to world shorelines. *Zeitschrift für geomorphologie*, 127-142.
- Davis, R. A., & Hayes, M. O. (1984). What is a Wave-Dominated Coast? In B. Greenwood & R. A. Davis (Éds.), *Developments in Sedimentology* (Vol. 39, p. 313-329). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0070-4571\(08\)70152-3](https://doi.org/10.1016/S0070-4571(08)70152-3)
- Dawson, R. J., Dickson, M. E., Nicholls, R. J., Hall, J. W., Walkden, M. J. A., Stansby, P. K., Mokrech, M., Richards, J., Zhou, J., Milligan, J., Jordan, A., Pearson, S., Rees, J., Bates, P. D., Koukoulas, S., & Watkinson, A. R. (2009). Integrated analysis of risks of coastal flooding and cliff erosion under scenarios of long term change. *Climatic Change*, 95(1-2), 249-288. <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9532-8>
- DDTM 85, (2015). Plan de Prévention des Risques Naturels Prévisibles Littoraux « Pays d'Olonne », note de présentation, 49 p.
- Dean, R. G. (1977). *Equilibrium beach profiles: US Atlantic and Gulf coasts*.
- Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (2004). *Coastal Processes with Engineering Applications*. Cambridge University Press.
- de Andrade, T. S., Sousa, P. H. G. de O., & Siegle, E. (2019). Vulnerability to beach erosion based on a coastal processes approach. *Applied Geography*, 102, 12-19. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.11.003>
- Debaine, F. (2012). Aide à la gestion multifonctionnelle des dunes littorales atlantiques par l'évaluation cartographiée de leur état de conservation, Programme « Multidune », rapport de synthèse, 25 p.
- Debaine, F., et Robin, M. (2012). A new GIS modelling of coastal dune protection services against physical coastal hazards. *Ocean & Coastal Management*, 63, pp. 43-54. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2012.03.012>
- Deboudt, P. (2010a). Vers la mise en œuvre d'une action collective pour gérer les risques naturels littoraux en France métropolitaine. *Cybergeo : European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.22964>
- Deboudt, P. (2010). Towards coastal risk management in France. *Ocean & Coastal Management*, 53(7), 366-378. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2010.04.013>
- Dehouck, A. (2006). *Morphodynamique des plages sableuses de la mer d'Iroise (Finistère) [Phdthesis, Université de Bretagne occidentale - Brest]*. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00109373>
- Del Río, L., Gracia, F. J., & Benavente, J. (2013). Shoreline change patterns in sandy coasts. A case study in SW Spain. *Geomorphology*, 196, 252-266. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.07.027>

Depellegrin D., Blažauskas N., de Groot R.S., (2010). Mapping of sensitivity to oil spills in the Lithuanian Baltic sea coast, *Baltica* 23, 2, pp.91-100.

Desmazes, F., Muller, H., Garcin, M., Belon, R., & Baudouin, V. (2014). Méthodologie de détermination du recul maximal des dunes pour les événements extrêmes (BRGM/RP-63157-FR; p. 135).

Desmazes, F., Garcin, M., Nicolae Lerma, A., & Muller, H. (2018). Méthodes de détermination du recul maximal des dunes côtières lors de tempêtes dans le cadre des Plans de Prévention des Risques Littoraux. XVèmes Journées, La Rochelle, 777 784. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2018.088>

Desmazes, F., Maspataud, A., Elineau, S., Billy, J., & Cozannet, G. L. (2019). Prise en compte de l'élévation du niveau de la mer sur l'alea recul du trait de cote: projections probabilistes sur deux sites métropolitains. 5. <https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-02360451>

Dickson, E., Baker, J.L., Hoornweg, D., Tiwari, A., (2012). Urban Risk Assessments: Understanding Disaster and Climate Risk in Cities. Urban development series. WorldBank. <http://documents.worldbank.org/curated/en/2012/06/16499064/urban-risk-assessments-understanding-disaster-climate-risk-cities>.

DHI, GEOS, (2007). Etude de connaissance des phénomènes d'érosion sur le littoral vendéen. Rapport final de la tranche ferme. 356 p.

Dolan, R., Fenster, M. S., & Holme, S. J. (1991). Temporal Analysis of Shoreline Recession and Accretion. 24.

Dolan, R., & Davis, R. E. (1992). An Intensity Scale for Atlantic Coast Northeast Storms. *Journal of Coastal Research*, 8(4), 840 853.

Douglas, B. C., Crowell, M., & Leatherman, S. P. (1998). Considerations for Shoreline Position Prediction. *Journal of Coastal Research*, 14(3), 1025 1033.

Douglas, B. C., & Crowell, M. (2000). Long-Term Shoreline Position Prediction and Error Propagation. *Journal of Coastal Research*, 16(1), 145 152.

Drejza, S., Friesinger, S., & Bernatchez, P. (2014). Exposition des infrastructures routières de l'Est du Québec (Canada) à l'érosion et à la submersion. 9.

Drejza, S., Friesinger, S., & Bernatchez, P. (2015). Vulnérabilité des infrastructures routières de l'est du Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques : 308.

Duffy W., Dickson S.M., (1995). Using grid and graph to quantify and display shoreline change. In: Proceedings 1995 ESRI International User Conference, p. 74.

Dupont P., (2005). L'état actuel du peuplement végétal des dunes de Vendée, Société Botanique de France, *Journal de Botanique*, 32, pp. 5-31.

- Edelman, T. (1968). Dune erosion during storm conditions. *Coastal Engineering*, 719–722.
- El Abdellaoui, J. E., & Ozer, A. (2007). Etude dichronique et historique de l'évolution du trait de côte de la baie de Tanger (Maroc). *Téledétection : Revue de Recherche et d'Application en Téledétection*, 7(n° 1-2-3-4). <https://orbi.uliege.be/handle/2268/173495>
- Escudero Castillo, M., Castillo, M. E., Baldwin, E. M., Casarin, R. S., Vanegas, G. P., & Juaréz, M. A. (2012). Characterization of Risks in Coastal Zones: A Review. *CLEAN - Soil, Air, Water*, 40(9), 894-905.
- Esteves, L. S., Brown, J. M., Williams, J. J., & Lymbery, G. (2012). Quantifying thresholds for significant dune erosion along the Sefton Coast, Northwest England. *Geomorphology*, 143-144, 52-61. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.02.029>
- European Commission, (2004). *Living with Coastal Erosion in Europe – Sediment and Space for Sustainability. Part I - Major Findings and Policy Recommendations of the EUROSION Project*, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 40 pp
- Fattal, P., Robin, M., Paillart, M., Maanan, M., Mercier, D., Lamberts, C., & Costa, S. (2010). Effets des tempêtes sur une plage aménagée et à forte protection côtière : la plage des Éloux (côte de Noirmoutier, Vendée, France). *Norois*, 215, 101-114.
- Faye, I. B. N., Hénaff, A., Gourmelon, F., & Diaw, A. T. (2008). Évolution du trait de côte à Nouakchott (Mauritanie) de 1954 à 2005 par photo-interprétation. *Norois. Environnement, aménagement, société*, 208, 11-27. <https://doi.org/10.4000/norois.2146>
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2003). *Guidelines and Specifications for Flood Hazard Mapping Partners, Appendix D: Guidance for Coastal Flooding Analyses and Mapping*. Prepared under FEMA's Flood Hazard Mapping Program.
- Ferreira, Ó., Taborda, R., Cialova, P., Armaroli, C., Balouin, Y., Benavente, J., Williams, J. (2009). Coastal storm risk assessment in Europe: examples from 9 study sites. *Journal of Coastal Research*, (SI 56), 1632-1636.
- Ferret Y. (2016). *Reconstruction de la série marégraphique de Saint-Nazaire. Rapport d'étude SHOM*.
- Feuillet, T., Chauveau, E., & Pourinet, L. (2012). Xynthia est-elle exceptionnelle ? Réflexions sur l'évolution et les temps de retour des tempêtes, des marées de tempête, et des risques de surcotes associés sur la façade atlantique française. *Norois. Environnement, aménagement, société*, 222, 27-44. <https://doi.org/10.4000/norois.3866>
- Flather, R. A. (2001). Storm surges. In *Encyclopedia of ocean sciences* (Vol. 5, p. 2882-2892).
- Fletcher, C.; Rooney, J.; Barbee, M.; Lim, S.C., and Richmond, B., (2003) Mapping Shoreline Change Using Digital Orthophotogrammetry on Maui, Hawaii. *Journal of Coastal Research*, SI 38, pp. 106-124
- Fossi Fotsi, Y., Pouvreau, N., Brenon, I., Onguene, R., & Etame, J. (2019). *Temporal (1948–2012)*

and Dynamic Evolution of the Wouri Estuary Coastline within the Gulf of Guinea. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(10), 343. <https://doi.org/10.3390/jmse7100343>

Fraser, C., Bernatchez, P., & Dugas, S. (2017). Development of a GIS coastal land-use planning tool for coastal erosion adaptation based on the exposure of buildings and infrastructure to coastal erosion, Québec, Canada. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 1103-1125. <https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1294114>

Gaillot S., Chaverot S., (2001). Méthode d'étude des littoraux à faible évolution. Cas du delta du Golo (Corse) et du littoral du Touquet (Pas-de-Calais) en France, *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, volume 7, numéro 1, pp. 47-54.

Garry G., Graszka E., Toulemont M. et Levoy F. (1997). Plans de prévention des risques littoraux (PPR), guide méthodologique. Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, Ministère de l'équipement, des transports et du logement. Paris, la Documentation Française, 54 p.

Genovese, E., Przulski, V., Vinit, F., & Déqué, M. (2013). Xynthia : le déroulement de la tempête et ses conséquences en France. In *Gestion des risques naturels : Leçons de la tempête Xynthia* (Editions Quae, p. 17-42).

Geos-DHI, (2007). Etude de connaissance des phénomènes d'érosion sur le littoral vendéen, GEOS-DHI, 356 p. http://www.pays-de-la-loire.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/_50198_Erosion_du_littoral_vendéen_TF_FINAL.pdf

Gornitz, V. (1991). Global coastal hazards from future sea level rise. 20.

Gornitz, V., & Kanciruk, P. (1989). Assessment of global coastal hazards from sea level rise (CONF-8907104-1). Oak Ridge National Lab. (ORNL), Oak Ridge, TN (United States). <https://www.osti.gov/biblio/5966579>

Gougnet, L. (2018). Guide de gestion des dunes et des plages associées. Edition Quae.

Hallermeier, R. J., & Rhodes, P. E. (1988). Generic Treatment of Dune Erosion for a 100-Year Event. Proceedings: 21st International Conference on Coastal Engineering held in Torremolinos, 1197-1211.

Hallermeier, R. J., & Rhodes, P. E. (1988) Generic Treatment of Dune Erosion for a 100-Year Event. Proceedings: 21st International Conference on Coastal Engineering held in Torremolinos, 1197-1211.

Halouani, N., Sabatier, F., Gueddari, M., & Fleury, J. (2007). Évolution du trait de côte de Tabarka-Bouterfess, nord-ouest de la Tunisie. Méditerranée. *Revue géographique des pays méditerranéens / Journal of Mediterranean geography*, 108, 131-137. <https://doi.org/10.4000/mediterranee.192>

Hanslow, D. J. (2007). Beach Erosion Trend Measurement: A Comparison of Trend Indicators. *Journal of Coastal Research*, 50, 7.

- Hapke, C.J.; Reid, D.; Richmond, B.M.; Ruggiero, P., and List, J., (2006). National assessment of shoreline change: Part 3: Historical shoreline changes and associated coastal land loss along the sandy shorelines of the California coast, U.S. Geological Survey Open-file Report 2006-1219, 79 p.
- Hapke, C. J., Reid, D., & Richmond, B. (2009). Rates and Trends of Coastal Change in California and the Regional Behavior of the Beach and Cliff System. *Journal of Coastal Research*, 603 615. <https://doi.org/10.2112/08-1006.1>
- Harley, M. D., Turner, I. L., Kinsela, M. A., Middleton, J. H., Mumford, P. J., Splinter, K. D., Phillips, M. S., Simmons, J. A., Hanslow, D. J., & Short, A. D. (2017). Extreme coastal erosion enhanced by anomalous extratropical storm wave direction. *Scientific Reports*, 7(1), 1 9. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05792-1>
- Harley, M., Kinsela, M., Sánchez-García, E. S., & Vos, K. (2018). CoastSnap: Crowd-Sourced Shoreline Change Mapping using Smartphones. 2018, EP52D-26.
- Hénaff, A., & Philippe, M. (2014). Gestion des risques d'érosion et de submersion marines. Alain Hénaff et Manuelle Philippe. <https://hal.univ-brest.fr/hal-01120822>
- Hénaff, A., Le Cornec, E., Jabbar, M., Pétré, A., Corfou, J., Le Drezen, Y., & van Vliët-Lanoë, B. (2018). Caractérisation des aléas littoraux d'érosion et de submersion en Bretagne par l'approche historique. *Cybergeo : European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.29000>
- Héquette, A., Ruz, M.-H., Zemmour, A., Marin, D., Cartier, A., & Sipka, V. (2019). Alongshore Variability in Coastal Dune Erosion and Post-Storm Recovery, Northern Coast of France. *Journal of Coastal Research*, 88(SI), 25 45. <https://doi.org/10.2112/SI88-004.1>
- Hervouet, J.-M., & Villaret, C. (2004). Simulation numérique des évolutions sédimentaires, importance d'une approche intégrée. VIIIèmes Journées, Compiègne, 185 193. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2004.021-H>
- Holling, C. S. (1973). Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4(1), 1 23. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>
- Houser, C., Hapke, C., & Hamilton, S. (2008). Controls on coastal dune morphology, shoreline erosion and barrier island response to extreme storms. *Geomorphology*, 100(3), 223 240. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.12.007>
- Judge, E. K., Overton, M. F., & Fisher, J. S. (2003). Vulnerability Indicators for Coastal Dunes. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 129(6), 270 278. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2003\)129:6\(270\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2003)129:6(270))
- Juigner, M., Robin, M., Fattal, P., Maanan, M., Le Guern, C., Gouguet, L., Baudouin, V., & Debaine, F. (2013). Cinématique d'un trait de côte sableux en Vendée entre 1920 et 2010. *Dynamiques Environnementales - Journal international des géosciences et de l'environnement*, 30, 29 39.

Juigner, M., Robin, M., Debaine, F., & Hélen, F. (2017). A generic index to assess the building exposure to shoreline retreat using box segmentation: Case study of the Pays de la Loire sandy coast (west of France). *Ocean & Coastal Management*, 148, 40-52. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.07.014>

Juigner, M., & Robin, M. (2018). Caractérisation de la morphologie des massifs dunaires de la région Pays de la Loire (France) face au risque de submersion marine. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, Volume 18 numéro 2. <https://doi.org/10.4000/vertigo.20558>

Juigner, M., Robin, M., Audère, M., Fattal, P., Hervy, B., Kerguillec, R., Suzanne, J.-B., Costa, S., Lopin, M., Maquaire, O., Medjkane, M., Pagny, J., & Thulie, A. (2021). Un nouvel indicateur de prédisposition au risque d'érosion côtière, application en Manche et en Vendée (France). *Cybergeo : European Journal of Geography*. <https://journals.openedition.org/cybergeo/37114>

Kabuth, A. K., Kroon, A., & Pedersen, J. B. T. (2013). Multidecadal Shoreline Changes in Denmark. *Journal of Coastal Research*, 30(4), 714-728. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-13-00139.1>

Kane, I. O., & Vanderlinden, J.-P. (2015). L'utilisation du concept polysémique de résilience : une analyse empirique en zone côtière. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, Hors-série 23. <https://doi.org/10.4000/vertigo.16661>

Klein, R. J. T., & Nicholls, R. J. (1999). Assessment of Coastal Vulnerability to Climate Change. *Ambio*, 28(2), 182-187.

Kantamaneni, K., Phillips, M., Thomas, T., & Jenkins, R. (2018). Assessing coastal vulnerability: Development of a combined physical and economic index. *Ocean & Coastal Management*, 158, 164-175. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.03.039>

Kergadallan, X., Le Berre, A., Sanquer, R., & Leclerc, B. (2022). Candhis : analyses 2002 des états de mer. tome 1 - Mer du nord, Manche et Atlantique (p. 322). CEREMA.

Kerguillec, R., Audère, M., Baltzer, A., Debaine, F., Fattal, P., Juigner, M., Launeau, P., Le Mauff, B., Luquet, F., Maanan, M., Pouzet, P., Robin, M., & Rollo, N. (2019). Monitoring and management of coastal hazards: Creation of a regional observatory of coastal erosion and storm surges in the Pays de la Loire region (Atlantic coast, France). *Ocean & Coastal Management*, 181, 104904. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.104904>

Kirezci, E., Young, I. R., Ranasinghe, R., Muis, S., Nicholls, R. J., Lincke, D., & Hinkel, J. (2020). Projections of global-scale extreme sea levels and resulting episodic coastal flooding over the 21st Century. *Scientific Reports*, 10(1), 11629. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67736-6>

Komar, P. D. (1983). Beach processes and erosion - An introduction. In *CRC handbook of coastal processes and erosion* (p. 317). CRC Press.

Kopp, R. E., Hay, C. C., Little, C. M., & Mitrovica, J. X. (2015). Geographic Variability of Sea-

- Level Change. *Current Climate Change Reports*, 1(3), 192-204. <https://doi.org/10.1007/s40641-015-0015-5>
- Kriebel, D.L. & Dean, R.G. (1993) Convolution method for time-dependent beach-profile response. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 119 (2), 204–226.
- Kunte, P. D., Jauhari, N., Mehrotra, U., Kotha, M., Hursthouse, A. S., & Gagnon, A. S. (2014). Multi-hazards coastal vulnerability assessment of Goa, India, using geospatial techniques. *Ocean & Coastal Management*, 95, 264-281. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.04.024>
- Lahousse, P., & Piédanna, V. (1998). *L'outil statistique en géographie - Philippe Lahousse, Vincent... - Librairie Eyrolles. Armand Collin.*
- Lambert, M.-L., Stahl, L., & Bernard-Bouissières, A. (2018). Risques littoraux: à la recherche d'une `` juste `` indemnisation par le fonds Barnier - Réflexions à propos de la décision QPC n° 2018-698 QPC du 6 avril 2018, *Syndicat secondaire Le Signal*. 19.
- Lang, A. V. (2012). La loi littoral et la protection des espaces naturels. *Revue juridique de l'environnement*, n° spécial(5), 105-116.
- Larson, M., & Kraus, N. C. (1989). SBEACH: numerical model for simulating storm-induced beach change. Report 1. Empirical foundation and model development. Coastal Engineering Research Center Vicksburg Ms.
- Larson, M., Erikson, L., & Hanson, H. (2004). An analytical model to predict dune erosion due to wave impact. *Coastal Engineering*, 51(8-9), 675-696. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.07.003>
- Launeau P., Giraud M., Robin M., Baltzer A., (2019). Full-Waveform LiDAR Fast Analysis of a Moderately Turbid Bay in Western France. *Remote Sens.* 2019, 11, 117. <https://doi.org/10.3390/rs11020117>
- Leatherman, S. P., Zhang, K., & Douglas, B. C. (2000). Sea level rise shown to drive coastal erosion. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 81(6), 55-57. <https://doi.org/10.1029/00EO00034>
- Leatherman, S. P. (2018). Coastal Erosion and the United States National Flood Insurance Program. *Ocean & Coastal Management*, 156, 35-42. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.04.004>
- Le Berre, I., Bailly, D., Philippe, M., & Kato, Y. (2014). Analyse économique des enjeux exposés aux risques côtiers : application au bâti résidentiel de Bretagne. 204. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01084626>
- Le Berre, I., Maulpoix, A., Theriault, M., Gourmelon, F., (2016). A probabilistic model of residential urban development along the French Atlantic coast between 1968 and 2008. *Land Use Policy* 50, pp. 461-478. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.09.007>.
- Le Corre, C., Auvray, B., Balleve, M., Robardet, M., (1991). Le Massif Armoricaïn. *Sci. Geol. Bull.* 44 (1-2), pp 31-103.

Le Guern, C., Baudoin, V., Robin, M., Fattal, P., Conil, P., Juigner, M., Debaine, F., Maanan, M., Rollier, C., Gouguet, L., Bouchet, F., Magne, J., & Robin, J.-G. (2014). Un SIG pour appuyer la gestion durable du littoral : exemple de l'érosion en Pays de Monts (Vendée, France). 817 824. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2014.090>

Le Mauff, B. (2018). Dynamique hydro-sédimentaire du goulet de Fromentine et des plages adjacentes jusqu'au Pays-de-Monts [Thesis, Nantes]. <http://www.theses.fr/2018NANT3005>

Le Mauff, B., Juigner, M., Ba, A., Robin, M., Launeau, P., & Fattal, P. (2018). Coastal monitoring solutions of the geomorphological response of beach-dune systems using multi-temporal LiDAR datasets (Vendée coast, France). *Geomorphology*, 304, 121 140. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.12.037>

Lenôtre, N. (2009). Pour une gestion dynamique du littoral. *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, N° 56(4), 80-88.

Leonard, M., Westra, S., Phatak, A., Lambert, M., van den Hurk, B., McInnes, K., Risbey, J., Schuster, S., Jakob, D., & Stafford-Smith, M. (2014). A compound event framework for understanding extreme impacts. *WIREs Climate Change*, 5(1), 113 128. <https://doi.org/10.1002/wcc.252>

Léone, F., & Vinet, F. (2006). La vulnérabilité, un concept fondamental au coeur des méthodes d'évaluation des risques naturels. In *La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles* (p. 9 26).

Léone, F., Meschinet De Richemond, N., & Vinet, F. (2010). Aléas naturels et gestion des risques.

Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons.

Lins-de-Barros, F. M., & Muehe, D. (2013). The smartline approach to coastal vulnerability and social risk assessment applied to a segment of the east coast of Rio de Janeiro State, Brazil. *Journal of Coastal Conservation*, 17(2), 211 223. <https://doi.org/10.1007/s11852-011-0175-y>

Lira, C. P., Silva, A. N., Taborda, R., & de Andrade, C. F. (2016). Coastline evolution of Portuguese low-lying sandy coast in the last 50 years: an integrated approach. 14.

Long, N., Millescamps, B., Guillot, B., Pouget, F., & Bertin, X. (2016). Monitoring the Topography of a Dynamic Tidal Inlet Using UAV Imagery. *Remote Sensing*, 8(5), 387. <https://doi.org/10.3390/rs8050387>

López Royo, M., Ranasinghe, R., & Jiménez, J. A. (2016). A Rapid, Low-Cost Approach to Coastal Vulnerability Assessment at a National Level. *Journal of Coastal Research*, 32(4), 932 945. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-14-00217.1>

Lovelock, J. (2000). *The Ages of Gaia: A Biography of Our Living Earth*. Oxford University Press.

Luijendijk, A., Hagenaars, G., Ranasinghe, R., Baart, F., Donchyts, G., & Aarninkhof, S. (2018).

The State of the World's Beaches. *Scientific Reports*, 8(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>

Luijendijk, A. (2019). A global view on beach erosion. *The Sand Motor: A Nature-Based Response To Climate Change: Findings and Reflections of the Interdisciplinary Research Program NatureCoast*, 174–175.

MacClenahan, P., McKenna, J., Cooper, J. a. g., & O'Kane, B. (2001). Identification of highest magnitude coastal storm events over western Ireland on the basis of wind speed and duration thresholds. *International Journal of Climatology*, 21(7), 829–842. <https://doi.org/10.1002/joc.666>

Mahendra, R. S., Mohanty, P. C., Bisoyi, H., Kumar, T. S., & Nayak, S. (2011). Assessment and management of coastal multi-hazard vulnerability along the Cuddalore–Villupuram, east coast of India using geospatial techniques. *Ocean & Coastal Management*, 54(4), 302–311. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2010.12.008>

Maiti, S., & Bhattacharya, A. K. (2009). Shoreline change analysis and its application to prediction: A remote sensing and statistics based approach. *Marine Geology*, 257(1), 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2008.10.006>

Martins, K. A., de Souza Pereira, P., Silva-Casarin, R., & Neto, A. V. N. (2017). The Influence of Climate Change on Coastal Erosion Vulnerability in Northeast Brazil. *Coastal Engineering Journal*, 59(2), 1740007–1–1740007–1740025. <https://doi.org/10.1142/S0578563417400071>

Maspataud, A., Idier, D., Larroude, P., Sabatier, F., Ruz, M.-H., Charles, E., Lecacheux, S., & Hequette, A. (2010). L'apport de modèles numériques pour l'étude morphodynamique d'un système dune-plage macrotidal sous l'effet des tempêtes : plage de la dune Dewulf, Est de Dunkerque, France. *XIèmes Journées, Les Sables d'Olonne*, 353–360. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2010.042-M>

Maspataud, A., Ruz, M.-H., & Hequette, A. (2011). Storm-driven shoreline evolution on a macrotidal coast: short- to medium-term spatial variability. a case study on the northern coast of France. In *The Proceedings of the Coastal Sediments 2011* (p. 927–940). World Scientific Publishing Company. https://doi.org/10.1142/9789814355537_0070

Masselink, G., & Short, A. D. (1993). The Effect of Tide Range on Beach Morphodynamics and Morphology: A Conceptual Beach Model. *Journal of Coastal Research*, 9(3), 785–800.

Masselink, G., Hughes, M. G., & Knight, J. (2014). *Introduction to coastal processes and geomorphology*.

Masselink, G., Castelle, B., Scott, T., Dodet, G., Suanez, S., Jackson, D., Floc'h, F., (2016a). Extreme wave activity during 2013/2014 winter and morphological impacts along the Atlantic coast of Europe. *Geophys. Res. Lett.* 43, 2135e2143. <https://doi.org/10.1002/2015GL067492>. 2135e2143. <https://doi.org/10.1002/2015GL067492>.

Masselink G., Scott T., Poate T., Russell P., Davidson M., Conley D., (2016b). The extreme

2013/2014 winter storms: hydrodynamic forcing and coastal response along the southwest coast of England, *Earth Surface Processes and Landforms*, 41, 3, pp. 378-391

McLaughlin, S., McKenna, J., & Cooper, J. a. G. (2002). Socio-economic data in coastal vulnerability indices: constraints and opportunities. *Journal of Coastal Research*, 36(sp1), 487-497. <https://doi.org/10.2112/1551-5036-36.sp1.487>

McPhillips, L. E., Chang, H., Chester, M. V., Depietri, Y., Friedman, E., Grimm, N. B., Kominoski, J. S., McPhearson, T., Méndez-Lázaro, P., Rosi, E. J., & Shafiei Shiva, J. (2018). Defining Extreme Events: A Cross-Disciplinary Review. *Earth's Future*, 6(3), 441-455. <https://doi.org/10.1002/2017EF000686>

Mentaschi, L., Voudoukas, M. I., Pekel, J.-F., Voukouvalas, E., & Feyen, L. (2018). Global long-term observations of coastal erosion and accretion. *Scientific Reports*, 8(1), 12876. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30904-w>

Mercier, D., & Chadenas, C. (2012). La tempête Xynthia et la cartographie des « zones noires » sur le littoral français : analyse critique à partir de l'exemple de La Faute-sur-Mer (Vendée). *Noréis. Environnement, aménagement, société*, (222), 45-60. <https://doi.org/10.4000/norois.3895>

Metzger, P., & D'Ercole, R. (2011). Les risques en milieu urbain : éléments de réflexion. *Echo-Géo*, 18. <https://doi.org/10.4000/echogeo.12640>

Meur-Ferec, C., Berre, I. L., Cocquempot, L., Guillou, É., Henaff, A., Lami, T., Dantec, N. L., Letortu, P., Philippe, M., & Noûs, C. (2020). Une méthode de suivi de la vulnérabilité systémique à l'érosion et la submersion marines. *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie*, Vol. 11, n°1. <https://doi.org/10.4000/developpementdurable.16731>

Méziane, I. (2019). Contribution à la modélisation des événements extrêmes le long du littoral de la région Pays de la Loire : focus sur les tempêtes Lothar, Martin et Xynthia. *Mémoire de Géographie*. Université de Nantes.

Miller, J. K., & Dean, R. G. (2004). A simple new shoreline change model. *Coastal Engineering*, 51(7), 531-556. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.05.006>

Ministère de l'écologie, du développement durable, et de l'énergie (MEDDE), (2014). Guide méthodologique : plan de prévention des risques littoraux. *Rapport, DGPR/MEDDDE*, 169

Moore, L. J., Ruggiero, P., & List, J. H. (2006). Comparing Mean High Water and High Water Line Shorelines: Should Proxy-Datum Offsets be Incorporated into Shoreline Change Analysis? *Journal of Coastal Research*, 22(4 (224)), 894-905. <https://doi.org/10.2112/04-0401.1>

Morton, R. A., Leach, M. P., Paine, J. G., & Cardoza, M. A. (1993). Monitoring Beach Changes Using GPS Surveying Techniques. *Journal of Coastal Research*, 9(3), 702-720.

Morton, R. A., Miller, T., & Moore, L. (2005). Historical Shoreline Changes Along the US Gulf of Mexico: A Summary of Recent Shoreline Comparisons and Analyses. *Journal of Coastal Research*

search, 21(4 (214)), 704 709. <https://doi.org/10.2112/04-0230.1>

Moussaid, J., Fora, A. A., Zourarah, B., Maanan, M., & Maanan, M. (2015). Using automatic computation to analyze the rate of shoreline change on the Kenitra coast, Morocco. *Ocean Engineering*, 102, 71 77. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.04.044>

Mukhopadhyay, A., Mukherjee, S., Mukherjee, S., Ghosh, S., Hazra, S., & 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(1), 201 213. <https://doi.org/10.5721/EuJRS20124519>

Musereau, J., Regnaud, H., & Planchon, O. (2007). Vulnérabilité aux tempêtes des dunes littorales : développement d'un modèle de prédiction du dommage à travers l'exemple de Saint-Trojan (Île d'Oléron, France). *Climatologie*, Volume 4, 145 166. <https://doi.org/10.4267/climatologie.819>

Nguyen, T. T. X., Bonetti, J., Rogers, K., & Woodroffe, C. D. (2016). Indicator-based assessment of climate-change impacts on coasts: A review of concepts, methodological approaches and vulnerability indices. *Ocean & Coastal Management*, 123, 18 43. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.11.022>

Nicholls, R. J., Wong, P. P., Burkett, V., Codignotto, J., & Hay, J. (2007). Coastal systems and low-lying areas. 44.

