

Thèse de Doctorat

Martin JUIGNER

Mémoire présenté en vue de l'obtention du
grade de Docteur de l'Université de Nantes
sous le sceau de l'Université Bretagne Loire

École doctorale : *DEGEST*

Discipline : *Géographie*

Unité de recherche : *LETG (UMR 6554 CNRS)*

Soutenu le *19 octobre 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)

JURY

Présidente du jury :	Lydie GOELDNER-GIANELLA , Professeure des Universités, Université Paris Panthéon Sorbonne (Paris I)
Rapporteurs :	Stéphane COSTA , Professeur des Universités, Université de Caen Normandie Virginie DUVAT-MAGNAN , Professeure des Universités, Université de La Rochelle
Examineur :	Mohamed MAANAN , Maître de conférences HDR, Université de Nantes
Invité :	Loïc GOUGUET , responsable de la Mission Littoral de l'Office National des Forêts
Directeur de Thèse :	Marc ROBIN , Professeur des Universités, Université de Nantes
Co-encadrante de Thèse :	Françoise DEBAINE , Maître de conférences, Université de Nantes

Université de Nantes
LETG-Nantes Géolittomer (UMR 6554, CNRS)

La géomatique au service de l'observation du trait de côte

Contribution à l'analyse des aléas côtiers sur les littoraux dunaires
de la région Pays de la Loire

Martin JUIGNER



Thèse de Doctorat (soutenue le 19 octobre 2017)
Discipline : Géographie

Directeur

Marc ROBIN, Professeur des Universités, Université de Nantes

Co-encadrante

Françoise DEBAINE, Maître de conférences, Université de Nantes



Page de couverture (crédit photographique, Martin Juigner), de gauche à droite et de haut en bas :

- Habitat collectif face au recul du trait de côte, commune de Saint-Hilaire-de-Riez, 02 février 2014
- Cordon de 1^{ère} ligne à Sainte-Anne, commune de La-Tranche-sur-Mer, 23 juillet 2014
- Prévention, commune de Saint-Hilaire-de-Riez, 02 février 2014
- Cordon de 1^{ère} ligne au Pont d'Yeu, commune de Saint-Jean-de-Monts, 27 avril 2017

Remerciements

Cette thèse est avant tout le fruit de belles rencontres. Sans elles, ces travaux n'auraient simplement pas pu aboutir.

Je tiens à exprimer mes premiers remerciements à Françoise Debaine et Marc Robin pour avoir encadré cette thèse et pour la confiance qu'ils m'ont accordée durant ces cinq années. Merci de m'avoir initié et impliqué dans l'observation littorale.

Je souhaite remercier Virginie Duvat-Magnan et Stéphane Costa pour m'avoir fait l'honneur de rapporter ce travail. Je remercie Lydie Goeldner-Gianella et Mohamed Maanan d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Il me faut également remercier les membres du Comité de Suivi de Thèse pour leurs recommandations avisées. Merci une nouvelle fois à Virginie Duvat-Magnan et Mohamed Maanan. Je souhaite remercier Loïc Gouguet d'avoir accepté l'invitation du comité, de s'être montré disponible et de bons conseils durant cette thèse.

Je voudrais ensuite remercier les structures grâce auxquelles ce travail s'est déroulé dans de bonnes conditions. Je remercie la Fondation de France pour avoir cru en la qualité du projet DiDUNE et de l'avoir soutenu financièrement. Je remercie le CNRS et l'UMR 6554 LETG-Nantes pour l'accueil qu'il m'a été accordé. Je tiens également à remercier l'OSUNA et l'OR2C de la région Pays de la Loire pour leur appui lors de la dernière année de thèse.

Ce travail est le fruit de diverses collaborations développées dans le cadre de l'observation du trait de côte. Je remercie les partenaires de l'OLPM et notamment Jean Magne, Jean-Guy Robin et Frédéric Boucher de la Communauté de Communes Océan-Marais-de-Monts, Christophe Rollier de l'ONF, Cécile Le Guern et Vivien Baudouin du BRGM, et tous les collègues du laboratoire impliqués dans l'observation locale et régionale. Je pense particulièrement à Paul Fattal, Nicolas Rollo et Baptiste Le Mauff. Merci à Aurélie Durand de m'avoir rapporté un fascicule des Journées EUCC de Noirmoutier en 2012 puisque c'est à cette occasion que j'ai découvert les boîtes, sans imaginer une seconde jusqu'où cela m'emmènerait. Je voudrais remercier également Patrick Launeau et Antoine Ba du LPG Nantes pour la collaboration dans le cadre du projet RS2E-OSUNA. Merci à Martin Paillart de l'Observatoire de Noirmoutier pour ces conseils et remarques avisés et pour le partage de sa passion littorale. J'adresse, enfin, toute ma reconnaissance à Florian Hélen, pour sa contribution au développement informatique de l'outil de géotraitement. Je dois la construction de ma démarche à chacune des personnes citées ci-dessus. Merci à vous tous.

Après ces cinq années passées dans les locaux de LETG-Nantes, j'adresse mes remerciements à tous ses membres, et plus particulièrement à Laurent Pourinet pour les heures passées à développer une partie des illustrations présentées dans ce manuscrit, à Simon Charrier pour les conseils de dernières minutes, également à Laurent Godet et Armelle Decaulne pour leur nombreux conseils concernant l'exercice de la publication, et à Malika Fredj, Daphnée Rousseau, Marie Pesnel et Laurence Hamard pour la partie administrative.

J'adresse une pensée à la force vive du laboratoire pour tous ces bons moments de la vie quotidienne au labo. Un grand merci à Élie, Emmanuelle, Marie C., Batman, Florent, Laurie, Pierre (un p'tit burger ?), la Tête, Marine et son fusil, Patrick, mais également à Épiphane, François, Anthony, Titi, Marie E.B., Mister Creech, et la fine fleur du bureau 981, de loin les meilleurs (désolé pour les autres, vous n'avez pas tiré le bon numéro !), Julien, Fréd et Adrien : les gars, ce fut un plaisir.

Mes remerciements à Axel pour la relecture de dernière minute, mais également pour le gabarit InDesign grâce auquel ce manuscrit a pris forme !

Une pensée bien particulière à la p'tite famille du Havre et à l'équipe nantaise, à vous tous, merci pour ces bons moments propices pour se vider la tête, à bientôt !

Enfin, je souhaite remercier mes proches qui ont contribué de près à l'effort de thèse, dans les bons moments comme dans les périodes de difficultés. Merci à mes parents. Merci Fanny pour ta présence de tous les instants. À toi, Émeline, j'espère te redonner autant si ce n'est plus que toute la présence, la patience et le soutien que tu m'as apporté pendant ces années. Merci infiniment ! Ce travail est également le vôtre.



Liste des sigles

BRGM :	Bureau de recherches géologiques et minières
CEREMA :	Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
CVI :	Coastal vulnerability index
DDTM :	Direction départementale des territoires et de la mer
DGPS :	Differential global positioning system
DiDUNE :	Diagnostic multiscalaire du service protection dunaire
DSAS :	Digital shoreline analysis system
EPCI :	Etablissement public de coopération intercommunale
EPR :	End point rate
GIS :	Geographic information system (voir SIG)
GPS :	Global positioning system
IGARUN :	Institut de géographie et d'aménagement régional de l'université de Nantes
IGN :	Institut national de l'information géographique et forestière
INEC :	Indicateur national d'érosion côtière
INSEE :	Institut national de la statistique et des études économiques
LiDAR :	Light detection and ranging
LRR :	Linear regression rate
MNT :	Modèle numérique de terrain
NICE :	National indicator of coastal erosion (voir INEC)
OCA :	Observatoire de la côte aquitaine
OLPM :	Observatoire du littoral des Pays de Monts
ONF :	Office national des forêts
OR2C :	Observatoire régional des risques côtiers
PIAO :	Photo-interprétation assistée par ordinateur
PPRL :	Plan de prévention des risques littoraux
REX :	Retour d'expérience
RMS :	Root mean square
ROL Corse :	Réseau d'observation du littoral de la Corse
ROLNP :	Réseau d'observation du littoral normand et picard
SHOM :	Service hydrographique et océanographique de la Marine
SIG :	Système d'information géographique
SLR :	Sea level rise
SNGITC :	Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte
SO LTC :	Système d'observation littoral/trait de côte
WLR :	Weighted linear regression



Sommaire

Intoduction générale	p.15
Chapitre 1 Concepts et méthodes en analyse côtière.....	p.21
Chapitre 2 Approche par transects pour l'analyse de la mobilité du trait de côte..	p.63
Chapitre 3 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)	p.93
Chapitre 4 Caractérisation de la capacité de protection des massifs dunaires de la région Pays de la Loire face au risque de submersion marine	p.121
Conclusion générale	p.147
Bibliographie	p.157
Annexe cartographique	p.173



Introduction générale

Située à l'interface entre la terre et la mer, la zone côtière est un espace sous pression. Dans le monde, la population vivant à moins de 100 km des côtes dans des zones d'altitudes inférieures à 100 m est estimée à 1,9 milliards de personnes en 2010, soit 28 % de la population mondiale (Kummu *et al.*, 2016). Signe du processus de littoralisation, cette présence humaine est associée à la concentration des activités économiques et des activités de récréations dans une bande côtière étroite et soumise aux dynamiques naturelles. Le trait de côte, symbole de cette interface, matérialise dans sa définition physique, la limite entre la terre et la mer.

L'attractivité des littoraux est à l'origine d'une densification croissante des aménagements et notamment de l'urbanisation le long du littoral. En France, les communes adossées au trait de côte (soit 4 % du territoire métropolitain) regroupaient en 1999 environ 10 % de la population et 13 % du parc total de logement, la densité de constructions sur le littoral étant quatre fois supérieure à la moyenne nationale (Zaninetti, 2006). Les conséquences de cette pression sociétale sont, d'une part la perturbation des dynamiques et des équilibres naturels (dégradation des habitats, 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 ici perçue autant comme un agent de forçage qu'un facteur du risque.

Les phénomènes d'érosion côtière, de submersion marine et de migration dunaire sont les principaux aléas physiques affectant les côtes basses meubles. En France, le phénomène d'érosion touche environ 39 % des côtes (MEDDE, 2016). La superficie totale des zones basses situées sous le niveau marin centennal, donc potentiellement submersibles, est d'environ 7 570 km² (MEDDE, 2016). Enfin, le phénomène de migration dunaire a été canalisé par les opérations de boisement du XIX^e siècle et par les mesures actuelles de fixation des dunes menées par l'Office National des Forêts (ONF) sur les dunes domaniales.

L'érosion côtière et la submersion marine sont donc les deux principaux aléas affectant les littoraux dunaires. Ces deux phénomènes entrent en résonance avec les aménagements côtiers dans un contexte de pénurie sédimentaire et d'élévation du niveau marin (Gouguet et Roche, 2014). L'impact de la tempête Xynthia du 28 février 2010 a rappelé que les territoires littoraux peuvent être dramatiquement exposés aux aléas côtiers. En effet, la rupture (brèche) ou la destruction (arasement) de certains cordons lors de la tempête Xynthia a engendré l'inondation par la mer de zones basses urbanisées. Suite à la catastrophe, une prise de conscience aiguë a donc émergé quant au rôle que peuvent jouer certains cordons dunaires face aux aléas météo-marins, 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 (Gouguet, 2011).

Cette prise de conscience a été renforcée par les érosions extrêmes enregistrées suite à la succession de tempêtes pendant l'hiver 2013-2014. Des valeurs de reculs dépassant souvent 20 mètres et atteignant par endroits 30 à 40 mètres ont été enregistrées en Charente-Maritime (Bulteau *et al.*, 2014). L'impact de l'érosion côtière sur les cordons dunaires est double. D'une part, celle-ci contribue à réduire, voire anéantir, l'assise des cordons de 1^{ère} ligne, diminuant d'autant la capacité de protection dunaire face à la submersion. D'autre part, les aménagements présents sur les cordons peuvent être directement menacés par l'érosion en cas de fort recul.

Dans ce contexte, l'évaluation de l'état de conservation des massifs dunaires et l'identification des territoires à risque d'érosion sont devenus une préoccupation majeure pour les acteurs du littoral. Les outils réglementaires de prévention et de gestion des risques préconisent une prise en compte des systèmes naturels, aux côtés des structures de protection (digues), lorsque ceux-ci jouent un rôle de protection des populations (MEDDE, 2014 ; MEDDTL, 2011). La Mission Littoral de l'ONF concentre une partie de son activité sur la caractérisation de la robustesse des cordons bordiers.

Enfin, l'intérêt pour la conservation et l'évaluation des massifs dunaires apparaît dans les recommandations du rapport Cousin (Cousin, 2011) puis de la Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte (SNGITC) à travers la mise en place des programmes d'action 2012-2015 et 2017-2019 (MEEM, 2017 ; MEDDTL, 2012). Les observatoires régionaux du trait de côte sont placés en première ligne par l'État pour soutenir et appuyer les gestionnaires et les décideurs dans le processus de réduction du risque.

Deux phases se succèdent dans la gestion : une phase de diagnostic et la phase d'intervention proprement dite. Depuis les recommandations formulées par le rapport Cousin en 2011, et notamment l'action A « développer les outils de l'observation du trait de côte et de la compréhension de son évolution à l'échelle nationale et au sein des régions pour prioriser l'action publique », de nouvelles méthodes et de nouveaux outils ont été développés (i) pour évaluer la dynamique du trait de côte à échelle nationale (MEDDE, 2016) et (ii) pour diagnostiquer le rôle de protection des cordons dunaires (ONF, 2014 ; Debaine et Robin, 2012 ; Gouguet, 2012 ; Gouguet, 2011 ; Ramont, 2010). Malgré cela, il manque à ce jour une dimension « outil opérationnel » permettant de renforcer la phase diagnostic en introduisant (i) un raisonnement spatialisé répondant à des questions thématiques précises et (ii) un niveau scalaire fin entre la vision synoptique et l'échelle d'intervention proprement dite.

Fort de ce constat, cette thèse interroge donc la possibilité de formaliser, mettre en application et automatiser une procédure spatiale opérationnelle et transposable pour l'évaluation cartographiée des espaces côtiers soumis aux aléas érosion côtière et submersion marine.

Parmi les outils et méthodes déployés en analyse côtière, il apparaît que la démarche géomatique proposée par Debaine (2012) dans le programme Liteau III Multidune autorise la création d'une telle procédure. En effet, les principaux acquis de ce programme sur le plan méthodologique concernent la création d'une nouvelle méthode d'intégration de l'information géographique autorisant un diagnostic multiscalair mieux structuré que les méthodes existantes.

Inspirée des acquis du programme Multidune, cette thèse a pour objectif d'utiliser l'information géographique disponible (il ne s'agit pas ici de créer plus d'information), de façon à bénéficier d'un système interopérable au niveau local et régional, et de formaliser, dans la phase diagnostic, un protocole multiscalair de prise de conscience des problèmes associés à l'érosion du trait de côte et à la submersion marine. A terme, l'ultime objectif est de proposer une procédure automatisée, reproductible et transposable sur d'autres territoires, conditions autorisant le développement d'un véritable outil de diagnostic. Pour cela, la thèse repose sur les fondements méthodologiques présentés ci-après. L'analyse des risques côtiers nécessite souvent de recourir aux outils de la géomatique, particulièrement les systèmes d'information géographique (SIG) (Robin, 2002). L'utilisation de logiciels SIG permet d'apporter des solutions pour collecter, structurer, traiter l'information et restituer les résultats, mais également pour automatiser une procédure par emboîtement d'outils de géotraitement. Comparativement aux diverses méthodes de segmentation utilisées en analyse côtière, il est considéré que le potentiel d'intégration de l'approche par boîte est particulièrement approprié pour mener à bien un diagnostic exhaustif à un niveau scalaire fin. L'exploitation de données génériques (c'est-à-dire disponibles au minimum à échelle régionale, au mieux à échelle nationale), autorise un diagnostic précis et homogène. Extraits à partir de ces données, les indicateurs, véritables outils pour la gestion des espaces côtiers, permettent de traduire des observations complexes sous une forme synthétique. Leur précision dépend donc de la disponibilité, l'exhaustivité et la résolution spatiale et temporelle des données. Élaborés dans le cadre d'un raisonnement spatialisé développé à partir de questions thématiques précises (ex. Quelle est la capacité de la dune à protéger les zones basses rétro littorales ?), ces indicateurs peuvent être combinés dans le but de créer des indices composites apportant des réponses synoptiques, quantitatives et spatialisées aux questions posées. A terme, l'agrégation des boîtes à des niveaux supérieurs permet de réaliser des synthèses spatiales à différentes échelles (ex.

limites administratives, naturelles) articulant ainsi un diagnostic se voulant multiscalaire.

Appliquée sur les massifs dunaires de la région Pays de la Loire (soit environ 140 km de linéaire côtier), cette démarche se veut opérationnelle. Elle a vocation à établir un lien entre recherche fondamentale et application de cette recherche en vue d'une meilleure connaissance, d'une meilleure compréhension et finalement d'une meilleure gestion des espaces dunaires.

Ce manuscrit suivra une organisation en quatre temps. Le premier établit un état des connaissances quant aux concepts et méthodes employés en analyse côtière dans le cadre de l'observation du trait de côte. Après avoir précisé les concepts relatifs au risque, un volet thématique sera consacré à la présentation des massifs dunaires, notamment en région Pays de la Loire, ainsi qu'au contexte de l'observation du trait de côte en France. Une ouverture sur les apports de la démarche géomatique amènera ensuite vers un second volet dédié à la présentation des indicateurs du risque et des diverses possibilités d'exploitation de ces indicateurs. Un dernier volet sera consacré aux méthodes de segmentation utilisées pour la réalisation de synthèses spatiales dans le cadre d'analyses de la bande côtière. Au terme d'une démonstration conceptuelle, nous verrons que les méthodes recensées présentent des aptitudes variables en fonction du type d'information géographique traité.

Le deuxième chapitre de cette thèse s'attachera à présenter une application basée sur l'étude d'un indicateur simple à l'aide d'une méthode de segmentation dite classique. L'objectif affiché ici est de démontrer le potentiel de l'approche par transects pour l'évaluation de la mobilité du trait de côte. Les actions engagées dans le cadre de l'Observatoire du littoral des Pays de Monts (OLPM) incluent notamment un volet « compréhension des phénomènes » que ce chapitre propose de développer à travers l'étude de la mobilité du trait de côte à long, moyen et court terme. Dans un premier temps, une analyse de la dynamique historique (1920-2010) du trait de côte sera présentée (publication dans la revue *Dynamiques Environnementales des Presses Universitaires de Bordeaux*). Un second temps sera consacré à l'exploitation des données acquises sur le terrain dans le cadre de l'observatoire, apportant ainsi une analyse de la mobilité récente du trait de côte levé par l'ONF (2010-2014).

Le troisième chapitre propose une démonstration cette fois basée sur l'exploitation simultanée de trois indicateurs à l'aide de l'approche par boîtes. L'objectif est ici de présenter une méthode reproductible, basée sur la création d'un indice composite, permettant d'identifier finement les territoires à risque d'érosion dans la bande des 100 m. Une évaluation de l'exposition du bâti au recul du trait de côte a été menée sur 350 km le long du littoral de la région Pays de la Loire, à l'aide de boîtes de 30*100 m. Ce travail a fait l'objet d'une publication dans la revue *Ocean & Coastal Management*.

Le quatrième et dernier chapitre de ce manuscrit se rapporte à la mise en œuvre d'une démarche géomatique proposant un raisonnement spatialisé dédié à l'évaluation de la capacité de protection des massifs dunaires de la région Pays de la Loire face au risque de submersion marine. Un ensemble de huit indicateurs agrégés en trois niveaux au sein de boîtes de 25*400 m a permis de développer (i) un indice de sensibilité des massifs dunaires, (ii) un indice d'exposition des enjeux non-humains et (iii) un indice de capacité de protection globale des massifs. Ces travaux ont été soumis dans la revue *VertigO*. Les résultats présentés dans ce chapitre ont fait l'objet d'une production cartographique proposée en annexe de ce manuscrit de thèse.



Chapitre 1

Concepts et méthodes en analyse côtière



Introduction du chapitre 1

Ce chapitre est une introduction à l'observation du trait de côte et son analyse. Il constitue d'une part un socle perfectible composé de l'état des connaissances acquises et de la pensée développée pendant la thèse. D'autre part, il a vocation à poser les bases conceptuelles nécessaires à la compréhension du principe et de l'intérêt de la démarche géomatique présentée dans ce manuscrit.

Nous proposons dans le premier volet une revue des principaux concepts relatifs aux risques ainsi qu'une présentation des cordons dunaires et du rôle que ceux-ci peuvent jouer face au risque de submersion marine. Nous verrons également comment l'observation du trait de côte est structurée en France et en quoi la démarche géomatique peut y apporter des solutions.

Dans un second temps, nous nous attarderons sur une présentation et un inventaire non-exhaustif des indicateurs du risque. Nous verrons ensuite les diverses possibilités d'exploitation de ces indicateurs, notamment à travers la création d'indices composites.

Enfin, nous nous intéresserons dans le dernier volet de ce chapitre aux méthodes de segmentation utilisées pour la réalisation de synthèses spatiales dans le cadre d'analyses de la bande côtière. Nous verrons au terme d'une démonstration conceptuelle que chaque méthode présente des caractéristiques bien spécifiques.

1. Introduction à l'observation du trait de côte

1.1 Définition des concepts relatifs aux risques côtiers

Le littoral est soumis à un ensemble de processus naturels et anthropiques pouvant, sous certaines conditions, être à l'origine de situations à risque. Les principaux concepts associés à cette problématique des risques côtiers sont définis dans cette section.

1.1.1 Les aléas

Selon Robin (2002), l'aléa est défini comme « un événement menaçant ou probabilité d'occurrence dans une région et au cours d'une période donnée d'un phénomène pouvant engendrer des dommages ». D'après Garry *et al.* (1997), cité par Hénaff et Philippe (2014), « l'aléa est considéré comme un événement d'origine naturelle ou humaine potentiellement dangereux ». 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). Selon Gouguet et Roche (2014), les principaux aléas physiques susceptibles d'affecter les littoraux dunaires sont le recul du trait de côte (avancée de la mer sur la terre, figure 1-A), la submersion marine (inondation temporaire par la mer des zones basses littorales et/ou rétro-littorales figure 1-B) et la migration dunaire (progression vers l'intérieur des terres des formes dunaires, figure 2).

L'aléa recul côtier sera principalement abordé dans les chapitres 2 et 3. Il est quantifié par la mesure de l'évolution de la position de plusieurs traits de côte. L'aléa submersion marine sera abordé dans le chapitre 4. Il est défini par la cote altimétrique atteint par un niveau marin centennal ou historique (MEDDE, 2014). La migration dunaire n'a pas été pleinement traitée dans ce travail, toutefois des perspectives seront présentées en conclusion.



Figure 1 : A- recul du trait de côte et B- submersion par franchissement de paquets de mer à la Pointe du Devin, Ile de Noirmoutier (Vendée), le 01 février 2014 (coefficient de marée 114).

1.1.2 Les enjeux

Les enjeux représentent la valeur humaine, économique ou environnementale des éléments exposés à l'aléa ; ils représentent ce que l'on risque de perdre et rassemblent tant les biens que les personnes (D'Ercole et Metzger (2011), cité par Hénaff et Philippe (2014)). Hénaff et Philippe



Figure 2 : Témoignage du phénomène de migration dunaire sur un extrait de la carte de Claude Masse dressée en 1705 (carte du 5e quarré de la carte générale des côtes du Bas-Poitou « Carte des marais de Mons ou vulgairement apellé le pays des Marainchins ») - secteur de Saint-Jean-de-Monts (Vendée).

(2014) présentent huit catégories d'enjeux pouvant être identifiées : le bâti, les activités économiques, l'enjeu humain, les milieux naturels, les établissements vulnérables (ex. hôpitaux, écoles, maisons de retraite, hébergements touristiques), le patrimoine culturel, le réseau et les équipements stratégiques.

Les enjeux associés à la présence de bâti et de réseau routier sont pris en compte dans les chapitres 3 et 4.

1.1.3 L'exposition des enjeux

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 » par un aléa (GIEC, 2014). L'exposition au risque est la coïncidence spatiale entre l'enjeu et l'aléa (Léone et Vinet, 2006).

L'exposition des enjeux bâtis au recul côtier sera traitée dans le chapitre 3, tandis que l'exposition de l'urbanisation et du réseau routier face au risque de submersion sera abordée dans le chapitre 4.

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.

1.1.5 Le concept de vulnérabilité

Selon Léone et Vinet (2006), la vulnérabilité se définit comme « une propension à l'endommagement ou au dysfonctionnement de différents éléments exposés (biens, personnes, activités, fonctions, systèmes) constitutifs d'un territoire et d'une société donnés ». Reghezza (2006) propose deux classes de vulnérabilités : (i) la vulnérabilité physique, comprenant la vulnérabilité comme degré de pertes et de dommages et comme exposition des enjeux, et (ii) la vulnérabilité sociale comprenant la capacité de résistance, la capacité d'adaptation et la résilience. L'auteur soutient le concept de vulnérabilité synthétique tel que défini par Dauphiné (2002), où « la vulnérabilité synthétique traduit la fragilité d'un système dans son ensemble, et de manière indirecte, sa capacité à surmonter la crise provoquée par un aléa. Plus un système est apte à se rétablir après une catastrophe, moins il est vulnérable ». Magnan (2014) précise que selon la définition proposée par le GIEC en 2001¹, la vulnérabilité dépend des trois composantes que sont l'exposition, la sensibilité et la capacité d'adaptation. Le concept de vulnérabilité est introduit ici afin d'en présenter les principales caractéristiques, dans le souci d'établir une distinction entre les termes de vulnérabilité, de sensibilité et d'exposition telles que définies ci-dessus. Les travaux présentés dans les chapitres suivants ne traiteront pas directement de vulnérabilité. Seules l'exposition des enjeux non-humains (bâti et réseau) et la sensibilité des cordons littoraux seront traitées.

1.1.6 Le concept de risque

Il n'existe pas une mais plusieurs définitions du risque selon les objectifs des auteurs (Castillo *et al.*, 2012). Le risque est traditionnellement décrit comme le produit (Robin, 2002) ou la conjonction (Léone et Vinet, 2006) d'un ou plusieurs aléas par la vulnérabilité. Une autre définition commune est celle proposée par Jonkman *et al.* (2003), où le risque peut être défini par une fonction mathématique (i) de probabilité d'un événement et (ii) des conséquences de cet événement. D'après Hénaff et Philippe (2014), « le risque résulte de la combinaison d'un (ou de plusieurs) aléa(s) d'un niveau donné (intensité) avec les enjeux ». Il est déterminé par l'exposition des enjeux aux aléas. S'il s'agit de la définition classique du risque, les auteurs soulignent que « si cette approche permet de circonscrire les enjeux exposés au risque, elle reste insuffisante si l'on veut en évaluer la vulnérabilité ». Enfin, Granja, Pinho et Mendes (2014) définissent le risque par la combinaison entre la sensibilité (vulnérabilité physique) et l'exposition des enjeux.

L'intensité des aléas, la présence d'enjeux et leur exposition aux aléas, et la sensibilité environnementale sont abordées dans ce travail. La combinaison de ces concepts ne permet pas de définir pleinement le risque, le critère de vulnérabilité des enjeux n'y étant pas intégré. Toutefois, le terme de risque, employé dans ce travail, est accepté dans sa définition la plus simple « aléas*enjeux », le risque étant fonction de la probabilité d'un aléa et des conséquences possibles de cet aléa sur les enjeux exposés. La sensibilité environnementale influera favorablement ou défavorablement sur le degré d'exposition des enjeux.

¹ Définition de la vulnérabilité proposée par le GIEC en 2001, d'après Magnan (2014) : « degré par lequel un système risque de subir ou d'être affecté négativement par les effets néfastes des changements climatiques, y compris la variabilité climatique et les phénomènes extrêmes. La vulnérabilité dépend du caractère, de l'ampleur et du rythme des changements climatiques auxquels un système est exposé, ainsi que de sa sensibilité et de sa capacité d'adaptation ».

1.2 Prise en compte des cordons dunaires dans l'évaluation des risques d'érosion et de submersion

1.2.1 Définition des cordons dunaires

La description et le fonctionnement des massifs dunaires ont fait l'objet de multiples écrits dont ceux de Paskoff (2006) et de Favennec (1999a, 1999b). Une définition synthétique est proposée ci-dessous.

Les massifs dunaires sont des formes d'accumulation formées et modelées par l'action du vent le long des côtes sableuses. Ils constituent la section émergée des systèmes plage-dune lesquels sont organisés en étages comprenant généralement de la mer vers l'intérieur des terres : l'avant-plage, l'estran, le haut de plage, le contact plage-dune (dune embryonnaire ou falaise dunaire), le cordon de 1^{ère} ligne, la dépression intra-dunaire et le cordon de 2^{ème} ligne.

Le système plage-dune est caractérisé par des échanges permanents de sables entre la plage et la dune : la plage alimente l'avant-dune et/ou le cordon de 1^{ère} ligne (répit estival) tandis que la dune constitue une véritable banque de sable réalimentant la plage lors des phases d'agitation (tempête hivernale). La présence d'une végétation fixatrice tend à piéger les sédiments et à développer les formes dunaires, parmi lesquelles figurent principalement les cordons, les dépressions intradunaires, les formes barkanoides et les formes paraboliques (isolées ou en râteau). La végétation dunaire est structurée en faciès parallèles à la côte comprenant du haut de plage vers l'intérieur des terres : l'avant-dune (ou dune embryonnaire), la dune blanche (ou dune mobile), la dune de transition, la dune grise (ou dune fixée) et la dune boisée (figure 3). La remobilisation des sédiments sous l'action du vent crée de nouvelles formes d'érosion (siffles-vents, plaques de déflation, caoudeyres) et d'accumulation (tucs, pourrières) principalement sur les cordons de 1^{ère} et de 2^{ème} ligne.

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 de nombreuses pressions anthropiques (activités économiques, activités de récréation, urbanisation, réseau). 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 météorologiques. L'anthropisation est donc autant un agent de forçage qu'un facteur du risque.

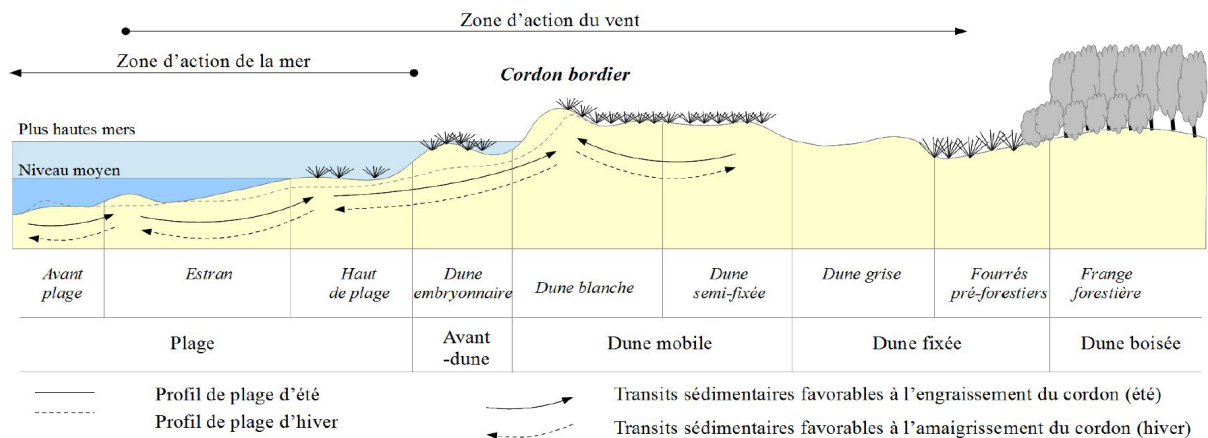


Figure 3 : Structure et dynamique des systèmes plage-dune (Florent Taureau dans Roche et al., 2015)

1.2.2 Les cordons dunaires en région Pays de la Loire

Les systèmes dunaires de la région ont fait l'objet de multiples descriptions dont celles, exhaustives, de Barrère (1999) et Dupont (2005). Ainsi, le littoral régional appartient, de la Baie de Pont Mahé jusqu'aux Sables d'Olonne, à la frange méridionale du Massif Armoricaire. 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 systèmes dunaires hérités de la dernière transgression holocène. La bordure maritime des marais est ainsi composée de systèmes 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 (INEC), s'étendent sur 217 km. Les systèmes dunaires, hors dunes perchées, représentent environ 140 km (figure 4).

Au nord de la Loire figurent les flèches de la Turballe (Pointe de Pen Bron) et de la Baule, formant avec la presqu'île du Croisic un double tombolo abritant le traict du Croisic et les marais de Guérande. Au sud de l'estuaire de la Loire s'étendent le long de la côte de Jade les cordons littoraux de Saint-Brévin-les-Pins, de Saint-Michel-Chef-Chef, ainsi que la flèche des Moutiers-en-Retz, porte septentrionale du Marais breton. À l'extrémité ouest de la Baie de Bourgneuf se trouve l'Île de Noirmoutier. Les parties basses de l'île sont ceinturées par des digues de protection côté baie et un ensemble de cordons littoraux et flèches sableuses le long de la côte nord et de la façade occidentale. Les formations dunaires de l'île de Noirmoutier peuvent être considérées comme la limite nord d'un corps sédimentaire vendéen quasi-continu courant le long du littoral en direction du sud jusqu'à l'Anse de l'Aiguillon. Seule la présence de rares promontoires rocheux (ex. Corniche vendéenne à Saint-Hilaire-de-Riez) ainsi que les falaises et dunes perchées de Château d'Olonne et de Talmont-Saint-Hilaire rappellent la présence du massif armoricaire, interrompant la continuité des paysages dunaires de la côte vendéenne. Progressivement mis en place à la fin de l'Holocène, les cordons littoraux et flèches sableuses se sont érigés en barrières naturelles, isolant de la mer de vastes zones basses. Ainsi, du nord au sud de la Vendée hercynienne s'enchaînent le massif dunaire des Pays de Monts (en bordure du Marais breton), la flèche sableuse de Saint-Gilles-Croix-de-Vie comprenant la dune de la Garenne et les dunes du Jaunay et de la Sauzaie (en bordure du Marais du Jaunay) et au sud, les dunes de la Gachère et le massif dunaire de la Forêt d'Olonne (en bordure des Marais d'Olonne). Enfin, située à environ 18 km au large des Pays de Monts, l'Île d'Yeu présente également un cordon littoral situé en position d'abri le long de la façade est de l'île, séparant de la mer plusieurs zones basses. Dans le sud de la Vendée, trois formations dunaires sont identifiées entre les Sables d'Olonne et l'Anse de l'Aiguillon. Située à l'extrémité de l'estuaire du Payré, la flèche du Veillon constitue un poulcier dont la forte mobilité traduit la dynamique de l'estuaire. Dans la continuité des dunes perchées de Jard-sur-Mer (non étudiées ici), la bordure occidentale du Marais poitevin est constituée du massif dunaire de Longeville-sur-Mer. Ce cordon littoral se prolonge jusqu'à La-Tranche-sur-Mer, où la dérive des sédiments vers l'est a conduit à la création de la lagune de la Belle-Henriette et plus au sud, celle de la Pointe d'Arçay. Enfin, située à l'extrémité de la rive gauche de l'estuaire du Lay, la Pointe de l'Aiguillon constitue la terminaison méridionale du corps sédimentaire vendéen.

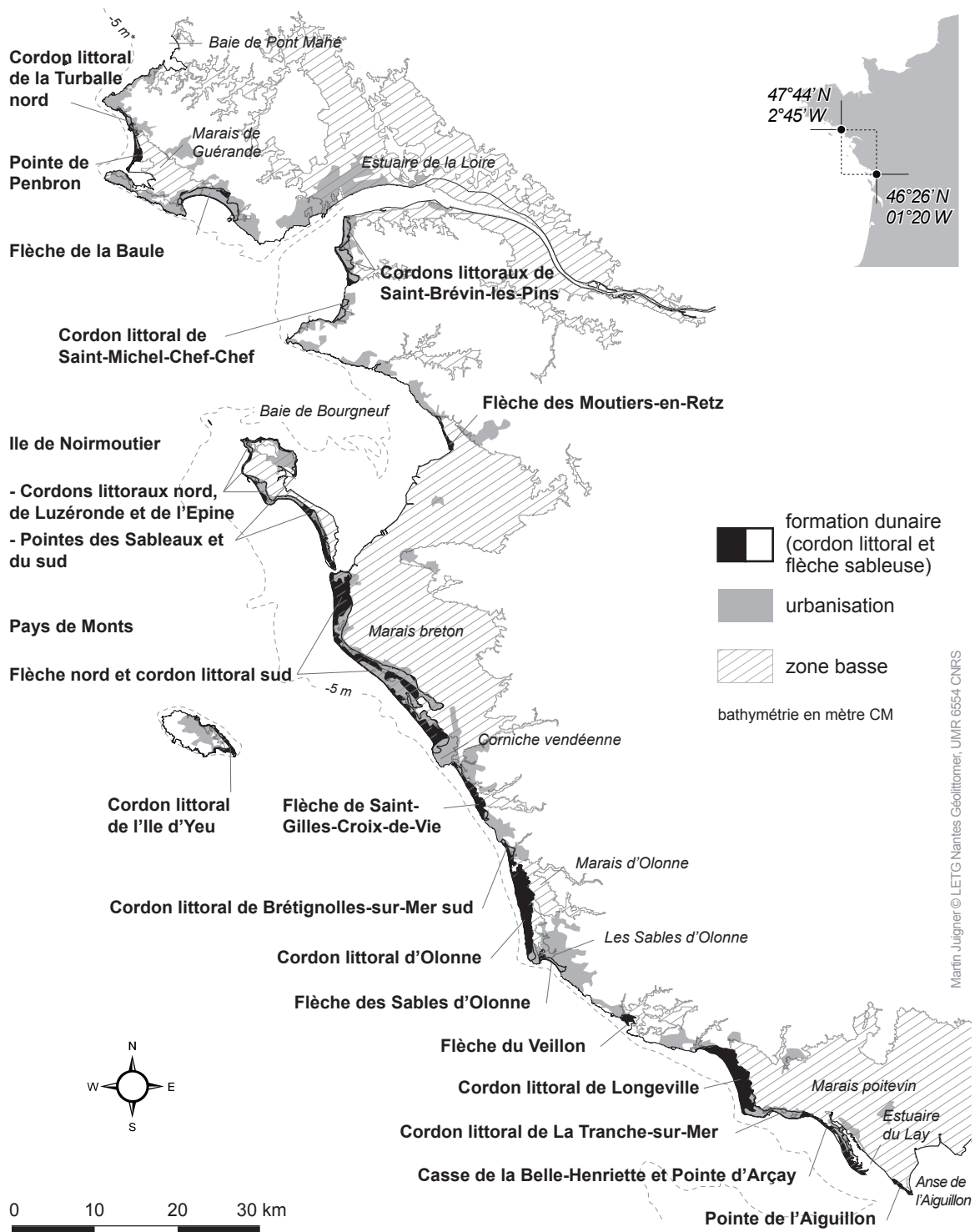


Figure 4 : Localisation des cordons littoraux et flèches sableuses de la région Pays de la Loire

(Bd Charm-50, BD TOPO, Litto 3D)

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), une dune blanche, une dune grise et, selon la profondeur de la formation, une dune boisée correspondant souvent aux cordons de 2^{ème} ligne. L'état actuel de la couverture des dunes de la région peut être résumé à un état de fixation quasi-généralisé lié d'une part au stade de maturité des systèmes dunaires (Paskoff, 2003), aux actions de

fixations 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 saupoudrages 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. L'érosion prononcée du trait de côte aura tendance à faire disparaître la dune blanche comme au droit de l'hippodrome de Saint-Jean-de-Monts, dont l'implantation limite considérablement l'emprise de la dune grise. Inversement la dune de la Tresson présente une dune blanche et une dune grise toutes deux largement développées, la dune boisée n'étant cantonnée qu'à l'extrémité sud-est de ce système dunaire. Enfin, le long du massif dunaire de Longeville-sur-Mer, entre la plage des Conches et le Goulet, la dune boisée est nettement répandue sur toute la largeur du massif dunaire, atteignant par endroit directement la dune blanche, au détriment d'une dune grise absente.

1.2.3 Affirmation et évaluation du rôle de protection des cordons dunaires

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, notamment les côtes basses meubles, peuvent être dramatiquement exposés aux aléas côtiers. Comme le rappellent Gouguet et Roche (2014), si la migration dunaire était une problématique de premier rang en matière de risque au XIX^e siècle, les inquiétudes portent dorénavant, au XXI^e siècle, sur les aléas érosion côtière et submersion marine. Non loin d'être nouveaux, ces deux phénomènes naturels entrent en résonance avec les aménagements côtiers (urbanisation, ouvrages de défense), dans un contexte d'accentuation lié d'une part à une pénurie sédimentaire et d'autre part à l'élévation du niveau marin (Gouguet et Roche, 2014).

Suite à la catastrophe Xynthia, une prise de conscience aiguë a donc émergé quant au rôle que peuvent jouer les massifs dunaires face aux aléas météo-marins, et plus précisément les submersions dans les zones à risque (Debaine, 2012). Les dunes bordières (voir figure 5) sont davantage perçues comme des barrières naturelles ayant un rôle de défense contre la mer (Roche *et al.*, 2015 ; Gouguet et Roche, 2014 ; Debaine, 2012 ; Gouguet, 2011). En effet, Gouguet et Roche (2014) précisent que les dunes, en tant que stock sédimentaire, jouent divers rôles directs et indirects face aux aléas érosion et submersion, incluant l'amortissement souple de l'énergie marine, le soutien du budget sédimentaire de la plage et la protection des zones basses rétrolittorales. 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 naturels 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 SNGITC (MEEM, 2017 ; MEDDTL, 2012).

L'intérêt pour la caractérisation des cordons dunaires traduit un besoin de connaissance nécessitant d'être comblé. Empruntée aux travaux sur les services écosystémiques (Millennium Ecosystem Assessment, 2005 ; Costanza *et al.*, 1997), la notion de services rendus par les massifs dunaires est dès lors 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 le rôle de protection des cordons dunaires le long des côtes françaises.

Le Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviales, actuel Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA) a développé une approche simplifiée de recensement et d'identification *in situ* des cordons dunaires assurant un rôle de protection (Roche *et al.*, 2015, Roche, 2011). Une typologie est proposée suivant le type d'assise du cordon dunaire et la nature du contact plage-dune. Y sont distinguées les formes érodées (dune basse), les formes triangulaires (dune étroite avec stabilité relative) et les formes trapézoïdales (dune avec un stock sédimentaire important). Conceptuellement, il est considéré que si chaque type de cordon peut assurer un rôle de protection, leur efficacité sera variable si l'on observe leur largeur au droit du niveau marin de référence (Roche *et al.*, 2015). Une forme érodée serait intégralement submergée, tandis qu'un cordon de forme triangulaire représenterait un objet de danger potentiel plus important qu'un cordon trapézoïdale du fait d'une plus faible capacité de résilience (Roche *et al.*, 2015). Cette approche repose sur un diagnostic *in situ* des seuls cordons bordiers et requiert une connaissance préalable de la localisation des secteurs sensibles.



Figure 5 : Exemple de cordon dunaire jouant un rôle de protection face à la submersion marine. Une partie du camping (à droite) est située sous la cote de l'aléa de référence (02 février 2014, La Pège, Saint-Hilaire-de-Riez, Vendée).

Le programme Liteau III Multidune (Debaine, 2012 ; Debaine et Robin, 2012) propose une démarche géomatique pour l'évaluation cartographique de deux services rendus par les écosystèmes dunaires : le service biodiversité (composé des volets biodiversité et naturalité) et le service protection contre les aléas météo-marins (composé des volets érosion marine, submersion marine et déflation éolienne). Le niveau de service rendu est évalué par l'intensité et la combinaison d'un ensemble d'indicateurs spécifiques à chaque service. Par exemple, le service protection contre la submersion marine est évalué à partir d'une variable topographique (altitude moyenne du massif dunaire) et de trois variables morphométriques extraites de données LiDAR (cuvette, sommet et crête) permettant de décrire la perméabilité du massif dunaire. Les variables sont combinées entre elles au sein d'unités d'observation (ou boîtes) de 50*500 m afin d'évaluer le niveau de protection de la dune. A terme, chaque boîte est caractérisée par un niveau de protection, lequel est combiné

à deux variables « enjeux » (la surface urbanisée et la distance trait de côte-urbanisation) ce qui permet d'identifier et de localiser précisément les secteurs à risque. Développée sur la côte sud de l'Île de Noirmoutier, cette démarche présente l'avantage d'utiliser des données génériques exploitées par des outils pouvant faire l'objet d'une automatisation. L'évaluation du massif dunaire est homogène et exhaustive.

Plus récemment, la Mission Littoral de l'ONF a proposé dans son rapport pour la Mission d'Intérêt Général « Prévention des Risques Naturels » (ONF, 2014) une méthodologie pour la caractérisation de la robustesse des cordons bordiers (expression préférée à celle de service/rôle de protection) jouant un rôle d'obstacle à la submersion marine. L'évaluation porte sur les cordons bordiers domaniaux perméables à la cote centennale plus un mètre établie par les services de l'État (SHOM-CETMEF, 2012). La localisation et la sélection des sites sensibles est menée par croisement d'informations géographiques (géologie, propriétés domaniales, zones basses, épaisseur du cordon inférieure à 20 m). Les sites retenus sont ensuite évalués via un diagnostic visuel simplifié *in situ* au cours duquel sont levés neuf critères (le profil dunaire, le contact plage-dune, la couverture végétale, l'anthropisation, l'arrière dune, la capacité de la dune à reculer, la nature de l'estran, et la présence d'ouvrages de protection). Enfin, les sites diagnostiqués sont découpés en secteurs selon la continuité/discontinuité des critères levés. À chaque secteur est finalement attribué un qualificatif (transparent, vulnérable, très robuste) en fonction de la hauteur et de la largeur du cordon résiduel situé au-dessus des niveaux extrêmes. Dans cette approche, la détection des sites sensibles suit un raisonnement spatialisé : sont sensibles les cordons bordiers dont l'épaisseur est inférieure à 20 m au droit d'une zone basse rétrolittorale. Les travaux de l'ONF traduisent l'intérêt de la complémentarité entre, d'une part l'apport de la géomatique dans la détection des sites sensibles, ce qui conduit d'autre part à guider les gestionnaires sur le terrain afin de compléter le diagnostic avec des observations *in situ*.

1.3 Les observatoires du trait de côte

Les observatoires du trait de côte ont un rôle central dans la gestion du littoral. En effet, ces structures, souvent le fruit de partenariats, ont pour but d'étudier et suivre l'évolution des côtes par la collecte, la structuration et l'exploitation de données à échelle locale. Si le trait de côte est un objet d'étude central, l'activité des observatoires peut également être élargie à l'environnement côtier dans un sens plus large, intégrant par exemple des variables de dynamique des plages, d'état des cordons dunaires, de pollution, de biodiversité, de fréquentation, ou encore de risque.

1.3.1 Démarche nationale et objectifs

L'État français a affirmé en 2009 avec le point 74 f du Livre Bleu des engagements du Grenelle de la Mer (MEEDDM, 2009) son intention de « développer une méthodologie et une stratégie nationale (collectivités et État) pour la gestion du trait de côte, pour le recul stratégique et la défense contre la mer ». Dans le contexte des conséquences catastrophiques de la tempête Xynthia de 2010 sur le littoral centre-atlantique français, l'engagement de l'État a conduit à la création d'un groupe de travail mené par le Député Cousin dont l'objectif a été de formaliser dans un rapport (Cousin, 2011) des « propositions pour une stratégie nationale de gestion du trait de côte, du recul stratégique et de la défense contre la mer, partagée entre l'État et les collectivités territoriales ». Les recommandations formulées ont conduit à la création en 2012 de la SNGITC (MEDDTL, 2012).

L'axe A¹ de la Stratégie nationale et plus particulièrement l'action 1² soutiennent (i) la création et l'animation d'un réseau national des observatoires basé sur des structures existantes et (ii) l'émergence de nouvelles structures d'observation pour les régions qui n'en sont pas encore dotées.

Les programmes d'action 2012-2015 et 2017-2019 de la Stratégie établissent quatre objectifs autour de cette mise en réseau :

- 1- Produire et partager des données fiables et homogènes en développant des protocoles d'acquisition et des règles de partages concertés ;
- 2- Mutualiser les compétences et les moyens pour faciliter l'émergence d'actions communes ;
- 3- Communiquer, éduquer et faire participer la société civile pour diffuser les connaissances et accroître les sources d'acquisition ;
- 4- Accompagner l'émergence de nouveaux observatoires locaux et la consolidation des observatoires existants.

A terme, ce socle d'observatoire aura vocation à améliorer, à l'échelle nationale, la connaissance du recul du trait de côte et des enjeux potentiellement impactés (Action 2) et développer la connaissance de la dynamique littorale (Action 3). Les travaux de caractérisation des cordons dunaires engagés par la Mission Littoral de l'ONF s'inscrivent donc bien dans les objectifs de la Stratégie nationale et peuvent ainsi venir appuyer les structures régionales d'observation, et inversement.

1.3.2 Inventaire des observatoires à échelle nationale

Cette section présente un bref état des lieux des structures d'observation existantes en France métropolitaine et dans les départements et régions d'outre-mer tel que présenté dans le travail d'inventaire issu des travaux de Suanez *et al.* (2012) et Bulteau *et al.* (2011). Cet inventaire a permis la création d'une typologie des observatoires basée sur les critères suivants : la fréquence de mesures, les conditions de déclenchement des mesures, les modalités de mise à jour des données, l'échelle spatiale, le type de valorisation ou d'utilisation des données. Ces critères ont permis aux auteurs de distinguer cinq types d'observatoires répartis en trois catégories (tableau 1).

Ainsi, 52 dispositifs de suivis ont été répertoriés sur l'ensemble des façades maritimes (Manche, Atlantique, Méditerranée et Outre-Mer). Les observatoires de type 3 et 4 représentent les acteurs majeurs du suivi du trait de côte (Suanez *et al.*, 2012). Toutefois, les structures pérennes (type 4) dont l'emprise est régionale apparaissent comme être les plus à même de capitaliser les données nécessaires à l'étude des phénomènes côtiers (MEDDE, 2016).

La liste mise à jour en 2017 (Kerguillec et Robin, 2017) des observatoires régionaux métropolitains est la suivante (figure 6) :

- 1- le Réseau d'Observation du Littoral Normand et Picard (ROLNP), actif depuis 2010 ;
- 2- le projet OSIRISC (« vers un observatoire intégré des risques côtiers d'érosion submersion ») couvrant le littoral breton, en projet ;
- 3- l'Observatoire Régional des Risques Côtiers (OR2C) en Pays de la Loire, en cours de lancement depuis 2016 ;
- 4- l'Observatoire de la Côte Aquitaine (OCA), actif depuis 2000 ;
- 5- la DREAL Occitanie avec le Système d'Observation Littoral/ Trait de côte (SO LTC), actif depuis les années 2000 ;
- 6- le Réseau d'Observation du Littoral de la Corse (ROL Corse), actif depuis 1999.

1 Intitulé de l'Axe A : « Développer l'observation du trait de côte et identifier les territoires à risque érosion pour hiérarchiser l'action publique »

2 Intitulé de l'Axe A - action 1 : « Créer un réseau d'observation et de suivi de l'évolution du trait de côte à l'échelle nationale »

1.3.3 Les initiatives en région Pays de la Loire

L'observation du trait de côte en région Pays de la Loire repose sur un socle d'initiatives d'observation locale antérieures à la création de l'OR2C. Ces observatoires ne couvrent qu'une partie du linéaire côtier régional et sont essentiellement concentrés dans le nord Vendée. Bulteau *et al.* (2011) ont recensé huit observatoires¹, dont trois de type 1, trois de type 2 et deux de type 3.

Les observatoires de l'Île de Noirmoutier (actif depuis 1999) et des Pays de Monts (actif depuis 2009), ainsi que le suivi de la plage des Sables d'Olonne par Géolittomer (depuis 1998), sont les principales initiatives d'acquisition de données pour le suivi et la compréhension des dynamiques littorales en région Pays de la Loire.

Type	Catégorie	Fréquence	Valorisation ou utilisation	Echelle spatiale	Déclenchement	Mise à jour
1	Opération	Mesures période unique, étude ponctuelle	Projet d'aménagements littoraux, risque	Réduite (locale)	Ponctuel	Opportuniste voire jamais
2		Mesures multi-dates, non planifié	Aménagements littoraux, risque, activité de recherche	Réduite (locale)	Ponctuel	Opportuniste
3	Observatoire	Suivi pluriannuel de courte durée / plutôt mono-paramètre	Activité de recherche, aide à la décision	Plusieurs communes, département	Programmé	Fréquence programmée
4		Observatoires pérennes (longue durée de vie, multi paramètres)	Aide à la décision, bases de données, activité de recherche	Département(s), région	Programmé	Fréquence programmée et action si événement exceptionnel (tempête)
SIL	Méta-observatoire	Pas d'acquisition	Suivi du littoral (indicateurs autres que le trait de côte)	Régionale à nationale	Pas d'acquisition propre	Fonction des accords avec les fournisseurs de données

Tableau 1 : Typologie des observatoires de suivi du trait de côte (Source : Suanez et al., 2012)

1.4 Apports de la géomatique pour l'observation du trait de côte

1.4.1 La démarche géomatique

L'analyse des risques côtiers nécessite souvent de recourir aux outils de la géomatique, particulièrement les SIG (Robin, 2002). L'utilisation de ces outils permet d'appréhender le risque sous un angle spatial (localisation des zones à risque), systémique ou socio-économique (Robin, 2002). Plusieurs étapes sont nécessaires pour étudier les risques.

D'une part il faut analyser les aléas, puis les enjeux, et d'autre part il faut combiner les deux pour spatialiser le risque et son intensité (Robin, 2005). La démarche géomatique consiste donc à collecter et exploiter l'information géographique afin de produire des résultats spatialisés souvent représentés sous forme de carte. L'utilisation d'indicateurs et d'indices est courante dans la littérature (voir section 2. du chapitre 1). Lorsqu'elle est disponible, l'information géographique sur le littoral peut être disparate (productions de données locales par divers acteurs : universités, bureaux d'études, services de l'État, gestionnaires...) ou exhaustive (production de données dé-

¹ D'après Bulteau *et al.* (2011) :

- type 1 : DDTM Vendée, DDTM Loire-Atlantique, DREAL Pays de la Loire ;

- type 2 : Syndicat Mixte de Défense contre la Mer du Littoral Continental de la Baie de Bourgneuf, Communauté de communes du Pays de Saint-Gilles-Croix-de-Vie, Laboratoire Géolittomer de l'Université de Nantes ;

- type 3 : Observatoire de l'Île de Noirmoutier, Observatoire du littoral des Pays de Monts

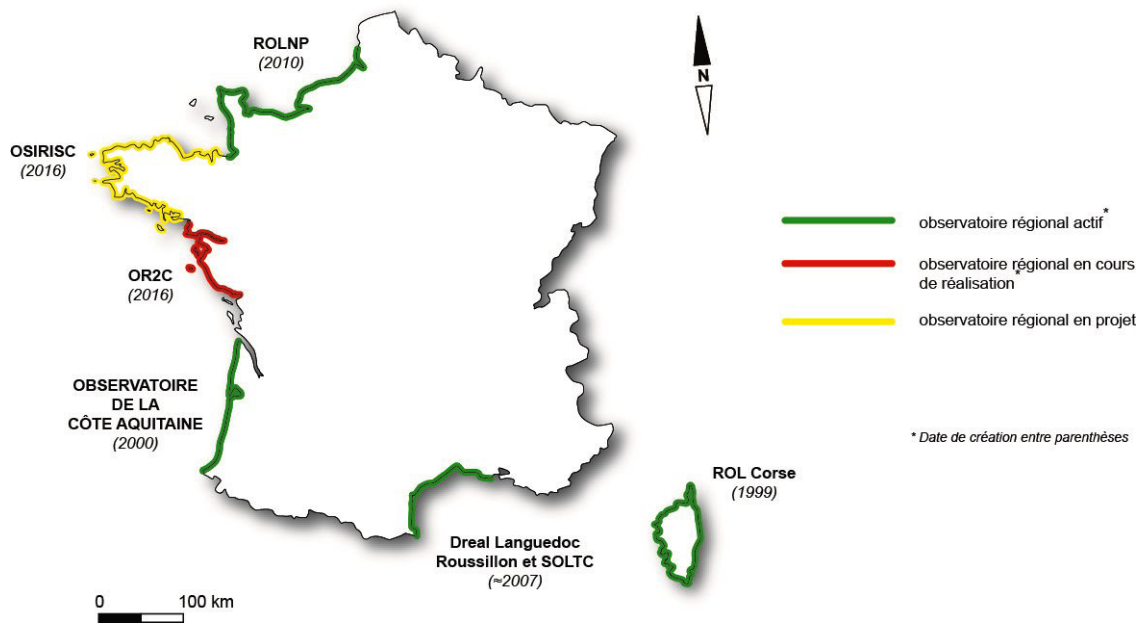


Figure 6 : Localisation des observatoires régionaux du trait de côte pour le littoral français métropolitain.
Source : Kerguillec et Robin (2017), d'après Suanez et al. (2012).

partementales, régionales ou nationales, souvent par les organismes nationaux). L'étude à échelle régionale ou nationale de la dynamique côtière et des risques littoraux nécessite de récolter des données répondant aux critères suivants : (i) la disponibilité sur l'ensemble de l'espace étudié (ii) la couverture continue des sites d'étude (iii) l'exhaustivité de l'information géographique (iv) la résolution spatiale la plus fine lorsque plusieurs jeux sont disponibles (v) une cohérence temporelle pour l'analyse des dynamiques historiques. Des inventaires de données (ou bases de données) et d'études littorales existent (Robin, 2002 ; Robin *et al.*, 2005 ; Kerguillec et Robin, 2017) ou sont en cours de réalisation, à l'image de la mise à jour des catalogues sédimentologiques dans le cadre de la SNGITC. Par exemple, concernant la mobilité du trait de côte en région Pays de la Loire, des données ont été produites (i) à échelle locale essentiellement dans le cadre des observatoires du trait de côte nord Vendée, (ii) à échelle départementale dans le cadre de travaux menés par des bureaux d'études (SOGREAH, 2012 ; Geos-DHI, 2008), (iii) à échelle nationale dans le cadre de l'INEC (MEDDE, 2016) et (iv) à échelle internationale dans le cadre du projet EUROSION (Lenôtre *et al.*, 2004).

1.4.2 Positionnement de la thèse

La concentration croissante des biens, des activités et des personnes sur le littoral, conjuguée à l'incidence de l'élévation du niveau marin sur les phénomènes d'érosion et de submersion, accentue le besoin de disposer de méthodes et d'outils pour une évaluation fine à des fins de prévention et de gestion des risques, particulièrement en ce qui concerne les côtes basses meubles.

Jusqu'à maintenant, diverses initiatives ont été déployées sur les côtes françaises. L'INEC, réalisé avec le logiciel MobITC du CEREMA, est la première étude à échelle nationale quantifiant l'évolution du trait de côte. La Mission Littoral de l'ONF a développé une méthode opérationnelle d'évaluation *in situ* de la robustesse des cordons dunaires domaniaux face à la submersion marine. Des études locales ont également été menées, notamment celle de Debaine et Robin (2012) pour évaluer le service protection dunaire sur l'Île de Noirmoutier, ou celle de Trmal, Pons et Ledoux (2016) sur la détection automatisée de structures de protection contre les inondations à partir de données LiDAR (outil DICARTO du CEREMA).

Si les méthodes classiques d'analyse spatiale permettent de répondre à un certain nombre de questionnements, il manque cependant à ce jour une démarche géomatique adaptée aux singularités littorales, simple et reproductible, permettant d'intégrer tous les types de données, donc de répondre à une grande diversité de questionnements thématiques précis.

Ce travail de thèse a pour objectif de proposer une telle démarche. Basée sur les acquis de travaux antérieurs relatifs à l'analyse spatiale des dynamiques côtières et des risques inhérents, la démarche géomatique proposée repose sur l'hypothèse suivante. L'utilisation de données génériques, conjuguée à une segmentation homogène de la bande côtière, autorise l'extraction d'indicateurs synthétiques, dont la combinaison permet de définir des indices composites apportant des réponses synoptiques, quantitatives et spatialisées aux questions posées.

2. Indicateurs et indices d'évaluation des risques côtiers

La construction d'une démarche géomatique repose sur la sélection et l'exploitation d'indicateurs. Cette section présente dans un premier temps une définition et une revue des indicateurs environnementaux et sociétaux rencontrés dans la littérature. Une réflexion spatiale pour la construction d'indicateurs y est également présentée. Dans un second temps, deux types d'exploitations sont présentés, l'approche fondée sur un ou plusieurs indicateurs simples, et l'approche fondée sur la combinaison de plusieurs indicateurs.

2.1 Les indicateurs

2.1.1 Éléments de définition des indicateurs

L'utilisation d'indicateurs pour l'évaluation des risques côtiers est largement répandue dans la littérature (Nguyen *et al.*, 2016 ; Carapuço *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 ; Bush *et al.*, 1999). Selon Carapuço *et al.* (2016), la première référence définissant les indicateurs côtiers est celle proposée par Berger (1996). L'auteur y présente les géoindicateurs comme des mesures, de processus géologiques et de phénomènes opérant à la surface de la Terre (ou à proximité), qui sont significatives pour la compréhension des changements environnementaux sur une période de 100 ans ou moins. Ils permettent de mesurer à la fois des événements majeurs et des événements plus graduels dans une échelle de temps humaine. Par exemple, la position du trait de côte est un marqueur utilisé pour observer et quantifier l'évolution des côtes à divers pas de temps (Morton, 1996 ; Carapuço, 2015). Plus récemment, l'Unesco a proposé une définition générique des indicateurs dans le manuel intitulé *A Handbook for measuring the progress and outcomes of Integrated Coastal and Ocean Management* (Heileman, 2006). Les indicateurs sont des relevés quantitatifs / qualitatifs ou des paramètres observés / mesurés pouvant être utilisés pour décrire des situations réelles et pour mesurer des évolutions ou tendances dans le temps. Trois types d'indicateurs sont distingués dans le manuel : les indicateurs de gouvernance (évaluation de la performance des composantes d'un programme), les indicateurs écologiques (évaluation de l'état de l'environnement) et les indicateurs socio-économiques (évaluation de la composante humaine dans les écosystèmes côtiers et marins).

Face à la multiplicité et la diversité (i) des indicateurs, (ii) de leur dénomination, (iii) de leur définition et (iv) de leurs usages recensés dans la littérature, Carapuço *et al.* (2016) proposent de développer un cadre commun pour la création et l'exploitation des indicateurs de l'état des environnements côtiers. Les auteurs proposent notamment de standardiser le terme de « géoindicateurs »

puisqu'il s'agit de la dénomination la plus ancienne (Berger, 1996). Toutefois, l'évaluation des risques nécessite d'intégrer des indicateurs environnementaux et sociétaux. Il conviendrait alors de distinguer les géoindicateurs tels que définis par Berger (1996) des indicateurs socio-économiques tels que définis par l'Unesco (Heileman, 2006). Par souci de simplification, la dénomination générique d'« indicateurs » suivant la définition large proposée par l'Unesco est retenue dans ce travail.

Les indicateurs 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 (van Rijn, 2010). Ils permettent également une orientation pour la mitigation de l'impact des aléas (Bush *et al.*, 1999). Pour être intégrés dans un processus d'aide à la décision, les indicateurs doivent répondre à un certains nombres de critères. Carapuço *et al.* (2016) proposent un ensemble de cinq critères auxquels les indicateurs doivent répondre favorablement :

- 1- être spécifique : les indicateurs devraient produire une représentation claire des caractéristiques du système qu'ils tentent d'éclairer.
- 2- être mesurable : ils devraient être quantifiables.
- 3- être réalisable : ils devraient pouvoir être extraits et compilés avec les ressources et le capital intellectuel disponibles.
- 4- être pertinent : il doit y avoir un lien direct entre l'indicateur et le problème (ou la question) posé (e).
- 5- être temporel : ils devraient répondre des évolutions dans le temps et fournir des informations à un instant donné.

2.1.2 Illustration à partir d'éléments bibliographiques

Les indicateurs ont une diversité d'applications incluant l'observation et le suivi de l'environnement, mais, leur utilisation dans le domaine côtier relève essentiellement de l'évaluation des aléas, des risques et des dommages (Bush *et al.*, 1999). Parmi les premières initiatives relevées dans la littérature figurent les listes de critères portant sur (i) l'évaluation de la sensibilité des dunes littorales face à l'élévation du niveau marin ou (ii) la détection du risque par évaluation des aléas et des enjeux. Trois exemples de listes sont évoqués ci-dessous.

Bodéré *et al.* (1991) proposent ainsi une liste de contrôle composé de 49 indicateurs environnementaux et sociétaux pour évaluer la vulnérabilité des milieux dunaires littoraux dans le sud du Pays de Galles et en Bretagne occidentale. Intégrés dans un questionnaire, les indicateurs sont structurés en neuf rubriques :

- 1- conditions physiques générales ;
- 2- site et morphologie dunaire ;
- 3- taille des particules ;
- 4- caractéristiques de l'estran ;
- 5- caractéristiques superficielles de la dune sur les 200 premiers mètres ;
- 6- témoignage de l'évolution de la dune ;
- 7- pression exercée par divers utilisateurs ;
- 8- usages économiques et agricoles actuels ;
- 9- mesures de protection récentes.

Monnier (1999) a élaboré une base de données pour évaluer la sensibilité des systèmes cordon-zone humide vis-à-vis d'une élévation du niveau marin. L'auteur a identifié à partir de la carte IGN au 1/25 000 et de contrôles sur le terrain les critères suivants le long de 75 sites sur le littoral

atlantique et 91 en domaine méditerranéen :

- 1- le type de cordon ;
- 2- la nature sédimentaire ;
- 3- l'exposition ;
- 4- la longueur du cordon ;
- 5- la largeur du cordon ;
- 6- la nature ;
- 7- la surface de la zone humide ;
- 8 - l'anthropisation ;
- 9 - l'intérêt du site ;
- 10- rapport superficie de la zone humide / superficie du bassin versant.

Dans le même temps, Bush *et al.* (1999) présentent une revue des géoindicateurs pour l'évaluation rapide des risques et aléas côtiers et leur mitigation. Les auteurs présentent une liste de géoindicateurs spécifiques pour chaque site d'étude répartis selon les ensembles suivants :

- 1- les paramètres généraux (altitude, végétation) ;
- 2- les paramètres associés au trait de côte¹ (configuration au large ; taux d'érosion ; largeur, pente et épaisseur de plage ; configuration de la falaise ou de la dune ; *overwash* ; défenses côtières)
- 3- les paramètres associés à la présence de goulets ou d'estuaires (distance du site au goulet ; formation et migration de goulet) ;
- 4- les paramètres décrivant l'arrière-dune (configuration ; drainage ; sol) ;
- 5- autres paramètres.

La démocratisation de l'utilisation des SIG dans les études littorales, conjuguée à l'essor des questionnements relatifs aux impacts du changement climatique sur les côtes basses meubles, ont entraîné un usage croissant d'indicateurs toujours plus diversifiés. Les indicateurs généralement employés pour l'étude locale de la morphodynamique côtière (tableau 3) côtoient dans la bibliographie un ensemble grandissant d'indicateurs nouveaux utilisés tant pour la description physique des côtes que pour l'évaluation de leur état environnemental et l'évaluation de la vulnérabilité des enjeux exposés aux aléas érosion côtière et submersion marine (tableau 2). L'échelle d'observation et la disponibilité des données jouent toutefois un rôle déterminant quant au choix des variables retenues par les auteurs. Les études à petites échelles auront souvent tendance à réaliser des synthèses d'indicateurs généraux - ex. lithologie, exposition et pente de la côte, marnage, hauteur des vagues, élévation du niveau marin, population - (Tahri *et al.*, 2017 ; Martínez-Grana *et al.*, 2016 ; Granja *et al.*, 2014 ; Mani Murali *et al.*, 2013), tandis que les études à grande échelle privilégieront davantage des indicateurs décrivant finement l'état et/ou la dynamique locale des systèmes étudiés - ex. largeur, altitude et volume de plage ou de dune, typologie du bâti, végétation dunaire - (Créach *et al.*, 2015 ; Debaine et Robin (2012) ; Bernatchez *et al.*, 2011 ; Barone *et al.*, 2009).

Comme le soulignent Bio *et al.* (2015), la non-sélection de paramètres généraux pour l'étude de la sensibilité des plages à grande échelle est liée au fait que ceux-ci présentent des valeurs uniformes le long de la bande côtière étudiée, ce qui n'apporte donc pas d'informations supplémentaires pour l'évaluation du risque.

¹ 25 paramètres supplémentaires sont identifiés pour caractériser la stabilité/instabilité des falaises et cordons dunaires face au phénomène d'érosion du trait de côte.

Nom de l'indicateur	Critère de mesure	Usage [Source]
Indicateurs environnementaux		
Brèche	Longueur de la brèche	Capacité de protection des édifices naturels contre la submersion [18]
Contact plage-dune	Typologie selon le degré de développement de l'avant-dune ou la présence d'une falaise	Dynamique sédimentaire [10] [17] ; sensibilité à l'érosion [20]
Zone basse	Surface terrestre située sous une cote de référence	Risque de submersion [12] [17]
Résurgences de la nappe	Modélisation de l'altitude de la surface de la nappe dans le massif dunaire	Cohésion des sédiments sur la plage [19]
Pente de la falaise dunaire	Pente moyenne maximum à partir du pied de dune	[11] [20]
Budget sédimentaire	Cubature de MNTs / calcul le long d'un profil	[6] [12]
Lithologie de la côte	Classification selon la nature des roches ou la cohésion des sédiments	Résistance contre l'érosion marine [5]
Pente de la côte	Ratio d'altitude entre 2 points (profil) ou pente calculée à partir d'une surface raster	Inondation par submersion des terres basses [3] [5] [6] [11]
Altitude de la côte	Altitude moyenne de la côte au-dessus du niveau moyen de la mer	Côtes basses potentiellement inondables [3] [5] [6] [11] [16]
Élévation du niveau marin	Tendance en mm/an de variation du niveau de la mer	Submersion marine [3] [6] Redistribution des sédiments [4] ; Vulnérabilité des zones côtières [3] [4]
Hauteur des vagues	Hauteur significative moyenne des vagues les plus hautes	Exposition à l'érosion et aux inondations [3] [4] [5] [6]
Marnage	Amplitude de la marée	Courants de marée et transport de sédiments [3] [6]
Type de côte	Typologie selon la géomorphologie de la côte	Résistance / sensibilité de la côte face à l'élévation du niveau marin [3] [4] [5] [16]
Ratio dune blanche / dune grise	Ratio en pourcentage des surfaces extraites par télédétection	Capacité de la dune à faire face à l'érosion [2]
Couvert végétal de la dune	Calcul du NDVI moyen / numérisation	Érosion éolienne, évolution des formes [2] ; sensibilité à l'érosion [6] [11] [17]
Forme de la dune	Mesure de l'entropie (homogénéité / hétérogénéité de la topographie)	Érosion éolienne, évolution des formes [2]

Nom de l'indicateur	Critère de mesure	Usage [Source]
Cuvettes de déflation (caoudeyre)	Entités morphométriques (pits) sans végétation / évolution	Érosion éolienne [2] [9] [10]
Cuvettes de déflation	Entités morphométriques (pits) avec altitude basse	Capacité à faire face à la submersion marine [2]
Crêtes et sommets de dune	Entités morphométriques (ridge, peaks)	Capacité de la dune à faire face à l'érosion et la submersion [2]
Surface de plage	Emprise de la plage entre l'isobathe -1 m et le pied de dune	Exposition du bâti [6]
Orientation de la côte	Orientation de la côte par rapport à la direction des houles dominantes	Exposition à l'action des vagues [8]
Largeur de l'arrière-dune	Surface dunaire située en retrait du cordon de 1 ^{ère} ligne	Zone tampon lors des tempêtes [11]
Centroïde de la dune	Centroïde du cordon de 1 ^{ère} ligne au-dessus d'une cote de référence	Défaillance de la dune [13]
Squelette de plage	Médiane de la forme de plage située entre l'ados de plage et la ligne d'humectation d'estran	Évolution des plages [14]
Espace d'accommodation	Distance entre la limite interne du cordon de 1 ^{ère} ligne et un obstacle artificiel	Capacité de mouvement (de recul) de la dune et du cordon [17]
Indicateurs sociétaux		
Hauteur d'eau potentielle	Hauteur d'eau à l'intérieur des logements	Exposition des constructions à la submersion marine [1]
Proximité des logements aux ouvrages de protection	Distance entre les logements et les ouvrages de défense contre la mer	Exposition à la submersion marine [1]
Architecture des logements	Type architectural des logements	Mise en danger des occupants face à une submersion marine [1]
Proximité à une zone refuge	Distance entre les logements et une zone refuge	Mise en danger des occupants face à une submersion marine [1]
Urbanisation	Présence d'urbanisation dans une bande côtière définie	Vulnérabilité sociétale [2] [6] [16] [17]
Distance trait de côte / urbanisation	Distance euclidienne mesurée entre l'emprise du bâti et la position d'un trait de côte récent	Vulnérabilité sociétale [2] [4]
Distance trait de côte / réseau routier	Intersection entre les éléments du réseau et des buffers de 2 km, 1km, 500m et 250 m à partir du trait de côte.	Vulnérabilité sociétale [3]
Défenses côtières longitudinales	Linéaire total protégé par des défenses dures et souples	Mitigation de l'érosion côtière [2] [16]

Nom de l'indicateur	Critère de mesure	Usage [Source]
Défenses côtières transversales	Nombre d'épis	Mitigation de l'érosion côtière [2] [11] [16]
Population	Nombre de résidents / densité de population par km ²	Exposition des enjeux humains [3] [7] [16]
Valeur marchande du bâti	Estimation de la valeur des biens (prix au m ²)	Vulnérabilité des enjeux [15]

Tableau 2 : Liste non-exhaustive d'indicateurs environnementaux et sociétaux pour l'évaluation des risques côtiers. Sources : [1] Créach et al. (2015) ; [2] Debaine et Robin (2012) ; [3] Mani Murali et al. (2013) ; [4] Tahri et al. (2017) ; [5] Martínez-Grana et al. (2016) ; [6] Granja et al. (2014) ; [7] Satta et al. (2016) ; [8] Ciccarelli et al. (2017) ; [9] Bate et al. (1996) ; [10] Hesp (2002) ; [11] Barone et al. (2009) ; [12] Bernatchez et al. (2011) ; [13] Judge et al. (2003) ; [14] Robin (1990) ; [15] Le Berre et al. (2014) ; [16] Martinelli et al. (2010) ; [17] ONF (2014) ; [18] Roche et al. (2015) ; [19] Le Guern et al. (2013) ; [20] Debaine (2012).

