

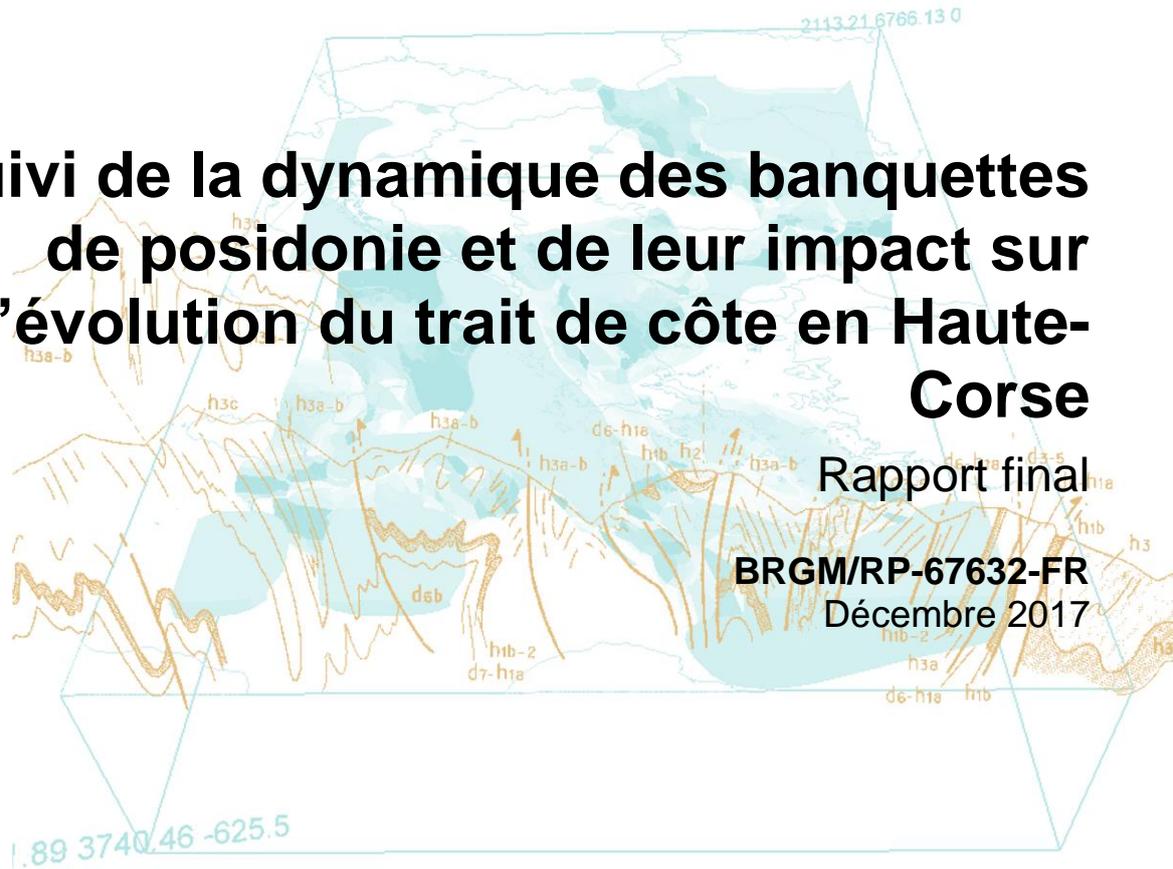


# Suivi de la dynamique des banquettes de posidonie et de leur impact sur l'évolution du trait de côte en Haute-Corse

Rapport final

BRGM/RP-67632-FR

Décembre 2017



Liberté • Égalité • Fraternité  
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

PREFET DE LA HAUTE-CORSE



# Suivi de la dynamique des banquettes de posidonie et de leur impact sur l'évolution du trait de côte en Haute- Corse

Rapport final

**BRGM/RP-67632-FR**

Décembre 2017

Étude réalisée dans le cadre des missions d'appuis aux politiques publiques du  
BRGM (2017)

**R. Belon**

Avec la collaboration de

**T. Laigre et T. Chevet**

**Vérificateur :**

Nom : Balouin, Y.

Fonction : Expert Littoral

Date : 29/01/2018

Signature :



**Approbateur :**

Nom : N. Frissant

Fonction : Directeur Régional

Date : 7/02/2018



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](mailto:qualite@brgm.fr)



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Mots-clés** : littoral, dynamique sédimentaire, hydrodynamique, banquettes de posidonies, time-lapse, suivi vidéo, trait de côte, érosion littorale, plage de poche, Haute-Corse.

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

**Belon R.** (2017) – Suivi de la dynamique des banquettes de posidonie et de leur impact sur l'évolution du trait de côte en Haute-Corse. Rapport final. BRGM/RP- 67632 -FR, 53 p., 33 ill.

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

## Synthèse

Dans le cadre d'un partenariat entre la Direction Départementale des Territoires et de la Mer de Haute-Corse (DDTM-2B) et le BRGM, une première étude a permis de caractériser la géologie et la géomorphologie de quarante-quatre plages de poche du littoral de Haute-Corse, les forçages météorologiques ainsi que les enjeux présents (Belon et al., 2013). Une deuxième étude (Belon et al., 2016) a eu pour objectif d'établir un atlas hydrodynamique, de caractériser les phénomènes de submersion marine potentielle ainsi que de préconiser un panel de modes de gestion intégrée des différentes plages en fonction de l'ensemble des informations recueillies (contexte géomorphologique, évolution du trait de côte, phénomène de submersion marine, présence d'enjeux...). Cela a permis d'élaborer un modèle conceptuel d'évolution de ces plages de poche. Cette analyse sur les quarante-quatre plages de poche de Haute-Corse a montré ses limites notamment lorsque les plages étaient caractérisées par la présence de banquettes de posidonies qui viennent certainement perturber, le plus souvent positivement, la dynamique littorale.

L'objectif de la présente étude est de mettre en place un protocole de suivi adapté de la dynamique de ces banquettes afin de mieux comprendre leur interaction avec l'évolution de la position du trait de côte.

Le suivi est basé sur l'utilisation d'appareils photographiques en mode time-lapse et a été mis en place sur trois sites pilotes, les plages de Pietracorbara, Méria et l'Ostriconi.

Des outils de traitement de ces images ont été créés afin d'obtenir des indicateurs qualitatifs et quantitatifs caractérisant la dynamique de ces banquettes et leur rôle sur l'évolution de la position du trait de côte.

Ce suivi réalisé entre mars 2016 et mai 2017 a permis de mettre en évidence la forte mobilité de ces banquettes, l'importance du contexte hydrodynamique (hauteur et direction de provenance de la houle) et de la structure des banquettes ainsi que leur rôle atténuateur vis-à-vis de l'érosion côtière.

Ce type de suivi pourrait être associé à différents modes de gestion de ces banquettes pour étudier la meilleure manière de les remettre sur la plage après la période estivale.



## Sommaire

<b>1. Introduction .....</b>	<b>9</b>
1.1. CONTEXTE .....	9
1.2. OBJECTIFS .....	10
<b>2. Etat de la connaissance .....</b>	<b>11</b>
2.1. LA POSIDONIE.....	11
2.2. DIAGNOSTIC SUR LES PRATIQUES DE GESTION DES BANQUETTES DE POSIDONIE .....	12
2.3. ROLE DES BANQUETTES SUR LA DYNAMIQUE DU TRAIT DE COTE EN CORSE .	13
<b>3. Protocole de suivi .....</b>	<b>15</b>
3.1. CHOIX DE LA METHODE.....	15
3.2. CHOIX DES SITES PILOTES .....	15
3.3. MATERIEL ET DONNEES UTILISEES .....	17
3.3.1. Appareils Time-lapse .....	17
3.3.2. Données DGPS .....	18
3.3.3. Données hydrodynamiques .....	18
3.4. OUTILS MIS EN ŒUVRE .....	18
<b>4. Analyse des résultats.....</b>	<b>29</b>
4.1. PERIODE D'ETUDE .....	29
4.2. DYNAMIQUE DES BANQUETTES .....	30
4.2.1. Pietracorbara .....	30
4.2.2. Meria.....	33
4.2.3. Ostriconi .....	36
4.2.4. Dynamique générale.....	39
4.3. ROLE PROTECTEUR.....	41
4.3.1. Posidonie immergée ou « panache de posidonie » .....	41
4.3.2. Posidonie émergée ou « banquettes de posidonie » .....	41
4.3.3. Cas particuliers .....	43
<b>5. Conclusion.....</b>	<b>45</b>
<b>6. Bibliographie .....</b>	<b>47</b>