Nicholls, R.J., Wong, P.P., Burkett, V.R., Codignotto, J.O., Hay, J.E., McLean, R.F., Ragoonaden, S., Woodroffe, C.D., (2007). Coastal systems and low-lying areas. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Mukhopadhyay, A., Mukherjee, S., Mukherjee, S., Ghosh, S., Hazra, S., & 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(1), 201 213. <https://doi.org/10.5721/EuJRS20124519>

Nicolae Lerma, A., Ayache, B., Ulvoas, B., Paris, F., Bernon, N., Bulteau, T., & Mallet, C. (2019). Pluriannual beach-dune evolutions at regional scale: Erosion and recovery sequences analysis along the aquitaine coast based on airborne LiDAR data. *Continental Shelf Research*, 189, 103974. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.103974>

OR2C-Université de Nantes (2021). Contribution à la modélisation hydrosédimentaire des événements extrêmes le long du littoral de la région Pays de la Loire : focus sur la tempête Xynthia - Version finale, 189p.

Oyedotun, T. D. T. (2014). Shoreline Geometry: DSAS as a Tool for Historical Trend Analysis. *Geomorphological Techniques*. 12 p.

Pajak, M. J., & Leatherman, S. (2002). The High Water Line as Shoreline Indicator. *Journal of Coastal Research*, 18(2), 329 337.

- Pendleton E.A., Williams S.J., Thieler E.R., (2004). Coastal vulnerability assessment of Assateague Island National Seashore (ASIS) to sea-level-rise, U.S. Geological Survey Open-File Report 2004-1020, 20 p.
- Pender, D., Callaghan, D. P., & Karunaratna, H. (2015). An evaluation of methods available for quantifying extreme beach erosion. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, 1(1), 31-43. <https://doi.org/10.1007/s40722-014-0003-1>
- Pereira, C., Coelho, C., Ribeiro, A., Fortunato, A. B., Lopes, C. L., & Dias, J. M. (2013). Numerical modelling of shoreline evolution in the Aveiro coast, Portugal – climate change scenarios. *Journal of Coastal Research*, 65(SIV2), 2161-2166. <https://doi.org/10.2112/SI65-365.1>
- Perherin, C. (2017). La concertation lors de la cartographie des aléas littoraux dans les Plans de Prévention des Risques: enjeu majeur de prévention [Géographie]. Université de Bretagne occidentale.
- Philibert, K. K., Célestin, H., Salomon, Y. K., Paul, D. N., Sylvain, M., & Kouamé, A. (2014). Évolution à long terme (quarante dernières années) du trait de côte du périmètre littoral est de Port-Bouët et projection d'une ligne de recul. 8.
- Péron, F. (2004). Patrimoine et paysages du littoral. *Drassana: revista del Museu Marítim*, 12, 58-73.
- Pineau-Guillou, L., Lathuilière, C., Magne, R., Louazel, S., Corman, D., & Perherin, C. (2012). Sea levels analysis and surge modelling during storm Xynthia. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16(8), 943-952. <https://doi.org/10.1080/19648189.2012.676424>
- Pollard, J. A., Spencer, T., Brooks, S. M., Christie, E. K., & Möller, I. (2020). Understanding spatio-temporal barrier dynamics through the use of multiple shoreline proxies. *Geomorphology*, 354, 107058. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107058>
- Populus, J., & Deshoux, V. (2004). Nouveaux outils au service du littoral : la topographie par télémétrie laser aéroportée. Journées Européennes de la Géomatique - Géoévénement Lidar, 30 mars au 1er avril 2004, Paris. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00151/26251/>
- Pottier, P. (2007). Problématique et enjeux de l'urbanisation du littoral. *L'espace littoral de la Loire-Atlantique. Cahier littoral*, 10, 20.
- Pouzet P., Maanan M., Piotrowska N., Baltzer A., Stéphan P., Robin M., (2018). Chronology of Holocene storm events along the European Atlantic coast: New data from the Island of Yeu, France, *Progress in physical geography*, 42, 4, pp. 431-450.
- Pye, K., & Blott, S. J. (2008). Decadal-scale variation in dune erosion and accretion rates: An investigation of the significance of changing storm tide frequency and magnitude on the Sefton coast, UK. *Geomorphology*, 102(3), 652-666. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.06.011>
- Quang, D. N., Ngan, V. H., Tam, H. S., Viet, N. T., Tinh, N. X., & Tanaka, H. (2021). Long-Term Shoreline Evolution Using DSAS Technique: A Case Study of Quang Nam Province, Vietnam. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(10), 1124. <https://doi.org/10.3390/jmse9101124>

- Raji, O., Del Rio, L., Garcia, F. J., & Benavente, J. (2011). The use of LIDAR data for mapping coastal flooding hazard related to storms in Cádiz Bay (SW Spain). *Journal of Coastal Research*, 1881-1885.
- Ranasinghe, R., Watson, P., Lord, D., Hanslow, D., & Cowell, P. (2007). Sea Level Rise, Coastal Recession and the Bruun Rule. 7.
- Ranasinghe, R., & Stive, M. J. F. (2009). Rising seas and retreating coastlines. *Climatic Change*, 97(3-4), 465-468. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9593-3>
- Ranasinghe, R. (2016). Assessing climate change impacts on open sandy coasts: A review. *Earth-Science Reviews*, 160, 320-332. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.07.011>
- Rangel-Buitrago, N., & Anfuso, G. (2011). An application of Dolan and Davis (1992) classification to coastal storms in SW Spanish littoral. *Journal of Coastal Research*, 1891-1895
- Rangel-Buitrago, N., & Anfuso, G. (2013). Winter wave climate, storms and regional cycles: the SW Spanish Atlantic coast. *International Journal of Climatology*, 33(9), 2142-2156. <https://doi.org/10.1002/joc.3579>
- Rangel-Buitrago, N., de Jonge, V. N., & Neal, W. (2018). How to make Integrated Coastal Erosion Management a reality. *Ocean & Coastal Management*, 156, 290-299. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.01.027>
- Rangel-Buitrago, N., Neal, W. J., & de Jonge, V. N. (2020). Risk assessment as tool for coastal erosion management. *Ocean & Coastal Management*, 186, 105099. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105099>
- Reghezza-Zitt, M. (2006). La vulnérabilité : un concept problématique. In *La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles. Analyses géographiques* 35-40.
- Reghezza-Zitt, M., Rufat, S., Djament-Tran, G., Le Blanc, A., & Lhomme, S. (2012). What Resilience Is Not: Uses and Abuses. *Cybergeo: European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.25554>
- Regnauld, H. (1999). *Les littoraux*. Armand Colin, 96 p.
- Revell, D. L., Komar, P. D., & Jr., A. H. S. (2002). An Application of LIDAR to Analyses of El Niño Erosion in the Netarts Littoral Cell, Oregon. *Journal of Coastal Research*, 18(4), 792-801.
- Robin, M. (2002). Étude des risques côtiers sous l'angle de la géomatique / Coastal hazards: a GIS approach to the men/nature interaction. *Annales de géographie*, 627-628, 471-502.
- Robin, M. (2002). Télédétection et modélisation du trait de côte et de sa cinématique. In *Le littoral, regards, pratiques et savoirs* (Editions ENS, p. 95-116).
- Robin, M., Juigner, M., & Audère, M. (2019). Assessing Surface Changes between Shorelines

from 1950 to 2011: The case of a 169-km Sandy Coast, Pays de la Loire (W France). *Journal of Coastal Research*, 88, 121-134.

Robin, N., Billy, J., Castelle, B., Hesp, P., Laporte-Fauret, Q., Lerma, A. N., Marieu, V., Rosebery, D., Bujan, S., Destribats, B., & Michalet, R. (2020). Beach-dune Recovery from the Extreme 2013-2014 Storms Erosion at Truc Vert Beach, Southwest France: New Insights from Ground-penetrating Radar. *Journal of Coastal Research*, 95(sp1), 588. <https://doi.org/10.2112/SI95-115.1>

Roche, A., Taureau, F., Deniaud, Y., Gouguet, L., & Bocquier, L. (2015). Prise en compte des cordons naturels dans la prévention des aléas côtiers. *La Houille Blanche*, 101(3), 79-84. <https://doi.org/10.1051/lhb/20150037>

Roelvink, D., Reniers, A., van Dongeren, A., van Thiel de Vries, J., McCall, R., & Lescinski, J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*, 56(11), 1133-1152. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.08.006>

Sallenger, A. H., Krabill, W. B., Swift, R. N., Brock, J., List, J., Hansen, M., Holman, R. A., Manizade, S., Sontag, J., Meredith, A., Morgan, K., Yunkel, J. K., Frederick, E. B., & Stockdon, H. (2003). Evaluation of Airborne Topographic Lidar for Quantifying Beach Changes. *Journal of Coastal Research*, 19(1), 125-133.

Sanson, G., Rochereau, O., & Ravail, B. (2000). Evaluation des dispositifs de secours et d'intervention mis en oeuvre à l'occasion des tempêtes des 26 et 28 décembre 1999. Rapport d'étape de la mission interministérielle, Premier ministre, 38.

Saxena, S., Purvaja, R., Mary Divya Suganya, G., & Ramesh, R. (2013). Coastal hazard mapping in the Cuddalore region, South India. *Natural Hazards*, 66(3), 1519-1536. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0362-7>

Saye, S. E., van der Wal, D., Pye, K., & Blott, S. J. (2005). Beach-dune morphological relationships and erosion/accretion: An investigation at five sites in England and Wales using LIDAR data. *Geomorphology*, 72(1-4), 128-155. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.05.007>

Schoenenwald, N. (2013). Les tempêtes en France et dans les îles Britanniques : des aléas aux événements [Phdthesis, Université Panthéon-Sorbonne - Paris I]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01244764>

Scott, T., Masselink, G., & Russell, P. (2011). Morphodynamic characteristics and classification of beaches in England and Wales. *Marine Geology*, 286(1), 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.mar-geo.2011.04.004>

Sekovski, I., Del Río, L., & Armaroli, C. (2020). Development of a coastal vulnerability index using analytical hierarchy process and application to Ravenna province (Italy). *Ocean & Coastal Management*, 183, 104982. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.104982>

Short, A. D., & Wright, L. D. (1981). Beach systems of the Sydney region. *Australian Geographer*, 15(1), 8-16. <https://doi.org/10.1080/00049188108702791>

- Smith, A., Houser, C., Lehner, J., George, E., & Lunardi, B. (2020). Crowd-sourced identification of the beach-dune interface. *Geomorphology*, 367, 107321. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107321>
- Small, C., Nicholls, R.J., (2003). A global analysis of human settlement in coastal zones. *J. Coast. Res.* 19 (3), 584-599. *J. Coast. Res.* 19 (3), pp. 584-599.
- Sousa, P. H. G. O., Siegle, E., & Tessler, M. G. (2013). Vulnerability assessment of Massaguaçu Beach (SE Brazil). *Ocean & Coastal Management*, 77, 24-30. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2012.03.003>
- Sogreah, (2012). Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire, 98 p. http://www.pays-de-la-loire.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Fascicule_D_Synthese_032012.pdf
- Soubeyroux, J.-M., Dosnon, F., Richon, J., Schneider, M., & Lassegues, P. (2017). Caractérisation à haute résolution spatiale des tempêtes historiques en métropole : Application à la tempête zeus du 6 Mars 2017. *Climatologie*, 14, 96-106. <https://doi.org/10.4267/climatologie.1282>
- Spielman, S. E., Tuccillo, J., Folch, D. C., Schweikert, A., Davies, R., Wood, N., & Tate, E. (2020). Evaluating social vulnerability indicators: criteria and their application to the Social Vulnerability Index. *Natural Hazards*, 100(1), 417-436. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03820-z>
- Splinter, K. D., Kearney, E. T., & Turner, I. L. (2018). Drivers of alongshore variable dune erosion during a storm event: Observations and modelling. *Coastal Engineering*, 131, 31-41. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.10.011>
- Stéphan, P., Dodet, G., Tardieu, I., Suanez, S., & David, L. (2018). Dynamique pluri-décennale du trait de côte en lien avec les variations des forçages météo-océaniques au nord de la Bretagne (baie de Goulven, France). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 24(vol. 24-n° 1), 79-102. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.11908>
- Stéphan, P., Blaise, E., Suanez, S., Fichaut, B., Autret, R., Floc'h, F., Cuq, V., Le Dantec, N., Ammann, J., David, L., Jaud, M., & Delacourt, C. (2019). Long, Medium, and Short-term Shoreline Dynamics of the Brittany Coast (Western France). *Journal of Coastal Research*, 88(sp1), 89. <https://doi.org/10.2112/SI88-008.1>
- Struillou, J.-F., & Hutten, N. (2021). Le juge administratif, le littoral et la mer après la loi ELAN. *Lexis Nexis/Litec*. <https://www.decitre.fr/livres/le-juge-administratif-le-littoral-et-la-mer-apres-la-loi-elan-9782711035861.html>
- Suanez, S., Cariolet, J.-M., & Fichaut, B. (2010). Monitoring of recent morphological changes of the dune of Vougot beach (Brittany, France) using differential GPS. 78(1), 12.
- Suanez, S., & Cariolet, J.-M. (2010). L'action des tempêtes sur l'érosion des dunes : les enseignements de la tempête du 10 mars 2008. *Noréis. Environnement, aménagement, société*, 215, 77

99. <https://doi.org/10.4000/norois.3212>

Suanez, S., Blaise, E., Cancouët, R., & Floc'h, F. (2016). Empirical Parameterization of Wave Runup and Dune Erosion during Storm Conditions on a Natural Macrotidal Beach. *Journal of Coastal Research*, 75(sp1), 932-936. <https://doi.org/10.2112/SI75-187.1>

Symonds, G., Huntley, D. A., & Bowen, A. J. (1982). Two-dimensional surf beat: Long wave generation by a time-varying breakpoint. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 87(C1), 492-498. <https://doi.org/10.1029/JC087iC01p00492>

Thieler, E. R., & Hammar-Klose, E. S. (2000). National assessment of coastal vulnerability to sea-level rise; preliminary results for the U.S. Gulf of Mexico Coast. Open-File Report. <https://doi.org/10.3133/ofr00179>

Thieler, E. ., Himmelstoss, E. ., Zichichi, J. ., & Ergul, A. (2009). The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0—an ArcGIS Extension for Calculating Shoreline Change. <https://doi.org/10.3133/ofr20081278>

Thom, B. G., & Hall, W. (1991). Behaviour of beach profiles during accretion and erosion dominated periods. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16(2), 113-127. <https://doi.org/10.1002/esp.3290160203>

Toimil, A., Losada, I. J., Camus, P., & Díaz-Simal, P. (2017). Managing coastal erosion under climate change at the regional scale. *Coastal Engineering*, 128, 106-122. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.08.004>

van de Graaff, J. (1977). Dune erosion during a storm surge. *Coastal Engineering*, 1, 99-134. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(77\)90010-2](https://doi.org/10.1016/0378-3839(77)90010-2)

van Rijn, L. C. (2011). Coastal erosion and control. *Ocean & Coastal Management*, 54(12), 867-887. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2011.05.004>

Vellinga, P. (1986). Beach and dune erosion during storm surges. *Delft Hydraulics Communications*, 372, 200.

Veyret, Y., & Reghezza-Zitt, M. (2005). Aléas et risques dans l'analyse géographique. *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, 61-69.

Vigneron, E. (1997). *Géographie et statistique*. Presses universitaires de France. Paris.

Wheaton, J. M., Brasington, J., Darby, S. E., & Sear, D. A. (2010). Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(2), 136-156. <https://doi.org/10.1002/esp.1886>

Welsh, M. (2014). Resilience and responsibility: governing uncertainty in a complex world. *The Geographical Journal*, 180(1), 15-26. <https://doi.org/10.1111/geoj.12012>

Wolman, M. G., & Miller, J. P. (1960). Magnitude and Frequency of Forces in Geomorphic Processes. *The Journal of Geology*, 68(1), 54-74.

Wright L. D. & Short A. D. (1983). "Morphodynamics of beaches and surf zones in Australia" in Komar, P. D., and Moore, J. R. CRC handbook of coastal processes and erosion. Boca Raton, Fla.: CRC Press. 35-64.

Yousef, A., Iftekharruddin, K. M., & Karim, M. A. (2013). Shoreline extraction from light detection and ranging digital elevation model data and aerial images. *Optical Engineering*, 53(1), 011006. <https://doi.org/10.1117/1.OE.53.1.011006>

Zaninetti, J.-M. (2006). L'urbanisation du littoral en France. *Population Avenir*, n° 677(2), 4 8.

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(1), 37 52. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.15315>

Zhu, Z.-T., Cai, F., Chen, S.-L., Gu, D.-Q., Feng, A.-P., Cao, C., Qi, H.-S., & Lei, G. (2019). Coastal Vulnerability to Erosion Using a Multi-Criteria Index: A Case Study of the Xiamen Coast. *Sustainability*, 11(1), 93. <https://doi.org/10.3390/su11010093>

Zuzek, P. J., Nairn, R. B., & Thieme, S. J. (2003). Spatial and Temporal Considerations for Calculating Shoreline Change Rates in the Great Lakes Basin. *Journal of Coastal Research*, 125 146.

Annexes

Annexe 1 : Monitoring and management of coastal hazards

Annexe 2 : Un nouvel indicateur de prédisposition au risque d'érosion côtière

Annexe 3 : Synthèse de la prédisposition des enjeux au risque d'érosion



Contents lists available at ScienceDirect

Annexe 1

Ocean and Coastal Management

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ocecoaman

Monitoring and management of coastal hazards: Creation of a regional observatory of coastal erosion and storm surges in the pays de la Loire region (Atlantic coast, France)



Riwan Kerguillec^{*}, Morgane Audère, Agnès Baltzer, Françoise Debaine, Paul Fattal, Martin Juigner, Patrick Launeau, Baptiste Le Mauff, Florent Luquet, Mohamed Maanan, Pierre Pouzet, Marc Robin, Nicolas Rollo

UMR 6554 CNRS, Laboratoire Environnement Télédétection Géomatique Nantes, Université de Nantes, Chemin de la Censive du terre, BP 81 227, 44 312, Nantes, France

ARTICLE INFO

Keywords:

Coastal observatory
Coastal erosion
Storm surges
Governance
Risk management
Topo-bathymetric LiDAR

ABSTRACT

The OR2C (Observatoire Régional des Risques Côtiers) is a new observatory of coastal hazards located in the Pays de la Loire region on the Atlantic coast of France. It was created, in 2016, in a context of high regional vulnerability to coastal erosion and storm surges. The OR2C is in charge of monitoring nearly 400 km of coastline. Its major mission is to reinforce the scientific knowledge and improve tools for managing coastal hazards, reducing thus exposure to risks. Its set-up is also related to the need of a regional body to gather all parties involved in monitoring and managing coastal hazards, with the aim to create a regional dynamic of observation. The OR2C is a decisional governance that creates a strong interface between academics and managers because it combines public institutions, research centers, decisional bodies, and operational bodies. This governance strengthens the dynamic of observation of coastal erosion and storm surges along the regional coast by improving the networking of the OR2C twenty-eight members. Monitoring strategy is based on an airborne LiDAR technology that provides annual topo-bathymetric data. One of the OR2C first actions was to establish an initial LiDAR acquisition survey (t0) in 2016 along 140 km of sandy coasts. The obtained data are updated every year and freely accessible to the coastal managers. The data are also used in an innovative toolbox of spatial analysis of coastal risks (MAP-RISC), which has an ability to map predisposition of coastal sectors exposed to coastal hazards. MAP-RISC provides several indicators to support decision-making, and could also be used in the future to update policies or strategic documents.

1. Introduction

Since the 19th century, new forms of urbanization have emerged including widespread tourism, in France and other developed countries (Dowling and Pforr, 2009). After World War II, urban development in both coastal zones and ports greatly increased. This new dynamic, known as littoralization (i.e. movement of humans and activities towards coasts), provoked spatial extension of built-up areas on coastal fringes (Deboudt, 2010; Le Berre et al., 2016). In France, the spatial extension dynamic has largely increased human vulnerability to coastal erosion and storm surges, so that the French coast is considered a prime example of an at-risk territory (Deboudt, 2010).

In this context, monitoring the shoreline and studying closely coastal hazards have become essential to provide long-term data for coastal evolution and risk management (Ruggiero et al., 2000; Rieb and

Walker, 2001; Meur-Ferec et al., 2008; Suanez et al., 2012), especially from the perspective of sea level rise in relation to climate change, which exacerbates the vulnerability of the most exposed areas (Neumann et al., 2015). Observatories of regional shoreline and coastal hazards have emerged in France since the 2000s to provide fundamental knowledge on coastal phenomena and homogenous long-term quality data in a coherent time scale. According to the classification of Suanez et al. (2012), these observatories can be defined by several characteristics that refer to their spatial limits (i.e. spatial extension), durability, data acquisition conditions (e.g. equipment, protocols, frequency and planning), and main missions. In France, regional observatories are perennial monitoring structures established at a regional level (i.e. more than 100 km of coastline) providing long-term homogeneous quality data, regularly updated. Their main missions are: giving access to the data to a wide audience; conducting scientific

^{*} Corresponding author.

E-mail address: riwan.kerguillec@univ-nantes.fr (R. Kerguillec).

<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.104904>

Received 25 January 2019; Received in revised form 23 July 2019; Accepted 24 July 2019

Available online 31 July 2019

0964-5691/ © 2019 Elsevier Ltd. All rights reserved.

studies with the aim of strengthening the scientific knowledge on coastal risks; and, in some cases, carrying out coastal expertise.

The OR2C (Observatoire Régional des Risques Côtiers/Regional Coastal Hazards Observatory) is a new regional observatory of coastal hazards located in the Pays de la Loire region on the Atlantic coast of France. This observatory is the most recent to be set up in France and its main objective is to collect, strengthen, and transmit scientific knowledge and data on coastal erosion and storm surges.

The OR2C was set up post-storm Xynthia to improve the existing tools used for coastal hazard management. Being part of a decentralization program of coastal risk management, the OR2C implements a regional shoreline management based on the French State strategies (Deboudt, 2010). Furthermore, the OR2C was created to respond to the need for a regional branch that combines the dynamic of observation engaging all involved parties in the study, management of coastal hazards, and promotion of collective actions.

The major aim of this paper is to present the context for setting up the OR2C and its conditions of deployment. It also focuses on the governance of the OR2C and describes its missions. The second aim is to highlight the main actions carried out since 2016 and the main outcomes. The paper gives an overview of the tools provided by the OR2C for acquisition, update, processing, storage, and transmission of data. The paper also highlights an observatory model based on an original network founded in close relationships from a local to a regional level and vice-versa (e.g. data exchange, synergies, feedback, etc.).

2. Background

2.1. Regional settings

The OR2C is located on the Atlantic French coast, extending from Pont-Mahé Bay in the north to L'Aiguillon Bay in the south. The coast is bounded by two islands located not far from the mainland (i.e. Noirmoutier Island, Yeu Island). Its general axis is orientated NW-SE and the elevation is mostly less than 10–20 m. The continental shelf is maximum 200 km wide with a water depth of less than 20 m for several kilometers off the mainland coast. The coast comprises three main coastal facies (i.e. two natural and one artificial), with 140 km sandy and 111 km rocky coasts, and 135 km present coastal defenses (Juigner, 2017) (Fig. 1).

The regional coast can be divided into two sections. The northern section, extending from Pont-Mahé Bay to Les Sables d'Olonne, is situated on the southern margin of the Massif Armoricaïn. It corresponds to the rocky coasts (i.e. low elevated rocky coasts or cliffs of less than 20 m elevation) that are locally very sensitive to erosion processes in relation to the terrain nature. As an example, the case of the small clay cliff of Bayadène, located south of Pont-Mahé Bay, which is regularly affected by mass movements threatening several houses. A large part of the coastal length of the first section is represented by marshes barred by dune ridges or moles protecting salt production areas, or even polders established during the 18th and 19th centuries (e.g. west of the Breton marsh; Noirmoutier Island) (Verger, 2011). The southern section, extending from Les Sables d'Olonne to L'Aiguillon Bay, is part of the northern margin of the Bassin Aquitain (Juigner, 2017; Ters, 1961). It is characterized by large low-lying areas barred by complex dune ridges (i.e. multiple successive dune ridges), sand spits, or moles (e.g. the Marais Poitevin in particular, the largest French Atlantic wetland).

The regional coastline is subjected to mesotidal and macrotidal semi-diurnal tides (Pirazzoli, 2000), and exposed to North Atlantic marine weather influences, with main WNW and SW winds (Juigner et al., 2017). Stormy conditions occur from November to March. Winter storms may be the main cause of the strong shoreline retreats (Gautier, 1979; Fattal et al., 2010; Juigner, 2017) (Fig. 2A). As Juigner et al. (2017) stated, the Pays de la Loire region sandy coasts experience strong long-term trends in shoreline position changes (from $+5.1 \pm 0.35$ m/y to -1.5 ± 0.35 m/y within the period

1950–2011). Several sites, essentially located in the Vendée Department (i.e. south east of the Pays de la Loire region), are closely monitored because they are vulnerable to erosion (Fig. 2A) (DHI and GEOS, 2007). These sites are essentially sandy coasts. The rocky coasts are unsurprisingly less sensitive to fast shoreline retreat with a change rate of ± 0.35 m/y over the same period, as suggested by the French national Indicator of Coastal Erosion (MEDDE, 2016).

The Pays de la Loire region is particularly well known for its vulnerability to storm surges (Chevillot-Miot and Mercier, 2014; Juigner, 2017). This vulnerability is largely explained by the extent (i.e. approximately 200 000 ha) of the low-lying areas (Perherin et al., 2010) subjected to a high level of urbanization. In this region, the second half of the 20th century experienced the strongest urbanization growth of the coastal zone, including the low-lying areas (Pottier, 2007; Juigner et al., 2017; Chauveau et al., 2011b). Juigner et al. (2017) noticed that buildings represent a significant part of the coastal zone land cover, with 23% of the regional coastal municipality area urbanized in 2007 (DREAL, 2007). Breaching of coastal dunes is a determinant factor for storm surge risks in the Pays de la Loire region (Devaux et al., 2012; DREAL, 2012; Juigner et al., 2017) (Fig. 2B).

One of the most dramatic coastal flood events of the last 10 years was storm Xynthia that occurred in February 2010. This storm hit the French Atlantic coast between the Loire estuary and the Gironde estuary where sea levels were recorded with 100-year recurrence intervals (e.g. a surge of over 1.50 m was recorded at La Rochelle) (Jacquet et al., 2016). The storm wind force, high spring tide, and wave setup (Bertin et al., 2015) were recognized as the main causes of these high water levels. Xynthia resulted in significant coastal flood along the urbanized coasts of the Vendée and Charente-Maritime departments (Anziani, 2010; Chadenas et al., 2011; Chauveau et al., 2011a and b; Vinet et al., 2012a; Kolen et al., 2013; Chadenas et al., 2014). The flood caused 47 deaths in France and is regarded as one of the most dramatic natural disasters in France in recent decades. La Faute-sur-Mer and L'Aiguillon-sur-Mer (Vendée Department) counted 29 deaths and experienced severe damages. During storm Xynthia, many coastal dunes were affected by breaches (e.g. Guerande marsh, Breton marsh, Belle-Henriette lagoon, etc.) and strong shoreline retreats were also recorded (e.g. retreat records of -5 m in Saint-Hilaire-de-Riez and -15 m in La Tranche-sur-Mer).

2.2. Institutional background

After the French State set the general guidelines down regarding the coastal risk policy in the early 2000s (Deboudt, 2010), the storm surge of 2010 urged the authorities to enhance and complete the national flood prevention policy (Jacquet et al., 2016). In 2011, the French State established a National plan for rapid floods to improve the safety of people living in flood zones (i.e. the National plan for rapid submersions, "Plan Submersions Rapides" or PSR). Created in 2002, the Action Plans for Prevention of Floods, "Plans d'Actions de Prévention contre les Inondations" (or PAPI) a key public policy tool for flood prevention initially designed for continental floods, were extended to storm surges in 2011. The PAPI is a comprehensive flood prevention policy for at-risk areas with the aim to reduce the consequences of storm surges through management partnership between the French State and local authorities. In 2012, the French State also launched a National strategy to implement integrated coastline management of the French coasts ("Stratégie Nationale de Gestion Intégrée du Trait de Côte" or SNGITC). This strategy recommends consolidating the knowledge of coastal hazards in order to enhance the actions performed against the risks. The SNGITC also promotes the regionalization of local strategies, as well as a real territorial strategy to reduce the exposure to coastal risks.