Face à une utilisation très répandue des indicateurs en morphodynamique côtière, Carapuço *et al.* (2016) établissent le constat d'une dérive dans la définition et la dénomination des géoindicateurs. Les auteurs proposent un cadre commun pour standardiser les géoindicateurs communément rencontrés dans la bibliographie (voir tableau 3). Cette initiative constitue un socle indispensable pour la définition et l'harmonisation des géoindicateurs de la morphodynamique des systèmes plage-dune. Cette liste pourrait cependant être complétée en y intégrant notamment (i) la limite de végétation qui est un marqueur de position du trait de côte souvent utilisé le long des côtes macrotidales (Boak et Turner, 2005) et (ii) des indicateurs de dynamique éolienne (ex. cuvette de déflation, volume érodé, taux de recouvrement végétal). En effet la déflation et la migration dunaire sont des aléas naturels affectant les cordons dunaires au même titre que l'érosion côtière et la submersion marine (Debaine et Robin, 2012).

Nom du géoindicateur	Marqueurs	Usage [Source]
Pour environnements sableux en général		
Position du trait de côte (<i>shoreline</i>)	Interface physique terre-mer (crête de berme, ligne des plus hautes eaux, niveau moyen des hautes mers)	Érosion côtière, dynamique sédimentaire, niveau marin, problématiques liées au climat [10] ; préservation et protection de ressources naturelles [11] ; tendance d'évolution des plages [12] ; érosion des plages [13] ; morphodynamique côtière [14]
Évolution du trait de côte	Évolution de la position du trait de côte dans le temps	Évaluation et gestion des risques [2] [9] [12] [15] ; protection des côtes [16] ; submersion marine et érosion côtière [17] ; développement de pratiques environnementales durables [18]

Nom du géoindicateur	Marqueurs	Usage [Source]
Position de la ligne de côte (<i>coastline</i>)	Limite supérieure du haut de plage (pied de dune, de falaise ou de structure)	Niveau de protection [1] [6] ; perception de sécurité [1] [6] ; maintien durable de la sécurité [19] ; entretien durable des dunes [19]
Évolution de la ligne de côte	Évolution de la position de la ligne de côte dans le temps	Évaluation et gestion des risques [2] [14] [20]
Taille des sédiments	Taille médiane des grains	Type de sable [12]
Composition des sédiments	Composition dominante	Type de sable [12]
Pour les plages		
Altitude de la plage	Altitude moyenne mesurée entre le trait de côte et la ligne de côte	Évaluation et gestion des risques [2] [14]
Volume de la plage	Volume (en m ³ /l) mesuré au-dessus du niveau moyen de la mer jusqu'à la ligne de côte	Résilience des plages [12]
Largeur de la plage	Distance entre le trait de côte et la ligne de côte	Niveau de protection [1] [6] ; Capacité de transport des plages [12]
Pente de la plage	Pente entre la position du trait de côte et la ligne du niveau moyen de la mer	Submersion et érosion côtière [1] [6] ; Risque de baignade [11]
Pour les formations dunaires		
Altitude de la dune	Altitude maximum de la crête de dune de 1 ^{ère} ligne par rapport au niveau moyen de la mer	Niveau de protection [1] [6]
Volume de la dune	Volume (en m ³ /l) au-dessus de la cote du pied de dune	Stock de sable
Largeur de la dune	Distance entre les limites interne et externe de la formation dunaire	Niveau de protection

Tableau 3 : Proposition de géoindicateurs communs pour les environnements côtiers sableux, extraits à partir de profils perpendiculaires à l'orientation de la côte (d'après Carapuço et al. 2016, modifié). Sources : [1] Sutherland (2010) ; [2] Bush et al. (1999) ; [3] NPS (2005) ; [4] van Rijn (2010) ; [5] van Koningsveld et al. (2005) ; [6] Marchand (2010) ; [7] van Koningsveld (2003) ; [8] UAB-GIM (2002) ; [9] Reis and Gama (2010) ; [10] Berger (1996) ; [11] Stevens et al. (2005) ; [12] Carapuço et al. (2013) ; [13] Ruggiero et al. (2013) ; [14] Carapuço (2015) ; [15] Bush et Young (2009) ; [16] Martí et al. (2007) ; [17] Bernatchez et al. (2011) ; [18] Sustain (2012) ; [19] Giardino et al. (2014) ; [20] Santoro et al. (2014) ; [21] NRC (1990).

2.1.3 Raisonnement spatial pour la construction d'indicateurs

Construits à partir de questions thématiques initiales, et dans un objectif final de réponse à ces questions (ex. le trait de côte recule-t-il et à quelle vitesse ? quelle est la capacité de la dune à protéger face à une submersion marine ?), les indicateurs apportent un éclairage simple pour améliorer

la compréhension des paysages côtiers. La réponse à la question posée dépend en partie de la mise en place d'un raisonnement spatialisé duquel dépend la sélection des indicateurs. Des clefs de lecture conduisant à la mise en place d'un raisonnement spatialisé sont présentées ci-dessous, suivant une vision structurelle de l'espace et de la thématique étudiés.

Les indicateurs décrivent des éléments précis d'un système qu'il convient, au préalable, de décomposer, de décortiquer. Ainsi, d'une manière générale, le paysage d'un système plage-dune peut être partitionné (i) en une distinction entre espaces « naturels » et espaces urbanisés (interface nature-société) et (ii) en une succession d'étages (interface terre-mer). Chacune de ces entités peut être décrite par des indicateurs ou par des associations d'indicateurs, ces dernières impliquant une agrégation des indicateurs entre eux.

Il convient de sélectionner dans un premier temps les entités paysagères impliquées par l'entrée thématique (ex. aléa érosion côtière, aléa submersion marine). Par exemple, l'étude de la morphodynamique d'une plage portera essentiellement sur les étages compris entre l'avant-plage et le cordon de 1^{ère} ligne. L'étude de la capacité de protection dunaire face à la submersion marine nécessitera d'intégrer les étages compris dans l'arrière-dune, ainsi qu'une dimension anthropique à travers la présence d'éventuels enjeux situés en zone basse.

Dans un second temps, il convient d'interroger, sur un plan thématique, les étages littoraux retenus afin d'en dégager des indicateurs. Suivant l'exemple de l'étude de la capacité de protection dunaire face à l'aléa submersion marine, le cordon de 1^{ère} ligne joue un rôle majeur en tant que premier rempart face à une élévation du niveau marin. Suivant ce constat, la sélection des indicateurs devrait permettre de répondre à la question suivante « Quelles caractéristiques permettent d'évaluer la robustesse d'un cordon de 1^{ère} ligne ? ». Suivant les enseignements de la bibliographie, les indicateurs retenus pourrait être la largeur, le volume, la hauteur et le taux de couverture végétale du cordon de 1^{ère} ligne ou encore la présence de caudeyres. Concernant l'arrière-dune, il ne peut y avoir submersion que s'il y a des zones dont l'altitude est inférieure à la cote de l'aléa de référence. La présence de zones basses peut être un indicateur, au même titre que la présence d'un cordon de 2^{ème} ligne dans la mesure où celui-ci peut limiter la propagation de la submersion vers l'intérieur des terres.

A terme, la synthèse des indicateurs et leur mise en relation doit (i) répondre à des critères de sélection avant tout portés par le ou les questionnements initiaux et (ii) permettre de décrire et transmettre des clefs de compréhension quant à l'état et/ou la dynamique d'un système.

2.2 Exploitation des indicateurs pour l'évaluation des risques

Les méthodes présentées dans cette section sont issues et adaptées de la typologie proposée par Robin (2002). Deux approches sont évoquées ici en fonction du degré de complexité technique. Sont distinguées (i) l'approche simple reposant sur l'analyse d'un ou plusieurs indicateurs et (ii) l'approche basée sur plusieurs indicateurs dont la combinaison conduit à la création d'un indice synthétique du risque. L'approche décisionnelle multicritère n'est pas abordée ici.

2.2.1 Approche fondée sur un ou plusieurs indicateurs simples

Cette première approche est largement répandue dans la littérature. Elle consiste à analyser l'évolution spatiale et/ou temporelle d'un ou plusieurs paramètres distincts, sans combinaison lorsque plusieurs indicateurs sont mobilisés. Deux exemples sont présentés ci-dessous pour illustrer cette approche.

Le premier exemple, le plus courant probablement en raison de sa simplicité d'exécution, est la réalisation d'une cinématique du trait de côte (Montreuil et Bullard, 2012 ; Ozturk et Sesli, 2015 ;

Moussaid *et al.*, 2015 ; Burningham et French, 2017). Cette approche consiste à quantifier la mobilité spatiale et temporelle d'un indicateur définissant la position du trait de côte (ou ligne de côte selon le choix de l'indicateur, voir tableau 3) à un instant donné. La mesure de la distance ou de la surface entre au minimum deux traits de côte transmet une information quantitative sur la dynamique d'une côte et permet de caractériser l'aléa érosion côtière (érosion, stabilité, accrétion). Un seul indicateur est mobilisé dans ce cas.

Le deuxième exemple, également courant, mais nécessitant toutefois davantage de traitements, consiste à extraire d'un ou plusieurs jeux de données modélisant l'élévation de la côte (ex. Modèle Numérique de Terrain - MNT) un ensemble d'indicateurs (ex. pied de dune, crête de dune, pente de plage, volume) souvent à partir de transects perpendiculaires à l'orientation de la côte (Saye *et al.*, 2005 ; Brodie et Spore, 2015 ; Pye et Blott, 2016). Pris un à un, les indicateurs décrivent l'état (description statique) ou la dynamique (description spatiale et temporelle) d'un ou plusieurs étages du système plage-dune (ex. avant-plage, estran, haut de plage, contact plage-dune). L'interprétation transversale des résultats met en lumière l'état ou la dynamique du système et apporte un socle de connaissance permettant d'améliorer la compréhension du fonctionnement de ce système.

Dans ce deuxième exemple, plusieurs indicateurs sont mobilisés sans pour autant être combinés

2.2.2 Approche fondée sur la combinaison de plusieurs indicateurs

2.2.2.1 Principe de création d'un indice synthétique

Selon Robin (2002), la combinaison de plusieurs critères forme un indice synthétique permettant une évaluation. Cette approche repose sur l'union ou l'intersection de critères. La combinaison au sein d'un objet (ex. polygone bâti) ou d'une unité d'observation (ex. maille), entre la coïncidence spatiale et l'intensité de plusieurs critères, permet de calculer une valeur d'indice caractérisant chaque objet ou unité d'observation. Cette approche nécessite de définir au préalable un questionnaire duquel découlera un raisonnement spatialisé et une sélection d'indicateurs adaptés (voir section 2.1.3). La structuration de l'indice peut être décrite comme une agrégation hiérarchique (Nguyen *et al.*, 2016) comprenant parfois différents niveaux (sous-indices) établis à partir d'indicateurs pondérés ou non.

Enfin, l'exploitation de plusieurs indicateurs nécessite souvent de mobiliser des jeux de données variés. La sélection des jeux de données appropriés est une étape importante dans le processus de création de l'indice. Les données utilisées doivent préférentiellement répondre aux critères annoncés dans la section 1.4.1 du chapitre 1.

2.2.2.2 Exemples d'indices

L'utilisation d'indices pour l'évaluation des aléas et de la vulnérabilité est largement répandue dans la littérature. Rangel-Buitrago et Anfuso (2015) proposent une revue des méthodes d'évaluation des risques côtiers à travers une sélection de 53 articles issus de la littérature scientifique internationale. Nguyen *et al.* (2016) ont réalisé une synthèse des concepts et approches méthodologiques des indices de vulnérabilités. La revue de plus de 50 références a notamment permis aux auteurs de discerner trois types d'approches méthodologiques : (i) l'approche participative (ii) l'approche basée sur des modèles de simulation et (iii) l'approche basée sur des indicateurs. Le tableau 4 présente divers exemples d'indices basés sur l'exploitation d'indicateurs.

Un des indices les plus couramment utilisé (et souvent adapté) est le CVI (*Coastal Vulnerability Index*) créé par Gornitz (1991). L'indice est fondé sur l'exploitation de sept indicateurs (voir tableau 4). Chacun d'eux est codé en cinq niveaux ordinaux, de la valeur 1 (intensité très faible) à la

valeur 5 (très forte intensité sous-tendant une vulnérabilité élevée). Ainsi, le code 1 est représenté par des altitudes du relief $> 30,1$ m, des roches plutoniques, des côtes rocheuses, une variation du niveau moyen de la mer $< -1,1$ mm/a, une tendance d'évolution du trait de côte $> 2,1$ m/a (soit une accrétion), un marnage $< 0,99$ m (côte microtidale) et des hauteurs de vagues maximum comprises entre 0 et 2,9 m. A l'opposé, le code 5 représente des reliefs bas (altitudes < 5 m), des sédiments fins non consolidés, des cordons dunaires et plages de sable, une variation du niveau moyen de la mer $> 4,1$ mm/a, une tendance d'évolution du trait de côte < -2 m/a (soit une érosion), un marnage $> 6,1$ m (côte macrotidale) et des hauteurs de vagues maximum > 7 m.

L'indice, calculé au sein d'unités spatiales (ici des mailles carrées), correspond à la racine carrée de la moyenne géométrique des indicateurs codés.

Cette méthode d'agrégation a été réutilisée et adaptée dans diverses études (voir tableau 4). C'est notamment le cas des travaux de Boruff, Emrich, et Cutter (2005), où le CVI, agrégé au CsoVI (*Coastal Social Vulnerability Index*), est une composante du PVI (*Place Vulnerability Index*). Abuodha et Woodroffe (2010) ont développé le CSI (*Coastal Sensitivity Index*) qui est une inspiration du CVI. Plus récemment, l'AVI (*Algarve Vulnerability Index*) proposé par Martínez-Grana *et al.* (2016) s'inscrit également dans la lignée des indices de type CVI, intégrant une variable bathymétrie et une variable distance à la côte en complément des variables proposées par Gornitz (1991).

Un autre exemple d'indice est celui proposé par Debaine et Robin (2012). Les auteurs proposent une démarche géomatique pour l'évaluation cartographique du service protection contre les aléas météo-marins (composé des volets érosion marine, submersion marine et déflation éolienne). Chaque volet est caractérisé par un ensemble d'indicateurs quantitatifs. Les variables sont combinées entre elles au sein d'unités d'observation afin d'évaluer le niveau de protection de la dune. Pour cela, les auteurs définissent le niveau de service minimum et classent en quatre niveaux les boîtes (algorithme *K-means*) en fonction de la distance à ce service minimum. A terme, chaque boîte est caractérisée par un niveau de protection, lequel est combiné à deux variables « enjeux » ce qui permet d'identifier et de localiser précisément les secteurs à risque. Quatre niveaux de risques sont identifiés par le produit entre la somme des niveaux de protection et le niveau d'enjeux.

Plus récemment, Granja, Pinho et Mendes (2014) ont développé l'ERI (*Erosion Risk Index*). Les indicateurs retenus par les auteurs sont agrégés en deux volets, l'EI (*Exposure Index*) et le VI (*Coastal Vulnerability Index*). Les indicateurs sont codés suivant une discrétisation en cinq niveaux (méthode des effectifs égaux). Les sous-indices sont calculés en sommant les valeurs codées des indicateurs (pondérés pour l'EI, pas pour le VI). L'indice final de risque, moyenne des deux sous-indices, est discrétisé en trois niveaux d'effectifs égaux.

Le dernier exemple présenté ici est le MDVI (*Mediterranean Dune Vulnerability Index*) proposé par Ciccarelli *et al.* (2017). Cet indice est composé de cinq volets décrivant la condition géomorphologique de la dune (GCD), l'influence marine (MI), la dynamique éolienne (AE), l'état de la végétation (VC) et l'impact anthropique (HE). Au total, 51 indicateurs sont mobilisés dans la création de l'indice. Les indicateurs sont codés en cinq niveaux suivant la même méthode que celle appliquée pour le CVI. La combinaison des indicateurs pour chaque volet est calculée en réalisant la somme des codes des indicateurs, divisée par la somme des codes maximaux des indicateurs (donc $5*n$ indicateurs). Les résultats, exprimés en pourcentage, sont moyennés sans pondération pour obtenir l'indice final (MDVI).

Nom de l'indice [source]	Indicateurs	Création de l'indice	Lieux
<i>Coastal Vulnerability Index</i> (CVI) [Gornitz, 1991]	Relief (altitude), type de roche, type de côte, variation du niveau marin, évolution du trait de côte, marnage, hauteur de vague	Indicateurs : codés en cinq niveaux selon seuils ou type définis par l'auteur ; Agrégation : racine carrée du produit des indicateurs codés divisé par le nombre total d'indicateurs utilisés ; CVI : discrétisé en quatre classes (intervalles égaux).	États-Unis, Canada, Mexique
<i>Place Vulnerability Index</i> (PVI), fonction de : CVI <i>Coastal Social vulnerability index</i> (CSoVI) [Boruff, Emrich, et Cutter, 2005]	Composé de 39 indicateurs (voir source)	Indicateurs et agrégation : similaire à la méthode du CVI ; PVI : somme de CVI et CSoVI puis discrétisation en trois classes (écart-type à la moyenne).	États-Unis
<i>Coastal sensitivity index</i> (CSI) [Abuodha et Woodroffe, 2010]	Type de roche, pente de la côte, géomorphologie, type de formation dunaire, exposition du trait de côte, évolution du trait de côte, élévation du niveau marin, hauteur moyenne des vagues, marnage moyen	Indicateurs : codés en cinq niveaux selon seuils ou type définis par l'auteur ; Agrégation : racine carrée du produit des indicateurs codés divisé par le nombre total d'indicateurs utilisés ; CSI : discrétisé en quatre classes (quartiles).	Australie
Service de Protection Globale, fonction de : Service Érosion Service Déflation Service Submersion Enjeux [Debaine et Robin, 2012]	Altitude de la dune, volume au-dessus du niveau moyen de la mer, largeur de dune, ratio dune blanche/dune grise, forme de la dune, entités morphométriques, couverture de la végétation dunaire, urbanisation, défenses côtières, évolution du trait de côte, distance trait de côte-urbanisation	Indicateurs : pas d'encodage ; Agrégation : classification en quatre classes (méthode des K-means) par service ; Indice de protection : somme des trois niveaux de services puis produit de cette somme avec le niveau d'enjeux, discrétisé en quatre classes.	France

Nom de l'indice [source]	Indicateurs	Création de l'indice	Lieux
<p><i>Erosion Risk Index</i> (ERI), fonction de :</p> <p><i>Exposure Index</i> (EI)</p> <p><i>Coastal Vulnerability Index</i> (VI)</p> <p>[Granja, Pinho et Mendes, 2014]</p>	<p>Largeur de plage, bâti, altitude de la côte, pente de plage, largeur de section, budget sédimentaire, climat de houle et couverture végétale.</p>	<p>Indicateurs : codés en cinq niveaux (20^e, 40^e, 60^e et 80^e centiles) ;</p> <p>Agrégation : somme de la valeur des indicateurs codés (pondérés pour EI, pas pour VI) ;</p> <p>ERI : moyenne de EI et VI puis discrétisation en trois classes (33^e et 66^e centiles).</p>	<p>Portugal</p>
<p><i>Coastal risk index at local scale</i> (CRI-LS), fonction de :</p> <p><i>Coastal Hazards</i> (CH)</p> <p><i>Coastal Vulnerability</i> (CV)</p> <p><i>Coastal Exposure</i> (CE)</p> <p>[Satta <i>et al.</i>, 2016]</p>	<p>Élévation du niveau marin, tempêtes, précipitation, sécheresse, population, tourisme, type de côte, pente, rugosité, évolution du trait de côte, altitude, distance au trait de côte, aménagements fluviaux, état de l'écosystème, éducation, âge de la population, protection côtière, occupation du sol, densité de population.</p>	<p>Indicateurs : codés en cinq niveaux selon seuils ou type définis par l'auteur ;</p> <p>Agrégation : somme de la valeur des indicateurs codés avec pondération, moins un divisé par quatre, pour chaque sous-indice ;</p> <p>CRI-LS : produits des trois sous-indices puis discrétisation en cinq classes (intervalles égaux).</p>	<p>Maroc</p>
<p><i>Algarve Vulnerability Index</i> (AVI)</p> <p><i>Flood Hazard Index</i> (FHI)</p> <p>[Martínez-Grana <i>et al.</i>, 2016]</p>	<p>Lithologie, géomorphologie, pente, hauteur, distance, bathymétrie, évolution du trait de côte, hauteur de vague, élévation du niveau marin, marnage extrême (selon divers scénarios de hauteur de vague, d'élévation du niveau marin et de marnage extrême)</p>	<p>Indicateurs : codés en cinq niveaux selon seuils ou type définis par l'auteur ;</p> <p>AVI : racine carrée du produit des indicateurs codés divisé par le nombre total d'indicateurs utilisés</p> <p>FHI : produit des indicateurs classés selon divers scénarios</p>	<p>Espagne</p>

Nom de l'indice [source]	Indicateurs	Création de l'indice	Lieux
<i>Mediterranean Dune Vulnerability Index</i> (MDVI), fonction de : <i>Geomorphological Conditions of the Dune systems</i> (GCD) <i>Marine Influence</i> (MI) <i>Aeolian Effect</i> (AE) <i>Vegetation Condition</i> (VC) <i>Human Effect</i> (HE) [Ciccarelli <i>et al.</i> , 2017]	Composé de 51 indicateurs (voir source)	Indicateurs : codés en cinq niveaux selon seuils ou type définis par l'auteur ; Agrégation : somme de la valeur des indicateurs codés, divisée par la somme des codes maximaux des indicateurs, pour chaque sous-indice ; MDVI : moyenne sans pondération des sous-indices	Italie

Tableau 4 : Inventaire non exhaustif d'indices composites.

2.2.2.3 Méthodes de création d'indice

La lecture des revues bibliographiques et la consultation de nombreuses études basées sur la création d'indices de vulnérabilité et de risque montrent qu'il n'existe pas de méthode commune pour l'élaboration des indices, qu'il s'agisse tant de la sélection des indicateurs que de la méthode appliquée pour la création même d'un indice. Néanmoins, la construction des indices répond souvent à une structure méthodologique articulée en plusieurs étapes. Il convient de préciser que pour chacune d'entre elles, les méthodes peuvent varier selon les auteurs (voir tableau 4). Les étapes identifiées ici sont :

1- l'encodage préalable des indicateurs en n niveaux (généralement cinq). Cette étape, relativement courante dans la bibliographie, est appliquée dans les méthodes proposées par Gornitz (1991), Boruff, Emrich, et Cutter, (2005), Abuodha et Woodroffe (2010), Granja, Pinho et Mendes (2014), Satta *et al.* (2016), Martínez-Grana *et al.* (2016) et Ciccarelli *et al.* (2017). Debaine et Robin (2012) s'abstiennent de l'encodage et combinent les variables à partir de leur valeur brute. La difficulté de l'encodage réside dans la définition des seuils. Ceux-ci varient d'un auteur à l'autre pour une même variable. Nguyen *et al.* (2016) soulignent le fait que les classes de valeurs attribuées aux indicateurs sont souvent inappropriées au regard de l'aptitude des variables à répondre à la problématique posée. Il n'existe donc pas de consensus sur ce point. L'idée principale retenue ici est que la détermination des seuils repose sur une définition subjective de ce qui est « très faible » ou « très fort ».

2- la pondération des indicateurs. Cette étape permet de nuancer la part de chacune des variables mobilisées dans un diagnostic. Elle introduit une part de subjectivité et dépend des compétences voire des intérêts de celui qui estime les facteurs de pondération (Caloz et Collet, 2011). Parmi les travaux consultés dans la bibliographie, certaines études définissent et appliquent des coefficients de pondérations aux variables tandis que d'autres s'en affranchissent. Cette étape semble être facultative dans le processus de création des indices. Ainsi les travaux de Gornitz (1991), Boruff, Emrich, et Cutter, (2005), Abuodha et Woodroffe (2010), Debaine et Robin (2012), Martínez-Grana *et al.* (2016) et Ciccarelli *et al.* (2017) mentionnés dans le tableau 4 combinent les indicateurs sans pondération. Granja, Pinho et Mendes (2014) appliquent une pondération pour le calcul de l'indice

d'exposition dans la mesure où les auteurs assument que celui-ci revêt une plus grande importance le long des secteurs urbanisés. En revanche, l'indice de sensibilité est calculé sans pondération. Enfin, Satta *et al.* (2016) appliquent un coefficient de pondération pour chaque indicateur mobilisé. Les coefficients sont définis dans le cadre de discussions menées avec un panel de 10 experts. Tout comme pour l'étape d'encodage, (i) il n'existe pas de consensus sur la nécessité de pondérer les indicateurs et (ii) la détermination des coefficients repose une définition subjective de ce qui tient un rôle « peu important » ou « très important ».

3- la combinaison des indicateurs pondérés ou non. La formule proposée par Gornitz (1991) est fréquemment utilisée dans la littérature (Boruff, Emrich, et Cutter, 2005 ; Abuodha et Woodroffe, 2010 ; Martínez-Grana *et al.*, 2016). Toutefois, des méthodes alternatives sont proposées par certains auteurs. Debaine et Robin (2012) utilisent l'algorithme des *K-means* pour établir des classes à partir d'un niveau de service rendu minimum. Granja, Pinho et Mendes (2014) et Satta *et al.* (2016) font une simple somme des indicateurs codés pour créer les sous-indices. Le calcul de l'indice global est, respectivement selon les auteurs, la moyenne des sous-indices et le produit des sous-indices. Enfin, Ciccarelli *et al.* (2017) combinent les indicateurs en divisant la somme des indicateurs codés par la somme des codes maximaux des indicateurs ($5*n$ indicateurs). L'indice final est la moyenne des sous-indices. Les méthodes citées proposent (i) divers niveaux hiérarchiques d'agrégation (indicateurs vers indice global ; indicateurs vers sous-indices vers indice global) et (ii) diverses méthode de calcul des sous-indices et indices. Ce constat laisse donc apparaître une diversité dans les possibilités d'agrégation.

4- la discrétisation de l'indice en n niveaux. Cette étape de simplification des résultats par le regroupement des valeurs d'indice à l'intérieur de classes (ou niveaux) permet de restituer les résultats sous la forme de cartes ou de tableaux synthétiques. Selon les auteurs, la méthode de discrétisation et le nombre de classes varient, l'information n'est pas restituée de la même façon. Boruff, Emrich, et Cutter (2005) et Granja, Pinho et Mendes (2014) discrétisent les valeurs d'indice en trois classes, utilisant respectivement la méthode de l'écart-type à la moyenne et la méthode des effectifs égaux (33^e et 66^e centiles). Gornitz (1991), Abuodha et Woodroffe (2010) et Debaine et Robin (2012) restituent des indices discrétisés en quatre classes suivant trois méthodes différentes, respectivement, en intervalles égaux, en effectifs égaux (quartiles) et manuelle. Enfin, Satta *et al.* (2016) discrétisent leurs résultats en cinq classes (intervalles égaux). Ainsi, chacune des études inventoriée dans le tableau 4 présente une méthode de discrétisation différente. Il ne semble pas exister de consensus sur ce point.

3. Les méthodes de segmentation pour la réalisation de synthèses spatiales

Les indicateurs sont spatialement représentés sous la forme de point, de ligne, de polygone voire de grille de pixels. Leur exploitation (simple ou en indice) est généralement menée à l'aide d'unités spatiales.

La segmentation est l'action de décomposer en portions régulières ou irrégulières un espace observé. Les portions sont appelées des unités spatiales, ou unités d'observation. Elles sont le support géométrique élémentaire de l'information géographique. D'une manière générale, une unité spatiale désigne toute maille (ex. éléments d'un carroyage) ou objet localisé (ex. bâti, cellule sédimentaire) auquel sont associées des informations spatiales en vue d'une analyse. Différentes méthodes de segmentation existent, de l'unité « zone » à l'unité « objet ». Les plus couramment rencontrées dans la littérature (approches dites « classiques », voir section 3.1) sont l'approche par maille (ou carroyage), l'approche par transect et l'approche par région. Depuis une décennie environ, une mé-

thode novatrice (approche par boîte, voir section 3.2) tend à émerger dans le paysage de l'analyse des dynamiques et des risques côtiers. Une revue des différentes approches est proposée dans cette partie, ce qui amène ensuite à un exercice de comparaison du potentiel d'application de chaque méthode.

3.1 Synthèse spatiale (i) les approches classiques

Les trois méthodes de segmentation les plus couramment utilisées dans la littérature scientifique pour les études côtières sont l'analyse par carroyage, par transect ou par région.

3.1.1 Unité spatiale régulière : le carroyage (unité « zone »)

Le carroyage est une grille composée d'un ensemble de mailles (ou cellules) régulières (figure 7) formant une partition complète de la zone d'étude (Pumain et Saint Julien, 2010). La création et la distribution des mailles est régulée par les coordonnées géographiques XY de la zone d'étude (le point de départ de création de la grille est défini par Xmin et Ymax), l'emprise géographique de la zone et par la taille des mailles. Elles peuvent être de formes différentes, le plus souvent carrées, hexagonales ou triangulaires.

La taille des mailles peut considérablement varier. Elle dépend de l'échelle d'observation retenue par les auteurs. Par exemple, Robin (2002) propose une analyse du risque à l'île d'Yeu à partir de carreaux de 50 m de côté. Li *et al.* (2016) évaluent la vulnérabilité de l'urbanisation côtière à l'aide de mailles de 200*200 m. Satta *et al.* (2017) évaluent les risques côtiers associés au changement climatique sur les côtes méditerranéennes à l'aide de mailles de 300*300 m. Pian et Menier (2011) utilisent des cellules de 500 m de côté pour réaliser une analyse multivariée de la variation de position du trait de côte en Bretagne sud. Enfin, Pendelton, Williams et Thieler (2004) et Abuodha et Woodroffe (2010) déploient respectivement un CVI et un CSI à l'aide de mailles de 1,5*1,5 km. Dans l'ensemble des cas présentés, les unités spatiales sont spatialement continues et homogènes. Elles sont distribuées indifféremment de la structuration de l'espace étudié.

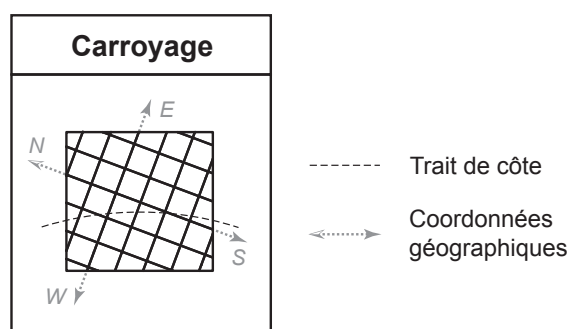


Figure 7 : Segmentation par carroyage

3.1.2 Le transect (ou profil transversal)

Selon Andrews, Gares et Colby (2002), les premières recherches intégrant des mesures le long de cordons dunaires avaient recours à des transects pour suivre l'évolution du profil de dune à travers le temps. Les transects sont des profils transversaux établis perpendiculairement à l'orientation de la côte. Ils permettent d'observer et quantifier des gradients (ex. gradients de pente, de végétation) et/ou des évolutions dans le cadre de séries temporelles. Si leur distribution est aléatoire (comme pour les mailles), la méthode des profils s'apparente à une méthode d'échantillonnage.

La couverture de l'espace étudié est discontinue (figure 8). L'écartement entre les transects permet d'augmenter ou de diminuer la densité de mesures sur un site d'étude. Les transects peuvent être homogènes (longueur unique) ou hétérogènes (longueur variées) selon la définition du ou des critères de délimitation amont (côté terre) et aval (côté mer).

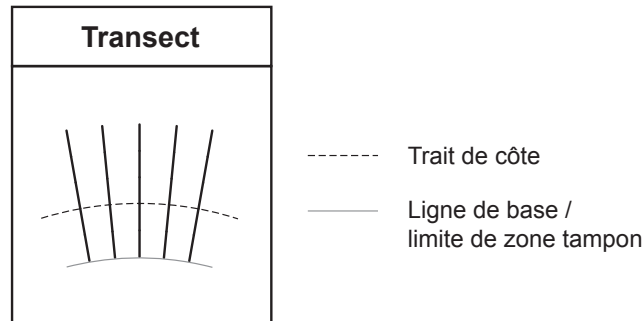


Figure 8 : Segmentation par transect

Ces critères sont donc variables d'un auteur à l'autre. À échelle nationale, l'INEC produit dans le cadre de la SNGITC évalue la mobilité historique du trait de côte tous les 200 m.

Les exemples suivants présentent des études régionales à locales. Saye *et al.* (2005) évaluent la relation entre les tendances d'accrétion-érosion du front dunaire et un ensemble d'indicateurs de la morphologie du système plage-dune à l'aide de données LiDAR. Les auteurs déploient des transects espacés de 250 m le long de cinq sites d'études. Les profils sont délimités à l'aval (bas de profil de plage) par la limite de la couverture du LiDAR, et à l'amont par une distance de 200 m au-delà de la plus haute mer astronomique. L'étendue amont-aval des transects n'est généralement pas précisée dans les études, notamment celles portant sur l'analyse de la mobilité du trait de côte, la longueur des transects n'influant pas sur les résultats de l'étude. Ainsi, Burningham et French (2017) travaillent avec des transects espacés de 100 m répartis sur 74 km de côte. Del Rio, Gracia et Benavente (2013) déploient des transects tous les 50 m sur un linéaire côtier de 150 km. Dolan, Fenster et Holme (1992) précisent en conclusion de leur travail qu'un pas de 50 m fournit une excellente estimation des taux d'évolution du trait de côte entre chaque transect. Enfin, Brodie et Spore (2015) pratiquent une extraction d'entités morphologiques du cordon dunaire de 1^{ère} ligne (crête de dune, pied de dune) à l'aide de transect espacés de 50 cm sur une section de 12 km le long d'une île barrière de la côte est des États-Unis.

Dans l'ensemble des exemples cités, les critères de déploiement des transects varient considérablement (ici d'un espacement de 50 cm à 250 m). Il s'agit d'une méthode d'échantillonnage. L'usage très répandu de cette méthode en domaine côtier tient au fait même de la disposition transversale des transects. Tous les faciès parallèles au trait de côte se trouvent ainsi inscrits dans chaque profil, dont l'orientation respecte rigoureusement la morphologie concave (une baie) ou convexe (un cap) de la côte.

3.1.3 Unité spatiale irrégulière : la région (unité « objet zonal »)

Une unité d'observation est dite irrégulière si elle revêt une justification physique se référant à un objet spatial, ici zonal, dont les limites sont définies dans la réalité (Caloz et Collet, 2011). Ses limites suivent donc un découpage thématique de la zone observée (ex. emprise du bâti, limites administratives, cellules sédimentaires). Dans ce cas, les unités sont considérées comme des régions (figure 9). Leurs contours épousent alors la forme ou la géométrie d'un objet spatial. Les objets reflétant des constructions humaines coïncident souvent avec des formes géométriques simples tandis que les unités établies pour l'analyse de phénomènes naturels prennent des formes quel-

conques (Caloz et Collet, 2011). La taille des régions peut considérablement varier (ex. une plage, une cellule sédimentaire, une façade) selon l'échelle d'observation, le critère de segmentation et la définition des limites terrestres et maritimes dans le cas de régions basées sur des limites naturelles.

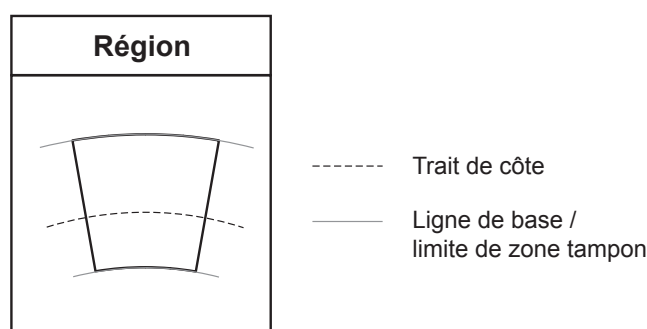


Figure 9 : Segmentation par région

Différents exemples sont présentés suivant un gradient scalaire. À échelle internationale, c'est le cas notamment de la segmentation proposée par Vafeidis *et al.* (2008) pour la mise en place d'une nouvelle base de données mondiale pour l'analyse de l'impact et de la vulnérabilité associée à l'élévation du niveau marin (projet DINAS-COAST). 12 148 segments côtiers continus ont été identifiés suite à une segmentation basée sur la variation longitudinale de critères physiques, écologiques, administratifs et socio-économiques suivant les travaux de McFadden *et al.* (2007). À échelle nationale, le projet de compartimentation du littoral australien (McPherson *et al.*, 2015) repose sur un panel de critères et de dires d'experts. À terme, trois niveaux scalaires de segmentation ont été cartographiés : (i) un niveau « primaire » défini par les grandes formes paysagères (estuaires, cap...) dont la limite terrestre est l'isoligne + 50 m et la limite marine est l'isobathe -130 m ; (ii) un niveau « secondaire » basé sur les déplacements sédimentaires dans les petits fonds, intégrant souvent plusieurs plages, et dont la limite marine correspond à l'isobathe -50 m ; (iii) un niveau « tertiaire » correspondant généralement à échelle de la plage. À échelle locale, Gomez *et al.* (2014) créent 49 unités spatiales de 2 km de long et de 400 m de profondeur (200 m de part et d'autre de la limite de végétation) pour mesurer l'évolution du trait de côte et évaluer la vulnérabilité de la côte d'une partie de l'archipel des Hébrides.

García-Mora *et al.* (2001) divisent en segments homogènes l'ensemble des dunes littorales du sud-ouest de la péninsule ibérique pour étudier leur vulnérabilité. Les critères de segmentation sont basés sur les caractéristiques morpho-sédimentaires, écologiques et anthropiques de chaque système dunaire étudié. De Pippo *et al.* (2008) procède à une compartimentation de la côte pour évaluer les aléas côtiers sur une partie du littoral italien. Les auteurs identifient et différencient des unités géomorphologiques sur la base de critères physiques et anthropiques. Dans le travail de Fattal *et al.* (2010), la segmentation du linéaire côtier de l'Île de Noirmoutier repose sur un critère morphologique. Vingt unités cohérentes sont dégagées selon la nature de la côte observée depuis les petits fonds jusqu'à la section émergée du littoral. Le secteur étudié est ainsi divisé en zones morpho-cardinales dont la profondeur est arbitrairement fixée à 3 km vers l'océan à partir du trait de côte. Enfin, dans une étude menée le long d'une portion du littoral portugais, Granja, Pinho et Mendes (2014) décomposent la bande côtière de la commune de Vila Nova de Gaia en 47 segments selon les trois critères suivants : limites administratives, présence/absence d'urbanisation et type de côte. La profondeur des régions est fixée arbitrairement (au moins 5 km en mer et 1 km à terre).

Dans l'ensemble des cas présentés, les unités spatiales sont spatialement continues et hétérogènes. Elles suivent la morphologie concave ou convexe de la côte. Les critères permettant de discriminer la côte varient d'un auteur à l'autre.

3.2 Synthèse spatiale (ii) l'approche par boîte

Dans la seconde moitié des années 2000 est apparue une nouvelle approche de segmentation des espaces côtiers. L'approche par boîte consiste en un découpage continu et régulier de la côte à l'aide de polygones (appelés boîtes) qui sont des unités spatiales pour une observation fine de processus locaux (figure 10). Chaque boîte est composée de quatre limites : deux transects perpendiculaires au trait de côte et deux limites longitudinales (une côté mer, une côté terre). La taille de ces unités est réglée par deux valeurs constantes, la largeur (équivalente à l'espacement entre les transects) et la profondeur de la boîte.

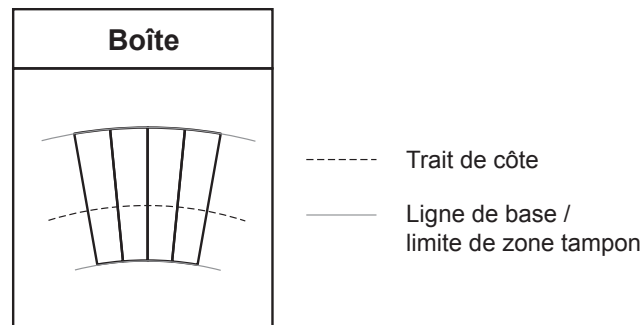


Figure 10 : Segmentation par boîte

Une revue de la littérature a permis de recenser un panel d'études utilisant des boîtes. La première apparition dans le domaine côtier semble être issue des travaux de Young et Ashford (2006, 2007), puis Young *et al.* (2009a, 2009b) sur la thématique de l'érosion des côtes rocheuses en Californie. Ces travaux ont conduit les auteurs à développer un outil SIG (TopCAT) automatisant la création de compartiments (*compartments*) et le calcul de volumes érodés à partir de données LiDAR (Olsen, Young et Ashford, 2012). Au fil de leurs travaux, les auteurs déploient des compartiments de 1 m, 2 m ou 3 m de large afin de couvrir le versant des côtes rocheuses étudiées. Une démonstration est proposée sur une côte sableuse (Cape Hatteras) avec des compartiments de 100 m de large.

Dans le même temps, Barone *et al.* (2009) proposent une méthode pour l'évaluation de la sensibilité dunaire d'une île barrière du New Jersey à l'aide de boîtes (*bins*) de 75 m de large. Depellegrin, Blažauskas et de Groot (2010) s'attèlent à cartographier la sensibilité de la côte lithuanienne en mer Baltique face aux pollutions par hydrocarbures. Les auteurs déploient des cellules côtières (*coastal cells*) de 1 km de large avec l'isobathe -20 m comme limite marine et une zone tampon de 300 m à l'intérieur des terres comme limite continentale. Plus récemment, Debaine (2012) et Debaine et Robin (2012) mettent en place une méthodologie pour l'évaluation cartographiée de l'état des massifs dunaires de l'île de Noirmoutier. La méthode repose notamment sur la segmentation des dunes à partir de boîtes (*boxes*) de 50*500 m. Enfin, Pye et Blott (2016) font usage de secteurs côtiers (*coastal sectors*) pour calculer le volume et l'emprise du cordon de 1^{ère} ligne et l'emprise du haut de plage sur la côte de Sefton (Royaume-Uni). Les auteurs ont transformé une partie des transects utilisés dans leur étude en polygones de 250 m de large, délimités (i) à l'amont par la limite d'action de la dynamique éolienne (ii) à l'aval par différents niveaux marins.

Sur la base des éléments de littérature présentés ci-dessus, il apparaît que, pour une méthode de segmentation commune, chaque auteur ou groupe d'auteur a proposé sa propre dénomination (*compartments*, *bins*, *coastal cells*, *boxes*, *coastal sectors*). Cette diversité de qualificatifs permet d'avancer l'hypothèse qu'il n'existe à ce jour aucune reconnaissance unanime à échelle internationale quant à l'existence de cette méthode de segmentation, seules des initiatives locales ou régionales ayant été

recensées lors des recherches bibliographiques. Par soucis de clarté, le terme de boîte sera retenu ici.

Enfin, dans l'ensemble des cas présentés, les unités spatiales sont spatialement continues et quasi-homogènes (l'emprise des boîtes varie sensiblement dans les secteurs de fortes concavités/convexités de la côte). Les critères permettant de segmenter la côte varient d'un auteur à l'autre. Ces unités spatiales sont perpendiculaires à l'orientation de la côte et respectent donc la morphologie de la côte.

3.3 Comparaison des méthodes de segmentation

Dès lors que les unités spatiales sont créées, la démarche consiste ensuite à intersecter ces unités avec un ensemble de couches d'informations (ou entités) thématiques. Chaque méthode de segmentation permet de répondre à diverses interrogations, ce qui la plupart du temps suffit pour établir un diagnostic. En revanche, il semble qu'aujourd'hui les méthodes classiques présentent des limites quant à leur capacité à répondre à des questions complexes, particulièrement lorsque celles-ci nécessitent l'utilisation de couches d'information issues des différentes primitives géométriques (point, ligne et polygone) et de données raster (grille de pixel). De plus, Debaine et Robin (2012) suggèrent, pour les études de risque, la nécessité d'intégrer la relation spatiale entre les variables à l'intérieur même des unités spatiales. Selon les auteurs, le risque provient de la coïncidence spatiale (ou de l'occurrence) entre les entités thématiques. L'agrégation des variables dans des boîtes est présentée comme une solution.

Dès lors, il semble intéressant de confronter la capacité des différentes méthodes de segmentation identifiées précédemment, à réaliser des synthèses spatiales fines et exhaustives. Les sections suivantes proposent (i) une revue de l'aptitude des différentes unités spatiales à intégrer et agréger les principaux types d'entités utilisées en analyse spatiale et (ii) une réflexion discriminante sur la nécessaire prise en compte de l'échelle d'observation.

3.3.1 Aptitude des méthodes de segmentation

La figure 11 présente sous forme graphique une vision synoptique de la capacité de chaque type d'unité spatiale à (i) intégrer les différentes primitives géométriques et données au format raster et (ii) mettre en relation ces données entre elles. Les primitives identifiées sont les données au format vecteur couramment utilisées en SIG : les points, les lignes et les polygones. Pour illustrer cette démonstration conceptuelle, une interprétation thématique des primitives du point de vue du risque est suggérée comme suit : les points correspondent au relevé des points bas le long d'une crête dunaire (point de rupture d'un cordon) ; les polygones représentent des positions historiques du trait de côte ; les polygones traduisent la présence d'enjeu bâti ; le raster représente le MNT d'un cordon dunaire duquel peut être extrait un volume de sable. Les quatre types d'unités spatiales sont représentés suivant une échelle d'observation commune. Une valeur fictive est appliquée à chaque unité spatiale. Par exemple, le côté d'une maille, l'espacement entre les transects et la largeur des boîtes seront tous égaux à 50 m, la région étant arbitrairement la fusion de quatre boîtes, donc 200 m.

L'intersection géographique entre les unités spatiales et les entités permet d'identifier les unités spatiales dans lesquelles sont intégrés les objets. Dans la figure 11, les unités avec un tracé épais intègrent l'information géographique, celles avec un tracé en pointillé n'intersectent pas les objets (ou les objets ne sont pas intégrés dans les unités). L'intersection entre les points bas de crête

	Carroyage	Transect	Région	Boîte
Unités spatiales (US)	côté = 50 m	écart = 50 m	largeur = 200 m	largeur = 50 m
US intersectent POINT (P) 1D	1	2	3	4
US intersectent LIGNE / POLYLIGNE (L) 2D	5	6	7	8
US intersectent SURFACE / POLYGONE (S) 2D	9	10	11	12
US intersectent RASTER (R) 2D / 3D	13	14	15	16
Agrégation spatiale US ∩ (P+L+S+R)	17	18	19	20

Martin Juigner
© LETG Nantes Géolittomer, UMR 6554 CNRS

distribution aléatoire

distribution transversale et longitudinale

Création des unités spatiales basée sur :

— Ligne de base / limite de zone tampon
↔ Coordonnées géographiques

----- Trait de côte

- Unités spatiales peu appropriées (données partiellement intégrées ou relation entre les données incomplète)
- Unités spatiales appropriées (données pleinement intégrées et/ou relation entre les données complète)

Figure 11 : Aptitude des unités spatiales à intégrer et mettre en relation les entités spatiales.

dunaire et les unités spatiales (cellules 1 à 4 dans la figure 11) révèle que (i) les mailles, la région et les boîtes intègrent correctement les objets point, (ii) un seul transect intersecte un point (les autres points ne sont pas intégrés dans les unités spatiales). L'intégration de la collection de traits de côte (cellules 5 à 8) est effective pour l'ensemble des transects¹, région et boîtes. En revanche, les mailles n'intègrent pas complètement la donnée en ce sens qu'une partie de la collection de traits de côte n'est pas intersectée simultanément par une ou plusieurs mailles ce qui se traduit par une absence de mesure.

De la même manière que pour les points, les mailles, régions et boîtes intègrent complètement les entités de type polygone (cellules 9 à 12), ce que ne permettent pas les transects puisqu'un enjeu bâti n'est pas intégré. A ce stade de la comparaison, seules la région et les boîtes intègrent la totalité des primitives géométriques. La donnée raster, composé d'une grille de pixel, est entièrement intégrée par les unités spatiales zonales (cellules 13, 15 et 16). Les transects ne couvrent qu'une partie des pixels (cellule 14) en ce sens où il s'agit d'une technique d'échantillonnage. Les pixels situés entre chaque transect ne sont pas intégrés. Les transects figurent ici toutefois comme représentant bien les données puisque (i) une densité élevée de transects tend à améliorer l'intégration des données², et (ii) certains indicateurs morphométriques ne peuvent être extraits qu'à partir de profils transversaux (par exemple, le calcul de pente de plage ou de courbure du contact plage-dune à partir de la grille de pixel d'un MNT implique que le degré de pente ou de courbure sera calculé en fonction des pixels environnants et non en fonction de l'azimut du profil réel de la plage que seul un transect permet d'obtenir).

La dernière section du graphique illustre l'aptitude des unités spatiales à agréger l'ensemble de l'information (cellules 17 à 20). D'un côté, les mailles et les transects n'intersectent pas toute les données (cellules 2, 5 et 10), ou les données sont intégrées mais pas dans les mêmes unités spatiales (cellules 1, 5, 9, 13 ; cellules 2, 6, 10, 14). Cela explique l'inaptitude à agréger l'information spatiale dans les mêmes unités. Le résultat principal est que l'agrégation est effective dans un nombre limité d'unités spatiales et que l'analyse des relations spatiales entre les informations est incomplète (cellules 17 et 18). D'un autre côté, la région et les boîtes intersectent l'ensemble des primitives et des pixels. Les relations spatiales entre les différentes informations sont complètes. Ces deux méthodes présentent une alternative bénéfique pour une agrégation complète de jeux de données variés sur un site d'étude (cellules 19 et 20).

L'agrégation au sein des boîtes et de la région permet d'établir si la relation spatiale présente ou non une concomitance entre des entités induisant une situation à risque. Suivant l'interprétation thématique des primitives et du raster proposée au début de la section, la coïncidence spatiale entre un point bas du cordon dunaire, une érosion du trait de côte au droit d'un secteur à faible volume avec présence d'enjeux bâti traduirait un point de faiblesse du cordon dunaire et une exposition potentielle du bâti.

3.3.2 Le critère discriminant de l'échelle (ou niveau) d'observation

Il ressort donc de l'exercice précédent que les boîtes et les régions présentent davantage d'aptitudes à intégrer et agréger les différents types d'entités spatiales que les approches par maille ou par transect. Ces deux méthodes ne présentent pourtant pas le même niveau de réponse face à la

¹ Pour rappel, Dolan, Fenster et Holme (1992) précisent qu'un pas de 50 m fourni une excellente estimation des taux d'évolution du trait de côte entre chaque transect.

² Poussé à l'excès, un écartement de transect égal à la résolution du raster (1 m par exemple) permettrait d'intégrer l'ensemble de la grille de pixel.

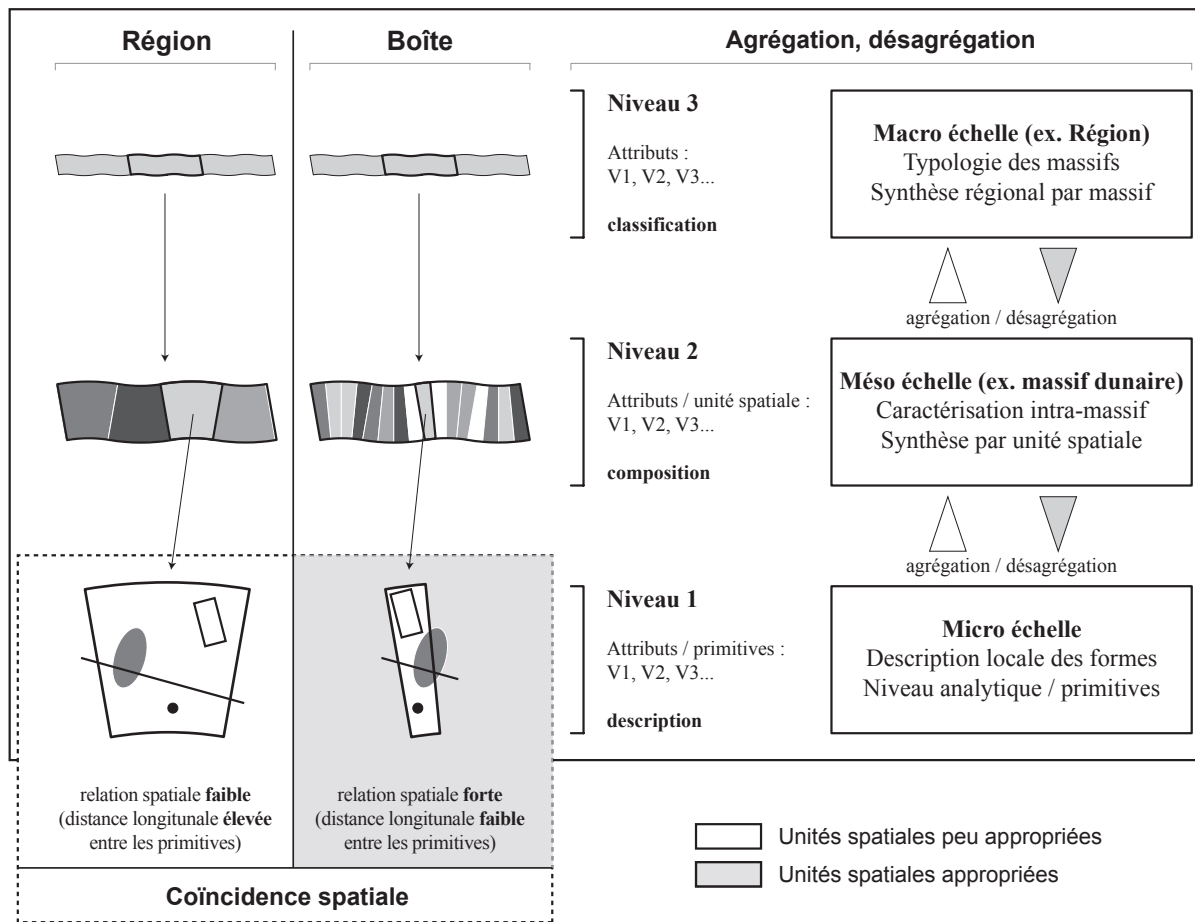


Figure 12 : Discrimination par l'échelle d'observation entre l'approche par région et l'approche par boîte (d'après Robin et Debaine, modifié).

nécessaire prise en compte de l'échelle d'observation (voir figure 12).

D'une part, le niveau d'observation à micro-échelle des deux méthodes ne présente pas le même degré de segmentation d'un linéaire côtier. En effet, le fait que l'agrégation de plusieurs boîtes conduise à la création d'une région signifie que (i) la boîte est une « unité-fille » de la région, donc (ii) le niveau 1 de la région correspond théoriquement à un niveau d'agrégation supérieur de boîtes. La boîte décompose donc plus finement un linéaire côtier qu'une région. L'approche par boîte offre donc la possibilité d'une information quantitativement supérieure à l'approche par région. Les capacités des deux méthodes à agréger l'information à des niveaux supérieurs sont similaires, bien que l'approche par boîte autorise une lecture plus fine de la variabilité spatiale de l'information (niveau 2 de la figure 12), ce qu'autorise également l'approche par transect, comme en témoigne la création d'unités morphodynamiques proposée dans le chapitre 2. Enfin, les deux méthodes permettent, selon une finesse différente, de réaliser des synthèses statistiques et de spatialiser des zones (à risque) par assemblage de plusieurs unités spatiales relativement homogènes.

D'autre part, la différence d'échelle d'observation entre ces deux niveaux de segmentation (« région-mère » et « boîte-fille ») joue sur la relation spatiale entre les entités intégrées dans les unités spatiales. La mise en relation des entités dépend d'une part de leur dispersion dans le paysage étudié, et d'autre part de leur intégration dans les unités spatiales. Dans les deux cas, la mise en relation est étroitement associée à la distance longitudinale entre entités. Plus cette distance entre les entités sera faible plus la coïncidence sera forte et proche d'une réalité terrain. En matière de risque, la

coïncidence « cordon dunaire perméable situé au droit d'une zone basse urbanisée » génère un risque potentiel de submersion du bâti. Dans ce cas, la mise en relation d'entités géographiquement proches dans une unité spatiale traduira une réalité terrain. En revanche, la coïncidence « un point de faiblesse du cordon situé à une centaine de mètres de la zone basse qui elle-même se situe à une centaine de mètres d'une zone urbanisée » ne représente pas une situation de risque du fait de la distance entre les indicateurs. Dans ce cas, la mise en relation dans une unité spatiale ne représenterait pas une réalité terrain.

L'influence de la taille des unités spatiales peut donc être prépondérante sur la détection du risque. Un pas de segmentation élevé (soit une largeur élevée) tend à augmenter le potentiel de distance maximum entre les entités intégrées donc à mettre en relation des entités pourtant non-concomitantes sur le terrain. C'est notamment le cas de l'approche par région telle que présentée dans la figure 12. À l'inverse, un pas de segmentation résolument fin tend à diminuer le potentiel de distance maximum entre les entités intégrées dans une unité spatiale. La mise en relation des entités tend à représenter finement une concomitance représentative de la réalité terrain. Ce deuxième cas s'apparente à la méthode des boîtes (voir figure 12).

En somme, la segmentation des distances entre entités crée des conditions de coïncidences spatiales plus strictes amenant à une spatialisation plus fine du risque.

Conclusion du chapitre 1

Dans ce premier chapitre, nous avons parcouru les éléments de cadrage de l'analyse des risques associés aux aléas érosion côtière et submersion marine le long des littoraux dunaires de la région Pays de la Loire. Tout d'abord, le risque a été ici défini par la simple fonction aléa*enjeu et ne prend donc pas en compte la vulnérabilité. Plus précisément, le risque est ici fonction de la probabilité d'un aléa et des conséquences possibles de cet aléa sur les enjeux exposés. La sensibilité environnementale influe favorablement ou défavorablement sur le degré d'exposition des enjeux.

Après avoir défini et présenté les 140 km de cordons dunaires de la région Pays de la Loire, il a ensuite été rappelé que ces édifices naturels peuvent jouer un rôle d'obstacle face au risque de submersion marine. La capacité de protection des dunes littorales est en effet au cœur des préoccupations des acteurs du littoral, conséquemment à la tempête Xynthia et à l'impact de l'hiver 2013-2014 sur les massifs dunaires le long du littoral centre-atlantique français. La Mission Littoral de l'ONF, en partenariat avec le CEREMA, et les observatoires du trait de côte se trouvent en première ligne pour développer et mettre en application les recommandations de la Stratégie nationale relatives à l'évaluation et la gestion des milieux dunaires. En Pays de la Loire, la création récente de l'OR2C s'inscrit dans la lignée des initiatives locales d'observation du trait de côte, essentiellement situées dans le nord Vendée.

Il a ensuite été rappelé que l'analyse des risques côtiers nécessite souvent de recourir aux outils de la géomatique, et que l'utilisation d'indicateurs et d'indices est courante dans la littérature. Il a été établi que si les méthodes classiques d'analyse spatiale permettent de répondre à un certain nombre de questionnements, il manque cependant à ce jour une démarche géomatique adaptée aux singularités littorales, simple et reproductible, permettant d'intégrer tous les types de données, donc de répondre à une grande diversité de questionnements thématiques précis. Ce travail de thèse a pour objectif de proposer une telle démarche. Basée sur les acquis de travaux antérieurs relatifs à l'analyse spatiale des dynamiques côtières et risques inhérents, la démarche géomatique proposée repose sur l'hypothèse suivante : l'utilisation de données génériques, conjuguée à une segmentation homogène de la bande côtière, autorise l'extraction d'indicateurs synthétiques, dont la combinaison permet de définir des indices composites apportant des réponses synoptiques, quantitatives et spatialisées aux questions posées.

En préambule à toute création de démarche géomatique, un état de l'art sur les indicateurs et les indices a été réalisé. Il en résulte que les indicateurs 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. La revue de la littérature traduit une grande diversité d'indicateurs environnementaux et sociétaux. Le constat a été fait que l'échelle d'observation et la disponibilité des données jouent toutefois un rôle déterminant quant au choix des variables retenues par les auteurs. D'une manière générale, les études à petites échelles auront davantage tendance à réaliser des synthèses d'indicateurs généraux tandis que les études à grande échelle privilégieront davantage des indicateurs décrivant finement l'état et/ou la dynamique locale des systèmes étudiés. Enfin, la sélection des indicateurs dépend également du raisonnement spatialisé mis en place pour répondre à un questionnement précis. Deux principales approches ont été identifiées pour exploiter les indicateurs, l'approche simple reposant sur l'analyse d'un ou plusieurs indicateurs distincts et

l'approche basée sur plusieurs indicateurs dont la combinaison conduit à la création d'un indice synthétique. La revue de différents indices a permis de dégager quatre grandes étapes dans le processus de création d'un indice (l'encodage, la pondération, la combinaison et la discrétisation). Il ressort de cette revue qu'il n'existe pas de méthode type, chaque étape présentant une diversité de possibilités d'exécution, certaines étapes étant facultatives (encodage, pondération).

Le dernier point développé dans ce premier chapitre est une synthèse, à des fins de comparaison, des différentes méthodes de segmentation utilisées en analyse côtière. Il y est rappelé que la segmentation est l'action de décomposer en unités spatiales un espace observé. Ces unités sont le support géométrique d'analyse des indicateurs, lesquels sont des primitives géométriques (point, ligne, polygone) ou des grilles de pixels. Ont été identifiées trois méthodes classiques (approches par mailles, transects ou régions) et une méthode novatrice apparue dans la seconde moitié des années 2000 (l'approche par boîte). Une démonstration conceptuelle a été conduite pour établir et comparer dans un premier temps l'aptitude des quatre méthodes à intégrer et mettre en relation les entités spatiales. A ce stade de la démonstration, il ressort de l'exercice que les boîtes et les régions présentent davantage d'aptitudes à intégrer et agréger les différents types d'entités spatiales que les approches par maille ou par transect. Toutefois, ces deux méthodes ne présentent pourtant pas le même niveau de réponse face à la prise en compte de l'échelle d'observation, nécessaire pour la réalisation de diagnostic fin et précis. D'une part, le niveau d'observation à micro-échelle des deux méthodes ne présente pas le même degré de segmentation d'un linéaire côtier (« région-mère » et « boîte-fille »). D'autre part, la qualité de la relation spatiale, c'est à dire la mise en relation des entités entre elles, dépend de la coïncidence spatiale entre les entités, laquelle est liée à la dispersion des entités dans le système étudié. Ainsi, une région aura tendance à mettre en relation des entités distantes (peu réaliste) tandis qu'une boîte créera une relation entre des entités proches (réaliste).

Il semble alors que, suivant un raisonnement spatial fondé sur une question précise, l'exploitation d'indicateurs au sein de boîtes permette de mettre en place des diagnostics fins de la bande côtière.





Chapitre 2

Approche par transects pour l'analyse de la mobilité du trait de côte



Introduction du chapitre 2

Après avoir introduit dans le premier chapitre les principaux aspects de l'observation du trait de côte, le deuxième chapitre de la thèse s'attache à présenter une application basée sur l'étude d'un indicateur simple, le trait de côte, à l'aide d'une méthode de segmentation classique, l'approche par transects. L'objectif est ici de démontrer le potentiel de l'approche par transects pour l'évaluation d'un indicateur unique représenté par une collection de polygones.

Face à un constat de recul d'une partie de son trait de côte et de manques de données existantes sur sa frange littorale, la Communauté de Communes Océan-Marais de Monts a décidé, en 2009, de créer un Observatoire du littoral. Cette structure, par son caractère pérenne, constitue un véritable outil d'aide à la gestion prévisionnelle du trait de côte et est pleinement intégrée dans la volonté nationale de suivi des espaces côtiers. Les actions engagées dans le cadre de l'observatoire incluent notamment un volet « compréhension des phénomènes » que ce chapitre propose de développer à travers l'étude de la mobilité du trait de côte à long, moyen et court terme.

Nous développerons dans une première partie une méthode permettant d'évaluer la mobilité historique du trait de côte à long et moyen terme. Ces travaux ont été valorisés dans la revue *Dynamiques Environnementales* des Presses Universitaires de Bordeaux. Dans un second temps, la dynamique des traits de côte levés par l'ONF sur la période 2010-2014 sera observée à travers une analyse court terme. Cette analyse est une production originale ne figurant pas dans les rapports de l'observatoire.



1. Cinématique d'un trait de côte sableux en Vendée entre 1920 et 2010 - Méthode et analyse

(Dynamiques Environnementales, décembre 2012, 30, pp. 29-39)

Martin Juigner¹, Marc Robin¹, Paul Fattal¹, Mohamed Maanan¹, Cécile Le Guern², Loïc Gouguet³, Vivien Baudouin², Françoise Debaine¹

Résumé - Abstract

Cet article propose une évaluation de la mobilité historique du trait de côte de l'Observatoire du Littoral des Pays de Monts (Vendée). Réalisée à partir des images aériennes 1920, 1950, 1971, 2000, 2001, 2006, 2009 et 2010, cette cinématique littorale repose sur une technique de détection des indicateurs d'extraction du trait de côte réalisée à partir d'observations *in situ* du contact plage-dune qui ensuite est transposée aux images aériennes. La sensibilité de ces indicateurs face aux épisodes tempétueux nécessite d'appréhender les conditions météo-marines (vitesse du vent, hauteurs du plan d'eau et de la houle) précédant la date de chaque campagne aérienne. Les traits de côte numérisés selon les principes de la photo-interprétation assistée par ordinateur sont intégrés dans le *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) qui à terme a permis de développer deux modes de représentation des résultats, l'un cartographique et l'autre tabulaire. Les résultats entre 1920 et 2010 révèlent que le linéaire côtier en accrétion est prédominant tandis que les résultats périodiques indiquent que l'érosion semble avoir gagné en intensité sur les dernières années de l'étude. Enfin, ce travail apporte un éclairage sur les impacts morphologiques de la tempête Xynthia du 28 février 2010 (recul du trait de côte de 7 à 8 mètres).

This paper points out the way the motion of the shoreline occurs along the coast of the Pays de Monts (Vendée, W France). The coastal analysis is based upon a method of detection of the shoreline carried out by *in situ* observations and beach/dune contact extraction out of a set of aerial photographs registered between 1920 and 2010. Once the set of coastlines are digitized using specific software tools, we used the Digital Shoreline Analysis System (DSAS) which made it possible to build up a set of 20m regularly spaced transects intersecting each of the coastlines. This allows setting up both cartographic and statistic results taking into account various temporal scale. The long-term results indicate that the in-accretion coastline is predominant (37.4 %) whereas the periodic results show that the strength of erosion seems to be increasing over the last years. Moreover, this study emphasizes the morphological impacts of the Xynthia storm (a 7 to 8 meters shoreline retreat).

Mots clés - Key words

érosion côtière, cinématique du trait de côte, contact plage-dune, tempête, photo-interprétation, cartographie

coastal erosion, shoreline change analysis, beach-dune contact, storm, photo-interpretation, cartography

1 Géolittomer - UMR 6554 CNRS LETG, Université de Nantes
martin.juigner@univ-nantes.fr ; marc.robin@univ-nantes.fr ; paul.fattal@univ-nantes.fr ;
mohamed.maanan@univ-nantes.fr ; francoise.debaine@univ-nantes.fr

2 Bureau de Recherches Géologiques et Minières - BRGM - Service géologique régional des Pays de la Loire
c.leguern@brgm.fr ; v.baudouin@brgm.fr

3 Office National des Forêts - ONF - Centre Ouest Auvergne Limousin
loic.gouguet@onf.fr

Introduction

Selon l'Ifen (2006), environ 20 % des côtes européennes sont en érosion. En France, de même, près d'un quart des côtes sont concernées. Le département de la Vendée l'est aussi à hauteur de près de 40% de son linéaire côtier (Ifen, 2006). Face à la prise de conscience du risque que peut représenter le recul du trait de côte sur son territoire, la Communauté de communes Océan-Maraux de Monts a impulsé dès 2009 un Observatoire de sa frange côtière (l'OLPM) en partenariat avec le BRGM, l'ONF et l'IGARUN. Dans ce cadre, l'analyse de la mobilité historique du trait de côte est devenue un préalable pour la compréhension des dynamiques actuelles et l'adaptation des territoires communaux à ces dynamiques. Cet article propose une méthodologie adaptée aux côtes sableuses pour la mise en évidence de la cinématique du trait de côte à divers pas de temps.

1.1 Présentation du site d'étude

Le littoral des Pays de Monts se situe au nord du département de Vendée, le long de la côte atlantique française. Ce secteur côtier s'étend sur 19,5 km et se caractérise par la présence d'un vaste cordon dunaire sur lequel sont implantées les communes de La-Barre-de-Monts, Notre-Dame-de-Monts et Saint-Jean-de-Monts (figure 1).

1.1.1 Contexte géomorphologique

Le paysage géomorphologique des Pays de Monts s'inscrit dans un continuum terre-mer hérité des cycles orogéniques du Massif Armoricaïn et de la transgression flandrienne (Ters, 1959 ; Gouleau, 1968). Pour la partie océanique, cet héritage se traduit par la présence de môles cristallins à l'origine de l'île de Noirmoutier et de l'île d'Yeu. La bathymétrie du secteur marque la prépondérance des petits fonds (isobathe -10 m) entre l'île d'Yeu et le continent, avec toutefois une augmentation de la profondeur au sud du secteur d'étude. La partie terrestre est principalement composée de formations superficielles, à savoir de dunes et de cordons littoraux (sables et galets) protégeant à l'arrière un marais rétro-littoral (vases, sables et graviers), composante ouest du vaste marais breton-vendéen dont l'altitude moyenne est inférieure au niveau des hautes mers. La largeur des cordons dunaires varie entre 250 m et 3 km (Le Guern *et al.*, 2011) pour une altitude maximum de 33,3 m IGN 69 pour les dunes les plus anciennes.

Le cordon dunaire s'aligne dans une première partie depuis le goulet de Fromentine jusqu'au Pont d'Yeu selon une direction nord/sud et est caractérisé par une dérive littorale à dominante sud/nord (Geos-Dhi, 2008). La seconde partie s'incurve en direction du sud-est au sud du Pont d'Yeu. Cette seconde partie se décompose en deux sous-ensembles de part et d'autre de l'ancien estuaire de la Baisse comblé naturellement au cours du XVIII^e siècle : l'ensemble du Pont d'Yeu à l'estuaire de la Baisse caractérisé par une dérive littorale nord-ouest/sud-est ; et l'ensemble au sud de l'estuaire de la Baisse jusqu'à la corniche Vendéenne caractérisé par une dérive sud-est/nord-ouest (Geos-Dhi, 2008). La figure 1 présente l'ensemble hydrosédimentaire correspondant au territoire de la communauté de commune des Pays de Mont, avec une cellule hydrodynamique nord (C1) et une cellule hydrodynamique sud (C2). Elle présente aussi la cellule C3 au sud de l'estuaire de la Baisse, de façon à bien replacer le territoire communal et ses deux cellules dans le contexte géomorphologique plus large de cette partie de la côte vendéenne.

