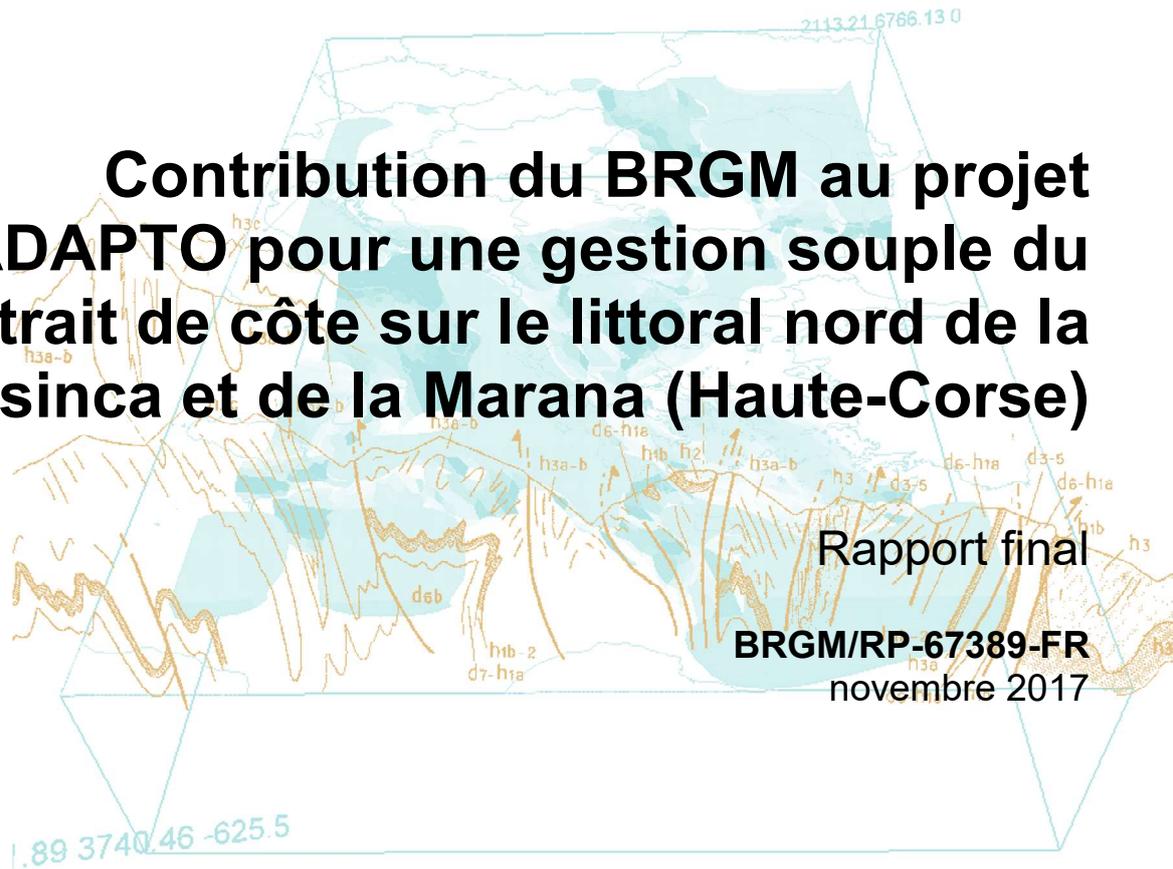




Contribution du BRGM au projet ADAPTO pour une gestion souple du trait de côte sur le littoral nord de la Casinca et de la Marana (Haute-Corse)



Rapport final

BRGM/RP-67389-FR
novembre 2017



Conservatoire du littoral



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Contribution du BRGM au projet ADAPTO pour une gestion souple du trait de côte sur le littoral nord de la Casinca et de la Marana (Haute-Corse)

Rapport final

BRGM/RP-67389-FR
novembre 2017

Étude réalisée dans le cadre des opérations de service public du
BRGM 2017-OBS-07 et de la convention de recherche et développement
partagés entre le BRGM et le Conservatoire du littoral signée le 08/03/2016

A. Stépanian, R. Belon
Avec la collaboration de
A. Calistri

Vérificateur :

Nom : Y. Balouin

Fonction : Expert littoral

Date : 07/02/2018

Signature :



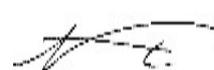
Approbateur :

Nom : N. Frissant

Fonction Directeur régional :

Date : 22/03/2018

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.
Contact : qualite@brgm.fr



Conservatoire du littoral



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés : Erosion littorale, trait de côte, changement climatique, Lido de la Marana, Embouchure du Golo, Haute-Corse

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

Stépanian A., Belon R., et Calistri A. (2017) – Contribution du BRGM au projet ADAPTO pour une gestion souple du trait de côte sur le littoral nord de la Casinca et de la Marana (Haute-Corse). Rapport final. BRGM/RP-67389-FR, 84 p., 56 ill., 3 ann., 1 CD.

© BRGM, 2017, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

En 2015, le Conservatoire du littoral a lancé au niveau national un projet baptisé ADAPTO dont l'objectif est de mettre en valeur une dizaine de démarches locales d'adaptation associant des sites du Conservatoire et les territoires environnants soumis aux aléas d'érosion côtière ou de submersion marine. Ce projet vise à montrer de façon concrète, par ces exemples locaux, qu'une anticipation raisonnée acceptant la mobilité de l'interface terre-mer sur des espaces naturels préservés est possible. Au niveau de la délégation Corse du Conservatoire du Littoral, le site retenu est l'embouchure du Golo qui comprend le littoral nord de la Casinca et le littoral de la Marana. Compte-tenu de l'implication du BRGM en Corse sur la problématique de l'érosion côtière et de submersion marine, au travers, en particulier du Réseau d'Observation du Littoral Corse (ROL)¹ le BRGM a mis à disposition dans le cadre d'une convention avec le Conservatoire du Littoral ses compétences thématiques et de nombreuses données acquises sur le littoral de la Plaine orientale de Corse.

Deux actions principales ont été définies dans le cadre de ce projet et font l'objet du présent rapport :

- mieux connaître l'évolution morphologique de 3 secteurs du site ADAPTO ;
- évaluer la position future du trait de côte à l'échéance 2050 sur l'ensemble du site.

Les secteurs retenus dans le cadre du projet ADAPTO sont caractérisés par un contexte géomorphologique et hydrodynamique complexe avec la présence du grau de l'étang de Biguglia, de l'embouchure du Golo, des morphologies sous-marines prononcées et une orientation de la côte face aux agents marins différente d'un site à l'autre. L'objectif est de mieux comprendre l'évolution de ces secteurs à différentes échelles temporelles tout en essayant de cerner dans la mesure du possible le processus prédominant de cette dynamique (tempêtes, dérive littorale, apports sableux...). Une analyse géomatique de l'évolution de la position du trait de côte est ainsi produite permettant de quantifier les évolutions interannuelles du trait de côte et du pied de dune. Ces évolutions sont confrontées à la fois aux données de houle et aux actions menées par le Conservatoire pour mieux comprendre les évolutions constatées.

L'évaluation de la position future du trait de côte a été produite selon une approche historique consistant à extrapoler les tendances d'évolution actuelle afin d'estimer la position future du trait de côte en faisant l'hypothèse d'une remontée du niveau de la mer identique à celle observée ces dernières décennies. Cette méthodologie, employée actuellement dans l'élaboration des Plans de Prévention des Risques Littoraux est soumise à un grand nombre d'incertitudes et d'approximations, en fonction de la prise en compte du changement climatique global et de la remontée progressive du niveau de la mer, et de la prise en compte des reculs ponctuels liés à l'impact des tempêtes. Ainsi, pour cette évaluation prospective du devenir du littoral, des choix méthodologiques ont été faits pour la prise en compte du changement climatique, avec l'utilisation du modèle de Bruun (1966), et la caractérisation du recul maximal lié à un événement de tempête a été estimée sur la base des relevés des positions du pied de dune réalisés dans le cadre du ROL sur l'ensemble du lido de Marana.

¹ www.littoral-corse.fr

Globalement, les degrés d'incertitude de cette projection restent importants sur la majeure partie du littoral, même sur les secteurs où les tendances d'évolution déterminées sur la base des observations historiques sont globalement constantes et homogènes :

- celles-ci se rencontrent essentiellement au niveau des zones naturelles, non influencées par les dynamiques hydro-sédimentaires complexes des embouchures et/ou la présence d'ouvrages côtiers ;
- les plus fortes incertitudes restent localisées au niveau des zones où l'évolution du littoral est complexe. Il s'agit de secteurs où les limites de l'analyse statistique de l'outil SIG DSAS² ont été identifiées. Il s'agit essentiellement de secteurs où des phases d'érosion et d'accrétion se sont succédées, si bien qu'il est difficile de déterminer précisément les évolutions futures.

L'intérêt de cette analyse prospective est d'estimer la fenêtre temporelle sur laquelle le Conservatoire du Littoral pourra mettre en œuvre des actions de gestion des sites et par la suite observer l'impact de ces actions sur la tendance évolutive de l'espace littoral.

² Digital Shoreline Analysis System (USGS)

Sommaire

1. Introduction.....	11
1.1. CONTEXTE DU PROJET	11
1.2. OBJECTIFS	13
1.2.1. Action 1 : Mieux connaître l'évolution morphologique des sites retenus en Corse pour le projet ADAPTO ;	13
1.2.2. Action 2 : Evaluation de la position future du trait de côte à échéance 2050	13
1.3. ORGANISATION DU RAPPORT	14
2. Le littoral de la Plaine orientale de Corse	15
2.1. GEOMORPHOLOGIE LITTORALE.....	15
2.1.1. Géographie.....	15
2.1.2. Typologie des plages de la Plaine orientale	16
2.1.3. Processus hydro sédimentaires côtiers et cellules sédimentaires	18
2.2. FORÇAGES HYDRODYNAMIQUES ET METEOMARINS.....	20
2.2.1. Marée	20
2.2.2. Vents	20
2.2.3. Vagues	21
2.3. DEFINITION DU TRAIT DE COTE.....	22
3. Données et méthodologie	25
3.1. DONNEES	25
3.1.1. Données de trait de côte.....	25
3.1.2. Données de houle.....	26
3.2. METHODOLOGIE D'ANALYSE DE L'EVOLUTION DU LITTORAL	31
3.2.1. Données et hypothèses	31
3.2.2. Cartographie du trait de côte de référence.....	33
3.2.3. Outil DSAS : Analyse semi-automatique de l'évolution historique du littoral	34
4. Evolution historique du littoral à l'échelle de la cellule Lupino-Golo et de l'extrémité nord de la cellule Golo-Campoloro.....	37
4.1. EVOLUTION HISTORIQUE DU LITTORAL (1937-2013).....	37
4.2. EVOLUTION DIACHRONIQUE INTERMEDIAIRE (1937-1977-2002-2013).....	37
4.3. CONCLUSIONS A L'ECHELLE DE LA CELLULE HYDRO-SEDIMENTAIRE LUPINO-GOLO	42

5. Analyse de l'évolution sur les secteurs ADAPTO	43
5.1. CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES SUR LA PERIODE 2002-2013	43
5.2. AMENAGEMENTS DU CONSERVATOIRE DU LITTORAL.....	45
5.3. SECTEUR N°1	46
5.3.1.Evolution historique 1937-2013	46
5.3.2.Evolution récente 2002-2016.....	47
5.3.3.Synthèse	50
5.4. SECTEUR N°2	50
5.4.1.Evolution historique 1937-2013	50
5.4.2.Evolution récente 2002-2016.....	51
5.4.3.Synthèse	53
5.5. SECTEUR N°3	53
5.5.1.Evolution historique 1937-2013	53
5.5.2.Evolution récente 2002-2013 du trait de côte.....	54
5.6. ROLE DES AMENAGEMENTS	55
5.6.1.A long-terme.....	56
5.6.2.A court-terme.....	58
5.7. CONCLUSIONS SUR L'EVOLUTION MORPHOLOGIQUE DES SECTEURS RETENUS SUR LE SITE ADAPTO.....	60
6. Evolution future du trait de cote.....	63
6.1. MÉTHODOLOGIE	63
6.2. CONSTRUCTION DU TRAIT DE COTE 2050.....	66
6.2.1.Hypothèses et scénarios d'évolution du trait de côte	66
6.2.2.Harmonisation des taux d'évolution bruts	66
6.2.3.Construction du trait de côte 2050.....	69
6.2.4.Détermination du recul lié à un évènement majeur	69
6.2.5.Impact du changement climatique sur le recul du trait de côte de la côte sableuse.....	70
6.2.6.Sources d'incertitudes	75
6.3. RESULTATS	76
6.3.1.Format des données.....	76
6.3.2.Cartographies.....	77
7. Conclusions.....	81
8. Bibliographie	83

Liste des figures

<i>Illustration 1 – Zooms sur les secteurs concernés par le projet ADAPTO, les secteurs 1 et 2 sur le lido de la Marana et le secteur 3 situé au sud de l'embouchure du Golo (images GoogleEarth).</i>	12
Illustration 2 - Physiographie du littoral de la Plaine orientale et principales cellules sédimentaires (Stépanian et al., 2010)	15
Illustration 3 - Géométrie tridimensionnelle des systèmes de barres sous-marines le long du lido de la Marana, mise en évidence par un levé lidar bathymétrique (Balouin et al., 2006)	17
Illustration 4- Morphologies de barres d'avant-côte parallèle (barre interne) et en mega-croissants (barre externe) au niveau du Lido de la Marana ; coupe au niveau de la chicane de la route de la lagune D107 (Levé Lidar BRGM 2010, in Balouin et al ; 2011).	17
Illustration 5 - Processus de transport sédimentaire (apports/pertes) en zone littorale (source : BRGM).	18
Illustration 6 - Définition des cellules sédimentaires en zone littorale (source : BRGM).	19
Illustration 7 - Niveaux moyens de la mer à Bastia (marée moyenne, marnage de 0,2 m ; Données SHOM). A Bastia, le niveau 0 m NGF/IGN78 se situe 0,4 m au dessus du niveau 0 m CM (Cote Marine), défini comme le niveau des plus basses mers.	20
Illustration 8 - Série chronologique 1979-2009 et statistiques des houles au large de Bastia (point Plaine orientale PO1 ; Stépanian et al, 2011).	21
Illustration 9 - Statistiques de la hauteur significative de la houle aux trois points d'extraction (Stépanian et al., 2011)	21
Illustration 10 - Principaux indicateurs du trait de côte pour les côtes sableuses et à falaises rocheuses (Mallet et al., 2012)	22
Illustration 11 - Méthodologies des mesures réalisées dans le cadre du ROL. a : Schéma type d'un profil de plage méditerranéen ; b : Principe d'acquisition du profil aérien ; c : Principe d'acquisition du profil sous-marin ; d : Technique utilisée pour le levé du trait de côte (Belon et Bodéré, 2016).	24
Illustration 12 – Tableau des données relatives au trait de côte et à l'évolution morphologique du littoral disponibles pour les secteurs 1 et 2.	25
Illustration 13 - Caractéristiques des tempêtes au large de la Plaine orientale sur la période 1979-2009.	28
Illustration 14 - Caractéristiques des tempêtes au large de la Plaine orientale sur la période 2010-2011.	29
Illustration 15 - Caractéristiques des tempêtes au large de la Plaine orientale sur la période 2011-2013.	30
<i>Illustration 16 – Evolution de la position du trait de côte entre 1937 et 2016 le long de la Marana – exemple de la zone du Pineto (orthophotographie : ©IGN, 2007)</i>	32
Illustration 17 - Traits de côte de référence retenus sur le littoral du lido (2016 en rouge pour le Nord du Golo, et sur Tanghiccina au sud de la commune de Lucciana, et 2013 en bleu pour la zone au Sud de l'embouchure).	33
<i>Illustration 18 – Méthodologie de l'analyse de l'évolution du trait de côte avec DSAS à l'échelle du littoral et zoom sur le secteur n°2, secteur Pineto-Poretta (orthophotographie : ©IGN, 2007)</i>	34
Illustration 19 - Evolution du trait de côte 1937-2013 du littoral de la Marana et de la Casinca	38
Illustration 20 - Evolution du trait de côte 1937-1977 du littoral de la Marana et de la Casinca	39
Illustration 21 - Evolution du trait de côte 1977-2002 du littoral de la Marana et de la Casinca	40
Illustration 22 - Evolution du trait de côte 2002-2013 du littoral de la Marana et de la Casinca	41
Illustration 23 - Evolution globale du littoral 1937-2013 et taux d'évolution mesuré	42
Illustration 24 - Caractéristiques principales des tempêtes entre 2002 et 2012 pendant la période annuelle des levés du ROL.	44

Illustration 25 - Système de ganivelles en pied de dune sur le littoral de la Marana (secteur n°2 Pinetto-Poretta au nord du Pineto ; vue vers le nord ; crédit photo : Conservatoire du littoral)....	46
Illustration 26 - Evolution du trait de côte 1937-2013 sur le secteur n°1	47
Illustration 27 - Evolution du trait de côte 2002-2016 sur le secteur n°1	48
Illustration 28 - Evolution du pied de dune 2002-2016 sur le secteur n°1	48
Illustration 29 - Synthèse de l'évolution du trait de côte et du pied de dune sur le secteur n°1.....	49
Illustration 30 - Caractéristiques des tempêtes sur les périodes d'analyse de l'évolution du littoral sur le site 1.....	49
Illustration 31 - Evolution du trait de côte 1937-2013 sur le secteur n°2.....	51
Illustration 32 - Evolution du trait de côte 2002-2016 sur le secteur n°2.....	52
Illustration 33 - Evolution du pied de dune 2002-2016 sur le secteur n°2.....	52
Illustration 34 - Synthèse de l'évolution du trait de côte et du pied de dune sur le secteur n° 2.....	53
Illustration 35 - Evolution du trait de côte 1937-2013 sur le secteur n°3.....	54
Illustration 36 - Evolution du trait de côte 2002-2013 sur le secteur n°3.....	55
Illustration 37 - Système de ganivelles en pied de dune sur le littoral de la Marana (secteur n°2 au nord du lotissement de la Marana ; vue vers le sud ; crédit photo : ROL/BRGM, 07/04/2016).....	56
Illustration 38 - Evolution résiduelle du pied de dune sur le secteur 1 avant (2002-2004) et après les aménagements (2004-2016).....	57
Illustration 39 - Evolution résiduelle du pied de dune sur le secteur 2 avant (2002-2004) et après les aménagements (2004-2016).....	57
Illustration 40 - Différentiel altimétrique entre 2013 (données Lidar DDTM2B) et 2010 (données lidar BRGM/OEC).	58
Illustration 41 - Dépôts éoliens en arrière des ganivelles - Secteur Pineto-Poretta (2016, Conservatoire du littoral)	59
Illustration 42 – Systèmes de ganivelles en plusieurs rangées sur le secteur Pineto-Poretta (2016, Conservatoire du littoral).....	59
Illustration 43 - Méthodologie de la projection de la position du trait de côte du lido de la Marana à l'horizon 2050 (d'après Bernon et al., 2016, modifié).	64
Illustration 44 - Taux d'évolution du trait de côte (LMS) pour chaque transect le long du littoral.....	65
Illustration 45 - Harmonisation des taux et sectorisation du littoral en tronçons au comportement homogène	67
Illustration 46 - Sectorisation du littoral en tronçons au comportement homogène. En grisé dans le tableau, les zones qui ont fait l'objet d'une correction des taux à dire d'expert (orthophotographie : ©IGN, 2007).	68
Illustration 47 – Exemple de relation entre les entailles d'érosion dunaire et les position des barres externes sur la Côte Aquitaine (photographie du 7 mars 2014 entre Lacanau et le Porge par Julien Lestage, dans Castelle et al., 2015).....	70
Illustration 48 - Schéma des paramètres pris en compte pour l'application de la règle de Bruun, avec une translation verticale et vers la terre du profil d'équilibre à cause d'une élévation du niveau de la mer (d'après Pilkey et Cooper, 2004)	71
Illustration 49 - Schéma d'implantation du site Lido de la Marana (© IGN SCAN 25).	72
Illustration 50 - Site Lido de la Marana, profil nord (San Damiano) – 2002 à 2013.	73
Illustration 51 - Site Lido de la Marana, profil sud (CCAS) – 2002 à 2013.....	74

Illustration 52 - Estimation du recul lié au changement climatique d'après la règle de Bruun (Bruun, 1962)	75
Illustration 53 - Symbologie des traits de côte prospectifs le long de la Marana.	77
Illustration 54 – Evolution prospective du trait de côte sur le secteur n°1 (orthophotographie : ©IGN, 2007)	78
Illustration 55 – Evolution prospective du trait de côte sur le secteur n°2 (orthophotographie : ©IGN, 2007)	79
Illustration 56 – Evolution prospective du trait de côte sur le secteur n°3 (orthophotographie : ©IGN, 2007)	80

Liste des annexes

Annexe 1 Planches cartographiques de l'évolution historique du trait de côte (1937-2016) et du pied de dune (2002-2016) sur le Secteur n°1	85
Annexe 2 Planches cartographiques de l'évolution historique du trait de côte (1937-2016) et du pied de dune (2002-2016) sur le Secteur n°2	93
Annexe 3 Planches cartographiques de l'évolution historique du trait de côte (1937-2016) sur le Secteur n°3	101

1. Introduction

1.1. CONTEXTE DU PROJET

En 2015, le Conservatoire du littoral a lancé au niveau national un projet baptisé ADAPTO dont l'objectif est de mettre en valeur une dizaine de démarches locales d'adaptation associant des sites du Conservatoire et les territoires environnants soumis aux aléas d'érosion côtière ou de submersion marine. Ce projet vise à montrer de façon concrète, par ces exemples locaux, qu'une anticipation raisonnée acceptant la mobilité de l'interface terre-mer sur des espaces naturels préservés est possible.

Au niveau de la délégation Corse du Conservatoire du Littoral, le projet ADAPTO s'est proposé de décrire et d'analyser le site retenu sous les angles suivants :

- connaissance des aléas et du comportement physique de l'interface terre-mer, en fonction des principaux scénarios envisageables de l'espace côtier ;
- effets prévisibles en termes de biodiversité et de paysage ;
- analyse des conséquences en termes de risques et d'activités économiques ;
- perception des habitants et des responsables locaux sur les enjeux présents et les solutions possibles.

Le site retenu pour la Corse est l'embouchure du Golo qui s'étend du lido de la Marana jusqu'au Nord de la Casinca (Illustration 1).

Compte-tenu de l'implication du BRGM en Corse sur la problématique de l'érosion côtière et de submersion marine, au travers, en particulier du Réseau d'Observation du Littoral Corse (ROL)³ (Belon et Bodéré., 2016) et des études menées sur le littoral de la Plaine orientale avec la DDTM 2B (Balouin et al., 2011), le BRGM a mis à disposition dans le cadre d'une convention avec le Conservatoire du littoral ses compétences thématiques et de nombreuses données acquises sur le littoral de la Plaine orientale de Corse.

³ www.littoral-corse.fr

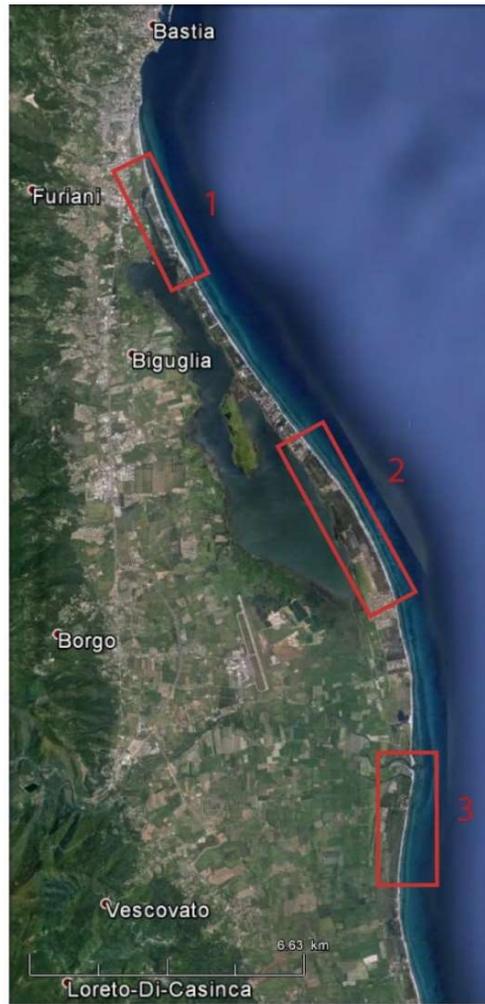


Illustration 1 – ZOOMS sur les secteurs concernés par le projet ADAPTO, les secteurs 1 et 2 sur le lido de la Marana et le secteur 3 situé au sud de l'embouchure du Golo (images GoogleEarth)

1.2. OBJECTIFS

Deux actions principales sont définies dans le cadre de ce projet et font l'objet du présent rapport :

- mieux connaître l'évolution morphologique des 3 secteurs identifiés sur le site ADAPTO ;
- évaluer la position future du trait de côte à l'échéance 2050 sur tout le site.

1.2.1. Action 1 : Mieux connaître l'évolution morphologique des sites retenus en Corse pour le projet ADAPTO ;

Les trois secteurs retenus sont caractérisés par des contextes géomorphologiques et hydrodynamiques complexes avec la présence du grau de l'étang de Biguglia, de l'embouchure du Golo, des morphologies sous-marines prononcées et une orientation de la côte face aux agents marins différente d'un site à l'autre.

L'objectif de cette action est donc de mieux comprendre l'évolution de ces secteurs à différentes échelles temporelles tout en essayant de cerner dans la mesure du possible le processus prédominant de cette dynamique (tempêtes, dérive littorale, apports sableux...).

Pour cela, les données déjà acquises lors de précédentes études issues du Réseau d'Observation du Littoral, du partenariat entre le BRGM et la DDTM 2B, ainsi que celles propres au Conservatoire du Littoral ont été valorisées dans le cadre de ce projet.

Une analyse géomatique de l'évolution de la position du trait de côte est ainsi produite permettant de quantifier les évolutions interannuelles du trait de côte et du pied de dune sur des transects. Ces évolutions sont confrontées à la fois aux données de houle et aux actions menées par le Conservatoire pour mieux comprendre les évolutions constatées.

1.2.2. Action 2 : Evaluation de la position future du trait de côte à échéance 2050

Une évaluation de la position future du trait de côte a été produite selon une approche historique consistant à extrapoler les tendances d'évolution actuelle afin d'estimer la position future du trait de côte en faisant l'hypothèse d'une remontée du niveau de la mer identique à celle observée ces dernières décennies.

Cette méthodologie, employée actuellement dans l'élaboration des Plans de Prévention des Risques Littoraux (MEDDE, 2014) est soumise à un grand nombre d'incertitudes et d'approximations, en fonction de la prise en compte du changement climatique global et de la remontée progressive du niveau de la mer, et de la prise en compte des reculs ponctuels liés à l'impact des tempêtes. Ainsi, pour cette évaluation prospective du devenir du littoral, des choix méthodologiques ont été faits pour la prise en compte du changement climatique, avec l'utilisation du modèle de Bruun (1966), et la caractérisation du recul maximal lié à un événement de tempête a été estimée sur la base des relevés des positions du pied de dune réalisés dans le cadre du ROL sur le lido de la Marana.

L'intérêt de cette analyse prospective est d'estimer la fenêtre temporelle sur laquelle le Conservatoire du Littoral pourra mettre en œuvre des actions de gestion des sites et par la suite observer l'impact de ces actions sur la tendance calculée.

1.3. ORGANISATION DU RAPPORT

Le rapport est organisé de la manière suivante :

- une première partie rassemble les éléments de contexte physique, et hydrodynamique, sur la Plaine orientale de Corse ;
- un rappel sur les données disponibles et sur la méthodologie employée fait l'objet d'un second chapitre ;
- l'évolution historique du littoral est appréhendée à l'échelle de la cellule sédimentaire Lupino-Golo qui incorpore l'ensemble du site ADAPTO ;
- une analyse de l'évolution morphologique à l'échelle de chacun des sites est ensuite produite à une échelle de temps historique (1937-2016) et sur la période récente (2002-2016). Les relations de l'évolution morphologique avec les conditions hydrodynamiques incidentes et avec les aménagements réalisés par le Conservatoire du Littoral sont alors étudiées ;
- enfin, dans une dernière partie, l'analyse prospective de l'évolution du trait de côte à échéance 2050 est détaillée. La méthodologie générale est présentée, mise en œuvre avec les données locales et les résultats cartographiques sont discutés.

En annexes, une synthèse cartographique rassemble les évolutions du trait de côte pour chacun des secteurs du site ADAPTO, concernant la position du trait de côte et la position du pied de dune, aux différentes échelles de temps investiguées.

2. Le littoral de la Plaine orientale de Corse

Le lido de la Marana et le littoral de la Casinca constituent l'extrémité septentrionale du littoral de la Plaine orientale de Corse. Les éléments majeurs de connaissance sur ce linéaire côtiers sont rappelés ci-dessous.

2.1. GEOMORPHOLOGIE LITTORALE

2.1.1. Géographie

La Plaine orientale est un littoral de type « côte basse sableuse » orienté Nord-Sud, relativement rectiligne et homogène, mais le trait de côte y présente cependant des changements d'orientations locaux, en particulier au niveau des embouchures des cours d'eau.

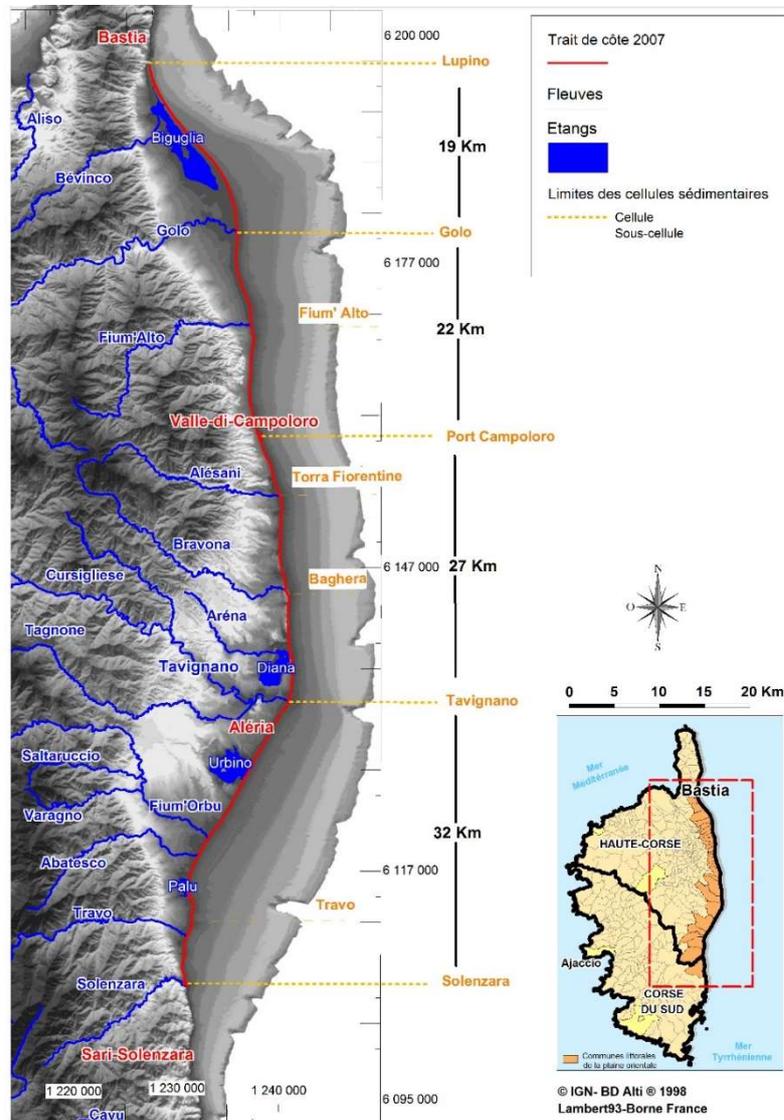


Illustration 2 - Physiographie du littoral de la Plaine orientale et principales cellules sédimentaires (Stépanian et al., 2010)

La Plaine orientale est traversée par de nombreuses rivières qui drainent la région montagneuse centrale de la Corse. Du Nord au Sud, les plus importants sont le Bevinco, le Golo, le Fium'Altu, l'Alésani, l'Alistro, le Fium'Orbo, la Bravona, le Travo, et la Solenzara, qui constitue la limite méridionale de cette plaine.

Le cordon littoral isole également un système de lagunes et d'étangs (Biguglia, Giustiniana, Diana, Urbino, Palu) qui occupent les parties basses de la plaine alluviale. Ces zones humides ont une superficie totale relativement faible, avoisinant les 3000 hectares, mais une grande importance écologique et économique. Elles sont, en particulier, le lieu d'activités aquacoles et conchylicoles.

2.1.2. Typologie des plages de la Plaine orientale

Le long de la Plaine orientale, les plages émergées sont relativement étroites et les massifs dunaires sont peu développés (jusqu'à 2 m d'altitude au maximum), du fait des faibles surfaces de déflation et des potentiels d'apports limités. Les pentes sont relativement fortes avec des valeurs de l'ordre de 4 à 5%.

Au niveau de la ligne de rivage, la plage présente parfois des micro-morphologies typiques construites par le jet de rive dans des conditions de houles faibles à moyenne. C'est le cas de bermes, de croissants de plage voire de petites barres de swash d'amplitude décimétrique. Lorsque les conditions d'énergie des houles augmentent, la plage est soumise généralement à une érosion par les vagues qui se traduit par la création de micro-falaises, cicatrices des niveaux maximums atteints par le jet-de-rive.

La plage sous-marine présente généralement une à plusieurs barres d'amplitude métrique à pluri-métrique dont la formation résulte de processus complexes qui varient très souvent d'un site à l'autre et dont la dynamique influe localement de façon forte l'évolution du trait de côte (Balouin *et al.*, 2007 ; Stépanian *et al.*, 2009). En effet, la morphologie de ces barres peut être linéaire longitudinalement mais elles présentent plus généralement des morphologies tridimensionnelles avec des formes en croissant de plusieurs centaines de mètres de longueur d'onde (Illustration 3 et Illustration 4).

Sur le domaine sous-marin, tout le long de la Plaine orientale, un herbier de posidonies (site NATURA 2000 FR9402014 « Grand herbier de la côte orientale ») s'étend de manière homogène du Nord au Sud à partir de -10 à -12 m NGF/IGN78 et délimite ainsi vers le large les zones sableuses qui sont potentiellement des zones « sources » de sédiments pour la plage émergée (Pasqualini, 1997).

Enfin, une particularité des plages de la Plaine orientale, est qu'en raison de la présence proche du grand herbier de posidonies, les laisses de mer, qui sont constituées essentiellement de bois flottés, incluent selon les secteurs et selon les années des débris de posidonies qui s'accumulent en « banquettes » sur la plage émergée. Ces accumulations, dont l'épaisseur peut atteindre plus d'un mètre ont un rôle non-négligeable sur la protection de la plage aux vagues de tempêtes par leur « rôle d'amortissement » du jet de rive dans ces conditions.

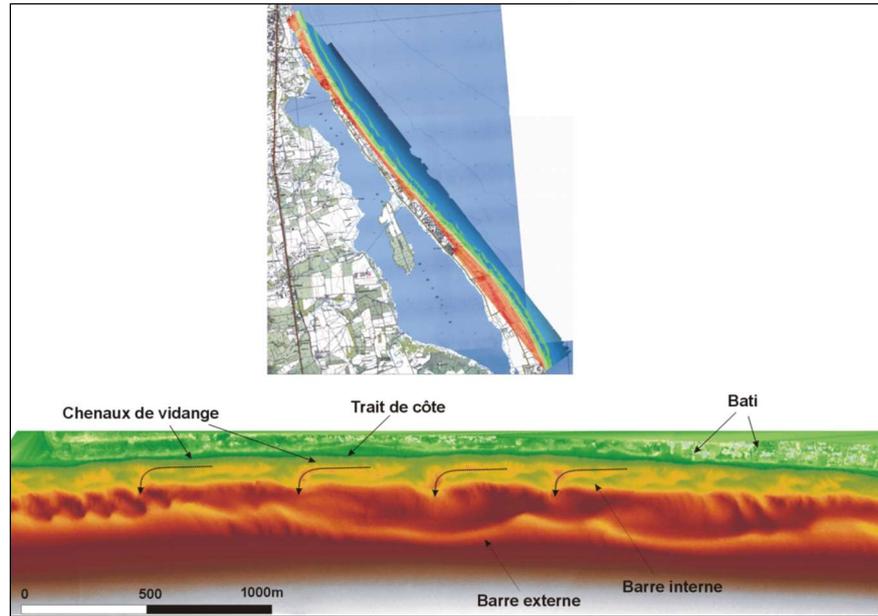


Illustration 3 - Géométrie tridimensionnelle des systèmes de barres sous-marines le long du lido de la Marana, mise en évidence par un levé lidar bathymétrique (Balouin et al., 2006)

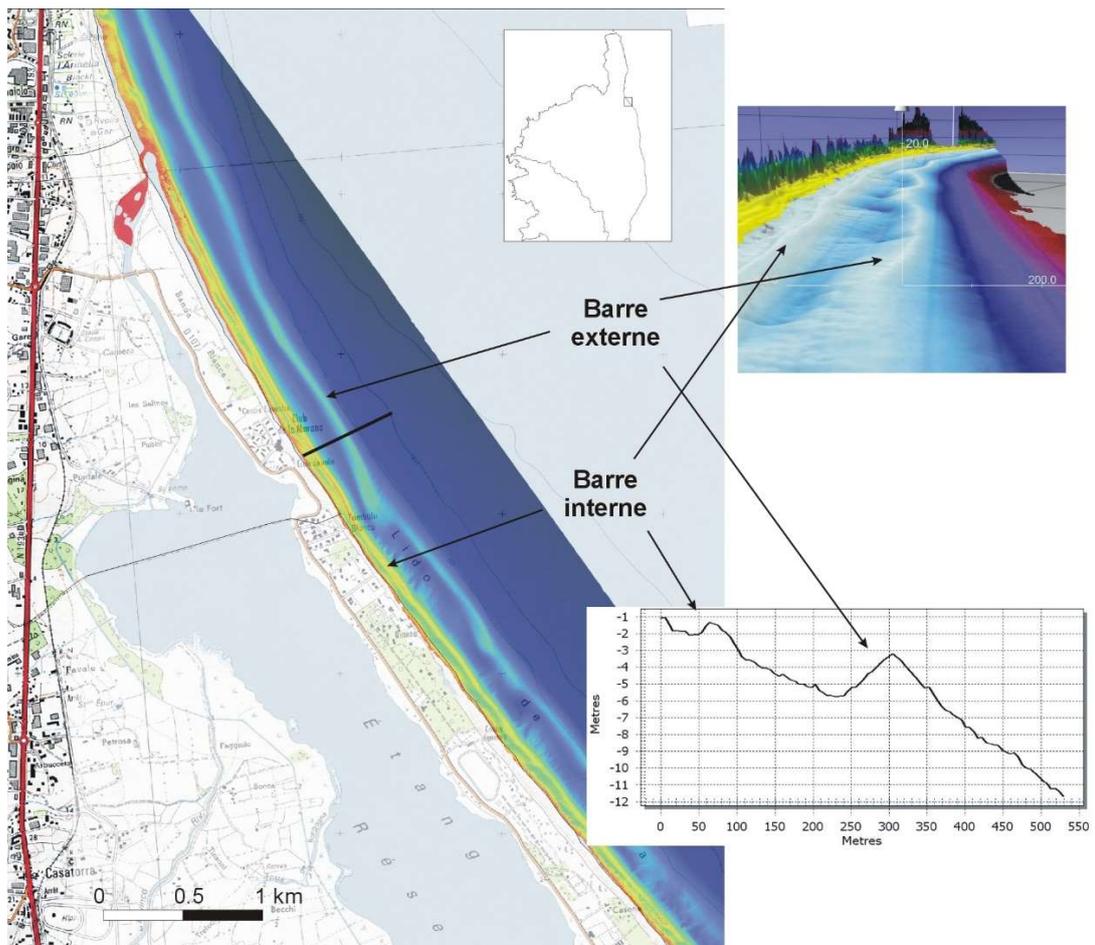


Illustration 4- Morphologies de barres d'avant-côte parallèle (barre interne) et en mega-croissants (barre externe) au niveau du Lido de la Marana ; coupe au niveau de la chicane de la route de la lagune D107 (Levé Lidar BRGM 2010, in Balouin et al ; 2011).