Difficulties of coastal risks are both national and European. European legislation and policies provide a strategic framework for all aspects of spatial planning and development within the European Union, including coastal hazards (e.g. Flood directives in 2006). Since

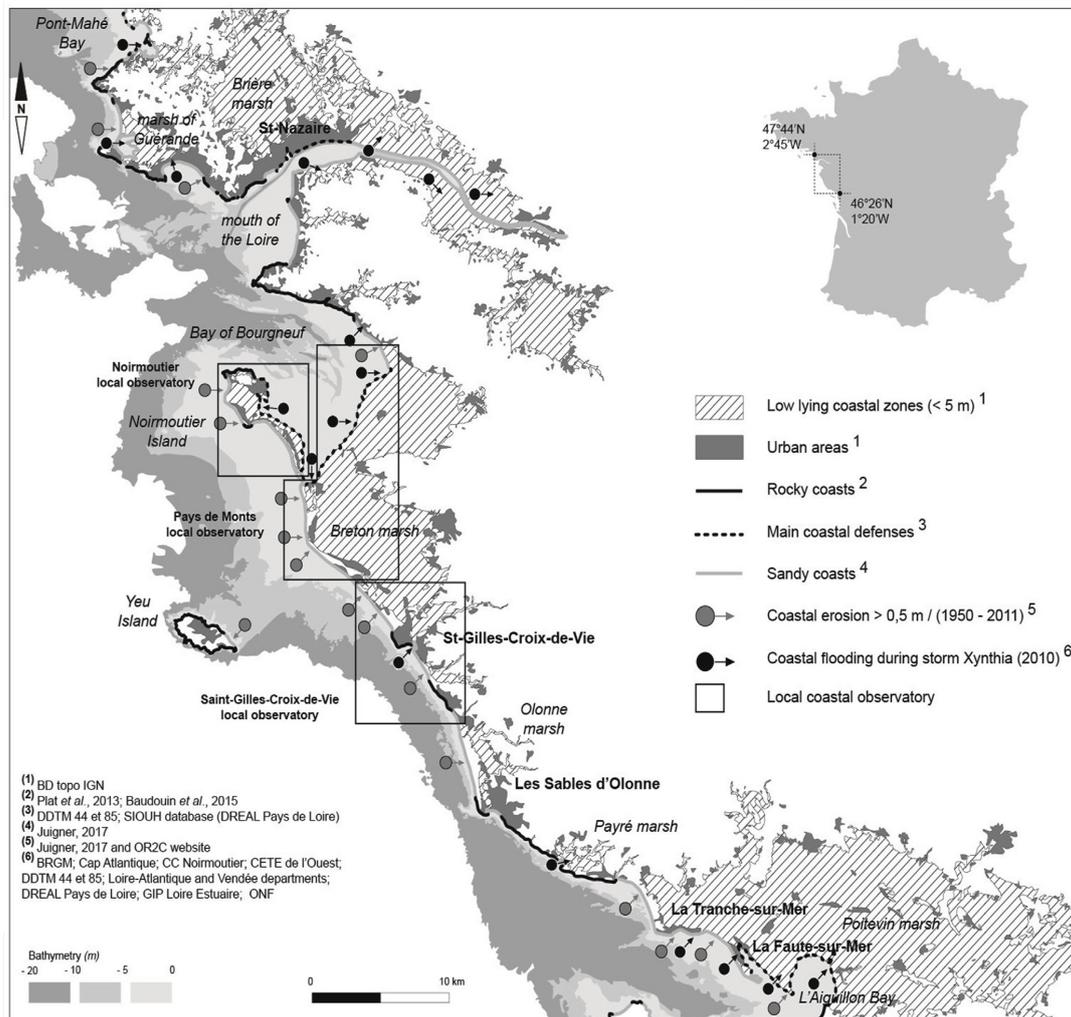


Fig. 1. Hazards and vulnerability of the coastal area monitored by the OR2C since 2016 (Baudouin et al., 2015; Plat et al., 2013).



Fig. 2. A. An erosional dune cliff at Les Becs in the Vendée Department after the stormy winter of 2013/2014 (© OR2C - M. Juigner 2014). B. The dramatic storm surge at La Faute-sur-Mer during storm Xynthia, February 2010 (© DDTM 85, 2010).

the early 2000s, the European Union has also supplemented numerous recommendations based on data provided by some research programs (e.g. recommendations for Integrated Coastal Zone Management in 2002 and Euroisn program in 2004). However, monitoring techniques are still poorly applied in Europe. Furthermore, there is a significant gap between Northern and Southern Europe in using systematic coastal monitoring techniques. For example, the United Kingdom and Netherlands have advanced programs for coastal monitoring using

mainly airborne LiDAR technology or video systems.

In the United Kingdom, the establishment of new legislation in the 2000s (e.g. European Flood Directive adopted in 2007) emphasized by significant vulnerability of coastal populations to storm surges and coastal erosion have resulted in the creation of a national strategy for coastal management. The Environment Agency, in partnership with local authorities and other services (e.g. the National Trust), has developed storm surges and coastal erosion management strategies, which identify and evaluate different options for putting management policies into practice. The British government has adjusted this strategy, adapting it to coastal erosion, storm surges, and sea level rise at different spatial and time scales. Therefore, the entire coastline in England and Wales is monitored. The coast is divided into coastal cells which fit in to a Shoreline Management Plan (SMP) with the aim of reducing exposure of populations, properties, and environments at risk of erosion and storm surges. Several options of implementing management policies are applied within each cell at three time scales for the next 25, 50, and 100 years (LICCO, Conservatoire du littoral and Syndicat Mixte Littoral Normand, 2014; Bermon et al., 2016).

In the Netherlands, coast protection and management are the prime concern considering that an important part of the coast is low-lying,

vulnerable to coastal flooding, inhabited by 60% of the population (Isle of Wight Council, 2005). A national strategy for low-lying land protection has started in the 1990s, including a Parliament policy to stop coastal recession. A “basal coastline” was determined on the 1st January 1990 followed by several actions conducted to prevent further coastal retreat (e.g., annual coastal measurements and comparison with “basal coastline”; preventive actions such as sand nourishment, close cooperation between Central Government, coastal water boards, Provincial Authorities, and coastal consultative bodies). The “basal coastline” has been almost maintained with this strategy (i.e., in 1990, 30% of the coast was landward of the “basal coastline”, and in 2000, 10%). Measurements in 3D have been conducted since 1998 to improve coastal sand transport movement and morphodynamic understanding, providing thus new information and tools for coastal zone practices.

In contrast, Portugal and Greece apply fewer coastal monitoring techniques; they even limit their applications to experimental research projects. In France, these techniques have been applied only in recent years (e.g. CLAREC project between 2008 et 2013; airborne LiDAR survey by the DREAL Languedoc-Roussillon in 2009; airborne LiDAR acquisition survey by the OR2C since 2016; Litto 3D monitoring by the coastal observation network, Normandie-Hauts-de-France regions since 2017).

In the Pays de la Loire region, local initiatives for monitoring shoreline and coastal hazards were launched in the late 1990s. Since 1998, the University of Nantes has conducted annual beach surveys in Les Sables d'Olonne. Moreover, the Community of Communes of Noirmoutier Island created Noirmoutier Coastal Observatory in 1999. In addition, more recently, Pays de Monts coastal observatory has been collaborating since 2009 with the National Forests Office (ONF), the French Geological Survey (BRGM), and the University of Nantes, following a decision of elected local officials. Their combined expertise allows the development and perpetuation of time-series data acquisitions (i.e. DGPS, LiDAR, hyperspectral imagery, bathymetry) (Le Guern et al., 2011, 2012, 2013). Their actions also make the 3 local observatories' decision support structures in coastal management.

Six years after storm Xynthia, the Pays de la Loire region decided to create a regional observatory of coastal hazards in accordance with the National strategy. Named the OR2C, the observatory has been funded by the council of Pays de la Loire region since 2016 and also by the Authority of Environment, Planning and Housing of the Pays de la Loire region since the end of 2018 (“Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement” or DREAL). The deployment of the OR2C fits into a general context of regional coastal observatories development in France. The observatories are promoted at present day because they are perennial in providing a precious scientific knowledge for coastal hazard management. Five regional observatories, found along the French coast, monitor a total of 2600 km of coastline (Fig. 3). Two other observatories are currently in progress: the OSIRISC project in the Brittany region and a project supervised by the BRGM (i.e. French Geological Survey) on the Occitanie region coastline South of France.

In the national and European context, the experience of the OR2C is therefore very recent compared to other French observatories having longer coastal action experience, such as the Observatory of the Aquitaine Coast (OCA), which has been acting for 20 years. However, the OR2C has several characteristics of governance: the network to which it belongs; its general organization; and its data acquisition processes. These characteristics ascribe a model observatory to the OR2C based on an original network.

3. Governance and structure

3.1. Governance and regional network

The governance of the OR2C includes two different levels. The first is a decision-making steering committee whereas the second is a technical committee (Fig. 4). Both committees meet up three times a year,

but also convene in cases of extreme weather events. The animation of the OR2C is entrusted to the OSUNA (“Observatoire des Sciences de l'Univers Nantes Atlantique”), a department in the University of Nantes. The animation team is composed of three dedicated research engineers, one of whom is the project coordinator, another is a coastal hazard specialists and the last is a GIS-web specialist. There are also seven senior lecturers and four PhD students from the University of Nantes.

The steering committee is comprised of seven members from the regional commission for sustainable management of the shoreline (“Commission Régionale de Gestion Durable du Littoral” or CRGDL). Created in 2015, this commission assembles the regional and department Authorities (council of Pays de la Loire region, council of Loire-Atlantique, and Vendée Departments) as well as four State Authorities (Department of Regional Affairs, Authority for Environment, Planning and Housing; Department Authorities for Territories and Sea of the Loire-Atlantique and Vendée). Thus, the commission is highly political, working closely with the State authorities, and other services for the Pays de la Loire region and departments. The steering committee makes all the decisions concerning the OR2C, and oversees the latter's development. Its role is to define the strategy of the OR2C and to ensure its political representation.

The technical committee is an advisory body, which expresses opinions on the OR2C questions and projects before their submission to the steering committee. The members have also the opportunity to present their work during the committee meetings (e.g. research, projects, protocols, equipment requirements, etc.). The technical committee consists of twenty-one members in addition to those belonging to the steering committee (Fig. 4). The technical committee brings together the main stakeholders involved in the study and management of coastal risks, including many topics such as geology and geophysics, marine hydrology and oceanography, coastal vegetation, and other scientific researches. Thus, the main institutions concerned with coastal hazards in France are represented in the committee. The committee also comprises nine PAPI managers, whom are in fact local authorities present on the Pays de la Loire region coast (i.e. communities of communes or communities of agglomerations). Also, it comprises three other members: the first member is from the Pays de la Loire region data center (i.e. GEOPAL, <https://www.geopal.org/>); the second member is from the coastal observation network Normandie-Hauts-de-France regions (“Réseau d'Observation du Littoral Normandie-Hauts-de-France” or ROL); and the third member is from the OSIRISC regional project in charge of the preliminary study for setting up a coastal regional observatory in Brittany region.

The governance of the OR2C is unique in France because it combines public institutions (e.g. SHOM,¹ IGN,² ONF³), research centers (e.g. IFSTTAR,⁴ CEREMA,⁵ University of Nantes), decisional bodies (i.e. State, regional and department authorities), and operational bodies (i.e. PAPI managers). This governance is currently the only one in France that has chosen to include PAPI managers. This choice is justified by their vested interest in coastal hazards under their responsibility area (overseeing moles and coastal defenses, monitoring shoreline, etc.). Three among the PAPI managers also take in charge local coastal observatories (i.e., three coastal observatories: Noirmoutier Island; Pays de Monts; and Saint-Gilles-Croix-de-Vie).

The governance strengthens OR2C operations at the local level, in accordance with its goal, which promotes coastal risks observation dynamic along the regional coast, at a short, medium, and long term. Therefore, the OR2C gives a global and coherent overview of coastal

¹ SHOM: Oceanographic and Hydrographic service of the French Marine.

² IGN: National Geographic and Forest Information Institute.

³ ONF: National forests office.

⁴ IFSTTAR: French Institute of Sciences and Technology for Transport, Development and Networks.

⁵ CEREMA: expertise center for risks, environment, mobility and planning.

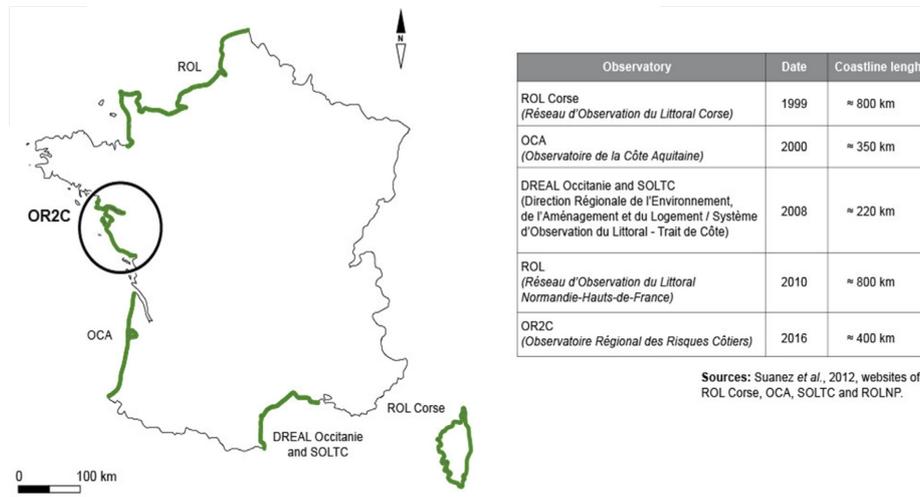


Fig. 3. Establishment year and coastline length of regional French coastal observatories.

hazards in the Pays de la Loire region. The governance also helps to improve OR2C members networking as well as the knowledge and management of coastal risks. The OR2C has thus a strong territorial dimension. The OR2C missions and partnerships have recently been formalized by a charter outlining its objectives and specifying the scope of its actions (e.g. geographic, thematic implications).

Moreover, the OR2C collaborates with the regional coastal observation network of Normandie-Hauts-de-France regions (i.e. ROL). The latter, established in 2010, acts as a technical committee member of the OR2C and is also involved in the National integrated coastline management strategy. In addition, the OR2C participates in several actions of the National network of coastal observatories (“Réseau National des Observatoires du Trait de Côte” or RNOTC) and integrates the interregional and National networks of coastal observatories.

3.2. A modular structure

The actions of the OR2C are conducted according to a modular structure, with six different technical or thematic elements called “Modules” (Fig. 5).

The major aim of Module 1 is to produce a comprehensive inventory of coastal hazards data in the Pays de la Loire region, but also to identify the needs in order to better target and prioritize the acquisitions. This module uses a thorough bibliographic research, questionnaires, and interviews conducted with the twenty-eight OR2C members. Module 1 is regularly updated along with an inventory of available equipment for coastal hazards studies and monitoring in the Pays de la Loire region.

Module 2 is entitled “Structuring and acquisition of the scientific knowledge of coastal hazards”. As its name suggests, this module aims to strengthen the scientific knowledge with acquisition of new data, and also organize and transmit knowledge on coastal hazards. This module is responsible for the LiDAR airborne acquisitions performed by the OR2C and is intended to provide data chronically (i.e. every year) or following an extreme event. The OR2C website was also designed and created within this module as a major vector for transmitting information and data.

Module 3 is thematic and deals with the history of coastal hazards in the Pays de la Loire region. It was carried out in the context of two PhD theses at the University of Nantes. The goal of the first thesis was to provide information on past extreme storm events (i.e. paleo-storms) and reconstruct paleo-storm chronology based on sediment analysis and dendrochronology. The project was achieved using sediment cores

sampled in marshes that had not been subjected to humans’ impacts before the 19th century (Pouzet, 2018; Pouzet et al., 2018b). The objective of the second thesis was to study historical storms and their impacts on coastal societies through historical documents (Athimon, 2019).

Module 4 deals with geoindicators of coastal hazards. Its main purpose is to provide geoindicators using a spatial toolbox analysis capable of detecting coastal areas exposed to coastal erosion and/or storm surges (i.e. MAP RISC, see below). This tool has a high accuracy because it provides information within spatial units 25 m wide. The tool was developed as part of a PhD thesis conducted on the sandy coasts of the Pays de la Loire region (Juigner, 2017). It was then deployed by the OR2C as a coastal spatial analysis toolbox in open access on the OR2C website. The tool development as part of the OR2C has automated all the necessary treatments for the creation of the spatial units along the coast, the calculation and combination of geoindicators. The tool’s final objective is to guide coastal managers in making a precise assessment of the most exposed zones in order to set up preventive measures (e.g. coastal defenses, beach nourishment or reshaping, relocation, etc.).

Module 5 is a communication and enhancement module in which all the OR2C actions of communication are organized (e.g. TV reports, radio programs, press releases, updating of the OR2C website, newsletters, etc.).

Module 6 is a recently added thematic module that analyzes the relationship between biodiversity and coastal hazards, considering biodiversity as particularly vulnerable in coastal zones especially in the changing climate context. This module aims to strengthen the knowledge of the dynamics of coastal vegetation communities, and also to assess the consequences of disturbances induced on vegetation communities by natural and anthropogenic pressures.

4. Missions and results 2016–2018

The actions conducted by the OR2C since 2016 are compatible with its three main missions (Fig. 5). The first mission is to reinforce the scientific knowledge of coastal hazards, according to the recommendations of the National integrated coastline management strategy which can be summarized as follows: “to know better to better act”; the second mission aims to organize and transmit this knowledge in multiple ways to a large public and especially to coastal managers. The last mission is to federate a regional dynamic of observation in the Pays de la Loire region and to promote collective actions, according to the recommendation of the National strategy.

The governance of the OR2C



The partnership of the OR2C (28 members)

3 Others members

- GEOPAL ⁽¹⁾
- OSIRISC ⁽²⁾
- ROL ⁽³⁾

9 PAPI ⁽⁴⁾ managers

(i.e. local authorities, see the map)

- PAPI Cap Atlantique
- PAPI Carene
- PAPI Ocean-Marais-de-Monts
- PAPI Noirmoutier
- PAPI Pays de Saint-Gilles
- PAPI des Olorannes
- PAPI Marais du Payré
- PAPI Bassin du Lay
- PAPI Vendée-Sèvre-Autizes

4 State authorities

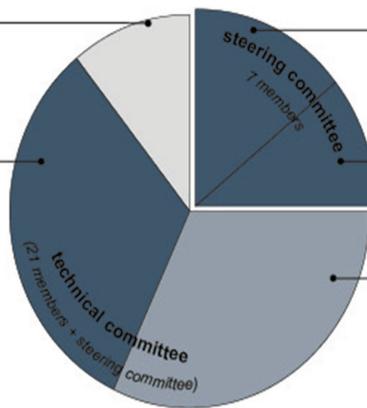
- SGAR ⁽⁵⁾
- DREAL of Pays de la Loire region ⁽⁶⁾
- DDTM Loire-Atlantique ⁽⁷⁾
- DDTM Vendée

Regional and department authorities (see the map)

- Council of Pays de la Loire Region
- Council of Loire-Atlantique Department
- Council of Vendée Department

9 Publics institutions

- Water agency
- French Agency for Biodiversity
- BRGM ⁽⁸⁾
- CEREMA ⁽⁹⁾
- IFSTTAR ⁽¹⁰⁾
- IGN ⁽¹¹⁾
- ONF ⁽¹²⁾
- SHOM ⁽¹³⁾
- University of Nantes



- State, regional, department and local authorities
- Public establishments or institutions
- Others members



⁽¹⁾ GEOPAL: web data center of Pays de la Loire region; ⁽²⁾ OSIRISC: project for a future regional observatory in Brittany Region; ⁽³⁾ ROL: Réseau d'Observation du Littoral Normandie-Hauts-de-France (regional coastal network of Normandie-Hauts-de-France regions); ⁽⁴⁾ PAPI: Programmes d'Action de Prévention contre les Inondations (action plans for prevention of floods); ⁽⁵⁾ SGAR: Secrétariat Général aux Affaires Régionales (department of regional affairs); ⁽⁶⁾ DREAL: Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (regional authority of environment, planning and housing); ⁽⁷⁾ DDTM: Direction Départementale des Territoires et de la Mer (department authority of territories and sea); ⁽⁸⁾ BRGM: Bureau de Recherches Géologiques et Minières (french geological survey); ⁽⁹⁾ CEREMA: Centre d'Etude et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (expertise center for risks, environment, mobility and planning); ⁽¹⁰⁾ IFSTTAR: Institut Français des Sciences et Technologies des Transport, de l'Aménagement et des Réseaux (French Institute of Sciences, Transports, Planning and Networks); ⁽¹¹⁾ IGN: Institut National de l'Information Géographique et Forestière (national institute of geographic and forest information); ⁽¹²⁾ ONF: Office National des Forêts (forests national office); ⁽¹³⁾ SHOM: Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (Naval Hydrographic and Oceanographic Service).

Fig. 4. The OR2C governance and partnership. Geographical location of the Pays de la Loire region in France, showing the departments and local authorities of the OR2C.

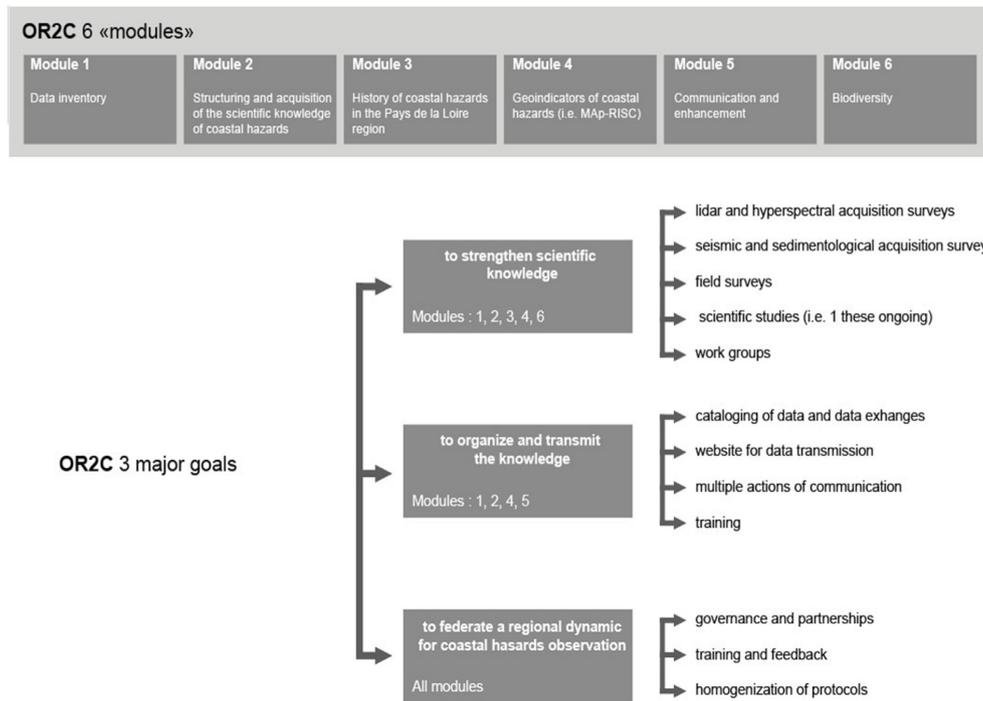


Fig. 5. The six modules and three goals of the OR2C.

4.1. First mission: strengthen the scientific knowledge

Module 1, from March 2016 to March 2017, provided an overview of available data in the Pays de la Loire region (Robin and Kerguillec, 2017). This work also showed that some data were missing or not very recent (e.g. some bathymetric data date to the 18th century). In addition, it considered the needs of the OR2C members, and particularly the requirements of local authorities (e.g. PAPI managers). The needs are essentially related to data, equipment, and training. Therefore, this work targeted the need for new data in order to advice the technical committee members about acquisition surveys.

4.1.1. LiDAR monitoring protocol

Acquisition surveys proposed by the OR2C are widely based on annual topo-bathymetric data carried out using airborne LiDAR technology. One of the first actions was to establish an initial LiDAR acquisition survey (t0) in 2016, using an airborne topo-bathymetric LiDAR (trademark Optech Titan DualWavelength) Titan DW600 acquired by a consortium, jointly founded in 2015 by the Universities of Nantes and Rennes. LiDAR data were collected on all sandy coasts of the Pays de la Loire region by GEOFIT Expert. The acquisition surveys take place every year from March to May and also at the end of summer (i.e. calm weather and reduced turbidity are required). Three LiDAR acquisition surveys have been conducted since 2016, including bathymetric acquisitions in shallow water areas in 2017–2018. In addition, the OR2C offers the opportunity to mobilize the LiDAR during the month following an extreme storm event in order to learn more about resilience of coastal systems (Le Mauff et al., 2018). Furthermore, the LiDAR is coupled to hyperspectral imagery (i.e. ground and airborne mapping, spectrometry) used in Module 6 for mapping vegetation communities and invasive species, and also to extract several indicators of the stability/instability of coastal dunes (Launeau et al., 2018).

Airborne LiDAR surveys register topographic data in three dimensions (Woolard and Colby, 2002; Pye and Blott, 2016) from which many morphometric parameters are extracted (Brock et al., 2004; Saye et al.,

2005). For example, LiDAR technology offers monitoring solutions for beach/dune systems, already tested in the Pays de la Loire region (Le Mauff et al., 2018). Morphometric information is automatically extracted from LiDAR data for large areas (e.g. bases and crests of dunes, coastal dune morphometry, contact and transects of beach/coastal dune, zero-topography, etc.) providing thus valuable information about beaches, coastal dune evolution, and shoreline mobility (i.e. erosion, accretion, stability). The technical committee members may request special flight plans in accordance with their needs. Several requests have already been processed since 2016, particularly in the context of mole monitoring to furnish coastal local authorities' GIS with high precision data or for the development of a PAPI.

4.1.2. Seismic, sedimentological and bathymetric surveys

Because it is essential to consider total sediment flux (sand) from land to sea and from sea to land to understanding resilience possibilities of beaches, the OR2C carried out in 2018 seismic, sedimentological, and bathymetric surveys in the area between the island of Yeu and the mainland (see Fig. 1). This offshore mission was accomplished along with a LiDAR airborne survey to gather land/sea data for an entire hydro-sedimentological cell, and identify the main sand accumulations related to hydrodynamic conditions.

The first step was to acquire high resolution seismic profiles and bathymetry datasets that are used to identify sediments (sand) partitioning. The offshore mission was carried out on the R/V Haliotis (Génavir, IFREMER), which is equipped with interferometric sonar (bathymetry and imagery) and a Chirp system (seismic profiles) fixed to the hull. Bathymetry, imagery, and seismic profiles were simultaneously acquired on board. In order to achieve a centimetric spatial resolution for data positioning, an Aquarius Thales GPS coupled to an RTK beacon fixed in the study zone was used. Raw data were processed with CARAIBES software (IFREMER) to obtain bathymetric maps and sonar mosaics. The seismic profiles were processed with the SUBOP software (IFREMER).

On the north of Yeu Island, a detailed bathymetric map was realized

to delimitate the exact position, shape, and source of the sandy bank “La Sablaire” in 2018. Sedimentological analyses have not yet been completed, but the dune geometry indicated a main transit direction, along the shore, from the west and a potential secondary order from the east. New data acquisitions are planned for June 2019 with the aim to understand rhythmicity of sediment fluxes by seasons and storm events.

4.1.3. History of coastal hazards

The history of risks has been studied with the help of local authorities and the Authority of Environment, Planning and Housing of the Pays de la Loire region (DREAL). Noirmoutier Island local authorities were consulted about building a dense historical storm database (Athimon and Maanan, 2018). Its construction is based on historical archive data acquired during the PhD thesis of Athimon (2019) following the method described by Athimon et al. (2016). The historical research was based on ancient documents preserved in libraries and archives (municipal, department and national). Over 19 888 documents were consulted, from which only 936 (around 5%) contained data on past storms and coastal floods since the 14th century. For the Pays de la Loire region, especially Noirmoutier Island and Olonne, the first well-documented event was the winter storm of the year 1351–1352 with a memorable storm surge.

Using a geophysical approach, Pouzet (2018) also showed that the Pays de la Loire region has experienced extratropical storms during the Holocene. Past storms have been identified in sedimentological and dendrochronological data in sensitive territories (Pouzet et al., 2019, 2018a; 2018b). For instance, the Marais Poitevin, the second largest wetland in France located in a low-lying coastal area, have undergone intense urbanization since 1705 (Pouzet et al., 2015). Urbanization was the main cause that provoked significant damage during the Xynthia event, resulting in 47 deaths in France (Vinet et al., 2012b). Following the method built by Liu and Fearn (1993, 2000), washover marine layers were extracted from lowland coastal depositional environments. Historical and geophysical approaches were crosschecked to produce an innovative method to study extreme past storms and storm surges. The obtained results were accurately matching (Pouzet et al., 2019; Athimon, 2019; Pouzet, 2018): for example, the hurricane of the 14th–15th March 1751 was found in both geophysical and historical archives for the Pays de la Loire region. The accuracy of the results opened new perspectives for reconstruction and characterization of past storms and storm surges.

With precise knowledge of this natural hazard, local authorities may assess the overall coastal risks in an area with historically demographical data. Overlapped with historical data, it helps to enhance adaptation of societies facing storms and coastal flood risks.

4.2. Second mission: organize and transmit the scientific knowledge

The second OR2C mission is to organize and largely transmit the data concerning coastal hazards. All the data acquired by the OR2C progress including the datasets provided by the airborne LiDAR surveys are freely accessible on the OR2C website as DEM (i.e. Digital Elevation Model) or DSM (Digital Surface Model). In fact, these data are stored in a Spatial Data Infrastructure (SDI) created and led by the OSUNA (University of Nantes) with a special dedicated staff. However, data-sharing policy applies with an exchange agreement. Several agreements have been signed with the OR2C members to use the data in their own projects (e.g. coastal studies and research, coastal management and development of the PAPI, etc.). Other agreements have been signed between the OR2C and structures outside the observatory with a general perspective of exchanging data (i.e. an agreement between the OR2C and RTE Company was signed in 2018 for the exchange of seismic, bathymetric and sedimentological data). Therefore, OR2C acts as a multi-destination data provider for offshore development projects, preparation of strategic documents (e.g. PAPI), coastal studies and expertise, or to complement the GIS of local authorities.