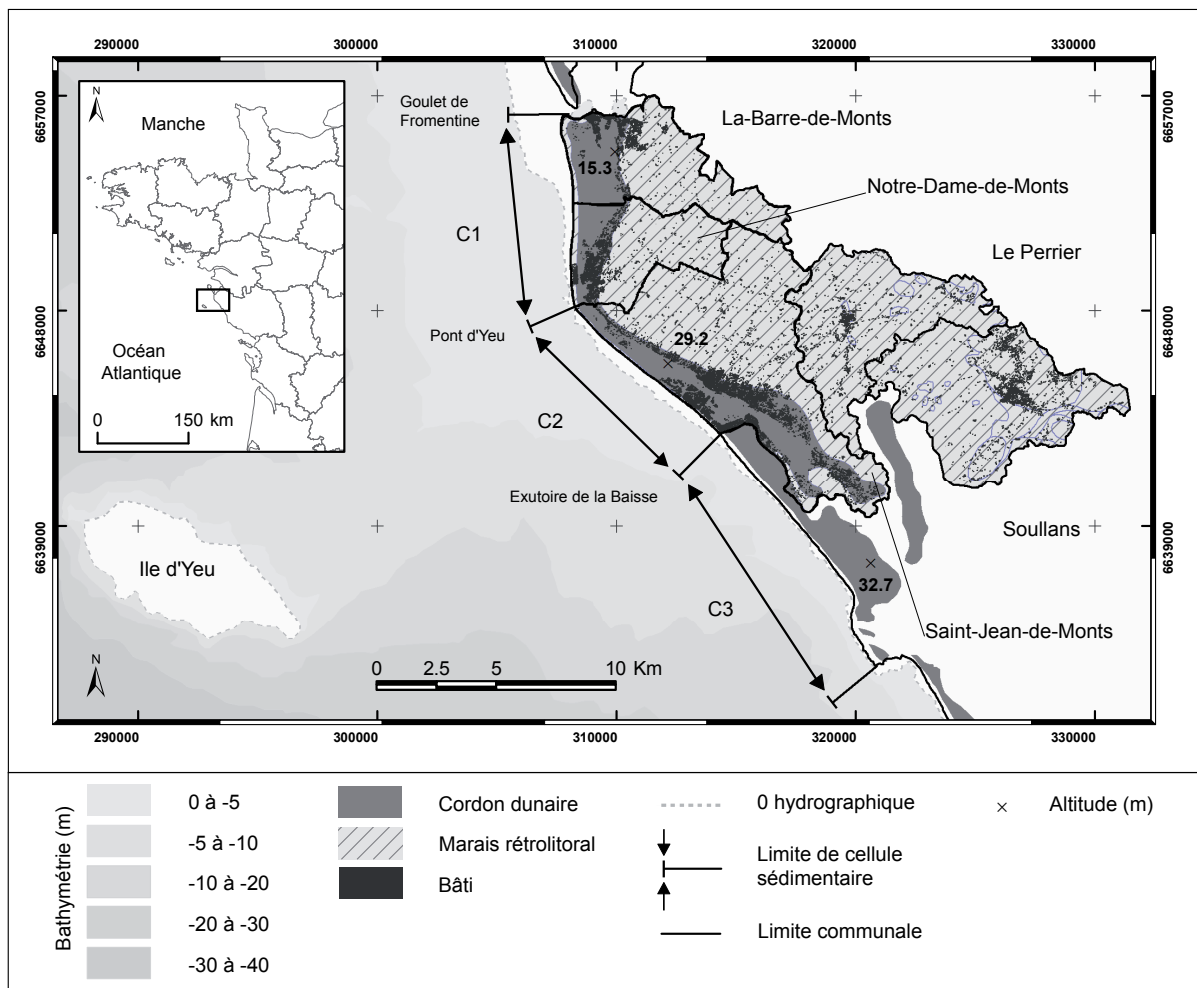


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude et contexte géomorphologique (C1, C2, C3 : cellules sédimentaires d'après Pinot, 1980 ; Geos-Dhi, 2008)

1.1.2 Exposition aux aléas météo-marins

Le littoral vendéen est soumis au climat tempéré océanique de la façade atlantique européenne. La température moyenne est de 13,2 C° à Saint-Jean-de-Monts pour une moyenne annuelle de 700 mm de précipitation. La côte, orientée Nord/sud et Nord-ouest/Sud-est, est directement exposée aux influences météo-marines de l'Atlantique Nord. Selon les données Météo France de l'Ile de Noirmoutier et de l'Ile d'Yeu, 40 % des vents enregistrés (FXI) entre 1999 et 2010 proviennent des secteurs Ouest-nord-ouest à Sud-ouest, les vents les plus violents (> 22 m/s) étant principalement issus des secteurs Ouest et Sud-ouest (figure 2). Les données de houles transmises par le Cetmef (figure 2) provenant des bouées 08502, 08503, 08504 (Ile d'Yeu) et 04401 (St Nazaire) de la base CANDHIS indiquent que les houles, essentiellement d'origine Ouest à Nord-Ouest (Geos-Dhi, 2008), ont une hauteur H1/3 moyenne de 1,5 m sur la période 1999-2010. 79,6 % des enregistrements ont une hauteur H1/3 inférieure à 2 m, 18,9 % sont compris entre 2 et 4 m tandis que seuls 1,4 % dépassent 4 m. Selon Geos-Dhi (2008), les houles dont la hauteur est la plus élevée proviennent des secteurs Ouest et Sud-ouest. La saison des tempêtes se situe entre les mois de novembre et de mars comme ce fût le cas lors de la tempête Xynthia au mois de février 2010. La diffraction de la houle de part et d'autre de l'île d'Yeu et la réfraction liée à la bathymétrie des petits fonds tend néanmoins à dissiper quelque peu leur énergie avant l'arrivée sur les plages.

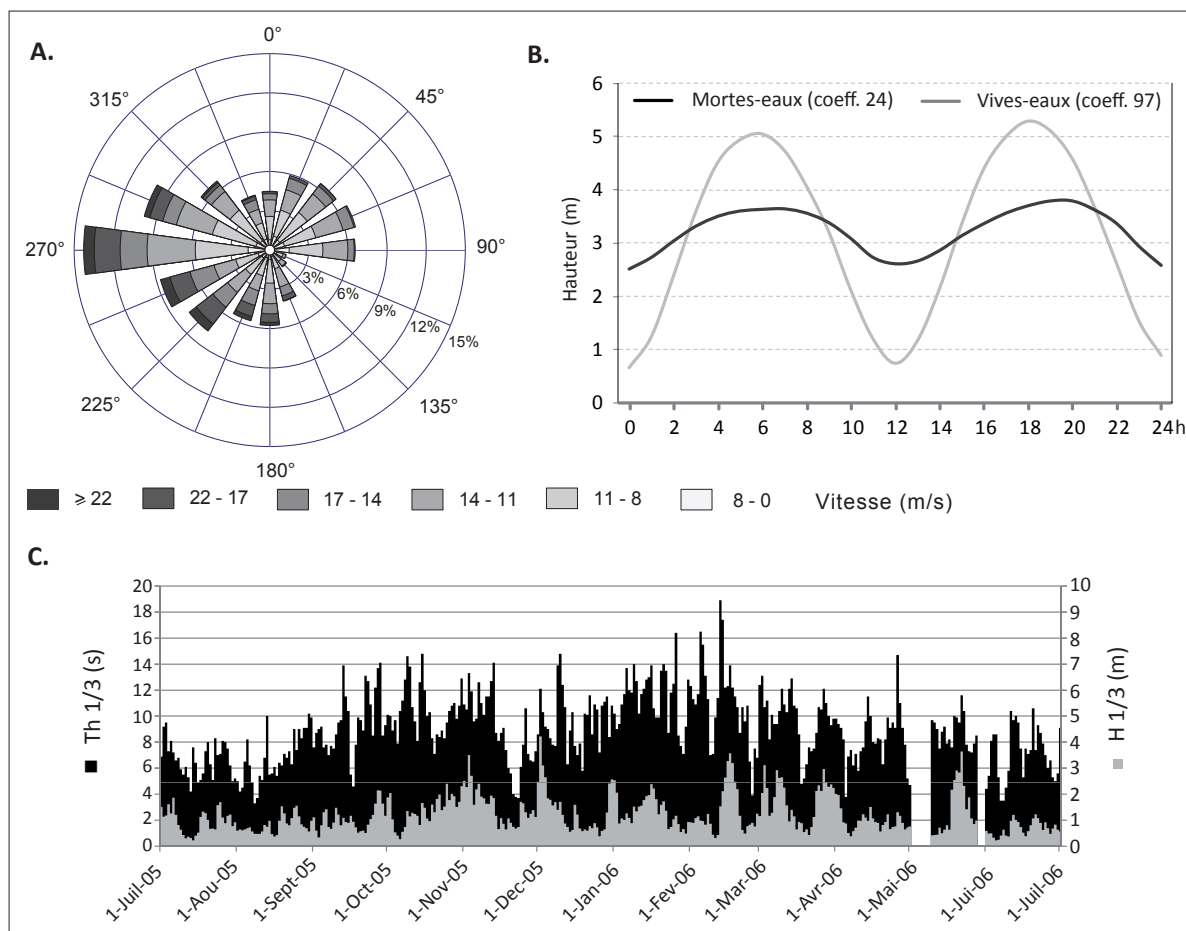


Figure 2 : Forçages météo-marins - A. Vitesse et direction du vent (FXI) ; B. Marnage de vive-eau et de morte-eau ; C. Période et hauteur de la houle de juillet 2005 à juillet 2006

1.1.3 Occupation et usage du sol

Selon la base de données LittoMos 2000-2006, les principaux types d'occupation du sol de la Communauté de communes Océan-Marais de Monts sont les territoires agricoles (61 %), les forêts et milieux semi-naturels (18,2 %), et les territoires artificialisés (17,8 %). Les zones humides et les surfaces en eau ne représentent que 3 % de la superficie totale du territoire. Il apparaît donc que le marais rétrolittoral a progressivement été aménagé pour être reconverti en surfaces agricoles. Les forêts et milieux semi-naturels sont quasi-exclusivement concentrés sur le massif dunaire (dune grise et dune boisée), incluant la forêt domaniale des Pays de Monts, constituée de pins maritimes et de chênes verts plantés au cours du XIX^e siècle pour fixer les sables dunaires. Enfin, les espaces artificialisés non-agricoles historiquement implantés sur la rive du marais se sont développés sur le massif dunaire tout au long du XX^e siècle. Les principaux types d'occupation du sol sur ces espaces sont les habitats (63,2 % tous types confondus) et les campings (16,9 %). En 2009, 63,3 % des logements étaient des résidences secondaires, soit une augmentation de 15,5 % depuis 1968 (données INSEE). Ces valeurs montrent l'importance du secteur touristique sur le site. Au sein du système plage-dune, les usages liés au tourisme ont conduit dans le passé à la construction d'ouvrages de protection côtière sur les trois communes littorales (remblais et perré). Aujourd'hui, la fréquentation touristique se traduit par l'affirmation des usages récréatifs (écoles de voile, activités équinées, golf, pêche à pied, baignade ...etc.) induisant une dégradation du milieu dunaire (sentiers dunaires, piétinement).

1.2 Matériel et méthode

L'analyse diachronique du trait de côte est un sujet qui a été largement abordé dans la littérature scientifique (Dolan *et al.*, 1991 ; Crowell *et al.*, 1991 ; Durand, 2000 ; Moore, 2000 ; Morton and Miller, 2005 ; Boak and Turner, 2005 ; Hapke *et al.*, 2006 ; Gentz *et al.*, 2007 ; Del Rio *et al.*, 2012). Les définitions du trait de côte et les méthodes d'analyse dépendent essentiellement du type de côte, des données disponibles et des outils de traitement de données. Face à cette diversité, il est nécessaire d'établir une méthodologie exhaustive et adaptée aux caractéristiques du secteur d'étude. Les apports bibliographiques et la connaissance du terrain ont permis de définir les principales phases constitutives de la cinématique (figure 3).

1.2.1 Choix de la ligne de référence et définition des indicateurs

Le trait de côte n'a pas une mais plusieurs définitions selon l'entrée thématique choisie. Boak et Turner (2005) présentent ainsi une synthèse d'environ 45 exemples de définitions recueillies dans la littérature. Dans le cadre des Pays de Monts, quatre types de lignes de références ont pu être identifiées : les lignes morphologiques, les lignes biologiques, les niveaux d'eau et les lignes artificielles. Dans le cadre d'une analyse historique, la difficulté est de trouver une ligne de référence qui soit un bon marqueur des tendances d'évolution et qui soit commune à l'ensemble des données couvrant la période d'étude. Le recours à différents types de ligne selon les périodes (ex. ligne de rivage instantanée et limite de végétation dunaire) fausserait l'estimation des taux d'évolution sur le long terme puisque les résultats dépendraient alors d'indicateurs n'évoluant pas systématiquement au même rythme.

Ainsi, les lignes de niveau d'eau (lignes dites d'humectation d'estran) traduisent la limite supérieure du jet de rive selon les différentes hauteurs du plan d'eau déterminées par les variations de la marée et les conditions des surcotes. Ces limites sont aisément détectables sur l'ensemble du site, mais doivent être caractérisées selon les conditions météo-marines précédant la date des relevés, ce qui n'est pas possible dans le cas présent par manque de données pour les dates historiques.

Gaillot et Chaverot (1999), Robin (2002), Battiau-Queney *et al.* (2003) et Boak et Turner (2005) considèrent que les ruptures de pentes (pied de dune et pied de dune embryonnaire) sont de bons indicateurs d'érosion et d'accrétion sur les côtes macrotidales. Ces indicateurs ne sont pas continus dans le temps et l'espace en raison des tendances d'évolution des secteurs littoraux et de leur exposition aux aléas météo-marins.

Les limites de végétation dunaire sont de bons marqueurs d'érosion mais ne montrent l'accrétion qu'avec un décalage significatif dans le temps (Boak et Turner, 2005). Ces limites sont sujettes à des discontinuités liées à la présence ou non de couvert végétal, à la phénologie du couvert engendrant des effets saisonniers, et au recouvrement par le sable ou au piétinement.

Le choix de la ligne de référence s'est donc porté sur les lignes morphologiques. Celles-ci sont caractérisées par la rupture de pente du pied de dune ou du pied de dune embryonnaire. Dans certains cas ces lignes peuvent se confondre avec les limites de végétation. Elles dépendent donc du type de contact liant le haut de plage à la dune.

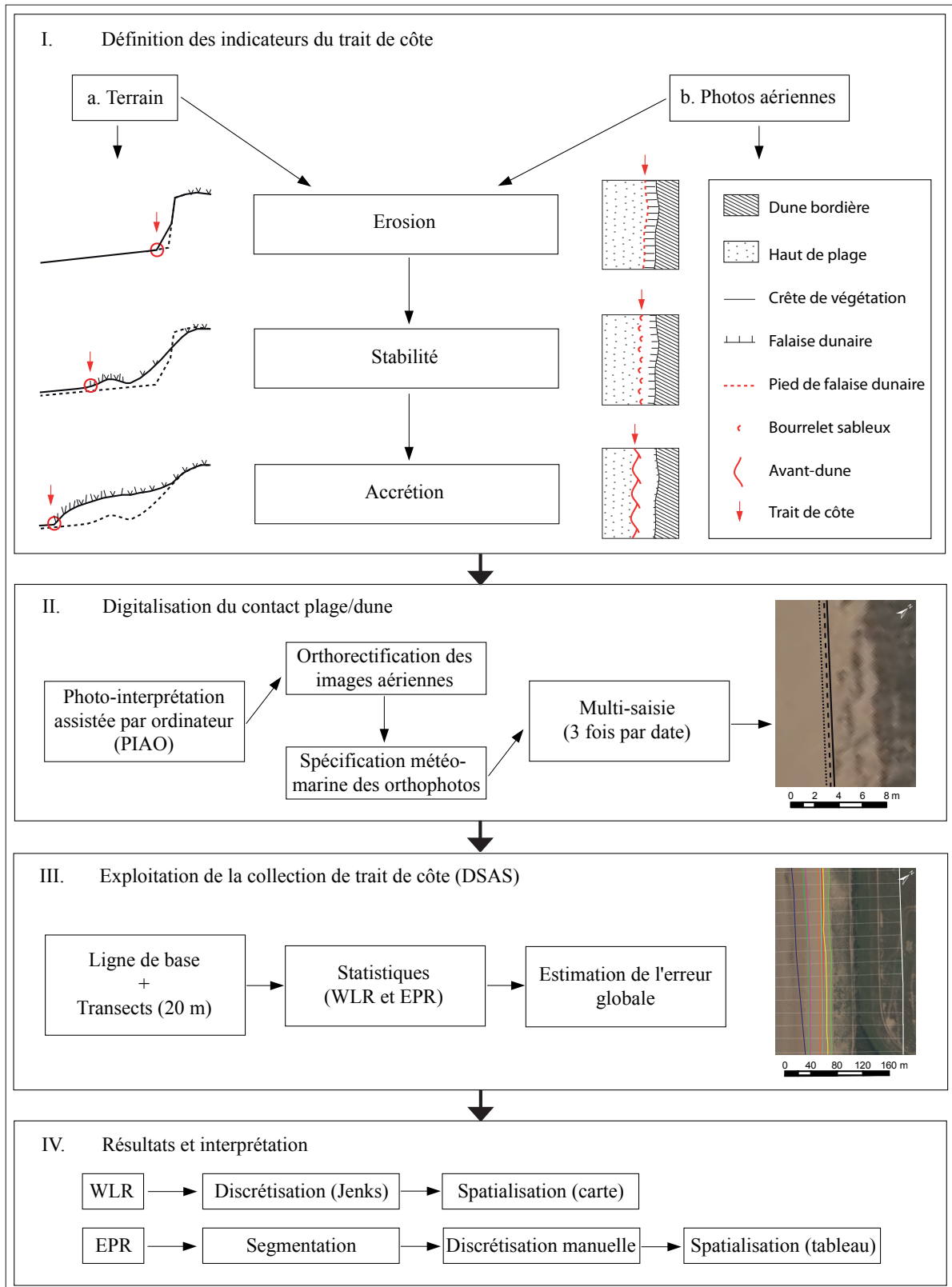


Figure 3 : Schéma méthodologique de l'analyse diachronique du trait de côte des Pays de Monts

Une typologie des contacts plage-dune a donc été établie sous la forme d'une séquence évolutive afin de déterminer avec précision les indicateurs morphologiques et biologiques définissant tous les profils identifiés sur le secteur (figure 4). Neuf types de profils ont ainsi été identifiés d'après les travaux de Favennec (2002) et de l'ONF sur le secteur des Pays de Monts (Gouguet, 2010). Cette étape a permis de situer précisément le trait de côte pour chaque type de contact plage-dune. Ainsi, les profils en érosion présentent un pied de dune situé à la jonction entre le haut de plage et une falaise dunaire. Les versants non végétalisés contrastent avec la crête de végétation dunaire colonisée par l'Oyat sur la dune blanche. La rupture de pente marque la position du trait de côte. Les profils relativement stables se distinguent par la présence de bourrelets sableux plus ou moins développés au pied d'une falaise éolisée. Ces formes d'accumulation sont progressivement colonisées par une végétation halophile (Euphorbe, Arroche des Sables, Agropiron...etc.). Le trait de côte se situe à la jonction entre la plage et le bourrelet végétalisé si ce dernier est significatif, sinon au pied de la dune éolisée. Enfin, les profils en accrétion sont caractérisés par des modelés d'accumulation plus développés. L'apparition de dunes embryonnaires par coalescence de nebkhas (fixation d'une accumulation sableuse éolienne par de la végétation) favorise l'émergence d'une avant-dune établie entre le haut de plage et le corps dunaire. Ces formes d'accumulations sont colonisées par de la végétation continentale et de la végétation halophile. La limite de végétation coïncide généralement avec le pied de dune embryonnaire ce qui permet d'y situer le trait de côte. Enfin, cette définition du trait de côte n'est valable que pour les secteurs où le contact plage-dune est mobile. Cela signifie que pour les secteurs fixés par des ouvrages de protection côtière, le trait de côte correspond à la rupture de pente entre la plage et le pied de l'ouvrage.

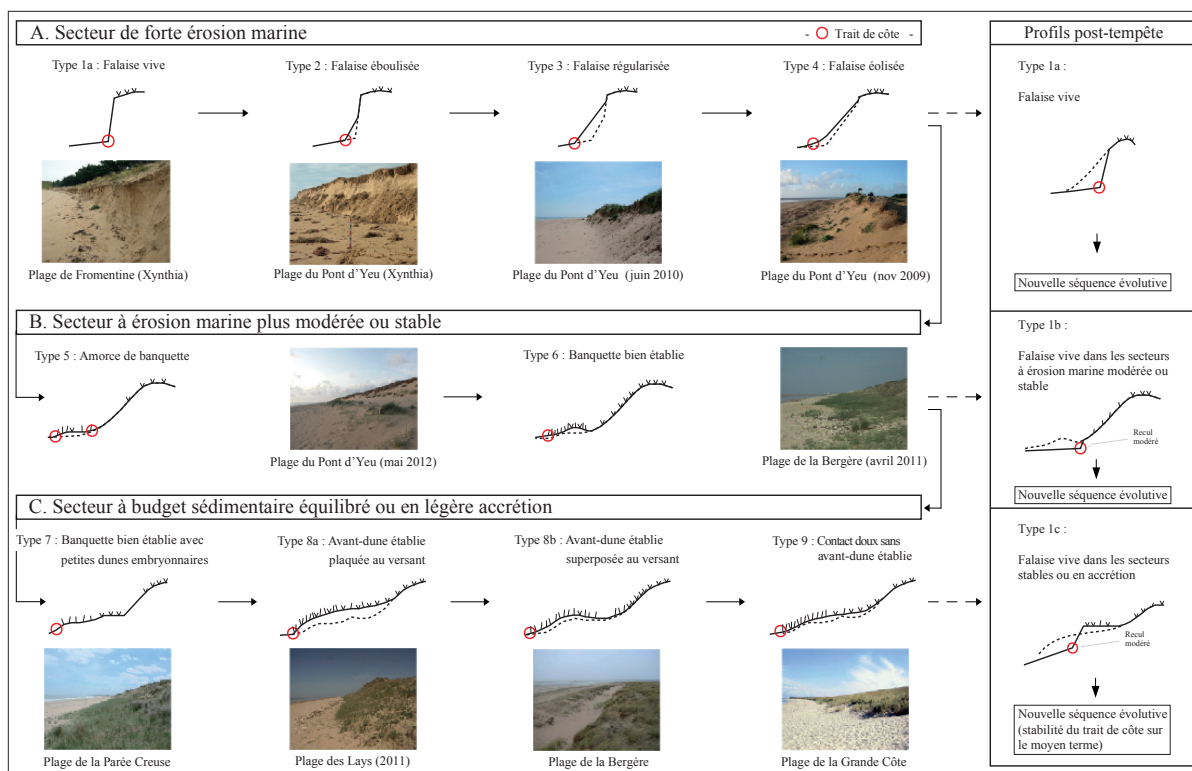


Figure 4 : Séquence évolutive des faciès du contact plage-dune adaptée aux Pays de Monts (d'après Favennec, 2002, modifié)

1.2.2 Digitalisation du contact plage-dune

L'analyse diachronique de photographies aériennes verticales est la méthode documentaire la plus appropriée pour étudier la dynamique spatio-temporelle des côtes sableuses à différents pas de temps (Durand, 2000). Cette méthode repose sur l'étude de photos dont l'échelle varie généralement entre 1/15 000 et 1/30 000 (Gaillot et Chaverot, 2001). La digitalisation du contact plage-dune est ici réalisée manuellement par photo-interprétation assistée par ordinateur (PIAO). La méthode appliquée repose sur un travail d'harmonisation des images aériennes ainsi que sur une méthodologie rigoureuse pour extraire le contact plage-dune de ces images.

1.2.2.1 Traitement des images aériennes

Les données récoltées (tableau 1) pour réaliser cette cinématique n'ont pas reçu le même niveau de traitement avant acquisition ce qui demande de distinguer les images brutes des orthophotographies IGN. Un ensemble de traitement a été nécessaire pour harmoniser ces données avant de les intégrer dans un SIG.

Date	Type de donnée	Provenance	Echelle	Résolution	Antécédents météo-marins	Marée (m)	Houle (m)	Vent (km/h)
1920	Ortholittorale (secteurs 1 et 2)	IFREMER (DDEA)	1/25 000	20 cm	?	?	?	?
14 et 15 mai 1950 ; 27 juillet 1950	BD ORTHO® HISTORIQUE	GEOPAL (IGN)	1/26 000	50 cm	Hiver 1949 (janvier, décembre ?) : "Vimer à Pornic"	?	?	?
03 sept 1971	Photos aériennes noir et blanc n° 33, 36 et 103	ONF / IGARUN (IGN)	1/30 000	69 cm	22 au 27 janvier 1971 : "Tempêtes dévastatrices"	?	?	?
30 juillet au 01 août 2000	Ortho Littorale®	Géolittoral (IGN)	1/25 000	50 cm	26 au 28 décembre 1999 : Tempêtes Lothar et Martin	-	7,42	162
12 août 2001	BD ORTHO® V2	Océan-Marais de Monts (IGN)	1/25 000	50 cm	5 au 8 février 2001 13 mars 2001 17 et 18 juillet 2001	5,92 6,02 5,3	5,11 5,55 3	83 72 83
23 juin 2006	BD ORTHO® V2	Océan-Marais de Monts (IGN)	1/25 000	50 cm	1 au 4 décembre 2005 2 au 4 mars 2006	5,78 5,87	4,22 3,12	102 67
2009	BD ORTHO® V2	Océan-Marais de Monts (IGN)	1/25 000	20 cm	6 au 10 février 2009	5,7	-	119,5
09 avril 2010	Photos aériennes couleur n° 112, 114, 124, 126, 611, 613, 615, 623, 706, 714, 716	Géolittoral (IGN)	1/20 000	21 cm	28 février 2010 : Tempête Xynthia	6,59	3,56	120,6

Tableau 1 : Inventaire des images aériennes exploitées et spécification des antécédents météo-marins (tempêtes) de l'année précédant les clichés

Les images brutes (1971 et 2010) acquises auprès de l'IGN ont été rectifiées géométriquement à l'aide du logiciel Erdas Imagine 2010. Les images de 1971 ont été redressées géométriquement à partir de l'orthophotographie 1950 et celles de 2010 à partir de l'orthophotographie 2009 par l'application d'un modèle polynomial du second degré et d'un rééchantillonnage par interpolation bilinéaire. Une soixantaine d'amers ont été collectés par image en 1971, et une vingtaine en 2010. Une première répartition homogène de six amers sur chaque image a permis ensuite de concentrer la collecte sur les secteurs les plus sensibles (bord des clichés et front dunaire) afin d'optimiser la qualité de la correction. Cette démarche a permis d'affiner la connaissance de l'erreur de correction géométrique sur le front dunaire par le calcul de deux erreurs pour chaque image : (i) l'erreur *Root Mean Square* (RMS) moyenne de l'ensemble des amers de l'image et (ii) l'erreur RMS moyenne des amers adjacents au front dunaire de l'image. Ainsi la moyenne de ces deux erreurs sur l'ensemble des images de 1971 est 3,24 pixels (soit 2,2 m), et de 1,71 pixel en 2010 (soit 34 cm). Les images corrigées ont ensuite été assemblées par groupe de deux ou trois afin de contrôler la superposition

des clichés, avant de créer les mosaïques finales à partir desquelles les traits de côte ont été digitalisés. Les images rectifiées de 1920 présentant des déformations importantes au niveau du contact plage-dune, un travail de re-corrrection a été entrepris à partir de l'orthophotographie 1950, suivant la même démarche. Une zone d'environ 500 m n'est pas couverte par la mosaïque au Sud du Pont d'Yeu. Enfin, l'ensemble des orthophotographies (1920, 1950, 1971, 2000, 2001, 2006, 2009 et 2010) ont ensuite été projetées dans le système Lambert 93.

1.2.2.2 Spécifications météo-marines

La typologie du contact plage-dune établie précédemment illustre la relation étroite entre les types de faciès et l'agitation météo-marine précédant les dates de campagne. L'impact des tempêtes morphogènes et la réponse du front dunaire qui en résulte déterminent les indicateurs qui permettent de digitaliser le trait de côte et influent donc directement sur les résultats d'une cinématique littorale, notamment sur l'incertitude globale (Gentz *et al.*, 2007). Il est donc important de pouvoir resituer le contexte dans lequel est relevé un trait de côte. Un travail de spécification des antécédents météo-marins a été entrepris pour chaque date (tableau 1). Pour la période antérieure à 2000, les informations ont été recueillies dans un historique des tempêtes réalisé par l'Association Patrimoine Marche de Bretagne Marais Breton des Moutiers-en-Retz, antenne de la Société des Historiens du Pays de Retz (Rivron, 2010). Cet historique a permis de déceler une tempête majeure dans la région au début de l'année 1971. Les référentiels récents (2000 à 2010) ont été spécifiés à l'aide d'un inventaire des épisodes tempétueux réalisé sur la période 1999-2010. Ce travail repose sur une définition météo-marine des conditions de mer (houle et marée) et de vent susceptibles d'engendrer un travail de sape du contact plage-dune. Les données de houle, de vent et de marée ont été seuillées puis croisées afin d'identifier l'ensemble des épisodes de moyenne et de forte agitation précédant une période d'un an avant les prises de vues aériennes.

Selon Suanez et Stéphan (2006), les seuils fixés dépendent de l'échelle spatio-temporelle de l'étude. Les travaux réalisés sur de grands domaines à des échelles pluri-décennales ne retiennent généralement que les événements exceptionnels. A l'inverse, les travaux menés sur l'impact des événements épisodiques sur des secteurs restreints utilisent des seuils moins élevés (Bruzzi et Provansal, 1996 ; Ruz et Meur-Ferec, 2004 ; Suanez et Stéphan, 2006 ; Sabatier *et al.*, 2009). Ce travail portant sur un pas de temps intermédiaire (10 ans) et sur un linéaire côtier limité (19,5 km), les tempêtes sont identifiées ici dès lors que $H1/3 \geq 2$ m, $FXI \geq 11$ m/s et la hauteur du plan d'eau $\geq 4,70$ m CM. Il résulte de cet inventaire que sur les huit dates de la cinématique, au moins trois sont marquées par des tempêtes majeures (1971, 2000 et 2010). Ces informations permettent de formuler l'hypothèse selon laquelle les contacts plage-dune présenteraient des profils en érosion (figure 4) pour ces trois dates.

Les traits de côte numérisés sur ces images pourraient donc engendrer une augmentation des rythmes d'érosion pour les secteurs historiquement en recul ainsi qu'une inversion de la tendance d'accrétion pour les secteurs historiquement en progradation.

Enfin, il convient de noter que les événements identifiés au début de l'année 2001 ainsi que celui précédant de trois semaines la campagne aérienne du 12 août 2001 pourraient avoir entravé la capacité de résilience du front dunaire après les tempêtes de 1999.

1.2.2.3 Extraction du trait de côte

Aujourd'hui les méthodes couramment utilisées pour réaliser une cinématique du trait de côte sont la PIAO et la photogrammétrie numérique (Boak et Turner, 2005). La PIAO couplée à un SIG présente l'avantage d'être peu coûteuse en matériel et a été retenue pour cette étude. L'opérateur

visualise le contact plage-dune sur les images aériennes puis le numérise à l'écran avec un logiciel de numérisation. Ce travail a été réalisé avec le module ArcMap du système ArcGIS 9.3. La ligne digitalisée dépend de la variation de la valeur des pixels de l'image. Le pied de dune est identifiable sur les photographies aériennes (figure 5) car il est fréquemment souligné par le contact entre le sable vif et la végétation (Gaillot et Chaverot, 2001). Cependant, selon le type de falaise dunaire, la distance entre la crête de végétation dunaire et le pied de dune est variable (figure 5). La limite de végétation peut alors introduire une erreur d'interprétation lors de la numérisation.

Lors de la digitalisation, la précision de la ligne extraite résulte de l'expérience du photo-interprète, de son appréciation de la ligne de référence, elle-même étant conditionnée par la résolution, l'échelle et la qualité radiométrique des images. Par conséquent, le trait de côte acquis par cette méthode est approximatif (Moore, 2000, Durand, 2000 ; Boak et Turner, 2005). Afin d'améliorer l'interprétation du contact plage-dune et d'estimer l'erreur de numérisation, les traits de côte ont été numérisés à trois reprises pour chaque date. L'expérience de photo-interprétation que cela génère amène à retenir les lignes de la troisième série, notamment lors de la superposition des trois numérisations.

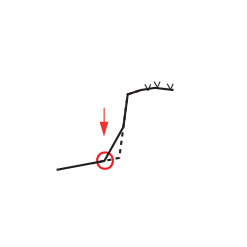


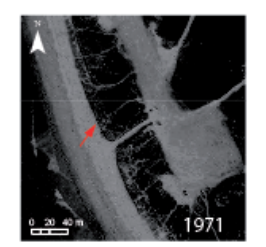
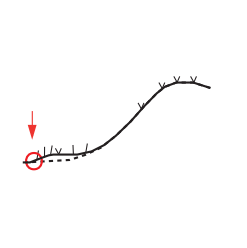


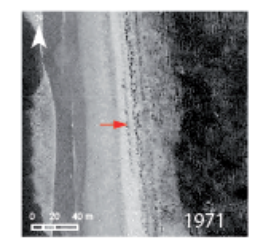
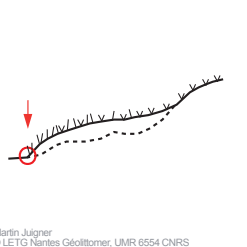

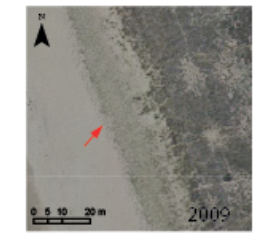
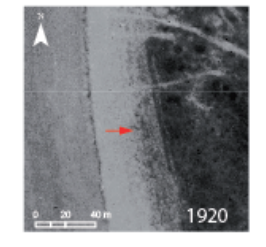
	Profil	Terrain	Orthophoto couleur	Orthophoto noir & blanc
EROSION				
STABILITE				
ACCRETION				

Figure 5 : Identification in situ du trait de côte (flèche rouge) et transposition aux images aériennes

1.2.3.1 Création de la ligne de base et des transects

Le fonctionnement du DSAS repose sur le tracé d'une ligne de base adjacente à la position des traits de côte, côté terre ou côté mer. Dans le cas présent, cette ligne correspond à la limite côté terre d'un tampon de 100 m créé autour de l'enveloppe des traits de côte. Des transects perpendiculaires à cette ligne sont ensuite automatiquement tracés. Les intersections entre les transects et les traits de côte établissent les points de mesure de la distance entre chaque trait de côte. L'écartement des transects perpendiculaires aux traits de côte varie généralement de 10 à 100 m selon

les auteurs (Durand, 2000 ; Gaillot et Chaverot, 2001 ; Morton et Miller, 2005 ; Hapke *et al.*, 2006). L'écart entre chaque transect est ici fixé à 20 m ce qui permet une analyse fine.

1.2.3.2 Statistiques

Les méthodes de quantification de la mobilité du trait de côte ont largement été développées dans la littérature. Dolan *et al.* (1991) présentent une revue des méthodes existantes que Gentz *et al.* (2007) ont actualisée. Les méthodes les plus fréquemment utilisées par les auteurs sont la méthode des points extrêmes et les régressions linéaires (régression linéaire simple, *Jackknife*, régression linéaire pondérée, méthode des moindres carrés etc.). Ces dernières, plus robustes pour le calcul de taux sur le long terme, sont de plus en plus privilégiées par les chercheurs (Morton et Miller, 2005 ; Hapke *et al.*, 2006 ; Gentz *et al.* 2007). Selon Gentz *et al.* (2007), le choix et la qualité de la régression repose sur la difficulté à identifier les marges d'erreur. Cette difficulté tient notamment à la capacité d'évaluer l'erreur liée à l'impact des tempêtes sur la position du trait de côte. Les résultats fournis par les régressions pondérées prennent davantage en considération l'hétérogénéité des marges d'erreurs renseignées pour chaque transect. Les taux obtenus sont ainsi influencés par les erreurs moindres et sont par conséquent plus fiables que ceux calculés avec une régression simple. La pente de la droite de régression exprime un taux d'évolution en m/an. Deux calculs statistiques sont retenus dans cette étude afin de décrire l'évolution du trait de côte sur les 90 années d'étude mais aussi pour observer les différents rythmes de cette évolution. La régression linéaire pondérée (*Weighted Linear Regression* - WLR) a été retenue pour décrire la mobilité du trait de côte sur le long terme, tandis que la description des rythmes d'évolution (résultats périodiques) est calculée avec la méthode des points extrêmes (*End Point Rate* - EPR).

Il convient toutefois de signaler que la question de la validité des résultats calculés avec les méthodes basées sur une régression linéaire se pose dès lors que la dynamique littorale n'est pas linéaire dans le temps et l'espace. Ces méthodes semblent correctes quand l'évolution d'un trait de côte est régulière sur un littoral rectiligne. En revanche leur application sur des secteurs plus sinueux où les tendances évoluent dans le temps peuvent induire une augmentation voire une explosion de la marge d'erreur. La mesure statistique intègre donc dans l'incertitude globale la dynamique naturelle en plus de l'erreur réelle. La régression linéaire n'est plus corrélée avec l'objet de la mesure, contrairement à la méthode des points extrêmes.

1.2.3.3 Estimation de la marge d'erreur

Plusieurs sources d'erreur influencent la précision de la position des traits de côte et par conséquent les résultats des analyses (Crowell *et al.*, 1991 ; Durand, 2000 ; Moore, 2000 ; Fletcher *et al.*, 2003 ; Hapke *et al.*, 2006). Ces erreurs dépendent essentiellement de la qualité et du traitement des données. Cinq erreurs ont été identifiées dans cette cinématique (tableau 2).

L'erreur pixel (i) correspond à la résolution des images. L'erreur d'orthorectification (ii) découle de la procédure d'harmonisation des images. L'erreur RMS calculée ici est la moyenne des erreurs RMS de l'image auxquelles sont rajoutées les erreurs RMS des amers adjacents au trait de côte. Ce calcul permet d'augmenter l'influence des erreurs RMS proches du contact plage-dune. L'erreur de digitalisation (iii) équivaut à la moyenne des écarts maximum enregistrés lors de la multi-saisie des traits de côte. Selon Durand (2000), Fletcher *et al.* (2003) et Boak et Turner (2005), il est nécessaire de tenir compte des variations saisonnières et des variations post-tempêtes du contact plage-dune à travers une erreur appelée ici erreur tempête (iv). Le calcul de cette erreur permet donc de définir l'amplitude (valeur en mètre) de la mobilité du contact plage-dune. Cette valeur témoigne de la dynamique naturelle de l'objet d'étude et intègre la variabilité saisonnière, les évolutions liées aux

épisodes morphogènes ainsi que celles liées aux événements exceptionnels. La valeur de l'erreur estimée ici est égale au recul moyen du trait de côte après le passage de la tempête Xynthia, soit 5,5 m. L'erreur d'interprétation (v) traduit l'approximation de la position de la ligne digitalisée pour les secteurs où le contact plage-dune a un profil en falaise. Sur une vue aérienne, un écart d'environ un à trois mètres est constaté entre un pied de dune éboulisé et un pied de dune éolisé, la différence entre les deux types de profil n'étant pas toujours perceptible sur les images aériennes. L'amplitude moyenne de cet écart, soit deux mètres, est appliquée pour traduire l'erreur d'interprétation sur toutes les images hormis celles de 2010 en raison de leur fine résolution. L'erreur de position globale (résultats sur le long terme, tableau 2) pour un trait de côte est calculée en prenant la racine carrée de la somme des carrés de chaque erreur (Fletcher *et al.*, 2003 ; Hapke *et al.*, 2006).

Lorsque les taux d'évolution sont calculés entre deux dates (résultats périodiques, tableau 2), ces valeurs peuvent être annualisées en calculant la racine carrée de la somme des carrés de l'erreur globale de chaque date, divisé par le temps écoulé entre ces deux dates (Fletcher *et al.*, 2003 ; Hapke *et al.*, 2006).

A.

Année	1920	1950	1971	2000	2001	2006	2009	2010
Erreur pixel	0.20	0.50	0.69	0.50	0.50	0.50	0.20	0.21
Erreur d'orthorectification dont :	6.78	2.00	4.23	1.50	1.50	1.50	1.50	1.84
- Collecte des amers	6.50	2.00	2.00	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50
- Erreur RMS	0.28	-	2.23	-	-	-	-	0.34
Erreur de digitalisation	1.50	1.45	1.12	0.96	1.65	1.87	0.99	0.40
Erreur tempête	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50
Erreur d'interprétation	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	-
Erreur globale (m)	8.88	6.37	6.70	6.14	6.28	6.34	6.13	5.73

B.

Période	1920 - 1950	1950 - 1971	1971 - 2000	2000 - 2010	2000 - 2001	2001 - 2006	2006 - 2009	2009 - 2010
Erreur globale (m/an)	0.26	0.24	0.16	0.32	4.08	0.88	1.39	3.14
Erreur globale (m)	7.68	5.01	4.70	3.16	4.08	4.38	4.16	3.14

Tableau 2 : Synthèse des erreurs sur les traits de côte digitalisés - A. Incertitude long-terme ; B. Incertitude périodique

1.3 Résultats

Les résultats de cette cinématique sur le littoral des Pays de Monts conduisent à la réalisation d'une cartographie de l'aléa érosion côtière de 1920 à 2010. Cette approche permet de représenter la distribution spatiale et temporelle des tendances d'évolution de ce linéaire côtier et d'appréhender les dynamiques sédimentaires historiques et périodiques des différentes unités morphosédimentaires composant ce littoral.

1.3.1 Évolution morphologique historique

Les taux d'évolution obtenus à partir de la WLR sont cartographiés afin de spatialiser la dynamique du trait de côte sur le long terme (1920-2010). Ce mode de représentation synthétise et spatialise les rythmes d'évolution dans lesquels sont intégrés tous les traits de côte digitalisés entre 1920 et 2010 (figure 6). Pour cela, les taux d'évolution calculés avec un intervalle de confiance de 90 % ont

été discrétisés par la méthode de *Jenks*. Selon *Cauvin et al.* (1987), cette méthode repose sur la variance et correspond à la méthode des seuils observés. Adaptée pour discrétiser un grand nombre de valeurs, cette méthode permet de maximiser l'homogénéité des classes et d'accroître l'hétérogénéité entre les classes. Dans le cas présent, la discrétisation en six classes permet d'obtenir un intervalle central interprété comme étant la tendance stable. Un dégradé de couleur est appliqué pour représenter chaque classe sur la carte. A chaque transect est attribuée une couleur, le bleu symbolisant l'accrétion et le rouge l'érosion.

Conjointement est représenté sous forme graphique l'écart-type calculé pour chaque taux d'évolution. Ce mode de représentation permet de spatialiser la marge d'erreur afin de compléter la lecture des résultats. Cette incertitude globale est influencée par l'ensemble des erreurs inhérentes à la méthode ainsi que par la dynamique sédimentaire. On constate ainsi que la marge d'erreur globale est d'autant plus élevée pour les secteurs où la mobilité du trait de côte est grande et surtout non linéaire (inversion de tendance par exemple sur la durée) comme c'est le cas à proximité du Goulet de Fromentine.

Les résultats révèlent ainsi que 26,4 % du littoral montois est en situation érosive depuis 90 ans. Comme le montre la figure 6, les secteurs les plus touchés sont la plage du Pont d'Yeu (\pm transects 371 à 411), la plage du Mûrier (\pm transect 351), la jonction plage des Lays / plage de la Bergère (\pm 731) et la section Nord de la plage de la Grande Côte (\pm 811 à 831). Les taux d'érosion de ces tronçons varient de -0,36 m/an à -0,63 m/an, soit de -32,4 m à -56,7 m sur la période considérée, le maximum étant atteint sur la Plage du Pont d'Yeu.

Les secteurs en accrétion (37,4 % du littoral) se situent principalement sur la plage de la Bergère (\pm transects 751 à 791), de la plage de la Braie à la plage de la Parée Grollier (\pm 511 à 611), sur la plage de la Parée du Jonc et devant le golf de Saint-Jean-de-Monts (\pm 131 à 291). Le taux d'accrétion maximal enregistré est de 1,36 m/an, soit 122,4 m sur la période considérée pour la plage de la Bergère.

Une lecture morphodynamique des résultats amène au constat que le secteur sud Pont d'Yeu est structuré par une continuité entre les zones en érosion, stable et en accrétion. Cette dynamique sédimentaire correspond au principe de fonctionnement classique d'une cellule ou sous-cellule sédimentaire selon les mécanismes d'ablation (à l'amont des courants littoraux dominants), de transport et de dépôt des sédiments (aval). Cette lecture ne semble pas fonctionner pour le secteur nord Pont d'Yeu où l'on constate des dysfonctionnements dans l'enchaînement des zones. Une interprétation de cette dynamique peut conduire à penser que la forte accrétion relevée sur la plage de la Bergère (\pm transects 751 à 791) est alimentée par des sédiments expulsés de la Baie de Bourgneuf au niveau du goulet de Fromentine (transport par les courants de marée dans le contexte du fonctionnement de ce qui peut être interprété comme un delta de marée selon F. Verger, 1968). L'intensité de ces apports diminuant progressivement jusqu'à la limite sud du delta de marée (transect 700 voire 651), l'hypothèse d'une dérive nord-sud expliquerait l'ablation dégressive de sédiments sur l'ensemble de la plage des Lays (\pm transects 631 à 731), puis après transport par la dérive, le dépôt des sédiments induisant une accumulation au nord du remblai de Notre-Dame-de-Monts (\pm transects 511 à 611).

1.3.2 Évolution morphologique périodique

L'évolution périodique (EPR) expose les rythmes de la mobilité historique et récente du trait de côte. La représentation des résultats doit mettre en valeur les rythmes d'évolution afin d'identifier l'intensité spatio-temporelle de l'aléa. Pour cela, la segmentation du trait de côte en plusieurs sous-ensembles permet de calculer la moyenne des taux d'évolution situés au sein d'un même

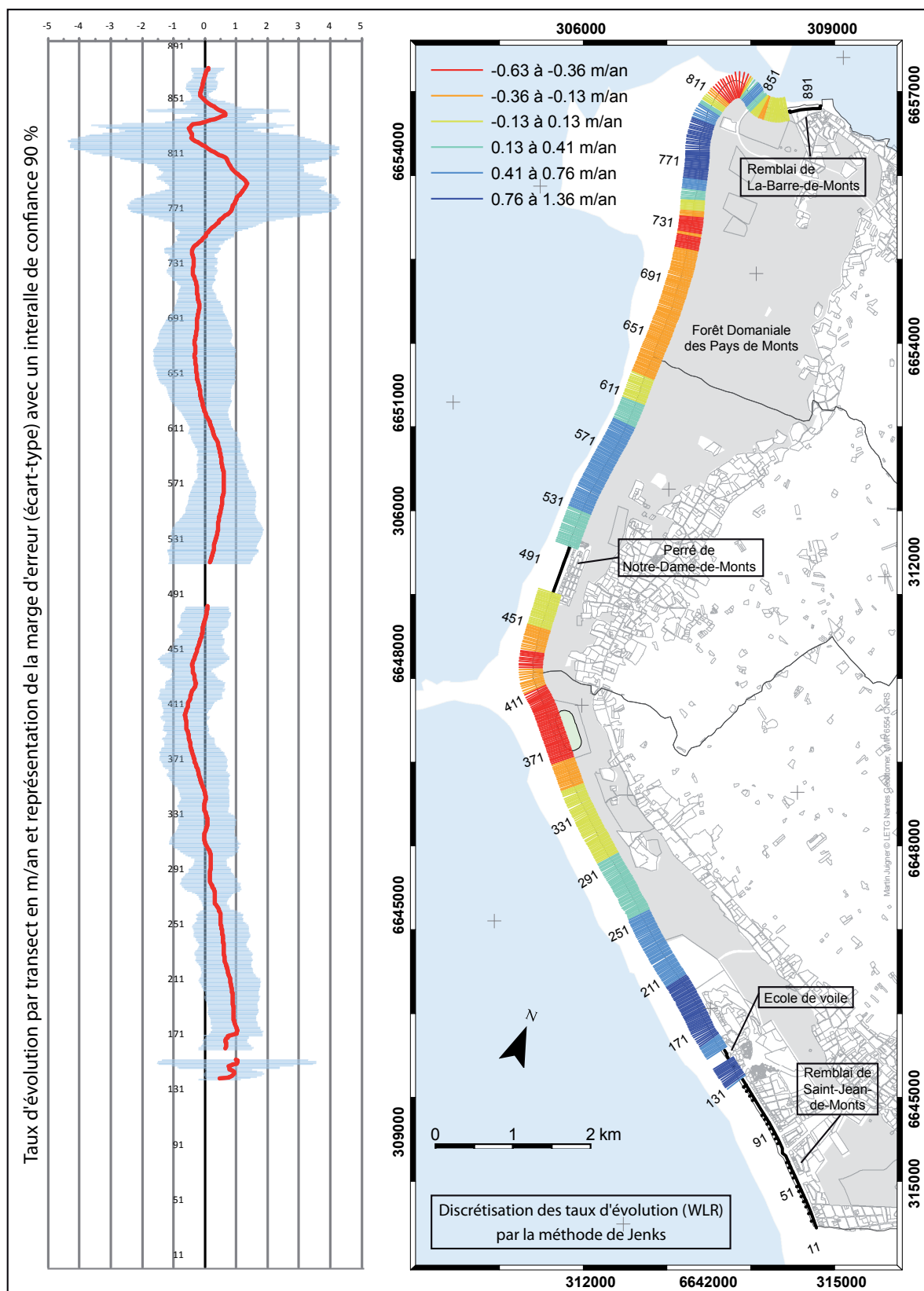


Figure 6 : Cartographie de l'aléa érosion côtière des Pays de Monts sur le long-terme (11 à 891 : numéro de transect créé avec le DSAS ; à gauche, représentation graphique des taux d'évolution, en rouge, et de la marge d'erreur, en bleu)

sous-ensemble, rendant alors possible les comparaisons dans le temps pour un même secteur. Dans cet article, le critère de segmentation repose sur les résultats obtenus à partir de la régression linéaire pondérée. Le linéaire côtier est ainsi décomposé en autant de segments qu'il existe de tendances d'évolution sur le long terme (érosion, stabilité, accrétion et artificiel). Ce découpage a permis d'identifier 18 unités morphosédimentaires sur l'ensemble de la côte (figure 7). A chaque unité correspond un taux d'évolution moyen par période auquel est associée une marge d'erreur. Afin d'améliorer la lecture de l'intensité de l'aléa, les taux ont été discrétisés manuellement en huit classes, l'accrétion étant représentée par un dégradé de bleu et l'érosion par un dégradé de rouge. Pour le long terme, les résultats indiquent que les principaux secteurs en érosion sont les unités 4, 8 et 13. Les secteurs du Pont d'Yeu (UM13) et du nord des Lays (UM 8) sont les deux seuls à être en érosion depuis 1950, les taux d'érosion constatés étant en progression. Entre 2000 et 2010, le trait de côte a reculé en moyenne de 1,29 m par an au Pont d'Yeu. Malgré un pas de temps réduit, la période 2000-2010 se traduit par une amplification de l'érosion côtière, en linéaire touché mais aussi en intensité. Des secteurs historiquement en accrétion (unités 3, 10, 15) sont aujourd'hui en érosion, une intensité croissante ou nouvelle étant constatée pour les unités 2, 5, 9, 12 et 14. Les résultats pour la dernière décennie révèlent que les unités 2, 3, 8 à 10 et 12 à 15 ont connu une érosion plus intense de 2006 à 2009 comparativement à la période 2001-2006. Simultanément, on constate également une forte diminution de l'accrétion pour les unités 6 et 7. Enfin, les taux moyennés traduisent l'impact exceptionnel de la tempête Xynthia (2010) sur l'ensemble du front dunaire avec des valeurs moyennes de recul comprises entre -1,54 m et -8,78

1.4 Conclusion et discussion

La cinématique du trait de côte des Pays de Monts repose sur une méthodologie développée pour les littoraux sableux. Si le choix de la ligne de référence varie considérablement selon les sources bibliographiques, il apparaît que les indicateurs morphologiques et botaniques définissant les types de contact plage-dune présentent l'avantage de bien indiquer la dynamique évolutive du trait de côte. Cette orientation méthodologique prend son sens dès lors que les conditions météo-marines précédant les campagnes aériennes sont connues (dans la mesure du possible, le travail d'inventaire étant limité aux données existantes) ce qui est d'autant plus important pour les littoraux exposés aux aléas météo-marins de forte intensité. La marge d'erreur constitue le principal inconvénient d'une cinématique. Il est indispensable de l'identifier avec précaution afin d'estimer la validité des résultats et de définir les limites techniques d'une telle démarche. Le recours à la régression linéaire pondérée a permis d'appréhender la morphodynamique globale de la cellule sédimentaire sur le long terme mais aussi de structurer la lecture des résultats périodiques en segmentant les 19,5 km de côte en 18 unités morphosédimentaires. La démarche doit aussi veiller à prendre en compte les dynamiques non-linéaires introduisant, quelle que soit la statistique utilisée, un biais en gonflant artificiellement cette marge : ainsi une forte marge dans un secteur à inversion de tendance ne signifie pas pour autant une mauvaise estimation de la dynamique (ex. Goulet de Fromentine). L'analyse de la mobilité du trait de côte permet d'établir le constat que l'érosion du littoral des Pays de Monts est un processus historique qu'il faut considérer sur le long terme afin de comprendre la dynamique actuelle de la côte. Ainsi, les évolutions ne sont pas linéaires dans le temps et présentent différents rythmes d'évolution influencés par la fréquence et l'intensité des tempêtes et la capacité de résilience du front dunaire.

Les travaux en cours de l'Observatoire du littoral des Pays de Monts permettent d'ores et déjà de constater la résilience du front dunaire après le passage de la tempête Xynthia. Cette mobilité souligne la sensibilité du front dunaire face aux événements extrêmes et traduit en temps réel les notions de rythme et d'intensité de l'évolution d'un trait de côte. La connaissance des antécédents

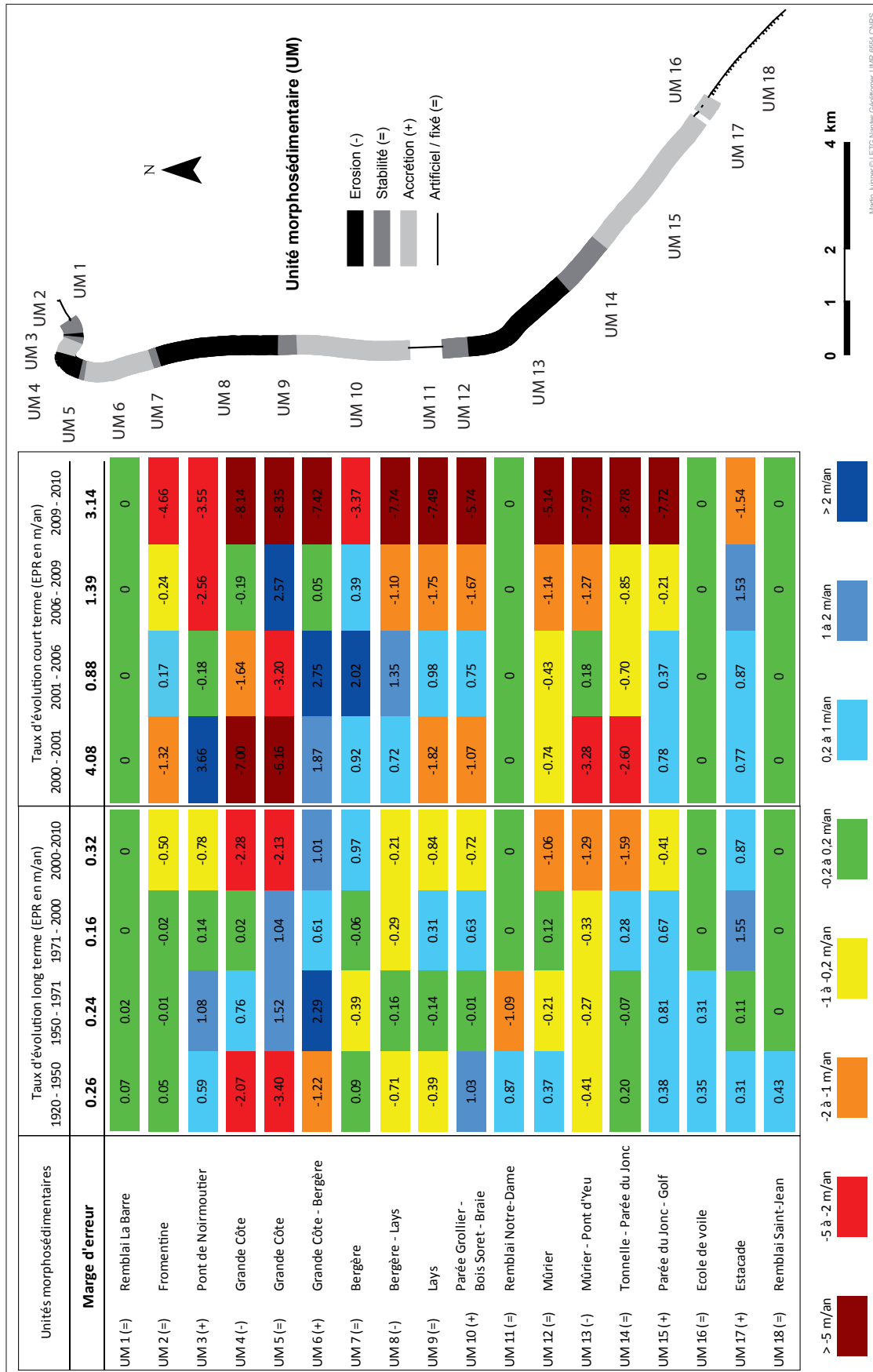


Figure 7 : Représentation tabulaire des résultats périodiques (EPR) : Segmentation du linéaire côtier en unités morphosédimentaires et discrétisation des taux d'évolution moyennés

météo-marins semble donc primordiale afin d'écartier de la cinématique les images aériennes impactées par des événements exceptionnels si l'éventail de données le permet. Cette démarche évite d'introduire un biais supplémentaire. Dans le cas contraire, il est préférable d'identifier la variation de position du trait de côte liée à de tels événements afin de l'intégrer dans l'incertitude globale. La méthodologie mise en place pour cette cinématique et plus spécifiquement le volet consacré à la détection des indicateurs caractéristiques du contact plage-dune ont permis d'établir des préconisations pour l'extraction des traits de côte à partir de clichés aériens. Cette méthode se veut également applicable sur le terrain lors de relevé du contact plage-dune à l'aide d'un GPS ou d'un DGPS.

2. Exploitation de données terrain pour le suivi du trait de côte à court terme

Cette partie est directement inspirée des travaux réalisés dans le cadre de l'OLPM sur la période 2010-2014 (Le Guern *et al.*, 2011, 2012, 2013 ; OLPM, 2015), et plus particulièrement de l'action 4 « Suivis : acquisition des données » et de l'action 5 « Compréhension des phénomènes » du programme mis en place par les partenaires de l'observatoire (BRGM, ONF, IGARUN) dès sa création.

2.1 Définition, acquisition et restitution du trait de côte de l'ONF

L'action du 4 de l'observatoire porte sur l'acquisition de données afin de compléter les manques mis en évidence lors de la création de l'état des connaissances (action 1). Ces données font suite à l'acquisition de l'état initial en 2010, et correspondent à un suivi régulier et événementiel des plages (levé de profils de plage), du trait de côte et du contact plage-dune.

Dans la continuité de l'analyse historique, l'analyse proposée dans cette partie porte uniquement sur l'exploitation de la collection de traits de côte.

Le trait de côte a été levé une fois par an par l'ONF avec un GPS Trimble Geo Explorer XT (précision ± 50 cm). Le premier levé a été réalisé suite à la tempête Xynthia. Il constitue un état de référence particulier compte-tenu de l'intensité de la tempête survenue le 28 février 2010. Le trait de côte est défini soit par la limite de végétation pérenne (secteur stable ou en accrétion), soit par le pied de falaise dunaire dans les secteurs en érosion. Si une avant-dune est précédée d'une microfalaise significative (pluri-décimétrique et inférieure à 1 m), le pied de la falaise sera pris en compte. Enfin, le long des secteurs artificialisés, le trait de côte est le contact entre le haut de plage et le pied des ouvrages de protection. Conjointement à l'acquisition de la position du trait de côte, l'ONF a renseigné dans la table attributaire le type de contact plage-dune le long de segments homogènes. Les huit types identifiés (amorce de banquette, banquette, avant-dune établie, avant-dune plaquée, contact doux, microfalaise, falaise régularisée et falaise vive) renseignent sur l'état et la dynamique du contact plage-dune. Un suivi photographique a également été réalisé pendant les levés et lors des campagnes d'acquisition de profils de plage.

La restitution des levés a été réalisée sous forme de cartes permettant de visualiser d'une part la progression du trait de côte entre deux ou plusieurs dates, et d'autre part d'observer le changement de type de contact plage-dune d'une année à l'autre. Il n'existe à ce jour pas d'évaluation quantifiée de l'évolution du trait de côte des Pays de Monts sur la période 2010-2014.

2.2 Analyse de la dynamique du trait de côte à court terme

Une exploitation des traits de côte levés sur le terrain a donc été réalisée afin de quantifier et spatialiser les tendances d'évolution entre 2010 et 2014 sur l'ensemble du littoral des Pays de Monts (figure 8). La période d'étude est analysée en deux temps correspondant à deux phases marquées par des dynamiques contraires. La première correspond à une phase de cicatrisation post-Xynthia du contact plage-dune (2010-2013) observée sur le terrain (figure 9). Hormis la tempête Joachim (déc. 2011) dont l'impact sur le littoral montois a été de faible ampleur (coefficient de marée 69), cette période n'a pas été marquée par des tempêtes morphogènes. La seconde phase marque une rupture dans le processus de cicatrisation puisqu'elle correspond à l'hiver 2013-2014, caractérisé par une succession de tempêtes et coups de vents morphogènes ayant entraîné de forts reculs dunaires aux Pays de Monts.

Une approche par cycle interannuel (cicatrisation/érosion) a donc été privilégiée suivant les résul-

tats obtenus suite à l'analyse des rythmes historiques d'évolution du trait de côte.

Pour chaque transect espacé de 20 m, une régression linéaire simple (LRR) a été calculée pour la période 2010-2013 (taux en mètres/an) et la distance (EPR) a été mesurée entre les traits de côte 2013 et 2014 (évolution en mètre). Les erreurs globales calculées sont respectivement de $\pm 0,60$ m/an pour la LRR et de $\pm 0,71$ m pour l'EPR. Ces valeurs ne prennent en compte que la précision du GPS (± 50 cm), les erreurs identifiées pour l'analyse long terme n'étant pas transposables pour des acquisitions terrains. Les résultats, discrétisés manuellement autour d'une classe centrale définie par la marge d'erreur (stabilité relative), ont été cartographiés (figure 8). Les bornes de la classe centrale de l'analyse 2013-2014 sont alignées sur les valeurs de l'erreur de 2009-2010 à des fins de comparaisons.

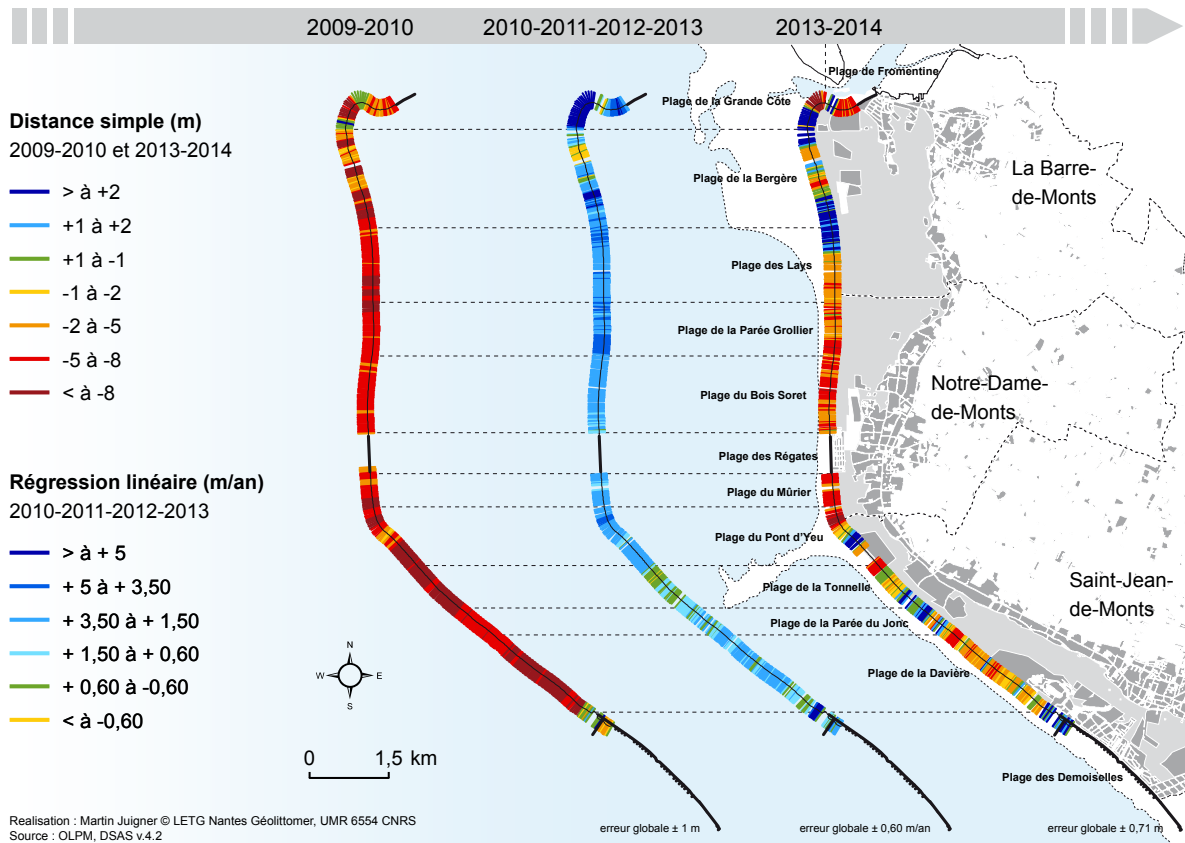


Figure 8 : Mobilité du trait de côte des Pays de Monts à court terme : impact d'événements extrêmes (tempête Xynthia en 2010 et hiver 2013-2014) et période de cicatrisation du contact plage-dune (2010-2013)

La dynamique du trait de côte des Pays de Monts présente des variations spatiales et temporelles à court terme. L'érosion causée par la tempête Xynthia est quasi-généralisée sur l'ensemble de la côte, avec des reculs souvent supérieurs à 5 m, atteignant par endroit des valeurs supérieures à 8 m, notamment au sud du Pont d'Yeu.

La période 2010-2013 est caractérisée par une avancée du trait de côte sur l'ensemble du littoral à l'exception du nord de la plage de la Bergère qui présente une légère érosion et de la plage de la Tonnelie qui est caractérisée par une relative stabilité. La partie centrale du cordon situé au nord du pont d'Yeu et les plages du Pont d'Yeu, de la Parée du Jonc et de la Davière présentent des taux d'accrétion importants, compris entre 1,50 m/an et 3,50 m/an. Les taux d'accrétion les plus importants sont situés sur la plage de la Grande Côte, les vitesses d'avancée enregistrées dépassant souvent 20 m/an (maximum de 25,5 m/an). La cicatrisation post-Xynthia de la côte s'est opérée suite à l'évolution du contact plage-dune. Les falaises vives se sont progressivement régularisées et ont rapidement été devancées sur le haut de plage par une banquette à Agropiron. Les banquettes

se sont progressivement développées à mesure de l'alimentation en sable éolien. Le trait de côte a ainsi à peu près retrouvé sa position *ante*-Xynthia dans les années qui ont suivis la tempête. Selon le rapport de l'OLPM (2015), il a été relevé qu'à partir de 2013, le phénomène d'accrétion constaté depuis le passage de la tempête Xynthia tend à diminuer le long de la côte. La progression du trait de côte et la reconstruction de la dune ont atteint un point d'équilibre.

Le développement des banquettes n'est cependant pas uniforme le long de la côte (figure 9 et 10). Le long de certains secteurs, les banquettes ont peiné à se reconstituer (ex. plage du Mûrier).

tempête Johanna (11/03/2008) ; falaise dunaire



post-Johanna (17/07/2009) ; amorce de banquette



tempête Xynthia (03/03/2010) ; falaise dunaire



post-Xynthia (05/11/2013) ; banquette bien établie



Hiver 2013-2014 (15/01/2014) ; micro falaise



post-hiver 2013-2014 (27/04/2017) ; avant-dune



Figure 9 : Évolution du contact plage-dune devant l'hippodrome de Saint-Jean-de-Monts, plage du Pont d'Yeu (Source : OLPM).

Comparativement, la succession de tempêtes et coups de vent de l'hiver 2013-2014 a moins marqué le trait de côte que la tempête Xynthia (figure 8). L'impact de cette période agitée sur le trait de côte est contrasté du fait de la variabilité dans les tendances observées. Les secteurs les plus touchés par un recul côtier sont les plages de Fromentine, de la Grande Côte, de la plage des Lays à la plage du Pont d'Yeu, et la plage de la Davière au sud. Ces secteurs enregistrent des valeurs de recul généralement comprises entre -2,5 m et -7,5 m (moyenne de 5 m et écart-type de 2,5) avec des disparités puisque les secteurs du Pont d'Yeu (valeurs supérieures à 8 m) et de la Grande côte (valeurs supérieures à 15 m) ont été particulièrement touchés. Certains secteurs semblent avoir été relativement épargnés puisque une accrétion a été relevée au nord des Pays de Monts (jonction plage des Lays/plage de la Bergère et sud de la Grande Côte) et au sud (centre de la plage du Pont d'Yeu, plage de la Parée du Jonc et nord de la plage des Demoiselles). Selon le rapport de l'OLPM (2015), l'impact de l'hiver 2013-2014 est relativement modéré sur la côte montoise en comparaison

avec les littoraux de Noirmoutier, ou surtout, de Charente-Maritime. Le type dominant de contact plage-dune relevé à la sortie de l'hiver est la micro-falaise, certains secteurs étant caractérisés par une falaise vive. Le rapport précise également que les banquettes ont été par endroits fortement érodées, jouant ainsi pleinement leur rôle d'amortissement.

Enfin, il convient de noter que le recul côtier a localement touché le cordon de 1^{ère} ligne le long de secteurs caractérisés par un degré de cicatrisation faible (figure 10). Dans ces cas, la zone tampon que constitue l'avant-dune n'a pas pu jouer son rôle d'amortissement de l'énergie des houles.

mars 2010 (tempête Xynthia)



novembre 2013 (post-Xynthia)



avril 2011 (post-Xynthia)



février 2014 (Hiver 2013-2014)



novembre 2012 (post-Xynthia)



Figure 10 : Degré de cicatrisation faible du contact plage-dune et érosion du cordon de 1^{ère} ligne à côté du poste de secours de la plage du Mûrier. L'ouvrage a été retiré après l'hiver 2013-2014 (Source : OLPM, Jean Magne). Notez l'emplacement du profil de dune sur le panneau nord du poste de secours.

L'analyse de la période 2010-2014 illustre à fine échelle temporelle les rythmes mis en lumière par l'analyse long terme. Pour autant, il n'a pas semblé opportun de réaliser une comparaison entre les résultats long terme et court terme compte tenu de la différence entre les pas de temps étudiés. La dynamique du trait de côte est animée par des cycles avancée/recul que seule l'acquisition de données en continu permettra de comprendre, voire d'anticiper. Face au manque actuel de connaissances sur les rythmes d'évolution, incluant la capacité de cicatrisation des dunes face aux événements extrêmes, l'exercice de projection du trait de côte vers des horizons futurs tel que préconisé par les PPRL et la SNGITC doit être réalisé avec grande prudence.

2.3 Limites et préconisations pour l'analyse par transects

L'utilisation de transects permet donc l'analyse simultanée d'une collection de traits de côte levés sur le terrain. La méthode apporte des résultats dans l'ensemble satisfaisants, l'exhaustivité de ces résultats dépendant essentiellement de deux paramètres.

D'une part, un écartement réduit entre les transects densifie le nombre de mesures et améliore la connaissance de la dynamique du trait de côte. Pour rappel, Dolan, Fenster et Holme (1992) précisent en conclusion de leur travail qu'un pas de 50 m fournit une excellente estimation des taux d'évolution du trait de côte entre chaque transect. Ce constat est toutefois à nuancer par le fait qu'il s'agit d'une technique d'échantillonnage. Aucune analyse n'est réalisée entre les transects. Ainsi, des érosions intenses, très localisées, liées à la présence d'aménagements sur le haut de plage ne sont pas forcément détectées. C'est le cas notamment de l'érosion prononcée du cordon de 1^{ère} ligne présentée dans la figure 10. Une solution consisterait à raisonner en surfaces gagnées ou perdues plus qu'en distances (une application est présentée dans le chapitre 4).

D'autre part, l'exhaustivité est liée à la continuité/discontinuité spatiale des données acquises (levés terrain et traits de côte photo-interprétés). Une couverture continue assure une évaluation homogène de la côte. Une couverture discontinue de la donnée sur un secteur à une date donnée implique que l'analyse ne tiendra pas compte de cette année dans la cinématique. Il y aura donc un trou dans la série temporelle. Dans ces cas précis, il convient de retirer de l'analyse les transects concernés. Sans cela, le calcul des vitesses d'érosion serait faussé entre un transect disposant d'une collection de traits de côte complète et un transect disposant d'une collection partielle. Les discontinuités relevées aux Pays de Monts se situent essentiellement sur les débuts et fins de levés et /ou numérisation, soit à chaque interruption de l'indicateur relevé (ex. artificialisation, accès piéton). L'analyse présentée dans la figure 8 porte sur un total de 623 transects, après retrait de 36 transects n'intersectant pas l'ensemble de la collection de traits de côte. Une acquisition continue et homogène (niveau de détail équivalent entre les acquisitions d'une année à l'autre) permettrait d'améliorer la qualité et la précision des résultats, apportant ainsi une connaissance fine de la réponse des systèmes dunaires face aux tempêtes morphogènes.

Conclusion du chapitre 2

L'évaluation de la mobilité historique et actuelle du trait de côte des Pays de Monts a été réalisée suivant une méthode adaptée pour les côtes sableuses. Une définition synthétique du trait de côte basée sur le type de contact plage-dune a été présentée et appliquée. La limite de végétation est retenue le long des secteurs en accrétion (banquette, avant-dune), tandis que le pied de la structure surplombant le haut de plage caractérisera les secteurs en érosion (pied de dune le long des falaises ou micro-falaises dunaires) et les secteurs artificialisés (pied de l'ouvrage de protection). Cette définition présente l'avantage (i) d'être commune pour une acquisition par photo-interprétation et une acquisition sur le terrain, et (ii) de permettre une acquisition en continu malgré les variations du type de contact plage-dune. Toutefois, une réserve peut être émise sur le nombre de faciès identifiés dans la cinématique long terme. La définition proposée par l'ONF telle que présentée dans l'analyse court terme apparaît comme suffisamment élaborée pour décrire synthétiquement tous les types de contact plage-dune.

L'évaluation de la marge d'erreur a été calculée et adaptée en fonction de la méthode d'acquisition des traits de côte. La formule appliquée est la même dans les deux cas (PIAO et acquisitions terrain).

La diversité des méthodes de calculs de la mobilité du trait de côte a permis d'envisager une exploitation de l'information à différentes échelles temporelles. Concernant l'évolution historique, une évaluation globale a été menée. L'agrégation des transects présentant une tendance historique similaire (accrétion, stable, érosion) a permis de segmenter la côte sur la base d'un critère unique discriminant, offrant la possibilité de réaliser des synthèses de l'évolution périodique pour chacune des 18 unités morphosédimentaires identifiées. Cette méthode a révélé (i) différents rythmes d'évolution du trait de côte, (ii) induisant par conséquent une évolution historique non linéaire (successions de tendances d'accrétion et d'érosion, et variations de l'intensité des tendances). Ce résultat a été pris en compte pour l'analyse court terme. Deux principales phases d'évolution du trait de côte ont été déterminées au préalable suite aux observations terrain menées par l'observatoire. Deux analyses ont été menées distinctement avant d'être cartographiées sur le même support pour réaliser une lecture transversale des tendances spatiales et temporelles de la dynamique du trait de côte à partir de l'événement Xynthia.

