

Caractérisation de la morphologie des massifs dunaires de la région Pays de la Loire (France) face au risque de submersion marine

Martin Juigner and Marc Robin

Volume 18, Number 2, September 2018

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/1059919ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec à Montréal
Éditions en environnement VertigO

ISSN

1492-8442 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

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).

Article abstract

Especially in areas with high human and non-human stakes, coastal dunes may act as natural forms of coastal protection against coastal flooding. This justifies the importance of assessing their ability at protecting the low-lying areas. This paper aims to propose a GIS-based reproducible method to assess : (i) the sensitivity of coastal dunes (ii) the exposure of non-human stakes to coastal floods (iii) the role of protection of coastal dunes. The segmentation along the 140 km of barrier systems and sand spits of the Pays de la Loire Region is carried out within 25*400 m boxes. Eight indicators are extracted from a generic dataset, then computed within each box : minimum dune crest height, dune base and dune volume of the frontal dune ; historical shoreline change ; extend of the low-lying areas and back dune base ; extend and potential water depth of the stakes. The aggregation of these indicators conducts to the indexes creation. The index value depends on the intensity and the concomitance of the indicators. This process, easy to implement, exhaustive and reproducible, allows : (i) to produce a fine diagnosis of the whole of study sites and (ii) to locate territories critically exposed to coastal flooding. This methodology is intended to guide and prioritize the public action towards the at-risk areas through the diffusion of an objective knowledge of the risk.



Caractérisation de la morphologie des massifs dunaires de la région Pays de la Loire (France) face au risque de submersion marine

Martin Juigner et Marc Robin

Introduction

- 1 Les massifs dunaires sont des formes d'accumulation formées et modelées par l'action du vent le long des côtes sableuses. Ils sont composés d'un cordon bordier surplombant le haut de plage et l'avant-dune, puis, selon la disponibilité des sédiments et l'exposition de l'estran au vent dominant, d'un ensemble de crêtes dunaires et de dépressions intradunaires (zones basses) formant l'arrière-dune. Situés à l'interface terre-mer, les massifs dunaires sont des espaces dynamiques soumis aux aléas naturels que sont l'érosion marine, la submersion marine et la déflation éolienne (Debaine, 2012). Ces espaces concentrent également de nombreuses pressions anthropiques (activités économiques, activités de récréation, urbanisation, réseau routier). Les conséquences de cette pression sociétale sont d'une part la perturbation des dynamiques et des équilibres naturels (dégradation des habitats dunaires, accentuation de l'érosion côtière), et d'autre part une contribution dans le processus de création du risque dès lors que des infrastructures sont implantées dans des secteurs sensibles aux aléas météo-marins. L'anthropisation est donc autant un agent de forçage qu'un facteur du risque.
- 2 Le risque résulte de la combinaison d'un ou plusieurs aléas à une intensité donnée avec les enjeux humains et non humains ; il est déterminé par l'exposition des enjeux aux aléas (Hénaff et Philippe, 2014). Granja, Pinho et Mendes (2014) définissent le risque par la combinaison d'un indice de sensibilité avec un indice d'exposition. La sensibilité peut être définie par le degré d'affectation d'un système (mangrove, récifs coralliens, dunes littorales) soumis à des perturbations modifiant ou non les équilibres en place (Magnan,

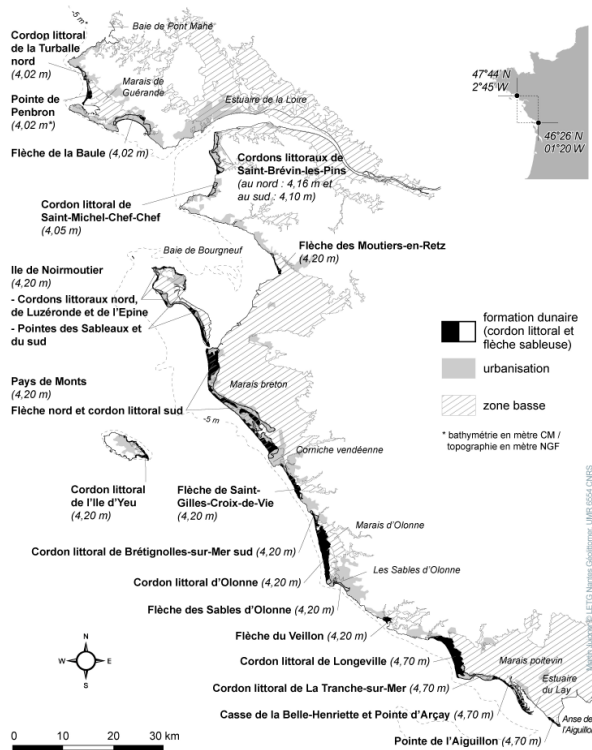
2014). Qu'il s'agisse de pressions d'origine naturelle et/ou anthropique, l'altération de la fonction protectrice de ces systèmes peut jouer sur l'exposition des territoires en augmentant leur vulnérabilité. L'évaluation de la sensibilité d'un massif dunaire revient à évaluer les faiblesses de ce massif face aux aléas côtiers (Barone et al., 2012). L'exposition au risque est la coïncidence spatiale entre l'enjeu et l'aléa (Leone et Vinet, 2006). L'exposition fait référence à « la présence de personnes, de moyens de subsistance, d'espèces ou d'écosystèmes, de services environnementaux et de ressources, d'infrastructures ou de biens économiques, sociaux ou culturels implantés dans des lieux qui pourraient être défavorablement affectés¹ » (GIEC, 2014). Dans le cas de la submersion marine, l'expression concrète de l'aléa peut être traduite par la cote altimétrique atteint par un niveau marin centennal ou historique (MEDDE, 2014). Dès lors, il est admis que les enjeux situés dans les zones basses intradunaires et rétrolittorales sont potentiellement exposés à la submersion marine.

- 3 L'analyse spatiale des risques côtiers nécessite souvent de recourir aux outils de la géomatique (Robin, 2002). La démarche géomatique consiste à collecter et exploiter l'information géographique afin de produire des résultats spatialisés souvent représentés sous forme de carte. L'utilisation d'indicateurs pour l'évaluation des risques côtiers est largement répandue dans la littérature (Nguyen et al., 2016 ; Bio et al., 2015 ; Granja, Pinho et Mendes, 2014 ; Barone et al., 2012 ; Debaine et Robin, 2012 ; Olsen, Young et Ashford, 2012 ; Abuodha et Woodroffe, 2010). Les géoindicateurs sont des marqueurs de changements environnementaux. Ils constituent un outil idéal pour la gestion des espaces côtiers puisqu'ils permettent de traduire des observations, souvent trop complexes donc difficilement utilisables dans un processus de gestion, sous une forme synthétique et compréhensible pour les gestionnaires (Carapuço, 2016). Sur le littoral, ils sont utilisés pour évaluer les risques et les dommages potentiels (Bush et al., 1999). La synthèse spatiale par agrégation d'indicateurs fournit une vision synthétique du risque (Robin, 2002). L'information peut être agrégée afin de réaliser, d'une part, des synthèses au sein de chaque unité spatiale (ex. la boîte, le transect, la maille). D'autre part, l'agrégation des unités spatiales permet de réaliser un second niveau de synthèse à des échelles cohérentes en matière d'analyse des espaces côtiers (ex. la cellule sédimentaire, le bassin de risque).
- 4 L'évaluation et le suivi de l'état des massifs dunaires sont au cœur des initiatives actuelles de gestion, de conservation et de protection des milieux naturels aux échelles locales ou régionales, nationales et internationales (Debaine, 2012). Bien que le suivi des cordons bordiers au droit de zones à risque ne soit pas une préoccupation nouvelle (Gouguet, 2007), l'impact de la tempête Xynthia du 28 février 2010 a rappelé que les territoires littoraux peuvent être dramatiquement exposés aux aléas côtiers que sont la submersion marine et le recul du trait de côte. Suite à la catastrophe, une prise de conscience aiguë a émergé quant au rôle que peuvent jouer les massifs dunaires face aux aléas météorologiques, et plus précisément les submersions dans les zones à risque (Debaine, 2012). Les dunes bordières sont davantage perçues comme des barrières naturelles ayant un rôle de défense contre la mer (Roche et al., 2015 ; Debaine, 2012 ; Gouguet, 2011). Les assauts répétés de la mer lors de l'hiver 2013-2014 (Masselink et al., 2016 ; Bulteau et al., 2014) ont renforcé cette prise de conscience, plaçant le rôle d'obstacle des massifs dunaires au centre des préoccupations des acteurs du littoral (gestionnaires, élus, services de l'État). En conséquence, les outils réglementaires de gestion et de prévention des risques d'inondation préconisent un renforcement du contrôle de l'état des ouvrages de

protection, incluant les systèmes à fonctionnement naturel comme les cordons dunaires lorsque ceux-ci jouent un rôle de protection des populations (MEDDE, 2014 ; MEDDTL, 2011). L'intérêt pour la conservation des massifs dunaires apparaît également dans les recommandations stratégiques proposées par l'État à travers la mise en place des programmes d'action 2012-2015 et 2017-2019 de la stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte - SNGITC (MEEM, 2017 ; MEDDTL, 2012).

- 5 Empruntée aux travaux sur les services écosystémiques (Millennium Ecosystem Assessment, 2005 ; Costanza et al., 1997), la notion de service rendu par les massifs dunaires est mise en avant dans la littérature (Debaine et Robin, 2012 ; Gouguet, 2012 ; Gouguet, 2011 ; Ramont, 2010). Depuis la tempête Xynthia, diverses initiatives ont été proposées afin d'évaluer ce rôle de protection le long des côtes françaises : (i) une approche simplifiée de recensement et d'identification *in situ* des cordons dunaires assurant un rôle de protection (Roche et al., 2015 ; Roche, 2011) ; (ii) une démarche géomatique spatialisée pour l'évaluation cartographique de deux services rendus par les écosystèmes dunaires : le service biodiversité et le service protection contre les aléas météo-marins (Debaine, 2012 ; Debaine et Robin, 2012) ; (iii) une méthodologie opérationnelle pour la caractérisation *in situ* de la robustesse des cordons bordiers domaniaux jouant un rôle d'obstacle à la submersion marine (ONF, 2014).
- 6 L'élaboration de ce travail repose sur le constat qu'il manque toutefois aujourd'hui une démarche géomatique simple, robuste et reproductible, pour caractériser, identifier et localiser les massifs dunaires naturels et/ou anthropisés présentant une capacité de protection faible. Une telle démarche constitue un premier niveau de diagnostic opérationnel permettant d'orienter voire d'alimenter les suivis *in situ* des secteurs identifiés comme sensibles. Les objectifs de cet article sont donc (i) de proposer un tel protocole (ii) à travers la création d'une base de données détaillant l'état des massifs dunaires (iii) afin d'identifier les secteurs côtiers sensibles et/ou exposés à la submersion marine. Les massifs dunaires sont ici perçus comme des édifices naturels ou anthropisés disposant d'une capacité intrinsèque d'opposition aux submersions marines. En fonction de l'état morphologique de ces systèmes, la capacité à faire obstacle peut être hypothétique (capacité de protection faible) ou pleinement assurée (capacité de protection élevée). La démarche synthétique proposée dans cet article est inspirée des acquis et des limites des travaux antérieurs (ONF, 2014 ; Debaine et Robin, 2012 ; Roche, 2011). Suivant le concept méthodologique proposé par Debaine et Robin (2012), un indice composite a été construit et déployé le long des formations dunaires de la région Pays de la Loire. Cet indice est composé d'un premier volet dédié à la sensibilité morphologique des massifs dunaires, incluant (i) une évaluation de la sensibilité à la submersion du cordon de 1^{re} ligne (altitude et assise du cordon), (ii) une évaluation de la sensibilité à l'érosion côtière du cordon de 1^{re} 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^e ligne). Le second volet de l'indice porte sur l'évaluation de l'exposition des enjeux bâtis et réseau routier au risque de submersion marine (emprise de l'urbanisation et du réseau routier en zone basse et hauteur d'eau potentielle). Au terme d'un raisonnement spatialisé articulé en trois niveaux, l'agrégation des indicateurs conduit à la création d'indices de sensibilité, d'exposition et de protection globale.

