

Document public

Réseau d'Observation du Littoral de la Corse – Valorisation des données de la Base de Données des Houles Corses

Rapport final

BRGM/RP-67257-FR

Octobre 2017



Document public



Réseau d'Observation du Littoral de la Corse – Valorisation des données de la Base de Données des Houles Corses

Rapport final

BRGM/RP- 67257-FR

Octobre 2017

Étude réalisée dans le cadre des projets
d'appui aux politiques publiques du BRGM 2017

A. Stépanian et R. Belon



Vérificateur : Y. Balouin

Date : 26/09/2017

Approbateur : N. Frissant

Date : 02/10/2017

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.



Mots clés : Littoral, Corse, Trait de côte, Profil de plage, Evolution, Erosion, Système d'Information Géographique.

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

Stépanian A., et Belon R. (2017) – Réseau d'Observation du Littoral de la Corse – Valorisation des données de la Base de Données des Houles Corses. Rapport final. Rapport BRGM RP-67257-FR, 60 p., 38 ill.

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

Synthèse

Depuis 1999, le Réseau d'Observation du Littoral de la Corse (ROL) a pour mission de fournir les données nécessaires à la compréhension des phénomènes et processus, à la quantification des évolutions côtières et à l'identification des remèdes possibles.

Ce réseau comprend des sites « régionaux », témoins représentatifs des évolutions régionales naturelles et des sites « sensibles » qui sont soumis à évolutions critiques ponctuelles, et/ou sensibles économiquement et/ou sensibles à des impacts d'aménagements. Jusqu'à présent, les interprétations des évolutions mesurées sur le terrain se basaient sur une connaissance incomplète des conditions hydrodynamiques qui ont impacté le littoral insulaire, en raison de l'absence de houlographe directionnel le long des côtes de Corse.

Le présent rapport est consacré à la recherche d'une corrélation entre les évolutions morphologiques interannuelles constatées dans les levés morphologiques du ROL depuis 2000 et les variations des conditions hydrodynamiques déterminées par la Base de Données des Houles Corse (BDHC), développée par le BRGM dans le cadre du ROL (Belon, 2014). Une analyse du rôle des tempêtes sur les évolutions du trait de côte a été ainsi réalisée sur 6 sites de la Plaine orientale et de la côte rocheuse.

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 clairement établies, et des conditions d'énergie équivalentes peuvent avoir des résultats très différents en termes d'évolution morphologique. Les données issues de la BDHC ont permis cependant de vérifier de manière qualitative sur certains sites, la prédominance d'une direction de provenance des vagues en tempête à une échelle de temps saisonnière, appréhendée par le paramètre « puissance », qui permet d'expliquer pour partie les tendances à l'accrétion ou l'érosion observées entre deux levés consécutifs. De même, en particulier pour les sites de la Plaine orientale, les observations montrent que des situations hivernales présentant des tempêtes avec des incidences des vagues plus frontales semblent être fréquemment corrélées à une tendance générale de recul du trait de côte, affectant le plus souvent l'ensemble du site.

Cependant, l'utilisation de paramètres hydrodynamiques intégrés sur une période de temps reste très limitée car on ne peut appréhender l'alternance de tempêtes de directions opposées et dont les effets se sont peut-être finalement contrebalancés au cours de la période d'intérêt. Enfin, les points d'extraction sont probablement trop éloignés du littoral pour contraindre correctement les évolutions morphologiques constatées en raison de la complexité des interactions/retroactions permanentes des systèmes morphodynamiques côtiers mesurés dans le programme du ROL.

Sommaire

1. Introduction	9
1.1. OBJECTIF	10
1.2. DONNEES EXPLOITEES	11
1.2.1. Données morphologiques.....	11
1.2.2. Données de houle - Base de données BDHC.....	12
1.2.3. Analyse des tempêtes	14
1.3. RELATION ENTRE EVOLUTION MORPHOLOGIQUE LITTORALE ET CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES COTIERES.....	16
2. Sites de la Plaine orientale	19
2.1. CAMPOLORO NORD	19
2.1.1. Evolution du trait de côte	20
2.1.2. Impact des tempêtes 2002-2013	23
2.1.3. Corrélation évolution morphologique/conditions hydrodynamiques	25
2.2. CAMPOLORO SUD	26
2.2.1. Evolution du trait de côte	26
2.2.1. Impact des tempêtes 2002-2013	29
2.2.1. Corrélation évolution morphologique/conditions hydrodynamiques	29
2.3. TAVIGNANO	31
2.3.1. Impact des tempêtes 2002-2013	35
2.3.1. Corrélation évolution morphologique/conditions hydrodynamiques	36
2.4. ETANG DE PALU.....	37
2.4.1. Evolution du trait de côte	38
2.4.2. Impact des tempêtes 2002-2013	41
2.4.1. Corrélation évolution morphologique/conditions hydrodynamiques	41
3. Sites de la côte rocheuse	44
3.1. CALVI	44
3.1.1. Evolution du trait de côte	44
3.1.1. Impact des tempêtes 2002-2013	47
3.1.1. Corrélation évolution morphologique/conditions hydrodynamiques	48
3.2. PORTIGLIOLO	49

3.2.1. Evolution du trait de côte	50
3.2.1. Impact des tempêtes 2002-2013	54
3.2.1. Corrélation évolution morphologique/conditions hydrodynamiques.....	55
4. Conclusions.....	57
5. Bibliographie	59

Liste des illustrations

Illustration 1 - Le Réseau d'Observation du Littoral de la Corse en 2015.....	11
Illustration 2 – Localisation des points de sorties du modèle de propagation de la houle SWAN avec des exemples de roses de houle sur la période 2009-2010 (image GoogleEarth)	13
Illustration 3 - Série chronologique 1979-2009 et statistiques des houles au large de Bastia (point San Martino di Lota / Plaine orientale PO1 ; Stéphanian et al, 2011).....	14
Illustration 4 - Caractéristiques des tempêtes au large de la Plaine orientale sur la période 1979-2009.....	16
Illustration 5 – Présence d'enjeux plus ou moins proches du rivage sur Campoloro Nord (ROL/BRGM,26/10/2015).	19
Illustration 6 – Présence de falaises d'érosion en haut de plage, apparition de galets et présence de feuilles mortes de posidonies en bas de plage (ROL/BRGM,26/10/2015).	20
Illustration 7 – Présence d'aménagements le long du littoral de Campoloro Nord (ROL/BRGM,26/10/2015).	20
Illustration 8 - Site Campoloro nord – Evolution pluriannuelle du trait de côte entre 2002 et 2013(© IGN BD-ORTHO 2007).	21
Illustration 9 - Site Campoloro nord – Evolution pluriannuelle du pied de dune entre 2002 et 2013 (© IGN BD-ORTHO 2007)	22
Illustration 10 - Caractéristiques des tempêtes au point PO2 Campoloro – 2002 -2013	24
Illustration 11 - Caractéristiques des tempêtes et évolution du trait de côte sur les périodes d'analyse de l'évolution du littoral sur Campoloro Nord	25
Illustration 12 – Environnement dunaire bien développé sur la partie nord (photo de gauche), illustrations de la largeur de plage qui se rétrécit en allant vers le sud (ROL/BRGM,05/10/2015).	26
Illustration 13 – Pointe de Prunete (ROL/BRGM,05/10/2015).....	26
Illustration 14 - Site Campoloro sud – Evolution pluriannuelle du trait de côte entre 2002 et 2013(© IGN BD-ORTHO 2007).	27
Illustration 15 - Site Campoloro sud – Evolution pluriannuelle du pied de dune entre 2002 et 2013(© IGN BD-ORTHO 2007).	28
Illustration 16 - Caractéristiques des tempêtes et évolution du trait de côte sur les périodes d'analyse de l'évolution du littoral sur Campoloro Sud.....	30

Illustration 18 – Synthèse des évolutions de la position du trait de côte entre 2002 et 2015 sur le site de Tavignano (fond BD-ORTHO IGN, 2007).....	33
Illustration 19 – Synthèse des évolutions de la position du pied de dune entre 2002 et 2015 sur le site de Tavignano (fond BD-ORTHO IGN, 2007).	34
Illustration 20 - Caractéristiques des tempêtes au point PO3 Solenzara – 2002 -2013.....	35
Illustration 25 - Caractéristiques des tempêtes et évolution du trait de côte sur les périodes d'analyse de l'évolution du littoral sur Tavignano.	36
Illustration 21 - Flèche sableuse de l'étang de Palu ouverte au sud (ROL/BRGM, 23/10/2015).....	37
Illustration 22 – Micro-falaise présente sur la flèche sableuse au sud (ROL/BRGM, 23/10/2015).....	38
Illustration 23 - Site Etang de Palu, évolutions pluriannuelles du trait de côte 2002-2013 (© IGN BD-ORTHO 2007).	39
Illustration 24 - Site Etang de Palu, évolutions pluriannuelles du pied de dune 2002-2015 (© IGN BD-ORTHO 2007).	40
Illustration 26 - Caractéristiques des tempêtes et évolution du trait de côte sur les périodes d'analyse de l'évolution du littoral sur Palu.....	41
Illustration 26 – Exemples d'enjeux vulnérables à l'érosion côtière sur la plage de Calvi (ROL/BRGM,27/10/2015).	44
Illustration 27 - Site Calvi, évolution pluriannuelle du trait de côte entre 2005 et 2015 (© IGN BD-ORTHO 2007).	45
Illustration 28 - Site Calvi, évolution pluriannuelle du pied de dune entre 2005 et 2015 (© IGN BD-ORTHO 2007).	46
Illustration 29 - Caractéristiques des tempêtes au point Revelatta – 2000 -2013	47
Illustration 31 - Caractéristiques des tempêtes et évolution du trait de côte sur les périodes d'analyse de l'évolution du littoral sur Calvi.* La période entre deux levés et ici de 3 ans et donc pas directement comparable avec les autres périodes.	48
Illustration 30 – Embouchure du Rizzanese, vue vers le sud à gauche et vue vers le nord à droite (ROL/BRGM,08/10/2015).	49
Illustration 32 - Barres en croissant sur le site de Portigliolo (© IGN BD-ORTHO 2007).	50
Illustration 33 - Site de Portigliolo, évolution pluriannuelle du trait de côte entre 2002 et 2015 (© IGN BD-ORTHO 2007).	52
Illustration 34 - Site de Portigliolo, évolution pluriannuelle du pied de dune entre 2002 et 2015 (© IGN BD-ORTHO 2007).	53
Illustration 35 - Caractéristiques des tempêtes au point Valinco – 2000 -2013.....	54
Illustration 38 - Caractéristiques des tempêtes et évolution du trait de côte sur les périodes d'analyse de l'évolution du littoral sur Portigliolo.	55

1. Introduction

La Corse est sujette à une mobilité de la position du trait de côte avec des reculs localisés dus, soit à des phénomènes naturels, soit à des aménagements sur le littoral qui impactent la dynamique sédimentaire naturelle. Cette érosion peut avoir des conséquences économiques et/ou environnementales importantes avec une régression des plages qui menace notamment les activités touristiques de stations balnéaires, les zones de protection environnementale, mais également les infrastructures soumises à un risque d'érosion et/ou de submersion marine.

Depuis 1999, dans le cadre de la convention OEC-BRGM, un programme d'observation a été mis en place pour fournir les données nécessaires à la compréhension des phénomènes et processus, à la quantification des évolutions côtières et à l'identification des remèdes possibles. Ce programme se décline en un **Réseau d'Observation du Littoral de la Corse (ROL)** qui s'étend à des sites « régionaux », témoins représentatifs des évolutions régionales naturelles, à des sites « sensibles » qui sont soumis à évolutions critiques ponctuelles, et/ou sensibles économiquement et/ou sensibles à des impacts d'aménagements.

L'objectif du ROL est triple :

- **être un outil de suivi du littoral** : il a pour mission de valoriser et de compléter les informations existantes sur le littoral, de caractériser les évolutions des systèmes côtiers, d'évaluer les vitesses de recul du trait de côte, mais également la dynamique des morphologies sableuses sous-marines qui constituent le stock sédimentaire disponible. Cet outil a pour but de permettre à l'ensemble des acteurs d'évaluer l'état du littoral mais aussi les politiques de gestion mises en place. Ce suivi a également pour objectif de diffuser une information cohérente à un large public ;
- **être un outil de mutualisation et d'organisation de l'information** : le réseau de suivi œuvre pour mutualiser les efforts de connaissance et d'acquisition de données sur l'évolution du littoral corse. Ainsi, le réseau d'observation contribue aux réflexions nationales sur l'homogénéisation des protocoles de collecte, de traitements et de diffusion des données (Mallet *et al.*, 2012) ;
- **être un outil de prospective** : le ROL a pour objectif de développer des outils de compréhension et de prospective visant à anticiper les grands changements sur le littoral en permettant la mise à disposition d'outils d'aide à la décision nécessaires à la définition et à l'adaptation des politiques publiques. Dans ce cadre, le réseau a une mission d'expertise et d'avis en soutien aux partenaires du projet :
 - l'Office de l'Environnement de la Corse qui contribue financièrement au suivi de treize sites ;
 - le Conseil Général de Haute-Corse qui contribue au suivi de deux sites ;
 - la DREAL Corse qui contribue au ROL de Corse pour le maintien technique de la plate-forme de mesures ;

- le BRGM qui participe également financièrement par sa subvention pour charge de service public (SCSP) et qui reste l'opérateur technique historique du Réseau d'Observation du Littoral.

La métrologie littorale mise en œuvre répond à un réel besoin de données pour une meilleure compréhension des processus d'évolution morphologique. Le ROL constitue également un outil d'aide à la gestion du littoral corse permettant à la fois d'estimer la vulnérabilité des côtes, et de fournir les informations requises pour la définition des éventuelles stratégies d'aménagement et le dimensionnement des projets.

1.1. OBJECTIF

Jusqu'à présent, les interprétations des évolutions mesurées sur le terrain se basaient sur une connaissance incomplète des conditions hydrodynamiques qui ont impacté le littoral insulaire, en raison de l'absence de houlographe directionnel le long des côtes de Corse. Les informations recueillies étaient basées sur une veille internet du modèle Prévimer, et sur une revue de presse locale qui renseigne sur l'occurrence d'évènements de tempête importants, essentiellement en fonction de leur impact sur les infrastructures littorales.

Le présent rapport est consacré à la recherche d'une corrélation entre les évolutions morphologiques interannuelles constatées dans les levés morphologiques du ROL depuis 2000 et les variations des conditions hydrodynamiques déterminées par la Base de Données des Houles Corse, développée par le BRGM dans le cadre du ROL (Belon, 2014). Une analyse du rôle des tempêtes sur les évolutions du trait de côte sur chacun des secteurs est ainsi réalisée.

Ce travail est complémentaire au rapport annuel du ROL (Belon et Bodéré, 2016 ; BRGM RP-66351-FR) et porte sur les sites de :

- Campoloro Nord ;
- Campoloro Sud ;
- Tavignano ;
- Palu ;
- Calvi ;
- Portigliolo.

Ces sites ont été retenus pour couvrir la Plaine orientale en raison des forts enjeux de ce secteur. Le nord de la Plaine orientale, le lido de Marana (Site ADAPTO) est également étudié à travers une convention entre le Conservatoire du Littoral et le BRGM (Stépanian et al., 2017).

Les deux sites de la côte rocheuse (Calvi et Portigliolo) ont été choisis à titre exploratoire.

1.2. DONNEES EXPLOITEES

1.2.1. Données morphologiques

Les données morphologiques sont les données d'évolution du trait de côte acquises sur les sites du Réseau d'Observation du Littoral de la Corse¹ (Illustration 1).

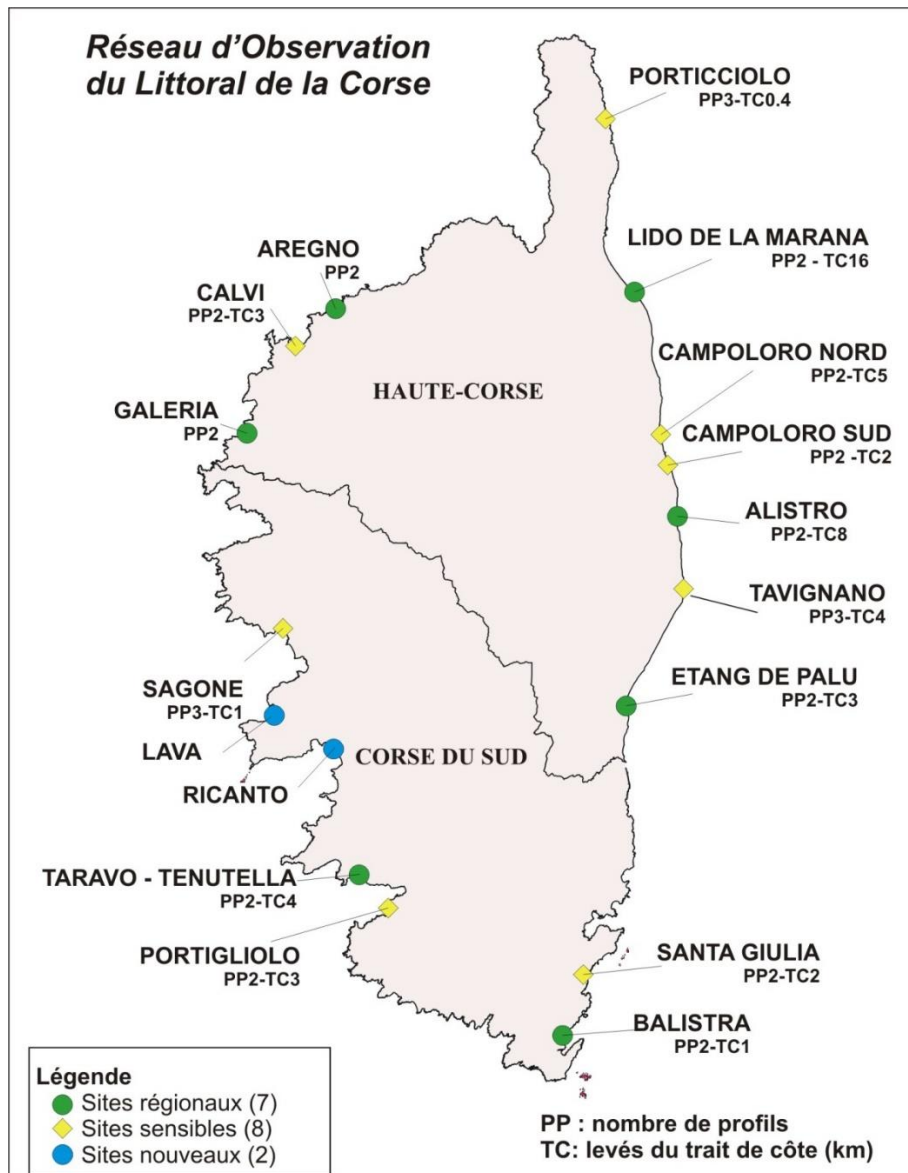


Illustration 1 - Le Réseau d'Observation du Littoral de la Corse en 2015.