À terme, ces deux analyses renseignent sur la mobilité historique et court terme du trait de côte. Si certains secteurs sont en situation érosive sur le long terme (ex. plage des Lays et du Pont d'Yeu), ceux-ci présentent une capacité de cicatrisation importante après des événements extrêmes. Les méthodes de gestion souple du trait de côte (pose de fil lisse) préconisées et mises en place par l'observatoire ont permis d'accompagner la reconstitution des banquettes à Agropiron puis le développement d'avant-dunes colonisées par l'Oyat le long de ces secteurs, limitant ainsi le recul côtier notamment au droit de secteurs à enjeux (hippodrome de Saint-Jean-de-Monts).

Si l'approche par transect intègre bien une collection de traits de côte (chaque trait de côte est intersecté régulièrement par les transects), celle-ci présente toutefois des limites en matière d'exhaustivité de l'analyse spatiale. Il a été montré que la méthode n'a pas permis de détecter la faible résilience d'un secteur, lequel a vu son cordon de 1^{ère} ligne reculer fortement suite aux tempêtes de l'hiver 2013-2014. Ce constat rappelle que l'approche par transect est avant tout une méthode d'échantillonnage. Toute dynamique située entre deux transects n'est pas analysée. L'utilisation d'une approche permettant d'intégrer des surfaces d'érosion/accrétion permettrait une analyse exhaustive de la dynamique du trait de côte. Cela permettrait également d'intégrer les enjeux sur-

faciques (ex. poste de secours) pour détecter une exposition éventuelle à l'érosion.

Enfin, des préconisations ont été formulées pour homogénéiser les analyses. D'une part, il convient de ne pas trop espacer les transects pour obtenir une vision la plus fine possible de la dynamique. Une valeur de 50 m maximum semble raisonnable suivant les résultats de Dolan, Fenster et Holme (1992). D'autre part, les traits de côte devraient, tant que possible, être acquis de manière continue le long de la côte, tant par PIAO que sur le terrain. Toute discontinuité non nécessaire tend à diminuer l'exhaustivité de l'analyse. Une acquisition homogène est également préconisée en ce sens qu'une acquisition réalisée avec différents niveaux de détail sur le terrain, ou avec une échelle d'affichage non constante en photo-interprétation, aura pour conséquence d'amplifier ou réduire les évolutions mesurées.



Chapitre 3

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)



Résumé français du chapitre 3

Les zones côtières sont exposées aux aléas naturels dans un contexte de changement global et de concentration des activités humaines sur le littoral, ce qui justifie l'intérêt de l'évaluation des territoires à risque. Ce chapitre propose une méthode reproductible pour identifier les territoires à risque d'érosion basée sur la création d'un indice d'exposition. Une évaluation de l'exposition du bâti au recul du trait de côte est menée sur 350 km de côte le long du littoral du centre atlantique français (région Pays de la Loire).

La segmentation de la bande des 100 m à partir du trait de côte est réalisée à l'aide de boîtes de 30*100 m distribuées sur l'ensemble du linéaire côtier régional. Cette approche a été retenue pour sa capacité à intégrer et combiner tout type d'information géographique. Trois indicateurs sont calculés au sein de chaque boîte : (i) la distance trait de côte-bâti minimum, (ii) l'emprise du bâti de 1^{ère} ligne et (iii) l'érosion côtière entre deux dates (1950-2011). La combinaison de ces indicateurs dans les boîtes mène à la création d'un indice d'exposition.

Ainsi, cette approche spatiale fournit une méthode reproductible pour améliorer la connaissance synthétique du risque d'érosion en région Pays de la Loire. L'ensemble des situations à risque est détecté à échelle 1/5 000, ce qui est un progrès important. À échelle des Pays de la Loire, cet article révèle qu'environ 5 162 m de côte sont caractérisés par la présence de bâti dans la bande des 100 m situé en arrière de zones en érosion. 228 emprises de bâti de 1^{ère} ligne, équivalents à une surface totale de 25 029 m², sont dans une position exposée. Une exposition très élevée est détectée sur 695 m le long du littoral régional. À échelle municipale, le territoire le plus exposé est la commune de la Tranche-sur-Mer. Une exposition du bâti a été enregistrée sur 2 359 m, distribués le long de 13 zones. D'un autre côté, la zone la plus exposée est située sur la commune de Saint-Hilaire-de-Riez. Elle est caractérisée par un fort recul côtier (érosion moyenne de -0,73 m/a), une faible distance trait de côte-bâti (distance moyenne de 39,26 m) et une forte emprise du bâti de 1^{ère} ligne (moyenne de 345,03 m²), le tout concentré sur un linéaire de 238,3 m. Cette nouvelle méthode peut détecter toutes les expositions, permettant ainsi d'anticiper les gestions de crise à travers le déploiement d'un véritable système d'alerte opérationnel aidant pour la prise de décisions éclairées.

La précision de cette étude repose sur les données génériques utilisées et sur la segmentation en boîte de 30*100 m. Cette résolution spatiale mène à des résultats plus fins que les études antérieures. En effet, l'information disponible concernant l'érosion côtière aux échelles régionales et nationales en France est actuellement développée au 1/100 000. Cette échelle est fonctionnelle pour une compréhension globale des phénomènes et pour l'élaboration de cartes d'aléa à petite échelle. Cependant ces résultats ont besoin d'être affinés pour avoir une vision plus fine des systèmes côtiers pour la création d'initiatives locales de gestion de la part des gestionnaires. Cette méthode détecte des zones côtières variablement exposées (selon quatre degrés), ce qui permet d'orienter les gestionnaires sur le terrain pour réaliser des évaluations précises des cas d'exposition détectés afin de mettre en place des mesures de prévention (rechargement et/ou reprofilage de dune, réaligement de défenses dures). Comme l'information est créée à l'échelle la plus fine, il est aisé de la synthétiser, sur demande, à des niveaux supérieurs par agrégations successives (commune, EPCI, département, région). À terme, cela pourrait permettre de prioriser et planifier l'action publique pour la gestion du risque et concrétiser des propositions de mesure sur le long-terme telle que la relocalisation des biens et des activités, si nécessaire.

Cette approche pourrait conduire à une actualisation des indicateurs pour observer la mobilité du trait de côte avec un pas de temps plus court ainsi que des évolutions de l'urbanisation dans la

bande des 100 m. Elle pourrait améliorer la définition et la localisation des territoires à risque dans le contexte d'un observatoire régional du trait de côte et des risques côtiers.

Enfin, la segmentation spatiale utilisée dans cet article peut être considérée comme un support d'analyse spatiale pour l'étude de problématiques côtières basée sur la combinaison d'indicateurs. En France, les territoires côtiers, et particulièrement les côtes basses meubles, sont exposés à trois types d'aléas (l'érosion côtière, la submersion marine et la migration dunaire). Aussi, la surveillance de l'état de conservation des cordons dunaires est une préoccupation actuelle pour les gestionnaires. L'évaluation de leur sensibilité pourrait être mise en perspective avec l'exposition potentielle des enjeux situés en zone basse.



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, novembre 2017, 148, pp. 40-52)

Martin Juigner¹, Marc Robin¹, Françoise Debaine¹, Florian Hélien¹

Abstract

Coastal zones are exposed to natural hazards in the context of global change and the concentration of human activities, which justifies the interest in assessing at-risk territories. This paper proposes a reproducible method to identify the erosion risk territories on the basis of an exposure index creation. An assessment of the building exposure to shoreline retreat is conducted along 350 km of the Atlantic French coast (Pays de la Loire regional administrative division) including rocky coasts, coastal barriers and sand spits, estuaries, bays, and coasts with protection structures. The segmentation of a 100-m landward strip is carried out with 30*100 m boxes. Three geoindicators are computed within each box: (i) the shortest shoreline-building distance (ii) the building footprint of the first row (iii) the coastal erosion along sandy coasts. The aggregation of these geoindicators within each box leads to the creation of an exposure index. Thus, this spatial framework provides a reproducible method to improve the synthetic knowledge of the erosion risk in the Pays de la Loire Region. The whole of the risk situation is detected at 1/5000 scale, which is original and significant progress. The accuracy of this study is due to the generic data used and the 30*100 m segmentation. This spatial resolution leads to finer results than previous studies. This new method can detect all the exposures in order to anticipate crises management through the deployment of a real operational alert system.

Keywords

Coastal erosion; building; exposure index; at-risk territory

¹ Laboratoire LETG-Nantes Géolittomer, UMR 6554 CNRS
Université de Nantes, Campus Tertre, BP 81227, 44312 Nantes Cedex 3, France
Martin.Juigner@univ-nantes.fr ; Marc.Robin@univ-nantes.fr ; Françoise.Debaine@univ-nantes.fr ; helen_florian@yahoo.fr

1. Introduction

Human settlement in coastal zones is a well-known process throughout history (Small and Nicholls 2003). Since the last century, the concentration of human population, settlements and socioeconomic activities has grown significantly at a global scale and contributed to increasing the anthropic pressures on coastal environments (EAA 2006). In many poor countries, a large proportion of urbanization is taking place in low-elevation coastal zones that are highly vulnerable to natural disasters and are expected to experience the greatest impact of climate change (Balk *et al.* 2009). In most rich countries, such as in Europe, specific forms of urbanization have emerged related to the development of tourism (Dowling and Pforr 2009). In addition to ports and coastal villages, the proliferation of resorts and residential housing has contributed everywhere to increasing built-up areas (Dickson *et al.* 2012, Romano and Zullo 2014) including the French coastal zone (Le Berre *et al.* 2016).

The French coastal strip concentrates around 10 % of the population and represents 4 % of the national territory; the building density is 176 homes per square kilometer on the coast against 53/km² for metropolitan France (Zaninetti 2006). After World War II until 1975, urban development in the coastal zone greatly increased because of an absence of restrictive legislation (Le Berre *et al.* 2016). Since 1975, the management of the French littoral zone has included two general trends: “littoralization” (i.e. the movement of human populations and activities towards the coast) and the natural heritage coastal preservation policy, underpinned by the creation of the Coastline and Lakeshore Conservancy in 1975 and the Coastal, Development, Protection and Enhancement Act (the Littoral Law) in 1986 (Deboudt, Dauvin and Lozachmeur 2008). In order to control coastal urbanization, the Littoral Law enacted the enforcement of a 100-m landward strip from the coastline where construction is forbidden. Thus, any extension of the urban perimeter must be a continuity of the initial urban area. This restriction also led to the provision of a buffer zone that protects urban areas from coastal risks (Le Berre *et al.* 2016). On the basis of the growing concentration of people and economic activities on a coastal strip that is subject to shoreline retreat, Deboudt (2010) describes the French coastal zone as an at-risk territory.

About 70 % of the world’s sandy beaches experience erosion (Bird 1985). This is controlled by long-term processes such as Sea Level Rise (SLR) and episodic processes such as severe storms (Nicholls and Cazenave 2010; Castelle *et al.* 2015). The projected impacts due to climate change on the SLR, wave climate and storm surges could increase shoreline recession rates (Leatherman, Zhang and Douglas 2000; Nicholls and Cazenave 2010). The prospect of this recession of sandy coasts and higher sea levels exacerbates the risk that built-up areas will be exposed to natural hazards (Deboudt 2010).

Numerous studies have assessed shoreline change (Del Rio, Gracia and Benavente 2012; Jackson, Alexander and Bush 2012; Moussaid *et al.* 2015; Dada *et al.* 2016; Mann and Westphal 2016). At the European scale, the EUROSION project was conducted in 2004 to build a Geographical European Coastal Erosion Database (Lenôtre *et al.* 2004). Based on the first 1990 CORINE Coastal erosion project, the results describe the coasts with many criteria such as morpho-sedimentology, evolutionary trends, the presence or not of coastal defenses, the coastline geology and the data status and their availability. This database was the first source of coastal erosion knowledge in France at a national scale. More recently, the Ministry of Ecology, Sustainable Development and Energy has developed a homogeneous NICE (National Indicator of Coastal Erosion) to establish a national coastal erosion map and identify areas of high, average and low erosion (Ministère de l’Écologie, du Développement durable et de l’Énergie 2016). This initiative is a fundamental

component of the French national integrated coastline management strategy (2012-2015) and has contributed significantly to improving knowledge about coastal erosion in France.

In order to compute the risk index of coastal spatial objects, GIS tools such as Qgis and ArcGIS® 10.X ESRI can easily combine raster or vector datasets representing hazard variables and stake variables whether they are (i) inside an area or a buffer aligned on either side of the coastline and cut into more or less wide coastal stretches, which is the most common (Fattal *et al.* 2012; Arkema *et al.* 2013; Romano *et al.* 2017; Narra *et al.* 2017) or (ii) inside a regular grid taking into account diffusion process dynamic modeling (Valdor *et al.* 2016) or not (Marignani *et al.* 2017).

Moreover, a methodology has been developed and tested to combine the hazard assessment and the presence of non-human stakes in a defined segmented coastal strip at a very fine scale, taking into account local coastal geometry and accurately spatializing geoindicators with regard to the organization of the coastal strip (Debaine and Robin 2012).

In this paper, we develop and automatize a simple generic methodology which (i) is based on an automatic fine spatial segmentation of the coastal strip (ii) assesses and maps the building exposure to shoreline retreat (iii) provides, without scale limitation, statistics from a local to a global scale to obtain a more accurate and reliable knowledge of the risk.

Three geoindicators are computed and spatialized (i) the shortest shoreline-building distance (ii) the building footprint of the first row (iii) and the shoreline change analysis. Their aggregation inside oriented spatial units (boxes) according to the local coastal geometry leads to the creation of the exposure index, which is ranked into four degrees of exposure. Finally, the building exposure to shoreline retreat is mapped from the municipality level, which is the smallest administrative level in France, to the regional level. Such a methodology can provide public administrations and local communities an easy-to-use instrument for Integrated Coastal Zone Management (ICZM).

2. Regional setting

The study area is located on the mid-Atlantic French coast and is generally orientated along a NW-SE axis (figure 1). Situated on the meridional margin of the Massif Armoricaïn, the coast included between the Bay of Pont Mahé and les Sables d'Olonne is characterized by a succession of moles and rocky cliffs (including the islands) and marshes barred by dune systems, bays and estuaries because it is part of an ancient massif 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 Bassin Aquitain. It is characterized by the presence of a large low-lying area occupied by the largest French Atlantic wetland (the Marais Poitevin) whose western border is composed of large barrier systems and sand spits. The regional coastline is subjected to a mesotidal and macrotidal semi-diurnal tide and is exposed to the marine weather influences of the North Atlantic. From 1999 to 2010, the winds recorded in Noirmoutier Island and Yeu Island came from the WNW and SW sectors, with the more violent winds mainly from the W and SW sectors (Juigner *et al.* 2013). The main orientation of the waves is W to NW and the higher swells come from the W and SW sectors (Geos-DHI 2008). The stormy conditions occur mainly from November to March with a SW orientation. The exposed coastline of the Pays de la Loire Region includes 112.2 km of sandy coast, 110.8 km of rocky coast and 135.2 km with coastal defense structures. According to the results of the NICE (Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie 2016), the rocky coast has imperceptible sensitivity to the shoreline retreat in the long term in this coastal area (the whole change rate is lower than ± 0.35 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). On the other hand, the sandy coasts are affected by strong long-term

trends in shoreline position changes (from $+5.1 \pm 0.35$ m/y to -1.5 ± 0.35 m/y).

In the Pays de la Loire Region, building development is a historical process as described by Pottier (2007) and Chauveau *et al.* (2011). The second half of the 20th century corresponded to a period of strong growth in the urbanization of the coastal zone of Pays de la Loire and, in recent times, buildings represent a significant part of the land cover. In 2007, 23 % of the coastal municipality area of the Region was urbanized or devoted to the urbanization process (DREAL 2007). The building distribution shows a marked difference between the 44 coastal municipalities as shown in Figure 1. Given the diversity of the spatial configurations between the coast types, the presence-

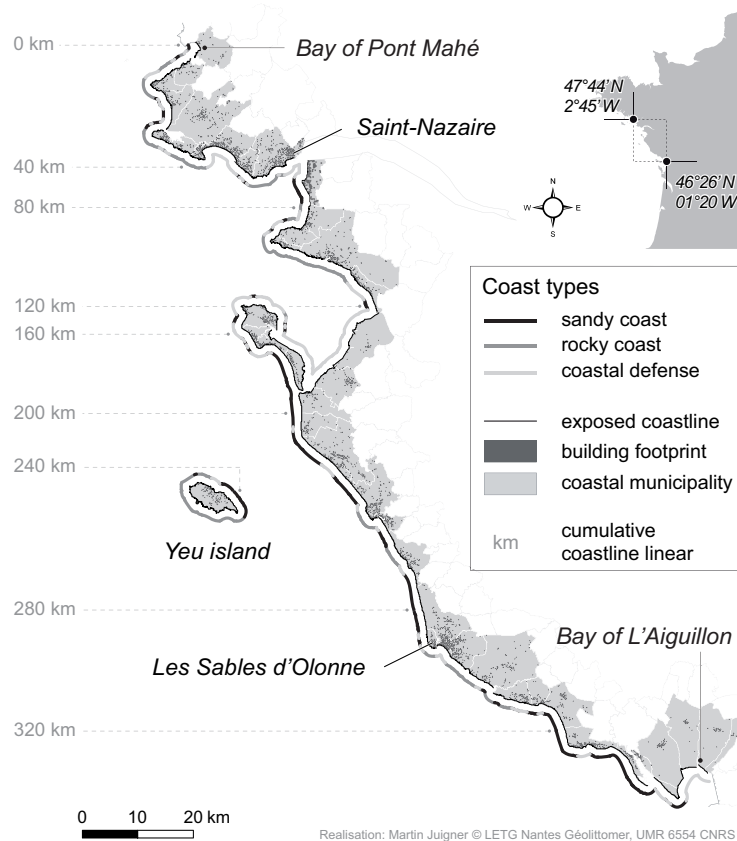


Figure 1 : Location map of the Pays de la Loire Region along the French Atlantic coast

absence of urbanization and the shoreline dynamics, this study site is of great interest to apply and test the method proposed in this paper.

3. Material and method

3.1 Creation of the spatial units

The data used to compute the geoindicators are polygon and polyline types (see Table 1). These have different spatial characteristics: the shoreline is considered to be a spatially continuous longshore polyline while the buildings are defined as discontinuous polygons with a heterogeneous longshore and cross-shore spatial distribution. This geographic information cannot be integrated and aggregated without a segmentation of the coastal strip. Spatial segmentation of the coastal

zone with units adapted for the index was carried out in this study (figure 3). The method developed here is based on the previous works of Barone *et al.* (2009), Debaine and Robin (2012) and Olsen, Young and Ashford (2012). It consists of a continuous and regular segmentation of the coast into discrete polygons (i.e. named boxes), which are spatial units for the fine observation

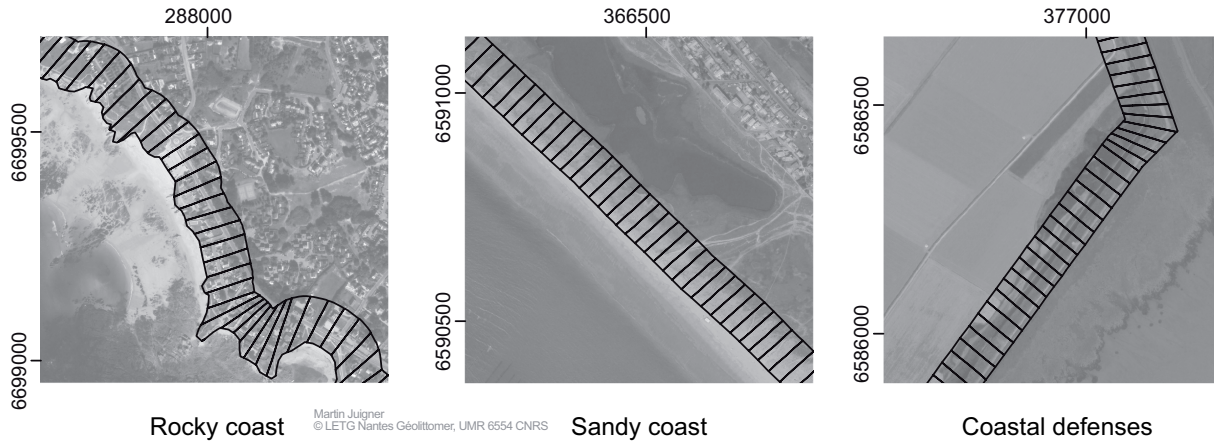


Figure 2 : Creation of the boxes (30*100 m from the 2011 shoreline) along the rocky coasts, the sandy coasts and the coastal defenses (aerial images: Ortho Littorale V2 - Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie)

of local processes. Each of them is built up from four limits: two cross-shore transects and two alongshore limits (one seaward and one landward). The size of these units is regulated by the constant value of the width and depth of the polygons.

A baseline corresponding to the shoreline is used for the segmentation. In this study, the shoreline proxies (Boak and Turner 2005) are identified as the dune vegetation limit or dune toe limit (where there is no vegetation) for sandy coasts, the base of the cliff or the seaward vegetation limit of the cliff top (where there is no discernible cliff base) for rocky coasts, and the base of the protection structure where there are coastal defenses (figure 2). The shoreline is digitized on 2011-2012 aerial images (Table 1) at the 1/3 500 scale with ArcGIS 10.2 software. Cross-shore transects at 30-m spacing are created along the baseline. Alongshore limits correspond to a 100-m buffer around the baseline. A set of 30*100 m landward boxes is deployed along the entire coast. Each box is characterized by a unique identifier based on a continuous numbering from north to south including islands, and the length of the shoreline computed within each box. This step is performed by applying a specific tool developed using the Python program processed in the ArcGIS 10.2 environment.

3.2 Coastal classification

The coast is characterized according to the typology approved by the national integrated coastline strategy i.e. sandy coasts, rocky coasts and coasts with coastal defenses. The data on coast types (Table 1) are provided on a website, which may be viewed up to a scale of 1/100 000 (Table 1). Sometimes when downloaded data are viewed on a background map or aerial photograph at a scale of 1/5 000, inaccuracies may occur locally which require manual editing of the polylines concerned to correct inadequacy due to a scaling level change in two cases: (i) updating a new attribute when a coast type section appears in the middle of another coast type i.e. a short sandy coast section within a rocky coast or vice versa or (ii) adjusting spatially when going from one type to another i.e. changing from a sandy to a rocky coast. This information is assigned to each box.

Data type	Data source	Resolution	Data use
Raster			
2011-2012 aerial images	Ortho Littorale V2 - Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie	0.5 m	Shoreline digitization
1950-1952 aerial images	BD ORTHO® Historique (RGE®) - IGN	0.5 m	Shoreline digitization
Vector (Pg = polygons; Pl = polylines)			
Building (Pg)	BD TOPO® (RGE®) - IGN	1 / 5 000	Stakes location
Administrative limits (Pg)	BD TOPO® (RGE®) - IGN	1 / 5 000	Map
Coast types (Pl)	NICE ©CEREMA/MEDDE - Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie Accessed from http://cartelie.application.developpement-durable.gouv.fr/	1 / 100 000	Coastal classification

Table 1 : Presentation of the data used

3.3 Computation of the geoindicators for exposure assessment

Geoindicators are proxies of environmental changes. In the coastal zone, they are used to evaluate potential risks and damages (Bush *et al.* 1999). In this paper, the building exposure is defined as the presence of built-up areas at the back of coastal segments affected by significant erosion, which could also be mentioned as urban pressure (Romano *et al.* 2017) inside such segments. Three geoindicators are selected (figure 3) to evaluate the coastal erosion hazard and the presence of stakes, corresponding here to buildings on the 100-m landward strip.

3.3.1 Shortest shoreline-building distance

The presence of non-human stakes potentially threatened by shoreline retreat is analyzed with a first variable assessing the building proximity to the recent shoreline (figure 3).

The building layer (available at a national scale), where each polygon represents the spatial extent of a building, and the 2011 shoreline are used. The shortest shoreline-building distance is computed per box by applying a Python program processed in the ArcGIS 10.2 environment along the regional coast.

This geoindicator highlights the presence/absence of buildings and gives a first information level about the location of the stakes within the 100-m strip.

3.3.2 Building footprint of the first row

The area of the ground floor footprint of the buildings is the second geoindicator proposed here

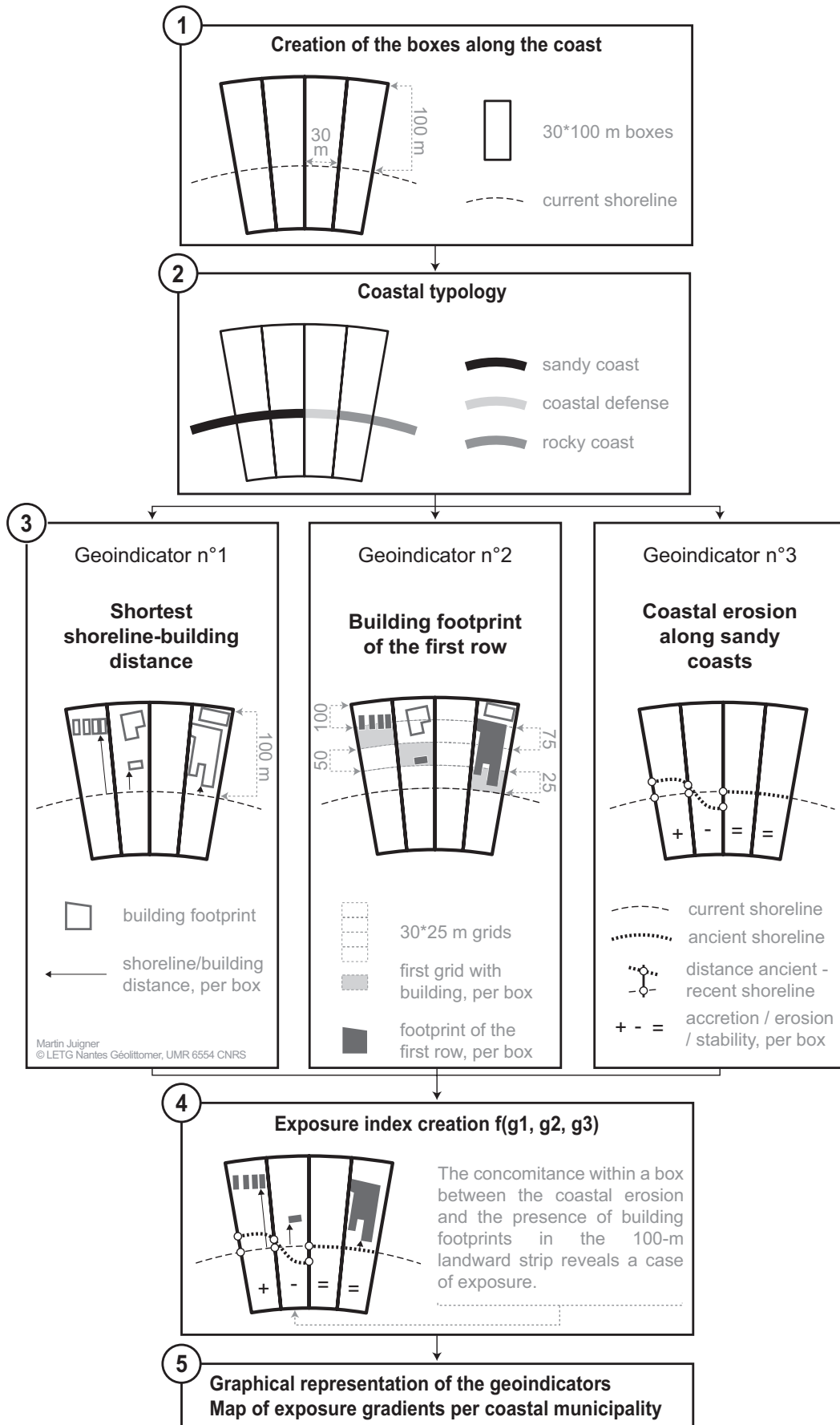


Figure 3 : General methodological chart

to have a fine metric per box about the quantity of the stakes potentially exposed to the shoreline retreat.

The distribution of the buildings within the box is highly variable (see the examples given in figure 3). It is necessary to develop a generic geoinicator to integrate all the spatial configurations and therefore the diversity of the cases of exposure. Thus, the building areas set back from the nearest buildings to the shoreline will not present the same exposure as the frontal buildings owing to their greater distance from the shoreline. The solution proposed here is to distinguish two sets of buildings: (i) the buildings located in the first row (or nearest row) facing the shoreline dynamics and (ii) those set back from this first line. The buildings in the first row are those included in the computation of the shortest shoreline-building distance; only this set is used to compute the building footprint geoinicator.

The process used to compute this geoinicator requires the creation of the 30*25 m grids to subdivide the boxes (figure 3). Thus, each 30*100 m box is composed of a mosaic of four grids identified with a box identifier and a depth value (25, 50, 75 and 100). The computation of the building footprint within each grid identifies those with or without buildings. The grids nearest to the shoreline with a footprint value higher than zero are extracted to define spatially the first building row. A selection is made by locating all the buildings intersected by these grids before calculating, per box, the sum of the area of the footprints. In this study, the BD TOPO gives the footprint of each building (Table 1). The geoinicator is computed per box with the ArcGIS 10.2 toolbox.

3.3.3 Coastal erosion along sandy coasts

As described in the regional setting section, the results of the NICE did not detect any significant changes along the rocky coasts of the Pays de la Loire Region. Therefore, in this study, the coastal erosion analysis is conducted along the sandy coasts.

The reference line used is the dune vegetation limit or dune toe limit (where there is no vegetation) for sandy coasts. The shoreline is digitized at the 1/3500 scale by photo-interpretation of the aerial images taken in 1950-1952 and 2011-2012 (Table 1). These two sets of aerial images are used owing to their availability at regional and national scales and the relatively constant time period.

A total uncertainty is computed to provide change rate accuracy. This is based on the error parameters used by Ruggiero *et al.* (2012), Moussaid *et al.* (2015) and Dada *et al.* (2016) as follows:

$$Esp = \sqrt{(Ep^2 + Eo^2 + Ed^2)}$$

where Esp is the shoreline position error for one date, Ep is the pixel error, Eo is the orthorectification error and Ed is the digitalization error (Table 2).

The total errors are used to compute the total uncertainty (Ea) annualized as follows:

$$Ea = \sqrt{(Esp1^2 + Esp2^2)}/time$$

where *time* is the period between the aerial images used for the analysis. As shown in Tables 1 and 2, aerial images are composed of two different dates due to the data production processes. In this case, the shortest time period is considered to annualize the total uncertainty.

Combining uncertainties due to the multiple errors, the overall accuracy of the measured trends is ± 0.13 m/y.

The cross-shore transects used to create the boxes allow the computation of the change rates at 30-m spacing (figure 3). The distance between two shorelines is measured along each transect and divided by the time between the earlier and the most recent date, as in the EPR method proposed in the Digital Shoreline Analysis System manual (Himmelstoss 2009). This geoinicator

is computed per box with GIS tools from the ArcGIS 10.2 environment.

Measurement errors	1950, 1952	2011, 2012
Ep - pixel error (m)	0.5	0.5
Eo - orthorectification error (m)	6	1.2
Ed - digitization error (m)	3.6	2.87
Esp - shoreline position error (m)	7.01	3.15
E α - total uncertainty annualized (m/y)	0.13	

Table 2 : Computation of the shoreline position errors and the total uncertainty

3.4 Creation of the exposure index

A generic exposure index is created to aggregate the shoreline change, the shortest shoreline-building distance and the building footprints of the first row in order to produce synthetic degrees highlighting the building exposure to shoreline retreat (figure 3).

This index does not use weighting and is based on a simple combination of the geoindicators. The set of values of each geoindicator is divided into two ranks (low and high) using a threshold value. The aggregation of the three ranks (one per geoindicator) enables the degrees of exposure to be defined. This step is processed in the ArcGIS 10.2 environment.

Thus, the “low” degree is composed of three values that involve a low rank (minimum coastal erosion, minimum building footprint of the first row and maximum shortest shoreline-building distance). The “moderate” degree is defined by two values that involve a low rank and a third value considered a high rank. The “high” degree contains two values that involve a high rank and a third value considered a low rank, while the “very high” degree is composed of three values that involve a high rank (maximum coastal erosion, maximum building footprint of the first row and minimum shortest shoreline-building distance). The exposure is not detected if there is no stake presence or no coastal erosion hazard.

4. Results

Spatial segmentation is conducted along the exposed coastline of the Pays de la Loire through the creation of 10919 boxes between the Bay of Pont Mahé in the north and the Bay of l’Aiguillon in the south, distributed between 112.2 km of sandy coasts, 110.8 km of rocky coasts and 135.2 km of coasts with protection structures.

4.1 Building presence facing the shoreline in the 100-m strip

In this study, the stakes in the 100-m landward strip are assessed by the measurement of two variables associated with the urbanization distribution along the regional coast. The shortest shoreline-building distance reveals the building proximity to the shoreline. Clearly, a building near the coast will be more exposed to shoreline retreat than one located further away. The building footprint of the first row represents the quantity of the stakes located very close (here defined with the 30*25 m grids) to the nearest building to the shoreline. A high building footprint area will potentially expose more stakes than a low area. Footprints located behind this first row are not integrated in this definition of the stakes.

Figure 4 presents a synthesis of the coastal classification and the geoindicator values per box along the Pays de la Loire coast. The results reveal that urbanization is present along 156.7 km (4604

boxes) of the exposed coast, which is 44 % of the complete linear. Sandy coasts represent 14 % of the urbanized linear (21.2 km) while 40 % is located along the rocky coasts (62.1 km) and 47 % is established behind coastal defenses (73.4 km).

The whole of the urbanization within the 100-m landward strip is composed of 17575 building footprints (the total surface area is 1.64 km²), 6615 of which have been identified in the first row as defined in the methodology. Thus, the first row includes (i) the 4604 buildings detected by the measurement of the shortest building-shoreline distance and (ii) the 2011 supplementary building footprints identified with the 30*25 m grids.

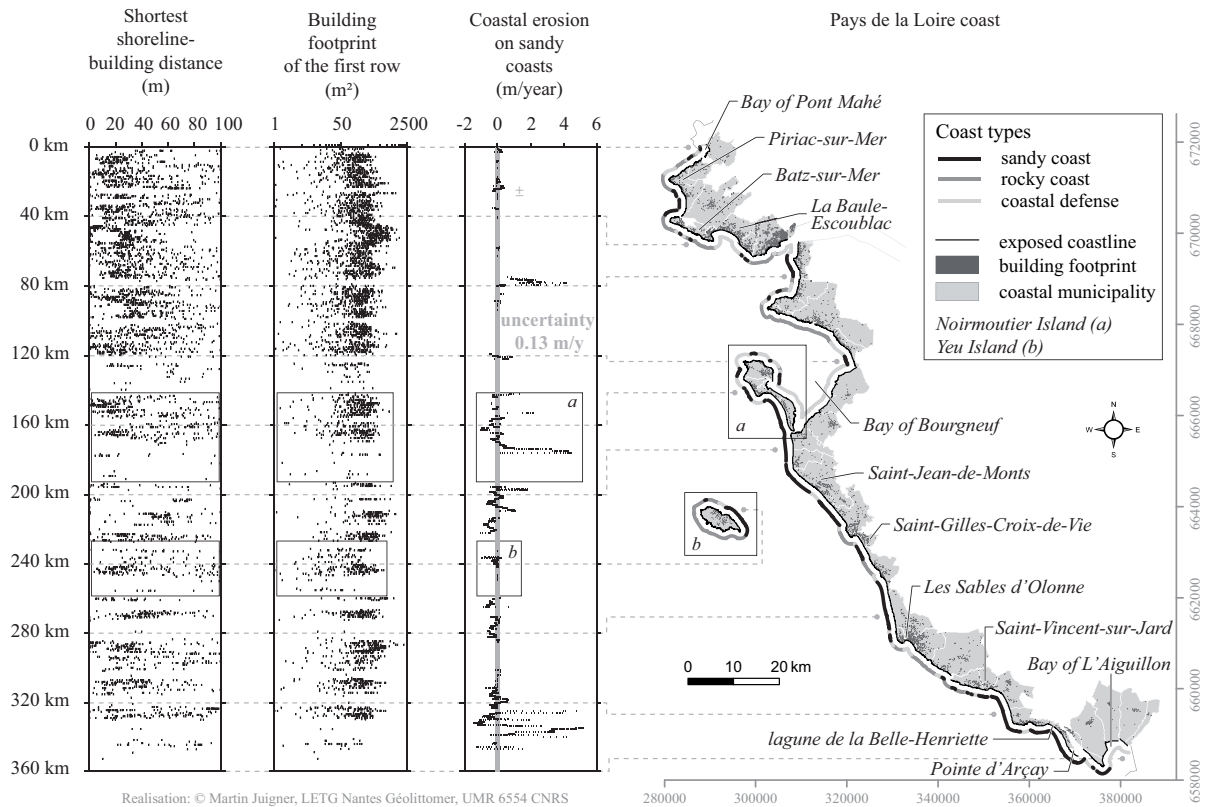


Figure 4 : Graphical representation of the shortest shoreline-building distance, the building footprint of the first row and the coastal erosion values along the coast of the Pays de La Loire Region

The minimum distance is 0 m for all coast types, which indicates the presence of at least one building on the shoreline. The maximum building footprint of the first row is 2085 m² along coastal defenses (the 90th percentile is 500 m²), 1472 m² along the rocky coasts (the 90th percentile is 282 m²) and 910 m² along the sandy coasts (the 90th percentile is 280 m²).

As shown in Figure 4, the footprints located behind coastal defenses are larger and nearer to the shoreline, which reflects (i) a strong representation of the cooperative housing built during the second half of the 20th century in front of the seaside towns (e.g. La Baule-Escoublac, Saint-Jean-de-Monts, Saint-Gilles-Croix-de-Vie, Les Sables d'Olonne), (ii) the management decisions about the creation of hard coastal defenses in front of the urban zone affected by coastal erosion and (iii) a sense of security that leads to the development of urbanization behind the protection structures.

The first row of building is located, on average, at a greater distance from the shoreline along the coasts without protection structures. The average of the building footprint along the sandy coasts (138.5 m²) and the rocky coasts (147.3 m²) is lower than behind the coastal defenses (241.2 m²). This difference can be explained by the presence of smaller but more dispersed building footprints suggesting an urban sprawl composed of individual houses (e.g. Piriac-sur-Mer, Batz-sur-

Mer, Yeu Island, Saint-Vincent-sur-Jard).

Lastly, there are some discontinuities in the presence/absence of the stakes in the 100-m landward strip at the regional scale. These gaps in urbanization are particularly observable in the southern part of the region and correspond to a succession of large dune systems and the presence of polders currently used in agricultural activities (e.g. Bay of Bourgneuf, Bay of l'Aiguillon).

4.2 Long-term shoreline change

Historical shoreline dynamics are one of the most common geoindicators of landform changes in coastal zones. According to Moussaid *et al.* (2015), shoreline position reflects the coastal sediment budget. Overall, regular sedimentary transits mainly occur on shallows above -5 m and do not exceed 50 000 m³/y north of km 200 (figure 1), reaching 100 000 m³/y from km 200 to km 250 and even more than 600 000 m³ in some hydrodynamic cells from km 250 to km 330 with a decrease beyond (Geos-DHI 2008).

Its changes may indicate natural or human-induced effects along a coast. In terms of risk, shoreline recession must be considered as much a hazard as storm surges or SLR. It can affect coastal installations such as urbanization, transport roads or economic activities and ecosystems.

We have only taken into account this long-term shoreline change. Between these two dates, many storms struck the coast with the strongest, named Xynthia, occurring on February 27-28, 2010. This event has a much greater return period than 100 years with a maximum sea level height of 734 cm recorded during the Xynthia storm at the tide station of Saint-Nazaire (see location in figure 1). Indeed, calculations made in 2007 gave a maximum height of 648 cm for a 100 year return period and 621 cm for a 10 year return period (Pirazzoli 2007). During this event, a maximum shoreline retreat of -15 m was recorded along the shoreline of the municipality of La Tranche-sur-Mer (km 329, figure 4). At this very place, long-term shoreline change has a value of -0.56 m/y, giving a net shoreline retreat of -33.6 m. In fact, the min/max long-term trend is always greater than the short-term trend even with such a Xynthia event. This is due to post-storm resilience which occurs during sometimes 2 or 3 years after an event (Juigner *et al.*, 2012). Hence, in terms of planning, a 60-year trend is considered entirely acceptable for taking this risk into account since this long-term trend totally encompasses short-term variations. Moreover, this is the same temporal gap as used by the NICE.

Figure 4 also illustrates the results for coastal sections with erosion trends, imperceptible changes (included in the total uncertainty ± 0.13 m/y) or accretion dynamics on sandy coasts. The EPR was not computed for 1.5 km due to some mouths that had gradually been filled. A no-data value was recorded for all the rocky coasts following the results of the NICE. In addition, where coastal defenses occur, as for the NICE, erosion was considered to have stopped with no evolution of the shoreline: this does not mean that no mobility of the dune behind a low sea wall is possible but that human post-storm interventions are workable to fix the position of the shoreline as it stands. The risk is thus removed because of artificial maintenance of coastal defense structures.

As shown in figure 4, an accretion trend is detected along 35.1 km with a maximum change rate of 5.24 m/y located along the southern sand spit of the study site (Pointe d'Arçay). The change rates included in the total uncertainty represent 36.5 km. The maximum shoreline net movement of these records is ± 8.06 m.

A shoreline retreat is detected along 40.1 km (11.2 % of the exposed coast). The maximum erosion rate (-1.43 m/y) is located along the coastal dune of La lagune de la Belle-Henriette (figure 4).

4.3 Exposure assessment

The combination within the boxes of the shoreline dynamics and the building presence facing the shoreline in the 100-m strip indicates the extent of the potential exposure of the stakes at a regional scale. It is observed that 5.2 km of the coast are affected by a shoreline recession and the presence of buildings in the first row in the 100-m landward strip. A total of 162 cases of exposure have been identified within the boxes. Considering these cases, the shoreline change rates vary between -0.13 m/y and -0.99 m/y, the shortest shoreline-building distances are from 0 to 99.4 m and the building footprints of the first row from 0.002 to 737 m² (Table 3).

Boxes with a concomitance between stakes and hazard (n=162)	Shortest shoreline-building distance (m)	Building footprint of the first row (m²)	Coastal erosion (<-0.13 m/y)
Min	0	1.E-03	-0.99
Max	99.41	737.04	-0.13
Mean	50.13	154.50	-0.35
Variance	799.16	19392.68	0.04
Stand. Dev.	28.27	139.26	0.20
Median	52.46	118.48	-0.29
Skewness	-0.02	1.69	-1.15
Kurtosis	-1.16	3.66	0.33
Relative Stand. Dev.	56.39	90.13	-57.54
Jarque-Bera JB test	9.04	158.5	35.6
Jarque-Bera (p normal)	0.01	3.92E-35	1.86E-08
Jarque-Bera (p Monte Carlo)	0.02	1.E-04	1.E-03

Table 3 : Descriptive statistics and normality tests of the geoindicator values recorded within the 162 boxes characterized by concomitance between the shoreline erosion and the building presence in the 100-m landward strip

To create the exposure index, the three datasets were thresholded in order to rank the risk from low to very high. Unfortunately, there are no generic values related to a similar approach at a regional or national scale to help fix a threshold for each dataset. Moreover, the datasets do not present correlations (the correlation coefficient is -0.01 between Coastal erosion and Building footprint of the first row, -0.24 between Building footprint of the first row and Shortest shoreline-building distance, 0.03 between Coastal erosion and Shortest shoreline-building distance) and are not statistically normally distributed except for the Shortest shoreline-building distance, which is the most normally distributed variable (for example, Jarque-Bera JB = 9.04 against JB = 35.6 for the Coastal erosion variable and 158.5 for the Building footprint of the first row variable, see Table 3). The distribution is very wide between the minimum and maximum values (see Relative Standard Deviation up to 50% or Kurtosis far from the “normal” value 3, Table 3) and not really symmetric (see Skewness far from the “normal” value 0, Table 3). In order to avoid a complex and non-generic thresholding and to keep two classes per dataset, we use the median, which is the middle value of the datasets and is considered the most resistant statistic with a breakdown point of $(n-1)/2n = 0.49$ (Maronna 2006). The threshold values (see Table 3) used to compute the exposure index are thus the median shortest distance (52.46 m), the median footprint of the first row (118.48 m²) and the median coastal erosion rate (-0.29 m/y).

The results of the index reveal that 5162 m of the Pays de la Loire coast are characterized by the presence of buildings in the 100-m landward strip behind erosional coasts. 228 building footprints of the first row, equivalent to a total surface area of 25029 m², are in a situation of exposure. The four exposure degrees are represented along the coast, which reflects the diversity in the cases of exposure detected. The cumulative linears of the low, moderate, high and very high degrees are 760 m, 1759 m, 1948 m and 695 m, respectively. Thus, the very high exposure extends along 0.2 % of the regional coast.

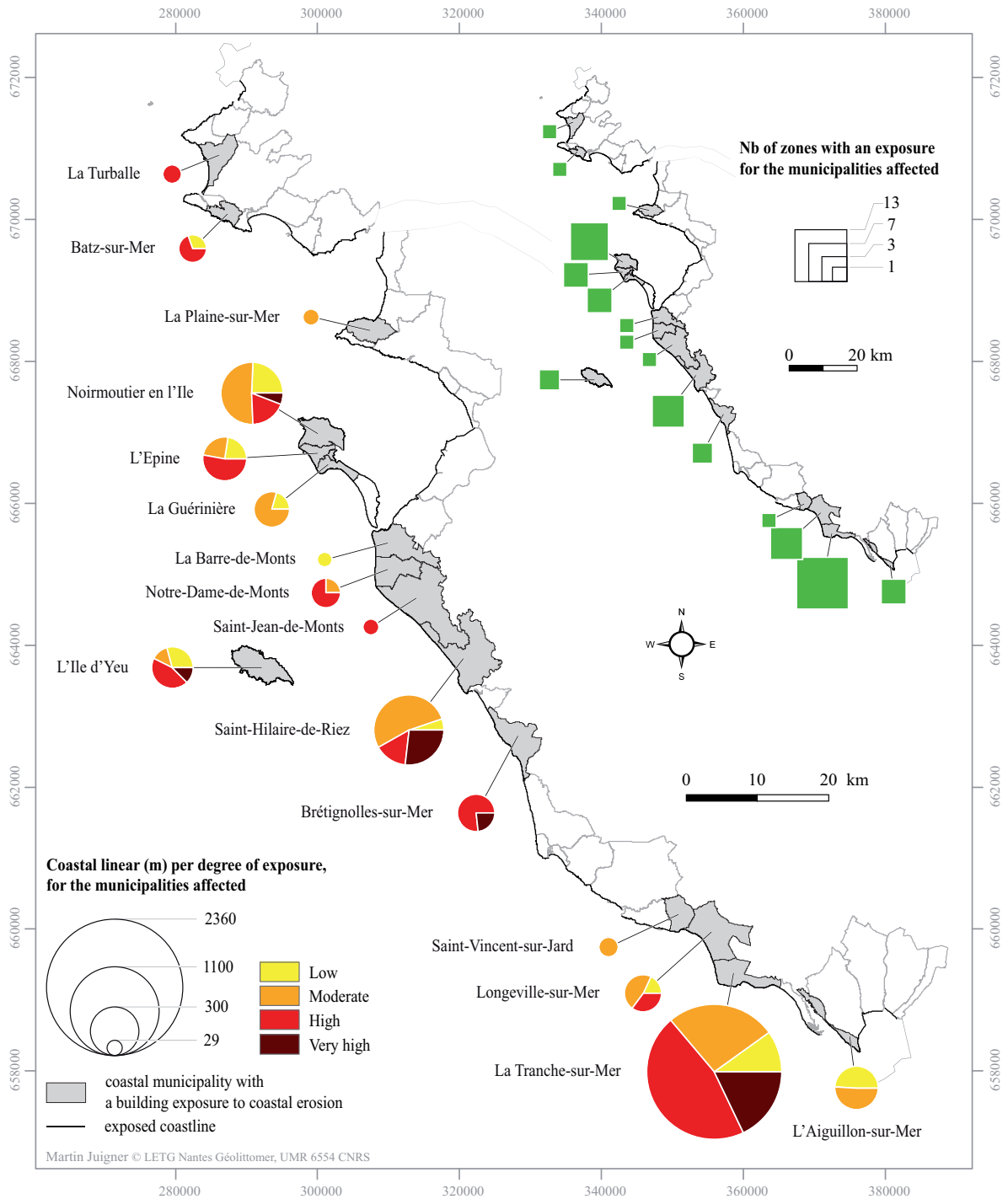


Figure 5 : Building exposure to shoreline retreat per municipality along the Pays de la Loire coast: the pie-charts present the linear (in m) of each degree of exposure identified and the proportional symbols (squares) illustrate the number of zones exposed per municipality

The results can be synthesized to produce statistics and to map the exposure index. This step requires aggregating the boxes located inside each spatial feature of a functional level. The level used in this study is the smallest administrative division in France (the municipality), which provides an accurate representation of the results along the mainland and insular coasts. Figure 5 presents a synthesis of the results by aggregation of the boxes. The sum of the coastal linears of each degree of exposure is computed for all the 44 administrative features. Then, the exposed zones are identified within each municipality and characterized according to the same procedure. These zones are defined by the presence of one isolated box or a set of two or more adjacent boxes. Figure 5 (see the proportional squares) reveals that 51 zones, distributed between 16 municipalities, have been identified. Twenty-two zones are constituted by one isolated box, which corresponds to weakly extended and scattered exposures along the coast. The other zones are characterized by a varying succession of cases of exposure composed of different degrees. 50 % of the at-risk linear is concentrated in 9 zones characterized by a coastal linear higher than 150 m. These zones concentrate 54.4 % of the at-risk building footprints.

The most exposed zone is located in Saint-Hilaire-de-Riez (see figure 6). It is characterized by a strong shoreline recession (average erosion is -0.73 m/y), a short shoreline-building distance (average distance is 39.26 m) and a high building footprint (average is 345.03 m²) along 238.3 m. At the municipal level, the most exposed territory is La Tranche-sur-Mer (figure 5). The building exposure is detected along a linear of 2359 m distributed between 13 zones. The high and very high degrees represent 63 % of the exposed linear. The largest zone is 620 m long and is characterized by a succession of moderate, high or very high degrees of exposure. This territory is one of the three municipalities of the Pays de la Loire Region that were most affected during the Xynthia storm, 28 February 2010 (Devaux *et al.*, 2012), after La Faute-sur-Mer and L'Aiguillon-sur-Mer, which were dramatically struck by a storm surge that caused 29 victims. The whole of the coast of La Tranche-sur-Mer was strongly eroded by the storm (from -5 m to -15 m shoreline retreat even beyond the protection structures) including areas where the urbanization is located near the top of the frontal dune ridge. Beyond the shoreline erosion, the wave action caused damages to property such as the destruction of the property boundaries and the undermining of the buildings nearest to the shoreline (Devaux *et al.*, 2012). The impact of the Xynthia storm and the results of the exposure index at La Tranche-sur-Mer illustrate the consequences of urban development along a coast subject to shoreline erosion caused by natural processes and human forcing on these processes.

5. Discussion and conclusions

From the 30×100 m box to the various aggregation scales, this spatial framework provides a generic method to improve the synthetic knowledge of the erosion risk in the Pays de la Loire Region and aims to improve management of the coastal zone facing the risk of erosion. Many points can be detailed to put this study into a scientific and operational context:

(i) This regional study was developed within the framework of the national integrated coastline management strategy (Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie 2012). Thus, sub-action 2.2 of the strategy recommends an identification of high erosion risk territories based on a combination of the results of the NICE and land occupation data. The spatial segmentation and the geoindicators used in this paper provide a useful and synoptic approach to identify the at-erosion risk territories based on a very fine and local view. This identification gives new updatable knowledge, with the specific aim of improving local strategies for coastline mana-

gement and providing coherent measures for urbanization development in a risk context.

(ii) The available information about coastal erosion at regional and national scales in France is currently developed at a 1/100 000 scale. The EUROSION Project (Lenôtre *et al.* 2004) provides results on the basis of coastal segments with a minimum length of 200 m. More recently, the results of the NICE have been presented on the basis of measuring shoreline change rates at 200-m transect spacing. This scale is functional for a general understanding of the phenomenon and the large-scale construction of hazard maps. However, these results need to be refined to have a more precise view of the coastal systems for the creation of local management initiatives by the decision-makers. In this paper, the whole of the risk situation is detected at 1/5000 scale, which is original and significant progress. The accuracy of this study is due to the data used (Table 1) and the 30*100 m segmentation. This spatial resolution leads to finer results than the previous studies.

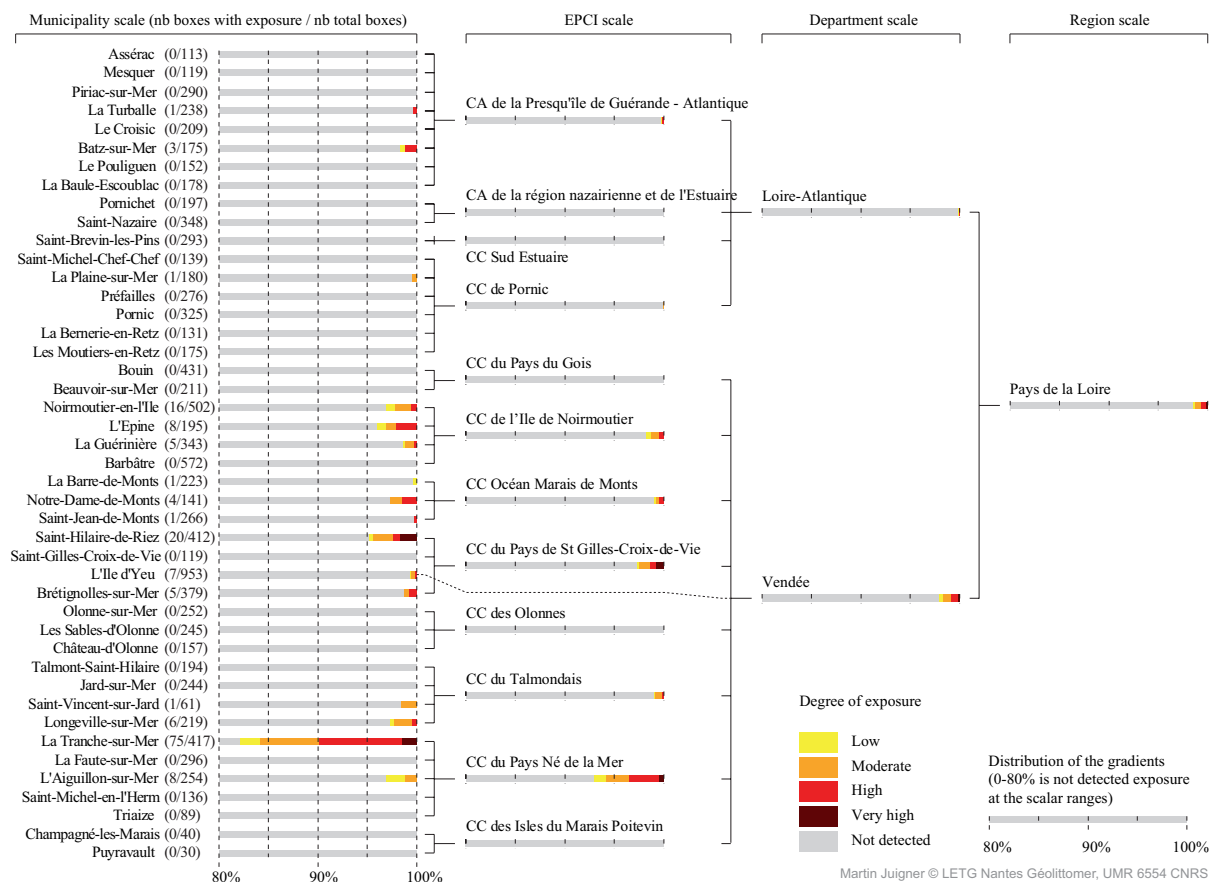


Figure 6 : Multiscalar chart compiling the exposure statistics at each administrative scale, from the municipalities ordered from north to south of the Region (on the left) to the Region (on the right). Pays de la Loire is an at-risk Region in France; more accurately, the Department of Vendée is more impacted than that of Loire-Atlantique; in the Vendée Department, the grouping of municipalities of the CC du Pays Né de la Mer is the most impacted; and within this grouping, the municipality of La Tranche-sur-Mer is the most impacted.

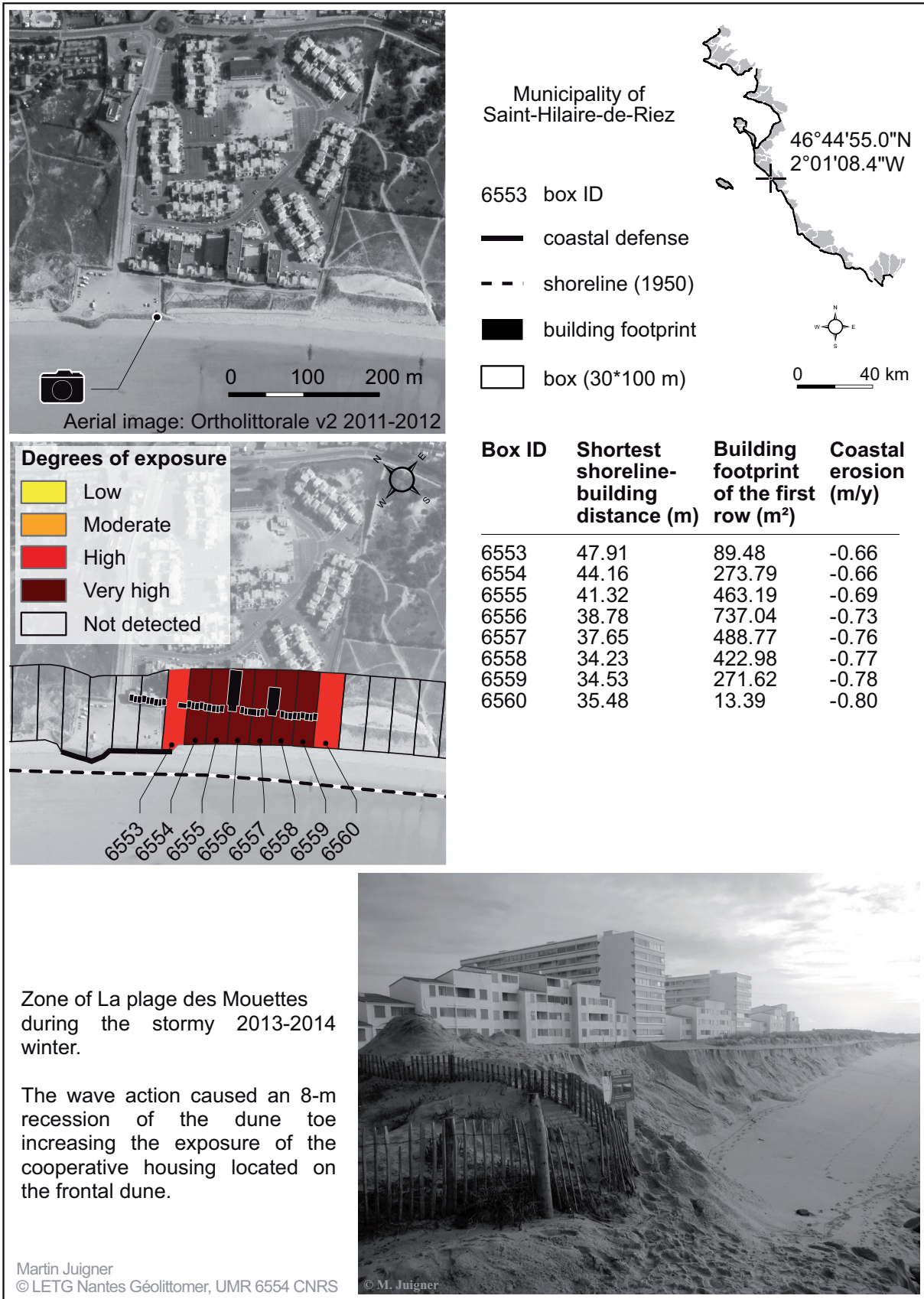


Figure 7 - left : Location and metrics of the exposure of the cooperative housing located in La plage des Mouettes, municipality of Saint-Hilaire-de-Riez (field photograph February 02, 2014)

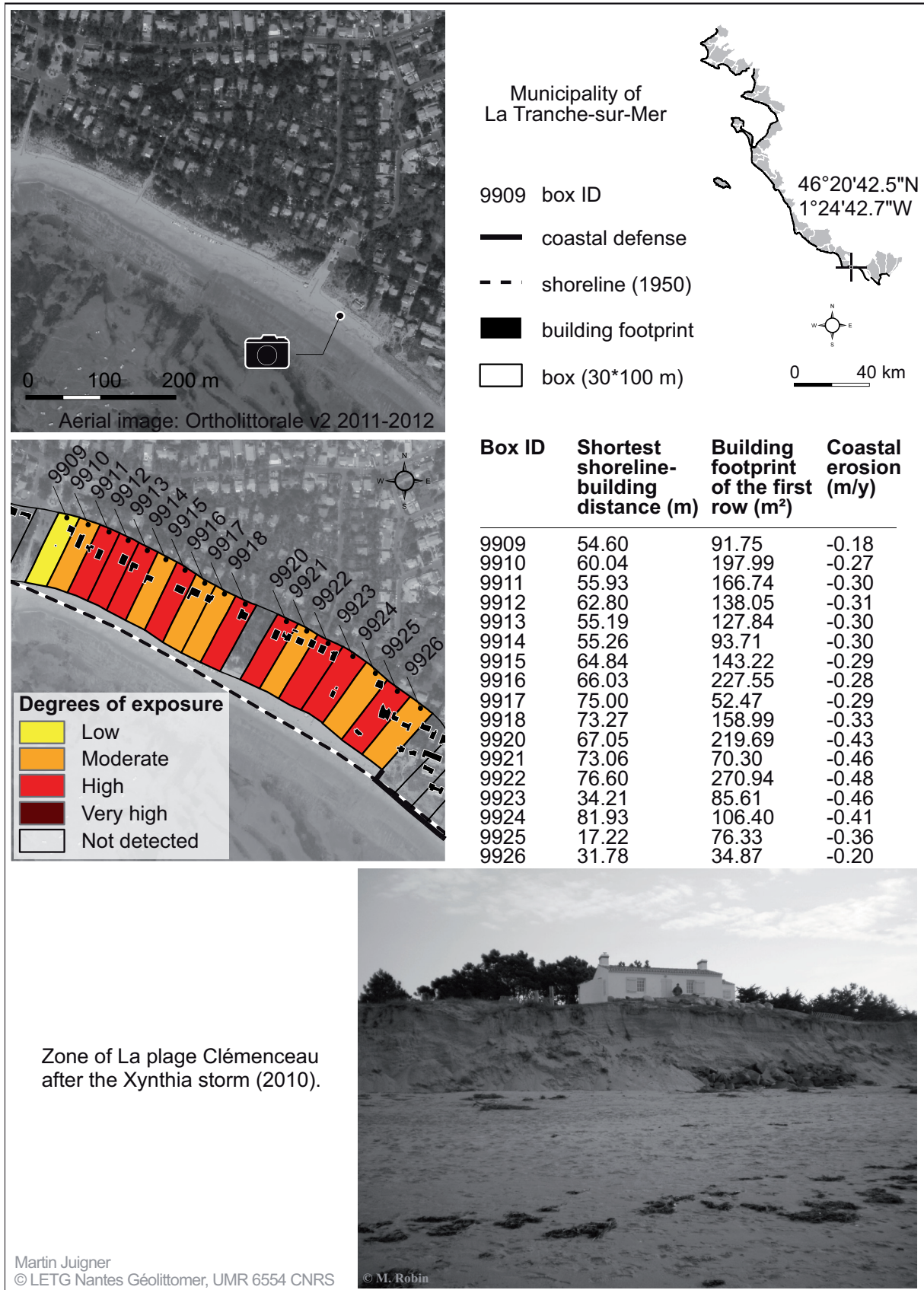


Figure 7 - right : Location and metrics of the exposure of the individual housing in La plage Clémenceau, municipality of La Tranche-sur-Mer (field photograph March 08, 2010).

(iii) Because the precision of the information is provided at the finest scale, it is easy to synthesize this information at coarser scales by successive aggregation: at the municipality scale, EPCI scale (administrative grouping of municipalities), department scale and even regional scale, on demand (figure 6). This graphical representation of the results (figure 6) enables the at-erosion risk territories to be clearly identified for each administrative scale, which has two immediate advantages: on one hand, the possibility of providing statistical knowledge at aggregating scales corresponding to all administrative levels. On the other hand, helping the decision-makers to assess the risk at various scales and giving them the possibility of estimating the overall cost to be invested per administrative unit at each level to minimize the risk: in this way, the funding can be triggered by targeting sensitive sectors with more objectivity. This facilitates negotiations for the distribution of funding when public funds are limited and arbitrations must be made. It also makes it possible to prioritize and plan public action for risk management and objectify longer-term planning proposal measures such as the relocation of goods and activities if necessary.

(iv) The analysis and understanding of coastline variability and coastal erosion-accretion trends are important for scientists and local decision-makers for orienting regulation and decisions concerning coastal planning when facing risk. In order to involve stakeholders in such an approach, this work was funded within the framework of a program of the Fondation de France, with the special feature of associating scientists and coastal dune managers (the National Forest Office). Co-construction of the method between scientists and managers was favored through many presentations and discussions on the organization of this approach for almost the 3-year duration of the program. The methods were thus validated with many well-known local case studies, two examples of which are given later in this section. At the municipality level, presentations were made in parallel with decision-makers. Given the precision of the results and the possibilities offered by this spatialized approach, even beyond the urban risk theme presented in this article and intended to illustrate some of its potential, it was decided to propose an overall monitoring of the coast at the regional level as part of a new coastal hazards observatory in the Pays de la Loire Region. The objective is to (i) deploy an up-to-date risk status monitoring (ii) exploit the ability to detect a highly localized threat in order to help managers, (iii) evaluate the cost of threat detection after a powerful stormy event and target the cost of crisis response; and (iv) propose a risk reading to take into account a real threat in the updating of planning documents: risk prevention plans, local town planning plans.

(v) In order to illustrate the operational dimension of this approach and its capacity to identify exposed sectors and thus anticipate a potential amplification of the exposure of the stakes, we now present two examples of information provided by this method and discussed with managers and decision-makers of the two municipalities concerned. This aims to test the monitoring capacity, risk ranking, detection of high-risk sections requiring emergency intervention or not, and the interest of managers. The test consists of (i) applying a degree of exposure detection, (ii) zooming in on two stretches of coastline affected by high exposure: a case with cooperative housing, another with individual housing, (iii) recording the status of these two stretches of coastline just after the Xynthia storm to find out if the method detects a truly endangered coastline, and (iv) asking the decision-maker whether this detection is effective and what has been done in terms of post-storm crisis management.

The first example is located in Saint-Hilaire-de-Riez. This coastal linear is characterized by a large cooperative housing development close to a dune cliff strongly eroded during the 2010 Xynthia storm (5 m of coastal retreat) and again during the stormy winter of 2013-2014 (8 m of retreat at the edge of the embankment). The long-term results presented in this paper (figure 7, left) highlighted a very high exposure of this sector. The values of the geoindicators recorded for the

cooperative housing are the highest at the regional level (see 3.2 Exposure assessment). As a result, crisis management initiated an extension and a realignment of the seawall along the current shoreline (cost of 527.000 €).

The second example is located in La Tranche-sur-Mer. This coastal linear is characterized by the presence of individual houses with a relatively low density (figure 7, right). The western side of the zoom is little affected by coastal erosion (average rate of -0.29 m/y) contrary to the eastern side, which is located at the end of a seawall made of stone blocks (average rate of -0.40 m/y). The shoreline-building distance is higher in the “low” and “moderate” boxes (minimum of 54.60 m) than in the “high” gradients identified on the eastern side where the minimum distance scored is 17.22 m. As a result, crisis management initiated nothing: there was a strong resilience of the dune cliff after the storm Xynthia. Simple fences have been set up to prevent access and trampling and promote re-vegetation of the beach-dune contact.

These two examples illustrate the capacity of this approach to detect coastal areas variably exposed (four degrees) in order to guide the managers in the field to carry out a precise assessment of the identified cases in order to set up preventive measures (beach-dune nourishment, beach-dune reshaping, realignment of coastal defenses). This new method can help to anticipate crises management through the deployment of a real operational alert system.

(vi) This approach could lead to an update of these geoindicators to observe the shoreline mobility at a shorter time-lapse and changes in urbanization in the 100-m strip. It could improve the definition and location of at-risk territories within the framework of a regional observatory for coastal monitoring. Overall, the spatial segmentation used in this paper can be considered a spatial analysis support to study coastal issues based on the combination of geoindicators. In mainland France, coastal territories and especially low-lying areas are exposed to three types of natural hazard: shoreline retreat, coastal flooding and dune migration (Deboudt 2010; Debaine and Robin 2012). Breaching of coastal dunes caused by hydraulic processes during severe storms is a determinant factor for the flood risk, as occurred during Storm Xynthia in the Department of Vendée (Devaux *et al.*, 2012). Monitoring the conservation status of the dune ridges is a current challenge for coastal management (Gouguet 2011). The assessment of the susceptibility of the coastal dune ridges can be put into perspective with the potential exposure to floods of the residential housing located in the low-lying areas. Thus, the analysis at the micro-scale level (i.e. the building) of the exposure of coastal towns to flood hazard as proposed by Créach *et al.* (2015) is a relevant example of spatial information that could be combined with dune susceptibility within boxes to produce synoptic statistics of the vulnerability of coastal buildings to flooding.

In conclusion, the method proposed in this paper identifies the at-risk buildings related to the shoreline recession using three simple geoindicators. The use of a segmentation based on the creation of boxes enables the presence of stakes to be assessed with the calculation, per box, of the shortest shoreline-building distance and the building footprint of the first row. This segmentation method is also functional to compute the shoreline recession along the transversal limits of the boxes. The aggregation of these geoindicators leads to the creation of an easily reproducible synthetic index.

At the Pays de la Loire level, this paper reveals that 5162 m of the coast are characterized by the presence of buildings in the 100-m landward strip at the back of erosional zones. 228 building footprints of the first row, equivalent to a total surface area of 25029 m², are in a situation of exposure. Very high exposure extends along 695 m of the regional coast.

At the municipal level, the most exposed territory is La Tranche-sur-Mer. Building exposure was detected along a linear of 2359 m distributed between 13 zones.

On the other hand, the most exposed zone is located in Saint-Hilaire-de-Riez and is characterized by a strong shoreline recession (average erosion is -0.73 m/y), a short shoreline-building distance

(average distance is 39.26 m) and a high building footprint (average is 345.03 m²) along 238.3 m. This paper reveals the functionality of the method and its ability to anticipate crises management through the deployment of a real operational alert system in order to make enlightened decisions.

Acknowledgements

This work was supported by the DIDUNE program of the “Fondation de France”. The authors would like to thank the UMR 6554 LETG-Nantes Géolittomer and OR2C (Regional Observatory of Coastal Risks of Pays de la Loire Region) for providing research facilities. We also thank Mohamed Maanan and Carol Robins for proofreading this paper.



Chapitre 4

Caractérisation de la capacité de protection des massifs dunaires de la région Pays de la Loire face au risque de submersion marine



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

(VertigO, soumis, juillet 2017)

Martin Juigner¹ et Marc Robin¹

Résumé

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 non-humains 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 boîte 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^{ère} ligne ; la dynamique historique du trait de côte ; l'emprise des zones basses et l'assise du cordon de 2^{ème} ligne ; l'emprise et la hauteur d'eau potentielle des enjeux non-humains 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. A 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.

Mots-clefs

cordon dunaire ; côte atlantique ; risques littoraux ; submersion marine ; protection dunaire; indicateurs du risque ; indice de sensibilité ; indice d'exposition ; LiDAR.

¹ Laboratoire LETG-Nantes Géolittomer, UMR 6554 CNRS
Université de Nantes, Campus Tertre, BP 81227, 44312 Nantes Cedex 3, France
Martin.Juigner@univ-nantes.fr ; Marc.Robin@univ-nantes.fr

Abstract

Especially in areas with high human and non-human stakes, coastal dunes may act as natural forms of coastal protection against coastal floods. 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 allows 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 flood. 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.

Keywords

dune ridge ; Atlantic coast ; coastal risks ; coastal flood ; dune protection; risk indicators ; sensitivity index ; exposure index ; LiDAR

Introduction

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, puis, selon la disponibilité des sédiments et l'exposition de l'estran au vent dominant, d'un ensemble de crêtes dunaires et de dépression 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). 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 météorologiques. L'anthropisation est donc autant un agent de forçage qu'un facteur du risque.

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 naturelles et/ou anthropiques, 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'aléa étant défini par la cote altimétrique atteint par un niveau marin centennal ou historique (MEDDE, 2014), il est admis que les enjeux situés dans les zones basses intradunaires et rétrolittorales sont exposés à la submersion marine.

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 au sein d'unités spatiales ayant pour but de segmenter l'espace étudié et de produire autant de synthèses qu'il existe d'unités spatiales (ex. communes littorales, cellules sédimentaires, mailles, boîtes).

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.

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 météo-marins, 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 SNGITC (MEEM, 2017 ; MEDDTL, 2012).

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).

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 donnée 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^{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). Le second volet de l'indice porte sur l'évaluation de l'exposition des enjeux non-humains 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.

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

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, de Barrère (1999) et Dupont (2005) concernant la côte vendéenne. Ainsi, le littoral régional appartient de la Baie de Pont Mahé jusqu'aux Sables d'Olonne à la frange méridionale du Massif Armoricaïn. 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'INEC, 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.