## Liste des illustrations

Illustration 1 – Exemple de banquettes de posidonies présentes sur la plage de Méria en Haute-Corse (à gauche) et action des feuilles mortes de posidonies sur la protection contre l'érosion côtière (à droite).....	9
Illustration 2 : Estimation de la quantité de feuilles échouées sur différents secteurs à partir de la surface de l'herbier littoral. Les banquettes ne se forment que sur le littoral sableux (en opposition au trait de côte rocheux), c'est pourquoi le pourcentage de trait de côte sableux a été rajouté. (Pasqualini, 1997, modifié). .....	11
Illustration 3 – Communes sollicitées pour répondre au questionnaire (en orange, les communes qui ont répondu et en gris celles qui n'ont pas donné suite) .....	12
Illustration 4 – Exemples de dispositifs photographiques autonomes.....	15
Illustration 5 - Localisation des plages étudiées couplée aux rosaces des houles de la Côte Ouest et de la côte Est de Haute Corse (données Puertos del Estado 2014-2017).....	16
Illustration 6 – Caractéristiques générales de chaque site, d'après Belon et al. 2013 et 2016.....	16
Illustration 7 – Exemple du dispositif Solarcam ( <a href="http://www.solarcam.fr">www.solarcam.fr</a> ).....	18
Illustration 8 - Exemples d'images inexploitable : buée sur l'objectif a), refluxes dues au soleil b) et brouillard c). .....	19
Illustration 9 - Equations nécessaire au redressement et géo-référencement des images obliques des caméras (d'après Almar, 2009).....	20
Illustration 10 – Image moyennée a) et son équivalent redressé b). Le point d'origine des axes sur l'image redressée correspond à la position de la caméra. Les points rouges numérotés sont les points de référence obtenus grâce au DGPS, les croix bleues correspondent à la position calculée de ces mêmes points.....	21
Illustration 11 - Exemples de ratios rouge/bleus a) et rouge/vert b) sur une image redressée de Pietracorbara c).....	22
Illustration 12 – Principe du module DSAS (ArcGIS) .....	22
Illustration 13 - Exemple de campagnes de mesures topographique en « radiales » a) et modèle d'élevation obtenu avec ces données b).....	24
Illustration 14 Traits de côte du 22/02/2017 obtenu avec la caméra en noir et avec le DGPS en rouge à Pietracorbara sur fond orthophotographique (© IGN-BD_ORTHO ® 2007, Système de coordonnées : RGF 93 – Lambert 93). .....	25
Illustration 15 – Tableau récapitulatif des écarts de position (en pixel et en mètre) de la caméra sur chaque plage .....	25
Illustration 16 – Emprise du modèle utilisé par Puertos del Estado .....	26
Illustration 17 –Comparaison des données de hauteur de houle de Puertos del Estado et des bouées houlographique du réseau CANDHIS (CEREMA) à Alistro a) et Revellata b). .....	27
Illustration 18 – Hs : hauteur significative de la houle (m.), période (sec.) et direction (°) sur la côte Est a) de Mars 2016 à Avril 2017 et sur la côte Ouest b) de Mai 2016 à Avril 2017 (Puertos del Estado). Les flèches représentent les période d'enregistrement des caméras.....	29
Illustration 19 – Evolution des banquettes de posidonie au Nord (ligne supérieure) et Sud (ligne inférieure) de la plage de Pietracorbara sur toute la période d'étude couplée à la puissance de la houle (Source : Puertos del Estado). Les valeurs positives indiquent des houles de direction Sud et les valeurs négatives des houles de direction Nord. ....	30

- Illustration 20 – Images redressées du 04/03/2016 a), 07/03/2016 b), 11/03/2016 c) et 15/03/2016 d). Puissance de la houle couplée à la dynamique des banquettes au Nord et Sud de la plage e). Evolution du trait de côte sur la plage de Pietracorbara du 04 au 07/03/2016 f) et du 11 au 15/03/2016 g) couplée aux conditions hydrodynamiques (Puertos del Estado), sur fond orthophotographique (© IGN-BD\_ORTHO ® 2007, Système de coordonnées : RGF 93 – Lambert 93).....31
- Illustration 21 – Evolution de deux profils time-stacks au Nord et Sud de la plage de Pietracorbara di 04 au 07/03/2016 a) et du 12 au 15/03/2016 b) couplés aux conditions hydrodynamiques (Puertos del Estado).Les différentes phases d'avancée et recul des banquettes sont différenciées par les lignes de couleurs. La limite banquette/eau est surlignée en pointillés noirs. ....32
- Illustration 22 – Evolution des banquettes de posidonie au Nord (ligne supérieure) et Sud (ligne inférieure) de la plage de Meria sur toute la période d'étude couplée à la puissance de la houle (Source : Puertos del Estado). Les valeurs positives indiquent des houles de direction Sud et les valeurs négatives des houles de direction Nord. ....33
- Illustration 23 – Images moyennées et redressées du 07 a), 11 b) et 15/02/2017 c), les traits de côte du 07 et 11 Février sont représentés en pointillés. Puissance de la houle couplée à la dynamique des banquettes au Nord et Sud de la plage d). Evolution du trait de côte sur la plage de Meria du 07 au 11/02/2017 e) et du 11 au 14/02/2017 f) couplée aux conditions hydrodynamiques (Puertos del Estado), sur fond orthophotographique (© IGN-BD\_ORTHO ® 2007, Système de coordonnées : RGF 93 – Lambert 93).....34
- Illustration 24 – Evolution de deux profils time-stacks au Nord et Sud de la plage de Meria couplés aux conditions hydrodynamiques (Puertos del Estado).Les différentes phases d'avancée et recul des banquettes sont différenciées par les lignes de couleurs. La limite banquette/eau est surlignée en pointillés noirs.....35
- Illustration 25 – Evolution des banquettes de posidonie au Nord (ligne supérieure) et Sud (ligne inférieure) de la plage de Meria sur toute la période d'étude couplée à la puissance de la houle (Source : Puertos del Estado). Les valeurs positives indiquent des houles de direction Sud et les valeurs négatives des houles de direction Nord. ....36
- Illustration 26 – Images moyennées et redressées de la plage de l'Ostriconi du 01 a), 03 b), 09 c) et du 11/04/2017 d). Puissance de la houle en fonction de la dynamique des banquettes au Nord et Sud de la plage e). Evolution du trait de côte du 01 au 03/04/2017 f) et du 09 au 11/04/2017 g) couplée aux conditions hydrodynamiques (Puertos del Estado), sur fond orthophotographique (© IGN-BD\_ORTHO ® 2007, Système de coordonnées : RGF 93 – Lambert 93).....37
- Illustration 27 – Suivi de deux profils Time-stacks au Nord et Sud de la plage de l'Ostriconi 01 au 03/04/2017 a) et du 09 au 11/04/2017 b).couplés aux conditions hydrodynamiques (Puertos del Estado). La limite banquette/eau est surlignée en pointillés noires. Les différentes phases sont différenciées par des lignes de couleur. ....38
- Illustration 28 – Position digitalisée des structures immergées, chenaux, panache et banquettes sur une image moyennée du 06/04/2017 de la plage de l'Ostriconi a). Equivalent géoréférencé sur fond orthophotographique (© IGN-BD\_ORTHO ® 2007, Système de coordonnées : RGF 93 – Lambert 93) b). ....39
- Illustration 29 – Modèle conceptuel d'évolution des banquettes de posidonie sur une plage type. ....40
- Illustration 30 – Construction par accumulation latérale a) et par projection b). La banquette fraîchement déposée est limitée par les pointillots. ....40
- Illustration 31 – Images moyennées et redressées de la plage de Pietracorbara a) et Meria b), les points verts représentent la position des banquettes et les étoiles noires celle du panache. ....41
- Illustration 32 – Evolution du trait de côte sur la plage de Pietracorbara du 31/03 au 06/04/2016 a) et du 28/02 au 05/03/2017 b) couplée aux conditions hydrodynamiques (Puertos del Estado, sur fonc cartographique (© IGN-BD\_ORTHO ® 2007, Système de coordonnées : RGF 93 – Lambert 93).....42

Illustration 33 – Evolution du trait de côte (DGPS) a), modèle numérique d'élévation b), c) , d) et différentiel d'élévation entre le 22/02 et le 16/03/2017 e) au Nord de la plage de Meria , sur fond orthophotographique (© IGN-BD\_ORTHO ® 2007, Système de coordonnées : RGF 93 – Lambert 93). Puissance de la houle (Puertos del Estado) couplée à la dynamique des banquettes. .... 43

# 1. Introduction

## 1.1. CONTEXTE

L'évolution des plages de poche dépend de plusieurs facteurs tels que l'orientation de la plage, sa longueur, sa fermeture, sa géologie, le régime hydrodynamique ou encore la granulométrie. De nombreux travaux scientifiques ont été entrepris afin de définir leur stabilité (Yasso, 1965) ou leur régime morphodynamique (oscillation vs rotation, Short and Masselink, 1999). La morphodynamique est supposée dépendre du plan de plage (Hsu et al. 1987) même si les variations à court terme sont conduites par l'hydrodynamique, les mega-rips, qui sont des courants intenses orientés vers le large, générés durant des événements tempétueux (Loureiro et al. 2012) ou par les barres sableuses (Harley et al., 2015).