Elles sont issues du rapport BRGM RP-66351-FR (Belon et Bodéré, 2016) qui présente les résultats, l'analyse et l'interprétation des observations réalisées en 2015.

¹ Les rapports du ROL sont accessibles au téléchargement sur le site infoterre : <http://infoterre.brgm.fr/>

1.2.2. Données de houle - Base de données BDHC

En raison de l'absence de données de houles disponibles issues de mesures *in situ*, au large de la Plaine orientale², 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 Houles Corse (BDHC) est une base de données de vagues qui s'étend sur la période 1979-2013, développée dans le cadre du Réseau d'Observation du Littoral de la Corse. Elle avait pour vocation première de participer à l'évaluation des conditions hydrodynamiques au large pour l'évaluation de l'aléa submersion à la côte (Balouin *et al.*, 2011 ; Stepanian *et al.*, 2011).

En 2014, le BRGM a rendu public la BDHC pour palier à l'absence de mesures de houles *in situ* tout autour de la Corse (BRGM/RP-63032-FR ; Bélon, 2014). 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, ce qui a permis l'extraction de données de vague le long du littoral insulaire (Illustration 2).

² 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).

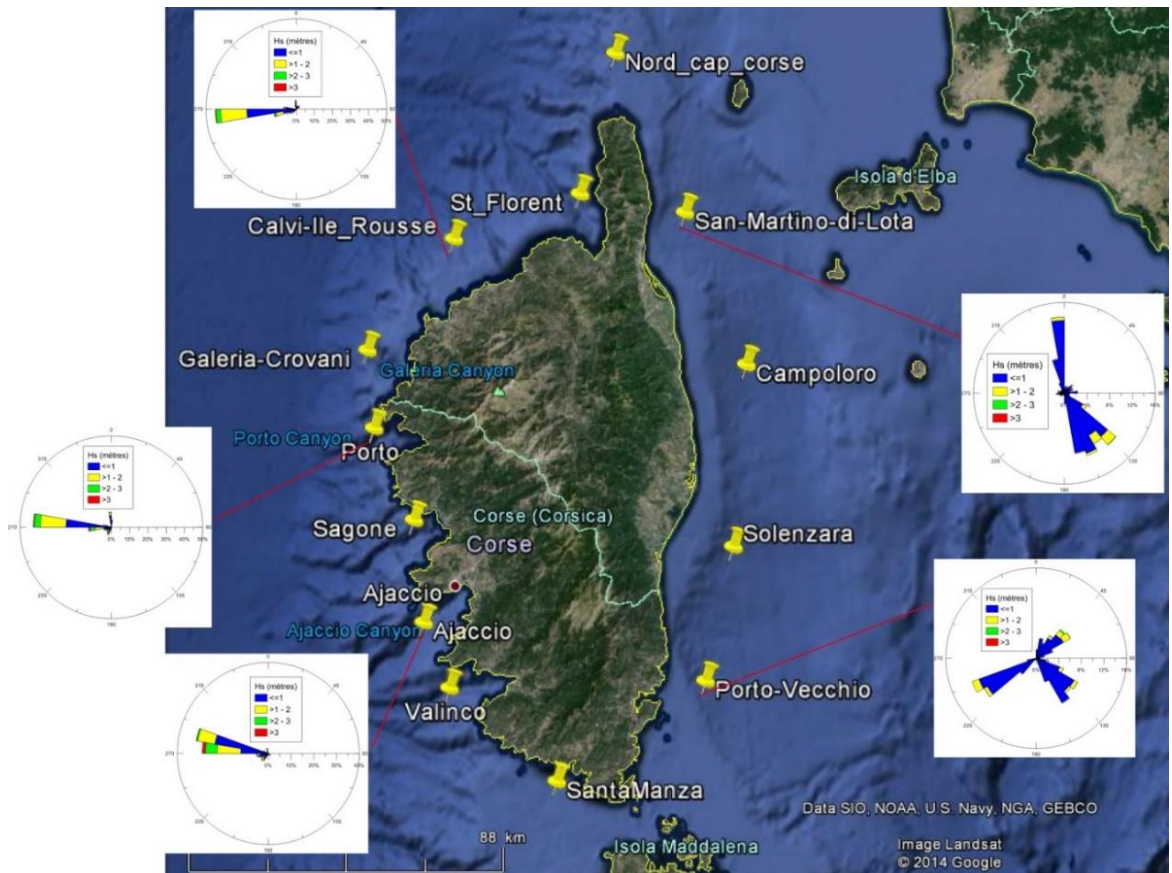


Illustration 2 – Localisation des points de sorties du modèle de propagation de la houle SWAN avec des exemples de roses de houle sur la période 2009-2010 (image GoogleEarth)

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 ($0,5^\circ \times 0,5^\circ$) toutes les 6h (Illustration 3) ;
- période 2009-2010 : Vents NCEP CFSR ($0,5^\circ \times 0,5^\circ$), résolution temporelle 3h ;
- période 2011-2013 : Vents CFSv2 $0,5^\circ \times 0,5^\circ$, résolution temporelle 1h.

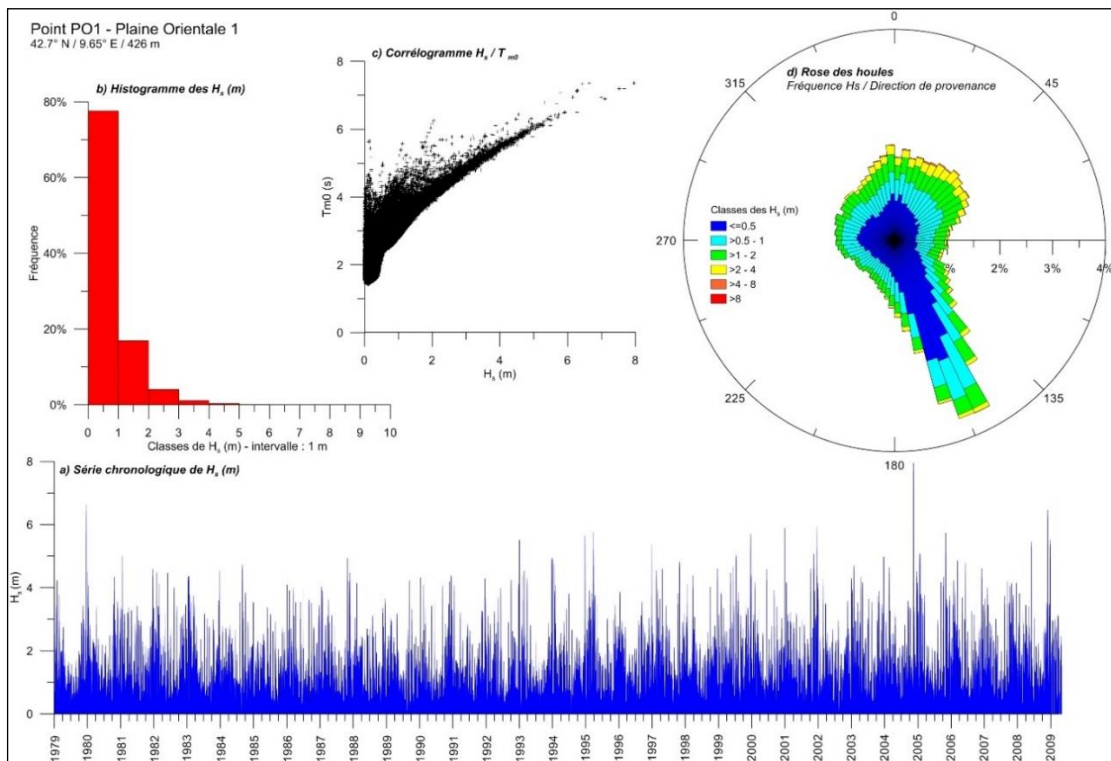


Illustration 3 - Série chronologique 1979-2009 et statistiques des houles au large de Bastia (point San Martino di Lota / Plaine orientale PO1 ; Stéphanian et al, 2011).

1.2.3. Analyse des tempêtes

A partir des 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 fortes houles (événements qualifiés par le terme « tempêtes » dans la suite du rapport) 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 ($\pm 90^\circ$ 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) ;

- H_s^3 max (le maximum de hauteur significative) ;
- la date de H_s max (m) (date du maximum de la hauteur significative) ;
- la moyenne de H_s (m) sur la durée de l'évènement ;
- la période moyenne à la date de H_s max (s) ;
- la période de pic à la date de H_s max (s) ;
- la direction de pic en convention nautique ($^\circ$) à la date de H_s max ;
- T_{pic} max (le maximum de la période pic) ;
- la date de T_{pic} max (date du maximum de la période pic) ;
- la direction globale moyenne ($^\circ$) = la direction moyenne (Dir) moyennée sur la durée de l'évènement ;
- l'incidence de la houle par rapport à la côte ($^\circ$) au moment du pic (date de H_s max) ;
- l'énergie totale de la tempête (J/m^2) ;
- la puissance de la tempête.

Ainsi, à titre d'exemple, l'illustration 4 montre la répartition temporelle des tempêtes au large de la Plaine orientale pour les périodes et leurs caractéristiques statistiques principales sur la période 1979-2009

³ H_s : Hauteur significative, moyenne des hauteurs (mesurées entre crête et creux) du tiers des plus fortes vagues sur une période donnée.

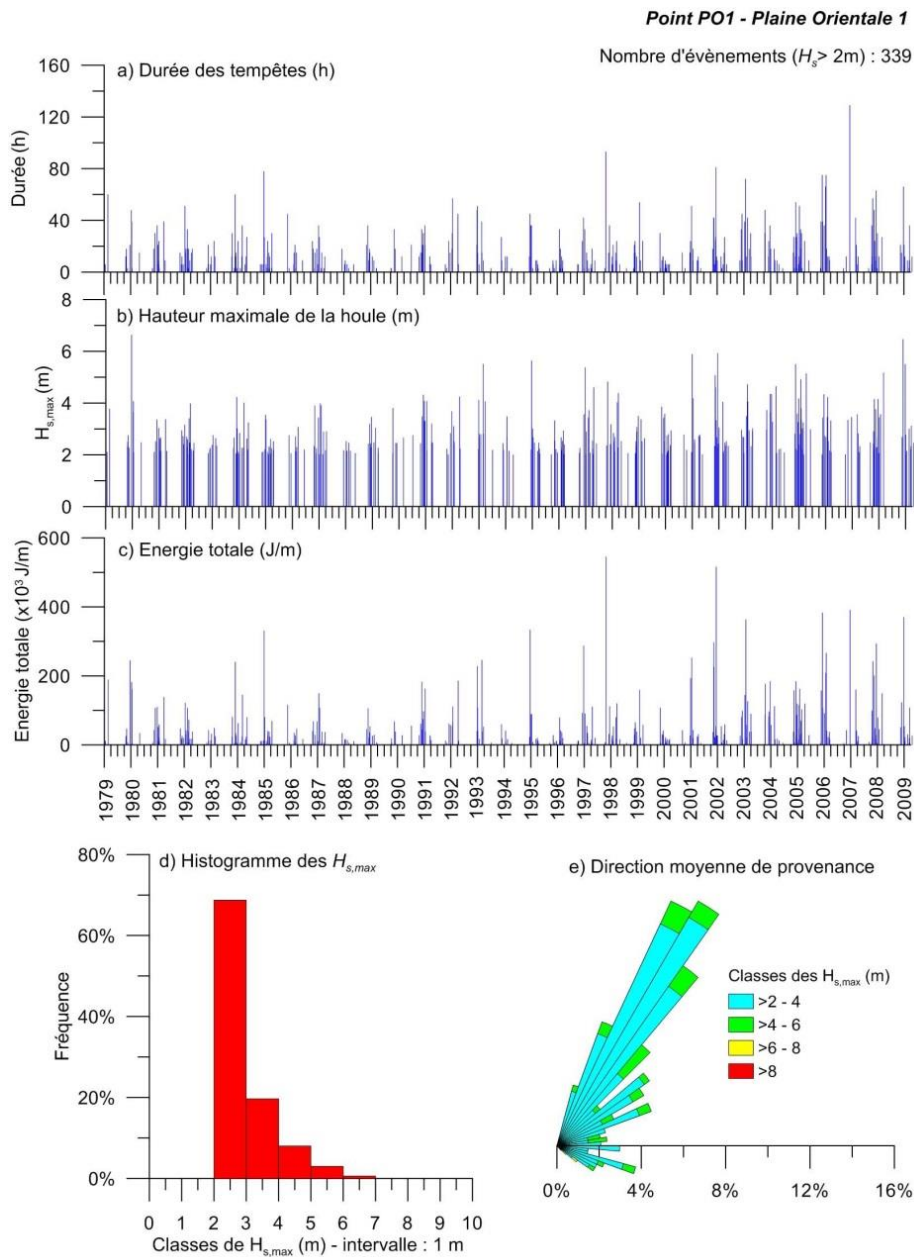


Illustration 4 - Caractéristiques des tempêtes au large de la Plaine orientale sur la période 1979-2009

1.3. RELATION ENTRE EVOLUTION MORPHOLOGIQUE LITTORALE ET CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES COTIERES

La méthodologie employée pour explorer les relations morphodynamiques entre l'évolution morphologique du littoral et les conditions hydrodynamiques a été employée sur les sites du Conservatoire du Littoral, le long de la Marana et de la Casinca (Stépanian et al., 2017).

Elle est basée sur la comparaison des évolutions des indicateurs morphologiques issus des mesures du ROL et des indicateurs issus d'analyses statistiques de la BDHC pour des périodes entre deux levés :

- L'indicateur morphologique est principalement l'évolution du trait de côte résiduelle sur la période entre deux levés et intégrée sur la totalité du linéaire côtier ;
- Les indicateurs hydrodynamiques sont le nombre d'évènements de tempêtes, la hauteur de vagues maximales, l'énergie totale impactant le littoral intégrée sur la période entre deux levés.

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 du ROL 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 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.

Cette approche intégratrice et simplificatrice pose par hypothèse, qu'entre ces périodes, le comportement modal d'évolution du littoral est dominé par les conditions modales des vagues.

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 reste difficile d'appréhender les impacts respectifs des différents 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/m^2). Ce paramètre renseigne sur le degré d'agitation totale de la période. L'énergie totale de la houle E (J) intégrée sur une longueur d'onde est calculée par :

$$E = \frac{1}{8} \rho_w g H_s^2$$

avec ρ_w , la masse volumique de l'eau de mer (1027 kg.m^{-3}), g , l'accélération de la pesanteur ($9,81 \text{ m.s}^{-2}$) et H_s , la hauteur significative de la houle (m).

La puissance est un paramètre qui indique le flux d'énergie total (J/s) transmis par crête de vagues et par unité de longueur dans le sens de propagation de la houle. Elle est exprimée en (en Joules par seconde, $J.s^{-1}$), et est calculée pour chaque valeur discrète de la manière suivante :

$$P = \frac{1}{8} \rho_w g H_s^2 \left(\frac{L}{T} \right) \left[0,5 \left(1 + \frac{4\pi h}{\sinh(4\pi h/L)} \right) \right]$$

avec ρ_w , la masse volumique de l'eau de mer (1027 kg.m^{-3}), g , l'accélération de la pesanteur ($9,81 \text{ m.s}^{-1}$), H_s , la hauteur significative de la houle (m), L , la longueur d'onde de la houle (m), T (s), la période de la houle, et h , la hauteur d'eau (m).

Le flux d'énergie intégré sur la durée de la tempête est projeté sur le littoral selon l'angle d'incidence de la houle pour distinguer ainsi les secteurs de provenance majoritaires de l'énergie des vagues. Il est ensuite intégré sur la période entre deux levés consécutifs :

- une valeur positive de puissance intégrée indique un flux d'énergie dominant en provenance d'un secteur particulier (en fonction de l'orientation du littoral) ;
- une valeur négative de puissance intégrée indique un flux d'énergie dominant en provenance du secteur contraire (secteur Nord pour cette période) ;
- une valeur proche de 0 implique que sur l'échelle de temps de la période, les conditions s'équilibrent et le transfert sédimentaire résiduel par dérive littorale est peu significatif.

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

2. Sites de la Plaine orientale

2.1. CAMPOLORO NORD

Sur le littoral de Campoloro, deux secteurs d'étude ont été définis au Nord et au Sud du port de Taverna. Celui-ci constitue un obstacle au transit sédimentaire naturel par la dérive littorale orientée du Sud vers le Nord le long de la côte. Son édification en 1972 a fortement perturbé la dynamique côtière locale et influence aujourd'hui encore l'évolution des plages adjacentes. Des levés ont été réalisés sur ces deux sites depuis 2003.

