Document public

Observatoire du littoral des Pays de Monts

Synthèse 2012 des réalisations des partenaires scientifiques (IGARUN, ONF, BRGM)

BRGM/RP-62937-FR
Septembre 2013

Océan-Marais de Monts
COMMUNAUTÉ DE COMMUNES

UNIVERSITÉ DE NANTES

Igarun
Institut de Géographie et d'Aménagement Régional de l'Université de Nantes

Office National des Forêts

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Observatoire du littoral des Pays de Monts

Rapport d'avancement 2012

BRGM/RP-62937-FR

Septembre 2013

Étude réalisée dans le cadre des opérations (projets)
de Service public du BRGM 2012-OBS0704

C. Le Guern, M. Juigner, V. Baudouin, M. Robin, P. Fattal, C. Rollier, D. Marie, M. Maanan,
Avec la collaboration de **P. Conil, L. Gouguet, F. Debaine** et **F. Bouchet**

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : PALVADEAU Eric	Nom : CONIL Pierre
Date :	Date :
Signature :	Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique, l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Océan-Marais de Monts
COMMUNAUTÉ DE COMMUNES

UNIVERSITÉ DE NANTES

Carun
Institut de Géographie et d'Aménagement Régional de l'Université de Nantes

Office National des Forêts

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots-clés : littoral, Pays de Monts, Vendée, observatoire, SIG, base de données, suivi, sédimentologie, géomorphologie, bio-indicateurs, hydrogéologie, érosion, submersion littoral, trait de côte, dune, Vendée, France

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

C. Le Guern, M. Juigner, V. Baudouin, M. Robin, P. Fattal, C. Rollier, D. Marie, M. Maanan avec la collaboration de P. Conil , F. Debaine, L. Gouguet et F. Bouchet. (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., 35 ill., 3 ann..

© BRGM, 2013, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse des partenaires de l'Observatoire du littoral des Pays de Monts.

Synthèse

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.

La mise en place de cet observatoire passe par une étroite collaboration entre différents partenaires. D'une part la communauté de communes, qui participe via une contribution financière et technique (achat logiciels et données). D'autre part les partenaires scientifiques, représentés par l'Université de Nantes (IGARUN), l'Office National des Forêts (ONF) et le Bureau des Recherches Géologiques et Minières (BRGM), qui sont en charge de l'état des lieux, la structuration et la mise en forme des données ainsi que la compréhension des phénomènes.

La mise en place de l'observatoire s'est poursuivie en 2012. Au cours de cette troisième année de l'observatoire, les objectifs fixés dans le programme scientifique ont été globalement atteints. Ce rapport d'avancement synthétise les réalisations des partenaires scientifiques, qui ont compris :

- Des suivis réguliers de terrain (profils topographiques des plages, contact plage/dunes, espèces patrimoniales, hydrogéologie, …) ;
- Une poursuite de l'interprétation de données.

L'analyse approfondie de la dynamique du trait de côte a permis d'identifier les secteurs les plus sensibles à l'érosion. Le secteur de l'hippodrome apparaît ainsi en érosion chronique, ce qui est en cohérence avec le ressenti de la collectivité. Cette analyse a montré en outre que la tempête Xynthia a impacté significativement des zones stables ou en accrétion. Ceci montre l'importance de la dune comme structure de résistance face aux forçages météo-marins. En complément, cela permet de poser la question de la fragilité de zones où le cordon dunaire est étroit et peu élevé. C'est le cas en particulier de 2 zones situées sur la commune de Saint-Hilaire de Riez (au sud de l'observatoire), dont le secteur de La Pège. En cas d'effacement du cordon dunaire, la zone rétro-littorale du Pays de Monts, d'altitude basse, serait soumise à l'aléa submersion. Il est à noter que l'observatoire ne traite pas le cas des digues situées au nord du linéaire étudié, mais que celles-ci sont à surveiller.

Le long de l'observatoire, les dunes semblent pour le moment pouvoir jouer un rôle de barrière face aux aléas météo-marins compte-tenu de leur largeur et de leur hauteur. L'observation a même pu mettre en évidence une reconstruction de l'avant-dune après Xynthia. La durabilité des dunes face à l'évolution du climat reste toutefois à évaluer. Pour cela, l'évaluation des stocks sédimentaires sera utile (action parallèle à l'observatoire), de même que la modélisation de la géométrie des matériaux constituant la dune et son sous-bassement (intégrée aux actions envisagées dans la prochaine convention).

Une analyse plus approfondie des enjeux sera en outre nécessaire pour progresser dans l'appui à l'identification de solutions douces de gestion du littoral.

Sommaire

1. Introduction 9

2. Rappels sur l'observatoire.....11

2.1. CONTEXTE 11

2.2. OBJECTIFS 11

2.3. PARTENAIRES.....11

2.4. PLAN D'ACTIONS 12

3. Méthodologies mises en œuvre 15

3.1. SUIVIS REGULIERS : ACQUISITION DE DONNEES DE TERRAIN - ACTION 415

3.2. COMPREHENSION DES PHENOMENES - ACTION 5 16

4. Suivis réguliers et événementiels : Acquisition de données de terrain (action 4)17

4.1. PROFILS TOPOGRAPHIQUES DE PLAGE 17

4.2. CONTACT PLAGE/DUNE.....18

4.3. ESPECES PATRIMONIALES 19

4.4. HYDROGEOLOGIE 19

5. Compréhension des phénomènes (action 5).....23

5.1. POURQUOI LE TRAIT DE COTE RECULE PLUS VITE PAR ENDROITS ? ...23

5.2. Y A-T-IL PENURIE SEDIMENTAIRE ? 28

5.3. QUELLE SENSIBILITE AUX ALEAS METEO-MARINS (EROSION, SUBMERSION) ? 30

5.3.1. Court terme (1 an).....31
5.3.2. Moyen terme.....32
5.3.3. Long terme 33
5.3.4. Perspectives de changement climatique 34
5.3.5. Influence de la taille des grains 34

5.4. QUELLE CAPACITE DE LA DUNE A PROTEGER (ATOUTS, MENACES) ?..36

5.4.1. Morphologie des dunes.....36
5.4.2. Contacts plage-dune.....41
5.4.3. Approche géologique 42

5.5. QUELS RISQUES (ALEAS ET ENJEUX) ?.....48

5.5.1. Aléas (érosion, submersion) 48
5.5.2. Enjeux 58

6. Conclusion 61

7. Bibliographie 63

Liste des illustrations

Illustration 1 : Schématisation des actions engagées pour mettre en place l'observatoire du littoral des Pays de Monts 13

Illustration 2 : Localisation des profils de plage réalisés en mars et octobre 2012 18

Illustration 3 : Localisation du point d'eau équipé d'une sonde pressiométrique pour le suivi en continu des niveaux d'eau souterraines 20

Illustration 4 : Evolution des niveaux d'eau souterraines au niveau du point d'eau équipé d'une sonde pressiométrique et au niveau du puits d'un particulier communicant ses données (BRGM) 21

Illustration 5 : Méthodologie pour l'analyse diachronique du trait de côte des Pays de Monts (Juigner, 2012). 24

Illustration 6 : Analyse historique long terme de l'évolution du trait de côte des Pays de Monts à partir de photos aériennes (1920-2010)(Juigner, 2012)- littoral est découpé en transects de 20m de large numéroté de 1 à 901 25

Illustration 7 : Analyse historique moyen terme de l'évolution du trait de côte à partir de photos aériennes (1920-2010) (Juigner, 2012) 27

Illustration 8 : Zones d'incertitudes sur l'épaisseur des sédiments meubles en mer (BRGM, modifié d'après données de la carte géologique harmonisée du littoral des Pays de la Loire au 1/250 000, Thinon et al., 2013) 29

Illustration 9 : Transport théorique net de sédiments le long du littoral des Pays de Monts (DHI, 2008) 30

Illustration 10 : Evolution du contact plage-dune depuis la tempête Xynthia (IGARUN, ONF) ... 31

Illustration 11 : Evolution de la position du trait de côte liée à la cicatrisation de la dune après la tempête Xynhia (ONF) 32

Illustration 12 : Vitesse du vent et hauteur du niveau marin observés à l'Ile d'Yeu lors des événements météo-marins entre 1999 et 2010 (IGARUN) 33

Illustration 14 : Variation du diamètre médian des grains de sables en milieu de plage, du nord vers le sud du littoral des Pays de Monts. Comparatif 2010/2011 (Renault 2011, in Le Guern et al., 2012) 35

Illustration 15 : Morphologie des dunes sur le littoral des Pays de Monts (interprétation de Litto 3D 2011) zones dunaires étroites entourées en rouge (BRGM) – altitude en m NGF37

Illustration 16 : Volume de sable disponible au-dessus du niveau moyen de la mer (bande de 500 m de large) (IGARUN) 39

Illustration 17 : Zones basses en arrière immédiat du contact plage/dune (IGARUN) 40

Illustration 18 : Typologie du contact plage/dune (ONF) 41

Illustration 19 : Comparaison des trois campagnes de relevé du contact plage/dune: 42

Illustration 20 : Synthèse géologique à partir de la cartographie du littoral des Pays de la Loire au 1/250 000 (modifié d'après Thinon et al., 2013) 43

Illustration 21 : Coupe géologique au niveau de l'hippodrome (BRGM) 44

Illustration 22 : Propriétés des couches géologiques au droit de la dune (BRGM) 44

Illustration 23 : Ebauche de modélisation de la surface probable de la nappe à partir des données de piézométrie et d'affleurement d'eau (BRGM) 45

Illustration 24 : Ebauche de modélisation de l'altitude du toit du susbtratum (calcaire éocène principalement) à partir des données de sondage disponibles dans la Banque de Données du Sous-Sol (BRGM) 46

Illustration 25 : Ebauche de modélisation de l'altitude de la base des sables dunaires (BRGM) 47

Illustration 26 : Mise en perspective du relief dunaire des Pays de Monts face aux cotes extrêmes (Xynthia, GIEC) – NB : cette carte ne présume pas les zones submersibles (BRGM, IGARUN) 49

Illustration 27 : Mise en perspective du relief dunaire avec les côtes extrêmes (Xynthia, GIEC) au niveau de l'hippodrome (BRGM, IGARUN) 50

Illustration 28 : Exemple de secteur sensible à l'intrusion marine du fait d'une faible largeur de la dune (BRGM, IGARUN) 50

Illustration 30 : Comparaison des reculs du trait de côte annuels calculés à partir des jeux de photos aériennes (Juigner, 2012) 52

Illustration 31 : Représentation de la section érodée considérée dans les calculs de volume de sable exporté lors d'une tempête en fonction des configurations possibles du front dunaire avant tempête (profils stabilisés ou en accrétion schématisés ici). 53

Illustration 32 : Hauteurs moyennes des falaises vives dunaires post-Xynthia estimées à partir des données disponibles (contact plage-dune, profils de plage, photos de terrain) (BRGM) 55

Illustration 33 : Evolution historique et prospective du trait de côte (1920-2020) au niveau de l'hippodrome des Pays de Monts (Juigner, 2012) 57

Illustration 34 : Synthèse de l'occupation des sols à l'échelle de la parcelle cadastrale (modifié d'après Coquin, 2011 in Le Guern et al., 2012) (BRGM) 59

Illustration 35 : Zones d'occupation des sols (hors zones de loisirs) situées dans des zones de relief situées sous les surcotes extrêmes – NB : cette carte ne présume pas les zones submersibles (BRGM) 60

Liste des tableaux

Tableau 1 - Liste des actions engagées pour mettre en place et faire vivre l'observatoire du littoral des Pays de Monts. 12

Tableau 2 : Liste des relevés réalisés en 2012 dans le cadre de l'action 4 – Acquisition de données de terrain - Suivi régulier, fréquence associée et acteurs 15

Tableau 3 : Evaluation des volumes de sables dunaires érodés (à partir des sections impactées par la tempête Xynthia intégrant les hauteurs moyennes des falaises dunaires) et des surfaces impactées (BRGM) – Comparaison aux taux d'évolution annuels sur le long terme calculés par Juigner (2012) 56

Liste des annexes

Annexe 1 Publication dans la revue Dynamiques Environnementales 65

Annexe 2 Détermination de la hauteur de falaise vive moyenne à partir des jeux de données disponibles 89

Annexe 3 Quelles solutions techniques et/ou stratégiques ? 93

1. Introduction

Dans un contexte général d'érosion littorale (1/4 côtes françaises métropolitaines, IFEN 2007), en corrélation avec l'attractivité toujours plus importante des zones côtières, les collectivités cherchent désormais à prendre en compte le risque dans leur politique de développement territorial. Cela passe tout d'abord par une connaissance approfondie des forçages naturels pouvant affecter le milieu et de leurs conséquences, afin de prévoir et de prendre en compte les tendances d'évolution du trait de côte.

Cette connaissance approfondie s'avère nécessaire pour ne pas reproduire les erreurs encore trop fréquentes de gestion du littoral. Ainsi, faute d'une compréhension des interactions et d'une vision suffisamment globale du littoral, les solutions de gestion mise en œuvre dans le passé (épis, enrochement…), et encore récemment, reportent souvent les problèmes d'érosion sur le territoire voisin. Elles peuvent ainsi aggraver le problème global d'érosion. Il apparaît ainsi nécessaire de comprendre le présent, pour anticiper le futur.

Les problèmes d'érosion devraient par ailleurs se renforcer sous l'effet du changement climatique. Il est en effet présagé à l'horizon 2100 une élévation du niveau des mers et une augmentation de la fréquence et de la force des tempêtes. L'ONERC retient des scénarios d'élévation du niveau des mers compris entre 0,4 à 0,6 m, avec un extrême à 1 m (ONERC, 2010). Du fait du changement climatique, les risques liés à l'érosion et à la submersion marine devraient ainsi croître.

Face à ces problèmes (érosion, submersion marine), il est important de gérer au mieux le territoire. Dans ce cadre, l'approche géosystémique a été préconisée intégrant le territoire, ses enjeux et ses acteurs.

Dans un contexte d'émergence des problématiques environnementales et du concept de Développement Durable au cours des années 1990, la planification en zones côtières s'est avérée plus complexe qu'ailleurs. En effet, « la multiplicité des usages, conjuguée à la fragilité des composantes environnementales peut entraîner des situations critiques dont la résolution implique des mesures concrètes de gestion » (Gourmelon et Robin, 2005). C'est ainsi que le concept de Gestion Intégrée des Zones Côtières (GIZC) a vu le jour. Il consiste à rechercher un certain équilibre dans les priorités d'action, en adoptant une approche de l'espace plus dynamique et intégrée.

Face à un constat de recul d'une partie de son trait de côte et au manque 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, constituera un véritable outil d'aide à la gestion prévisionnelle du trait de côte.

La mise en place de cet observatoire passe par une étroite collaboration entre différents partenaires. D'une part, la communauté de communes, assure la maîtrise d'ouvrage, et participe via une contribution financière et technique (achat logiciels et données). D'autre part les partenaires scientifiques et techniques, représentés par l'Université de Nantes (IGARUN), l'Office National des Forêts (ONF) et le BRGM, sont en charge de l'état des lieux, de la structuration et de la mise en forme des données ainsi que de la compréhension des phénomènes.

Le présent rapport retrace la troisième année de vie de l'observatoire, avec les actions menées durant 2012, ainsi que le début de la quatrième année (1er semestre 2013).

2. Rappels sur l'observatoire

2.1. Contexte

La Communauté de Communes Océan – Marais de Monts a la compétence territoriale pour œuvrer dans la gestion du littoral. Ayant constaté un recul rapide du trait de côte ces dernières années en lien avec une érosion marine, elle a décidé la mise en place d'un observatoire sur la totalité de sa frange littorale, soit 19,5 km. Cette structure vise, par une meilleure connaissance des phénomènes d'évolution et des tendances, à instaurer un véritable outil d'aide à la décision.

La démarche Observatoire du Littoral, telle qu'engagée depuis 2010 par la Communauté de Communes Océan - Marais de Monts apparaît comme exemplaire dans ce domaine et s'inscrit pleinement dans la « Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte » élaborée en 2012 par le Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie.

2.2. Objectifs

Les objectifs généraux de l'observatoire sont les suivants :

- Elaborer un outil permettant une meilleure connaissance des phénomènes et des interactions sur le littoral ;
- Construire un élément d'aide à la gestion prévisionnelle de la côte de la Communauté de Communes Océan – Marais de Monts, notamment dans le cadre de l'entretien des ouvrages hydrauliques (digues de la Barre de Monts…), dunes ;
- Etablir un point régulier de la qualité écologique (faune et flore) des milieux côtiers ;
- Suivre le littoral en établissant des préconisations en matière d'aménagement et d'entretien ;
- Identifier l'observatoire comme interlocuteur privilégié pour la problématique littorale sur ce territoire ;
- Valider et affiner les études globales.

2.3. Partenaires

La collectivité s'est associée à des partenaires scientifiques et techniques : Université de Nantes (IGARUN), ONF, BRGM. L'ONF et le BRGM bénéficient déjà d'une expérience commune d'observatoire (Aquitaine). L'Université de Nantes est quant à elle impliquée dans des projets de recherche et dans la formation d'étudiants sur la cartographie des espaces à forte contrainte, et la gestion du littoral (actions sur les Sables d'Olonne notamment).

Ces partenaires s'avèrent très complémentaires. L'ONF est spécialiste de la gestion des dunes et de la biodiversité. L'Université de Nantes dispose de compétences en géographie physique et humaine, ainsi qu'en cartographie. Le BRGM apporte ses compétences en sédimentologie, hydrogéologie, bases de données, morphodynamique (analyse des processus et modélisation), analyse des aléas et des risques naturels et cartographie.

2.4. Plan d'actions

Pour mettre en place et faire vivre l'observatoire dans le temps, un ensemble d'actions ont été envisagées, certaines réalisées directement par la Communauté de Commune (tel l'achat de licences, nécessaires pour disposer de certaines données), d'autres par les partenaires scientifiques.

L'état des lieux, la structuration et la mise en forme des données, la compréhension des phénomènes (cf. Illustration 1) sont ainsi à la charge des partenaires scientifiques, également à disposition pour des actions ponctuelles de conseil et d'expertise. Le plan d'actions a été décliné en 7 actions, dont l'échéancier prévisionnel est détaillé dans le Tableau 1.

En particulier, les tâches réalisées entre avril 2012 et juin 2013 concernent les actions 4 et 5.

N° Action	Titre Action	Année de réalisation proposée
1	Etat des connaissances	2010
2	Structuration et mise en forme des données	2010-2011
3	Etat zéro : acquisition des données	2010
4	Suivis : acquisition des données	2011 et suivantes
5	Compréhension des phénomènes	2011 et suivantes
6	Conseil et expertise	2010 et suivantes
7	Vie de l'observatoire	2010 et suivantes

Tableau 1 - Liste des actions engagées pour mettre en place et faire vivre l'observatoire du littoral des Pays de Monts.

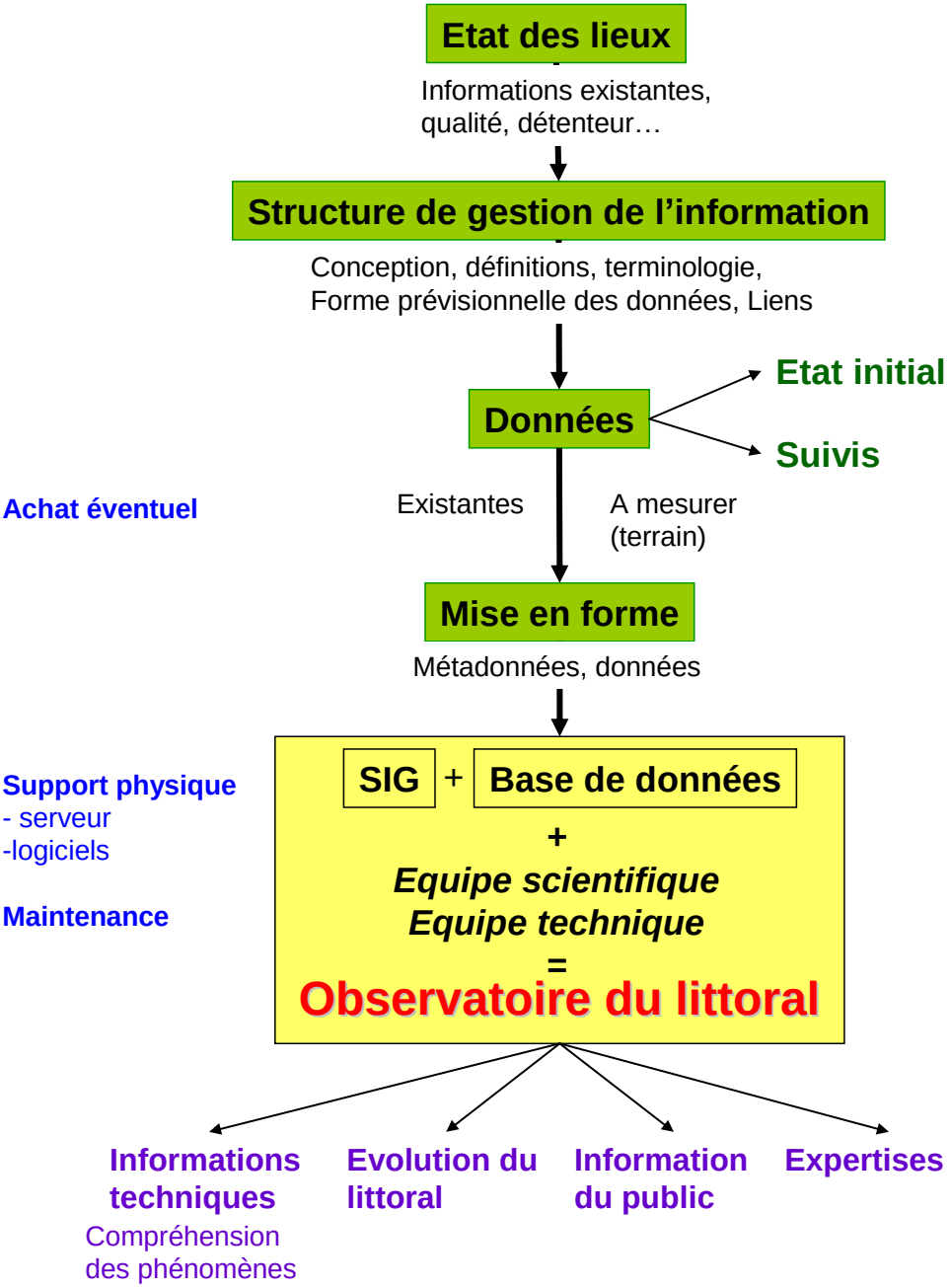


Illustration 1 : Schématisation des actions engagées pour mettre en place l'observatoire du littoral des Pays de Monts

3. Méthodologies mises en œuvre

Comme évoqué au chapitre précédent, la mise en place de l'observatoire s'organise autour de plusieurs actions. Les méthodologies correspondant aux principales actions réalisées en 2012 sont détaillées ci-après.

3.1. Suivis réguliers : acquisition de données de terrain - Action 4

Les données de terrain acquises dans le cadre de l'action 4 représentent des suivis réguliers et font suite à l'état initial engagé en 2010 (action 3). Le recueil périodique et événementiel de données nécessaires au fonctionnement de l'observatoire et à la délivrance d'une expertise régulière et actualisée prévoit :

- des mesures annuelles de certaines formes de la plage et du cordon dunaire indiquant les évolutions lentes du système et permettant de définir les états d'équilibre des plages et des tendances évolutives,
- un suivi périodique des espèces et communautés végétales à caractère indicateur de la dynamique littorale,
- des mesures occasionnelles des faciès de plage et de front dunaire suite aux événements brutaux qui ont un effet majeur sur l'évolution morphologique de ces milieux,
- un suivi des eaux souterraines (nappe de la dune).

Ainsi, les profils de plage ont été reconduits aux mêmes endroits qu'en 2011. Le contact plage/dune et différents bio-indicateurs ont été relevés. En outre, l'évolution de la végétation des dunes et des cordons dunaires a été regardée. Enfin, un suivi du niveau de la nappe de la dune a été mené. La répartition des tâches par partenaire scientifique est détaillée dans le Tableau 2.

Type de relevé	Thème	Fréquence	Période	Acteur
Formes	Contact plage/dune* * événementiel	2 fois /an En tant que de besoin	Avril et septembre Après tempêtes hivernales	ONF
	Topographie des plages (profils)	2 fois /an	Avril et septembre	IGARUN BRGM ONF
Biodiversité	Gravelot	1 fois /an	Juin	ONF
	Plantes patrimoniales *(Polygonum maritimum, Eryngium maritimum, Dianthus gallicus…)*		Juin	ONF, IGARUN
	Euphorbia Peplis		septembre	ONF
Autres relevés	Eaux souterraines (piézométrie)		Oct-fév.	BRGM

Tableau 2 : Liste des relevés réalisés en 2012 dans le cadre de l'action 4 – Acquisition de données de terrain - Suivi régulier, fréquence associée et acteurs

3.2. Compréhension des phénomènes - Action 5

La compréhension des phénomènes est nécessaire pour établir des diagnostics et aider à la gestion du territoire. Ainsi, les premières interprétations entamées en 2011 ont été complétées. Compte-tenu des attentes et besoins exprimés par les représentants de la Communauté de Communes, ces travaux ont tenté de répondre à différents questionnements listés ci-après :

a) Pourquoi le trait de côte recule plus vite par endroits (ex : hippodrome) ?
b) Y a-t-il une pénurie sédimentaire ?
c) Quelle sensibilité aux aléas météo-marins (érosion, submersion marine) ? Quelle sensibilité au changement climatique ?
d) Quelle capacité de la dune à protéger (atouts, menaces) ?
e) Quels risques : aléas et enjeux ?

Les questionnements visent à proposer des solutions techniques et/ou stratégiques.

4. Suivis réguliers et événementiels : Acquisition de données de terrain (action 4)

Les suivis réguliers et événementiels représentent l'action 4 définie dans la démarche de l'observatoire. Il s'agit d'acquérir des données complémentaires par rapport aux données existantes. Ces suivis, par comparaison avec l'état de référence (cf. Action 3) réalisé en 2010 (hors bathymétrie), serviront de base à la compréhension des phénomènes, nécessaire pour établir des diagnostics.

4.1. Profils topographiques de plage

En 2010, 19 profils topographiques de plage avaient été réalisés. Le positionnement s'était appuyé sur une segmentation préliminaire du littoral (à partir de l'étude DHI, 2008). La typologie des plages, des contacts plage-dune et les propriétés granulométriques des sables de plage déterminées courant 2010 avait conduit à ajouter 3 profils supplémentaires. Ces mêmes 22 profils ont été levés en 2012. L'ensemble des profils levés est présenté dans l'Illustration 2.

Les campagnes 2012 ont été réalisées du 7 au 9 mars et du 15 au 17 octobre 2012. Les moyens mis en œuvre sont les mêmes que ceux décrits dans la synthèse des réalisations 2010 (Le Guern *et al*., 2011).