Dans le cadre d'un partenariat entre la Direction Départementale des Territoires et de la Mer de Haute-Corse (DDTM-2B) et le BRGM, une première étude a permis de caractériser la géologie du secteur, la géomorphologie de quarante-quatre plages de poche, les forçages météorologiques ainsi que les enjeux présents (Belon et al., 2013). Une deuxième (Belon et al., 2016) a eu pour objectif d'établir un atlas hydrodynamique, de caractériser les phénomènes de submersion marine potentielle ainsi que de préconiser un panel de modes de gestion intégrée des différentes plages en fonction de l'ensemble des informations recueillies (contexte géomorphologique, évolution du trait de côte, phénomène de submersion marine, présence d'enjeux...). Cela a permis d'élaborer un modèle conceptuel d'évolution des plages. Cette analyse sur les quarante-quatre plages de poche de Haute-Corse a montré ses limites notamment lorsque les plages étaient caractérisées par la présence de banquettes de posidonies (Illustration 1) qui viennent certainement perturber la dynamique littorale.

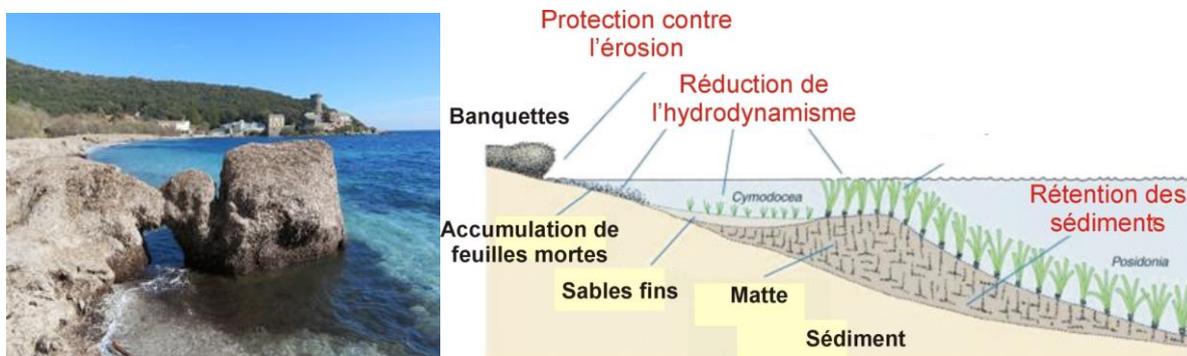


Illustration 1 – Exemple de banquettes de posidonies présentes sur la plage de Méria en Haute-Corse (à gauche) et action des feuilles mortes de posidonies sur la protection contre l'érosion côtière (à droite)

La posidonie est largement répandue en Méditerranée mais contrairement aux herbiers (e.g. Agostini et al., 2002, Leredde et al., 2016 et Abadie et al., 2016), les banquettes sont peu étudiées et leur dynamique est encore mal comprise. Elles sont essentiellement constituées des feuilles de l'herbier *Posidonia Oceanica* mais peuvent aussi contenir le rhizome de la plante, du sédiment ainsi que divers débris végétaux dans des proportions qui varient selon chaque plage et au sein d'une même plage suivant l'axe cross-shore c'est-à-dire l'axe perpendiculaire à la plage (Simeone and De Falco, 2012).

Une tempête peut avoir un impact important sur la quantité de feuilles déposées sur la plage (cf. Illustration 1) : les vagues les plus puissantes engendrent une destruction des herbiers, favorisant les dépôts sur la plage ; néanmoins, les tempêtes présentent également un pouvoir érosif

important. Il est fréquent que les banquettes soient retirées à l'approche de la saison estivale pour des raisons purement esthétiques. Cette action présente l'inconvénient de retirer du sable également et les dépôts ne sont généralement pas remis en place ce qui peut réduire fortement la protection de la plage face à l'érosion (Cancemi and Buron 2008 et 2010, Simeone and De Falco, 2013).

## **1.2. OBJECTIFS**

Les objectifs de cette étude étaient de définir un protocole de suivi de la dynamique de ces banquettes de posidonies, de choisir des sites pilotes et de mettre en place ce suivi pendant une saison hivernale afin d'évaluer l'efficacité du protocole mis en place en fonction des évolutions observées au cours de la période suivie.

## 2. Etat de la connaissance

### 2.1. LA POSIDONIE

La posidonie est une plante aquatique sous-marine endémique à la méditerranée. En ce qui concerne son cycle de vie, de nouvelles feuilles se forment toute l'année depuis un rhizome. Elles vivent entre 5 et 8 mois, plus rarement jusqu'à 13 mois. Une fois mortes, ces feuilles rejoignent la matre qui est l'ensemble constitué des sédiments, rhizomes, racines et feuilles mortes situés sous l'herbier vivant. Le renforcement des conditions climatiques en automne et l'arrachement des feuilles mortes de la matre simultanée, après une longue période d'accalmie et d'accumulation des feuilles, fait que l'on assiste souvent à de très gros dépôts sur les plages sous la forme de banquettes (Boudouresque et al., 2006).

Les herbiers constituent une barrière (cf. Illustration 1) qui atténue l'énergie cinétique des particules, qui se déposent plus rapidement, et contribuent ainsi à améliorer la clarté de l'eau, à réduire l'hydrodynamisme et ainsi protéger les côtes de l'érosion (Jeudy de Grissac & Boudouresque, 1985). Les mêmes auteurs ont suggéré que les banquettes jouent aussi un rôle sur la protection contre l'érosion des plages pendant les fortes tempêtes en amortissant les vagues sur les plages et par l'augmentation de la viscosité de l'eau du fait de la mise en suspension des fragments de feuilles mortes.

La quantité de feuilles de posidonie échouées par secteur est estimée au moyen de différents paramètres tels que la surface de l'herbier et la longueur de la côte (V. Pasqualini, 1997). Un indice est calculé dans le but d'estimer le potentiel accumulateur sur les plages.

$$P_{accumulateur} = 0.00001 * \frac{\text{Volume feuilles échouées}}{\text{Pourcentage de trait de côte sableux}}$$

Secteur	Surface d'herbier (hectare) S*R <sub>2</sub>	Quantité de feuilles échouées (tonnes) Q	Volume feuilles échouées (m <sup>3</sup> )	Pourcentage de trait de côte sableux	P <sub>accumulateur</sub>
Est-Cap-Corse (01)	2688.5	690.7	8126	12%	0.67
Ile-Rousse/Agriates (12)	1761.0	452.4	5322	9%	0.59
Saint-Florent (13)	1033.0	517.3	6086	20%	0.3
Ouest Cap-Corse (14)	307.5	79.0	929	2%	0.46
Nord Cap-Corse (15)	207.1	53.2	624	19%	0.03

*Illustration 2 : Estimation de la quantité de feuilles échouées sur différents secteurs à partir de la surface de l'herbier littoral. Les banquettes ne se forment que sur le littoral sableux (en opposition au trait de côte rocheux), c'est pourquoi le pourcentage de trait de côte sableux a été rajouté. (Pasqualini, 1997, modifié).*

Les plages de l'est du Cap-Corse et du secteur de l'Île-Rousse-Agriates sont *a priori* les plus impactées (Illustration 2) par la présence de banquettes de posidonie sur les plages. Ce constat résulte des observations régulières des plages de ces secteurs.

## 2.2. DIAGNOSTIC SUR LES PRATIQUES DE GESTION DES BANQUETTES DE POSIDONIE

Différents travaux réalisés par la DREAL de Corse avec notamment le Cabinet E.V.E.Mar (Etude et Valorisation de l'Environnement Marin) entre 2008 et 2010 (Cancemi, 2010) ont permis de recenser les différentes pratiques menées par certaines communes de Corse pour gérer la présence des banquettes de posidonies sur les plages à travers l'envoi d'un questionnaire (Illustration 3). En effet, cette présence peut être perçue par les touristes comme étant une nuisance incitant les communes à mettre en place des actions de nettoyage plus ou moins adaptées.



Illustration 3 – Communes sollicitées pour répondre au questionnaire (en orange, les communes qui ont répondu et en gris celles qui n'ont pas donné suite)

Si l'objectif principal était d'essayer de proscrire l'enlèvement des banquettes, force est de constater que cette pratique reste largement utilisée en Corse avec tout de même un effort de certaines communes de limiter l'impact sur l'environnement en laissant par exemple les posidonies enlevées sur l'extrémité de la plage afin de les garder dans le système plage. Si des réflexions sont menées sur la manière de les enlever ainsi que sur l'identification de zones de

dépôt adaptées de ces banquettes, très peu de communes semblent remettre sur la plage les banquettes retirées après la saison estivale.