2.1.3. Processus hydro sédimentaires côtiers et cellules sédimentaires

a) Processus de transport sédimentaire

Le littoral est un système dont l'équilibre dynamique dépend des échanges et des transferts de sédiments qui se produisent latéralement sous l'action des houles et des courants, avec l'arrière-plage et entre le large et la côte (Illustration 5). Le rôle des embouchures avec les apports sédimentaires des fleuves joue également un rôle très important dans le bilan sédimentaire littoral.

A une échelle de temps longue, de construction du prisme littoral, le rôle de la dérive littorale est prépondérant dans les transports sédimentaires. La construction est perturbée épisodiquement par l'impact des tempêtes qui modifient ponctuellement les plages et le trait de côte de manière transversale.

A ces forçages naturels, s'ajoutent également les actions humaines qui tendent à différentes échelles de temps, à :

- faciliter les processus naturels : pose de brise-vent, ganivelles pour favoriser les dépôts éoliens en pied de dune, pose d'ouvrages pour diminuer l'impact des vagues sur la côte ;
- intervenir artificiellement et directement sur le budget sédimentaire par des apports (rechargements) ou des pertes (extraction, dragage, barrage en amont des fleuves).

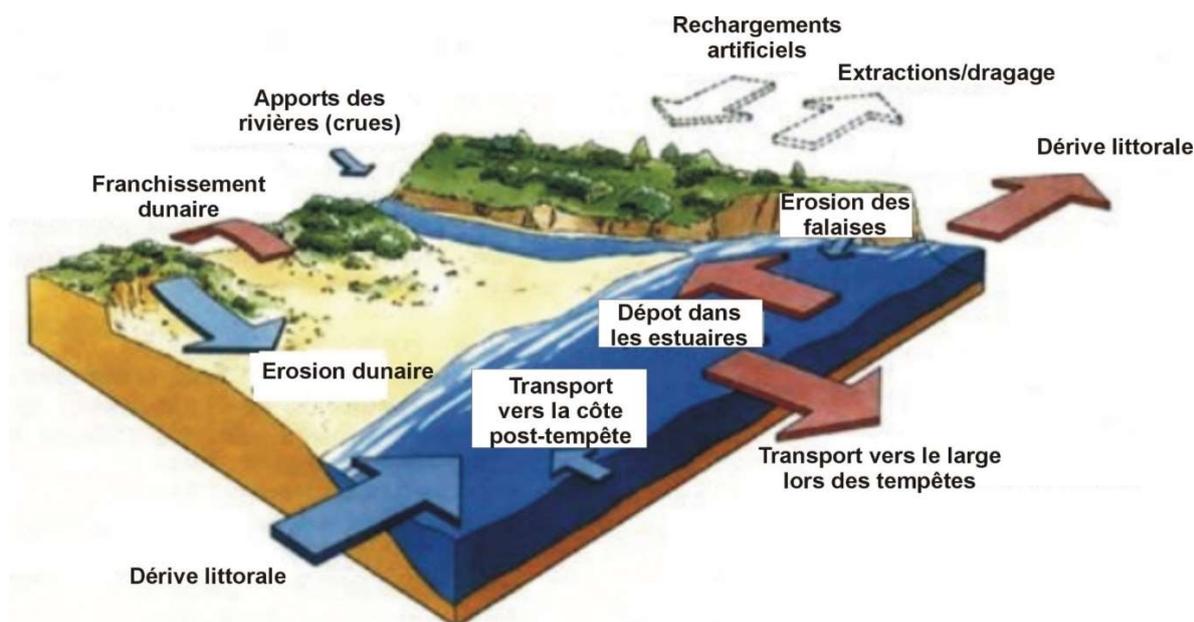


Illustration 5 - Processus de transport sédimentaire (apports/pertes) en zone littorale (source : BRGM)

C'est un système ouvert et il est d'usage d'appréhender son équilibre au travers de l'analyse de son bilan sédimentaire au sein d'unités homogènes dont les limites spatiales n'ont rien de commun avec les limites administratives (MEEDDM, 2010).

b) Cellules sédimentaires

Ces unités d'analyse sont les cellules sédimentaires qui sont des portions de la côte à l'intérieur desquelles les circulations sédimentaires ont un fonctionnement autonome par rapport aux portions voisines. Leurs limites sont ainsi constituées soit par des ouvrages maritimes, soit par

des obstacles naturels (caps, embouchures,) importants qui bloquent ou modifient les transits sableux sous l'action de la dérive littorale. Les limites latérales peuvent être d'origine naturelle (embouchures, pointements rocheux) ou bien anthropiques (ports, épis...). Une limite de cellule sédimentaire correspond généralement à une inversion de sens de la dérive littorale et par conséquent du transport sédimentaire associé (Illustration 6).

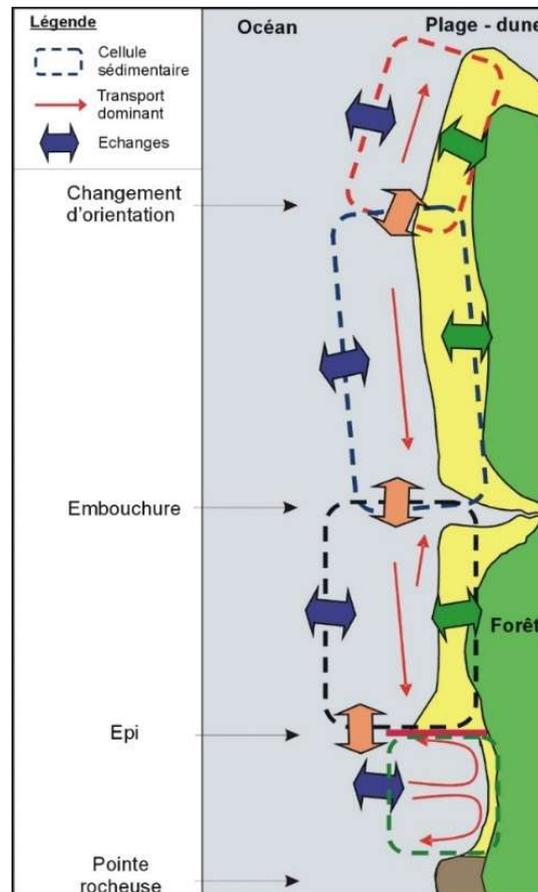


Illustration 6 - Définition des cellules sédimentaires en zone littorale (source : BRGM).

Le littoral de la Plaine orientale est ainsi constitué de quatre grands compartiments hydrosédimentaires, délimités principalement en fonction des embouchures des fleuves côtiers (SDAGE AERMC, 2005 ; représentation sur l'illustration 2) :

- cellule « Lupino-Golo » ;
- cellule « Golo-Campoloro » ;
- cellule « Campoloro-Tavignano » ;
- cellule « Tavignano-Solenzara ».

Les secteurs du site ADAPTO se situent dans la cellule «Lupino-Golo» pour les deux secteurs sur le lido de la Marana et à l'extrémité nord de la cellule «Golo-Campoloro» pour le secteur sur le littoral de la Casinca.

La cellule « Lupino-Golo » est délimitée par deux frontières naturelles et présente un linéaire côtier d'environ 19 km. La limite nord est marquée par une modification de la morphologie côtière. Au niveau du lieu-dit « Lupino », la côte passe d'une portion sableuse à une côte purement rocheuse sur laquelle est construite la ville de Bastia. La limite sud de cette première cellule

correspond à l'embouchure du fleuve Golo. Le delta sous-marin formé par l'accumulation des dépôts fluviatiles modifie la propagation des houles et ainsi le sens de la dérive littorale. Les volumes charriés par le fleuve sont relativement importants puisqu'ils ont permis l'édification du lido de la Marana au cours de l'Holocène. Cette limite de cellule sédimentaire est également marquée par un changement important de l'orientation de la côte. Au Nord du Golo, la côte est orientée N30 alors qu'au Sud de l'embouchure, le rivage suit un axe pratiquement Nord-Sud.

Le Nord du delta du Golo est bordé par une longue plage d'une vingtaine de kilomètres d'orientation générale Nord-Sud. Cette plage a une largeur moyenne variant généralement entre 30 et 40 m. Son alimentation sédimentaire est assurée principalement par le Golo qui est la plus longue rivière de l'île avec un linéaire de 84 km pour un bassin versant de presque 1000 km². De nombreux petits cours d'eau secondaires participent aussi à son alimentation.

Sur la partie nord de la cellule « Golo-Campoloro », les plages présentent des caractéristiques similaires avec des largeurs de plage de l'ordre de 15 à 40 m et des pentes avoisinant 5°. Les dunes sont typiques des milieux littoraux méditerranéens avec des hauteurs d'environ 1 m. La berme, caractéristique de ces plages, est généralement bien marquée en conditions de beau temps. Vers le Sud en direction du port de Taverna, la largeur des plages diminue et elle devient résiduelle aux abords du port au niveau des falaises rocheuses au Nord du port. Dans ce secteur, le littoral est très souvent stabilisé par des aménagements en enrochements sur le haut de plage.

2.2. FORÇAGES HYDRODYNAMIQUES ET METEOMARINS

La description des forçages hydrodynamiques à l'origine des processus d'évolution du trait de côte et des plages le long de la Plaine orientale est décrite en détails dans Stépanian et al. (2010). Les principaux éléments sont repris ci-dessous de manière succincte.

2.2.1. Marée

En Corse, la marée est caractérisée par un régime de type semi diurne à inégalité diurne avec un marnage microtidal dont l'amplitude maximale en vive-eau ne dépasse pas 0,4 m. L'illustration 6 montre les niveaux moyens de marée à Bastia (d'après le SHOM).

	Pleine Mer	Niveau moyen	Basse mer
Niveau / 0 CM	+0,6	+0,5	+0,4
Niveau / 0 NGF	+0,2	+0,1	0

Illustration 7 - Niveaux moyens de la mer à Bastia (marée moyenne, marnage de 0,2 m ; Données SHOM). A Bastia, le niveau 0 m NGF/IGN78 se situe 0,4 m au dessus du niveau 0 m CM (Cote Marine), définit comme le niveau des plus basses mers.

2.2.2. Vents

Sur la façade orientale de l'île, les vents sont assez irréguliers. Les vents de secteur Ouest (U Libeccio) sont cependant dominants toute l'année, mais leur influence est limitée sur le littoral à l'abri des fortes houles. En revanche, les vents de secteur Est (U Grecale, U Levante, le Sirocco) sont moins fréquents, mais ont une influence directe sur le littoral, en particulier lors des épisodes

de forte énergie. Ce sont de plus ces vents d'Est qui contribuent actuellement à l'alimentation des cordons dunaires depuis la plage.

2.2.3. Vagues

En l'absence de mesures de vagues *in-situ* au large de la Plaine orientale jusqu'en 2013 et l'installation d'un houlographe au large d'Alistro, les caractéristiques des vagues présentées sont issues de travaux de modélisation à partir d'un point PO1 situé au large de Bastia. Les données modélisées couvrent la période 1979-2009 à un pas de temps horaire (Illustration 8, Illustration 9).

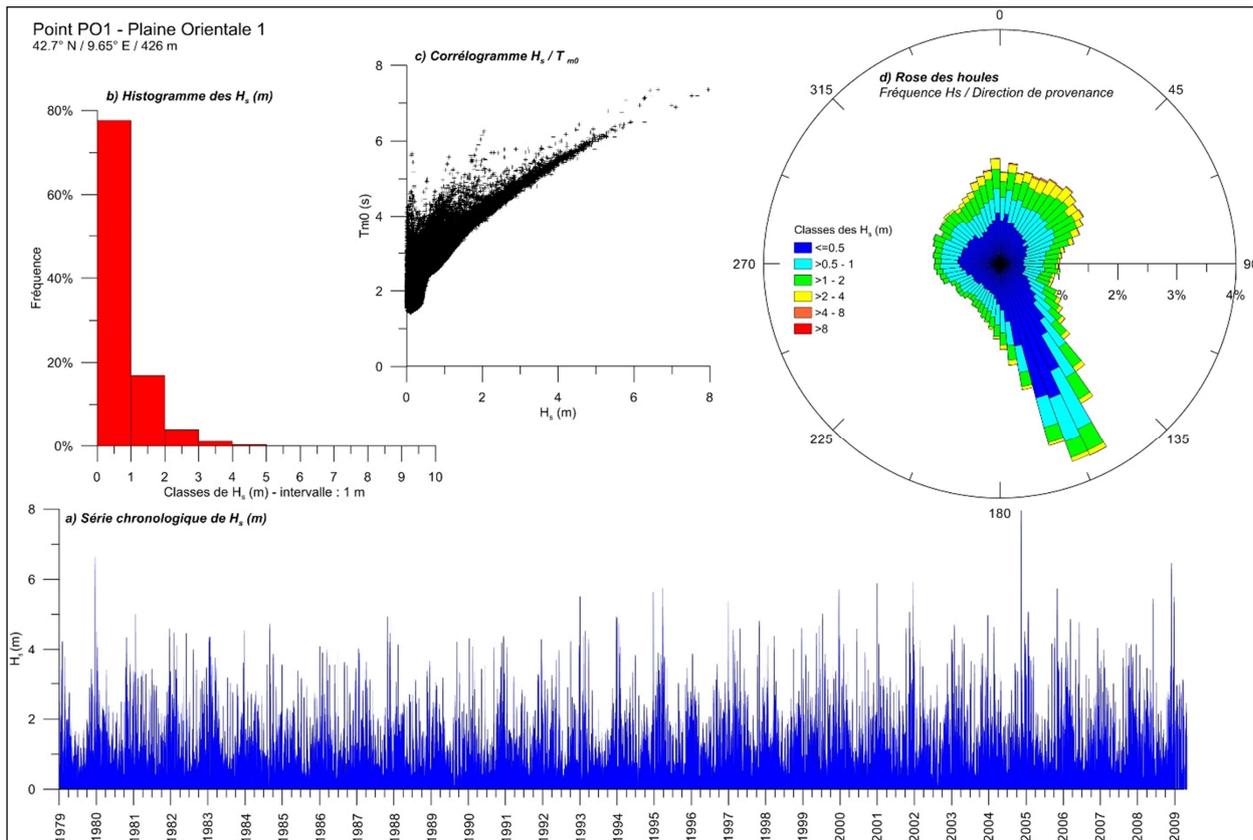


Illustration 8 - Série chronologique 1979-2009 et statistiques des houles au large de Bastia (point Plaine orientale PO1 ; Stépanian et al, 2011).

		PO1
Hauteur significative H_s (m)	Maximum	7,96
	Moyenne	0,71
	Ecart-type	0,67

Illustration 9 - Statistiques de la hauteur significative de la houle aux trois points d'extraction (Stépanian et al., 2011)

De manière générale, les conditions de faible agitation ($H_s < 1$ m) représentent 75 à 80% du temps. La classe [1-2m] est inférieure à 20%, et la classe des événements où la hauteur significative de la houle est supérieure à 2 m est inférieure à 10% du temps. Les corrélogrammes

H_s/T_{m0} montrent une relation de dispersion relativement classique, la période des vagues augmentant de manière quasi-linéaire avec la hauteur significative : les périodes maximales de l'ordre de 8 s se retrouvent lors d'épisodes de très fortes vagues ($H_s > 8$ m). Les conditions de faible agitation sont également dominées par des vagues de secteur Sud-Sud-Est, qui contrôlent la dérive littorale dominante du Sud au Nord sur la Plaine orientale de Corse.

2.3. DEFINITION DU TRAIT DE COTE

En raison de la multiplicité des facteurs qui interviennent sur l'évolution du littoral, le trait de côte doit être considéré comme « une bande dans laquelle l'interface entre le domaine marin et le domaine terrestre évolue ». Il ne constitue donc pas une limite fixée dans l'espace et ni dans le temps. Cependant, pour étudier son évolution à différentes échelles de temps, il est nécessaire de repérer des critères morphologiques sur le terrain ou sur photographies aériennes pour préciser sa position pour permettre leur comparaison.

La notion de trait de côte diffère ainsi selon les usages et organismes. En France métropolitaine, on distingue par exemple, pour les côtes sableuses et rocheuses, un grand nombre d'indicateurs (Illustration 10, Mallet *et al.*, 2012).

Milieu	Indicateurs de trait de côte fréquemment utilisés	Classe/type
Tous types de plages et dunes (côte sableuse, galets, plage corallienne...)	ligne correspondant à l'altitude d'une basse mer moyenne	altimétrique
	ligne correspondant à l'altitude d'une pleine mer moyenne	altimétrique
	ligne de débris (trace de tempête passée)	hydrodynamique
	résurgence d'eau sur la plage	hydrodynamique
	laisse de mer	hydrodynamique
	limite sable mouillé/sec	hydrodynamique
	limite de jet-de-rive	hydrodynamique (instantané ou non)
	ligne d'eau instantanée	hydrodynamique (instantané)
	première barre d'avant-côte	géomorphologique
	berme	géomorphologique
	talus de collision (côte microtidale)	géomorphologique
	ped de dune	géomorphologique
	crête de dune	géomorphologique
	abrupt	géomorphologique
	limite de végétation pionnière	botanique
limite côté mer de végétation pérenne dunaire	botanique	
Côte à falaise rocheuse	ligne correspondant à l'altitude d'une basse mer moyenne	altimétrique
	ligne correspondant à l'altitude d'une pleine mer moyenne	altimétrique
	ligne de débris (trace de tempête passée)	hydrodynamique
	laisse de mer	hydrodynamique
	limite sable mouillé/sec	hydrodynamique
	encoche basale	géomorphologique
	ped de falaise	géomorphologique
	sommet de falaise	géomorphologique
	rupture de pente topographique	géomorphologique
	limite supérieure du cône d'éboulis	géomorphologique
	limite inférieure de végétation terrestre	botanique
	partie supérieure de la ceinture grise à cyanobactéries	botanique
	limite supérieure du lichen marin noir	botanique

Illustration 10 - Principaux indicateurs du trait de côte pour les côtes sableuses et à falaises rocheuses (Mallet *et al.*, 2012)

Sur les côtes microtidales de Méditerranée, la limite de jet-de-rive constitue un outil de travail pour les études d'évolution de trait de côte à partir de photographies aériennes et d'images satellitales. Ce marqueur présente l'avantage d'être aisément observable sur les clichés aériens.

Ainsi, sur les orthophotographies récentes avec une résolution numérique et un rendu des couleurs de bonne qualité, l'identification de la limite de jet-de-rive est relativement aisée. Lors de l'interprétation de photographie aérienne en noir et blanc, cette discontinuité est relativement nette puisque l'on constate une variation de teinte de gris. Le sédiment humide apparaît alors plus foncé que le sable sec. Si ce marqueur présente de nombreux avantages pour étudier les évolutions littorales, il est également entaché d'incertitudes. Les conditions météorologiques influencent cette limite virtuelle. Les surcotes ou décotes dues au vent et aux variations de pression sont difficilement quantifiables (Boak & Turner, 2005). On peut toutefois considérer que les photographies aériennes sont réalisées lorsque les conditions météorologiques sont bonnes, quand la visibilité est suffisante et que le vent ne perturbe pas les prises de vues. Boak & Turner (2005) estiment qu'une incertitude sur les variations de la limite de jet-de-rive subsiste du fait de l'infiltration de l'eau de mer qui fait fluctuer la limite dans le temps et l'espace. Si l'on considère que le sédiment présent sur les plages ne change pas de nature, l'incertitude peut être réduite. Enfin, sur les côtes méditerranéennes, le faible marnage permet de minimiser l'importance de l'heure de la prise de vue. Ce marqueur de trait de côte permet de suivre des évolutions annuelles mais aussi des événements plus exceptionnels tels que les tempêtes, lorsque les prises de vues sont rapprochées. En étant identifiable à la fois sur le terrain et sur de l'imagerie aérienne, l'indicateur « limite de jet-de-rive » est donc un outil approprié pour les études d'évolutions de trait de côte à moyen terme en Méditerranée par photo-interprétation. Il faut cependant être vigilant quant à son utilisation et prendre en compte des marges d'erreurs inhérentes à la technique.

Dans le cadre des levés du trait de côte du Réseau d'Observation du Littoral, deux critères morphologiques sont ainsi repérés et géoréférencés (Illustration 11) :

- la position de la berme de basse plage (la plus récente, ou à défaut de la ligne de rivage) qui correspond au niveau moyen de l'eau en période calme ou « trait de côte moyen » ;
- la position du pied de dune (ou à défaut de la limite de végétation).

Morphologiquement, la berme de basse plage est très comparable au « trait de côte » relevé sur les données issues de l'analyse des photographies aériennes du SHOM et/ou de l'IGN. Ce type de données est disponible sur pratiquement tout le littoral de Corse grâce aux études d'évolution historique du trait de côte (période 1948-1996), réalisées dans les années 1990 (Oliveros et Delpond, 1996, 1999). Leur comparaison permet donc d'apprécier, sur l'ensemble des sites, les changements opérés depuis 1996, et sur certains depuis 1948. Les deux lignes ainsi positionnées délimitent la zone active de la plage aérienne qui correspond à la zone de déferlement des vagues sur les plages microtidales (jet de rive et nappe de retrait). Ces levés au DGPS permettent également d'estimer à un instant donné la largeur de cette plage active, paramètre important pour évaluer la vulnérabilité du littoral à l'érosion.

En termes d'incertitudes, compte-tenu des marges d'erreur des levés DGPS liées, non pas à la précision instrumentale mais, au repérage parfois difficile des traits morphologiques suivis, seules les variations supérieures ou égales à 5 m peuvent être considérées comme significatives.

Cela permet également de relativiser les évolutions annuelles par rapport à un « degré de liberté » du trait de côte qui correspond à une « bande » à l'intérieur de laquelle oscille la position de l'interface terre-mer à l'échelle annuelle.

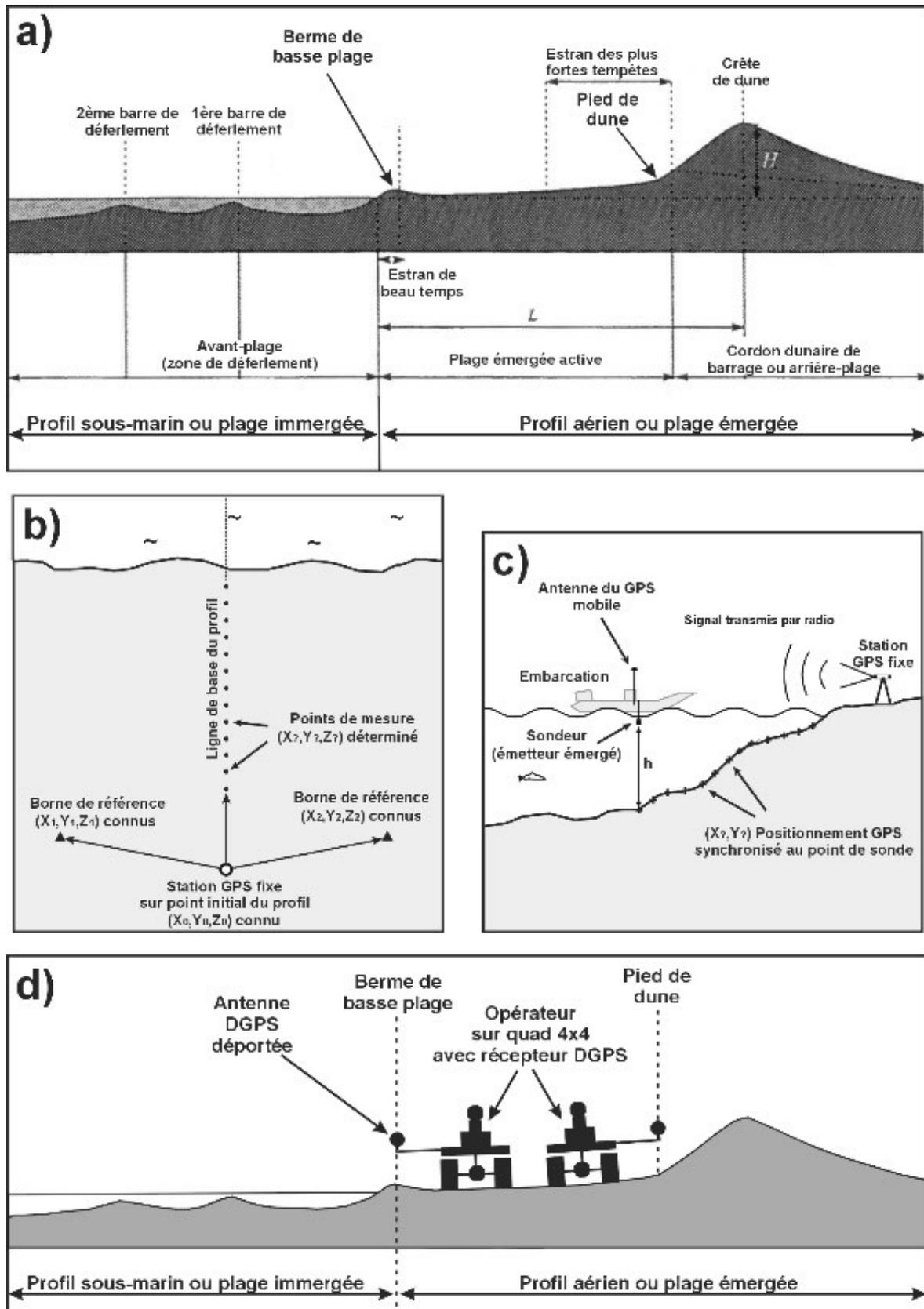


Illustration 11 - Méthodologies des mesures réalisées dans le cadre du ROL. a : Schéma type d'un profil de plage méditerranéen ; b : Principe d'acquisition du profil aérien ; c : Principe d'acquisition du profil sous-marin ; d : Technique utilisée pour le levé du trait de côte (Belon et Bodéré, 2016).

3. Données et méthodologie

3.1. DONNEES

3.1.1. Données de trait de côte

Les données de trait de côte utilisées pour les secteurs du lido de la Marana (Secteurs 1 et 2) sont rassemblées dans l'illustration 12 :

Données BRGM	Données Conservatoire	Données DDTM2B
<p>Relevés annuels de la position du trait de côte depuis 2002 (ROL) ;</p> <p>Traits de côte digitalisés à plusieurs dates entre 1948 et 2007 (études BRGM) ;</p> <p>Profils topo-bathymétriques depuis 2002 (ROL) ;</p> <p>Relevé topo-bathymétrique haute-résolution acquis grâce à une technique LIDAR aéroporté en 2010 (études complémentaires au ROL).</p>	<p>Traits de côte digitalisés 1937 à 2013</p> <p>Inventaire des actions de gestion menées sur les sites du Conservatoire et dates de réalisation</p> <p>Photographies sur les sites concernés</p>	<p>Relevé topographique haute-résolution LIDAR (2013)</p>

Illustration 12 – Tableau des données relatives au trait de côte et à l'évolution morphologique du littoral disponibles pour les secteurs 1 et 2.

Pour le secteur 3 (Sud de la commune de Lucciana et le Nord de la Casinca), autour de l'embouchure du Golo, il n'a pas fait l'objet d'un suivi mis en place dans le Réseau d'Observation du Littoral. Les données de trait de côte disponibles sur ce secteur spécifique résultent de la digitalisation sur des ortho-photographies entre 1948 et 2013.

Au regard des imprécisions de la démarche de photo-interprétation de la position du trait de côte à partir de photographies aériennes et d'images satellitales (cf. ch. 2.3), la marge d'incertitude sur ces données est estimée de l'ordre de +/- 10 m.

A l'inverse, en ce qui concerne les mesures de la position du trait de côte par des méthodes DGPS, l'incertitude est estimée à +/- 5 m.

3.1.2. Données de houle

a) Base de données BDHC

En raison de l'absence de données de houles disponibles issues de mesures *in situ*, au large de la Plaine orientale⁴, l'analyse des conditions de forçages hydrodynamiques repose sur une série de données de modélisation de vagues réalisées par le BRGM autour de la Corse et utilisée dans l'évaluation de l'érosion côtière sur la Plaine orientale (Stépanian et al., 2011).

Cette base de données de vagues (BDHC – Base de Données de Houles Corse, Belon 2014), qui s'étend sur la période 1979-2013, à un pas de temps horaire, a été générée dans le cadre du Réseau d'Observation du Littoral de la Corse.

Les données de vagues sont obtenues par simulation d'un modèle SWAN emboîté à deux rangs, avec un rang 1 à l'échelle de la Méditerranée occidentale et un rang 2 couvrant la Corse. Cette configuration a permis de générer des vagues en fonction des données de vents qui sont variables en fonction des périodes considérées :

- période 1979-2008 : Vents NCEP (0,5°x0,5°) toutes les 6h ;
- période 2009-2010 : Vents NCEP CFSR (0,5°x0,5°), résolution temporelle 3h ;
- période 2011-2013 : Vents CFSv2 0,5°x0,5°, résolution temporelle 1h.

Les rapports du BRGM suivants détaillent précisément le mode de constitution de cette base de données (Stépanian et al., 2010 ; Belon, 2014).

b) Analyse des tempêtes

A partir de ces chroniques il est intéressant d'identifier les événements les plus énergétiques dirigés vers la côte qui peuvent être responsables des évolutions morphologiques constatées sur le terrain, à savoir ceux dont la hauteur significative de la houle dépasse un certain seuil, nous avons pris un seuil arbitraire égal à 2 mètres. Ce filtre permet ainsi de répertorier les événements de tempêtes pouvant impacter le littoral de la Corse.

La sélection des événements repose donc sur les critères suivants :

- les conditions de vagues sont supérieures à 2 m ;
- la durée minimale d'un événement est de 6h ;
- la durée minimale entre 2 événements est de 12h. En dessous de ce seuil, on considère que l'on observe toujours le même événement ;
- seules les houles en direction de la côte sont concernées (+/- 100° par rapport à la normale à la côte).

Pour chaque événement et pour chacun des sites, on extrait :

- les dates de début et fin de la tempête ;
- la durée de la tempête (heures) ;
- la durée inter-tempêtes (heures) ;
- Hs max (le maximum de hauteur significative) ;
- la date de Hs max (m) (date du maximum de la hauteur significative) ;
- la moyenne de Hs (m) sur la durée de l'évènement ;
- la période moyenne à la date de Hs max (s) ;

⁴ Depuis 2013, une bouée de mesure de houles est installée au large d'Alistro et incorporée au réseau CANDHIS piloté par le CEREMA (www.candhis.fr).

- la période de pic à la date de Hs max (s) ;
- la direction de pic en convention nautique (°) à la date de Hs max ;
- Tpic max (le maximum de la période pic) ;
- la date de Tpic max (date du maximum de la période pic) ;
- la direction globale moyenne (°) = la direction moyenne (Dir) moyennée sur la durée de l'évènement ;
- l'incidence de la houle par rapport à la côte (°) au moment du pic (date de Hs max);
- l'énergie totale de la tempête (J/m²) ;
- la puissance de la tempête.

Ainsi, les Illustration 13, Illustration 14 et Illustration 15 montrent la répartition temporelle des tempêtes au large de la Plaine orientale pour les périodes et leurs caractéristiques statistiques principales 1979-2009, 2000-2011 et 2011-2013, respectivement.