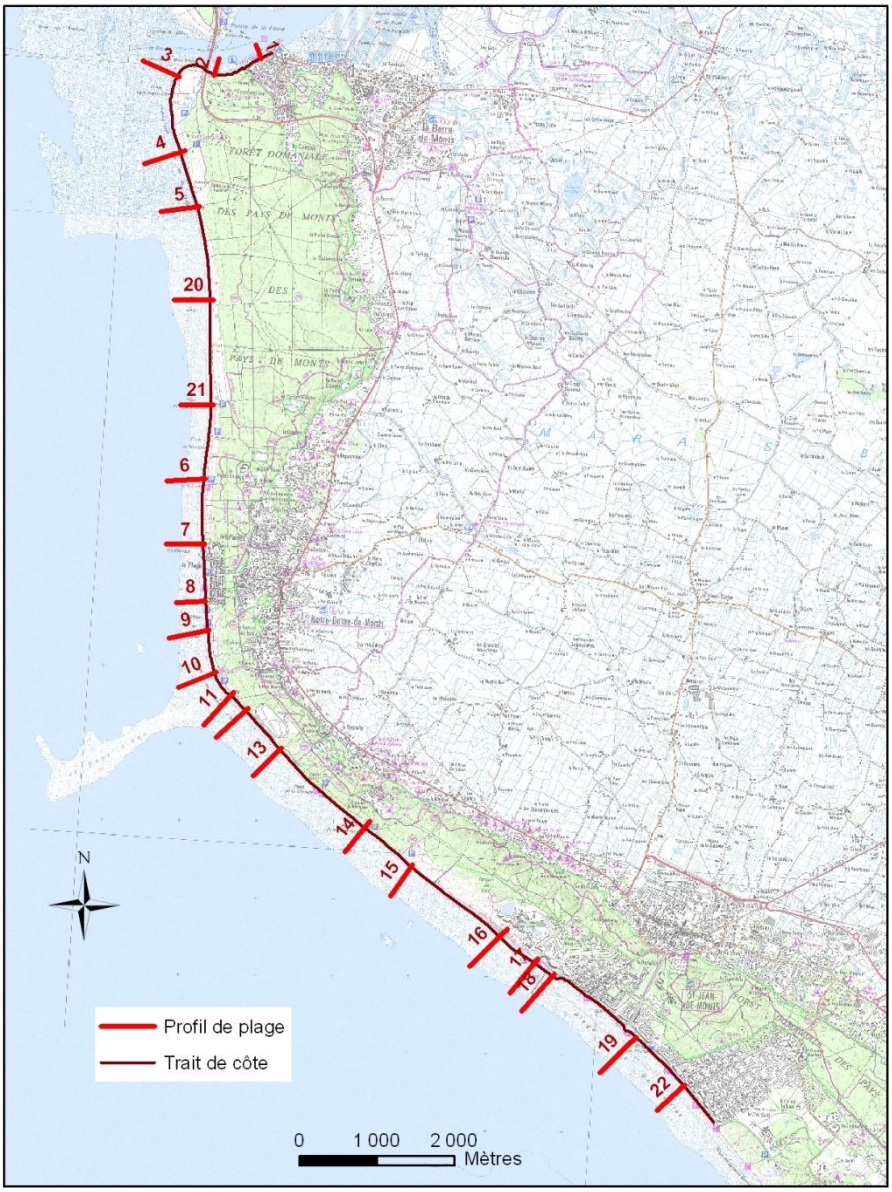


Illustration 2 : Localisation des profils de plage réalisés en mars et octobre 2012

4.2. Contact plage/dune

Les relevés de terrain relatifs au contact plage/dune ont été réalisés en avril et septembre 2012 selon les protocoles décrits dans le rapport de synthèse 2010 et utilisés également en 2011.

La régularisation constatée des profils (cf. typologie in Le Guern et al., 2011) indique une accrétion ou une stabilité du contact plage/dune, qui est occupé majoritairement par des banquettes à Agropyron.

4.3. Espèces patrimoniales

L'explosion de la population de Renouée maritime (*Polygonum maritimum*) observée en 2011 s'est essoufflée. Ce développement brutal qui semblait lié à la perturbation occasionnée par les évènements de 2011 s'est brutalement arrêté, les populations se sont retranchées dans leurs secteurs initiaux (au nord de la Grande Côte et les Lays).

Les populations d'espèces comme l'Œillet des dunes (*Dianthus hyssopifolius subsp. gallicus*) et le Panicaut de dunes (*Eryngium maritimum*) sont dans un état très favorable, leurs effectifs sont stables.

La linaire des sables (*Linaria arenaria*) est également stable.

Le lys de mer (*Pancratium maritimum*) semble en progression. On peut néanmoins s'interroger sur le devenir des pieds situés en position très exposée près de la banquette à Agropyron, susceptibles de disparaître au moindre événement météo-marin morphogène érosif.

Le suivi entamé en 2011 de l'Armoise de Loyd (*Artemisia campestris subsp. Loydii*) est abandonné, l'espèce étant très régulière et ne présentant pas d'enjeu patrimonial majeur.

4.4. Hydrogéologie

Les eaux souterraines présentes dans la dune jouent divers rôles : stabilité de la végétation dunaire, contribution à la biodiversité (cf. chaîne alimentaire, abris permis par la végétation, lien avec les mares et leurs écosystèmes, …), protection contre l'érosion marine et éolienne (cohésion du sable) ou à l'inverse participation à l'érosion du sable de plage (vidange de chenaux, perte de cohésion du sable en zone saturée).

L'étude de la nappe des dunes s'est poursuivie par l'équipement d'un piézomètre (Illustration 3) avec une sonde pressiométrique permettant de suivre en continu le niveau des eaux souterraines. Par ailleurs, la collecte des profondeurs d'eau dans un puits de particulier, mesurées chaque mois manuellement par son propriétaire, s'est poursuivie.

Les résultats de suivi (Illustration 4) indiquent une recharge régulière de la nappe en période hivernale et une décharge estivale. Le battement de la nappe est d'environ 80 cm pour les 2 ouvrages sur la période commune de suivi.

L'évolution des niveaux d'eau dans le puits du particulier sur les dix dernières années indique un régime annuel de la nappe. Le suivi horaire du puits de la Buzelière ne montre aucune influence de la marée. Ceci peut s'expliquer par l'éloignement relatif du puits par rapport au front de mer. La poursuite des suivis et la comparaison avec les pluies efficaces apporteraient des éléments complémentaires sur le fonctionnement de cette nappe libre.

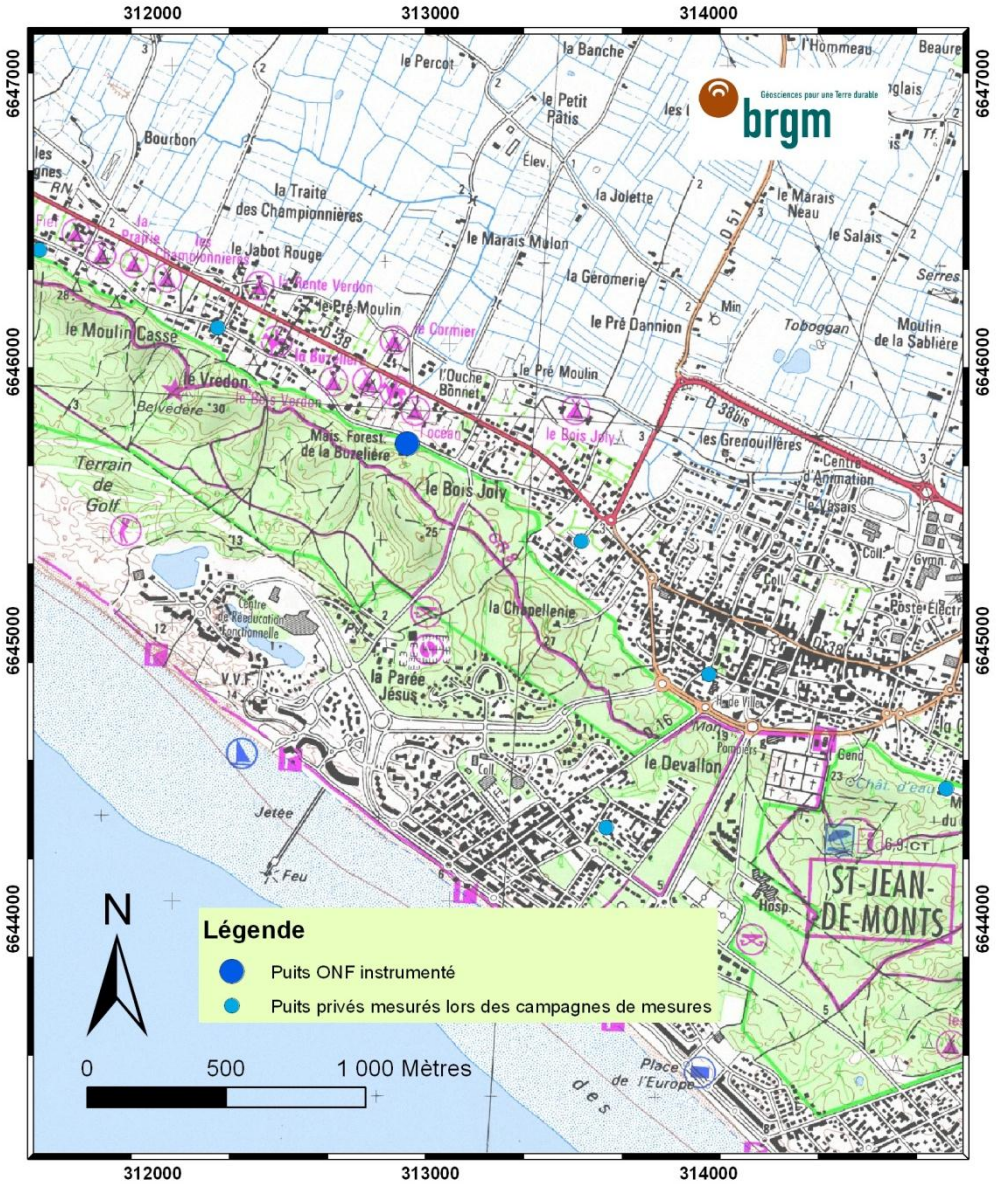


Illustration 3 : Localisation du point d'eau équipé d'une sonde pressiométrique pour le suivi en continu des niveaux d'eau souterraines

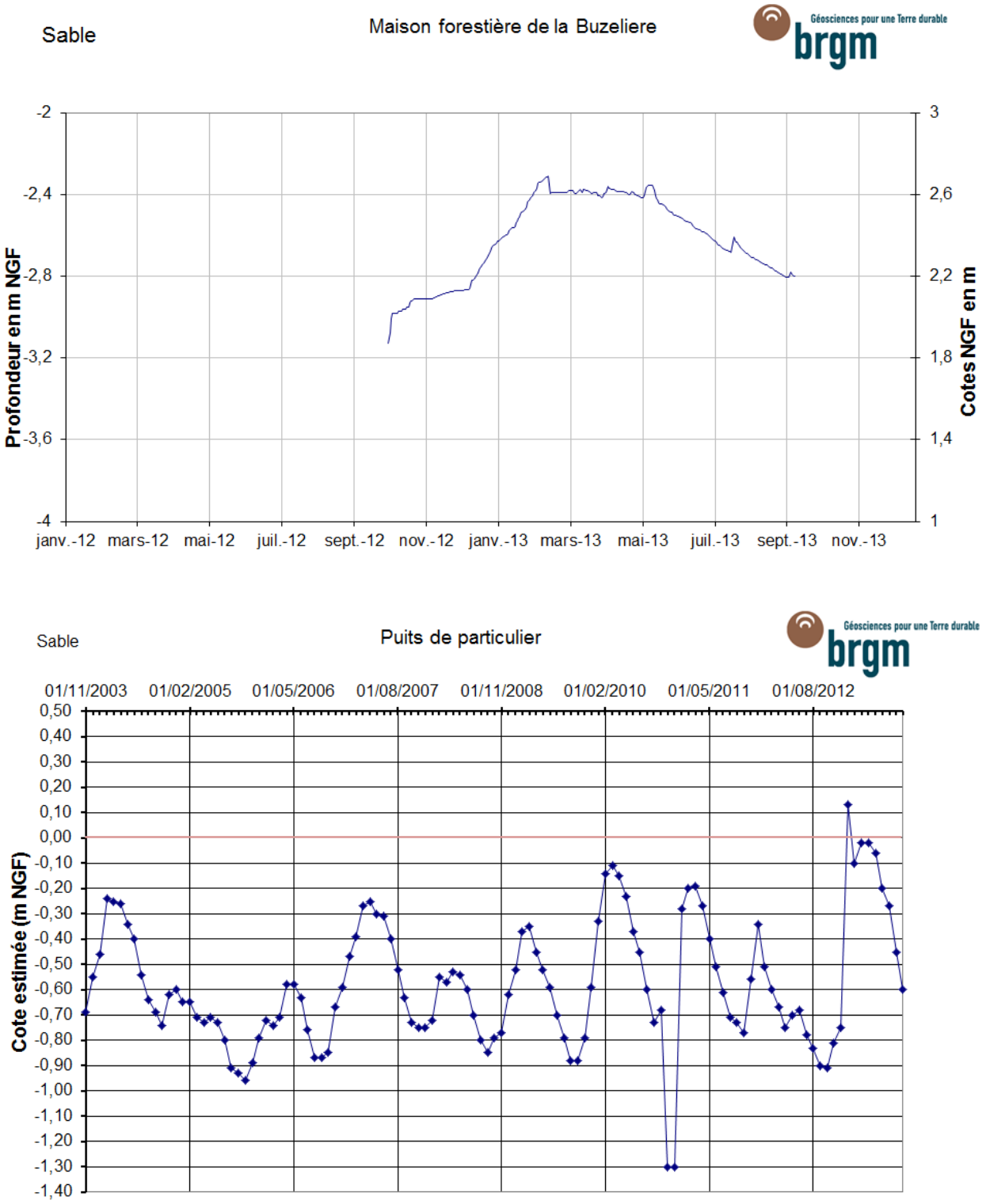


Illustration 4 : Evolution des niveaux d'eau souterraines au niveau du point d'eau équipé d'une sonde pressiométrique (en haut) et au niveau du puits d'un particulier communicant ses données (en bas) (BRGM)

5. Compréhension des phénomènes (action 5)

Dans le cadre de cette action, l'ébauche d'interprétation des données acquises initiée en 2011 a été poursuivie. Cette action, qui sera poursuivie au fur et à mesure de l'acquisition des données, vise à apporter des éléments de compréhension des phénomènes prépondérants dans l'évolution du trait de côte du secteur concerné. Cette compréhension des phénomènes est nécessaire pour établir des diagnostics et aider à la gestion du territoire. Les éléments ci-après sont proposés sur la base des connaissances disponibles.

5.1. Pourquoi le trait de côte recule plus vite par endroits ?

Pour répondre à cette question, il est important de comprendre la dynamique sédimentaire. Une comparaison du trait de côte à différentes périodes dans le temps avait été effectuée en 2011. Cette approche a été approfondie en 2012.

Plus particulièrement, une méthodologie dédiée a été développée sur la base des méthodologies existant au niveau international. Ce développement méthodologique (Illustration 5) a fait l'objet d'un article scientifique accepté par la revue Dynamiques Environnementales (parution prévue en 2014) présenté en Annexe 1.

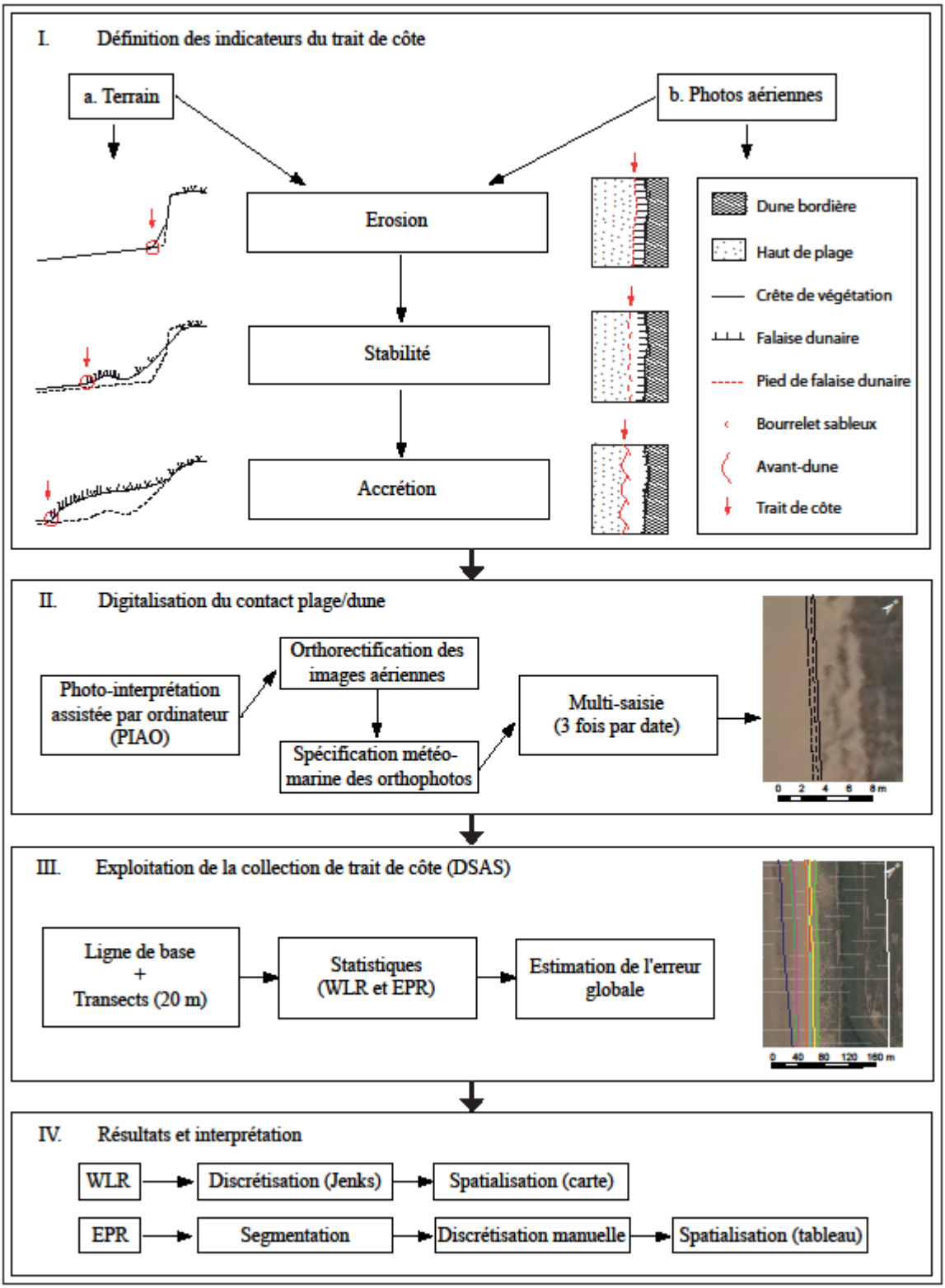


Illustration 5 : Méthodologie pour l'analyse diachronique du trait de côte des Pays de Monts (Juigner, 2012).

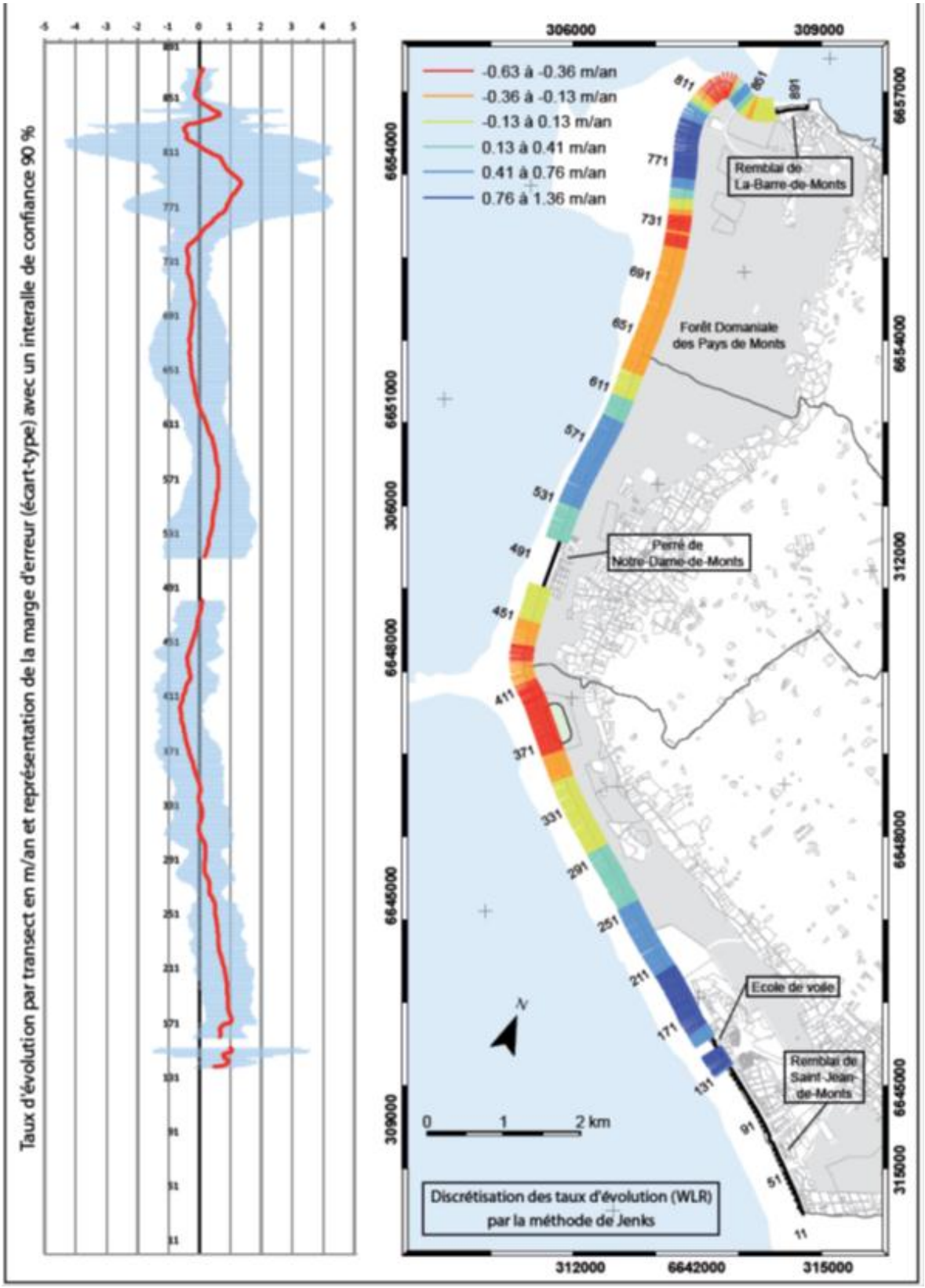


Illustration 6 : Analyse historique long terme de l'évolution du trait de côte des Pays de Monts à partir de photos aériennes (1920-2010)(Juigner, 2012)- littoral est découpé en transects de 20m de large numéroté de 1 à 901

L'analyse historique long terme (1920-2010), présentée dans l'Illustration 6, révèle que 26,4 % du littoral montois est en situation érosive depuis 90 ans. Les secteurs les plus touchés sont la plage du Pont d'Yeu (± transects 371 à 411), la plage du Mûrier (± transect 351), la jonction plage des Lays / plage de la Bergère (± 731) et la section Nord de la plage de la Grande Côte (± 811 à 831). Les taux d'érosion de ces tronçons varient de -0,36 m/an à -0,63 m/an, soit de - 2,4 m à -56,7 m, 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 (± transects 751 à 791), de la plage de la Braie à la plage de la Parée Grollier (± 511 à 611), sur la plage de la Parée du Jonc et devant le golf de Saint-Jean-de-Monts (± 131 à 291). Le taux d'accrétion maximal enregistré est de 1,36 m/an, soit 122,4 m 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 une moindre cohérence dans l'enchainement des zones. Une interprétation de cette dynamique peut conduire à penser que la forte accrétion relevée sur la plage de la Bergère (± 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 (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 (± 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 (± transects 511 à 611).

L'analyse de l'évolution du trait de côte à moyen terme (Illustration 7), indique que les principaux secteurs montrant de l'érosion sont le nord de la plage de la Grande Côte (± transect 315), la jonction entre la plage de la Bergère et la plage des Lays (± transect 331) et la plage du Pont d'Yeu (± transect 151). Les secteurs du Pont d'Yeu et du Nord des Lays 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. La période 2000-2010 se traduit par une amplification de l'érosion côtière, en linéaire touché mais aussi en intensité, lié notamment à l'impact de la tempête Xynthia. Des secteurs historiquement en accrétion (secteur du Pont de Noirmoutier et des plages de la Parée Grollier, du Bois Soret, de la Braie et de la Parée du Jonc) apparaissent en érosion sur cette période 2000-2010, une intensité croissante ou nouvelle étant constatée pour les plages de Fromentine, du sud de la Grande Côte, des Lays, du Mûrier et du sud de la Tonnelle.

Les résultats pour la dernière décennie (évolution court terme) révèlent que les plages de Fromentine, du Pont de Noirmoutier, du sud de la Bergère et de la Parée Grollier au Mûrier ont connu une érosion plus intense de 2006 à 2009 comparativement à la période 2001-2006 (Annexe 1). Simultanément, on constate également une forte diminution de l'accrétion pour les plages de la Grande Côte et de la Bergère. Les taux moyennés traduisent l'impact de la tempête Xynthia sur l'ensemble du front dunaire avec des valeurs moyennes de recul comprises entre -1,54 m et -1,78 m.

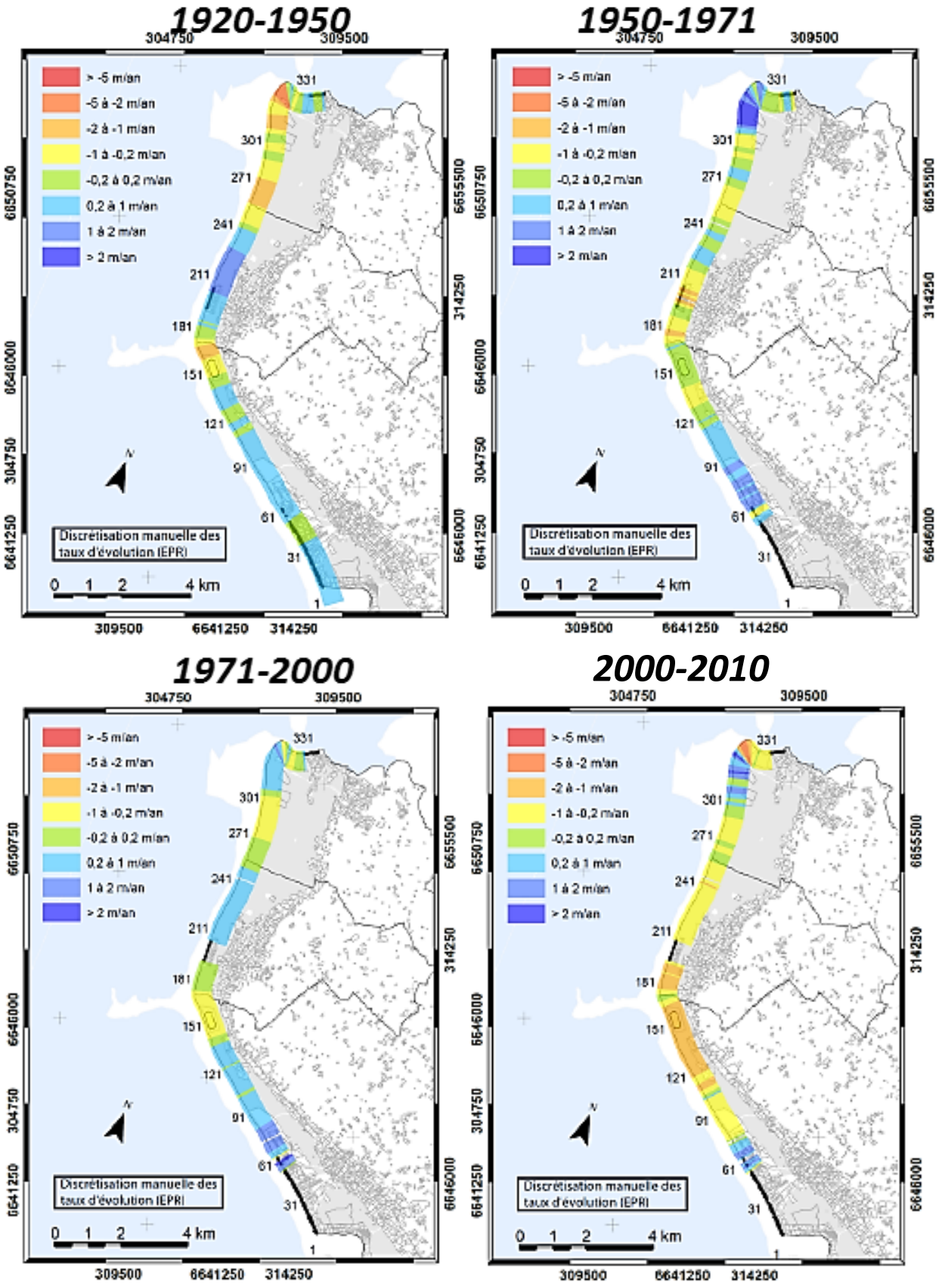


Illustration 7 : Analyse historique moyen terme de l'évolution du trait de côte à partir de photos aériennes (1920-2010) (Juigner, 2012)

L'analyse de la mobilité du pied de dune à moyen terme 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.