Figure 1. Localisation des massifs dunaires évalués en Région Pays de la Loire / Location of the coastal dunes surveyed along the Pays de la Loire Region.



Pour chaque site, la cote de l'alaé de référence préconisée dans les Plans de Prévention des Risques Littoraux (ici la cote Xynthia) est donnée / For each site, the sea water level baseline as defined in the risk prevention plans is given (here based on the Xynthia storm 2010).

Le site d'étude : les massifs dunaires de la région Pays de la Loire

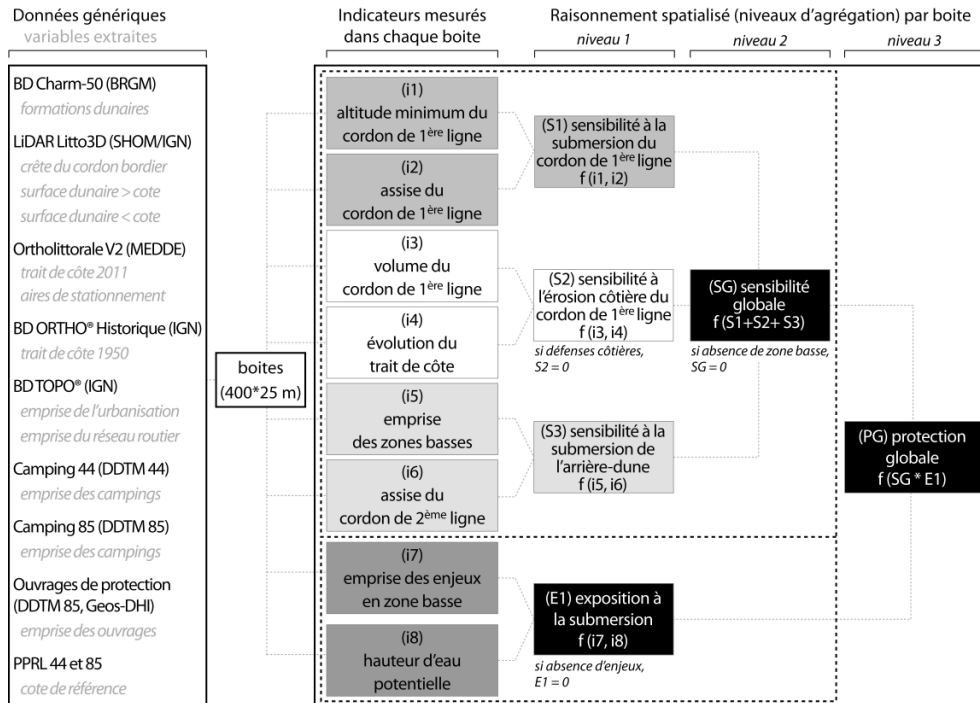
- 7 L'évaluation de la sensibilité des massifs dunaires et de l'exposition du bâti à la submersion marine est conduite sur l'ensemble des cordons littoraux et flèches sableuses de la région Pays de la Loire. Les massifs dunaires de la région ont fait l'objet de multiples descriptions dont celles, exhaustives sur le littoral vendéen, de Barrère (1999) et Dupont (2005), cette dernière ne concernant que la couverture végétale des massifs. Ainsi, le littoral régional appartient de la Baie de Pont Mahé jusqu'aux Sables d'Olonne à la frange méridionale du Massif Armoricain. Cette section est caractérisée par un fort découpage du linéaire côtier qui se traduit par une alternance entre côtes rocheuses (basses et hautes), milieux estuariens et marais maritimes, et côtes sableuses. Hormis la présence de plages de poches et de plaquages sableux le long de secteurs rocheux, les côtes sableuses sont dans l'ensemble caractérisées par la présence de massifs dunaires hérités de la transgression holocène. La bordure maritime des marais est ainsi composée de massifs dunaires faisant obstacle aux intrusions marines. Du sud des Sables d'Olonne jusqu'à l'Anse de l'Aiguillon, le paysage littoral appartient à la partie septentrionale du Bassin Aquitain. Il est essentiellement caractérisé par la présence du marais poitevin dont la bordure maritime se compose d'un vaste complexe dunaire dont la terminaison méridionale aboutit au développement de deux flèches sableuses, la Pointe d'Arçay et la

Pointe de l'Aiguillon. Les côtes sableuses de la région Pays de la Loire, identifiées par les codes « 30 » et « 31 » de l'attribut « Géomorphologie du littoral » de l'indicateur national de l'érosion côtière, s'étendent sur 217 km. Les massifs dunaires, hors dunes perchées, représentent environ 140 km. L'ensemble des sites d'étude est localisé dans la figure 1.

- 8 Le découpage des massifs dunaires, selon les limites des cellules sédimentaires identifiées le long de la côte et selon les points d'ancrage des formations dunaires, a permis d'identifier et localiser les 24 sites d'études présentés dans la figure 1.
- 9 Les formations dunaires de la région Pays de la Loire présentent dans leur ensemble une succession de faciès parallèles à la côte comprenant, de la mer vers l'intérieur des terres, une avant-dune (hormis dans les secteurs en érosion chronique) et une dune blanche (ou dune mobile), une dune grise (ou dune fixée) et, selon la profondeur de la formation, une dune boisée correspondant souvent aux cordons de 2^e ligne. L'état actuel de la couverture des dunes de la région traduit un état de fixation quasi-généralisée lié d'une part au stade de maturité des massifs dunaires (Paskoff, 2003), aux actions de fixation antérieures et actuelles des sables mobiles (Favennec, 1999a, 1999b), et d'autre part à l'urbanisation progressive de la côte (Pottier, 2007 ; Chauveau et al., 2011). Toutefois, la présence de cuvettes de déflation situées sur le versant externe des cordons bordiers (siffles-vent, caoudeyres et accès piétons) et de saupoudrage de sable témoigne de la dynamique éolienne actuelle. Les trois principaux faciès dunaires (dune blanche, dune grise, dune boisée) et leurs cortèges floristiques respectifs ne sont pas uniformément distribués le long de la côte. Selon les secteurs, certains faciès sont prédominants ou à l'inverse, absents.
- 10 Le niveau d'urbanisation des dunes littorales est également très varié le long de la côte. D'après Zaninetti (2006), la densité de construction sur le littoral français est 4 fois supérieure à la moyenne nationale. En région Pays de la Loire, cette croissance de l'urbanisation est, d'une part, le résultat du développement des cités balnéaires (ex. La Baule, Les Sables d'Olonne), mais aussi celui de l'apparition dans les années 1970 de vastes projets immobiliers implantés sur le front de mer (ex. Saint-Jean-de-Monts, Saint-Gilles-Croix-de-Vie). D'autre part, l'étalement urbain, associé à la multiplication des habitats dispersés, a également conduit à une urbanisation progressive des dunes littorales (ex. Ile de Noirmoutier, la Tranche-sur-Mer). Les espaces semi-naturels côtoient des espaces parfois intégralement urbanisés, induisant une grande diversité dans la structure des paysages dunaires. Ce processus d'urbanisation a pour conséquences l'augmentation de la pression anthropique sur les massifs dunaires, conduisant notamment à la fragmentation des habitats, mais également à une augmentation des enjeux potentiellement exposés au recul côtier et à la submersion marine.
- 11 Les événements survenus lors de la tempête Xynthia illustrent dramatiquement les conséquences d'un étalement urbain mal maîtrisé. La consultation du retour d'expérience de la tempête Xynthia et des photographies aériennes obliques réalisées par les services de l'État (Devaux et al., 2012) permet d'établir que la quasi-totalité des littoraux dunaires a été affectée par un recul du trait de côte lors de la tempête. De nombreux dommages sur les aménagements (destructions partielles ou totales, affouillements) ont été relevés, conjointement aux 126 brèches recensées, dont 26 sont situées sur des cordons bordiers y compris ceux dotés d'ouvrages de défense contre l'érosion côtière. Les niveaux d'eau atteints lors de la tempête ont dépassé les niveaux marins centennaux calculés par les services de l'État (SHOM-CETMEF, 2012), faisant de la tempête Xynthia l'aléa de référence pris en compte pour l'élaboration des Plan de prévention des risques littoraux (PPRL) de

la région. La cote Xynthia, correspondant au niveau extrême d'eau atteint par la mer pendant la tempête, est ici retenue comme la cote d'aléa maximum utilisée pour l'évaluation du service protection contre la submersion marine. Cette cote est exprimée en mètre IGN 69. La consultation du PPRL de chaque site d'étude a permis d'attribuer une cote spécifique pour chaque bassin de risque (voir la figure 1). Il convient de préciser que la définition de l'aléa retenue ici est celle d'une cote marine statique, laquelle ne tient par conséquent pas compte des dynamiques en jeu lors de la propagation d'une submersion.

Figure 2. Schéma méthodologique présentant le raisonnement spatialisé développé pour évaluer la capacité de protection dunaire contre la submersion marine / Methodological chart of the spatialized reasoning developed to assess the dune protection role against coastal flood.



Principe de caractérisation de la capacité de protection dunaire contre la submersion marine

12 Face à la diversité des sites d'études, la condition préalable est de mettre en place un protocole adapté à l'ensemble des massifs dunaires de la région. L'hypothèse formulée est que (i) l'utilisation de données génériques, (ii) la segmentation homogène des dunes littorales et (iii) l'extraction d'indicateurs synthétiques, permettent de définir par des niveaux d'agrégations successifs un indice global de protection dunaire apportant une vision synoptique et fine du risque. La réalisation d'un diagnostic fiable, homogène et reproductible repose sur la sélection de jeux de données génériques (figure 2) répondant à quatre critères majeurs (i) une disponibilité à échelle régionale au minimum, à échelle nationale au mieux (ii) une couverture continue des sites d'étude (iii) l'exhaustivité et la résolution spatiale la plus fine lorsque plusieurs jeux de données sont disponibles (iv) une cohérence temporelle pour l'analyse des dynamiques historiques. Le concept spatial proposé par Debaine et Robin (2012) est appliqué dans ce travail. L'évaluation cartographique de l'état des dunes est menée par extraction et agrégation d'indicateurs

dans des boîtes de 25*400 m. La synthèse spatiale (création d'indice) est réalisée au niveau le plus fin, c'est-à-dire celui de la boîte. Les indicateurs de détection de la sensibilité sont inspirés des travaux antérieurs (ONF, 2014 ; Debaine et Robin, 2012 ; Roche, 2011), des réflexions menées parallèlement aux travaux de l'Observatoire du Littoral des Pays de Monts (OLPM) et d'échanges avec l'Office national des forêts.