Le secteur situé au Nord du port de Taverna commence généralement au Nord de Vanga di l'Oru jusqu'au village CCAS de Talasani. Ce littoral présente des enjeux plus ou moins proches du rivage avec notamment le secteur de Moriani plage qui est particulièrement vulnérable à l'érosion côtière (Illustration 5).



Illustration 5 – Présence d'enjeux plus ou moins proches du rivage sur Campoloro Nord (ROL/BRGM,26/10/2015).

Les mesures réalisées montrent que le littoral proche du port est soumis à un phénomène d'érosion marqué par une disparition progressive du sable fin laissant apparaître par endroit des galets. Les laisses de haute-mer ainsi que les falaises d'érosion du haut de plage illustrent bien les assauts de la mer et son impact sur cette partie du littoral. Il est à noter toutefois la présence fréquentes de feuilles mortes de posidonies en bas de plage qui jouent un rôle protecteur face à l'érosion de la plage (Illustration 6).



Illustration 6 – Présence de falaises d'érosion en haut de plage, apparition de galets et présence de feuilles mortes de posidonies en bas de plage (ROL/BRGM,26/10/2015).

Pour faire face à cette problématique d'érosion certains aménagements ont été réalisés avec la présence d'épis en géotextiles ou de de big bag ainsi que des enrochements (Illustration 7).

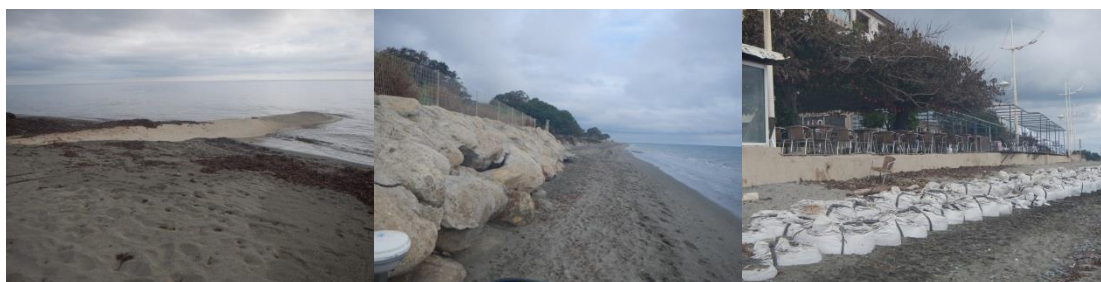


Illustration 7 – Présence d'aménagements le long du littoral de Campoloro Nord (ROL/BRGM,26/10/2015).

2.1.1. Evolution du trait de côte

Même s'il est possible d'observer des alternances de secteurs en avancée et en recul au cours des évolutions interannuelles comme sur la plupart des sites de la Plaine orientale, il existe tout de même des tendances dominantes (Illustration 8 et Illustration 9).

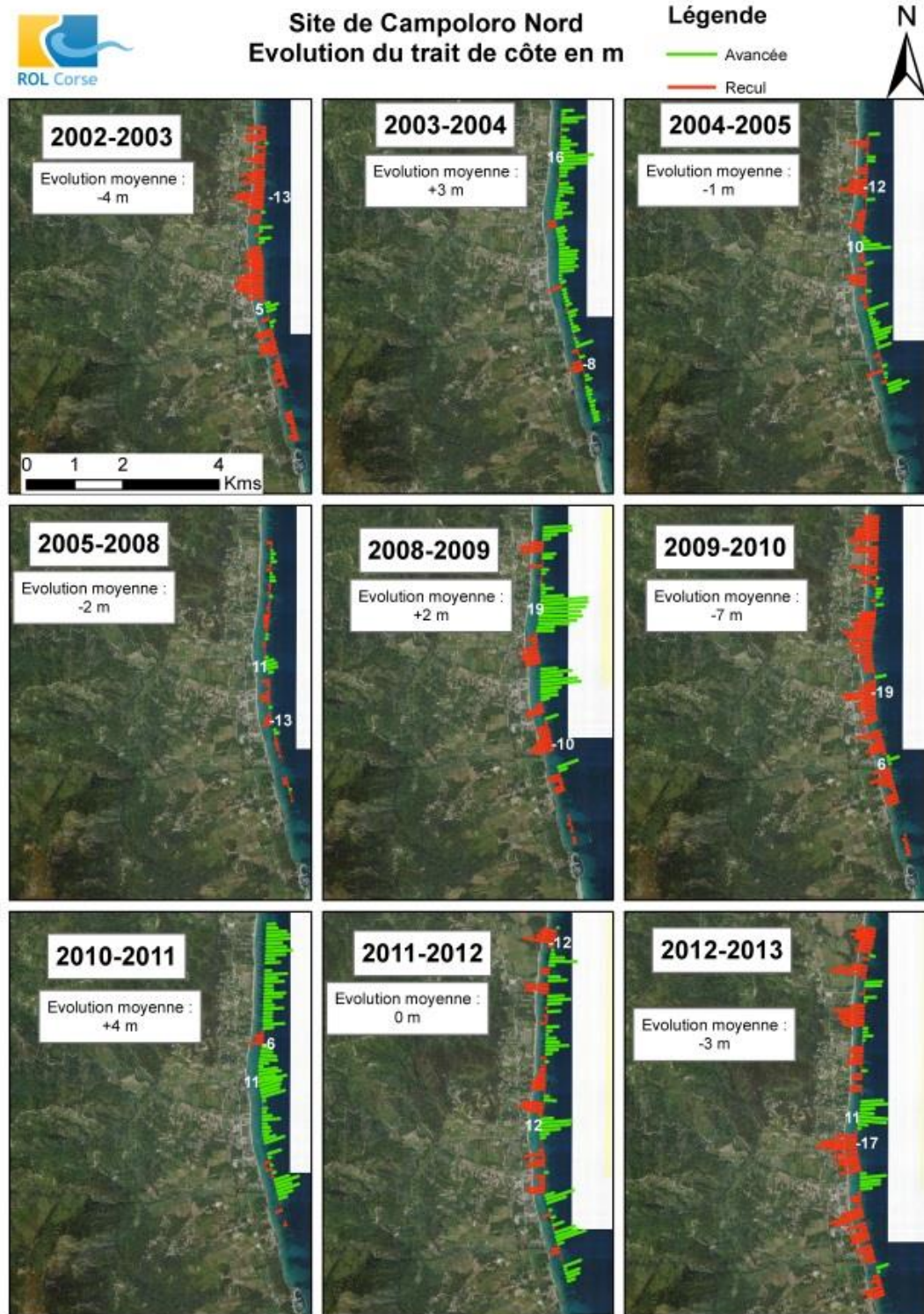


Illustration 8 - Site Campoloro nord – Evolution pluriannuelle du trait de côte entre 2002 et 2013(© IGN BD-ORTHO 2007).

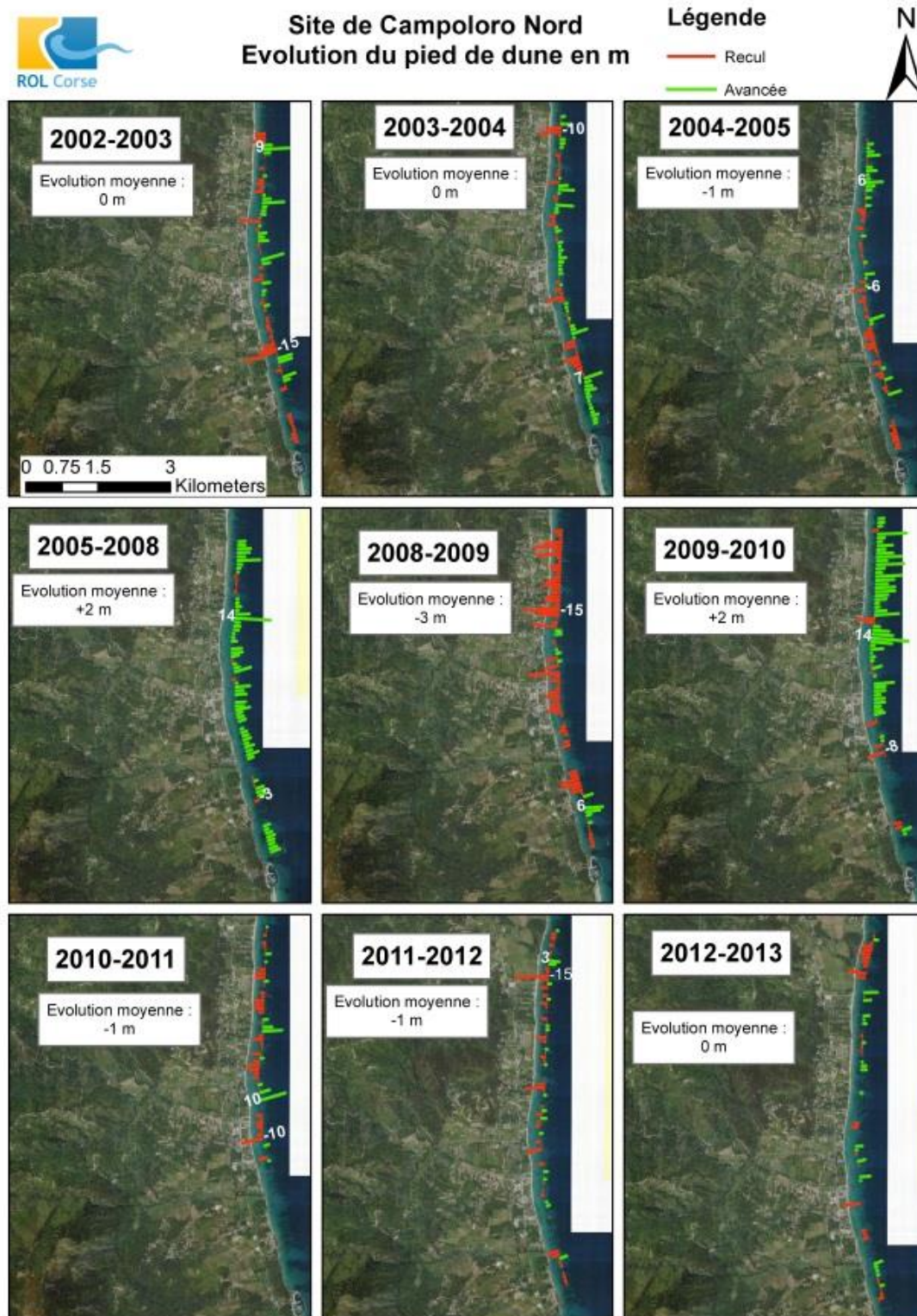


Illustration 9 - Site Campoloro nord – Evolution pluriannuelle du pied de dune entre 2002 et 2013
(© IGN BD-ORTHO 2007)

En termes de recul du trait de côte, les périodes les plus impactantes ont été 2002-2003 (recul moyen de -4 m), 2009-2010 (recul moyen de -7 m) et 2011- 2012 (recul moyen de -3 m) (Illustration 8). Il est intéressant de constater que chacune de ces périodes ont été suivies par des périodes d'avancée généralisée du trait de côte mais d'importance moindre.

Les observations concernant l'évolution du pied de dune restent difficiles sur ce secteur en raison d'un haut de plage souvent urbanisé. Le suivi interannuel permet quand même d'observer l'impact que peut avoir un événement fortement énergétique comme celui de novembre 2008 sur le haut de plage avec un recul du pied de dune observé entre 2008 et 2009 en moyenne de -3 m mais qui peut atteindre localement -15 m notamment proche du secteur d'Alba Serena (Illustration 9). L'évolution entre 2009 et 2010 montre que le système possède une bonne capacité de récupération puisque le pied de dune avance du même ordre de grandeur.

Le bilan 2002-2015 confirme celui du trait de côte avec un recul généralisé du pied de dune et notamment sur le secteur situé directement au nord du port de Taverna.

2.1.2. Impact des tempêtes 2002-2013

Les conditions hydrodynamiques sont issues de la BDHC au niveau de la bouée Plaine orientale 2 au large de Campoloro (Illustration 2). Les caractéristiques des tempêtes sur la période 2002-2013 sont reportées sur l'illustration 10.

**Caractéristiques des tempêtes
Point PO2 - Plaine Orientale 2**

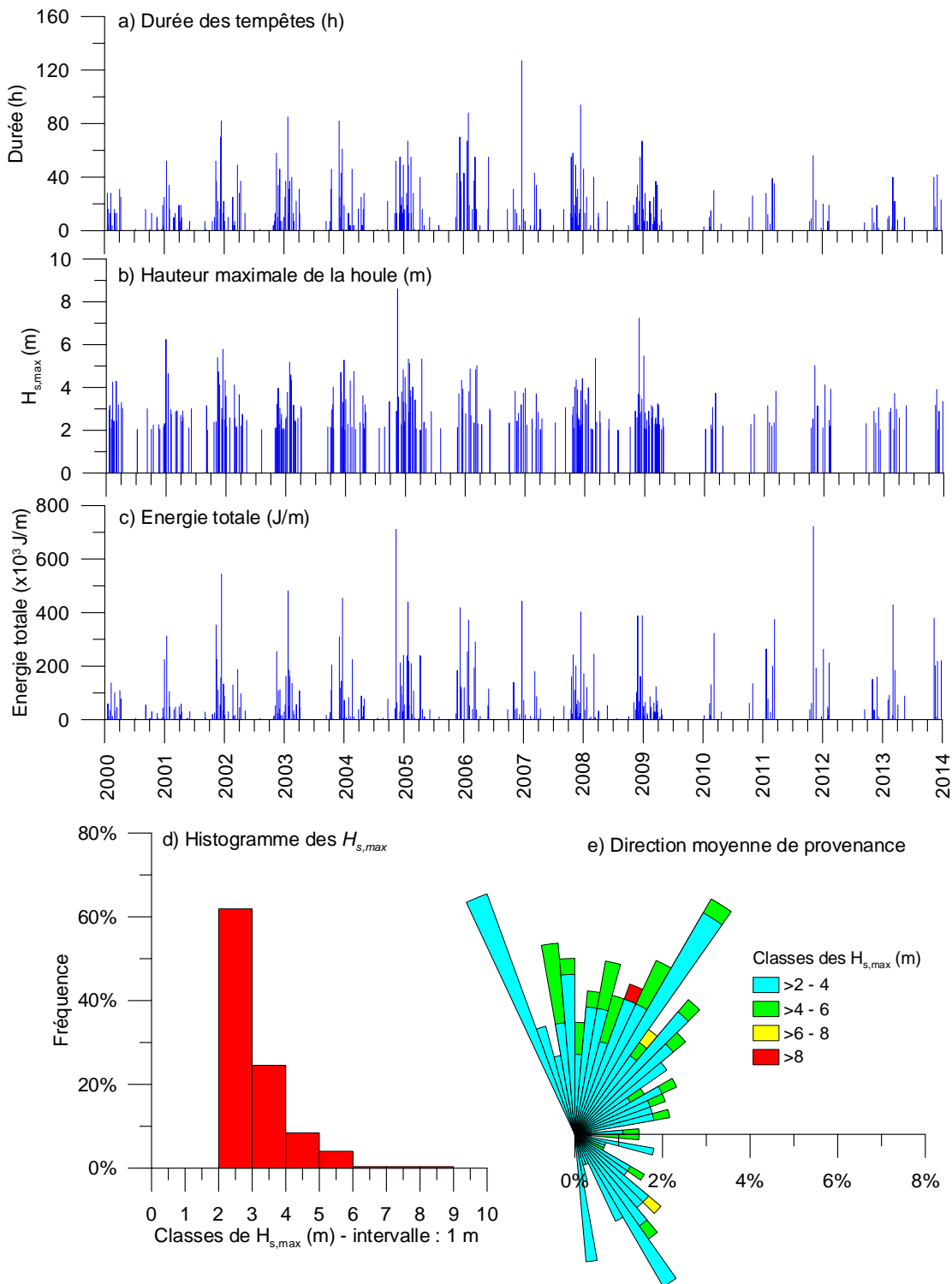


Illustration 10 - Caractéristiques des tempêtes au point PO2 Campoloro – 2002 -2013

2.1.3. Corrélation évolution morphologique/conditions hydrodynamiques

L'illustration 11 rassemble les évolutions du trait de côte et du pied de dune intégrée sur les périodes entre deux levés consécutifs. Une valeur positive de puissance indique un flux d'énergie dominant en provenance de secteur Nord pour cette période, alors qu'une valeur positive indique un flux d'énergie dominant en provenance de secteur Sud.

Période	Début	Fin	Nombre de mois	Nombre de tempêtes	Hs,max (m)	Energie totale (J/m ²)	Puissance (W/m)	Evolution du trait de côte (m)	Evolution du pied de dune (m)
2002-2003	20/03/2002	07/03/2003	12	29	5.2	2375335	-1156761	-4	0
2003-2004	07/03/2003	28/05/2004	14	27	5.3	2313997	4498	+3	0
2004-2005	28/05/2004	23/05/2005	12	27	8.6	3364915	-5072941	-1	-1
2005-2008	23/05/2005	15/05/2008	36	59	8.6	5797172	-5005485	-2	+2
2008-2009	15/05/2008	19/05/2009	12	47	7.2	2890521	58192	+2	-3
2009-2010	19/05/2009	30/09/2010	16	10	5.0	1959948	672206	-7	+2
2010-2011	30/09/2010	13/11/2011	14	8	4.1	819516	-709076	+4	-1
2011-2012	13/11/2011	02/10/2012	11	11	3.7	1293733	2378213	0	-1
2012-2013	02/10/2012	16/09/2013	11	29	5.2	2375335	-1156761	-3	0

Illustration 11 - Caractéristiques des tempêtes et évolution du trait de côte sur les périodes d'analyse de l'évolution du littoral sur Campoloro Nord

Les périodes 2002-2003 et 2009-2010 ont été marquées par un recul très significatif du trait de côte et une évolution contrastée du pied de dune. La période 2002-2003 est caractérisée par une succession de tempêtes assez fréquentes (29 en 12 mois) qui pourrait expliquer pour partie le recul global, avec une tendance marquée par un flux d'énergie de secteur Sud. En revanche, le recul de -7 m du trait de côte se produit après une période (2009-2010), avec 10 tempêtes en 16 mois, mais avec des valeurs d'énergie totale assez limitée.