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), 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^{ème} ligne. L'état actuel de la couverture des dunes de la région peut être résumé à un état de fixation quasi-généralisée lié d'une part au stade de maturité des massifs dunaires (Paskoff, 2003), aux actions de fixations antérieures et actuelles des sables mobiles (Favenec, 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 saupoudrages 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.

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'Olonnes) 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.

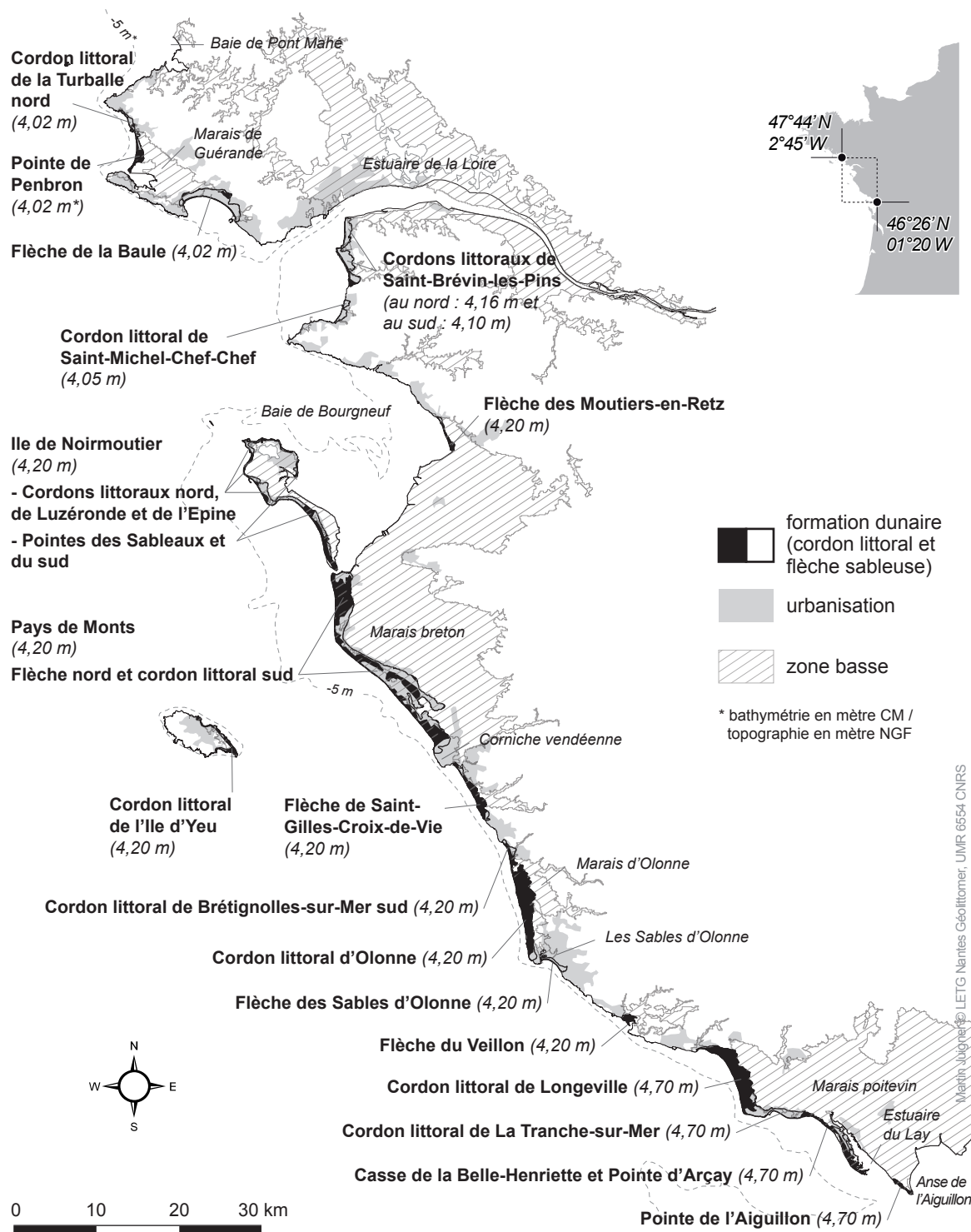


Figure 1 : Localisation des massifs dunaires évalués en région Pays de la Loire. Pour chaque site, la cote de l'aléa de référence préconisée dans les Plans de Prévention des Risques Littoraux (ici la cote Xynthia) est donnée.

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 réalisée 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 PPRL de la région. La cote Xynthia est ici retenue comme la cote d'aléa maximum utilisée pour l'évaluation du service protection contre la submersion marine. 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 jeux lors de la propagation d'une submersion.

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

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 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 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 et d'échanges avec l'ONF.

Le constat est fait qu'en matière de sensibilité, les massifs dunaires peuvent être partitionnés en deux entités paysagères distinctes : d'une part le cordon de 1^{ère} 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^{ème} ligne. Ce premier niveau de lecture amène au raisonnement spatialisé proposé dans la figure 2.

Un cordon de 1^{ère} 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^{ère} ligne. Ce recul entraîne une diminution de l'assise du cordon et peut engendrer un affaissement de la crête de dune. A 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^{ère} 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'exède 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^{ème} 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.

L'exposition des enjeux non-humains 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 apparait donc qu'un massif dunaire composé d'un cordon de 1^{ère} ligne robuste bordant une petite zone basse précédant un cordon de 2^{ème} 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^{ère} ligne perméable bordant une vaste zone basse sans cordon de 2^{ème} ligne présente une sensibilité élevée face au 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^{ère} ligne à la submersion (figure 2, S1) est fonction de l'altitude et de l'assise du cordon. La sensibilité du cordon de 1^{ère} 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 ($S2 = 0$) le long des secteurs dotés d'ouvrages de protection longitudinaux. La sensibilité de l'arrière-dune à la submersion (figure 2, S3) intègre l'assise du cordon de 2^{ème} ligne et l'emprise des zones basses. L'exposition des enjeux non-humains (figure 2, E1) est fonction de la hauteur d'eau potentielle et de l'emprise des enjeux en zone basse. L'absence d'enjeux en zone basse traduit une absence d'exposition à la submersion ($E1 = 0$). Le croisement

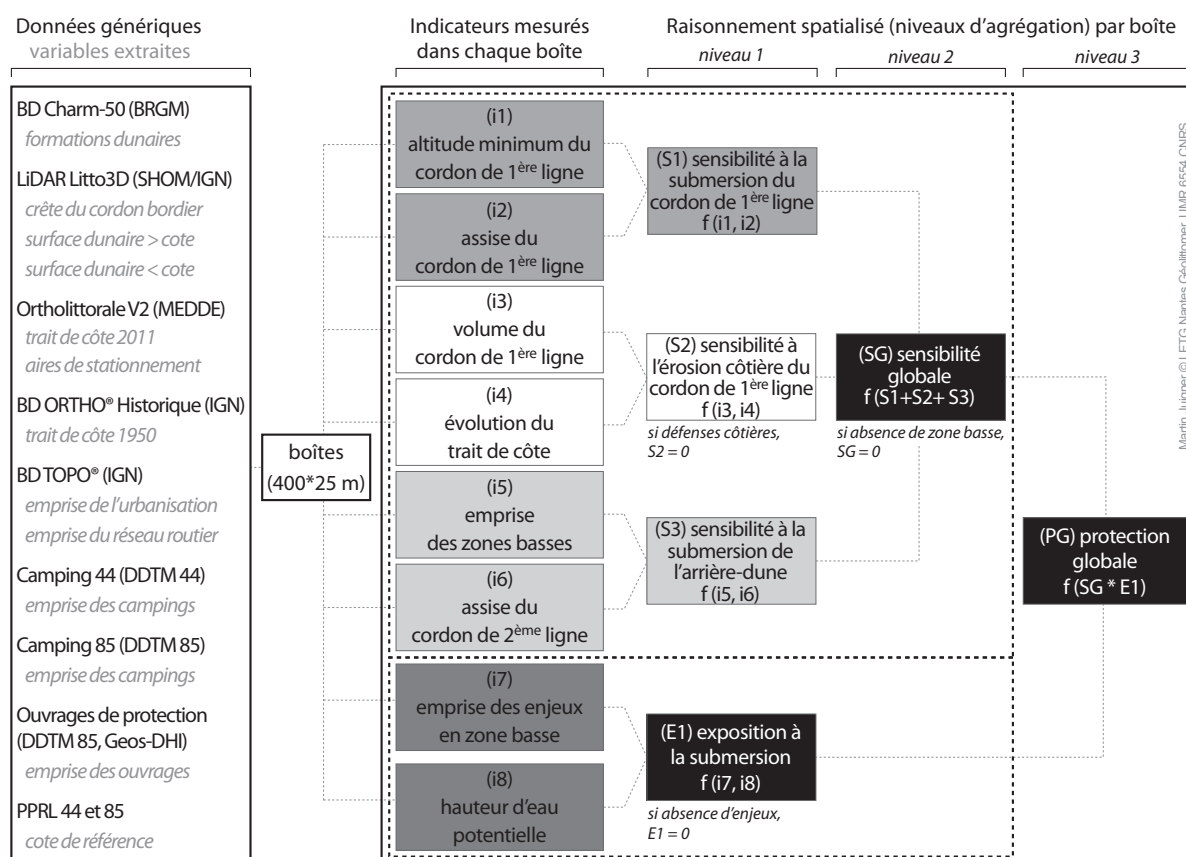


Figure 2 : Schéma méthodologique présentant le raisonnement spatialisé développé pour évaluer la capacité de protection dunaire contre la submersion marine.

des trois 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).

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

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 la dynamique des systèmes plage-dune et constitue 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 non-humains résulte de la combinaison des emprises polygonales issues (i) de la BD TOPO®, (ii) des aires de camping transmises par les DDTM 44 et 85 ainsi que (iii) les aires de stationnements 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.

L'ensemble des variables extraites sont intégrées dans un 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^{ème} ligne. Le volume du cordon de 1^{ère} ligne correspond au volume situé au-dessus de l'assise. Les surfaces

Sensibilité à la submersion du cordon de 1 ^{ère} ligne (S1)	<p><u>Définitions :</u> (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><u>Usages :</u> - 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><u>Définitions :</u> (i3) volume du cordon au dessus de la cote de l'aléa de référence, (i4) évolution historique du trait de côte</p> <p><u>Usages :</u> - 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><u>Définitions :</u> (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><u>Usages :</u> - 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><u>Définition :</u> (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><u>Usages :</u> - présence d'enjeux potentiellement exposés à la submersion marine - hauteur d'eau pouvant affecter les enjeux</p>	

Martin Juigner © LETG Nantes Géoc littomer, UMR 6554 CNRS

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 dunaire contre la submersion marine.

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 (Etc dans le tableau 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 (Etc^2 dans le tableau 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 (Etc dans le tableau 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 non-humains 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.

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
Etc incertitude de position du trait de côte (m)	7,01	3,15
Etc^2 incertitude de position du trait de côte en surface (m²)	355,99	166
Erreur globale (m²)	392,79	

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.

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 possibles 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) :

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

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.

Chaque indice est ensuite discrétisé en quintiles (cinq 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).

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

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 1^{ère} ligne est davantage corrélé à l'altitude de la crête ($R^2 = 0,56$; $r = 0,75$; $p\text{-valeur} = 0$) et à l'assise du cordon de 1^{ère} ligne ($R^2 = 0,57$; $r = 0,76$; $p\text{-valeur} = 0$) qu'avec l'érosion côtière ($R^2 = 0,001$; $r = -0,03$; $p\text{-valeur} = 0,002$). Enfin, certains indicateurs varient dans le même sens (altitude, assise et volume du cordon de 1^{ère} ligne) tandis que d'autres évoluent en sens opposé, comme c'est le cas des zones basses et de l'assise du cordon de 2^{ème} 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 2^{ème} ligne qui la borde sera étroit (voir figure 4).

		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	

Tableau 2 : Matrice de corrélation (Pearson r) entre les indicateurs utilisés pour le diagnostic. Les corrélations affichées en gras ne sont statistiquement pas significatives ($p\text{-valeur} > 0,05$).

La représentation des indicateurs du cordon de 1^{ère} ligne (altitude, assise et volume) et de l'arrière-dune (zone basse, cordon de 2^{ème} 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 le tableau 3). Par exemple, la flèche des Moutiers-en-Retz (g dans la figure 4) est composée d'un cordon de 1^{ère} 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 2^{ème} 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 1^{ère} ligne et de 2^{ème} ligne. Enfin, la dynamique du trait de côte est entravée au nord par des ouvrages de protection. Un secteur en

Chapitre 4 : Caractérisation de la capacité de protection des massifs dunaires de la région Pays de la Loire (France) face au risque de submersion marine

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 à un cordon de 1^{ère} 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 2^{ème} 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 (tableau 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.

Massifs dunaires régionaux :	Linéaire avec altitude de crête négative (m)	Assise médiane du cordon de 1 ^{ère} ligne (m)	Volume médian du cordon de 1 ^{ère} ligne (m ³)	Linéaire de trait de côte de 1 ^{ère} ligne (m)	Linéaire de trait de côte artificialisé (m)	Linéaire de trait de côte en accrétion (m)	Assise médiane du cordon de 2 ^{ème} ligne (m)	Somme des zones basses (m ²)	Linéaire de trait de côte stable (m)	Linéaire de trait de côte en érosion (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	

Tableau 3 : Résumé statistique des indicateurs de sensibilité par massif dunaire.

Inventaire des cordons littoraux et flèches sableuses (de a à x, ordonnés du nord au sud de la Région)

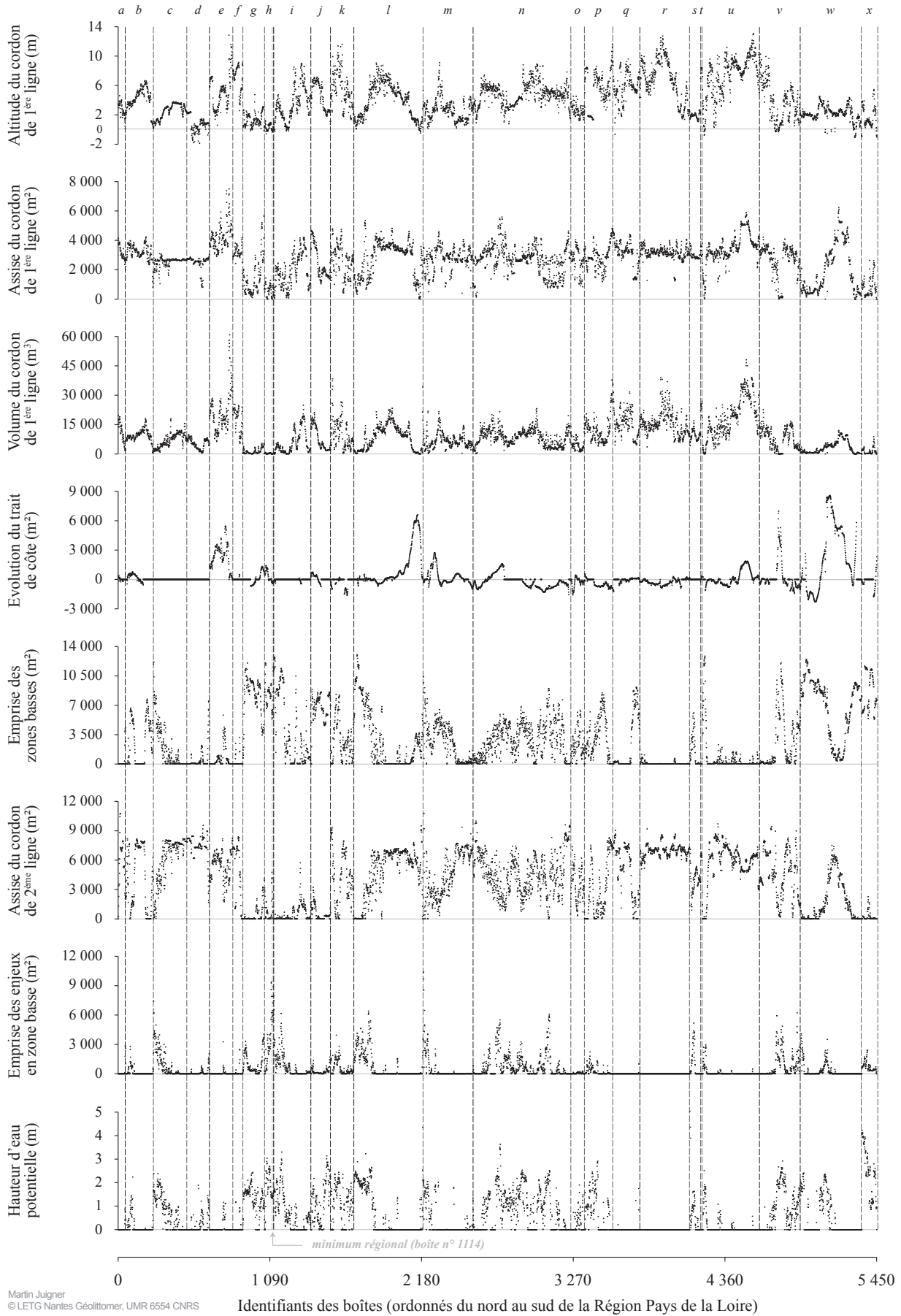


Figure 4 : Synthèse régionale des huit indicateurs calculés ; du nord au sud : (a) cordon littoral de la Turballe nord (b) Pointe de Penbron (c) Tombolo de La Baule (d) Cordon littoral de Saint-Brévin-les-Pins nord (e) Cordon littoral de Saint-Brévin-les-Pins sud (f) Cordon littoral de Saint-Michel-Chef-Chef (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.

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 non-humains 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).

Prises unes à unes, les valeurs extrêmes des indicateurs sont dispersées le long de la côte. Le cordon de 1^{ère} 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 matière d'emprise et de hauteur d'eau pourra être situé en retrait d'un cordon de 1^{ère} 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 (Île 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 2^{ème} 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.

Une synthèse spatiale des résultats par indice est ensuite menée à 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 1^{ère} 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 2^{ème} 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.

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 2^{ème} 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. Cinq flèches sableuses et quatre 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)

Chapitre 4 : Caractérisation de la capacité de protection des massifs dunaires de la région Pays de la Loire (France) face au risque de submersion marine

Systèmes dunaires du nord au sud de la Région Pays de la Loire (longueur totale en m)	Sensibilité à la submersion du cordon 1 ^{ère} ligne (S1) <i>min = 1 ; max = 5</i>	Sensibilité à l'érosion côtière du cordon de 1 ^{ère} ligne (S2) <i>min = 1 ; max = 5</i>	Sensibilité à la submersion de l'arrière-dune (S3) <i>min = 1 ; max = 5</i>	Sensibilité globale à la submersion (SG) <i>f (S1 + S2 + S3) min = 2 ; max = 15</i>	Exposition des enjeux à la submersion (E1) <i>min = 1 ; max = 5</i>	Protection globale face à la submersion (PG) <i>f (SG * E1) min = 2 ; max = 75</i>
Cordon littoral de la Turballe nord (1448 m)						
Pointe de Penbron (5054 m)						
Flèche de la Baule (6939 m)						
Cordon littoral de Saint-Brévin-les-Pins nord (3387 m)						
Cordon littoral de Saint-Brévin-les-Pins sud (4316 m)						
Cordon littoral de Saint-Michel-Chef-Chef (1824 m)						
Flèche des Moutiers-en-Retz (4355 m)						
Pointe des Sableaux (1846 m)						
Cordon littoral de l'Île de Noirmoutier nord (6118 m)						
Cordon littoral de Luzéronde (3713 m)						
Cordon littoral de l'Épine (4147 m)						
Flèche de l'Île de Noirmoutier sud (12744 m)						
Flèche des Pays de Monts (9342 m)						
Cordon littoral des Pays de Monts (17661 m)						
Cordon littoral de l'Île d'Yeu (2583 m)						
Flèche de Saint-Gilles-Croix-de-Vie (5331 m)						
Cordon littoral de Brétignolles-sur-Mer sud (4739 m)						
Cordon littoral d'Olonne (9119 m)						
Flèche des Sables d'Olonne (1996 m)						
Flèche du Veillon (447 m)						
Cordon littoral de Longeville (10401 m)						
Cordon littoral de La Tranche-sur-Mer (7289 m)						
Casse de la Belle-Henriette et pointe d'Arçay (11394 m)						
Pointe de l'Aiguillon (2814 m)						

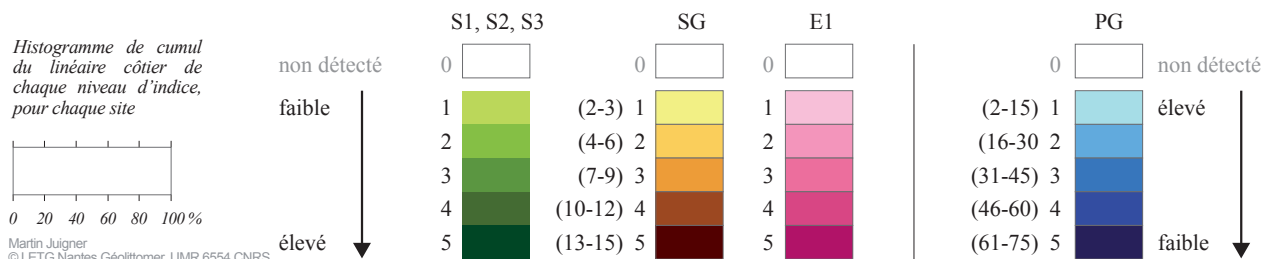


Figure 5 : Synthèse des différents niveaux d'indices par massif dunaire (S1, S2, S3, SG, E1 et PG)

5. Discussion

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 perpendiculaires au trait de côte. L'approche par boîte présente un potentiel issu de la combinaison de ces deux techniques. A 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 traitée et intégrée 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 fourni 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 matière 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.

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. 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 1^{ère} ligne peut être estimée dans chaque boîte selon la formule suivante :

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

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 1^{ère} 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).

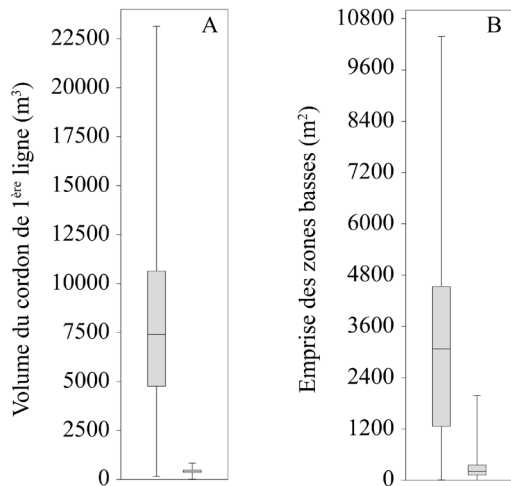


Figure 6 : Estimation de l'erreur associée au calcul de volume -A- et à l'extraction de surfaces (ici les zones basses) -B- à partir des données LiDAR Litto3D (résolution 1m ; précision $z = \pm 0,20 \text{ m}$) le long du massif dunaire des Pays de Monts (1060 boîtes). Sur chaque graphique, la boîte 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.

L'emprise des enjeux non-humains 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 que, 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.

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 1ère 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 1ère 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 1ère 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 1ère 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).

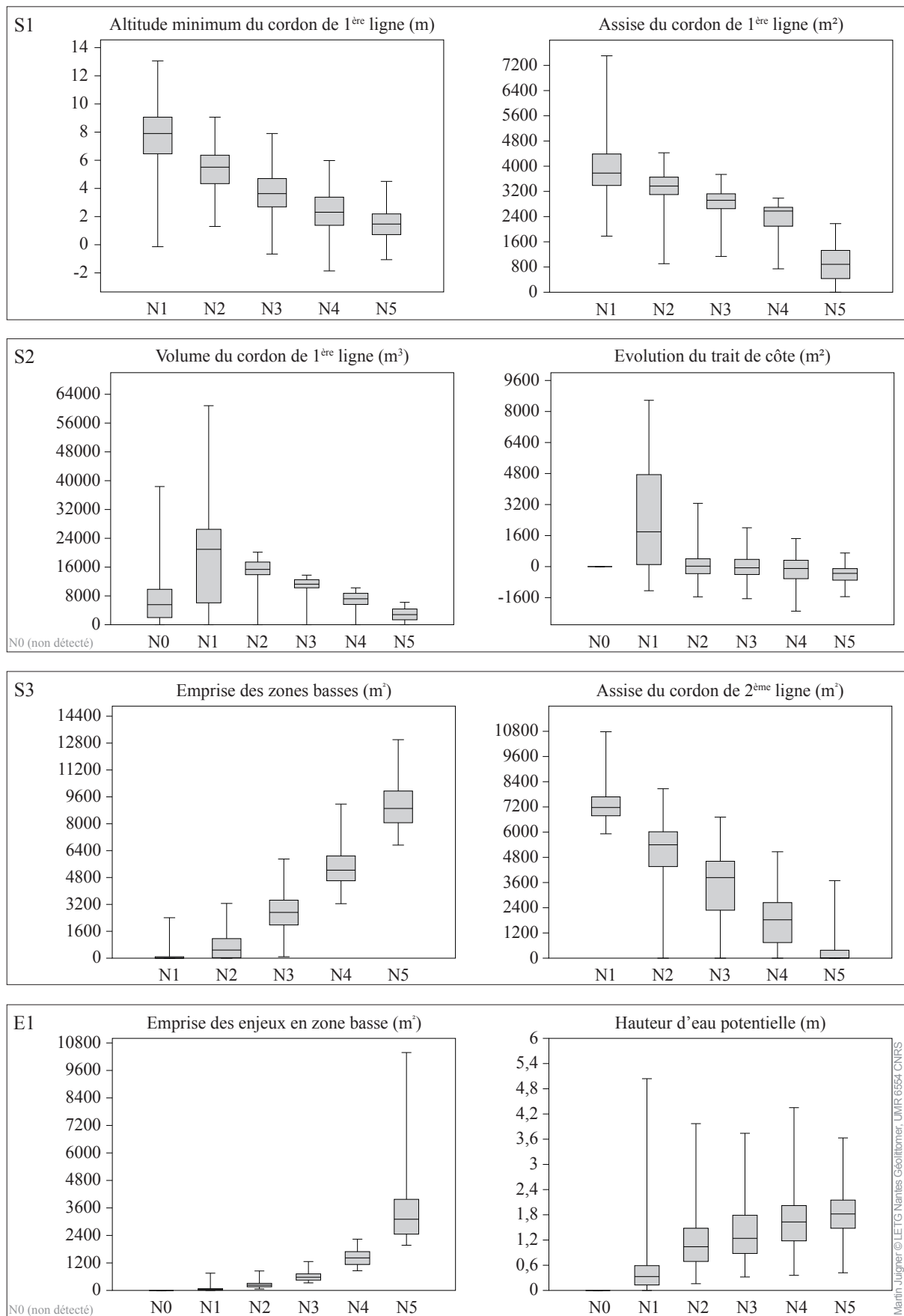


Figure 7 : Description par indicateur des niveaux de chaque indice ; S1 (sensibilité à la submersion du cordon de 1^{ère} ligne), S2 (sensibilité à l'érosion côtière du cordon de 1^{ère} ligne), S3 (sensibilité à la submersion de l'arrière-dune) et E1 (exposition des enjeux à la submersion).

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 Luzéronde, de la Guérinière, de Fromentine, des Lays (nord Pays de Monts), de la Pège à Sion, de l'Ile d'Yeu, du Goulet, de La Tranche et de la Belle-Henriette. (ii) Les secteurs de Fromentine, des Lays et de l'Ile 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 matière 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 1^{ère} 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 1^{ère} ligne se sont formées malgré la présence d'ouvrages de protection, à la Tranche-sur-Mer et à la pointe de l'Aiguillon.

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 DOM. 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 Loire. 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 trois 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).

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 connaissances en matière 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. A 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.

6. Conclusion

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 boîtes. 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.

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^{ère} 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 2^{ème} 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 potentielle. Les massifs dunaires ne jouant pas un rôle de protection (absence d'enjeux en zone basse) s'étendent sur 79 km de côte. Cependant, cinq flèches sableuses et quatre 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^{ème} 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.

Cette démarche géomatique propose un diagnostic fin, exhaustif et homogène présentant différents niveaux de lecture. A terme, l'information est disponible (i) pour chaque composante d'un système dunaire (cordon de 1^{ère} 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 trois 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.

Enfin, l'approche par boîte permet de produire une connaissance homogène permettant de pallier au manque de connaissance concernant certains secteurs côtiers jusqu'ici peu étudiés. La démarche présentée dans cet article est en cours d'intégration dans un observatoire des risques côtiers en région Pays de la Loire. 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.

Remerciements

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.



Conclusion générale

L'érosion côtière et la submersion marine sont les deux principaux aléas affectant les littoraux dunaires. L'impact des événements extrêmes survenus en ce début de XXI^e siècle a contribué à développer une prise de conscience aiguë quant au rôle que peuvent jouer certains cordons dunaires face aux aléas météo-marins. Les dunes bordières sont davantage perçues comme des barrières naturelles ayant un rôle de défense contre la mer. L'évaluation de l'état de conservation des cordons dunaires jouant un rôle d'obstacle face à la submersion est donc placée au centre des préoccupations des gestionnaires. Ces cordons sont d'autant plus sensibles lorsqu'ils sont soumis au phénomène d'érosion côtière. En effet, le recul du trait de côte entraîne une diminution de l'assise des cordons de 1^{ère} ligne, affaiblissant d'autant leur capacité de protection face à la submersion. Le long des secteurs urbanisés, le recul du trait de côte peut directement menacer les aménagements implantés à proximité ou directement sur le cordon de 1^{ère} ligne. Dans ce contexte, l'évaluation de l'état de conservation des massifs dunaires et l'identification des territoires à risque d'érosion sont devenus une préoccupation majeure pour les gestionnaires et les décideurs.

Suites aux recommandations du Grenelle de la Mer (2009), la Stratégie nationale tend à développer et structurer l'observation du trait de côte à échelle nationale à travers les programmes d'action 2012-2015 et 2017-2019. Les observatoires régionaux du trait de côte sont placés en première ligne par l'État pour soutenir et appuyer les gestionnaires et les décideurs dans le processus de réduction du risque. Parmi les recommandations formulées figure le besoin de « développer les outils de l'observation du trait de côte et de la compréhension de son évolution à l'échelle nationale et au sein des régions pour prioriser l'action publique » (Cousin, 2011). En ce sens, le CEREMA a réalisé et diffusé les résultats de l'indicateur national d'érosion du trait de côte à échelle nationale. Dans le même temps, l'ONF a développé une méthodologie opérationnelle pour caractériser la robustesse des cordons domaniaux face à la submersion. Cependant, le besoin de disposer d'un outil opérationnel permettant d'établir des diagnostics fins et précis a pu être identifié.

À partir des expériences antérieures, cette thèse a donc interrogé la possibilité de formaliser, mettre en application et automatiser une procédure spatiale opérationnelle et transposable pour l'évaluation cartographiée des espaces côtiers soumis aux aléas érosion côtière et submersion marine. Les objectifs initiaux reposaient sur l'hypothèse que l'utilisation de données génériques, conjuguée à une segmentation homogène de la bande côtière, autorise l'extraction d'indicateurs synthétiques, dont la combinaison permet de définir des indices composites apportant des réponses synoptiques, quantitatives et spatialisées aux questions posées. À terme, la revue des méthodes en analyse côtière a conduit à présenter l'application et les limites d'une méthode classique d'analyse du trait de côte avant de développer et déployer une démarche originale de diagnostic adaptée à (i) l'évaluation des territoires à risque d'érosion et (ii) la caractérisation de la capacité de protection dunaire face à la submersion marine. Cette thèse apporte donc un éclairage méthodologique et une connaissance thématique nouvelle en réponse à la problématique initiale.

1. Apports pour le développement de méthodes en analyse spatiale

Il a été établi que l'analyse des risques côtiers nécessite souvent de recourir aux outils de la géomatique, et que l'utilisation d'indicateurs est largement répandue dans la littérature. De fait, il existe une grande diversité d'indicateurs environnementaux et sociétaux. L'échelle d'analyse, la disponibilité des données et la mise en place d'un raisonnement spatialisé sont souvent déterminants dans le choix des indicateurs. D'une manière générale, les études à petites échelles auront davantage tendance à utiliser des indicateurs généraux tandis que les études à grande échelle privilégieront davantage des indicateurs décrivant finement un objet d'étude. Deux principales approches ont été identifiées pour exploiter les indicateurs, l'approche simple reposant sur l'analyse d'un ou plusieurs

Conclusion générale

indicateurs distincts et l'approche basée sur plusieurs indicateurs dont la combinaison conduit à la création d'un indice synthétique. La revue de différents indices a permis de dégager quatre grandes étapes dans le processus de création d'un indice (l'encodage, la pondération, la combinaison et la discrétisation). Il ressort de cette revue qu'il n'existe pas réellement de méthode type, chaque étape présentant une diversité de possibilités d'exécution, certaines d'entre elles étant facultatives (encodage, pondération).

L'utilisation d'indicateurs et d'indices nécessite souvent de recourir à une méthode de segmentation afin de réaliser des synthèses spatiales. Ce deuxième aspect méthodologique a également fait l'objet d'une revue de la littérature afin de dégager les principales méthodes de segmentation utilisées sur le domaine côtier. Quatre méthodes ont été recensées : l'approche par mailles, l'approche par transects, l'approche par régions et l'approche par boîtes. Les trois premières sont des méthodes dites classiques car largement répandues dans la littérature. En revanche, la quatrième, l'approche par boîte, est qualifiée de novatrice en ce sens qu'elle est récente et peu diffusée dans la littérature. Il apparaît dans un premier temps que les transects, régions et boîtes sont distribués perpendiculairement à l'orientation de la côte, intégrant donc l'étagement littoral, ce que ne permet pas l'approche par mailles. L'approche par transects est une technique d'échantillonnage tandis que les approches par mailles, régions et boîtes couvrent entièrement un terrain d'étude.

Dans un second temps, une démonstration conceptuelle a été conduite pour établir et comparer l'aptitude des quatre méthodes à intégrer et mettre en relation les différents types d'entités spatiales (point, ligne, polygone et pixel). À ce stade de la démonstration, il ressort de l'exercice que les boîtes et les régions présentent davantage d'aptitudes à intégrer et agréger les différents types d'entités spatiales que les approches par maille ou par transect. Les approches par régions et par boîtes ne présentent pourtant pas le même niveau de réponse face à la prise en compte de l'échelle d'observation, nécessaire pour la réalisation de diagnostics fin et précis. L'approche par boîte présente davantage de finesse dans la mesure où une région équivaut à un premier niveau d'agrégation de boîtes (« région-mère » et « boîte-fille »). La conséquence majeure de ce constat est que la qualité de la relation spatiale entre entités sera meilleure dans une boîte que dans une région. La faible largeur de la boîte implique que la distance entre entités sera plus faible que dans une région, ce qui aura pour effet de générer une coïncidence spatiale plus réaliste.

Les applications thématiques développées dans cette thèse confirment d'une part le fait que l'approche par transects est un support adapté pour l'étude fine de la dynamique du trait de côte. Bien qu'il s'agisse d'une méthode d'échantillonnage, l'intégration de l'ensemble des traits de côte a permis de quantifier et spatialiser, notamment par zones homogènes, la dynamique du trait de côte.

D'autre part, l'utilisation des boîtes pour l'évaluation des territoires à risque d'érosion et la caractérisation du rôle de protection des massifs dunaires illustrent la capacité de la méthode à bien intégrer toute l'information géographique et à établir des relations spatiales fortes entre les entités. Dans le premier cas, des polygones ont pu être associées à des polygones, la distance minimum entre les deux types d'entités ayant été calculée au sein de chaque boîte. Le raisonnement spatialisé est relativement simple et la combinaison de trois indicateurs est établie sur un seul niveau. Dans le second cas, des points, des polygones, des polygones et des grilles de pixels ont été pleinement intégrés puis combinés. Huit indicateurs sont mobilisés. Le raisonnement spatialisé mis en place présente davantage de complexité puisque la procédure d'agrégation se décline en trois niveaux, l'indice global étant composé de cinq sous-indices.

A terme, il apparaît que ces deux méthodes présentent donc, en fonction du type d'information à intégrer, un potentiel certain pour les analyses de variables répondant à la structuration étagée des littoraux.

2. Apports de nouvelles connaissances thématiques :

Les trois applications développées dans cette thèse apportent des nouvelles connaissances sur les thématiques de l'érosion côtière, de l'exposition du bâti au recul du trait de côte, et la capacité de protection des cordons dunaires face à la submersion marine.

2.1 Connaissance sur l'évolution du trait de côte

À échelle locale, l'analyse de l'évolution historique (1920-2010) du trait de côte des Pays de Monts enseigne que 26,4 % du littoral montois est en situation érosive depuis 90 ans tandis que les secteurs en accrétion représentent 37,4 % des 19 km de linéaire étudié. L'analyse périodique des résultats long terme révèle des rythmes d'évolution traduisant une variabilité temporelle de l'évolution du trait de côte. L'analyse des relevés du contact plage-dune par l'ONF sur la période 2010-2014 a permis de quantifier la vitesse de cicatrization du massif dunaire (2010-2013) suite aux érosions extrêmes enregistrées lors de la tempête Xynthia. Cette dynamique d'accrétion quasi-généralisée s'est stabilisée en 2013 avant d'être contrariée par la succession de tempêtes de l'hiver 2013-2014. Cette nouvelle crise érosive n'a pas affecté l'ensemble du linéaire côtier, cependant, il a été montré que l'impact de ces tempêtes a pu engendrer un recul du cordon de 1^{ère} ligne le long de secteurs moins résilients.

La dynamique du trait de côte des Pays de Monts présente donc des variations spatiales et temporelles à long, moyen et court terme. Si certains secteurs sont en situation érosive sur le long terme (ex. plages des Lays et du Pont d'Yeu), ceux-ci présentent une réelle capacité de cicatrization après des événements extrêmes.

À échelle régionale sur la période 1950-2011, l'étude de la dynamique du trait de côte le long des côtes sableuses (excluant le linéaire comportant des structures de protection) révèle que 35 km de côte sont en accrétion (la valeur maximale 5,24 m/a est enregistrée le long de la Pointe d'Arçay) et que 40 km présentent une situation érosive (la valeur maximale -1,43 m/a est située le long de la lagune de la Belle-Henriette). Un linéaire de 36 km, interprété comme relativement stable, ne présente pas de dynamique significative. Les principaux secteurs en érosion (< -0.70 m/a) se situent exclusivement sur le littoral vendéen : les secteurs des Éloux (à l'Épine), de la Pège (à Saint-Hilaire-de-Riez) et des Grandes Conches (sur l'Île d'Yeu) dans le nord du département, ceux de Saint-Anne et de la Belle-Henriette (La Tranche-sur-Mer et La Faute-sur-Mer) au sud.

2.2 Connaissance sur l'exposition du bâti à l'érosion côtière

En région Pays de la Loire, un total de 17 575 empreintes de bâti indifférencié a été détecté dans la bande des 100 m. 6 615 de ces empreintes constituent la rangée de bâti faisant front au trait de côte. L'urbanisation de la bande des 100 m touche environ 156 km de côte. Les côtes sableuses représentent 14 % du linéaire urbanisé (21 km), les côtes rocheuses 40 % (62 km) et les côtes fixées 47 % (73 km). Les principales ruptures d'urbanisation observées se situent en Vendée, correspondant principalement aux massifs dunaires et aux activités agricoles situées dans des polders.

L'étude de l'exposition du bâti au recul du trait de côte révèle qu'environ 5 162 m de côte sont caractérisés par la présence de bâti dans la bande des 100 m situé en arrière de zones en érosion. Parmi les 162 cas d'exposition détectés, les taux d'évolution du trait de côte varient entre -0.13 m/a et -0.99 m/a, la distance minimum trait de côte-bâti varie de 0 à 99 m et l'empreinte de bâti de 1^{ère} ligne atteint au maximum 737 m². 228 emprises de bâti de 1^{ère} ligne, équivalents à une surface totale de 25 029 m², sont dans une position exposée. Une exposition très élevée est détectée sur 695 m le long du littoral régional. Les empreintes de bâti situées en retrait des défenses côtières

Conclusion générale

sont plus importantes (241 m² en moyenne contre 147 m² pour les côtes rocheuses et 138 m² pour les côtes sableuses) et plus proches du trait de côte.

À échelle municipale, le territoire le plus exposé est la commune de la Tranche-sur-Mer. Une exposition du bâti a été enregistrée sur 2 359 m, distribués le long de 13 zones. D'un autre côté, la zone la plus exposée est située sur la commune de Saint-Hilaire-de-Riez. Elle est caractérisée par un fort recul côtier (érosion moyenne de -0,73 m/a), une faible distance trait de côte-bâti (distance moyenne de 39,26 m) et une forte emprise du bâti de 1^{ère} ligne (moyenne de 345,03 m²), le tout concentré sur un linéaire de 238,3 m.

2.3 Connaissance sur la capacité de protection des cordons dunaires face à la submersion marine.

La morphologie de chaque massif a été décrite dans une base de données regroupant les paramètres suivants : l'altitude minimum, l'assise et le volume du cordon de 1^{ère} ligne, l'évolution du trait de côte en surface, l'emprise des zones basses et l'assise du cordon de 2^{ème} ligne. Chaque massif peut ainsi faire l'objet d'une description approfondie basée sur des métriques homogènes. D'une manière générale, les massifs dunaires sont caractérisés par une grande variabilité entre et à l'intérieur de chaque site. Par exemple, la flèche des Moutiers-en-Retz est composée d'un cordon de 1^{ère} 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). À l'inverse, le cordon littoral de Longeville est caractérisé par un cordon de 1^{ère} 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. Dix formations dunaires présentent une situation de crête transparente par rapport à l'aléa de référence. 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.

La distribution des enjeux non-humains situés en zone basse est aussi inégalement répartie 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). Les secteurs les plus marqués sont le cordon littoral des Pays de Monts (546 154 m²), la flèche de l'Île de Noirmoutier sud (375 834 m²), la Pointe des Sableaux (267 807 m²) ou encore le cordon de La Tranche-sur-Mer (245 262 m²).

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 1^{ère} ligne bas (altitude médiane = 2 m), étroit (assise médiane = 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^{ème} ligne faible (médiane = 229 m²).

Les dunes jouant un rôle de protection contre la submersion marine sont étendues sur 60 km. Les formations dunaires présentant une capacité de protection faible (niveau 5) sont caractérisées par un cordon bordier bas (altitude médiane = 1,82 m), étroit (assise médiane = 1 101 m²) avec un faible volume (1 735 m³) marqué par un recul du trait de côte (érosion médiane = -109 m²). L'arrière-dune est constituée d'une vaste zone basse (médiane = 8 331 m²) et d'une assise de cordon de 2^{ème} 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.

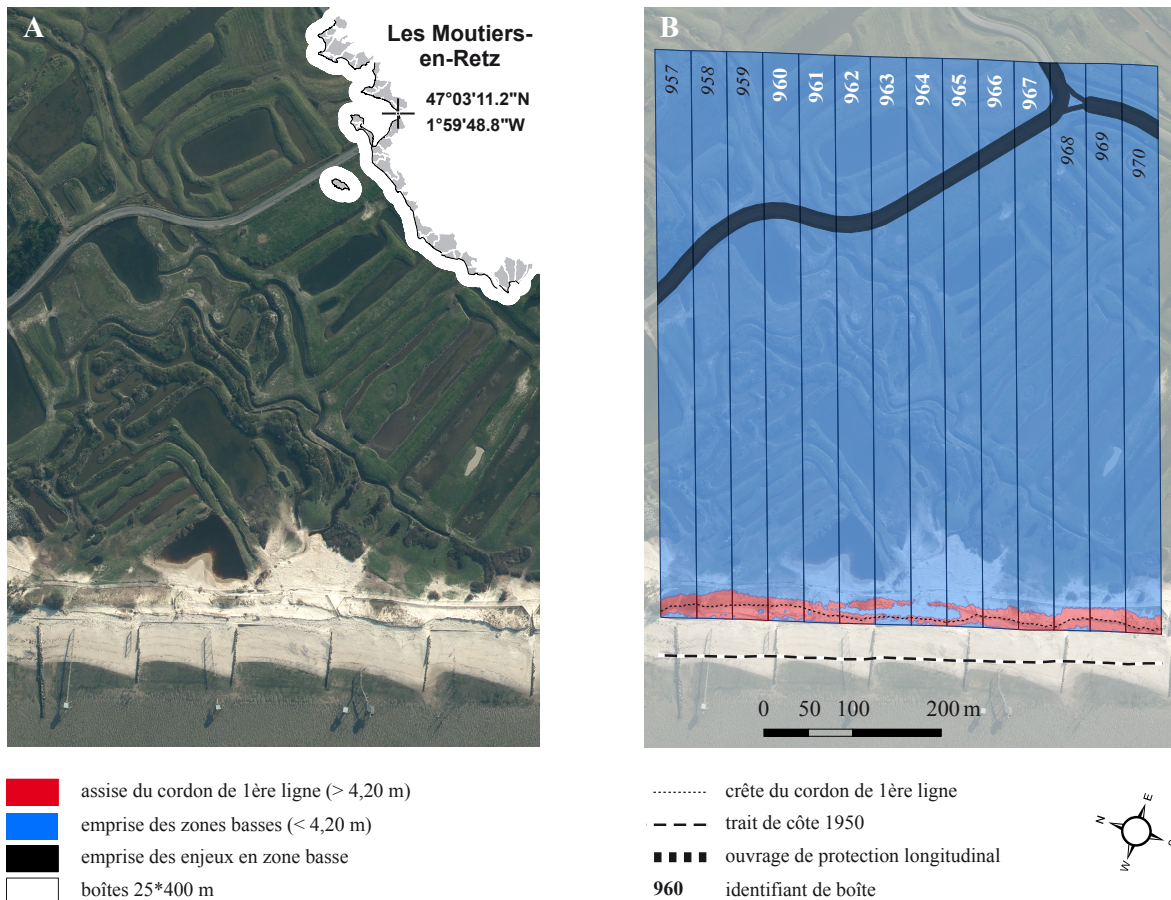
Les secteurs identifiés comme les plus sensibles sont les flèches des Moutiers, des Sableaux, d'Arçay et de l'Aiguillon, les cordons de Luzéronde, de la Guérinière, de Fromentine, des Lays (nord Pays de Monts), de la Pège à Sion, de l'Île d'Yeu, du Goulet, de La Tranche et de la Belle-Henriette.

98,5 % des boîtes intersectant les brèches recensées après la tempête Xynthia présentent un cordon de 1^{ère} ligne à sensibilité élevée face à la submersion marine.

3. Incertitudes liées à la méthode

D'une manière générale en SIG, l'exploitation de données cartographiques nécessite de prendre en compte l'incertitude liée à la donnée et à son traitement.

L'incertitude de position des traits de côte a été prise en compte dans le calcul de l'évolution du trait de côte à partir des transects (long, moyen et court termes) et à partir des boîtes. Dans ce



Extrait de la base de donnée :

ID	indicateurs									indices					
	A	A-1L	V	EC	ZB	A-2L	E-ZB	HE	S1	S2	S3	SG	E1	PG	
960	0,25	349,20	79,27	-634,65	9765,16	0	282,19	2,04	5	5	5	15 (5)	2	30 (2)	
961	0,06	314,09	37,77	-634,11	9797,92	0	288,75	2,40	5	5	5	15 (5)	2	30 (2)	
962	0,16	288,85	78,75	-628,34	9819,48	1	281,40	1,82	5	5	5	15 (5)	2	30 (2)	
963	-0,05	121,73	23,84	-593,76	9946,69	39,98	310,09	1,82	5	5	5	15 (5)	2	30 (2)	
964	0,07	108,30	11,01	-599,86	9964,68	29,67	322,90	1,16	5	5	5	15 (5)	2	30 (2)	
965	0,15	263,75	59,55	-601,09	9844,70	0	323,16	1,20	5	5	5	15 (5)	2	30 (2)	
966	0,35	336,12	115,09	-591,54	9782,00	0	323,62	1,51	5	5	5	15 (5)	2	30 (2)	
967	0,85	297,82	169,72	-573,17	9814,83	0	379,43	2,41	5	5	5	15 (5)	2	30 (2)	

ID identifiant des boîtes ; A altitude minimum du cordon de 1^{ère} ligne ; A-1L assise du cordon de 1^{ère} ligne ; V volume du cordon de 1^{ère} ligne ; EC érosion côtière ; ZB emprise des zones basses ; A-2L assise du cordon de 2^{ème} ligne ; E-ZB emprise des enjeux en zone basse ; HE hauteur d'eau potentielle ; 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 ; SG sensibilité globale (niveau d'indice) ; E1 exposition des enjeux à la submersion ; PG protection globale (niveau d'indice)

Realisation: Martin Juigner © LETG Nantes Géolittomer, UMR 6554 CNRS

Figure 1 : Exemple de fiche d'identification d'un secteur dunaire sensible situé aux Moutiers-en-Retz.

dernier cas, l'analyse surfacique de l'évolution du trait de côte a nécessité d'adapter une méthode de calcul pour évaluer l'incertitude surfacique de la position du trait de côte. Les analyses régionales de l'érosion côtière ne prennent en compte que la mobilité historique du trait de côte. Pour intégrer les tendances d'évolution récentes et affiner le diagnostic, il conviendrait d'ajouter de nouvelles positions du trait de côte à moyen et court terme.

L'inventaire des erreurs associées à la résolution spatiale et la précision planimétrique de chaque type de données mobilisées dans les diagnostics a été réalisé. Il en résulte que si l'incertitude associée à chaque donnée est modérée, il semble raisonnable de la prendre en compte dans l'interprétation des résultats des diagnostics. Cette précaution est d'autant plus importante si l'on considère que, d'une part, un jeu de données est une représentation instantanée d'un territoire. Par exemple, la morphologie dunaire analysée dans la thèse correspond à un instantané de l'état de la côte quelques mois après le passage de la tempête Xynthia, les données LiDAR Litto 3D ayant été acquises l'été suivant la tempête.

D'autre part, la temporalité des sources de données utilisées n'est pas uniforme (ex. LiDAR de 2010, BD TOPO de 2013).

Compte tenu de l'ensemble des biais identifiés, les résultats présentés dans cette thèse correspondent donc à une représentation cartographique instantanée du littoral des Pays de la Loire.

4. Une démarche opérationnelle en appui à la gestion des espaces côtiers

La démarche géomatique présentée dans cette thèse a été développée dans le cadre de concertations avec les partenaires de l'Observatoire du Littoral des Pays de Monts, et plus particulièrement avec l'Office National des Forêts. Le déploiement de la méthode sur la totalité du littoral régional a toutefois nécessité d'élargir cette co-construction à l'ensemble des configurations rencontrées sur ce littoral. La méthode développée a dû faire face à l'extrême diversité des sites d'études et à la nécessité de tous les intégrer pour proposer un diagnostic transposable.

Dans une idée in fine d'opérationnalité, cette démarche est articulée entre une vision terrain et une vision synoptique, à destination des gestionnaires et des décideurs. Cette articulation repose sur l'apport de la méthode pour la production d'une information synthétique à échelle fine (1/5 000 dans cette thèse contre 1/100 000 pour les études antérieures d'évaluation de l'érosion côtière).

La réalisation de synthèses spatiales (vision synoptique) à différents niveaux administratifs et/ou naturels 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. Cette démarche apporte un éclairage aux décideurs pour évaluer les risques à différentes échelles, leur offrant la possibilité d'estimer les coûts à investir pour minimiser les risques. Lorsque les fonds sont limités, cela peut faciliter les négociations par la mise en place d'arbitrages objectifs.

À un niveau scalaire plus fin, cette démarche constitue un système d'alerte opérationnel permettant de déceler finement l'ensemble des configurations à risques le long d'un littoral. Ce potentiel apporte la possibilité de planifier l'action publique pour la prévention et la gestion des risques à long terme, incluant notamment des mesures comme la relocalisation des biens et des activités si nécessaire. La lecture du risque apportée ici peut être intégrée dans les outils de prévention des risques et d'urbanisme. D'ores et déjà intégrée dans l'Observatoire Régional des Risques Côtiers en région Pays de la Loire, cette démarche, par les possibilités d'identification fine des secteurs à risque, permet d'assurer un monitoring ciblé sur les secteurs sensibles en amont et à l'aval des événements météo-marins extrêmes à risque. La cartographie exhaustive des massifs permet d'identifier, en amont des interventions, les secteurs nécessitant un suivi particulier. Les acteurs en charge de la prévention et de la gestion de ces espaces pourraient à présent s'appuyer sur des fiches d'iden-

tification réalisées à partir d'extractions du SIG (figure 1).

Enfin, les outils de la géomatique offrent la possibilité d'alimenter directement les acquisitions *in situ* par l'extraction d'indicateurs difficilement accessibles sur le terrain (ex. calcul tous les 25 m de l'altitude minimum, de l'assise et du volume du cordon de 1^{ère} ligne).

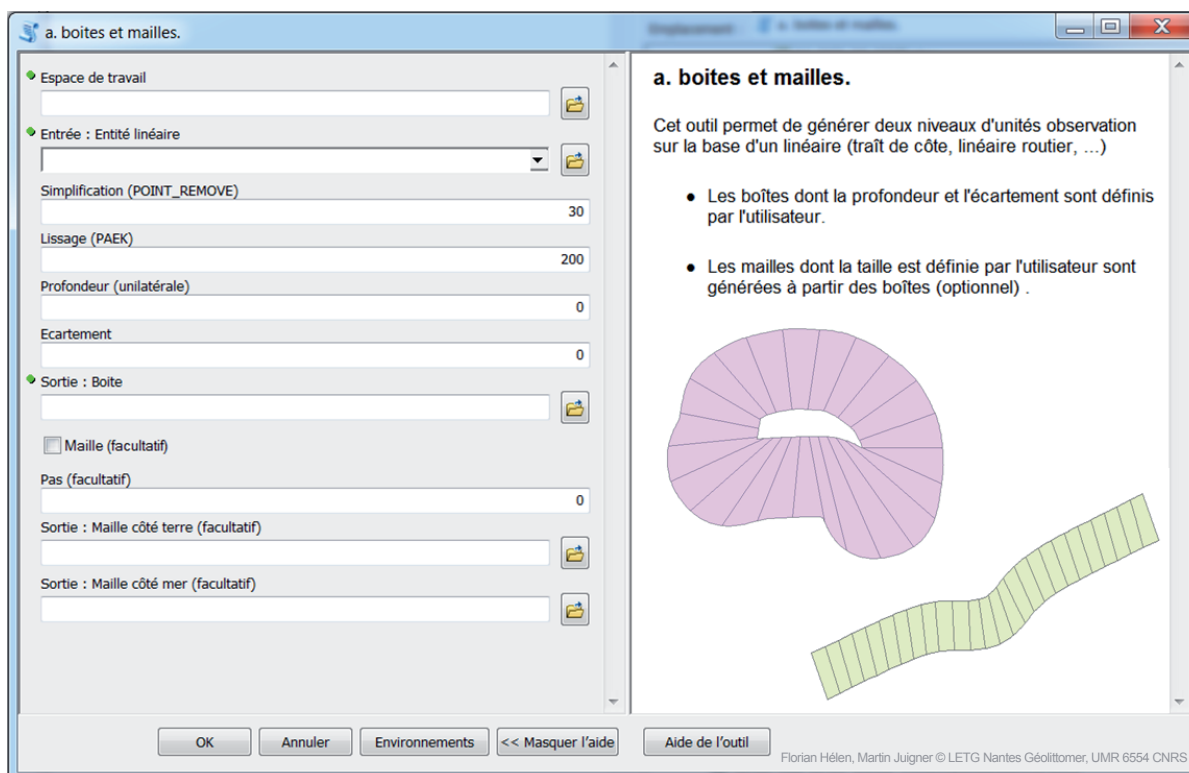


Figure 2 : Captures écran de l'interface de l'outil de géotraitement développé par Florian Hélen dans le cadre du projet DiDUNE

5. Perspectives : vers le développement d'un outil de géotraitement et l'intégration de nouveaux indicateurs

Pour être pleinement opérationnels, les protocoles présentés dans cette thèse ont été élaborés sous la condition de pouvoir être intégralement automatisés en vue de la création d'un outil de géotraitement. L'outil de géotraitement repose sur l'idée que la création de chaînes de modules de géotraitement utilisés en SIG et en programmation permet d'automatiser le diagnostic. Pour ce faire, Florian Hélen (contractuel du projet DiDUNE) a été recruté sur une période de six mois afin de développer en langage Python un outil destiné à être encapsulé de la même manière que les scripts implémentés dans les boîtes à outils d'ArcGIS 10.2.

L'objectif est donc de développer une véritable boîte à outil composé d'un premier script permettant de créer des boîtes et des mailles, puis d'une succession de scripts permettant de calculer les indicateurs.

A terme, la première phase a permis de développer une procédure originale aboutissant à la création de boîtes et de mailles (figure 2), de largeurs et de profondeurs modulables, adaptées à tous les types de côte (rectilignes, concaves ou convexes), le long de lignes ouvertes (continent) comme fermées (île). Ce script ne demande en entrée qu'une simple polyligne matérialisant le trait de côte. Il a été utilisé pour la création des unités d'observation de 30*100 m dans le chapitre 3 (couverture régionale soit 350 km) et de 25*400 m dans le chapitre 4 (couverture des massifs dunaires soit 140 km).

La seconde phase consiste donc à développer autant de scripts qu'il existe d'informations géographiques ou d'indicateurs à intégrer dans les unités d'observation. À ce jour, deux modules supplémentaires ont été développés. Un premier permettant de calculer les indicateurs déployés pour l'évaluation de l'exposition du bâti à l'érosion côtière, et un second permettant d'injecter dans les boîtes les limites du découpage administratif français pour la réalisation de synthèses statistiques. Cette démarche d'automatisation est actuellement intégrée dans l'OR2C en région Pays de la Loire. Les travaux actuels, menés par Florent Luquet (contractuel OR2C), visent à optimiser l'outil avant sa mise à disposition depuis la plateforme web de l'observatoire.

Ces premiers résultats sont encourageants et permettent d'entrevoir la possibilité (i) de tester différents pas de segmentation et prendre en considération l'autocorrélation spatiale pour optimiser les diagnostics, (ii) d'étendre l'approche par boîte sur d'autres territoires pour tester la reproductibilité de la méthode, (iii) de poursuivre l'automatisation en intégrant un module de diagnostic de la capacité de protection dunaire (iv) de mettre à jour les diagnostics par actualisation des données et (v) de développer de nouveaux indicateurs.

Ce dernier point inclut diverses possibilités. Ainsi, les dimensions habitat et analyse du relief dunaire, toutes deux développées dans le programme Multidune, n'ont pas été suffisamment approfondies pour être intégrées dans le diagnostic de la capacité de protection. L'analyse de la morphodynamique des systèmes plage-dune pourrait également faire l'objet d'un développement sur la base des acquis du Réseau de Suivi et de Surveillance Environnemental (RS2E) de l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Nantes et Angers (OSUNA). Ce projet a permis de mettre en place une méthode d'analyse de la réponse géomorphologique de trois systèmes plage-dune situés dans le nord Vendée à partir de l'exploitation de données LiDAR multi-dates (Le Mauff *et al.*, 2017). L'intégration de la vulnérabilité des enjeux bâtis face à la submersion marine telle que proposée par Créach *et al.* (2015) permettrait de traiter pleinement du risque de submersion.

Enfin, les besoins actuels et futurs de la Mission Littoral de l'ONF et plus largement de la Stratégie nationale pourrait faire l'objet d'échanges afin d'adapter la méthode proposée dans cette thèse et de développer de nouveaux indicateurs et indices opérationnels en matière de prévention et de gestion des risques côtiers.



Bibliographie



Bibliographie

- 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, pp. 189-205. doi - 10.1007/s11852-010-0097-0
- Arkema K.K., Guannel G., Verutes G., Wood S.A., Guerry A., Ruckelshaus M., Kareiva P., Lacayo M. et Silver M., 2013, Coastal habitats shield people and property from sea-level rise and storms, *Nature Climate Change*, 3, pp.913-918. doi: 10.1038/nclimate1944
- Balk D., Montgomery M.R., McGranahan G., Kim D., Mara V., Todd M., Buettner T. et Dorelien A., 2009, Mapping Urban Settlements and the Risks of Climate Change in Africa, Asia and South America In Guzmán J.M., Martine G., McGranahan G., Schensul D. et Tacoli C (ed), *Population Dynamics and Climate Change*. UNFPA, New York, IIED, London, pp. 80-103.
- Barone D.A., Farrell S.C., Koch R.V., Howard B.S. et Gruver M.H., 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] 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 Bernard (dir.), 1999, *Le littoral. Problèmes et pratiques de l'aménagement*, éditions BRGM - Manuels et méthodes, 32, pp. 93-117.
- Bate G. et Fergusson M., 1996, Blowouts in coastal foredunes, *Landscape and Urban Planning*, 34, pp. 215-224.
- Battiau-Queney Y., Billet J.F., Chaverot S. et Lanoy-Ratel P., 2003, Recent mobility and geomorphologic evolution of macrotidal sandy beaches in the north of France, *Marine Geology*, 194, 1-2, pp.31-45.
- Berger A.R., 1996, The geoinicator concept and its application: an introduction, In Berger A.R. et Lams W.J. (Ed.), *Geoinicators: Assessing Rapid Environmental Changes in Earth Systems*, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 1-14.
- Bernatchez P., Fraser C., Lefavre D. et Dugas S., 2011, Integrating anthropogenic factors, geomorphological indicators and local knowledge in the analysis of coastal flooding and erosion hazards, *Ocean & Coastal Management*, 54, pp. 621-632. doi : 10.1016/j.ocecoaman.2011.06.001
- Bio A., Bastos L., Granja H., Pinho J.L.S., Gonçalves J. A., Henriques R., Madeira S., Magalhaes A. et Rodrigues D., 2015, Methods for coastal monitoring and erosion risk assessment: two Portuguese case studies, *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 15, 1, pp. 47-63.
- Bird E.C.F., 1985, *Coastline Changes*. Wiley & Sons, New York.
- Boak E.H. et Turner I.L., 2005, Shoreline definition and detection: a review, *Journal of Coastal Research*, 21, 4, pp. 688-703. doi : 10.2112/03-0071.1.
- Bodéré J.C., Cribb R., Curr R., Davies P., Hallégouët B., Meur C., Piriou N., Williams A. et Yoni C., 1991, La gestion des milieux dunaires littoraux. Évolution de leur vulnérabilité à partir d'une liste de contrôle, Étude de cas dans le sud du Pays de Galles et en Bretagne occidentale, *Norois*, 151, pp. 279-298.
- Brodie K.L. et Spore N.J., 2015, Foredune classification and storm response: automated analysis of terrestrial LiDAR DEMs, In Wang P., Rosati J. D. et Cheng J. (Ed.) *The Proceedings of the Coastal Sediments 2015*, 14 p. doi : 10.1142/9789814689977_0041
- Bruzzi C. et Provansal M., 1996, Impacts morphosédimentaires des tempêtes sur les Côtes de Provence, *Quaternaire*, 7, 2-3, pp. 129-137.
- Bulteau T., Garcin M., Lenôtre N. et Oliveros C., 2011, Synthèse des travaux menés sur l'observation de l'évolution du trait de côte, Rapport BRGM/RP-59296-FR, 156 p. [En ligne] <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-59396-FR.pdf> Consulté le 14 août 2017.

-
- Bulteau T., Mugica J., Mallet C., Garnier C., Rosebery D., Maugard F., Nicolae Lerma A. et Nahon A. avec la collaboration de Millescamps B., 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.
- Burningham H. et French J., 2017, Understanding coastal change using shoreline trend analysis supported by cluster-based segmentation, *Geomorphology*, 282, pp. 131-149. doi : 10.1016/j.geomorph.2016.12.029
- Bush D.M., Neal W.J., Young R.S. et Pilkey O.H., 1999, Utilization of geoindicators for rapid assessment of coastal-hazard risk and mitigation, *Ocean & Coastal Management*, 42, pp. 647-670.
- Bush D.M. et Young R., 2009, Coastal Features and Processes In Young R. et Norby L. (Ed.), *Geological Monitoring*, Geological Society of America, Colorado, pp. 47-67.
- Caloz R. et Collet C., 2011, *Analyse spatiale de l'information géographique*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 383 p.
- Carapuço M., Silveira T.M., Taborda R., Andrade C., Freitas M.C. et Pinto C., 2013, Development of a beach monitoring program: linking science and management - a case study from Portugal, *Geo-Temas*, 14, pp. 43-46.
- Carapuço M.M., 2015, Coastal indicators, In Kennish M.J. (Ed.), *Encyclopedia of estuaries*, Encyclopedia of Earth Sciences Series, Springer, 139 p.
- Carapuço M.M., Taborda R., Mendes Silveira T., Psuty N.P., Andrade C. et Conceição Freitas M., 2016, Coastal geoindicators: Towards the establishment of a common framework for sandy coastal environments, *Earth-Science Reviews*, 154, pp. 183-190. doi : 10.1016/j.earscirev.2016.01.002
- Castelle B., Marieu V., Bujan S., Splinter K.D., Robinet A., Sénéchal N. et 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, pp.135-148. doi: 10.1016/j.geomorph.2015.03.006
- Castillo M.E., Baldwin E.M., Casarin R.S., Vanegas G.P. et Juarez M.A., 2012, Characterization of risks in coastal zones: a review, *Clean - Soil, Air, Water*, 40, 9, pp. 894-905.
- Cauvin C., Raymond H. et Serradj A., 1987, *Discrétisation et représentation cartographique*, Montpellier, GIP Reclus, 116 p.
- Chauveau E., Chadenas C., Comentale B., Pottier P., Blançœil A., Feuillet T., Mercier D., Pourinet L., Rollo N., Tillier I. et Trouillet B., 2011, Xynthia: leçons d'une catastrophe. *Cybergeo: European Journal of Geography, Environnement, Nature, Paysage*, 538, pp. 1-25, [En ligne]: <https://cybergeo.revues.org/23763>. Consulté le 18 décembre 2016.
- Ciccarelli D., Pinna M.S., Alquini F., Cogoni D., Ruocco M., Bacchetta G., Sarti G. et Fenu G., 2017, Development of a coastal dune vulnerability index for Mediterranean ecosystems: A useful tool for coastal managers ? *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 187, pp. 84-95. doi : 10.1016/j.ecss.2016.12.008
- 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] 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.
- Cohen O., Dolique F., Anthony E.J. et Héquette A., 2002, L'approche morphodynamique en géomorphologie littorale In Baron-Yelles N., Goeldner-Gianella L. et Velut S. (dir.) *Le littoral, regards, pratiques et savoirs*, Études offertes à Fernand VERGER. Edition Rue d'Ulm / Presses universitaires de l'École Normale Supérieure, Paris, pp. 191-214.

Bibliographie

- Costanza R., d'Arge R., de Goot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R.V., Paruelo J., Raskin R.G., Sutton P. et van der Belt M., 1997, The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387, pp. 253-260.
- Cousin A., 2011, Propositions pour une stratégie nationale de gestion du trait de côte, du recul stratégique et de la défense contre la mer, partagée entre l'État et les collectivités territoriales, 61 p. [En ligne] <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/114000656.pdf> Consulté le 14 août 2017.
- Créach A., Pardo S., Guillotreau P. et 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, pp. 1679-1710. doi : 10.1007/s11069-015-1669-y
- Crowell M., Leatherman S.P. et Buckley M.K., 1991, Historical Shoreline Change: Error Analysis and Mapping Accuracy, *Journal of Coastal Research*, 7, 3, pp. 839-852.
- Dada O.A., Li G., Qiao L., Ding D., Ma Y. et Xu J., 2016, Seasonal shoreline behaviours along the arcuate Niger Delta coast: Complex interaction between fluvial and marine processes, *Continental Shelf Research*, 122, pp.51-67. doi: 10.1016/j.csr.2016.03.002
- Dauphiné A., 2002, Réflexions préliminaires sur les vulnérabilités analytiques et synthétiques, In Veyret Y. *et al.*, Risques naturels et aménagement en Europe, actes du colloque international, Grande Arche de la Défense, 22-24 octobre 2002, Paris, A. Colin, 254 p.
- DDTM 85, 2013, Plan de Prévention des Risque Littoraux, Pays de Monts, Pays d'Olonne et Pays Talmondaïs, Rapport de phase 1, 952 p. [En ligne] http://webissimo.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/PPRL_3_Pays_Rapport_de_phase_1_v4-0_cle297df4.pdf Consulté le 03 juillet 2017.
- 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] 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] https://www1.liteau.net/uploads/projet_documents/LITEAU_III_2007_Debaine_Synthese_long.pdf. Consulté le 06 février 2016.
- 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. doi - 10.1016/j.ocecoaman.2012.03.012.
- Deboudt P., Dauvin J.C. et Lozachmeur O., 2008, Recent developments in coastal zone management in France: The transition towards integrated coastal zone management (1973-2007), *Ocean & Coastal Management*, 51, 3, pp.212-228. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2007.09.005
- Deboudt P., 2010, Towards coastal risk management in France, *Ocean & Coastal Management*, 53, pp.366-378. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2010.04.013
- Del Rio L., Gracia F.J. et Benavente J., 2013, Shoreline change patterns in sandy coasts. A case study in SW Spain, *Geomorphology*, 196, pp. 252-266. doi : 10.1016/j.geomorph.2012.07.027
- Depellegrin D., Blažauskas N. et de Groot R.S., 2010, Mapping of sensitivity to oil spills in the Lithuanian Baltic sea coast, *Baltica*, 23, 2, pp. 91-100.
- De Pippo T., Donadio C., Pennetta M., Petrosino C., Terlizzi F. et Valente A., 2008, Coastal hazard assessment and mapping in Northern Campania, Italy, *Geomorphology*, 97, pp. 451-466.

-
- Devaux E., Désiré G., Boura C., Lowenbruck J., Bérenger N., Rouxel N. et Romain N., 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] http://www.pays-de-la-loire.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/rapport_REX_final.pdf. Consulté le 01 Janvier 2017.
- D'Ercole R. et Metzger P., 2011, Les risques en milieu urbain : éléments de réflexion, *EchoGéo*, 18, 17 p. [En ligne] <https://echogeo.revues.org/12640> Consulté le 13 août 2017.
- Dickson E., Baker J.L., Hoornweg D. et Tiwari A., 2012, Urban risk assessments: understanding disaster and climate risk in cities. Urban development series. World Bank. [En ligne] <http://documents.worldbank.org/curated/en/2012/06/16499064/urban-risk-assessments-understanding-disaster-climate-risk-cities> Consulté le 02 avril 2016.
- Dolan R., Fenster M.S. et Holme J., 1991, Temporal Analysis of Shoreline Recession and Accretion, *Journal of Coastal Research*, 7, 3, pp. 723-744.
- Dolan R., Fenster M.S. et Holme J., 1992, Spatial Analysis of Shoreline Recession and Accretion, *Journal of Coastal Research*, 8, 2, pp. 263-285.
- Dowling R.K. et Pforr C. (ed.), 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. [En ligne] http://www.pays-de-la-loire.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Developpement_de_l_urbanisation_et_loi_littorale_cle5e4394.pdf Consulté le 17 février 2016.
- Dupont P., 2005, L'état actuel du peuplement végétal des dunes de Vendée, *Société Botanique de France, Journal de Botanique*, 32, pp. 5-31.
- Durand P., 2000, Approche méthodologique pour l'analyse de l'évolution des littoraux sableux par photo-interprétation, Exemple des plages situées entre les embouchures de l'Aude et de l'Hérault (Languedoc, France), *Photo-interprétation*, 2000/1-2, pp. 3-18.
- EEA, 2006, The changing faces of Europe's coastal areas, EEA Report 6/2006 [En ligne] http://www.eea.europa.eu/publications/eea_report_2006_6 Consulté le 28 novembre 2016.
- Fattal P., Maanan M., Tillier I., Rollo N., Robin M. et Pottier P., 2010, Coastal vulnerability to oil spill pollution: the case of Noirmoutier Island (France), *Journal of Coastal Research*, 26, 5, pp. 879-887. doi - 10.2112/08-1159.1.
- 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.
- Favennec J., 2002, Paysages des dunes littorales non boisées de la côte atlantique - Une conjonction de formes et de communautés végétales en constante évolution In Favennec *et al.*, *Connaissance et gestion durable des dunes de la côte atlantique*, Manuel récapitulant les enseignements du projet européen Life-Environnement de «Réhabilitation et gestion durable de quatre dunes françaises», Les dossiers forestiers, 11, ONF, p. 93-108.
- Gaillot S. et 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*, 7, 1, pp. 47-54.
- García-Mora M.R., Gallego-Fernandez J.B., Williams A.T. et García-Novo F., 2001, A coastal dune vulne-

Bibliographie

- rability classification. A case study of the SW Iberian Peninsula, *Journal of Coastal Research*, 17, pp. 802-811.
- Garry G., Graszak 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.
- Gentz A.S., Fletcher C.H., Dunn R.A., Frazer L.N. et Rooney J.J., 2007, The Predictive Accuracy of Shoreline Change Rate Methods and Alongshore Beach Variation on Maui, Hawaii, *Journal of Coastal Research*, 23, 1, pp.87-105.
- Geos-DHI, 2008, Étude de connaissance des phénomènes d'érosion sur le littoral vendéen. [En ligne] <http://www.pays-de-la-loire.developpement-durable.gouv.fr/etude-de-connaissance-des-phenomenes-d-erosion-sur-a1899.html> Consulté le 16 août 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).
- Giardino A., Santinelli G. et Vuik V., 2014, Coastal state indicators to assess the morphological development of the Holland coast due to natural and anthropogenic pressure factors, *Ocean & Coastal Management*, 87, pp. 93-101.
- Gomez C., Wulder M.A., Dawson A.G., Ritchie W. et Green D.R., 2014, Shoreline Change and Coastal Vulnerability Characterization with Landsat Imagery: A Case Study in the Outer Hebrides, Scotland, *Scottish Geographical Journal*, 130, 4, pp. 279-299. doi : 10.1080/14702541.2014.923579
- Gornitz V., 1991, Global coastal hazards from future sea level rise, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 89, pp. 379-398.
- Gouguet L., 2007, Lorsque la dune devient digue, l'exemple de Noirmoutier, *Rendez-vous techniques*, 17, pp. 58-60.
- Gouguet L., 2010, Observatoire du littoral des Pays de Monts - description des tronçons, Note ONF du 01/09/2010, 16 p.
- 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. [En ligne] <http://www.onf.fr/outils/medias/20110524-080057-713119/++files++/2> Consulté le 15 décembre 2016.
- Gouguet L., 2012, Restaurer les dunes digues, *Espaces naturels*, 39, pp. 48-49.
- Gouguet L. et Roche A., 2014, Évolution de la gestion des dunes domaniales : les nouvelles stratégies, *Dynamiques Environnementales*, 33, 10 p.
- Gouleau D., 1968, Etude hydrologique et sédimentologique de la baie de Bourgneuf, Thèse de 3e cycle, Université de Nantes, 193 p.
- Granja H., Pinho J. et 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. et Makowski C. (Ed.), *Remote Sensing and Modeling, Advances in Coastal and Marine Resources*, Springer, pp. 481-494.
- Hapke C.J., Reid D., Richmond B.M., Ruggiero P. et 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.
- Hardin E., Kurum M.O., Mitsova H. et Overton M.F., 2012, Least Cost Path Extraction of Topographic Features for Storm Impact Scale Mapping, *Journal of Coastal Research*, 28, 4, pp. 970-978.