- 13 Le constat est fait qu'en termes de sensibilité, les massifs dunaires peuvent être partitionnés en deux entités paysagères distinctes : d'une part le cordon de 1^{re} ligne qui constitue la première ligne de défense naturelle, et d'autre part l'arrière-dune qui peut être composée de zones basses et/ou de cordons de 2^e ligne. Ce premier niveau de lecture amène au raisonnement spatialisé proposé dans la figure 2.
- 14 Un cordon de 1^{re} ligne présente une capacité à faire opposition à une submersion plus faible s'il est en érosion, bas et étroit avec un faible volume, que s'il est volumineux, haut, large et en accrétion. L'érosion côtière entraîne le recul du front dunaire en soustrayant à chaque épisode morphogène une partie du stock de sable présent dans le cordon de 1^{re} ligne. Ce recul entraîne une diminution de l'assise du cordon et peut engendrer un affaissement de la crête de dune. À l'inverse, une dynamique d'accrétion peut conforter l'assise d'un cordon et jouer favorablement en faveur du développement de ce dernier (gains en volume et en hauteur). Un cordon de 1^{re} ligne ne joue un rôle d'obstacle que s'il borde une zone basse. L'absence de zone basse signifie que la sensibilité, l'exposition et le risque de submersion sont non détectés tant que la hauteur du niveau marin n'excède pas la cote de l'aléa de référence utilisée dans ce travail. Une arrière-dune est d'autant plus sensible que l'emprise de la zone basse qui la compose est vaste. La présence d'un cordon de 2^e ligne a pour effet de réduire la sensibilité de l'arrière-dune puisqu'il constitue une deuxième ligne de défense ayant pour effet de limiter la propagation de la submersion vers l'intérieur des terres.
- 15 L'exposition des enjeux bâtis et réseau routier en zone basse est d'autant plus élevée que leur emprise au sol est forte et que la hauteur d'eau potentielle est élevée. Il apparaît donc qu'un massif dunaire composé d'un cordon de 1^{re} ligne robuste bordant une petite zone basse précédant un cordon de 2^e ligne présente une sensibilité faible à la submersion. La présence éventuelle d'enjeux dans cette zone basse génèrera un niveau de risque de submersion modéré. En revanche, un cordon de 1^{re} ligne perméable bordant une vaste zone basse sans cordon de 2^e ligne présente une sensibilité élevée face à l'aléa submersion. Une présence importante d'enjeux dans la zone basse génèrera un niveau de risque élevé. En somme, la coïncidence spatiale d'un ensemble d'indicateurs exprime un niveau de protection. La sensibilité du cordon de 1^{re} ligne à la submersion (figure 2, S1) est fonction de l'altitude et de l'assise du cordon. La sensibilité du cordon de 1^{re} ligne à l'érosion (figure 2, S2) combine l'évolution du trait de côte et le volume du cordon. Il est considéré que la sensibilité à l'érosion est nulle ($S2 = 0$) au droit des ouvrages de protection longitudinaux. Cela signifie que l'érosion d'un cordon dunaire situé derrière une protection basse est possible, mais que la maintenance post-tempête des ouvrages de protection tend à fixer la position du trait de côte à son emplacement initial. La sensibilité de l'arrière-dune à la submersion (figure 2, S3) intègre l'assise du cordon de 2^e ligne et l'emprise des zones basses. L'exposition des enjeux bâtis et réseau routier (figure 2, E1) est fonction de la hauteur d'eau potentielle et de l'emprise des enjeux en zone basse. L'absence de bâti et réseau routier en zone basse traduit une absence d'exposition de ces enjeux à la submersion ($E1 = 0$). Le croisement des 3 indices de sensibilité (S1, S2 et S3) génère un indice de sensibilité globale (figure 2, SG). Les secteurs

dépourvus de zone basse ne présentent pas de sensibilité globale à la submersion ($SG = 0$). Enfin, la combinaison entre la sensibilité globale et l'exposition des enjeux amène à un indice de protection globale (figure 2, PG).

Méthodologie depuis l'extraction des variables jusqu'à la construction des indices multicritères

- 16 Quatre familles de variables sont successivement extraites. (i) L'emprise des formations dunaires extraite de la BD Charm-50 permet de délimiter les massifs dunaires régionaux. Les formations dunaires correspondant aux cordons littoraux et flèches à pointe libre ont été sélectionnées (voir figure 1). Des boîtes de 25*400 m ont été déployées le long de chaque site à partir du trait de côte 2011. Ces unités spatiales respectent la géométrie de la côte (concave/convexe) et présentent l'avantage de capter et d'agréger la totalité de l'information géographique, quelle que soit l'origine de cette information (primitives géométriques : point, ligne, polygone ; données raster : pixel). Les variables sont extraites dans une bande côtière de 400 m de profondeur. (ii) La topographie fine est issue des données LiDAR Litto3D (acquisition menée dans le cadre d'un partenariat SHOM/IGN lors de l'été 2010 sur le littoral de la région Pays de la Loire) dont la précision altimétrique est de ± 20 cm. L'assemblage des dalles de résolution 1 m offre une couverture exhaustive des secteurs étudiés. La mosaïque obtenue est un instantané de l'état des systèmes plage-dune, lequel est influencé par la combinaison de processus court et long termes (Le Mauff et al., 2017). Sur le littoral de la région Pays de la Loire, ces données constituent un état zéro de la connaissance de la microtopographie. L'exploitation des données LiDAR permet de dériver des couches d'informations en continu le long de la côte. La crête du cordon bordier est extraite sur l'ensemble des sites par création du chemin de plus faible coût suivant la méthode proposée par Hardin et al. (2012). La cote de référence de chaque site (voir figure 1), renseignée dans les PPRL de la région Pays de la Loire est intégrée dans les boîtes. Les surfaces dunaires supérieures à cette cote représentent l'assise de la dune. Les surfaces situées en-dessous de la cote de référence correspondent aux zones basses. (iii) Le trait de côte a été numérisé par photo interprétation (échelle 1/3 500) à partir de deux orthophotographies pour obtenir une position historique (BD ORTHO® Historique 1950-1952) et une position récente (Ortholittorale V2 2011-2012) de la limite du contact entre la plage et la dune (limite de végétation dunaire ou pied de dune selon la dynamique du secteur). Les ouvrages de protection longitudinaux sont également pris en compte. (iv) La présence des enjeux bâtis et réseau routier résulte de la combinaison des emprises polygonales issues (i) de la BD TOPO®, (ii) des aires de camping transmises par les Direction départementale des territoires et de la mer (DDTM) 44 et 85 ainsi que (iii) les aires de stationnement numérisées à partir de l'Ortholittorale V2. Le réseau routier, extrait de la BD TOPO®, regroupe les routes primaires et secondaires. L'emprise des routes a été créée à l'aide de zones tampons dont la largeur, propre à chaque route, est calculée à partir des champs « largeur » et « précision planimétrique » de la table attributaire.

Figure 3. Définition, usage et schématisation des indicateurs (i1 à i8) mesurés dans chaque boîte de 25*400 m pour l'évaluation de la protection duniaire contre la submersion marine / Definition, use and illustration of the indicators (i1 to i8) computed within each 25*400 m box for the assessment of the dune protection role against coastal flood.

<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 duniaire - 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 à 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 	

- 17 L'ensemble des variables extraites sont intégrées dans un système d'information géographique (SIG) afin de les combiner et de calculer les indicateurs. Le croisement entre la cote de l'aléa de référence et l'altitude de la crête de dune permet de calculer la hauteur du cordon de 1^{ère} ligne. Cette hauteur est mesurée tous les mètres, soit à la résolution pixel du LiDAR Litto3D. L'indicateur extrait dans chaque boîte est l'altitude minimum de la crête du cordon de 1^{ère} ligne par rapport à la cote de l'aléa de référence. Une valeur négative signifie que la crête se situe sous le niveau d'eau extrême si le niveau marin atteint la cote de l'aléa de référence. Une valeur positive élevée signifie que le cordon est suffisamment élevé pour contenir une élévation du niveau marin. Le croisement entre les surfaces dunaires supérieures à la cote de référence et une zone tampon de 100 m autour de la crête du cordon bordier permet de délimiter l'assise des cordons de 1^{ère} ligne. Toute autre assise est assimilée à un cordon de 2^e ligne. Le volume du cordon de 1^{ère} ligne correspond au volume situé au-dessus de l'assise. Les surfaces d'érosion et d'accrétion entre les deux traits de côte sont mesurées dans chaque boîte. L'incertitude de position de chaque trait de côte (E_{tc} dans la Table 1) est calculée en prenant la racine carrée de la somme des erreurs élevées au carré (Dada et al., 2016 ; Hapke et al., 2006). L'évolution du trait de côte étant quantifiée par la mesure de surfaces, les incertitudes sont converties en surface (E_{tcz} dans la Table 1) par création d'une zone tampon autour de chaque trait de côte dont la largeur est égale à l'incertitude de position du trait de côte (E_{tc} dans la Table 1). L'erreur globale est calculée en prenant la racine carrée de la somme des incertitudes élevées au carré, soit 392,79 m². Dans la bande des 400 m, l'emprise des enjeux bâtis et réseau routier est croisée avec la couche zone basse afin de ne conserver dans les boîtes que la surface totale des enjeux situés en zones

basses. L'altitude minimum de l'urbanisation et du réseau routier est mesurée à partir des données LiDAR Litto3D et est soustraite à la cote de l'aléa pour obtenir la hauteur d'eau potentielle maximum.

Tableau 1. Estimation de l'incertitude de la position du trait de côte et calcul de l'erreur globale de la cinématique du trait de côte. /Computation of the shoreline position uncertainty, and calculation of the global error of the shoreline change analysis.

Mesure des erreurs	1950, 1952	2011, 2012
E_p erreur pixel (m)	0,50	0,50
E_o erreur d'orthorectification (m)	6	1,20
E_n erreur de numérisation (m)	3,60	2,87
E_{tc} incertitude de position du trait de côte (m)	7,01	3,15
$E_{tc,z}$ incertitude de position du trait de côte en surface (m ²)	355,99	166
Erreur globale (m ²)	392,79	

- 18 Le principe d'agrégation des indicateurs appliqué ici est inspiré de la méthode proposée par Debaine et Robin (2012). Les indices sont élaborés sans pondération. La recherche des valeurs les plus extrêmes possible des huit indicateurs pris simultanément au sein d'une même boîte permet de définir le niveau de protection minimum régional (ex. dans une même boîte : faible altitude, faible assise, faible volume, forte érosion, vaste zone basse, forte emprise des enjeux en zone basse, hauteur d'eau importante). Cela ne signifie pas que ces valeurs sont les plus extrêmes à échelle régionale, mais que la coïncidence spatiale entre ces valeurs génère un niveau de risque maximum. Ainsi, les boîtes ayant des valeurs d'indicateurs proches de ce minimum (soit une proximité, donc une faible distance) présenteront un niveau de protection faible, tandis que celles qui en sont éloignées (grande distance) présenteront un niveau de protection élevé. Suivant ce principe, la construction des indices de sensibilité et d'exposition est réalisée en agrégeant les indicateurs de chaque indice par le calcul de la distance euclidienne entre le minimum régional et chaque boîte (les valeurs des indicateurs sont centrées-réduites au préalable) :

$$I = \sqrt{(a_{min} - a_n)^2 + (b_{min} - b_n)^2}$$

- 19 où I est l'indice calculé (S1, S2, S3, E1), a_{min} la valeur de l'indicateur a et b_{min} la valeur de l'indicateur b de la boîte présentant le minimum régional ($_{min}$), a_n la valeur de l'indicateur a et b_n la valeur de l'indicateur b de chacune des n boîtes déployées le long de la côte.
- 20 Chaque indice est ensuite discrétisé en quintiles (5 classes notées par la suite N1, N2, N3, N4 et N5 figure 5). À chaque classe est attribué un nombre ordinal, de la valeur 1 (fort éloignement au minimum régional) à la valeur 5 (grande proximité avec le minimum régional). L'indice de sensibilité globale (SG) est obtenu en calculant la somme des valeurs des indices S1, S2 et S3. La plage de valeur s'étend de 2 (sensibilité minimum) à 15 (sensibilité maximum). L'absence de zone basse renvoie une valeur 0 (sensibilité non détectée). L'indice de protection globale résulte du produit de la sensibilité globale par

l'exposition des enjeux. La plage de valeur s'étend de 2 à 75. L'absence d'enjeux renvoie une valeur 0 (risque non détecté).