Aujourd'hui, ces pratiques sont hétérogènes autour de l'île et s'il existe un consensus sur le fait que ces banquettes jouent un rôle important sur la dynamique littorale, il est encore difficile d'établir un protocole permettant d'enlever ces banquettes en saison estivale pour rendre plus attractives les plages vis à vis des usagers tout en les redéposant avant la saison hivernale afin qu'elle puisse jouer leur rôle de protection de la plage face à l'érosion côtière.

### **2.3. ROLE DES BANQUETTES SUR LA DYNAMIQUE DU TRAIT DE COTE EN CORSE**

Dans le cadre des études menées par la DREAL (Cancemi, 2008), des premières approches permettant de faire un lien entre la dynamique du trait de côte et l'enlèvement périodique des banquettes de posidonies ont été menées en comparant l'évolution de deux sites relativement protégés des forçages hydrodynamiques et dont l'un était sujet à un enlèvement périodique des banquettes alors que l'autre non.

Il s'avère que celui qui bénéficiait d'un enlèvement périodique des banquettes de posidonies avait subi un recul de la position du trait de côte alors que l'autre non.

D'autres analyses ont été faites pour observer l'évolution du volume de banquettes présentes sur certaines plages au cours de l'année. Trois campagnes étaient réalisées par an, une en hiver, une au printemps et une en été. Il en ressortait que le volume le plus important était en général observé en hiver. Des carottages ont également été réalisés afin d'estimer la proportion de sédiments pouvant être piégés dans ces banquettes, l'idée étant de connaître la part de sédiments extraite lors des actions de nettoyage des plages. Il s'avère que le volume de sédiments piégés pourrait atteindre 10% du volume des banquettes.

Si le rôle des banquettes de posidonies sur la protection du trait de côte est encore mal connu, il est par contre certain que l'enlèvement des banquettes joue un rôle parfois non négligeable sur l'érosion des plages en raison de la part de sédiments piégés dans les banquettes et qui serait extraite du milieu.



### 3. Protocole de suivi

#### 3.1. CHOIX DE LA METHODE

Si certaines approches semblent mettre en évidence l'effet protecteur des banquettes de posidonie sur l'évolution du trait de côte, les méthodes généralement utilisées consistent à effectuer des missions de terrain à des pas de temps plus ou moins espacés (de quelques jours à plusieurs semaines ou mois pour mesurer l'évolution de la morphologie de la plage au moyen de GPS différentiel par exemple (Balestri et al., 2006 ; Simeone et Falco, 2012).

Dans le cadre de cette étude, nous voulions trouver le moyen de travailler à des échelles de temps plus réduites et notamment suivre l'évolution de ces banquettes en temps réel au cours d'évènements tempétueux. Nous nous sommes alors concentrés sur des systèmes d'acquisition photographique autonomes.

S'il existe différents dispositifs (Illustration 4), il semblait intéressant de travailler sur des techniques à « bas coût » afin de valider le protocole et montrer le potentiel de ces dispositifs avant d'envisager d'investir sur des dispositifs plus performants. Deux dispositifs ont été testés, celui de Wingsapes dans un premier temps et celui de Solarcam qui nous paraît aujourd'hui le plus adapté.

Appareil	Récupération des images	Prévisualisation	Résolution (MegaPix.)	Fréquence minimale	Autonomie	Stockage (Go)	Contrôle à distance	Traitements possibles	Prix (euros)
<b>Wingscapes</b>	Terrain	non	2 (8 interpolé)	10 sec.	A pile	Selon carte sd	non	Morphologique	200 + carte sd + piles
<b>Sequence box</b>	Internet	oui	3 + objectif	A la demande ?	solaire	illimité (serveur)	Wifi, 3G, liaison radio	Morphologique	Sur devis (achat ou location)
<b>photosentinel</b>	Internet	oui	Choix appareil	60 (5 min. conseillé)	solaire	illimité (serveur)	4G	Morphologique	4000-6000 +40/ mois (serveur)
<b>cyclapse</b>	Terrain	non	24.2	30 sec. ?	solaire	carte SD (64 initial)	non	Morphologique	3700 + carte sd
<b>harbortronics</b>	Terrain	non	15-54 (Reflex)	1 sec.	Solaire	carte SD (32 initial)	non	Morphologique + hydrodynamique	2500-12000 + carte sd
<b>solarcam XL</b>	Internet, MMS	oui	8	60 sec. (5 min. conseillé)	solaire	30 jours sur serveur (et/ou Carte micro)	3G, GSM	Morphologique	320 + forfait Téléphone + carte sd (option)
<b>Caméra Scoutguard</b>	Terrain, MMS Mail	oui (en option)	5 (12 interpolé)	Manuel (SMS)	solaire	Selon carte sd	3G, GSM	Morphologique	340 + piles + carte sd
<b>Enlaps</b>	Internet	Oui	16	60 sec. (5 min. conseillé)	solaire	Selon carte sd	Bluetooth, Wifi (GSM et GPS en option payante)	Morphologique	600 + cartes sd
<b>Brinno</b>	Terrain	non	1.3	1 sec.	Piles	4 Go	non	Morphologique + hydrodynamique	355

Illustration 4 – Exemples de dispositifs photographiques autonomes

Des approches similaires sont menées en Italie pour mieux comprendre cette dynamique de dépôt des banquettes de posidonies (Simeone et al., 2013).

#### 3.2. CHOIX DES SITES PILOTES

Sur la base des études menées sur les plages de Haute-Corse, plusieurs paramètres nous paraissent importants dans le choix des sites d'étude :

- la granulométrie et en particulier les plages de sables vont être beaucoup plus sensibles à la présence des banquettes de posidonies avec une stratification observée dû au mélange de sable et de feuilles mortes de posidonies ;
- l'indentation de la plage (l'indice de fermeture) qui va limiter les échanges avec l'extérieur et ainsi confiner les feuilles mortes de posidonies ;
- la présence avérée de feuilles mortes de posidonies en quantité importante ;
- les modes de gestion utilisés par les communes ;

- l'exposition des plages aux forçages hydrodynamiques, la façade ouest étant plus exposée à la houle que la façade est.

La méthode choisie va également engendrer certaines contraintes comme l'accessibilité à la plage, la présence d'un point de vue en hauteur permettant d'avoir une vue correcte sur la plage, la possibilité de mettre l'appareil au sud de la plage pour limiter la réverbération...

Compte-tenu de l'ensemble de ces paramètres, nous avons voulu observer trois sites dont certaines caractéristiques présentaient des différences. L'idée était à la fois de jouer sur le contexte hydrodynamique ainsi que sur la quantité de banquettes de posidonies présentes sur la plage.

Les trois sites identifiés sont les plages de Pietracorbara et de Meria sur la façade Est du Cap Corse et la plage de l'Ostriconi sur la façade Ouest (Illustration 5).

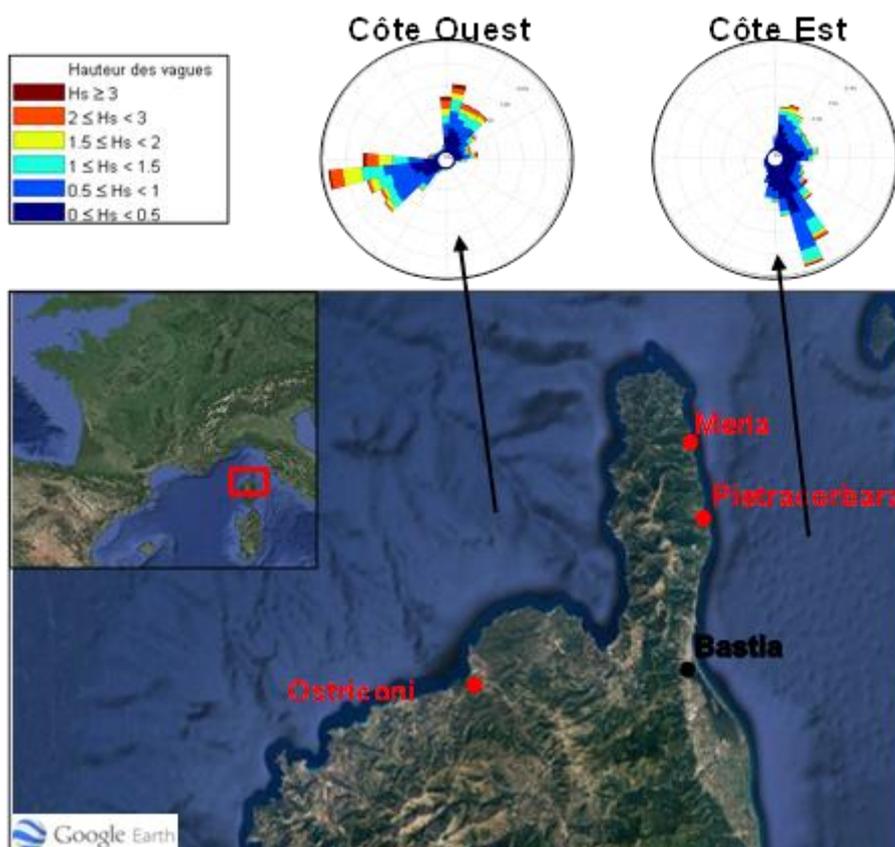


Illustration 5 - Localisation des plages étudiées couplée aux rosaces des houles de la Côte Ouest et de la côte Est de Haute Corse (données Puertos del Estado 2014-2017)

Les caractéristiques générales de ces plages sont présentées dans l'illustration 6.