4.2.1. The OR2C website

The main vector for transmitting information and data is the OR2C website at: <http://or2c.osuna.univ-nantes.fr/>. Public access to information is a distinctive feature of all regional observatories (Suarez et al., 2012). After being developed over a period of fifteen months, the website was officially inaugurated in early 2018. Its architecture is built around 5 sections (1: OR2C overview; 2: Coast of Pays de la Loire region overview; 3: Coastal hazards; 4: Data and resources; 5: Actualities). The first three sections are respectively dedicated to an overview of the OR2C organization and background, diversity found on the Pays de la Loire region coast, and involved processes and coastal hazards (i.e. coastal erosion and storm surges). The information is essentially informative; the sections supply multiple documents to download (i.e. summary sheets, maps, papers, etc.). These elements can also be downloaded in section 4 “data and resources” which is the website core. This section also includes all the thematic sheets as well as a bibliographic database of more than 600 references. Here, the user can access the spatial toolbox MAP-RISC.

The OR2C website also offers to the user a diachronic analysis of the coastline based on postcards and old photographs from various sources dating to the beginning of the last century (e.g. scientific studies, department archives, private collections, etc.). This application superimposes an old photograph on a recent one taken from the same spot, angle of view, and focal length. Comparison of images highlights the physical coastal dynamics (e.g. coastal erosion or accretion; dynamics

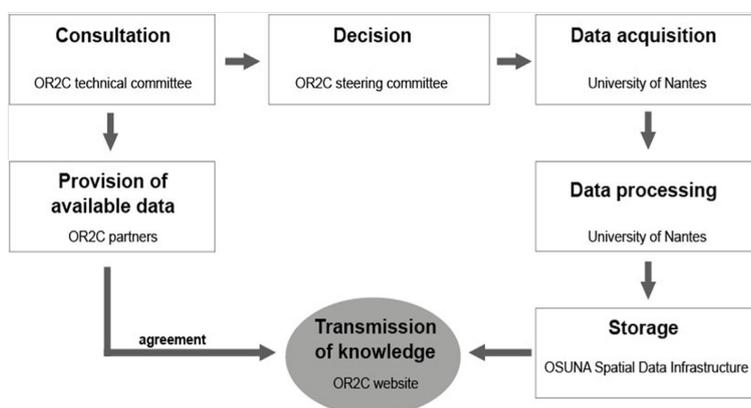


Fig. 6. The OR2C procedure for acquisition and transmission of data.



Fig. 7. Spatial display of two indicators from the MAP-RISC web-page located in the eastern coast of La Tranche-sur-Mer (Vendée). Per spatial unit: A. Coastal erosion (m²) with full spatial units; B. Shortest shoreline-building distance (m) with onshore spatial units.

of vegetation cover, etc.). The diachronic application also shows human effects on the coastline (i.e. land use, urbanization development, etc.). It is also participative by giving the opportunity to the users to share their own photographs.

The successive stages of data acquisition process are shown in Fig. 6. The acquisition surveys are validated by the steering committee after consulting the technical committee. The data are processed and eventually stored in the Spatial Data Infrastructure of the OSUNA, then transmitted by the OR2C website. The technical committee members may also make available their own datasets. Discussions are currently taking place with OR2C members to insert their data in MAP-RISC.

4.2.2. MAP-RISC: a geo-treatment tool for coastal hazard analysis

Considering the vulnerability of the Pays de la Loire region to coastal hazards and following the recommendations of the National integrated coastline management strategy (MEDDTL, 2012), a GIS solution using coastal hazard indicators has been developed and implemented along the coast of the Pays de la Loire region (program DiDUNE founded by the Fondation de France, see applications proposed by Juigner et al., 2017; Juigner and Robin, 2018). The aim of OR2C module 4 is to further develop this program by implementing along the Pays de la Loire coast an original toolbox that computes and maps fine-scale coastal hazard indicators (i.e. 1/5 000e) using GIS techniques.

Geo-treatment tool for coastal risk spatial analysis is called MAP-

RISC (“Module d’Analyse spatiale des RISques Côtiers”, or “spatial analysis system for coastal hazards”). It largely contributes to the specificity of the OR2C. Coastal hazard analysis is documented in the international scientific literature. A large number of publications present GIS solutions to compute coastal hazard indicators and indices (see examples suggested by Saye et al., 2005; Debaine and Robin, 2012; Olsen et al., 2012; Pye and Blott, 2016; Bonetti and Woodroffe, 2017; and the large review proposed by Nguyen et al., 2016).

Indicators are defined here as proxies of environmental changes. In coastal zones, they are used not only to evaluate potential risks and damages but also translate complex coastal observations into an operational, synthetic, and comprehensive form used to help managers and decision-makers in management processes (see Lescinski, 2010; Carapuço et al., 2016).

The method applied here is similar to the one used in rocky coasts by Young and Ashford (2006), sandy coasts by Debaine and Robin (2012), and various coast types in DiDUNE program (see above sections). It consists of a continuous and regular segmentation of the coast into polygons (i.e. spatial units) positioned perpendicularly to the coastline direction. The units obtained are particularly adapted to integrate and aggregate various spatial information types such as geometric primitives (point, polyline and polygon), or raster datasets (Juigner, 2017). Thus, the spatial unit segmentation is suitable to compute and combine multiple indicators extracted from different data sources. The module objective is not to create new dataset, but to exploit existing generic data (e.g. land occupation, topography i.e. LiDAR, orthophotography), and create new spatialized information computed inside each spatial unit.

MAP-RISC is developed with an open-source database management system PostgreSQL and its spatial extension PostGIS in order to incorporate the tool to the web architecture. It allows easy integration in a web map server, and has substantial optimization of computing time performances. The process runs in four steps. The first step examines spatial unit segmentation. Spatial units of 25*100 m are pre-executed along the Pays de la Loire coast. Their creation can be launched through different executions in other coastal territories (see example below). The second step is selecting one existing indicator. At the stage of development, available proxies are relative to: (i) the exposure index suggested by Juigner et al. (2017), i.e. the shortest shoreline-building distance (in meters), the first row building footprint (in square meters), and the coastal erosion estimated between two dates (in square meters); and (ii) susceptibility index of coastal dunes to flooding as proposed by Juigner and Robin (2018), i.e. dune volume above a topographic level. Other indicators relative to dune susceptibility (e.g. dune width, dune altitude, low-lying areas) are in progress (see the tool on the OR2C website for more information). The third step consists of selecting a territory to conduct a spatial analysis. Territories are defined following administrative or natural limits (e.g. regions, departments, municipalities, littoral cells). The fourth and last step is related to cartographic restitution of the results through the web-mapping platform. Two different spatial types of information are available. First metric indicators are mapped using a graphic semiology based on color changes. For example, spatial unit n° 9159 in La Tranche-sur-Mer (see Fig. 1) is characterized by the presence of at least one building located at 7.7 m from the shoreline. In the same spatial unit, a strong shoreline recession (-878.7 m²) is recorded during the 1950–2011 period (see Fig. 7-A). Fig. 7-B presents the result of the shortest shoreline-building distance in La Tranche-sur-Mer coast section. A dark color tone shows the proximity of a building to the shoreline. A light color shows a building far from the shoreline. The second information is contained inside each spatial unit. Spatial units are described by a unique spatial unit identifier (classified from north to south of the regional coastline), and by a metric corresponding to the indicator value. The spatial units’ geometry and attribute table are downloadable on the website.

From a local (spatial unit level) to a regional scale (higher synthesis level), the geo-treatment tool contribution is related to its ability to map

predispositions of certain coastal sectors exposed to coastal physical hazards, such as coastal erosion and storm surges. One of the most important advances is the creation of new fine, spatialized, quantitative, exhaustive, and homogeneous geographic information. Using GIS and spatial unit segmentation provide a quantitative value of an indicator every 25 m. The entire coast is mapped by the system; thus, the entire at-risk configuration is precisely detected. Spatial information provides a synoptic view of the hazards and/or risks at various scalar levels. At a spatial unit scale, partners will have access to precise metrics describing the state of the coast. At a smaller scale (e.g. municipality, department, region, and littoral sedimentary cells), multiscale synthesis can be executed to give a territorial view of the hazard/risk (see demonstrations proposed by Juigner, 2017).

MAP-RISC aspires to develop and diffuse reference data for the OR2C's partners at a local (e.g. PAPI managers, coastal dune managers, local coastal observatories) and regional scale (e.g. State, territorial authorities, and services). This new reference could be used to update policies, strategic documents, coastal studies, and coastal GIS territories.

MAP-RISC proposes responses to several recommendations of the National integrated coastline management strategy. First, the combination of non-human at stake indicators with historical shoreline mobility responds to a need of identifying at-erosion-risk territories. Secondly, the indicators relative to dune's susceptibility (i.e. current dune volume and shoreline retreat) reveal the ability of the spatial unit segmentation to create and combine multi-risk indicators (here, identified as coastal erosion and storm surges). Furthermore, this application responds to the need to consider the role of natural ecosystems against physical hazards following the recommendations of the National strategy, and especially in the case of danger-evaluation studies (Deniaud and Ledoux, 2018). Thirdly, the National strategy recommends the development and sharing of common methodologies, to produce homogenous knowledge about coastal zone dynamics and hazards. In this sense, an initial experiment was conducted to detect the predisposition of building exposure to coastal erosion along 120 km of sandy coast in Normandie, in partnership with the coastal observation network of Normandie - Hauts-de-France regions. Fourthly, web mapping of the results can diffuse knowledge and inform the public about coastal dynamics and coastal hazards. Currently, the development of this tool is in progress. Four indicators are proposed at the present time, and the future development would consist of aggregating the indicators to compute synthetic risk and/or multi-risk indexes following the recommendations of the decision-making steering committee and OR2C technical committee.

4.3. Third mission: federate a regional dynamic for coastal hazards observation

The last mission of the OR2C is to impulse a dynamic of observation in the Pays de la Loire region, between all the structures involved in coastal risk studies and management. This objective does not mean replacing the existing structures, but it does act as a link between all the OR2C technical committee members to strengthen actions against coastal hazards and promote collective actions. The objective also promotes improved coherence and relationships at various levels in the territory (see Fig. 4) in order to go beyond sectoral management of coastal risks and benefit from a global approach in this management. Reducing information gaps on coastal risks is one of the first steps towards achieving this goal, in accordance with the recommendations of the National integrated coastline management strategy. In this sense, the OR2C acts to include all territories in terms of production of information. The OR2C also connects various operators for data acquisition and management on coastal risks, by promoting mediation through an exchange space aimed at defining a common strategy of data acquisition and common protocols for shoreline monitoring. Moreover, the OR2C promotes a dynamic of observation by encouraging the OR2C

members to exchange their theoretical and technical skills as well as their methods. In early 2018, the observatory organized and supervised a 3-day training on shoreline monitoring, during which partners shared their knowledge. These collective actions are in accordance with the National integrated coastline management strategy. A second training session on the use of LiDAR data was proposed in January 2019. The objective was to help coastal managers use LiDAR data for coastline monitoring. The OR2C also organizes working groups on topical issues, such as defining shared indicators for shoreline monitoring (September 2017), considering climate change in the context of public policy (Marsh 2019), and relocation (ongoing). These working groups bring together the OR2C members around common themes and lead shared visions and proposals.

5. Conclusion

Regional coastal observatories like the OR2C are recognized as appropriate networks to fight against coastal risks because of their spatial dimension, data quality, and sustainability. Generally, regional coastal observatories aim to rationalize and mutualize expensively acquired and shared data in regards to coastal risks, in order to respond to public and private requirements for better management of coastal areas. Thus, the OR2C is set-up in response to the recent dramatic disaster (i.e. storm Xynthia) and to improve the national context for strengthening the tools that counteract coastal risks. Moreover, the decentralization to local authorities, of policy making against coastal risks in French coastal regions, can also be found in this set-up. This trend can be seen for the GEMAPI competence transfer from the French State to local authorities in 2018 (i.e. the GEMAPI competence deals with managing aquatic environments and preventing floods including storm surges). This trend is also noticed in the context of two new French laws: the first decreed in 2014 called MAPTAM, "Modernisation de l'Action Publique Territoriale et d'Affirmation des Métropoles", and the second in 2015 called NOTRE, "Nouvelle Organisation Territoriale de la République". The National network of regional shoreline observatories, led by the French Ministry of Environment, Ecological, and Solidary Transition ("Réseau National des Observatoires du Trait de Côte" or RNOTC), is largely based on regional observatories. Despite the fact the OR2C is recent, it provides in this context a new model of integrated regional collective actions against coastal hazards, strongly anchored at the local level, based on high-precision data used to strengthen the scientific knowledge, develop and strengthen strategic tools, and provide a new tool for coastal hazard management (MAP-RISC).

Acknowledgements

The OR2C is funded by the council of Pays de la Loire region since 2016 and also by the Authority of Environment, Planning and Housing of the Pays de la Loire region (DREAL) since the end of 2018. The authors are grateful for the careful review by three anonymous reviewers and the Editor whose constructive feedback really improved this manuscript.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.104904>.

References

- Anziani, A., 2010. Rapport sur les conséquences de la tempête Xynthia 554 collection Les rapports du Sénat, Paris (rapport d'étape).
- Athimon, E., 2019. "Vimers de mer" et sociétés dans les provinces de la façade atlantique du royaume de France (XIVe-XVIIIe siècle). University of Nantes PhD Thesis.
- Athimon, E., Maanan, M., 2018. Vulnerability, resilience and adaptation of societies during major extreme storms during the Little Ice Age. Clim. Past Discuss. <https://doi.org/10.5194/cp-2018-62> (under revision).

- Athimon, E., Maanan, M., Sauzeau, T., Sarrazin, J.-L., 2016. Vulnérabilité et adaptation des sociétés littorales aux aléas météo-marins entre Guérande et l'île de Ré, France (XIVe - XVIIIe siècle). *VertigO La Rev. Électron. Sci. Environ.* 16.
- Baudouin, V., Plat, E., Bouchez, M., Sauvaget, B., Loquet, M., 2015. Identification et cartographie des aléas liés aux talus et aux falaises du littoral de Vendée. BRGM report n° RP-64271FR.
- Bermon, N., Mallet, C., Belon, R., 2016. Caractérisation de l'aléa recul du trait de côte sur le littoral de la côte aquitaine aux horizons 2025 et 2050. Observatoire Côte aquitaine. BRGM/RP-66277-FR.
- Le Berre, I., Maulpoix, A., Theriault, M., Gourmelon, F., 2016. A probabilistic model of residential urban development along the French Atlantic coast between 1968 and 2008. *Land Use Policy* 50, 461e478.
- Bertin, X., Li, K., Aron, R.D., Bidlot, J.-R., 2015. Contribution of short-waves in storm surges: two case studies in the Bay of Biscay. *Cont. Shelf Res.* 96.
- Bonetti, J., Woodroffe, C., 2017. Spatial analysis for coastal vulnerability assessment. In: Bartlett, D., Celliers, L. (Eds.), *Geoinformatics for Marine and Coastal Management*. CRC Press, Boca Raton, United States, pp. 367–395.
- Brock, J.C., Krabill, W., Sallenger, A.H., 2004. Barrier island morphodynamic classification based on LiDAR metrics for North Assateague Island, Maryland. *J. Coast. Res.* 20 (2).
- Carapuço, M.M., Tabora, R., Mendes Silveira, T., Psuty, N.P., Andrade, C., et Conceição Freitas, M., 2016. Coastal geoinformatics: towards the establishment of a common framework for sandy coastal environments. *Earth Sci. Rev.* 154.
- Chadenas, C., Pottier, P., Mercier, D., Chauveau, E., 2011. Le Prix D'une Urbanisation Abusive. Place Publique, hors-série.
- Chadenas, C., Creach, A., Mercier, D., 2014. The impact of storm Xynthia in 2010 on coastal flood prevention policy in France. *J. Coast. Conserv.* 18 (8).
- Chauveau, E., Chadenas, C., Comental, B., Pourinet, L., 2011a. Une Tempête Banale ? Place Publique, Special Issue. pp. 25–30.
- Chauveau, E., Pottier, P., Chadenas, C., Mercier, D., Pourinet, L., Feuillet, Th, Comental, B., Blanlil, A., 2011b. La catastrophe Xynthia : un processus d'urbanisation littorale face à un fait de nature. *Cahiers Nantais* 2011 (1).
- Chevillat-Miot, E., Mercier, D., 2014. La vulnérabilité face au risque de submersion marine : exposition et sensibilité des communes littorales de la région Pays de la Loire (France). *VertigO* 14 (2).
- Debaine, F., Robin, M., 2012. A new GIS modelling of coastal dune protection services against physical coastal hazards. *Ocean Coast Manag.* 63.
- Deboudt, P., 2010. Towards coastal risk management in France. *Ocean Coast Manag.* 53.
- Deniaud, Y., Ledoux, P., 2018. Étude de dangers de systèmes d'endiguement, Concepts et principes de réalisation des études. CEREMA.
- Devaux, E., Désiré, G., Boura, C., Lowenbruck, J., Bérenger, N., Rouxel, N., Romain, N., 2012. La tempête Xynthia du 28 février 2010 - Retour d'expérience en Loire-Atlantique et Vendée - Volet hydraulique et ouvrages de protection. CETE-ouest/DREAL Pays de la Loire/DDTM Loire-Atlantique/DDTM Vendée.
- DHI and GEOS, 2007. Etude de connaissance des phénomènes d'érosion sur le littoral vendéen. Rapport final de la tranche ferme pour la DDE 85.
- Dowling, R.K., Piore, C. (Eds.), 2009. *Coastal Tourism Development, Tourism Dynamics*. Cognizant Communication Corporation, New York.
- DREAL, 2007. Développement de l'urbanisation et loi littoral. Données, méthodes et usages du SIG littoral. DRE Pays de la Loire.
- DREAL, 2012. La Tempête Xynthia du 28 février 2010. Retour d'expérience en Loire-Atlantique et Vendée. Volet hydraulique et ouvrages de protection.
- Fattal, P., Robin, M., Paillart, M., Maanan, M., Mercier, D., Lamberts, C., Costa, S., 2010. Effets des tempêtes sur une plage aménagée et à forte protection côtière : la plage des Éloux (côte de Noirmoutier, Vendée, France). *Norois* 215.
- Gautier, M., 1979. Les effets des tempêtes de fin décembre 1978 et du premier janvier 1979 sur les côtes de Noirmoutier (Vendée) et du Pays de Retz (Loire-Atlantique). *Norois* 103.
- Le Guern, C., Suaud, S., Legras, L., Fattal, P., Gouguet, L., Robin, M., Baudouin, V., Mallet, C., 2011. Observatoire du littoral des Pays de Monts, synthèse des réalisations 2010. Rapport final BRGM/RP-59538-FR.
- Le Guern, C., Fattal, P., Gouguet, L., Baudouin, V., Robin, M., Maanan, M., Debaine, F., Jaouen, J., Renault, R., Juigner, M., Durand, A., Coquin, J., 2012. Observatoire du littoral des Pays de Monts, rapport d'avancement 2011. Rapport BRGM/RP-61098-FR.
- Le Guern, C., Juigner, M., Baudouin, V., Robin, M., Fattal, P., Rollier, C., Marie, D., Maanan, M., 2013. Observatoire du littoral des Pays de Monts, rapport d'avancement 2012. Rapport BRGM/RP-62937-FR.
- Ile of Wight Council, 2005. A Case Study Documenting Coastal Monitoring and Modelling Techniques in the Netherlands. Report Prepared in the Framework of the MESSINA Project.
- Jacquet, M., Kahan, J.-M., Lalonde, J.-P., 2016. Actions after the Xynthia storm on the French atlantic coast. In: *E3S Web of Conferences* 7.
- Juigner, M., 2017. La géomatique au service de l'observation du trait de côte : contribution à l'étude des aléas côtiers sur les littoraux dunaires de la région Pays de la Loire (France). PhD Thesis. University of Nantes.
- Juigner, M., Robin, M., 2018. Caractérisation de la morphologie des massifs dunaires de la région Pays de la Loire (France) face au risque de submersion marine. *VertigO* 18 (2) (in press).
- Juigner, M., Robin, M., Debaine, F., Hélen, F., 2017. A generic index to assess the building exposure to shoreline retreat using box segmentation: case study of the Pays de la Loire sandy coasts (west of France). *Ocean Coast Manag.* 148.
- Kolen, B., Slomp, R., Jonkman, S., 2013. The impact of storm Xynthia February 27-28, 2010 in France: lessons for flood risk management. *J. Flood Risk Manag.* 6, 3.
- Launeau, P., Giraud, M., Ba, A., Moussaoui, S., Robin, M., Debaine, F., Lague, D., Le Menn, E., 2018. Full-waveform LiDAR pixel analysis for low-growing vegetation mapping of coastal foredunes in western France. *Remote Sens.* 10 (5), 669.
- Lescinski, J., 2010. Description of Coastal State Indicators in Concepts and Science for Coastal Erosion Management (Conscience) Project. Description of Coastal State Indicators, Deliverable D9.
- LICCO, Conservatoire du littoral and Syndicat Mixte Littoral Normand, 2014. Les politiques de gestion des inondations et des risques côtiers en Angleterre.
- Liu, K., Fearn, M.L., 1993. Lake-sediment record of late Holocene hurricane activities from coastal Alabama. *Geology* 21.
- Liu, K., Fearn, M.L., 2000. Reconstruction of prehistoric landfall frequencies of catastrophic hurricanes in northwestern Florida from lake sediment records. *Quat. Res.* 54.
- Le Mauff, B., Juigner, M., Ba, A., Robin, M., Launeau, P., Fattal, P., 2018. Coastal monitoring solutions of the geomorphological response of beach-dune systems using multi-temporal LiDAR datasets (Vendée coast, France). *Geomorphology* 304.
- MEDDE, Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, 2016. Développer la connaissance et l'observation du trait de côte - Contribution pour une gestion intégrée.
- MEDDTL, Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement, 2012. Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte - Vers la relocalisation des activités et des biens.
- Meur-Férec, C., Deboudt, P., Morel, V., 2008. Coastal risks in France: an integrated method for evaluating vulnerability. *J. Coast. Res.* 24 (2B).
- Neumann, B., Vafeidis, A.T., Zimmermann, J., Nicholls, R.J., 2015. Future coastal population growth and exposure to sea-level rise and coastal flooding - a global assessment. *PLoS One* 10 (3).
- Nguyen, T.T.X., Bonetti, J., Rogers, K., Woodroffe, C.D., 2016. Indicator-based assessment of climate change impacts on coasts: a review of concepts, methodological approaches and vulnerability indices. *Ocean Coast Manag.* 123.
- Olsen, M.J., Young, A.P., Ashford, S.A., 2012. TopCAT - topographical compartment analysis tool to analyse seacliff and beach change in GIS. *Comput. Geosci.* 45.
- Perherin, C., Roche, A., Trmal, C., Roux, I., Pons, F., Boura, C., Devaux, E., Desire, G., 2010. Vulnérabilité du territoire national à la submersion marine. In: *XIIIèmes Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil*, 2014, Dunkerque, France. *XIIIèmes Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil*, pp. 917–924.
- Pirazzoli, P.A., 2000. Surges, atmospheric pressure and wind change and flooding probability on the Atlantic coast of France. *Oceanol. Acta* 23 (6).
- Plat, E., Baudouin, V., Decotte, T., 2013. Identification et cartographie des aléas liés aux talus et falaises du littoral de Loire-Atlantique. BRGM report n° RP62521FR.
- Pottier, P., 2007. Problématique et enjeux de l'urbanisation du littoral, l'espace littoral de la Loire-Atlantique 10 Conseil de Développement de la Loire-Atlantique Cahier littoral.
- Pouzet, P., 2018. Étude des paléovénements extrêmes le long de la côte atlantique française : Approches sédimentologiques, dendrochronologiques et historiques. PhD Thesis. University of Nantes.
- Pouzet, P., Creach, A., Godet, L., 2015. Dynamique de la démographie et du bâti dans l'ouest du Marais poitevin depuis 1705. *Norois* 234.
- Pouzet, P., Maanan, M., Piotrowska, N., Baltzer, A., Stéphan, P., Robin, M., 2018a. Chronology of holocene storm events along the european atlantic coast. *Prog. Phys. Geogr.: Earth Environ.* <https://doi.org/10.1177/0309133318776500>.
- Pouzet, P., Robin, M., Decaulne, A., Gruchet, B., Maanan, M., 2018b. Sedimentological and dendrochronological indicators of coastal storm risk in western France. *Ecol. Indicat.* 90.
- Pouzet, P., Maanan, M., Schmidt, S., Athimon, E., Robin, M., 2019. Correlating three centuries of historical and geological data for the marine deposit reconstruction of two depositional environments of the French Atlantic coast. *Mar. Geol.* 407.
- Pye, K., Blott, S.J., 2016. Assessment of beach and dune erosion and accretion using LiDAR: impact of the stormy 2013-14 winter and longer term trends on the Sefton Coast, UK. *Geomorphology* 266.
- Rieb, G., Walker, P., 2001. Suivi morphologique du littoral. *Geologues* 129.
- Robin, M., Kerguillec, R., 2017. Rapport d'avancement du module 1 Etat des lieux des données sur les risques côtiers en Pays de la Loire. OR2C report 1.
- Ruggiero, P., Voigt, B., Kaminsky, G., 2000. Beach monitoring for enhanced decision-making. In: *Coastal Society 17th Conference Coasts at the Millennium*, 9-12 July 2000, Portland, Oregon.
- Saye, S.E., van der Wal, D., Pye, K., Blott, S.J., 2005. Beach-dune morphological relationships and erosion/accretion: an investigation at five sites in England and Wales using LiDAR data. *Geomorphology* 72.
- Suarez, S., Garcin, M., Bulteau, Th, Rouan, M., Lagadee, L., David, L., 2012. Les observatoires du trait de côte en France métropolitaine et dans les DOM. *EchoGéo* 19.
- Ters, M., 1961. La Vendée littorale. Etude de géomorphologie. Université de Rennes.
- Verger, F., 2011. Digués et polders littoraux : réflexions après la tempête Xynthia. *Physio-Géo Géogr. Phys. Environnement* 5.
- Vinet, F., Boissier, L., Defossez, S., 2012a. Le processus de production du risque « submersion marine » en zone littorale : l'exemple des territoires Xynthia. *Norois* 221.
- Vinet, F., Lumbroso, D., Defossez, S., Boissier, L., 2012b. A comparative analysis of the loss of life during two recent floods in France: the sea surge caused by the storm Xynthia and the flash flood in Var. *Nat. Hazards* 61, 1179–1201.
- Woolard, J.W., Colby, J.D., 2002. Spatial characterization, resolution, and volumetric change of coastal dunes using airborne LiDAR: cape Hatteras, North Carolina. *Geomorphol. 29th Binghamt. Geomorphol. Symp.: Coast. Geomorphol.* 48.
- Young, A.P., Ashford, S.A., 2006. Application of airborne LiDAR for seacliff volumetric change and beach-sediment budget contributions. *J. Coast. Res.* 22 (2).



Cybergegeo: European Journal of Geography
Environnement, Nature, Paysage | 2021

Un nouvel indicateur de prédisposition au risque d'érosion côtière, application en Manche et en Vendée (France)

A New Coastal Erosion Risk indicator: Application to Manche and Vendée territories, France

Un nuevo indicador de exposición al riesgo por erosión costera, aplicación en los departamentos de la Mancha y Vandea (Francia)

Martin Juigner, Marc Robin, Morgane Audère, Paul Fattal, Benjamin Hervy, Riwan Kerguillec, Jean-Baptiste Suzanne, Stéphane Costa, Maëlys Lopin, Olivier Maquaire, Mohand Medjkane, Julie Pagny et Arnaud Thulie



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/cybergegeo/37114>

DOI : 10.4000/cybergegeo.37114

ISSN : 1278-3366

Éditeur

UMR 8504 Géographie-cités

Ce document vous est offert par Nantes Université



Référence électronique

Martin Juigner, Marc Robin, Morgane Audère, Paul Fattal, Benjamin Hervy, Riwan Kerguillec, Jean-Baptiste Suzanne, Stéphane Costa, Maëlys Lopin, Olivier Maquaire, Mohand Medjkane, Julie Pagny et Arnaud Thulie, « Un nouvel indicateur de prédisposition au risque d'érosion côtière, application en Manche et en Vendée (France) », *Cybergegeo: European Journal of Geography* [En ligne], Environnement, Nature, Paysage, document 985, mis en ligne le 21 juillet 2021, consulté le 11 octobre 2022. URL : <http://journals.openedition.org/cybergegeo/37114> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/cybergegeo.37114>

Ce document a été généré automatiquement le 22 juillet 2021.



Creative Commons - Attribution 4.0 International - CC BY 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Un nouvel indicateur de prédisposition au risque d'érosion côtière, application en Manche et en Vendée (France)

A New Coastal Erosion Risk indicator: Application to Manche and Vendée territories, France

Un nuevo indicador de exposición al riesgo por erosión costera, aplicación en los departamentos de la Mancha y Vandea (Francia)

Martin Juigner, Marc Robin, Morgane Audère, Paul Fattal, Benjamin Hervy, Riwan Kerguillec, Jean-Baptiste Suzanne, Stéphane Costa, Maëlys Lopin, Olivier Maquaire, Mohand Medjkane, Julie Pagny et Arnaud Thulie

Les auteurs adressent leurs remerciements aux deux lecteurs anonymes pour leur évaluation. Leurs nombreux commentaires ont permis d'améliorer significativement la compréhension du manuscrit.