Il ressort donc de cette analyse que le site a une réponse globalement érosive lorsque la période est caractérisée par une puissance négative significative. Cependant, les paramètres d'évolution morphologique étant moyennés sur la période, il est difficile d'appréhender la succession d'évènements de même direction ou de direction opposée..

2.2. CAMPOLORO SUD

Le littoral situé au sud du port de Taverna est caractérisé par une large plage favorisant ainsi le développement de l'environnement dunaire dû au blocage des sédiments par le port puis la plage rétrécit vers le sud jusqu'au secteur de Prunete où la dune disparaît avec la présence d'enjeux qui restent vulnérables face aux phénomènes d'érosion côtière et de submersion marine (Illustration 12).



Illustration 12 – Environnement dunaire bien développé sur la partie nord (photo de gauche), illustrations de la largeur de plage qui se rétrécit en allant vers le sud (ROL/BRGM,05/10/2015).

D'importants dépôts de feuilles mortes de posidonies peuvent être présents sur la plage limitant ainsi l'impact des vagues comme notamment le long de la pointe de Prunete. La falaise reste tout de même sensible à l'érosion (Illustration 13).



Illustration 13 – Pointe de Prunete (ROL/BRGM,05/10/2015).

2.2.1. Evolution du trait de côte

L'évolution du trait de côte dans ce secteur est liée à la présence du port qui bloque les apports de la dérive littorale résiduelle annuelle qui est orientée Sud-Nord. La comparaison générale des levés à l'échelle du secteur est reportée sur l'illustration 14.

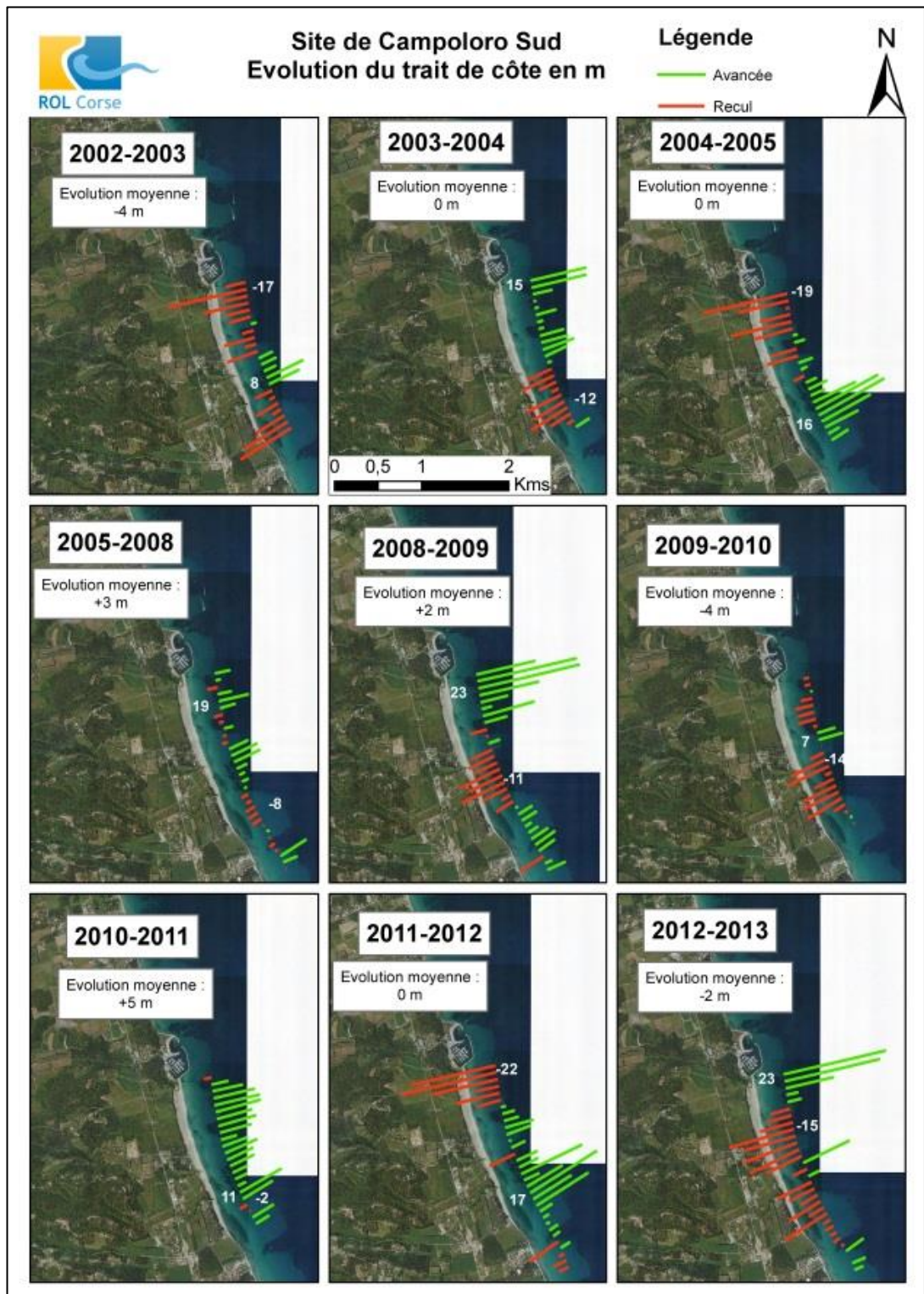


Illustration 14 - Site Campoloro sud – Evolution pluriannuelle du trait de côte entre 2002 et 2013(© IGN BD-ORTHO 2007).

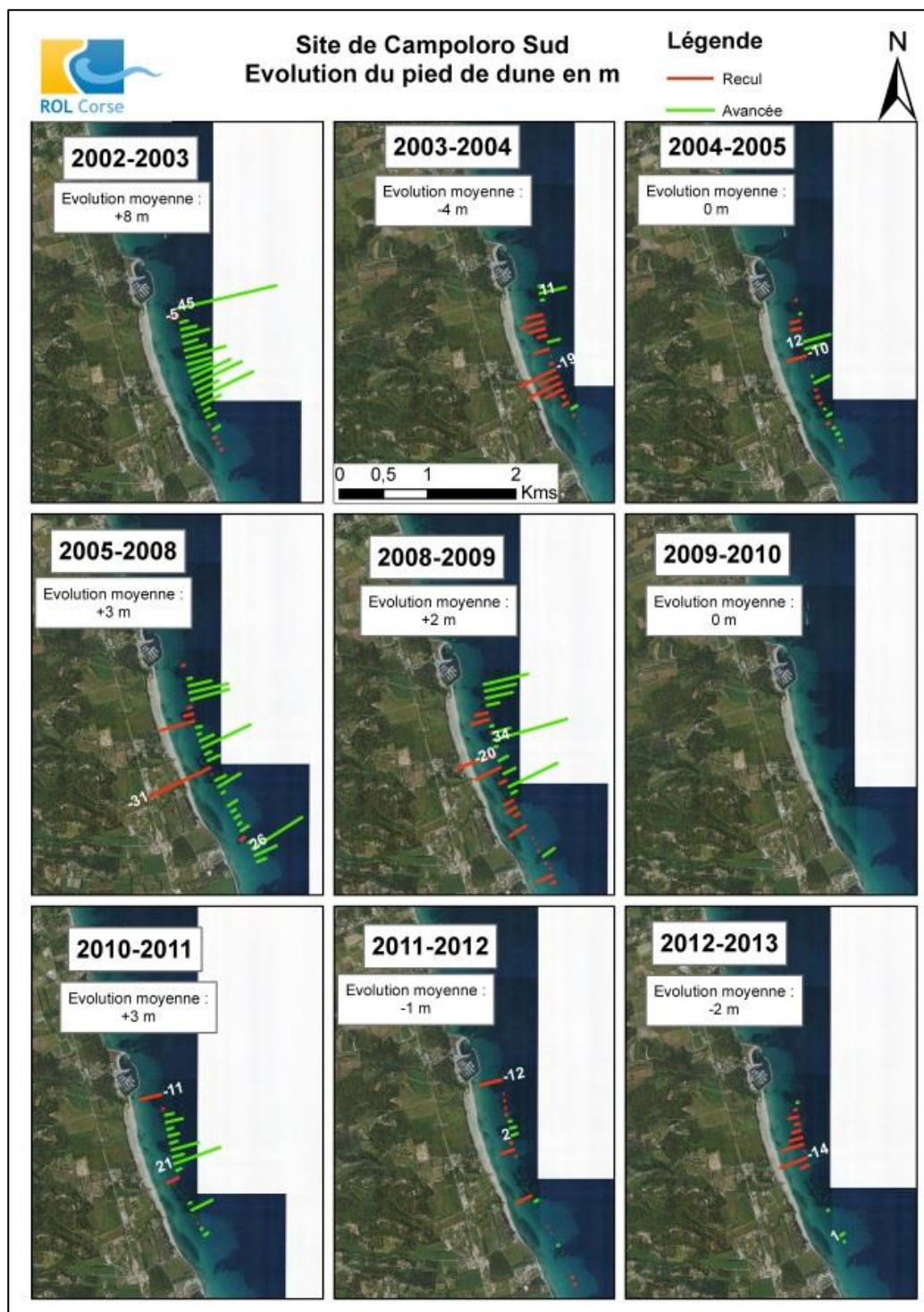


Illustration 15 - Site Campoloro sud – Evolution pluriannuelle du pied de dune entre 2002 et 2013(© IGN BD-ORTHO 2007).

On distingue deux zones dont les comportements peuvent diverger au cours des périodes observées :

- au Sud du port, en amont-transit de la digue ;
- l'extrémité sud.

Suivant la période observée, des phénomènes de basculement de plage avec une avancée au nord et un recul au sud (2003-2004 par exemple) ou l'inverse (2004-2005) sont constatés. Ils montrent que le transit sédimentaire peut varier au cours du temps avec tantôt un transit plus important orienté vers le Nord et tantôt plus important vers le Sud à mettre en lien avec les conditions hydrodynamiques de l'année écoulée.

Il est intéressant de noter que les amplitudes d'évolution du trait de côte les plus importantes ont lieu à proximité de la digue sud du port qui joue un rôle certain dans ces évolutions.

L'évolution de la position du pied de dune est cohérente avec les observations faites sur la position du trait de côte avec une avancée significative de l'environnement dunaire au sud de la digue et un recul sur l'extrémité sud du site (Illustration 15).

2.2.1. Impact des tempêtes 2002-2013

Comme pour Campoloro nord, les conditions hydrodynamiques sont issues de la BDHC au niveau de la bourée Plaine Orientale 2 au large de Campoloro (Illustration 2). Les caractéristiques des tempêtes sur la période 2002-2013 sont reportées sur l'illustration 10.

2.2.1. Corrélation évolution morphologique/conditions hydrodynamiques

L'illustration 16 rassemble les évolutions du trait de côte et du pied de dune intégrée sur les périodes entre deux levés consécutifs. Une valeur positive de puissance indique un flux d'énergie dominant en provenance de secteur Nord pour cette période, alors qu'une valeur négative indique un flux d'énergie dominant en provenance de secteur Sud.

Période	Début	Fin	Nombre de mois	Nombre de tempêtes	Hs,max (m)	Energie totale (J/m ²)	Puissance (W/m)	Evolution du trait de côte (m)	Evolution du pied de dune (m)
2002-2003	20/03/2002	07/03/2003	12	29	5.2	2375335	-1156761	+4	+8
2003-2004	07/03/2003	28/05/2004	14	27	5.3	2313997	4498	0	-4
2004-2005	28/05/2004	23/05/2005	12	27	8.6	3364915	-5072941	0	0
2005-2008	23/05/2005	15/05/2008	36	59	8.6	5797172	-5005485	+3	+3
2008-2009	15/05/2008	19/05/2009	12	47	7.2	2890521	58192	+2	+2
2009-2010	19/05/2009	30/09/2010	16	10	5.0	1959948	672206	-4	0
2010-2011	30/09/2010	13/11/2011	14	8	4.1	819516	-709076	+5	+3
2011-2012	13/11/2011	02/10/2012	11	11	3.7	1293733	2378213	0	-1
2012-2013	02/10/2012	16/09/2013	11	29	5.2	2375335	-1156761	-2	-2

Illustration 16 - Caractéristiques des tempêtes et évolution du trait de côte sur les périodes d'analyse de l'évolution du littoral sur Campoloro Sud

On retrouve des tendances dans les données issues de la BDHC permettant d'expliquer les évolutions constatées sur le littoral de Campoloro Sud. En effet, certaines évolutions de plages en rotation sont cohérentes :

- avec les périodes caractérisées par une puissance positive (2003-2004, 2008-2009, 2012-2013) et des transferts potentiels sableux depuis le Nord avec érosion vers Prunete et accrétion au niveau de la digue.
- le comportement inverse (accrétion à prunette et érosion au niveau de la digue) est observé entre 2002-2003 et 2004-2005 et 2011-2012.
- en 2010-2011, l'accrétion générale est mesurée après une période avec une puissance intégrée négative et donc avec des apports potentiels par dérive littorale plus importants depuis le Sud, ce qui est envisageable.

Les données de la BDHC permettent ici de caractériser de manière qualitative une tendance de la dérive littorale, avec des tempêtes très obliques qui ont peu d'effet ou génèrent des avancées modérées, alors que des périodes caractérisées avec des évènements plus frontaux (2009-2010) génèrent plus facilement un recul du trait de côte.

2.3. TAVIGNANO

Le littoral suivi s'étend du grau de Diane au Nord jusqu'à l'embouchure du Tavignano au Sud.

Les levés annuels réalisés depuis 2002 ont permis de dégager un schéma conceptuel d'évolution du site de Tavignano, avec sur le secteur nord une évolution marquée par des oscillations du trait de côte au niveau de secteurs « nœuds » où l'érosion reste modérée et des secteurs « ventres » où l'on observe des alternances d'érosion et d'accrétion (Stéphanian *et al*, 2011, 2012).

Suite à la forte érosion constatée après un coup de mer en octobre 2007, les observations de 2008 ont montré une bonne récupération de la plage dans la partie nord, entre la Marina d'Aléria et le Grau de Diane, le linéaire au Sud, vers l'embouchure du Tavignano, restant en situation critique. En 2009, le secteur montrait d'importants remaniements morphologiques des barres sous-marines au cours de la période hivernale 2008-2009, attribués aux impacts hydro-sédimentaires des vagues de fortes tempêtes, comme celle de décembre 2008. En 2010, ces changements sur la partie sous-marine étaient moindres, mais les situations inquiétantes sur la partie Sud persistaient. En 2011, depuis la zone des restaurants jusqu'à l'embouchure du Tavignano en particulier, la situation s'est améliorée avec une accrétion quasi-générale. On observait également une érosion très nette de la plage au Sud du Grau de Diane, à l'inverse des années précédentes, en relation probable avec un changement de régime de la climatologie des houles, générant une inversion de dérive littorale résiduelle. En 2012, on retrouvait un mode de comportement très contrasté de la plage avec une érosion assez générale sur la plage de Padulone Nord constatée également sur le profil Nord, et une accrétion forte au niveau des profils Centre et Sud. En 2013, on retrouve un comportement contrasté du littoral, avec des zones en recul parfois important au Sud et sur Padulone, mais ce recul s'accompagne, sur le domaine sous-marin d'une accrétion très significative des barres internes, Ceci traduit une situation plutôt positive de l'avant-côte en termes de budget sédimentaire pouvant alimenter la plage et qui tend à la protéger contre les impacts des vagues de tempêtes.

Alors que les observations réalisées depuis 2012 montraient que l'on sortait de ce modèle nœud/ventre (recul global du trait de côte en 2012 et avancée globale en 2014), on retrouve en 2015 une alternance marquée des secteurs en avancée et en recul, caractéristique des plages à barres sous-marines festonnées (Illustration 17).

Au sud, l'évolution naturelle est perturbée d'une part par l'embouchure du Tavignano, et d'autre part, par la présence de restaurants et d'infrastructures localisés sur le trait de côte. Contrairement à 2014, un recul important affecte cette partie de la plage en 2015.

Même si les évolutions interannuelles montrent des alternances de phases d'avancée et de recul du trait de côte d'amplitude pouvant être importante d'une année à l'autre, l'ensemble de ce secteur est tout de même soumis à un recul généralisé globalement important au cours de cette dernière décennie.

L'évolution du pied de dune semble quant à elle beaucoup plus homogène. Certaines périodes ont été particulièrement impactantes comme 2006-2007 ou 2008-2009 avec des reculs maximums ayant atteint -15 m. L'évolution constatée depuis 2003 montre

deux comportements opposés avec l'extrémité nord qui est plutôt en avancée et une majorité du secteur plus au sud en recul pouvant atteindre un maximum de -30 m ce qui confirme l'érosion chronique de la plage (Illustration 18).

Ce recul est probablement structurel en raison de sa position au niveau d'une divergence des transits sédimentaires généraux avec une dérive littorale vers le Nord et l'étang de Diane et une autre vers le Sud qui participe à l'édification de la flèche sableuse de l'embouchure du Tavignano, très évolutive (Illustration 18). Il s'aggrave de manière conjoncturelle lors de l'impact d'évènements de tempête sur ce littoral déjà très vulnérable.