Point PO1 - Plaine Orientale 1

Nombre d'évènements ($H_s > 2\text{m}$) : 339

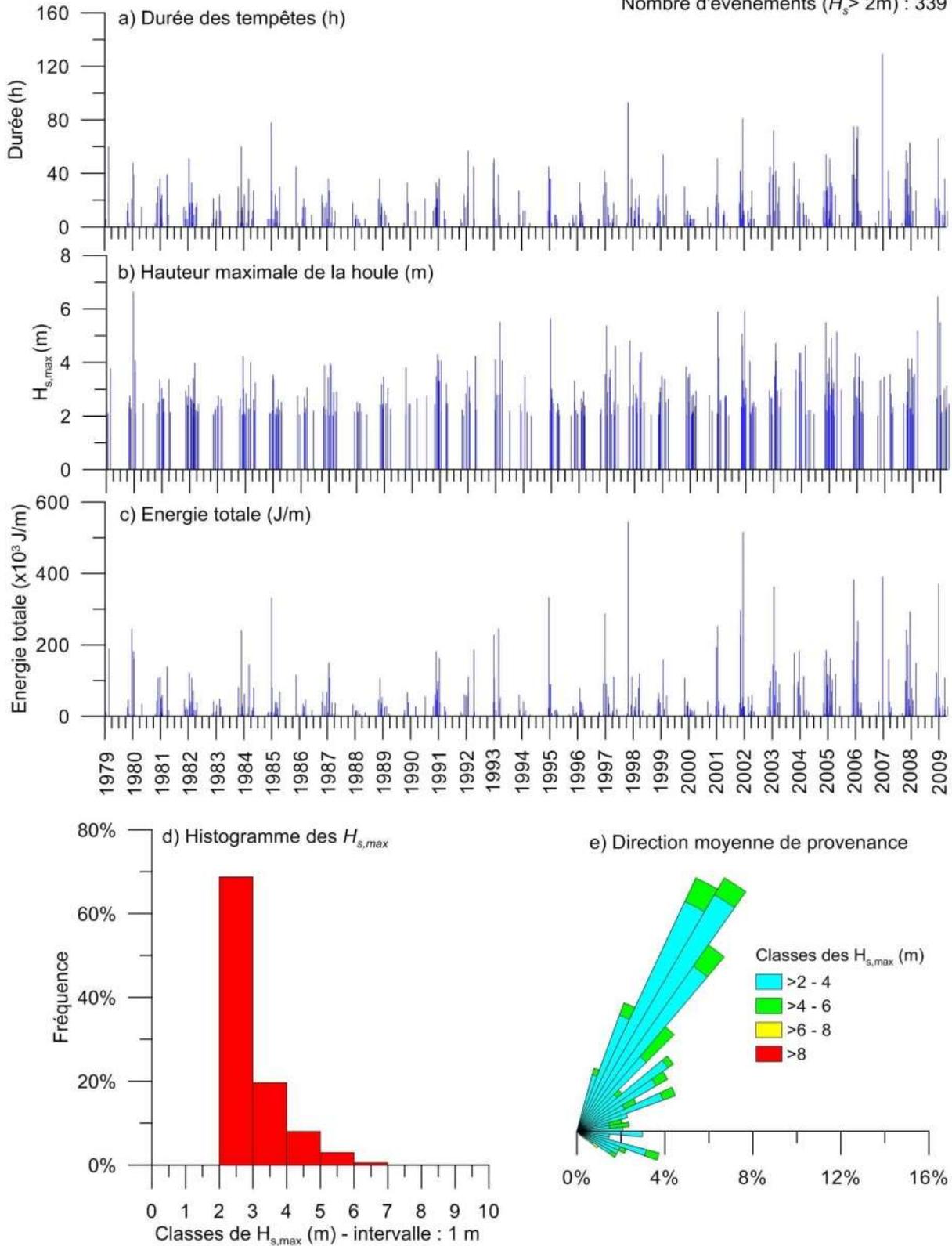


Illustration 13 - Caractéristiques des tempêtes au large de la Plaine orientale sur la période 1979-2009

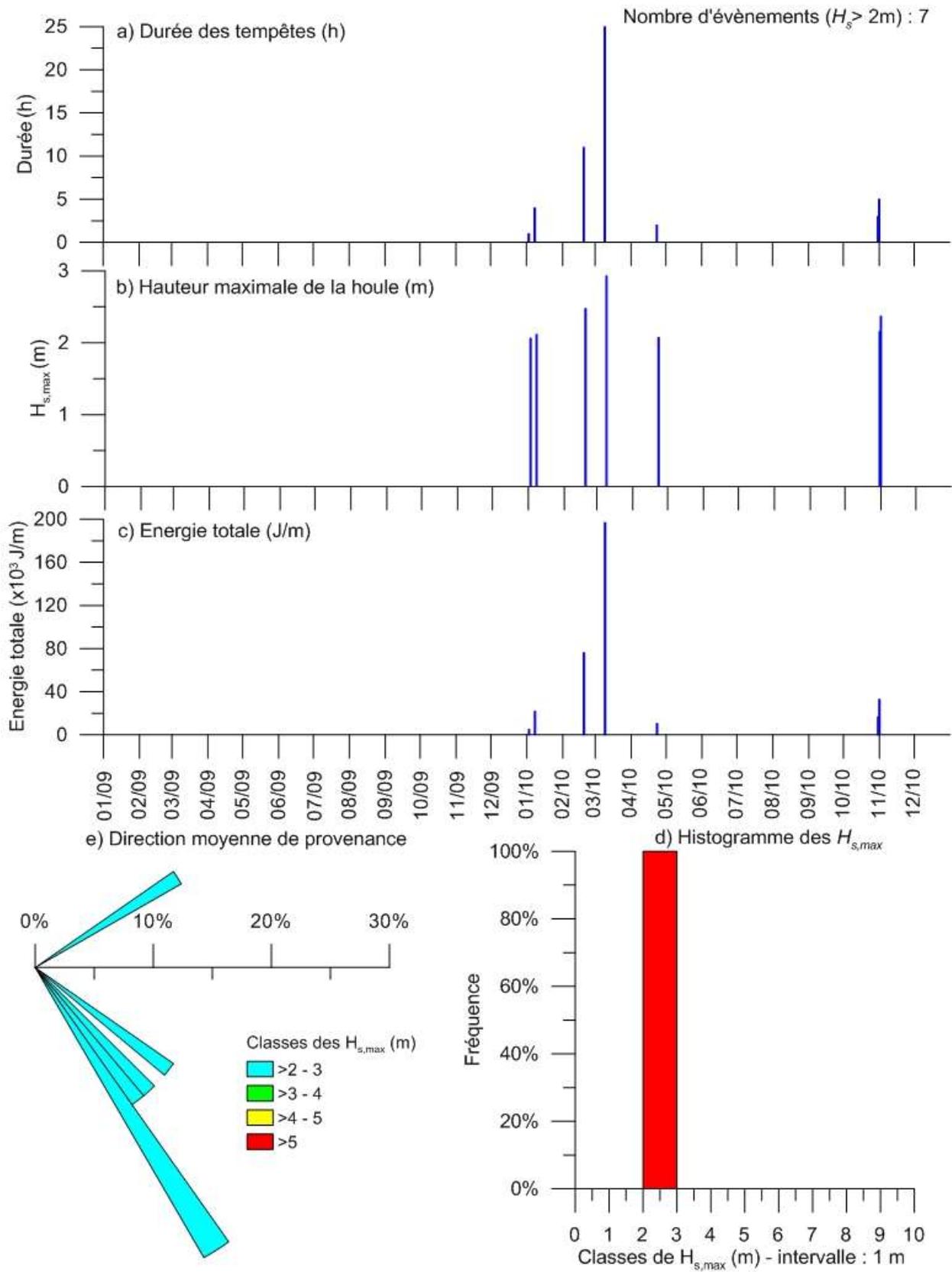


Illustration 14 - Caractéristiques des tempêtes au large de la Plaine orientale sur la période 2010-2011

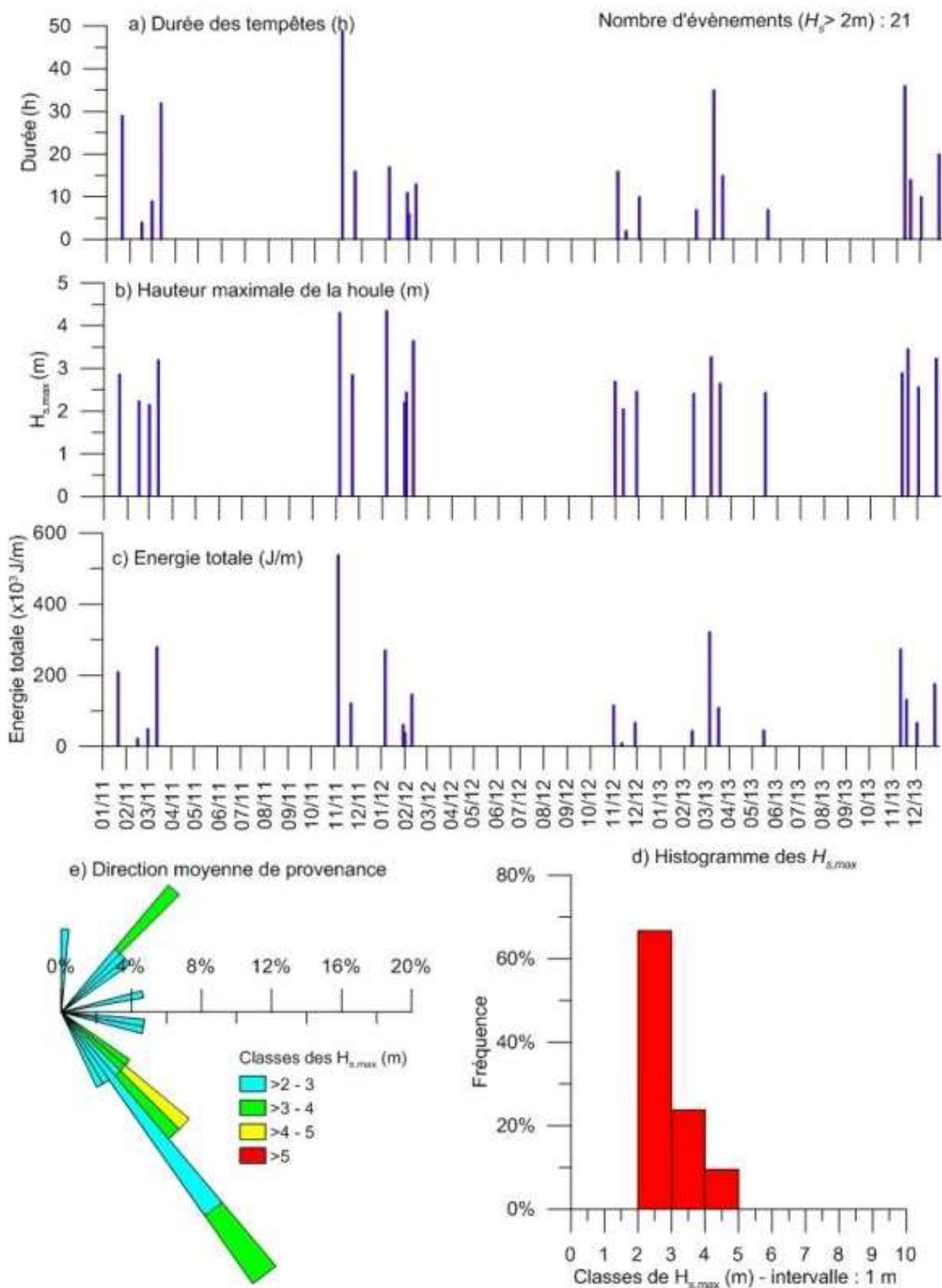


Illustration 15 - Caractéristiques des tempêtes au large de la Plaine orientale sur la période 2011-2013

3.2. METHODOLOGIE D'ANALYSE DE L'EVOLUTION DU LITTORAL

3.2.1. Données et hypothèses

Les travaux réalisés par le ROL et la collecte d'études locales ou régionales relatives à l'évolution du trait de côte, forment une bibliothèque d'études variées qui ont été consultées dans le cadre de cette étude. Elles sont issues soit d'analyse de photographies aériennes (avant 2002), soit de relevés topographiques du trait de côte (depuis 2002).

Ainsi, les traits de côtes de 1937 à 2016 sur les photographies aériennes ont été fournis et produits par le Conservatoire du littoral délégation Corse, et les levés DGPS du TDC et du pied de dune proviennent du suivi terrain effectué par le BRGM dans le cadre du ROL.

Le tracé des traits de côte à partir des photos aériennes et des images satellites n'est pas toujours aisé à déterminer et ceci en raison :

- 1 de la qualité des images ;
- 2 des problèmes liés au calage des images ;
- 3 des conditions océaniques et météorologiques au moment de la prise de vue.

L'illustration 43 présente un exemple des différentes positions du trait de côte sur un secteur du littoral de la Marana depuis 1937. Elle montre la grande variabilité de l'évolution du littoral à cette échelle de temps.

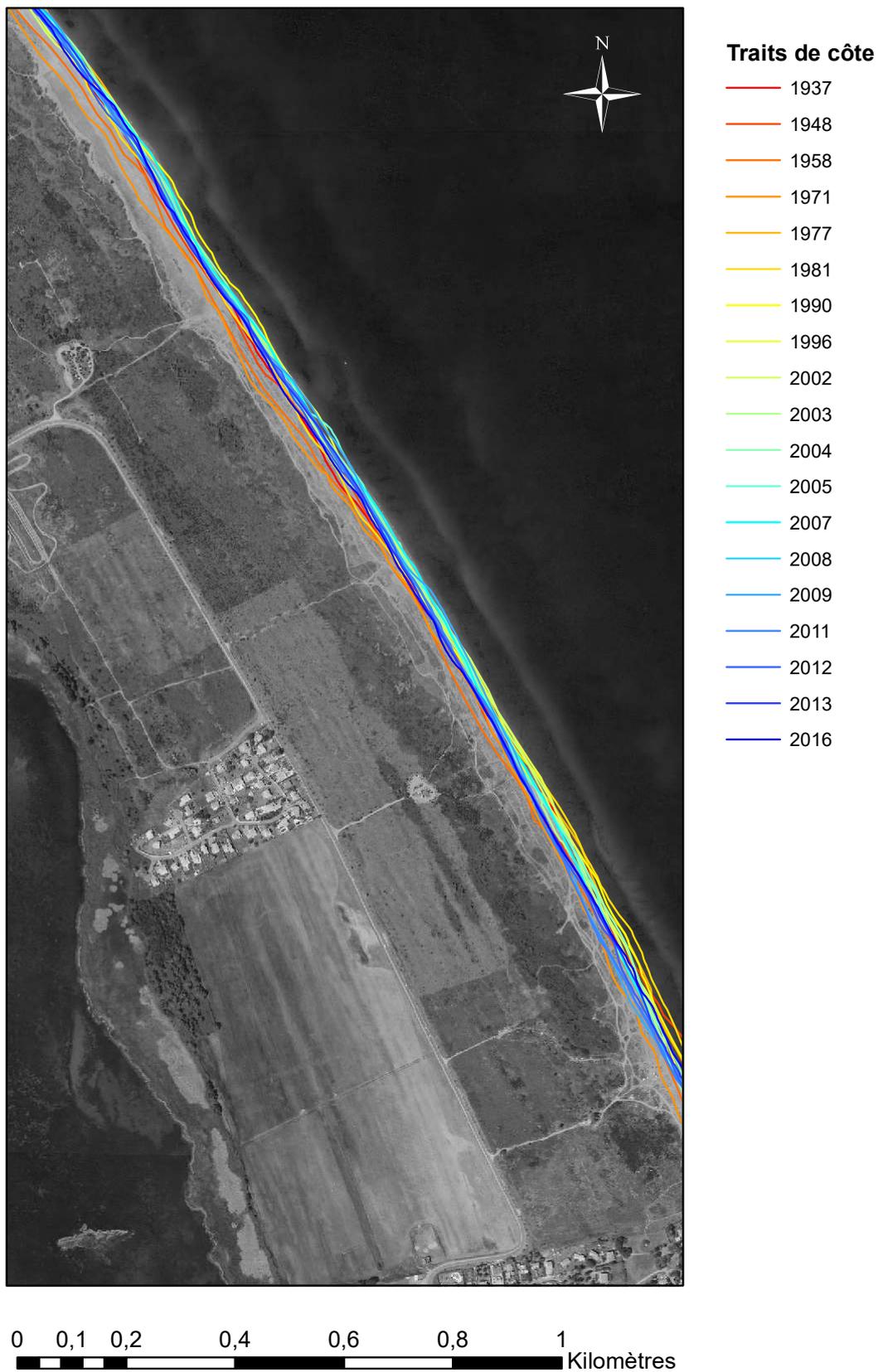


Illustration 16 – Evolution de la position du trait de côte entre 1937 et 2016 le long de la Marana – exemple de la zone du Pineto (orthophotographie : ©IGN, 2007)

3.2.2. Cartographie du trait de côte de référence

Le trait de côte de référence est le plus récent et le plus précis disponible (Illustration 17) :

- un relevé du trait de côte a été réalisé par le BRGM en 2016 sur le lido de la Marana au Nord du Golo et sur Tanghiccina au sud de la commune de Lucciana;
- sur la zone au Sud de l'embouchure, c'est le trait de côte de 2013, produit par photo-interprétation de ortho-photographie, qui est retenu.

C'est à partir de cette position du trait de côte de référence que sera projetée dans la position 2050 du trait de côte, suite à l'analyse des taux d'évolution historique du trait de côte.

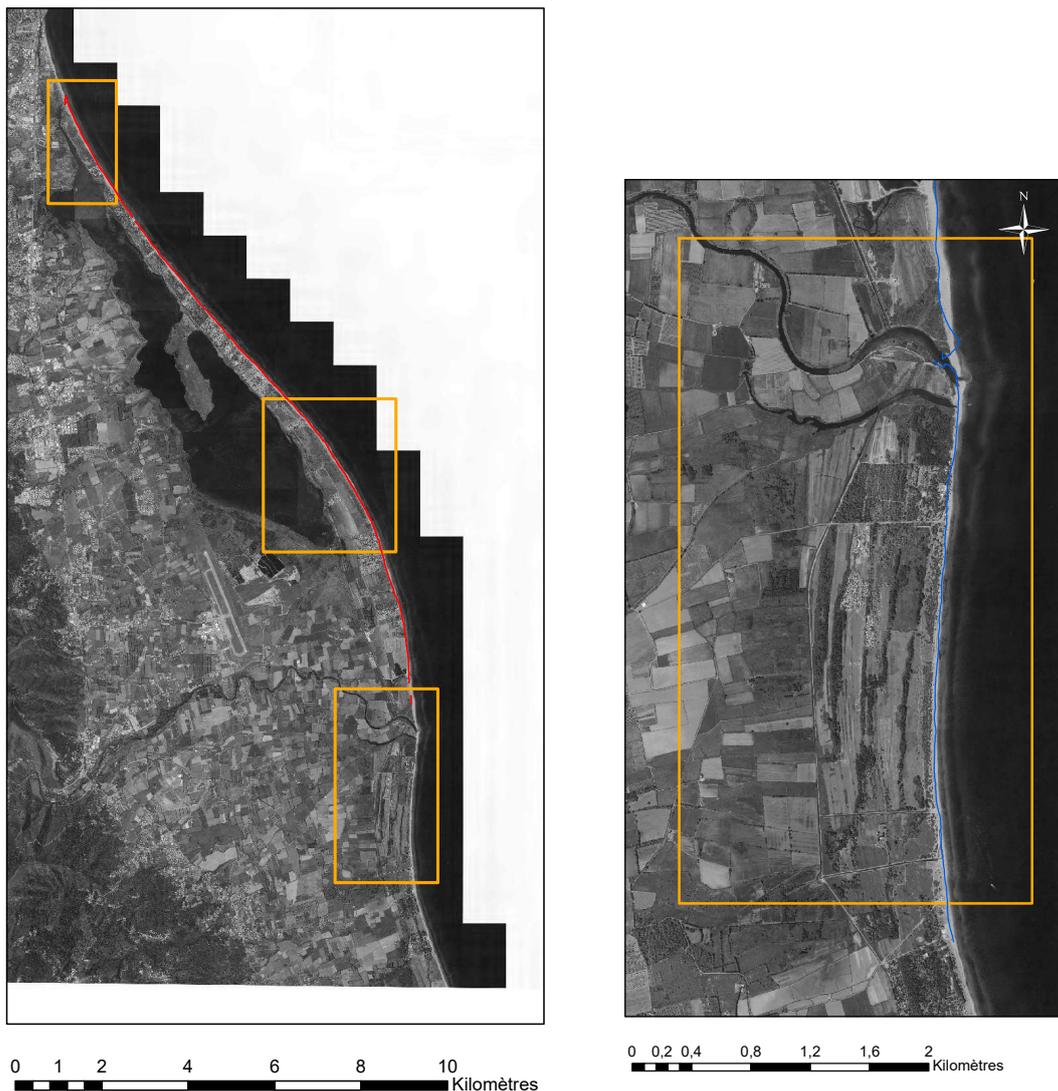


Illustration 17 - Traits de côte de référence retenu sur le littoral du lido (2016 en rouge pour le Nord du Golo, et sur Tanghiccina au sud de la commune de Lucciana, et 2013 en bleu pour la zone au Sud de l'embouchure)

3.2.3. Outil DSAS : Analyse semi-automatique de l'évolution historique du littoral

L'outil utilisé pour réaliser cette analyse est le DSAS, développé par l'USGS, et exploitable sous ArcGIS®. Cet outil SIG calcule des taux d'évolution du trait de côte à intervalles réguliers le long du linéaire côtier à partir de la date de chaque trait de côte et des distances qui les séparent d'une ligne de base.

Une série de transects perpendiculaires au trait de côte est donc générée tous les 50 m depuis une ligne de base parallèle au littoral (Illustration 18).

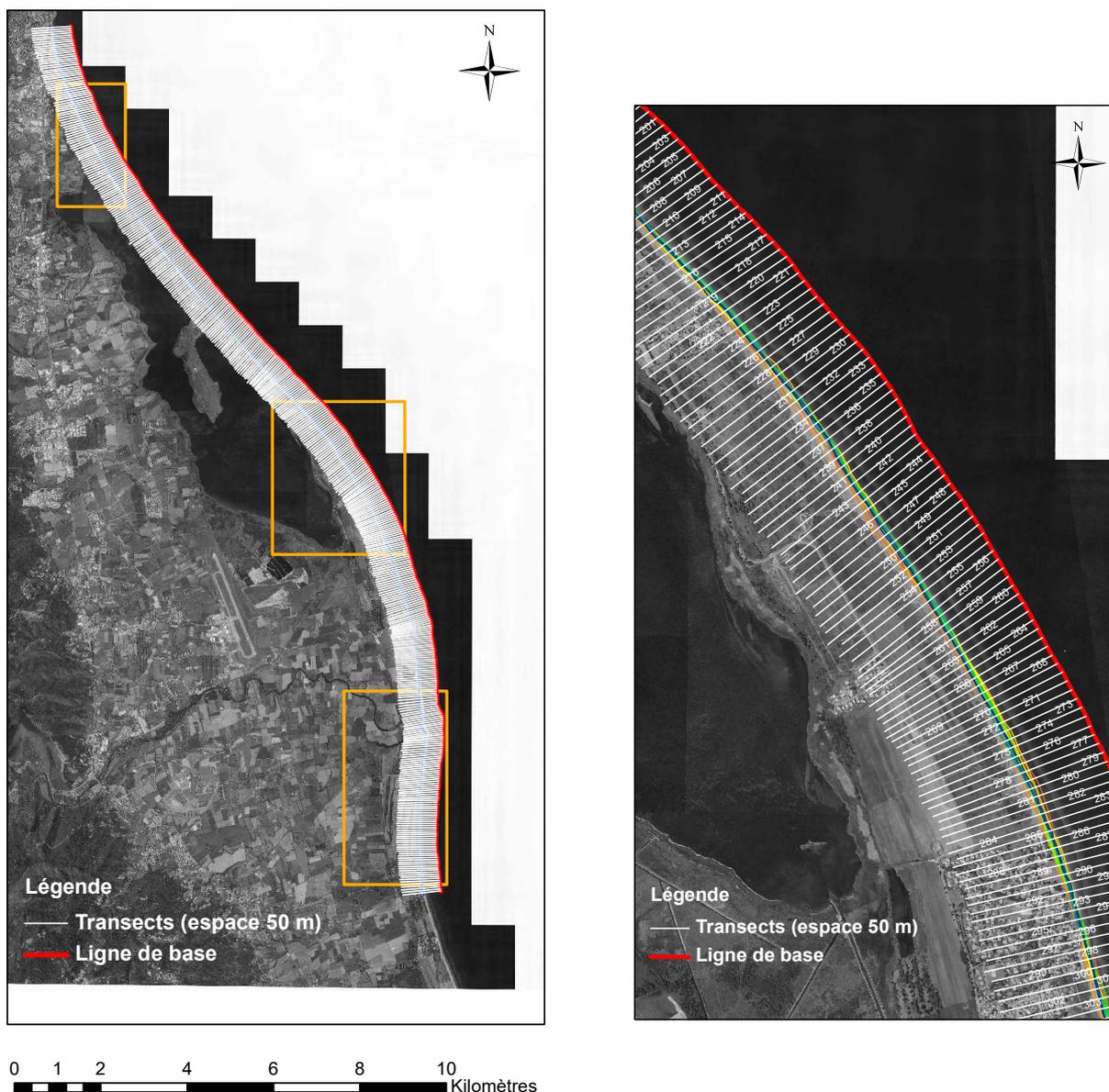


Illustration 18 – Méthodologie de l'analyse de l'évolution du trait de côte avec DSAS à l'échelle du littoral et zoom sur le secteur n°2, secteur Pineto-Poretta (orthophotographie : ©IGN, 2007)

Les transects coupent les traits de côte et leur distance par rapport à la ligne de base est mesurée.

Après analyse statistique, on dispose ainsi de manière semi-automatique des taux d'évolution du littoral entre les différentes positions du trait de côte tous les 50 m.

Il est ainsi possible de réaliser les cartographies quantitatives de l'évolution du littoral entre deux positions consécutives du trait de côte à l'échelle du lido de la Marana.

Dans le cadre de ce travail, les cartographies ont été principalement réalisées par le Conservatoire du Littoral et servent de support pour l'analyse et la compréhension de l'évolution du trait de côte.

4. Evolution historique du littoral à l'échelle de la cellule Lupino-Golo et de l'extrémité nord de la cellule Golo-Campoloro

Ce chapitre présente l'évolution historique du littoral sur le site ADAPTO, qui est appréhendée par l'analyse diachronique des positions du trait de côte à partir de diverses sources de données.

4.1. EVOLUTION HISTORIQUE DU LITTORAL (1937-2013)

A l'échelle de la cellule sédimentaire Lupino-Golo, l'évolution résiduelle entre 1937 et 2013 est représentée sur l'illustration 19.

A cette échelle de temps et à cette échelle spatiale très globale, l'évolution est principalement caractérisée par un recul moyen de l'ordre de 7 m en 76 ans, soit environ un taux de recul de 0,1 m/an). Cette valeur qui reste indicative est fortement modulée spatialement le long du littoral. Ainsi, on observe des zones de très forts recul, comme les rivages adjacents de l'embouchure du Golo, où le recul maximum mesuré atteint 204 m sur la rive sud. A l'inverse, on observe également des zones en forte accrétion comme au niveau du grau de Biguglia où l'avancée du rivage sur la mer atteint 55 m, et au niveau du littoral de Mucchiatana.

Au-delà de ces variations fortes, l'évolution de la position du trait de côte reste néanmoins dominée par un mode d'alternance de zone en érosion et en accrétion.

4.2. EVOLUTION DIACHRONIQUE INTERMEDIAIRE (1937-1977-2002-2013)

L'évolution du littoral est représentée entre chaque situation intermédiaire sur

- l'illustration 20 pour la période 1937-1977 ;
- l'illustration 21 pour la période 1977-2002 ;
- l'illustration 22 pour la période 2002-2013.

Cette visualisation montre la grande variabilité de cette évolution dans le temps et dans l'espace.

En effet, dans le temps, l'amplitude des évolutions globales varient entre des avancées de +6 m et des reculs atteignant -7 m, réparties le long du linéaire côtier étudié. L'illustration 23 rassemble les valeurs mesurées et les normalise pour obtenir un taux comparable d'une période de mesure à l'autre. Les taux ainsi mesurés varient entre -1,5 m/an pour les taux d'érosion les plus forts et +1 m/an, à l'inverse pour les taux d'avancée du trait de côte les plus forts.



Illustration 19 - Evolution du trait de côte 1937-2013 du littoral de la Marana et de la Casinca

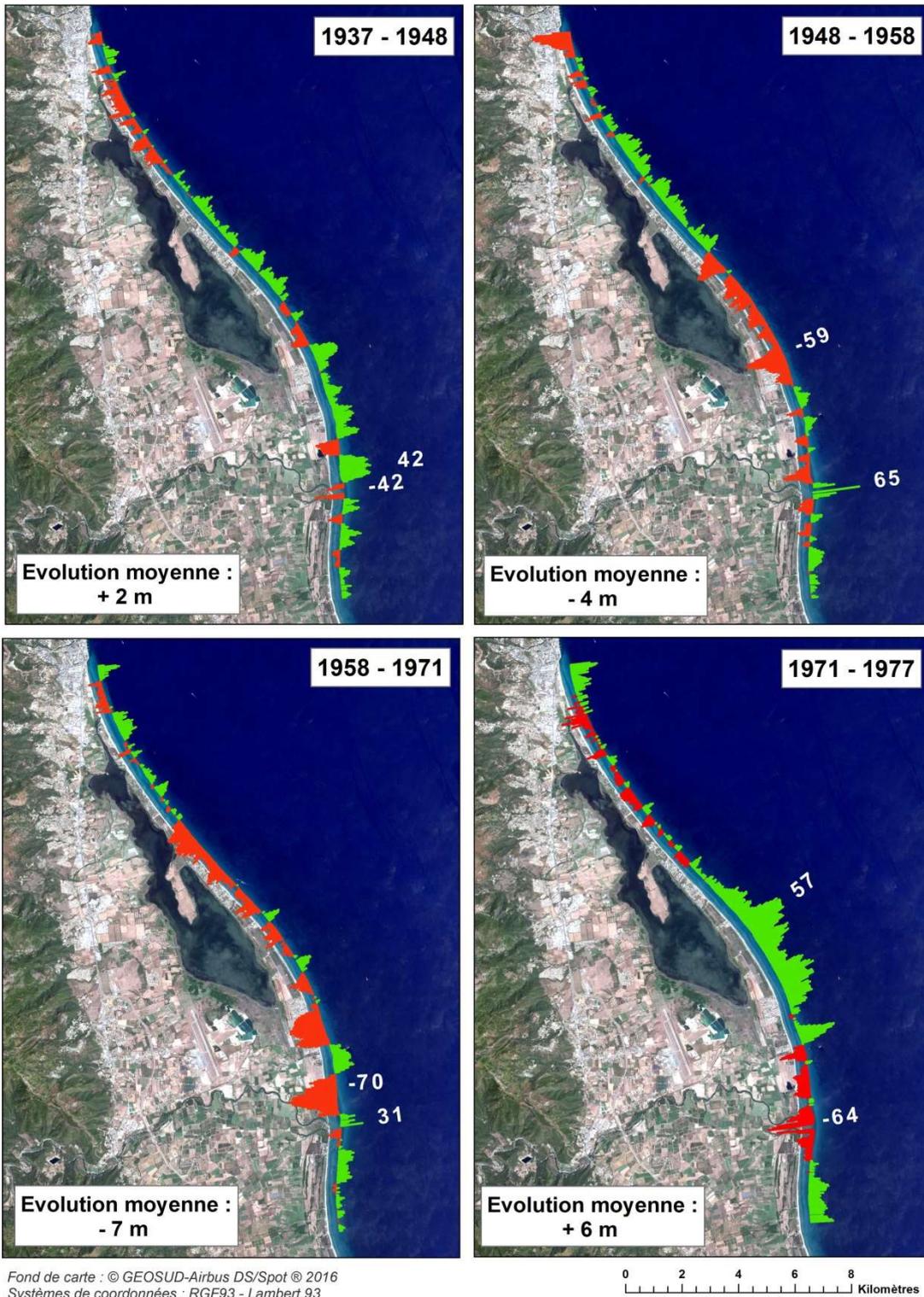
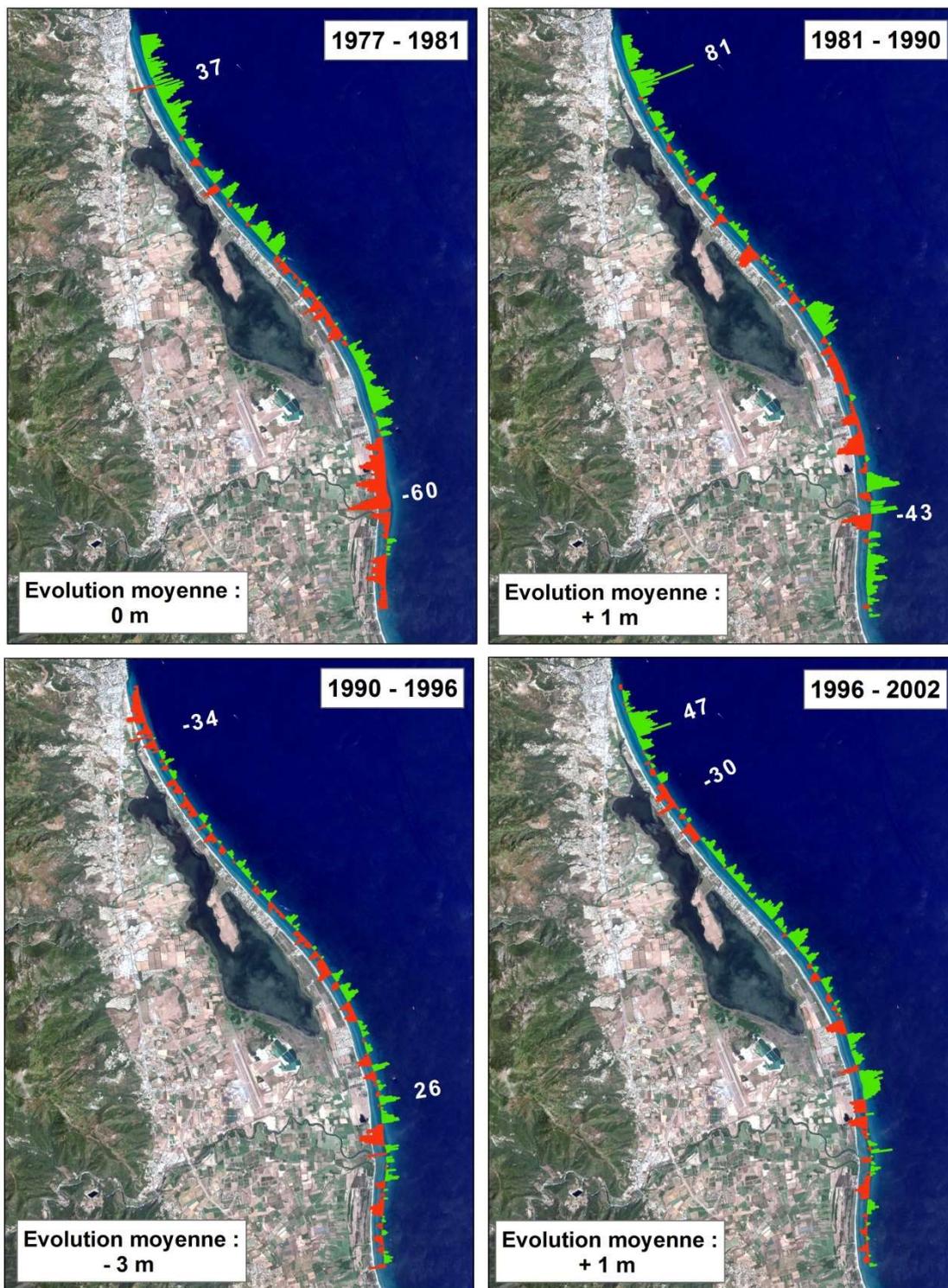
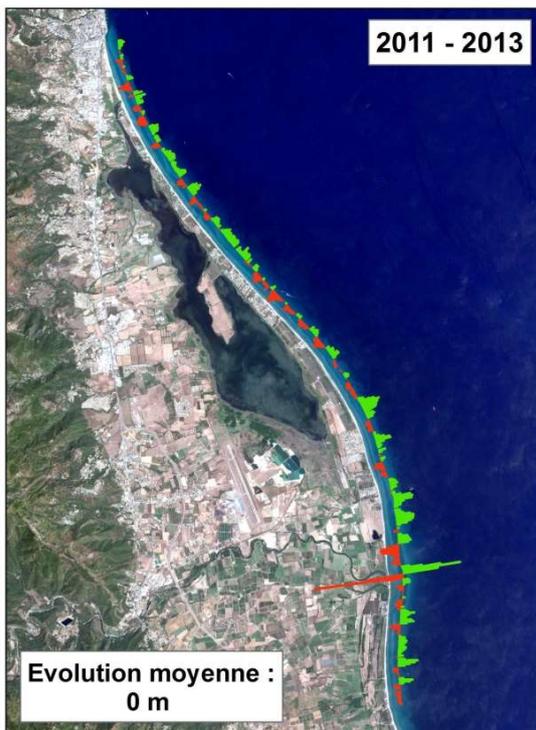


Illustration 20 - Evolution du trait de côte 1937-1977 du littoral de la Marana et de la Casinca



Fond de carte : © GEOSUD-Airbus DS/Spot © 2016
Systèmes de coordonnées : RGF93 - Lambert 93

Illustration 21 - Evolution du trait de côte 1977-2002 du littoral de la Marana et de la Casinca



Fond de carte : © GEOSUD-Airbus DS/Spot © 2016
Systèmes de coordonnées : RGF93 - Lambert 93



Illustration 22 - Evolution du trait de côte 2002-2013 du littoral de la Marana et de la Casinca

Période	Evolution moyennée sur la cellule (m)	Taux d'évolution (m/an)
1937-1948	2	0,18
1948-1958	-4	-0,40
1958-1971	-7	-0,54
1971-1977	6	1,00
1977-1981	0	0,00
1981-1990	1	0,11
1990-1996	-3	-0,50
1996-2002	1	0,17
2002-2007	2	0,40
2007-2011	-6	-1,50
2011-2013	0	0,00

Illustration 23 - Evolution globale du littoral 1937-2013 et taux d'évolution mesuré

4.3. CONCLUSIONS A L'ECHELLE DE LA CELLULE HYDRO-SEDIMENTAIRE LUPINO-GOLO

A cette échelle spatiale, il apparaît clairement que les phénomènes d'avancée et de recul du trait de côte sont caractérisés par une très forte hétérogénéité spatiale et temporelle. De plus, il n'existe pas non plus une tendance généralisée et marquée dans l'évolution de la position du trait de côte au cours du temps. Les épisodes érosifs restent discontinus et entrecoupés de période de stabilité ou d'accrétion du littoral.

Ceci exprime la stabilité dynamique du trait de côte, qui caractérise ainsi la bonne résilience du système sédimentaire littoral malgré l'occurrence régulière de fortes tempêtes dont l'effet reste difficile à appréhender. En effet, si l'impact d'une tempête peut se traduire par une érosion significative locale (érosion dunaire, abaissement du niveau de la plage), ses conséquences sur les littoraux adjacents restent inconnus : elle peut ainsi participer à la remobilisation d'un stock sédimentaire qui viendra, par la suite, et probablement à la faveur d'une baisse des conditions énergétique, alimenter le prisme littoral et contribuer à une accrétion plus aisée des plages.

Cependant, à cette échelle de temps, sur ce secteur, l'embouchure du Golo reste un contexte sédimentaire particulier avec de probables phases d'apport par le fleuve, des périodes d'interruption de la dérive littorale et de périodes de by-pass de cette dérive. Ses rivages nord et sud peuvent être ainsi considérés en érosion chronique avec un recul de plus de 100 m en moyenne (200 m au maximum) depuis 1937. Il faut enfin noter l'existence de deux secteurs, l'extrémité du lido de la Marana au Nord et le littoral de Mucchiatana au Sud, qui sont en accrétion sur la période de temps considérée.

5. Analyse de l'évolution sur les secteurs ADAPTO

Ce chapitre se concentre sur l'évolution du trait de côte sur les secteurs ADAPTO. Les planches cartographiques permettant l'analyse diachronique de l'évolution du littoral entre 1937 et 2016 sont rassemblées dans les annexes 1 à 3 pour chacun des trois secteurs ADAPTO :

- pour les secteurs n°1 et 2, elles permettent de visualiser la dynamique quantitative du trait de côte entre 1937 et 2016 et du pied de dune entre 2002 et 2016 grâce aux levés du ROL ;
- sur le secteur n°3, secteur en dehors du ROL, en l'absence de levés régulier du pied de dune, seule l'évolution du trait de côte est ainsi analysée.

Depuis 2002, grâce à la disponibilité des levés du ROL et de la BDHC, une analyse du rôle des tempêtes sur les évolutions du trait de côte sur chacun des secteurs est réalisée. Il est également possible d'étudier le rôle des travaux d'aménagement réalisés par le Conservatoire du Littoral en 2004 avec la pose de rangée de ganivelles au niveau du pied de dune.

5.1. CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES SUR LA PERIODE 2002-2013

L'illustration 24 rassemble les caractéristiques des tempêtes (occurrence, fréquence, intensité, ...) pour les périodes de temps entre deux levés du trait de côte réalisés le long du littoral de la Marana dans le cadre du ROL. Il s'agit ici d'essayer d'identifier le rôle des tempêtes et de leur impact sur les évolutions mesurées pendant chaque période.

Cette approche peut ainsi permettre d'identifier les rôles des agents moteurs principaux et/ou secondaires sur l'évolution du trait de côte à une échelle de temps annuelle à inter-annuelle sur les sites ADAPTO entre 2002 et 2013, les données de vagues disponibles dans la BDHC s'arrêtant à cette date.

Les périodes entre chaque levé sont ainsi caractérisées par :

- le nombre de tempêtes de secteur nord, où la hauteur significative des vagues Hs au large dépasse 2 m ;
- le nombre de tempêtes de secteur Sud, où la hauteur significative des vagues Hs au large dépasse 2 m ;
- le nombre de tempêtes de secteur nord, où la hauteur significative des vagues Hs au large dépasse 3m ;
- le nombre de tempêtes de secteur Sud, où la hauteur significative des vagues Hs au large dépasse 3 m ;
- le nombre de tempêtes de secteur nord, où la hauteur significative des vagues Hs au large dépasse 4 m ;
- le nombre de tempêtes de secteur Sud, où la hauteur significative des vagues Hs au large dépasse 4 m ;
- le nombre total de tempête sur la période
- la hauteur maximale des vagues enregistrée Hs max ;
- l'énergie totale des tempêtes pendant cette période ;
- la puissance totale des vagues pendant cette période.