Introduction

- 1 La bande côtière est un espace contraint qui est exposé aux aléas naturels. En France métropolitaine, ces aléas sont essentiellement l'érosion côtière, la submersion marine et la migration dunaire. Lors d'événements extrêmes, ces aléas peuvent intervenir de façon concomitante, comme ce fut le cas lors de la tempête Xynthia (Vinet *et al.*, 2012). Comme le suggèrent Hénaff *et al.* (2018), Quillet *et al.* (2019) et Meur-Ferec *et al.* (2020), l'étude des risques côtiers implique alors de mettre en relation, dans une approche multi-aléa, quatre composantes du risque (aléa, enjeux, gestion et représentations), chaque composante faisant l'objet d'une caractérisation. Dans ce travail, l'attention est justement portée sur la caractérisation fine de la relation spatiale entre l'aléa érosion côtière et les enjeux. Les risques côtiers sont alors abordés sous l'angle de la

prédisposition au risque d'érosion. L'érosion côtière peut être simplement défini comme "le déplacement vers l'intérieur des terres de la limite entre le domaine marin et le domaine continental" et est interprété comme "la conséquence d'une perte de matériaux sous l'effet de l'érosion marine, érosion naturelle induite par les forces marines, combinée parfois à des actions continentales, ou d'une érosion générée ou accélérée par l'homme" (Direction générale de la prévention des risques, DGPR, 2014). Les effets du changement climatique impactent directement le niveau de la mer en accélérant sa remontée, ce qui présente de lourdes conséquences pour les côtes basses (IPCC SR Ocean and Cryosphere, 2019). Ceux-ci engendrent aussi, par voie de conséquence, un effet sur l'accélération du recul du trait de côte, bien que cela ne soit pas toujours parfaitement établi dans les observations effectuées (Planton *et al.*, Roche et Costa, *in* ONERC, 2015).

- 2 Tous les types de côtes sont potentiellement soumis à des problématiques de recul du trait de côte. Parmi ces derniers, les côtes basses sableuses sont probablement un des types les plus sensibles à la question de l'érosion. Ce sujet a été largement étudié le long des côtes macrotidales françaises (Levoy, Larsonneur, 1994 ; Levoy *et al.*, 2000 ; Héquette, 2010 ; Castelle *et al.*, 2018 ; Robin *et al.*, 2019 ; Stéphan *et al.*, 2019). En métropole et outre-mer (hors Guyane), l'indicateur national de l'érosion côtière montre ainsi que sur les 6220 km de côtes recensées, 54 % des côtes sont rocheuses (dont 93 % ne présentent pas d'évolution perceptible), alors que les 41 % de côtes sableuses présentent pour 37 % d'entre elles des reculs significatifs. Ces résultats sont issus d'une mesure de l'évolution du trait de côte en 2D sur des périodes variables d'un territoire à l'autre (Hédou *et al.*, 2018).
- 3 L'implantation des activités humaines le long d'un espace par définition limité et en équilibre dynamique tend à faire des littoraux sableux des territoires du risque (Meur-Férec, 2006 ; Deboudt, 2010). Lorsque les infrastructures ont été implantées trop près du rivage, la mobilité du trait de côte, et plus particulièrement la tendance au recul (érosion côtière), s'avère être une menace pour l'urbanisation. Cette menace pour certains usages de la bande côtière qui, parfois, peuvent eux-mêmes être un facteur d'amplification de l'érosion, n'est pas pour autant nouvelle et a fait l'objet, dès 1993, d'un ouvrage de synthèse en France intitulé "côtes en danger" (Paskoff, 1993). De fait, l'augmentation de la pression démographique et de l'urbanisation le long du littoral français (Robin, Verger, 1996 ; Zaninetti, 2006 ; Béchet *et al.*, 2017), dans un contexte de poursuite de l'élévation du niveau marin (Pouvreau, 2008 ; Ferret, 2016 ; Dodet *et al.*, 2019), accentue l'exposition des infrastructures à l'érosion côtière. Un récent rapport le rappelle de façon très circonstanciée (Buchou, 2020) et des fiches thématiques actualisées permettent de s'informer précisément sur ce sujet (Observatoire National de la Mer et du Littoral, ONML). De ce fait, l'évaluation quantitative des enjeux menacés par l'érosion abonde à l'échelle internationale (Fraser, Bernatchez, Dugas, 2017 ; Fitton, Hansom, Rennie, 2018 ; Drejza *et al.*, 2019 par exemple).
- 4 L'identification des territoires à risque d'érosion et des enjeux potentiellement impactés par le recul du trait de côte constitue un axe majeur de la stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte, portée par le Ministère de la Transition écologique et Solidaire. Les programmes d'action 2012-2015 et 2017-2019 de la stratégie nationale font état de la nécessité de développer et d'améliorer la connaissance de l'évolution du trait de côte et des territoires concernés par l'érosion côtière (SNGITC¹, 2020). En effet, la cartographie de la mobilité du trait de côte et des infrastructures menacées par

l'érosion est un préalable à la mise en place de stratégies de gestion du trait de côte et d'adaptation au risque érosion. Dans ce cadre, deux études ont ainsi été réalisées à l'échelle nationale, par le centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA) : un indicateur national de l'érosion côtière (Hédou *et al.*, 2018) et une évaluation prospective des enjeux affectés par le recul du trait de côte à l'horizon 2100 (CEREMA, 2019). Cette dernière étude apporte un premier ordre de grandeur, à l'échelle nationale, sur le nombre et la valeur des logements menacés par l'érosion côtière (entre 5 000 et 50 000 logements et entre 0,8 Md€ et 8 Md€ à l'horizon 2100 selon le scénario retenu). Ce constat serait de nature à modifier l'approche historique du traitement de l'érosion côtière, en promulguant une doctrine plutôt centrée sur la recomposition territoriale et non pas tant sur l'amplification des mesures de défenses côtières dans une logique de fixation du trait de côte (CGEDD-IGA-IGF², 2019).

- 5 Conjointement, la stratégie nationale promeut la création puis l'animation d'un réseau national des observatoires du trait de côte (SNGITC, 2020). Ce réseau s'appuie notamment sur les établissements publics et les initiatives régionales et interrégionales (communément appelées "observatoires régionaux" dans cet article) engagés dans l'observation et le suivi des dynamiques littorales. La stratégie nationale et le réseau des observatoires favorisent ainsi la création et le maintien des observatoires régionaux, dans le but d'aboutir à un maillage national exhaustif et pérenne du trait de côte français (SNGITC, 2020). À l'image du Réseau d'Observation du Littoral (ROL) de Normandie et des Hauts-de-France et de l'Observatoire Régional des Risques Côtiers (OR2C) en Pays de la Loire, les observatoires régionaux mettent en réseau les acteurs impliqués dans l'observation du trait de côte, structurent et assistent les actions menées en région et contribuent à édifier et à mettre à disposition un socle de données de référence régionales fiables, homogènes et pérennes (Kerguillec *et al.*, 2019).
- 6 Le passage de l'observation à la mise en place d'un indicateur nécessite une démarche méthodologique rigoureuse. La production d'une observation sur le risque nécessite d'abord de définir conceptuellement les modalités du risque, combinant de façon usuelle, par types de risque, les aléas, les enjeux et les niveaux de vulnérabilité intégrant la capacité de réponse de la société (Léone, Vinet, 2013). Il s'agit ensuite de s'accorder sur le choix du meilleur indicateur, observable donc, qui met en évidence le risque et son niveau (ADEME³, 2013). On peut caractériser l'indicateur conceptuellement comme étant en capacité de quantifier "l'information, sous la forme d'une mesure simple ou d'une mesure agrégée (de données multiples et disparates) dont on suit l'évolution ou que l'on compare à des valeurs de références (objectif politique, valeur limite, valeur guide)" (ADEME, 2013 p.9). Le premier vaste essai à l'échelle mondiale de conceptualisation d'un indicateur de vulnérabilité global du littoral, en regard d'aléas divers associés à l'élévation du niveau de la mer et au changement climatique, a été proposé dès 1991 sous la forme du Coastal Vulnerability Index (Gornitz, 1991) et a été largement repris et amélioré par la suite au fur et à mesure des progrès des observations et des techniques. Ainsi, l'utilisation d'indicateurs pour l'évaluation des risques côtiers abonde-t-elle largement dans la littérature (Meur-Ferec *et al.*, 2020 ; Quillet *et al.*, 2019 ; Nguyen *et al.*, 2016 ; Bio *et al.*, 2015 ; Granja, Pinho, Mendes 2014 ; Debaine Robin 2012 ; Olsen Young Ashford 2012 ; Abuodha

difficilement utilisables dans un processus de gestion, sous une forme synthétique et surtout compréhensible pour faciliter le travail des gestionnaires (Carapuço, 2016).

- 7 La difficulté de construction d'un indicateur apparaît lorsqu'il s'agit de comparer des secteurs géographiques différents. Cela nécessite un certain degré d'agrégation dans la prise en compte des informations, à la fois des aléas et des enjeux présents avec leur niveau de vulnérabilité. Cet article propose de spatialiser un indicateur de prédisposition au risque concernant les enjeux (urbanisation et réseau routier) associés à l'érosion côtière, dans une bande de 100m telle que définie par l'article L 121-16 du code de l'urbanisme, à la suite d'un premier travail effectué à l'échelle de l'OR2C concernant l'exposition du bâti à l'érosion côtière (Juigner *et al.*, 2017). Deux sections littorales d'environ 90 km sont choisies dans le département de la Vendée et celui de la Manche. Elles font l'objet de séries d'observation par deux observatoires régionaux (le ROL et l'OR2C). L'apport de l'article concerne la recherche des dénominateurs communs aux démarches de ces deux observatoires, de façon à produire, sous la forme d'un démonstrateur, un indicateur générique et reproductible qu'il serait ensuite envisageable de déployer en tout point du littoral. Une présentation des deux secteurs sera d'abord effectuée, suivie de la méthodologie mise en œuvre, de la présentation des résultats puis d'une discussion conclusion.

Contexte de l'étude

La segmentation par boîte

- 8 La démarche mise en œuvre dans ce travail s'inscrit dans la lignée de travaux menés depuis 2012 par le laboratoire LETG-Nantes, et plus récemment dans le cadre de l'OR2C (Debaine, Robin, 2012 ; Juigner *et al.*, 2017 ; Juigner, Robin, 2018 ; Kerguillec *et al.*, 2019, Robin *et al.*, 2019). Le concept utilisé repose sur une méthode de segmentation régulière et continue de la frange côtière, à l'aide d'unités d'observation appelées "boîtes". Ces unités sont des polygones contraints par deux limites transversales (ou transects) et deux limites longitudinales (côté mer et côté terre). Cette méthode de segmentation, préconisée dans l'étude du recul des falaises sous le nom de la méthode des "surfaces perdues" (Costa *et al.*, 2004 ; Letortu *et al.*, 2014), permet l'agrégation de nombreux jeux de données (vecteur comme raster) mobilisables pour une analyse spatiale multicritère. Un pas de segmentation réduit (boîtes de 50 m de large par exemple) apporte une information à grande échelle indispensable pour observer finement la concomitance entre variables. La segmentation par boîte est une méthode d'analyse spatiale du *continuum* terre-mer héritée des méthodes d'analyse dites "par transect" et "par carroyage", dont elle s'inspire largement. La segmentation transversale du *continuum* terre-mer à l'aide de polygones discrets et continus assimilables aux mailles d'un carroyage permet, au sein de chaque unité d'observation, de mettre en relation les étages littoraux par le calcul et l'agrégation d'indicateurs tant environnementaux que sociétaux. En retraçant les principales orientations de la côte, la ligne de base utilisée pour créer les boîtes sert de guide à la segmentation pour que celle-ci épouse la morphologie concave ou convexe des côtes.

Le partenariat entre deux observatoires régionaux (ROL et OR2C)

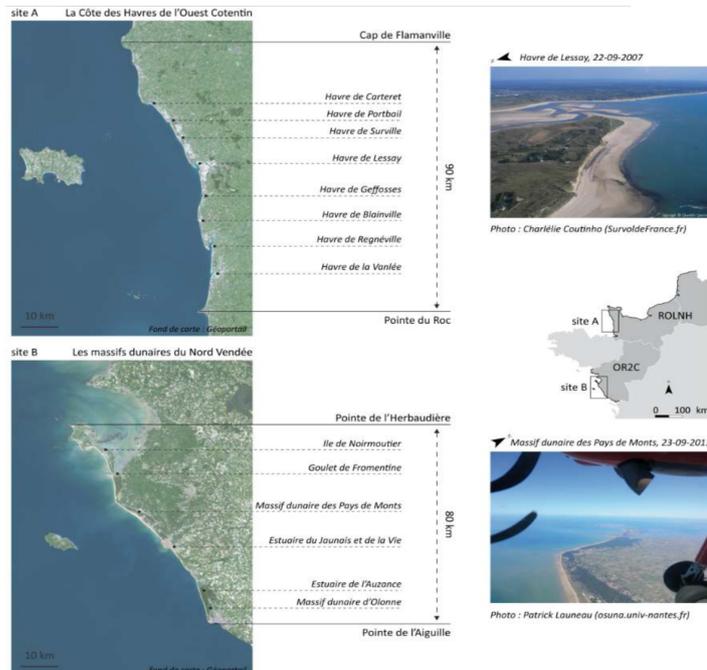
- 9 La production d'indicateurs du risque est un des objectifs de l'OR2C. Un outil de géotraitement (MAPRISC, "Module d'analyse spatiale des risques côtiers") est en cours de développement, afin d'automatiser les chaînes de géotraitement nécessaires à la création d'unités d'observation puis le calcul d'indicateurs sur les 400 km de côte de la région Pays de la Loire. Des premiers indicateurs régionaux produits dans le projet DiDUNE ("outil de diagnostic multiscalair du service protection dunaire", thèse de géographie de l'Université de Nantes) a émergé le projet de partenariat entre le ROL et l'OR2C pour la mise en place d'un démonstrateur commun aux deux observatoires. Le premier volet de ce partenariat a été réalisé par l'Université de Caen Normandie, en partenariat avec le ROL et l'OR2C dans l'objectif d'exporter et de tester la segmentation par boîte en dehors du littoral des Pays de la Loire. Dans le cadre d'un mémoire de Master 1, trois indices composites ont été créés pour estimer (i) les rythmes et vitesses de l'évolution du trait de côte, (ii) la prédisposition des enjeux au risque érosion et (iii) la prédisposition multirisque (érosion et submersion) pour la côte ouest Cotentin (Suzanne, 2018). Ce premier travail concluant a ensuite été approfondi afin de mettre en évidence des secteurs où l'évolution du trait de côte est homogène, d'affiner la connaissance des enjeux proches du rivage et d'estimer les liens de causalité entre l'érosion côtière et différentes variables liées au type de côte (Emile, 2019). Le second volet de ce partenariat consiste donc à concrétiser un démonstrateur commun aux deux observatoires.

Les sites d'étude : la côte ouest du Cotentin et la côte nord de la Vendée

- 10 Deux segments côtiers de longueur significative et constitués d'un type de côte analogue (côtes dunaires) dans des contextes morphodynamiques toutefois assez différents (CEREMA, 2019b) ont été retenus pour cette expérimentation (figure 1). Le linéaire choisi en région Pays de la Loire s'étend sur environ 80 km le long de la côte vendéenne. Il est compris entre la Pointe de l'Herbaudière, au nord de l'île de Noirmoutier, et la Pointe de l'Aiguille, au sud du massif dunaire d'Olonne. Ce littoral d'orientation Nord-Ouest/Sud-Est est caractérisé par la présence de vastes massifs dunaires (jusqu'à 27 km de long et 3 km de large au Pays de Monts), localement entrecoupés par la présence d'exutoires (du sud au nord : l'Auzance au nord du massif dunaire d'Olonne, l'estuaire du Jaunaie et de la Vie au niveau de Saint-Gilles-Croix-de-Vie, le goulet de Fromentine entre l'île de Noirmoutier et le Pays de Monts) et de pointes rocheuses. Le linéaire retenu en région Normandie s'étend sur environ 90 km, le long de la côte ouest du Cotentin dans le département de la Manche. Il est compris entre la Pointe du Roc à Granville et le Cap de Flamanville. Ce littoral d'orientation globalement Nord/Sud est aussi caractérisé par une succession de massifs dunaires localement interrompus par des pointes rocheuses et des havres (petits environnements estuariens) : du sud au nord : le havre de la Vanlée, de Regnéville, de Blainville, de Geffosses, de Lessay, de Surville, de Porbail, de Carteret. Les massifs de ces deux segments côtiers se sont formés à la fin de la transgression Holocène suite au développement de flèches sableuses ancrées à la faveur d'affleurements et de môles rocheux. L'élévation du niveau marin, couplée au transit sédimentaire et à la mobilisation éolienne des sédiments, a progressivement façonné les cordons littoraux

et flèches à pointe libre actuels, favorisant le colmatage de zones basses situées en arrière des cordons dunaires (CEREMA, 2019b).

Figure 1 : Carte de localisation des sites d'étude



M. Juigner, 2021.

Construction de l'indicateur de prédisposition

Raisonnement spatial

- 11 L'indicateur de prédisposition présenté dans cet article se veut relativement simple dans sa conception. L'objectif affiché est de proposer un indicateur dont la reproductibilité sur deux terrains d'étude garantit la possibilité (i) de transposition sur d'autres territoires littoraux et (ii) d'intégration d'autres variables afin d'affiner le cas échéant les résultats de l'analyse spatiale. Il ne s'agit donc pas, dans un premier temps, de développer une batterie de variables et d'indicateurs synthétisant l'ensemble des composantes du risque ni même de développer un indice composite multirisque. Le risque associé à l'érosion est ici appréhendé sous l'angle de la prédisposition, c'est-à-dire l'étude de facteurs susceptibles de favoriser l'exposition d'un enjeu au risque érosion. Ainsi, la présence d'un enjeu implanté à proximité du trait de côte au droit d'un linéaire côtier en recul révèle un état de prédisposition de cet enjeu à l'aléa érosion. C'est la relation spatiale entre aléa et enjeu, et plus précisément la concomitance et la variabilité de l'intensité de l'aléa et de la proximité des enjeux au trait de côte qui déterminent le niveau de prédisposition. Les enjeux étendus le long de la côte peuvent être caractérisés par plusieurs relations aléa/enjeu. Par exemple, une route littorale n'est pas uniformément exposée à l'érosion côtière, certains tronçons

peuvent être épargnés par le recul du trait de côte. Cette troisième section présente la démarche suivie pour formaliser ce raisonnement à partir de trois variables : (i) la tendance et la vitesse d'évolution du trait de côte entre deux dates (ii) la distance minimum entre les enjeux (les constructions, les campings et les routes carrossables) et le trait de côte et (iii) la présence ou l'absence d'ouvrages de protection. L'agrégation de ces variables produit un indicateur composite (ou indice composite) de prédisposition.

Présentation des données

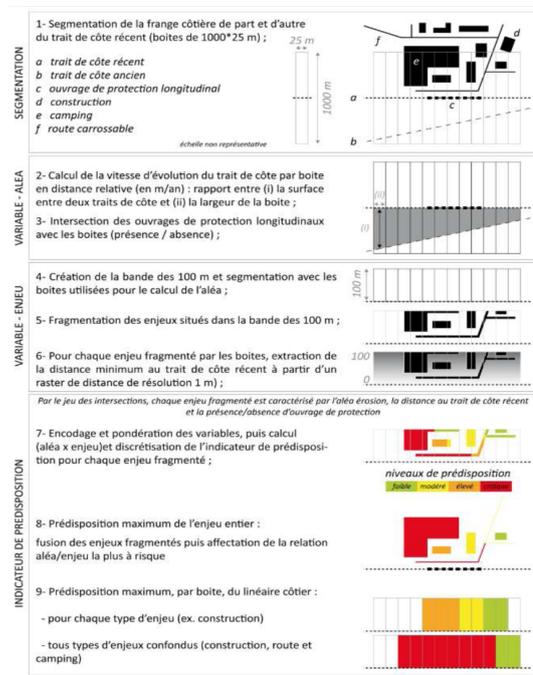
- 12 La transposabilité de la démarche requiert la mobilisation de données de références communes aux deux observatoires. Ces données doivent répondre autant que possible à des critères d'accessibilité, d'exhaustivité, de résolution, d'homogénéité et de temporalité. La synthèse des données collectées auprès des deux observatoires est présentée dans le tableau 1. Les traits de côte historiques et récents couvrent une période d'environ 60 ans. Les marqueurs de la position du trait de côte (numérisation à échelle 1/2500^e à partir d'orthophotographies) sont la limite de végétation dunaire et le pied de dune. L'emprise au sol des constructions et du réseau routier est issue de la BD TOPO de l'IGN. Les constructions correspondent à l'ensemble des bâtiments recensés dans la BD TOPO. Les routes carrossables regroupent les routes empierrées, les routes à une et/ou deux chaussées, aux bretelles d'autoroutes, aux autoroutes et quasi-autoroutes. Aucune couche de données relative à l'emprise au sol des campings n'a pu être récoltée. Les campings représentent cependant un enjeu important à intégrer dans le calcul de l'indicateur, du fait de leur implantation souvent située en bord de mer. La couche de donnée a donc été constituée manuellement. Les établissements ont été localisés sur Géoportail (<https://www.geoportail.gouv.fr/donnees/campings>) puis l'emprise au sol a été numérisée et validée à partir de la BD PARCELLAIRE de l'IGN et de l'ortholittorale v2. La localisation des ouvrages de protections est issue, d'une part, des bases de données à disposition du ROL, et d'autre part, de la Cartographie nationale des ouvrages et aménagements littoraux réalisée par le CEREMA.

Tableau 1 : Inventaire des données collectées

Type	Source	Date	Résolution
Trait de côte récent	ROL, CEREMA/OR2C	2010/2010	1/2500 ^e
Trait de côte ancien	ROL, CEREMA/OR2C	1947/1952	1/2500 ^e
Construction	BD TOPO IGN/BD TOPO IGN	2017/2012	1/5000 ^e
Route carrossable	BD TOPO IGN/BD TOPO IGN	2017/2012	1/5000 ^e
Camping	Géoportail, BD PARCELLAIRE IGN, Ortholittorale v2	2017/2017	1/2500 ^e
Ouvrage de protection	ROL-CEREMA/CEREMA	≤ 2012	1/2500 ^e

M. Juigner, 2021.

Figure 2 : Schéma de construction de l'indicateur de prédisposition



M. Juigner, 2021.

Phase 1 : segmentation de la bande côtière

- 13 L'élaboration de l'indicateur est articulée en quatre phases illustrées dans la figure 2. La première phase consiste à créer les unités d'observations qui serviront de support pour l'analyse spatiale (figure 2 - Segmentation). Déployées à partir du trait de côte 2010, des boîtes composées de deux limites transversales et deux limites longitudinales ont été créées. Les limites transversales correspondent à des transects espacés de 25 m. Les limites longitudinales sont établies à l'aide d'une zone tampon tracée de part et d'autre du trait de côte. Une distance de 400 m a été retenue en Vendée (soit des boîtes de 25*800 m). La mobilité historique du trait de côte étant plus importante dans le Cotentin, une distance de 500 m a été appliquée (boîtes de 25*1000 m).

Phase 2 : calcul de l'aléa

- 14 L'aléa érosion est ici considéré en 2D par la mesure de la mobilité du trait de côte, les données historiques disponibles ne permettant pas le calcul d'indicateurs en 3D (figure 2 - Aléa). La surface entre les traits de côte ancien et récent est calculée au sein de chaque boîte. Cette surface est rapportée à la largeur de la boîte et au temps écoulé entre les deux dates pour en déduire la distance relative séparant les deux traits de côte. Cette distance s'exprime en m/an. L'incertitude des résultats est estimée à $\pm 0,13$ m/an (± 8 m sur la période étudiée), au regard de la résolution pixel, de l'erreur de correction géométrique des supports de numérisation, et de la précision de la numérisation des marqueurs. La présence/absence d'ouvrages de protection est

également intégrée dans les boîtes. Le rôle et l'impact des ouvrages sur le transit sédimentaire et la dynamique du trait de côte sont extrêmement variables d'un secteur à un autre, du fait de spécificités locales. Cette complexité contraint à ne considérer ici que les ouvrages entravant le recul du trait de côte en deux dimensions (XY), autrement dit, les ouvrages de protection longitudinaux.

Phase 3 : calcul de la proximité des enjeux au trait de côte

- 15 L'indicateur de prédisposition vise à analyser les enjeux situés dans la bande des 100 m. Dans une troisième phase, la bande des 100 m est calculée à partir du trait de côte récent à l'aide d'une zone tampon. L'intersection entre les boîtes, la zone tampon et les enjeux permet d'extraire et de fragmenter les enjeux situés à l'intérieur et au contact de la bande des 100 m (figure 2 – Enjeu). La distance au trait de côte 2010 est calculée à partir d'un raster de distance de résolution pixel égale à 1 mètre. Pour chaque enjeu fragmenté, la distance retenue est la valeur pixel minimum, c'est-à-dire le point le plus proche du trait de côte. Aux termes des trois premières phases, tous les enjeux sont caractérisés par au moins une relation aléa/enjeu (vitesse d'évolution du trait de côte, présence/absence d'ouvrage de protection et distance au trait de côte). Les enjeux étendus le long de la côte (routes littorales, campings) ont été fragmentés par les boîtes et sont donc caractérisés par plusieurs relations aléa/enjeu.

Phase 4 : agrégation de l'information géographique

- 16 La dernière phase de la méthode consiste à agréger et synthétiser l'information pour créer l'indicateur de prédisposition. Le tableau 2 présente le détail de la création de l'indicateur. Les variables sont codées et pondérées selon le raisonnement suivant : (i) un enjeu situé à proximité immédiate du trait de côte le long d'un linéaire en accrétion ou en stabilité relative peut être exposé à l'érosion côtière en cas de recul lié à un épisode tempétueux ; (ii) tout enjeu situé à proximité immédiate du trait de côte le long d'un secteur en érosion présente un niveau de prédisposition maximum ; (iii) le niveau de prédisposition décroît en fonction de l'éloignement au trait de côte et de la vitesse de recul du trait de côte. La variable évolution du trait de côte est discrétisée en 9 classes, dont une pour l'accrétion, une pour la stabilité relative et sept pour la tendance à l'érosion. Les bornes de classes adoptées pour l'érosion sont inspirées de la classification des vitesses d'évolution du trait de côte, proposée par Luijendijk *et al.* (2018) à l'échelle internationale. Elles ont ensuite été affinées pour intégrer la variabilité des vitesses de recul calculées à l'échelle des deux sites d'étude. La variable distance est discrétisée en 10 classes d'amplitude égale (10 m). La variable distance est pondérée avec un facteur de puissance deux fois plus important que la variable évolution du trait de côte, afin d'attribuer un niveau de prédisposition maximum aux enjeux situés à proximité immédiate (0 à 10 m) du trait de côte au droit d'un linéaire en faible érosion (-0,13 à -0,50 m/an). L'indicateur de prédisposition est issu du produit de l'aléa par l'enjeu. L'indicateur est ensuite discrétisé en quatre classes. Les seuils correspondent aux quartiles (Q1 et Q3) et à la médiane. Ces classes correspondent aux quatre niveaux d'intensité (faible, modérée, élevée et critique) décrivant l'importance croissante de la prédisposition au risque érosion. Une prédisposition dite "critique" traduit une exposition actuelle des enjeux à l'érosion côtière. Les niveaux "élevé", "modéré" et "faible" correspondent à trois niveaux d'intensité qualifiant

graduellement l'exposition des enjeux si la tendance à l'érosion mesurée dans cet article se poursuivait dans les années et décennies à venir. À terme, l'indicateur de prédisposition est calculé pour chaque enjeu situé à l'intérieur et au contact de la bande des 100 m. Pour les enjeux fragmentés, donc caractérisés par plusieurs relations aléa/enjeu (les routes littorales et les campings par exemple), le niveau de prédisposition appliqué à l'enjeu entier provient de la relation aléa/enjeu la plus à risque, c'est-à-dire le niveau de prédisposition maximum. En complément, les niveaux de prédisposition maximum (pour chaque type d'enjeu puis pour tous les types d'enjeux confondus) ont été intégrés dans les boîtes. Cette dernière étape permet, par un décompte des boîtes, de disposer d'une estimation des linéaires côtiers affectés par les différents niveaux de prédisposition.

Tableau 2 : Encodage, pondération, agrégation des variables et discrétisation de l'indicateur

		Aléa (a) - évolution du trait de côte (en m/an)										
		accrétion		stabilité		érosion						
		>+0,13	[-0,13 ; -0,13]	[-0,13 ; -0,5]	[-0,5 ; -1]	[-1 ; -2]	[-2 ; -3]	[-3 ; -4]	[-4 ; -5]	<-5		
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	e	0	1	4	9	16	25	36	49	64	81	
	e^2	0	1	4	9	16	25	36	49	64	81	
	σ^2	0	1	4	9	16	25	36	49	64	81	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Enjeu (e) - distance minimum trait de côte récent / enjeux (en m)	-9999	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	[100-90[	1	1	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	[90-80[	2	16	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002
	[80-70[	3	81	0	0.000	0.000	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.008
	[70-60[	4	256	0	0.000	0.001	0.003	0.005	0.008	0.011	0.015	0.020
	[60-50[	5	625	0	0.001	0.003	0.007	0.012	0.019	0.028	0.038	0.049
	[50-40[	6	1296	0	0.002	0.006	0.014	0.026	0.040	0.058	0.078	0.102
	[40-30[	7	2401	0	0.003	0.012	0.027	0.047	0.074	0.107	0.145	0.190
	[30-20[	8	4096	0	0.005	0.020	0.046	0.081	0.126	0.182	0.248	0.324
	[20-10[	9	6561	0	0.008	0.032	0.073	0.130	0.203	0.292	0.397	0.518
[10-0[	10	10000	0	0.012	0.049	0.111	0.198	0.309	0.444	0.605	0.790	

bornes des classes	min (0)	Q1 (0.001)	méd. (0.015)	Q3 (0.106)	max (1)
niveaux de prédisposition	faible	modéré	élevé	critique	0 pas de donnée

- importance de la prédisposition → +

M. Juigner, 2021.

Spatialisation de la prédisposition associée au risque érosion

- 17 Les résultats sont présentés en deux parties. La première partie porte sur l'interprétation des résultats de l'évolution du trait de côte et de la distance enjeux/trait de côte. La représentation graphique de chaque variable présentée dans la figure 3 illustre un ensemble d'analogies et de contrastes entre les deux terrains d'étude. Dans une deuxième partie, les résultats de l'indicateur de prédisposition sont présentés. Un bilan de l'indicateur de prédisposition à l'échelle des deux terrains d'étude est dressé. La spatialisation de la prédisposition pour chaque type d'enjeu est illustrée dans la figure 4. Les principaux secteurs exposés au risque érosion en sont déduits et un exemple est présenté dans la figure 5. Dans un dernier temps, une synthèse menée à l'échelle des établissements publics de coopération intercommunale (EPCI) est proposée. Une vision synoptique de la prédisposition pour chaque Communauté de communes (CC) et Communauté d'agglomération (CA) est proposée dans la figure 6 et un tableau de synthèse du nombre d'enjeu est présenté en annexe.