Plages	Caractéristiques générales							
	Longueur	Largeur	Angle normal	Indentation	Géologie	Granulométrie	Evolution historique	Urbanisation
<b>Ostriconi</b>	750 m	30 m	300°	90 m	Granite leucocrate	Sable fin à moyen	Stable	Nulle
<b>Pietracorbara</b>	550 m	20-30 m	90°	270 m	Schistes lustrés	Sable fin à moyen	Erosion	Modérée
<b>Meria</b>	230 m	<20 m	120°	120 m	Ophiolites et schistes lustrés	Sable moyen à grossier	Erosion	Importante

Illustration 6 – Caractéristiques générales de chaque site, d'après Belon et al. 2013 et 2016.

### 3.3. MATERIEL ET DONNEES UTILISEES

#### 3.3.1. Appareils Time-lapse

Les principaux outils d'observations sont les caméras de type time-lapse installées sur les plages. L'imagerie vidéo est particulièrement adaptée au suivi du littoral (e.g. *Holland et al. 1997, Almar 2009, Holman 1993*) et des banquettes de posidonie puisque leur dynamique peut être extrêmement rapide. Effectivement, des variations horaires ou journalières considérables sont fréquemment observées. Des campagnes de type levé topographique avec une fréquence journalière durant plusieurs mois demanderaient beaucoup de moyens engagés. Alors que la caméra une fois installée fournit des données à très haute fréquence et nécessitant peu d'interventions.

Des systèmes bon marché ont été choisis au détriment de stations vidéo plus performantes de types Argus, Cam-Era ou CASAGEC en raison de leurs faibles coûts de mise en place ou d'entretien et de leur grande mobilité. La précision des images ainsi que leurs traitements seront de ce fait également moins précis. Il existe de nombreux systèmes de ce type à petit et moyen budget avec différentes caractéristiques (Cf. Illustration 4). Néanmoins, beaucoup sont inadaptés pour le traitement des images : résolution trop faible, fréquence des prises de vue inadéquat, utilisation ou récupération des photos complexe, etc. Les premiers appareils choisis furent ceux proposés par la société Wingscapes® offrant à l'époque les prix les moins chers du marché (~210 € avec un jeu de piles C (LR14) et une carte SD). Néanmoins, la récupération systématique des données sur le terrain impliquant le déplacement de la caméra et l'alimentation par piles se sont avérés contraignant. De plus, le nonaccès en temps réel aux images ne permet pas d'être alerté d'un éventuel dysfonctionnement ou dégradation du système, en effet les deux appareils achetés ont fini par être dérobés.

Le choix des caméras suivantes s'est donc porté sur © SolarCam (cf. Illustration 7) en raison de son faible coût (~350 € avec un forfait téléphone et une carte SD), de sa facilité de mise en place et surtout de son contrôle total à distance. Le dispositif, d'une conception très simple est composé d'un panneau solaire relié à un téléphone Sony Xperia protégé par un boîtier étanche. Une fois installées, les caméras sont autonomes et le transfert des données s'effectue via le réseau 3G vers un serveur internet. La fréquence des prises de vue est modulable entre 1 photo/min et 1 photo/heure pour une résolution de 8 MP. La stabilité énergétique de l'appareil dépend la couverture 3G, de la fréquence de prise de vue et de l'efficacité du panneau solaire. La fréquence maximale de prise de vue étant fixée à une photo par minute, il n'est pas possible d'étudier les paramètres hydrodynamiques avec ce type d'appareil (e.g. *Holman et al. 1993, Almar et al. 2009*).

Les images obtenues avec les caméras ont servi après traitements à déterminer les évolutions des banquettes de posidonie, du trait de côte et des diverses structures et courants d'arrachements.



Illustration 7 – Exemple du dispositif Solarcam ([www.solarcam.fr](http://www.solarcam.fr))

### 3.3.2. Données DGPS

Un GPS différentiel Trimble R6 a également été utilisé. Les corrections étant apportées par le système ACTISAT : réseau de stations permanentes pour la géolocalisation de précision. Le GPS a été utilisé afin de projeter les images en plan et estimer la précision des données obtenues avec les caméras. Il a aussi été utilisé pour évaluer de façon ponctuelle les fluctuations volumiques de la plage notamment entre plusieurs tempêtes. Pour cela, des campagnes topographiques ont été organisées. L'opérateur marche sur la plage en décrivant des transects parallèles entre eux d'une dizaine de mètres d'espacement. Les données des points de mesure sont ensuite interpolées à toute la plage et donnent un modèle numérique de la plage.

### 3.3.3. Données hydrodynamiques

N'ayant pas accès à des données locales ou des bouées houlographiques, Les données hydrodynamiques proviennent du modèle WAM (*WAMDI, 1988*) créé et diffusé par l'organisme public Espagnol Puertos del Estado (<http://www.puertos.es/>). Il s'agit d'un modèle prévisionnel dont le forçage principal est la vitesse du vent provenant du modèle HIRLAM de l'AEMET (Agencia Estatal de METeorologica). Elles fournissent des valeurs horaires de hauteur moyenne, maximale, de direction et période de la houle. Les données de Puertos del Estado ont l'avantage d'être facile d'accès et gratuite.

## 3.4. OUTILS MIS EN ŒUVRE

### 3.4.1. Interface de traitement d'image sous Matlab

#### *Installation des caméras*

Da la position des caméras dépend la qualité des images, des traitements ultérieurs et par conséquent des analyses. C'est pourquoi, dans la mesure du possible, il faut respecter plusieurs règles lors du positionnement de la caméra. Tout d'abord, il est préférable de placer la caméra au Sud de la plage (visant le Nord) afin d'éviter les reflets dues au soleil qui rendent les images inexploitable (Cf. Illustration 8b).

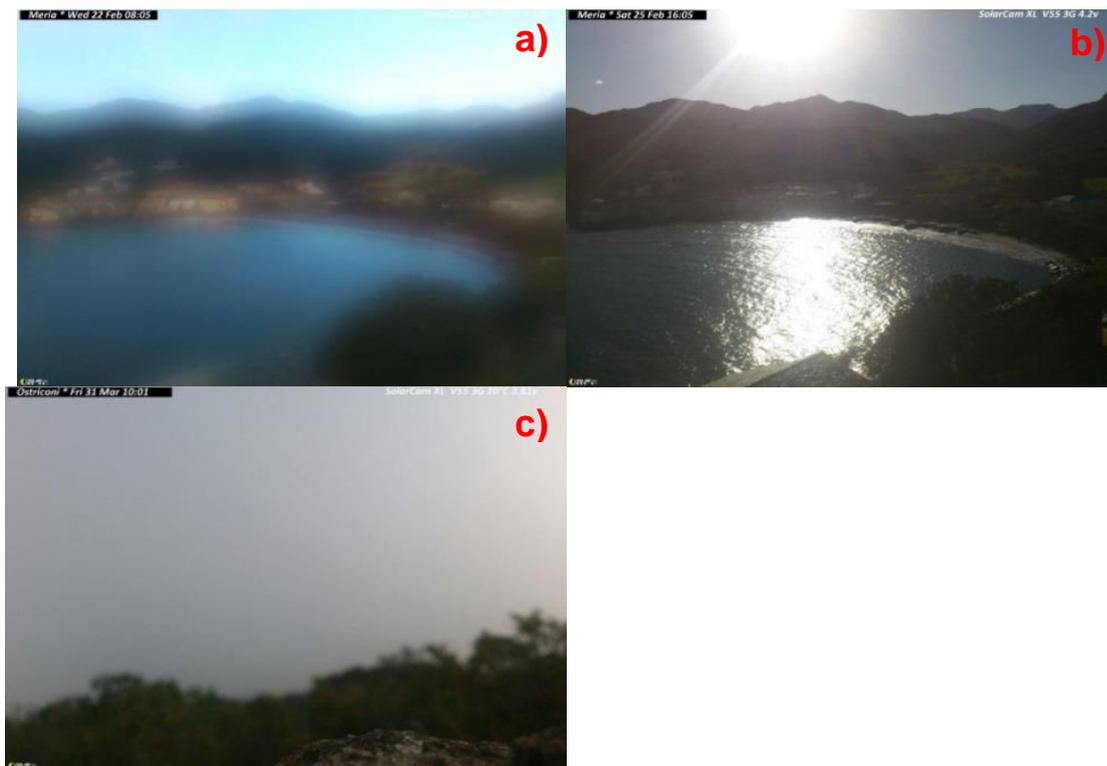


Illustration 8 - Exemples d'images inexploitables : buée sur l'objectif a), refluent dues au soleil b) et brouillard c).