Période	Nombre de tempête Nord avec <i>Hs > 2 m</i>	Nombre de tempête Sud avec <i>Hs > 2m</i>	Nombre de tempête Nord avec <i>Hs > 3m</i>	Nombre de tempête Sud avec <i>Hs > 3m</i>	Nombre de tempête Nord avec <i>Hs > 4m</i>	Nombre de tempête Sud avec <i>Hs > 4m</i>	Nombre de tempête total	<i>Hs max</i> (m)	Energie Totale (J/m ²)	Puissance totale
02/02/2002 13/06/2002	1	6	1	0	1	0	9	4.27	478992	-312222
13/06/2002 01/02/2003	5	5	2	1	2	0	15	4.72	1259333	-1255444
01/02/2003 01/06/2004	10	6	4	3	2	2	27	4.98	2203048	-342393
01/06/2004 25/10/2005	11	1	7	2	6	0	27	7.95	3141315	-4607054
25/10/2005 12/05/2007	14	4	8	0	3	1	30	4.87	3198333	-2502647
12/05/2007 13/05/2009	32	12	8	1	3	3	59	6.46	37758382	-1095078
13/05/2009 14/10/2011	2	4	4	1	0	0	11	3.29	948840	-297338
14/10/2011 01/10/2012	2	2	1	0	1	1	7	4.7	1430877	-150531

Illustration 24 - Caractéristiques principales des tempêtes entre 2002 et 2012 pendant la période annuelle des levés du ROL.

Par hypothèse, il est convenu qu'entre ces périodes, le comportement modal d'évolution du littoral est dominé par les conditions modales des vagues, qui sont de faible amplitude et de secteur Sud-Sud-Est, ce qui entraîne des transferts sédimentaires longitudinaux : la dérive littorale Sud-Nord dominante sur le littoral de la Plaine orientale (cf.ch. 2.2.3).

Pendant les tempêtes, ce comportement modal est contrebalancé par les houles de forte énergie qui arrivent de secteur différent, mais également de manière plus frontale au littoral, en raison de la réfraction sur les fonds, ce qui génère des transports sédimentaires dans le sens du profil de plage (perte de sédiment vers le large, ou fort apport sur le profil émergé).

En l'absence de relevés topo bathymétriques ou de relevés de traits de côte peu avant et peu après l'évènement de tempête, il est difficile d'appréhender les impacts de ces évènements.

L'approche semi-empirique mise en œuvre ici permet de caractériser les conditions énergétiques dominantes de vague pendant des périodes entre deux levés de terrain séparés de plusieurs mois et de comparer ces conditions avec les évolutions mesurées.

On distingue ainsi des périodes peu énergétiques et des périodes très énergétiques en fonction de l'énergie cumulée des vagues incidentes pendant les tempêtes (J/m²).

La puissance est un paramètre qui indique le flux d'énergie total intégré sur la période entre deux levés consécutifs, et projeté pour distinguer les secteurs de provenance de l'énergie des vagues :

- une valeur positive de puissance intégrée indique un flux d'énergie dominant en provenance de secteur Sud pour cette période ;
- une valeur positive de puissance intégrée indique un flux d'énergie dominant en provenance de secteur Nord pour cette période ;

Ceci permet d'estimer de manière paramétrique les forçages des vagues sur le littoral au cours des différentes périodes.

5.2. AMENAGEMENTS DU CONSERVATOIRE DU LITTORAL

Dans le cadre de ses missions d'aménagement des zones naturelles littorales, la délégation du conservatoire du littoral de Corse a réalisé en 2004 des aménagements sur les secteurs 1 et 2.

Ces aménagements consistent essentiellement en la pose de rangées de ganivelles en haut de plage pour avec comme objectifs (Illustration 25) :

- d'améliorer le stockage du sable en pied de dune, en bloquant le transport éolien ;
- de protéger la végétation embryonnaire en pied de dune ;
- de canaliser la circulation des personnes sur le domaine dunaire ;
- de limiter ainsi les effets du piétinement qui conduit à la formation de siffle-vent et caoudeyres par déflation éolienne.
- de limiter la circulation des véhicules motorisés sur les plages.

C'est également un bon témoin de l'évolution du littoral, en termes accrétion ou d'érosion, qui permet au conservatoire d'adapter sa stratégie de gestion.

Parallèlement à la pose de ganivelles, un mode de gestion des laisses de mer, basé sur un nettoyage raisonné, participe également à un maintien du sable sur les plages et ainsi à la protection pérenne du stock sédimentaire.



Illustration 25 - Système de ganivelles en pied de dune sur le littoral de la Marana (secteur n°2 Pinetto-Poretta au nord du Pineto ; vue vers le nord ; crédit photo : Conservatoire du littoral).

La distinction entre les périodes avant et après aménagement est prise en considération dans l'analyse des évolutions du trait de côte et du pied de dune sur les deux secteurs concernés. Il faut cependant noter que l'évolution probable suite aux aménagements est concentrée sur la période post-aménagement dans les premiers mois ou années qui suivent.

5.3. SECTEUR N°1

Ce secteur se trouve sur le lido de la Marana. Il englobe le littoral entre l'hôtel le Pineto, et le grau de Biguglia.

5.3.1. Evolution historique 1937-2013

L'évolution historique du trait de côte entre 1937 et 2013 au droit du secteur 1 est représentée sur l'illustration 26. A cette échelle de temps, l'évolution s'effectue sous la forme d'alternance de zone en accrétion et en érosion, avec néanmoins un bilan positif marquée par une avancée moyenne de +5 m le long du littoral, ce qui caractérise une stabilité globale eu égard les incertitudes pesant sur les données d'entrée (ortho-photographies et levés de terrain).

Une érosion chronique importante est présente dans la partie sud avec des reculs de l'ordre de 20 m au niveau du lotissement Tumbulu Bianco, érosion qui s'atténue vers le Nord. Au niveau du grau de Biguglia, le trait de côte est en forte accrétion à cette échelle de temps, avec une valeur maximale de 55 m.



Illustration 26 - Evolution du trait de côte 1937-2013 sur le secteur n°1

5.3.2. Evolution récente 2002-2016

La cinématique de l'évolution récente du littoral est étudiée à travers l'évolution du trait de côte (Illustration 27) et du pied de dune (Illustration 28). Les amplitudes d'évolution à cette échelle de temps restent cohérentes avec celles mesurées à plus long terme et on retrouve un mode d'évolution principal basé sur une alternance de zones en érosion et en accrétion parallèlement au trait de côte.

Cependant, certaines périodes plus marquées par des phénomènes érosifs plus intenses ressortent de la cartographie :

- 2002-2003 et 2004-2005 pour le critère « trait de côte » ;
- 2005-2009 (intégrant la position de 2008) pour le critère pied de dune.

On retrouve également des périodes où l'avancée conjointe du trait de côte et du pied de dune est bien marquée (2003-2004).

La période 2011-2012 est-elle marquée par une forte avancée du pied de dune et une stabilité du trait de côte.

L'illustration 29 rassemble les taux d'évolution moyens calculés à l'échelle du site pour chacune des périodes.

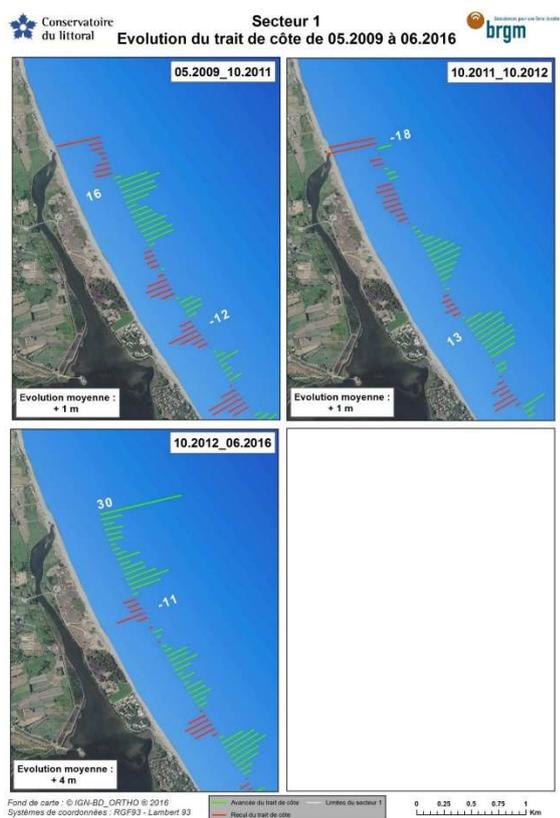
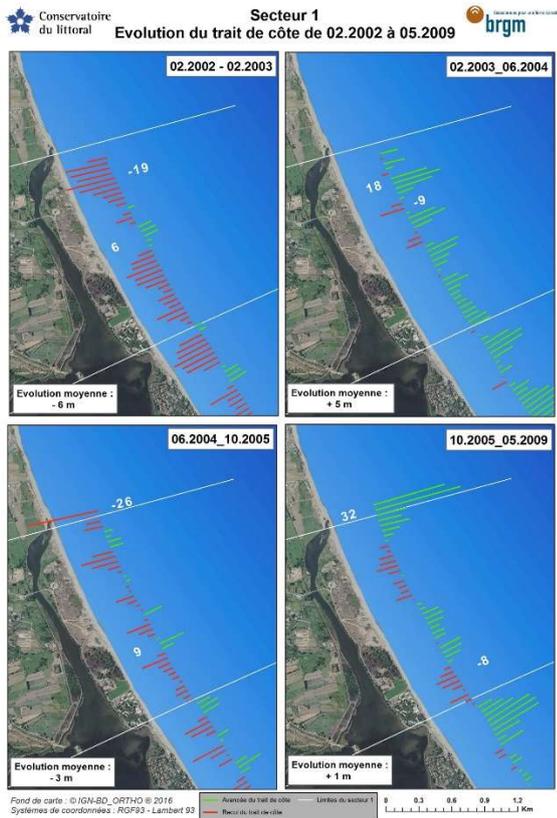


Illustration 27 - Evolution du trait de côte 2002-2016 sur le secteur n°1

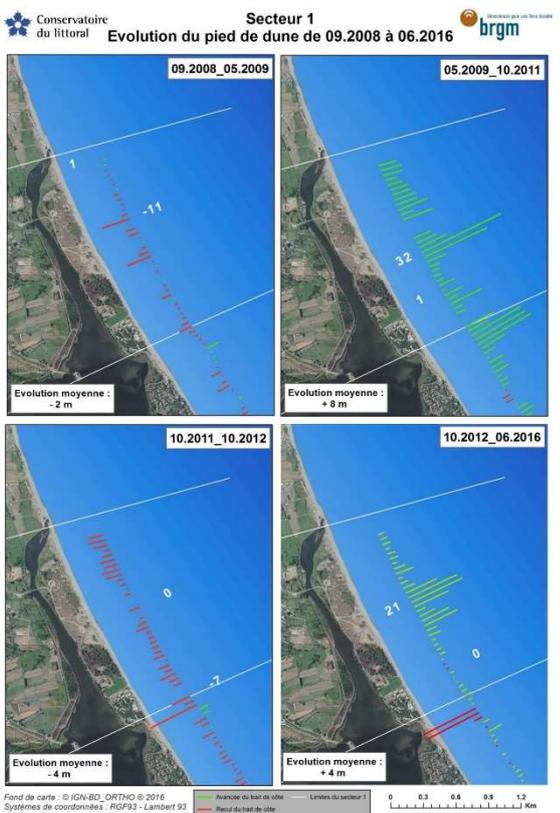
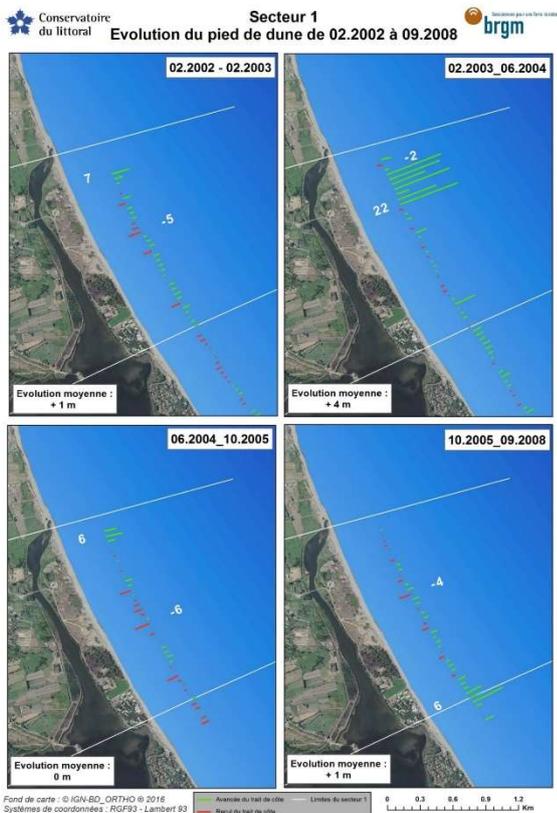


Illustration 28 - Evolution du pied de dune 2002-2016 sur le secteur n°1

Période	Nombre de mois	Evolution du trait de côte (m)	Evolution du pied de dune (m)	Taux d'évolution trait de côte (m/an)	Taux d'évolution pied de dune (m/an)
02/02/2002 – 01/02/2003	12	-6	+1	-6,0	+1,0
01/02/2003 – 01/06/2004	16	+5	+4	+3,8	+3,0
01/06/2004 – 25/10/2005	16	-3	0	-2,3	0,0
25/10/2005 – 13/05/2009	43	+1	-1	+0,3	-0,3
13/05/2009 – 14/10/2011	17	+1	+8	+0,7	+5,6
14/10/2011 – 01/10/2012	12	+1	-4	+1,0	-4,0

Illustration 29 - Synthèse de l'évolution du trait de côte et du pied de dune sur le secteur n°1.

Le comportement évolutif différent entre le trait de côte et le pied de dune traduit la complexité des échanges sédimentaires à ces échelles de temps sur ce littoral. Ceux-ci sont dépendants des forçages hydrodynamiques mais également des caractéristiques bathymétriques locales notamment la présence des barres sous-marines en croissants qui exercent un contrôle sur la propagation des vagues à la côte et donc sur les zones plus ou moins soumises à l'impact des vagues et aux processus érosifs.

L'illustration 30 rassemble les paramètres des tempêtes pour chacune des périodes d'évolution étudiée. Une intégration des différentes périodes est réalisée par rapport à l'illustration 24 pour être en conformité avec les périodes inter-levés topographiques.

Période	Nombre de tempêtes Nord avec	Nombre de tempêtes Sud avec	Nombre de tempêtes Nord avec	Nombre de tempêtes Sud avec	Nombre de tempêtes Nord avec	Nombre de tempêtes Sud avec	Nombre de tempêtes total	Hs max	Energie totale	Puissance totale
	Hs > 2 m	Hs > 2m	Hs > 3m	Hs > 3m	Hs > 4m	Hs > 4m		(m)		
02/02/2002 – 01/02/2003	6	11	3	1	3	0	24	4.72	1738325	-1567666
01/02/2003 – 01/06/2004	10	6	4	3	2	2	27	4.98	2203048	-342393
01/06/2004 – 25/10/2005	11	1	7	2	6	0	27	7.95	3141315	-4607054
25/10/2005 – 13/05/2009	46	16	16	1	6	4	89	6.46	40956715	-3597725
13/05/2009 – 14/10/2011	2	4	4	1	0	0	11	3.29	948840	-297338
14/10/2011 – 01/10/2012	2	2	1	0	1	1	7	4.7	1430877	-150531

Illustration 30 - Caractéristiques des tempêtes sur les périodes d'analyse de l'évolution du littoral sur le site 1

Les périodes 2002-2003 et 2004-2005 ont été très énergétiques et marquées par un recul significatif du trait de côte et à l'inverse d'une stabilité du pied de dune.

La période 2005-2009, marquée par une forte érosion du pied de dune, est cependant très longue et intègre probablement trop d'éléments pour discriminer des relations forçages/évolution.

5.3.3. Synthèse

Il ne ressort pas de cette analyse une tendance temporelle marquée entre les conditions hydrodynamiques incidentes et l'évolution du trait de côte et du pied de dune sur ce secteur. Le système sédimentaire reste cependant dans un état de stabilité dynamique à moyen et long-terme.

Celui-ci est très probablement contrôlé par le volume sédimentaire disponible au niveau des barres sableuses qui participent à l'alimentation périodique du littoral en conditions de faible agitation, et à sa protection en dissipant l'énergie des vagues lors des tempêtes. La distribution des énergies des houles en fonction de la propagation des vagues sur ces géométries complexes est probablement à l'origine du comportement morpho-dynamique de l'évolution du littoral se traduisant par l'alternance de zones en érosion et en accrétion aux diverses échelles de temps étudiées.

5.4. SECTEUR N°2

Ce secteur se trouve sur le lido de la Marana, entre le lotissement de la Marana au Sud et celui des sables de Biguglia au Nord.

5.4.1. Evolution historique 1937-2013

L'évolution historique du trait de côte entre 1937 et 2013 au droit du secteur 2 est représentée sur l'illustration 31. L'évolution y est également caractérisée par une alternance de zones en érosion et de zones en accrétion réparties le long du littoral, avec des amplitudes de -26 à +24 m à cette échelle de temps. Le bilan global montre une tendance moyenne du recul de -2 m à l'échelle du secteur.

Cette tendance reste peu significative au regard de la période concernée, le littoral restant globalement stable. En revanche, la répartition des zones en érosion montre qu'elles se situent sur la partie sud, de part et d'autre d'un bombement du littoral au niveau d'une zone en accrétion faible. Le rôle de la dérive littorale locale, induit par ce changement d'orientation de la côte, est probablement significatif sur l'évolution du trait de côte à moyen et long-terme sans que ses modalités d'action soient très explicites. La partie nord est plutôt marquée par une avancée du trait de côte.

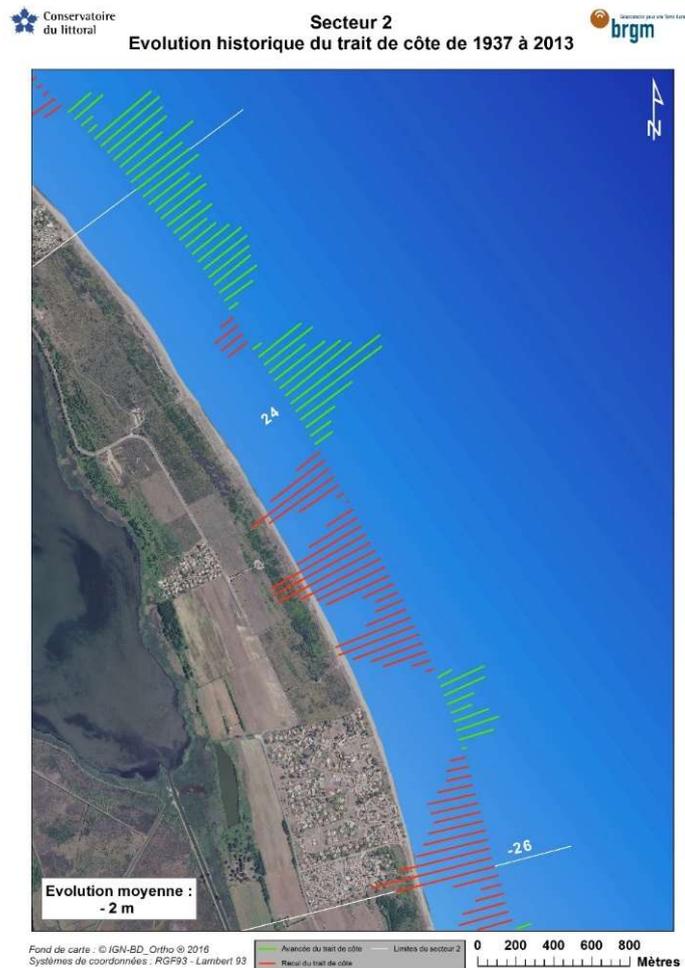


Illustration 31 - Evolution du trait de côte 1937-2013 sur le secteur n°2

5.4.2. Evolution récente 2002-2016

L'évolution récente du littoral est étudiée à travers l'évolution du trait de côte (Illustration 32) et du pied de dune (Illustration 33). La tendance générale est marquée par un recul faible mais constant du trait de côte (bilan de -6 m en 14 ans) et en revanche une stabilité du pied de dune.

On retrouve un mode d'évolution classiquement décrit le long du lido de la Marana avec une succession de zones en accrétion/érosion le long du littoral, avec un comportement très variable spatialement et temporellement.

Les périodes aux tendances érosives marquées sont 2002-2003, 2005-2009 et 2009-2011 pour le trait de côte. Le pied de dune montre une très faible évolution entre 2005 et 2009 (-2 m).

Une avancée globale du trait de côte est significative entre 2003 et 2004 (+7 m en moyenne).

L'illustration 29 rassemble les taux d'évolution moyens calculés à l'échelle du site pour chacune des périodes.

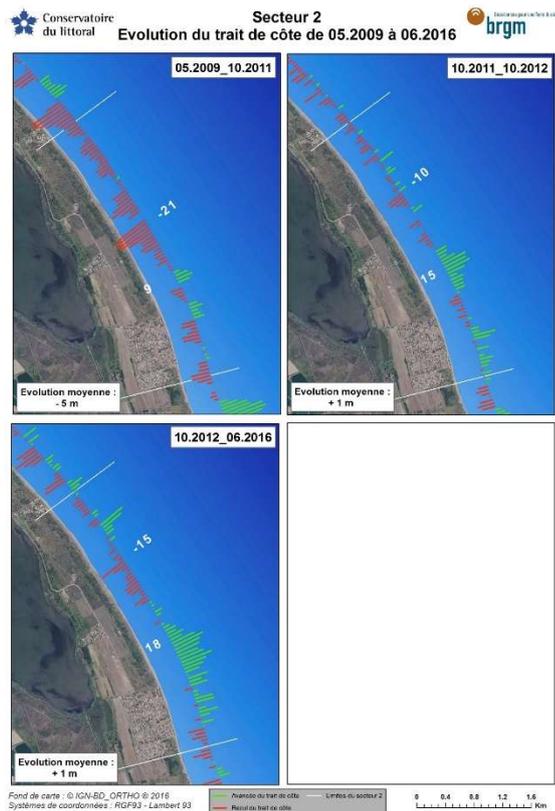
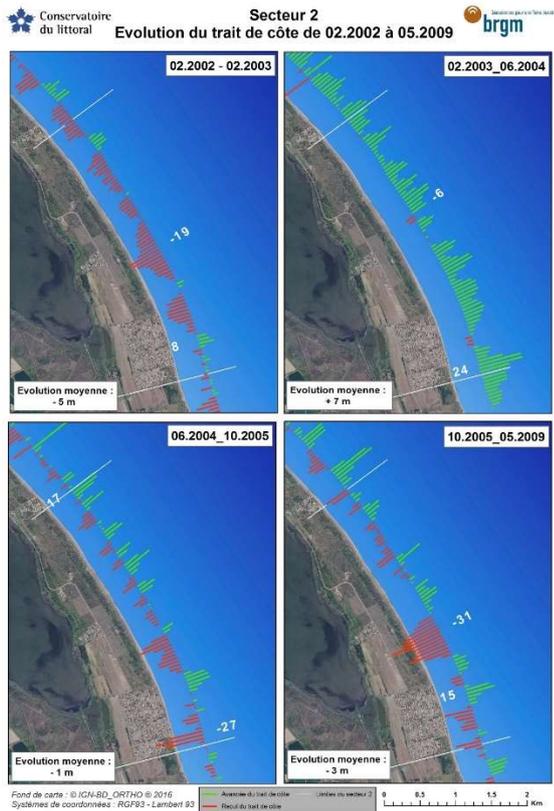


Illustration 32 - Evolution du trait de côte 2002-2016 sur le secteur n°2

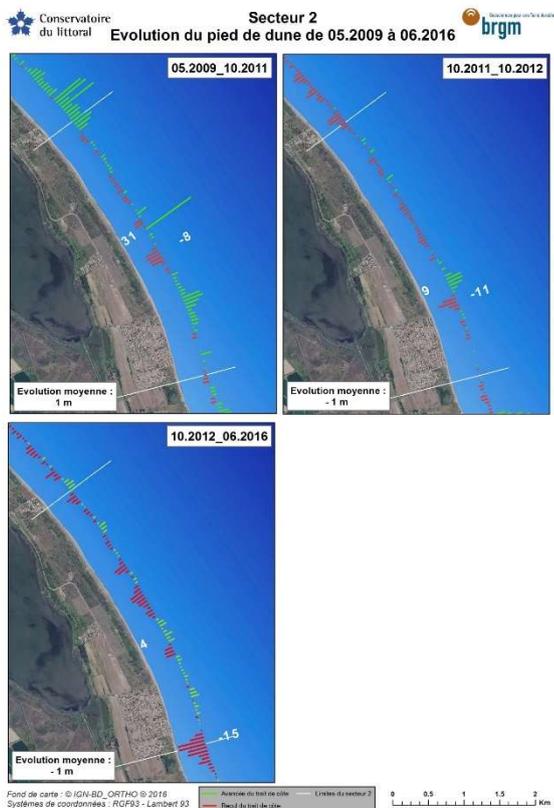
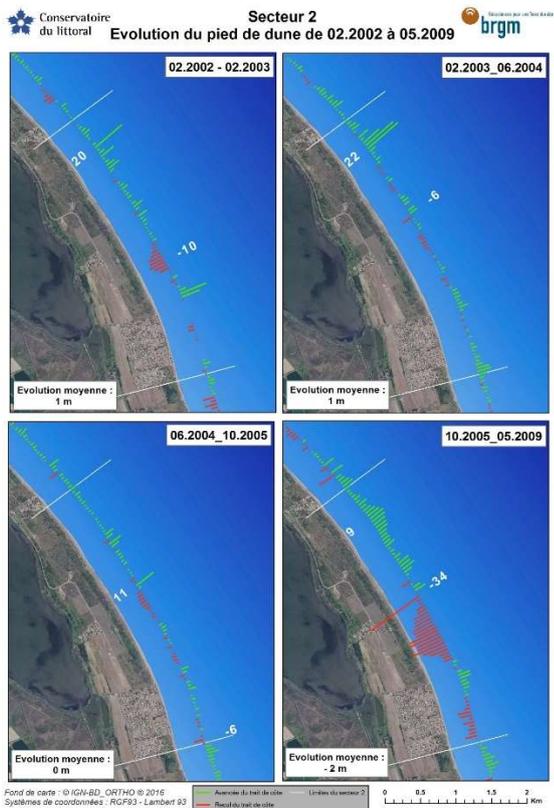


Illustration 33 - Evolution du pied de dune 2002-2016 sur le secteur n°2

<i>Période</i>	<i>Nombre de mois</i>	<i>Evolution du trait de côte (m)</i>	<i>Evolution du pied de dune (m)</i>	<i>Taux d'évolution trait de côte (m/an)</i>	<i>Taux d'évolution pied de dune (m/an)</i>
02/02/2002 – 01/02/2003	12	-5	+1	-5,0	+1,0
01/02/2003 - 01/06/2004	16	+7	+1	+5,3	+0,8
01/06/2004 - 25/10/2005	16	-1	0	-0,8	0,0
25/10/2005 - 13/05/2009	43	-3	-2	-0,8	-0,6
13/05/2009 - 14/10/2011	17	-5	+1	-3,5	+0,7
14/10/2011 - 01/10/2012	12	+1	-1	+1,0	-1,0

Illustration 34 - Synthèse de l'évolution du trait de côte et du pied de dune sur le secteur n° 2.

La comparaison des taux d'évolution du trait de côte et les conditions hydrodynamiques des tempêtes (cf. Illustration 30) ne montre pas, sur ce secteur non plus de relations universelles :

- la période 2002-2003 est marquée par un recul du trait de côte de 5 m, et un nombre important de tempêtes (24) ;
- ainsi, la période 2004-2005, très énergétique se traduit par une évolution très faible du trait de côte (-1 m) et une stabilité du pied de dune à l'échelle globale du site.
- à l'inverse, c'est à l'issue de la période 2009-2011, peu énergétique, que se produisent des reculs significatifs du trait de côte.

5.4.3. Synthèse

On retrouve sur ce secteur une dichotomie de fonctionnement entre le comportement du trait de côte et celui du pied de dune, qui évoluent de manière indépendante au regard des données disponibles.

Les relations entre les forçages hydrodynamiques et l'évolution du littoral restent méconnus. Et ce secteur suit le même comportement morphodynamique que les autres sites le long du lido de la Marana, caractérisés par des systèmes de barres sous-marines qui jouent un rôle non-défini, à l'heure actuelle sur l'évolution du littoral à moyen et long-terme.

5.5. SECTEUR N°3

Le secteur n°3 se trouve sur la rive sud de l'embouchure du Golo.

5.5.1. Evolution historique 1937-2013

L'évolution historique de ce secteur est représentée sur l'illustration 35.

Elle est principalement caractérisée par un fort recul au niveau de l'embouchure du Golo, qui atteint localement 100 m. L'amplitude de l'érosion décroît rapidement vers le Sud où le littoral se retrouve avec une tendance en accrétion bien marquée sur le reste du secteur, où elle atteint 30 m. Cependant, le bilan global du secteur reste significativement négatif à cette échelle de temps (-14 m en moyenne).

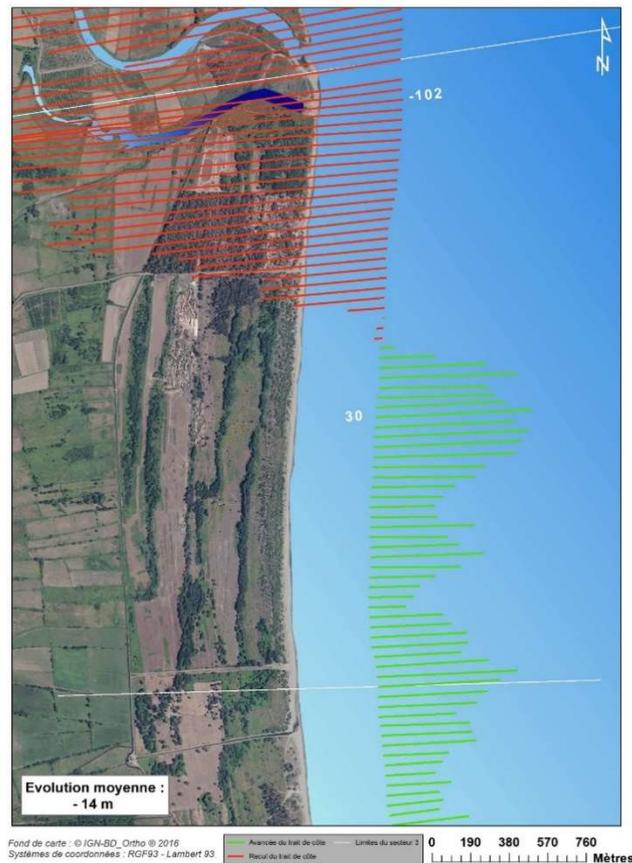


Illustration 35 - Evolution du trait de côte 1937-2013 sur le secteur n°3

5.5.2. Evolution récente 2002-2013 du trait de côte

L'évolution récente est ici étudiée uniquement sur le critère « trait de côte », dans la mesure où ce secteur ne fait pas l'objet d'un suivi de la position du pied de dune, car non-inclus dans le ROL. De même, l'approche est uniquement réalisée à partir de données d'ortho-photographies aériennes (2002, 2007, 2011, 2013). Le pas de temps entre les prises de vues ne permet pas de faire une approche similaire à celle menée sur les précédents secteurs, avec comparaison avec les conditions hydrodynamiques, l'approche reste donc descriptive.

Ce secteur est en recul depuis 2002 (-9 m en moyenne), qui résulte de la quasi-totalité de la perte de terrain entre 2007 et 2011. Durant cette période, la tempête de novembre 2008, tempête majeure sur la Plaine orientale, a probablement joué un rôle important sur le recul du trait de côte, et du pied de dune probablement, sans qu'il en soit possible d'en quantifier la responsabilité à l'aide de ces données.

Au cours des périodes 2002-2007 et 2011-2013, on observe une certaine similitude de la répartition le long du littoral des zones d'érosion et d'accrétion, et des amplitudes d'évolution semblables. Ce type de comportement est probablement le résultat de la mobilité des barres sous-marines qui induisent une variabilité spatiale et temporelle des zones protégées ou non des attaques des vagues.

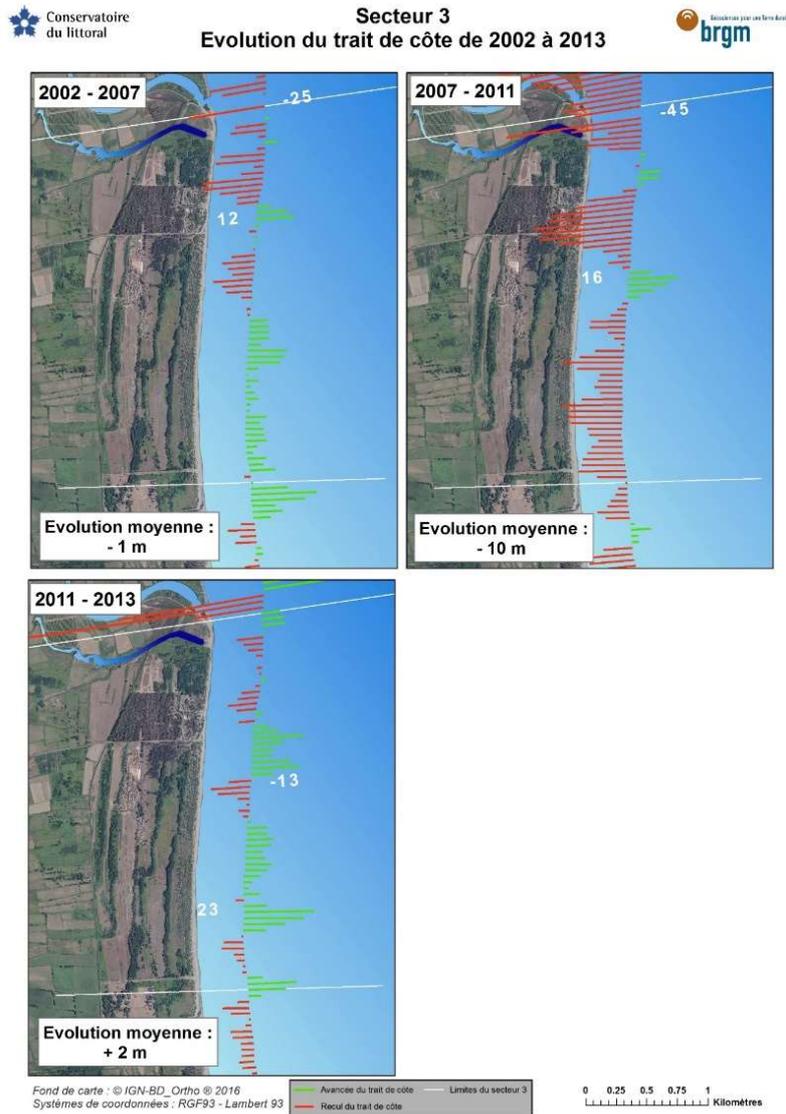


Illustration 36 - Evolution du trait de côte 2002-2013 sur le secteur n°3

5.6. RÔLE DES AMÉNAGEMENTS

Le rôle des aménagements réalisés en 2004 par le Conservatoire du Littoral sur les secteurs n°1 et n°2 (pose de rangées de ganivelles, Illustration 37) en haute plage au contact du pied de dune est ici étudiée :

- à long-terme, à travers une analyse de l'évolution résiduelle du pied de dune globale avant et après les aménagements ;
- à court-terme, à travers une analyse de l'évolution topographique entre 2010 et 2013 par comparaison des données lidar topographiques disponibles sur les deux secteurs.

Ces aménagements qui ont été mis en place sur le cordon dunaire permettent de limiter la fréquentation et ainsi les effets néfastes du piétinement. Ils contribuent aussi à fixer/piéger le sable déplacé par le vent sur l'avant dune.



Illustration 37 - Système de ganivelles en pied de dune sur le littoral de la Marana (secteur n°2 au nord du lotissement de la Marana ; vue vers le sud ; crédit photo : ROL/BRGM, 07/04/2016).

5.6.1. A long-terme

Sur le secteur n°1 (Illustration 38), les évolutions globales entre 2002 et 2004 étaient marquées par un bilan positif de +5 m d'avancée, dans un contexte donc favorable pour l'accrétion du pied de dune. Après la mise en place des aménagements en 2004, l'évolution jusqu'en 2016 est marquée par une avancée de l'ordre de +7 m en moyenne sur le secteur. Une telle évolution traduit ainsi une stabilité de la tendance d'accrétion du pied de dune à cette échelle de temps, avec un rôle très probablement positif des rangées de ganivelles sur le développement du pied de dune, bien qu'à travers ces données, la démonstration de leurs effets reste délicate.

Sur le secteur n°2 (Illustration 39), le rôle des aménagements n'est pas aussi évident. En effet, entre 2002 et 2004, on constate une distribution des zones en accrétion et en érosion avec une accrétion moyenne de +4 m du pied de dune. Sur la période 2004-2016, on retrouve une répartition quasi-similaire avec des évolutions avec cependant des amplitudes d'évolution différentes et un bilan négatif avec un recul moyen de -4 m.

Cette différence peut s'expliquer par le contexte de chaque site. Le site n°1 se situe à l'extrémité nord de la Plaine orientale, dans une zone de ralentissement de la dérive littorale sud-nord et donc dans un contexte favorable à la sédimentation. A l'inverse en raison de la différence d'incidence du trait de côte par rapport aux vagues modales de secteur Sud-Sud-Est, le transit sédimentaire par la dérive littorale est probablement plus important sur le secteur n°2 qui est ainsi dans un environnement moins favorable pour le dépôt.