Sur le littoral de la Marina d'Aléria, ce recul chronique est géré par des travaux d'aménagement (boudins en géotextiles installés en 2010, reprofilages mécaniques du bourrelet dunaire, voire rechargement) en particulier au niveau de la zone centrale du camping. Il est cependant confirmé par un recul important du pied de dune entre 2003 et 2015.

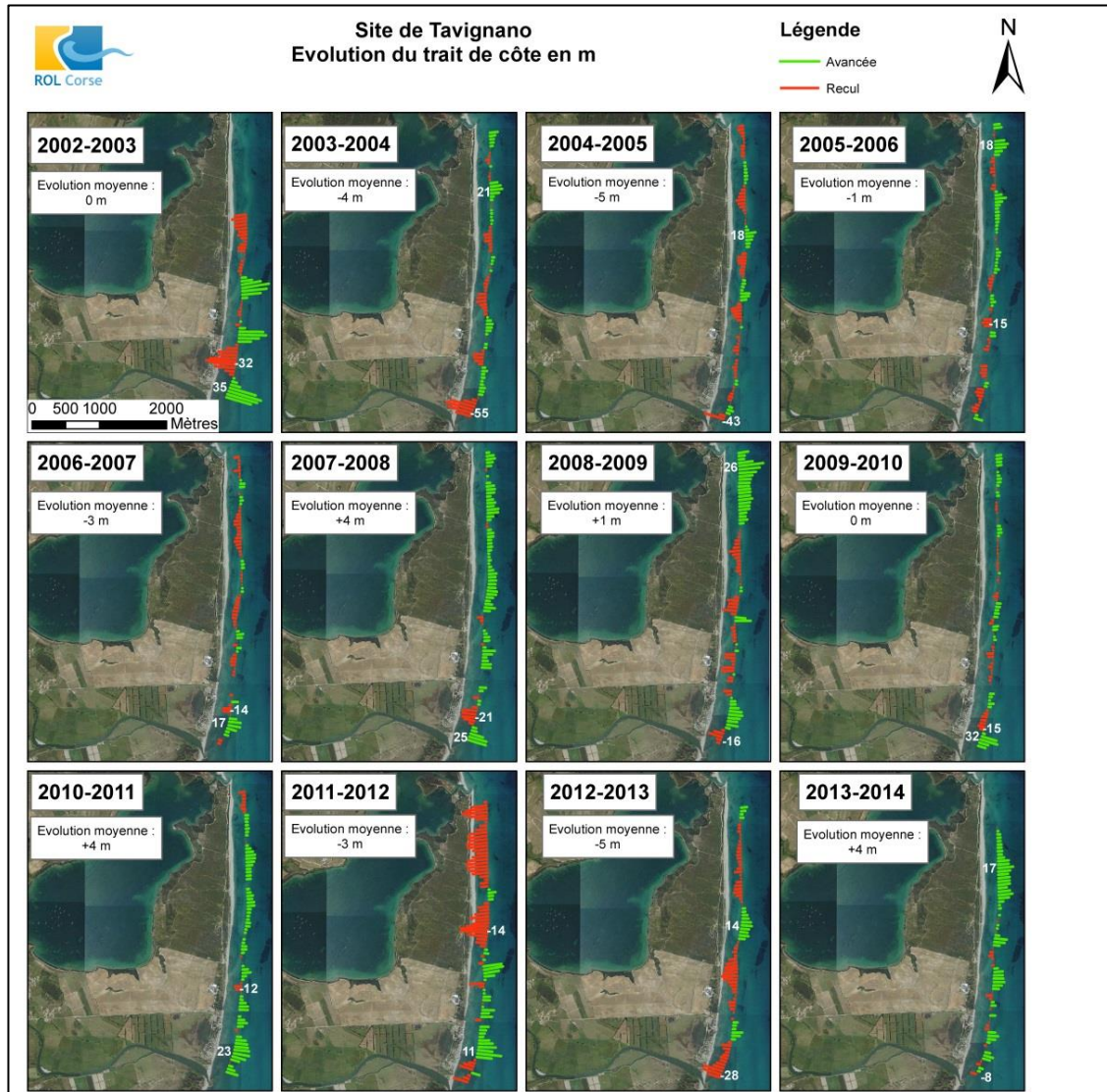


Illustration 17 – Synthèse des évolutions de la position du trait de côte entre 2002 et 2015 sur le site de Tavignano (fond BD-ORTHO IGN, 2007).

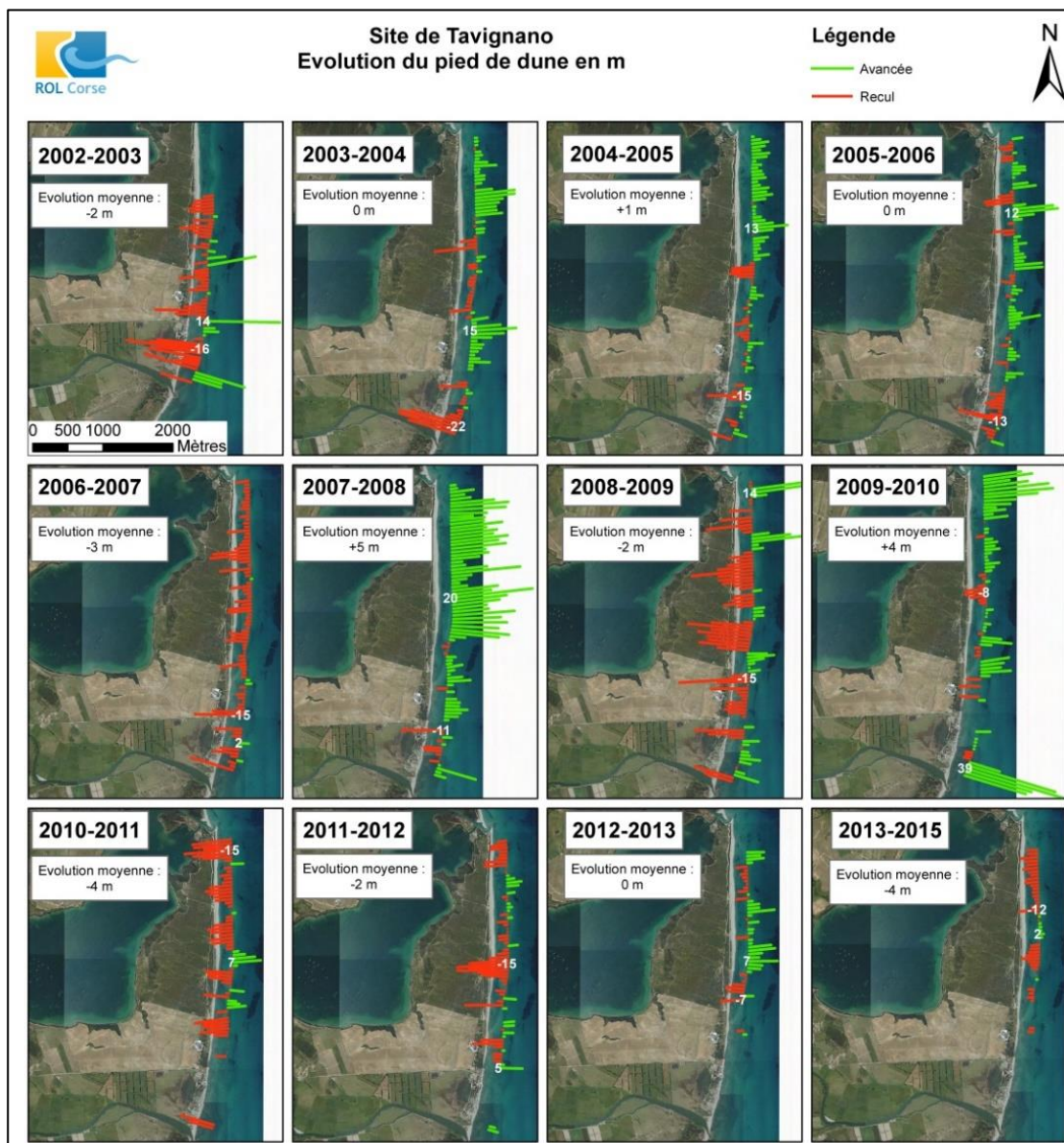


Illustration 18 – Synthèse des évolutions de la position du pied de dune entre 2002 et 2015 sur le site de Tavignano (fond BD-ORTHO IGN, 2007).

2.3.1. Impact des tempêtes 2002-2013

Les conditions hydrodynamiques sont issues de la BDHC au niveau de la bouée Plaine Orientale 3 au large de Solenzara (Illustration 2). Les caractéristiques des tempêtes sur la période 2002-2013 sont reportées sur l'illustration 19.

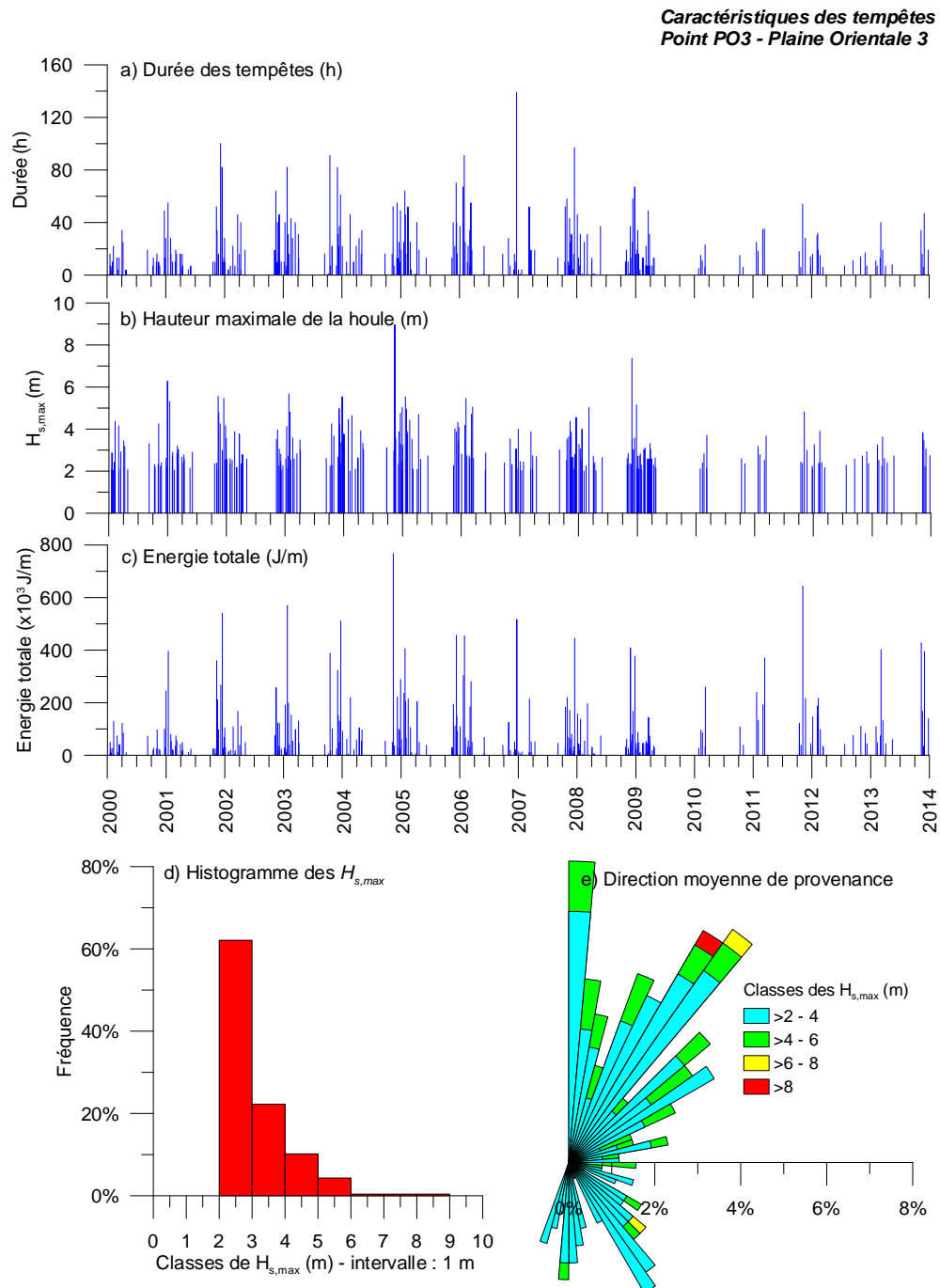


Illustration 19 - Caractéristiques des tempêtes au point PO3 Solenzara – 2002 -2013

2.3.1. Corrélation évolution morphologique/conditions hydrodynamiques

L'illustration 20 rassemble les évolutions du trait de côte et du pied de dune intégrée sur les périodes entre deux levés consécutifs. Une valeur positive de puissance indique un flux d'énergie dominant en provenance de secteur Nord pour cette période, alors qu'une valeur négative indique un flux d'énergie dominant en provenance de secteur Sud.

Période	Début	Fin	Nombre de mois	Nombre de tempêtes	Hs,max (m)	Energie totale (J/m ²)	Puissance (W/m)	Evolution du trait de côte (m)	Evolution du pied de dune (m)
2002-2003	28/10/2002	24/02/2003	4	16	5.7	7865276	1893827	0	-2
2003-2004	24/02/2003	02/06/2004	16	24	5.5	11394668	2781404	-4	0
2004-2005	02/06/2004	18/10/2005	16	22	9.0	14595061	3244538	-5	+1
2005-2006	18/10/2005	17/10/2006	12	20	5.5	11344408	2749259	-1	0
2006-2007	17/10/2006	31/10/2007	12	17	4.0	5305552	1374236	-3	-3
2007-2008	31/10/2007	01/10/2008	11	23	5.0	7519223	1903783	+4	+5
2008-2009	01/10/2008-	24/06/2009	8	36	7.4	9667410	2320772	+1	-2
2009-2010	24/06/2009	28/09/2010	15	5	3.7	2371101	502435	0	+4
2010-2011	28/09/2010	11/10/2011	13	6	3.7	5326538	1081000	+4	-4
2011-2012	11/10/2011	03/10/2012	12	14	4.8	10002356	2054729	-3	-2
2012-2013	03/10/2012	18/09/2013	11	10	3.6	5613854	1106656	-5	0

Illustration 20 - Caractéristiques des tempêtes et évolution du trait de côte sur les périodes d'analyse de l'évolution du littoral sur Tavignano.

Pour l'ensemble des périodes, la valeur de la puissance intégrée est toujours positive, ce qui traduit la quasi permanence des conditions de tempête de secteur Nord-Nord-Est

qui contrebalancent fortement la tendance modale de l'agitation en conditions de beau temps au niveau du littoral qui est à l'origine d'une dérive littorale Sud-Nord.

Sur ce secteur, les modes d'évolution en « noeuds et ventres » du trait de côte sont complexes, et sont fortement inter-dépendants de la position des barres sableuses et du trait de côte. 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.

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. Cependant, comme au niveau du port de Taverna, les périodes hivernales marquées par des tempêtes plus frontales sont à l'origine de reculs plus importants que celles où l'incidence des vagues au littoral est plus oblique. 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.

Le système sédimentaire reste dans un état de stabilité dynamique à moyen et long-terme, 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.

2.4. ETANG DE PALU

Le site de Palu est caractérisé par la présence d'un étang, séparé du domaine marin par une flèche sableuse ouverte au Sud (Illustration 21).



Illustration 21 - Flèche sableuse de l'étang de Palu ouverte au sud (ROL/BRGM, 23/10/2015).

La flèche montre très souvent des signes d'érosion en haut de plage avec la présence d'une micro-falaise (Illustration 22).



Illustration 22 – Micro-falaise présente sur la flèche sableuse au sud (ROL/BRGM, 23/10/2015).

2.4.1. Evolution du trait de côte

La comparaison des levés GPS interannuels met en évidence un comportement relativement homogène du trait de côte sur la grande majorité du linéaire littoral surveillé même s'il peut être observé des alternances de secteurs en avancée ou en recul au cours de certaines périodes. L'évolution récente montre cette possibilité d'alternance de secteurs en avancée et en recul dont la longueur semble relativement homogène et proche de 800 m (Illustration 23).

Par contre l'évolution mesurée depuis 2002 montre deux comportements distincts avec :

- un secteur Nord en avancée dont l'amplitude est relativement significative avec un maximum de près de 20 m ;
- un secteur Sud où la tendance est plutôt au recul notamment le long de la flèche sableuse, ce qui confirme les observations réalisées sur le terrain avec la présence de micro-falaises.

Les évolutions du pied de dune constatées en complément du trait de côte montrent un caractère beaucoup plus homogène des évolutions et parfois un certain déphasage par rapport à la tendance observée sur la position du trait de côte (Illustration 24) : ces évolutions observées sur le haut de plage correspondraient aux événements les plus énergétiques comme pendant la période 2008-2009 où l'ensemble du site a été caractérisé par un recul moyen du pied de dune de -4 m et qui a pu localement dépasser -10 m. Cependant, il est intéressant de noter que le site possède une bonne capacité de récupération avec notamment une avancée importante observée sur la période 2011-2012. Cette récupération nécessite du temps pour que la dune se reforme avec une recolonisation de la végétation qui permet de fixer le sable en haut de plage.

Malgré cette période particulièrement impactante de 2008-2009, tout comme pour le trait de côte, deux comportements distincts semblent se dégager avec un secteur Nord en avancée et un secteur Sud en recul.