En dépit des scénarios du GIEC dont les prévisions laissent penser à une augmentation de l'érosion côtière, la tendance à l'intensification de l'érosion aux Pays de Monts depuis la seconde moitié des années 2000 doit être considérée avec prudence si on veut extrapoler ces tendances pour prédire l'évolution du trait de côte dans les années à venir.

5.2. Y a-t-il pénurie sedimentaire ?

Comme le montre l'Illustration 8, les connaissances actuelles sur les sédiments marins ne sont pas suffisantes pour répondre à cette question.

Toutefois, les levés sismiques, de bathymétrie et de courantologie prévus en 2013 (IGARUN, en parallèle des conventions annuelles OLPM) devraient permettre de mieux appréhender le budget et la dynamique sédimentaire (stock de sédiments en place, transit…). Les résultats acquis pourront être confrontés à l'analyse de DHI réalisée à l'échelle de la Vendée (Illustration 9) et aux constats d'évolution du trait de côte présentés dans le chapitre précédent ;

Illustration 8 : Zones d'incertitudes sur l'épaisseur des sédiments meubles en mer (BRGM, modifié d'après données de la carte géologique harmonisée du littoral des Pays de la Loire au 1/250 000, Thinon et al., 2013)

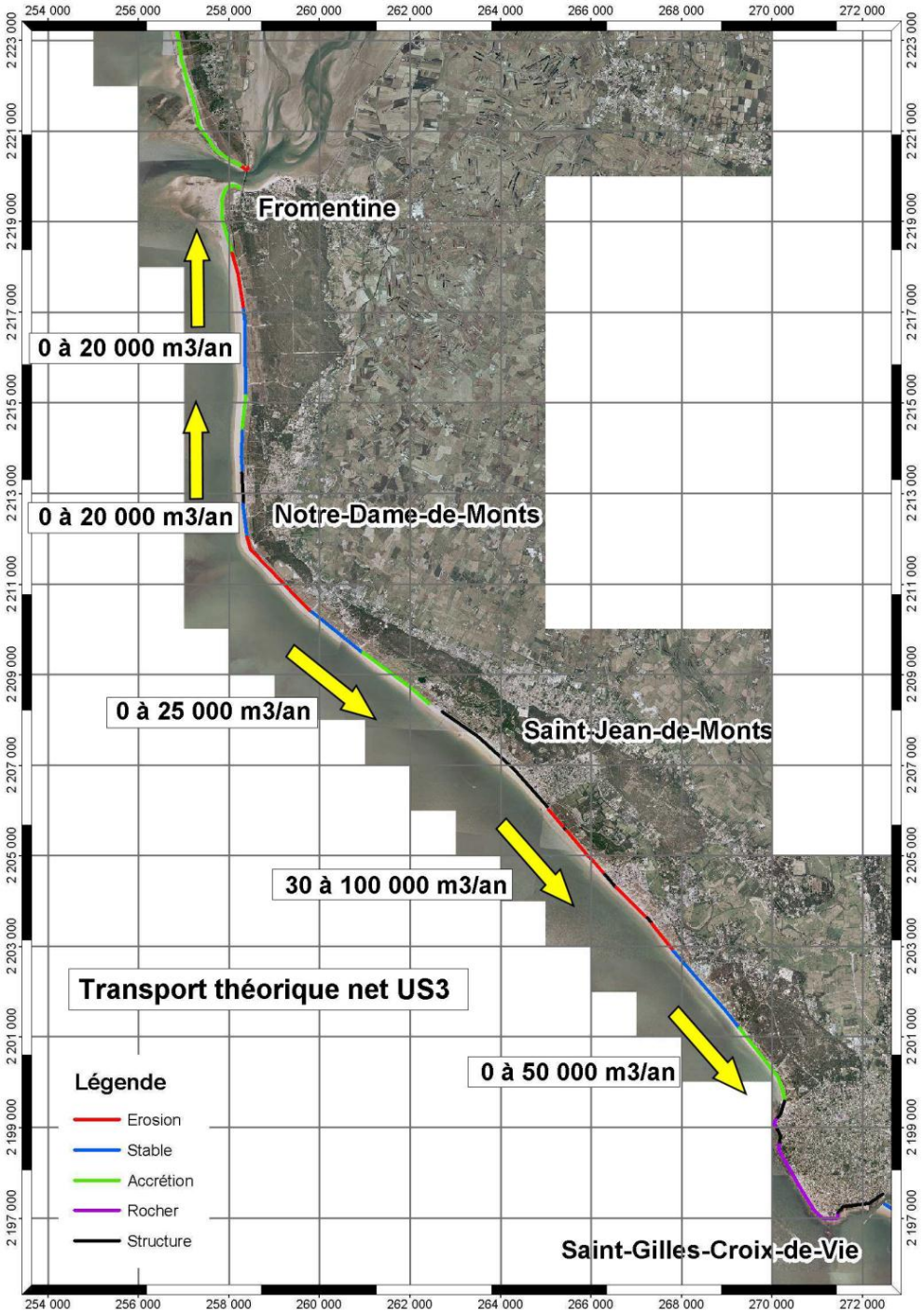


Illustration 9 : Transport théorique net de sédiments le long du littoral des Pays de Monts (DHI, 2008)

5.3. Quelle sensibilité aux aléas météo-marins (érosion, submersion) ?

Pour répondre à la question de la sensibilité du littoral des Pays de Monts aux aléas météo-marins, on s'est intéressé à différentes échelles de temps ainsi qu'aux perspectives liées au changement climatique.

5.3.1. Court terme (1 an)

Pour le court terme, la tempête Xynthia (2010) apporte un exemple de sensibilité aux aléas météo-marins. Lors de cette tempête, la dune des Pays de Monts a reculé jusqu'à 8 m par endroit. Toutefois, elle montre une certaine résilience. En effet, les falaises vives post-tempête ont généralement laissé place à un profil d'accrétion (Illustration 10 et Illustration 11).

Illustration 10 : Evolution du contact plage-dune depuis la tempête Xynthia (IGARUN, ONF)

Avec la cicatrisation du cordon, le pied de dune a avancé de plusieurs mètres (Illustration 11). On observe une évolution globale du contact plage-dune : les falaises vives sont progressivement adoucies puis devancées par une avant-dune embryonnaire, signe de la reconstruction du front dunaire. Le trait de côte retrouve ainsi pratiquement sa position d'origine dès l'année suivant la tempête (deux saisons de végétation) à condition que l'apport de sable éolien soit suffisant. Il se stabilise plus ou moins dans la mesure où les banquettes à Agropyron ne sont pas altérées par la surfréquentation touristique. A ce stade, la morphologie du cordon reste cependant très fortement modifiée, la topographie du nouveau cordon étant nettement plus basse par rapport à l'état initial.
Ces banquettes sont très sensibles au piétinement et seraient vite altérées dans les zones les plus fréquentées si des clôtures n'avaient pas été mises en place en pied de dune. On observe d'ailleurs le repli de la végétation s'aventurant au-delà du fil après la saison touristique.

Des questions restent en suspens pour mieux appréhender cette évolution à court terme. La résilience observée (tendance à la reconstitution de l'avant dune) est-elle liée à un étalement du front dunaire (sans renouvellement du stock de sable) ou à un apport de sable depuis le front marin (lié à un stock sédimentaire en mer) ?

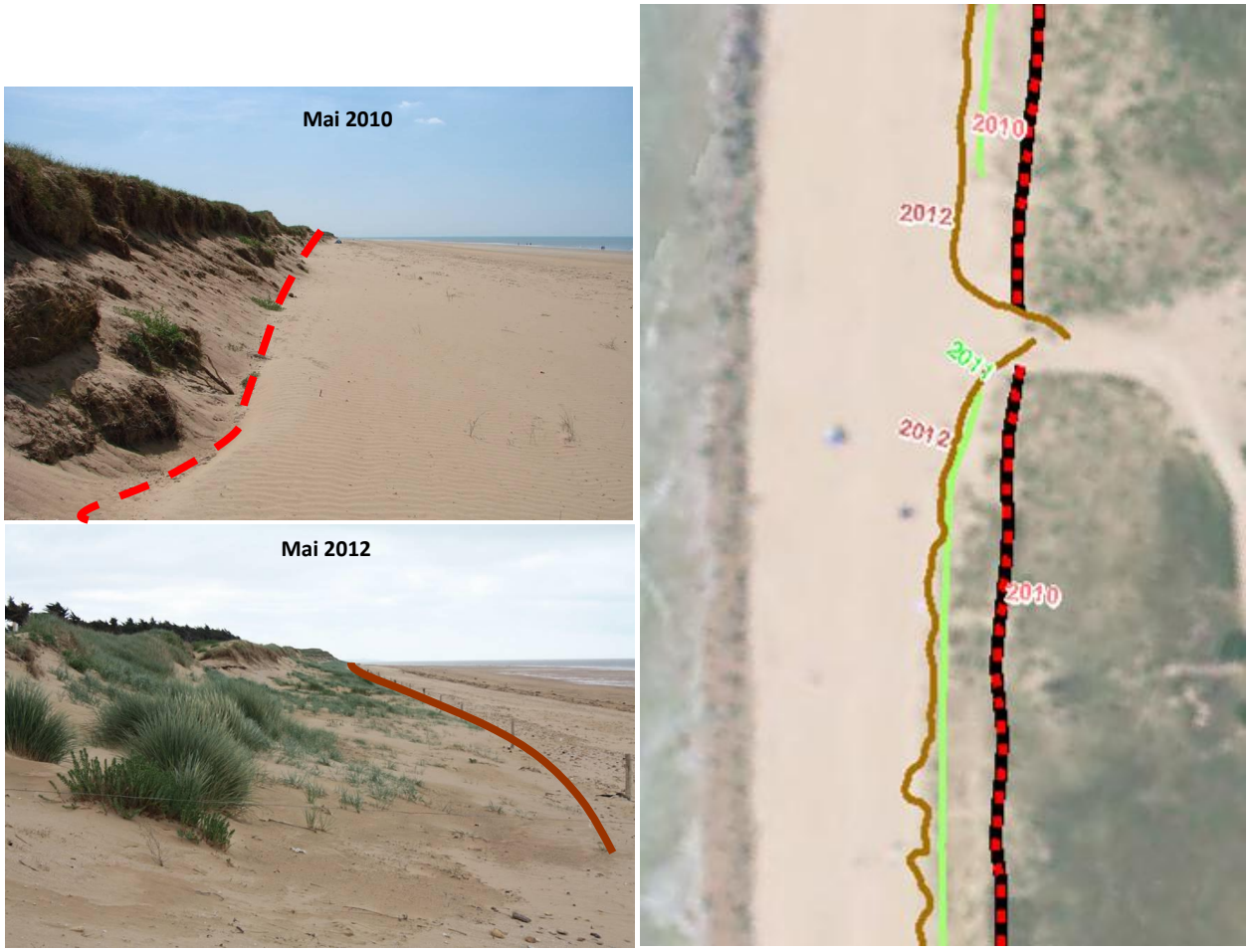


Illustration 11 : Evolution de la position du trait de côte liée à la cicatrisation de la dune après la tempête Xynhia (ONF)

5.3.2. Moyen terme

Pour initier un travail d'étude de la sensibilité du littoral aux évènements météo-marin, et en particulier évaluer la sensibilité à l'érosion à moyen terme (10 ans), des données de classification et d'évolution des tempêtes ont été utilisées. Les épisodes de forte énergie susceptibles d'impacter le contact plage/dune sont ici définis par des hauteurs de houle supérieures à 2 m, des hauteurs du plan d'eau supérieures à 4,70 m et des vitesses de vents supérieures à 40 km/h (11m/s). Les données de houle fournies par le CETMEF proviennent des bouées 08502, 08503, 08504 (Ile d'Yeu) et 04401 (St Nazaire) de la base CANDHIS. Les hauteurs du niveau marin sont issues du marégraphe des Sables d'Olonne et sont la propriété du SHOM et de la CCI Vendée (disponible sur le site refmar.shom.fr). Les vitesses de vent (FXI) ont été transmises par Météo France et proviennent de l'Ile de Noirmoutier et de l'Ile d'Yeu. L'Illustration 12 montre ainsi une analyse des événements météo-marins par année selon la vitesse du vent et la hauteur du niveau marin observées sur le secteur de l'Ile d'Yeu entre 1999 et 2010.

Si cette illustration ne montre pas de tendance claire sur les dix dernières années, on constate tout de même des nuances entre les années : 2005 ressort ainsi comme une année très calme et 1999 comme une année exceptionnelle au niveau du nombre d'événements avec des vents très forts.

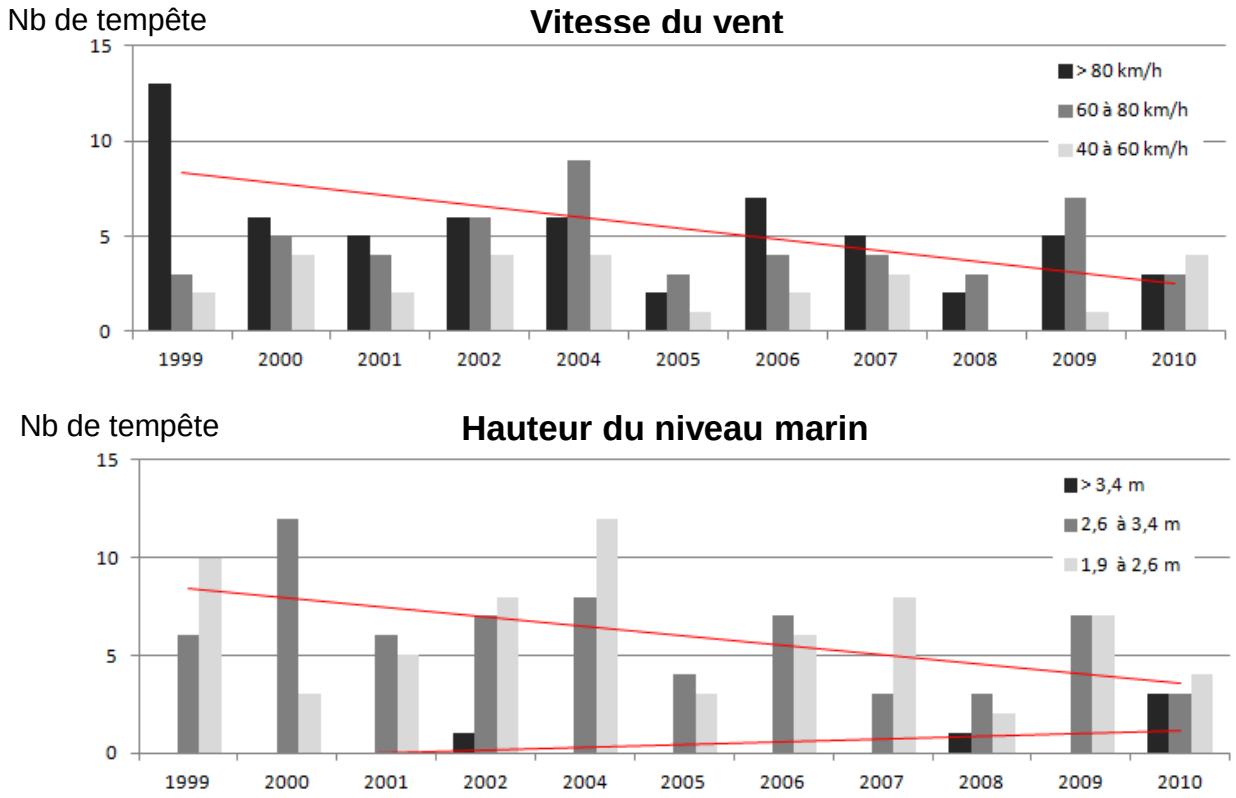


Illustration 12 : Vitesse du vent et hauteur du niveau marin observés à l'Ile d'Yeu lors des événements météo-marins entre 1999 et 2010 (IGARUN)

5.3.3. Long terme

Le nombre de jours de tempête et l'intensité des vents observés sur l'Ile d'Yeu entre 1960 et 2010 (Illustration 13) sont très contrastés en début de période. Ainsi, plus de 30 jours de tempêtes ont été enregistrés pour les années 1960, 1961, 1965, 1966, avec régulièrement des vents très forts. A l'inverse, aucun jour de tempête n'a été enregistré en 1962, et moins de 5 par an entre 1970 et 1974. En revanche, entre 1982 et 2010, le nombre de jours de tempête montre une certaine stabilité (environ 15 jours par an en moyenne), voire même une certaine décroissance pour les vents très forts.

Comme pour l'évolution sur le moyen terme, ces données restent difficiles à comparer aux évolutions du trait de côte et de la géomorphologie du littoral. Des essais de corrélation sont proposés dans le cadre de l'analyse diachronique du trait de côte (§ 5.1.1). Les observations de terrain (cf. § 4) devraient permettre à terme d'établir des liens entre les forçages météo-marins et les résultats de suivi.

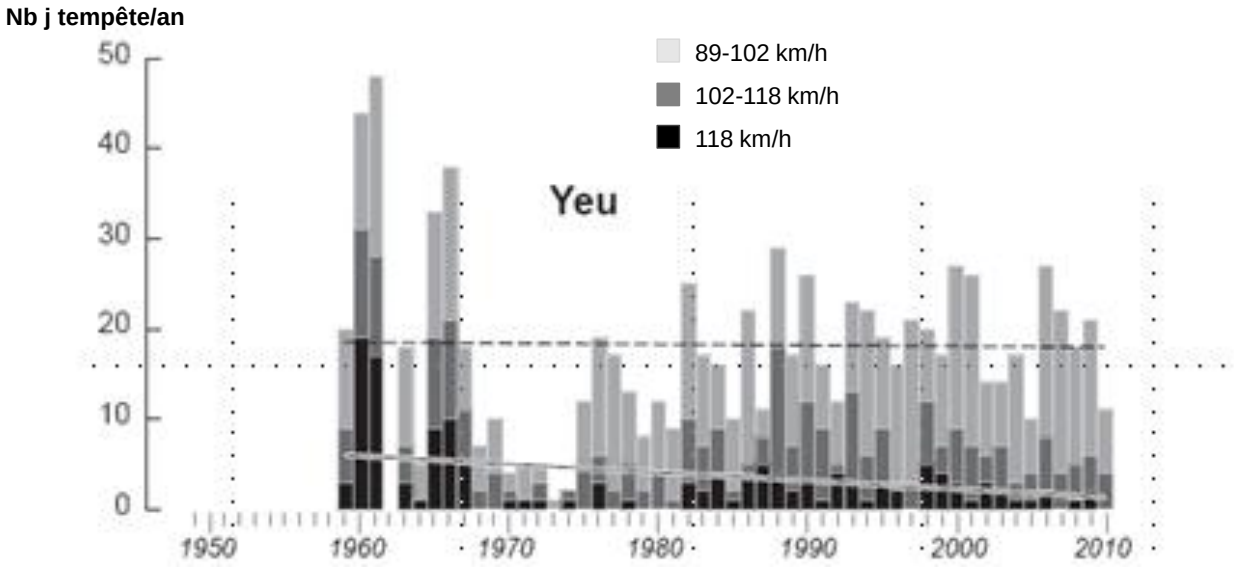


Illustration 13 : Inventaire des jours de tempête à l'Ile d'Yeu entre 1960 et 2010 et tendance d'évolution (Feuillet et al., 2012)

5.3.4. Perspectives de changement climatique

L'évolution générale attendue des aléas météo-marins sont une augmentation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes, combinée à l'élévation du niveau marin. Entre 1990 et 2006, la tendance observée d'élévation du niveau marin est de plus de 3 mm/an. A l'horizon 2100 (vs 2000), l'ONERC (2010) prédit une augmentation du niveau marin entre 40 cm et 60 cm, avec un extrême à 1 m. Ceci devrait augmenter la sensibilité du littoral aux aléas météo-marins (érosion, submersion marine).

5.3.5. Influence de la taille des grains

En fonction de leur taille, les matériaux constituant le système côtier peuvent être plus ou moins mobiles du fait des forçages météo-marins (courant, houle, vent, …). En particulier, les matériaux particulaires (sables notamment) sont mobiles et participent à la dynamique sédimentaire. Il est ainsi connu que les particules fines (limons par exemple) seront plus facilement mobilisables que les particules grossières (galets par exemple).

Il est alors intéressant de comparer la taille des grains de surface sur les plages aux analyses historiques de l'évolution du trait de côte.

D'après le suivi réalisé entre avril 2010 et avril 2011 (Illustration 14), le diamètre médian (d50) des sédiments au niveau de l'estran médian est compris entre 1,6 et 0,1 mm. Quatre secteurs distincts ressortent.

- De Fromentine à la colonie de vacances, les sables prélevés sont fins à moyens (diamètre moyen de 0,4 mm).

- Entre la plage des Lays et l'accès nord du Pont d'Yeu, les sédiments prélevés apparaissent fins à très fins avec une taille constante de l'ordre de 0,1 mm tout le long du linéaire côtier.

- Entre l'accès sud du Pont d'Yeu et la plage de la Parée du Jonc, les sédiments prélevés sur la plage sont moyens à grossiers avec un diamètre moyen de 0,5 mm.

- Entre la plage de la Davière et la plage des Demoiselles, des sédiments fins de l'ordre de 0,2 mm ont été prélevés.

La comparaison entre les premières analyses granulométriques et l'analyse historique de l'évolution du trait de côte ouvrent les hypothèses suivantes (IGARUN), qui restent à confirmer. Ainsi, la zone en accrétion au niveau de la plage de la Bergère, caractérisée par un sable d50>1 mm, est le reflet d'un secteur à forte énergie, en raison notamment de la proximité du goulet de Fromentine. La zone en érosion de la plage des Lays pourrait être le reflet d'un déficit d'apport en provenance de la plage de la Bergère, dû à des courants de dérives faibles qui n'auraient pas la capacité de transporter le matériel grossier. S'il était confirmé, ce modèle irait en contradiction avec le modèle de DHI.

Au Sud du Pont d'Yeu on retrouve le même schéma d'évolution des plages, avec une zone en érosion au nord (Pont d'Yeu et la plage de la Parée du Jonc) caractérisée par un sable grossier, et une zone légèrement stable dans le secteur de la plage de la Davière et la plage des Demoiselles, caractérisée par un sable fin à moyen. Les résultats seraient ici en parfaite adéquation avec les résultats de DHI.

Ces résultats granulométriques des sédiments de plages, trop fragmentaires, nécessiteraient un suivi plus approfondi pour mieux mettre en exergue la relation entre évolution du rivage et granulométrie des plages (Fletcher et *al.*, 2011, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia).

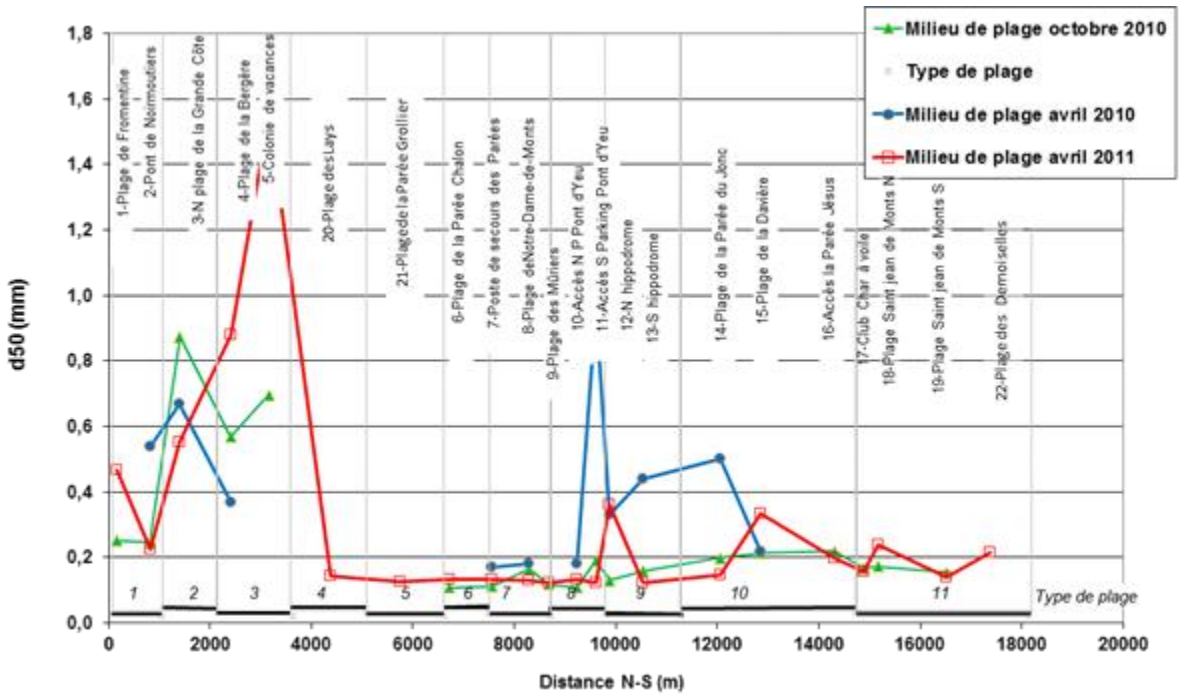


Illustration 14 : Variation du diamètre médian des grains de sables en milieu de plage, du nord vers le sud du littoral des Pays de Monts. Comparatif 2010/2011 (Renault 2011, in Le Guern et al., 2012)

5.4. Quelle capacité de la dune à protéger (atouts, menaces) ?

Pour répondre à cette question en utilisant les données disponibles, on s'est intéressé à la morphologie de la dune, au contact plage/dune et à la géologie de la dune. Les éléments correspondant sont détaillés ci-après.

5.4.1. Morphologie des dunes

Le **relief dunaire** (Illustration 15) a été dégagé par traitement des données de topographie acquises par Lidar (Litto 3D), mises à disposition via Geopal.