Résultats de l'évolution du trait de côte et de la distance enjeu/trait de côte

La dynamique historique du trait de côte

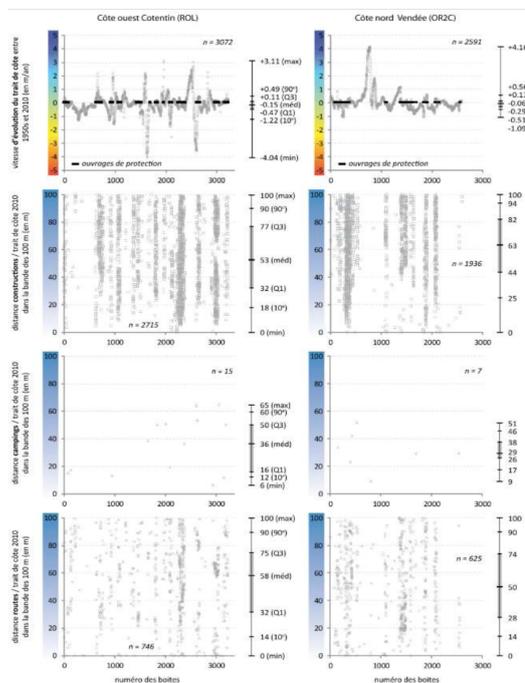
- 18 Les deux sites d'étude sont caractérisés par une représentation significative de chaque tendance d'évolution du trait de côte. Le long des côtes sableuses de l'ouest du Cotentin et du nord de la Vendée, les résultats de l'analyse historique de l'évolution du trait de côte révèlent que la tendance à l'érosion (respectivement 50 % et 42 %) est plus importante que la stabilité relative (25 % et 33 %) ou que l'accrétion (25 % et 25 %). Dans les deux cas, environ un cinquième du linéaire côtier est fixé par des ouvrages de protection longitudinaux (respectivement 22 % et 20 %). L'amplitude de la mobilité du trait de côte et les vitesses de recul sont toutefois nettement plus marquées dans le Cotentin. Les indicateurs de position présentés dans la figure 3 (max, 90^e centile, Q3, médiane, Q1, 10^e centile et min) permettent d'observer et de comparer le profil statistique de chaque site d'étude pour chaque variable. Il apparaît que le littoral normand présente une amplitude de plus de 7 m/an pour 5 m/an en Vendée, entre les années 1950 et 2010. Ce constat doit être approfondi en deuxième lecture. En effet, les deux sites présentent une analogie au regard des indicateurs de positions positifs (90^e cent. et Q3). La tendance à l'accrétion est relativement homogène entre les deux sites, le nord de la Vendée enregistrant toutefois un pic d'accrétion plus important (+4,16 m/an, boîte n°777, CC Île de Noirmoutier). En revanche, les vitesses de recul du trait de côte sont nettement plus contrastées. Dans le nord de la Vendée, les vitesses de recul sont principalement situées entre -0,13 et -0,50 m/an (10^e cent. = -0,51 m/an) avec un maximum de -1,09 m/an (boîte n°1838, CC Pays de Saint-Gilles-Croix-de-Vie). Le long de la côte normande, tandis qu'un quart des vitesses de recul est supérieur à -0,50 m/an (Q1= -0,47 m/an), les valeurs extrêmes de recul (10^e cent. = -1,22 m/an) atteignent un maximum de -4,04 m/an (boîte n°1629, CC Côte Ouest Centre Manche). D'après ces résultats, il apparaît que l'érosion côtière affecte plus sévèrement la côte sableuse de l'ouest du Cotentin, tant en linéaire qu'en intensité. Ces valeurs sont tout à fait comparables à celles proposées dans les travaux du ROL-DREAL, 2014 (voir l'atlas en ligne : https://maps.rolnhdf.fr/atlas/Dynamique_et_risques/), ou ceux publiés par le Centre de Recherches en Environnement Côtier de l'Université de Caen Normandie, dans le cadre de leur suivi annuel (voir les statistiques en ligne : <https://crec.unicaen.fr/suivi50/>).

La proximité des enjeux au trait de côte

- 19 Un second résultat porte sur la présence et la proximité des enjeux avec le trait de côte 2010 : constructions, campings et routes carrossables dans la bande des 100 mètres (figure 3). L'implantation de ces trois types d'enjeux dans la bande des 100 m est avérée sur les deux sites d'étude. La présence de secteurs à forte concentration de constructions et de routes traduit l'existence de noyaux urbains relativement denses implantés sur le front de mer, par endroits au contact du trait de côte. Cette proximité immédiate au trait de côte n'est cependant pas uniforme. Certains noyaux urbains ne s'étirent pas jusqu'au trait de côte, ce qui laisse supposer la présence d'une zone tampon entre le trait de côte et les premières constructions, ces zones pouvant être des espaces naturels comme des zones aménagées (remblais, aire de stationnement, aire de jeux, etc.) non prises en compte dans l'analyse. La densité de construction et de route

est variable d'un secteur urbanisé à un autre. Des fenêtres "naturelles" subsistent entre les zones urbanisées, signe que l'urbanisation n'est pas continue dans la bande des 100 m. Ces fenêtres représentent 67 % du linéaire côtier sableux du nord de la Vendée et 63 % de la côte ouest du Cotentin. La répartition des enjeux dans la profondeur de la bande des 100 m est relativement constante entre les deux sites. La médiane des séries "routes carrossables" et "constructions" oscille entre 50 m et 63 m. La côte normande concentre sensiblement plus de constructions à proximité du trait de côte (10^e cent. = 18 m) que la côte vendéenne (10^e cent. = 25 m). Les campings recensés sur les deux sites sont implantés à faible distance du trait de côte (méd = 36 m dans le Cotentin ; méd = 29 m en Vendée). Ainsi, ces résultats traduisent une relative analogie entre les deux sites au regard de la présence de constructions, routes et campings dans la bande des 100 m.

Figure 3 : Vitesses d'évolution du trait de côte, présence/absence d'ouvrages de protection et distance entre les enjeux et le trait de côte 2010 sur la côte ouest du Cotentin et le littoral du nord de la Vendée



M. Juigner, 2021.

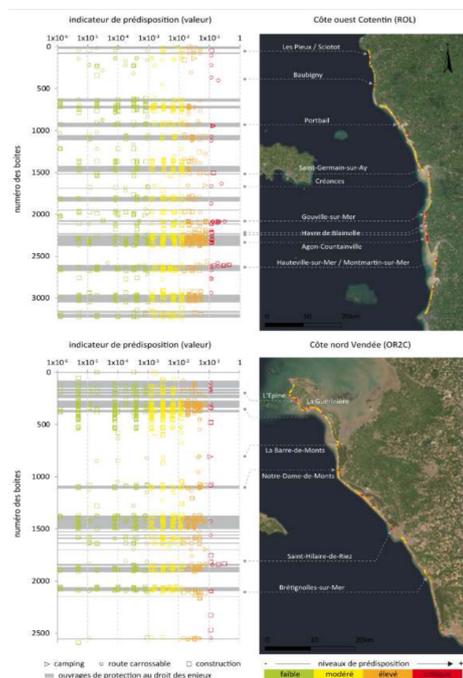
Résultats de l'indicateur de prédisposition

Bilan global de la prédisposition

- 20 Un premier résultat à l'échelle des deux terrains d'étude porte sur un bilan global de la prédisposition. L'agrégation des variables et le calcul de l'indicateur pour les constructions, routes et campings permettent de spatialiser la prédisposition sur les deux sites. La figure 4 présente, sur la totalité du linéaire étudié, le niveau de prédisposition de l'ensemble des enjeux pris en compte dans la bande des 100 m. Cette cartographie permet d'une part d'identifier le type d'enjeu, et d'autre part de localiser les secteurs présentant un niveau de prédisposition critique. Ainsi, il apparaît que la

côte ouest du Cotentin concentre un nombre d'enjeux en zone à risque érosion plus élevé que la côte vendéenne. Par ailleurs, les intensités de l'indicateur de prédisposition y sont également plus importantes (figure 4). Sur les 3476 enjeux recensés dans le Cotentin (2568 en Vendée), 82 (28 en Vendée) présentent un niveau de prédisposition critique, ce qui traduit une exposition actuelle à l'aléa recul du trait de côte. Parmi ces enjeux, 32 (15 en Vendée) sont implantés sur des secteurs où le trait de côte n'est pas (ou partiellement) fixé par des ouvrages de protection longitudinaux. Un décompte des enjeux par site est proposé dans la figure 6 et la synthèse exhaustive est accessible dans l'annexe. Ce constat peut être appuyé par deux observations. D'une part, le Cotentin est plus affecté par l'érosion côtière que la Vendée, tant en linéaire qu'en vitesse de recul. Par exemple, le recul moyen au droit des enjeux fortement exposés (prédisposition critique) est égal à -0,26 m/an (max = -1,08, boîte n°1836, CC Pays de Saint-Gilles-Croix-de-Vie) en Vendée et -0,85 m/an (max = -3,73, boîte n°1633, CC Côte Ouest Centre Manche) dans le Cotentin. D'autre part, s'il est admis que la présence des enjeux dans la bande des 100 m est analogue entre les deux territoires, la part des enjeux implantés le long des secteurs en érosion historique est plus importante dans le Cotentin (31 % ; contre 18 % en Vendée). Enfin, la part des enjeux situés derrière des ouvrages de protection est élevée sur les deux sites (77 % sur la côte normande, 70 % en Vendée). Cette implantation derrière des ouvrages illustre une situation de tension entre le processus d'urbanisation de la frange côtière et la pression exercée par la dynamique côtière sur cette même frange côtière. Dans les deux cas étudiés, environ 8 % des enjeux sont implantés sur des secteurs en érosion dépourvus d'ouvrages de protection longitudinaux, ce qui représente un linéaire côtier de 8 km dans le Cotentin et de 3 km en Vendée.

Figure 4: Indicateur de prédisposition pour les constructions, les routes carrossables et les campings sur les côtes ouest Cotentin et nord Vendée



Dans les nuages de points, les valeurs de l'indicateur sont représentées avec une échelle logarithmique.

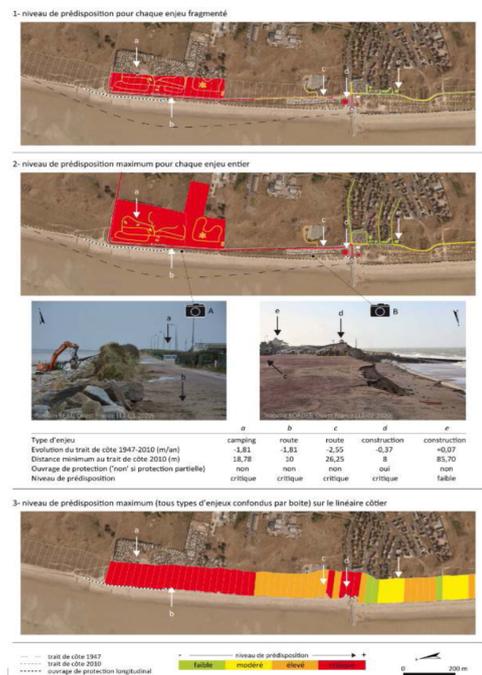
M. Juigner, 2021. Source : fond de carte ESRI.

Identification de territoires exposés, illustration sur la commune de Gouville-sur-Mer

- 21 Un deuxième résultat à l'échelle des deux terrains d'étude révèle l'existence de secteurs où l'exposition actuelle des enjeux au recul côtier apparaît critique (figure 4). Dans le Cotentin, les dunes de Hauteville-sur-Mer/Montmartin-sur-Mer et le secteur du havre de Lessay peuvent être cités, bien connus par les services de l'État qui gèrent le risque "Érosion". Ces sites sont localisés de part et d'autre de havres caractérisés par une forte mobilité du trait de côte. Situé à l'extrémité sud du Havre de Regnéville, le secteur de Montmartin-sur-Mer est particulièrement dynamique, puisque le trait de côte a reculé en moyenne de -2 m/an entre 1947 et 2010 (max = $-3,55$ m/an, boîte n°2603) sur un linéaire côtier d'environ deux kilomètres. Un enrochement de 400 m de long tend à fixer la position du trait de côte au-devant d'une vingtaine de constructions, d'une dizaine de segments routiers et d'un camping. Le recul du trait de côte mesuré sur ce secteur étant antérieur à la construction de l'enrochement (vers la fin des années 1970), les vitesses de recul sont "artificiellement" minimisées du fait de la présence de l'ouvrage. Le secteur du havre de Lessay comporte deux sites sensibles, situés aux extrémités nord (commune de Saint-Germain-sur-Ay) et sud du havre (commune de Créances). Le recul côtier est plus modéré au nord ($-0,74$ m/an en moyenne) qu'au sud, où le recul moyen est de $-2,30$ m/an et atteint un maximum de -4 m/an (boîte n°1629). Un camping et trois constructions semblent menacés à court terme au sud, tandis qu'une quinzaine de constructions se situent sur le cordon dunaire au nord du havre.

Une de ces constructions est implantée derrière un enrochement contourné par l'érosion. Le troisième secteur identifié dans le Cotentin correspond aux dunes de Gouville-sur-Mer (figure 5). Contrairement aux deux premiers secteurs, celui-ci se situe entre deux havres (Geffosses et Blainville). Ce site s'étend sur un linéaire d'environ un kilomètre, délimité au sud par une cale faisant office d'épi et au nord par un enrochement de 400 m de long. Deux campings, trois segments de route et deux constructions sont directement menacés par le recul du trait de côte. La vitesse moyenne de recul est de -1,10 m/an (max = -2,55 m/an au droit des campings, boîte n°2111). La figure 5 illustre sur ce site la restitution de l'indicateur de prédisposition. La cartographie du niveau de prédisposition des enjeux fragmentés (figure 5.1) permet de localiser pour chaque enjeu situé dans la bande des 100 m, notamment pour les enjeux s'étendant sur un long linéaire de côte (routes, campings), le ou les points les plus sensibles. On observe ainsi que la route longeant le trait de côte en direction des campings ne présente pas partout le même niveau de prédisposition, la section proche des campings étant plus exposée. La cartographie du niveau de prédisposition maximum des enjeux entiers (figure 5.2) permet de caractériser chaque enjeu par une seule relation aléa/enjeu, celle présentant la prédisposition la plus importante. La route citée précédemment présente désormais un niveau de prédisposition homogène, "critique" dans ce cas. Enfin, la cartographie des niveaux de prédisposition maximum pour tous les types d'enjeu confondus (figure 5.3) propose une synthèse par boîte de la prédisposition maximum d'un linéaire côtier. Elle permet d'identifier les points sensibles le long de la côte, quel que soit le type d'enjeu. Sur le site de Gouville-sur-Mer, le linéaire côtier au droit des campings ainsi qu'une partie de la route côtière présente un niveau de prédisposition critique. Il s'agit, après le front de mer de la commune d'Agon-Coutainville, du linéaire le plus important identifié dans cette étude. Enfin, le dernier site identifié se situe en Vendée, sur la commune de Saint-Hilaire-de-Riez. Deux constructions sont situées au contact d'un perré maçonné édifié au droit un linéaire côtier avec un recul historique moyen de -0,80 m/an. La côte nord de la Vendée n'a pas d'équivalent aux sites localisés dans le Cotentin. Les enjeux identifiés par un niveau de prédisposition critique sont dispersés le long de la côte et caractérisés par des vitesses de recul modérées.

Figure 5: Indicateur de prédisposition sur un secteur à risque de la commune de Gouville-sur-Mer



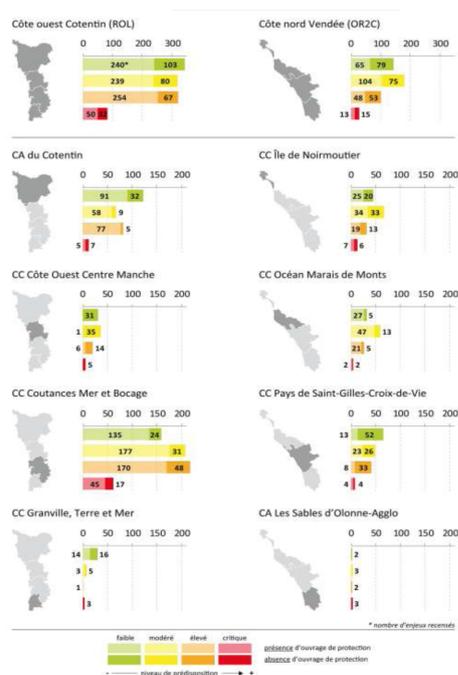
M. Juigner, 2021. Source : Ortholittorale v2 MEDDE

Synthèse à l'échelle des territoires

- 22 Enfin, les résultats de l'indicateur de prédisposition sont restitués sous la forme d'un bilan réalisé à l'échelle des territoires. La compétence de la gestion du trait de côte et des risques côtiers relevant le plus souvent de groupements de communes, le bilan présenté dans la figure 6 est réalisé à l'échelle des EPCI. Ce bilan dresse, pour chaque EPCI, une vision synoptique et instantanée du nombre d'enjeux situés dans les secteurs en érosion, tous types d'enjeux confondus, en fonction du niveau de prédisposition et de la présence/absence d'ouvrages de protection. Le détail par type d'enjeu est présenté en annexe de l'article. Les côtes ouest Cotentin et nord Vendée sont couvertes par quatre EPCI chacune. Par simple observation du nombre d'enjeux recensés, ces huit "territoires à risque d'érosion" peuvent être caractérisés et groupés en quatre classes. La première classe comprend les territoires faiblement exposés, à savoir la CC Granville, Terre et Mer (Cotentin) et la CA Les Sables d'Olonne-Agglomération (Vendée). Ces deux territoires ne recensent que 3 enjeux avec un niveau de prédisposition critique, pour un nombre total d'enjeux exposés inférieur à 50. Une deuxième classe, pouvant être définie comme modérément exposée, rassemble les CC Côte Ouest Centre Manche (Cotentin), Île de Noirmoutier, Océan Marais de Monts et Pays de Saint-Gilles-Croix-de-Vie (Vendée). Ces quatre EPCI comprennent entre 100 et 150 enjeux, parmi lesquels le niveau de prédisposition critique est faiblement représenté. Les CC Île de Noirmoutier et Pays de Saint-Gilles-Croix-de-Vie se démarquent cependant par un nombre sensiblement plus important d'enjeux pouvant être exposés à moyen terme (32 et 41 enjeux respectivement pour le niveau de prédisposition élevé), dans la mesure où la tendance à l'érosion persisterait dans les années à venir. La troisième classe est

caractérisée par les territoires modérément exposés, avec un potentiel élevé d'exposition au risque érosion. Cette classe ne comprend qu'un seul territoire, la CA du Cotentin. La présence avérée d'enjeux dans des secteurs en érosion (plus de 280 enjeux au total) induit la possibilité d'une augmentation de l'exposition au risque érosion si la tendance au recul se confirme (82 enjeux avec un niveau de prédisposition élevé). Enfin, la quatrième classe identifie les territoires fortement exposés, avec un potentiel élevé d'exposition au risque érosion. C'est le cas de la CC Coutances Mer et Bocage (Cotentin). Ce territoire cumule un nombre important d'enjeux avec un niveau de prédisposition critique (62 enjeux) et un vaste "réservoir" d'enjeux pouvant être exposés dans les décennies à venir (218 enjeux avec un niveau de prédisposition élevé, 208 enjeux avec un niveau modéré et 159 avec un niveau faible) si la tendance historique à l'érosion venait à se poursuivre. Parmi les huit EPCI étudiés ici, la CC Coutances Mer et Bocage est le "territoire à risque érosion" le plus exposé.

Figure 6 : Bilan de l'indicateur de prédisposition à l'échelle des territoires (nombre d'enjeux exposés au recul du trait de côte)



M. Juigner, 2021.

Discussion

Transposabilité de la segmentation par boîte et de l'indicateur

- 23 La création et la publication d'un indicateur de prédisposition au risque associé à l'érosion côtière, commun à deux observatoires régionaux du trait de côte, constituent une première expérience sur le littoral français. La faisabilité d'un tel indicateur repose, d'une part, sur la recherche de dénominateurs communs aux deux territoires et, d'autre part, sur la transposabilité de la méthode de calcul. Ce démonstrateur se

voulant transposable simplement, l'intégration de variables supplémentaires de nature à le complexifier n'a pas été retenue dans l'élaboration de la démarche. Toutefois, des variables relatives à l'occupation du sol, à la microtopographie ou à la morphodynamique des systèmes plage-dune pourraient, par exemple, aisément être intégrées et agrégées dans les boîtes pour affiner le diagnostic. Ce potentiel ne peut être exploité que si l'information géographique existe. La production de données fiables, homogènes et pérennes est donc centrale dans le processus de compréhension du risque. Les actions entreprises en ce sens par les établissements publics et les observatoires régionaux, dans le cadre du réseau national des observatoires du trait de côte, doivent donc perdurer. La mise à disposition de la donnée est également primordiale. L'occasion est saisie ici de signaler l'absence criante d'informations géographiques relatives à l'emprise au sol des campings, alors que ces infrastructures sont bien souvent implantées à proximité du trait de côte et constituent des enjeux incontournables dans le paysage littoral, notamment économiques et pour les vies humaines en cas de submersion ou d'effondrement de falaise. Par ailleurs, la méthode de segmentation utilisée répond bien à l'objectif fixé de transposabilité le long des côtes sableuses. L'optimisation et l'automatisation des chaînes de géotraitement nécessaires à la création de boîtes (ou de transects) et au calcul d'indicateurs se poursuivent dans le cadre des travaux de l'OR2C (<https://geo-or2c.univ-nantes.fr/>). Un déploiement plus ambitieux de la méthode peut être envisagé le long des côtes basses sableuses, tout comme des tests effectués sur les autres types de côte.

Éclairer les choix de gestion et prioriser l'action publique

- 24 La cartographie à échelle 1/5 000^e de la prédisposition au risque érosion contribue à identifier les enjeux et les territoires exposés sur la base de critères objectifs. La vision synoptique et instantanée de l'exposition constitue un préalable aux projets de développement des territoires littoraux. Ainsi, la démarche et les résultats présentés dans cet article ont pour vocation d'éclairer les décideurs, notamment dans les choix qu'ils auront à faire dans le cadre de la gestion de la bande côtière. Cette gestion doit également intégrer le risque de submersion marine. La prise en compte de la mobilité du trait de côte dans les projets de territoire doit permettre de contraindre l'implantation de nouveaux enjeux dans des secteurs à risque et d'anticiper les possibles gestions de crises dans les secteurs actuellement exposés. La promotion récente par l'État d'un changement de doctrine, prônant "la recomposition spatiale des territoires littoraux", au détriment du concept de "défense contre la mer" (mais uniquement pour l'érosion), illustre bien la nécessité d'adaptation des sociétés littorales à leur environnement. Les territoires étant inégalement affectés par le recul du trait de côte, l'apport d'outils permettant d'éclairer les décideurs et de prioriser l'action publique en direction des territoires les plus touchés apparaît indispensable. Le projet ANR "RICOCHET" Évaluation multirisques de territoires côtiers en contexte de changement global (2016-2021) propose ainsi des outils de gestion et d'aide à la décision aux gestionnaires des territoires côtiers à risques (<http://anr-ricochet.unicaen.fr/>).

Intégrer la variabilité de l'évolution du trait de côte

- 25 La méthode de quantification de l'aléa érosion utilisée dans cette étude consiste à mesurer la surface (ou la distance relative) entre deux traits de côte sur une période de

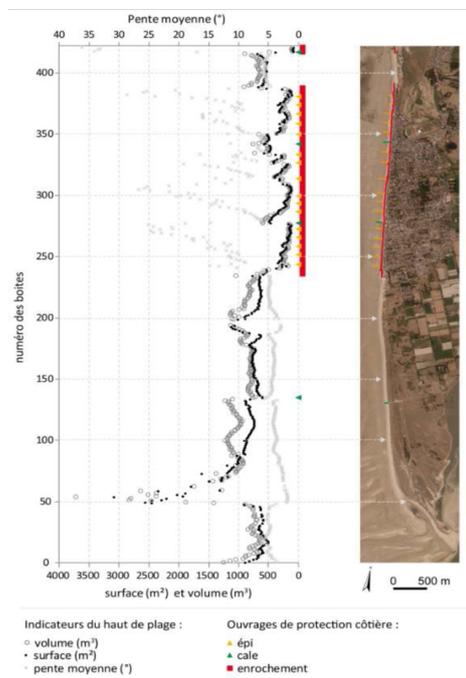
60 ans (*End Point Rate*). Ce calcul, au même titre que les méthodes basées sur le calcul d'une moyenne, ou d'une pente de régression linéaire, tend à résumer par une valeur unique une dynamique parfois complexe. Bien que couramment utilisées dans les études littorales, ces méthodes ne rendent pas compte des différents événements, rythmes et inversions de tendances qui caractérisent toute la variabilité de l'évolution du trait de côte. Les travaux engagés par l'Université de Caen (Levoy *et al.*, 2000 ; Suzanne, 2018 ; Emile, 2019) et par l'Université de Nantes (Robin *et al.*, 2019) ont démontré que l'évolution du trait de côte sur la côte ouest du Cotentin et sur le littoral sableux de la région Pays de la Loire n'est pas linéaire dans le temps. L'intégration de dates intermédiaires dans la cinématique et la classification des tendances et vitesses d'évolution obtenues pour différentes périodes d'analyse permettraient d'affiner l'aléa érosion par la définition de segments côtiers où l'évolution du trait de côte est homogène dans le temps (Burningham, French, 2017 ; Suzanne, 2018 ; Emile, 2019). Chaque segment homogène serait alors caractérisé par une combinaison de tendances et de rythmes d'évolution. Une meilleure qualification de l'aléa nécessite également de prendre en compte le recul plus instantané lié aux événements extrêmes (le paramètre L_{max}) qui, s'il est intégré dans l'évolution historique et donc pris en compte sur un plus long terme, peut poser un problème de gestion à court terme lors de l'événement (Castelle *et al.*, 2017 ; Audère, Robin, 2020).

Préciser le rôle et l'impact des ouvrages de protection

- 26 La prise en compte partielle des ouvrages de protection dans l'indicateur de prédisposition traduit la difficulté de préciser la fonction et le niveau de protection de chaque ouvrage, mais également son impact sur la dynamique sédimentaire. La recherche d'un dénominateur commun permettant d'intégrer directement les ouvrages dans l'indicateur de prédisposition n'a pas abouti du fait de la spécificité de chaque ouvrage. La simple présence d'un ouvrage ne permet pas de conclure qu'un secteur est protégé du fait, par exemple, d'un possible contournement ou d'une rupture. Un ouvrage peut, s'il est situé en avant du trait de côte naturel, être le témoin d'une érosion historique et actuelle. Si un même ouvrage existe sur les images aériennes historiques et récentes, l'analyse ne permettra pas d'établir une éventuelle érosion antérieure, et le trait de côte sera considéré comme stable (voire en accrétion si l'ouvrage a été conforté vers la plage). L'intégration des ouvrages dans la qualification de l'aléa érosion est fondamentale et nécessite d'être approfondie. La segmentation par boîte utilisée pour l'indicateur de prédisposition pourrait être mobilisée pour objectiver les phénomènes bien connus d'érosion des plages au droit et à proximité des ouvrages. Le calcul et la mise en relation d'indicateurs permettraient alors de caractériser les ouvrages en fonction de leur impact sur la dynamique sédimentaire. Par exemple, la figure 7 restitue, sur le linéaire côtier de la commune d'Agon-Coutainville, un ensemble d'indicateurs extraits du LiDAR Litto3D de l'IGN et calculés dans des boîtes de 20*110 m. Ces indicateurs décrivent la morphologie du haut de plage et du stock de sédiment disponible. Il s'agit de la surface, du volume et de la pente moyenne du haut de plage (compris entre la plus haute mer astronomique et le niveau moyen des hautes mers). Au nord de la commune, l'impact des ouvrages longitudinaux sur l'abaissement du haut de plage apparaît clairement, et se traduit par une diminution brutale de la surface et du volume de sédiment comparativement aux secteurs dunaires en libre évolution situés au sud. La pente augmente significativement

au droit des ouvrages, ce qui signifie que la limite des plus hautes mers astronomiques atteint ces derniers. Le haut de plage n'existe plus du fait de l'érosion causée par l'ouvrage. L'impact des ouvrages transversaux (cales et épis) apparaît également et se traduit par une succession d'indentations liées à la retenue des sédiments en amont de l'ouvrage et par une érosion en aval (selon le sens de la dérive littorale dominante). La problématique de l'érosion côtière au droit des ouvrages de protection peut être traitée mais requiert la mise en place d'une démarche méthodologique dédiée de mise en relation d'indicateurs.