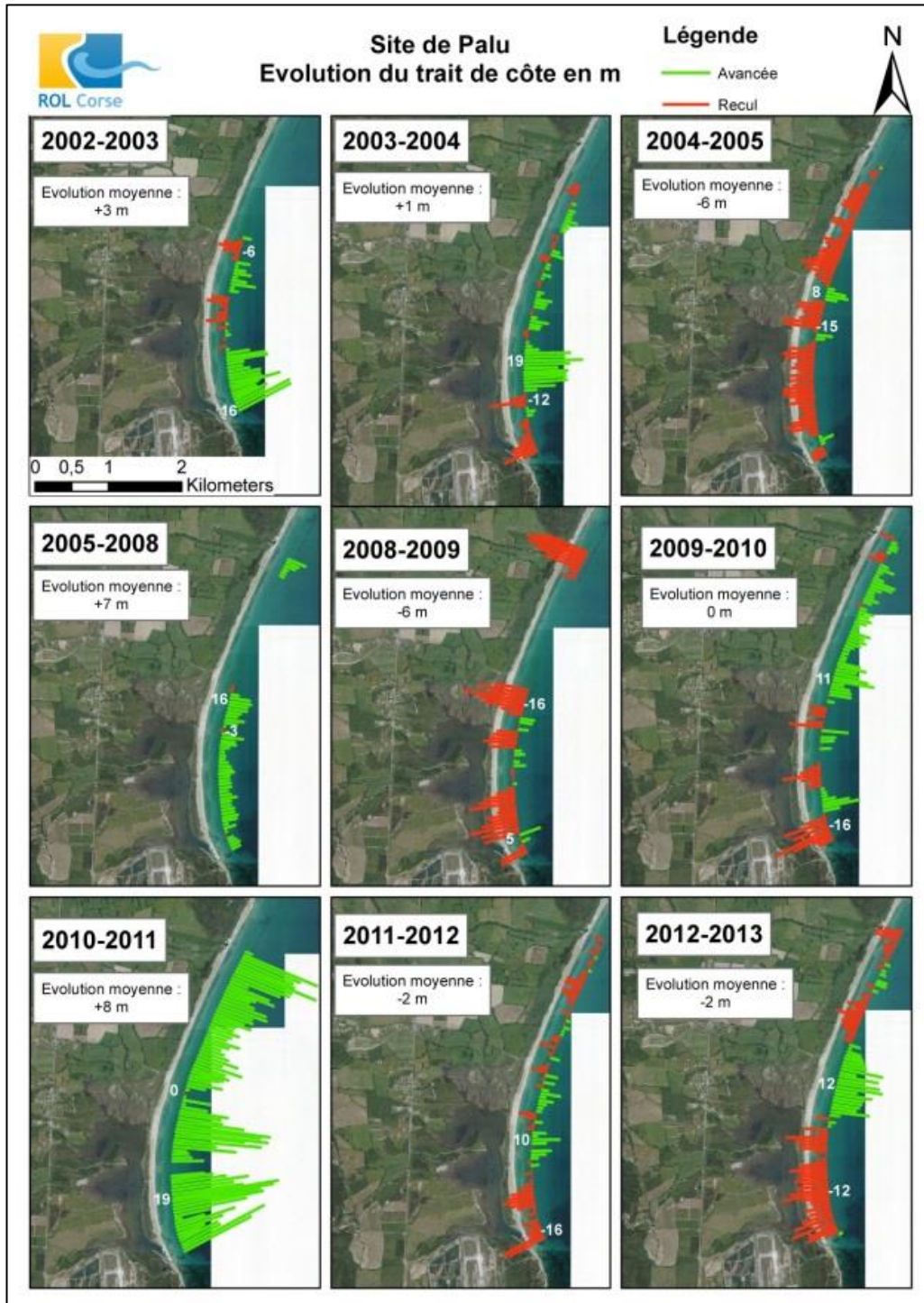


Illustration 23 - Site Etang de Palu, évolutions pluriannuelles du trait de côte 2002-2013 (© IGN BD-ORTHO 2007).

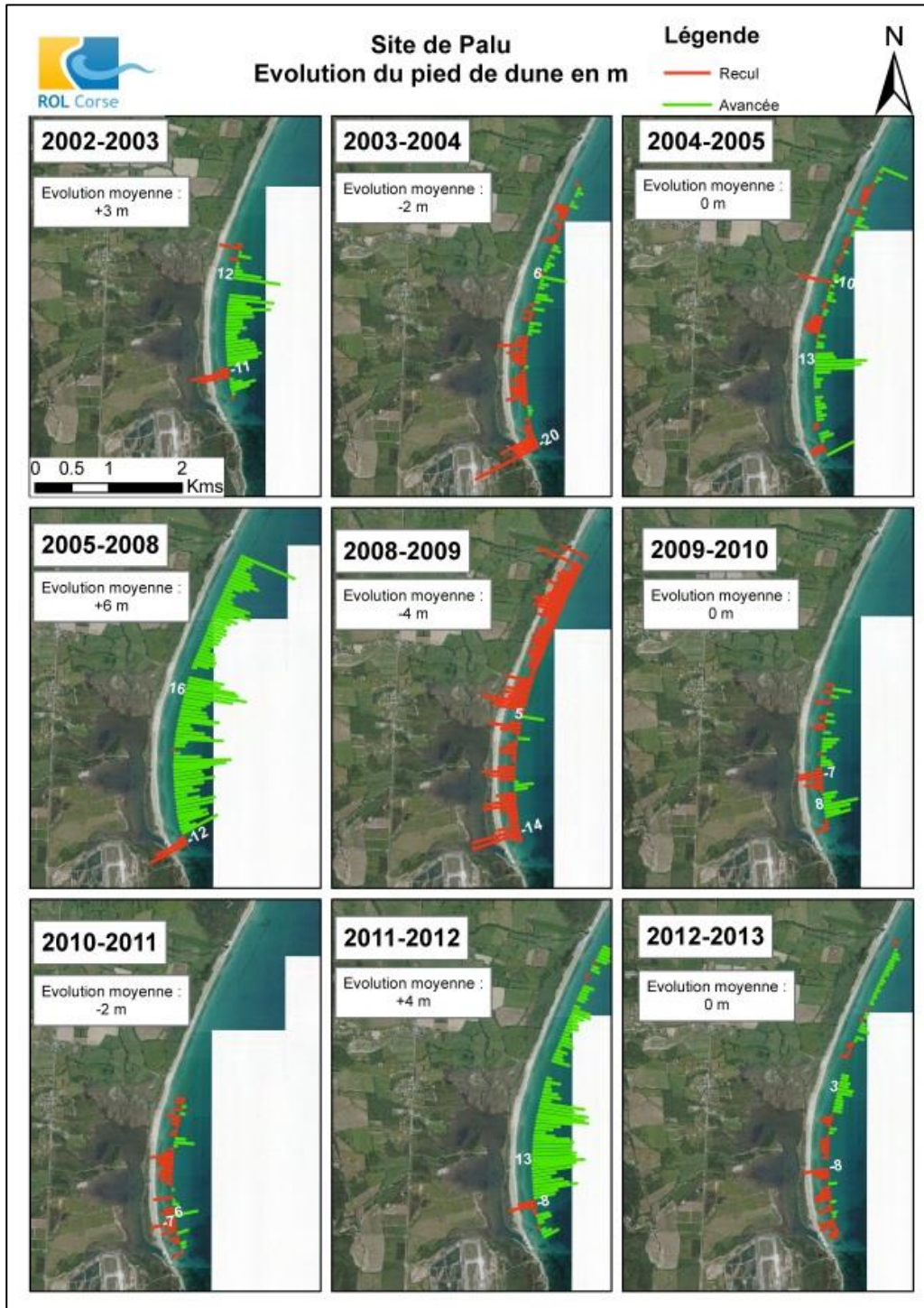


Illustration 24 - Site Etang de Palu, évolutions pluriannuelles du pied de dune 2002-2015 (© IGN BD-ORTHO 2007).

Au Sud, l'évolution observée est principalement liée à la mobilité de la flèche sableuse et aux actions entreprises pour stabiliser le grau. L'érosion de la flèche qui s'était

stabilisée en 2011 reprend en 2012 et continue jusqu'en 2015 même si du sable semble avoir été déposé artificiellement surélevant ainsi sa cote maximale.

2.4.2. Impact des tempêtes 2002-2013

Les conditions hydrodynamiques sont issues de la BDHC au niveau de la la bouée Plaine Orientale 3 au large de Solenzara (Illustration 2). Les caractéristiques des tempêtes sur la période 2002-2013 sont reportées sur l'illustration 19.

2.4.1. Corrélation évolution morphologique/conditions hydrodynamiques

L'illustration 20 rassemble les évolutions du trait de côte et du pied de dune intégrée sur les périodes entre deux levés consécutifs. Une valeur positive de puissance indique un flux d'énergie dominant en provenance de secteur Nord pour cette période, alors qu'une valeur négative indique un flux d'énergie dominant en provenance de secteur Sud.

Période	Début	Fin	Nombre de mois	Nombre de tempêtes	Hs,max (m)	Energie totale (J/m ²)	Puissance (W/m)	Evolution du trait de côte (m)	Evolution du pied de dune (m)
2002-2003	20/02/2002	06/03/2003	11	26	8.9	2600786	-1056911	+3	+3
2003-2004	06/03/2003	02/06/2004	15	22	8.7	2659211	657816	+1	-2
2004-2005	02/06/2004	16/11/2005	17	25	9.0	3390364	-4603808	-6	0
2005-2008	16/11/2005	09/10/2008	35	57	7.4	6061671	-5235663	+7	+6
2008-2009	09/10/2008	24/09/2009	11	36	4.8	2371236	808993	-6	-4
2009-2010	24/09/2009	29/09/2010	12	5	3.7	502435	-280141	0	0
2010-2011	29/09/2010	26/05/2011	13	6	3.7	1081000	1028539	+8	-2
2011-2012	26/05/2011	27/09/2012	16	14	4.8	2054729	650427	-2	+4
2012-2013	27/09/2012	20/09/2013	12	10	3.6	1106656	2082578	-2	0

Illustration 25 - Caractéristiques des tempêtes et évolution du trait de côte sur les périodes d'analyse de l'évolution du littoral sur Palu

Sur ce site, les accrétions majeures du trait de côte observées depuis 2002 se sont produites lors de périodes avec des agitations dominées tant par des flux de secteur Nord (2010-2011) que de secteur Sud (2002-2003, 2005-2008), bien que l'importance des évènements de tempête lors de cette dernière période est difficile de mettre en évidence en raison de sa longueur (3 ans).

En revanche, les deux périodes marquées par une érosion majeure quasi-uniforme sur le trait de côte à l'échelle de la plage sont :

- 2004-2005, avec un flux dominant de secteur Sud et une succession de tempêtes (25 en 17 mois), avec ponctuellement des très fortes valeurs de hauteurs significatives des vagues (9 m) ;
- 2008-2009 est caractérisée par un flux dominant de secteur nord, avec 36 tempêtes en 11 mois et des hauteurs de vagues moindres ($H_{s,max} = 4.7$).

Il n'existe à priori pas de relation directe entre les conditions hydrodynamiques et l'évolution morphologique qui puisse être mise en évidence à partir des données de la BDHC, intégrées sur les périodes entre les levés. De manière qualitative, on retrouve cependant certaines caractéristiques des périodes hivernales avec des effets érosifs plus importants lorsque les tempêtes sont frontales. Sur ce site, comme sur ceux de la Plaine orientale, les morphologies tridimensionnelles des fonds proches (barres sous-marine, rip-current) conditionnent la répartition des énergies des vagues sur le littoral, leur transformation à la côte. La recherche de corrélations à partir de données au large, telles que celle de la BDHC, s'en trouve d'autant plus compliquée.

3. Sites de la côte rocheuse

3.1. CALVI

Le site de Calvi est une grande baie qui peut être découpée en deux secteurs, un à l'Est qui reste naturel et un à l'Ouest qui est aménagé avec la présence d'enjeux le long du littoral dont une voie de chemin de fer située en haut du cordon dunaire sur la moitié ouest de la plage. Des aménagements, trois épis et trois brise-lames, ont été construits en 2001 sur la plage dans le but de réduire le phénomène d'érosion.

Un suivi de la position du trait de côte par DGPS a été engagé depuis 2009 sur ce site au vu des évolutions préoccupantes. Elles montrent la vulnérabilité des enjeux et du cordon dunaire face aux phénomènes d'érosion côtière et de submersion marine.

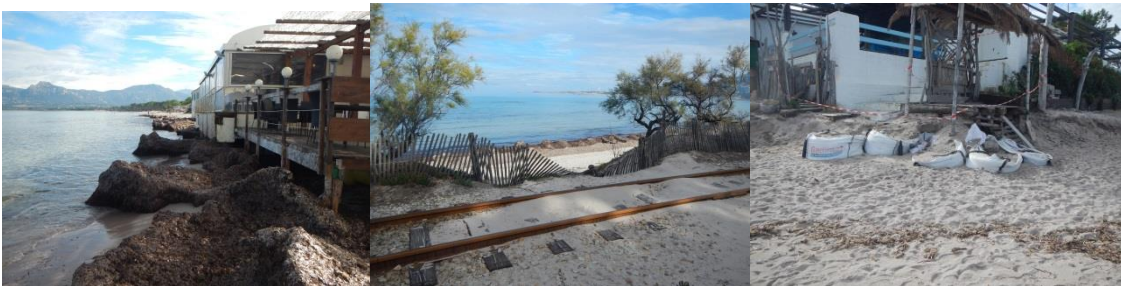


Illustration 26 – Exemples d'enjeux vulnérables à l'érosion côtière sur la plage de Calvi (ROL/BRGM,27/10/2015).

3.1.1. Evolution du trait de côte

L'évolution de la position du trait de côte (berme) est représentée sur l'illustration 27.

Si deux périodes montrent une avancée quasi généralisée du trait de côte, celle entre 2005 et 2009 ainsi que celle entre 2010 et 2011, les autres périodes sont plus propices à un recul généralisé. Parmi ces périodes, deux ont été particulièrement impactantes, celle entre 2009 et 2010 avec un recul moyen de -3 m ainsi que celle entre 2012 et 2013 avec un recul moyen de -4 m.

Si les ouvrages présents sur la plage de Calvi semblent avoir eu un effet positif sur la position du trait de côte jusqu'en 2009, cela ne semble plus être le cas à partir de 2010. En effet, le secteur situé en face des brises-lames notamment semble être particulièrement impacté avec une érosion importante du haut de plage, ce qui a nécessité la mise en œuvre de travaux d'urgence pour éviter l'effondrement de la voie de chemin de fer située sur le haut de la dune.

La période 2013-2015 est bien représentative de ces évolutions avec un recul localisé entre chaque brise-lame et un recul généralisé à l'est.

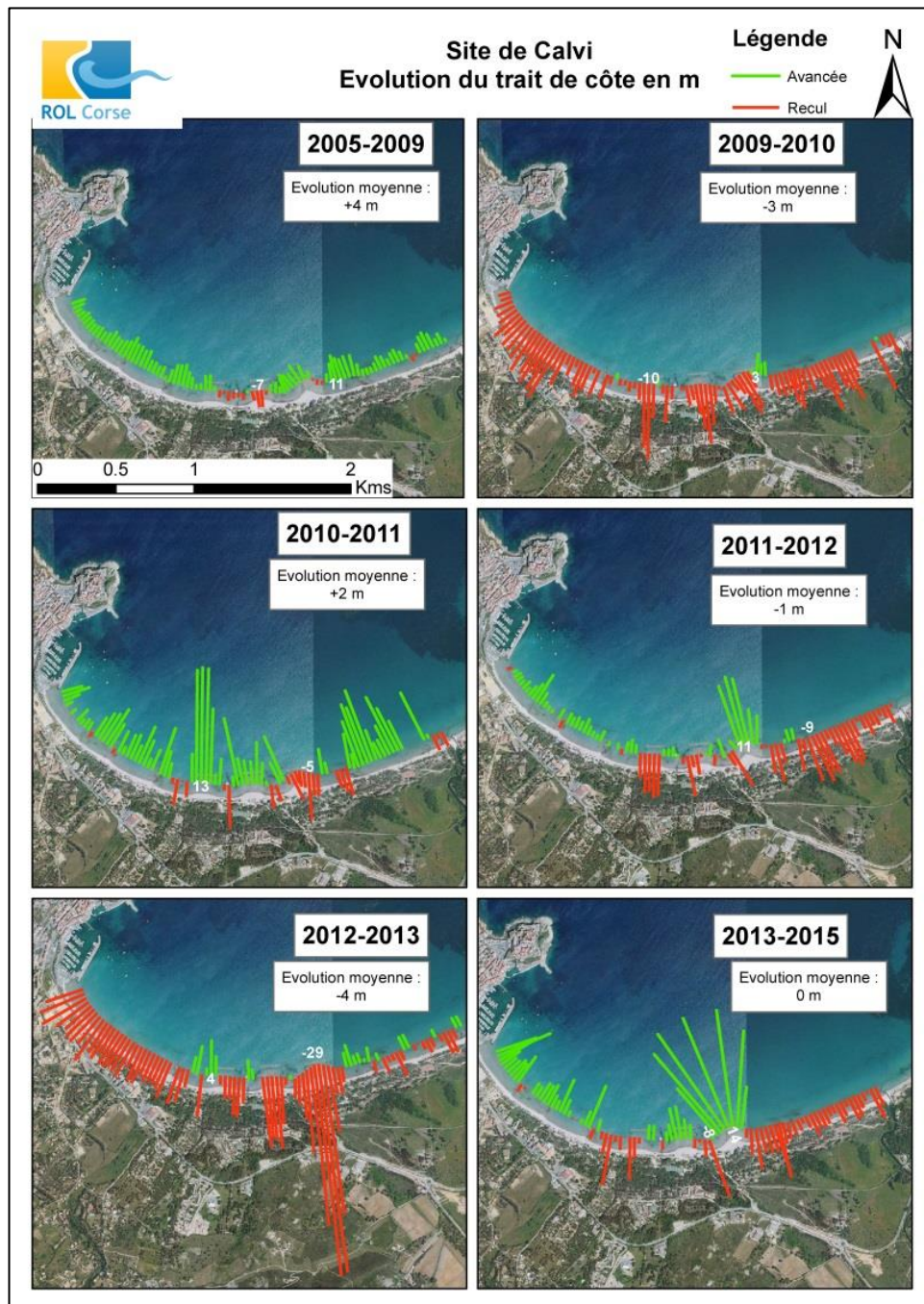


Illustration 27 - Site Calvi, évolution pluriannuelle du trait de côte entre 2005 et 2015 (© IGN BD-ORTHO 2007).