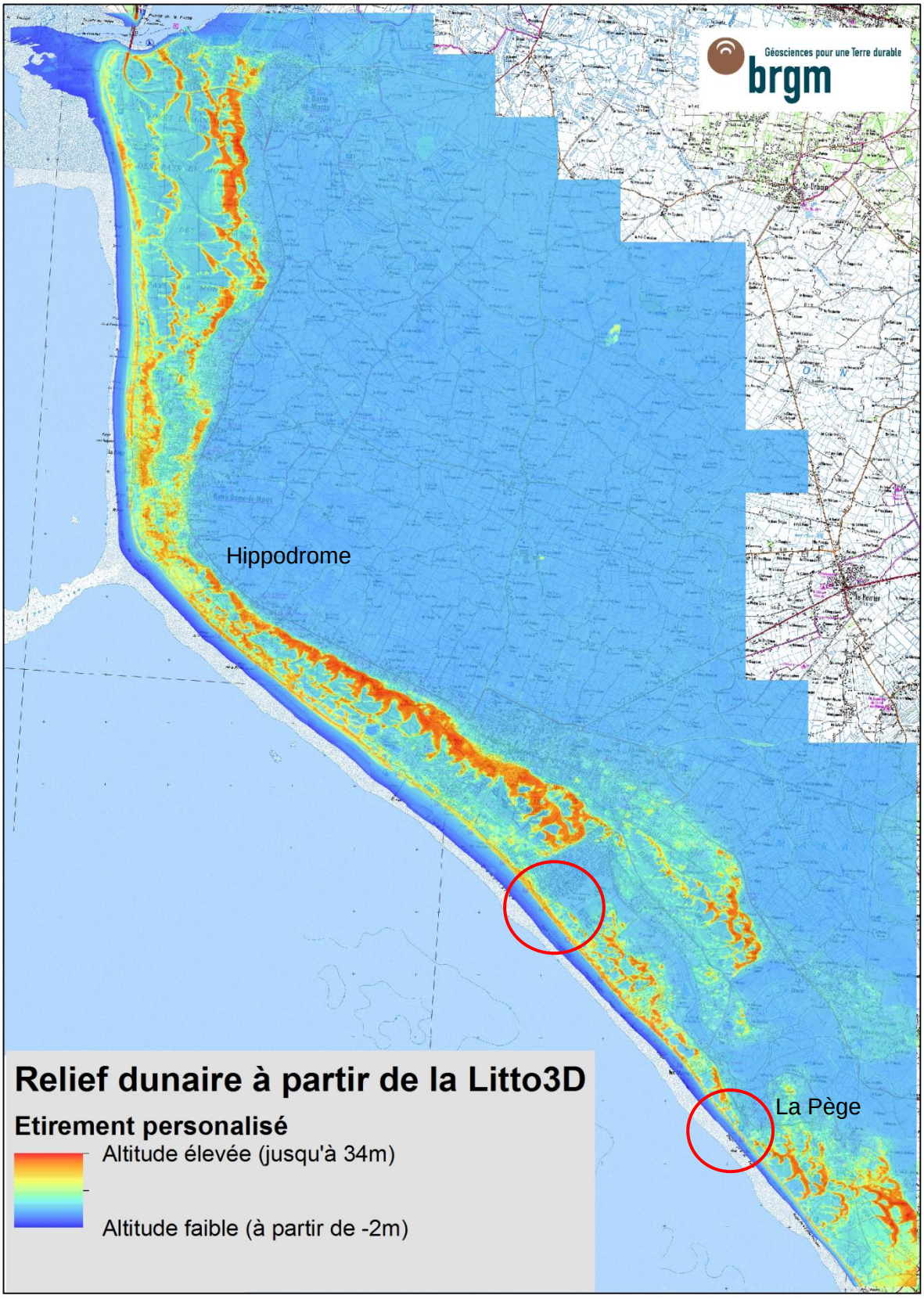


Illustration 15 : Morphologie des dunes sur le littoral des Pays de Monts (interprétation de Litto 3D 2011) zones dunaires étroites entourées en rouge (BRGM) – altitude en m NGF

L'analyse topographique montre la présence de plusieurs crêtes d'altitude significative sur une majeure partie du massif dunaire des Pays de Monts inscrit dans l'observatoire (environ 10 m d'altitude en moyenne sur le front de mer, plus de 20 m sur certains cordons situés plus vers l'intérieur du massif dunaire). Ceci présage une faible sensibilité à la submersion sur ce linéraire. L'analyse topographique montre aussi des zones de sensibilité à l'intrusion marine où la dune est très étroite et d'altitude modérée. C'est le cas notamment au niveau de secteur de la Pège qui correspond à l'ancien exutoire de la Baisse. Ce secteur, en dehors du périmètre de l'observatoire, mérite une attention particulière.

La caractérisation topographique de la dune est un préalable pour établir le diagnostic en regard des divers aléas météo-marins. L'Illustration 16 représente le volume de sable total de la dune au-dessus du zéro NGF calculé au sein de boites de 500 m (perpendiculairement à la côte) par 50 m de large, à partir des données LIDAR. Ce premier calcul ne prend pas en compte l'analyse géologique, et considère la présence de sables dunaires au-dessus du zéro NGF.

Depuis les boites où le volume de sable est réduit (75 000 m^3 de sable entre le zéro NGF et la surface dunaire, boites de couleur rouge) jusqu'aux secteurs où ce volume est important (plus de 270 000 m^3, boites de couleur bleu), cette représentation met en évidence les secteurs de front dunaire potentiellement fragile, du fait d'un volume sédimentaire plus faible. Pour compléter cette approche, un indicateur géomorphométrique des zones basses a été imaginé (Illustration 17). Il est calculé au sein de chaque boite à partir de la surface totale des secteurs déprimés ou en creux sur une bande rétrolittorale de 25 m par rapport au trait de côte géomorphologique relevé en 2012 (contact plage/dune). Ainsi en rouge apparaissent les boites avec d'importantes surfaces de secteurs relativement bas (jusqu'à plus de 250 m^2) alors que vers le bleu, la superficie des zones basses diminue jusqu'à disparaître. Cet indicateur, croisé avec un indicateur de l'élévation moyenne de ces secteurs relativement bas en regard des cotes Xynthia (4,2 m) ou GIEC (4,8 m) devient ainsi un indicateur des zones pouvant subir une submersion marine en cas d'érosion de la dune.

D'autres indicateurs sont en cours d'étude, l'idée étant d'arriver à compiler un indicateur synthétique simple et global capable de mettre en évidence l'affaiblissement des capacités protectrices des dunes contre les aléas météo-marins.

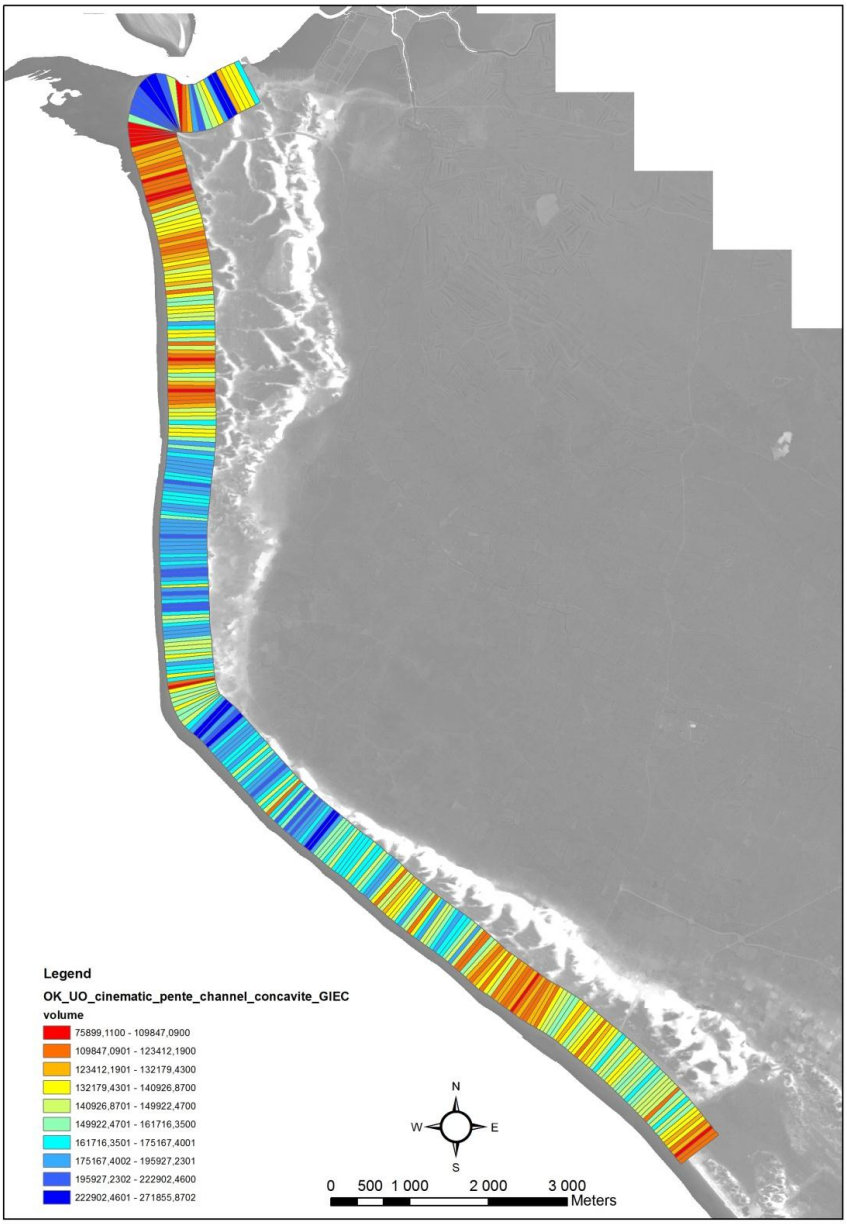


Illustration 16 : Volume de sable disponible au-dessus du niveau moyen de la mer (bande de 500 m de large) (IGARUN)

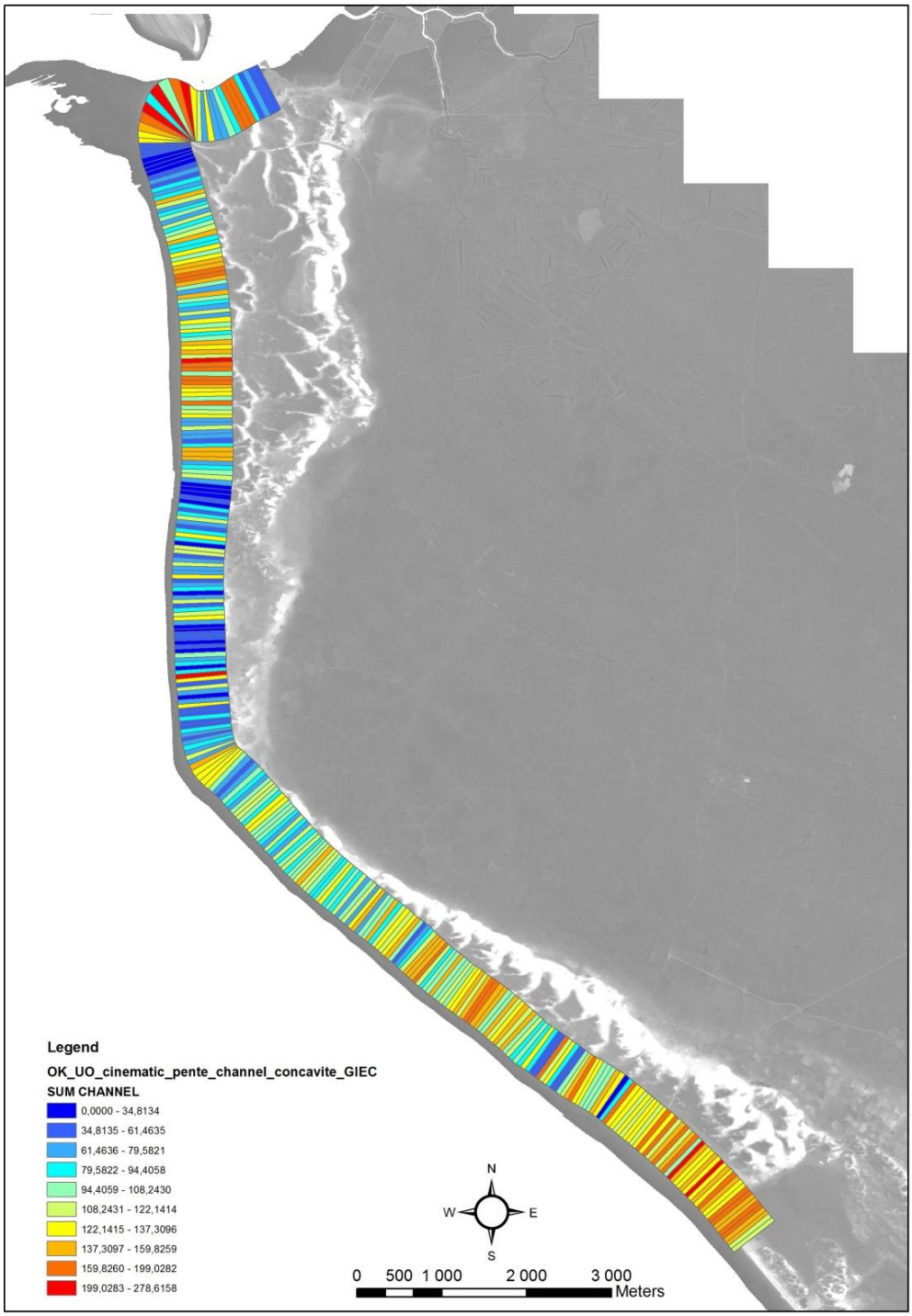


Illustration 17 : Zones basses en arrière immédiat du contact plage/dune (IGARUN)

5.4.2. Contacts plage-dune

La typologie employée pour la description du contact plage-dune est illustrée par le schéma suivant (illustration 17). Cette typologie, simple à mettre en œuvre, s'appuie sur la dynamique du cordon dunaire. On distingue ainsi des profils d'équilibre ou d'accrétion et à l'inverse des profils traduisant l'érosion. Les 6 types décrits marquent à la fois cette dynamique et replacent les étapes de l'évolution du contact plage-dune au moment où est faite la description.

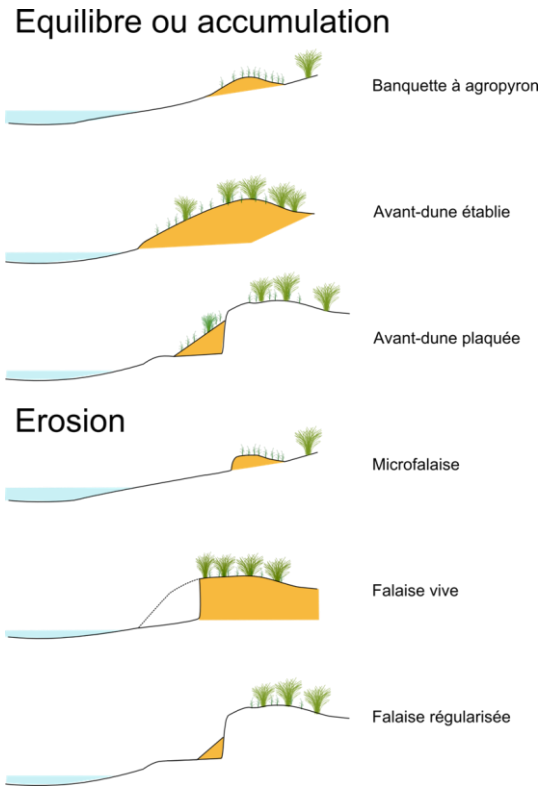


Illustration 18 : Typologie du contact plage/dune (ONF)

La comparaison des trois campagnes annuelles de relevé du contact plage/dune (2010, 2011, 2012) (Illustration 19) montre une résilience du système dunaire avec un repositionnement du trait de côte après l'érosion quasi-généralisée due à la tempête Xynthia. On observe sur le terrain une revégétalisation de la zone de contact plage/dune. Afin que cette végétation perdure et puisse piéger du sable, il est nécessaire de protéger cette zone.

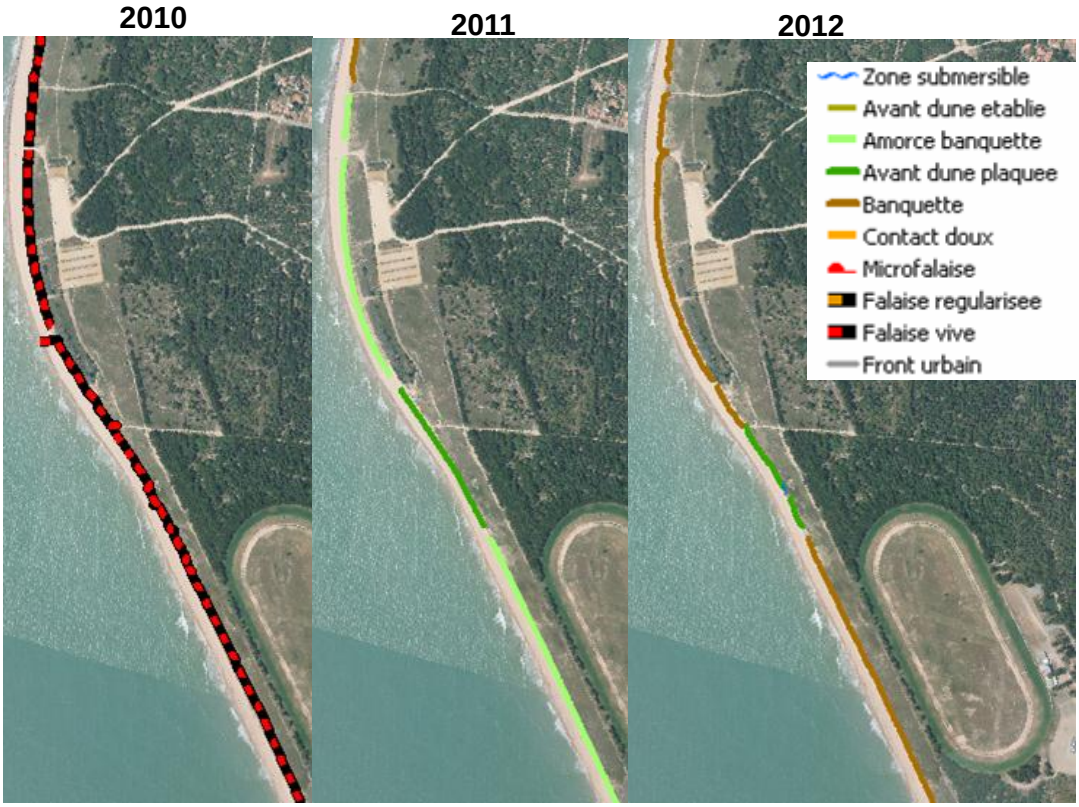


Illustration 19 : Comparaison des trois campagnes de relevé du contact plage/dune montrant la résilience du système dunaire et le repositionnement du trait de côte ; la revégétalisation de la zone de contact rend la protection de cette zone nécessaire (ONF)

5.4.3. Approche géologique

Les connaissances géologiques apportent également des éléments de compréhension du système dunaire, et de sa capacité à protéger la côte des aléas météo-marins.

Une première étape a consisté à synthétiser les données géologiques (Illustration 20) disponibles à terre et en mer (cartes géologiques et données de sondage renseignées dans la Banque de Données du Sous-sol (BSS). Des coupes géologiques ont également été réalisées. L'Illustration 21 présente ainsi une coupe géologique au niveau de l'hippodrome. Elle montre une superposition de matériaux de résistance mécanique différente. La dune repose ainsi sur des alluvions du Quaternaire (Flandrien), elles-mêmes déposées sur des calcaires du Tertiaire (Eocène).

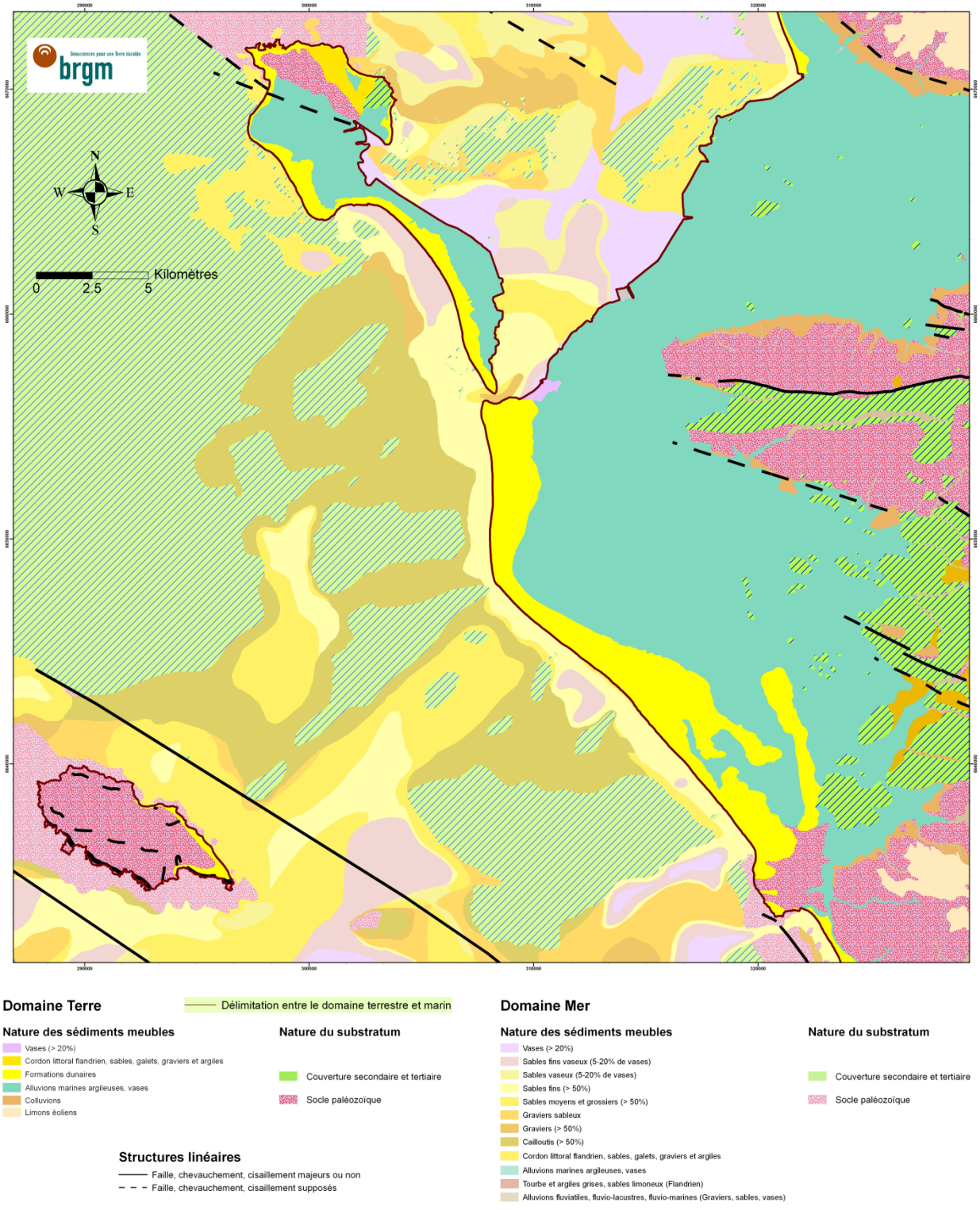


Illustration 20 : Synthèse géologique à partir de la cartographie du littoral des Pays de la Loire au 1/250 000 (modifié d'après Thinon et al., 2013)

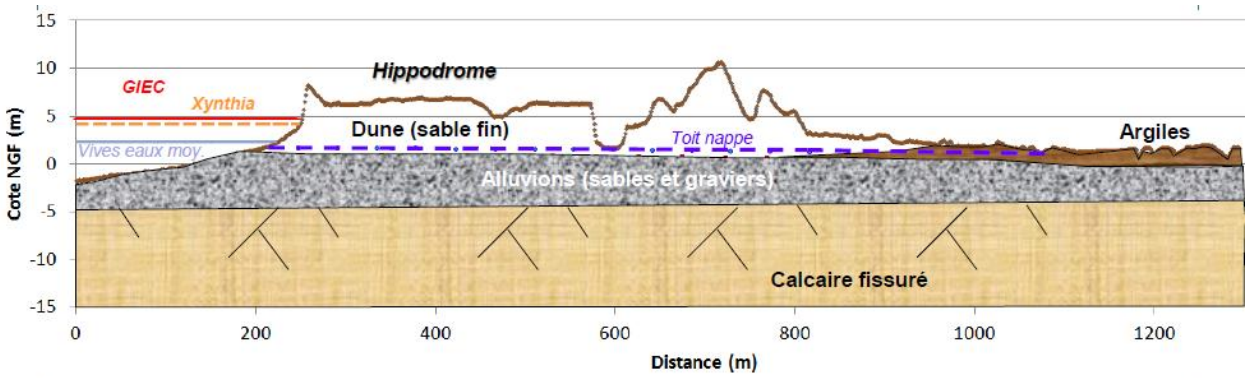


Illustration 21 : Coupe géologique au niveau de l'hippodrome (BRGM)

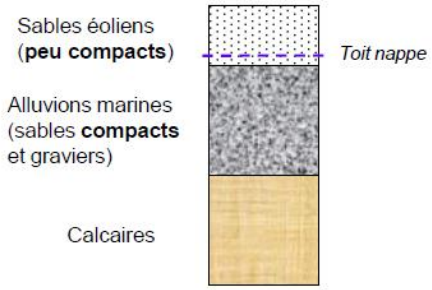


Illustration 22 : Propriétés des couches géologiques au droit de la dune (BRGM)

Les sables éoliens, assez fins et peu compacts, devraient offrir peu de résistance mécanique à l'érosion, comparativement aux sables compacts et aux graviers constituant les alluvions marines, et aux calcaires fissurés sous-jacents encore plus cohésifs.

La nappe de la dune est susceptible de jouer sur la cohésion des sables, et donc sur leur résistance mécanique. Une première modélisation (Illustration 23) à partir des données de piézométrie, complétée par une analyse des affleurements d'eau pouvant correspondre à la nappe, montre que la surface de la nappe de la dune semble corrélée à la topographie de celle-ci. Les niveaux d'eau indiqués dans l'Illustration 21 sont donc probablement légèrement plus hauts au niveau des crêtes.

Des compléments de connaissance seraient nécessaires pour affiner l'analyse géologique et hydrogéologique. Les données s'avèrent en effet très lacunaires. En particulier, il conviendrait de mieux caractériser la nappe de la dune et son exutoire sur les plages, ainsi que la géométrie des matériaux constituant la dune et son sous-bassement. L'ébauche de modélisation de l'altitude du toit du substratum (Illustration 24) et de la base de la dune (Illustration 25) montre notamment les lacunes d'informations dans de nombreux endroits. Or, cette information est importante pour évaluer le stock de sédiments et la capacité de la dune à résister à l'érosion.