De plus, il faut placer la caméra au plus près de la plage pour conserver une bonne résolution tout en gardant une élévation importante (ce paramètre influe sur la qualité du redressement des images). Il est conseillé de placer la caméra à l'abri des regards sur un support fixe pour éviter tout déplacement même infime qui parasite les données. Afin d'exploiter au mieux les images des caméras, plusieurs outils Matlab ont été développés.

### **Principe de la vidéo Time-lapse**

Des vidéos couplant photographies et conditions hydrodynamiques permettant de comprendre le rôle de la houle sur la dynamique des banquettes ont été mises au point. Elles offrent un aperçu rapide et qualitatif des divers processus intervenants sur la plage et sont souvent utilisées pour cibler les périodes critiques pendant lesquelles seront lancés les autres outils.

### **Images moyennées**

Les images moyennées correspondent à la superposition de plusieurs images, le temps que représente une image dépend de la fréquence de prise de vue. Elles ont l'avantage de laisser apparaître les zones de déferlement. En effet, les zones claires correspondent au point de déferlement alors que les zones avant ou après déferlement apparaissent plus sombres. Ce contraste est révélateur de la topographie immergée de la plage (e.g. Lippman and Holman 1989; Holman et al., 1993, 1997). Elles sont donc utilisées pour déterminer la position d'éventuels barres sous-marines ou courants d'arrachements.

### Principe du géoréférencement

Afin de convertir les données pixels en distances réelles, il est nécessaire de redresser et géoréférencer les images (Cf. *Illustration 10*). L'utilisation des images est limitée en repère local, cette démarche facilite le suivi évolutif des plages et permet des comparaisons avec les données GPS. Un outil traite automatiquement les images avec les données GPS et redresse les images. Cette étape suppose le passage de coordonnées locales (x,y) comme en *Illustration 10.a*) à des coordonnées réelles (X, Y, Z) comme sur la *Illustration 10.b*) elle est largement décrite dans la littérature (e.g. *Bailey and Shand, 1996 ; Holland et al., 1997 ; Lippman and Hollman, 1989 ; Almar, 2009*). Il est nécessaire de résoudre plusieurs équations (*Illustration 9*).

$$X = (Z - Z_0)Q + X_0 \quad (1)$$

$$Y = (Z - Z_0)P + Y_0 \quad (2)$$

Avec :

$$Q = \frac{m_{11}x + m_{21}y - m_{31}Df}{m_{13}x + m_{23}y - m_{33}Df} \quad (3)$$

Et :

$$P = \frac{m_{12}x + m_{22}y - m_{32}Df}{m_{13}x + m_{23}y - m_{33}Df} \quad (4)$$

Les coefficients  $m_{ij}$  (équation 3 et 4) sont les éléments de la matrice de rotation M (équation 5) et correspondent à l'ensemble des rotations.

$$M = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\tau) & -\sin(\tau) \\ 0 & \sin(\tau) & \cos(\tau) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\cos(\sigma) & -\sin(\sigma) & 0 \\ -\sin(\sigma) & \cos(\sigma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

*Illustration 9 - Equations nécessaire au redressement et géo-référencement des images obliques des caméras (d'après Almar, 2009).*

La technique utilise des points de référence bien visibles sur la caméra dont la position exacte a été préalablement mesurée par GPS (Cf. *Illustration 10*). Dans la mesure du possible, ces points doivent être répartis sur l'ensemble de la zone étudiée. Cette technique est largement décrite dans la littérature (e.g. *Bailey and Shand, 1996 ; Holland et al., 1997 ; Lippman and Hollman, 1989 ; Almar, 2009*).

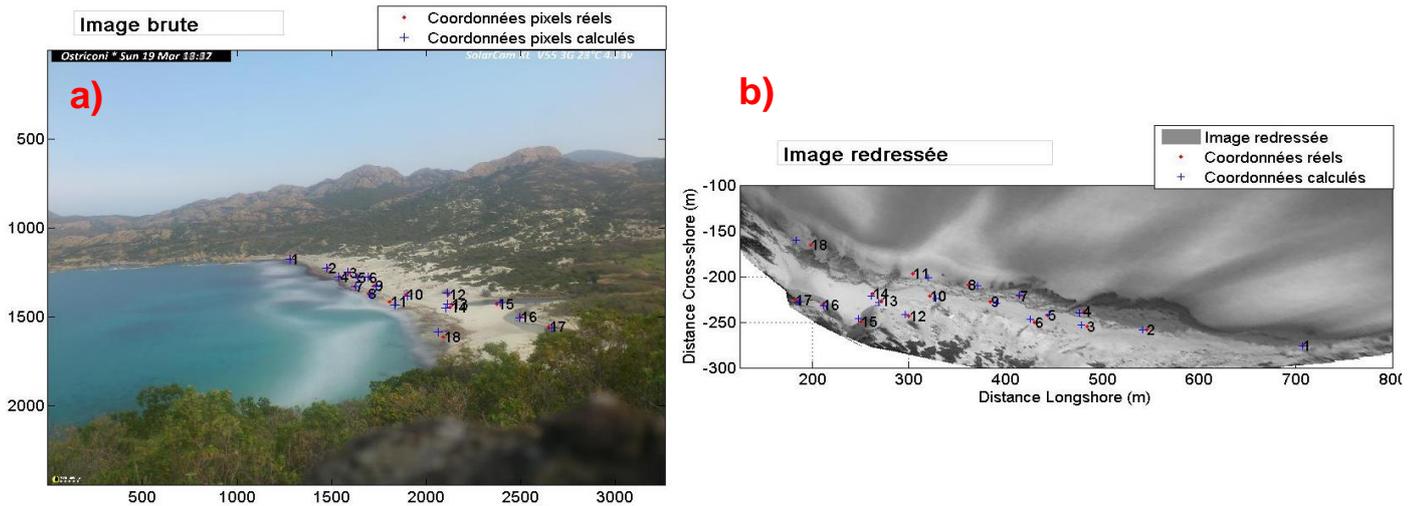


Illustration 10 – Image moyennée a) et son équivalent redressé b). Le point d'origine des axes sur l'image redressée correspond à la position de la caméra. Les points rouges numérotés sont les points de référence obtenus grâce au DGPS, les croix bleues correspondent à la position calculée de ces mêmes points.

### Détection et suivi du trait de côte

Généralement, une image de couleur est la superposition de 3 feuillets. Le code RVB associé à chaque pixel un indice d'intensité de couleur rouge vert et bleu. Le sable possède un indice important en rouge et faible en bleu alors que c'est l'inverse pour l'eau de mer. Ainsi, le ratio rouge/bleu d'une image laisse clairement apparaître la limite du trait de côte associé à la limite sable/eau alors que le ratio rouge/vert donne une limite bien moins nette (Illustration 11).

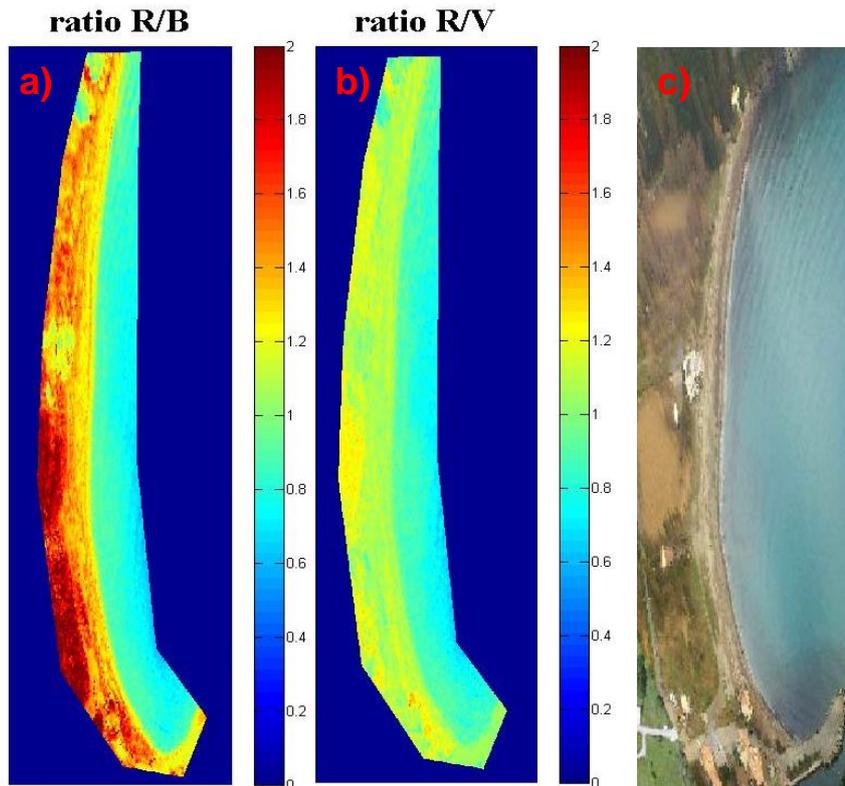


Illustration 11 - Exemples de ratios rouge/bleus a) et rouge/vert b) sur une image redressée de Pietracorbara c).