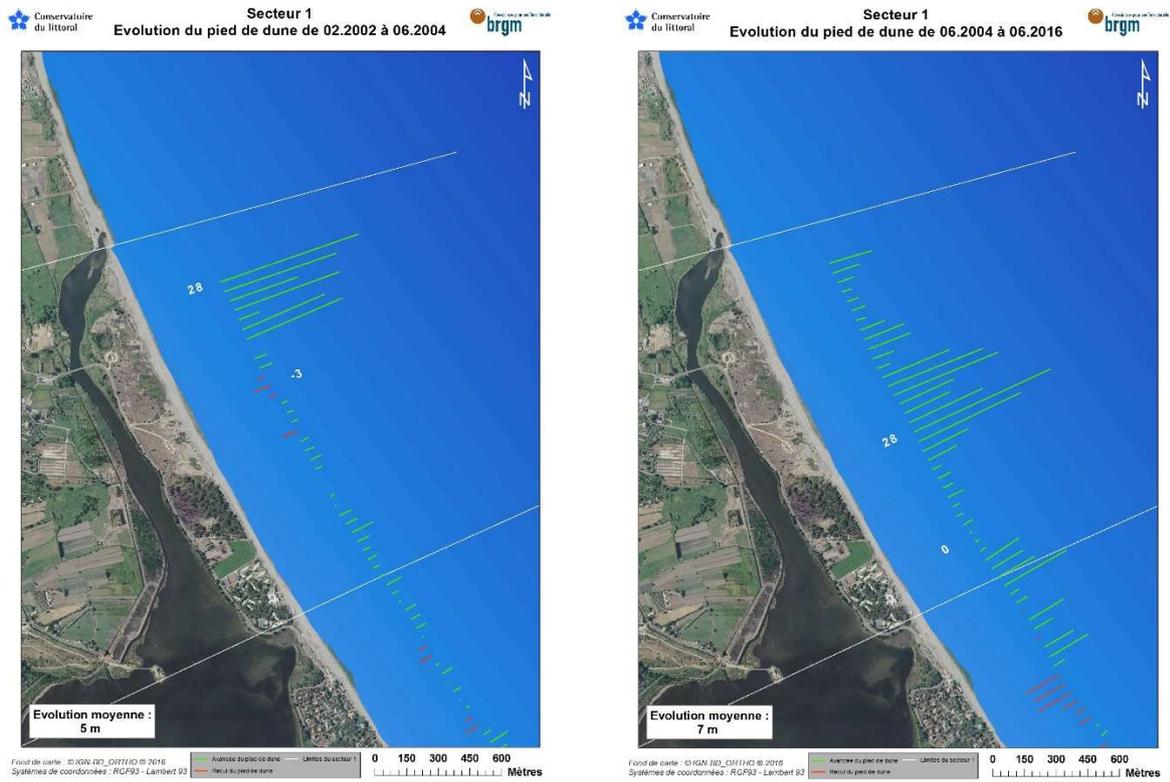


Illustration 38 - Evolution résiduelle du pied de dune sur le secteur 1 avant (2002-2004) et après les aménagements (2004-2016)

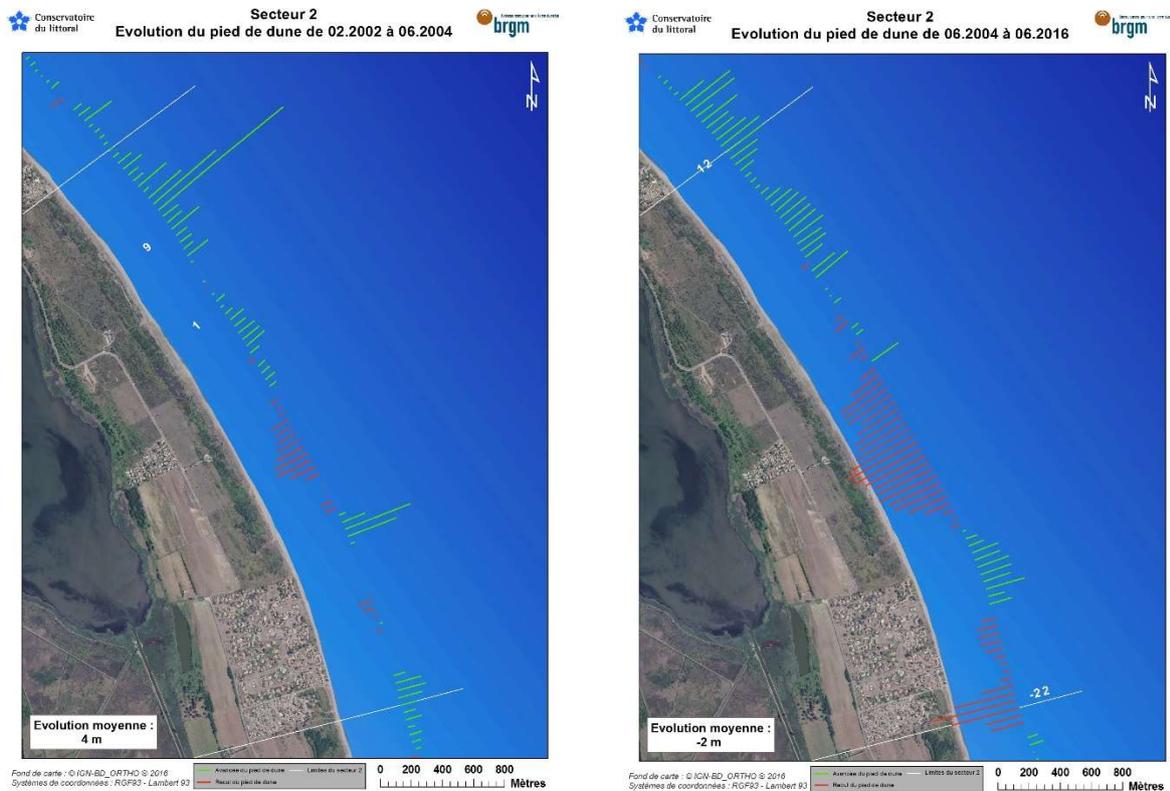


Illustration 39 - Evolution résiduelle du pied de dune sur le secteur 2 avant (2002-2004) et après les aménagements (2004-2016)

5.6.2. A court-terme

La différence d'altimétrie entre 2010 et 2013 que l'on peut mesurer à travers la comparaison des données lidar permet de mettre en évidence le rôle des aménagements sur la dynamique du cordon dunaire sur une courte période de temps. A titre d'exemple, l'illustration 40 montre ainsi l'évolution topographique du cordon dunaire sur le secteur n°2, au nord du lotissement de la Marana.

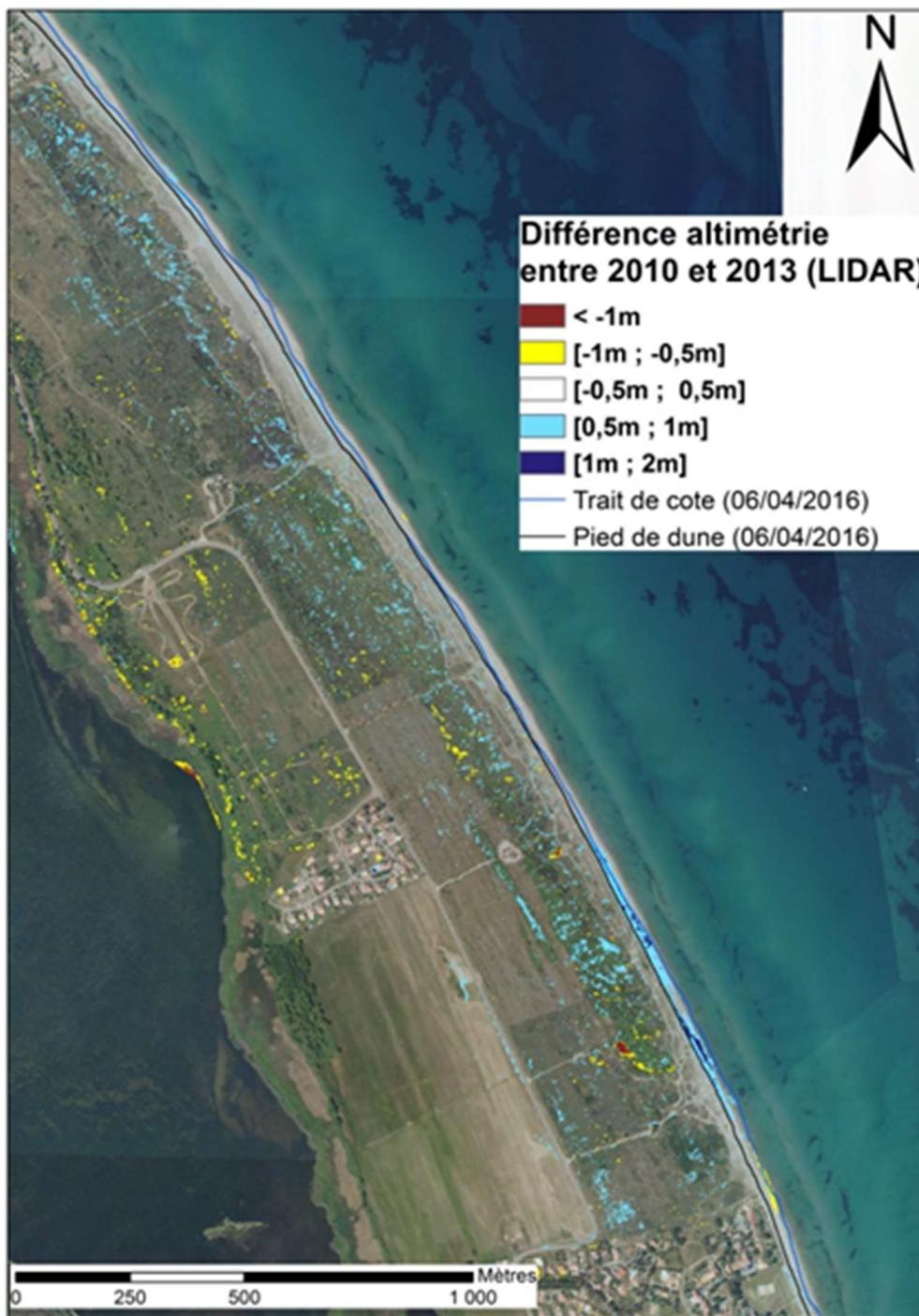


Illustration 40 - Différentiel altimétrique entre 2013 (données Lidar DDTM2B) et 2010 (données lidar BRGM/OEC).

Au droit des secteurs aménagés, situés sur la partie nord, on distingue qu'au niveau de la zone en arrière de la crête du cordon dunaire, les zones en accrétion (bleu clair) sont relativement fréquentes. Ceci tend à montrer l'efficacité des ganivelles qui facilitent la formation du bourrelet dunaire, (Illustration 41), favorisant par conséquent la déflation éolienne en arrière-dune. Cette efficacité a entraîné par la suite le Conservatoire à disposer d'autres rangées de ganivelles devant les premières implantées pour accompagner et consolider les accrétions constatées et protéger ainsi ce secteur contre l'érosion (Illustration 42) De plus, cela atteste l'efficacité de ces systèmes pour gérer les cheminements sur l'arrière-dune et limiter ainsi les effets néfastes d'un piétinement régulier sur celle-ci.



Illustration 41 - Dépôts éoliens en arrière des ganivelles - Secteur Pineto-Poretta (2016, Conservatoire du littoral)



Illustration 42 – Systèmes de ganivelles en plusieurs rangées sur le secteur Pineto-Poretta (2016, Conservatoire du littoral)

5.7. CONCLUSIONS SUR L'EVOLUTION MORPHOLOGIQUE DES SECTEURS RETENUS SUR LE SITE ADAPTO

Les secteurs sur le littoral de la Marana (secteur 1 et 2) montrent généralement une tendance à une relative stabilité de la position du trait de côte sur de longues échelles de temps (1937-2016), tout en présentant une forte variabilité interannuelle. A l'inverse, le secteur 3 sur le littoral nord de la Casinca, dans le contexte hydro-sédimentaire de l'embouchure du Golo, la tendance est marquée par une érosion progressive de la rive sud de l'embouchure qui décroît progressivement vers le Sud. A cette échelle de temps, ces grandes tendances résultent directement de l'impact de la dérive littorale régionale (de direction Sud-Nord sur la Plaine orientale) et de ses modifications locales, en relation avec les particularités morpho-bathymétriques. Ainsi, le lobe sédimentaire sous-marin (barre d'embouchure) à l'embouchure du Golo, joue un rôle important en réfractant les vagues incidentes de secteur Est, vers le nord et vers le Sud, entraînant de fait une divergence locale de la dérive sédimentaire et ainsi favorisant le recul au droit du fleuve. Si ce type de comportement morphodynamique se retrouve sur la Plaine orientale à l'embouchure du Tavignano, et sur d'autres littoraux microtidaux, il reste cependant peu quantifié en raison de l'absence de mesures régulières disponibles. Une autre hypothèse possible, non contradictoire avec la précédente, pour expliquer cette tendance chronique au recul local est une réduction des apports sédimentaires du Golo, et un démantèlement progressif du lobe par la dérive littorale.

Sur la période récente (2002-2013), les dynamiques du trait de côte et du pied de dune montrent une grande variabilité d'une période à l'autre et d'un site à l'autre. A l'échelle de chaque secteur, les relations entre l'évolution morphologique mesurée et le contexte hydrodynamique en termes d'énergie incidente des vagues (conditions peu ou très énergétiques) ne sont pas claires, et des conditions d'énergie équivalentes peuvent avoir des résultats très différents en termes d'évolution morphologique, ce qui complique ainsi la prise en compte du forçage des vagues dans une démarche prospective visant à anticiper une évolution potentielle du trait de côte à plus ou moins long terme. De même, l'analyse des relations entre l'évolution du pied de dune et celle du trait de côte montre qu'à la lumière des données disponibles, les comportements apparaissent déconnectés. Ces différences soulignent une fois de plus l'importance du contexte bathymétrique sur les évolutions de la plage émergée, source d'apports sableux au domaine dunaire. En particulier pour les sites de la Marana, le rôle des barres sous-marines en tant que morphologie protectrice du littoral est illustré en tant que dissipateur des vagues fortes, répartiteur de l'énergie de vagues le long du linéaire côtier et en tant que réservoirs sableux. Elles garantissent ici la bonne résilience du trait de côte et des plages contre les vagues de tempêtes.

Le rôle des aménagements réalisés par le Conservatoire du Littoral sur les évolutions du pied de dune n'est pas très explicite au regard des données de terrain disponibles. En revanche, l'analyse des évolutions topographiques entre 2010 et 2013 grâce aux données lidar a montré une tendance à l'accrétion du domaine dunaire, liée probablement principalement à la limitation du piétinement. Il favorise la stabilisation de la végétation dunaire et contribue aux dépôts éoliens, qui restent cependant peu importants en raison du faible potentiel d'apport lié à des surfaces de déflation limitée eu égard les faibles largeurs de plage émergée.

Enfin, l'analyse réalisée est fortement dépendante des données de suivis de terrain. Celles-ci principalement acquises dans le cadre du réseau d'observation du Littoral de Corse, depuis 2002 et à un pas de temps annuel, restent cependant trop fragmentaires pour caractériser des modes d'évolution du littoral et les mettre en relation directe avec les conditions énergétiques. La mise en place de suivis haute-fréquence des systèmes de barres sableuses du lido de la Marana par camera video et l'initiation d'un suivi systématique du littoral de l'embouchure du Golo restent une priorité pour consolider la connaissance de leur comportement morphodynamique.

Les principaux résultats de l'analyse de l'évolution des sites seront exploités par la suite pour argumenter de l'approche méthodologique retenue pour anticiper l'évolution du littoral à échéance 2050 dans la suite du rapport.

6. Evolution future du trait de cote

Ce chapitre présente la méthodologie employée pour déterminer les zones du littoral de la Marana et du nord de la Casinca exposées à un aléa érosion côtière à l'horizon 2050.

Cette évaluation intègre les conséquences de :

- l'évolution historique du littoral liée principalement à la climatologie modale des houles et à l'influence de la dérive littorale sur les cycles érosion/avancée du trait de côte sur l'ensemble du site pilote Corse du projet ADAPTO ;
- l'évolution évènementielle lors d'épisodes de tempêtes, appréhendée grâce aux levés annuels de profils de plages et de trait de côte réalisés par le BRGM dans le Cadre du Réseau d'Observation du Littoral de la Corse (ROL) le long de la Plaine orientale ⁵;
- l'évolution du littoral liée à une remontée du niveau marin en conséquence du changement climatique en cours à l'échelle globale, sur la base de la règle de Brüun et des hypothèses d'amplitude de remontée du niveau à l'horizon 2050, couramment acceptées par les experts.

La méthodologie employée consiste à partir des données disponibles et des hypothèses retenues à construire une position théorique du trait de côte en 2050, la zone potentiellement à risque étant délimitée par la position actuelle du trait de côte (Trait de côte de référence) et cette position 2050. C'est la méthode employée dans l'élaboration des Plans de Prévention des Risques Littoraux (MEDDE, 2014).

6.1. MÉTHODOLOGIE

La méthodologie développée dans la présente étude afin de cartographier les traits de côte prospectifs aux horizons 2050 repose sur l'étude de l'évolution du littoral du site-pilote ADAPTO, et plus particulièrement du trait de côte⁶ (TDC), effectuée à partir de l'analyse de photographies aériennes anciennes et récentes, et de mesures prises au DGPS sur le terrain.

Les taux d'évolution du trait de côte ont été calculés selon une approche déterministe, à l'aide d'une analyse statistique sur la position de dix-neuf traits de côte historiques répartis :

- sur la période 1937 – 2016 pour le lido de la Marana ;
- sur la période 1937 - 2013 pour le sud de la commune de Lucciana et le nord de la Casinca.

L'analyse est réalisée à l'aide d'un outil géomatique appelé DSAS (*Digital Shoreline Analysis System*) développé par l'USGS (*United States Geological Survey* (Danforth and Thieler, 1992, Thieler *et al.*, 2009) et exploitable sous ArcGIS (©Esri).

Les étapes ayant permis de déterminer ces taux, puis de cartographier les TDC prospectifs aux horizons 2050, sont présentées ci-après (Illustration 43).

⁵ <http://www.littoral-corse.fr/>

⁶ Trait de côte : dans le cadre de cette étude, il correspond à la limite terre-mer définie par la position de la berme.

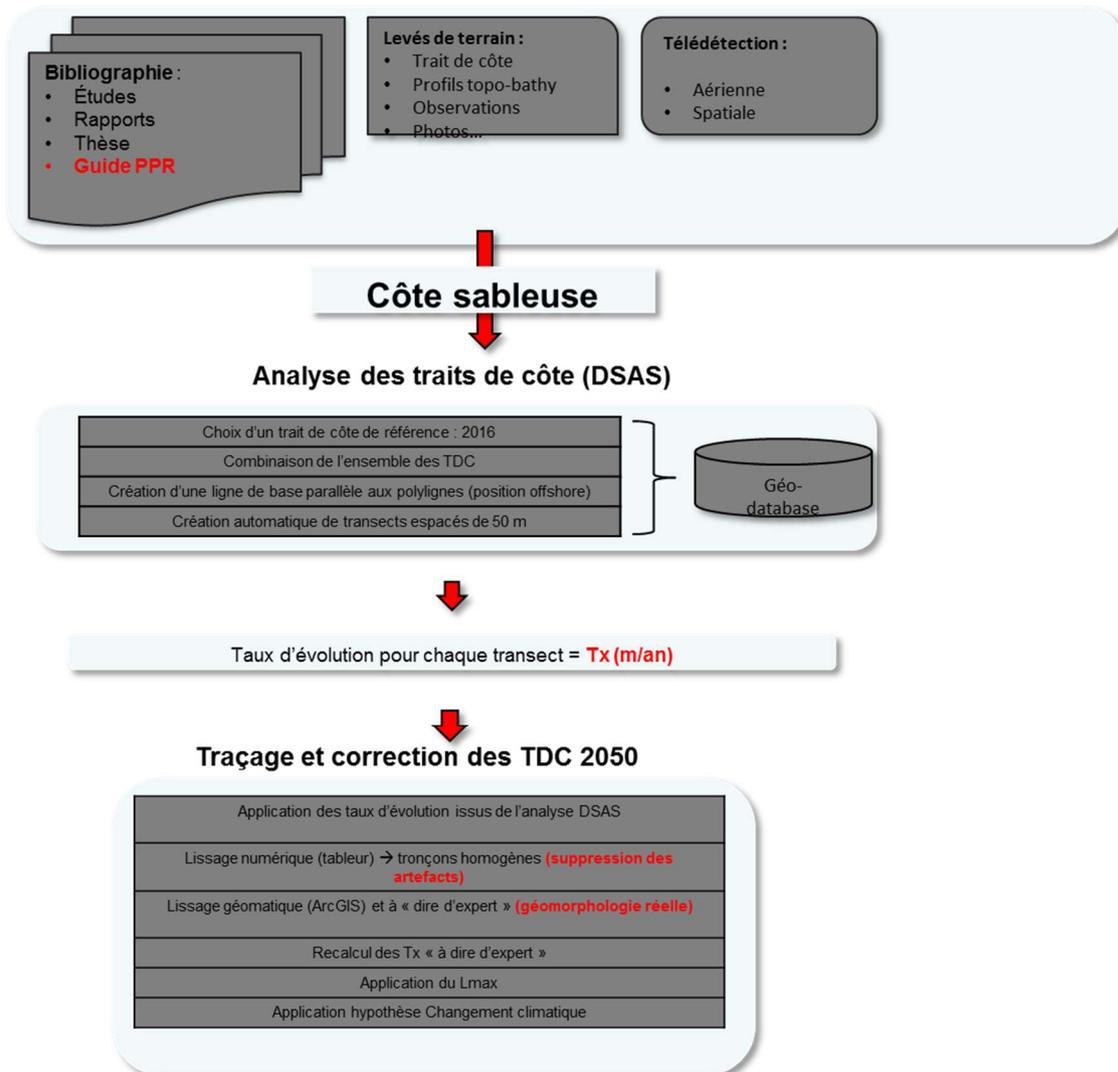


Illustration 43 - Méthodologie de la projection de la position du trait de côte du lido de la Marana à l'horizon 2050 (d'après Bernon et al., 2016, modifié).

L'analyse statistique déterministe sur les positions historiques du trait de côte présente l'avantage de se révéler fiable dans la majorité des cas d'utilisation (bonne reproduction de l'évolution passée du littoral). Elle permet la traçabilité des différentes étapes de construction des traits de côte futurs.

Plusieurs méthodes statistiques de calcul des taux d'évolution ont été mises en œuvre et les résultats étudiés. Ces méthodes sont disponibles dans DSAS et comprennent notamment la LRR (Linear Regression Rate-of-change), la LMS (Least Median of Squares) et EPR (End Point Rate) (Thieler *et al.*, 2009). Les résultats issus de cette analyse sont des valeurs de taux d'évolution au droit de chaque transect. Ils peuvent être attribués aux intersections entre les transects et le trait de côte de référence, et par extension, 50 mètres de part et d'autre des transects.

Toutefois, l'étude des résultats statistiques bruts est effectuée sous tableur Excel®.

L'utilisation de l'outil DSAS possède des avantages et des inconvénients qu'il est important de préciser :

- il permet de prendre en compte l'ensemble des traits de côte disponibles et d'avoir une précision correcte des taux d'évolution ;

- il est également rapide à mettre en œuvre et s'applique bien en milieu ouvert.

Cependant :

- l'analyse statistique diachronique est limitée dans les zones où alternent des phases d'érosion et d'accrétion ;
- les dynamiques sédimentaires fortes, induites par exemple au niveau des embouchures et provoquant des évolutions importantes du trait de côte, ne peuvent être retranscrites par les méthodes statistiques disponibles dans DSAS (régressions linéaires).

En conséquence, la reprise des résultats bruts de DSAS à dire d'expert est fondamentale pour conforter les calculs statistiques.

Pour identifier ces secteurs nécessitant une analyse plus fine à dire d'expert en raison de la complexité des processus responsables des évolutions de la position du trait de côte, les résultats de plusieurs méthodes statistiques ont été comparés, comme le préconise le guide méthodologique d'élaboration des PPRL (MEDDE, 2014).

L'influence du jeu de données sur les résultats, constitué de plusieurs traits de côte, a également été étudiée. Les résultats (les taux d'évolution) sont susceptibles de varier selon la méthode statistique et/ou l'échantillon de traits de côte historiques pris en compte dans l'analyse.

Un réajustement des taux d'évolution bruts calculés par les différentes méthodes statistiques est alors indispensable pour déduire des taux d'évolution cohérents par portions homogènes du littoral.

Pour ce faire, il a été décidé de considérer les résultats fournis par la méthode LMS (Illustration 44), généralement la plus sécuritaire, et d'appliquer un dire d'expert en deux étapes présentées ci-après (harmonisation des taux d'évolution bruts, lissage géomatique à dire d'expert). Elle permet également de minimiser l'influence des événements extrêmes sur les évolutions.

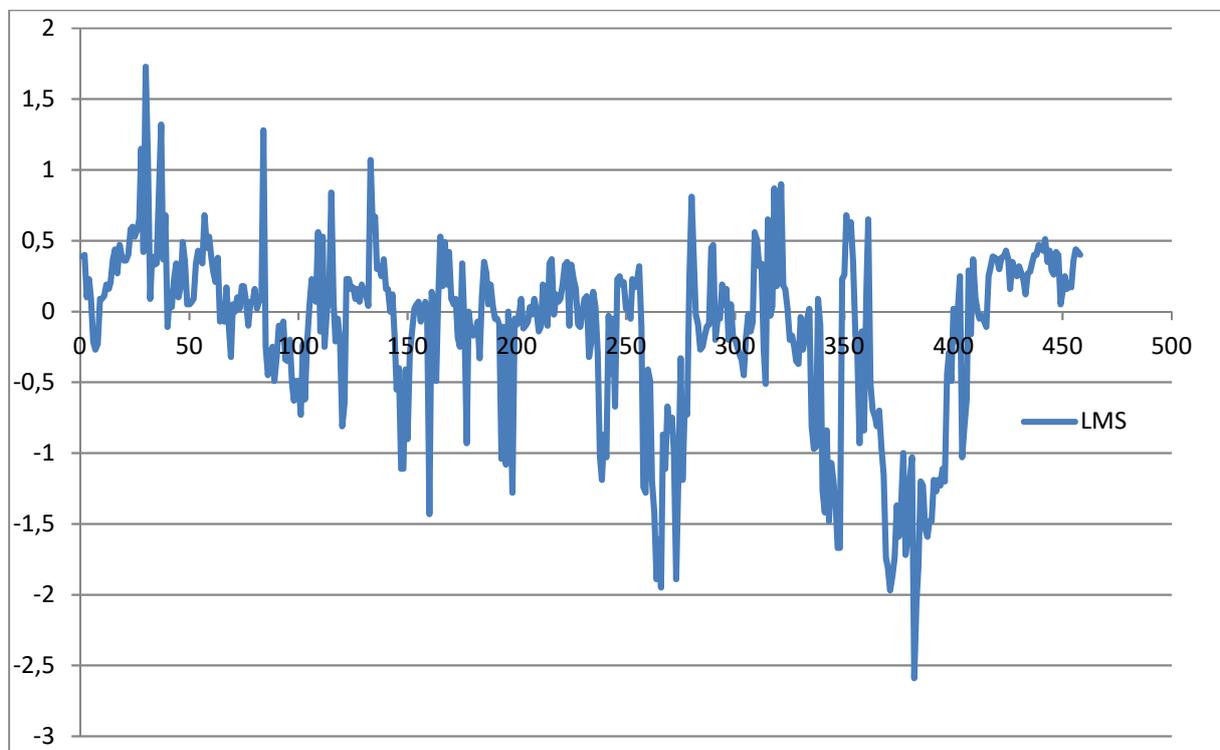


Illustration 44 - Taux d'évolution du trait de côte (LMS) pour chaque transect le long du littoral

6.2. CONSTRUCTION DU TRAIT DE COTE 2050

6.2.1. Hypothèses et scénarios d'évolution du trait de côte

Les hypothèses génériques énoncées dans le guide méthodologique d'élaboration des PPRL (MEDDE, 2014) concernant l'analyse diachronique de position des traits de côte sont respectées :

- la connaissance des évolutions sur plusieurs dizaines d'années passées autorise une projection des tendances passées dans le futur, dans des conditions environnementales considérées comme invariantes dans le temps ;
- les indicateurs de la position du trait de côte aux différentes dates sont identiques ou assimilables.

L'évolution future du trait de côte dépend en partie de la présence d'ouvrages côtiers, et notamment ceux qui ont vocation à limiter l'érosion côtière. Pour ce dernier point, le lido de la Marana est exempt de constructions portuaires susceptibles de perturber fortement la dynamique sédimentaire. Malgré cela, des aménagements locaux de protection contre l'érosion peuvent avoir des impacts significatifs sur l'évolution côtière : ainsi, l'hôtel Pineto (commune de Biguglia), a subi d'importants dégâts lors de la tempête du 27-28 novembre 2008. En réponse à cet événement, l'hôtel s'est doté d'ouvrages de protection, un cordon d'enrochements a ainsi été positionné en front de mer au droit de l'hôtel dans le secteur touché par la tempête de 2008.

6.2.2. Harmonisation des taux d'évolution bruts

L'outil DSAS fournit donc un taux d'évolution du TDC tous les 50 m. A l'aide de la connaissance du terrain et des données issues de la bibliographie, les secteurs ayant des vitesses d'évolution homogènes ont été définis. Cette harmonisation des taux d'évolution bruts par secteurs permet de s'affranchir des artefacts locaux issus de l'analyse brute réalisée par DSAS. En effet, les valeurs calculées tous les 50 m peuvent varier fortement d'un transect à un autre, en raison de variations soudaines des positions des TDC historiques. Elles ne représentent pas la tendance globale que l'on cherche à définir dans cette étude pour des projections futures à court et moyen termes. Les valeurs statistiques sont alors moyennées par tronçons homogènes (sous tableur Excel®).

Le lido de la Marana est caractérisé par la présence de barres sous-marines parallèles au littoral et en forme de croissants (levé Lidar 2006 sur l'illustration 3 et 2010 sur l'illustration 4, p.12). Son évolution morphodynamique à moyen terme est caractérisée par une alternance de phases érosives et de phases en accumulation, liée à la dynamique des barres sous-marines, relevant d'un modèle classique avec migration des barres vers la côte en conditions de beau temps, et vers le large sous l'effet des fortes tempêtes.

La dynamique de ces barres sous-marines, qui sont en forme de croissant et qui sont les plus développées de Corse, est importante et les vitesses de déplacement peuvent atteindre plusieurs dizaines de mètres par an. La forte variabilité latérale de ces barres ne permet pas de conclure sur la nature exacte de ces déplacements (longitudinalement ou transversalement).

De plus, l'interaction entre l'évolution du trait de côte et la dynamique des barres est encore à ce jour difficile à mettre en évidence, malgré les nombreux levés sur ce site et la disponibilité de données lidar. En effet, les levés lidar de 2006 et 2010 montrent qu'elles ont des formes en croissant dont les cornes sont dirigées vers la plage, que les barres internes sont plus rectilignes et sont entrecoupées tous les 400 à 500 m environ par un chenal de vidange qui s'ouvre vers le Sud (Balouin *et al.*, 2009 ; Stépanian *et al.*, 2011).

La longueur d'onde des barres sous-marines parallèlement au littoral amène à prendre en compte leur impact sur la dynamique du trait de côte, en fonction de leurs déplacements longitudinaux, sous l'effet de la dérive littorale. L'homogénéisation des taux moyens est alors effectuée suivant une fenêtre mobile de 400 m.

Une analyse de l'évolution de ces taux moyens à l'échelle du littoral est alors effectuée pour identifier des zones de comportements homogènes, en comparant les résultats des méthodes statistiques LMS et LRR avec prise en compte des incertitudes à 95%. Les résultats sont présentés dans l'illustration 45.

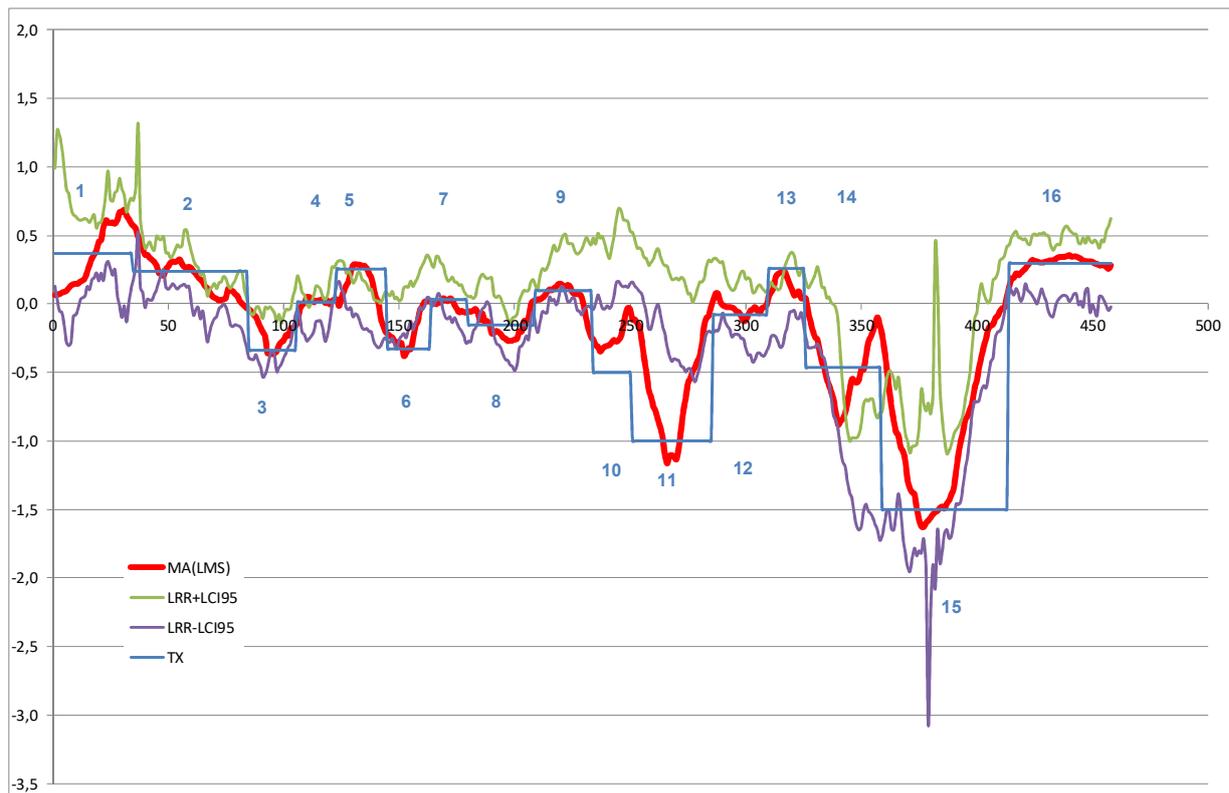


Illustration 45 - Harmonisation des taux et sectorisation du littoral en tronçons au comportement homogène

Lorsque les valeurs de LMS sont cohérentes avec les valeurs LRR (+/- IC 95%), les valeurs des taux moyens TX sont retenues comme cohérentes à l'échelle de chaque secteur.

Lorsqu'elles diffèrent, une analyse par secteur est réalisée pour identifier les causes de cette différence et un taux moyen à dire d'expert est retenu pour le secteur. Les comportements anormaux résultent généralement de la dynamique des embouchures très variables dans le temps, avec de fortes amplitudes (apparition/disparition des flèches sableuses, comblement des graus), de changements de comportement du littoral au cours du temps, et d'artefacts sur le levé ou la digitalisation du trait de côte.

L'analyse à dire d'expert est alors nécessaire pour identifier les causes et proposer un taux d'évolution cohérent avec la connaissance locale des processus et des morphologies.

L'illustration 46 montre la sectorisation du littoral ainsi réalisée et les taux moyens retenus pour chacun des secteurs.

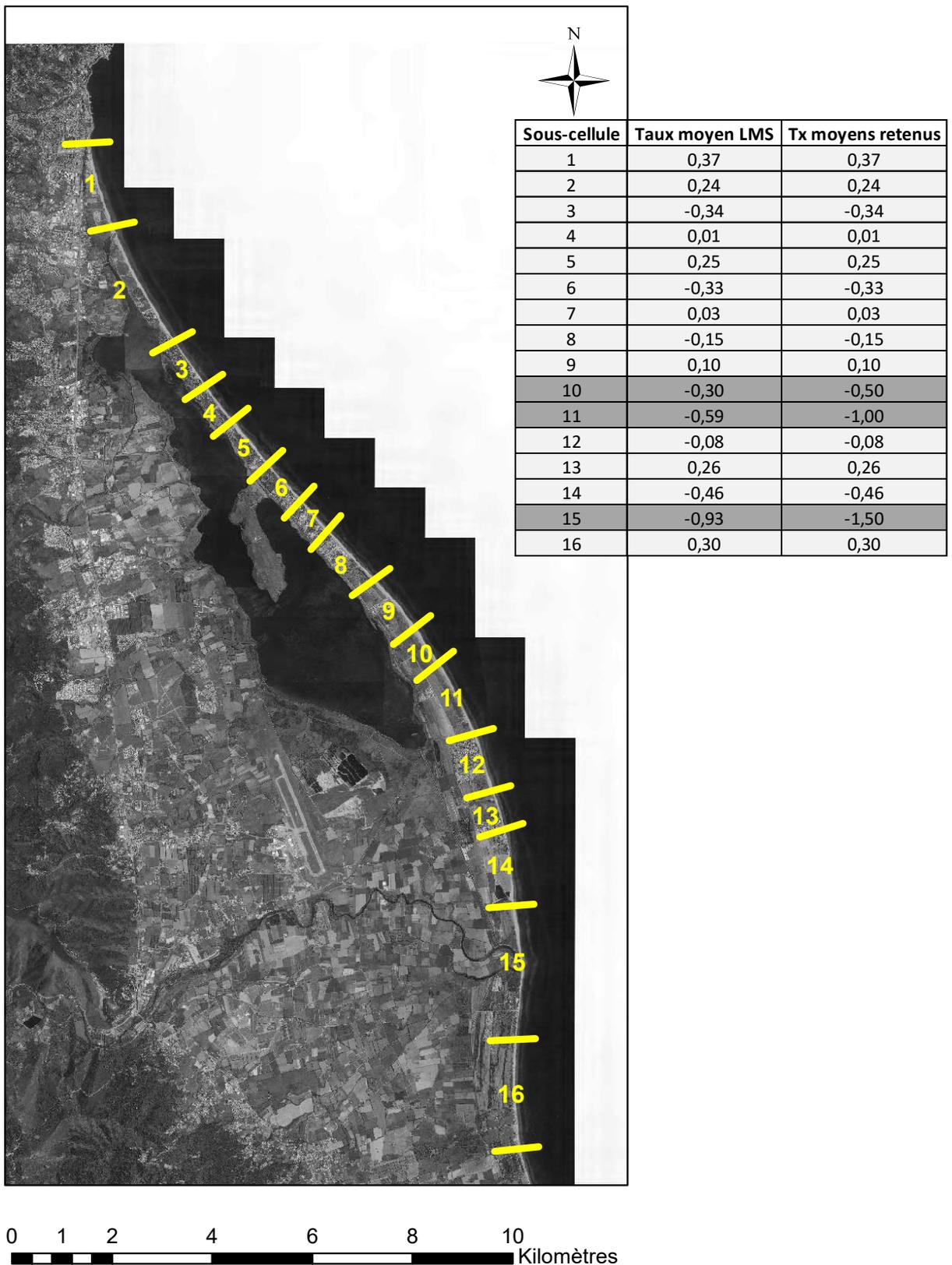


Illustration 46 - Sectorisation du littoral en tronçons au comportement homogène. En grisé dans le tableau, les zones qui ont fait l'objet d'une correction des taux à dire d'expert (orthophotographie : ©IGN, 2007).