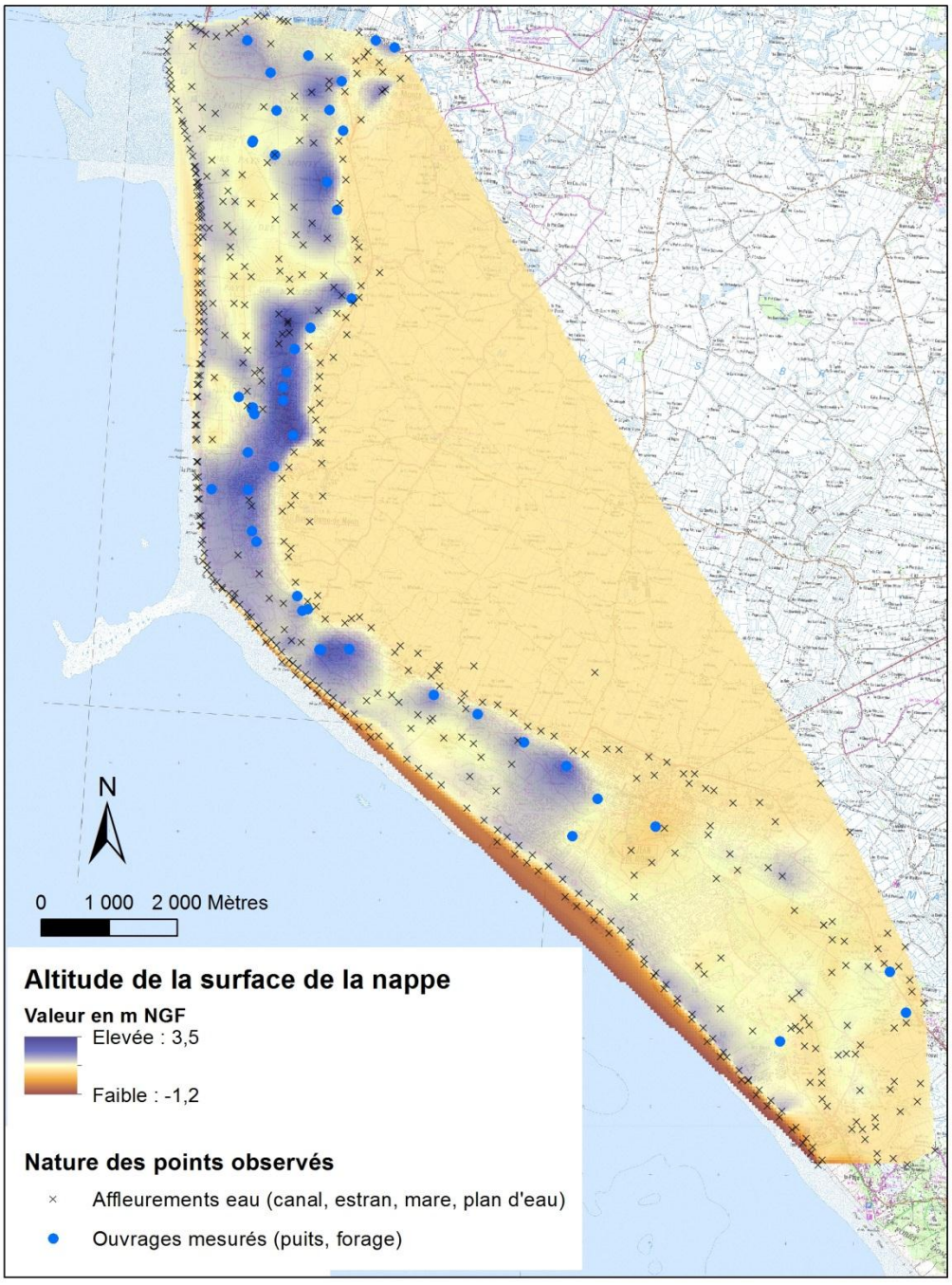


Illustration 23 : Ebauche de modélisation de la surface probable de la nappe à partir des données de piézométrie et d'affleurement d'eau (BRGM)

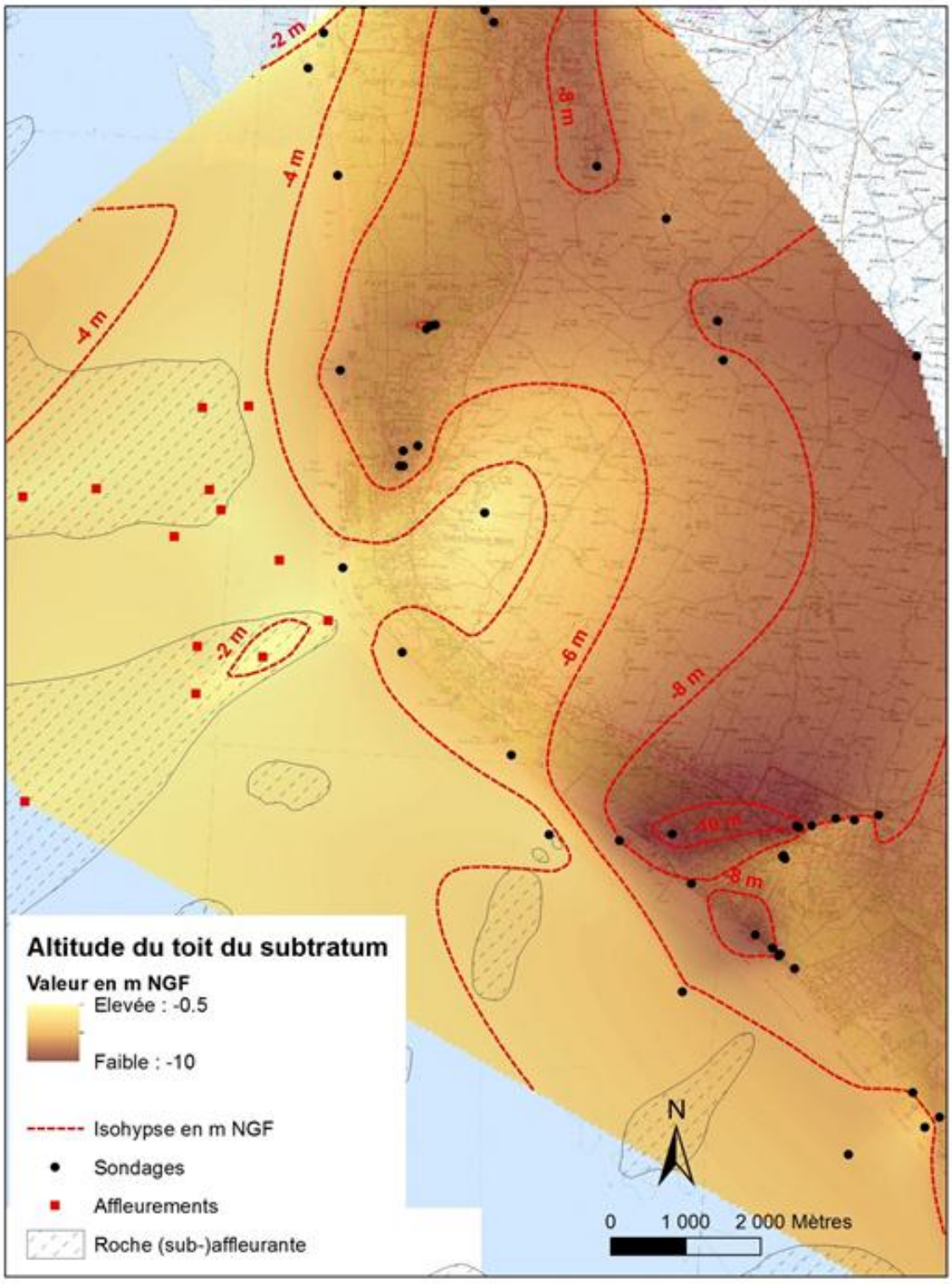


Illustration 24 : Ebauche de modélisation de l'altitude du toit du susbtratum (calcaire éocène principalement) à partir des données de sondage disponibles dans la Banque de Données du Sous-Sol (BRGM)

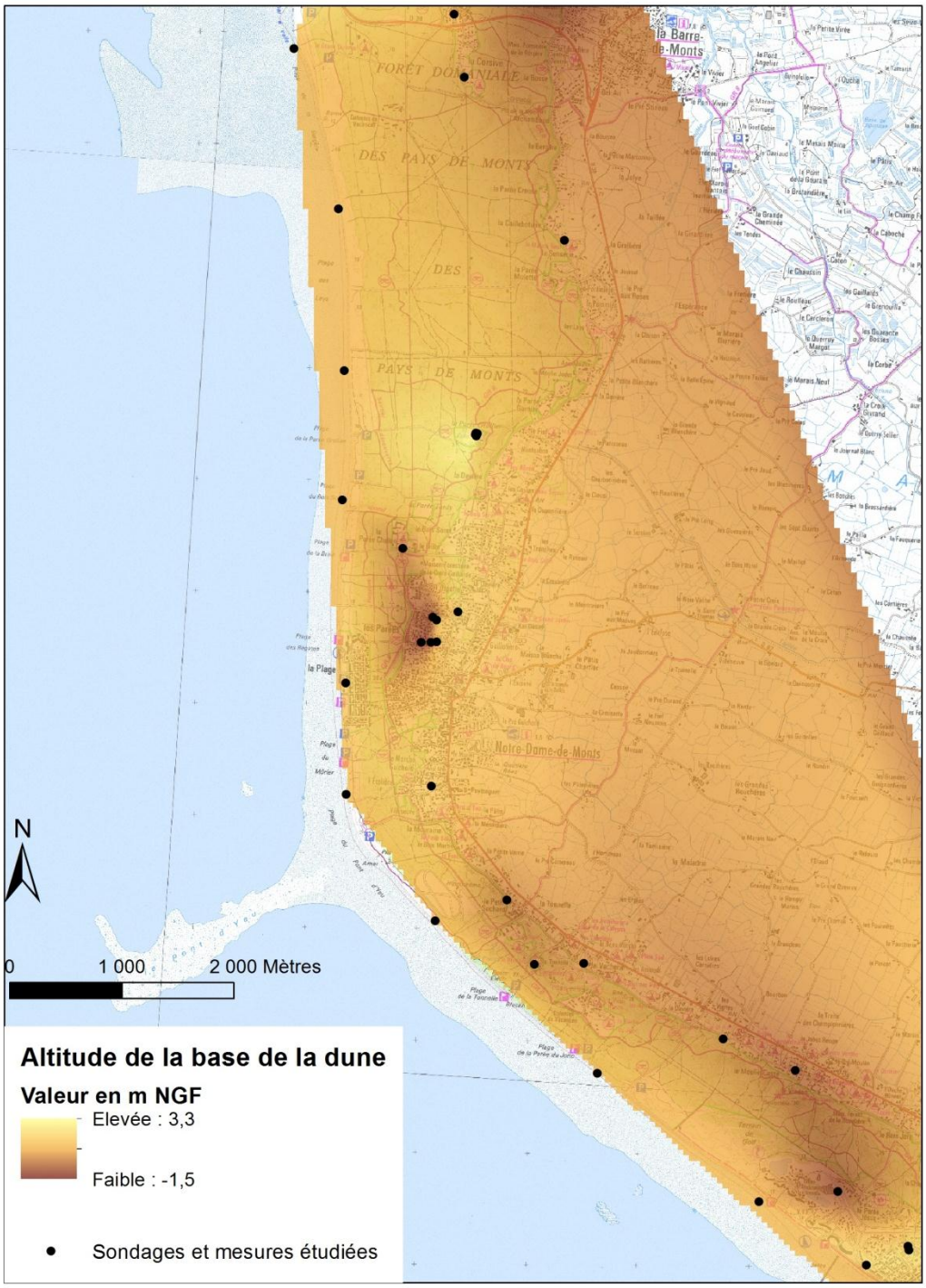


Illustration 25 : Ebauche de modélisation de l'altitude de la base des sables dunaires (BRGM)

5.5. Quels risques (aléas et enjeux) ?

5.5.1. Aléas (érosion, submersion)

Approche topographique

L'approche topographique de la dune (cf. § 5.1.1) met en évidence des zones de sensibilité du cordon dunaire des Pays de Monts. La mise en perspective de ce relief face aux cotes extrêmes actuelles (Xynthia) et futures (prospective GIEC) (Illustration 26 à Illustration 28), confirme le rôle de barrière naturelle de la dune, mais aussi les zones de sensibilités à l'érosion (cf. secteur de la Pège notamment).

L'arrière-pays, bas topographiquement, apparait donc particulièrement sensible à la submersion. Les zones de sensibilité à l'érosion de la dune méritent ainsi une attention particulière (Sud) de même que les zones de digues au Nord (cf Illustration 26). Il est important de noter que ces zones les plus sensibles sont situées en dehors du périmètre de l'observatoire.

Le PPRL de la Baie de Bourgneuf (en cours et qui couvre un large territoire incluant le Pays de Monts) devrait apporter des éléments complémentaires sur les aléas, et notamment sur l'aléa submersion. En particulier, il devrait apporter des éléments quant à la pénétration de la mer par le Nord. Il faudra vérifier s'il apporte des éléments par rapport à d'éventuelles brèches sur le cordon dunaire, notamment dans le secteur de La Pège.

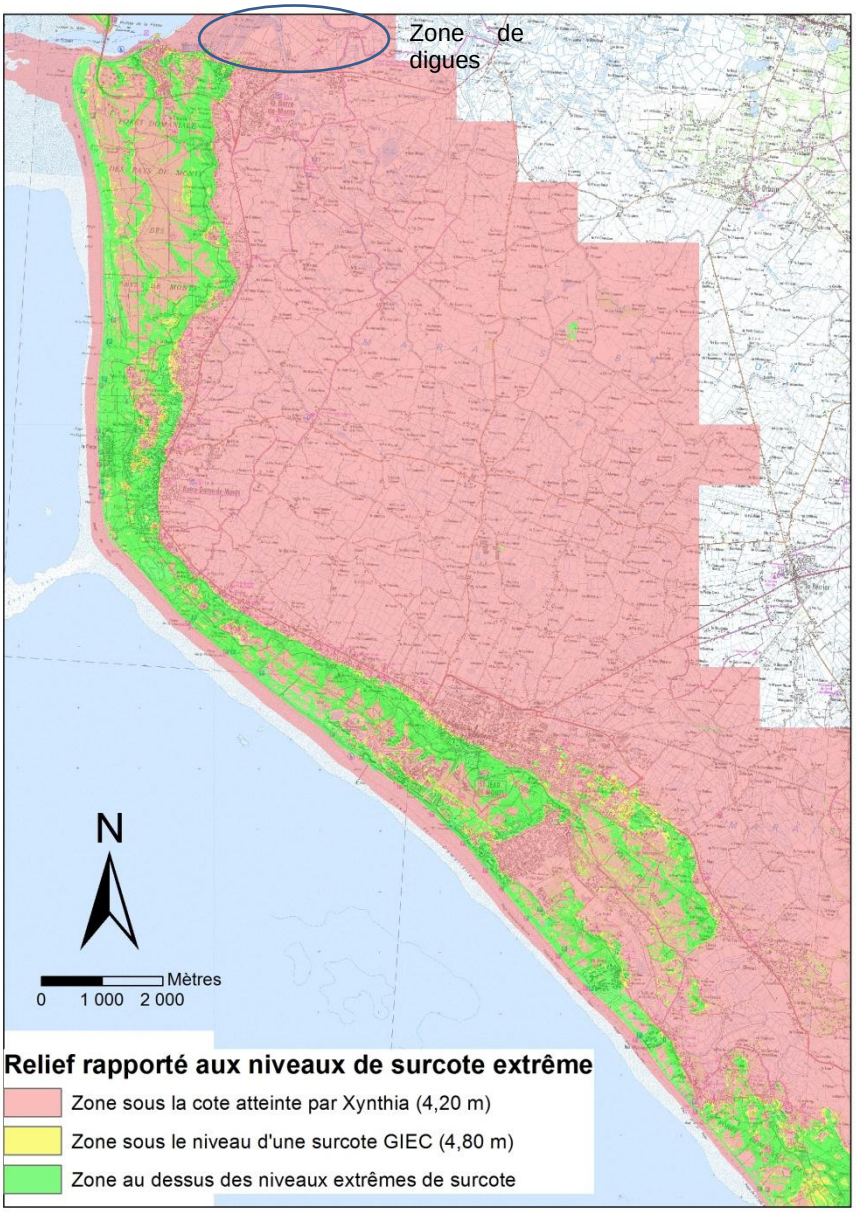


Illustration 26 : Mise en perspective du relief dunaire des Pays de Monts face aux cotes extrêmes (Xynthia, GIEC) – NB : cette carte ne présume pas les zones submersibles (BRGM, IGARUN)

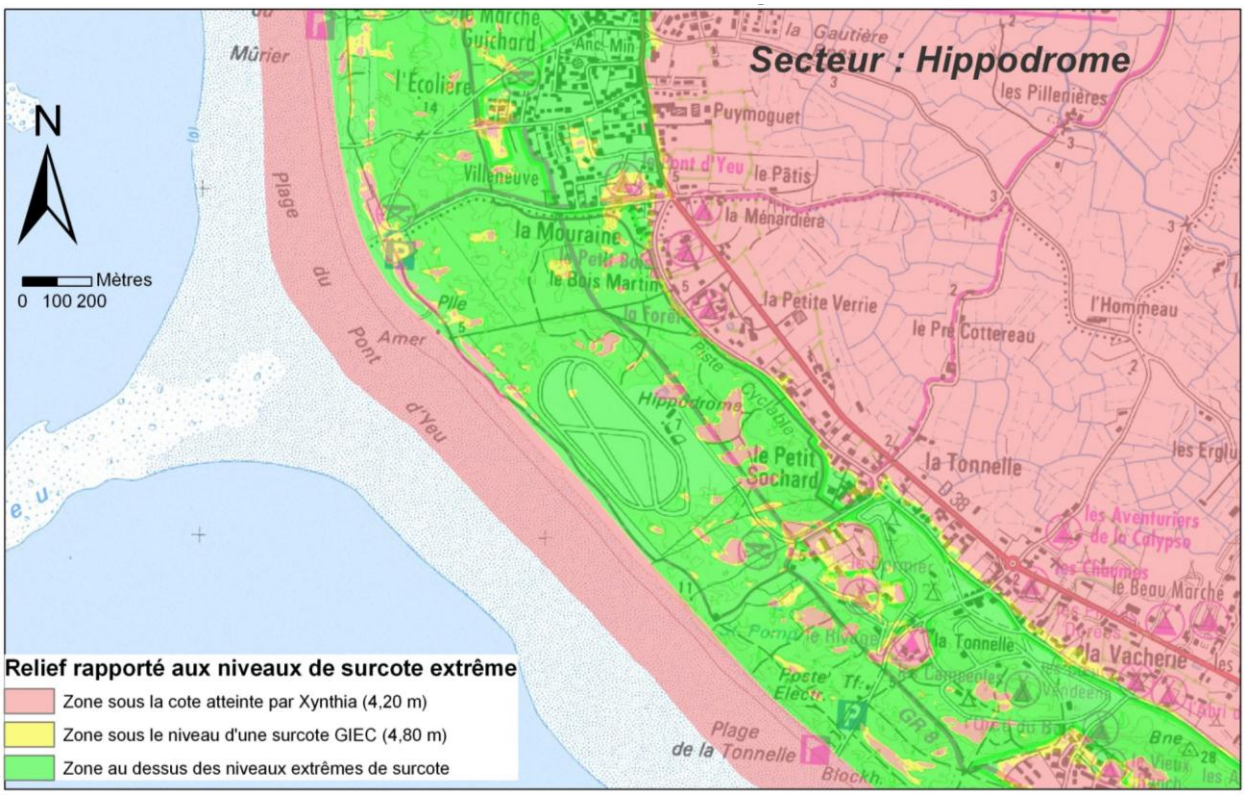


Illustration 27 : Mise en perspective du relief dunaire avec les côtes extrêmes (Xynthia, GIEC) au niveau de l'hippodrome (BRGM, IGARUN)

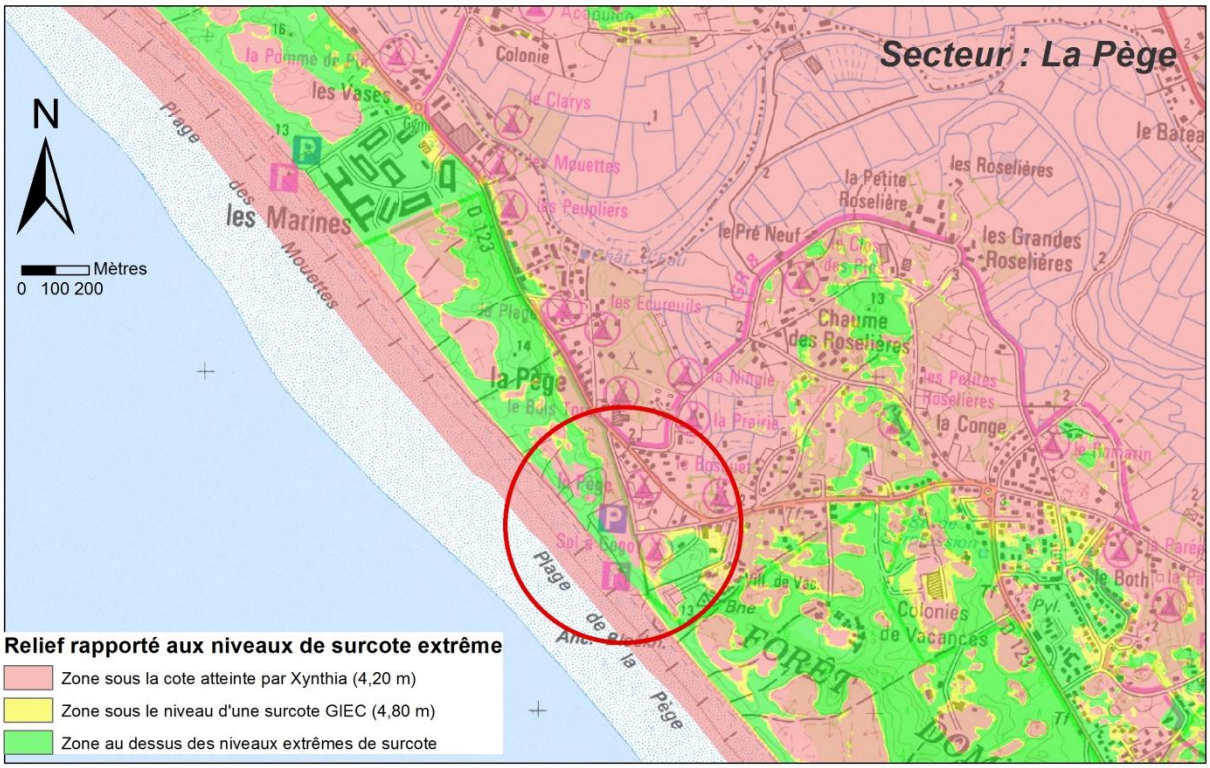


Illustration 28 : Exemple de secteur sensible à l'intrusion marine du fait d'une faible largeur de la dune (BRGM, IGARUN)

Evolutions annuelles en lien avec les événements météo-marins

La dynamique sédimentaire, avec notamment les variations historiques du trait de côte sont utiles à rappeler ici (cf. 5.1, Illustration 6 et Illustration 7). Outre les tendances d'évolution générale, se posent aussi les évolutions ponctuelles liées à des événements extrêmes ou à des successions d'événements morphogènes.

Le recul du trait de côte issu de l'interprétation des photos aériennes sur différentes périodes a dans ce cadre été comparé aux périodes de tempêtes et autres événements morphogènes (coups de vents) survenus préalablement aux clichés (Illustration 29).

Ainsi, les orthophotos 2000 et 2001 se situent dans une période où la fréquence des épisodes morphogènes est la plus élevée : 16 épisodes par an en moyenne entre 1999 et 2001 contre 11 entre 2008 et 2010. Les images de 2000 ont été prises 8 mois après les fortes tempêtes de fin décembre 1999, celles de 2001 sont marquées par une tempête survenue trois semaines avant la campagne aérienne. L'année 2009 a connu des épisodes morphogènes de moindre importance (Juigner, 2011).

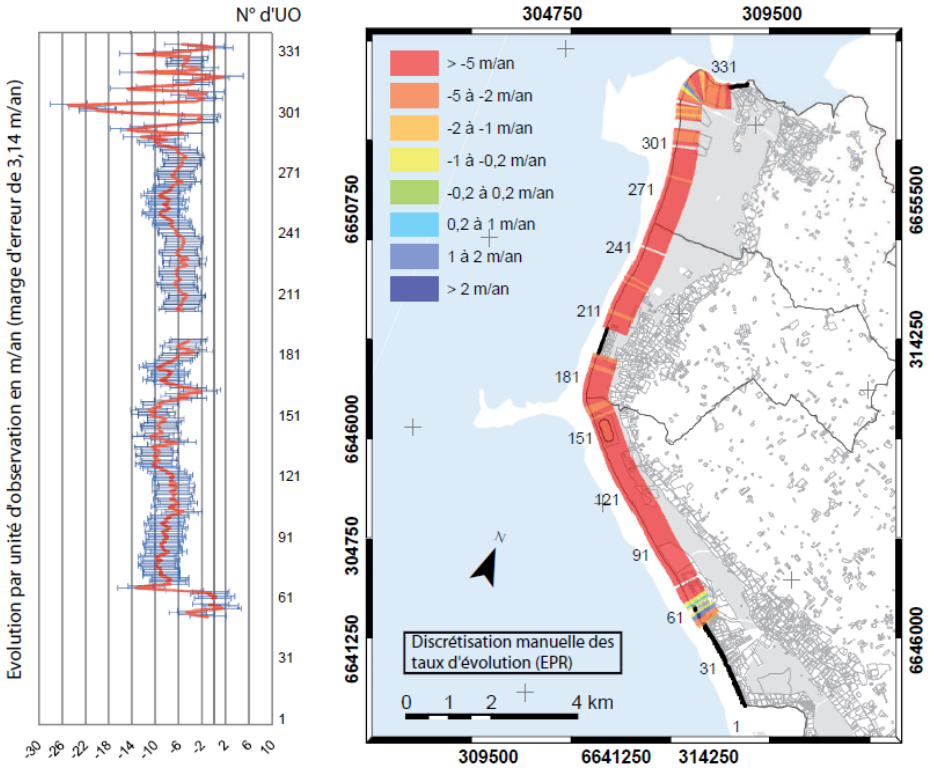
Images aériennes		Evenements majeurs recensés		
Date des clichés	Saison	Date	Intervalle date clichés / date tempête	Descriptif
01/071920	Eté	-	-	-
14/05/1950 15/05/1950 27/07/1950	Printemps ou été	Hiver 1949 (décembre ? Janvier ?)	-	"Vimer à Pornic : l'eau rentra dans les magasins du port de Pornic"[1]
03/09/1971	Eté	22 et 23 au 27 janvier 1971	8 mois	**Tempêtes dévastatrices**[1]
30/07/2000 au 01/08/2000	Eté	26 au 28 décembre 1999	8 mois	**Tempêtes Lothar et Martin** : hauteur d'eau max (inconnu) ; H1/3 max (7,42 m) ; vent max (162 km/h)
12/08/2001	Eté	5 au 8 février 2001	6 mois	Episodes morphogènes : hauteur d'eau max (5,92 m) ; H1/3 max (5,11 m) ; vent max (83 km/h)
		13 mars 2001	5 mois	Episodes morphogènes : hauteur d'eau max (6,02 m) ; H1/3 max (4,55 m) ; vent max (72 km/h)
		17 et 18 juillet 2001	**3 semaines**	**Episodes morphogènes : hauteur d'eau max (5,3 m) ; H1/3 max (3 m) ; vent max (83 km/h)**
23/06/2006	Printemps	1 au 4 décembre 2005	6 mois	Episodes morphogènes : hauteur d'eau max (5,78 m) ; H1/3 max (4,22 m) ; vent max (102 km/h)
		2 au 4 mars 2006	3 mois	Episodes morphogènes : hauteur d'eau max (5,87 m) ; H1/3 max (3,12 m) ; vent max (67 km/h)
01/07/2009	Eté	6 au 10 février 2009	5 mois	Episodes morphogènes : hauteur d'eau max (5,7 m) ; H1/3 max (inconnu) ; vent max (119,5 km/h)
09/04/2010	Printemps	27 et 28 février 2010	**1 mois et une semaine**	**Tempête Xynthia : hauteur d'eau max (6,59 m) ; H1/3 max (3,56 m) ; vent max (120,6 km/h)**

[1]Source : Inventaire réalisé par l'Association Patrimoine Marche de Bretagne Marais Breton des Moutiers en Retz, antenne de la Société des Historiens du Pays de Retz (2010)

Hauteur d'eau max : correspond à la marée observée maximum enregistrée au marégraphe des Sables d'Olonnes pendant l'événement (SHOM)
H1/3 max : correspond à la hauteur significative maximum de la houle enregistrée au large de l'Ile d'Yeu pendant l'événement (CETMEF)
Vent max : correspond à la vitesse maximum du vent enregistrée à Noirmoutiers pendant l'événement (Météo France)

Illustration 29 : Inventaire des tempêtes et autres épisodes morphogènes ayant pu influencer les clichés aériens (Juigner, 2012)

2009-2010



2000-2001

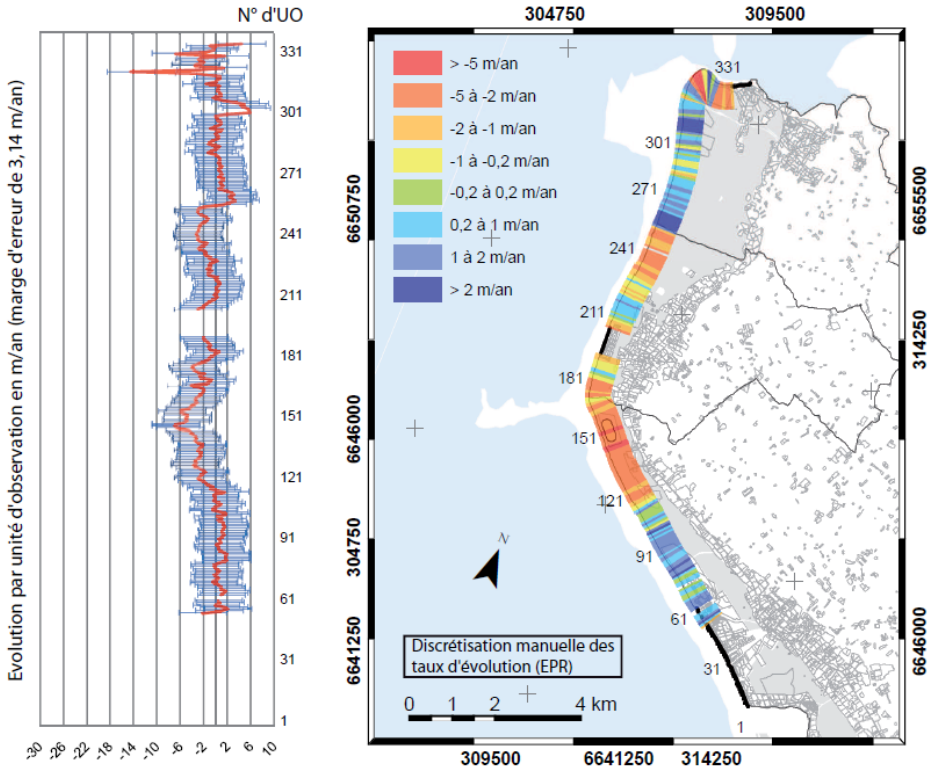


Illustration 30 : Comparaison des reculs du trait de côte annuels calculés à partir des jeux de photos aériennes (Juigner, 2012)

L'évolution du trait de côte suite aux épisodes morphogènes de l'hiver 2000-2001 et du printemps 2001 (Illustration 30) semble cohérente avec l'évolution indiquée par l'analyse historique 1920-2010 (Illustration 6), montrant des zones en érosion, et d'autres stables ou en accrétion. Le secteur de l'hippodrome montre ainsi un recul d'environ 7 m. La comparaison des photos 2009 et 2010 (Illustration 30) montre que la tempête Xynthia a impacté l'ensemble du front dunaire, y compris des zones stables ou en accrétion sur le long terme, avec des reculs atteignant 6 à 8 m dans ces zones. Cet importance du recul lors d'un événement doit attirer l'attention sur les secteurs où le cordon dunaire est étroit, comme au sud de Saint-Jean-de-Monts ou sur le secteur de la Pège (largeur dune <15 m), au sud de l'observatoire.