-
- Heileman S. (Ed.), 2006, A Handbook for Measuring the Progress and Outcomes of Integrated Coastal and Ocean Management. IOC Manuals and Guides, 46, ICAM Dossier 2, Paris, UNESCO, 224 p. [En ligne] <http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001473/147313e.pdf> Consulté le 31 juillet 2017.
- Hénaff A. (Ed.) et M. Philippe, 2014, Gestion des risques d'érosion et de submersion marines, guide méthodologique. Projet Cocorisco. 156 p. [En ligne] <http://www.risques-cotiers.fr/fr/boîte-a-outils/guide-cocorisco>. Consulté le 13 mai 2017.
- Hesp P., 2002, Foredunes and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics, *Geomorphology*, 48, pp. 245-268.
- Himmelstoss E.A., 2009, DSAS 4.0 Installation Instructions and User Guide. [En ligne] http://woods-hole.er.usgs.gov/project-pages/DSAS/version4/data/DSASv4_3.pdf. Consulté le 07 août 2016.
- IFEN, 2006, Un quart du littoral recule du fait de l'érosion, le quatre page, 113.
- IGN, 2015, BD TOPO® Version 2.1, Descriptif de contenu, 204 p. [En ligne] http://professionnels.ign.fr/sites/default/files/DC_BDTOPO-2-1.pdf Consulté le 01 Juillet 2017.
- Jonkman S.N., van Gelder P.H.A.J.M. et Vrijling J.K., 2003, An overview of quantitative risk measures for loss of life and economic damage, *Journal of Hazardous Materials*, 99, 1, pp. 1-30.
- Jackson C.W. Jr, Alexander C.R. et Bush D.M., 2012, Application of the AMBUR R package for spatio-temporal analysis of shoreline change: Jekyll Island, Georgia, USA, *Computers & Geosciences*, 41, pp.199-207. doi: 10.1016/j.cageo.2011.08.009
- Judge E.K., Overton M.F. et Fisher J.S., 2003, Vulnerability Indicators for Coastal Dunes, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 129, 6, pp. 270-278. doi : 10.1061/(ASCE)0733-950X(2003)129:6(270)
- Juigner M., Robin M., Fattal P., Maanan M., Le Guern C., Gouguet L., Baudouin V. et Debaine F., 2012, Cinématique d'une trait de côte sableux en Vendée entre 1920 et 2010, Méthode et analyse, *Dynamiques environnementales*, 30, pp.29-39.
- Juigner M., Robin M., Debaine F. et 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, pp. 40-52. doi : 10.1016/j.ocecoaman.2017.07.014
- Kerguillec R. et Robin M., 2017, Observatoire Régional des Risques Côtiers en Pays de la Loire, Rapport d'avancement du module 1 - État des lieux des données sur les risques côtiers en Pays de la Loire, version provisoire, 93 p.
- Kummu M., de Moel H., Salvucci G., Viviroli D., Ward P.J. et Varis O., 2016, Over the hills and further away from coast: global geospatial patterns of human and environment over the 20th-21st centuries, *Environmental Research Letters*, 11, 3. doi : 10.1088/1748-9326/11/3/034010
- Leatherman S.P., Zhang K. et Douglas B.C., 2000, Sea level rise shown to drive coastal erosion, *Eos*, 81, pp.55-57.
- Le Berre I., Bailly D., Philippe M. et Kato Y., 2014, Analyse économique des enjeux exposés aux risques côtiers : application au bâti résidentiel de Bretagne In Meur-Férec C. et Hénaff A. (Ed.), Acte du colloque international « Connaissance et compréhension des risques côtiers : Aléas, Enjeux, Représentations, Gestion », Juillet 2014, Plouzané, France, pp.204-213.
- Le Berre I., Maulpoix A., Thériault M. et 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. doi: 10.1016/j.landusepol.2015.09.007
- Le Corre C., Auvray B., Balleve M. et Robardet M., 1991, Le Massif Armoricaïn, *Scientific Geological Bulletin*, 44, 1-2, pp.31-103.

Bibliographie

- 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. avec la collaboration de Conil P. et Bouchet F., 2012, Observatoire du littoral des Pays de Monts - Rapport d'avancement 2011, Rapport BRGM RP-61098-FR, 89 p.
- Le Guern C., Suaud S., Legras L., Fattal P., Gouguet L., Robin M., Baudouin V., Mallet C. avec la collaboration de Maanan M., Ramon N., Debaine F., Renault R., Jaouen J., Conil P., Bouchet F. et Favennec J., 2011, Observatoire du littoral des Pays de Monts - Synthèse des réalisations 2010, Rapport BRGM RP-59538-FR, 207 p.
- Le Guern C., Juigner M., Baudouin V., Robin M., Fattal P., Rollier C., Marie D. et Maanan M. avec la collaboration de Conil P., Debaine F., Gouguet L. et Bouchet F., 2013, Observatoire du littoral des Pays de Monts, Synthèse 2012 des réalisations des partenaires scientifiques (IGARUN, ONF, BRGM), Rapport d'avancement 2012, BRGM/RP-62937-FR, p. 97.
- Le Mauff B., Juigner M., Ba A., Robin M., Launeau P. et Fattal P., 2017, Analysis of the geomorphological response of beach-dune systems using multi-temporal LiDAR datasets (Vendée coast, France), *Geomorphology* (accepté).
- Lenôtre N., Thierry P., Batkowski D. et Vermeersch F., 2004, EUROSION project The Coastal Erosion Layer WP 2.6, BRGM/PC-52864-FR, 45 p.
- Leone F. et Vinet F., 2006, La vulnérabilité, un concept fondamental au cœur des démarches d'évaluation des risques naturels, In Leone F. et Vinet F. (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.
- Li Y., Zhang X., Zhao X., Ma S., Cao H. et Cao J., 2016, Assessing spatial vulnerability from rapid urbanization to inform coastal urban regional planning, *Ocean & Coastal Management*, 123, pp. 53-65. doi - 10.1016/j.ocecoaman.2016.01.010
- Magnan A., 2014, De la vulnérabilité à l'adaptation au changement climatique : éléments de réflexion pour les sciences sociales, In Monaco A. et Prouzet P. (dir.), *Risques côtiers et adaptations des sociétés*, ISTE Editions, pp. 241-274.
- Marchand M. (Ed.), 2010, *Concepts and Science for Coastal Erosion Management, Concise Report for Policy Makers*, Deltares, Delft, 32 p. [En ligne] <http://conscience-eu.net/documents/concise-report-final.pdf> Consulté le 31 juillet 2017.
- Mani Murali R., Ankita M., Amrita S. et Vethamony P., 2013, Coastal vulnerability assessment of Puducherry coast, India, using the analytical hierarchical process, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, pp. 3291-3311. doi : 10.5194/nhess-13-3291-2013
- Mann T. et Westphal H., 2016, Multi-decadal shoreline changes on Takú Atoll, Papua New Guinea: Observational evidence of early reef island recovery after the impact of storm waves, *Geomorphology*, 257, pp.75-84. doi: 10.1016/j.geomorph.2015.12.028
- Marignani M., Bruschi D., Astiaso Garcia D., Frondoni R., Carli E., Pinna MS., Cumo F., Gugliermetti F., Saatkamp A., Doxa A., Queller E.M., Chaieb M., Dagher-Kharrat M.B., El Zein R., El Jeitani S., Khater C., Mansour S., Al-Shami A., Harik G., Alameddine I., El-Fadel M. et Blasi C., 2017, Identification and prioritization of areas with high environmental risk in Mediterranean coastal areas: A flexible approach, *Science of the Total Environment*, 590-591, pp.566-578. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.221
- Maronna R.A., Martin R.D. et Yohai V.J., 2006, *Robust statistics: Theory and methods*. Wiley Series in Probability and Statistics, John Wiley & Sons, Chichester.
- Martinelli L., Zanuttigh B. et Corbau C., 2010, Assessment of coastal flooding hazard along the Emilia Romagna littoral, *IT, Coastal Engineering*, 57, pp. 1042-1058. doi : 10.1016/j.coastaleng.2010.06.007

-
- Martínez-Grana A.M., Boskib T., Goya J.L., Zazoc C. et Dabriad C.J., 2016, Coastal-flood risk management in central Algarve: Vulnerability and flood risk indices (South Portugal), *Ecological Indicators*, 71, pp. 302-316. doi : 10.1016/j.ecolind.2016.07.021
- Martí X., Lescrauwaet A., Borg M. et Valls M., 2007, Indicators Guideline: To Adopt And Indicator-Based Approach To Evaluate Coastal Sustainable Development, DEDUCE consortium, Government of Catalonia, Barcelona.
- Masselink G., Castelle B., Scott T., Dodet G., Suanes S., Jackson D. et Floc'h F., 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.
- McFadden L., Nicholls R.J., Vafeidis A. et Tol R.S.J., 2007, A Methodology for Modeling Coastal Space for Global Assessment, *Journal of Coastal Research*, 23, 4, pp. 911-920.
- McPherson A., Hazelwood M., Moore D., Owen K., Nichol S. and Howard F., 2015, The Australian Coastal Sediment Compartments Project, Methodology and Product Development, *Geoscience Australia, Record 2015/25*, 24 p. [En ligne] <https://data.gov.au/dataset/the-australian-coastal-sediment-compartments-project-methodology-and-product-development> Consulté le 24 juillet 2017.
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005, *Ecosystems and Human Well-being: Wetlands and Water Synthesis*. World Resources Institute, Washington, DC.
- 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] http://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/sngitc_pg2017-2019_web2.pdf. Consulté le 01 juillet 2017.
- Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer - MEEDDM, 2009, *Le Livre Bleu des engagements du Grenelle de la Mer*, 71 p. [En ligne] <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/094000356.pdf> Consulté le 14 août 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] 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] 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'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] 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] http://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/SNGITC_20120301_cle211ba9-1.pdf Consulté le 05 juillet 2017.
- Monnier O., 1999, Une base d'information littorale des côtes de France. Calcul d'un indice de sensibilité potentielle vis-à-vis d'une élévation du niveau de la mer, pour les systèmes cordons-zones humides, *Norois*, 183, 3, pp. 407-420.
- Montreuil A.L. et Bullard J.E., 2012, A 150-year record of coastline dynamics within a sediment cell: Eastern England, *Geomorphology*, 179, pp. 168-185. doi : 10.1016/j.geomorph.2012.08.008

Bibliographie

- Moore L.J., 2000, Shoreline mapping techniques, *Journal of Coastal Research*, 16, 1, pp.111-124.
- Morton R.A., 1996, Geoindicators of coastal wetlands and shorelines, In Berger A.R. and Lams W.J. (Ed.), *Geoindicators: Assessing rapid environmental changes in earth systems*, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 207-230.
- Morton R.A et Miller T.L., 2005, National Assessment of Shoreline Change – Part 2 Historical shoreline changes and associated coastal land loss along the US southeast Atlantic coast, US Geological Survey Open-File report 2005-1401, 35 p.
- Moussaid J., Ait Fora A., Zourarah B., Maanan M. et Maanan M., 2015, Using automatic computation to analyze the rate of shoreline change on the Kenitra coast, Morocco, *Ocean Engineering*, 102, pp. 71-77. doi : 10.1016/j.oceaneng.2015.04.044
- Narra P., Coelho C., Sancho F. et Palalane J., 2017, CERA: An open-source tool for coastal erosion risk assessment, *Ocean & Coastal Management*, 142, pp. 1-14. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2017.03.013
- Nelson J.R., Grubestic T.H., Sim L., Rose K. et Graham J., 2015. Approach for assessing coastal vulnerability to oil spills for prevention and readiness using GIS and the Blowout and Spill Occurrence Model, *Ocean & Coastal Management*, 112, pp. 1-11. doi : 10.1016/j.ocecoaman.2015.04.014
- Nguyen T.T.X., Bonetti J., Rogers K. et 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, pp. 18-43. doi : 10.1016/j.ocecoaman.2015.11.022
- Nicholls R.J. et Cazenave A., 2010, Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones, *Science*, 328, pp.1517-1520. doi: 10.1126/science.1185782
- National Park Service - NPS, 2005, Mediterranean Coast Network - Vital Signs Monitoring Plan, Natural Resources Technical Report NPS/MEDN/NRTR. National Park Service, California.
- National Research Council - NRC, 1990, *Managing Coastal Erosion*, National Academy Press, Washington, DC.
- OLPM, 2015, Observatoire du littoral des Pays de Monts - Synthèse 2013-2014 des réalisations des partenaires scientifiques (IGARUN, ONF, BRGM), Rapport d'avancement 2014, 86 p.
- Olsen M.J., Young A.P. et Ashford S.A., 2012, TopCAT - Topographical Compartment Analysis Tool to analyse seacliff and beach change in GIS, *Computers & Geosciences*, 45, pp. 284-292. doi - 10.1016/j.cageo.2011.11.007
- 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.
- Ozturk D. et Sesli F.A., 2015, Shoreline change analysis of the Kizilirmak Lagoon Series, *Ocean & Coastal Management*, 118, pp. 290-308. doi : 10.1016/j.ocecoaman.2015.03.009
- 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.
- Paskoff R., 2006, *Les littoraux, Impacts des aménagements sur leur évolution*, 2 éd., Paris, Armand Colin, 260 p.
- Pendleton E.A., Williams S.J. et 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. [En ligne] <https://pubs.usgs.gov/of/2004/1020/> Consulté le 19 juillet 2017.
- Pian S. et Menier D., 2011, The use of a geodatabase to carry out a multivariate analysis of coastline va-

-
- riations at various time and space scales, *Journal of Coastal Research*, SI 64, pp. 1722-1726.
- Pinot J.P., 1980, *Le Marais de Monts*, Cahier Nantais, 18, p. 7-18.
- Pirazzoli P.A., 2007, Données pour dimensionnement des structures côtières et des ouvrages de bord de mer à longue échéance, projet DISCOBOLE, Rapport final, CNRS, Laboratoire de Géographie Physique (UMR n°8591), Meudon, Mars 2017, 241 p.
- 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.
- Pumain D. et Saint-Julien T., 2010, *Analyse spatiale, Les localisations*, 2e Ed., Paris, Armand Collin, 190 p.
- Pye K, et 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, pp. 146-167. doi : 10.1016/j.geomorph.2016.05.011.
- Ramont N., 2010, Étude de caractérisation du service de protection du cordon dunaire domanial 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.
- Rangel-Buitrago N. et Anfuso G., 2015, Review of the Existing Risk Assessment Methods In Risk Assessment of Storms in Coastal Zones: Case Studies from Cartagena (Colombia) and Cadiz (Spain). *Springer Briefs in Earth Sciences*. Springer, Cham, pp. 7-13.
- Reghezza M., 2006, La vulnérabilité : un concept problématique, In Leone F. et Vinet F. (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. 34-38.
- Reis A.H. et Gama C., 2010, Sand size versus beach face slope - an explanation based on the constructal law, *Geomorphology*, 114, pp. 276-283.
- Rivron J.P. (dir.), 2010, *Historique des vimers, tempêtes et inondations aux Moutiers-en-Retz et sur les côtes de la Baie de Bourgneuf*, La Garzette, Association Patrimoine Marche de Bretagne Marais de Monts des Moutiers-en-Retz, Numéro spécial 1, 12 p.
- Robin M., 1990, Cinématique d'un littoral par squelettisation de formes, *Photo-Interprétation*, 90, 2, pp. 65-70.
- 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*, 111, 627, pp. 471-502.
- Robin M., 2005, De la prévention à la protection des espaces côtiers face aux risques : l'apport des SIG, In Gourmelon F. et Robin M., 2005, *SIG et littoral*, Paris, Lavoisier, pp. 191-216
- Robin M., Morsetti V., Pichereau D., Babillot P., Colas S., Texier C. et Thuillier A., 2005, L'information géographique de référence en zone côtière : la situation française, In Gourmelon F. et Robin M., 2005, *SIG et littoral*, Paris, Lavoisier, pp. 49-84
- 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., Taureau F., Deniaud Y., Gouguet L. et Bocquier L., 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.
- Romano B. et Zullo F., 2014, The urban transformation of Italy's Adriatic coastal strip: Fifty years of unsustainability. *Land Use policy*, 38, pp. 26-36. doi : 10.1016/j.landusepol.2013.10.001
- Romano B., Marucci A., Zullo F., Fiorini L. et Ciabò S., 2017, Urban pressure and planning management

Bibliographie

- for italian coastal areas. Sixth International Symposium. Monitoring of Mediterranean Coastal Areas: problems and Measurement Techniques: Livorno, Italy, September 28-29, 2016, edited by Claudio Conese - Firenze: Firenze University Press, 2017. (Proceedings e report; 112), pp.285-298. [En ligne] <http://digital.casalini.it/9788864534282> ISBN 978-88-6453-428-2
- Ruggiero P., Kratzmann M.G., Himmelstoss E.A., David R., Johathan A. et Kaminsky G., 2013, National Assessment of Shoreline Change - Historical Shoreline Change Along the Pacific Northwest Coast, U.S. Geological Survey Open-File Report 2012-1007. doi : 10.3133/ofr20121007 [En ligne] <https://pubs.usgs.gov/of/2012/1007/> Consulté le 31 juillet 2017.
- Ruz M.H. et Meur-Ferec C., 2004, Influence of high water levels on eolian sand transport : upper beach/dune evolution on a macrotidal coast, Wissant Bay, northern France, *Geomorphology*, 60, pp. 73-87.
- Sabatier F., Anthony E.J., Héquette A., Sunaez S., Musereau J., Ruz M.H. et Regnauld H., 2009, Morphodynamics of beach/dune systems : examples from the coast of France, *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 1, pp. 3-22.
- Santoro F., Lescrauwaet A.K., Taylor J. et Breton F. (Ed.), 2014, Integrated Regional Assessments in Support of ICZM in the Mediterranean and Black Sea Basins (PEGASO Project), IOC Technical Series 111, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, Paris.
- Satta A., Snoussi M., Puddu M., Flayou L. et Hout R., 2016, An index-based method to assess risks of climate-related hazards in coastal zones: The case of Tetouan, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 175, pp. 93-105. doi : 10.1016/j.ecss.2016.03.021
- Satta A., Puddu M., Venturini S. et Giupponi C., 2017, Assessment of coastal risks to climate change related impacts at the regional scale: The case of the Mediterranean region, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 24, pp. 284-296. doi : 10.1016/j.ijdr.2017.06.018
- Saye S.E., van der Wal D., Pye K. et 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, pp. 128-155. doi : 10.1016/j.geomorph.2005.05.007
- SHOM-CETMEF, 2012, Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique). [En ligne] <http://www.eau-mer-fleuves.cerema.fr/statistiques-des-niveaux-marins-extremes-des-cotes-a414.html>. Consulté le 19 avril 2017.
- SHOM-IGN, 2015, Litto3D® Version 1.0, Descriptif de contenu, 32 p. [En ligne] http://diffusion.shom.fr/media/wysiwyg/pdf/DC_Litto3D.pdf Consulté le 01 Juillet 2017.
- SOGREAH, 2012, Étude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire. [En ligne] <http://www.pays-de-la-loire.developpement-durable.gouv.fr/etude-relative-a-la-gestion-durable-du-trait-de-a1900.html> Consulté le 16 août 2017.
- Small C. et Nicholls R.J., 2003, A Global Analysis of Human Settlement in Coastal Zones. *Journal of Coastal Research*, 19, 3, pp. 584-599
- Stevens S., Milstead B., Albert M. et Entsminger G., 2005, Northeast Coastal and Barrier Network Vital Signs Monitoring Plan, Technical Report NPS/NER/NRTR-2005/025, Boston, National Park Service.
- Suanez S. et Stephan P., 2006, Forçages météo-marins et dynamique morphosédimentaire saisonnière des cordons dunaires. Exemple de la baie de Saint-Michel-en-Grève (Côtes d'Armor, Bretagne), *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 2, pp. 91-110.
- Suanez S., Garcin M., Bulteau T., Rouan M., Lagadec L. et David L., 2012, Les observatoires du trait de côte en France métropolitaine et dans les DOM, *EchoGéo*, 19, 17 p. [En ligne] <https://echogeo.revues.org/12942?lang=en> Consulté le 14 août 2017.
- Sustain, 2012, The SUSTAIN Indicator Set. A Set of Easily Measurable Sustainability Indicators, Costal

-
- & Marine Union (UECC), Leiden, 19 p. [En ligne] http://www.sustain-eu.net/what_are_we_doing/sustain_indicator_set.pdf Consulté le 31 juillet 2017.
- Sutherland J., 2010, Guidelines on beach monitoring for coastal erosion in concepts and science for Coastal Erosion Management (Conscience) Project, Deliverable D15, 30 p. [En ligne] <http://conscience-eu.net/documents/deliverable15-guidelines-on-beach-monitoring-for-coastal-erosion.pdf> Consulté le 03 août 2017.
- Tahri M., Maanan M., Maanan M., Bouksim H. et Hakdaoui M., 2017, Using Fuzzy Analytic Hierarchy Process multi-criteria and automatic computation to analyse coastal vulnerability, *Progress in Physical Geography*, 41, 3, pp. 268-285. doi : 10.1177/0309133317695158
- Ters M., 1959, La Vendée littorale : étude de géomorphologie, Thèse de Géographie, Université de Rennes, 578 p.
- Thieler E.R., Himmelstoss E.A., Zichichi J.L. et Ergul A., 2009, Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 - An ArcGIS extension for calculating shoreline change: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278, 81 p.
- Trmal C., Pons F. et Ledoux P., 2016, Flood protection structure detection with Lidar: examples on French Mediterranean rivers and coastal areas, E3S Web Conf., FLOODrisk 2016 - 3rd European Conference on Flood Risk Management, 5 p. doi : 10.1051/e3sconf/20160714001 [En ligne] https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2016/02/e3sconf_flood2016_14001.pdf Consulté le 16 août 2017.
- UAB-GIM-Universitat Autònoma de Barcelona - Geographic Information Management NV, 2002, Coastal Erosion Indicators Study. Coastal Erosion - Evaluation of the Needs for Action. EUROSION project. UAB-GIM, Barcelona.
- Vafeidis A.T., Nicholls R.J., McFadden L., Tol R.S.J., Hinkel J., Spencer T., Grashoff P.S., Boot G. et Klein R.J.T., 2008, A New Global Coastal Database for Impact and Vulnerability Analysis to Sea-Level Rise, *Journal of Coastal Research*, 24, 4, pp. 917-924. doi : 10.2112/06-0725.1
- Valdor P.F., Gómez A.G., Velarde V. et Puente A., 2016, Can a GIS toolbox assess the environmental risk of oil spills? Implementation for oil facilities in harbors, *Journal of Environmental Management*, 170, pp.105-115. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.01.012
- van Koningsveld M., 2003, Matching Specialist Knowledge with End User Needs, thèse de doctorat, University of Twente, Enschede.
- van Koningsveld M., Davidson M. et Huntley D., 2005, Matching science with coastal management needs : the search for appropriate coastal state indicators, *Journal of Coastal Research*, 213, pp. 399-411. doi : 10.2112/03-0076.1.
- van Rijn L., 2010, Description of coastal state indicators in concepts and Science for Coastal Erosion Management (Conscience) Project. Description of coastal state indicators, Deliverable D9, 11 p. [En ligne] <http://conscience-eu.net/documents/index.htm> Consulté le 31 juillet 2017.
- Verger F., 1968, Marais et wadden du littoral français : étude de géomorphologie, Thèse de Lettres, Paris, 549 p.
- Young A.P. et Ashford S.A., 2006, Performance Evaluation of Seacliff Erosion Control Methods, *Shore and Beach*, 74, 4, pp. 16-24.
- Young A.P. et Ashford S.A., 2007, Quantifying sub-regional seacliff erosion using mobile terrestrial LIDAR, *Shore and Beach*, 75, 3, pp. 38-43.
- Young A.P., Flick R.E., Gutierrez R. et Guza R.T., 2009a, Comparison of short-term seacliff retreat

Bibliographie

measurement methods in Del Mar, California, *Geomorphology*, 112, pp. 318-323. doi : 10.1016/j.geomorph.2009.06.018

Young A.P., Guza R.T., Flick R.E., O'Reilly W.C. et Gutierrez R., 2009b, Rain, waves, and short-term evolution of composite seacliffs in southern California, *Marine Geology*, 267, pp. 1-7. doi : doi:10.1016/j.margeo.2009.08.008

Zaninetti J.M., 2006, L'urbanisation du littoral en France. *Population & avenir*, 2, pp.4-8



**Annexe
cartographique**

Informations au lecteur :

Cette annexe est composée de deux index de localisation et de 42 planches illustrant les résultats du chapitre 4 sur la caractérisation de la capacité de protection des massifs dunaires des Pays de la Loire face à la submersion marine.

Chaque planche est éditée à échelle constante (1/20 000).

Les informations représentées à terre sont :

l'emprise d'étude (ici la bande des 400 m à partir du trait de côte 2011-2012) ;
l'emprise des massifs dunaires, composée du cordon de 1^{ère} ligne et du cordon de 2^{ème} ligne ;
les zones basses (< cote Xynthia) ;
l'urbanisation et le réseau routier en zone basse.

les zones sans aplats de couleur comprises dans la bande des 400 m ne sont ni des massifs dunaires ni des zones basses

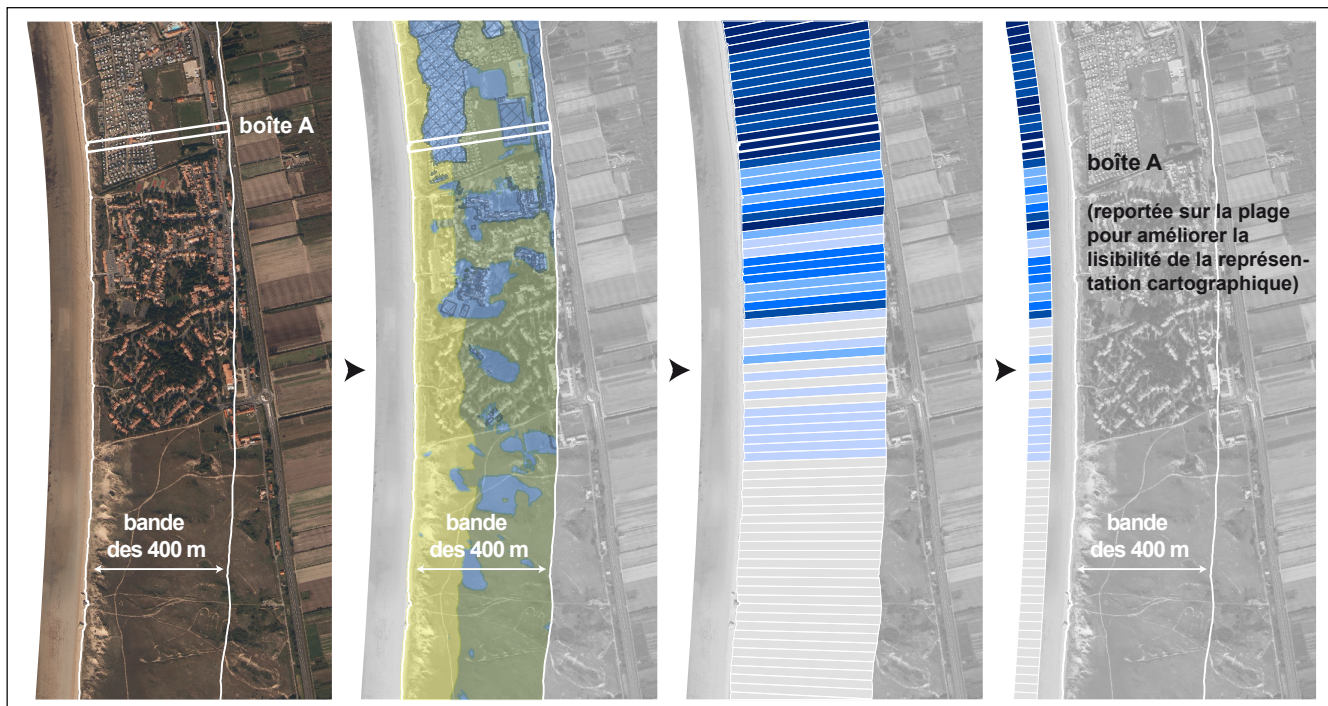
Les informations représentées sur l'estran (de la mer vers la terre) sont :

l'indice de sensibilité globale des massifs dunaires ;
l'indice d'exposition des enjeux ;
l'indice de la capacité de protection globale des massifs dunaires.

Concernant la représentation filaire des trois indices (voir figure ci-contre, bas) :

les boîtes ont été prolongées sur l'estran, puis découpées pour ne conserver que l'extrémité côté mer ;

les aplats de couleur des trois indices, situés dans un même alignement perpendiculaire au trait de côte, sont par conséquent issus de la même boîte ; ils décrivent le massif dunaire, les zones basses et les éventuels enjeux situés à leur hauteur le long de la côte.



La bande côtière est segmentée en boîtes de 400*25 m (voir agrandissement ci-dessous). Des indicateurs sont calculés et combinés dans chaque boîte afin de créer des indices de sensibilité, d'exposition et de capacité de protection (voir en bas de page)

Exemple d'indicateurs

- assise du cordon de 1^{ère} ligne
- assise du cordon de 2^{ème} ligne
- zone basse (< Xynthia)
- enjeux en zone basse

Indice de protection des cordons dunaires face à la submersion

- capacité de protection élevée
- capacité de protection faible

enjeu en zone basse non détecté



Extrait de planche cartographique

Indice de sensibilité des cordons dunaires
fonction des **indicateurs** suivants :

- 1- altitude 1^{ère} ligne
- 2- assise 1^{ère} ligne
- 3- volume 1^{ère} ligne
- 4- érosion côtière
- 5- zone basse
- 6- assise 2^{ème} ligne

- zone basse non détectée
- cordon peu sensible
-
- cordon très sensible

Indice d'exposition des enjeux bâtis et routes
fonction des **indicateurs** suivants :

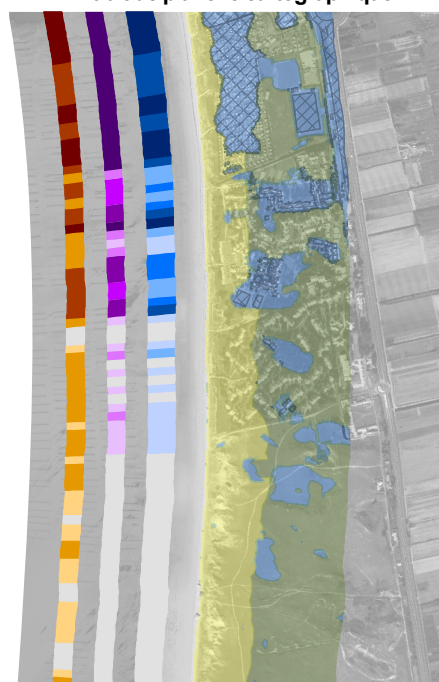
- 1- enjeux en zone basse
- 2- hauteur d'eau potentielle

- enjeu en zone basse non détecté
- enjeu peu exposé
- enjeu très exposé

Indice de protection des cordons dunaires
fonction des **indices** suivants :

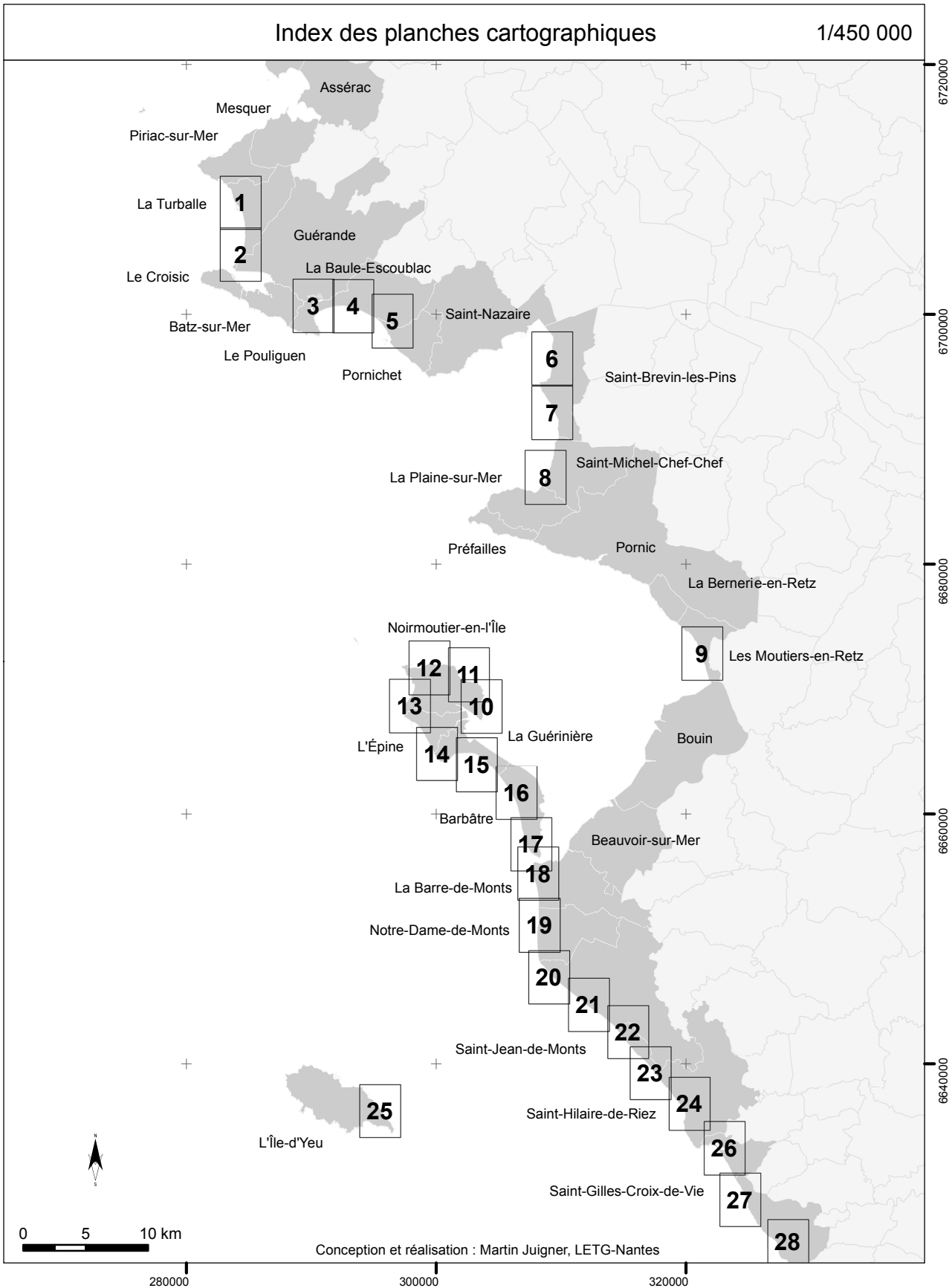
- 1- sensibilité des cordons dunaires
- 2- exposition des enjeux bâtis et routes

- enjeu en zone basse non détecté
- capacité de protection élevée
- capacité de protection faible

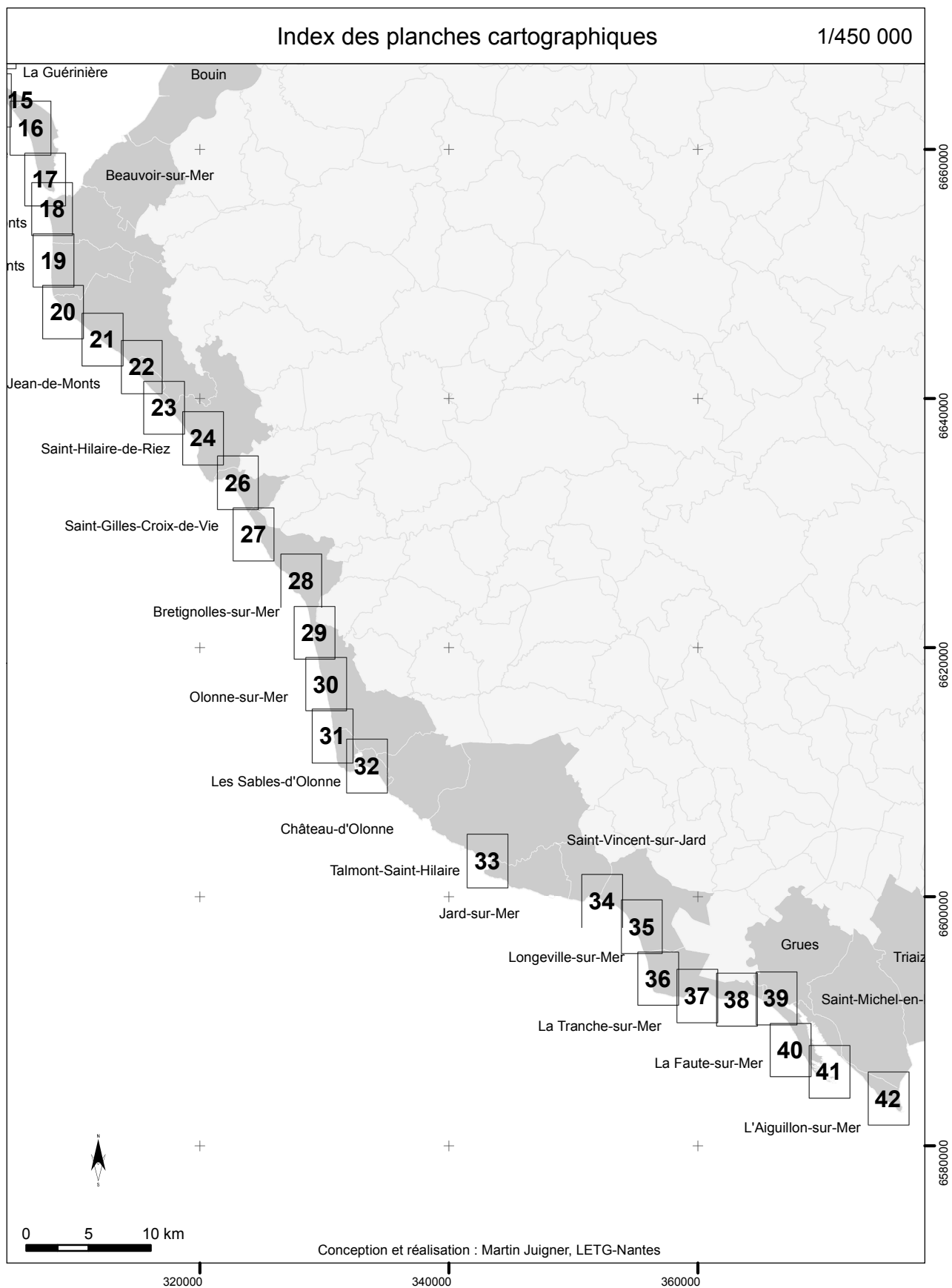


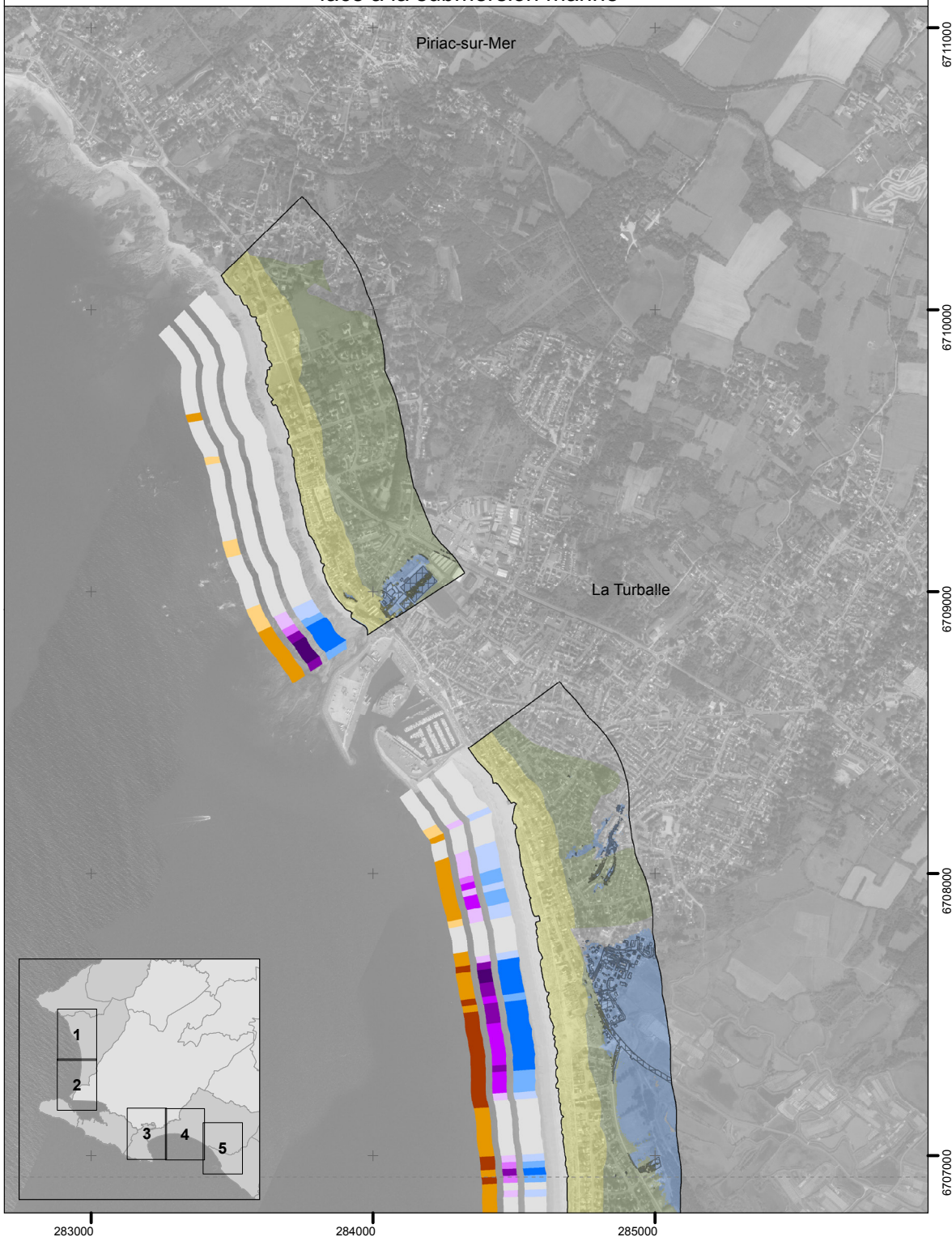
Index des planches cartographiques

1/450 000



Conception et réalisation : Martin Juigner, LETG-Nantes

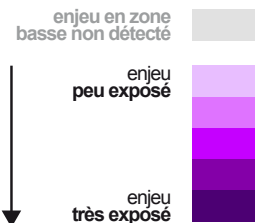




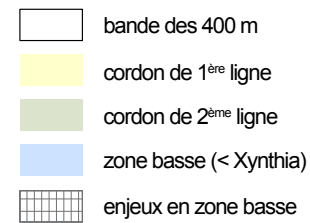
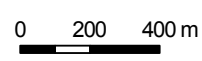
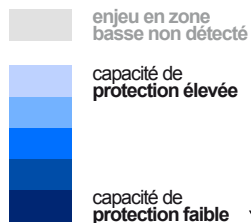
Niveau de sensibilité des cordons dunaires

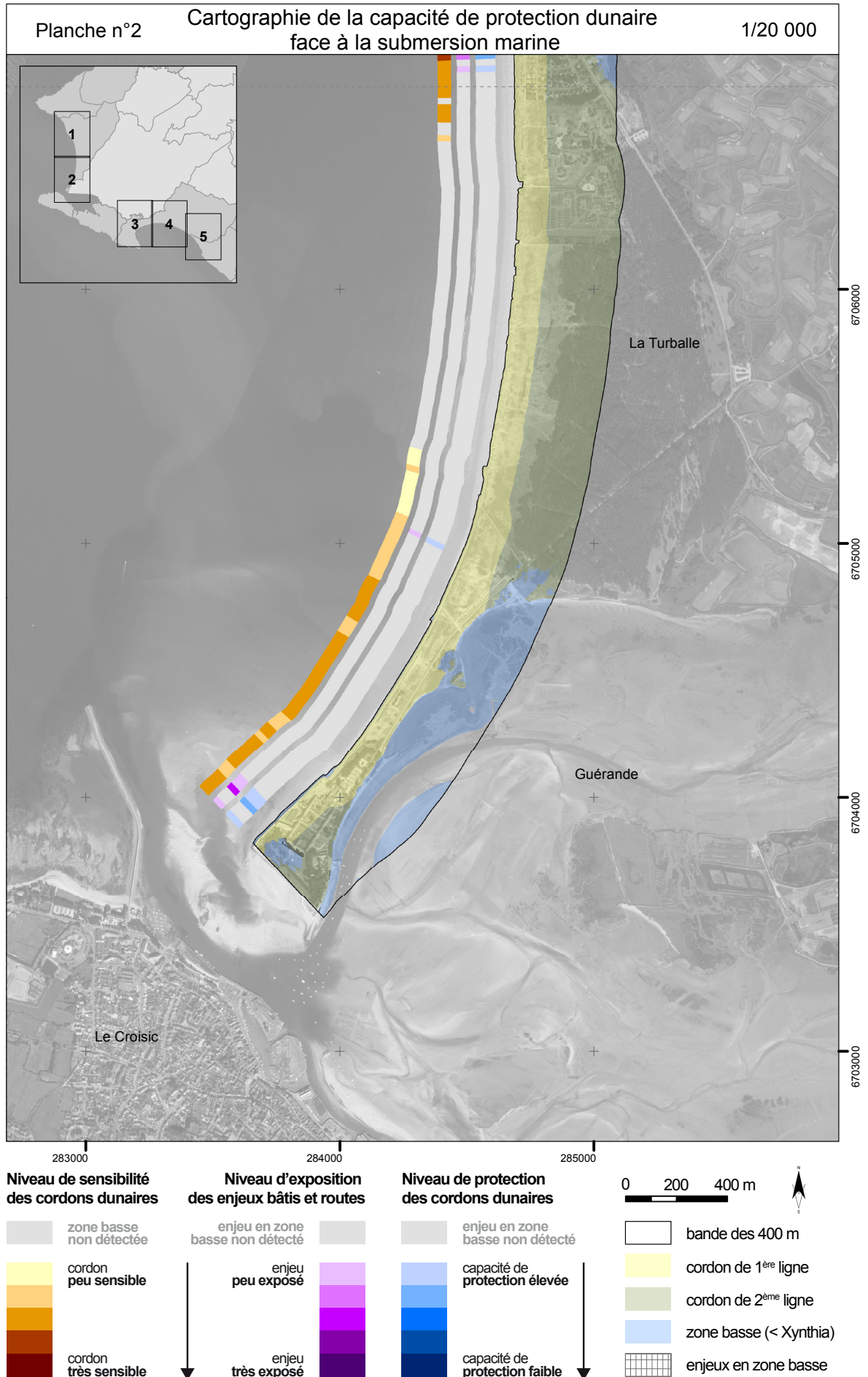


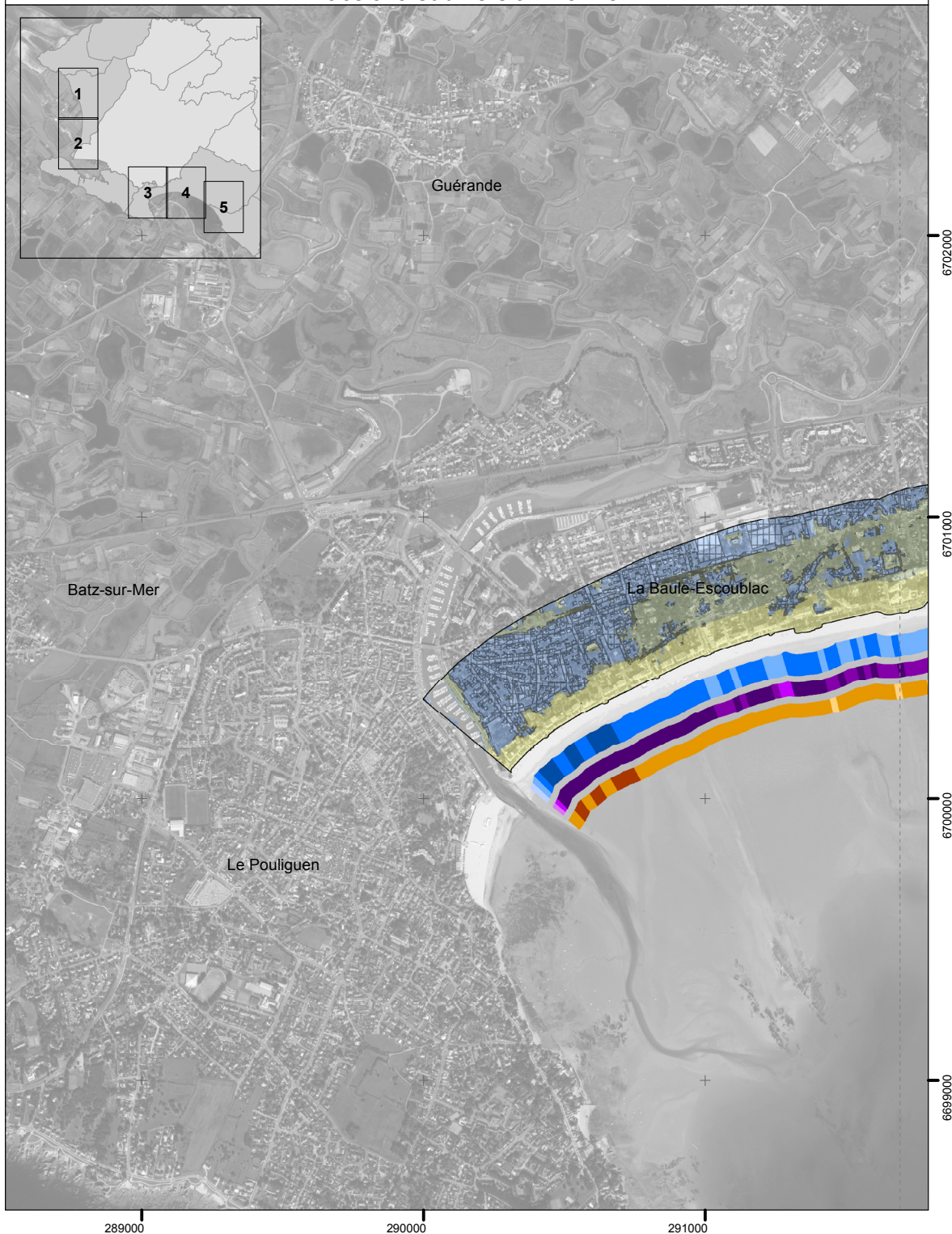
Niveau d'exposition des enjeux bâtis et routes



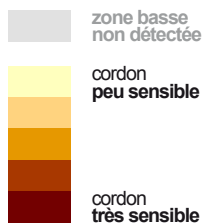
Niveau de protection des cordons dunaires



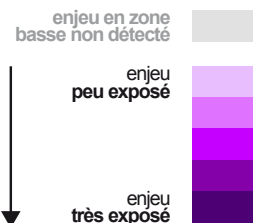




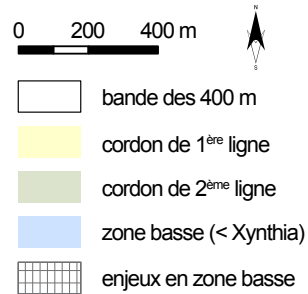
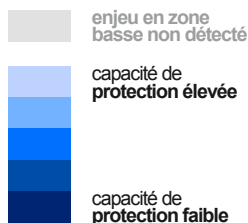
Niveau de sensibilité des cordons dunaires

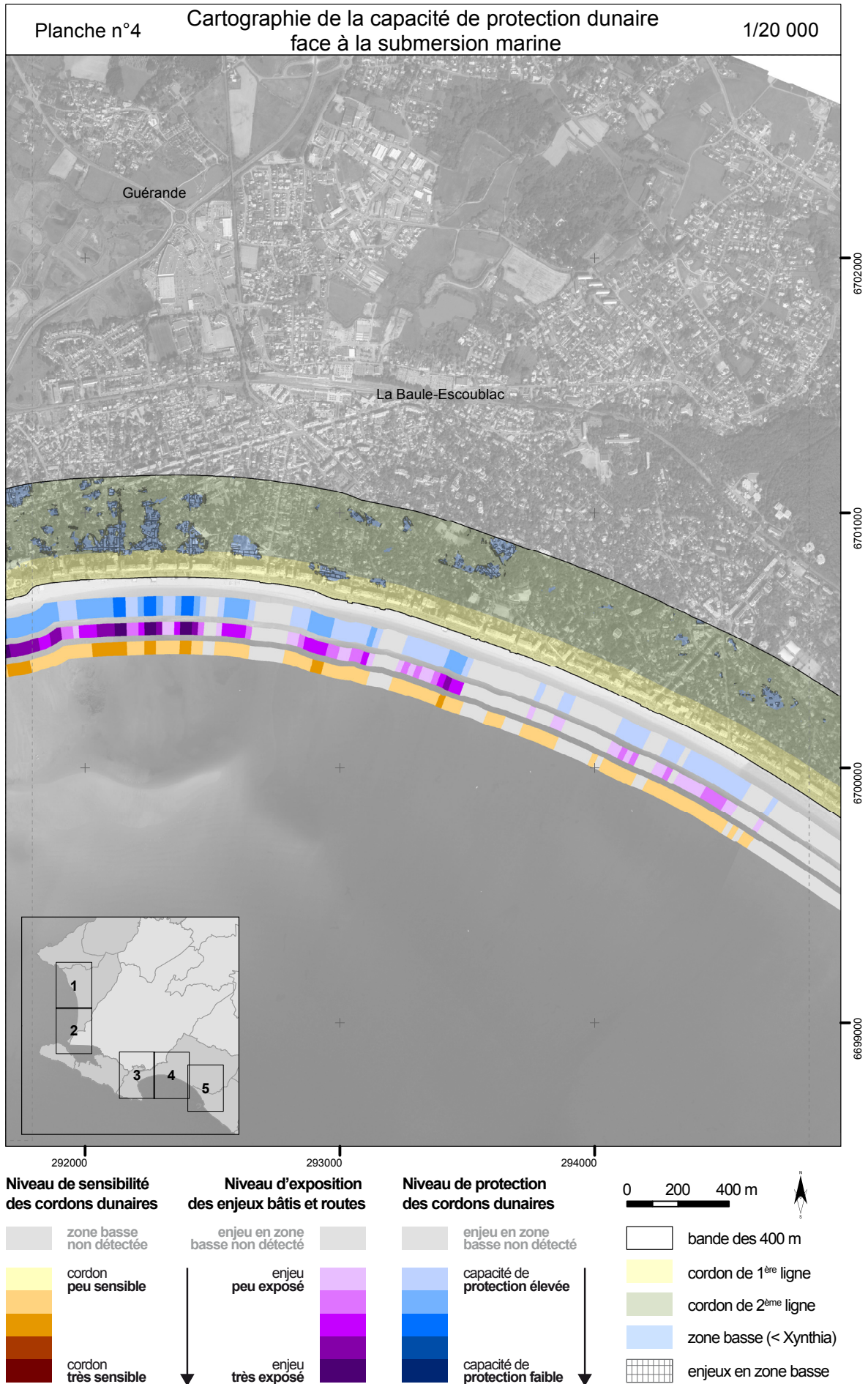


Niveau d'exposition des enjeux bâtis et routes



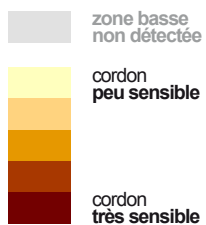
Niveau de protection des cordons dunaires



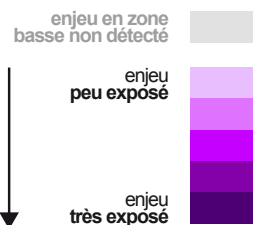




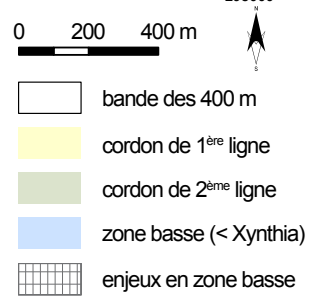
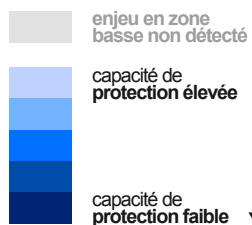
Niveau de sensibilité des cordons dunaires

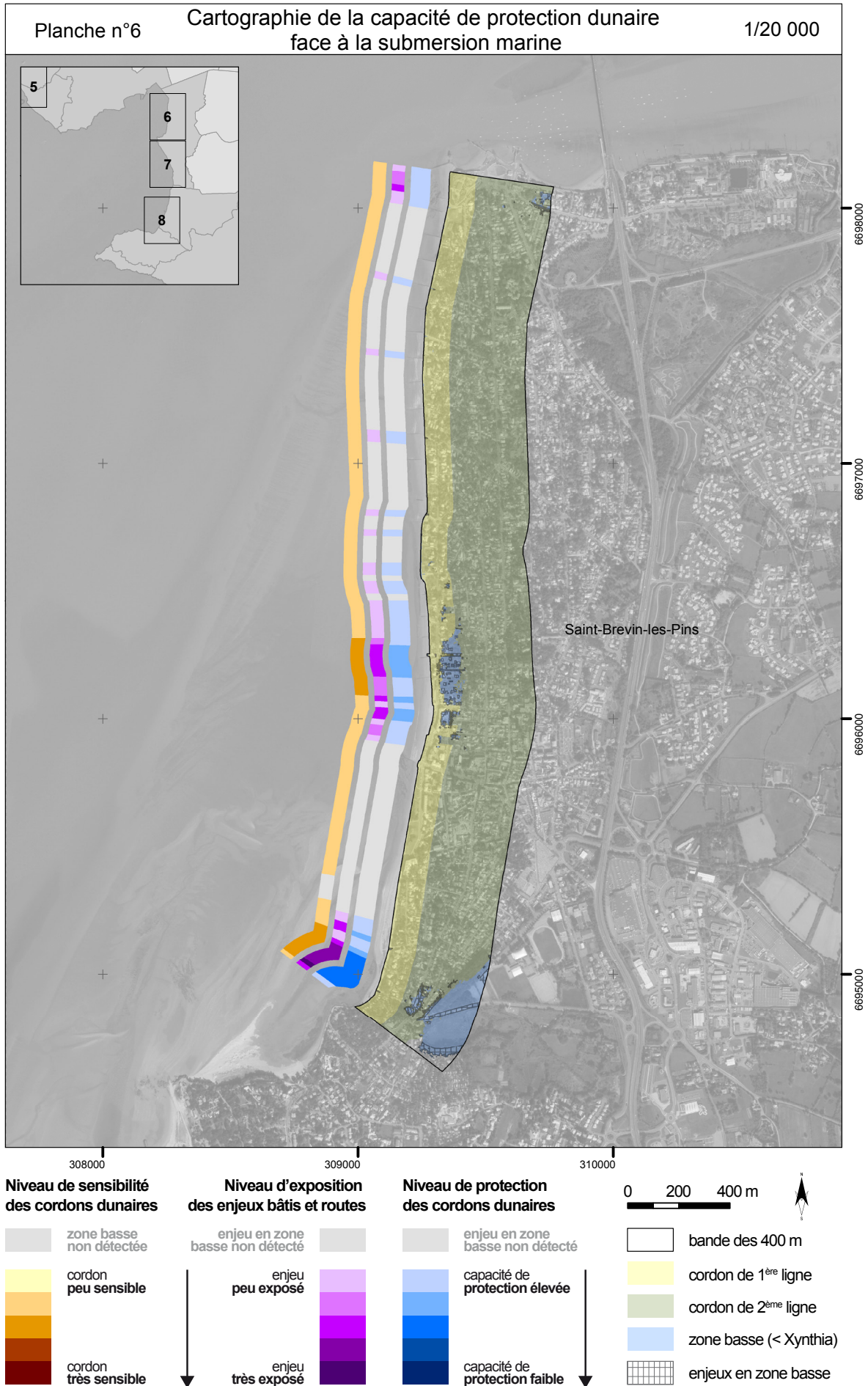


Niveau d'exposition des enjeux bâtis et routes



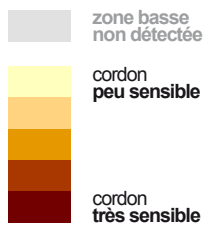
Niveau de protection des cordons dunaires



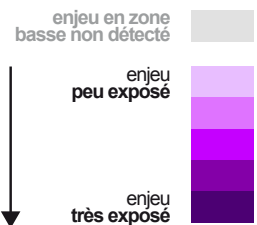




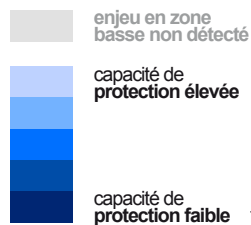
Niveau de sensibilité des cordons dunaires



Niveau d'exposition des enjeux bâtis et routes



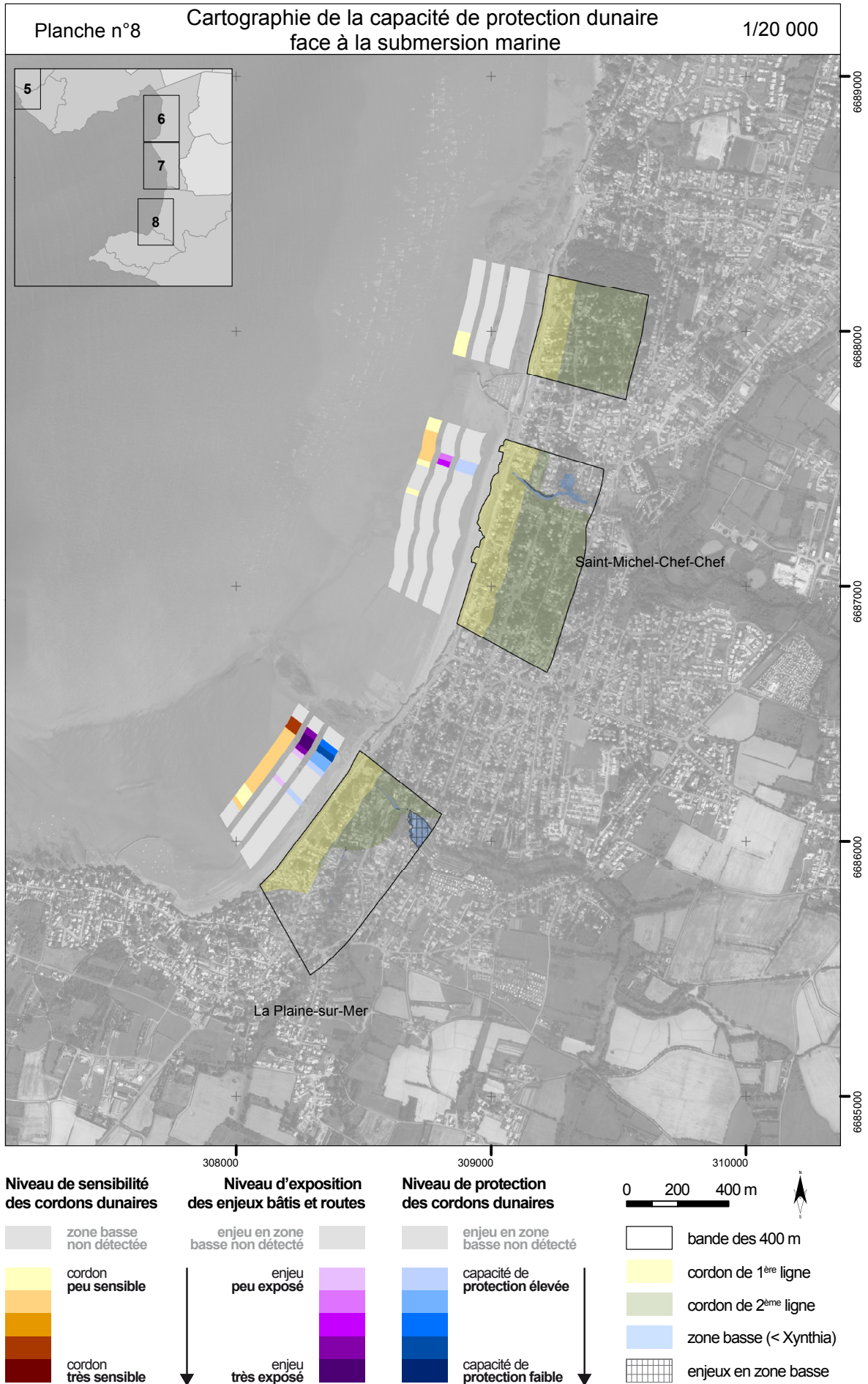
Niveau de protection des cordons dunaires

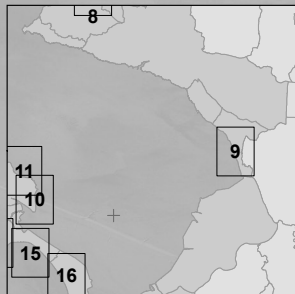
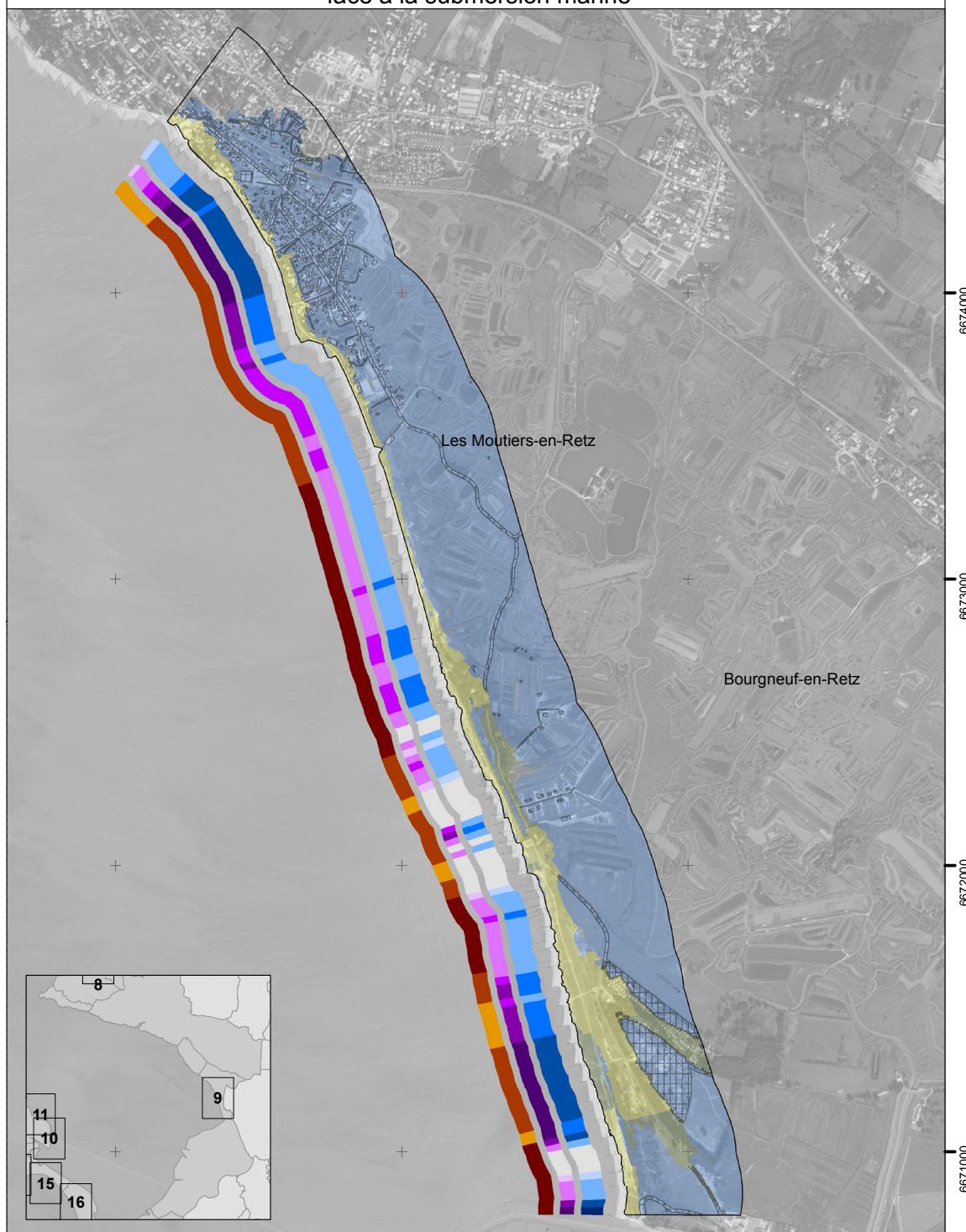


0 200 400 m



- bande des 400 m
- cordon de 1^{ère} ligne
- cordon de 2^{ème} ligne
- zone basse (< Xynthia)
- enjeux en zone basse



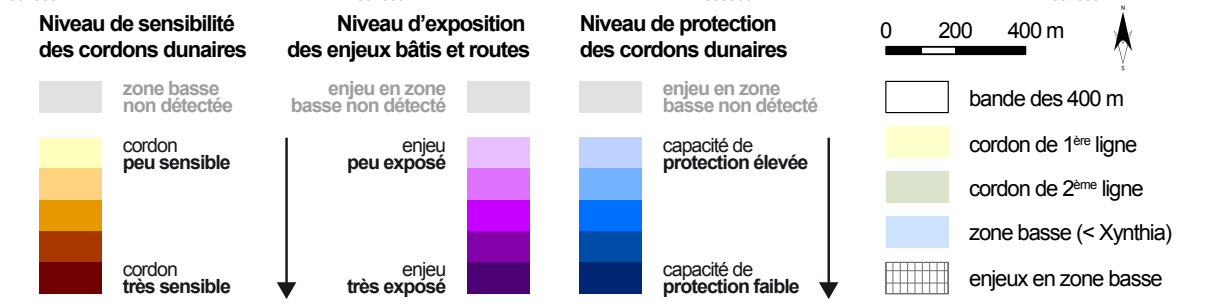
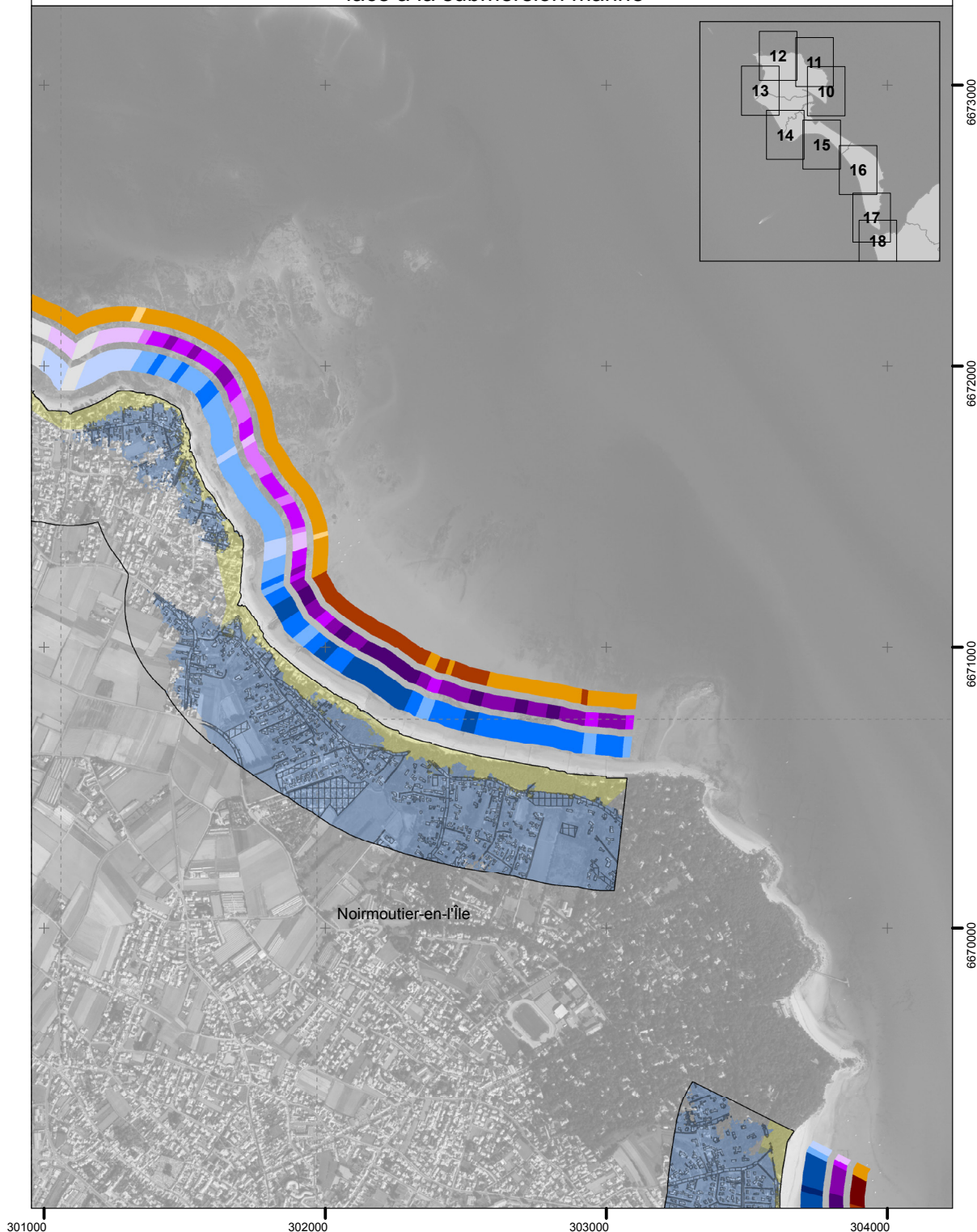