Le trait de côte est calculé automatiquement à partir du ratio rouge/bleu (e.g. Almar, 2009, Bryan et al., 2013).

La comparaison de la position des différents traits de côte est ensuite réalisée avec le logiciel DSAS développé par l'USGS (Thieler et al., 2008). Ce module d'ArcGIS mesure les évolutions entre chaque position du trait de côte grâce à une série de transects perpendiculaires à la côte

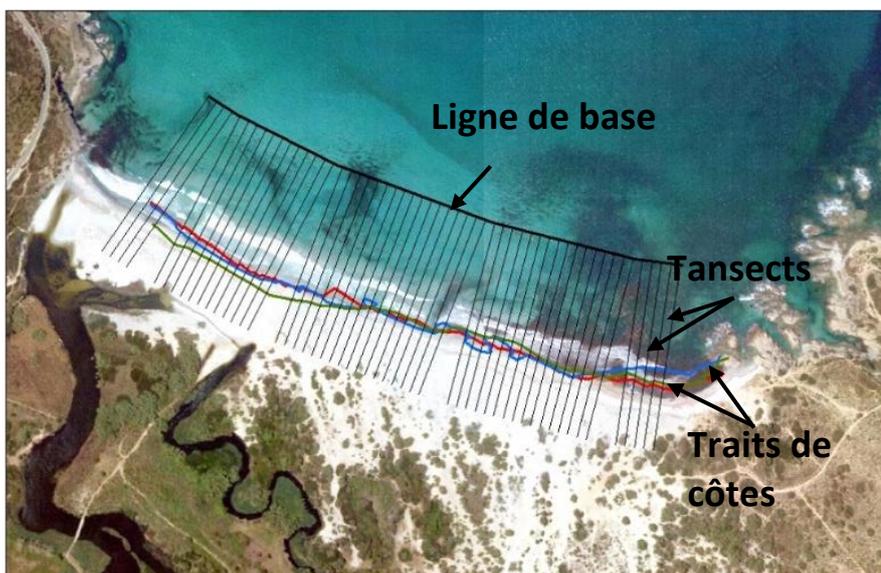


Illustration 12 – Principe du module DSAS (ArcGIS)

depuis une ligne de base (Cf. *Illustration 12*). Cela permet de comparer la position d'un grand nombre de points de façon automatique.

### **Graphiques dynamiques**

Un outil couplant puissance de la houle avec évolution de la banquette a été mis au point, il permet d'identifier les phases de retrait ou d'avancée des banquettes et de les associer aux conditions hydrodynamiques. Il facilite l'identification de tendances d'avancée ou recul des banquettes. Il est inspiré des travaux de *Gómez-Pujol et al., 2013*.

### **Images Time-stacks**

Les images time-stacks représentent le suivi temporel d'un profil de plage selon un pas de temps donné (*Almar, 2009*). Elles vérifient et complètent les informations des graphiques dynamiques puisque ces images sont couplées elles aussi aux conditions météo-marines facilitant l'identification des seuils de mise en mouvement et de destruction des banquettes. Les caméras utilisées ne sont pas capable de fournir une fréquence assez fine pour étudier les paramètres hydrodynamiques comme le font les systèmes plus abouti (Cam-Era, ARGUS..).

### **3.4.2. Suivi topographique**

L'outil d'imagerie vidéo n'est généralement pas adapté pour des traitements volumiques quantitatifs. Il existe tout de même des techniques comme la stéréoscopie (*e.g. Astruc et al., 2011, Palmster and Holman., 2011*) où l'utilisation des variations du niveau de marée permettant d'obtenir des données d'élévation. Ces techniques sont complexes à mettre en œuvre et requièrent la présence de deux caméras sur la plage or, le nombre de caméras mis à notre disposition est limité, pour ces raisons, ces techniques n'ont pas été exploitées lors de cette étude.

Les campagnes topographiques au DGPS permettent donc d'apporter une approche volumique à cette étude grâce à un modèle d'élévation de la plage. Elles sont organisées en fonction des variations des banquettes observées sur les vidéos et des conditions hydrodynamiques, idéalement entre chaque événement énergétique. L'illustration 13 montre un exemple de campagne et le modèle d'élévation obtenu.

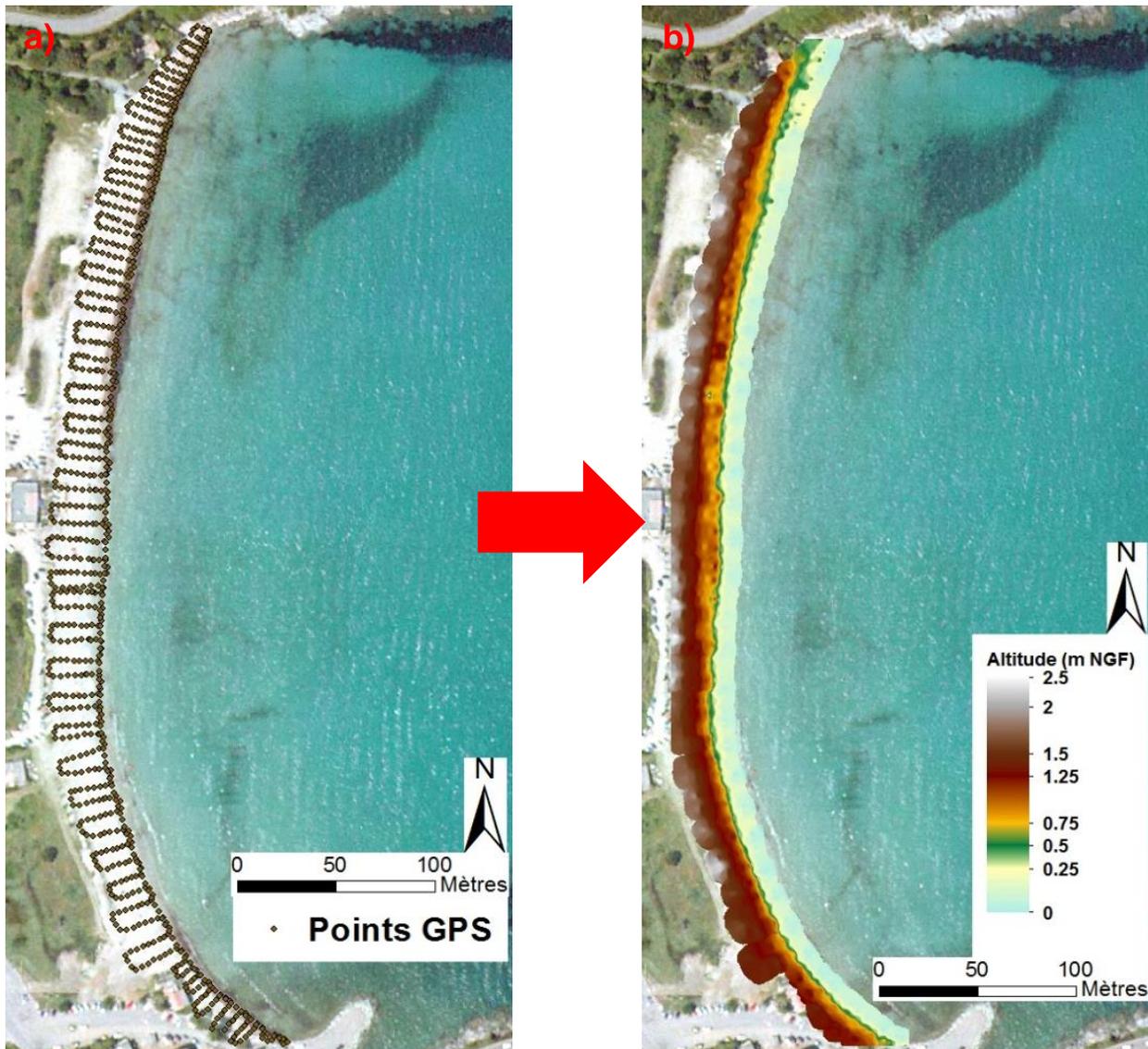


Illustration 13 - Exemple de campagnes de mesures topographique en « radiales » a) et modèle d'élévation obtenu avec ces données b).

### 3.4.3. Incertitudes et critique des données

- **Données morphologiques**

Concernant les caméras, leur position les expose au vol et même correctement fixées (généralement à même la roche), elles sont susceptibles de bouger légèrement ce qui complique les traitements ultérieurs. De plus, elles sont totalement dépendantes de la couverture 3G, il est donc assez fréquent d'avoir quelques trous dans les données.