6.2.3. Construction du trait de côte 2050

a) Projection des taux moyens

Les taux d'évolution harmonisés par tronçon sont alors attribués sur le TDC de référence de 2016 et 2013 qui est la base cartographique pour les projections des traits de côte futurs. Techniquement, une zone tampon est appliquée :

- sur le TDC 2013 d'une largeur égale à $37xT_x$ pour l'échéance 2050
- sur le TDC 2016 d'une largeur égale à $34xT_x$ pour l'échéance 2050.

L'enveloppe de ces zones tampons correspond ainsi à la position du TDC 2050 sur la seule base des taux d'évolution de la côte sableuse.

b) Lissage géomatique « à dire d'expert »

Une intervention à dire d'expert sur le TDC 2050 est ensuite réalisée. Elle vise à intégrer des informations difficilement quantifiables, c'est-à-dire que l'analyse statistique et l'harmonisation des taux d'évolution bruts seules ne peuvent prendre en compte, tels que :

- l'analyse historique, la connaissance du littoral de la Marana ;
- la connaissance du terrain (géologie, géomorphologie, observations diverses) et de la bibliographie ;
- la connaissance des processus hydro-sédimentaires, de leurs influences et de leurs évolutions, qui peuvent impacter les évolutions actuelles et futures du littoral ;

Cette intervention « à dire d'expert » est indispensable pour intégrer ces différentes informations. Elle permet également de lisser les contours du traits de côte de part et d'autres des transects en limite de chacun des secteurs pour éviter des décrochages trop importants du trait de côte incohérents avec le rôle de la mer et des vagues comme agents de régularisation du littoral à moyen et long-terme. Le lissage géomatique à dire d'expert est une correction effectuée sur les traits de côte projetés aux différents horizons temporels, après harmonisation des taux d'évolution bruts.

Elle est réalisée visuellement sous ArcGIS. Elle consiste à repositionner le trait de côte prospectif en considérant les éléments présentés ci-dessus.

6.2.4. Détermination du recul lié à un évènement majeur

Le long de la Plaine orientale de Corse, les évènements majeurs provoquent l'attaque du pied de dune, engendrant alors une érosion du cordon dunaire et des reculs significatifs.

Dans le cadre d'un programme de travail établi en 2014 et 2015 entre le BRGM et le MEDDE/DGPR, une étude sur les méthodologies de détermination et d'estimation du recul maximal des dunes lors d'évènements extrêmes a été réalisée (Desmazes *et al.*, 2015). Cette étude conclut que « *les observations et les mesures sont les éléments indispensables à la connaissance du recul dunaire lié à des évènements extrêmes ou aux séquences de tempêtes dans les bassins de risques littoraux soumis à l'aléa de recul du trait de côte sableux* ».

Deux méthodes visant à estimer les reculs dunaires liés à un évènement majeur sont proposées dans le guide méthodologique pour l'élaboration des PPRL (MEDDE, 2014) : les observations à la suite d'un évènement tempétueux et l'application de formules empiriques.

L'évènement particulièrement énergétique survenu sur la côte orientale de Corse est l'épisode de tempêtes de l'automne 2008, dont l'impact a pu être mesuré au travers des mesures annuelles réalisées par le BRGM dans le cadre du ROL, et l'étude menée sur la Plaine orientale en partenariat avec la DDTM2B (Stéphanian *et al.*, 2011 ; Balouin *et al.*, 2012). Le pas de temps

annuel de ces mesures ne permet pas de déterminer précisément le recul exceptionnel, car elles ne sont pas spécifiquement réalisées avant et après un évènement, mais la gamme des valeurs mesurées le long de la Plaine orientale permet une estimation de ce recul potentiel maximal de l'ordre de 15 m au niveau de la berme.

C'est cette valeur qui est retenue pour valeur de recul « L_{max} » lié à un évènement majeur.

Le recul du trait de côte lié à l'impact d'un évènement majeur se manifeste par des entailles d'érosion du cordon dunaire. Il s'agit concrètement de pertes de sables au niveau de la dune qui se forment à la suite de l'attaque du pied de dune par les vagues de tempête.

Sur l'exemple type de la côte sableuse aquitaine, ces entailles, dont la forme incurvée rappelle des « coups de cuillère », sont généralement corrélées avec la localisation et la morphologie des barres sableuses externes situées à environ 500 m au large du pied de dune (Castelle *et al.*, 2015, Illustration 47). Cette morphologie se rapproche de celles potentiellement présentes le long de la Plaine orientale.

Ce système de barres sableuses étant mobile sur l'ensemble du littoral, il n'est pas possible de déterminer les positions futures des entailles d'érosion engendrées par un évènement majeur. Il est donc considéré qu'une bande uniforme est exposée.

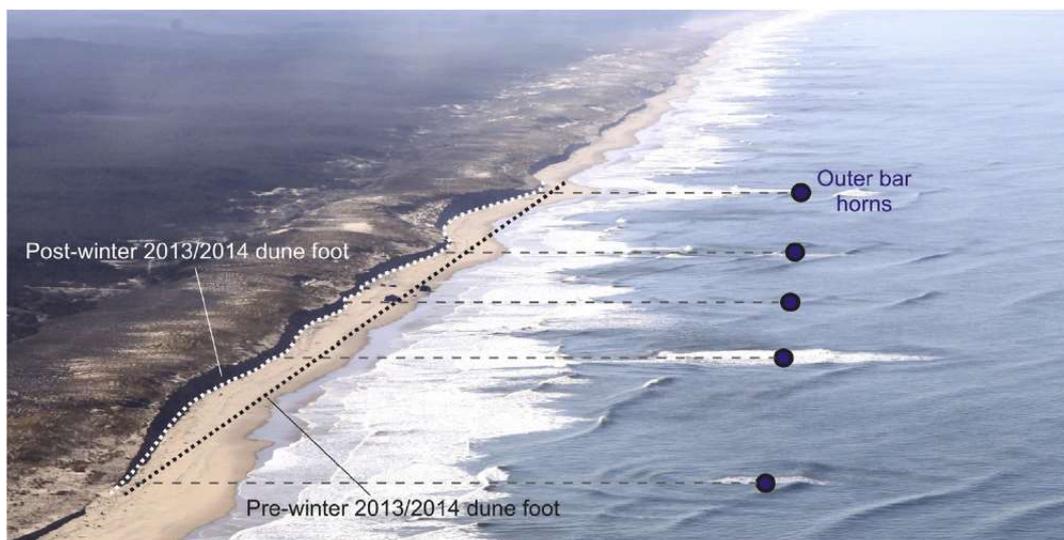


Illustration 47 – Exemple de relation entre les entailles d'érosion dunaire et les position des barres externes sur la Côte Aquitaine (photographie du 7 mars 2014 entre Lacanau et le Porge par Julien Lestage, dans Castelle *et al.*, 2015).

6.2.5. Impact du changement climatique sur le recul du trait de côte de la côte sableuse

Dans le cadre de cette étude, une première approche régionale a cependant été menée en utilisant une méthode citée dans le guide méthodologique pour l'élaboration des PPRL (MEDDE, 2014) : la règle de Bruun (Bruun, 1962). Les conséquences du changement climatique à l'échéance 2050 sont ainsi étudiées et se traduisent par un recul du trait de côte supplémentaire (ou amplifié) au recul évalué sur la base des observations historiques.

Les réflexions sur cette thématique ont mis en évidence les difficultés pour estimer avec précision les impacts du changement climatique. Ces difficultés relèvent, d'une part, de la variabilité des conséquences probables du changement climatique suivant les scénarios de réduction d'émission des gaz à effet de serre, et d'autre part, de l'indisponibilité d'une méthode précise pour quantifier ces impacts.

Cependant, d'après les travaux de la communauté scientifique, la conséquence la plus probable du changement climatique est l'élévation du niveau marin, qui est évaluée par une étude du BRGM en cours de 10 cm à 50 cm à l'horizon 2050 sur la façade maritime de la France métropolitaine. Ces valeurs ont été utilisées pour tester la méthode de Bruun.

a) Règle de Bruun (1962)

La règle de Bruun (Bruun, 1962), reste une formulation empirique qui bien que contestable dans son universalité, fournit une première estimation du recul engendré par la hausse du niveau marin sur les côtes basses meubles.

Cette méthode considère que le profil de plage s'adapte à l'élévation du niveau marin en conservant sa forme avec une translation sur le rivage. La méthode de Bruun (Illustration 48) estime le recul du trait de côte R d'après la formule :

$$R = S \left(\frac{L}{B+h} \right) = S \left(\frac{1}{\tan \alpha} \right)$$

où S est l'élévation du niveau de la mer, L la largeur du profil de la plage, B l'altitude de berme et h la profondeur de fermeture (hauteur entre l'isobathe et le pied de la dune).



Illustration 48 - Schéma des paramètres pris en compte pour l'application de la règle de Bruun, avec une translation verticale et vers la terre du profil d'équilibre à cause d'une élévation du niveau de la mer (d'après Pilkey et Cooper, 2004)

La règle de Bruun nécessite de déterminer la profondeur de fermeture et l'altitude de la berme.

La profondeur de fermeture est un paramètre généralement défini comme la limite d'un transport important de sédiments sous l'action des vagues le long d'un profil de plage.

Cette profondeur a été estimée pour le lido de la Marana à l'aide des deux profils topographiques relevés annuellement entre 2002 et 2013 dans le cadre du ROL sur deux secteurs de la Marana (Illustration 49). Les données 2002-2013 sont représentées pour chacun des profils sur l'illustration 50 (profil Nord à San Damiano) et l'illustration 51 (profil sud au niveau du CCAS).

La profondeur de fermeture est ici estimée au niveau où la variabilité de la bathymétrie du profil est nulle, c'est à dire à une profondeur où il n'y a plus d'évolution significative du profil de plage, et donc de changement bathymétrique dans le temps :

- sur le profil nord, la profondeur de fermeture est de l'ordre de -15 m NGF, après l'herbier de posidonies perturbe le signal bathymétrique de manière trop importante ;
- sur le profil sud, cette profondeur de fermeture est de l'ordre de -10 m NGF. Au-delà on retrouve l'herbier de posidonies.

L'altitude de la berme le long du littoral du lido de la Marana est de l'ordre de +1,5 m NGF. Elle est proche de celle du pied de dune.

La pente moyenne de la plage est alors calculée :

- entre +1,5 m NGF et -15 m NGF sur le profil nord ;
- entre +1,5 m NGF et -10 m NGF sur le profil sud.

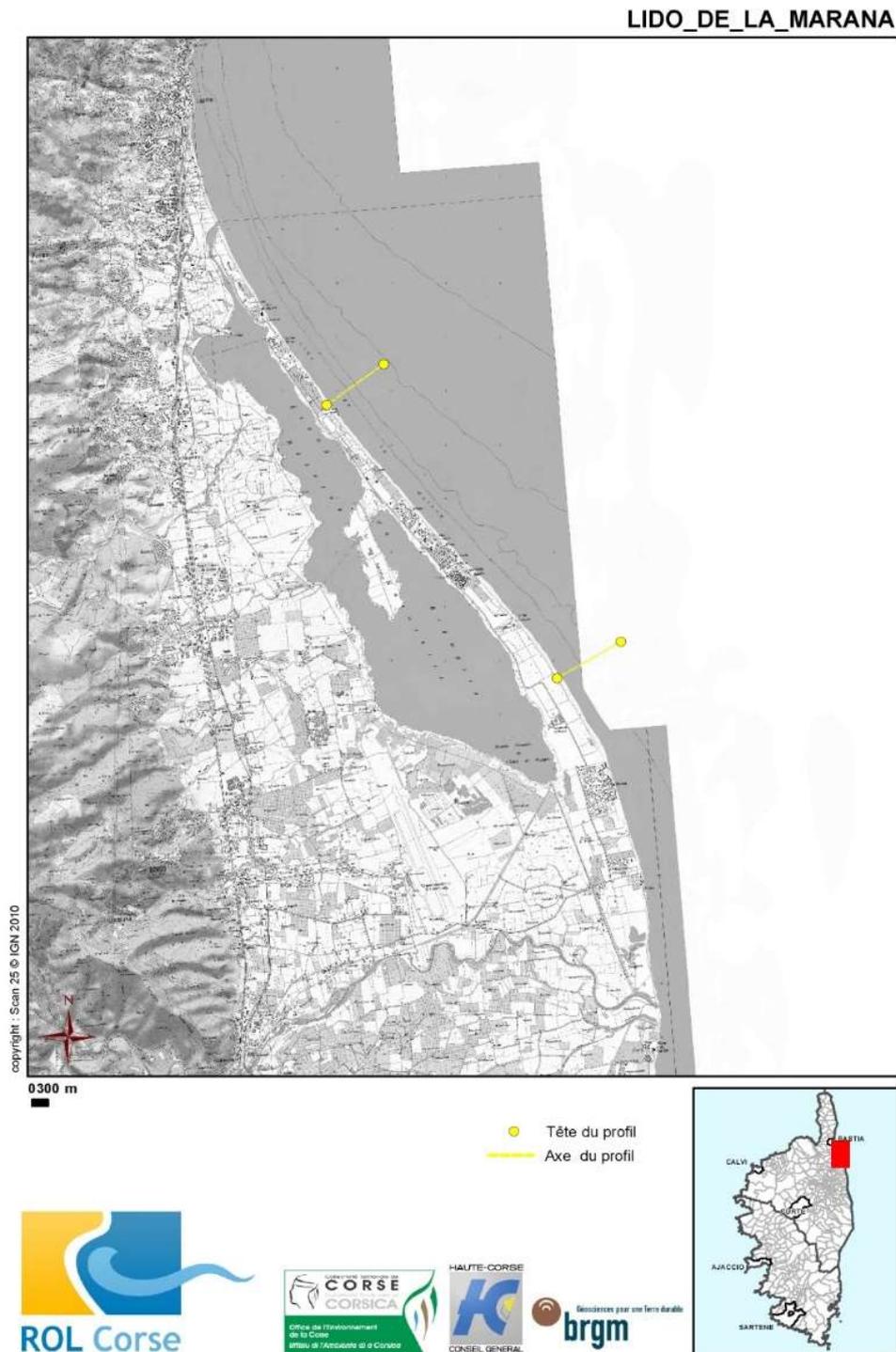
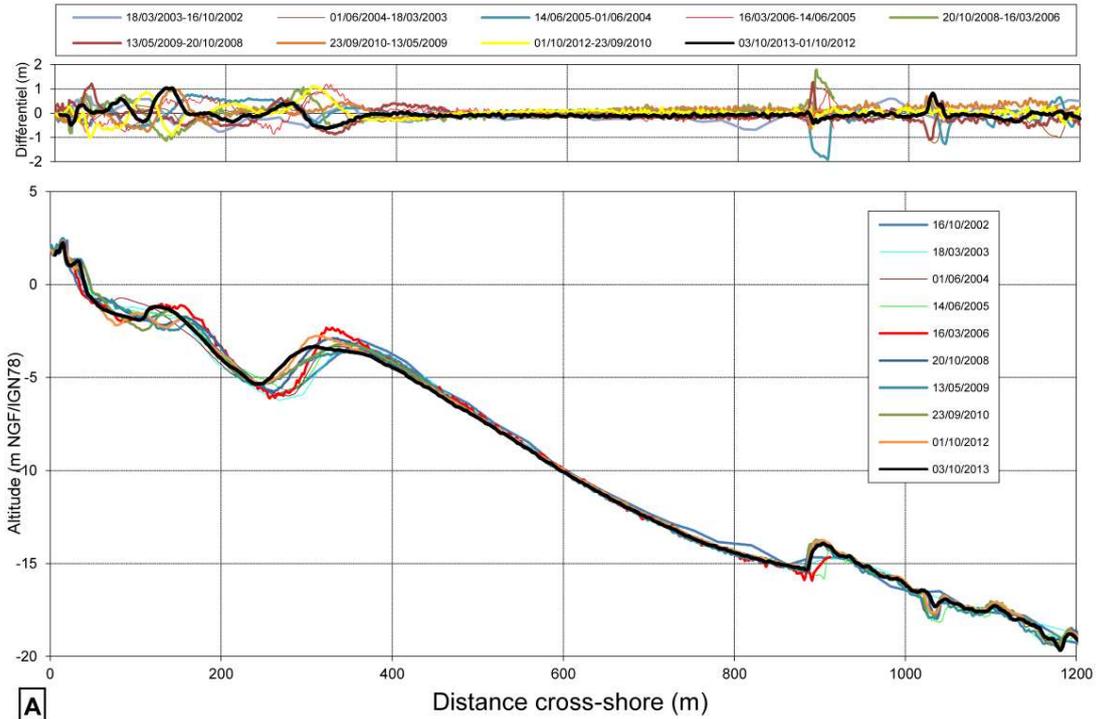
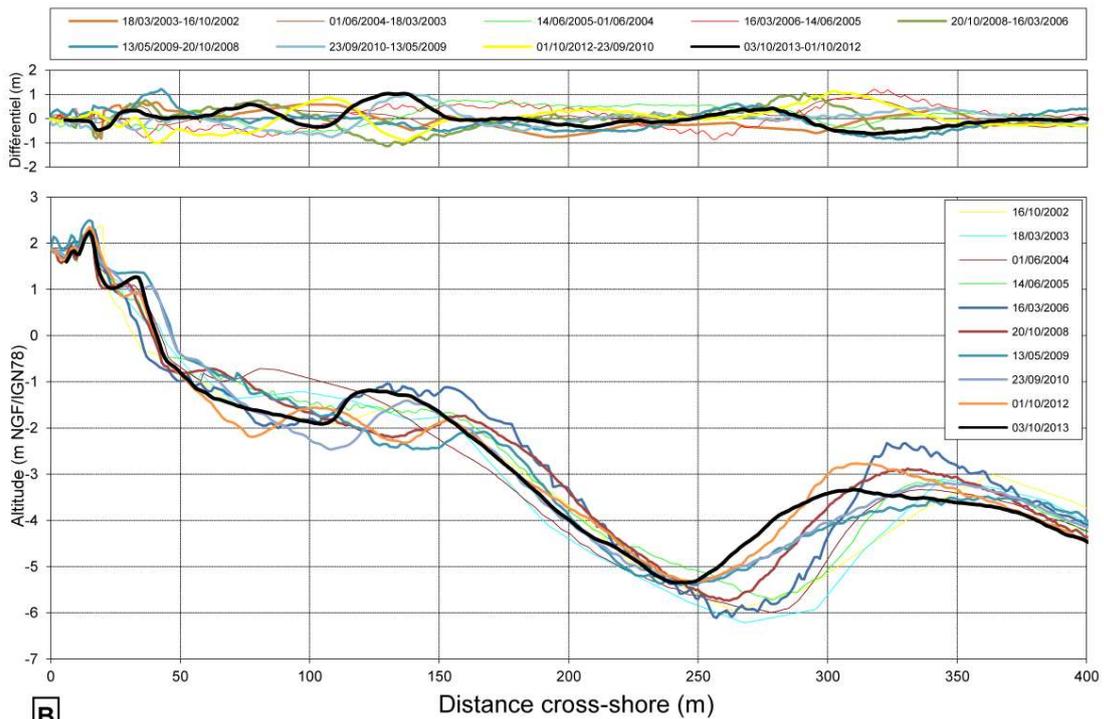


Illustration 49 - Schéma d'implantation du site Lido de la Marana (© IGN SCAN 25).

Marana - Profil Nord



A



B

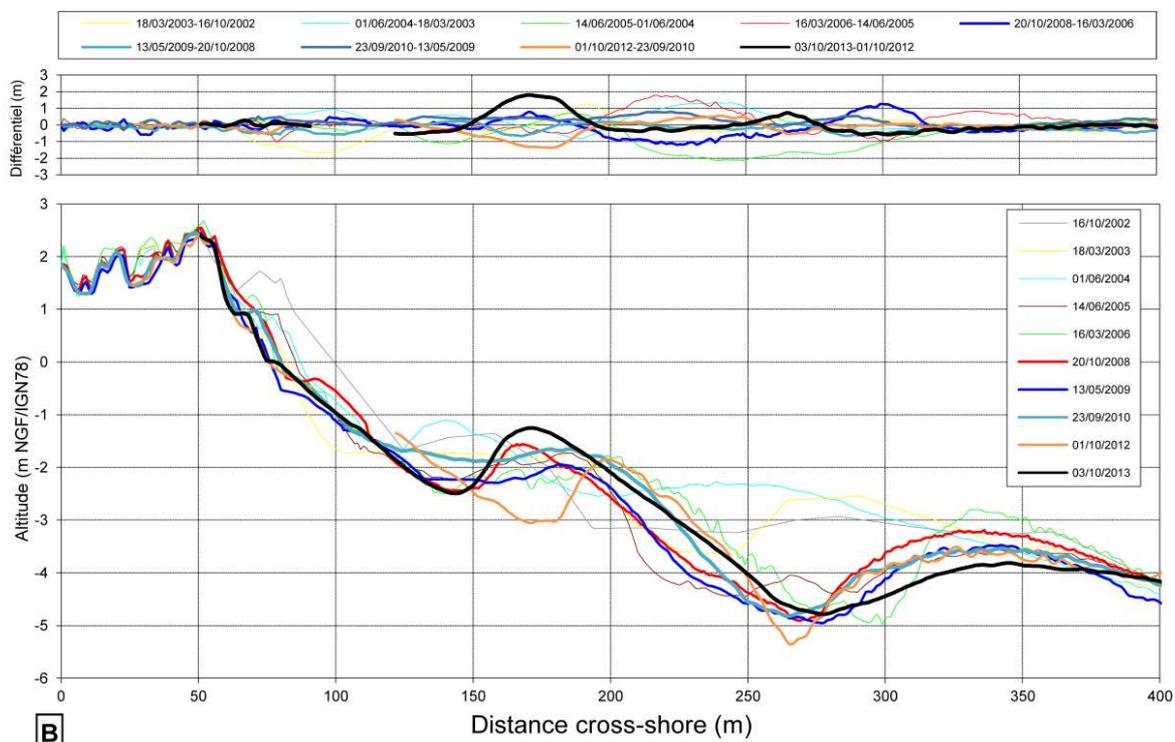
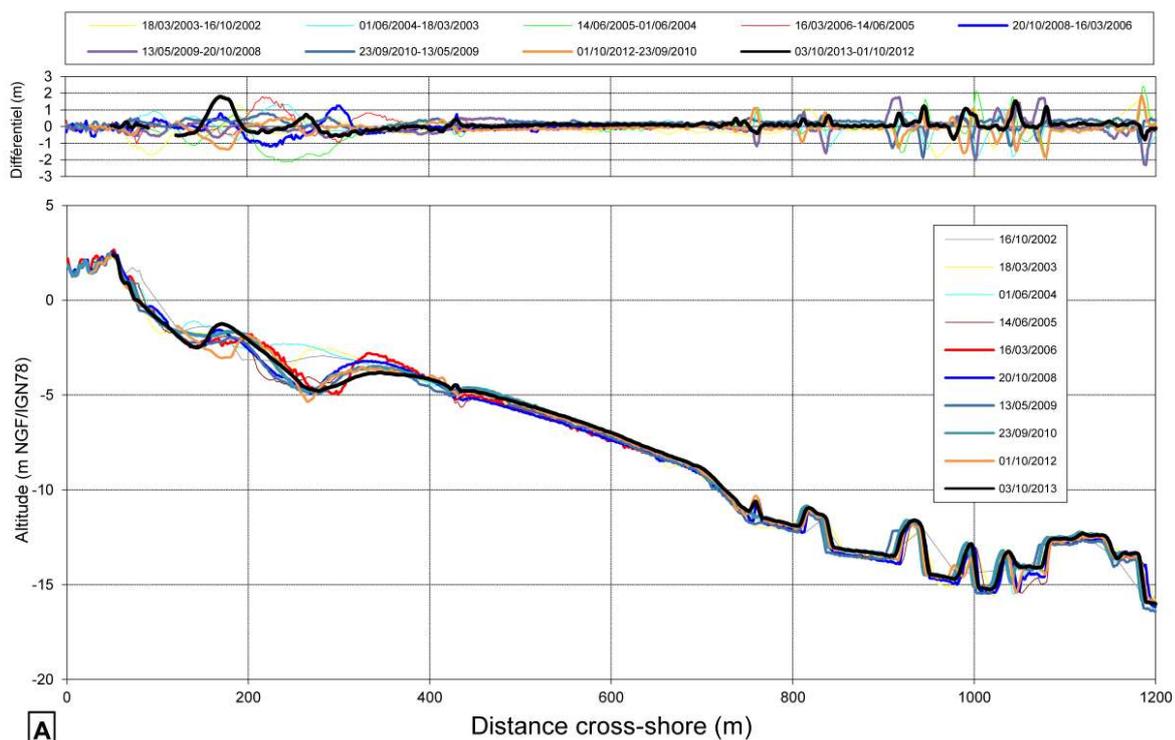
ROL OEC/BRGM	2013
Site	Marana
Profil	Nord
Levé du :	03/10/2013



Variations de volume 2012-2013	
Profil total :	-68 (m ³ /m)
Profil immergé :	-68 (m ³ /m)
Profil émergé :	0 (m ³ /m)
Evolution de la ligne de rivage :	+1 m

Illustration 50 - Site Lido de la Marana, profil nord (San Damiano) – 2002 à 2013.

Marana - Profil Sud



ROL OEC/BRGM	2013
Site	Marana
Profil	Sud
Levé du :	03/10/2013



Variations de volume 2012-2013		
Profil total :	NA	(m ³ /m)
Profil immergé :	NA	(m ³ /m)
Profil émergé :	+1	(m ³ /m)
Evolution de la ligne de rivage :		+3 m

Illustration 51 - Site Lido de la Marana, profil sud (CCAS) – 2002 à 2013.

La méthode de Bruun a été mise en œuvre sur les deux profils disponibles sur la Marana (Illustration 52).

Les valeurs moyennes de recul R estimées par cette méthode sont de :

- 6,65 mètres pour le scénario d'élévation du niveau marin de 10 centimètres en 2050 ;
- 33,27 mètres pour le scénario d'élévation du niveau marin de 50 centimètres en 2050.

	Pente	hypothèse 2050 + 0,1 m	hypothèse 2050 + 0,5 m
Marana Nord	0,0182	5,49	27,47
Marana Sud	0,0128	7,81	39,06
Moyenne	0,0155	6,65	33,27

Illustration 52 - Estimation du recul lié au changement climatique d'après la règle de Bruun (Bruun, 1962)

Il est proposé de considérer la valeur de recul moyen calculée par la méthode de Bruun en effectuant la moyenne des valeurs obtenues selon les deux scénarios d'élévation du niveau de la mer, soit 19,96 m et arrondie à la dizaine près, soit 20 mètres.

b) Bilan

En première approche, pour la prise en compte du changement climatique à l'horizon 2050, un recul supplémentaire moyen de 20 mètres est à considérer en arrière de la position du trait de côte 2050 (qui correspond à un recul de 34 ou $37 \times Tx + L_{max}$) sur l'ensemble du littoral sableux.

Il convient cependant de garder à l'esprit les nombreuses incertitudes inhérentes aux hypothèses retenues dans cette application de la règle de Bruun, ainsi que celles intrinsèques à la méthode. Cette quantification du recul engendré par le changement climatique constitue une première approximation ; elle pourra être précisée par des investigations plus poussées sur ce sujet, qui relèvent encore aujourd'hui du domaine de la recherche.

6.2.6. Sources d'incertitudes

Les sources d'incertitudes sur les projections des traits de côte proviennent :

D'une part, concernant l'estimation des taux d'évolution T_x de la côte sableuse :

- des incertitudes sur les positions de traits de côte historiques anciens (estimées globalement de l'ordre de 10 mètres) : elles sont issues essentiellement des supports cartographiques et photographiques utilisés (résolution du support, précision de l'orthorectification), et de la subjectivité du tracé propre à l'opérateur ;
- des incertitudes sur les positions de traits de côte historiques acquis par le ROL depuis 2002 (estimées globalement de l'ordre de 5 mètres) : elles sont issues des supports cartographiques et photographiques utilisés, mais aussi des données DGPS recueillies par le ROL ayant permis de préciser la position du trait de côte et de la subjectivité des opérateurs ;
- des incertitudes sur les taux d'évolution calculés par DSAS à partir des traits de côte historiques (inconnue précisément) ;

- des incertitudes imputables à l'harmonisation des taux d'évolution bruts et à l'application du dire d'expert (non quantifiable).

D'autre part, les autres composantes de l'aléa recul du trait de côte sont elles aussi incertaines :

- recul lié à l'impact d'un évènement majeur *Lmax* : évalué à partir d'observations et de mesures de terrain après un évènement majeur (incertitude estimée de l'ordre de 5 m) ;
- recul lié à l'impact du changement climatique : la valeur déterminée par la méthode de Bruun considérant deux scénarios d'élévation du niveau marin est approximative et contestable ; l'incertitude sur cette valeur est non quantifiable.

Bien que des méthodes aient été développées pour quantifier les incertitudes sur les données sources (Del Rio *et al.*, 2013, Fletcher *et al.*, 2011), elles nécessitent des informations précises qui sont difficilement accessibles pour les données anciennes.

Du fait de l'impossibilité de quantifier précisément toutes les incertitudes inhérentes aux données de base et aux méthodes employées, la quantification d'une incertitude globale sur les projections effectuées n'a pu être menée.

Enfin, au niveau des zones d'embouchures, sur les flèches sableuses non fixées par la végétation l'échelle de temps historique, la projection de la position du trait de côte n'a pas été réalisée car elle est trop incertaine, en raison notamment de leur grande mobilité et de leur faible résilience car non colonisée par la végétation dunaire.

6.3. RESULTATS

6.3.1. Format des données

Les résultats sont fournis sous la forme d'une couche de polygones au format *.shp*.

Elle contient les informations suivantes :

- Tracé du trait de côte de référence (2013 ou 2016, suivant les zones) ;
- Position projetée du trait de côte en 2050 basée sur l'analyse et la projection des taux historiques ;
- Position projetée du trait de côte en 2050 et prise en compte du recul en cas de tempêtes majeures *Lmax* (bande de 15 m de large) ;
- Position projetée du trait de côte en 2050 et prise en compte du recul en cas de tempêtes majeures *Lmax* et impact du Changement Climatique (bande de 20 m de large).

Ces différentes lignes délimitent ainsi des bandes de terrains littoraux exposés à un recul potentiel du trait de côte à l'échéance à l'horizon 2050 en fonction de la prise en compte des différents paramètres (Illustration 53).

Ces informations sont disponibles pour tout le littoral de la Marana et sur le littoral nord de la Casinca.



Illustration 53 - Symbologie des traits de côte prospectifs le long de la Marana.

6.3.2. Cartographies

Les tracés de l'évolution prospective du trait de côte sur chacun des secteurs du site ADAPTO sont reportés sur les illustrations suivantes :

- Illustration 54 pour le secteur n°1 ;
- Illustration 55 pour le secteur n°2 ;
- Illustration 56 pour le secteur n°3.



Illustration 54 – Evolution prospective du trait de côte sur le secteur n°1 (orthophotographie : ©IGN, 2007)

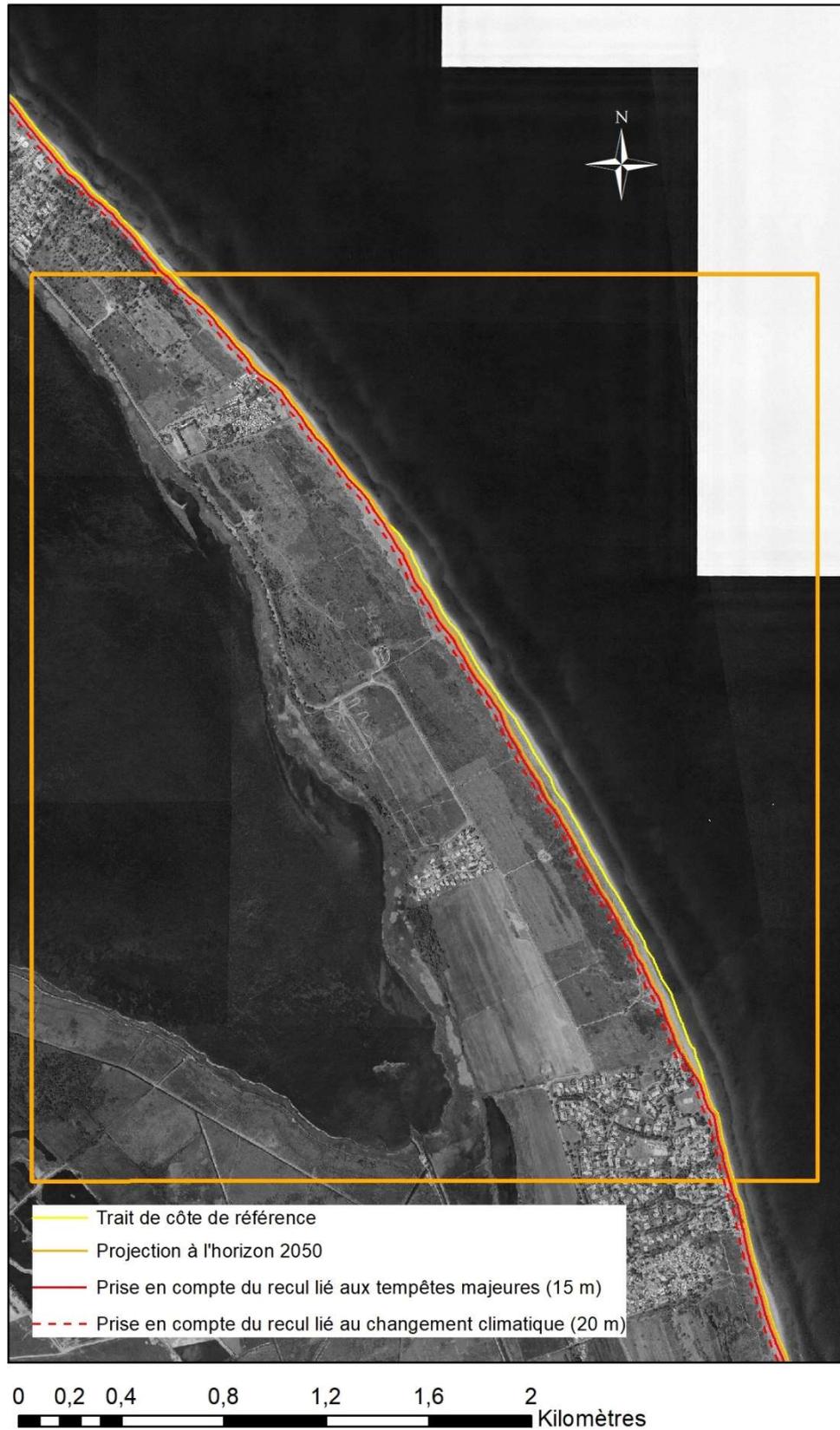


Illustration 55 – Evolution prospective du trait de côte sur le secteur n°2 (orthophotographie : ©IGN, 2007).



Illustration 56 – Evolution prospective du trait de côte sur le secteur n°3 (orthophotographie : ©IGN, 2007).

7. Conclusions

Compte-tenu de l'implication du BRGM en Corse sur la problématique de l'érosion côtière et de submersion marine, au travers, en particulier du Réseau d'Observation du Littoral Corse (ROL)⁷ le BRGM a mis à disposition dans le cadre d'une convention avec le Conservatoire du Littoral ses compétences thématiques et de nombreuses données acquises sur le littoral de la Plaine orientale de Corse.

Deux actions principales ont été définies dans le cadre de ce projet et font l'objet du présent rapport :

- mieux connaître l'évolution morphologique de trois secteurs du site corse du projet ADAPTO ;
- évaluer la position future du trait de côte à l'échéance 2050 sur tout littoral du site.

Les secteurs retenus dans le cadre du projet ADAPTO sont caractérisés par un contexte géomorphologique et hydrodynamique complexe avec la présence du grau de l'étang de Biguglia, de l'embouchure du Golo, des morphologies sous-marines prononcées et une orientation de la côte face aux agents marins différente d'un site à l'autre. L'objectif est de mieux comprendre l'évolution de ce littoral à différentes échelles temporelles tout en essayant de cerner dans la mesure du possible le processus prédominant de cette dynamique (tempêtes, dérive littorale, apports sableux...). Une analyse géomatique de l'évolution de la position du trait de côte est ainsi produite permettant de quantifier les évolutions interannuelles du trait de côte et du pied de dune.