Résultats : spatialisation des indicateurs du risque et diagnostic de la capacité de protection des massifs dunaires

- 21 Les cordons littoraux et flèches sableuses étudiés s'étendent respectivement sur 77 km et 62 km le long du littoral de la région Pays de la Loire. La distribution des sites d'étude est très inégale entre les départements de Vendée (112 km) et de Loire Atlantique (27 km). L'ensemble des massifs dunaires est couvert par un total de 5 450 boîtes de 25*400 m constituant ainsi la trame de l'analyse spatiale des dunes littorales. Au terme du déploiement de la méthodologie, chaque boîte est caractérisée par la valeur calculée de chacun des huit indicateurs, par les niveaux de sensibilité (S1, S2, S3, SG), un degré d'exposition des enjeux (E1) et un niveau de protection globale (PG). Les indicateurs calculés pour le diagnostic présentent des relations linéaires faibles (coefficient $r < 0,50$) et moyennes (coefficient $0,50 < r < 0,90$) (Tableau 2). Par exemple, le volume du cordon de 1re ligne est davantage corrélé à l'altitude de la crête ($R^2 = 0,56$; $r = 0,75$; p-valeur = 0) et à l'assise du cordon de 1re ligne ($R^2 = 0,57$; $r = 0,76$; p-valeur = 0) qu'à l'érosion côtière ($R^2 = 0,001$; $r = -0,03$; p-valeur = 0.002). Enfin, certains indicateurs varient dans le même sens (altitude, assise et volume du cordon de 1re ligne) tandis que d'autres évoluent en sens opposé, comme c'est le cas des zones basses et de l'assise du cordon de 2e ligne. En effet, puisque l'arrière-dune n'est ici composée que de deux entités, une zone basse sera d'autant plus vaste que le cordon de 2e ligne qui la borde sera étroit (voir figure 4).

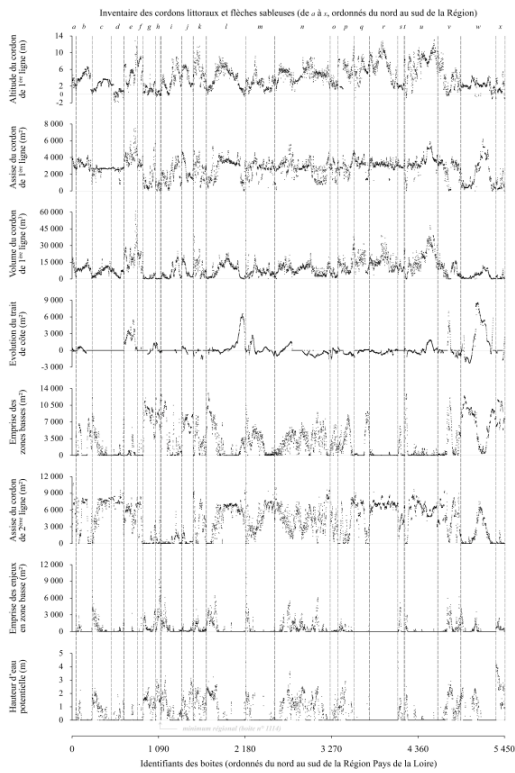
Tableau 2. Matrice de corrélation (Pearson r) entre les indicateurs utilisés pour le diagnostic / Matrix of correlation (Pearson r) of the indicators used in the analysis.

		A	A1L	V	EC	ZB	A2L	EZB	HE
Altitude 1 ^{ère} ligne	A								
Assise 1 ^{ère} ligne	A1L	0,51							
Volume 1 ^{ère} ligne	V	0,75	0,76						
Érosion côtière	EC	-0,19	0,15	-0,03					
Zone basse	ZB	-0,38	-0,64	-0,53	-0,05				
Assise 2 ^{ème} ligne	A2L	0,27	0,44	0,40	0,02	-0,80			
Enjeux zone basse	EZB	-0,24	-0,28	-0,27	-0,02	0,48	-0,36		
Hauteur d'eau	HE	-0,27	-0,37	-0,36	-0,03	0,57	-0,49	0,65	

Les corrélations affichées en gras ne sont statistiquement pas significatives (p-valeur > 0,05) / Correlations in bold are not statistically significantly different (p-value > 0.05).

22 La représentation des indicateurs du cordon de 1re ligne (altitude, assise et volume) et de l'arrière-dune (zone basse, cordon de 2e ligne) confirment la grande variabilité de l'état morphologique des massifs dunaires le long du littoral régional (figure 4). La segmentation du linéaire côtier en grands ensembles homogènes permet d'observer et localiser cette variabilité entre et à l'intérieur des massifs dunaires (voir les 13 cordons littoraux et 11 flèches sableuses localisés sur la figure 1, identifiés de a à x sur la figure 4 et décrits dans la table 3). Par exemple, la flèche des Moutiers-en-Retz (g dans la figure 4) est composée d'un cordon de 1re ligne relativement peu élevé (altitude médiane de 1,11 m au-dessus de la cote de référence), avec une assise étroite (médiane de 939 m²) et d'un faible volume (médiane de 660 m³). L'emprise des zones basses est élevée (1 364 602 m² au total) tandis que le cordon de 2e ligne est quasi-inexistant (médiane de 5 m²). Une faible variabilité est constatée le long de ce cordon puisque seule la présence de crochet à l'extrémité sud de la flèche tend à rehausser les valeurs des indicateurs du cordon de 1re ligne et de 2e ligne. Enfin, la dynamique du trait de côte est entravée au nord par des ouvrages de protection. Un secteur en érosion historique (1950-2011) est identifié au centre de la flèche tandis que le sud présente une dynamique d'accrétion. À l'inverse, le cordon littoral de Longeville (u dans la figure 4) est caractérisé par un cordon de 1re ligne avec une altitude, une assise et un volume médians de 8,25 m, 3 446 m² et 18 161 m³, soit des valeurs nettement supérieures à celles enregistrées aux Moutiers-en-Retz. L'arrière-dune est davantage composée d'un cordon de 2e ligne (médiane de 6 332 m²) que de zones basses (289 414 m² au total). Une forte variabilité est toutefois observée entre le nord et le sud du massif, cela pour l'ensemble des indicateurs morphologiques, mais également concernant la mobilité historique du trait de côte. Enfin, le linéaire côtier total caractérisé par une altitude de crête négative est calculé pour chaque formation dunaire (Table 3). Dix formations dunaires présentent une situation de crête transparente par rapport à l'aléa de référence, parmi lesquelles figurent le cordon littoral de Saint-Brévin-les-Pins nord (979 m) ou encore la Pointe des Sableaux (589 m). Que ce soit le long de systèmes de défense naturels ou artificiels, 122 boîtes (soit 3 211 m) présentant une altitude de crête inférieure ou égale à 0 ont été détectées le long du littoral de la région Pays de la Loire.

Figure 4. Synthèse régionale des huit indicateurs calculés / Regional synthesis of the eight computed indicators.



Du nord au sud : (a) cordon littoral de la Turballe nord (b) Pointe de Penbron (c) Tombolo de La Baule (d) Cordon littoral de Saint-Brévin-les-Pins nord (e) Cordon littoral de Saint-Brévin-les-Pins sud (f) Cordon littoral de Saint-Michel-Chef-Chef (g) Flèche des Moutiers-en-Retz (h) Pointe des Sableaux (i) Cordon littoral de l'île de Noirmoutier nord (j) Cordon littoral de Luzéronde (k) Cordon littoral de l'Épine (l) Flèche de l'île de Noirmoutier sud (m) Flèche des Pays de Monts (n) Cordon littoral des Pays de Monts (o) Cordon littoral de l'île d'Yeu (p) Flèche de Saint-Gilles-Croix-de-Vie (q) Cordon littoral de Brétignolles-sur-Mer (r) Cordon littoral d'Olonne (s) Flèche des Sables d'Olonne (t) Flèche du Veillon (u) Cordon littoral de Longeville (v) Cordon littoral de La Tranche-sur-Mer (w) Casse de la Belle-Henriette et Pointe d'Arçay et (x) Pointe de l'Aiguillon.

Tableau 3. Résumé statistique des indicateurs de sensibilité par massif dunaire / Statistics summary of the sensitivity indicators per dune system.

Massifs dunaires régionaux :	Linéaire avec altitude de crête négative (m)	Volume médian du cordon de 1 ^{ère} ligne (m ²)	Linéaire de trait de côte de 1 ^{ère} ligne (m)	Linéaire de trait de côte en accrétion (m)	Linéaire de trait de côte stable (m)	Assise médiane du cordon de 2 ^{ème} ligne (m)	Somme des zones basses (m ²)	Assise médiane du cordon de 2 ^{ème} ligne (m)	
1- Cordon littoral de la Turballe nord	0	3015	10664	693	28	727	0	25646	6144
2- Pointe de Penbron	0	3190	9390	2068	1305	1566	115	474364	4389
3- Flèche de la Baule	0	2649	7461	6939	0	0	0	463397	7573
4- Cordon littoral de Saint-Brévin-les-Pins nord	979	2578	4526	3387	0	0	0	92229	7326
5- Cordon littoral de Saint-Brévin-les-Pins sud	0	4145	19357	0	3906	410	0	105977	5809
6- Cordon littoral de Saint-Michel-Chef-Chef	0	3096	20013	1722	52	51	0	16270	6883
7- Flèche des Moutiers-en-Retz	77	939	660	2084	1051	545	656	1364602	5
8- Pointe des Sableaux	589	532	183	624	426	718	78	616890	52
9- Cordon littoral de l'île de Noirmoutier nord	101	1791	3573	5393	0	616	109	839261	42
10- Cordon littoral de Luzéronde	0	1959	4862	1792	550	1144	227	941361	278
11- Cordon littoral de l'Épine	0	2806	8312	2673	0	439	1035	458806	4165
12- Flèche de l'île de Noirmoutier sud	159	3268	9199	1571	4531	5866	776	1439324	5795
13- Flèche des Pays de Monts nord	0	2785	5812	1066	2474	4624	1177	920725	4645
14- Cordon littoral des Pays de Monts sud	0	2755	8745	4172	2253	3882	7354	2045485	4509
15- Cordon littoral de l'île d'Yeu	0	2725	4129	0	51	1876	656	243028	3246
16- Flèche de Saint-Gilles-Croix-de-Vie	0	2779	11226	1174	75	758	3323	641630	1758
17- Cordon littoral de Brétignolles-sur-Mer sud	26	3253	15113	999	0	3499	241	422149	5398
18- Cordon littoral d'Olonne	0	3150	14836	551	0	5126	3442	25142	7003
19- Flèche des Sables d'Olonne	0	2849	9238	1996	0	0	0	116990	3985
20- Flèche du Veillon	0	3296	22567	0	0	447	0	38181	6311
21- Cordon littoral de Longeville	173	3446	18161	839	2270	5167	2126	289414	6332
22- Cordon littoral de La Tranche-sur-Mer	507	3048	7677	2243	1133	2124	1789	701684	4707
23- Casse de la Belle-Henriette et pointe d'Arçay	502	1268	2190	1463	6306	717	2908	3001379	847
24- Pointe de l'Aiguillon	98	649	605	1745	186	232	651	927784	22