Figure 7 : Illustration de l'impact des ouvrages sur le transit sédimentaire et le stock de sédiment sur la commune d'Agon-Coutainville (ouest Cotentin)



M. Juigner, 2021. Source : Ortholittorale v2 MEDDE.

Affiner la qualification des enjeux

- 27 La sélection des enjeux retenus pour le calcul de l'indicateur permet de dresser un tableau global de la prédisposition au risque érosion. Toutefois, l'indicateur n'intègre pas de réelle réflexion sur la nature des enjeux. Ce premier démonstrateur pourrait conduire, dans un second temps, à un travail de reclassification des enjeux pour affiner la lecture des résultats (Le Berre *et al.*, 2014 ; Robert, 2016). Une estimation monétaire des enjeux semble être également une piste à poursuivre, à l'image de ce que proposent Fraser, Bernatchez et Dugas (2017).

Conclusion

- 28 Pour conclure, le partenariat entre le ROL et l'OR2C a permis de développer pour la première fois sur le littoral français un indicateur de prédisposition au risque érosion commun à deux observatoires régionaux du trait de côte. Cette étude conforte l'idée que la segmentation par boîte est une démarche géomatique adaptée pour l'analyse spatiale des composantes du risque, d'autant plus si elle est couplée avec la production et la mise à disposition de données de référence. Les résultats de l'indicateur produits dans cette étude dressent un premier bilan de la prédisposition associée au risque érosion sur les côtes du Cotentin et de la Vendée. Les enjeux exposés sont mis en évidence et les territoires du risque identifiés. Cette démarche est transposable et permet de situer différents terrains d'étude dans un référentiel commun à des fins de comparaison. De fait, la côte ouest de la Manche est plus exposée au risque d'érosion côtière que le littoral nord vendéen. La prédisposition au risque érosion d'un certain nombre de secteurs de l'ouest Cotentin n'a pas d'équivalent sur la côte nord de la Vendée. Les résultats de l'indicateur, plus particulièrement le long des secteurs fortement exposés, illustrent la nécessité pour les décideurs et les aménageurs de concilier projet de territoire et dynamique côtière. De plus, cette étude offre de nouvelles perspectives en vue d'améliorer la cartographie de la prédisposition au risque d'érosion. La variabilité de l'érosion côtière sur le court, le moyen et le long termes, les reculs extrêmes liés aux événements tempétueux et l'impact des ouvrages sur la dynamique sédimentaire sont autant d'exemples de dénominateurs communs qu'il est possible de développer pour affiner le diagnostic de l'aléa érosion. La reclassification des enjeux apporterait également une vision précise de la nature et de la valeur des biens exposés.
-

BIBLIOGRAPHIE

- Abuodha P.A.O., Woodroffe C.D., 2010, "Assessing vulnerability to sea-level rise using a coastal sensitivity index: a case study from southeast Australia", *Journal of Coastal Conservation*, Vol.14, No. 3, 189-205.
- ADEME, 2013, *Indicateurs de vulnérabilité d'un territoire au changement climatique*.
- Audère M., Robin M., 2020, "Assessment of the vulnerability of sandy coasts to erosion (short and medium term) for coastal risk mapping (Vendée, W France)", *Ocean and Coastal Management*, Vol. 201.
- Béchet B., Le Bissonnais Y., Ruas A. (coord.), Aguilera A., Andrieu H., Barbe E., Billet P., Cavailhès J., Cohen M., Cornu S., Dablanc L., Delolme C., Géniaux G., Hedde M., Sophie L., Mering C., Musy M., Polèse M., Weber C., Desrousseaux M., Frémont A., Le Perchec S., Schmitt B., Savini I., 2017, *Sols artificialisés et processus d'artificialisation des sols : déterminants, impacts et leviers d'action*, Synthèse du rapport d'expertise scientifique collective, Ifsttar-Inra (France).
-

Bio A., Bastos L., Granja H., Pinho J.L.S., Gonçalves J.A., Henriques R., Madeira S., Magalhaes A., Rodrigues D., 2015, "Methods for coastal monitoring and erosion risk assessment: two Portuguese case studies", *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, Vol.15, No.1, 47-63.

Buchou S., 2020, *Quel littoral pour demain ? Vers un nouvel aménagement des territoires côtiers adapté au changement climatique*, Rapport remis à Monsieur le Premier Ministre et à Madame la Ministre de la Transition Écologique et Solidaire.

Burningham H., French J., 2017, "Understanding coastal change using shoreline trend analysis supported by cluster-based segmentation", *Geomorphology*, Vol.282, 131-149.

Carapuço M.M., 2016, "Coastal indicators", In Kennish M.J. (Ed.), *Encyclopedia of estuaries*, Encyclopedia of Earth Sciences Series, Springer.

Castelle B., Bujan S., Ferreira S., Dodet G., 2017, "Foredune morphological changes and beach recovery from the extreme 2013/2014 winter at a high-energy sandy coast", *Marine Geology*, Vol. 385, 41-55.

Castelle B., Guillot B., Marieu V., Chaumillon E., Hanquiez V., Bujan S., Poppeschi C., 2018, "Spatial and temporal patterns of shoreline change of a 280-km high-energy disrupted sandy coast from 1950 to 2014: SW France", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol.200, 212-223.

CEREMA, 2019, *Connaissance du trait de côte - Évaluation prospective des enjeux affectés par le recul du trait de côte*, Collection : Connaissances.

CEREMA, 2019b, *Dynamique et Évolution du littoral, Fascicule 6 de la pointe de Chémoulin à la pointe de Suzac et Fascicule 4 (à paraître) du cap de la Hague à la pointe de Corsen*, Collection : Connaissances.

CGEDD-IGA-IGF, 2019, *Recomposition spatiale des territoires littoraux*, Rapport mars 2019. <http://www.igf.finances.gouv.fr/files/live/sites/igf/files/contributed/IGF%20internet/2.RapportsPublics/2019/2018-M-088-03-Territoires%20littoraux.pdf>.

Costa S., Delahaye D., Freire-Diaz S., Davidson R., Di-Nocera L., Plessis E., 2004, "Quantification by photogrammetric analysis of the Normandy and Picardy rocky coast dynamic (Normandie, France)", in: Mortimore & Duperet (eds.), *Coastal chalk cliff instability*, Geological Society Engineering, Geology special publication, No.20, 139-148.

Debaine F., Robin M., 2012, "A new GIS modelling of coastal dune protection services against physical coastal hazards", *Ocean & Coastal Management*, Vol.63, 43-54.

Deboudt P., 2010, "Towards coastal risk management in France", *Ocean & Coastal Management*, Vol. 53, 366-378.

DGPR, 2014, *Guide méthodologique : plan de prévention des risques littoraux*, DGPR, SRNH, Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie.

Dodet G., Bertin X., Bouchette F., Gravelle M., Testut L., Wöppelmann G., 2019, "Characterization of Sea-level Variations Along the Metropolitan Coasts of France: Waves, Tides, Storm Surges and Long-term Changes", in: Castelle B., Chaumillon E. (eds.), "Coastal Evolution under Climate Change along the Tropical Overseas and Temperate Metropolitan France", *Journal of Coastal Research*, Special Issue, No.88, 10-24.

Drejza S., Bernatchez P., Marie G., Friesinger S., 2019, "Quantifying road vulnerability to coastal hazards: Development of a synthetic index", *Ocean and Coastal Management*, Vol.181.

Emile P., 2019, *Étude de l'évolution de la position du trait de côte, approche par segmentation et apport des SIG pour combiner les informations sur le littoral : Exemple de deux secteurs du Cotentin aux*

dynamiques différentes, Mémoire de Master 1 Aménagement, Environnement et Développement, sous la direction de Stéphane Costa, UFR SEGGAT, Université de Caen Normandie.

Ferret Y., 2016, *Reconstruction de la série marégraphique de Saint-Nazaire*. Rapport No.27, Shom/DOPS/HOM/MAC.

Fitton J.M., Hansom J.D., Rennie A.F., 2018, "A method for modelling coastal erosion risk: the example of Scotland", *Natural Hazards*, Vol.91, No.3, 931-961.

Fraser C., Bernatchez P., Dugas S., 2017, "Development of a GIS coastal land-use planning tool for coastal erosion adaptation based on the exposure of buildings and infrastructure to coastal erosion, Québec, Canada", *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, Vol.8, No.2, 1103-1125.

Gornitz V., 1991, "Global coastal hazards from future sea level rise", *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, Vol.89, 379-398.

Granja H., Pinho J., Mendes J., 2014, "A Multi-criteria Approach for Erosion Risk Assessment Using a New Concept of Spatial Unit Analysis, Wave Model and High Resolution DEMs", in: Finkl C.W., Makowski C. (eds.), *Remote Sensing and Modeling, Advances in Coastal and Marine Resources*, Springer, 481-494.

Hédou F., Roche A., Trmal C., Moraud S., Deniaud Y., 2018, "Élaboration de l'indicateur national de l'érosion côtière", XVèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, La Rochelle, *Paralia*.

Hénaff A., Le Cornec E., Jabbar M., Pétré A., Corfou J., Le Drezen Y., van Vliët-Lanoë B., 2018, "Caractérisation des aléas littoraux d'érosion et de submersion en Bretagne par l'approche historique", *Cybergeo : European Journal of Geography, Environnement, Nature, Paysage*, [en ligne] document 847. URL : <http://journals.openedition.org/cybergeo/29000>.

Héquette A., 2010, "Les risques naturels littoraux dans le Nord-Pas-de-Calais, France", *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement*, Hors-série 8, [en ligne]. URL : <http://journals.openedition.org/vertigo/10173>.

IPCC SR Ocean and Cryosphere, 2019, *Chapter 4: Sea Level Rise and Implications for Low Lying Islands, Coasts and Communities*. URL : <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-4-sea-level-rise-and-implications-for-low-lying-islands-coasts-and-communities/>.

Juigner M., Robin M., Debaine F., Hélen F., 2017, "A generic index to assess the building exposure to shoreline retreat using box segmentation: Case study of the Pays de la Loire sandy coast (west of France)", *Ocean & Coastal Management*, Vol.148, 40-52.

Juigner M., Robin M., 2018, "Caractérisation de la morphologie des massifs dunaires de la région Pays de la Loire (France) face au risque de submersion marine", *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement*, Vol.18, No.2, [en ligne]. URL : <http://journals.openedition.org/vertigo/20558>.

Kerguillec R., Audère M., Baltzer A., Debaine F., Fattal P., Juigner M., Launeau P., Le Mauff B., Luquet F., Maanan M., Pouzet P., Robin M., Rollo N., 2019, "Monitoring and management of coastal hazards: Creation of a regional observatory of coastal erosion and storm surges in the pays de la Loire region (Atlantic coast, France)", *Ocean & Coastal Management*, Vol.181, No.1.

Le Berre I., Bailly D., Philippe M., Kato Y., 2014, "Les enjeux, une composante essentielle de la vulnérabilité", in: Hénaff A. (ed.), Philippe M., *Gestion des risques d'érosion et de submersions marines, guide méthodologique*, Projet Cocorisco.

Léone F., Vinet F. (ed.), 2013, *Le littoral : caractérisation et gestion d'un espace à risques*, Géorisques, PULM.

- Letortu P., Costa S., Abdelkrim B., Cador J.M., Quenol H., 2014, "Vitesses et rythmes de recul des falaises crayeuses de Haute-Normandie (France)", *Géomorphologie, Relief processus environnement*, Vol.20, No.2, 133-144.
- Levoy F., Larsonneur C., 1994, *Étude globale concernant la défense contre la mer : Synthèse des études*, Caen, CREC.
- Levoy F., Anthony E.J., Monfort O., Larsonneur C., 2000, "The morphodynamics of megatidal beaches in Normandy, France", *Marine Geology*, Vol.171, No.1-4, 39-59.
- Luijendijk A., Hagenaars G., Ranasinghe R. et al., 2018, "The State of the World's Beaches", *Scientific Reports*, Vol.8, 6641.
- Meur-Ferec C., 2006, *De la dynamique naturelle à la gestion intégrée de l'espace littoral : un itinéraire de géographe*, HDR, Université de Nantes.
- Meur-Ferec C., Le Berre I., Cocquempot L., Guillou E., Henaff A., Lami T., Le Dantec N., Letortu P., Philippe M., Noûs C., 2020, "Une méthode de suivi de la vulnérabilité systémique à l'érosion et la submersion marines", *Développement durable et territoires*, Vol.11, No.1, [en ligne]. URL : <http://journals.openedition.org/developpementdurable/16731>.
- Nguyen T.T.X., Bonetti J., Rogers K., Woodroffe C.D., 2016, "Indicator-based assessment of climate change impacts on coasts: A review of concepts, methodological approaches and vulnerability indices", *Ocean & Coastal Management*, Vol.123, 18-43.
- Olsen M.J., Young A.P., Ashford S.A., 2012, "TopCAT - Topographical Compartment Analysis Tool to analyse seacliff and beach change in GIS", *Computers & Geosciences*, Vol.45, 284-292.
- ONERC, 2015, *Changement climatique et niveau de la mer : de la planète aux côtes françaises, Le climat de la France au XXIème siècle*, Vol.5, rapport DGEC, Ministère de l'Écologie et du Développement durable.
- ONML, Observatoire National de la Mer et Littoral, [en ligne]. URL : <https://www.onml.fr/accueil/>.
- Paskoff R., 1993, *Côtes en danger*, Collection Pratiques de la Géographie, Masson, Paris.
- Pouvreau N., 2008, *Trois cents ans de mesures marégraphiques en France : outils, méthodes et tendances des composantes du niveau de la mer au port de Brest*, Thèse de doctorat, Université de La Rochelle.
- Quillet E., Meur-Ferec C., Chauveau E., Philippe M., 2019, "Contribution à la mise en place d'indicateurs de suivi de la gestion des risques côtiers en France Métropolitaine: vers un observatoire intégré des risques d'érosion submersion", *Norôis*, Vol.250, [en ligne]. URL : <http://journals.openedition.org/norois/7417>.
- Robin M., Verger F., 1996, "Pendant la protection, l'urbanisation continue", *Les Ateliers du Conservatoire du littoral*, No.13.
- Robin M., Juigner M., Luquet F., Audere M., 2019, "Assessing Surface Changes between Shorelines from 1950 to 2011: The case of a 169-km Sandy Coast, Pays de la Loire (W France)", in: Castelle B., Chaumillon E. (eds.), "Coastal Evolution under Climate Change along the Tropical Overseas and Temperate Metropolitan France", *Journal of Coastal Research*, Special Issue, No.88, 122-134.
- Robert S., 2016, "Entre étalement et densification : une approche fine de l'urbanisation littorale sur la Côte bleue, Provence", *Cybergeo : European Journal of Geography, Espace, Société, Territoire*, [en ligne] document 764. URL : <http://journals.openedition.org/cybergeo/27451>.

SNGITC, 2020, *Stratégie Nationale de Gestion Intégrée du Trait de Côte*, [en ligne]. URL : <http://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/strategie-nationale-de-gestion-integree-du-trait-r434.html>

Stéphan P., Blaise E., Suanez S., Fichaut B., Autret R., Floc'h F., Cuq V., Le Dantec N., Ammann J., David L., Jaud M., Delacourt C., 2019, "Long, Medium, and Short-term Shoreline Dynamics of the Brittany Coast (Western France)", in: *Castelle B., Chaumillon E. (eds.), "Coastal Evolution under Climate Change along the Tropical Overseas and Temperate Metropolitan France", Journal of Coastal Research, Special Issue, No.88, 89-109.*

Suzanne J.B., 2018, *Approche géomatique des dynamiques du trait de côte : Création d'indices de caractérisation et de prédisposition aux aléas côtiers sur la côte ouest Cotentin*, Mémoire de Master 1 Aménagement, Environnement et Développement, sous la direction de Stéphane Costa, UFR SEGAT, Université de Caen Normandie.

Vinet F., Defossez S., Rey T., Boissier L., 2012, "Le processus de production du risque « submersion marine » en zone littorale : l'exemple des territoires « Xynthia »", *Norois, No.222*, [en ligne]. URL : <http://journals.openedition.org/norois/3834>.

Zaninetti J.M., 2006, "L'urbanisation du littoral en France", *Population & Avenir, No.677, 4-8.*

ANNEXES

Synthèse par territoire, par niveau de prédisposition et par tendance d'évolution du trait de côte (avec présence/absence d'ouvrage de protection) du nombre de constructions, de routes carrossables et de campings recensés dans la bande des 100 m.

Tendances d'évolution du trait de côte	Ouvrage de protection	Côte ouest du Cotentin								Côte nord de la Vendée								total																			
		CA du Cotentin		CC Côte Ouest Centre Manche		CC Coutance Mer et Bocage		CC de Granville, Terre et Mer		CC Ile de Noirmoutier		CC Océan Marais de Monts		CC Pays de St Gilles-Croix-de-Vie		CA Les Sables d'Olonne-Anglo																					
Constructions	érosion	absence	Nb	15	3	3	3	21	25	8	1	19	23	38	6	14	1	180	16	20	9	5	2	9	1	1	36	19	29	3	1	1	2	154			
		présence	Nb	86	41	73	2	5	92	129	147	31	13	2	621	20	28	15	17	42	1	9	20	6	2	1231											
	stabilité relative / accretion	absence	Nb	125	46	1	73	26	15	13	66	15	2	23	4	409	250	113	2	7	5	1	1	1	2	6	3	391									
		présence	Nb	94	69	20	125	105	23	213	234	116	235	156	115	1505	225	174	112	138	78	10	282	168	44	7	1	3	2	1936							
	total	Nb	320	159	97	5	219	156	51	1	337	452	316	37	264	182	119	0	2715	511	335	138	5	164	134	13	1	328	208	81	5	7	1	3	2		
Routes carrossables	érosion	absence	Nb	17	6	2	4	10	9	5	4	5	8	9	9	2	3	2	95	4	13	3	1	3	4	4	16	7	3	1	1	2	1	64			
		présence	Nb	5	17	4	2	1	1	43	47	23	14	1	1	1	1	1	1	160	5	6	4	7	10	5	20	2	4	3	2	2	70				
	stabilité relative / accretion	absence	Nb	21	21	7	24	11	3	6	1	1	3	2	2	100	60	43	10	15	6	4	4	2	1	1	6	152									
		présence	Nb	22	24	14	25	17	21	71	45	28	67	27	30	391	22	19	22	42	33	50	63	53	34	1	339										
	total	Nb	65	68	27	6	59	38	30	4	125	101	61	23	73	31	33	2	746	91	81	39	8	70	48	78	2	87	65	40	3	1	3	8	1	625	
Campings	érosion	absence	Nb				1	1			1	2		1	1	7																		4			
		présence	Nb				1				1					2																		0			
	stabilité relative / accretion	absence	Nb				1									2																		3			
		présence	Nb				1				1					4																			0		
	total	Nb	0	0	2	1	1	1	1	0	0	2	1	2	0	2	1	1	15	0	2	2	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	7		
Synthèse (nombre d'enjeux et linéaire côtier associé)	érosion	absence	Nb	32	9	5	7	31	35	14	5	24	31	48	17	16	5	0	3	282	20	33	13	6	5	13	5	2	52	26	33	4	2	3	2	222	
		présence	Nb	91	58	77	5	0	1	6	0	135	177	170	45	14	3	1	0	783	25	34	19	7	27	47	21	2	13	23	8	4	0	0	0	230	
	stabilité relative / accretion	absence	Nb	146	67	9	0	98	37	18	0	19	67	16	0	5	23	6	0	511	310	158	13	0	22	11	5	0	5	3	3	0	6	1	9	0	546
		présence	Nb	116	93	35	0	150	122	44	0	284	280	144	0	302	184	146	0	1900	247	193	134	0	180	111	60	0	345	221	78	0	0	0	1	0	1570
	total	Nb	178	76	14	7	129	72	32	5	43	98	64	17	21	28	6	3	793	330	191	26	6	27	24	10	2	57	29	36	4	8	4	11	3	768	
Toutes tendances	Linéaire côtier (m)	absence	Nb	1893	1985	934	197	1850	2091	1357	173	603	987	1670	648	388	592	522	134	16023	1214	2737	950	178	609	746	494	123	636	823	365	156	103	76	298	85	9593
		présence	Nb	207	151	112	5	150	123	50	0	419	457	314	45	316	187	147	0	2683	272	227	153	7	207	158	81	2	358	244	86	4	0	0	1	0	1800
	Linéaire côtier (m)	absence	Nb	94	2120	2061	267	25	768	1472	0	292	1289	1471	2247	127	1253	2138	0	15625	455	1135	3327	331	224	653	2236	276	50	1602	1884	143	0	0	109	0	12425
		présence	Nb	385	227	126	12	279	195	82	5	462	555	378	62	337	215	153	3	3476	602	418	179	13	234	182	91	4	415	273	122	8	8	4	12	3	2568
	total	Nb	1987	4105	2994	464	1875	2859	2829	173	895	2276	3141	2895	516	1845	2660	134	31648	1669	3871	4277	509	833	1399	2731	399	686	2425	2249	299	103	76	406	85	22017	

M. Juigner, 2021.

NOTES

1. Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte

2. Conseil général de l'environnement et du développement durable, Inspection générale de l'administration, Inspection générale des finances

3. Agence de la transition écologique

RÉSUMÉS

Les côtes basses sableuses sont des espaces contraints et sensibles aux aléas côtiers. L'implantation des activités humaines à proximité du bord de mer fait de ces espaces des territoires du risque. L'identification des territoires exposés au recul du trait de côte figure parmi les objectifs de la stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte portée par le Ministère de la Transition écologique et solidaire. Pour ce faire, la stratégie nationale s'appuie notamment sur la mise en réseau des observatoires régionaux du trait de côte. Cet article propose une démarche géomatique de spatialisation d'un nouvel indicateur de prédisposition associé au risque érosion, commune à deux de ces observatoires régionaux : le Réseau d'observation du littoral de Normandie et des Hauts-de-France et l'Observatoire régional des risques côtiers en Pays de la Loire. La prédisposition est estimée, par l'agrégation dans des unités d'observation appelées « boîtes », de trois variables spatialisées : (i) l'évolution historique du trait de côte (ii) la distance entre le trait de côte et les constructions, les routes carrossables et les campings situés dans la bande des 100 m et (iii) la présence/absence d'ouvrages de protection. Le calcul de l'indicateur pour chaque enjeu puis la réalisation d'une synthèse à l'échelle des territoires permet une classification des territoires exposés au risque d'érosion côtière le long de la côte ouest de la Manche et de la côte nord de la Vendée

Low sandy coasts are small and constrained spaces very sensitive to coastal hazards. The settlement of human activities next to the coastline sets up at-risk territories. The identification of territories exposed to coastal erosion is one of the objectives of the French national strategy for integrated coastal management initiated by the French Ministry of Ecology. This national strategy relies on the network of regional coastal observatories. This paper proposes a common geomatics approach of two of these regional observatories aimed at spatializing a new coastal erosion risk indicator. The partnership between the "Réseau d'observation du littoral de Normandie et des Hauts-de-France" and the "Observatoire régional des risques côtiers en Pays de la Loire", aims at applying this indicator along the sandy coasts of western Manche and northern Vendée, France. The indicator is composed of the combination of 3 variables into spatial units ("boxes"): (i) the historical shoreline change, (ii) the distance between the shoreline and the buildings, roads and campsites located in the 100-m coastal strip and (iii) the presence/absence of coastal protections. The computation of the indicator for each stake, at the scale of the territories, allows the ranking of the erosion risk territories

Las costas bajas arenosas son espacios contraídos y sensibles a los riesgos costeros y la localización de actividades humanas a proximidad del borde de mar hace de estos espacios territorios de riesgo. La identificación de áreas expuestas al retroceso de la línea de costa figura entre los objetivos de la estrategia nacional de gestión integrada de la línea costera desarrollada por el Ministerio de la Transición Ecológica y Solidaridad. Para ello, la estrategia nacional se apoya principalmente en la puesta en marcha de redes de observatorios regionales en la línea de costa. Este artículo propone desde un enfoque geomático de espacialización, un nuevo indicador

de exposición asociado al riesgo de erosión en dos observatorios regionales: La Red de Observación del litoral de Normandía y de los Altos-de-Francia y el Observatorio regional de riesgos costeros en el País de la Loira. La exposición es estimada, por la agregación de unidades de observación llamadas «cajas», de tres variables espacializadas : (i) la evolución histórica de la línea de costa (ii) la distancia entre la línea de costa y las construcciones, las rutas transitables y los campings localizados en una franja de 100 metros y (iii) la presencia/ausencia de obras de protección. El cálculo del indicador para cada uno y posteriormente la realización de una síntesis a escala de los territorios, permite una clasificación de las áreas expuestas al riesgo de erosión costera a lo largo de la costa oeste de la Mancha y de la costa norte de la Vandea.

INDEX

Palabras claves : erosión costera, geomática, indicador, riesgo costero

geographyun 908, 926, 250

Keywords : coastal erosion, geomatics, indicator, coastal risks, stakes

Mots-clés : érosion côtière, géomatique, indicateur, risques côtiers, enjeu

AUTEURS

MARTIN JUIGNER

Université de Nantes, CNRS, OSUNA UMS 3281, 44000 Nantes, France

Ingénieur de recherche

Martin.Juigner@univ-nantes.fr

MARC ROBIN

Université de Nantes, CNRS, LETG UMR 6554, 44000 Nantes, France

Professeur des universités

Marc.Robin@univ-nantes.fr

MORGANE AUDÈRE

Université de Nantes, CNRS, LETG UMR 6554, 44000 Nantes, France

Doctorante

Morgane.Audere@univ-nantes.fr

PAUL FATTAL

Université de Nantes, CNRS, LETG UMR 6554, 44000 Nantes, France

Professeur des universités

Paul.Fattal@univ-nantes.fr

BENJAMIN HERVY

Université de Nantes, CNRS, OSUNA UMS 3281, 44000 Nantes, France

Ingénieur de recherche

Benjamin.Hervy@univ-nantes.fr

RIWAN KERGUILLEC

Université de Nantes, CNRS, OSUNA UMS 3281, 44000 Nantes, France
Ingénieur de recherche
Riwan.Kerguillec@univ-nantes.fr

JEAN-BAPTISTE SUZANNE

NORMANDIE UNIV, UNICAEN, CNRS, LETG, 14000 CAEN, France
Diplômé de Master 2
jeanbaptiste.suzanne50@gmail.com

STÉPHANE COSTA

NORMANDIE UNIV, UNICAEN, CNRS, LETG, 14000 CAEN, France
Professeur des universités
stephane.costa@unicaen.fr

MAËLYS LOPIN

Réseau d'Observation du Littoral (ROL) de Normandie et des Hauts-de-France, 14200 Hérouville-Saint-Clair, France
Géomaticienne
m.lopin@rolnhdf.fr

OLIVIER MAQUAIRE

NORMANDIE UNIV, UNICAEN, CNRS, LETG, 14000 CAEN, France
Professeur des universités
olivier.maquaire@unicaen.fr

MOHAND MEDJKANE

NORMANDIE UNIV, UNICAEN, CNRS, LETG, 14000 CAEN, France
Ingénieur de recherche
mohand.medjkane@unicaen.fr

JULIE PAGNY

Réseau d'Observation du Littoral (ROL) de Normandie et des Hauts-de-France, 14200 Hérouville-Saint-Clair, France
Directrice
j.pagny@rolnhdf.fr

ARNAUD THULIE

Réseau d'Observation du Littoral (ROL) de Normandie et des Hauts-de-France, 14200 Hérouville-Saint-Clair, France
Géomaticien
a.thulie@rolnhdf.fr

Annexe 3 : Synthèse de la prédisposition des enjeux au risque d'érosion

Prédisposition du bâti					
Distance 2019	Prédisposition 2019	Distance Lmax	Prédisposition Lmax	Distance 2050 +Lmax	Prédisposition 2050 + Lmax
85,2	1,0	74,7	2,0	66,6	2,0
79,8	2,0	70,3	2,0	62,6	2,0
79,1	2,0	69,4	2,0	67,5	2,0
74,6	2,0	65,7	2,0	62,0	2,0
75,7	2,0	66,2	2,0	58,0	3,0
74,1	2,0	65,0	2,0	57,7	3,0
74,1	2,0	64,6	2,0	56,3	3,0
72,0	2,0	61,7	2,0	53,7	3,0
70,2	2,0	59,1	3,0	51,2	3,0
66,9	2,0	56,0	3,0	51,2	3,0
66,6	2,0	54,7	3,0	47,3	3,0
64,8	2,0	54,1	3,0	47,1	3,0
62,4	2,0	52,7	3,0	46,9	3,0
58,7	3,0	54,5	3,0	46,7	3,0
58,6	3,0	51,6	3,0	44,6	3,0
52,2	3,0	45,2	3,0	41,1	3,0
50,4	3,0	42,4	3,0	34,7	4,0
32,8	4,0	23,3	4,0	16,3	5,0
14,8	5,0	6,3	5,0	0,0	5,0

Prédisposition des parcelles : Variable distance				
Distance 2019	Prédisposition 2019	Distance perdue	Pourcentage de perte	Prédisposition 2050 + Lmax
54,64	1	11,51	21,05	1
56,29	1	12,97	23,04	1
52,80	1	13,75	26,04	1
52,33	1	16,89	32,27	2
52,33	1	15,22	29,08	2
52,33	1	16,42	31,39	2
51,24	2	17,41	33,97	3
49,34	2	18,29	37,07	4
50,99	2	16,10	31,58	2
50,81	2	17,85	35,27	3
49,20	3	14,20	28,87	1
47,54	3	18,47	38,85	5
47,89	3	17,65	36,86	4
47,42	3	18,35	38,70	5
41,18	4	14,78	35,89	3
42,72	4	15,52	36,32	4
39,36	4	12,96	32,92	3
18,44	5	12,78	69,32	5
15,56	5	14,14	90,91	6
9,85	5	9,85	100,00	6
9,90	5	9,90	100,00	6