Ces évolutions sont confrontées à la fois aux données de houle et aux actions menées par le Conservatoire du Littoral pour mieux comprendre les évolutions constatées. Les principaux enseignements de cette analyse sont :

- les secteurs sur le littoral de la Marana (secteur n°1 et n°2) montrent généralement une tendance à une relative stabilité de la position du trait de côte sur de longues échelles de temps (1937-2016). A l'inverse, sur le secteur n°3 sur le littoral de la Casinca, dans le contexte hydro-sédimentaire de l'embouchure du Golo, la tendance est marquée par une érosion progressive de la rive sud de l'embouchure qui décroît progressivement vers le Sud ;
- sur la période récente (2002-2013), les dynamiques du trait de côte et du pied de dune montrent une grande variabilité d'une période à l'autre et d'un site à l'autre. A l'échelle de chaque secteur, les relations entre l'évolution morphologique mesurée et le contexte hydrodynamique en termes d'énergie incidente des vagues (conditions peu ou très énergétiques) ne sont pas claires, et des conditions d'énergie équivalentes peuvent avoir des résultats très différents en termes d'évolution morphologique. De même, l'analyse des relations entre l'évolution du pied de dune et celle du trait de côte montre qu'à la lumière des données disponibles, les comportements apparaissent déconnectés ;
- ces différences soulignent une fois de plus l'importance du contexte bathymétrique sur les évolutions de la plage émergée et par conséquent celles du domaine dunaire. En particulier pour les sites de la Marana, le rôle des barres sous-marines en tant que

⁷ www.littoral-corse.fr

morphologie protectrice du littoral est illustré en tant que dissipateur des vagues fortes, répartiteur de l'énergie de vagues le long du linéaire côtier et en tant que réservoirs sableux ;

- le rôle des aménagements réalisés par le Conservatoire du Littoral sur les évolutions de la position du pied de dune n'est pas très explicite au regard des données de terrain disponibles. En revanche, l'analyse des évolutions topographiques entre 2010 et 2013 grâce aux données lidar a montré une tendance à l'accrétion du domaine dunaire, liée probablement principalement à la limitation du piétinement par l'implantation de ganivelles. Il favorise la stabilisation de la végétation dunaire et contribue aux dépôts éoliens, qui restent cependant peu importants en raison du faible potentiel d'apport lié à des surfaces de déflation limitée, en raison des faibles largeurs de plage émergée.

L'évaluation de la position future du trait de côte a été produite selon une approche historique consistant à extrapoler les tendances d'évolution actuelle afin d'estimer la position future du trait de côte en faisant l'hypothèse d'une remontée du niveau de la mer identique à celle observée ces dernières décennies. Cette méthodologie, employée actuellement dans l'élaboration des Plans de Prévention des Risques Littoraux est soumise à un grand nombre d'incertitudes et d'approximations, en fonction de la prise en compte du changement climatique global et de la remontée progressive du niveau de la mer, et de la prise en compte des reculs ponctuels liés à l'impact des tempêtes.

Ainsi, pour cette évaluation prospective du devenir du littoral, des choix méthodologiques ont été faits pour la prise en compte du changement climatique, avec l'utilisation du modèle de Bruun (1966), et la caractérisation du recul maximal lié à un événement de tempête a été estimée sur la base des relevés des positions du pied de dune réalisés dans le cadre du ROL sur le secteur de la Marana.

Globalement, les degrés d'incertitude de cette projection restent importants, y compris les secteurs où les tendances d'évolution déterminées sur la base des observations historiques sont globalement constantes et homogènes, au niveau des zones naturelles, non influencées par les dynamiques hydro-sédimentaires complexes des embouchures et/ou la présence d'ouvrages côtiers. Les plus fortes incertitudes restent cependant localisées au niveau des zones où l'évolution du littoral est complexe, sur des secteurs où les limites de l'analyse statistique de DSAS ont été identifiées. Il s'agit essentiellement de secteurs où des phases d'érosion et d'accrétion se sont succédées, si bien qu'il est difficile de déterminer les évolutions futures potentielles. Par ailleurs, les projections au niveau des zones de flèches sableuses mobiles des embouchures fluviales n'ont pas été réalisées en raison de leur faible résilience face aux événements de tempêtes et de l'évolution complexe du trait de côte au droit de ces secteurs où les processus hydro-sédimentaires liés à l'embouchure jouent un rôle difficile à anticiper sur les évolutions futures du littoral. Le recul chronique de ces secteurs est néanmoins attesté par la cinématique du trait de côte très significative basée sur les observations historiques.

8. Bibliographie

Balouin Y., Palvadeau E., et Bodéré, G. (2007) - Réseau d'observation du littoral de la Corse. Rapport d'observations 2006. Rapport BRGM/RP-55617-FR, 143 p., 102 ill.

Balouin Y., Belon R., Stépanian A., Bodéré G. (2012) – Etude générale pour la protection du littoral de la Plaine orientale de Corse – Préconisations de gestion. Rapport BRGM/RP-61650-FR ; 52 p., 36 ill.

Balouin Y., Belon R., Delvallée E., Lamy M., et Bodéré G. (2011) - ROL : Etude complémentaire sur l'impact des tempêtes sur le littoral de la Plaine orientale de Corse. Cartographie de la submersion marine, de la sensibilité à l'érosion côtière et de l'exposition des enjeux. RP-59724-FR, 39 p. + volume cartographique.

Balouin Y., Palvadeau E., Bodéré G., et Hennequin V. (2009) – Réseau d'observation du littoral de la Corse. Rapport d'observation 2008. Rapport BRGM/RP-57521-FR, 153 p., 111 ill.

Balouin Y., Palvadeau E., et Bodéré, G. (2007) - Réseau d'observation du littoral de la Corse. Rapport d'observations 2006. Rapport BRGM/RP-55617-FR, 143 p., 102 ill.

Bélon R. et Bodéré G. (2016) – Réseau d'Observation du Littoral de la Corse. Rapport d'observations 2015. Rapport BRGM RP-66351-FR, 111 p., 66 ill.

Bélon R., Stépanian A., Bodéré G., Balouin Y. et Imbault M. (2013) – Réseau d'Observation du Littoral de la Corse. Rapport d'observations 2013. Rapport BRGM RP-64582-FR, 180 p., 113 ill..

Belon R. (2014) – Base de Données de Houles Corses BDHC 2012. Rapport final. BRGM/RP-63032-FR, 46 p., 12 ill., 4 ann.

Bernon N., Mallet C., Belon, R., avec la collaboration de **Hoareau A., Bulteau T. et Garnier C.** (2016) - Caractérisation de l'aléa recul du trait de côte sur le littoral de la côte aquitaine aux horizons 2025 et 2050. Rapport final. BRGM/RP-66277-FR, 99 p., 48 ill., 16 tab., 2 ann., 1 CD.

Bruun P. (1962) - Sea-level rise as a cause of shore erosion. *Journal Waterways and Harbours Division*, vol. 88(1-3), pp. 117-130.

Castelle B., Marieu V., Bujan S., D. Splinter K., Robinet A., Sénéchal N., Ferreira. (2015) - Impact of the winter 2013–2014 series of severe Western Europe storms on a double-barred sandy coast: Beach and dune erosion and megacusp embayments. *Geomorphology*, 2338: 135-148.

Danforth W. W., and Thieler E. R., (1992) - Digital Shoreline Analysis System (DSAS) User's Guide, Version 1.0: U.S. Geological Survey Open-File Report 92-355, 42 p.

Del Rio L., Gracia F.J. (2013) – Error determination in the photogrammetric assessment of shoreline changes, *Natural Hazard*, Vol. 65, Issue 3, pp 2385-2397.

Fletcher C.H., Romine B.M., Genz A.S., Barbee M.M., Dyer Matthew Anderson T.R., Lim S. C., Vitousek, S., Bochicchio C. and Richmond B.M., (2011) - National assessment of shoreline

change: Historical shoreline changes in the Hawaiian Islands: U.S. Geological Survey Open-File Report 2011-1051, 81 p

Mallet C., Michot A., De La Torre Y., Lafon V., Robin M., et Prevotiaux B. (2012) - Synthèse de référence des techniques de suivi du trait de côte, Rapport BRGM/RP-60616-FR, 226 p., 101 fig., 7 ann.

Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, et de l'Energie (2014) – Guide méthodologique : Plan de prévention des risques littoraux, 169 p.

Pilkey O.H. and Cooper J.A.G. (2004) – Society and sea level rise. *Science*, 303, 1781-1785

Boak E. H., and Turner I.L. (2005) - Shoreline definition and detection: A review. *Journal of Coastal Research*, 21(4), 688-703. West Palm Beach (Florida), ISSN 0749-0208.

MEEDDM (2010). La gestion du trait de côte. Ed. Quae, 308 p.

Oliveros C., et Delpont, G. (1996). Littoral oriental corse : Evolution du trait de côte de 1948 à 1996 de l'embouchure de l'Alesani (Comm. De San Giuliano) à l'embouchure du Fium'Orbu (Ghisonaccia). R-38922, 30 p.

Oliveros C., et Delpont G., (1999). Littoral oriental Corse : Evolution du trait de côte de 1948 à 1996 de Bastia-Furiani à Cervione et de l'embouchure du Travo (Solaro) à Solenzara. Rapport BRGM R-40504, 22 p.

Pasqualini V. (1997). Caractérisation des peuplements et types de fonds le long du littoral corse (Méditerranée, France). Thèse de Doctorat, Université de Corse, 158 p. + Annexes.

SDAGE AERMC. (2005) - Connaissance et gestion de l'érosion du littoral. Guide technique n°9, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse,

SHOM (2012) - Ouvrage de marée, Références Altimétrique Maritimes. Ports de France métropolitaine et d'outre-mer. Côtes du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée. Edition 2012, 104 p.

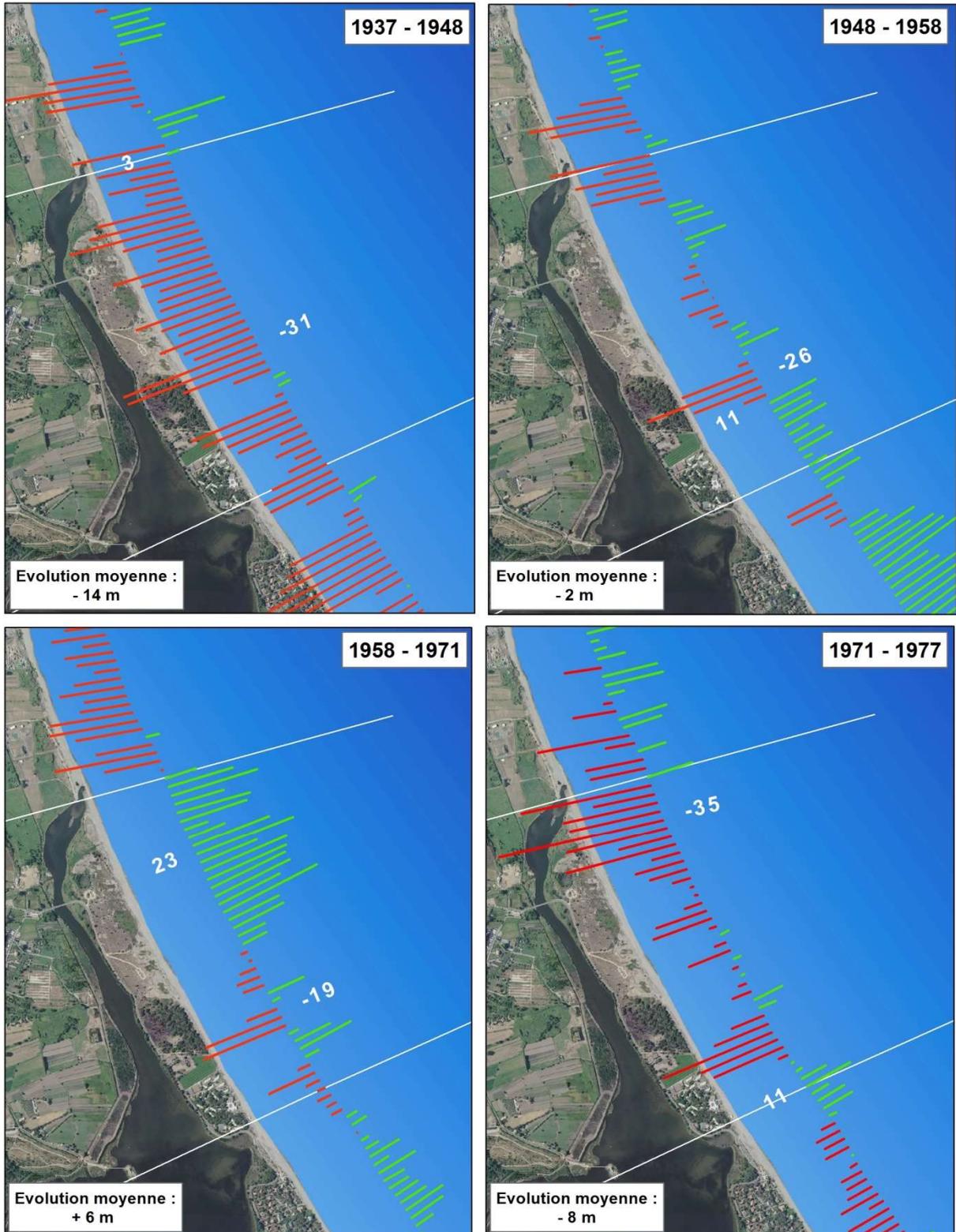
Stépanian A., Balouin Y., Bacon A., Bodéré G, Danger Y.,et Hennequin V., (2010). Atlas littoral de la Plaine orientale de Corse. Rapport final. Rapport BRGM RP-59058-FR, 78 p., 13 ill., 28 planches.

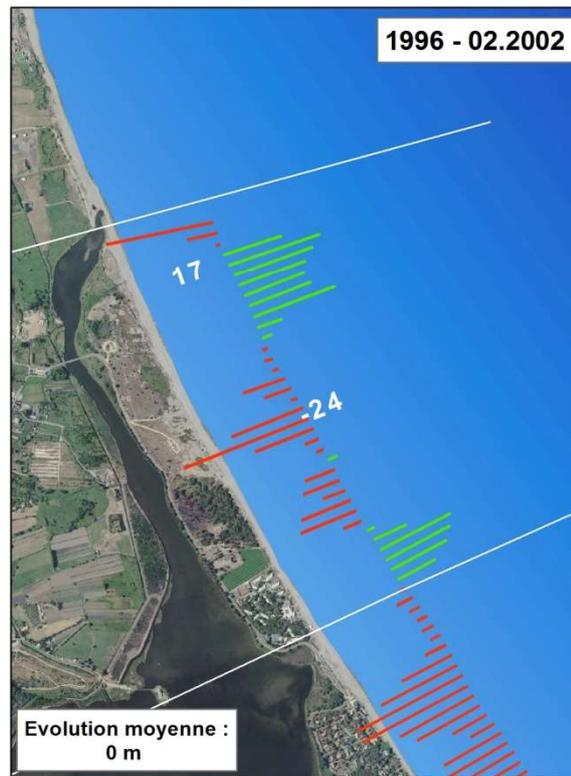
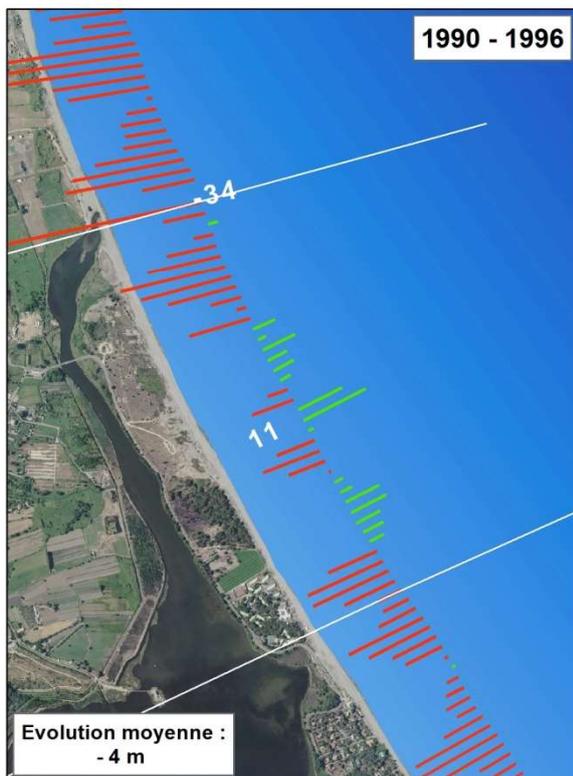
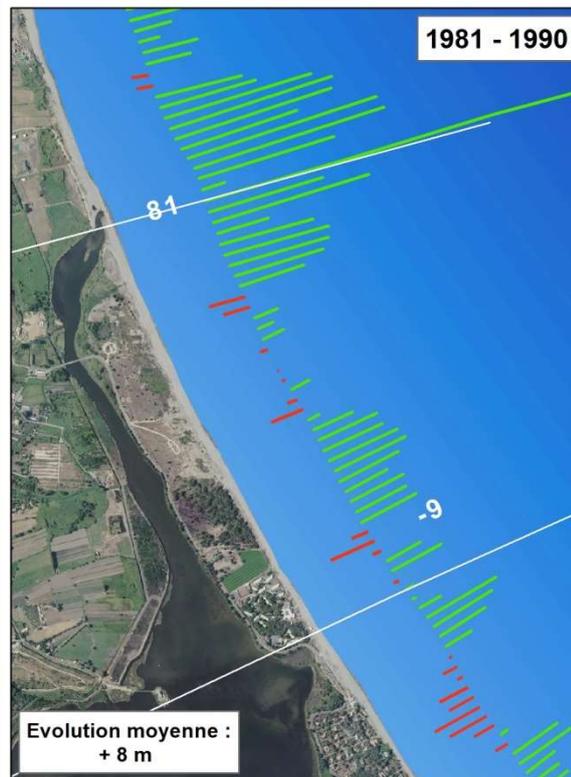
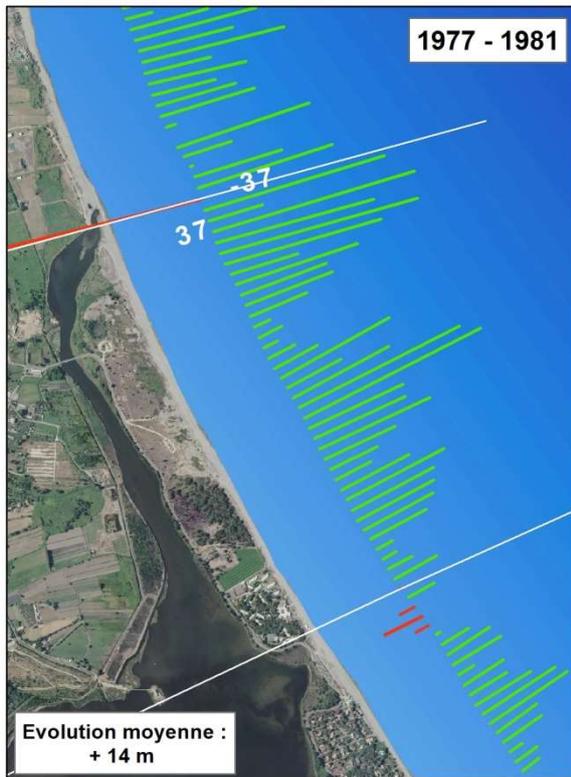
Stépanian A., Balouin Y., Belon R., et Bodéré G., (2011). ROL – Etude complémentaire sur le littoral de la Plaine orientale de Corse – Etat des connaissances sur les impacts des tempêtes sur le littoral. Rapport final. Rapport BRGM/RP-59058-FR, 137 p., 64 ill., 4 ann.

Thieler E.R., Himeltooss E.A., Zichichi J.L., and Ergul A. (2009) - Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0— An ArcGIS extension for calculating shoreline change: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278.

Annexe 1

Planches cartographiques de l'évolution historique du trait de côte (1937-2016) et du pied de dune (2002-2016) sur le Secteur n°1

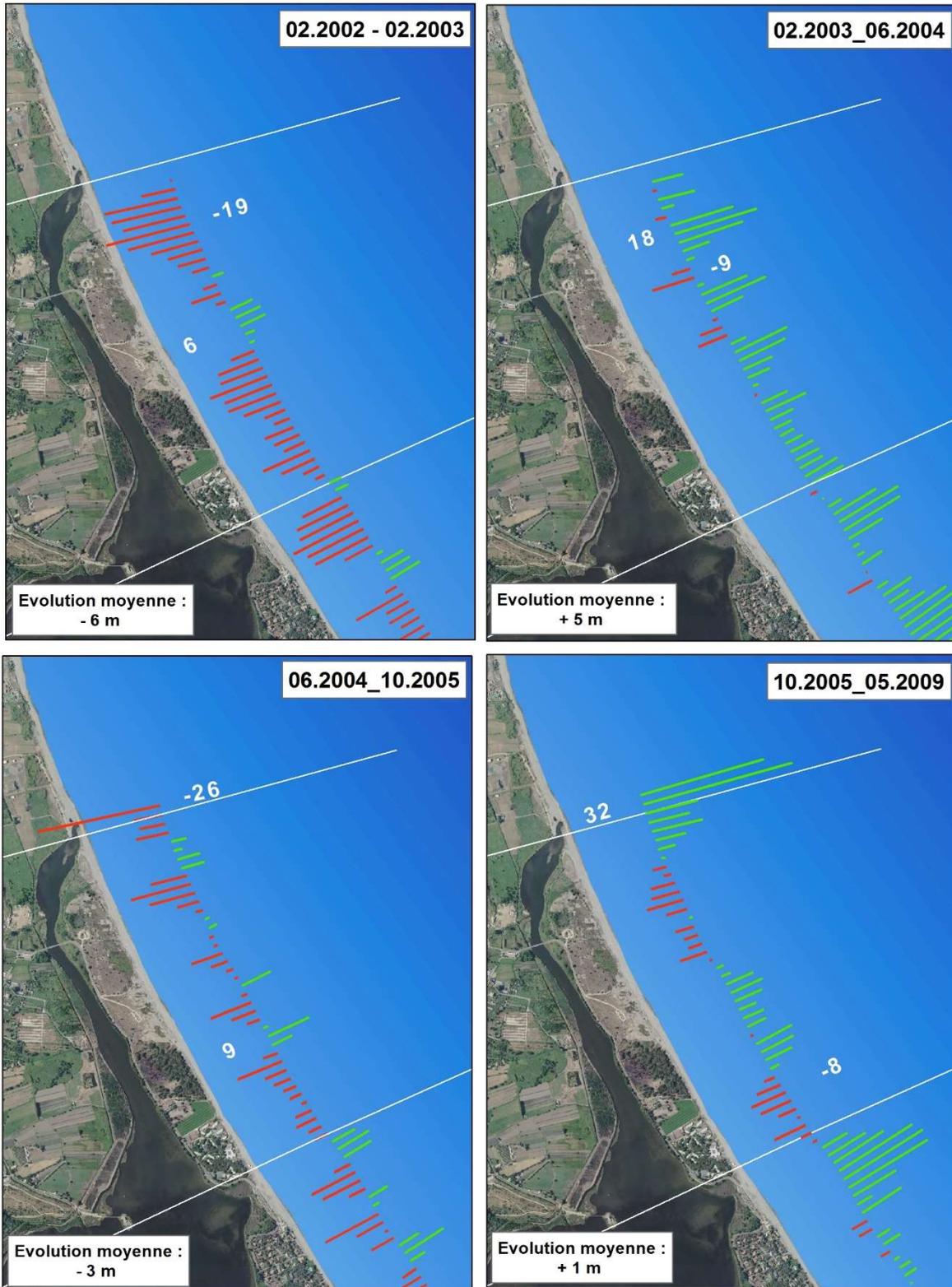


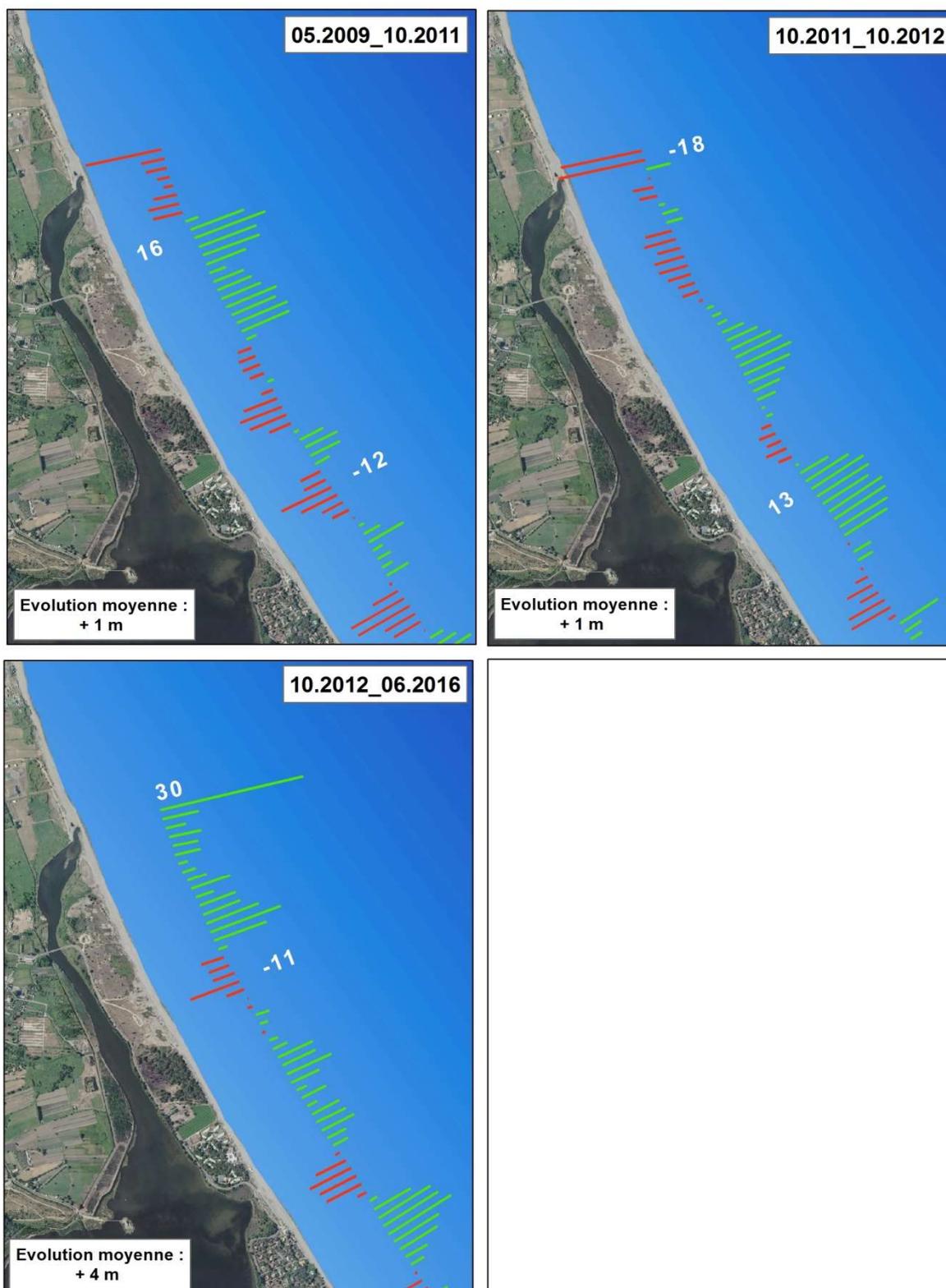


Fond de carte : © IGN-BD_ORTHO © 2016
Systèmes de coordonnées : RGF93 - Lambert 93

— Avancée du trait de côte — Limites du secteur 1
— Recul du trait de côte

0 0.25 0.5 0.75 1
Km

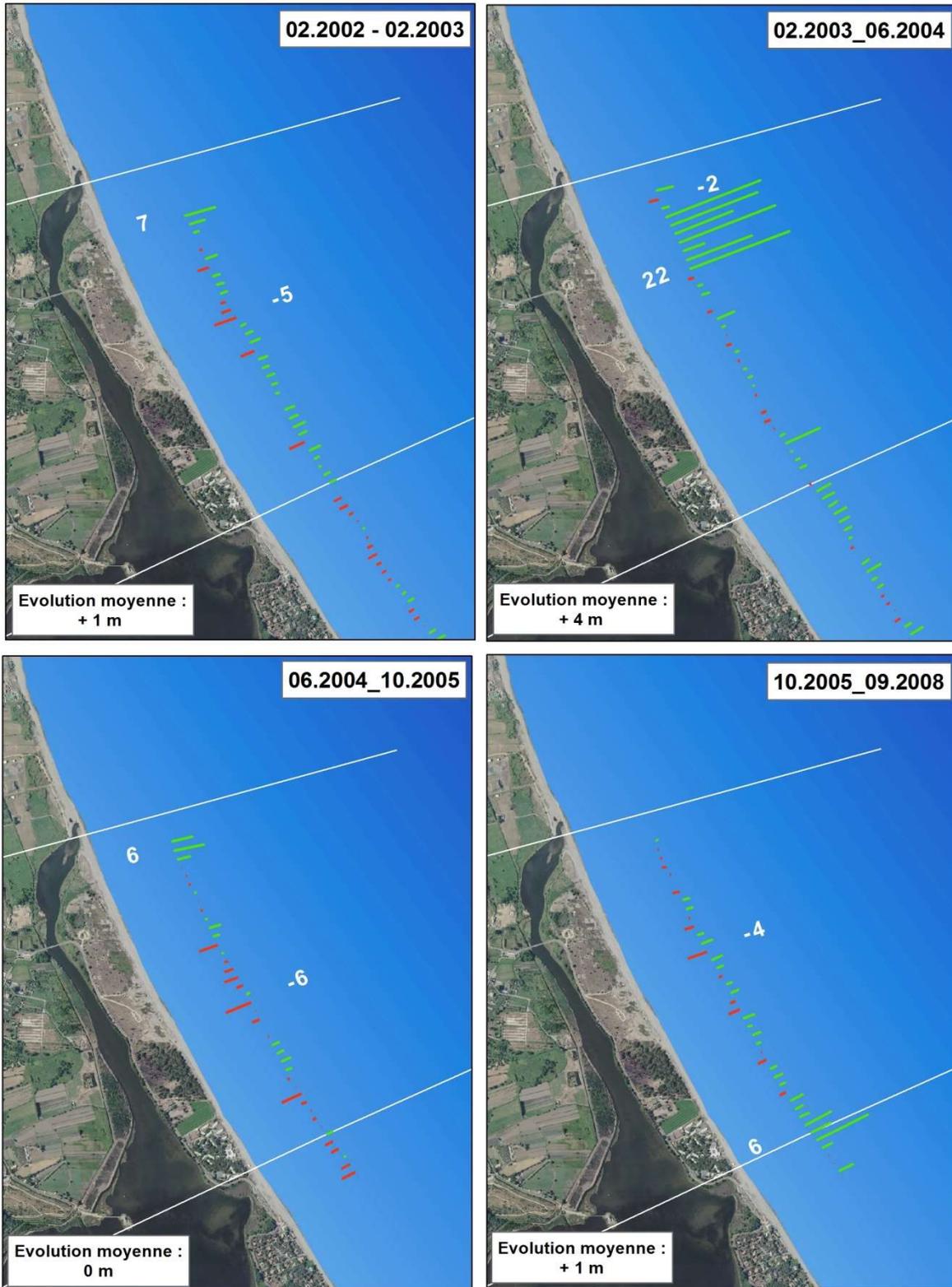


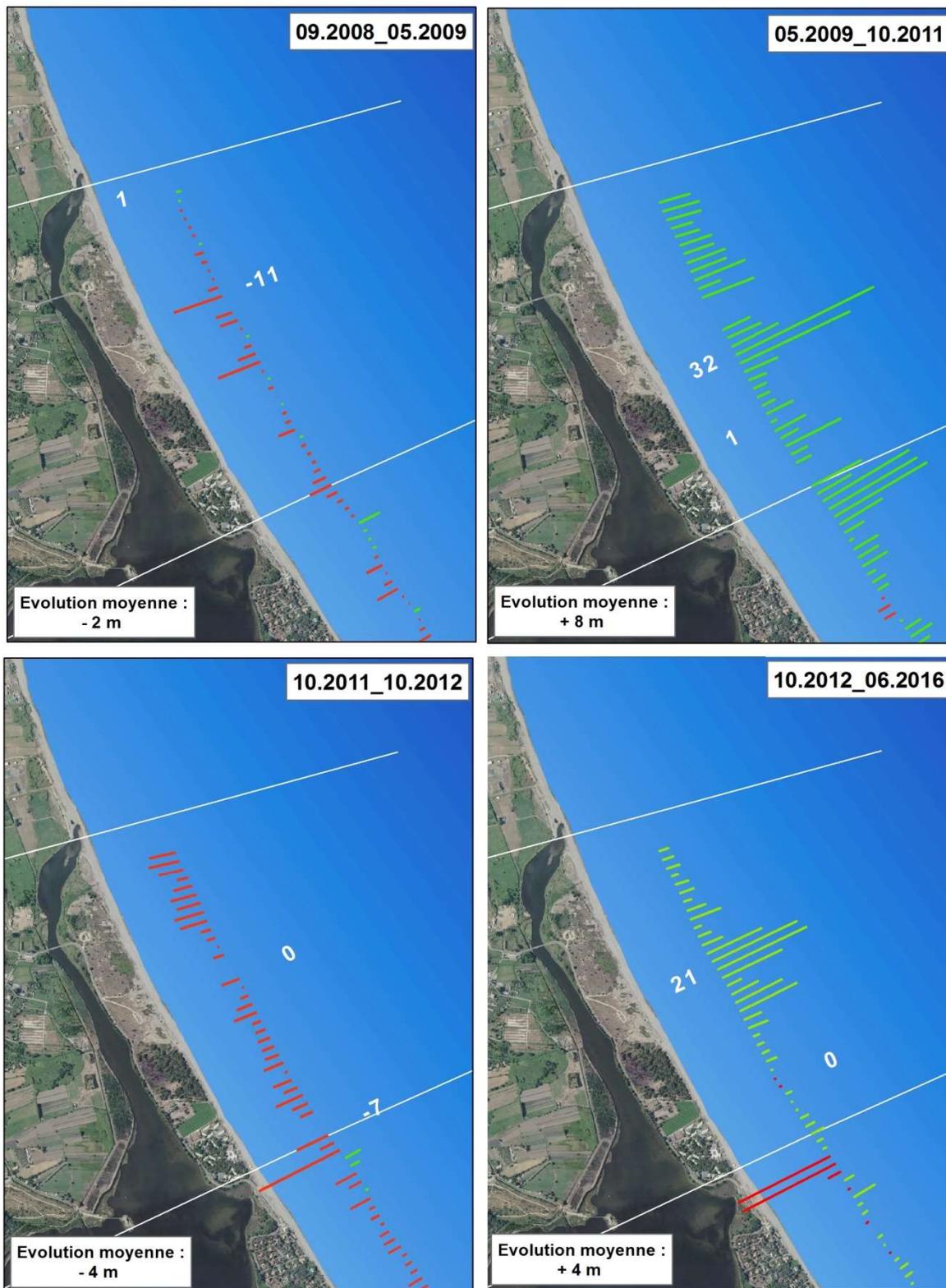


Fond de carte : © IGN-BD_ORTHO © 2016
Systèmes de coordonnées : RGF93 - Lambert 93

— Avancée du trait de côte — Limites du secteur 1
— Recul du trait de côte

0 0.25 0.5 0.75 1 Km





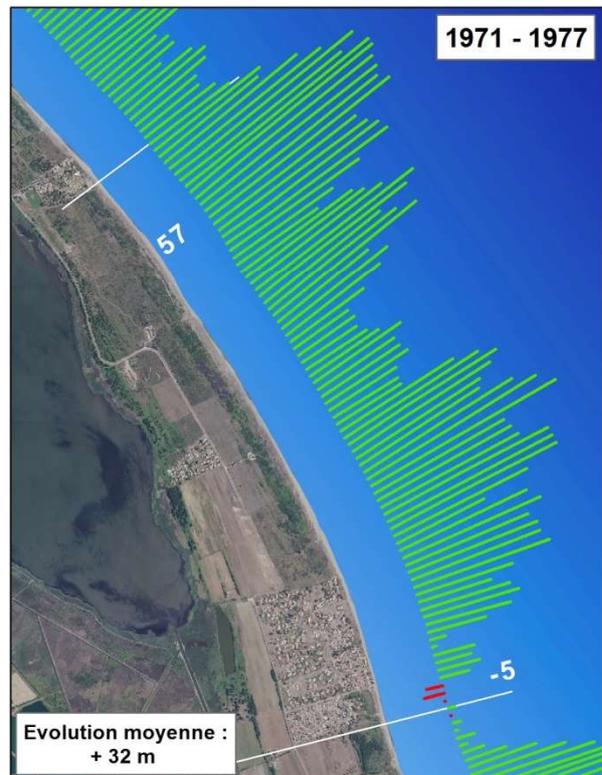
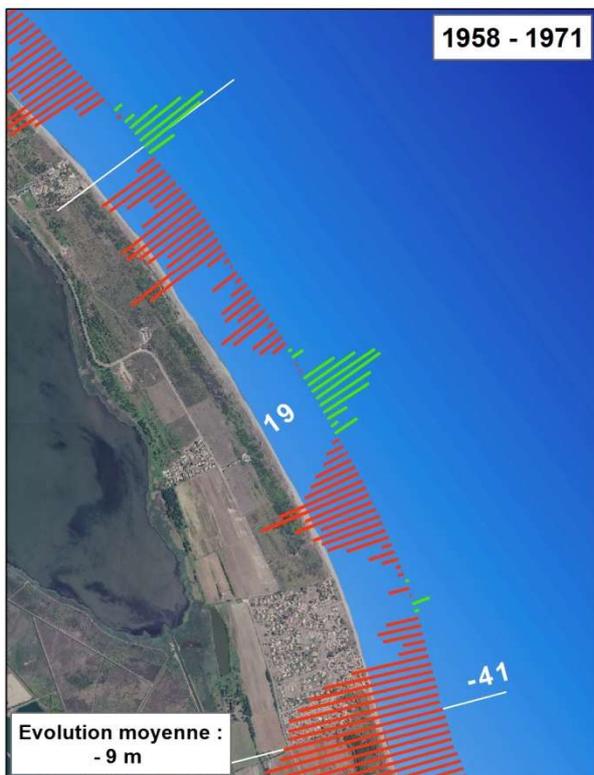
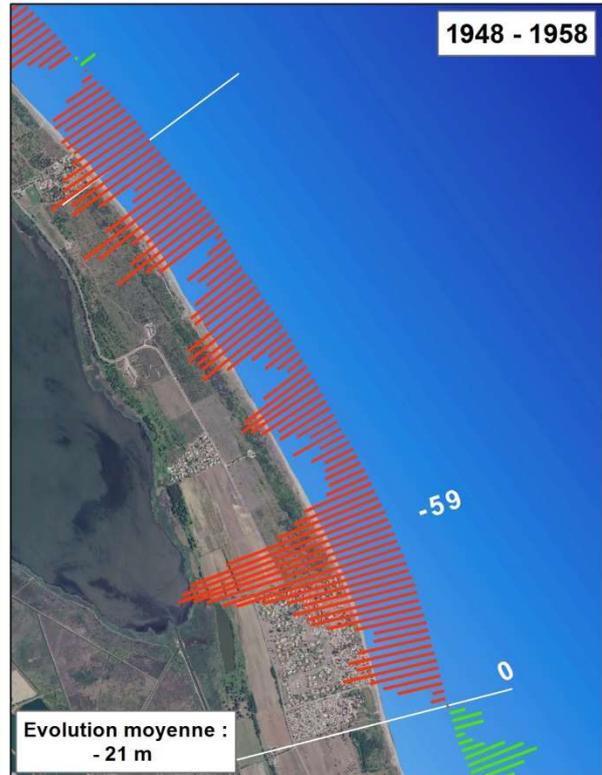
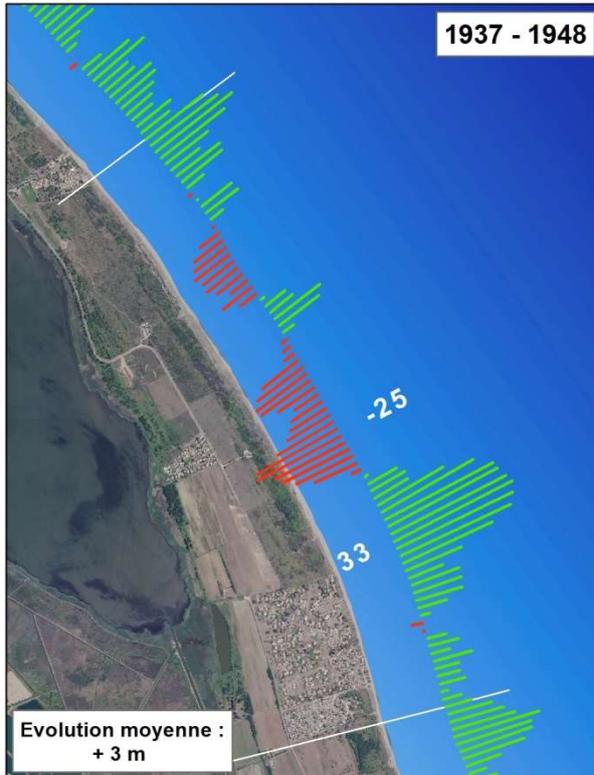
Fond de carte : © IGN-BD_ORTHO © 2016
Systèmes de coordonnées : RGF93 - Lambert 93