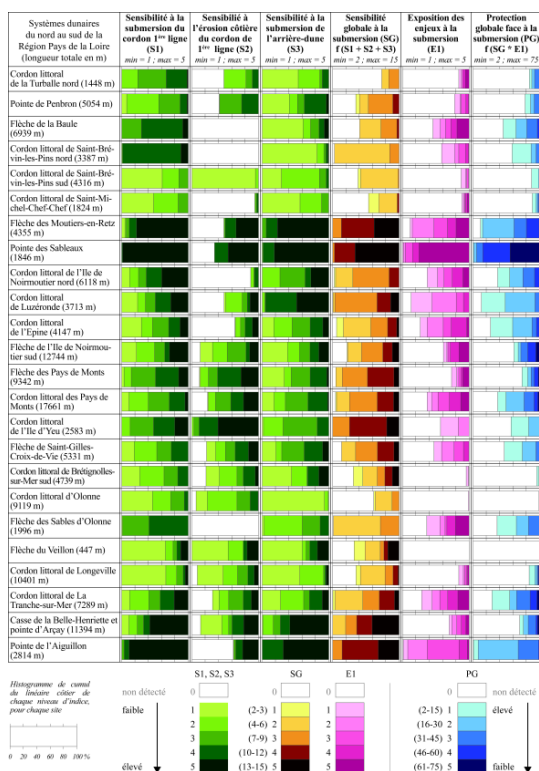
23 L'ensemble des enjeux situés en zone basse est potentiellement exposé à des hauteurs d'eau lors d'une submersion marine. La distribution des enjeux bâtis et réseau routier situés en zone basse dans une bande de 400 m est aussi inégalement répartie entre les deux départements côtiers des Pays de la Loire, puisque la Loire-Atlantique concentre 26 % des enjeux en zone basse (soit une emprise au sol totale de 438 297 m²) et la Vendée 74 % (2 252 758 m²). Si des formations dunaires en sont exemptes (flèche du Veillon, cordons littoraux de Longeville et de Brétignolles-sur-Mer sud), d'autres sont particulièrement marquées. C'est le cas du cordon littoral des Pays de Monts (546 154 m²), de la flèche de l'île de Noirmoutier sud (375 834 m²), de la Pointe des Sableaux (267 807 m²) ou encore du cordon de La Tranche-sur-Mer (245 262 m²). Enfin, il convient de souligner que les formations de La Baule, de Saint-Brévin-les-Pins et des Sables d'Olonne sont les plus artificialisées tant au niveau de l'occupation du sol que de la fixation du trait de côte. Chacune présente toutefois des zones basses avec enjeux, à savoir les extrémités ouest des flèches de La Baule et des Sables d'Olonne et la partie centrale du cordon de Saint-Brévin-les-Pins nord. Le linéaire côtier potentiellement affecté par une submersion dans la bande des 400 m est composé de 22 km de côte exposées à des hauteurs d'eau extrêmes inférieures à 1 m, de 25 km de côte exposées à des hauteurs d'eau comprises entre 1 m et 2 m, et de 11 km exposés à des hauteurs d'eau supérieures à 2 m. Les valeurs de hauteurs d'eau potentielles sont variablement réparties le long de la côte. Les secteurs de la Turballe, de Penbron et de Saint-Brévin-les-Pins nord sont les moins affectés (hauteur d'eau moyenne < 0,65 m). L'île de Noirmoutier présente deux secteurs davantage exposés avec des hauteurs extrêmes moyennes de 1,84 m pour la flèche des Sableaux et de 1,70 m pour la flèche sud. Une forte variabilité est enregistrée le long de cette dernière puisque l'essentiel des valeurs enregistrées sont situées au nord du

secteur, notamment le long de la commune de la Guérinière. Enfin, la Pointe de l'Aiguillon présente les hauteurs d'eau les plus importantes du littoral régional (hauteur moyenne = 2,40 m).

- 24 Prises unes à unes, les valeurs extrêmes des indicateurs sont dispersées le long de la côte. Le cordon de 1re ligne le plus bas et le plus étroit ne bordera pas nécessairement la zone basse la plus vaste. Le secteur avec les enjeux les plus importants en termes d'emprise et de hauteur d'eau pourra être situé en retrait d'un cordon de 1re ligne à fort volume avec une dynamique d'accrétion du trait de côte. La coïncidence spatiale, c'est-à-dire la concomitance entre la présence et l'intensité de l'ensemble des indicateurs au sein d'une unité d'observation, est génératrice ou non de sensibilité, d'exposition et de risque. La boîte présentant une concomitance entre les valeurs d'indicateurs les plus élevées a été identifiée (figure 4). Elle correspond au minimum régional, c'est-à-dire là où la capacité de protection dunaire est la plus faible au regard des enjeux présents. Cela signifie que cette boîte ne regroupe pas les valeurs extrêmes régionales, mais que la coïncidence spatiale entre les indicateurs génère une situation à risque dans une bande côtière de 25*400 m. Le minimum régional, situé sur la Pointe des Sableaux (Ile de Noirmoutier), est caractérisé par une altitude minimum de crête (0,29 m), une assise (284 m²) et un volume de cordon bordier (88 m³) faibles, une érosion du trait de côte modérée (-434 m²), une arrière-dune composée d'une vaste zone basse (11 572 m²) et d'un cordon de 2e ligne quasi-inexistant (32 m²). La quantité d'enjeux en zone basse (8 874 m²) et la hauteur d'eau potentielle maximum (1, 41 m) sont élevées.
- 25 Une synthèse spatiale des résultats par indice est ensuite menée à l'échelle des cordons littoraux et flèches sableuses identifiés le long de la côte. La coïncidence spatiale entre les différents niveaux de sensibilité S1, S2 et S3 génère un niveau de sensibilité globale (figure 5). La présence d'ouvrages de protection du trait de côte se traduit par un indice S2 = 0 et tend donc à diminuer l'indice de sensibilité globale. L'absence de zone basse dans la zone des 400 m traduit une sensibilité globale non détectée (SG = 0). En résultat, 18 % du linéaire étudié ne présente pas de sensibilité globale à la submersion (SG = 0 dans la figure 5) en raison de l'absence de zone basse dans la bande des 400 m. Les niveaux de sensibilités globales 1 à 4 représentent respectivement 3 %, 25 %, 26 % et 18 % du littoral dunaire régional. Les massifs dunaires caractérisés par une sensibilité globale élevée face à la submersion marine (niveau 5) représentent 11 % du linéaire étudié. Ils sont caractérisés par un cordon de 1re ligne bas (médiane de altitude = 2 m), étroit (médiane de assise = 1 035 m²) avec un faible volume (médiane = 1 623 m³) marqué par un recul du trait de côte (médiane = -309 m²). L'arrière-dune est constituée d'une vaste zone basse (médiane = 8 298 m²) et d'une assise de cordon de 2e ligne faible (médiane = 229 m²). Au total, 18 secteurs ont été identifiés en région Pays de la Loire. La flèche des Moutiers constitue l'unique secteur localisé dans le Département de Loire-Atlantique.
- 26 L'agrégation de l'indice de sensibilité globale et de l'indice d'exposition des enjeux génère l'indice de protection globale. Il est considéré que la capacité de protection des édifices dunaires renvoie une valeur égale à 0 si un secteur est dépourvu de zones basses, donc d'enjeux en zone basse. Un édifice dunaire sensible au droit d'enjeux exposés à la submersion traduit une capacité de protection dunaire faible. Le risque de submersion est d'autant plus important que le massif dunaire ne peut assurer un rôle d'obstacle. Une capacité de protection de niveau 1 est qualifiée d'élevée (cordon robuste) tandis qu'une capacité de protection de niveau 5 est qualifiée de faible (cordon potentiellement perméable). Les massifs dunaires ne jouant pas un rôle de protection (PG = 0) s'étendent

sur 79 km de côte. Les dunes jouant un rôle de protection contre la submersion marine sont étendues sur 60 km. Les 5 niveaux de protection sont représentés suivant les linéaires suivants : niveau 1 (18 km), niveau 2 (19 km), niveau 3 (13 km), niveau 4 (7 km) et niveau 5 (3 km). Les formations dunaires présentant une capacité de protection faible (niveau 5) sont caractérisées par un cordon bordier bas (médiane de altitude = 1,82 m), étroit (médiane de assise = 1 101 m²) avec un faible volume (1 735 m³) marqué par un recul du trait de côte (médiane de érosion = -109 m²). L'arrière-dune est constituée d'une vaste zone basse (médiane = 8 331 m²) et d'une assise de cordon de 2e ligne faible (médiane = 697 m²). L'exposition des enjeux y est caractérisée par une emprise des enjeux en zone basse (médiane = 3 649 m²) et une hauteur d'eau potentielle (médiane = 1,87 m) élevées. 5 flèches sableuses et 4 cordons littoraux présentent au moins un secteur où le massif dunaire offre une capacité de protection faible au regard des enjeux situés en zone basse (figure 5)

Figure 5. Synthèse des différents niveaux d'indices par massif dunaire (S1, S2, S3, SG, E1 et PG) / Synthesis of the different levels of indices per dune system (S1, S2, S3, SG, E1 et PG).



Discussion

- 27 L'apport de la démarche repose sur la méthode de segmentation utilisée. Les techniques traditionnelles d'analyse spatiale en domaine côtier reposent sur un découpage en mailles régulières ou sur l'utilisation de transects perpendiculaire au trait de côte. L'approche par boîte présente un potentiel issu de la combinaison de ces deux techniques. À l'instar des transects, l'orientation des boîtes est adaptée à la forme concave (une baie) ou convexe (un cap) de la côte ce qui permet de prendre en compte, au sein de chaque boîte, l'ensemble des faciès (ou bandes parallèles) structurant un domaine littoral, ce que ne permet pas un carroyage classique. À l'égal des mailles, l'approche par boîte couvre un

terrain d'étude dans sa totalité. L'ensemble de l'information géographique peut être traité et intégré dans une analyse qui sera exhaustive, contrairement à l'approche par transect qui est une technique d'échantillonnage. La largeur des boîtes joue, de la même manière que l'écartement entre transects, sur la finesse d'un diagnostic. Le pas de segmentation de 25 m utilisé dans cette étude apporte (i) un potentiel de mesure élevé (une métrique tous les 25 m) ce qui génère (ii) une connaissance fine des terrains étudiés et (iii) une coïncidence spatiale précise entre les indicateurs. Une mesure effectuée tous les 200 m n'apporterait qu'une connaissance limitée du fait de la faible résolution du pas d'analyse. Dolan, Fenster et Holme (1992) précisent ainsi qu'un pas de 50 m fournit une excellente estimation des taux d'évolution du trait de côte entre chaque transect. Juigner et al. (2017) détectent à échelle 1/5 000 les territoires à risque d'érosion à l'aide de boîtes de 30*100 m. Enfin, la coïncidence spatiale entre les indicateurs au sein d'une même boîte requiert un pas de segmentation résolument fin. La concomitance ne peut être effective que si l'espace dans lequel se situent les indicateurs est restreint. En termes de submersion marine, cela signifie par exemple qu'une brèche ne constitue un point d'entrée d'eau que si elle se situe au droit d'une zone basse. Si elle se situe à 100 m de la zone basse, il n'y a pas coïncidence avec la cuvette donc le risque de submersion par surverse ou rupture du cordon dunaire est moindre.