La position du pied de dune n'est plus relevée depuis 2011 sur la partie ouest de la baie en raison du caractère non naturel du haut de plage. Sur la partie Est, il est tout de même important de constater que le pied de dune, tout comme le trait de côte, reculent de manière significative montrant une érosion importante du secteur (Illustration 28).

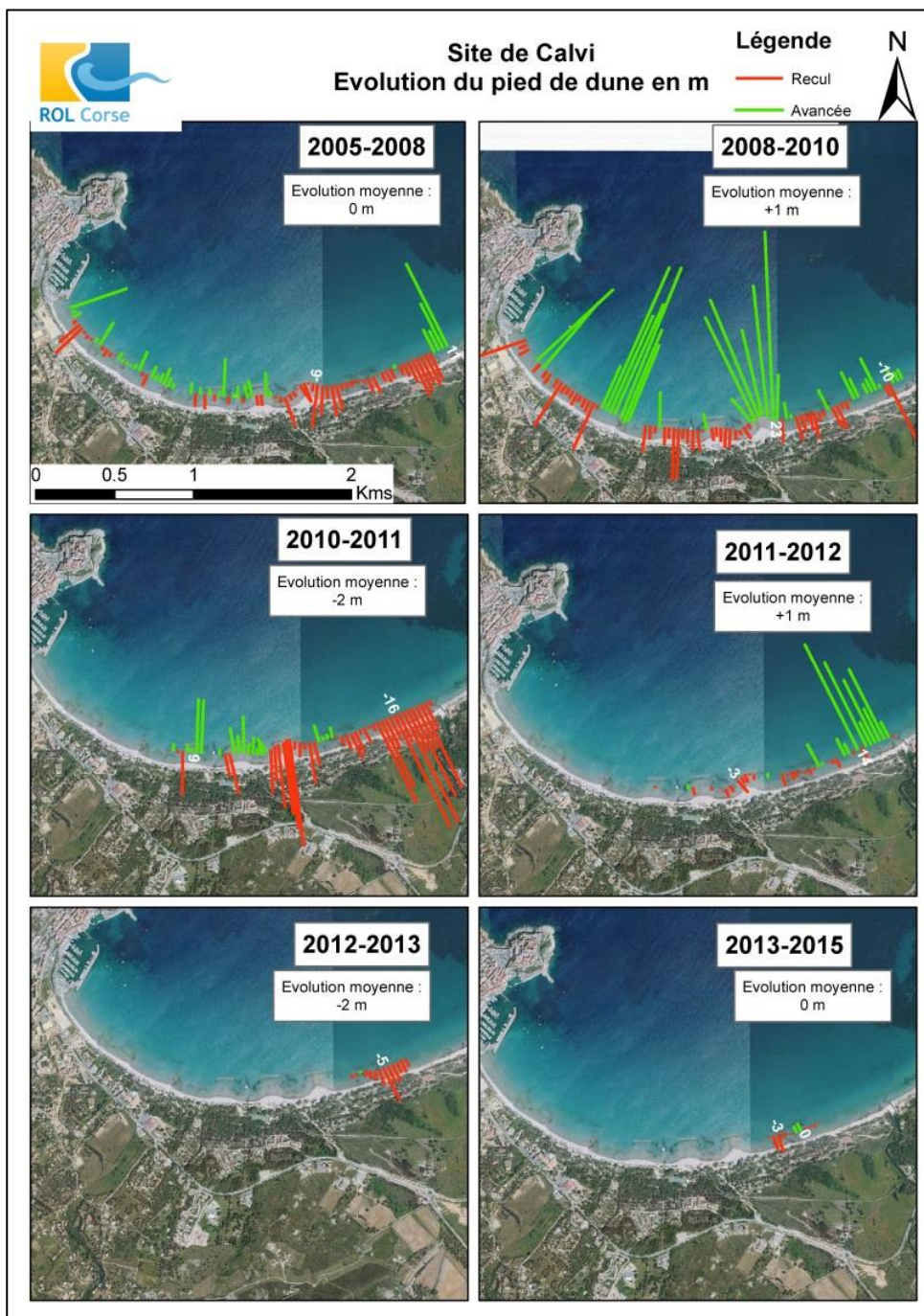


Illustration 28 - Site Calvi, évolution pluriannuelle du pied de dune entre 2005 et 2015 (© IGN BD-ORTHO 2007).

3.1.1. Impact des tempêtes 2002-2013

Les conditions hydrodynamiques sont issues de la BDHC au niveau de la bouée Calvi située au large de la pointe de la Revelatta (Illustration 2). Les caractéristiques des tempêtes sur la période 2000-2013 sont reportées sur l'illustration 29.

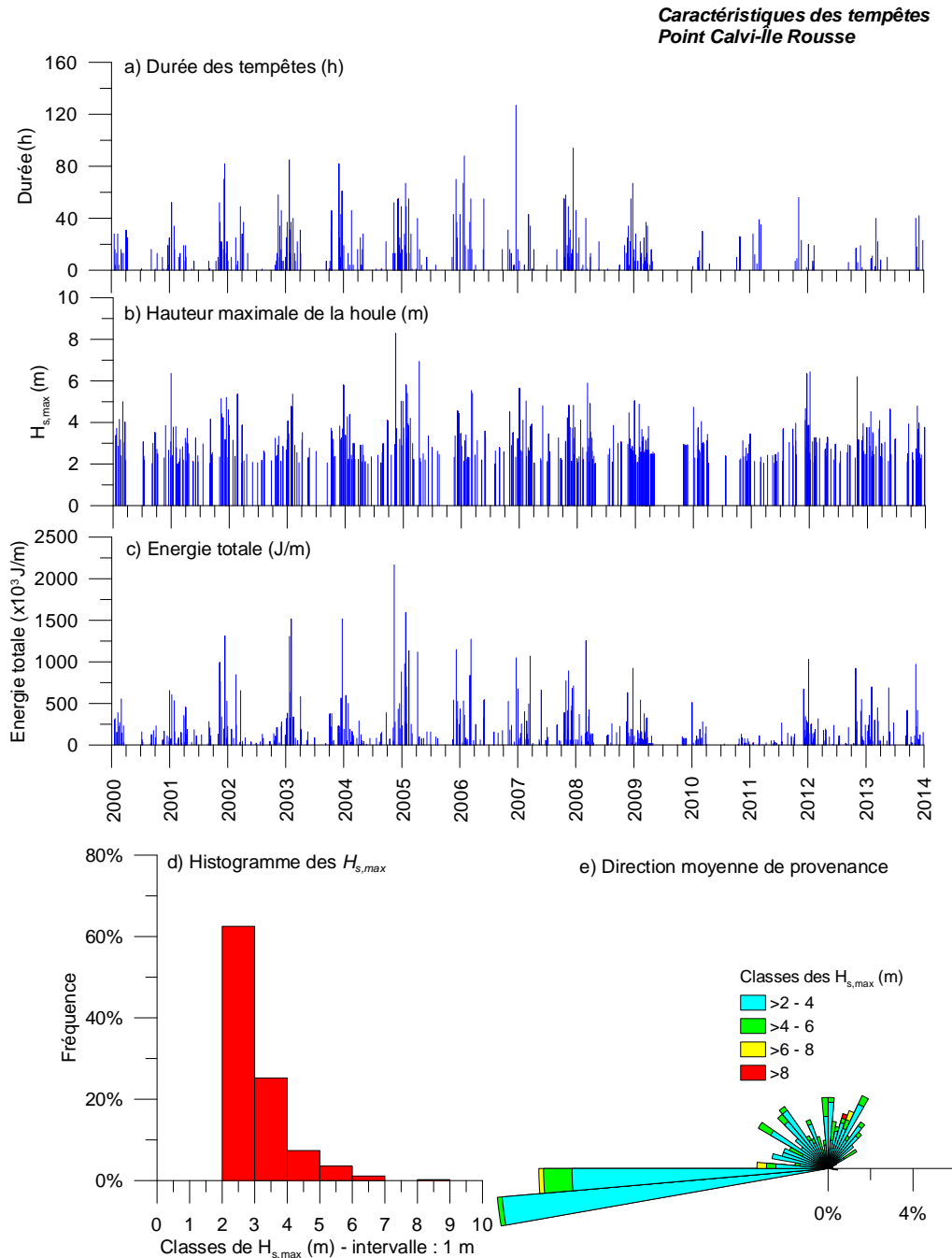


Illustration 29 - Caractéristiques des tempêtes au point Revelatta – 2000 -2013

3.1.1. Corrélation évolution morphologique/conditions hydrodynamiques

L'illustration 30 rassemble les évolutions du trait de côte et du pied de dune intégrée sur les périodes entre deux levés consécutifs. Une valeur positive de puissance indique un flux d'énergie dominant en provenance de secteur Est pour cette période, alors qu'une valeur négative indique un flux d'énergie dominant en provenance de secteur Ouest.

Période	Début	Fin	Nombre de mois	Nombre de tempêtes	Hs,max (m)	Energie totale (J/m ²)	Puissance (W/m)	Evolution du trait de côte (m)	Evolution du pied de dune (m)
2005-2008	30/11/2005	17/06/2009	43	137	5.9	31589229*	8688840	+4	0
2009-2010	17/06/2009	22/06/2010	24	21	4.7	2487832	1037856	-3	+1
2010-2011	22/06/2010	17/05/2011	11	22	3.5	856328	187815	+2	-2
2011-2012	17/05/2011	25/09/2012	16	48	6.4	7382417	2670093	-1	+1
2012-2013	25/09/2012	01/10/2013	12	36	6.2	8035950	3146569	-4	-2

*Illustration 30 - Caractéristiques des tempêtes et évolution du trait de côte sur les périodes d'analyse de l'évolution du littoral sur Calvi. * La période entre deux levés et ici de 3 ans et donc pas directement comparable avec les autres périodes.*

Depuis 2001, on note un comportement opposé entre les deux extrémités de la baie :

- La partie ouest est plutôt stable, avec une faible évolution résiduelle du trait de côte au niveau du profil mais cette stabilité est pour partie artificielle, car liée à la présence d'aménagements « durs » (épis, brise-lames) et elle dépend aussi de la faible mobilité des barres d'avant-côte qui présentent un stock sédimentaire très limité ;
- Sur le profil Est, le recul est plus chronique, et tend à s'aggraver depuis 2011.

La période 2002-2006 était caractérisée par une dynamique liée aux barres sous-marines :

- dans les secteurs où l'évolution naturelle rendait possible la mobilité des barres, la plage était très stable depuis 2002 (secteur Est) ;
- à l'ouest en revanche, la dynamique naturelle était limitée par les aménagements, et un recul faible mais continu était observé.

Les levés depuis 2009 montrent une situation inverse avec un secteur Est en érosion importante, en particulier au niveau du front dunaire sur le profil est, et une situation du profil Ouest qui devient de plus en plus favorable par rapport à 2006.

Dans le secteur est, les barres d'avant-côte sont fragilisées depuis 2006, et ne protègent plus le trait de côte de l'érosion qui est ici significative depuis plusieurs années.

Les évolutions du trait de côte et du pied de dune sont relativement faibles et toutes les périodes sont caractérisées par des valeurs de puissance positive avec des évolutions morphologiques contrastées. Malgré la variété des réponses morphologiques et des comportements du littoral décrits précédemment, il n'apparaît pas de corrélation évidente entre les données d'observations et l'analyse des données de la BDHC.

3.2. PORTIGLIOLO

Le site de Portigliolo est intégré au réseau d'observation depuis 2002. La plage est séparée en deux secteurs par la zone de débouché du Rizzanese, en avant de l'aérodrome de Propriano-Tavaria (Illustration 31).



Illustration 31 – Embouchure du Rizzanese, vue vers le sud à gauche et vue vers le nord à droite (ROL/BRGM, 08/10/2015).

La morphologie de la plage est caractérisée par une berme de bas de plage en général bien marquée avec parfois des croissants de plage, à l'image de la morphologie sous-marine. L'environnement dunaire du haut de plage est relativement détérioré surtout sur la moitié nord de la plage certainement en raison du piétinement (piétons, véhicules..., **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). La plage sous-marine de Portigliolo est caractérisée par des systèmes de barres sous-marines de grande ampleur qui présentent une morphologie en croissants (Illustration 32). Elles se développent ici dans un environnement très énergétique en termes de conditions de houles.

Cette situation, très exposée aux fortes houles incidentes, se traduit également par une granulométrie plus grossière (sables et graviers) et des profils de plage présentant une forte pente.

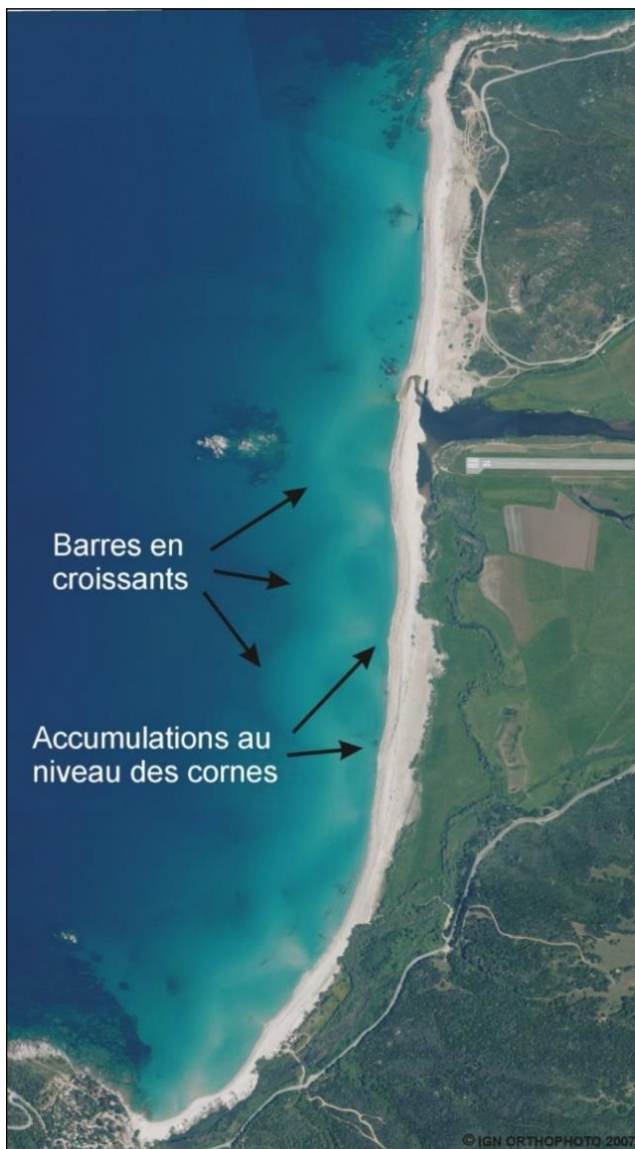


Illustration 32 - Barres en croissant sur le site de Portigliolo (© IGN BD-ORTHO 2007).

3.2.1. Evolution du trait de côte

La comparaison des levés de la position du trait de côte entre 2002 et 2015 met en évidence la variabilité spatiale et temporelle de l'évolution de la position du trait de côte caractéristiques des plages présentant des systèmes de barres sous-marines (Illustration 33).

Les évolutions interannuelles montrent une bonne stabilité dynamique du système malgré des périodes marquées par un recul significatif du trait de côte comme celles entre 2008 et 2009 ou plus récemment entre 2013 et 2015.

Seule la période 2002-2003 a été marquée par une avancée significative du trait de côte. Cette avancée n'est corrélée à aucune information de crue du Rizzanese sur cette période.

Tout comme l'évolution du trait de côte seule la période entre 2002 et 2003 a été favorable à une avancée du pied de dune (Illustration 34). La plupart des évolutions interannuelles mettent en évidence la variabilité spatiale et temporelle de l'évolution du pied de dune. La période la plus récente entre 2013 et 2015 a été caractérisé par un recul significatif généralisé du pied de dune sur la moitié située au sud de l'embouchure du Rizzanese. L'extrémité sud a reculé de près de 30 m au cours de cette période..