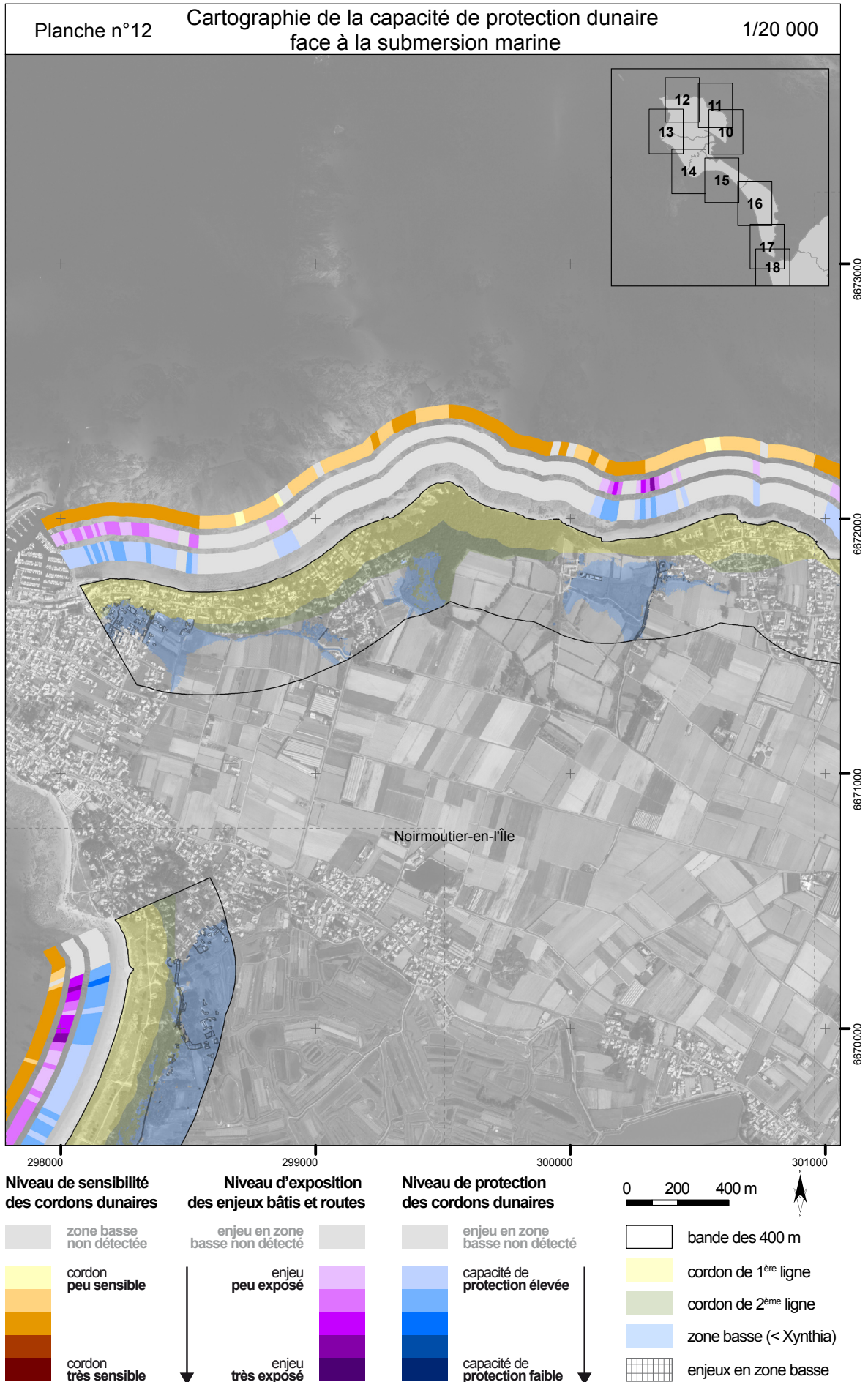
<p>Niveau de sensibilité des cordons dunaires</p> <ul style="list-style-type: none"> zone basse non détectée cordon peu sensible cordon très sensible 	<p>Niveau d'exposition des enjeux bâtis et routes</p> <ul style="list-style-type: none"> enjeu en zone basse non détecté enjeu peu exposé enjeu très exposé 	<p>Niveau de protection des cordons dunaires</p> <ul style="list-style-type: none"> enjeu en zone basse non détecté capacité de protection élevée capacité de protection faible 	<p>0 200 400 m</p> <ul style="list-style-type: none"> bande des 400 m cordon de 1^{ère} ligne cordon de 2^{ème} ligne zone basse (< Xynthia) enjeux en zone basse
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

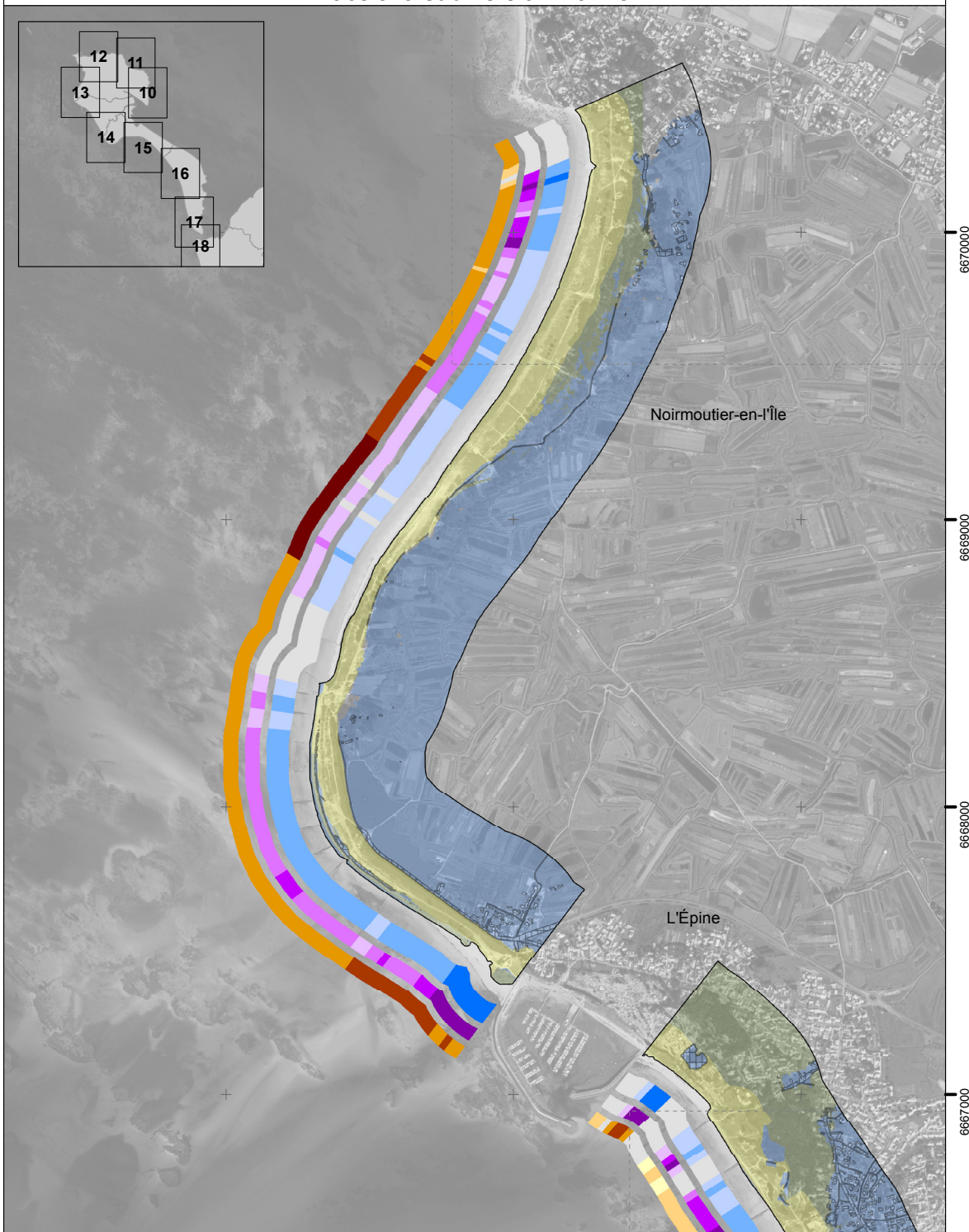
Conception et réalisation : Martin Juigner, LETG-Nantes (Source : Ortholittorale V2, projet DiDUNE Fondation de France)



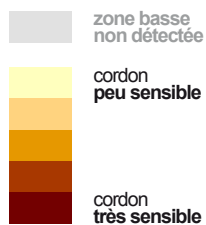
Conception et réalisation : Martin Juigner, LETG-Nantes (Source : Ortholittorale V2, projet DiDUNE Fondation de France)



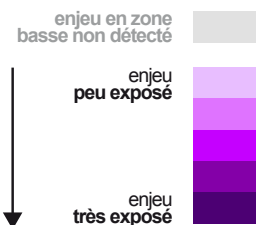




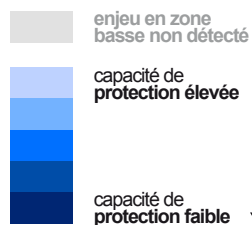
Niveau de sensibilité des cordons dunaires



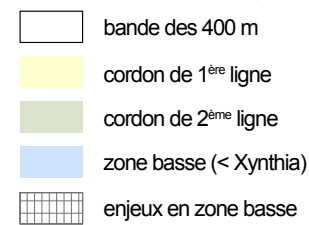
Niveau d'exposition des enjeux bâtis et routes

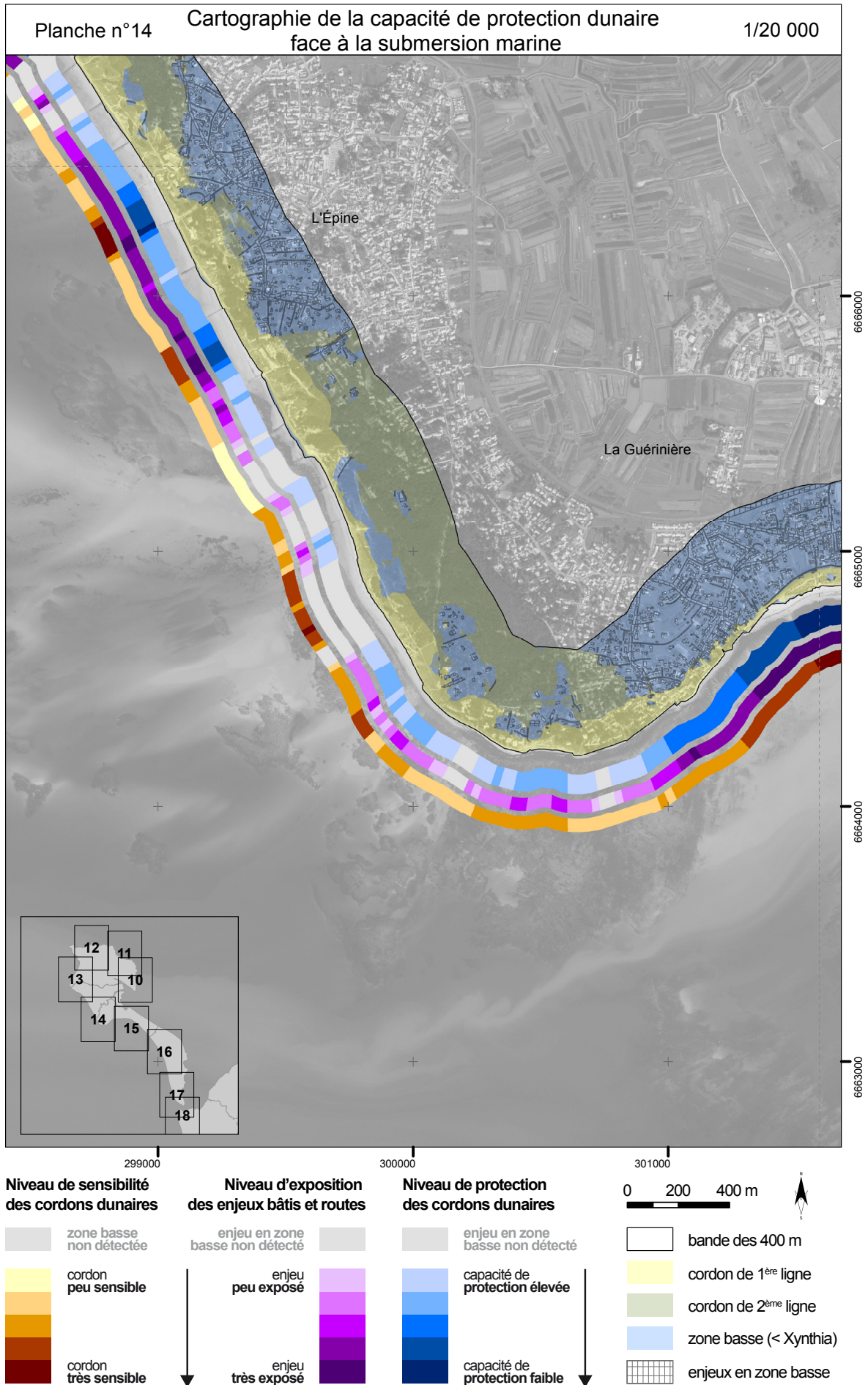


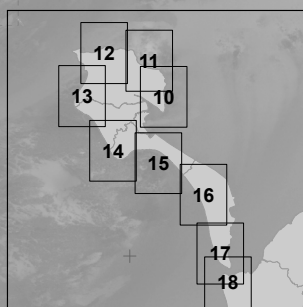
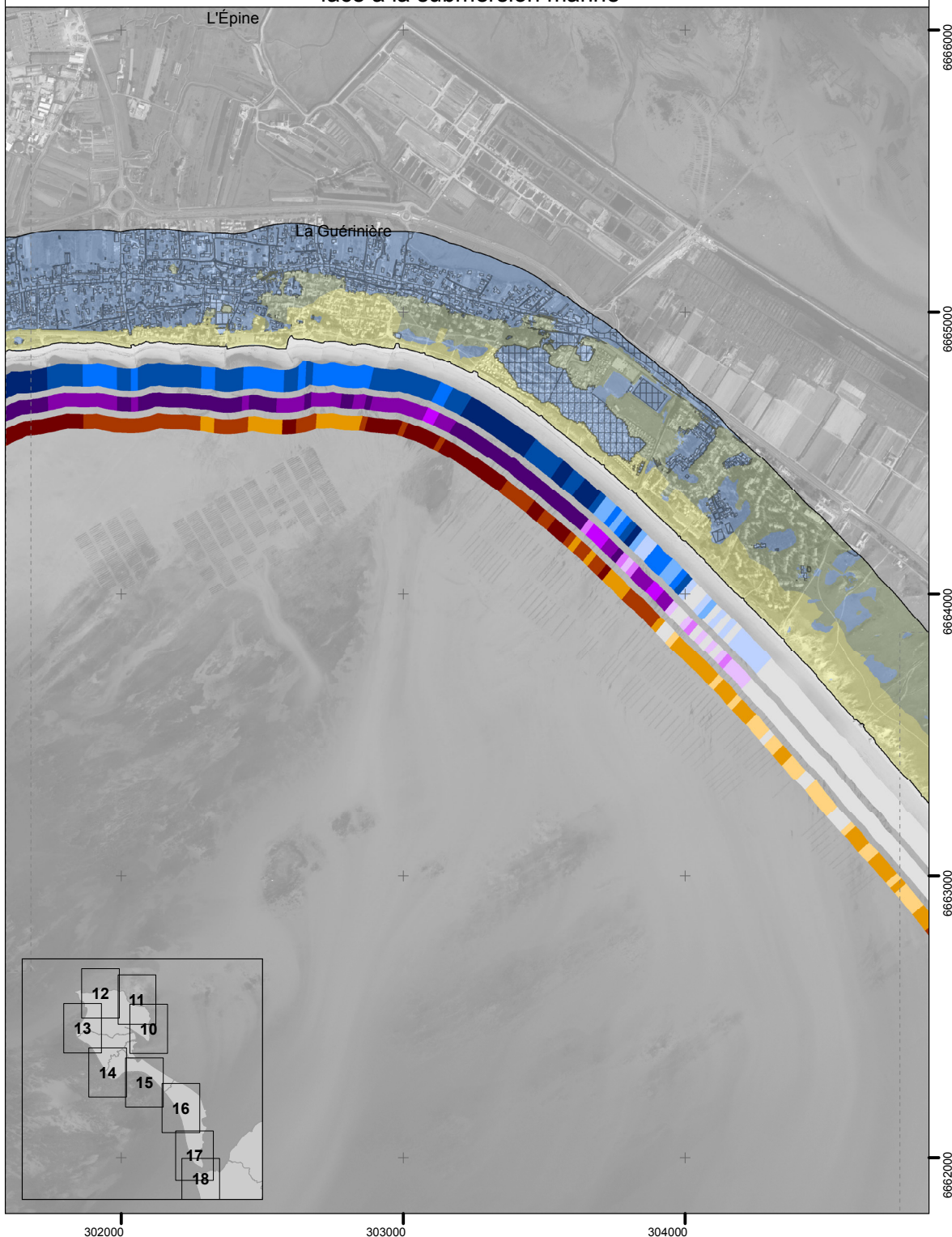
Niveau de protection des cordons dunaires



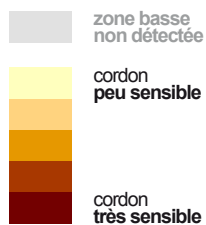
0 200 400 m



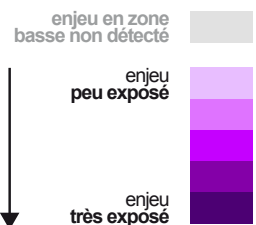




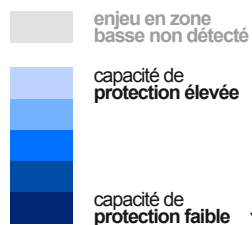
Niveau de sensibilité des cordons dunaires



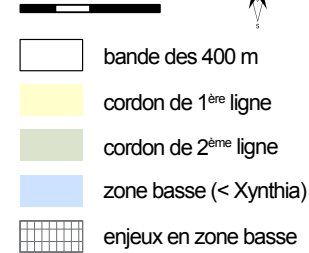
Niveau d'exposition des enjeux bâtis et routes

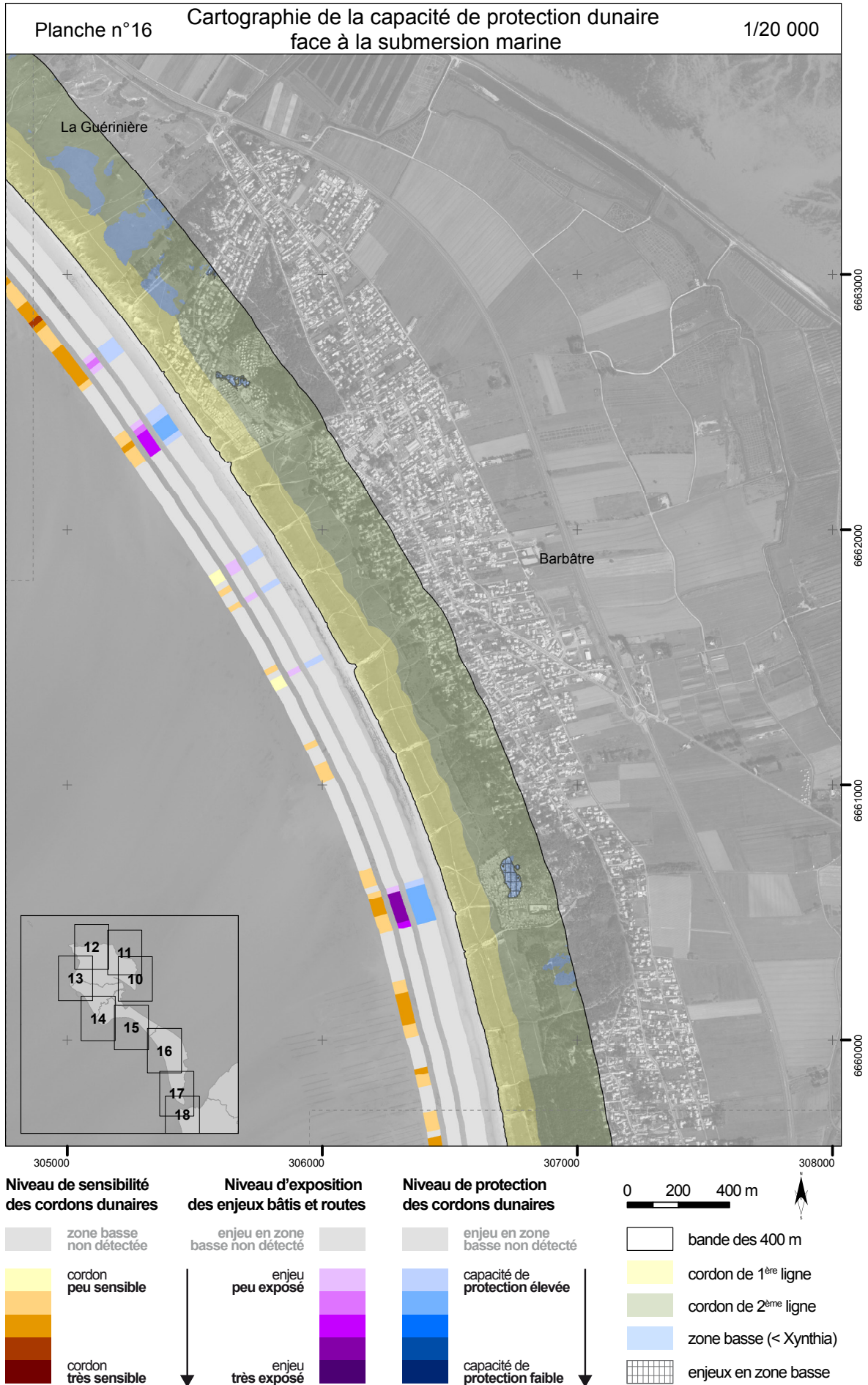


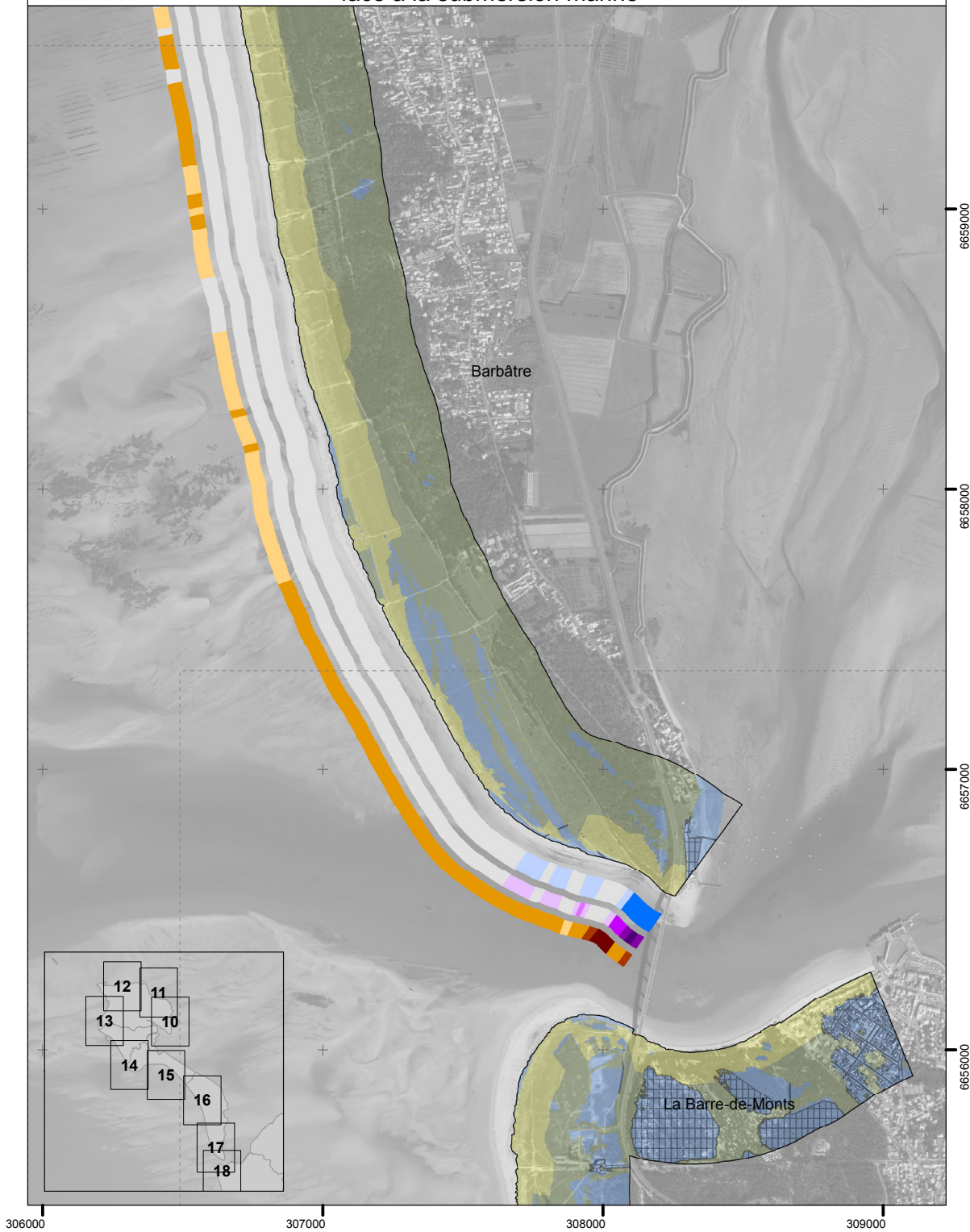
Niveau de protection des cordons dunaires



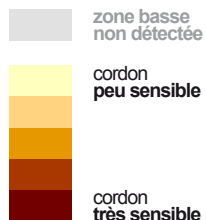
0 200 400 m



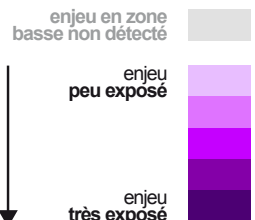




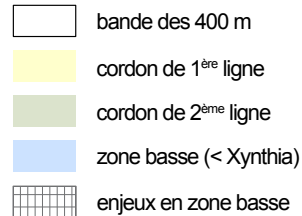
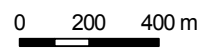
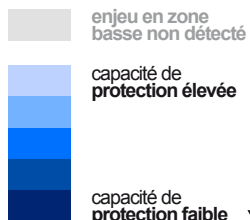
Niveau de sensibilité des cordons dunaires

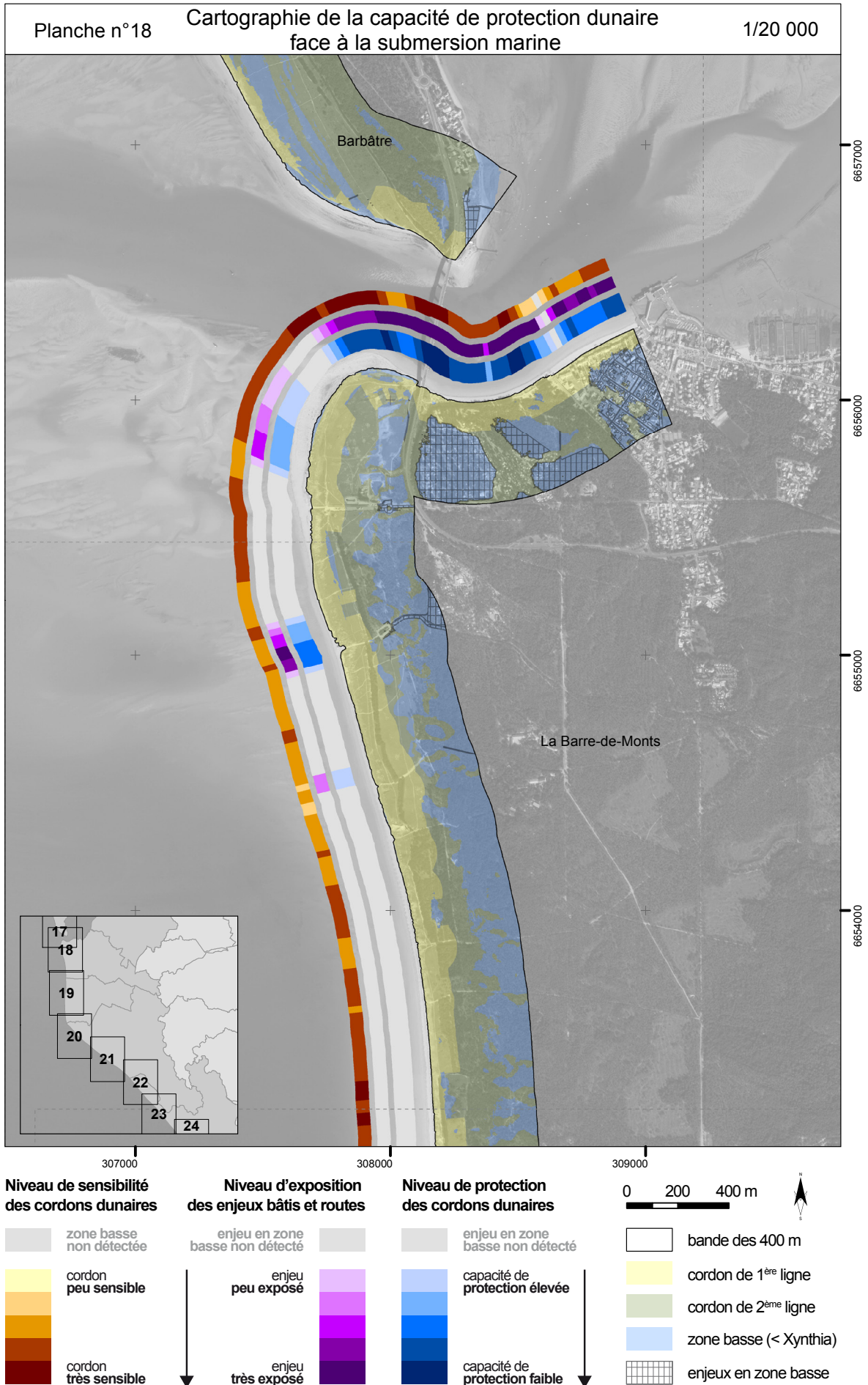


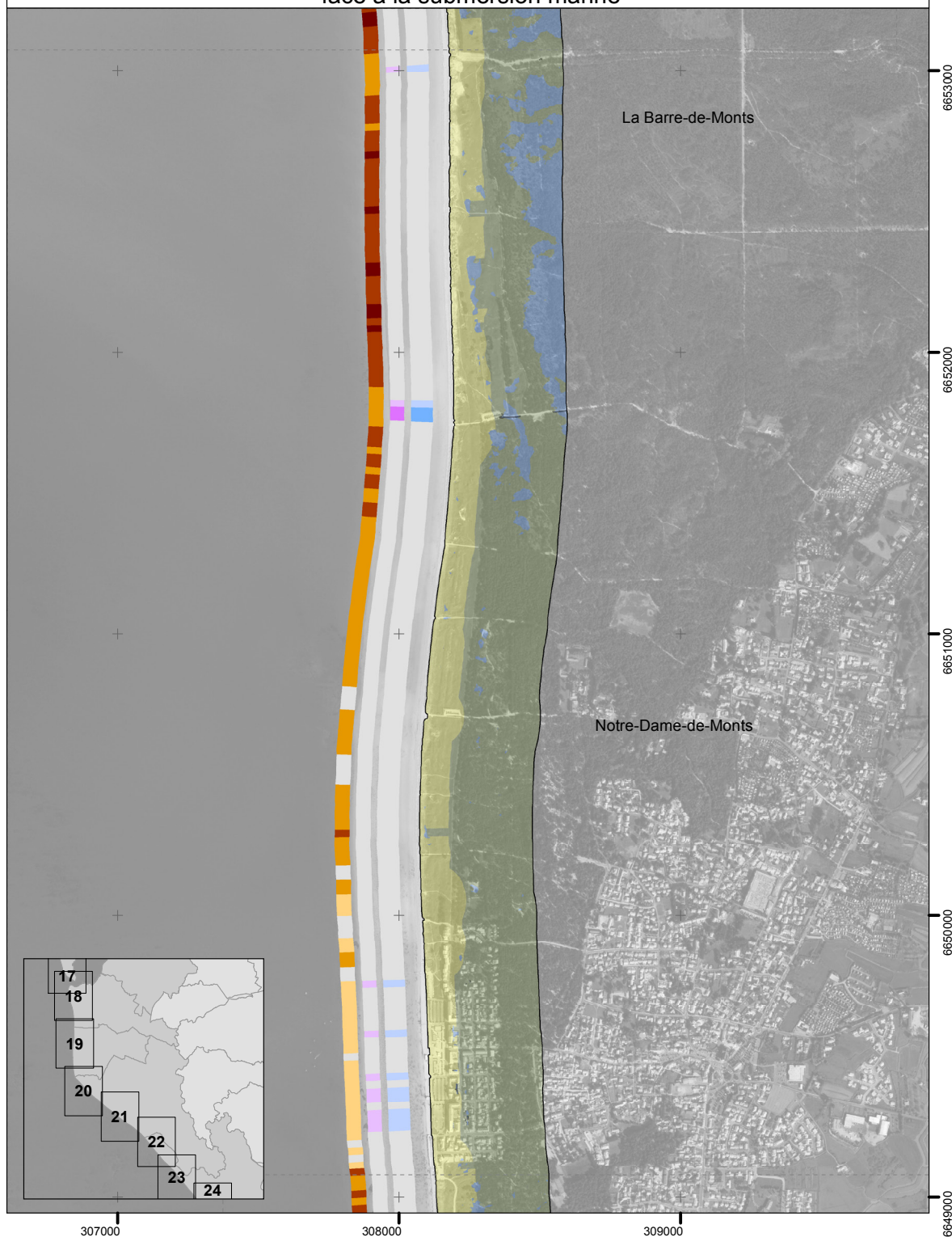
Niveau d'exposition des enjeux bâtis et routes



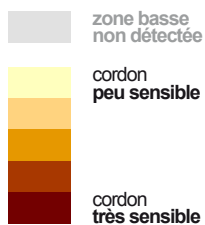
Niveau de protection des cordons dunaires



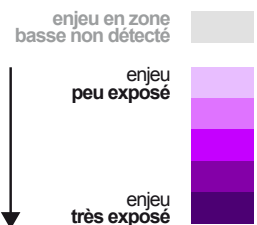




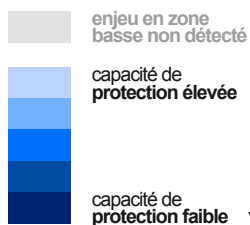
Niveau de sensibilité des cordons dunaires



Niveau d'exposition des enjeux bâtis et routes



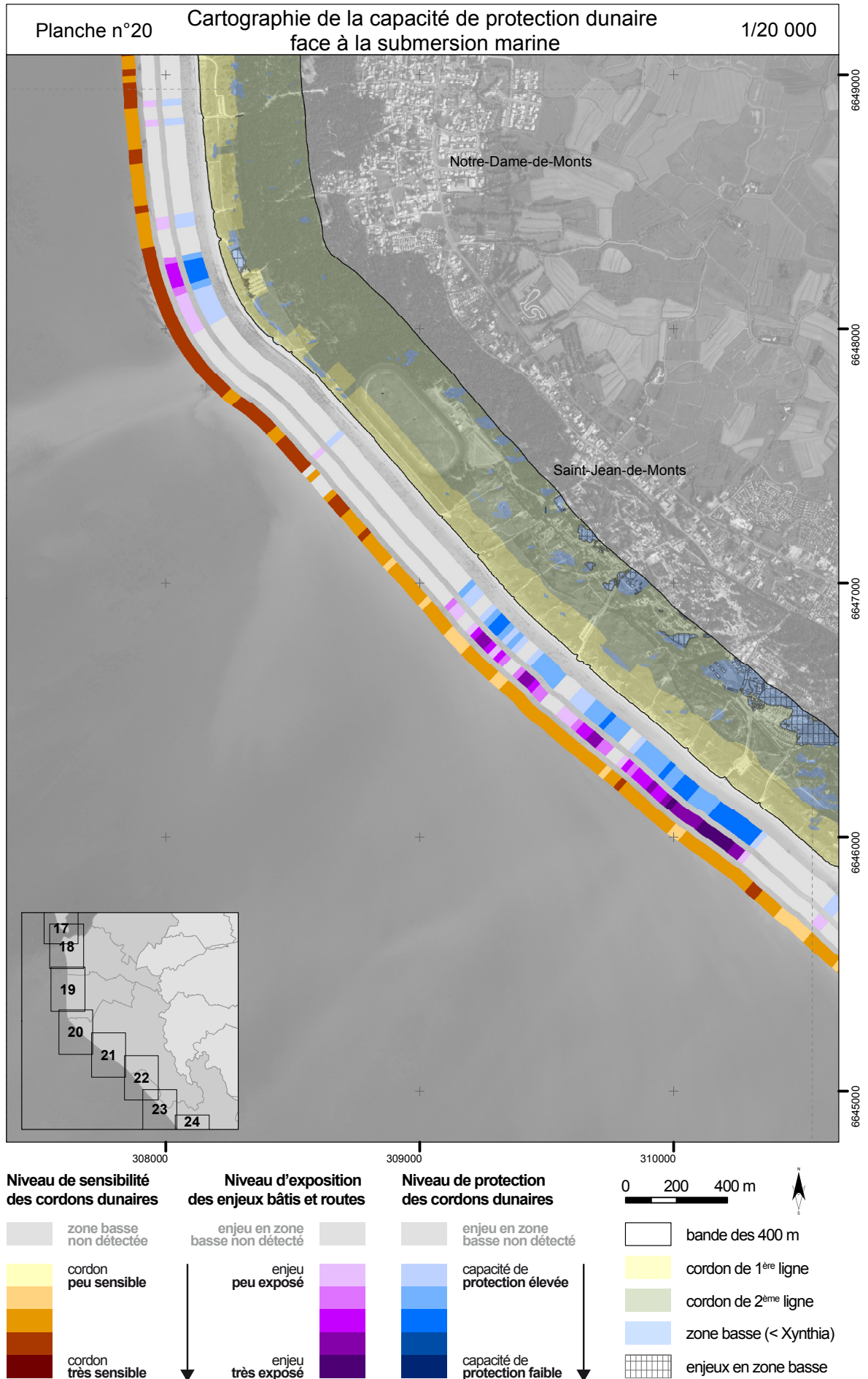
Niveau de protection des cordons dunaires

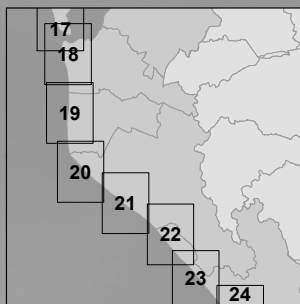
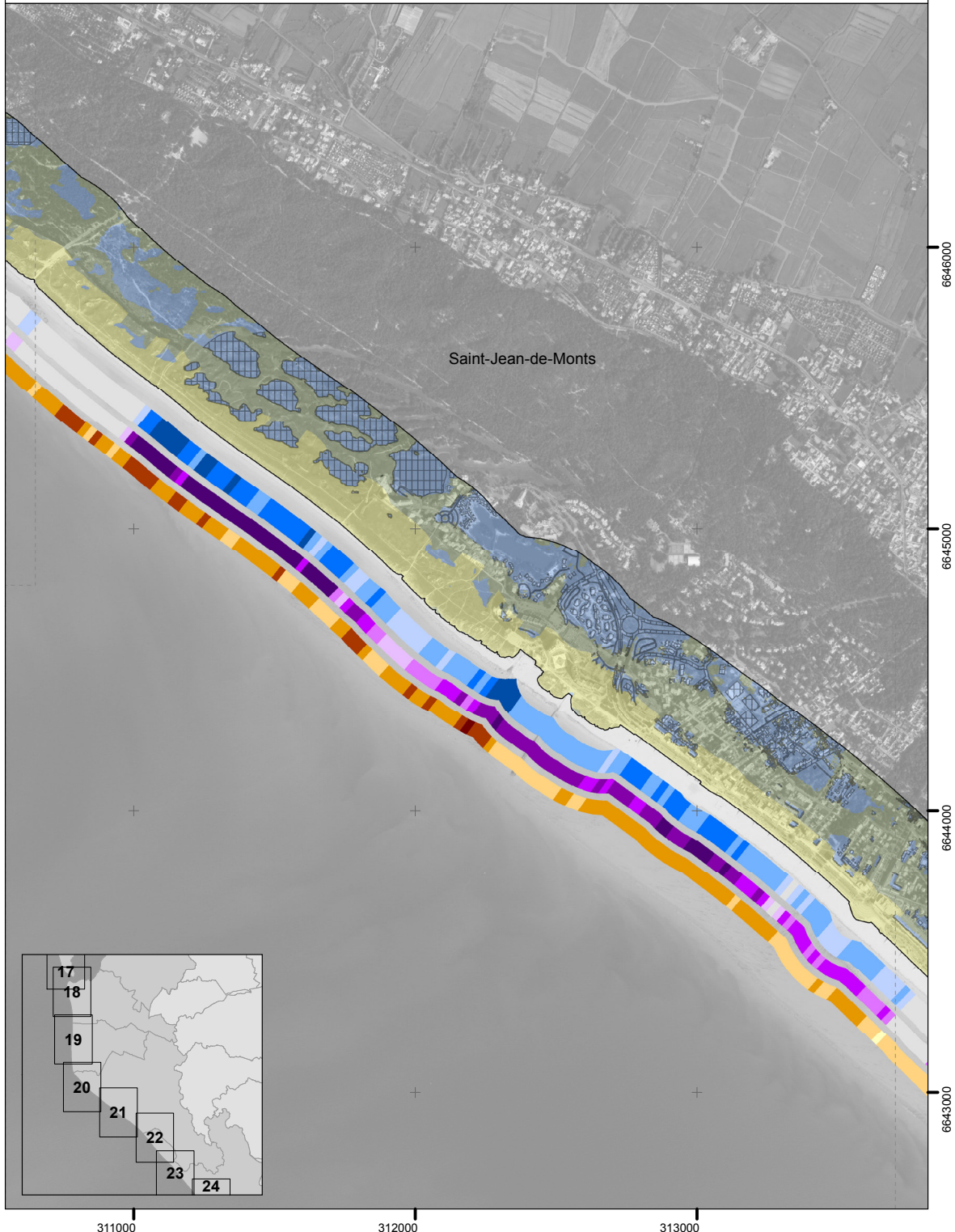


0 200 400 m

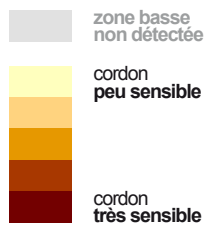


- bande des 400 m
- cordon de 1^{ère} ligne
- cordon de 2^{ème} ligne
- zone basse (< Xynthia)
- enjeux en zone basse

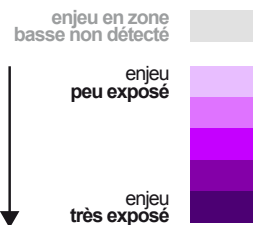




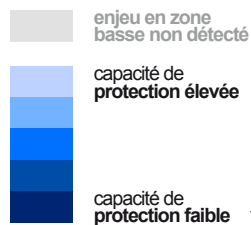
Niveau de sensibilité des cordons dunaires



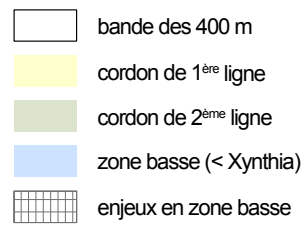
Niveau d'exposition des enjeux bâtis et routes

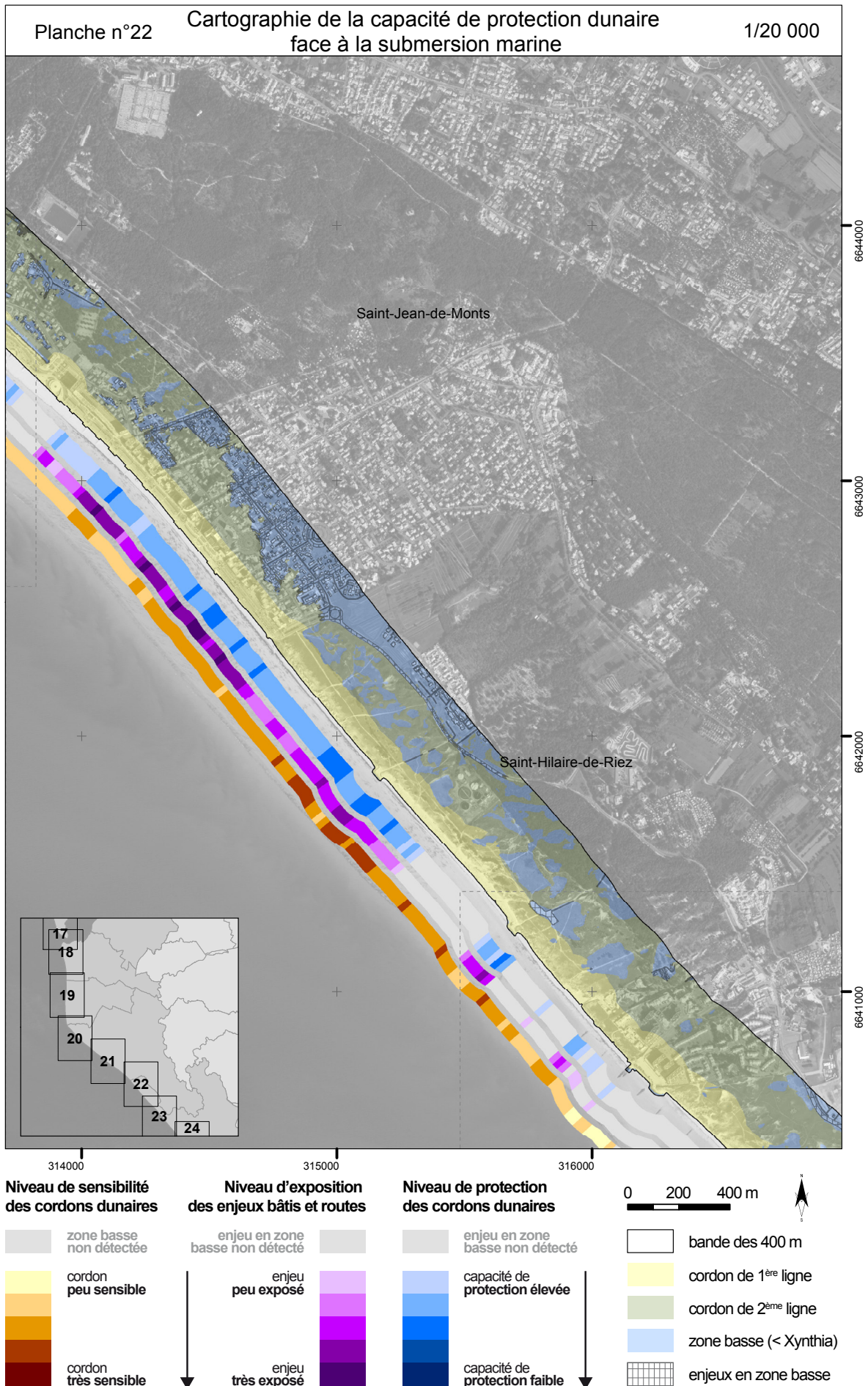


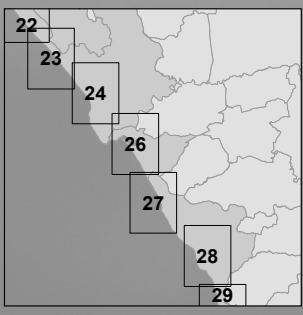
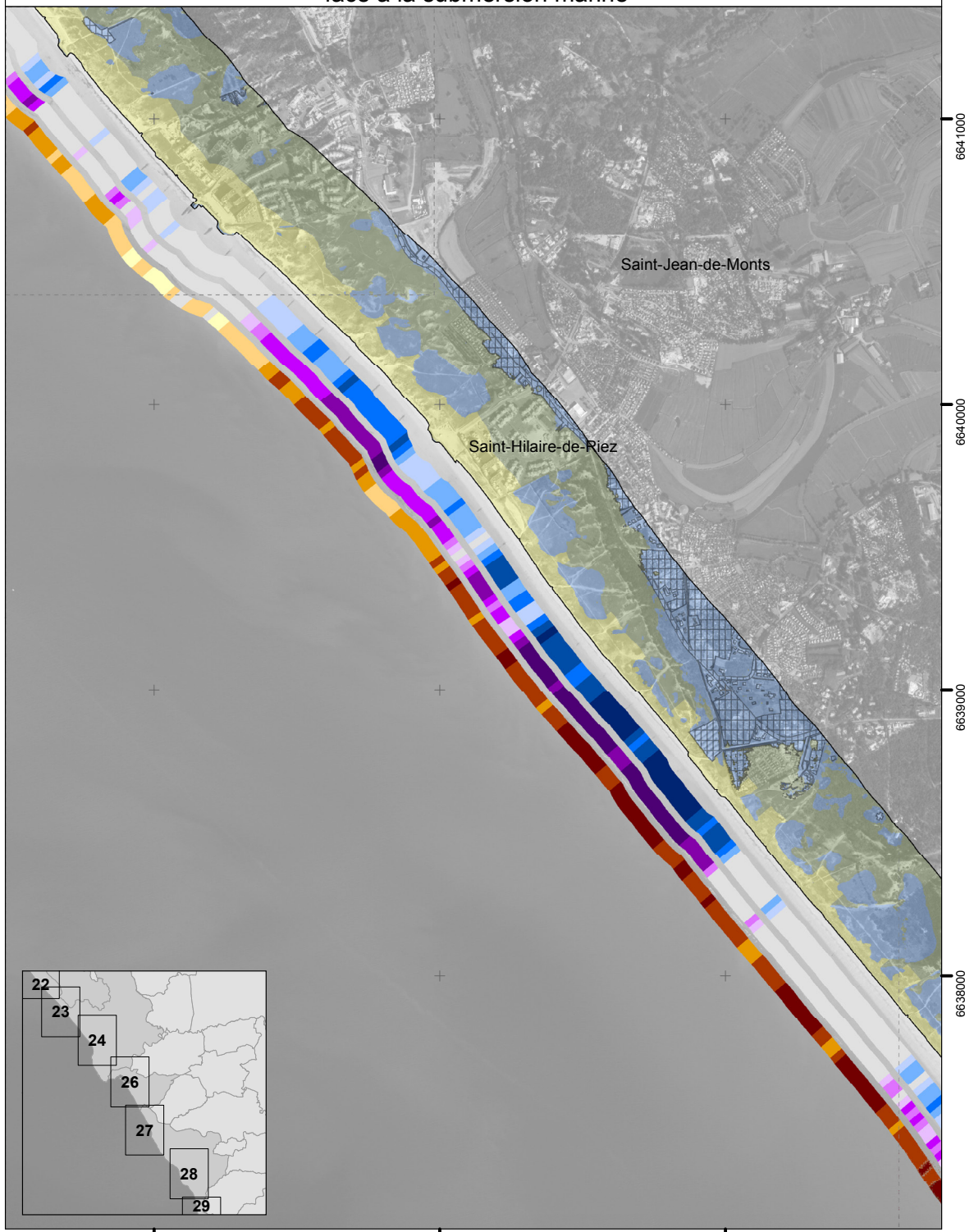
Niveau de protection des cordons dunaires



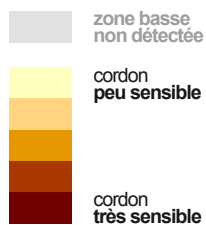
0 200 400 m



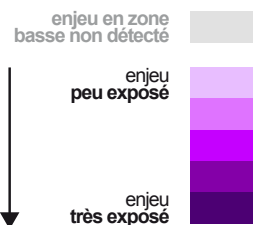




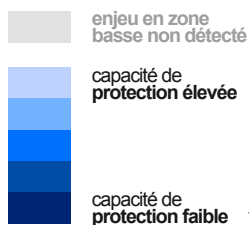
Niveau de sensibilité des cordons dunaires



Niveau d'exposition des enjeux bâtis et routes



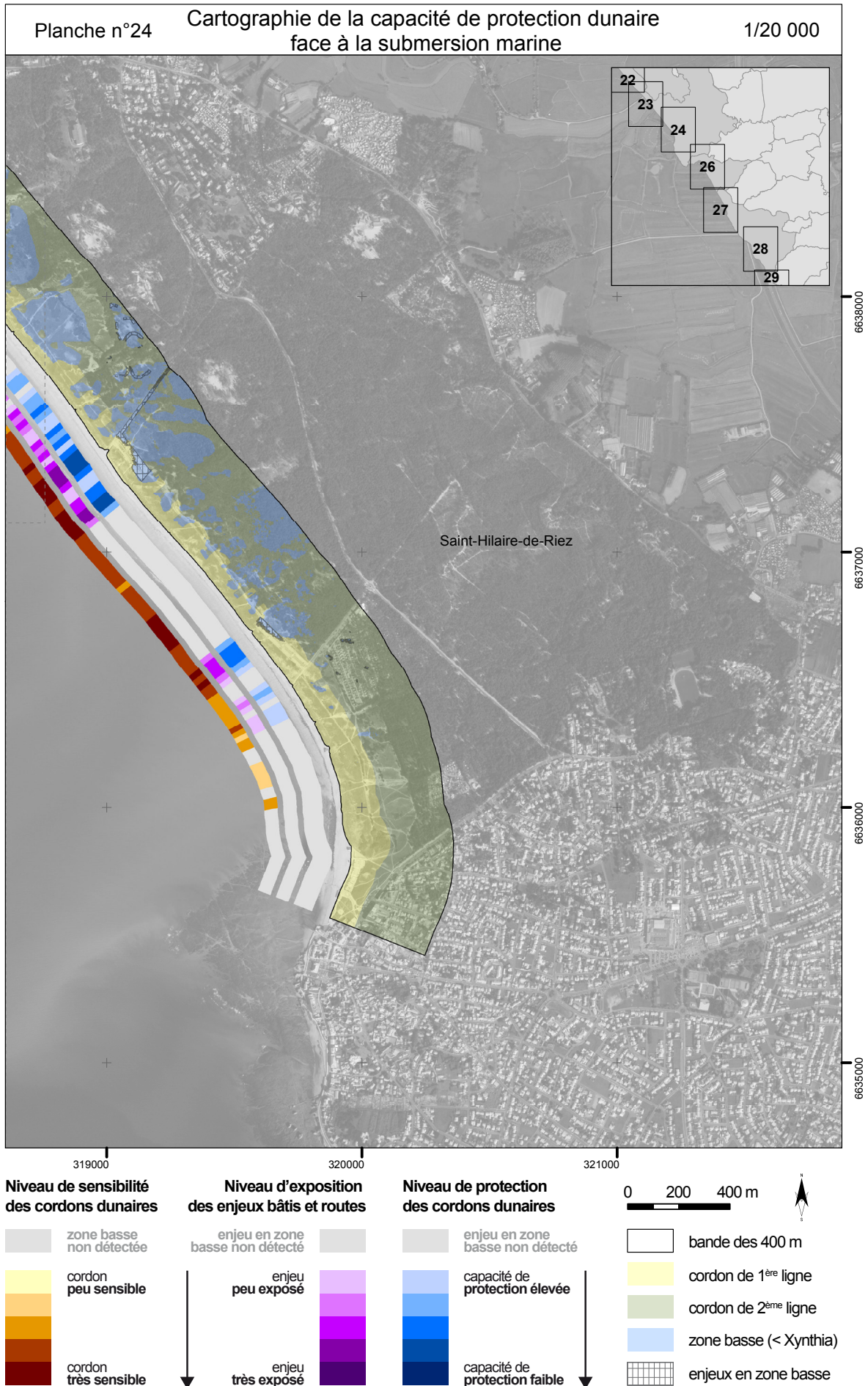
Niveau de protection des cordons dunaires

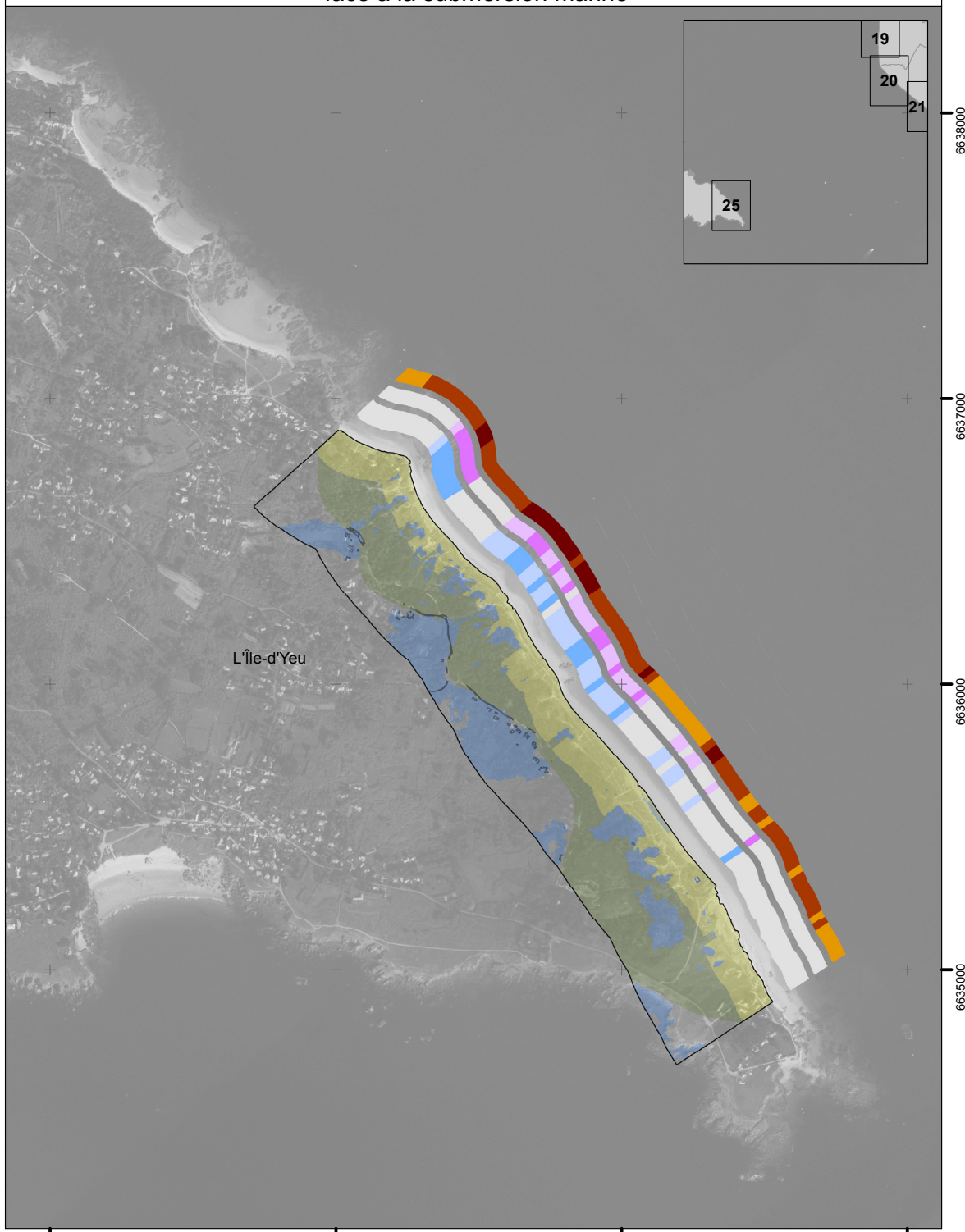


0 200 400 m

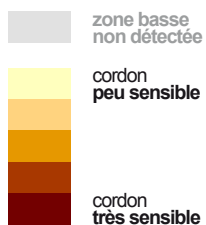


- bande des 400 m
- cordon de 1^{ère} ligne
- cordon de 2^{ème} ligne
- zone basse (< Xynthia)
- enjeux en zone basse

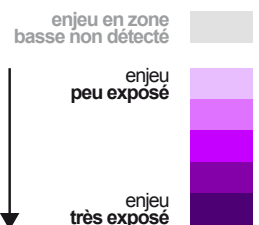




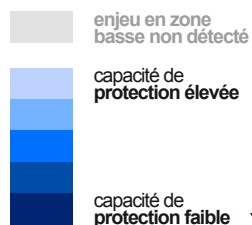
Niveau de sensibilité des cordons dunaires



Niveau d'exposition des enjeux bâtis et routes








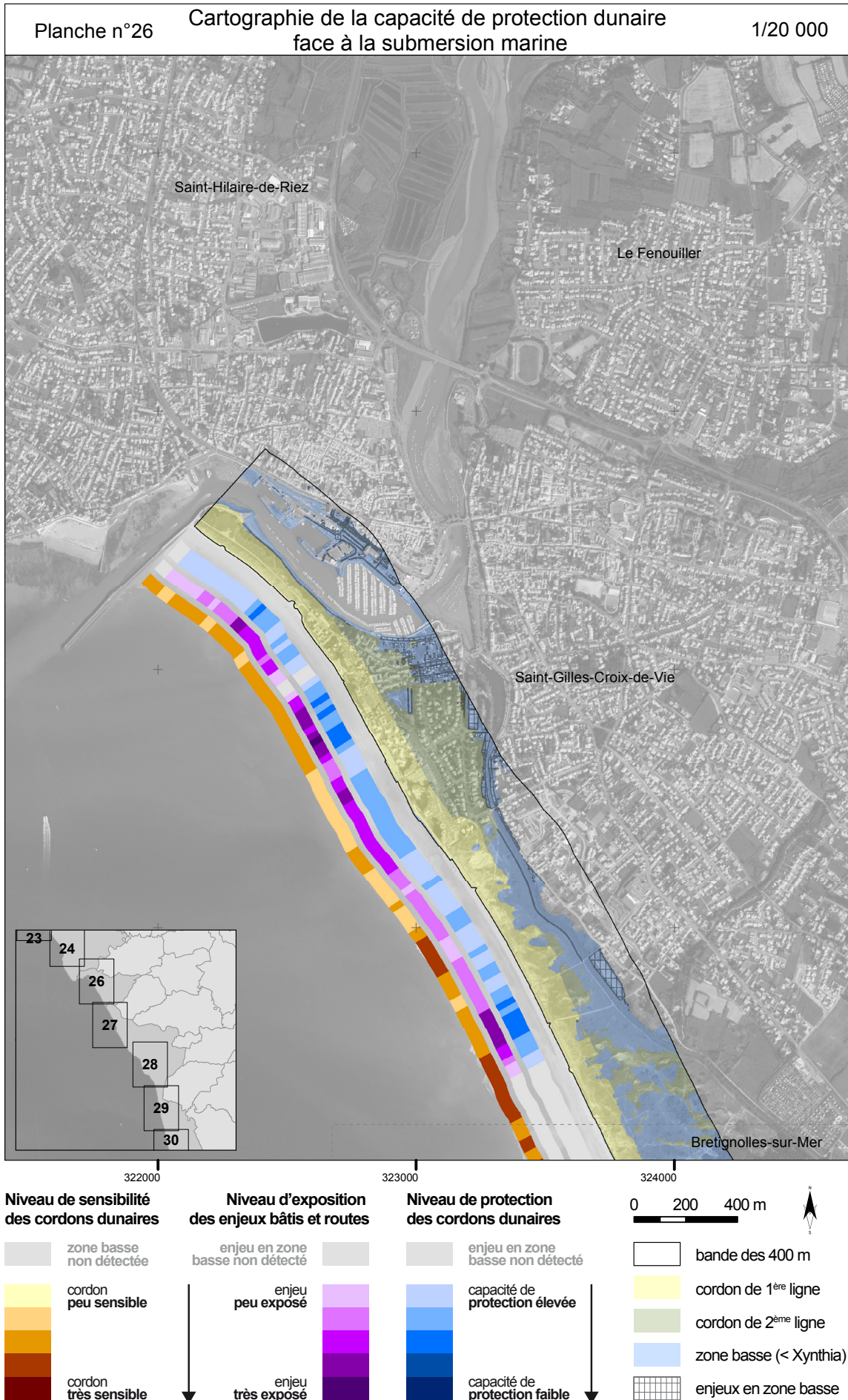
Niveau de protection des cordons dunaires

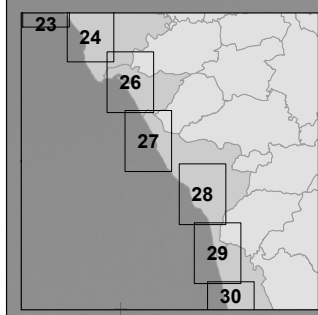
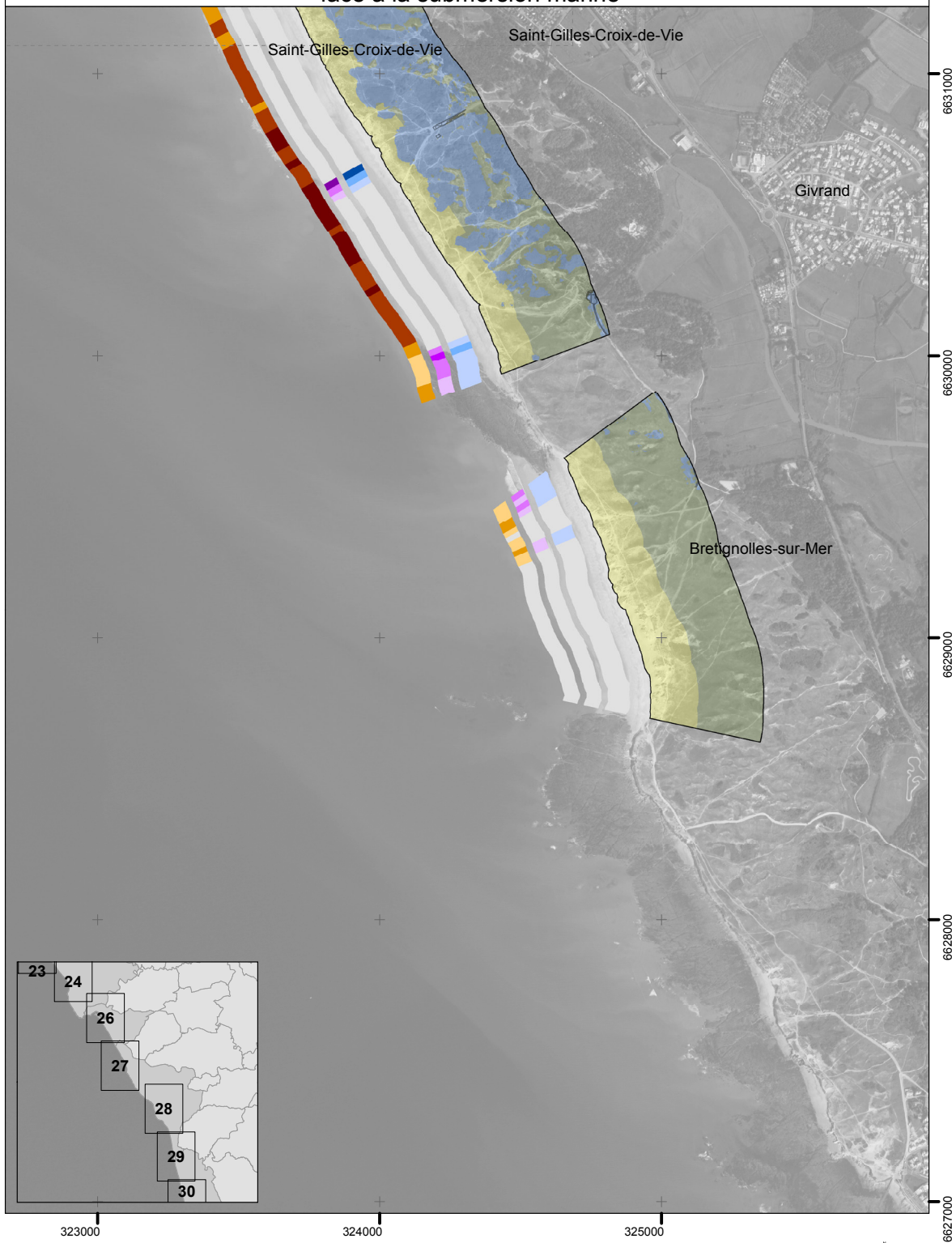


0 200 400 m

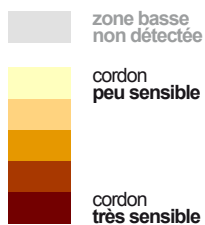


-  bande des 400 m
-  cordon de 1^{ère} ligne
-  cordon de 2^{ème} ligne
-  zone basse (< Xynthia)
-  enjeux en zone basse

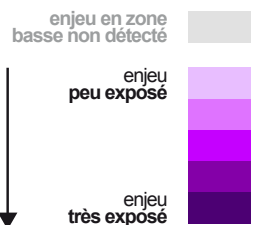




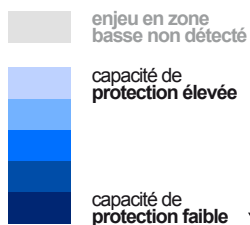
Niveau de sensibilité des cordons dunaires



Niveau d'exposition des enjeux bâtis et routes



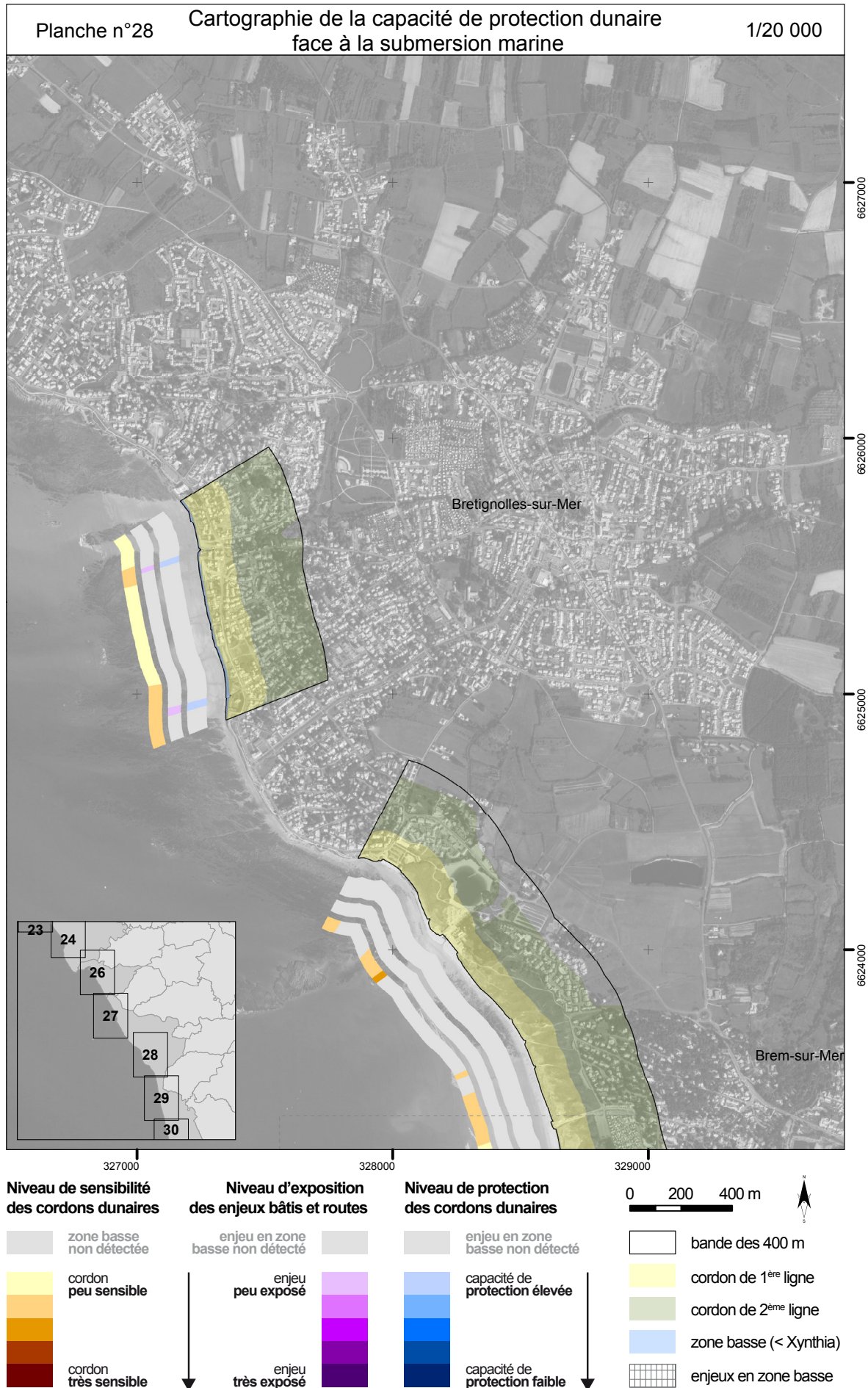
Niveau de protection des cordons dunaires