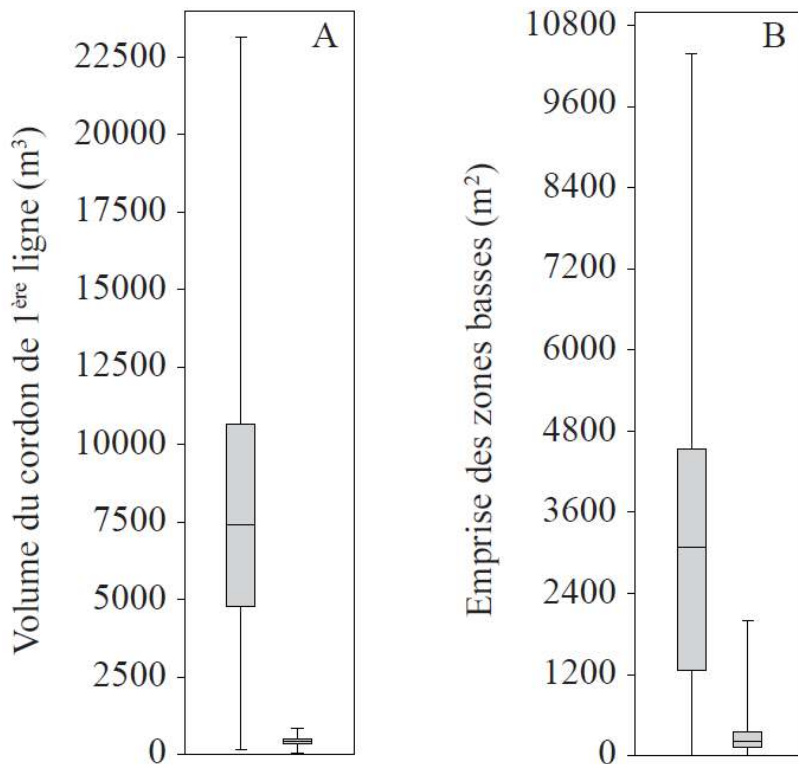
- 28 Il est nécessaire de considérer que la méthodologie proposée pour l'évaluation cartographique de la capacité de protection des dunes présente toutefois des limites liées à l'utilisation de différents types de données et de l'incertitude. Dans ce travail, les indicateurs morphologiques mobilisés pour le diagnostic reposent sur l'exploitation de données LiDAR dont la précision altimétrique est de 0,20 m (SHOM-IGN, 2015). Les valeurs d'altitude (ex. crête de dune) extraites à partir du LiDAR se situent donc dans un intervalle $\pm 0,20$ m. Une estimation des incertitudes pour les mesures de volume et de surface a été réalisée sur les 27 km du secteur des Pays de Monts. L'incertitude du volume (I_v) du cordon de 1re ligne peut être estimée dans chaque boîte selon la formule suivante :

$$I_v = r_{pix} \times p_z \times n_{pix}$$

- 29 où r_{pix} est la résolution LiDAR, p_z la précision altimétrique LiDAR et n_{pix} le nombre de pixel LiDAR compris dans l'assise du cordon. La figure 6-A présente les résultats du calcul de volume du cordon de 1re ligne et de l'incertitude mesurée dans les 1 060 boîtes des Pays de Monts. Dans ce cas, l'ensemble des valeurs de volume est supérieur aux incertitudes associées à chaque boîte. La médiane de l'ensemble des incertitudes est égale à $\pm 553,7$ m³ (écart-type = 178). Les incertitudes varient d'une boîte à l'autre en fonction de l'emprise de l'assise du cordon. Un cordon caractérisé par une grande assise présentera davantage d'incertitude quant au calcul de son volume qu'un cordon avec une petite assise. Dans le cas de cordons dunaires présentant un faible volume, l'incertitude pourra être supérieure au volume calculé si l'assise est large. Les extractions de surface au-dessus ou au-dessous d'une cote altimétrique sont également sensibles à la précision des données LiDAR, notamment dans le long des côtes basses où les variations d'altitude sont de faible amplitude. Compte tenu de la précision $\pm 0,20$ m du LiDAR, les emprises extraites peuvent être variables du fait de la morphologie des sites, particulièrement en ce qui concerne les zones basses (relief à faible pente). Les emprises inférieures aux cotes 4 m (cote de référence -0,20 m), 4,20 m, puis 4,40 m (cote de référence +0,20 m) ont été extraites et intégrées dans les boîtes des Pays de Monts. L'incertitude relative à l'extraction de surfaces est estimée en calculant, par boîte, les écarts moyens de surface entre chaque

emprise (figure 6-B). Dans le cas des Pays de Monts, 97 % des emprises de zone basse sont supérieures à l'incertitude associée. L'écart médian entre chaque emprise est égal à $\pm 270,5 \text{ m}^2$ (écart-type = 309,6).

Figure 6. Estimation de l'erreur associée au calcul de volume -A- et à l'extraction de surfaces (ici les zones basses) -B- à partir des données LiDAR Litto3D (résolution 1 m ; précision $z = \pm 0,20 \text{ m}$) le long du massif dunaire des Pays de Monts (1060 boîtes) / Computation of the error associated to the volume calculation -A- and the surface extraction (here the low-lying areas) -B- from LiDAR Litto3D dataset (pixel 1 m; accuracy $z = \pm 0.20 \text{ m}$) along the dune system of Les Pays de Monts (1060 boxes).

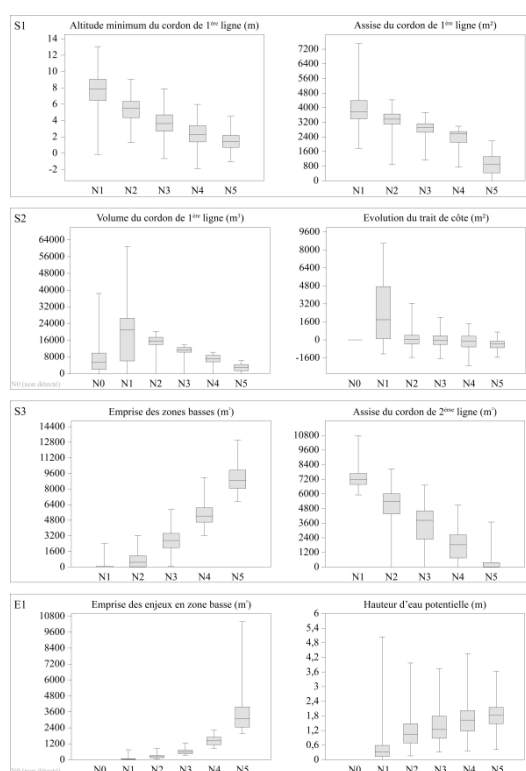


Sur chaque graphique, la boîte de gauche présente la synthèse des valeurs de l'indicateur mesurées dans les boîtes, la boîte de droite présente la synthèse des erreurs associées à l'incertitude altimétrique de la donnée / On each plot, the box on the left presents the values of the measured indicator, the box on the right presents the error associated to the uncertainty.

- 30 L'emprise des enjeux bâtis et réseau routier est issue d'une part de la BD TOPO® dont la précision planimétrique est de 5 m (IGN, 2015), d'autre part des données des DDTM 44 et 85 de localisation des campings dont la précision n'est pas connue. Cette donnée a été validée par un contrôle visuel sur fond d'orthophoto. Enfin, l'incertitude relative à la méthode développée pour évaluer la mobilité du trait de côte est de $392,79 \text{ m}^2$. Compte tenu des incertitudes spatiales évoquées ci-dessus, et dans la mesure où chaque jeu de données est un instantané (ex. LiDAR 2010, BD TOPO® 2013), les résultats présentés correspondent donc à une représentation cartographique instantanée de la capacité de protection des dunes littorales.
- 31 L'analyse des indices créés à partir de l'agrégation des indicateurs (figure 2) révèle finement les niveaux de risques. Les résultats du premier niveau d'agrégation (création des indices S1, S2, S3 et E1) sont présentés dans la figure 7. L'intensité de chaque indicateur pour chaque niveau d'indice est illustrée sous forme de boîte à moustache. Cette intensité, croissante ou décroissante selon les indicateurs, tend à respecter la

hiérarchie des niveaux de sensibilité et d'exposition. Ainsi, la sensibilité à la submersion du cordon de 1^{ère} ligne (S1) est faible pour un indice de niveau 1 (cordon haut et large), élevée pour un indice de niveau 5 (cordon bas et étroit). L'intensité des indicateurs altitude minimum et assise du cordon de 1^{ère} ligne diminue progressivement à mesure que la sensibilité du cordon augmente. Les résultats pour les indices S3 et E1 ainsi que l'indicateur de volume du cordon de 1^{ère} ligne présentent également des tendances marquées respectant la hiérarchie des niveaux d'indices. Concernant l'indice S2, l'indicateur d'évolution du trait de côte présente une tendance moins contrastée (médiane de N1 = 1 794,66 ; N2 = 23,81 ; N3 = -62,31 ; N4 = -97,15 et N5 = -348,36). Les secteurs où le trait de côte est artificialisé (niveau 0) présentent un volume du cordon de 1^{ère} ligne proche des secteurs les plus sensibles (médiane de N0 = 5 559,85 alors que médiane de N4 = 7 203,66 et médiane de N5 = 2 801,23).

Figure 7. Description par indicateur des niveaux de chaque indice / Description of each index levels per indicator.



S1 (sensibilité à la submersion du cordon de 1^{ère} ligne), S2 (sensibilité à l'érosion côtière du cordon de 1^{ère} ligne), S3 (sensibilité à la submersion de l'arrière-dune) et E1 (exposition des enjeux à la submersion) / S1 (sensitivity of the frontal dune to coastal flooding), S2 (sensitivity of the frontal dune to coastal erosion), S3 (sensitivity of the back dune to coastal flooding) and E1 (exposure of the stakes to coastal flooding).

- 32 La lecture des résultats de sensibilité à la submersion marine et leur confrontation avec les études d'aléas historiques produites dans le cadre des PPRL et l'inventaire des brèches et surverses causées par la tempête Xynthia permet néanmoins de tirer les enseignements suivants : (i) Les secteurs les plus sensibles (S1 = 5, S2 = 5 et SG = 5) sont les flèches des Moutiers, des Sableaux, d'Arçay et de l'Aiguillon ; les cordons de Luzérunde, de la Guérinière, de Fromentine, des Lays (nord Pays de Monts), de la Pège à Sion, de l'île d'Yeu, du Goulet, de La Tranche et de la Belle-Henriette. (ii) Les secteurs de Fromentine, des Lays et de l'île d'Yeu ne sont mentionnés ni dans les inventaires des études d'aléas

(DDTM 44, 2016 ; DDTM 85, 2013 ; Geos-DHI, 2013) ni dans le retour d'expérience (REX) de la tempête Xynthia (Devaux et al., 2012). Ce constat renseigne sur le fait, soit qu'il n'y a pas eu de submersion sur ces secteurs, soit qu'elles n'ont pas été documentées et/ou répertoriées dans les inventaires. (iii) Les secteurs du Goulet (Longeville-sur-Mer) et des Sableaux (Ile de Noirmoutier, minimum régional) n'apparaissent pas dans les inventaires de submersion historique (DDTM 85, 2013 ; Geos-DHI, 2013). Une surverse a été observée sur ces deux secteurs lors de la tempête Xynthia (Devaux et al., 2012). Les autres secteurs sensibles ont un historique en termes de submersion marine (mentions multiples dans les études d'aléas et/ou dans le REX). (iv) 98,5 % des boîtes intersectant les brèches recensées après la tempête Xynthia présentent un cordon de 1re ligne à sensibilité élevée face à la submersion (58 boîtes avec S1 =5 et 6 boîtes avec S1 = 4). 92,3 % présentent une sensibilité globale élevée (19 boîtes avec SG =4 et 41 boîtes avec SG =5). Deux des 26 brèches recensées dans les cordons de 1re ligne se sont formées malgré la présence d'ouvrages de protection, à la Tranche-sur-Mer et à la pointe de l'Aiguillon.