Volumes dunaires exportés par un événement majeur comme Xynthia

En complément de l'analyse précédente, une approche des volumes de sables exportés par un événement majeur a été menée, en s'appuyant sur l'événement extrême que représente la tempête Xynthia (2010). Pour faciliter l'analyse, un découpage du linéaire côtier a été effectué en secteurs homogènes à partir de la distribution géographique de l'ensemble des jeux de données utilisés.
Les reculs du trait de côte obtenus à partir des jeux d'orthophotos (2009-2010) (cf. § précédent) ont servi à calculer la section érodée comme demi produit du recul et des 2/3 de la hauteur moyenne de falaise vive, hypothèse basse permettant d'approcher les différentes configurations du front dunaire avant tempête (Illustration 31).

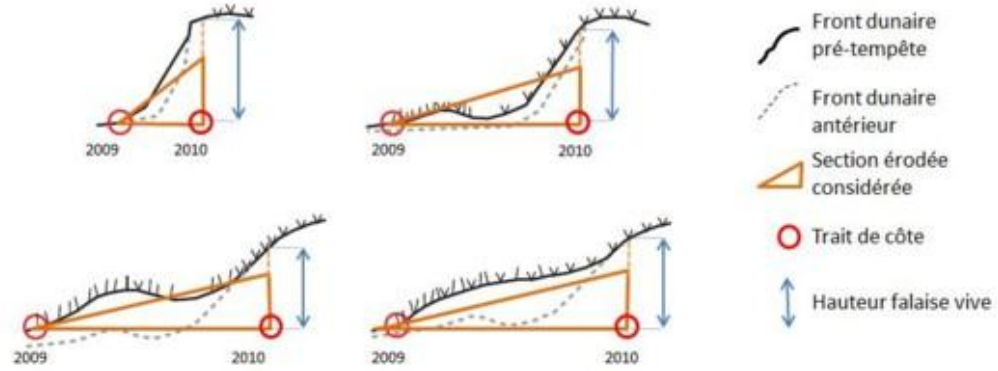


Illustration 31 : Représentation de la section érodée considérée dans les calculs de volume de sable exporté lors d'une tempête en fonction des configurations possibles du front dunaire avant tempête (profils stabilisés ou en accrétion schématisés ici).

Le volume de sable dunaire érodé par l'événement Xynthia est en première approche supposé correspondre au produit de la section érodée et de la longueur du secteur.
La hauteur moyenne de falaise vive dunaire engendrée par Xynthia.(Illustration 32, Annexe 2) a été évaluée à partir des observations et des mesures de falaises vives post Xynthia, in situ, en combinant :
a) la hauteur moyenne du premier cordon dunaire bordier évaluée à partir de la typologie du contact plage-dune, établie pour la première fois fin juin 2010 après la tempête,
b) la hauteur de la falaise dunaire estimée à partir de l'analyse des profils de plage (et des photos correspondantes datées du 27 au 30 avril 2010) et des jeux de photos des partenaires de l'OLPM immédiatement après Xynthia (début mars 2010).

Le Tableau 3 présente les différents calculs effectués par secteur. La somme des exports théoriques calculés indique un volume total de sable exporté d'environ 80 000 m^3, correspondant à une « perte » de banquettes, avant-dunes et dunes de l'ordre de 100 ha sur tout le secteur d'étude. Bien qu'approximatif du fait de l'absence de mesures de terrain

antérieures à Xynthia, et du mode de calcul simplifié du front dunaire, cet ordre de grandeur est intéressant à comparer avec les valeurs de transit sédimentaires évaluées par DHI (cf. Illustration 9, 0-20 000 à 100 000 m^3/an selon les cellules sédimentaires). Ceci équivaut à 80 % du transit annuel maximum estimé par DHI, et à 4 fois le transit minimum en un seul événement.

La comparaison entre la hauteur de falaises vives à la hauteur du premier cordon dunaire fait ressortir en outre l'incidence de l'entaille Xynthia sur le corps dunaire. Cette analyse génère un indicateur d'impact, qui pourrait être calculé de manière plus fiable lors d'événements ultérieurs grâce aux relevés réguliers.. De la plage de la Grande Côte à plage de la Bergère (secteurs de 4 à 7, Tableau 3), le faible ratio indique une entaille de faible amplitude, ce qui vient temporiser l'importance du recul moyen calculé sur la plage de la Bergère. A l'inverse, la position de l'entaille a atteint un maximum de la puissance du premier cordon dunaire au niveau de la plage du Pont d'Yeu. Le recul maximum constaté est aussi à mettre en perspective avec la largeur et la topographie du cordon dunaire.

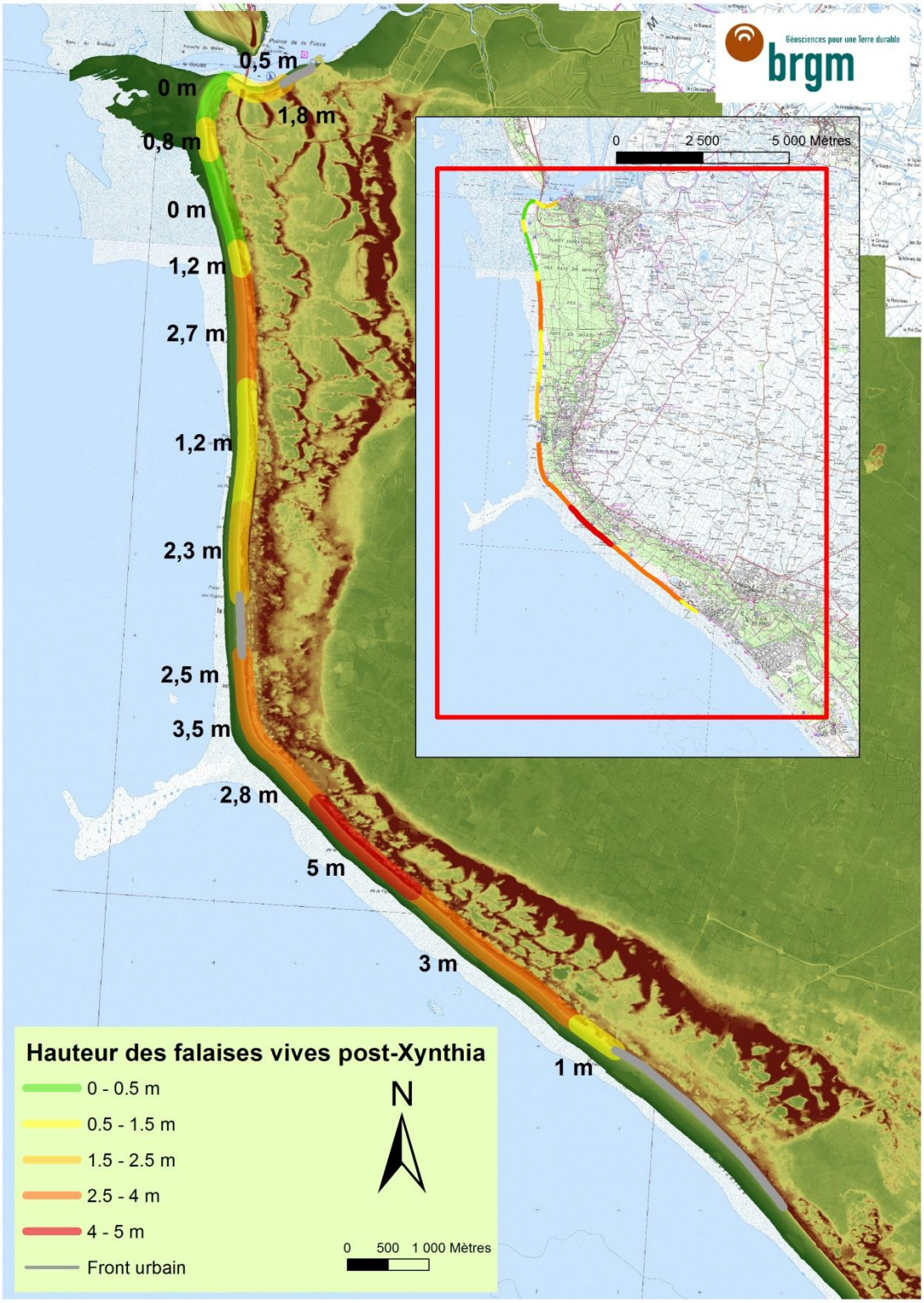


Illustration 32 : Hauteurs moyennes des falaises vives dunaires post-Xynthia estimées à partir des données disponibles (contact plage-dune, profils de plage, photos de terrain) (BRGM)

Secteurs homogènes			In-situ	Interprétation Orthophoto										
				Evènement Xynthia 2009-2010							Taux d'évolution annuel sur du long terme (entre 1920 et 2010)			
Id	NOM GENERIQUE	longueur (m)	Hauteur moyenne falaise vive dunaire retenue (m)	recul min (m)	recul max (m)	recul moyen (m)	ecart type (m)	surface impacté (m²)	section érodée (m²)	export théorique (m3)	Moyenne (m/an)	Min	Max	Ecart type
1	Front urbain de Fromentine	416	0	0	0	0	0	0	0.00	0	0	0	0	0
2	Plage de Fromentine	381	1.8	-2.36	-7.25	-4.69	1.35	1786.9	5.63	1072	-0.04	-0.15	0.11	0.08
3	Plage de Fromentine, partie W	250	0.5	-2.37	-5.39	-3.96	1.07	990	1.32	165	0.31	-0.07	0.66	0.25
4	Plage de la Grande Côte	786	0	1.72	-13.13	-4.97	5.14	3906.4	0.00	0	0.02	-0.51	0.75	0.42
5	Plage de la Grande Côte, partie S	309	0.8	-3.43	-14.77	-7.03	4.16	2172.3	3.75	579	1.02	0.75	1.33	0.19
6	Plage de la Bergère	1241	0	-1.45	-24.96	-9.02	6.76	11194	0.00	0	0.37	-0.42	1.36	0.62
7	Plage de la Bergère Sud	232	1.2	-6	-9.98	-8.36	1.5	1939.5	6.69	776	-0.34	-0.39	-0.27	0.04
8	Plage des Lays	1476	2.7	-4.72	-9.44	-6.85	1.22	10111	12.33	9100	-0.25	-0.32	-0.17	0.04
9	Plage de la Parée Grolier	1512	1.2	-4.4	-9.33	-6.45	1.24	9752.4	5.16	3901	0.29	-0.17	0.6	0.27
10	Plage des Régates et de la Braie	902	2.3	-4.66	-6.72	-5.81	0.55	5240.6	8.91	4018	0.44	0.26	0.59	0.1
11	La Plage du front urbain de Notre Dame de Monts	870	0	0	0	0	0	0	0.00	0	0.05	0	0.26	0.08
12	Plage du Murier	324	2.5	-3.31	-6.22	-5.27	0.97	1707.5	8.78	1423	-0.03	-0.1	0.06	0.05
13	Plage du Pont d'Yeu	1069	3.5	-2.12	-9.73	-6.89	1.96	7365.4	16.08	8593	-0.32	-0.53	-0.1	0.1
14	Hippodrome	761	2.8	-4.43	-11.13	-8.64	1.84	6575	16.13	6137	-0.53	-0.63	-0.37	0.07
15	Plage de la Tonnelle	1560	5	-6.67	-10.9	-8.72	1.36	13603	29.07	22672	-0.03	-0.36	0.2	0.14
16	Plage de la Parée de Jonc et de la Davière	2624	3	-0.57	-13.44	-7.94	2.02	20835	15.88	20834.56	0.61	0.16	1.04	0.26
17	Plage de la Parée Jésus	551	1	1.53	-4.54	-0.87	1.74	479.37	0.58	159.79	0.61	0	1.04	0.61
18	Plage des Demoiselles	2839	0	0	0	0	0	0	0.00	0	0	0	0.48	0.04
TOTAL		18103						97658		79429				

Tableau 3 : Evaluation des volumes de sables dunaires érodés (à partir des sections impactées par la tempête Xynthia intégrant les hauteurs moyennes des falaises dunaires) et des surfaces impactées (BRGM) – Comparaison aux taux d'évolution annuels sur le long terme calculés par Juigner (2012)

Essai prospectif

Au-delà de l'analyse du passé et du présent, une vision prospective est nécessaire pour anticiper les aléas, et prendre les mesures de gestion les plus appropriées. Cette vision

prospective est particulièrement délicate à cause des nombreuses incertitudes sur l'évolution des forçages météo-marins. Cela dit, une réelle augmentation du niveau marin est enregistrée depuis plusieurs années, dépassant même les prédictions.
De par les données disponibles, seule une extrapolation prudente de l'analyse historique de l'évolution du trait de côte peut être proposée ici. Les vitesses d'érosion calculées (cf. § 5.1) ont ainsi été extrapolées au niveau de l'hippodrome. La prédiction du trait de côte à l'horizon 2020 a été réalisée à partir des résultats de la régression linéaire pondérée (WLR) et de l'écart-type. Les valeurs prédites sont calculées de la façon suivante pour chaque sous-ensemble :

Valeur prédite (m) = [WLR * T]
Valeur prédite selon un scénario pessimiste (m) = [WLR * T] + [WCI90% * T]
Valeur prédite selon un scénario optimiste (m) = [WLR * T] - [WCI90% * T]

Avec :
WLR = taux d'évolution (pente de la régression linéaire pondérée) en m/an
WCI90% = écart-type de la pente avec un intervalle de confiance 90% (m)
T = pas de temps de prédiction en année

Et :
WCI90% moyen = 1,40 m (prédiction à T=10)
WCI90% min = 1,10 m (prédiction à T=10)
WCI90% max = 1,75 m (prédiction à T=10)

L'intégration de l'écart-type permet d'établir deux types de scénarios, l'un optimiste et l'autre pessimiste. Compte tenu de la marge d'erreur globale inhérente à la cinématique du trait de côte, seul le scénario pessimiste a été retenu. Les valeurs de prédiction ont été extrapolées avec des buffers pour être cartographiées sur les images aériennes de 2010. L'*Illustration 33*, montre un exemple de prédiction du trait de côte au niveau de l'hippodrome des Pays de Monts.

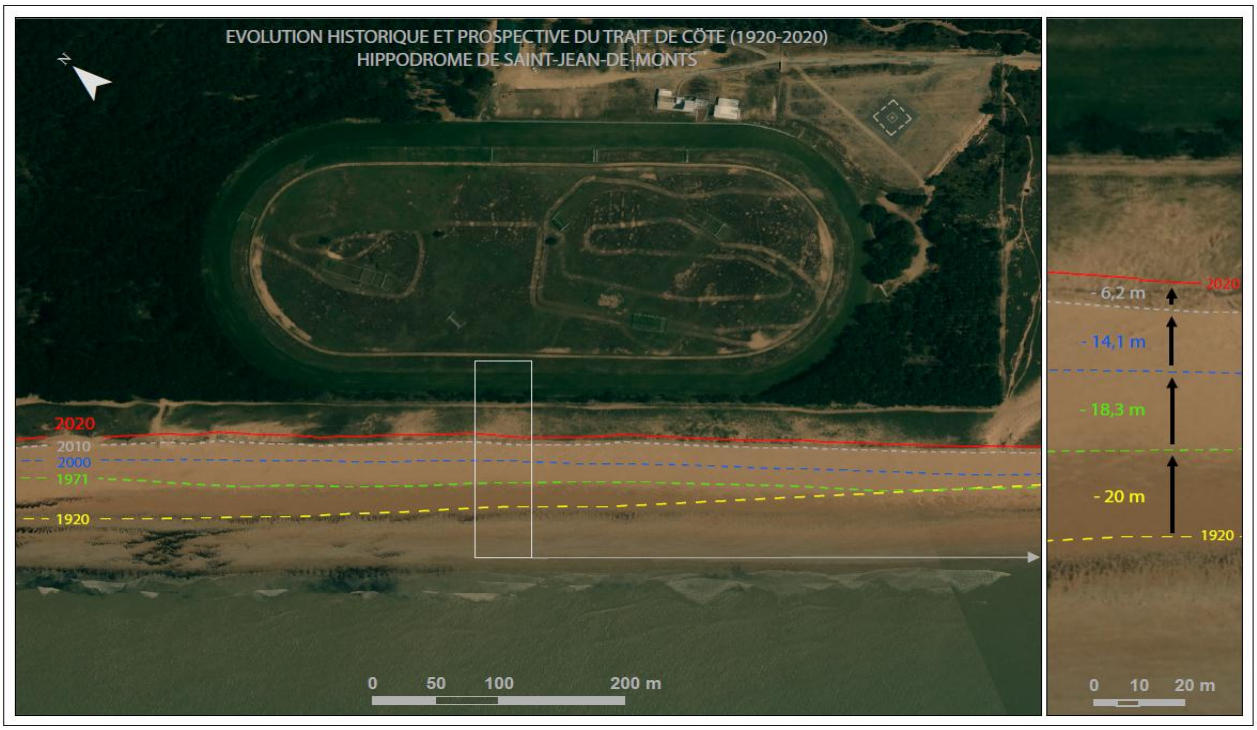


Illustration 33 : Evolution historique et prospective du trait de côte (1920-2020) au niveau de l'hippodrome des Pays de Monts (Juigner, 2012)

5.5.2. Enjeux

L'analyse fine des enjeux permet d'évaluer les biens et personnes susceptibles d'être impactés par une submersion marine ou une érosion, et d'en évaluer la vulnérabilité (pourcentage d'endommagement et/ou capacité à résister ou surmonter une crise).

Nous entendons par enjeux « les personnes, biens, activités, moyens, patrimoine, etc susceptibles d'être affectés par un aléa ». Et dans le cas de notre zone d'étude, les aléas considérés ici correspondent à ceux engendrés par les surcotes (submersion et érosion marines). A cet effet, lorsqu'on compare la carte d'occupation du sol (des enjeux) (Illustration 34) à la carte de mise en perspective du relief face aux niveaux de surcotes potentielles, on constate qu'une partie du tissu urbain et des infrastructures sont sous la cote atteinte (4,20 m) lors de la tempête Xynthia (Illustration 35) ou sous la cote GIEC. Or le massif dunaire est situé au-dessus des niveaux extrêmes de surcotes et fait obstacle aux attaques de la mer. La dune joue donc un rôle de « dune-digue », fragile lorsque sa hauteur est faible ou lorsque sa largeur s'amenuise (voir l'exemple de la Pège, Illustration 28), d'où l'importance d'un suivi régulier du cordon.

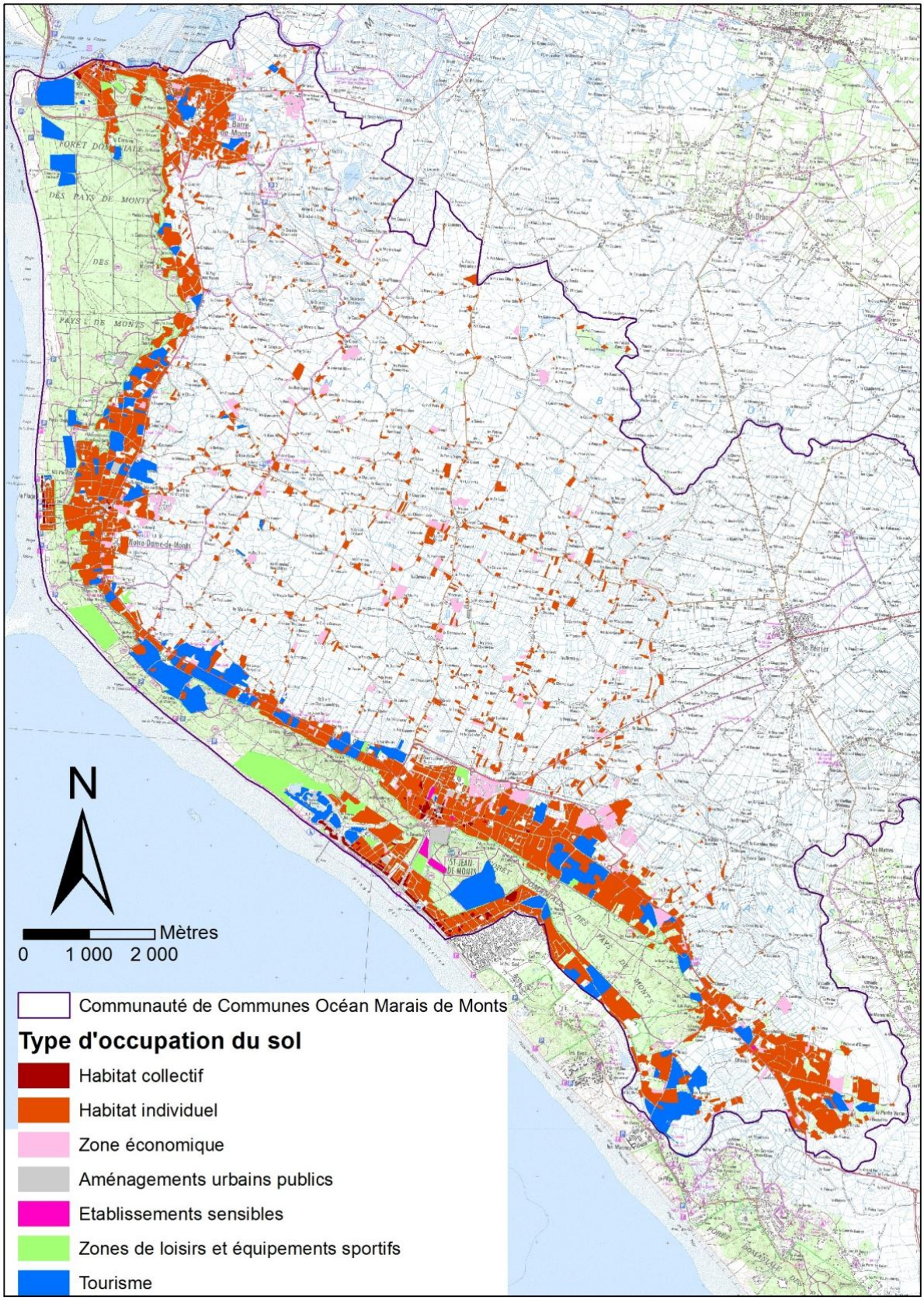


Illustration 34 : Synthèse de l'occupation des sols à l'échelle de la parcelle cadastrale (modifié d'après Coquin, 2011 in Le Guern et al., 2012) (BRGM)

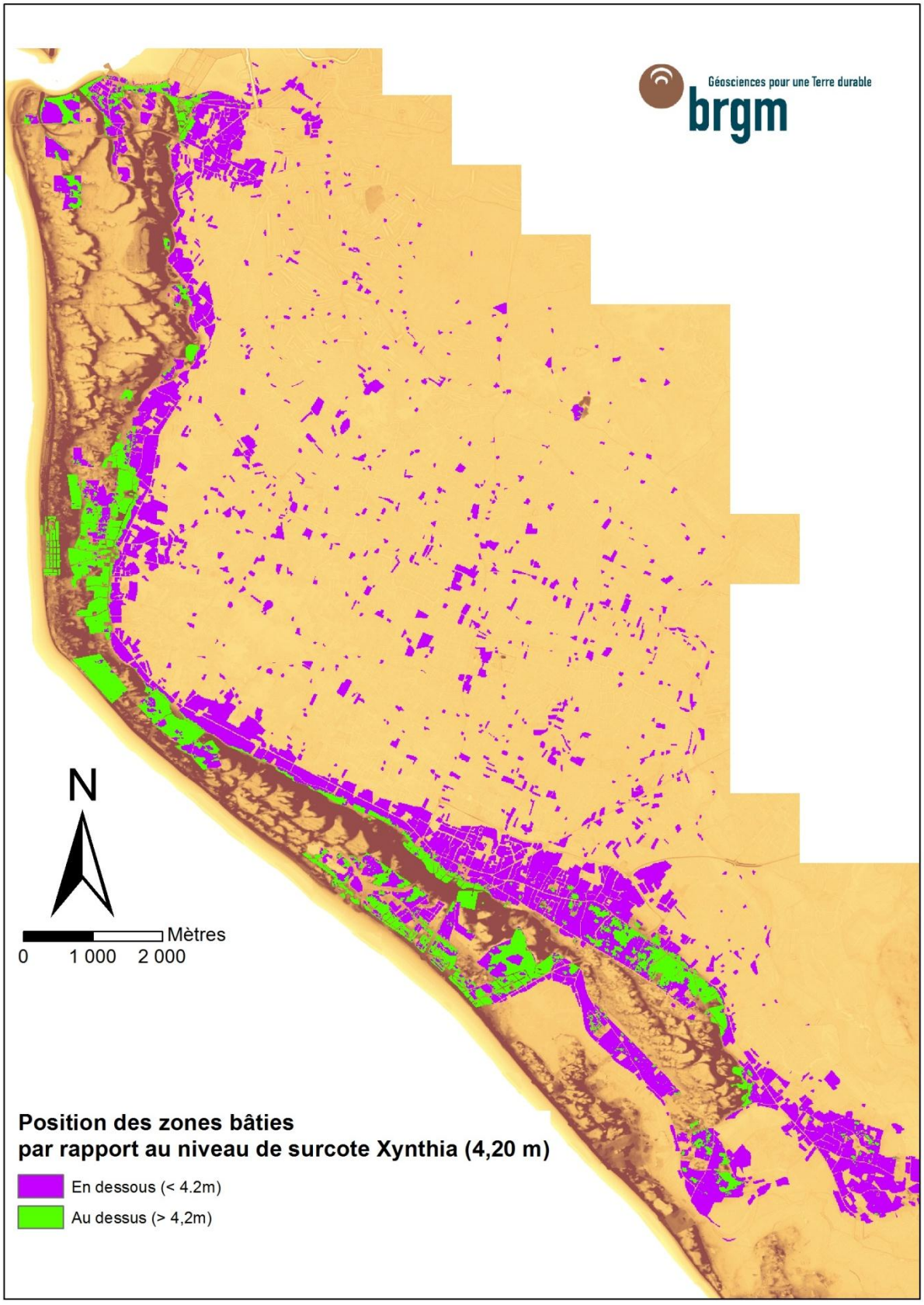


Illustration 35 : Zones d'occupation des sols (hors zones de loisirs) situées dans des zones de relief situées sous les surcotes extrêmes – NB : cette carte ne présume pas les zones submersibles (BRGM)

6. Conclusion

Les travaux réalisés en 2012 dans le cadre de l'observatoire du littoral des Pays de Monts sont globalement conformes au programme envisagé, avec quelques ajustements de circonstance. Les suivis réguliers (action 4) se sont poursuivis, incluant les profils de plage (22), le contact plage-dune, le relevé annuel des bio-indicateurs et la piézométrie. La synthèse des données actuelles (action 5) a permis d'évaluer leurs apports et limites par rapport à la compréhension des phénomènes.