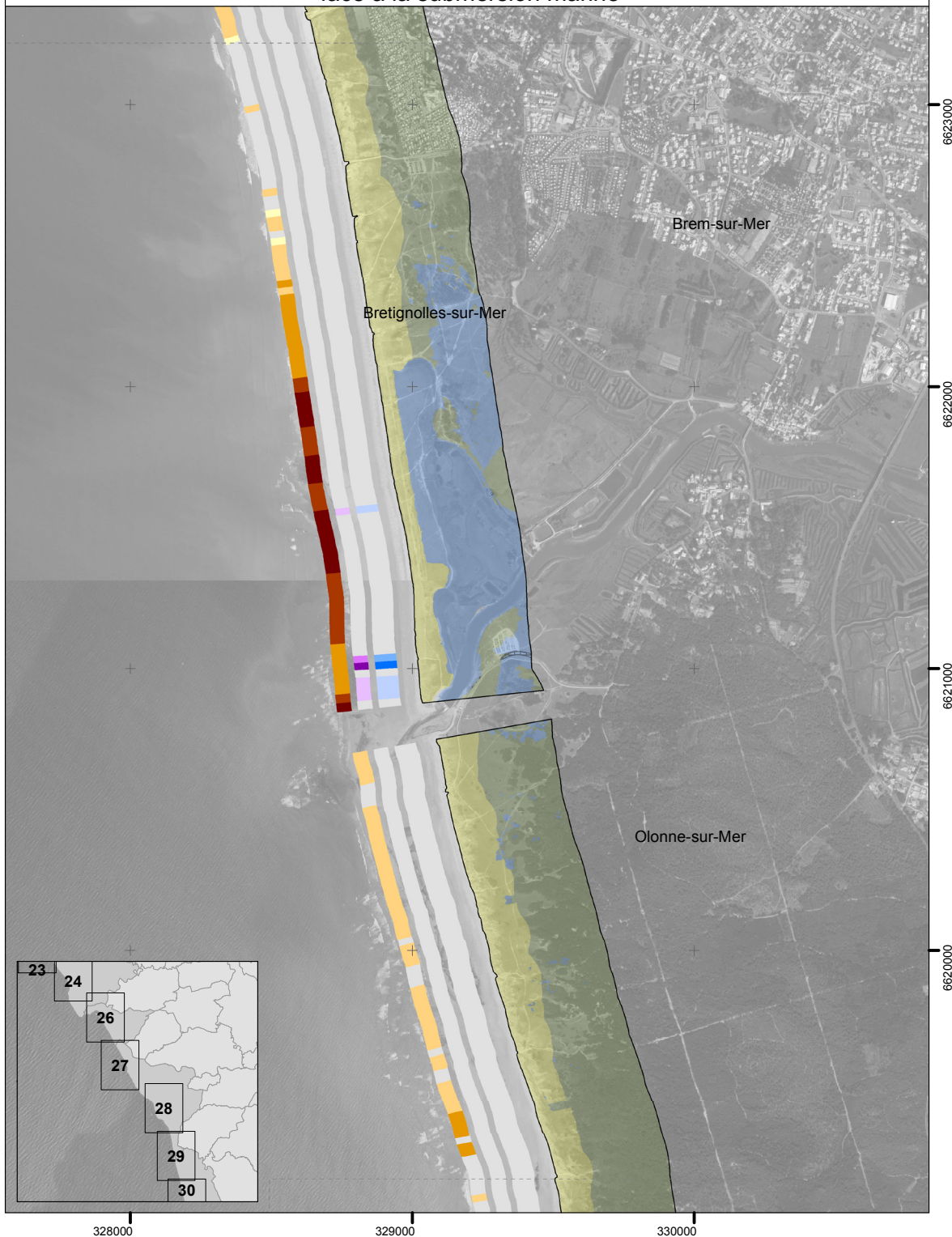


0 200 400 m

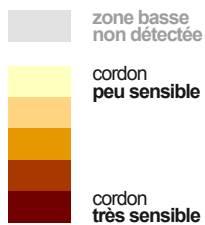


- bande des 400 m
- cordon de 1^{ère} ligne
- cordon de 2^{ème} ligne
- zone basse (< Xynthia)
- enjeux en zone basse

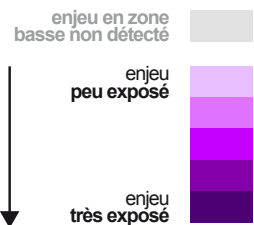




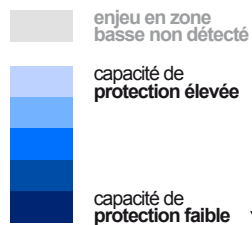
Niveau de sensibilité des cordons dunaires



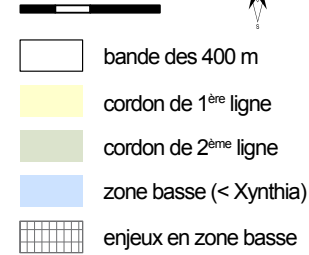
Niveau d'exposition des enjeux bâtis et routes

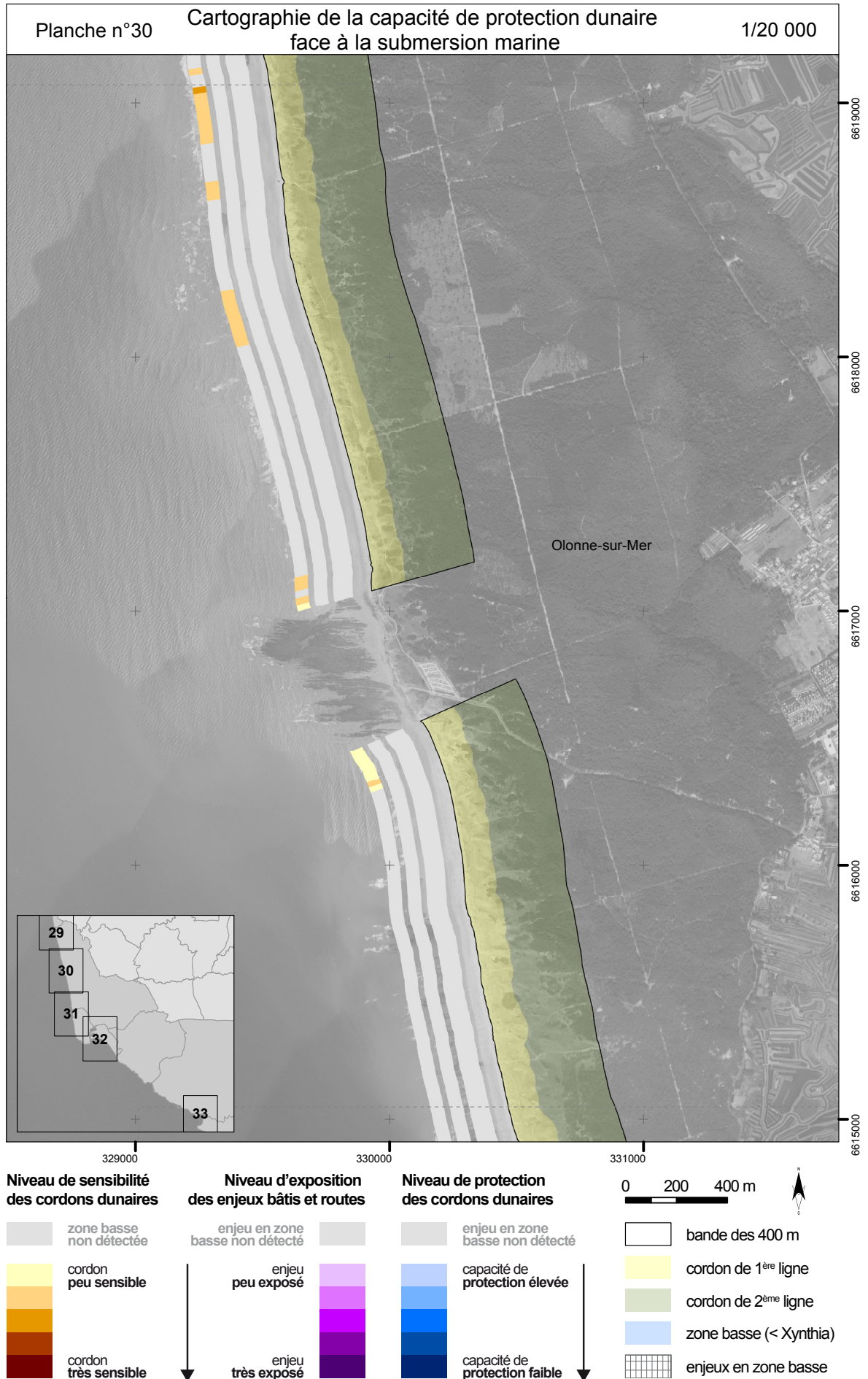


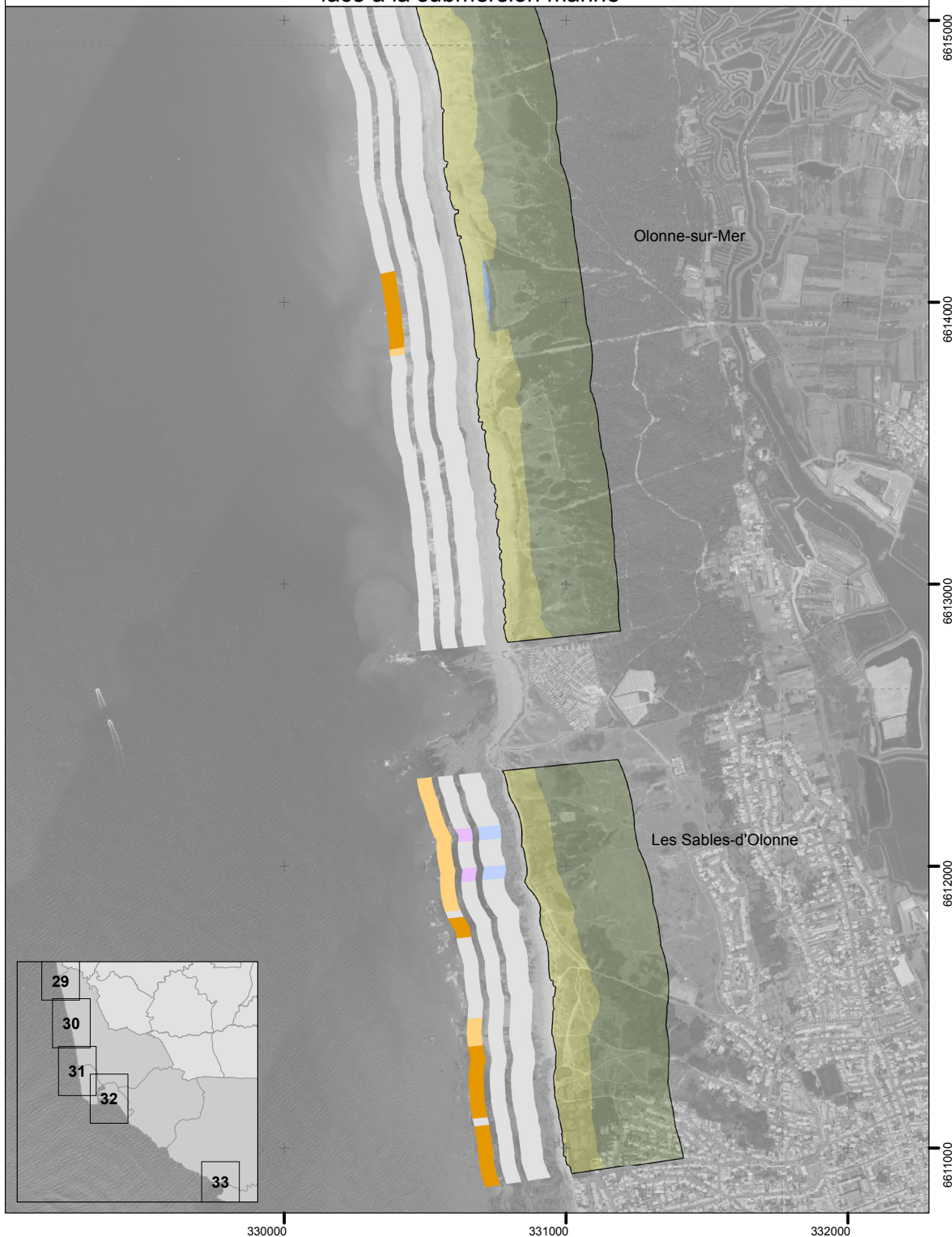
Niveau de protection des cordons dunaires



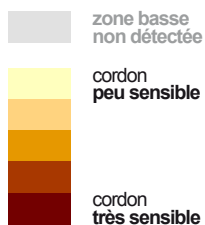
0 200 400 m



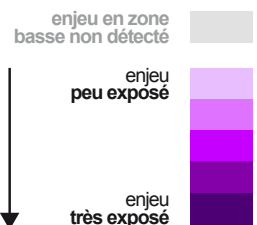




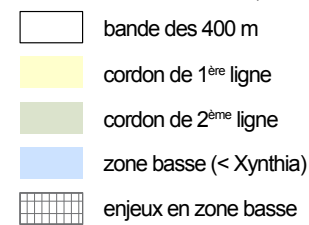
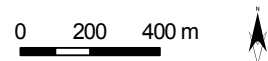
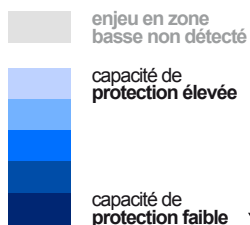
Niveau de sensibilité des cordons dunaires

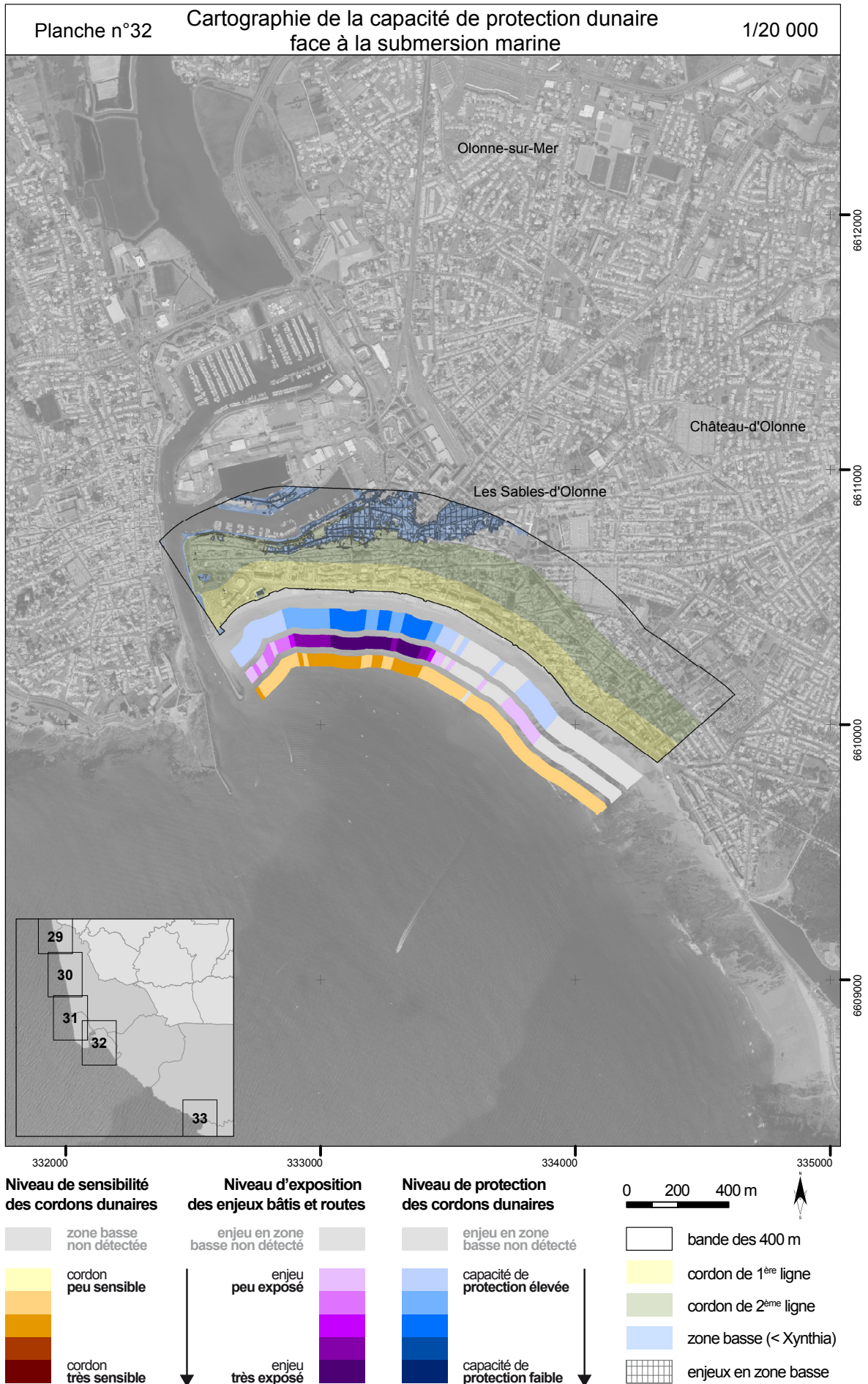


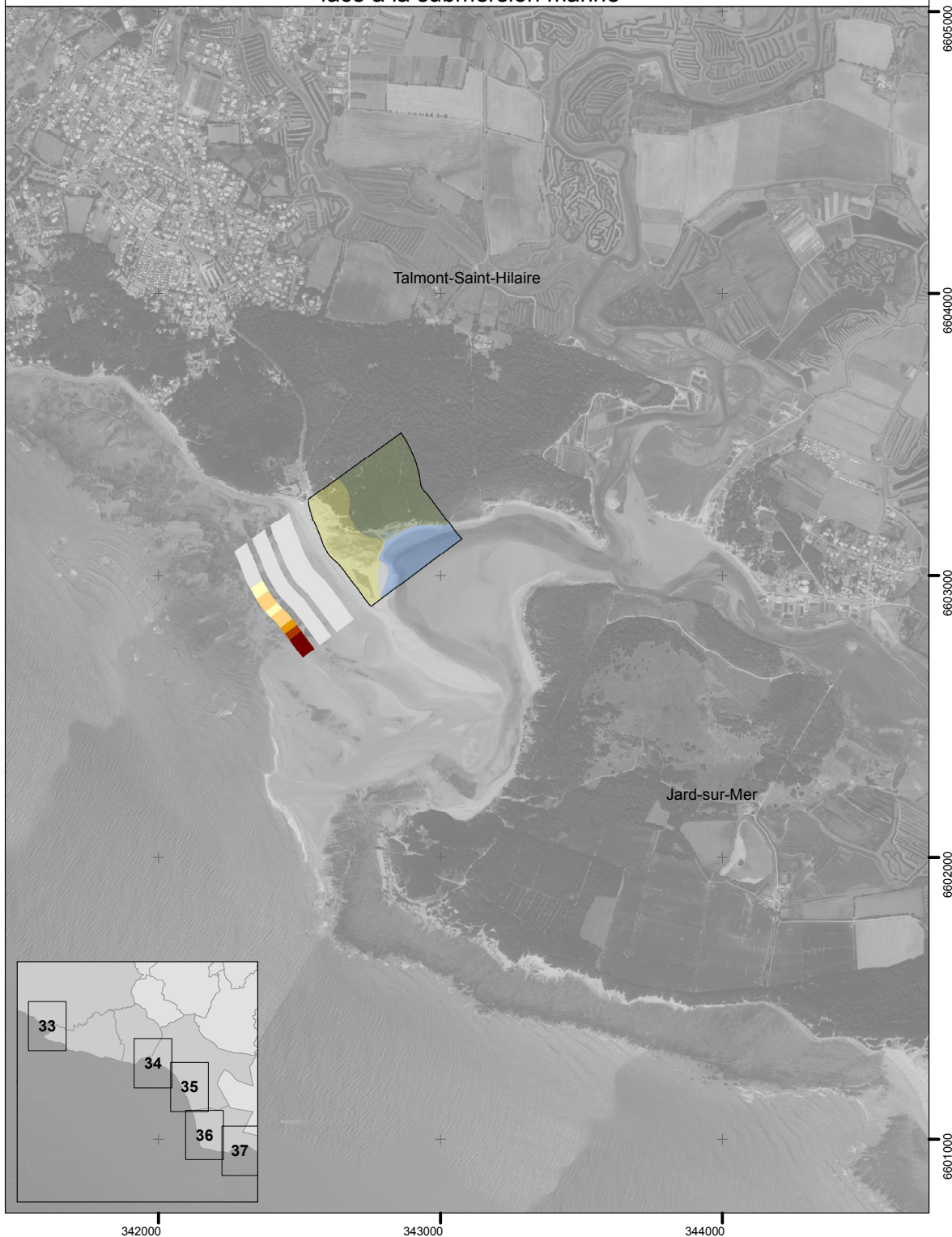
Niveau d'exposition des enjeux bâtis et routes



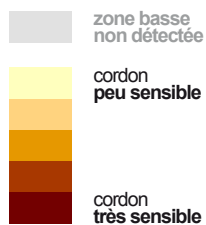
Niveau de protection des cordons dunaires



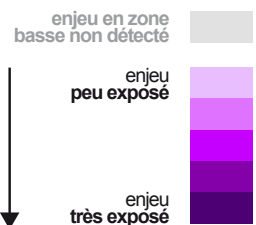




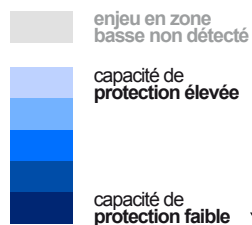
Niveau de sensibilité des cordons dunaires



Niveau d'exposition des enjeux bâtis et routes








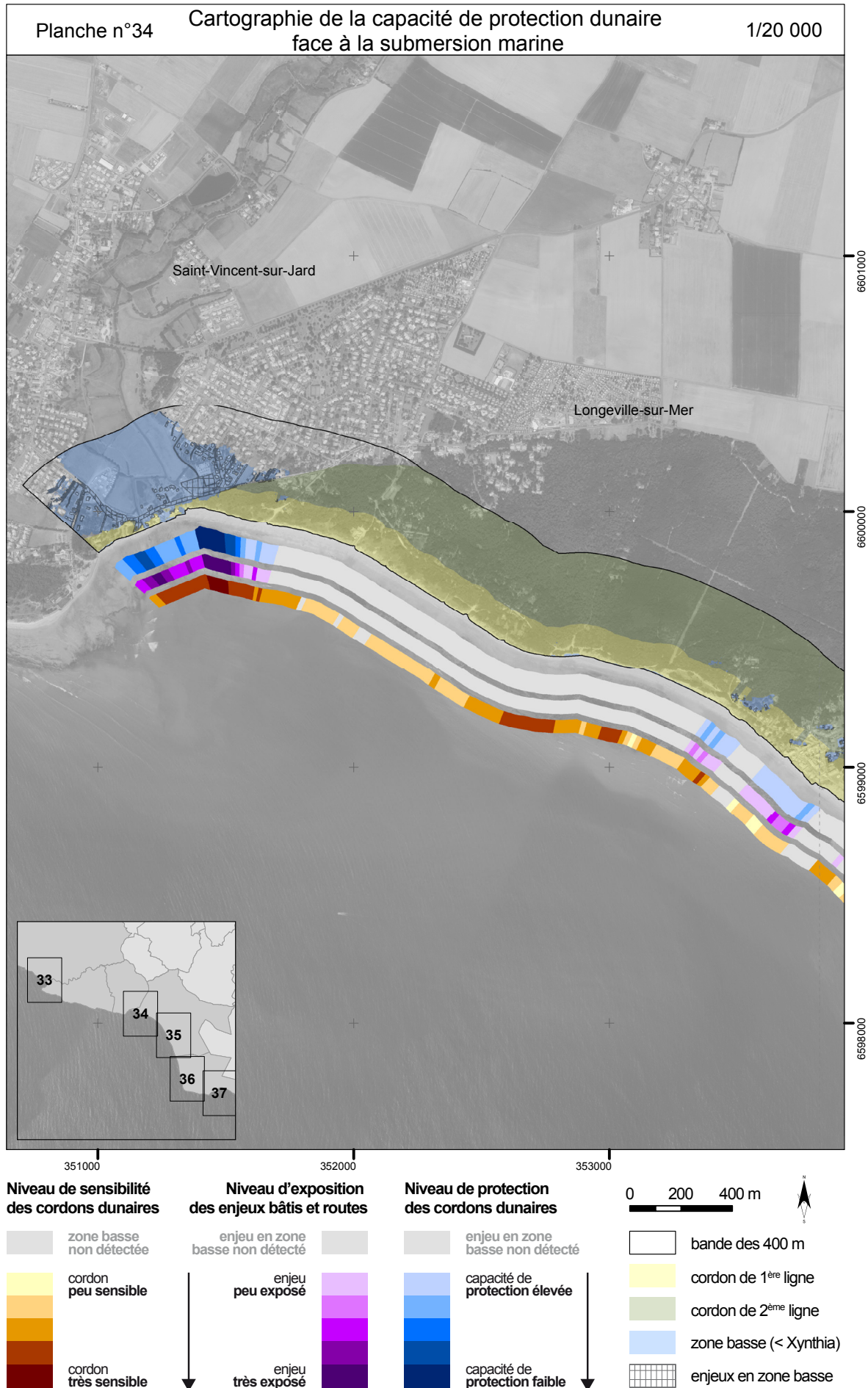
Niveau de protection des cordons dunaires

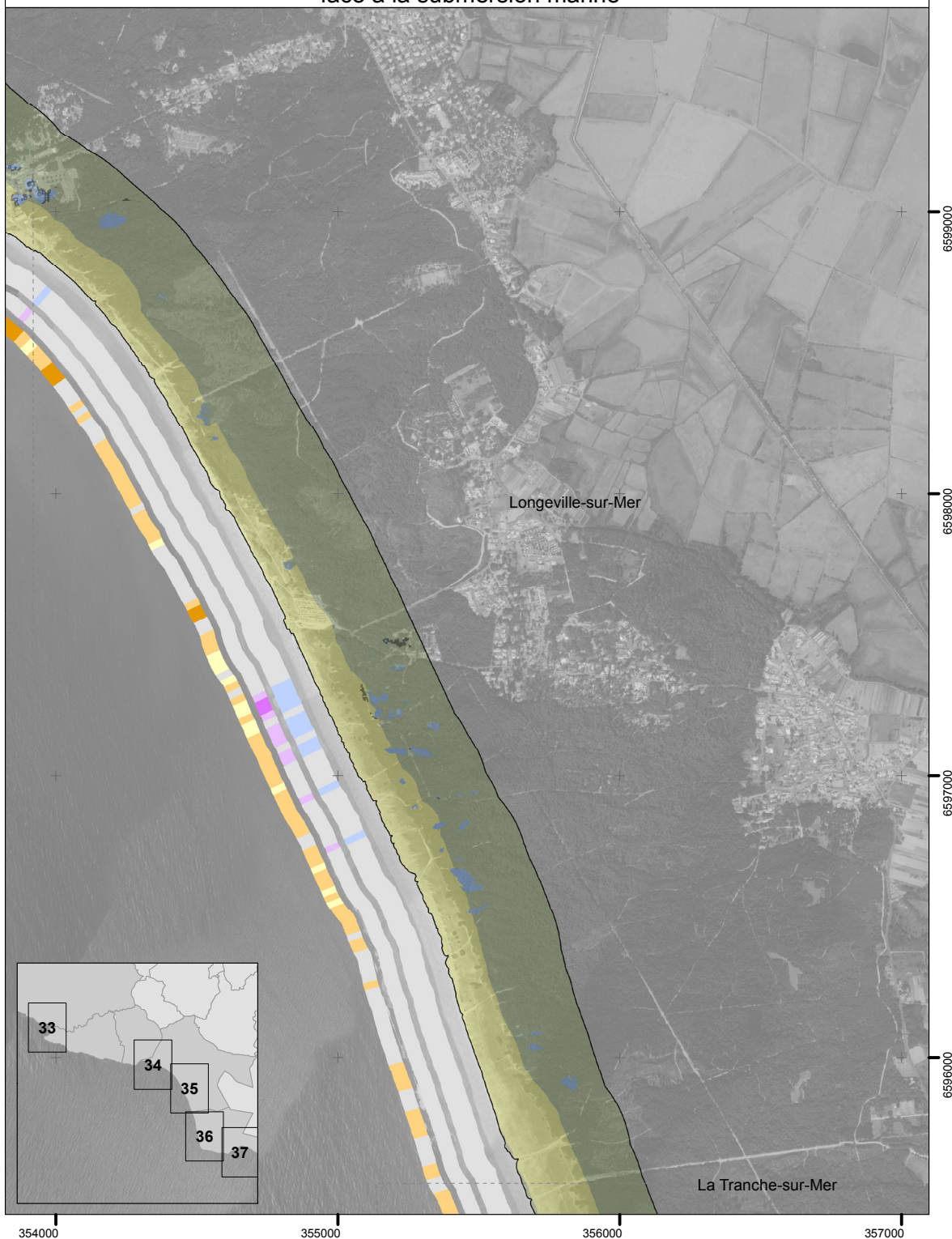


0 200 400 m

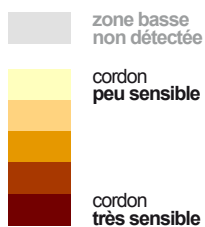


-  bande des 400 m
-  cordon de 1^{ère} ligne
-  cordon de 2^{ème} ligne
-  zone basse (< Xynthia)
-  enjeux en zone basse

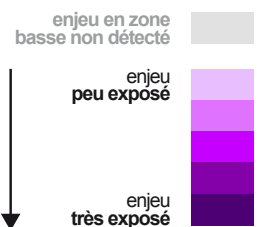




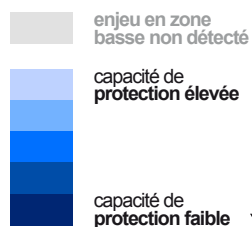
Niveau de sensibilité des cordons dunaires



Niveau d'exposition des enjeux bâtis et routes








Niveau de protection des cordons dunaires

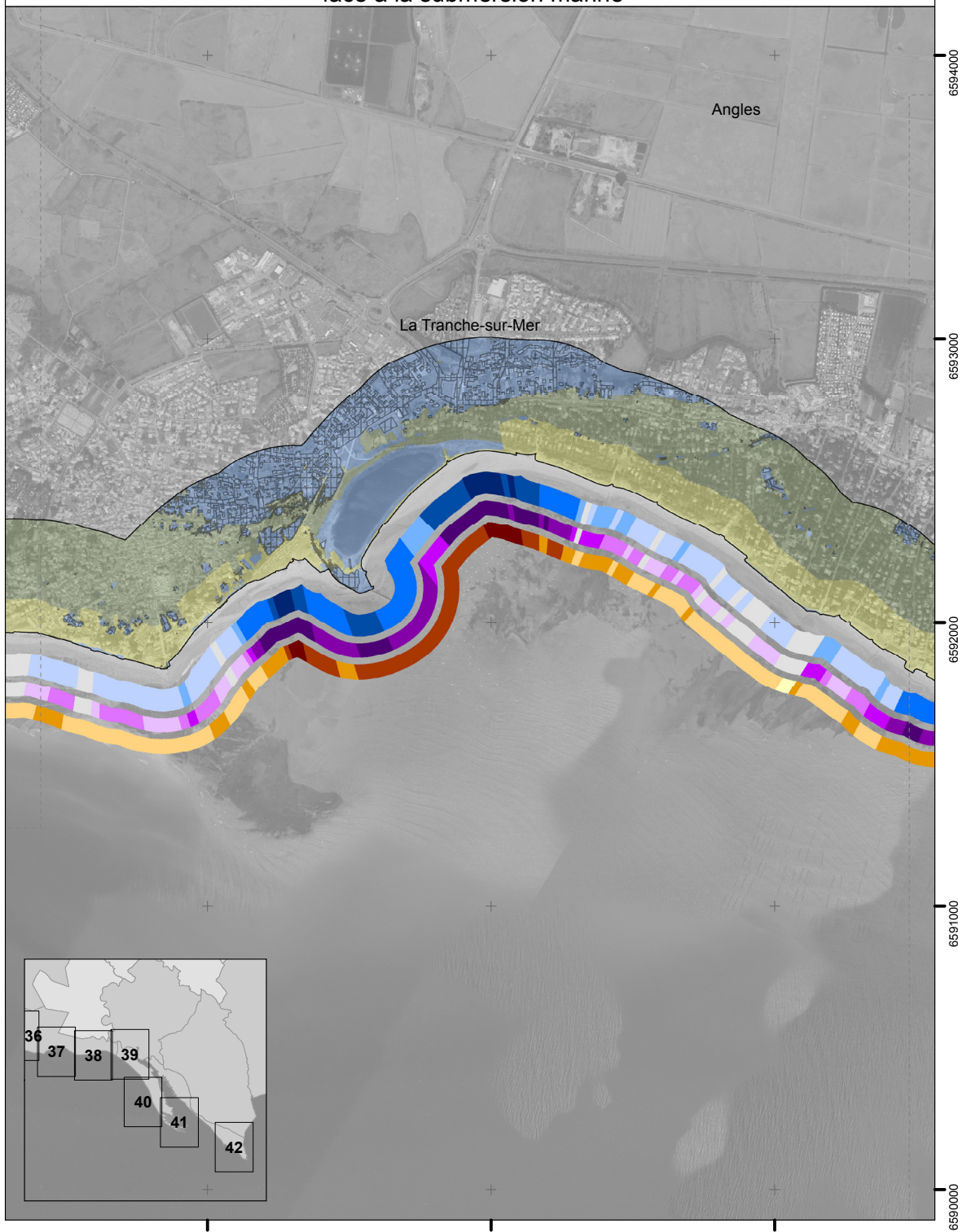


0 200 400 m

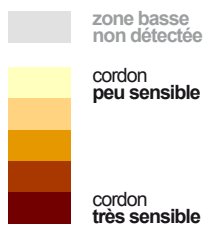


-  bande des 400 m
-  cordon de 1^{ère} ligne
-  cordon de 2^{ème} ligne
-  zone basse (< Xynthia)
-  enjeux en zone basse

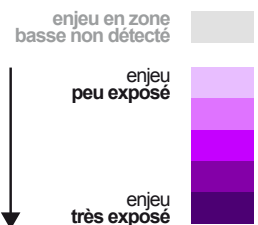




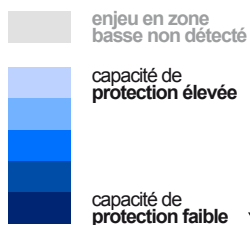
Niveau de sensibilité des cordons dunaires



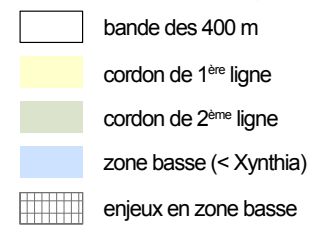
Niveau d'exposition des enjeux bâtis et routes

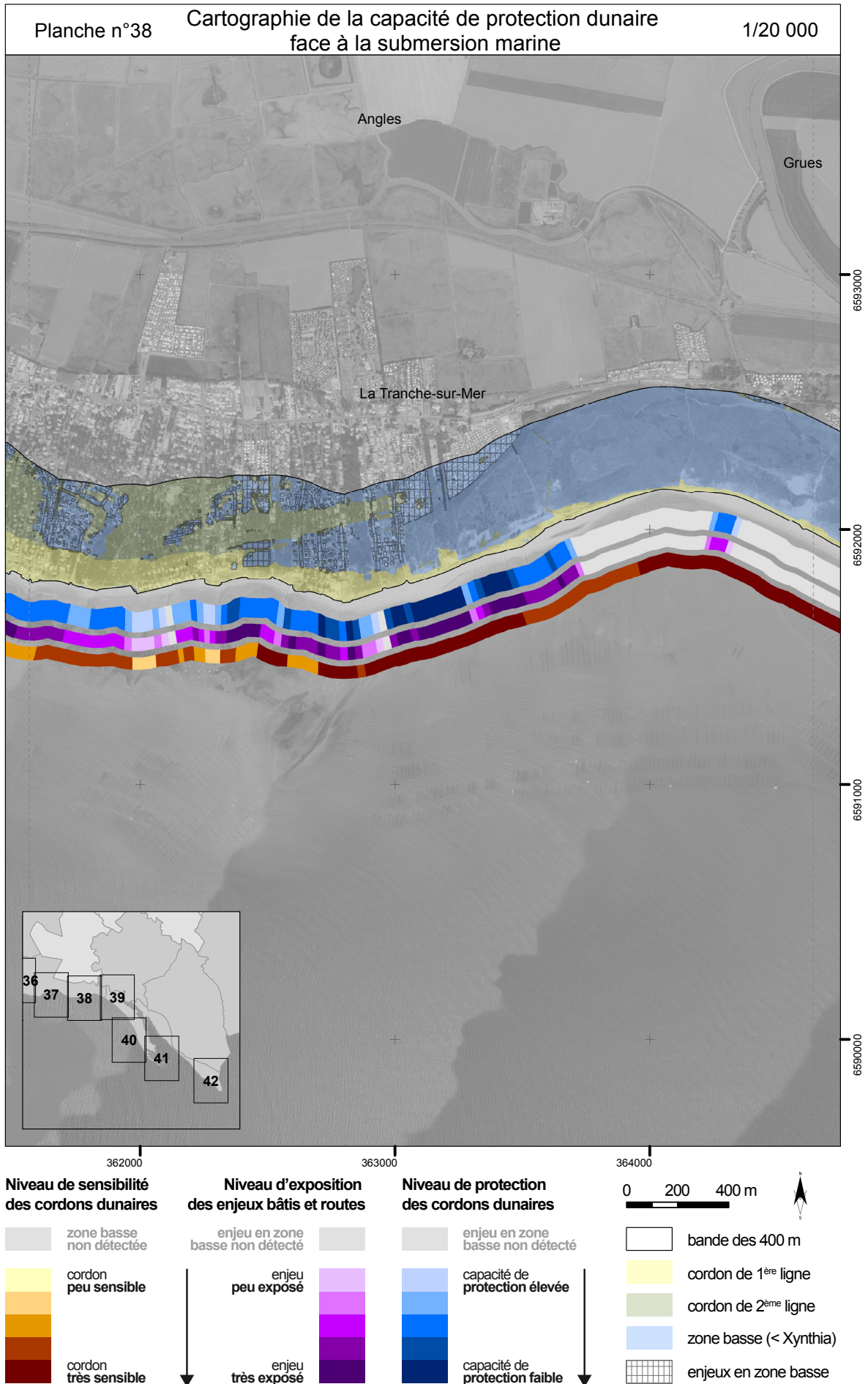


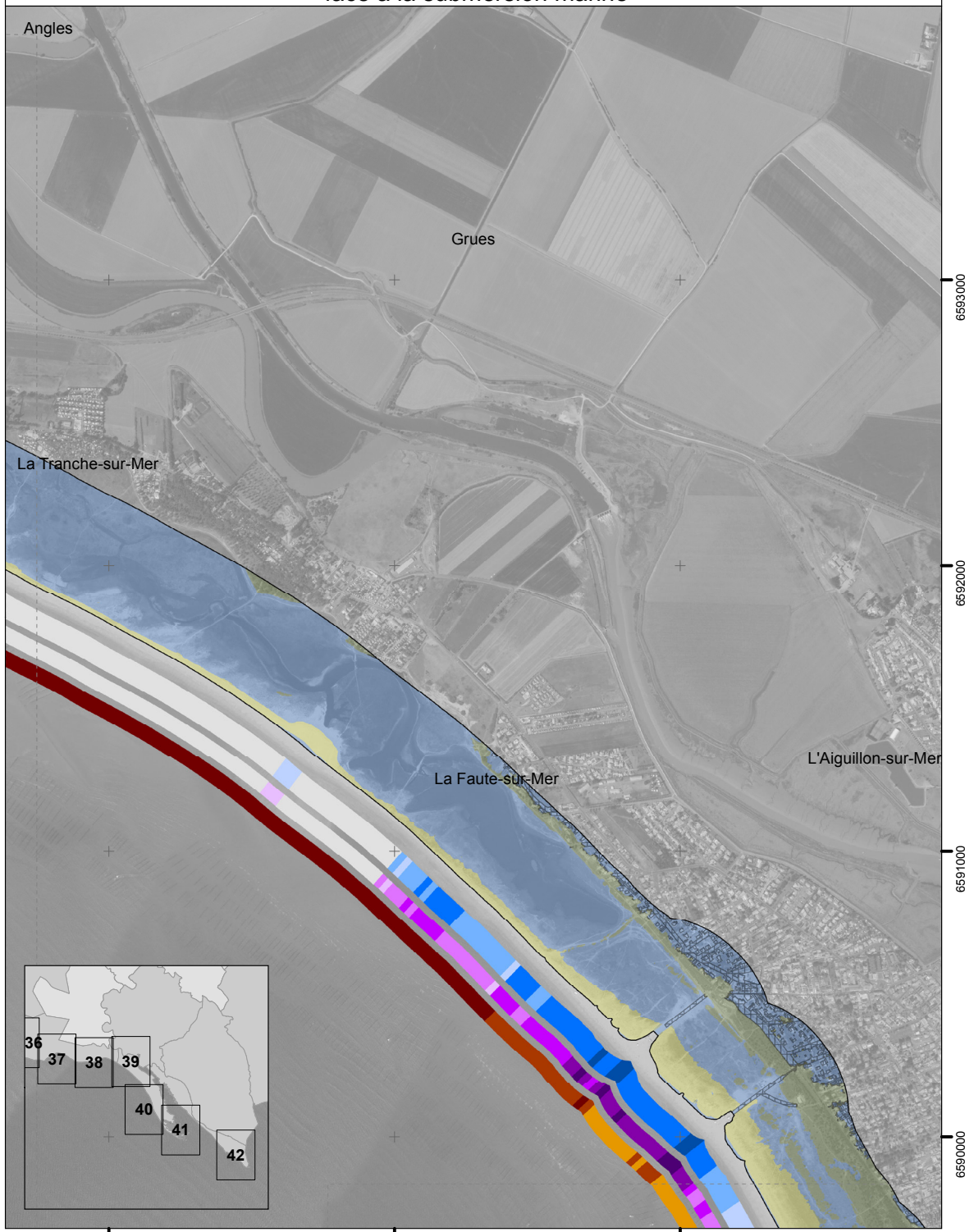
Niveau de protection des cordons dunaires



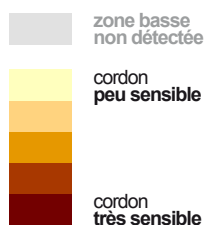
0 200 400 m



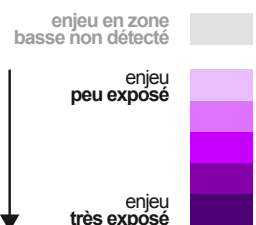




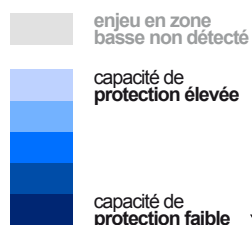
Niveau de sensibilité des cordons dunaires



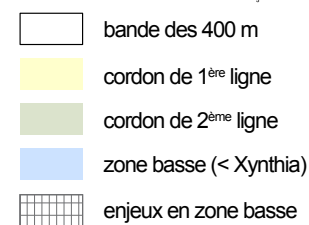
Niveau d'exposition des enjeux bâtis et routes

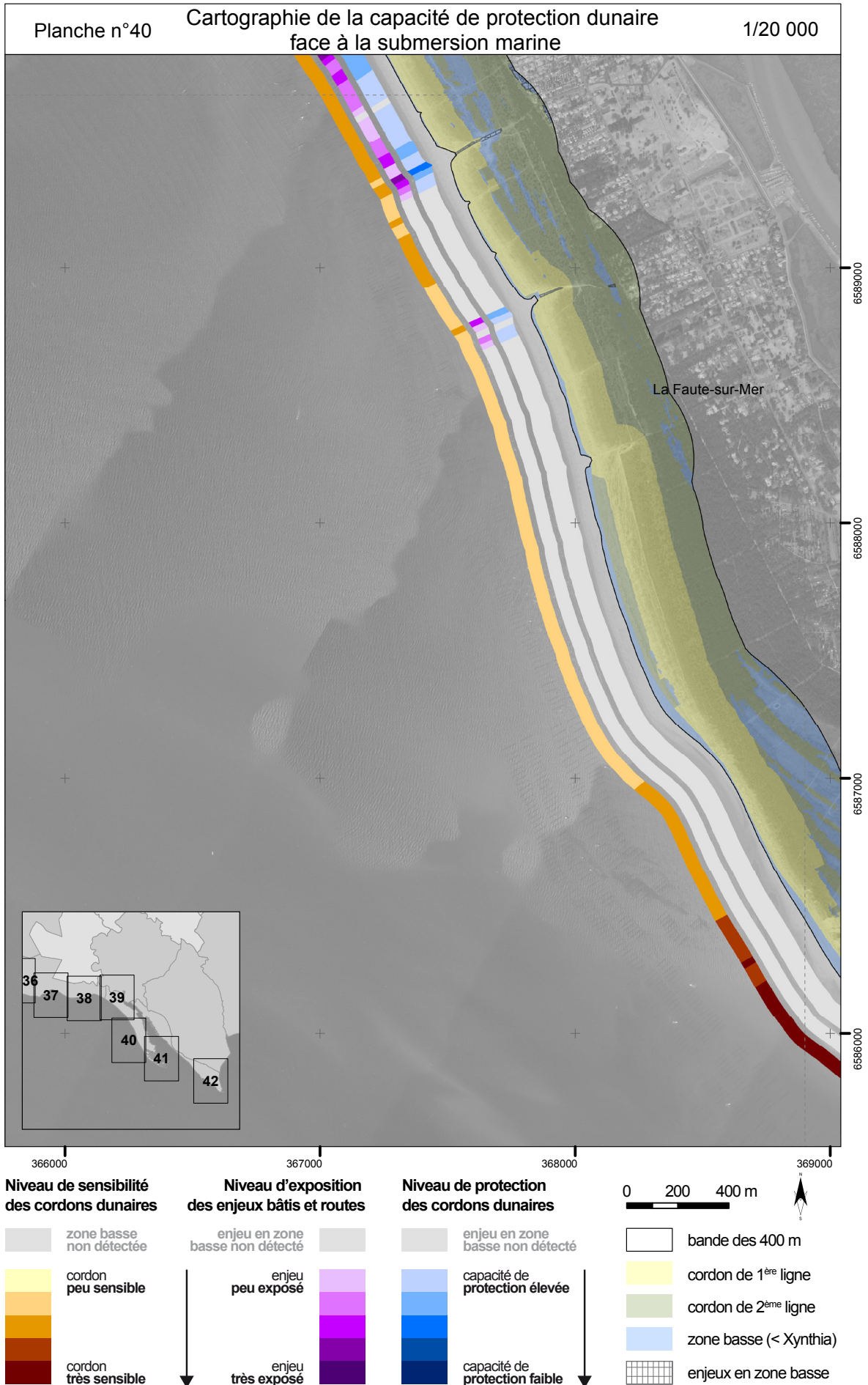


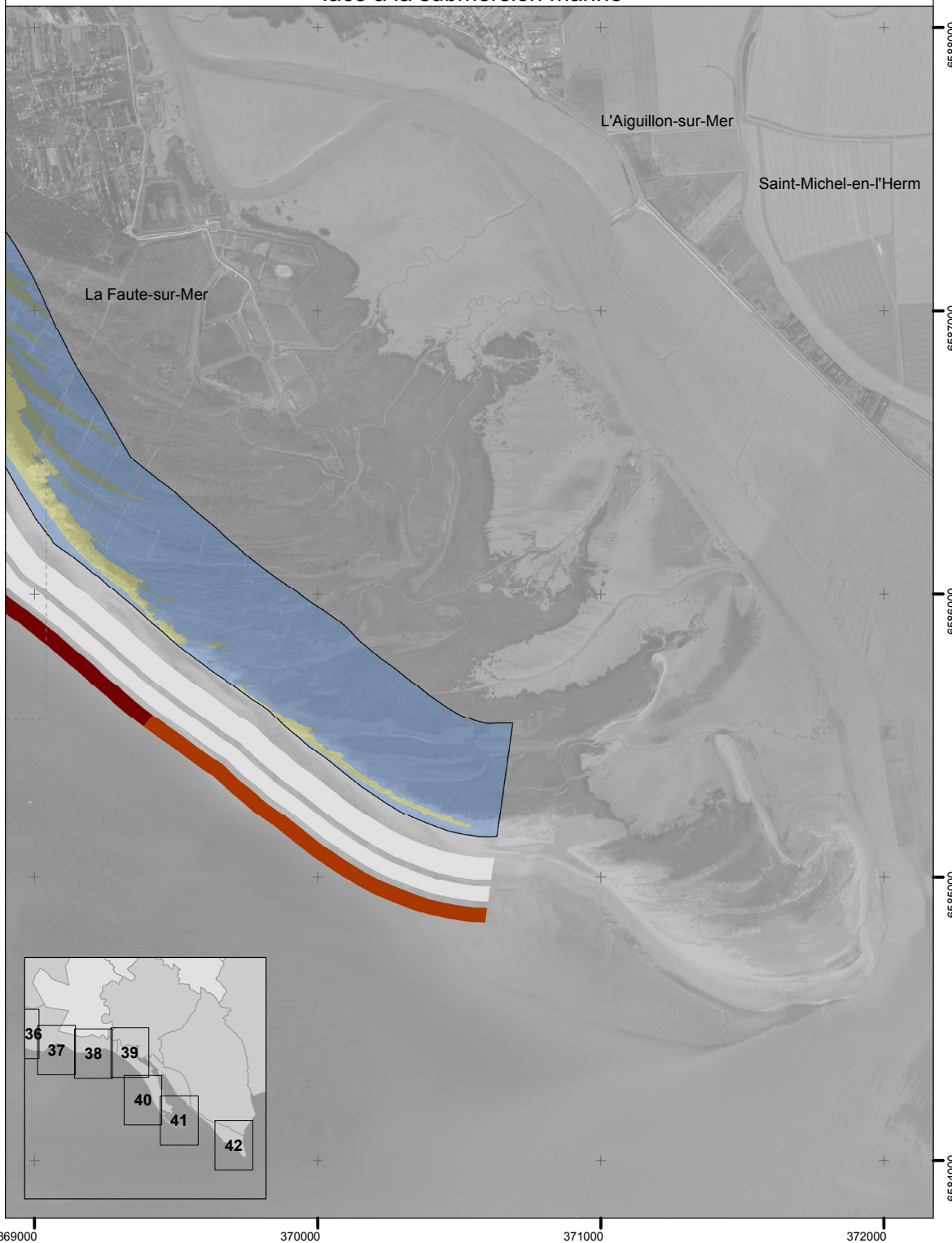
Niveau de protection des cordons dunaires



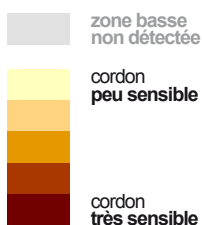
0 200 400 m



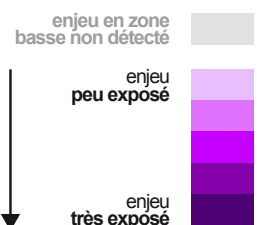




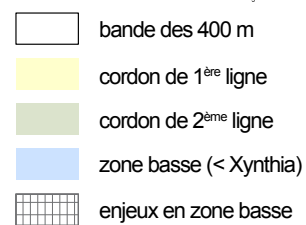
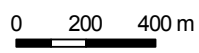
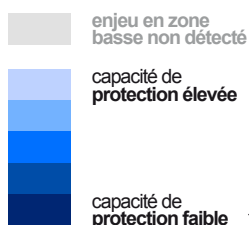
Niveau de sensibilité des cordons dunaires



Niveau d'exposition des enjeux bâtis et routes



Niveau de protection des cordons dunaires



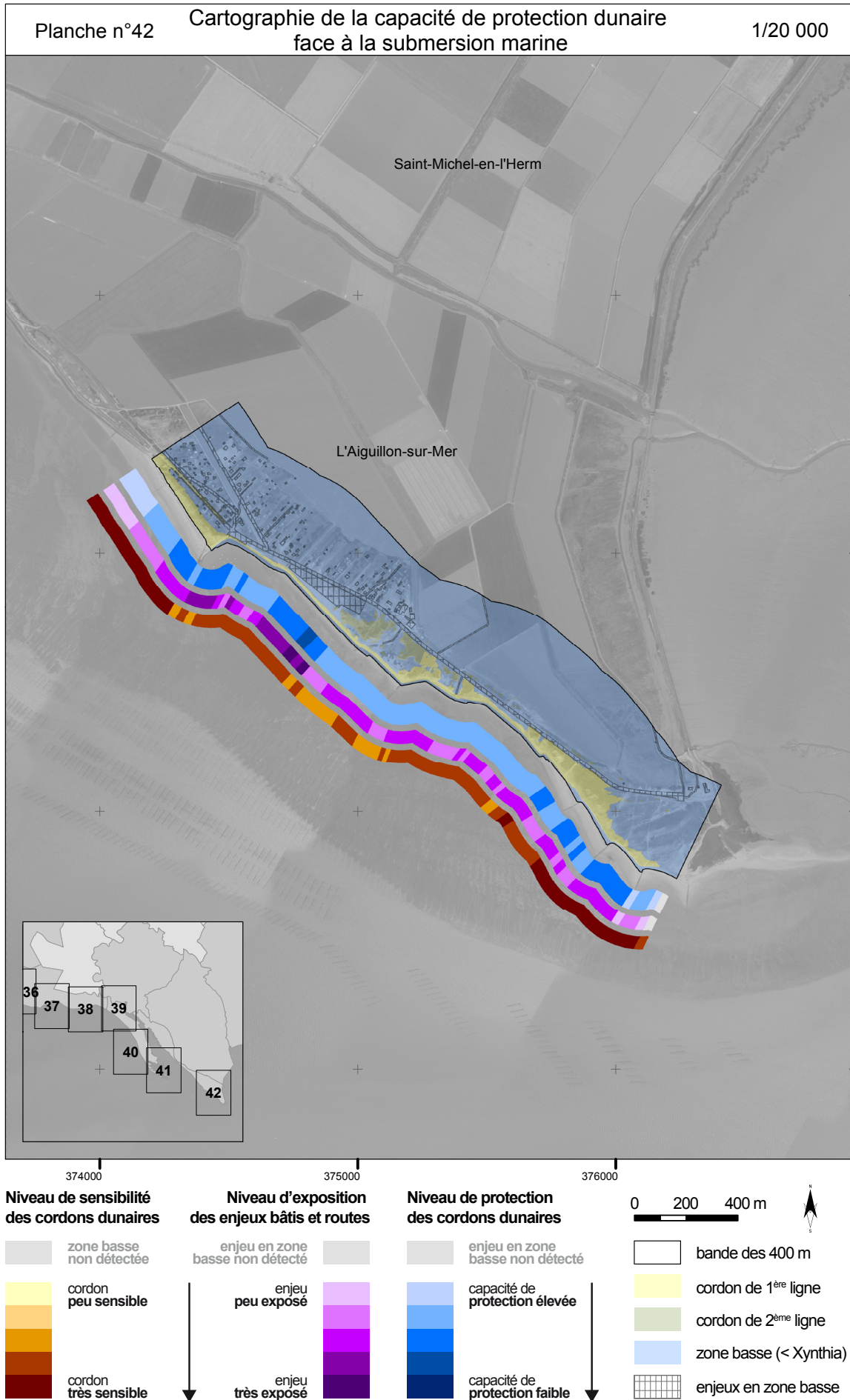




Table des figures

Chapitre 1 : Concepts et méthodes en analyse côtière

Figure 1 : A- recul du trait de côte et B- submersion par franchissement de paquets de mer à la Pointe du Devin, Ile de Noirmoutier (Vendée), le 01 février 2014 (coefficient de marée 114).....	p.24
Figure 2 : Témoignage du phénomène de migration dunaire sur un extrait de la carte de Claude Masse dressée en 1705 (carte du 5e quarré de la carte générale des côtes du Bas-Poitou « Carte des marais de Mons ou vulgairement apellé le pays des Marainchins ») - secteur de Saint-Jean-de-Monts (Vendée).	p.25
Figure 3 : Structure et dynamique des systèmes plage-dune (Florent Taureau dans Roche et al., 2015)	p.27
Figure 4 : Localisation des cordons littoraux et flèches sableuses de la région Pays de la Loire	p.29
(Bd Charm-50, BD TOPO, Litto 3D)	p.29
Figure 5 : Exemple de cordon dunaire jouant un rôle de protection face à la submersion marine. Une partie du camping (à droite) est située sous la cote de l'aléa de référence (02 février 2014, La Pège, Saint-Hilaire-de-Riez, Vendée).....	p.31
Figure 6 : Localisation des observatoires régionaux du trait de côte pour le littoral français métropolitain. Source : Kerguillec et Robin (2017), d'après Suanez et al. (2012).....	p.35
Figure 7 : Segmentation par carroyage	p.50
Figure 8 : Segmentation par transect	p.51
Figure 9 : Segmentation par région	p.52
Figure 10 : Segmentation par boîte	p.53
Figure 11 : Aptitude des unités spatiales à intégrer et mettre en relation les entités spatiales.	p.55
Figure 12 : Discrimination par l'échelle d'observation entre l'approche par région et l'approche par boîte (d'après Robin et Debaine, modifié).	p.57

Chapitre 2 : Approche par transects pour l'analyse de la mobilité du trait de côte

Figure 1 : Localisation de la zone d'étude et contexte géomorphologique (C1, C2, C3 : cellules sédimentaires d'après Pinot, 1980 ; Geos-Dhi, 2008)	p.69
Figure 2 : Forçages météo-marins - A. Vitesse et direction du vent (FXI) ; B. Marnage de vive-eau et de morte-eau ; C. Période et hauteur de la houle de juillet 2005 à juillet 2006	p.70
Figure 3 : Schéma méthodologique de l'analyse diachronique du trait de côte des Pays de Monts	p.72
Figure 4 : Séquence évolutive des faciès du contact plage-dune adaptée aux Pays de Monts (d'après Favennec, 2002, modifié).....	p.73
Figure 5 : Identification in situ du trait de côte (flèche rouge) et transposition aux images aériennes.....	p.76
Figure 6 : Cartographie de l'aléa érosion côtière des Pays de Monts sur le long-terme (11 à 891 : numéro de transect créé avec le DSAS ; à gauche, représentation graphique des taux d'évolution, en rouge, et de la marge d'erreur, en bleu).....	p.80
Figure 7 : Représentation tabulaire des résultats périodiques (EPR) : Segmentation du linéaire côtier en unités morphosédimentaires et discrétisation des taux d'évolution moyennés.....	p.82
Figure 8 : Mobilité du trait de côte des Pays de Monts à court terme : impact d'événements extrêmes (tempête Xynthia en 2010 et hiver 2013-2014) et période de cicatrisation du contact plage-dune (2010-2013).....	p.85
Figure 9 : Évolution du contact plage-dune devant l'hippodrome de Saint-Jean-de-Monts, plage du Pont d'Yeu (Source : OLPM).....	p.86
Figure 10 : Degré de cicatrisation faible du contact plage-dune et érosion du cordon de 1 ^{ère} ligne à côté du poste de secours de la plage du Mûrier. L'ouvrage a été retiré après l'hiver 2013-2014 (Source : OLPM, Jean Magne). Notez l'emplacement du profil de dune sur le panneau nord du poste de secours.	p.87

Chapitre 3 : 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)

Figure 1 : Location map of the Pays de la Loire Region along the French Atlantic coast.....	p.102
Figure 2 : Creation of the boxes (30*100 m from the 2011 shoreline) along the rocky coasts, the sandy coasts and the coastal defenses (aerial images: Ortho Littorale V2 - Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie)	p.103
Figure 3 : General methodological chart.....	p.105
Figure 4 : Graphical representation of the shortest shoreline-building distance, the building footprint of the first row and the coastal erosion values along the coast of the Pays de la Loire Region.....	p.108
Figure 5 : Building exposure to shoreline retreat per municipality along the Pays de la Loire coast: the pie-charts present the linear (in m) of each degree of exposure identified and the proportional symbols (squares) illustrate the number of zones exposed per municipality.....	p.111
Figure 6 : Multiscalar chart compiling the exposure statistics at each administrative scale, from the municipalities ordered from north to south of the Region (on the left) to the Region (on the right). Pays de la Loire is an at-risk Region in France; more accurately, the Department of Vendée is more impacted than that of Loire-Atlantique; in the Vendée Department, the grouping of municipalities of the CC du Pays Né de la Mer is the most impacted; and within this grouping, the municipality of La Tranche-sur-Mer is the most impacted.	p.113
Figure 7 - left : Location and metrics of the exposure of the cooperative housing located in La plage des Mouettes, municipality of Saint-Hilaire-de-Riez (field photograph February 02, 2014).....	p.114
Figure 7 - right : Location and metrics of the exposure of the individual housing in La plage Clémenceau, municipality of La Tranche-sur-Mer (field photograph March 08, 2010).....	p.115

Chapitre 4 : Caractérisation de la capacité de protection des massifs dunaires de la région Pays de la Loire face au risque de submersion marine

Figure 1 : Localisation des massifs dunaires évalués en région Pays de la Loire. Pour chaque site, la cote de l'aléa de référence préconisée dans les Plans de Prévention des Risques Littoraux (ici la cote Xynthia) est donnée.....	p.128
Figure 2 : Schéma méthodologique présentant le raisonnement spatialisé développé pour évaluer la capacité de protection dunaire contre la submersion marine.	p.130
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 dunaire contre la submersion marine.....	p.132
Figure 4 : Synthèse régionale des huit indicateurs calculés ; 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.	p.137
Figure 5 : Synthèse des différents niveaux d'indices par massif dunaire (S1, S2, S3, SG, E1 et PG).....	p.138
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 1m ; précision z = ± 0,20 m) le long du massif dunaire des Pays de Monts (1060 boîtes). 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.	p.141
Figure 7 : Description par indicateur des niveaux de chaque indice ; S1 (sensibilité à la submersion du cordon de 1ère ligne), S2 (sensibilité à l'érosion côtière du cordon de 1ère ligne), S3 (sensibilité à la submersion de l'arrière-dune) et E1 (exposition des enjeux à la submersion).....	p.142

Conclusion générale

Figure 1 : Exemple de fiche d'identification d'un secteur dunaire sensible situé aux Moutiers-en-Retz.....p.152

Figure 2 : Captures écran de l'interface de l'outil de géotraitement développé par Florian Hélen dans le cadre du projet DiDUNEp.154



Table des tableaux

Chapitre 1 : Concepts et méthodes en analyse côtière

Tableau 1 : Typologie des observatoires de suivi du trait de côte (Source : Suanez et al., 2012).....	p.34
Tableau 2 : Liste non-exhaustive d'indicateurs environnementaux et sociétaux pour l'évaluation des risques côtiers.	p.41
Tableau 3 : Proposition de géoindicateurs communs pour les environnements côtiers sableux, extraits à partir de profils perpendiculaires à l'orientation de la côte (d'après Carapuço et al. 2016, modifié)	p.42
Tableau 4 : Inventaire non exhaustif d'indices composites.....	p.48

Chapitre 2 : Approche par transects pour l'analyse de la mobilité du trait de côte

Tableau 1 : Inventaire des images aériennes exploitées et spécification des antécédents météo-marins (tempêtes) de l'année précédant les clichés.....	p.74
Tableau 2 : Synthèse des erreurs sur les traits de côte digitalisés - A. Incertitude long-terme ; B. Incertitude périodique.....	p.78

Chapitre 3 : 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)

Table 1 : Presentation of the data used.....	p.104
Table 2 : Computation of the shoreline position errors and the total uncertainty.....	p.107
Table 3 : Descriptive statistics and normality tests of the geoinicator values recorded within the 162 boxes characterized by concomitance between the shoreline erosion and the building presence in the 100-m landward strip	p.110

Chapitre 4 : Caractérisation de la capacité de protection des massifs dunaires de la région Pays de la Loire face au risque de submersion marine

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.....	p.133
Tableau 2 : Matrice de corrélation (Pearson r) entre les indicateurs utilisés pour le diagnostic. Les corrélations affichées en gras ne sont statistiquement pas significatives (p -valeur $> 0,05$).....	p.134
Tableau 3 : Résumé statistique des indicateurs de sensibilité par massif dunaire.....	p.135



Table des matières

Remerciements	p.8
Liste des sigles	p.11
Introduction générale	p.15
Chapitre 1 Concepts et méthodes en analyse côtière	p.21
Introduction du chapitre 1	p.23
1. Introduction à l'observation du trait de côte.....	p.24
1.1 Définition des concepts relatifs aux risques côtiers	p.24
1.1.1 <i>Les aléas</i>	p.24
1.1.2 <i>Les enjeux</i>	p.24
1.1.3 <i>L'exposition des enjeux</i>	p.25
1.1.5 <i>Le concept de vulnérabilité</i>	p.26
1.1.6 <i>Le concept de risque</i>	p.26
1.2 Prise en compte des cordons dunaires dans l'évaluation des risques d'érosion et de submersion.....	p.27
1.2.1 <i>Définition des cordons dunaires</i>	p.27
1.2.2 <i>Les cordons dunaires en région Pays de la Loire</i>	p.28
1.2.3 <i>Affirmation et évaluation du rôle de protection des cordons dunaires</i>	p.30
1.3 Les observatoires du trait de côte	p.32
1.3.1 <i>Démarche nationale et objectifs</i>	p.32
1.3.2 <i>Inventaire des observatoires à échelle nationale</i>	p.33
1.3.3 <i>Les initiatives en région Pays de la Loire</i>	p.34
1.4 Apports de la géomatique pour l'observation du trait de côte	p.34
1.4.1 <i>La démarche géomatique</i>	p.34
1.4.2 <i>Positionnement de la thèse</i>	p.35
2. Indicateurs et indices d'évaluation des risques côtiers	p.36
2.1 Les indicateurs.....	p.36
2.1.1 <i>Éléments de définition des indicateurs</i>	p.36
2.1.2 <i>Illustration à partir d'éléments bibliographiques</i>	p.37
2.1.3 <i>Raisonnement spatial pour la construction d'indicateurs</i>	p.42
2.2 Exploitation des indicateurs pour l'évaluation des risques.....	p.43
2.2.1 <i>Approche fondée sur un ou plusieurs indicateurs simples</i>	p.43
2.2.2 <i>Approche fondée sur la combinaison de plusieurs indicateurs</i>	p.44
2.2.2.1 <i>Principe de création d'un indice synthétique</i>	p.44
2.2.2.2 <i>Exemples d'indices</i>	p.44
2.2.2.3 <i>Méthodes de création d'indice</i>	p.48

3. Les méthodes de segmentation pour la réalisation de synthèses spatiales.....	p.49
3.1 Synthèse spatiale (i) les approches classiques	p.50
3.1.1 Unité spatiale régulière : le carroyage (unité « zone »).....	p.50
3.1.2 Le transect (ou profil transversal).....	p.50
3.1.3 Unité spatiale irrégulière : la région (unité « objet zonal»)	p.51
3.2 Synthèse spatiale (ii) l'approche par boîte.....	p.53
3.3 Comparaison des méthodes de segmentation.....	p.54
3.3.1 Aptitude des méthodes de segmentation.....	p.54
3.3.2 Le critère discriminant de l'échelle (ou niveau) d'observation	p.56
Conclusion du chapitre 1	p.59
Chapitre 2 Approche par transects pour l'analyse de la mobilité du trait de côte	p.63
Introduction du chapitre 2.....	p.65
1. Cinématique d'un trait de côte sableux en Vendée entre 1920 et 2010	
- Méthode et analyse	p.67
Introduction.....	p.68
1.1 Présentation du site d'étude	p.68
1.1.1 Contexte géomorphologique.....	p.68
1.1.2 Exposition aux aléas météo-marins	p.69
1.1.3 Occupation et usage du sol.....	p.70
1.2 Matériel et méthode.....	p.71
1.2.1 Choix de la ligne de référence et définition des indicateurs.....	p.71
1.2.2 Digitalisation du contact plage-dune.....	p.74
1.2.2.1 Traitement des images aériennes.....	p.74
1.2.2.2 Spécifications météo-marines	p.75
1.2.2.3 Extraction du trait de côte	p.75
1.2.3.1 Création de la ligne de base et des transects.....	p.76
1.2.3.2 Statistiques	p.77
1.2.3.3 Estimation de la marge d'erreur.....	p.77
1.3 Résultats	p.78
1.3.1 Évolution morphologique historique	p.78
1.3.2 Évolution morphologique périodique.....	p.79
1.4 Conclusion et discussion	p.81
2. Exploitation de données terrain pour le suivi du trait de côte à court terme.....	p.84
2.1 Définition, acquisition et restitution du trait de côte de l'ONF	p.84
2.2 Analyse de la dynamique du trait de côte à court terme.....	p.84
2.3 Limites et préconisations pour l'analyse par transects	p.88
Conclusion du chapitre 2	p.89

Chapitre 3 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). p.93

Résumé français du chapitre 3.....	p.95
1. Introduction.....	p.100
2. Regional setting.....	p.101
3. Material and method	p.102
3.1 Creation of the spatial units.....	p.102
3.2 Coastal classification.....	p.103
3.3 Computation of the geoindicators for exposure assessment	p.104
3.3.1 <i>Shortest shoreline-building distance.....</i>	<i>p.104</i>
3.3.2 <i>Building footprint of the first row</i>	<i>p.104</i>
3.3.3 <i>Coastal erosion along sandy coasts.....</i>	<i>p.106</i>
3.4 Creation of the exposure index.....	p.107
4. Results	p.107
4.1 Building presence facing the shoreline in the 100-m strip	p.107
4.2 Long-term shoreline change	p.109
4.3 Exposure assessment	p.110
5. Discussion and conclusions	p.112
Acknowledgements	p.118

Chapitre 4 Caractérisation de la capacité de protection des massifs dunaires de la région Pays de la Loire face au risque de submersion marine..... p.121

Introduction	p.125
1. Le site d'étude : les massifs dunaires de la région Pays de la Loire	p.127
2. Principe de caractérisation de la capacité de protection dunaire contre la submersion marine	p.129
3. Méthodologie depuis l'extraction des variables jusqu'à la construction des indices multicritères	p.131
4. Résultats : spatialisation des indicateurs du risque et diagnostic de la capacité de protection des massifs dunaires.....	p.134
5. Discussion	p.140
6. Conclusion.....	p.144
Remerciements	p.145

Conclusion générale.....	p.147
1. Apports pour le développement de méthodes en analyse spatiale	p.148
2. Apports de nouvelles connaissances thématiques :.....	p.150
2.1 Connaissance sur l'évolution du trait de côte.....	p.150
2.2 Connaissance sur l'exposition du bâti à l'érosion côtière	p.150
2.3 Connaissance sur la capacité de protection des cordons dunaires face à la submersion marine.....	p.151
3. Incertitudes liées à la méthode	p.152
4. Une démarche opérationnelle en appui à la gestion des espaces côtiers.....	p.153
5. Perspectives : vers le développement d'un outil de géotraitement et l'intégration de nouveaux indicateurs.....	p.155
Bibliographie	p.157
Annexe cartographique.....	p.173

Thèse de Doctorat

Martin JUIGNER

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)

Geomatic and shoreline monitoring -
Contribution to coastal hazards study along coastal dunes of the Pays de la Loire Region
(France)

Résumé

Suite à la succession de tempêtes morphogènes survenues dans la dernière décennie, une prise de conscience aiguë émerge concernant le rôle que peuvent jouer les cordons dunaires face aux aléas côtiers, relançant l'idée que certains cordons sont assimilés à des systèmes naturels de défense devant faire l'objet d'une surveillance. La capacité de protection dunaire est donc replacée au cœur de la vision sociale du rôle joué par ces milieux dans les zones à forts enjeux humain et non humains. Il manque cependant une dimension « outil opérationnel » pour un diagnostic efficace que ce travail de thèse propose de combler. Les méthodes d'analyse spatiale couramment utilisées sur le littoral présentant différentes contraintes, l'objectif est de développer et mettre en application une démarche géomatique reproductible permettant d'évaluer (i) la sensibilité des systèmes dunaires et (ii) l'exposition des enjeux non-humains face aux aléas d'érosion et de submersion. L'intégration et l'agrégation d'indicateurs synthétiques au sein d'unités d'observation (ou boîtes) de 25*400 m déployées le long de la côte permettent de réaliser un diagnostic multiscalair des littoraux dunaires. Dans une optique de caractérisation fine des territoires à risque, les secteurs urbanisés exposés à un recul historique du trait de côte ont été identifiés, tout comme l'ensemble des systèmes dunaires présentant une capacité de protection faible face à la submersion. Résolument opérationnelle, cette démarche en voie d'automatisation est une contribution s'inscrivant dans les objectifs d'amélioration de la connaissance et d'aide à la décision des observatoires régionaux du trait de côte.

Mots clés

cordon dunaire ; géomatique ; submersion marine ; érosion du trait de côte ; indice de sensibilité ; indice d'exposition ; indicateur ; analyse spatiale

Abstract

Following last decade series of morphogenic storms, an acute awareness emerged on the role of coastal dunes against physical hazards. Some dune ridges may act as natural defense systems, and therefore must be monitored closely. Along the coastal zone, where strong human and non-human stakes coexist, the evaluation of the dune protection capability is crucial. This PhD proposes an answer to the lack of operational tool to propose fine diagnoses. Spatial analysis methods, which are commonly used in coastal studies, have constraints; the objective here is thus to develop and to apply a reproducible geomatic process to assess (i) the susceptibility of coastal dunes and (ii) the exposure of non-human stakes regarding coastal erosion and marine flooding. The integration and aggregation of synthetic indicators within 25*400 m observation units (or boxes) along the coast enables realizing multiscale diagnoses of coastal dunes. To better characterize the at-risk territories, the urban sections of the coast with historical shoreline recession are identified, as well as dune systems presenting a weak protection capability against flooding. Resolutely operational, this automated process is a strong contribution to the objectives of improving knowledge and making decision support of the regional coastline observatories.

Key Words

coastal dune; geomatic; marine flooding; shoreline erosion; susceptibility index; exposure index; indicator; spatial analysis