- 33 En France, l'observation du trait de côte et des risques inhérents aux aléas côtiers repose sur un ensemble de structures locales ou régionales. Bulteau et al. (2011) ont recensé 52 observatoires répartis entre les trois façades métropolitaines et les DOMs. Les structures régionales couvrent des territoires plus larges et apparaissent comme les plus à même de capitaliser et diffuser de manière pérenne la connaissance nécessaire à la compréhension des phénomènes côtiers (MEDDE, 2016). La démarche présentée dans cet article est en cours d'intégration dans un observatoire des risques côtiers en région Pays de la Loire². Elle ambitionne d'aider à prioriser l'action publique sur les secteurs les plus à risque grâce à un porter à connaissance qui repose sur une approche objective du risque. Par les possibilités d'identification fine des secteurs à risque, elle permet d'assurer un monitoring ciblé d'une part lors des événements météo-marins extrêmes à risque et d'autre part d'orienter voire d'alimenter les suivis menés régulièrement sur le terrain. En effet, le raisonnement spatialisé structuré en 3 niveaux d'agrégation autorise de multiples lectures et extraction des résultats, du niveau de l'indicateur à la synthèse globale en passant par les différents indices intermédiaires. Certains indicateurs difficilement quantifiables sur le terrain peuvent ainsi alimenter et conforter le suivi *in situ* des cordons bordiers (ex. crête de dune, assise, et volume extraits de données LiDAR). Le long des secteurs sensibles ou à risque, la base de données et le diagnostic peuvent donc être mis à jour avec de nouvelles données, à la condition que celles-ci relèvent de protocoles d'acquisition communs (interopérabilité) suivant les préconisations de la Stratégie nationale (MEEM, 2017 ; MEDDTL, 2012).
- 34 Enfin, par son exhaustivité spatiale, l'approche par boîte permet de pallier au manque de connaissance concernant certains secteurs côtiers jusqu'ici peu étudiés. Elle apporte un véritable socle de connaissance en termes d'évaluation de la capacité de protection dunaire, mais également pour l'évaluation de l'exposition du bâti face à l'aléa érosion côtière (Juigner et al., 2017). Quels que soient les secteurs côtiers concernés, il est désormais possible d'apporter un premier niveau de réponse face à l'appréhension que peut susciter la sensibilité et/ou l'exposition d'un territoire face aux risques d'érosion et de submersion marine. À terme, la transposition de la méthode à une échelle nationale apporterait une contribution certaine au quatrième volet (« mieux connaître pour mieux agir ») du rapport du comité national de suivi de la Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte (CNS-SNGITC, 2015), et plus précisément au besoin actuel d'améliorer la

connaissance quant au rôle et à l'apport des écosystèmes sur l'atténuation des effets des aléas côtiers.

Conclusion

- 35 En conclusion, l'évaluation de la capacité de protection des massifs dunaires face au risque de submersion marine a été réalisée sur l'ensemble des cordons littoraux et flèches sableuses de la région Pays de la Loire. L'utilisation de données génériques autorise (i) l'extraction de variables spatialement continues et (ii) la création d'indicateurs synthétiques du risque. La segmentation de la côte à l'aide de boîtes de 25*400 m permet de réaliser autant de synthèses spatiales de la capacité de protection dunaire qu'il existe de boîte. La coïncidence spatiale, c'est-à-dire la concomitance entre la présence et l'intensité de l'ensemble des indicateurs au sein d'une unité d'observation, est génératrice ou non de sensibilité, d'exposition et de risque.
- 36 En résultat, 18 % du linéaire côtier étudié ne présente pas de sensibilité globale à la submersion marine. Les massifs dunaires caractérisés par une sensibilité globale élevée représentent 11 % du linéaire total. Ils sont caractérisés par un cordon de 1^{re} ligne bas (médiane de l'altitude = 2 m), étroit (médiane de l'assise = 1 035 m²) avec un faible volume (médiane = 1 623 m³) marqué par un recul du trait de côte (médiane = -309 m²). L'arrière-dune est constituée d'une vaste zone basse (médiane = 8 298 m²) et d'une assise de cordon de 2^e ligne faible (médiane = 229 m²). La coïncidence spatiale entre les secteurs sensibles et la présence d'enjeux en zone basse génère une situation de risque potentiel. Les massifs dunaires ne jouant pas un rôle de protection (absence d'enjeux en zone basse) s'étendent sur 79 km de côte. Cependant, 5 flèches sableuses et 4 cordons littoraux présentent au moins un secteur où le massif dunaire offre une capacité de protection faible au regard des enjeux situés en zone basse. Au total cela représente un linéaire de 3 km de côte. Les formations dunaires présentant une capacité de protection faible (niveau 5) sont caractérisées par un cordon bordier bas (médiane de altitude = 1,82 m), étroit (médiane de assise = 1 101 m²) avec un faible volume (1 735 m³) marqué par un recul du trait de côte (médiane de érosion = -109 m²). L'arrière-dune est constituée d'une vaste zone basse (médiane = 8 331 m²) et d'une assise de cordon de 2^e ligne faible (médiane = 697 m²). L'exposition des enjeux y est caractérisée par une emprise des enjeux en zone basse (médiane = 3 649 m²) et une hauteur d'eau potentielle (médiane = 1,87 m) élevées.
- 37 Cette démarche géomatique propose un diagnostic fin, exhaustif et homogène présentant différents niveaux de lecture. À terme, l'information est disponible (i) pour chaque composante d'un système dunaire (cordon de 1^{re} ligne, zone basse, cordon de 2^{ème} ligne) et (ii) du niveau de l'indicateur à celui de l'indice de protection global en passant par les indices de sensibilité et l'indice d'exposition. Compte tenu des incertitudes liées aux données utilisées, les résultats présentés correspondent à une représentation cartographique instantanée de la capacité de protection des dunes littorales. Néanmoins, à l'exception de 3 sites (l'Île d'Yeu, la plage de Fromentine et la plage des Lays), les secteurs identifiés comme particulièrement sensibles ont été le lieu soit de submersions marines historiques, soit de submersion (surverse ou brèche) pendant la tempête Xynthia.

Remerciements

- 38 Les auteurs tiennent à remercier particulièrement la Fondation de France pour le soutien financier apporté au projet DiDUNE, l'Observatoire régional des risques côtiers (OR2C) dans lequel s'inscrit ce travail, et l'UMR 6554 LETG pour son accueil. Les auteurs remercient également Françoise Debaine pour ses conseils et Laurent Godet pour son travail de relecture.
-

BIBLIOGRAPHIE

Abuodha, P. A. O. et C. D. Woodroffe, 2010, Assessing vulnerability to sea-level rise using a coastal sensitivity index : a case study from southeast Australia, *Journal of Coastal Conservation*, 14, 3, pp. 189-205.

Barone, D. A., S. C. Farrell, R. V. Koch, B. S. Howard et M. H. Gruver, 2009, Beach-dune system sensitivity assessment, Long Beach Island, Ocean County, New Jersey (version 1.0). National Oceanic and Atmospheric Administration, Coastal Services Center, Charleston, South Carolina. [En ligne] URL : http://crcgis.stockton.edu/dune_assessment/soc/. Consulté le 19 mai 2017.

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

Bio, A., L. Bastos, H. Granja, J. L. S. Pinho, J. A. Gonçalves, R. Henriques, S. Madeira, A. Magalhaes et D. Rodrigues, 2015, Methods for coastal monitoring and erosion risk assessment : two Portuguese case studies, *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 15, 1, pp. 47-63.

Bulteau, T. et M. Garcin avec la participation de C. Oliveros et N. Lenôtre, 2011, Synthèse des travaux menés sur l'observation de l'évolution du trait de côte. Rapport BRGM/RP-59396-FR, 156 p.

Bulteau, T., J. Mugica, C. Mallet, C. Garnier, D. Rosebery, F. Maugard, A. Nicolae Lerma et A. Nahon avec la collaboration de B. Millescamps, 2014, Évaluation de l'impact des tempêtes de l'hiver 2013-2014 sur la morphologie de la Côte Aquitaine. Rapport final. BRGM/RP-63797-FR, 68 p.

Bush, D. M., W. J. Neal, R. S. Young et O. H. Pilkey, 1999, Utilization of geoinicators for rapid assessment of coastal-hazard risk and mitigation, *Ocean & Coastal Management*, 42, pp. 647-670.

Carapuço, M.M., 2016, Coastal indicators, In Kennish M.J. (Ed.), *Encyclopedia of estuaries*, *Encyclopedia of Earth Sciences Series*, Springer, 139 p.

Chauveau, E., C. Chadenas, B. Comentale, P. Pottier, A. Blanlœil, T. Feuillet, D. Mercier, L. Pourinet, N. Rollo, I. Tillier et B. Trouillet, 2011, Xynthia : leçons d'une catastrophe. *Cybergeo : European Journal of Geography, Environnement, Nature, Paysage*, 538, pp. 1-25, [En ligne] URL : <https://cybergeo.revues.org/23763>. Consulté le 18 décembre 2016.

Comité National de Suivi de la Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte (CNS-SNGITC), 2015, 40 mesures pour l'adaptation des territoires littoraux au changement climatique

- et à la gestion intégrée du trait de côte, 30 p., [En ligne] : URL http://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Rapport_du_Comite_National_de_Suivi-octobre_2015-V4_cle624683.pdf. Consulté le 01 juillet 2017.
- Costanza, R., R. d'Arge, R. de Goot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R. V. O'Neill, J. Paruelo, R. G. Raskin, P. Sutton et M. van der Belt, 1997, The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387, pp. 253-260.
- Dada, O.A., G. Li, L. Qiao, D. Ding, Y. Ma et J. Xu, 2016, Seasonal shoreline behaviours along the arcuate Niger Delta coast : Complex interaction between fluvial and marine processes. *Continental Shelf Research*, 122, pp. 51-67.
- Direction départementale des territoires et de la mer 85 - DDTM 85, 2013, Plan de Prévention des Risques Littoraux, Pays de Monts, Pays d'Olonne et Pays Talmondais, Rapport de phase 1, 952 p. [En ligne] URL : http://webissimo.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/PPRL_3_Pays_Rapport_de_phase_1_v4-0_cle297df4.pdf. Consulté le 03 juillet 2017.
- Direction départementale des territoires et de la mer 44 - DDTM 44, 2016, Plan de Prévention des Risques Littoraux de la Baie de Bourgneuf Nord, Communes de la Bernerie-en-Retz, Villeneuve-en-Retz, les Moutiers-en-Retz et Ponic, 79 p. [En ligne] URL : http://www.loire-atlantique.gouv.fr/content/download/22672/165213/file/Note_presentation_PPRL-Baie-Bourgneuf.pdf. Consulté le 03 juillet 2017.
- 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. [En ligne] URL : https://www1.liteau.net/uploads/projet_documents/LITEAU_III_2007_Debaine_Synthese_long.pdf. Consulté le 06 février 2016.
- Debaine, F. et M. Robin, 2012, A new GIS modelling of coastal dune protection services against physical coastal hazards, *Ocean & Coastal Management*, 63, pp. 43-54.
- Devaux, E., G. Désiré, C. Boura, J. Lowenbruck, N. Bérenger, N. Rouxel et N. Romain, 2012, La tempête Xynthia du 28 février 2010 - Retour d'expérience en Loire-Atlantique et Vendée - Volet hydraulique et ouvrages de protection, Rapport du CETE-Ouest / DREAL Pays-de-la-Loire / DDTM Loire-Atlantique / DDTM Vendée, 78 p. [En ligne] URL : http://www.pays-de-la-loire.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/rapport_REX_final.pdf. Consulté le 01 Janvier 2017
- Dolan, R., M. S. Fenster et J. Holme, 1992, Spatial Analysis of Shoreline Recession and Accretion, *Journal of Coastal Research*, 8, 2, pp. 263-285.
- Dupont, P., 2005, L'état actuel du peuplement végétal des dunes de Vendée, *Société Botanique de France, Journal de Botanique*, 32, pp. 5-31.
- Favennec, J., 1999a, Gestion des dunes littorales non boisées, *In* Gérard B. (dir.), 1999, *Le littoral. Problèmes et pratiques de l'aménagement*, éditions BRGM - Manuels et méthodes, 32, pp. 117-135.
- Favennec, J., 1999b, Aménagement des forêts littorales : cas des forêts dunaires du littoral atlantique français, *Revue forestière française*, pp. 217-229.
- Geos-DHI, 2013, Études des aléas naturels sur le « sud Vendée et marais poitevin », rapport de phase 1, Analyse préalable du site, 99 p. [En ligne] URL : http://www.vendee.gouv.fr/IMG/pdf/Rapport_Phase_1_cle25328c.pdf. Consulté le 03 juillet 2017.

- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), 2014, IPCC Fifth Assessment Report : Climate Change 2014 (AR5) (Intergovernmental Panel on Climate Change : Working Group II report. Impacts, Adaptation and Vulnerability).
- Gouguet, L., 2007, Lorsque la dune devient digue, l'exemple de Noirmoutier, *Rendez-vous techniques*, 17, pp. 58-60.
- Gouguet, L., 2011, Les dunes domaniales jouant un rôle de digue en Centre Atlantique : un nouveau regard sur la gestion, *Rendez-vous techniques*, 31, pp. 3-9.
- Gouguet, L., 2012, Restaurer les dunes digues, *Espaces naturels*, 39, pp. 48-49.
- Granja H., J. Pinho et J. Mendes, 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. et C. Makowski (Ed.), *Remote Sensing and Modeling, Advances in Coastal and Marine Resources*, Springer, pp. 481-494.
- Hapke, C. J., D. Reid, B. M. Richmond, P. Ruggiero et J. List, 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. [En ligne] URL : <https://pubs.usgs.gov/of/2006/1219/of2006-1219.pdf>. Consulté le 05 avril 2017.
- Hardin, E., M. O. Kurum, H. Mitsova et M. F. Overton, 2012, Least Cost Path Extraction of Topographic Features for Storm Impact Scale Mapping, *Journal of Coastal Research*, 28, 4, pp. 970-978.
- Hénaff, A. (Ed.) et M. Philippe, 2014, *Gestion des risques d'érosion et de submersion marines, guide méthodologique. Projet Cocorisco*. 156 p. [En ligne] URL : <http://www.risques-cotiers.fr/fr/boite-a-outils/guide-cocorisco>. Consulté le 13 mai 2017.
- Institut géographique national (IGN), 2015, BD TOPO® Version 2.1, Descriptif de contenu, 204 p. [En ligne] URL : http://professionnels.ign.fr/sites/default/files/DC_BDTopo-2-1.pdf. Consulté le 01 Juillet 2017.
- Juigner, M., M. Robin, F. Debaine et F. Hélien, 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.
- Le Mauff, B., M. Juigner, A. Ba, M. Robin, P. Launeau et P. Fattal, 2017, Analysis of the geomorphological response of beach-dune systems using multi-temporal LiDAR datasets (Vendée coast, France), *Geomorphology* (accepté, sous presse).
- Leone, F. et F. Vinet, 2006, La vulnérabilité, un concept fondamental au cœur des démarches d'évaluation des risques naturels. *In* Leone F. et F. Vinet (dir.), *La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles, Analyses géographiques, Géorisques 1*, Coll. GESTER, Montpellier, Publications de l'Université Paul Valéry, pp. 9-25.
- Magnan, A., 2014, De la vulnérabilité à l'adaptation au changement climatique : éléments de réflexion pour les sciences sociales. *In* Monaco A. et P. Prouzet (dir.), *Risques côtiers et adaptations des sociétés*, ISTE Editions, pp. 241-274.
- Masselink, G., B. Castelle, T. Scott, G. Dodet, S. Suarez, D. Jackson et F. Floc'h, 2016, Extreme wave activity during 2013/2014 winter and morphological impacts along the Atlantic coast of Europe, *Geophysical Research Letters*, 43, 5, pp. 2135-2143.
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005, *Ecosystems and Human Well-being : Wetlands and Water Synthesis*. World Resources Institute, Washington, DC

- Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement (MEDDTL), 2011, Circulaire du 12 mai 2011 relative à la labellisation et au suivi des projets PAPI 2011 et opérations de restauration des endiguements PSR, Direction générale de la prévention des risques, Service des risques naturels et hydrauliques, 29 p. [En ligne] URL : http://circulaire.legifrance.gouv.fr/pdf/2011/05/cir_33178.pdf. Consulté le 15 juillet 2017.
- Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement (MEDDTL), 2012, Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte - Vers la relocalisation des activités et des biens, 20 p. [En ligne] URL : http://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/SNGITC_20120301_cle211ba9-1.pdf. Consulté le 05 juillet 2017.
- Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDDE), 2014, Guide méthodologique : Plan de prévention des risques littoraux, Direction Générale de la Prévention des Risques, 169 p. [En ligne] URL : http://www.side.developpement-durable.gouv.fr/EXPLOITATION/ACCIDR/Infodoc/ged/viewportalpublished.ashx?eid=IFD_FICJOINT_0013153&search=. Consulté le 05 juillet 2017.
- Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDDE), 2016, Développer la connaissance et l'observation du trait de côte - Contribution pour une gestion intégrée. 27 p. [En ligne] URL : http://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Synthese_nationale_Connaissance_trait-de-cote_fev_2016_cle588cdc-1.pdf. Consulté le 12 juillet 2017.
- Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer (MEEM), 2017, Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte - Programme d'actions 2017-2019, 28 p. [En ligne] URL : http://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/sngitc_pg2017-2019_web2.pdf. Consulté le 01 juillet 2017.
- Olsen, M. J., A. P. Young et S. A. Ashford, 2012, TopCAT - Topographical Compartment Analysis Tool to analyse seacliff and beach change in GIS, *Computers & Geosciences*, 45, pp. 284-292.
- Office national des forêts (ONF), 2014, Mission d'Intérêt Général « Prévention des Risques Naturels » Identification et qualification des dunes domaniales susceptibles de jouer un rôle d'obstacle aux submersions marines, 106 p.
- Paskoff, R., 2003, La conservation des dunes littorales implique-t-elle leur stabilisation ? L'exemple de la côte atlantique, *Natures Sciences Sociétés*, 11, pp. 288-294.
- Pottier, P., 2007, Problématique et enjeux de l'urbanisation du littoral, L'espace littoral de la Loire-Atlantique. Conseil de Développement de la Loire-Atlantique, Cahier Littoral, 10, 20 p.
- Nguyen, T.T.X., J. Bonetti, K. Rogers et C. D. Woodroffe, 2016, Indicator-based assessment of climate-change impacts on coasts : A review of concepts, methodological approaches and vulnerability indices, *Ocean & Coastal Management*, 123, pp. 18-43.
- Ramont, N., 2010, Étude de caractérisation du service de protection du cordon dunaire domaniale face au risque de submersion marine. Mémoire de Master 2 Cartographie et Gestion de l'Environnement. Institut de Géographie et d'Aménagement Régional de l'Université de Nantes.
- Robin, M., 2002, Étude des risques côtiers sous l'angle de la géomatique, *Annales de géographie*, 111, pp. 471-502.
- Roche, A., 2011, Préconisations pour le recensement des ouvrages et structures de défense contre les aléas côtiers - Notice méthodologique. Les Outils. CETMEF, 61 p.
- Roche, A., F. Taureau, Y. Deniaud, L. Gougnet et L. Bocquier, 2015, Prise en compte des cordons naturels dans la prévention des aléas côtiers, Congrès SHF « Événements extrêmes d'inondation :

de l'étude de l'aléa à la gestion du risque pour les ouvrages hydrauliques », Lyon, 13-14 novembre 2013, La Houille Blanche, 3, pp. 79-84.

Service hydrographique et océanographique de la Marine et Centre d'études techniques maritimes et fluviales (SHOM et CETMEF), 2012, Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique). <http://www.eau-mer-fleuves.cerema.fr/statistiques-des-niveaux-marins-extremes-des-cotes-a414.html>. Consulté le 19 avril 2017

Service hydrographique et océanographique de la Marine et Institut géographique national (SHOM et IGN), 2015, Litto3D® Version 1.0, Descriptif de contenu, 32 p. [En ligne] URL : http://diffusion.shom.fr/media/wysiwyg/pdf/DC_Litto3D.pdf. Consulté le 01 Juillet 2017.

Zaninetti, J. M., 2006, L'urbanisation du littoral en France, Population et Avenir, 677, pp. 4-8.

NOTES

1. *The presence of people, livelihoods, species or ecosystems, environmental functions, services, and resources, infrastructure, or economic, social, or cultural assets in places and settings that could be adversely affected.*
2. L'Observatoire Régional des Risques Côtiers (OR2C) en région Pays de la Loire (créé depuis le mois de mars 2016).

RÉSUMÉS

Les massifs dunaires peuvent jouer un rôle d'obstacle face au risque de submersion marine, notamment au droit de secteurs à enjeux humains et non-humains, ce qui justifie l'intérêt de l'évaluation de leur capacité à protéger les zones basses. Cet article propose une démarche géomatique reproductible pour évaluer : (i) la sensibilité des massifs dunaires, (ii) l'exposition des enjeux bâtis et réseau routier face au risque de submersion marine et (iii) la capacité de protection globale des massifs. La segmentation des 140 km de cordons littoraux et flèches sableuses de la région Pays de la Loire est réalisée à l'aide de boîtes de 25*400 m. Huit indicateurs synthétiques sont extraits de données génériques puis calculés au sein de chaque boîte : l'altitude minimum de la crête, l'assise et le volume du cordon de 1^{re} ligne ; la dynamique historique du trait de côte ; l'emprise des zones basses et l'assise du cordon de 2^e ligne ; l'emprise et la hauteur d'eau potentielle des enjeux bâtis et réseau routier implantés en zone basse. L'agrégation des indicateurs conduit à la création d'indices dont la valeur dépend de l'intensité et de la concomitance des indicateurs. Cette démarche simple, exhaustive et reproductible permet (i) d'évaluer finement l'ensemble des sites étudiés et (ii) de localiser les secteurs sensibles et/ou exposés à l'aléa submersion marine. À terme, cette démarche ambitionne d'aider à prioriser l'action publique sur les secteurs les plus à risque grâce à un porter à connaissance qui repose sur une approche objective du risque.

Especially in areas with high human and non-human stakes, coastal dunes may act as natural forms of coastal protection against coastal flooding. This justifies the importance of assessing their ability at protecting the low-lying areas. This paper aims to propose a GIS-based reproducible method to assess : (i) the sensitivity of coastal dunes (ii) the exposure of non-human

stakes to coastal floods (iii) the role of protection of coastal dunes. The segmentation along the 140 km of barrier systems and sand spits of the Pays de la Loire Region is carried out within 25*400 m boxes. Eight indicators are extracted from a generic dataset, then computed within each box : minimum dune crest height, dune base and dune volume of the frontal dune ; historical shoreline change ; extend of the low-lying areas and back dune base ; extend and potential water depth of the stakes. The aggregation of these indicators conducts to the indexes creation. The index value depends on the intensity and the concomitance of the indicators. This process, easy to implement, exhaustive and reproducible, allows : (i) to produce a fine diagnosis of the whole of study sites and (ii) to locate territories critically exposed to coastal flooding. This methodology is intended to guide and prioritize the public action towards the at-risk areas through the diffusion of an objective knowledge of the risk.

INDEX

Mots-clés : cordon dunaire, côte atlantique, risques littoraux, submersion marine, protection dunaire, indicateurs du risque, indice de sensibilité, LiDAR, indice d'exposition

Keywords : dune ridge, Atlantic coast, coastal risks, coastal flooding, dune protection, risk indicators, sensitivity index, exposure index, LiDAR

AUTEURS

MARTIN JUIGNER

Docteur, Université de Nantes, LETG, Campus Tertre, BP 81227, 44312 Nantes cedex 3, France, courriel : martin.Juigner@univ-nantes.fr

MARC ROBIN

Professeur des Universités, Université de Nantes, LETG, Campus Tertre, BP 81227, 44312 Nantes cedex 3, France, courriel : marc.Robin@univ-nantes.fr