Prédisposition des parcelles : Variable volume				
Volume 2019	Prédisposition 2019	Volume perdu	Pourcentage de perte	Prédisposition 2050 + Lmax
3134,17	1	146,14	4,66	1
2975,93	1	217,70	7,32	1
3075,16	1	261,11	8,49	1
3075,16	1	261,11	8,49	1
2832,23	2	467,16	16,49	2
2832,23	2	467,16	16,49	2
2832,23	2	467,16	16,49	2
2919,12	2	583,90	20,00	3
2742,18	2	741,05	27,02	3
2742,18	2	741,05	27,02	3
2306,27	3	518,57	22,49	3
2306,27	3	518,57	22,49	3
2300,69	3	766,81	33,33	4
2134,64	4	424,63	19,89	2
2082,47	4	698,05	33,52	4
2122,76	4	741,83	34,95	4
2122,76	4	741,83	34,95	4
1247,24	5	202,05	35,00	4
797,44	5	660,82	70,33	5
522,04	5	522,04	100,00	6
619,34	5	619,34	100,00	6

Table des figures

Partie 1 : État de l'art et présentation du secteur d'étude

Chapitre 1 : État de l'art sur l'aléa et les enjeux associés

Figure 1 : Schéma conceptuel des aléas côtiers (source : Robin, 2002).....	p.30
Figure 2 : Emboîtement d'aléas (adaptée de Robin, 2002)	p.30
Figure 3 : Types de marées (Masselink <i>et al.</i> , 2014)	p.33
Figure 4 : Relation entre l'amplitude moyenne des marées et la hauteur des vagues délimitant différents champs de dominance des vagues et des marées. (Modifié par Masselink <i>et al.</i> (2014) à partir de Davis et Hayes, 1984).....	p.34
Figure 5 : Classification des plages selon Masselink et Short (1993)	p.37
Figure 6 : : Schéma des mécanismes induisant le transport longshore des sédiments (Charles et al. ; 2012).....	p.37
Figure 7 : Changements du profil de la plage provoqués par les vagues de tempête à haute énergie par rapport aux vagues de houle à plus faible énergie (Komar <i>et al.</i> , 1983).	p.38
Figure 8 : Définition spatio-temporelle des processus côtiers	p.39
Figure 9 : Références altimétriques pour les marées de type semi-diurne.....	p.40
Figure 10 : Limites morphologiques sur les côtes sableuses (source : Boak et Turner, 2005) p.41	
Figure 11 : Incertitude de la position du trait de côte selon une étude de Smith <i>et al.</i> , 2020. .p.42	
Figure 12 : Schéma de principe montrant la règle de Bruun pour le recul des côtes où h = profondeur de fermeture, L = distance horizontale du trait de côte à la profondeur h, B = estimation de l'élévation de la dune dans la zone érodée, S = élévation du niveau de la mer et R = étendue horizontale du recul côtier.	p.51
Figure 13 : Principe de la règle de la FEMA (Hallermeier et Rhodes, 1988).....	p.52
Figure 14 : Matrice multi-scalaire des principaux instruments de gestion des risques côtiers (Hénauff et Philippe, 2014 ; élaboré par Meur-Ferec et Rabuteau)	p.55

Chapitre 2 : Présentation du secteur d'étude

Figure 1 : Localisation du secteur d'étude.....	p.65
Figure 2 : Types d'artificialisation de littoraux sableux.....	p.66
Figure 3 : Structure et dynamique d'un système plage-dune (Roche <i>et al.</i> , 2015)	p.66
Figure 4 : Classification des plages en Vendée (source : Meziane, 2019).....	p.67
Figure 5 : Marées prédites au port de Saint Nazaire (SHOM, 2022).....	p.67
Figure 6 : Pourcentage et direction des houles sur la période 1950-2022 (Source : ERA5)....	p.70
Figure 7 : Pourcentage et direction des vents sur la période 1950-2022 (Source : ERA5)	p.71
Figure 8 : Séries temporelles des indices correspondants avec superposition de Hs normalisés en moyenne hivernale simulés aux bouées SC (Ecosse, noir) et BI (Gascogne, gris) avec le coefficient de corrélation correspondant (Castelle <i>et al.</i> , 2017).....	p.74
Figure 9 : Inventaire des jours de tempête pour neufs stations de la façade atlantique et tendances d'évolution (Feuillet <i>et al.</i> , 2012).	p.75
Figure 10 : Répartition des logements par secteurs géographiques sur le littoral de Loire-Atlantique en 2005 (Pottier, 2007)	p.78
Figure 11 : Définition, usage et schématisation des indicateurs (i1 à i8) mesurés dans chaque boîte de 25*400 m pour l'évaluation de la protection dunaire contre la submersion marine (Juigner et Robin, 2018).....	p.81
Figure 12 : Campagnes aéroportées en Pays de la Loire OSUNA - OR2C	p.84
Figure 13 : Dispositif CoastSnap. Plage des Dames, commune de Noirmoutier-en-île (Source : OR2C)	p.85
Figure 14 : Fiche thématique produite par l'observatoire du littoral de l'île de Noirmoutier présentant l'évolution du trait de côte entre 1832 et 2007 (à gauche) et la caractérisation de secteurs spécifiques (à droite)	p.86
Figure 15 : Cartographie de l'aléa érosion côtière du Pays de Monts sur le long terme (11 à 891 : numéro de transect créé avec DSAS ; à gauche, représentation graphique des taux d'évolution en rouge, et de la marge d'erreur en bleu).(Juigner <i>et al.</i> , 2013).....	p.87

Partie 2 : L'aléa érosion

Chapitre 1 : Assessing Surface Changes between Shorelines from 1950 to 2011 : The case of a 169-km Sandy Coast, Pays de la Loire (W France)

Figure 1 : Location map of the Pays de la Loire Region along the French Atlantic coast.	p.97
Figure 2 : Method to retrieve the surface changes between shorelines.	p.101
Figure 3 : A zoom showing the example of La Turballe sand spit (in CS 2). The values in m ² are commented on in the text (in dark grey: erosion, in light grey: accretion, in white: stable or non-significant values). See Figure 5 for an overview of the study area, where only the erosion part is represented.	p.104
Figure 4 : Results of sediment cell changes. The values indicated are in m ² /m. There are the sums of surfaces in erosion and in accretion per period and per sedimentary cell (m ²). This sum is divided by the width of the box (m ² /m).....	p.105
Figure 5 : Trends inside each sediment cell. Surfaces in m ² in erosion (negative value) or accretion (positive value) per period for all boxes inside all sediment cells along the 169 km of the sandy dune coastline (from box 1 to box 6501)	p.107

Chapitre 2 : Assessment of the vulnerability of sandy coasts to erosion (short and medium term) for coastal risk mapping (Vendée, W France)

Figure 1 : Location map of Vendée (W France department).....	p.120
Figure 2 : a: Percentage and direction of wind and wave data over the 1979–2016 period (annual and seasonal), b: Wind and wave data during storms Lothar & Martin and Xynthia.	p.121
Figure 3 : Hydrodynamic characteristics over the period between the two aerial images for A) Lothar and Martin, B) Xynthia	p.126
Figure 4 : The shoreline's retreat and damage on protection works in the aftermaths of Xynthia. La Tranche-sur-Mer – South of the Clémenceau beach.	p.128
Figure 5 : Oblique aerial and ground photographs following Xynthia. Town of la Tranche-sur-Mer. Left: 2009. Right: 2010.....	p.128
Figure 6 : Steps of the realization of the “erosion hazard” zone.	p.129
Figure 8 : Retreats measured during both events on the local council community “Océan Marais de Monts”.	p.130
Figure 7 : Percentage of the shoreline impacted by storms per erosion phase on sandy coast of a) Vendée, b) Noirmoutier-en-île, c) La Faute-sur-Mer.	p.130
Figure 9 : Retreats measured during both events on La Pointe du Grouin du Cou. Left strip:	

Lothar and Martin (December 1999). Right strip: Xynthia (February 2010).	p.131
Figure 10 : Projection to 2050 with both scenarios (Lothar & Martin/Xynthia) a) La Tranche-sur-Mer, b) La Guérinière – Noirmoutier island.....	p.132
Figure 11 : Maximum retreat due to extreme events (Lmax) in south of Vendée.	p.133
Figure 12 : Summary of the impact of storms per town and urban area.	p.134
Figure 13 : Comparison of erosion hazard zones by 2050 and 2120. Clémenceau beach, La Tranche-sur-Mer.	p.137

Chapitre 3 : Projection du trait de côte et estimation de l'incertitude

Figure 1 : Méthode de projection du trait de côte et mesure de distance entre les traits de côte numérisé et projeté.	p.142
Figure 2 : Projection de l'élévation du niveau marin selon différents scénarios.....	p.144
Figure 3 : Taux d'évolution du trait de côte mesurés avec les méthodes EPR et LRR	p.145
Figure 4 : Evolution historique du trait de côte (à gauche) et projection du trait de côte selon les applications A1, A2, A3 (à droite) Secteur de l'hippodrome au sud du pont d'Yeu, commune de Saint-Jean-de-Monts.....	p.148
Figure 5 : Evolution historique du trait de côte (à gauche) et projection du trait de côte selon les applications A1, A2, A3 (à droite) Plage des Ovaires et plage des Conches, île d'Yeu.....	p.149
Figure 6 : Evolution historique du trait de côte (à gauche) et projection du trait de côte selon les applications A1, A2, A3 (à droite) Goulet de Fromentine, la Barre-de-Monts.....	p.150
Figure 7 : Evolution historique de la position du trait de côte entre 1950 et 2019 du Nord au Sud (de gauche à droite)	p.151
Figure 8 : Pentés de plages en Vendée	p.152
Figure 9 : Reculs liés à l'élévation du niveau marin aux horizons 2050 et 2120	p.153
Figure 10 : Projection du trait de côte à l'horizon 2050 et incertitude associée	p.155
Figure 11 : Extrait des résultats de modélisation d'un évènement types Xynthia (source : Université de Nantes - OR2C	p.159

Partie 3 : Spatialisation des enjeux côtiers

Chapitre 1 : Évaluation de la vulnérabilité côtière

Figure 1 : Méthode de construction de l'indice de vulnérabilité côtière	p.171
Figure 2 : Classification des variables d'évolution du trait de côte : évolution historique, Lmax et recul lié à l'élévation du niveau marin.....	p.173
Figure 3 : : Classification des variables morphologiques : volume de plage, volume de dune et altitude du trait de côte.....	p.174
Figure 4 : Différence de classification entre le CVI1 et le CVI2. Lire : 195 boîtes sont en classes 2 pour le CVI1 quand ces mêmes boîtes sont en classe 1 pour le CVI2.....	p.175
Figure 5 : Indices de vulnérabilité à l'érosion côtière.....	p.176

Chapitre 2 : Évaluation de la prédisposition des enjeux au risque d'érosion

Figure 1 : Méthode de projection du trait de côte et mesure de distance entre les traits de côte numérisé et projeté.....	p.142
Figure 2 : Projection de l'élévation du niveau marin selon différents scénarios	p.144
Figure 3 : Taux d'évolution du trait de côte mesurés avec les méthodes EPR et LRR. p.145	
Figure 4 : Evolution historique du trait de côte (à gauche) et projection du trait de côte selon les applications A1, A2, A3 (à droite) Secteur de l'hippodrome au sud du pont d'Yeu, commune de Saint-Jean-de-Monts.	p.148
Figure 5 : Evolution historique du trait de côte (à gauche) et projection du trait de côte selon les applications A1, A2, A3 (à droite) Plage des Ovaires et plage des Conches, île d'Yeu.	p.149
Figure 6 : Evolution historique du trait de côte (à gauche) et projection du trait de côte selon les applications A1, A2, A3 (à droite) Goulet de Fromentine, la Barre-de-Monts	p.150
Figure 7 : Evolution historique de la position du trait de côte entre 1950 et 2019 du Nord au Sud (de gauche à droite).....	p.151
Figure 8 : Pentés de plages en Vendée.....	p.152
Figure 9 : Reculs liés à l'élévation du niveau marin aux horizons 2050 et 2120.....	p.153
Figure 10 : Projection du trait de côte à l'horizon 2050 et incertitude associée	p.155
Figure 11 : Extrait des résultats de modélisation d'un événement types Xynthia (source : Université de Nantes - OR2C	p.159

Liste des tableaux

Partie 1 : État de l'art et présentation du secteur d'étude

Chapitre 1 : État de l'art sur l'aléa et les enjeux associés

Tableau 1 : Revue des définitions du risque et de ses éléments constitutifs d'après Escuerdo Castillo <i>et al.</i> (2012)	p.23
Tableau 2 : Inventaire de travaux reposant sur une donnée LiDAR / photogrammétrie	p.45
Tableau 3 : Avantages et inconvénients relatives aux techniques d'acquisition LiDAR et photogrammétriques (source : Cohen et Héquette, 2020)	p.46
Tableau 4 : Inventaire de travaux reposant sur l'utilisation de transects	p.47
Tableau 5 : Avantages et inconvénients de la technique d'acquisition par GNSS (Source : Cohen et Héquette, 2020)	p.50
Tableau 6 : Inventaire de travaux reposant sur l'utilisation de profils bidimensionnels...	p.50

Chapitre 2 : Présentation du secteur d'étude

Tableau 1 : Cotes des niveaux marins (en m) sur quatre observatoires des marées en Pays de la Loire. Références altimétriques du SHOM (2017).....	p.68
Tableau 2 : Campagnes de mesure des états de mer au large du littoral de la région Pays de la Loire.	p.69
Tableau 3 : Inventaire des tempêtes caractérisées par des vents supérieurs à 120 km/h depuis 1982 (Source : Météo France).....	p.72
Tableau 4 : Analyse fréquentielle des événements de vent supérieur à 118,8 km/h associés à un coefficient de marée supérieur ou égal à 80 et 100 et à la pleine mer sur les neuf stations de la façade atlantique française (Feuillet <i>et al.</i> , 2012).....	p.76

Partie 2 : L'aléa érosion

Chapitre 1 : Assessing Surface Changes between Shorelines from 1950 to 2011 : The case of a 169-km Sandy Coast, Pays de la Loire (W France)

Table 1 : Presentation of the sediment cells	p.98
Table 2 : Characteristics of the aerial photographs survey dataset from 1950 to 2012.	p.100
Table 3 : Calculation of the uncertainty of shoreline positions uncertainty. $ESP(m) = (E_p^2 + E_o^2 + E_d^2)^{0.5}$ and $ESP^2 (m^2) = ESP * 25$	p.102
Table 4 : A calculation of the uncertainty I (in m^2) by pairwise of dates. $I = [(Esp^2a)^2 + (Esp^2b)^2]^{0.5}$ with a = date a and b = date b.	p.103
Table 5 : Regional results for the 169km shoreline under study.....	p.106
Table 6 : Maximum value in square meters for erosion and accretion in one box of each sediment cell for each date.	p.108

Chapitre 2 : Assessment of the vulnerability of sandy coasts to erosion (short and medium term) for coastal risk mapping (Vendée, W France)

Table 1 : List of significant storms since 1979.....	p.122
Table 2 : Characteristics of the aerial photographs survey dataset for the Lothar & Martin and Xynthia storms.....	p.124

Chapitre 3 : Projection du trait de côte et estimation de l'incertitude

Tableau 1 : Caractéristiques des choix méthodologiques des applications 1, 2 et 3	p.142
Tableau 2 : Niveaux d'eau relatifs aux Plus Hautes Mers Astronomiques.....	p.144
Tableau 3 : Incertitude des variables relatives à l'estimation du recul du trait de côte dû à l'élévation du niveau marin.	p.145
Tableau 4 : Ecart statistique entre le trait de côte projeté et le trait de côte réel	p.146
Tableau 5 : Classification des distances (en%) entre les traits de côte réel et projeté pour chaque application.....	p.147
Tableau 6 : Moyenne des reculs aux échéances 2050 et 2120 selon les scénarios SSP1-2.6 et SSP5-8.5	p.154

Partie 3 : Spatialisation des enjeux côtiers

Chapitre 1 : Évaluation de la vulnérabilité côtière

Tableau 1 : Liste des variables composant les indices de vulnérabilité côtière.....	p.169
Tableau 2 : Référence des variables de vulnérabilité élaborée dans les chapitres précédents	p.170
Tableau 3 : Classification des variables pour l'indice de vulnérabilité	p.172
Tableau 4 : Répartition des boîtes dans les classes de vulnérabilité côtière	p.175
Tableau 5 : Moyenne du poids de chaque variable dans l'indice final (en%)	p.177
Tableau 6 : Part des boîtes par classe et par variable des classes 1 et 5 pour les deux CVI	p.178

Chapitre 2 : Évaluation de la prédisposition des enjeux au risque d'érosion

Tableau 1 : Inventaire des données utilisées.....	p.186
---	-------

Table des matières

Remerciements	p.5
Sommaire	p.9
Introduction générale	p.11
Partie 1 : État de l’art et présentation du secteur d’étude	p.19
Chapitre 1: État de l’art sur l’aléa et les enjeux associés	p.21
1. Définition des termes du sujet	p.23
1.1. Une revue de définitions du risque et de ses éléments constitutifs	p.23
1.2. Définition des termes composant conceptuellement le risque	p.27
1.2.1. <i>L’aléa</i>	p.27
1.2.2. <i>Les enjeux</i>	p.28
1.2.3. <i>La vulnérabilité des enjeux</i>	p.28
1.2.4. <i>Le risque</i>	p.29
1.2.5. <i>La résilience</i>	p.29
2. L’aléa érosion	p.30
2.1. L’ aléa érosion, un aléa induit	p.30
2.2. Processus et résultantes de l’aléa érosion	p.31
2.2.1. <i>Processus</i>	p.31
2.2.2. <i>Concomitances de facteurs et périodes de retour</i>	p.35
2.2.3. <i>Résultante</i>	p.36
2.2.4. <i>Relation spatio-temporelle entre processus et résultante</i>	p.38
2.3. Quel trait de côte ?	p.39
2.3.1. <i>Quel(s) indicateur(s) de position du trait de côte ?</i>	p.39

2.3.2. <i>Le choix d'indicateurs étroitement lié à la donnée exploitée</i>	p.41
2.4. Mesurer l'érosion	p.43
2.4.1. <i>La temporalité</i>	p.43
2.4.2. <i>Les données LiDAR / photogrammétriques</i>	p.44
2.4.3. <i>Les images aériennes / satellitaires</i>	p.46
2.4.4. <i>Les profils de plage bidimensionnels</i>	p.49
2.5. Estimer l'érosion.....	p.50
2.5.1. <i>Les approches empiriques</i>	p.50
2.5.2. <i>Les modèles numériques</i>	p.52
3. Les enjeux	p.53
3.1. La prévention des risques en région	p.53
3.1.1. <i>Historique de la prévention des risques littoraux</i>	p.53
3.1.2. <i>Les Plans de Prévention des Risques Littoraux</i>	p.54
3.2. Les méthodes de classification des enjeux.....	p.56
3.3. Les indices de vulnérabilité côtière	p.57
4. Conclusion	p.60

Chapitre 2 : Présentation du secteur d'étude **p.63**

1. Présentation physique du secteur d'étude	p.65
1.1. Caractéristiques géomorphologiques et hydrodynamiques du littoral des Pays de la Loire	p.65
1.1.1. <i>Types de côtes en région</i>	p.65
1.1.2. <i>Côtes sableuses dunaires</i>	p.66
1.2. Les conditions météo-marines.....	p.67
1.2.1. <i>Marée</i>	p.67
1.2.2. <i>Les vagues</i>	p.68
1.2.3. <i>Le vent</i>	p.70
1.2.4. <i>Les tempêtes répertoriées par Météo-France en région Pays de la Loire</i>	p.71
1.2.5. <i>Période de retour d'évènements extrêmes en région</i>	p.75
2. L'occupation du sol	p.77
2.1. Les données mobilisables pour l'identification des enjeux	p.77

2.2. Les espaces artificialisés.....	p.77
2.3. Considération des espaces dunaires dans les politiques publiques	p.79
2.4. L'exposition des enjeux	p.80
3. Les acteurs de l'observation du littoral en région	p.83
3.1. L'Observatoire régional des risques côtiers (OR2C)	p.83
3.1.1. <i>L'acquisition de données aéroportées</i>	<i>p.83</i>
3.1.2. <i>Un nouveau moyen d'observation participatif : le principe CoastSnap.....</i>	<i>p.84</i>
3.2. L'observation du littoral à l'échelle locale.....	p.85
3.2.1. <i>L'observatoire du littoral de l'île de Noirmoutier</i>	<i>p.85</i>
3.2.2. <i>L'observatoire du Littoral du Pays de Monts</i>	<i>p.86</i>
3.2.3. <i>Pays de Saint-Gilles-Croix-de-Vie Agglomération</i>	<i>p.87</i>
Partie 1 : Conclusion.....	p.89
Partie 2 : L'aléa érosion.....	p.91
Chapitre : Assessing Surface Changes between Shorelines from 1950 to 2011... p.93	
1. Introduction	p.95
2. Regional setting	p.96
3. Methods	p.99
3.1. Aerial Photograph Database.....	p.99
3.2. Shoreline Detection and Digitalization.....	p.101
3.3. Spatial Units (boxes) and Surfaces Computation	p.101
3.4. Assessment of the Uncertainty	p.102
4. Results.....	p.104
4.1. Regional Surfaces Sediment Balance	p.104
4.2. Sediment Cell and Sediment Budget	p.106
4.3. Sediment Cell Surfaces and Sediment Balances.....	p.107
5. Discussion conclusion	p.109

Chapitre 2 : Assessment of the vulnerability of sandy coasts to erosion (short and medium term) for coastal risk mapping (Vendée, W France) p.115

1. Introduction	p.117
2. Study area	p.120
3. Method	p.123
3.1. Data	p.123
3.2. Shoreline detection.....	p.124
3.3. Measurement of the retreat due to an extreme event	p.124
3.4. Assessment of the uncertainties	p.125
3.4.1. <i>Uncertainty of the shoreline position</i>	<i>p.125</i>
3.4.2. <i>Temporal uncertainty</i>	<i>p.125</i>
3.5. Projection of the shoreline to 2050.....	p.126
3.5.1. <i>Assessment to historical mobility of the shoreline</i>	<i>p.126</i>
3.5.2. <i>Projection to 2050</i>	<i>p.126</i>
3.5.3. <i>Erosion hazard</i>	<i>p.128</i>
4. Results	p.129
4.1. Impact of the two storms on the Vendée shoreline	p.129
4.2. The uneven effects of the two events on sandy coasts.....	p.130
4.3. Consequences on projection scenarios	p.132
4.4. A Lmax definition based on two extreme events	p.133
5. Discussion	p.134

Chapitre 3 : Projection du trait de côte et estimation de l'incertitude p.139

1. Introduction	p.141
2. Méthode	p.141
2.1. Méthode de projection du trait de côte.....	p.141
2.1.1. <i>Etape 1 - méthode de projection du trait de côte</i>	<i>p.141</i>
2.1.2. <i>Etape 2 - l'estimation du recul du trait de côte dû à l'élévation du niveau marin</i>	<i>p.143</i>
2.1.3. <i>Etape 3 - Mesure de l'incertitude</i>	<i>p.144</i>
3. Résultats	p.145

3.1. Les écarts entre trait de côte projeté et trait de côte connu.....	p.145
3.2. Résultats par application et sur l'ensemble du secteur d'étude	p.146
3.3. Focus sur trois zones d'intérêt	p.147
3.4. Estimation de la position future du trait de à l'horizon 2050.....	p.151
3.4.1. <i>Evolution historique du trait de côte</i>	p.151
3.4.2. <i>Pentes de plages</i>	p.152
3.4.3. <i>Estimation des reculs liés à l'élévation du niveau marin aux horizons 2050 et 2120</i>	p.153
3.4.4. <i>Estimation de la position du trait de côte à l'horizon 2050</i>	p.154
4. Discussion et limites	p.156
4.1. Les incertitudes relatives à la projection du trait de côte	p.156
4.1.1. <i>Le choix de la méthode statistique</i>	p.156
4.1.2. <i>Le nombre d'années de projection</i>	p.156
4.1.3. <i>Point de départ de la projection</i>	p.156
4.2. Les incertitudes liées à l'estimation de l'érosion due à l'élévation du niveau marin p.157	
4.2.1. <i>L'élévation future du niveau marin</i>	p.157
4.2.2. <i>La pente</i>	p.158
4.3. Limites de la démarche	p.158
4.4. Les pistes explorées	p.159
5. Conclusion : Partie 2.....	p.163
Partie 3 : Spatialisation des enjeux côtiers	p.165
Chapitre 1 : Évaluation de la vulnérabilité côtière.....	p.167
1. Introduction	p.169
2. Méthode	p.169
2.1. Choix des variables.....	p.169
2.1.1. <i>Remobilisation de variables</i>	p.169
2.1.2. <i> Nouvelles variables morphologiques</i>	p.170
2.2. Discrétisation des variables et calcul des indices de vulnérabilité.....	p.171
3. Résultats.....	p.172

3.1. Classification et spatialisation des variables	p.172
3.2. Comparaison des indices de vulnérabilité.....	p.175
3.3. Influence des variables dans les indices de vulnérabilité	p.177
4. Discussion.....	p.179
4.1. Apport et questionnement sur les variables	p.179
4.2. Les limites de la classification des indices	p.179
5. Conclusion	p.180

Chapitre 2 : Évaluation de la prédisposition des enjeux au risque d'érosionp.183

1. Introduction	p.185
2. Méthode	p.186
2.1. Données	p.186
2.2. Démarche.....	p.187
2.2.1. Démarche pour l'entité « parcelle »	p.187
2.2.2. Démarche pour l'entité « bâti ».....	p.189
2.2.3. Classification des variables.....	p.189
2.2.4. Calcul de la prédisposition globale.....	p.190
3. Résultats.....	p.190
3.1. Prédisposition du bâti face au risque d'érosion	p.190
3.2. Prédisposition de la parcelle au risque d'érosion en 2019.....	p.191
3.3. Prédisposition de la parcelle au risque d'érosion à l'horizon 2050	p.193
3.4. Prédisposition globale	p.195
4. Discussion.....	p.196
5. Conclusion	p.198

Partie 3 : Conclusion..... p.201

Conclusion généralep.203

1. Principaux résultats.....	p.205
1.1. Démarche générale pour répondre à la problématique	p.205
1.2. Principaux résultats et apports de la thèse.....	p.206
1.3. Limites	p.207

2. Perspectives de recherche	p.208
2.1. Étude de la résultante des évènements extrêmes via la modélisation numérique	p.208
2.2. Etude des concomitances de forçages météo-marins : exploitation de données de réanalyses	p.209
Bibliographie	p.211
Annexes	p.235
Annexe 1	p.237
Annexe 2	p.249
Annexe 3	p.279
Table des figures	p.281
Liste des tableaux	p.287
Table des matières	p.291

Spatialisation des enjeux côtiers sous l'emprise de l'aléa érosion observé et scénarisé en fonction des changements climatiques en région Pays de la Loire

Mots clés : érosion côtière ; événements extrêmes ; projection du trait de côte ; indice de vulnérabilité ; enjeux côtiers ; Pays de la Loire

Résumé : Les côtes sableuses sont des espaces particulièrement mobiles, à la fois dans le temps et dans l'espace. Leur sensibilité face aux aléas côtiers, qu'ils soient naturels ou anthropiques, incite à étudier leur fonctionnement ainsi que leur réponse face aux changements climatiques et ce, à court, moyen et long termes. Ce sont essentiellement les événements extrêmes survenus depuis la fin des années 90, et plus particulièrement la tempête Xynthia en février 2010, qui ont éveillé les consciences quant à la nécessité d'accentuer les recherches sur l'aléa érosion et les enjeux associés.

Dans un contexte où les politiques publiques s'inscrivent de plus en plus dans une gestion intégrée du trait de côte, ces travaux visent à renforcer les connaissances relatives à l'aléa érosion, ainsi qu'à son

impact sur les côtes sableuses et les enjeux côtiers. Ce processus d'érosion côtière est ainsi étudié dans ses diverses dimensions temporelles. L'analyse porte sur ses dynamiques passées ; d'une part à long terme (depuis 1950), d'autre part à court terme à travers la mesure d'impacts d'événements extrêmes tels que Lothar et Martin (1999) ou encore Xynthia (2010). La dimension prospective est également abordée via la projection du trait de côte, avec un intérêt particulier pour l'estimation des incertitudes induites par la démarche. Un indice de vulnérabilité côtière est également réalisé, remobilisant l'ensemble des résultats issus des démarches précédemment évoquées, et ce afin d'identifier les secteurs vulnérables en région et de mesurer l'exposition des enjeux face à l'aléa érosion.

Spatialization of coastal stakes under the influence of the erosion hazard, observed and scenarized according to climate change (Pays de la Loire, W France)

Key words: coastal erosion ; extreme events ; shoreline projection ; coastal vulnerability index ; coastal stakes ; Pays de la Loire

Sandy coasts are particularly mobile spaces, both in time and space. Their sensitivity to coastal hazards, whether natural or anthropogenic, leads to the study of their functioning and their response to climate change in the short, medium and long term. It is essentially the extreme events that have occurred since the end of the 1990s, and more particularly the Xynthia storm in February 2010, that have raised awareness of the need to step up research on erosion hazards and the associated issues.

In a context where public policies are increasingly based on integrated coastline management, this work aims to increase knowledge of the erosion hazard and its impact on sandy coasts and coastal issues.

This coastal erosion process is thus studied in its various temporal dimensions. The analysis focuses on its past dynamics; on the one hand in the long term (since 1950), and on the other hand, in the short term through the measurement of the impacts of extreme events such as Lothar and Martin (1999) or Xynthia (2010). The prospective dimension is also addressed through the projection of the shoreline, with a particular interest in estimating the uncertainties induced by the approach. A coastal vulnerability index is also produced, mobilising all of the results from the above-mentioned approaches, in order to identify vulnerable sectors in the region and to measure the exposure of issues to the erosion hazard.