Pour lever les questions scientifiques en suspens comme le stock de sédiments marins en place et son évolution, un programme d'acquisition spécifique a été engagé en parallèle (2012/2013). La Communauté de Communes a missionné l'IGARUN pour lever la bathymétrie des petits fonds, améliorer la connaissance des courants, acquérir des données géophysiques (sismique réflexion) et cartographier les lithologies des sédiments marins. Sur la base de ces connaissances nouvelles, les partenaires pourront mieux comprendre les aléas avec une meilleure connaissance de l'environnement, et ainsi apporter des éléments de réponse aux questions d'aménagement.

En 2013 et 2014, les travaux envisagés visent la poursuite des suivis réguliers (action 4) incluant les profils de plage (22), le contact plage-dune, le relevé annuel des bio-indicateurs, la piézométrie et la mise en forme des données. Ils visent également à finaliser le SIG (action 2), qui nécessite notamment une consolidation et une vérification complète avant d'être remis à la Communauté de Communes. Enfin, l'interprétation des phénomènes (action 5) sera poursuivie, en intégrant les nouveaux éléments de connaissance sur les fonds marins (bathymétrie, courantologie, sédiments…). Elle vise notamment à proposer des pistes d'actions pour la gestion du littoral des Pays de Monts, dont quelques éléments sont rappelés en Annexe 3.

Pour compléter ces travaux, des connaissances supplémentaires seront utiles à acquérir par la suite, notamment sur les dunes (structure géologique et hydrogéologique) pour mieux évaluer leur résistance à l'érosion, de même que des travaux de modélisation pour compléter la compréhension du fonctionnement du système (forçages météo-marins notamment) et évaluer les perspectives d'évolution de la dune. Une réflexion plus poussée sur les solutions de gestion et des suivis expérimentaux de solutions douces pourraient également être envisagés, notamment sur le secteur de l'hippodrome. Il est à noter toutefois que les zones les plus sensibles du cordon dunaire se situent en dehors de l'observatoire, sur la commune de Saint-Hilaire de Riez.

7. Bibliographie

Coquin J. (2011) *Définition des enjeux socio-économiques pour l'Observatoire du Littoral des Pays de Monts*. Rapport de stage de fin d'études. BRGM-Université de Nantes.

DHI-Geos (2008), *Etude détaillée de la cellule n°3 : du Goulet de Fromentine jusqu'à la pointe de Grosse Terre à Saint Gilles Croix de Vie*, 74 p.

Feuillet T., Chauveau E., Pourinet L. (2012*) Xynthia est-elle exceptionnelle ? Réflexion sur l'évolution et les temps de retour des tempêtes, des marées de tempêtes, et des risques de surcotes associés sur la façade atlantique française*, Norois, n° 222, p. 27-44.

Gourmelon F. et Robin M. (2005) SIG et littoral, éd Hermès Sciences-Lavoisier, 328 p., 2005

Juigner M. (2012*) Méthodologie pour l'analyse diachronique du trait de côte de l'Observatoire du Littoral des Pays de Monts (Vendée),* Mémoire de Master 2, Université de Nantes, BRGM, ONF, 103 p.

Juigner M. (2011) *Cinématique du trait de côte des Pays de Monts de 1920 à 2009 (Vendée)*, Mémoire de Master 1, Université de Nantes, 116 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., Renaul R., Jaouen J., Conil P., Bouchet F., Favennec J. (2011) *Observatoire du littoral des Pays de Monts - Synthèse des réalisations 2010*, Rapport BRGM RP-59538-FR, 211 p.

Le Guern C., P. Fattal, L. Gouguet, V. Baudouin, M. Robin, M. Maanan, F. Debaine, J. Jaouen, R. Renault, M. Juigner, A. Durand, J. Coquin avec la collaboration de P. Conil et F. Bouchet (2012) *Observatoire du littoral des Pays de Monts – Rapport d'avancement 2011*, Rapport BRGM RP-61098-FR, 88 p.

ONERC (2010) *Prise en compte de l'élévation du niveau de la mer en vue de l'estimation des impacts du changement climatique et des mesures d'adaptation possibles*, Synthèse n°2. 6 p.

Renault R. (2011) *Apport de la caractérisation des sables de plage et de dune à la gestion du littoral des Pays de Monts*. Rapport de Master 2. BRGM-Université de Caen.

Thinon I., Baudouin V., Paquet F., Conil P., Béchennec F., Le Bayon B. (2013) *Cartographie géologique harmonisée du littoral des Pays de la Loire*, Rapport BRGM/RP-62383-FR.

Annexe 1

Publication dans la revue Dynamiques Environnementales

CINEMATIQUE D'UN TRAIT DE COTE SABLEUX EN VENDEE ENTRE 1920 ET 2010 - METHODE ET ANALYSE.

Martin Juigner*, Marc Robin*, Paul Fattal*, Mohamed Maanan*, Cécile Le Guern, Loïc Gouguet***, Vivien Baudouin**, Françoise Debaine***

* Géolittomer – UMR 65554 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
Françoise.Debaine@univ-nantes.fr

** BRGM - Service géologique régional des Pays de la Loire
c.leguern@brgm.fr
v.baudouin@brgm.fr

*** ONF - Centre Ouest Auvergne Limousin
loic.gouguet@onf.fr

Résumé : 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).

Mots clés : érosion côtière, cinématique du trait de côte, contact plage/dune, tempête, photo-interprétation, cartographie.

Abstract : 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).

Key words: coastal erosion, shoreline change analysis, beach/dune contact, storm, photo-interpretation, cartography.

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-Marais de Monts a impulsé dès 2009 un Observatoire de sa frange côtière (l'OLPM – Observatoire du Littoral des Pays de Monts) en partenariat avec le BRGM[1], l'ONF[2] et l'IGARUN[3]. Dans ce cadre, l'analyse de la mobilité historique du trait

[1] Bureau de Recherches Géologiques et Minières

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.

I- PRESENTATION DU SITE D'ETUDE

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 (**Fig. 1**).

A- Contexte géomorphologique

Le paysage géomorphologique des Pays de Monts s'inscrit dans un continuum terre-mer hérité des cycles orogéniques du Massif Armoricain 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'Ile 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 (Litto3D®).

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 littoral 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.

[2] Office National des Forêts

[3] Institut de Géographie et d'Aménagement Régional de l'Université de Nantes

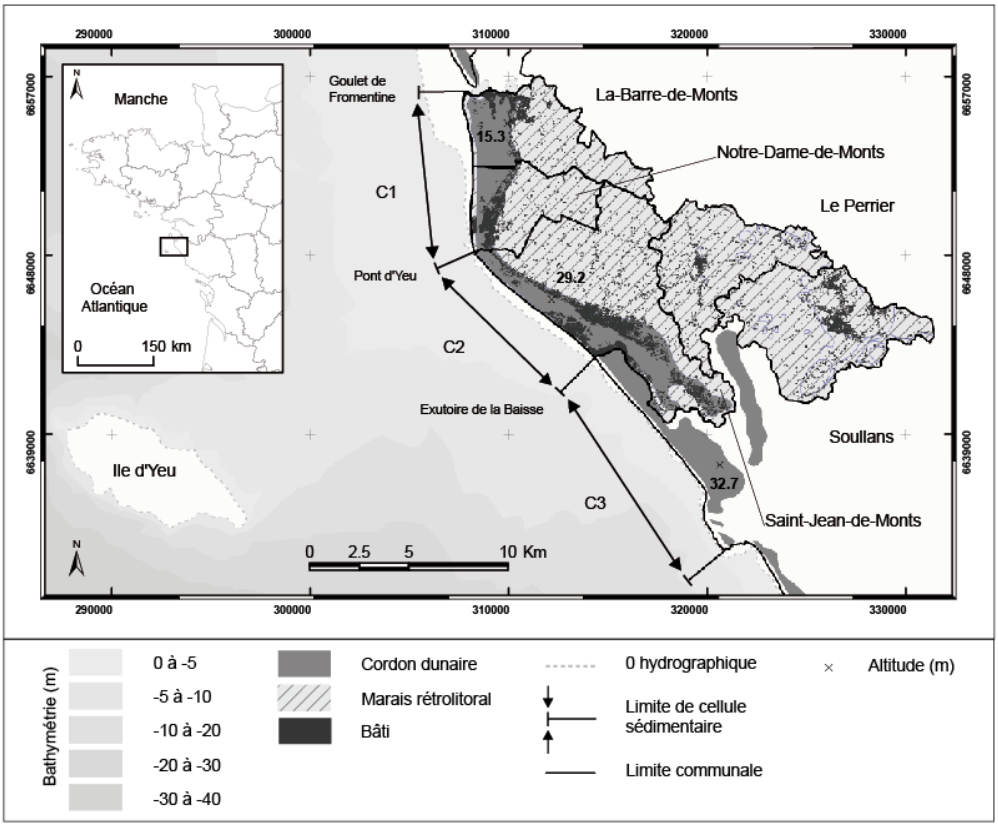


Fig. 1 : Localisation de la zone d'étude et contexte géomorphologique (C1, C2, C3 : cellules sédimentaires d'après Pinot, 1980 ; Geos-Dhi, 2008)

B- 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 (**Fig. 2**). Les données de houles transmises par le Cetmef (**Fig. 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.

Conditionné par un régime de marée macrotidale semi diurne[4] (**Fig. 2**), le système plage/dune est soumis à l'action mécanique des vents, des houles et des courants de marées, favorisant ainsi la mobilité longitudinale et transversale des sédiments. De l'interaction de ces paramètres résulte une redistribution des sédiments selon les principes de la morphodynamique côtière établissant ainsi des secteurs en érosion, stable ou en accrétion (Cohen et *al*., 2002).

[4] Données issues du marégraphe des Sables d'Olonne, propriété du SHOM et de la CCI de la Vendée, mises à disposition sur le site refmar.shom.fr (acquisition sur la période 1999-2010)

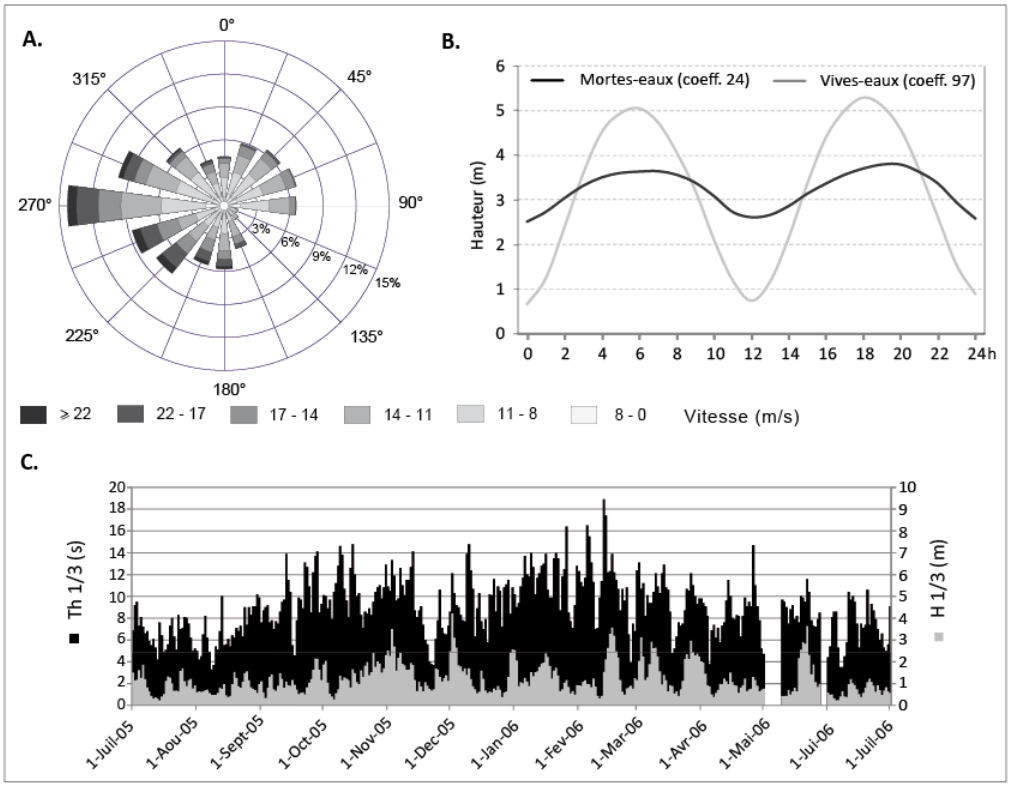


Fig. 2 : Forçages météo-marins - A. Vitesse et direction du vent (FXI) ; B. Marnage de vive-eau et de morte-eau ; C. Période et hauteur de la houle de juillet 2005 à juillet 2006

C- 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 (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 équines, golf, pêche à pied, baignade ...etc.) induisant une dégradation du milieu dunaire (sentiers dunaires, piétinement).

II- MATERIEL ET METHODE

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 (**Fig. 3**).

A- 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 ligne de références ont pu être identifiées : les lignes morphologiques, les lignes botaniques, 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.

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 botaniques définissant tous les profils identifiés sur le secteur (**Fig. 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 ou 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.

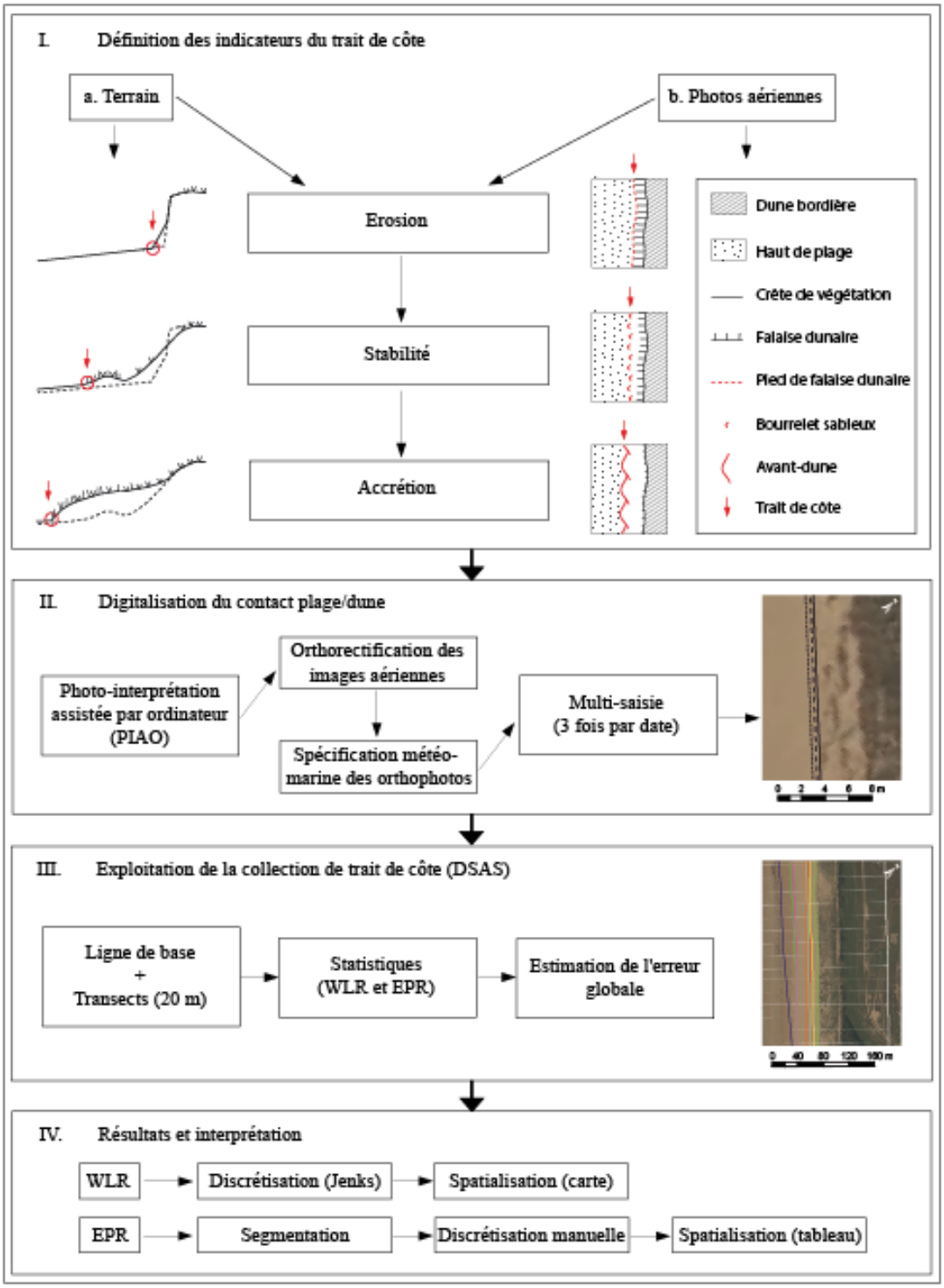


Fig. 3 : Schéma méthodologique de l'analyse diachronique du trait de côte des Pays de Monts

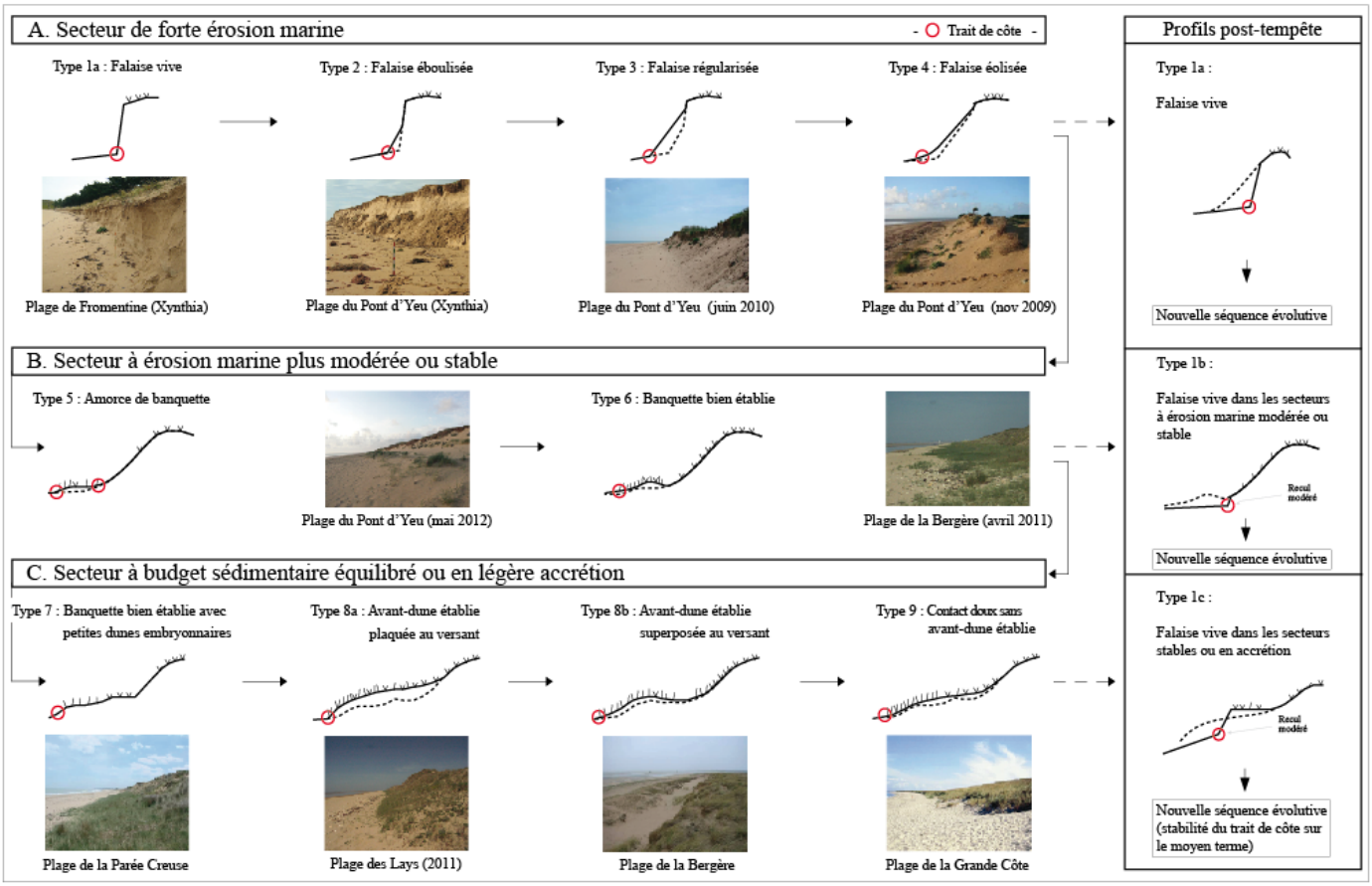


Fig. 4 : Séquence évolutive des faciès du contact plage/dune adaptée aux Pays de Monts (d'après Favennec, 2002, modifié)

B- 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. 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- Traitement des images aériennes

Les données récoltées (**Fig. 5**) 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.

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'amer 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-correction 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.

Date	Type de donnée	Provenance	Echelle	Résolution	Antécédents météo-marin	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

Fig. 5 : Inventaire des images aériennes exploitées et spécification des antécédents météo-marins (tempêtes) de l'année précédant les clichés

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 (**Fig. 5**). 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 ≥ 2 m, FXI ≥ 11 m/s et la hauteur du plan d'eau ≥ 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 (**Fig. 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.

3- Extraction du trait de côte

Aujourd'hui les méthodes couramment utilisées pour réaliser une cinématique du trait de côte sont la photo-interprétation assistée par ordinateur (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 (**Fig. 6**) 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 (**Fig. 6**). La limite de végétation peut alors introduire une erreur d'interprétation lors de la numérisation.

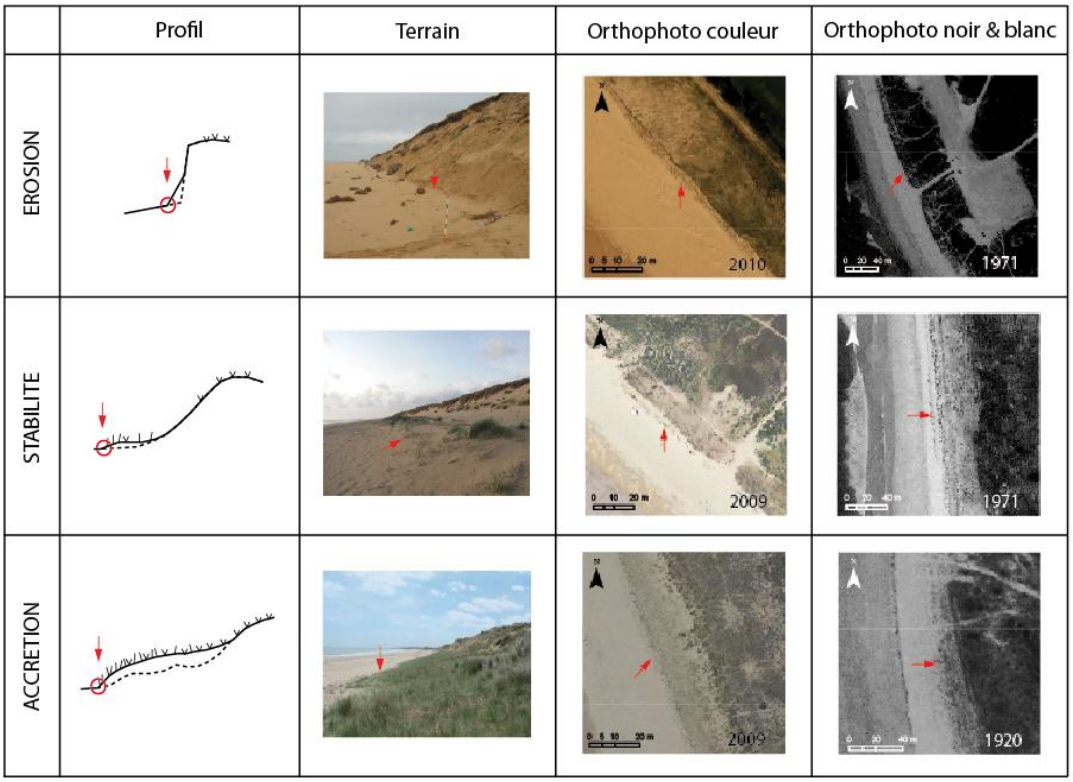


Fig. 6 : Identification *in situ* du trait de côte (flèche rouge) et transposition aux images aériennes

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 3 numérisations.

C. Exploitation de la collection de traits de côte avec le DSAS

L'exploitation des traits de côte dans un SIG peut être manuelle ou assistée par des outils de calcul automatisé des taux d'évolution (ex. DSAS, Mobi TC). Le *Digital Shoreline Analysis System* v4.2 (DSAS) a été utilisé pour cette cinématique. Cet outil est une extension gratuite du logiciel ArcMap, développé depuis le début des années 1990 par l'*US Geological Survey* (Thieler et *al.*, 2009). Le principe général de l'outil est de mesurer les distances entre les traits de côte d'une même série et de calculer les statistiques des taux d'évolution (en m/an). Pour cela, l'exploitation de l'outil demande au préalable une mise en forme rigoureuse des données dans une Géodatabase personnelle, la création d'une ligne de base et de transects, une estimation de l'incertitude liée à la méthode ainsi que le choix des statistiques de calcul des taux d'évolution.

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 à petite échelle.

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 pas 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.

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 (**Fig. 7**).

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, **Fig. 7**) 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, **Fig. 7**), 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

Fig. 7 : Synthèse des erreurs sur les traits de côte digitalisés - A. Incertitude long-terme ; B. Incertitude périodique

III- RESULTATS

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.

A- Evolution morphologique historique

Les taux d'évolution obtenus à partir de la régression linéaire pondérée (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 (**Fig. 8**). 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 (Cf. § II.3) 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 8, les secteurs les plus touchés sont la plage du Pont d'Yeu (± transects 371 à 411), la plage du Mûrier (± transect 351), la jonction plage des Lays / plage de la Bergère (± 731) et la section Nord de la plage de la Grande Côte (± 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 (± transects 751 à 791), de la plage de la Braie à la plage de la Parée Grollier (± 511 à 611), sur la plage de la Parée du Jonc et devant le golf de Saint-Jean-de-Monts (± 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'enchainement des zones. Une interprétation de cette dynamique peut conduire à penser que la forte accrétion relevée sur la plage de la Bergère (± 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 (± 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 (± transects 511 à 611).