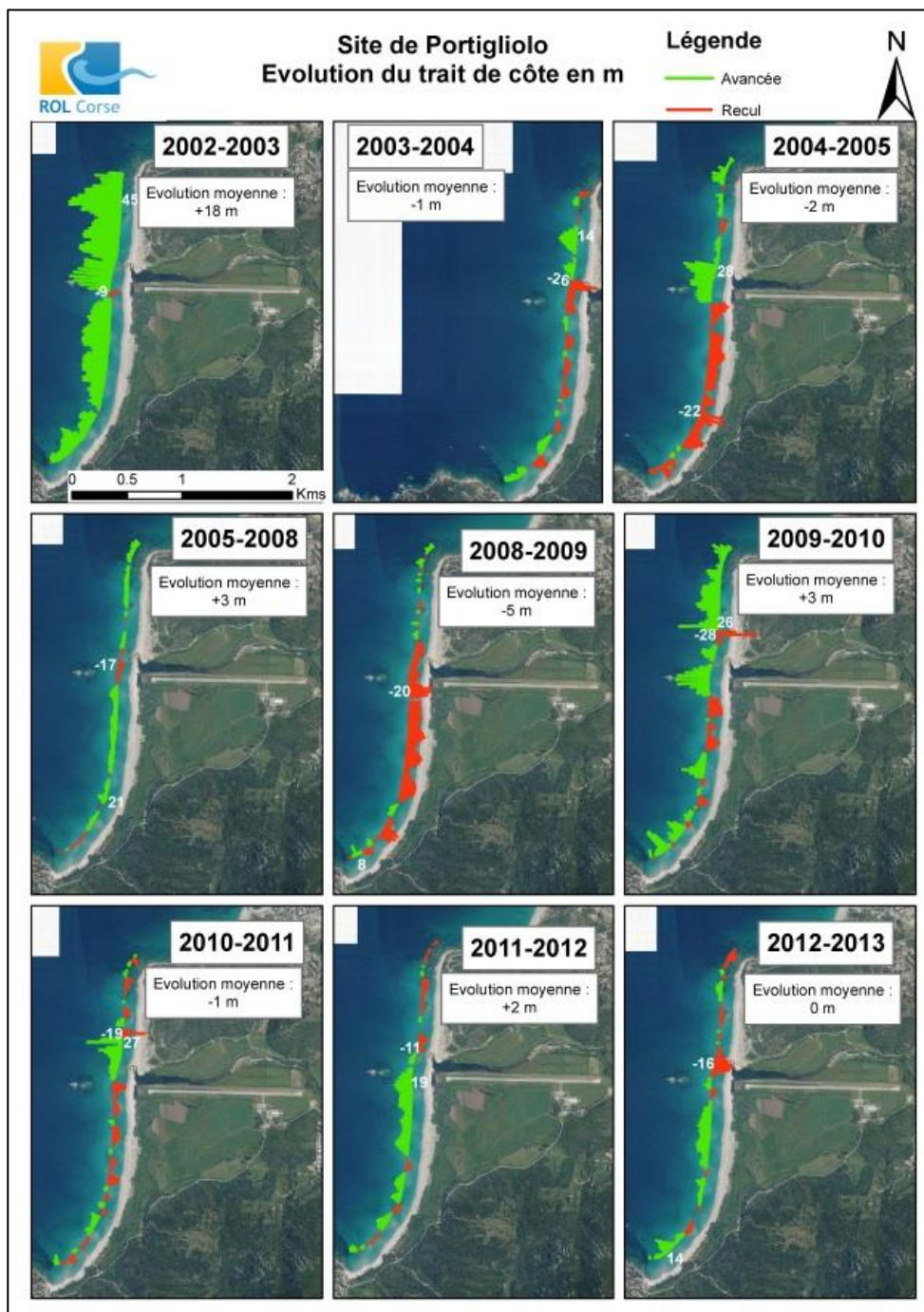


Illustration 33 - Site de Portigliolo, évolution pluriannuelle du trait de côte entre 2002 et 2015 (© IGN BD-ORTHO 2007).

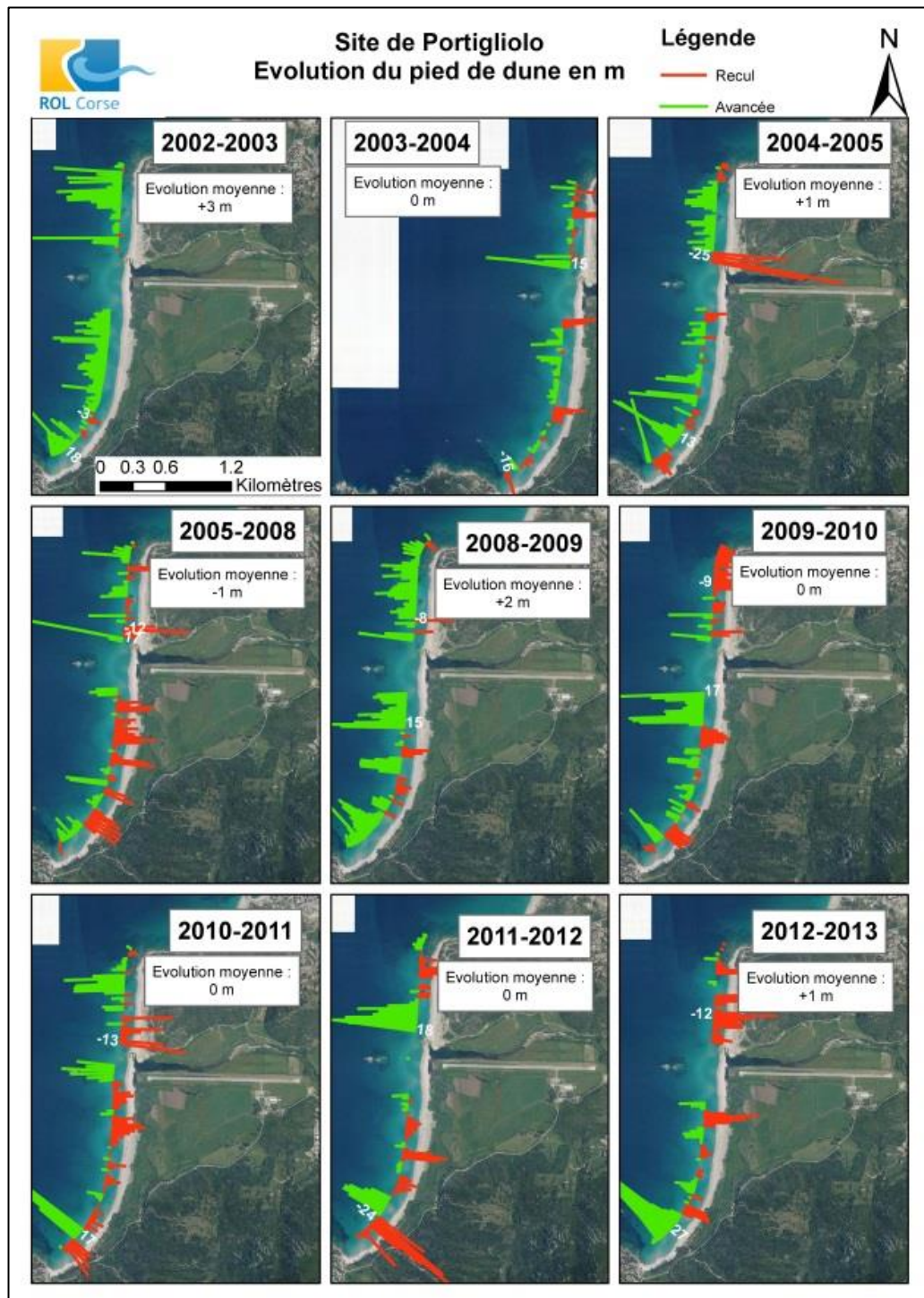


Illustration 34 - Site de Portigliolo, évolution pluriannuelle du pied de dune entre 2002 et 2015 (© IGN BD-ORTHO 2007).

3.2.1. Impact des tempêtes 2002-2013

Les conditions hydrodynamiques sont issues de la BDHC au niveau de la bouée Valinco au large du Golfe du Valinco (Illustration 2). Les caractéristiques des tempêtes sur la période 2002-2013 sont reportées sur l'illustration 35.

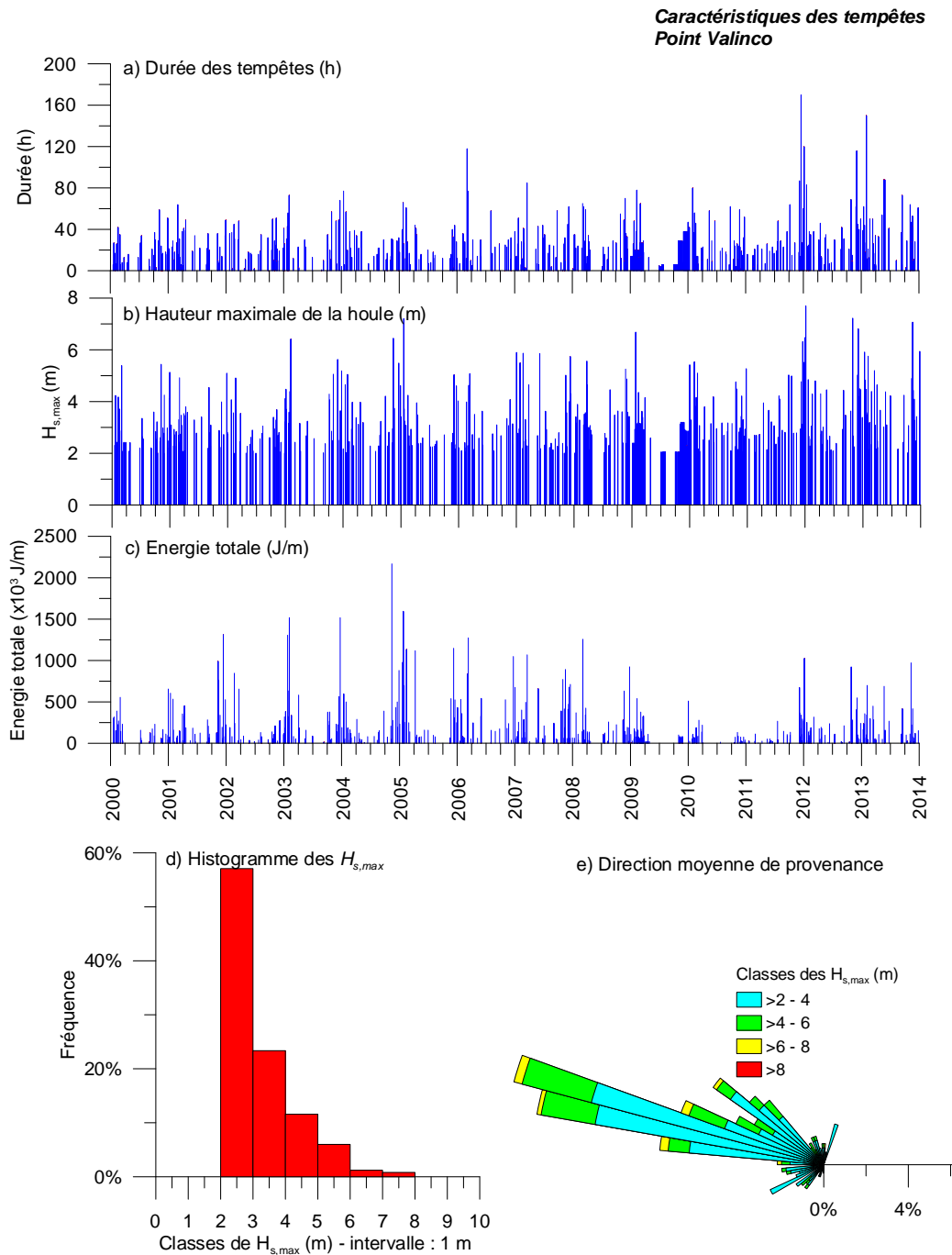


Illustration 35 - Caractéristiques des tempêtes au point Valinco – 2000 -2013

3.2.1. Corrélation évolution morphologique/conditions hydrodynamiques

L'illustration 36 rassemble les évolutions du trait de côte et du pied de dune intégrées sur les périodes entre deux levés consécutifs. Une valeur positive de puissance indique un flux d'énergie dominant en provenance de secteur Nord pour cette période, alors qu'une valeur négative indique un flux d'énergie dominant en provenance de secteur Sud.

Période	Début	Fin	Nombre de mois	Nombre de tempêtes	Hs,max (m)	Energie totale (J/m ²)	Puissance (W/m)	Evolution du trait de côte (m)	Evolution du pied de dune (m)
2002-2003	07/03/2002	04/06/2003	12	40	6.4	9720596	9335421	+18	+3
2003-2004	04/06/2003	01/06/2004	12	24	5.6	8561580	3937194	-1	0
2004-2005	01/06/2004	09/06/2005	12	30	7.2	9387697	17577190	-2	+1
2005-2008	09/06/2005	14/10/2008	40	104	5.9	27469860	18308478	+3	-1
2008-2009	14/10/2008	23/09/2009	13	48	6.7	10771551	-1026382	-5	+2
2009-2010	23/09/2009	28/06/2010	9	42	5.5	9156071	-2935757	+3	0
2010-2011	28/06/2010	23/05/2011	11	31	5.3	6314002	-1443569	-1	0
2011-2012	23/05/2011	21/09/2012	14	45	7.7	19155130	2440093	+2	0
2012-2013	21/09/2012	25/09/2013	12	36	7.2	17482227	-1367232	0	+1

Illustration 36 - Caractéristiques des tempêtes et évolution du trait de côte sur les périodes d'analyse de l'évolution du littoral sur Portigliolo.

Le site de Portigliolo est particulièrement exposé aux houles de secteur Ouest, et présente une importante dynamique sédimentaire.

Depuis le début des levés en 2002, les évolutions sont variables, avec l'alternance de phases d'érosion et d'accrétion et un comportement différencié au Nord et au Sud. Les houles de tempêtes mettent en mouvement des volumes sédimentaires très importants, et des changements morphologiques sont parfois observés à plus de 5 m au-dessus du niveau de la mer.

Lors des tempêtes, la propagation des fortes vagues est contrôlée par la géométrie des barres-sous-marines en croissant qui modulent et répartissent de fait les impacts des vagues sur la haute plage. De plus, la granulométrie grossière du sédiment local tend à augmenter, tant en érosion qu'en accrétion, l'amplitude des mouvements du trait de côte. Sur ce type de plages, on constate généralement de fortes et rapides érosions qui sont compensées par des retours massifs et rapides du sable au niveau du trait de côte.

Sur cette plage dont la morphologie est fortement conditionnée par les barres sous-marine et la dynamique d'embouchure du Rizanese, l'analyse entre l'évolution morphologique et les données issues de la BDHC ne montre pas de corrélation marquée.

La forte accrétion de 2002-2003 s'est produit après une année marquée par 40 évènements de tempêtes sur 12 mois. La période 2008-2009 comparabale en termes de conditions hydrodynamiques, avec cependant un flux de secteur Sud, est elle génératrice d'une érosion globale de la plage

4. Conclusions

Depuis 1999, le Réseau d'Observation du Littoral de la Corse (ROL) a été mis en place pour fournir les données nécessaires à la compréhension des phénomènes et processus, à la quantification des évolutions côtières et à l'identification des remèdes possibles. Ce réseau comprend des sites « régionaux », témoins représentatifs des évolutions régionales naturelles et des sites « sensibles » qui sont soumis à évolutions critiques ponctuelles, et/ou sensibles économiquement et/ou sensibles à des impacts d'aménagements.

Jusqu'à présent, les interprétations des évolutions mesurées sur le terrain se basaient sur une connaissance incomplète des conditions hydrodynamiques qui ont impacté le littoral insulaire, en raison de l'absence de houlographe directionnel le long des côtes de Corse. Le présent rapport est consacré à la recherche d'une corrélation entre les évolutions morphologiques interannuelles constatées dans les levés morphologiques du ROL depuis 2002 et les variations des conditions hydrodynamiques déterminées par la Base de Données des Houles Corse, développée par le BRGM dans le cadre du ROL (Belon, 2014). Une analyse du rôle des tempêtes sur les évolutions du trait de côte sur chacun des secteurs suivants a été ainsi réalisée :

- Campoloro Nord ;
- Campoloro Sud ;
- Tavignano ;
- Palu ;
- Calvi ;
- Portigliolo.

Sur la période 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.

Les analyses de la BDHC ont cependant permis de vérifier de manière très globale et qualitativement que sur chaque site, la prédominance d'une direction de provenance des vagues en tempête à une échelle de temps saisonnière, appréhendée par le paramètre « puissance », permet d'expliquer pour partie les tendances, à l'accrétion ou l'érosion, observées entre deux levés consécutifs. De même, en particulier pour les sites de la plaine orientale, les observations montrent que des situations hivernales présentant des tempêtes avec des incidences des vagues plus frontales semblent être fréquemment corrélées à une tendance générale de recul du trait de côte, affectant le plus souvent l'ensemble du site. Cela souligne une fois de plus l'importance du contexte

bathymétrique sur les évolutions de la plage émergée, source d'apports sableux au domaine dunaire et en particulier pour les sites de la plaine orientale, où le rôle des barres sous-marines en tant que morphologie protectrice du littoral s'illustre en tant que dissipateur des vagues fortes, et répartiteur de l'énergie de celles-ci le long du linéaire côtier.

Si ces résultats apportent des premiers éléments d'explication des comportements des sites étudiés, l'utilisation de paramètres hydrodynamiques intégrés sur une période de temps reste très limitée car on ne peut appréhender l'alternance de tempêtes de directions opposées et dont les effets se sont peut-être finalement contrebalancés au cours de la période d'intérêt. Une piste à envisager est l'utilisation de suivi à haute fréquence, notamment par vidéo, qui permettront d'analyser les tempêtes séparément, et d'être mieux à même d'anticiper les impacts d'un événement à venir.

L'utilisation des données de la BDHC permet également de qualifier les conditions des vagues au large, mais les points d'extraction sont probablement trop éloignés du littoral pour contraindre correctement les évolutions morphologiques constatées en raison de la complexité des interactions/retroactions permanentes des systèmes morphodynamiques côtiers mesurés dans le programme du ROL. En revanche, leur utilisation dans le cadre d'études à large échelle pour l'estimation de la vulnérabilité du littoral insulaire à la submersion marine en période de tempêtes reste pertinente au regard de l'absence de données de houle issues de mesures et de la rareté de banque de données issues d'autres re-analyses type ANEMOC/ANEMOC2.

5. Bibliographie

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.

Belon 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.

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

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

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.

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.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 6009

45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale de Corse

Immeuble Agostini
ZI de Furiani

20600 – Bastia - France
Tél. : 04 95 58 04 33