— Avancée du trait de côte — Limites du secteur 1
— Recul du trait de côte

0 0.3 0.6 0.9 1.2 Km

Annexe 2

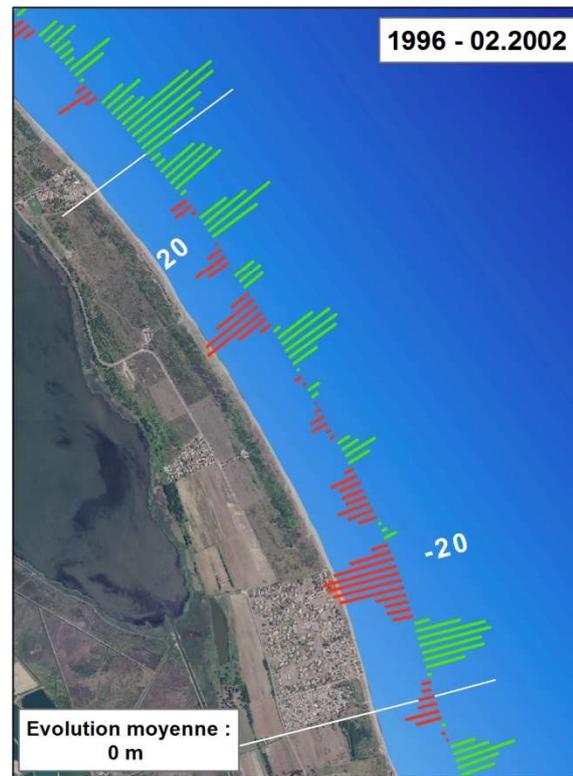
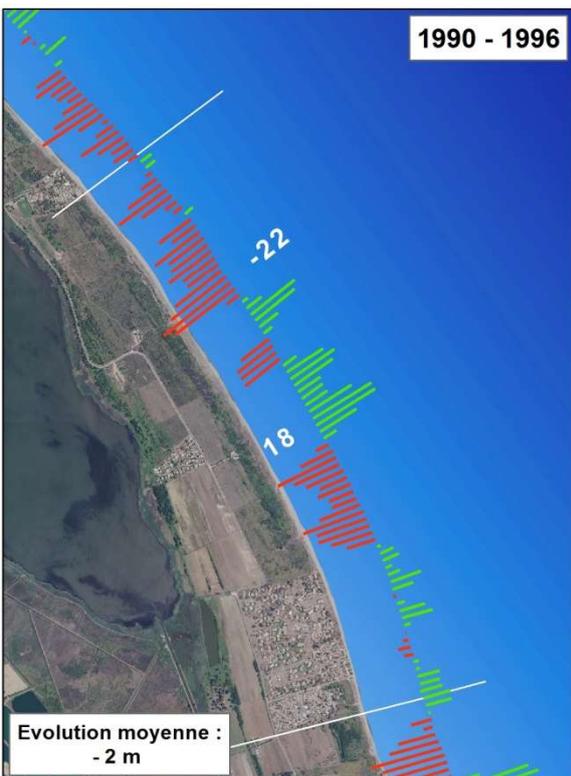
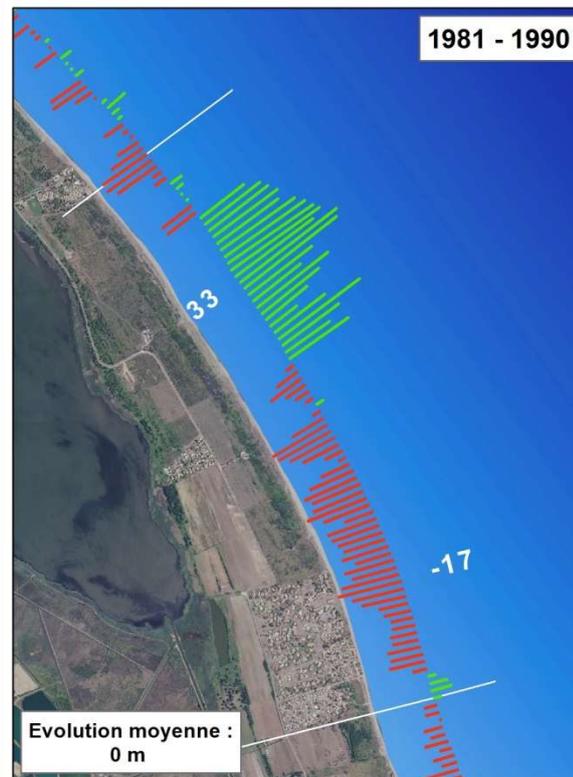
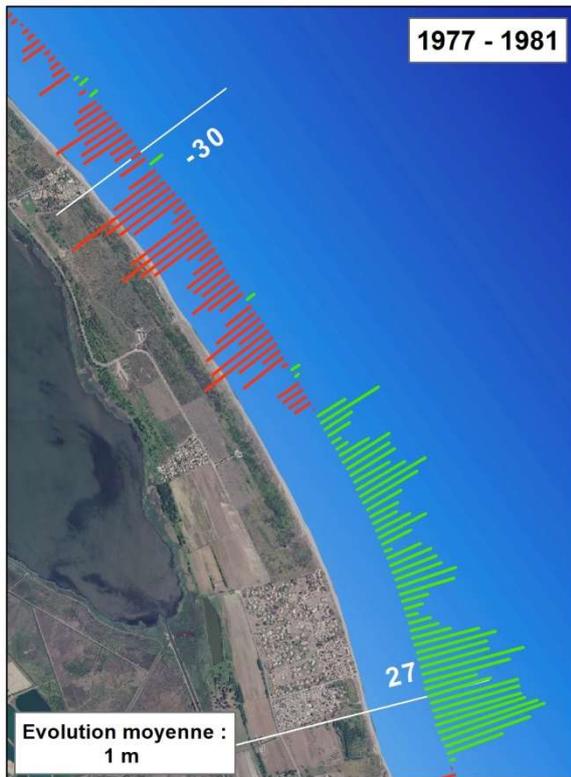
Planches cartographiques de l'évolution historique du trait de côte (1937-2016) et du pied de dune (2002-2016) sur le Secteur n°2



Fond de carte : © IGN-BD_ORTHO © 2016
Systèmes de coordonnées : RGF93 - Lambert 93

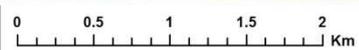
— Avancée du trait de côte — Limites du secteur 2
— Recul du trait de côte

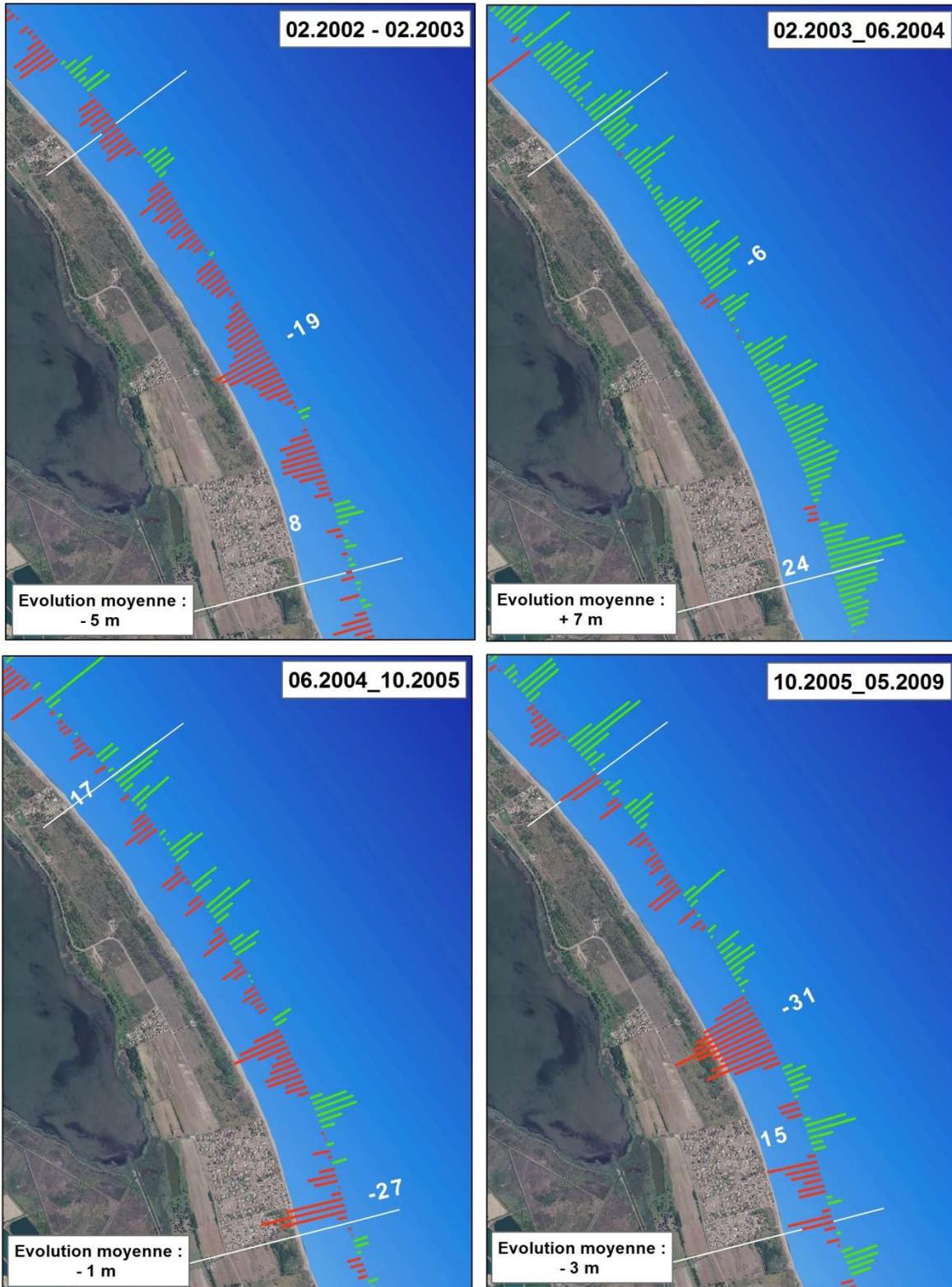
0 0.55 1.1 1.65 2.2 Km

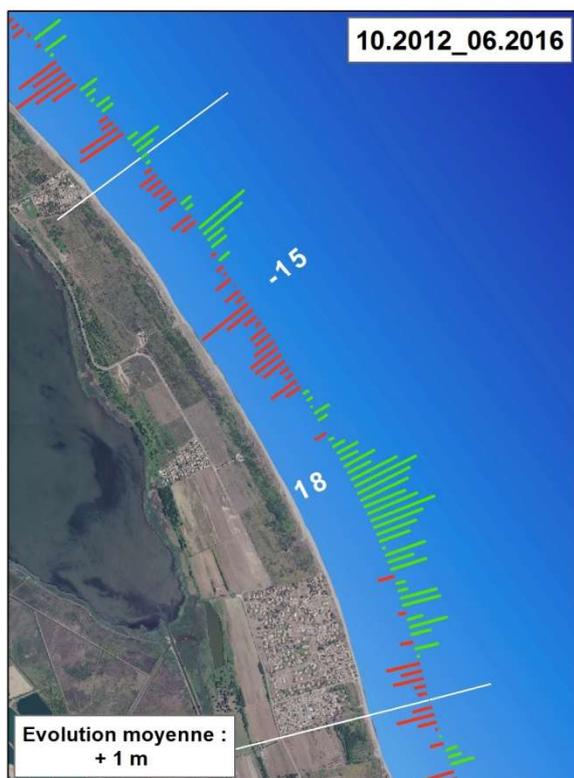
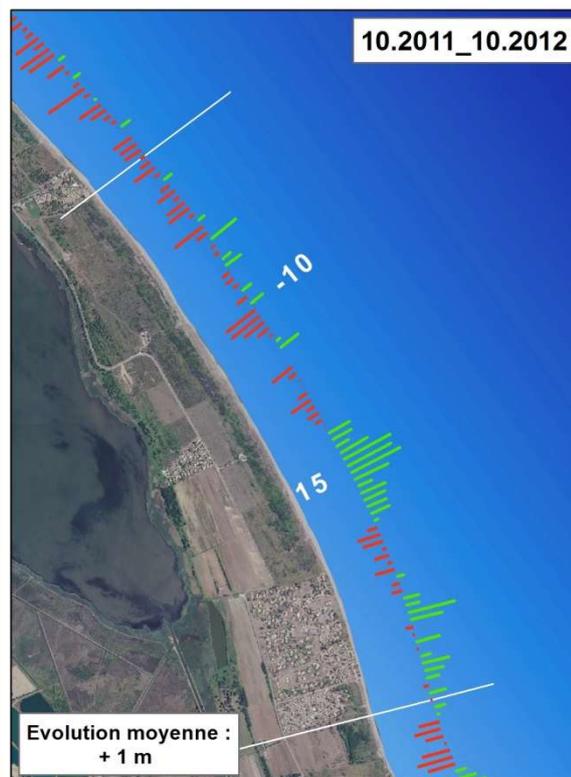
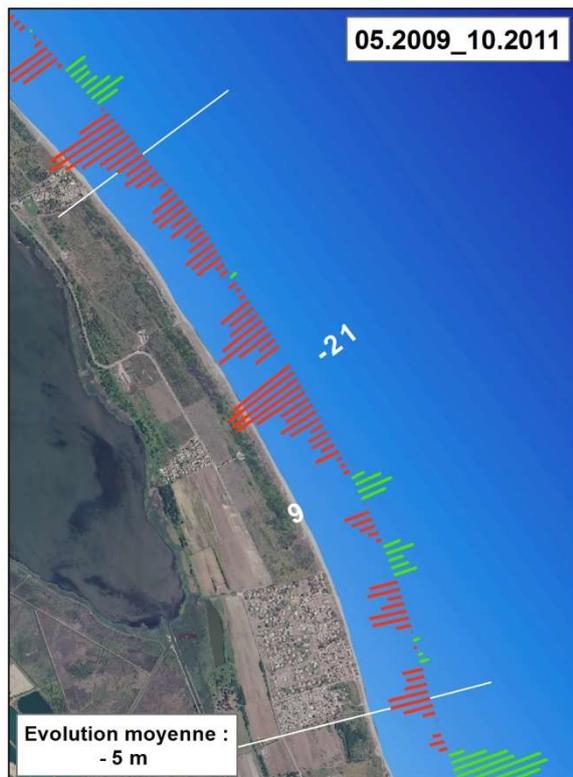


Fond de carte : © IGN-BD_ORTHO © 2016
Systèmes de coordonnées : RGF93 - Lambert 93

Avancée du trait de côte — Limites du secteur 2
Recul du trait de côte



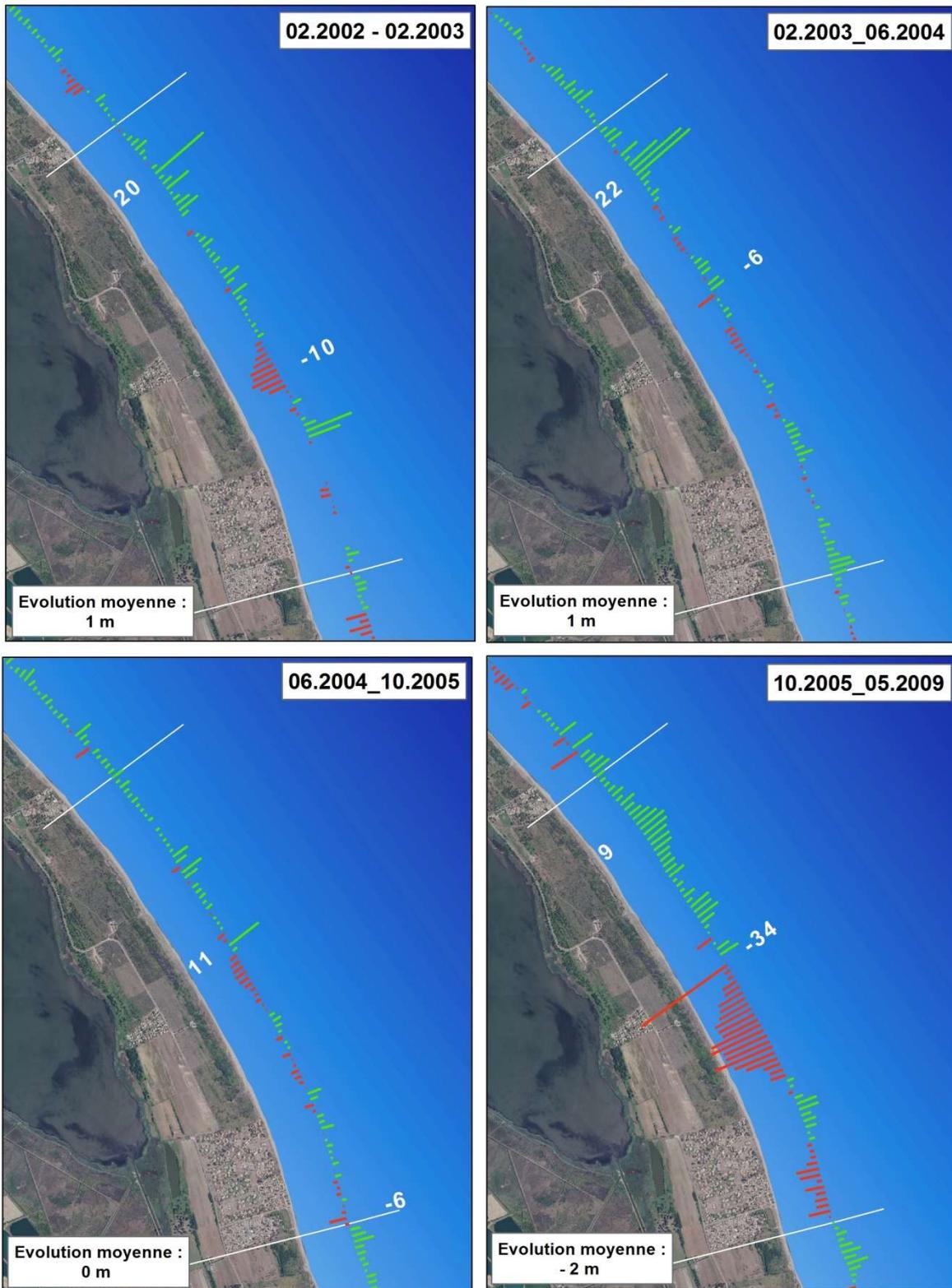




Fond de carte : © IGN-BD_ORTHO © 2016
Systèmes de coordonnées : RGF93 - Lambert 93

— Avancée du trait de côte — Limites du secteur 2
— Recul du trait de côte

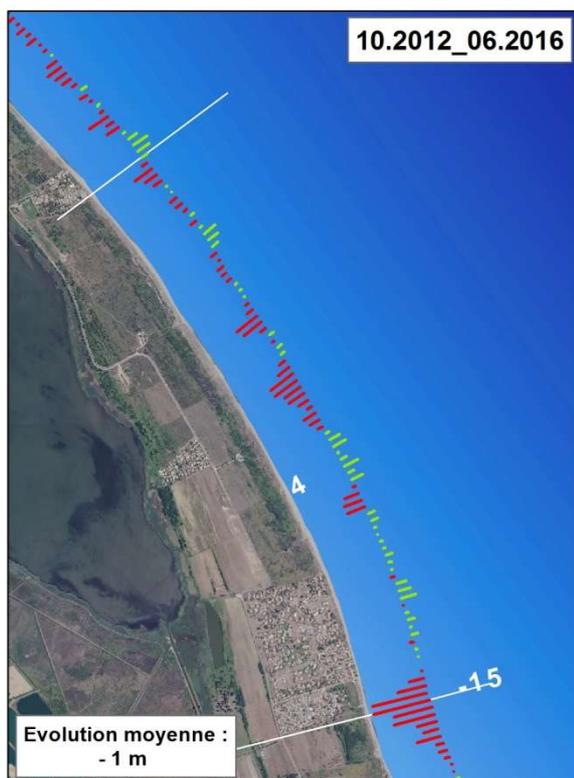
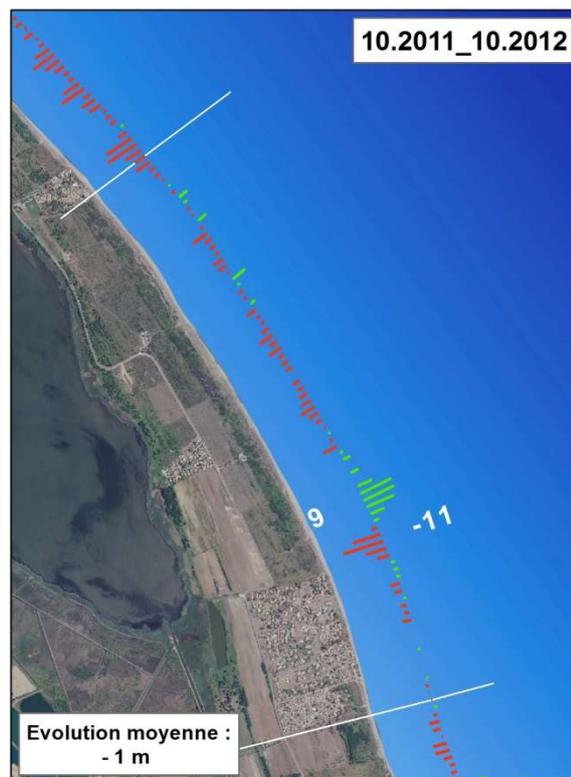
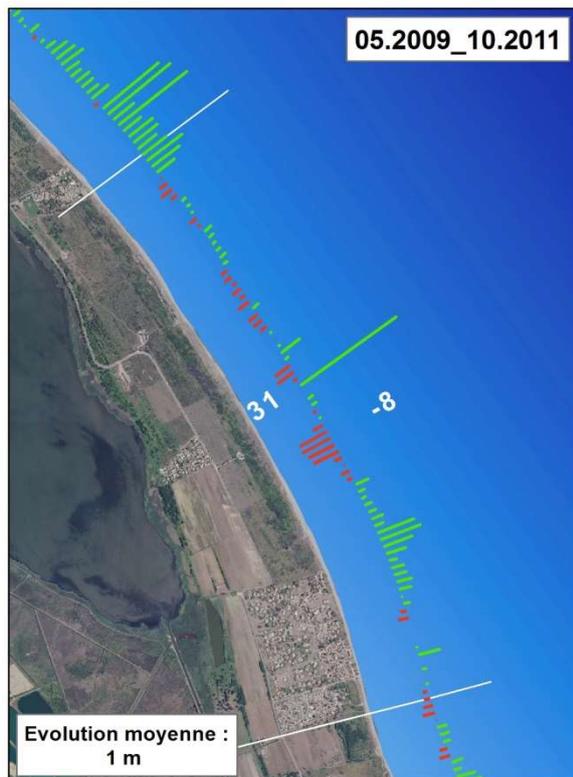
0 0.4 0.8 1.2 1.6
Km



Fond de carte : © IGN-BD_ORTHO © 2016
Systèmes de coordonnées : RGF93 - Lambert 93

— Avancée du trait de côte — Limites du secteur 2
— Recul du trait de côte

0 0.5 1 1.5 2 Km



Fond de carte : © IGN-BD_ORTHO © 2016
Systèmes de coordonnées : RGF93 - Lambert 93

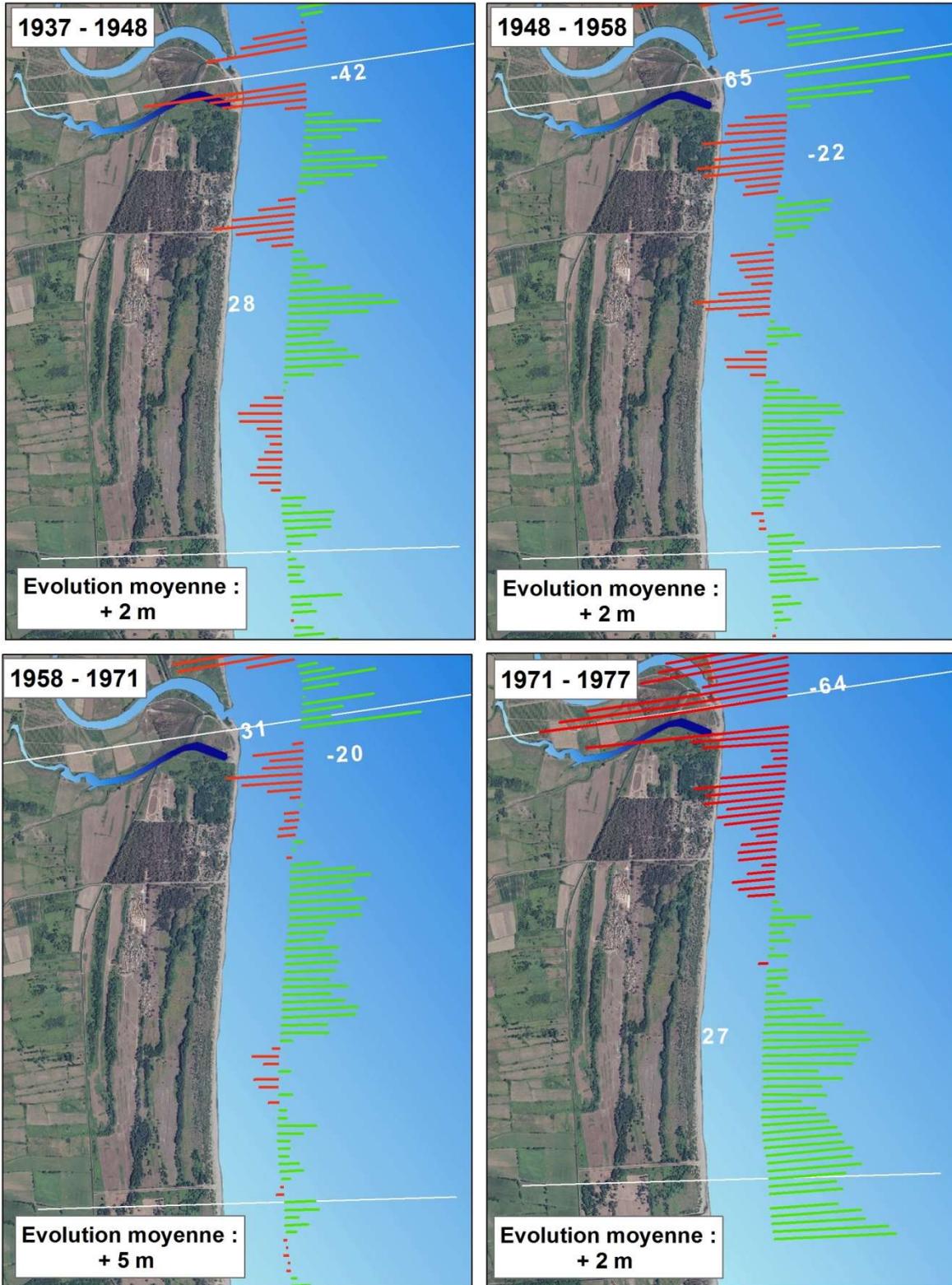
— Avancée du trait de côte — Limites du secteur 2
— Recul du trait de côte

0 0.5 1 1.5 2 Km

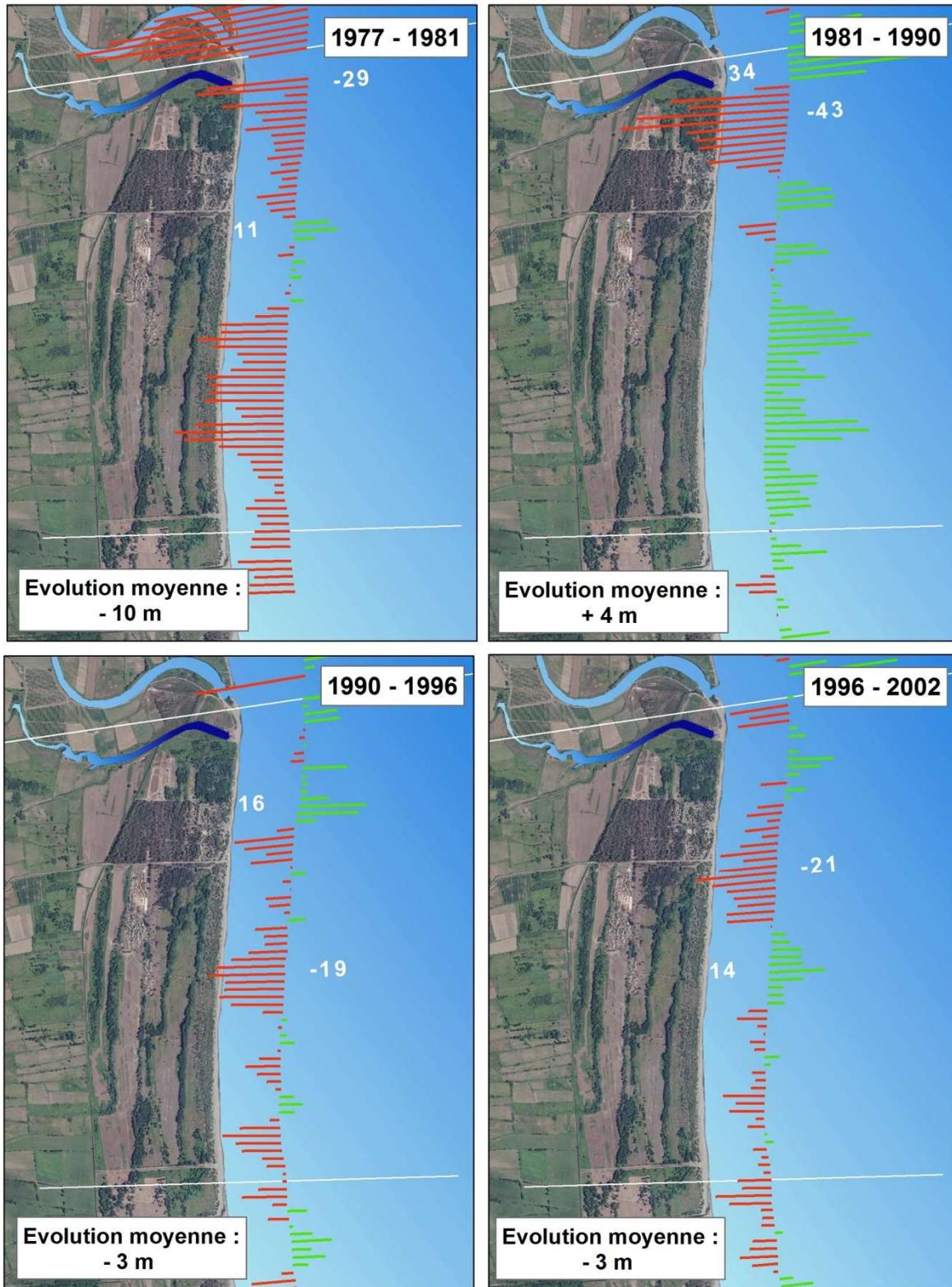
Annexe 3

Planches cartographiques de l'évolution historique du trait de côte (1937-2016) sur le Secteur n°3

Secteur 3
Evolution du trait de côte de 1937 à 1977



Secteur 3 Evolution du trait de côte de 1977 à 2002

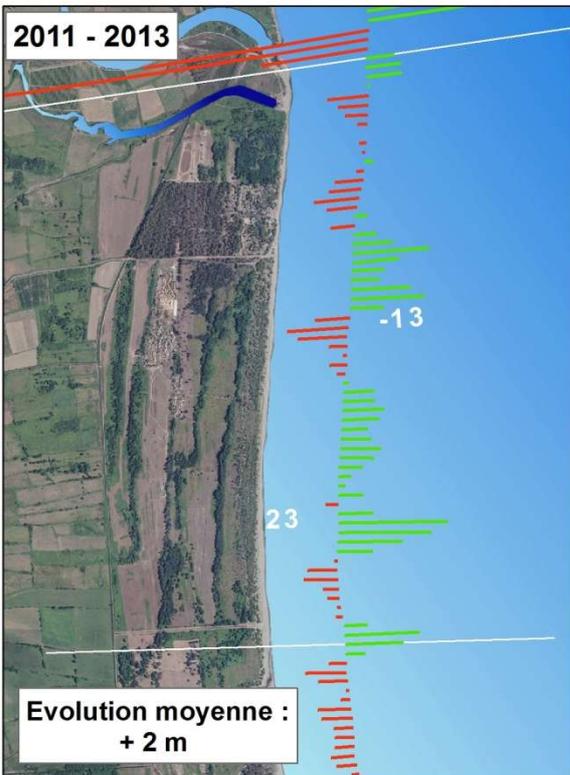
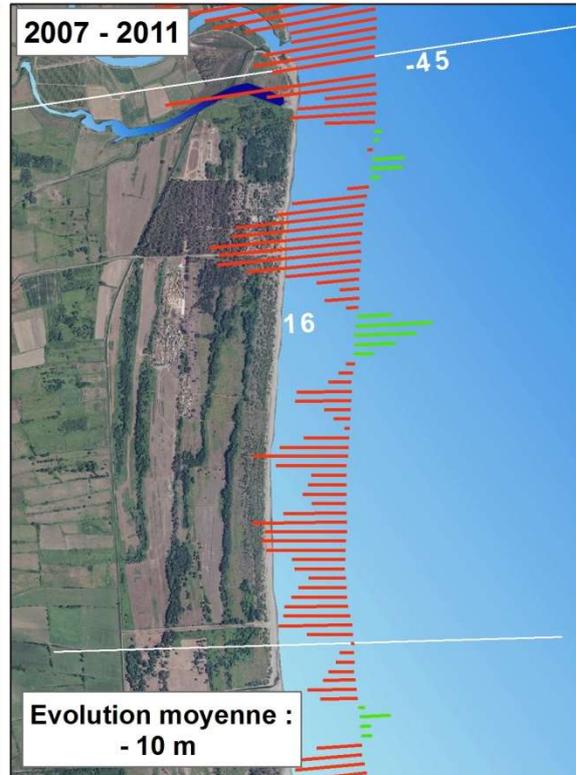
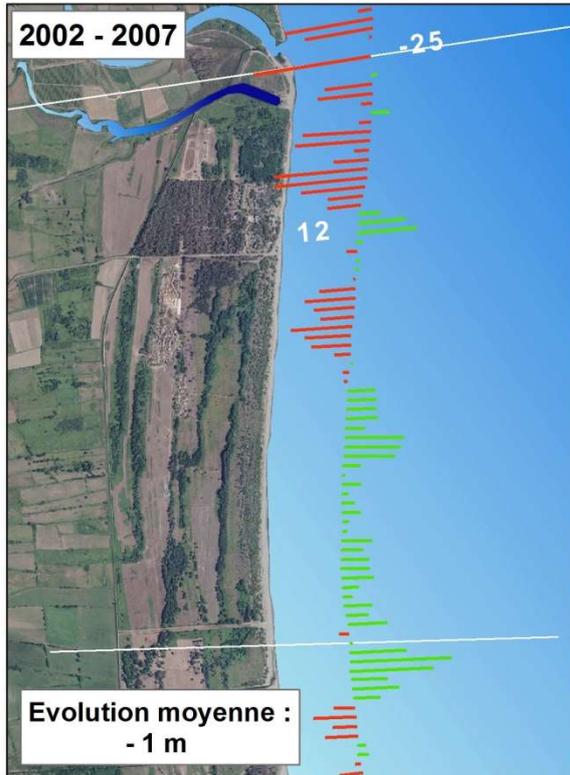


Fond de carte : © IGN-BD_Ortho © 2016
Systèmes de coordonnées : RGF93 - Lambert 93

Avancée du trait de côte — Limites du secteur 3
Recul du trait de côte

0 0.25 0.5 0.75 1
Kilomètres

Secteur 3 Evolution du trait de côte de 2002 à 2013



Fond de carte : © IGN-BD_Ortho © 2016
Systèmes de coordonnées : RGF93 - Lambert 93

Avancée du trait de côte — Limites du secteur 3
Recul du trait de côte

0 0.25 0.5 0.75 1
Kilomètres



Géosciences pour une Terre durable

brgm

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 du BRGM en Corse

Immeuble Agostini
ZI de Furiani

20600 – Bastia - France

Tél. : 04 95 58 04 33