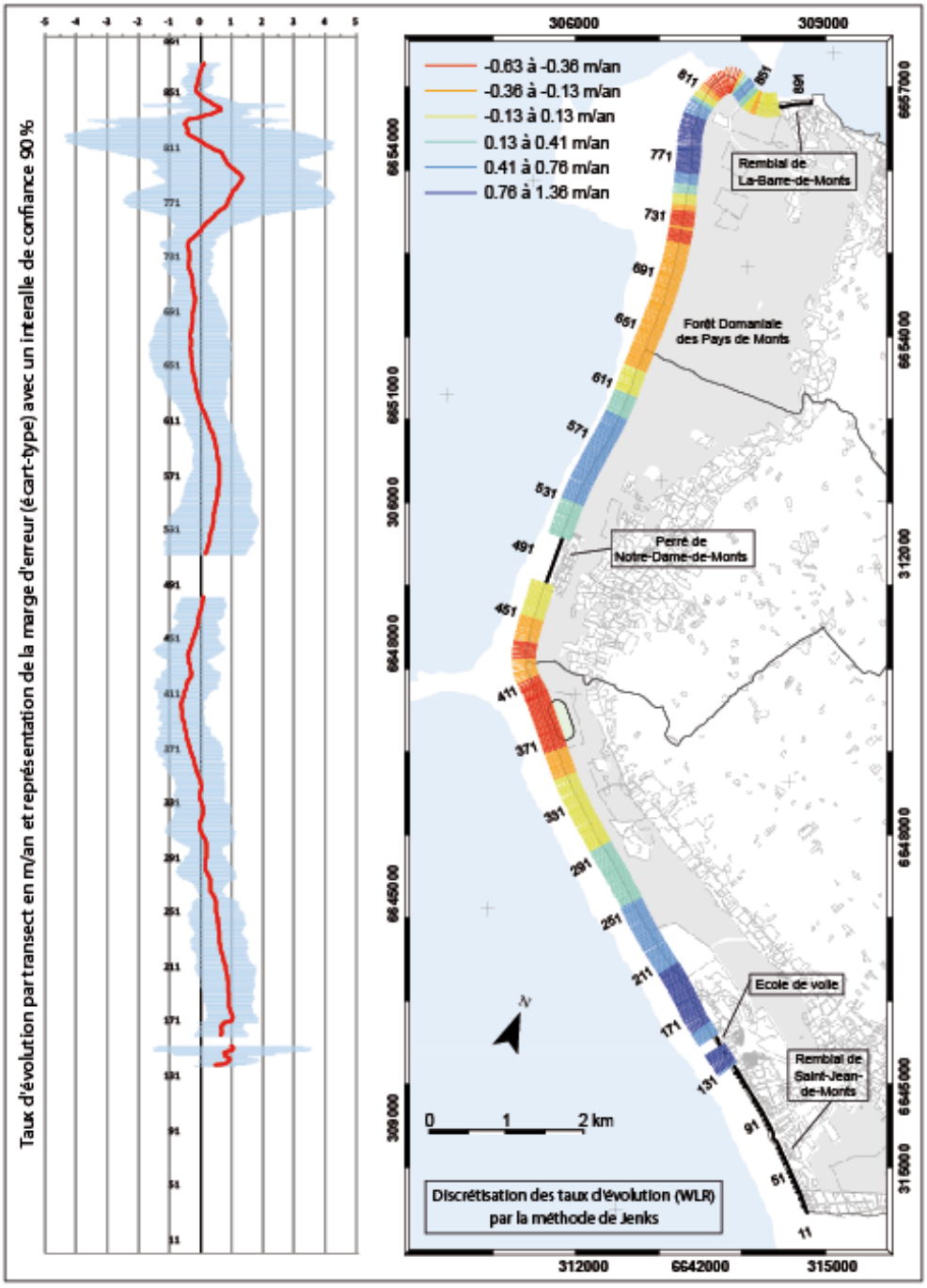


Fig. 8 : Cartographie de l'aléa érosion côtière des Pays de Monts sur le long-terme (11 à 891 : numéro de transect créé avec le DSAS ; à gauche, représentation graphique des taux d'évolution, en rouge, et de la marge d'erreur, en bleu)

B- Evolution 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 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 (WLR). Le linéaire côtier est ainsi décomposé en autant de segment 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 (**Fig. 9**). 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 -8,78m.

Unités morphosédimentaires		Taux d'évolution long terme (EPR en m/an) 1920 - 1950	1950 - 1971	1971 - 2000	2000-2010	Taux d'évolution court terme (EPR en m/an) 2000 - 2001	2001 - 2006	2006 - 2009	2009 - 2010
Marge d'erreur		0.26	0.24	0.16	0.32	4.08	0.88	1.39	3.14
UM 1 (=)	Remblai La Barre	0.07	0.02	0	0	0	0	0	0
UM 2 (=)	Fromentine	0.05	-0.01	-0.02	-0.50	-1.32	0.17	-0.24	-4.66
UM 3 (+)	Pont de Noirmoutier	0.59	1.08	0.14	-0.78	3.66	-0.18	-2.56	-3.55
UM 4 (-)	Grande Côte	-2.07	0.76	0.02	-2.28	-7.00	-1.64	-0.19	-8.14
UM 5 (=)	Grande Côte	-3.40	1.52	1.04	-2.13	-6.16	-3.20	2.57	-8.35
UM 6 (+)	Grande Côte - Bergère	-1.22	2.29	0.61	1.01	1.87	2.75	0.05	-7.42
UM 7 (=)	Bergère	0.09	-0.39	-0.06	0.97	0.92	2.02	0.39	-3.37
UM 8 (-)	Bergère - Lays	-0.71	-0.16	-0.29	-0.21	0.72	1.35	-1.10	-7.74
UM 9 (=)	Lays	-0.39	-0.14	0.31	-0.84	-1.82	0.98	-1.75	-7.49
UM 10 (+)	Parée Grollier - Bois Soret - Braie	1.03	-0.01	0.63	-0.72	-1.07	0.75	-1.67	-5.74
UM 11 (=)	Remblai Notre-Dame	0.87	-1.09	0	0	0	0	0	0
UM 12 (=)	Mûrier	0.37	-0.21	0.12	-1.06	-0.74	-0.43	-1.14	-5.14
UM 13 (-)	Mûrier - Pont d'Yeu	-0.41	-0.27	-0.33	-1.29	-3.28	0.18	-1.27	-7.97
UM 14 (=)	Tonnelle - Parée du Jonc	0.20	-0.07	0.28	-1.59	-2.60	-0.70	-0.85	-8.78
UM 15 (+)	Parée du Jonc - Golf	0.38	0.81	0.67	-0.41	0.78	0.37	-0.21	-7.72
UM 16 (=)	Ecole de voile	0.35	0.31	0	0	0	0	0	0
UM 17 (+)	Estacade	0.31	0.11	1.55	0.87	0.77	0.87	1.53	-1.54
UM 18 (=)	Remblai Saint-Jean	0.43	0	0	0	0	0	0	0

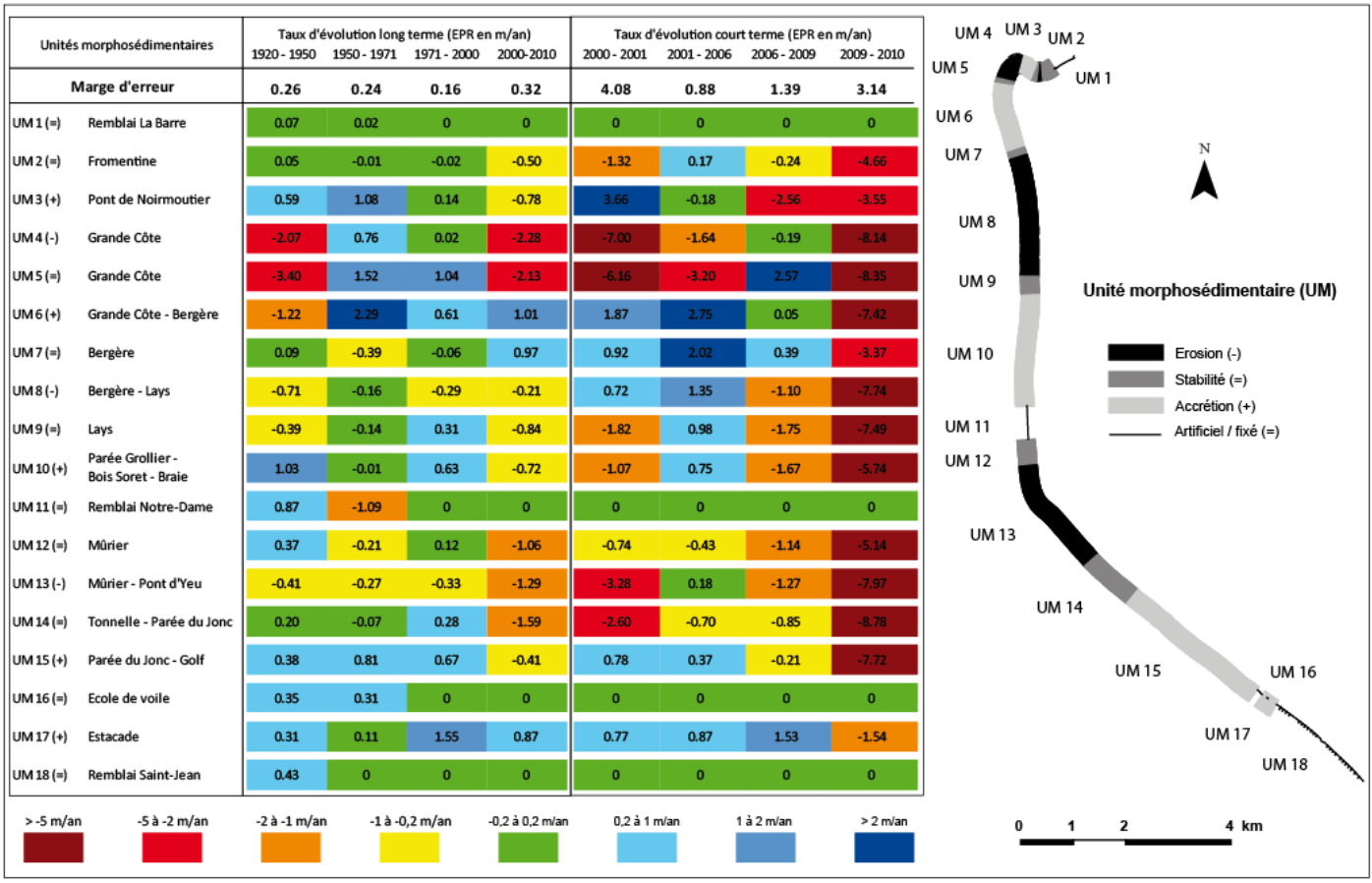


Fig. 9 : Représentation tabulaire des résultats périodiques (EPR) : Segmentation du linéaire côtier en unités morphosédimentaires et discrétisation des taux d'évolution moyennés

IV- 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. En dépit des scénarios du GIEC dont les prévisions laissent penser à une stagnation voire à une augmentation de l'érosion côtière, la tendance à l'intensification de l'érosion aux Pays de Monts depuis la seconde moitié des années 2000 ne doit pas être extrapolée sans prudence pour les années à venir (prédiction de trait de côte).

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 météo-marins semble donc primordiale afin d'écarter 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. En ce sens, une fiche synthétique a été créée (**Fig. 10**) afin d'identifier avec précision les types de contact plage/dune (type 1 à 10) et les entités morphologiques (R1 à R9) et botaniques (V1 à V3) caractérisant le contact plage/dune. A chaque secteur côtier correspond donc un type de profil auquel sont associés un ou plusieurs indicateurs de détection. Cette lecture en deux temps du paysage permet à l'opérateur-terrain et au photo-interprète de guider et de justifier la localisation du trait de côte. Ce document a été réalisé conjointement aux travaux en cours de l'ONF sur le littoral montois. Il constitue un outil d'aide pour le suivi du contact plage/dune dans le cadre d'un observatoire géomorphologique.

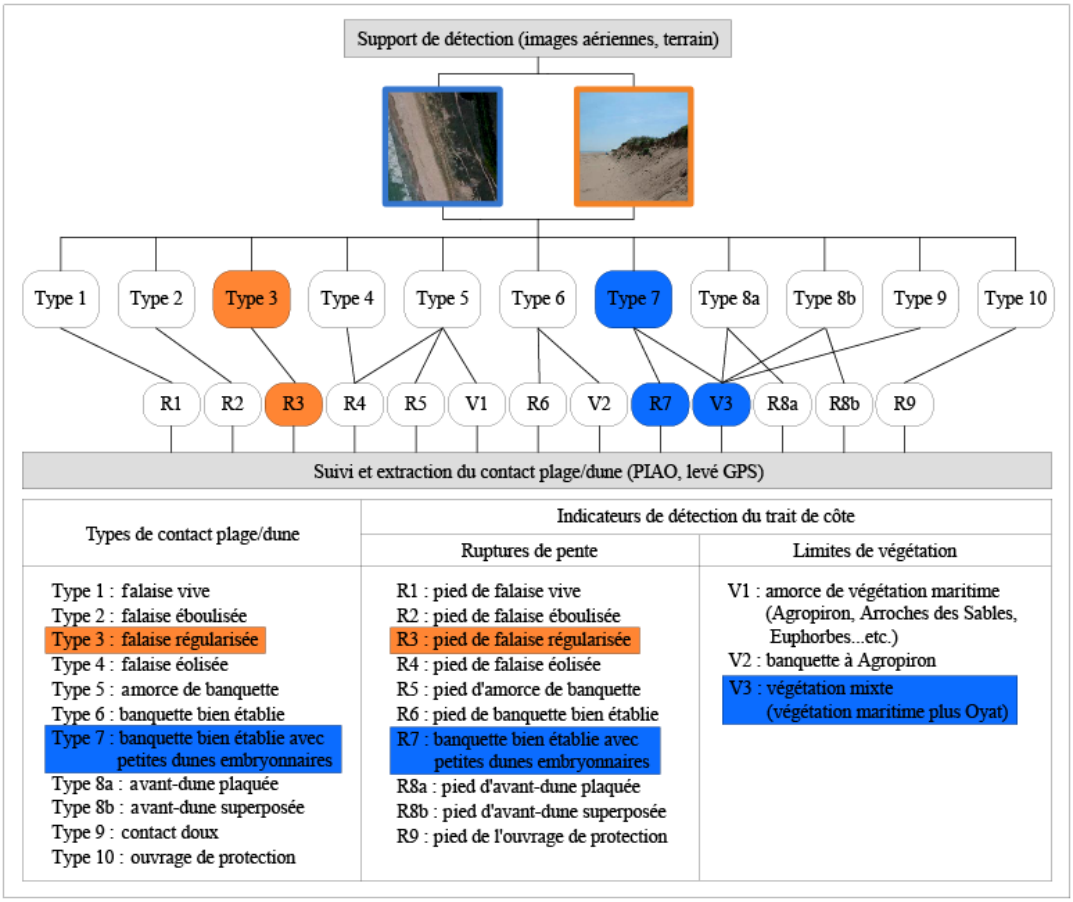


Fig. 10 : Fiche synthétique de localisation du trait de côte *in situ* et à partir d'images aériennes

Remerciements : Les auteurs tiennent à remercier l'Observatoire Littoral du Pays de Monts (Communauté de communes Océan-Marais de Monts, BRGM, ONF, Université de Nantes) et le soutien du programme DiDune de la Fondation de France (convention avec l'UMR 6554 LETG - LETG Nantes Géolittomer).

Bibliographie

BATTIAU-QUENEY Y., BILLET J.F., CHAVEROT S., LANOY-RATEL P. - 2003 - Recent mobility and geomorphologic evolution of macrotidal sandy beaches in the north of France, *Marine Geology*, volume 194, issues 1-2, p.31-45.

BOAK H., TURNER I.L. - 2005 - Shoreline Definition and Detection: A Review, *Journal of Coastal Research,* volume 21, n°4, p.688-703.

BRUZZI C., PROVANSAL M. - 1996 - Impacts morphosédimentaires des tempêtes sur les Côtes de Provence, *Quaternaire*, volume 7, numéro 2-3, p. 129-137, http://www.persee.fr/

CAUVIN C., REYMOND H., SERRADJ A. - 1987 - Discrétisation et représentation cartographique, Montpellier, GIP Reclus (Col. Reclus modes d'emploi), 116 p.

COHEN O., DOLIQUE F., ANTHONY E. J. et HEQUETTE A. - 2002 - L'approche morphodynamique en géomorphologie littorale. *In* (BARON-YELLES N., GOELDNER-GIONELLA L., VELUT S., Ed.) *Le littoral,*

regards, pratiques et savoirs. Etudes offertes à Fernand VERGER. Edition Rue d'Ulm / Presses universitaires de l'Ecole Normale Supérieure, Paris, p. 191-214.

CROWELL M., LEATHERMAN S.P, BUCKLEY M.K. - 1991 - Historical Shoreline Change : Error Analysis and Mapping Accuracy, *Journal of Coastal Research*, volume 7, n°3, p. 839-852.

DEL RIO L., GRACIA F. J., BENAVENTE J. - 2012 - Shoreline change patterns in sandy coasts. A case study in SW Spain, *Geomorphology*, 15 p., http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.07.027.

DOLAN R., FENSTER M.S., HOLME S.J. - 1991 - Temporal Analysis of Shoreline Recession and Accretion, *Journal of Coastal Research*, volume 7, n°3, p. 723-744.

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,* N°2000/1-2, p. 3-18.

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* n°11, ONF, p. 93-108.

GAILLOT S., CHAVEROT S. - 2001 - Méthode d'étude des littoraux à faible évolution. Cas du delta du Golo (Corse) et du littoral du Touquet (Pas-de-Calais) en France, *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, volume 7, numéro 1, p. 47-54, http://www.persee.fr/.

GENTZ A.S., FLETCHER C.H., DUNN R.A., FRAZER L.N., ROONEY J.J. - 2007 - The Predictive Accuracy of Shoreline Change Rate Methods and Alongshore Beach Variation on Maui, Hawaii, *Journal of Coastal Research*, volume 23, n°1, p.87-105.

GEOS-DHI - 2008 - *Etude de connaissance des phénomènes d'érosion sur le littoral vendéen*, 356 p.

GOUGUET L. - 2010 - Observatoire du littoral des Pays de Monts - description des tronçons, Note ONF du 01/09/2010, 16 p.

GOULEAU D. - 1968 - *Etude hydrologique et sédimentologique de la baie de Bourgneuf*, Thèse de 3e cycle, Université de Nantes, 193 p.

HAPKE C. J., REID D., RICHMOND B.M., RUGGIERO P., 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., http://pubs.usgs.gov/.

IFEN - 2006 - Un quart du littoral recule du fait de l'érosion, *le quatre page*, no. 113.

LE GUERN C., SUAUD S., LEGRAS L., FATTAL P., GOUGUET L., ROBIN M., BAUDOIN V., MALLET C. avec la collaboration de MAANAN M., RAMON N., DEBAINE F., RENAULT R., JAOUEN J., CONIL P., BOUCHET F., FAVENNEC J. - 2011 - Observatoire du littoral des Pays de Monts - Synthèse des réalisations 2010, Rapport BRGM RP-59538-FR, 211 p.

MOORE L. J. - 2000 - Shoreline mapping techniques, *Journal of Coastal Research*, volume 16, n°1, p.111-124.

MORTON R.A, 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, http://pubs.usgs.gov/.

PINOT J.P. - 1980 - Le Marais de Monts, *Cahier Nantais*, n°18, p. 7-18.

RIVRON J.P. (sdr.) - 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 n°1, 12 p.

ROBIN M. - 2002 - Télédétection et modélisation du trait de côte et de sa cinématique. *In* (BARON-YELLES N., GOELDNER-GIONELLA L., VELUT S., Ed.) *Le littoral, regards, pratiques et savoirs. Etudes offertes à Fernand VERGER*. Edition Rue d'Ulm / Presses universitaires de l'Ecole Normale Supérieure, Paris, p. 95-115.

RUZ M.-H., 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*, n°60, p. 73-87, http://www.sciencedirect.com/

SABATIER F., ANTHONY E.J., HEQUETTE A., SUANEZ S., MUSEREAU J., RUZ M.-H., REGNAULD H. - 2009 - Morphodynamics of beach/dune systems : examples from the coast of France, *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, n°1, p. 3-22, http://geomorphologie.revues.org/.

SUANEZ S., 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*, n°2, p. 91-110, http://geomorphologie.revues.org/.

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., ERGUL, AYHAN - 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., http://pubs.usgs.gov/.

VERGER F. - 1968 - *Marais et wadden du littoral français : étude de géomorphologie*, Thèse de Lettres, Paris, 549 p.

Annexe 2

Détermination de la hauteur de falaise vive moyenne à partir des jeux de données disponibles

Secteurs homogènes			Observations et mesures des falaises vives in-situ post Xynthia									Synthèse photos et profils	
			Typologie du contact plage/dune (ONF)			Analyse profils de plage et photos du 27 au 30 avril 2010				Analyse des photos de terrain (ONF-ComCom-BRGM)			
Id	NOM GENERIQUE	longueur (m)	ID Typo contact Plage-Dune	Description et caractéristique avant-dune et dune	Hauteur moyenne 1er cordon (m)	N° de profil	Hauteur de falaise vive sur le profil	Appréciation du secteur au droit du profil à partir des photos de la campagne	Valeur retenue	Nom Section (accès/lieu-dit/plage)	Hauteur falaise vive mesurée et/ou estimée in situ (m)	Hauteur moyenne falaise vive dunaire retenue (m)	Rapport entre falaise vive et hauteur du cordon (%)
1	Front urbain de Fromentine	416			0	P1	0	0	0	Plage front urbain	0	0	NC
2	Plage de Fromentine	381	T01	Cordon dunaire calibré	7,5	P2	1.5m?	1.5m		Plage de Fromentine	1.2-2m	1,8	24
3	Plage de Fromentine, partie W	250	T02	Cordon dunaire non calibré, pulstalus du pied du port	5	P2	1.5m?	1.5m		Est Port Fromentine	0,5	0,5	10
4	Plage de la Grande Côte	786	T03	Banquette plaquée sur très large dune embryonnaire, avec gouttière en partie centrale. Cordon dunaire marqué par des phases successives d'accrétion	5	P3	0	?m	0	Ouest Port / Grande Côte	0,3	0	0
5	Plage de la Grande Côte, partie S	309	T04	Banquette entaillée, plaquée sur un large cordon de dune blanche, peu élevé.	7					Grande Côte Sud	1	0,8	11
6	Plage de la Bergère	1241	T05	Puissante banquette plaquée sur dune blanche au S, gouttière au N, dune blanche élevée	10	P4-P5	0-0.5m	0m	0	Bergère / Blanc Mesnil	0	0	0
7	Plage de la Bergère Sud	232	T06	Puissante banquette plaquée sur dune blanche élevée	12					Blanc Mesnil	0.5-1.5m	1,2	10
8	Plage des Lays	1476	T06-T07	Dune blanche, étroite et entaillée	7					Les lays / Parée Cailloche / Parée Verte	2.2-3m	2,7	39
9	Plage de la Parée Grollier	1512	T07-T08	Cordon de dune blanche peu élevé à très bas, voire absente, dune grise entaillée	2					Parée Grollier / Bois Soret / Parée Tardy - Davière	1 m à 1.7 m	1,2	60
10	Plage des Régates et de la Braie	902	T08-T09	Cordon de dune blanche peu élevé	3	P6-P7	1.7-3.5m	2-3m	2,5	Braie / Parée Chalon / NdM Nord - Ecole de voile / Régates	1.5-3m	2,3	77
11	La Plage du front urbain de Notre Dame de Monts	870	T10			P8	0		0	Plage	0	0	NC
12	Plage du Murier	324	T11-T12	Cordon de dune blanche	2,5	P9	2.5m	3m	2,5	NdM Sud / Murier	1.5-3m	2,5	100
13	Plage du Pont d'Yeu	1069	T12-T13	Cordon bordier	4	P9-P10 P11	2.5-3.5-3.5m	3-3.5-3.5m	3	Pont d'Yeu Nord / Sud	3-4m	3,5	88
14	Hippodrome	761	T14	Cordon bordier irrégulier, s'abaissant au centre du tronçon, découpé par 3 passages	5	P12-P13	2-4m	?-4m	3	Hippodrome	1-4 m	2,8	56
15	Plage de la Tonnelle	1560	T15	Cordon de dune blanche élevé (8-10m), entaillé jusque dans la dune grise par endroit	8	P13-P14	4-3.5m	4-?m	4	Tonnelle / Parée du cimetière Nord	3-8 m	5	63
16	Plage de la Parée de Jonc et de la Davière	2624	T16-T17-T18	Cordon de dune blanche à oyats (3-6m au nord, puis 3-4m au niveau du golf/VVF)	5	P14-P15-P16	3.5-3.5?-2m	?-3-2m	3	Parée du Jonc Sud - Davière / Golf-VVF	2-3.5m	3	60
17	Plage de la Parée Jésus	551	T18-T21	Cordon de dune en avant d'un front urbain	2,5	P17-P18	0.5?-1.5m	?-1.5m	1	Parée Jésus / St Jean Nord	0.8m	1	40
18	Plage des Demoiselles	2899	T22	Dune absente (sauf toute petite partie extrême sud)	0	P19	0	0		Front urbain de St Jean / St Jean Sud	0-3m	0	NC

Légende couleur appliquée dans le tableau

Hauteur de falaise vive retenue en m	***Fourchette***	***Couleur***
Remblai - Front	NC	
Nul à très faible	0 - 0,5 m	
Faible	0,5 - 1,5 m	
Moyenne	1,5 - 2,5 m	
Elevée	2,5 - 4 m	
Très élevée	>= 4 m	

Rapport entre falaise vive et hauteur du cordon bordier	***Fourchette***	***Couleur***
Remblai - Front	NC	
Nul à très faible	0 - 20 %	
Faible	20 - 40 %	
Moyenne	40 - 60 %	
Elevée	60 - 80 %	
Très élevée	80 - 100 %	

Annexe 3

Quelles solutions techniques et/ou stratégiques ?

Parmi les solutions techniques et/ou stratégiques permettant de faire face aux risques d'érosion et de submersion marine, on peut citer :

- La relocalisation des biens et activités
- Le rechargement de plage (cf. rapport 2011, Le Guern *et al*., 2012)
- Des techniques douces (ganivelles, fil lisse, drainage de plage, brise-lame, épi souple, …)(cf. Illustration)
- Des protections dures (enrochements, brise-lame…)

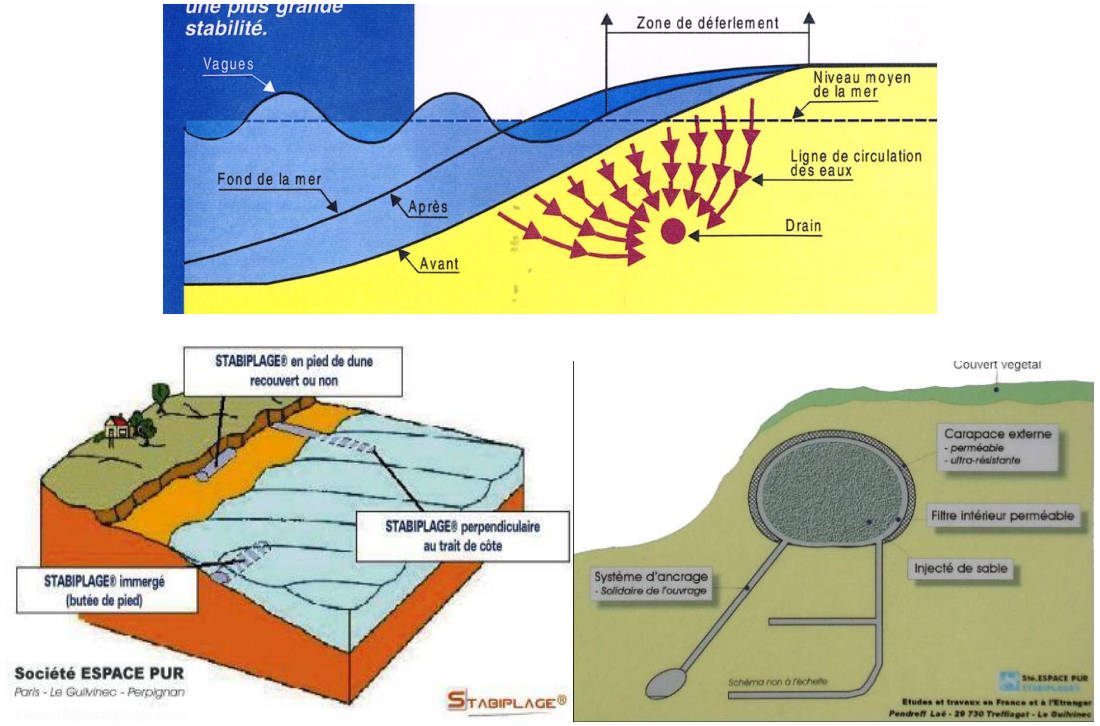


Illustration : Exemple de techniques douces de lutte contre l'érosion (drainage en haut, procédé Stabiplage® en bas)

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34 - **www.brgm.fr**

Direction Régionale des Pays de la Loire
1, rue des Saumonières
BP 92342
44323 NANTES cedex 3 France
Tél. : 02.51.86..01.51