Concernant les outils, la précision de l'outil de digitalisation du trait de côte a été évaluée. Pour cela, le trait de côte digitalisé est comparé à celui du même jour obtenu au DGPS. Pour Pietracorbara par exemple, les deux tracés sont très proches sauf au Nord de la plage, la caméra étant placée au Sud. L'erreur est évaluée à  $\pm 1$  m au Sud à  $\pm 5$  m au Nord (Cf Illustration 14). L'erreur dépend donc de l'éloignement mais également de l'angle de la prise de vue.



Illustration 14 Traits de côte du 22/02/2017 obtenu avec la caméra en noir et avec le DGPS en rouge à Pietracorbara sur fond orthophotographique (© IGN-BD\_ORTHO © 2007, Système de coordonnées : RGF 93 – Lambert 93).

L'illustration 15 résume pour chaque plage les écarts de position des points GPS en pixels puis en mètres. Notons que l'erreur maximale correspond aux points les plus éloignés de la caméra, le travail quantitatif n'a donc pas porté sur ces zones qui sont d'ailleurs la plupart du temps éloignées du trait de côte et donc de la zone d'intérêt. Ces points participent au calcul de précision moyenne et la font donc baisser. La caméra placée sur la plage de Meria est à seulement une vingtaine de mètres du niveau marin, cette position rapprochée de la plage confère une bonne résolution (empreinte pixel faible) mais complique le redressement (écart en pixels important). A l'inverse, la caméra placée à l'Ostriconi est très en hauteur (~60 m avec un écart en pixels très faible) mais relativement loin de la plage ce qui permet un bon redressement mais affiche une résolution médiocre (empreinte pixel importante). La caméra installée à Pietracorbara semble présenter le bon compromis. Le choix de la position de la caméra par rapport à la plage est donc un paramètre crucial. Plus la caméra sera placée haut et proche de la plage, meilleur sera le redressement et par conséquent les divers traitements qui en découlent.

Plages	Ecart de position					
	Pixels			Mètres		
	Minimum	Moyen	Maximum	Minimum	Moyen	Maximum
Pietracorbara	1	7	16	<1	1.75	4.25
Meria	10	35	82	1	4	8
Ostriconi	1	14	39	<1	5	16

Illustration 15 – Tableau récapitulatif des écarts de position (en pixel et en mètre) de la caméra sur chaque plage

- **Données hydrodynamiques**

Afin d'évaluer la précision des données hydrodynamiques, une comparaison avec les bouées houlographiques du réseau CANDHIS les plus proche (à savoir Alistro pour la côte Est et Revellata pour la côte Ouest) a été établie. La bouée d'Alistro ne fonctionne plus depuis Juin 2014, la comparaison concerne donc une période antérieure à l'étude. Les résultats sont présentés sur l'*Illustration 17*.

L'écart est important sur la côte Est (*Illustration 17.a*), et les tendances observées par la bouée ne se vérifient pas toujours sur le modèle. La corrélation est bien meilleure sur la côte Ouest (*Illustration 17.b*) même si l'écart varie d'un événement à l'autre. Le modèle utilisé étant Espagnol, il est optimisé pour la côte Ouest Méditerranéenne. La Corse est plus particulièrement la Côte Est (Mer Tyrrhénienne) se situe en bordure du modèle, loin de points de calibration (Cf. *Illustration 16*) ce qui pourrait expliquer l'erreur.



*Illustration 16 – Emprise du modèle utilisé par Puertos del Estado*

Notons que les valeurs qui seront utilisées par la suite sont calculées sur une maille située au large, les variations à la côte peuvent également être importantes. Au vue de la marge d'erreur des données mises à notre disposition, des conclusions quantitatives sur l'hydrodynamisme s'avèreraient hasardeuses. C'est pourquoi par la suite, seules les tendances seront étudiées.

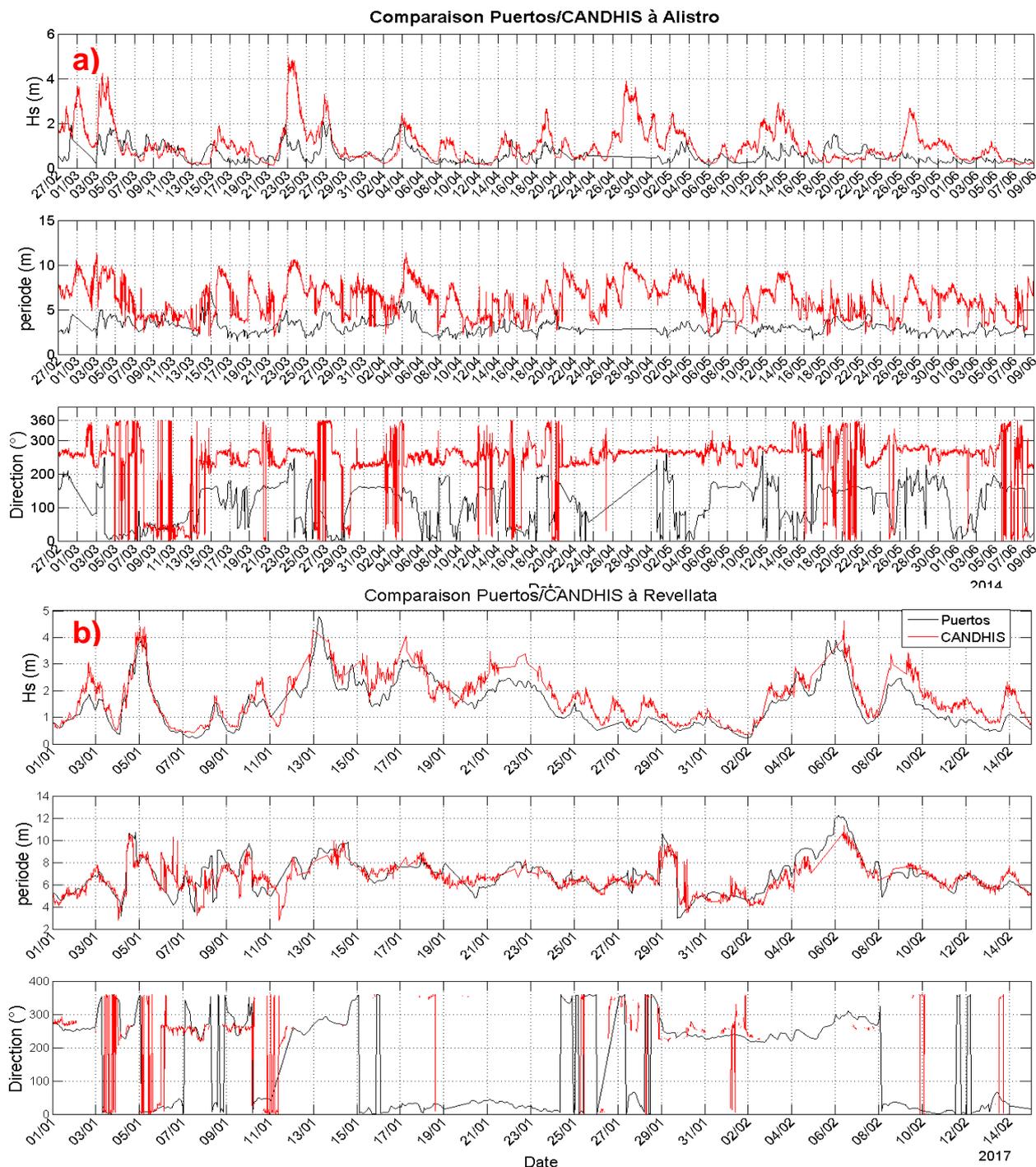


Illustration 17 – Comparaison des données de hauteur de houle de Puertos del Estado et des bouées houlographiques du réseau CANDHIS (CEREMA) à Alistro a) et Revellata b).



## 4. Analyse des résultats

### 4.1. PERIODE D'ETUDE

La période d'observation s'étend de mars 2016 à mai 2017 en plusieurs phases discontinues correspondant à la mise en place des caméras. Au cours de cette période, 21 événements dont la hauteur significative de la houle dépasse 1,5 mètres (données de Puertos del Estado) ont été observés sur la côte Est (Illustration 18) dont 9 en provenance du Nord et 12 en provenance du Sud. Sur la Côte Ouest 32 événements ont été identifiés dont 11 de Nord et 21 de Sud (Illustration 18). La côte Est a subi des houles de hauteur significative moyenne de 0,68 m et de période moyenne de 4,62 sec avec un maximum à 5 m le 27/12/2017. Alors que la côte Ouest a subi des houles de hauteur significative visiblement plus intenses avec 0,96 m de moyenne et 7,62 sec de période avec un maximum à 7,62 m le 07/03/2017. Les périodes agitées ont été observées la plupart du temps en hiver et également au printemps sur la côte Ouest. Les flèches de couleur (cf. Illustration 18) indiquent les périodes d'action des caméras, le vert se rapportant à Pietracorbara, le bleu à Meria et le rouge à l'Ostriconi.

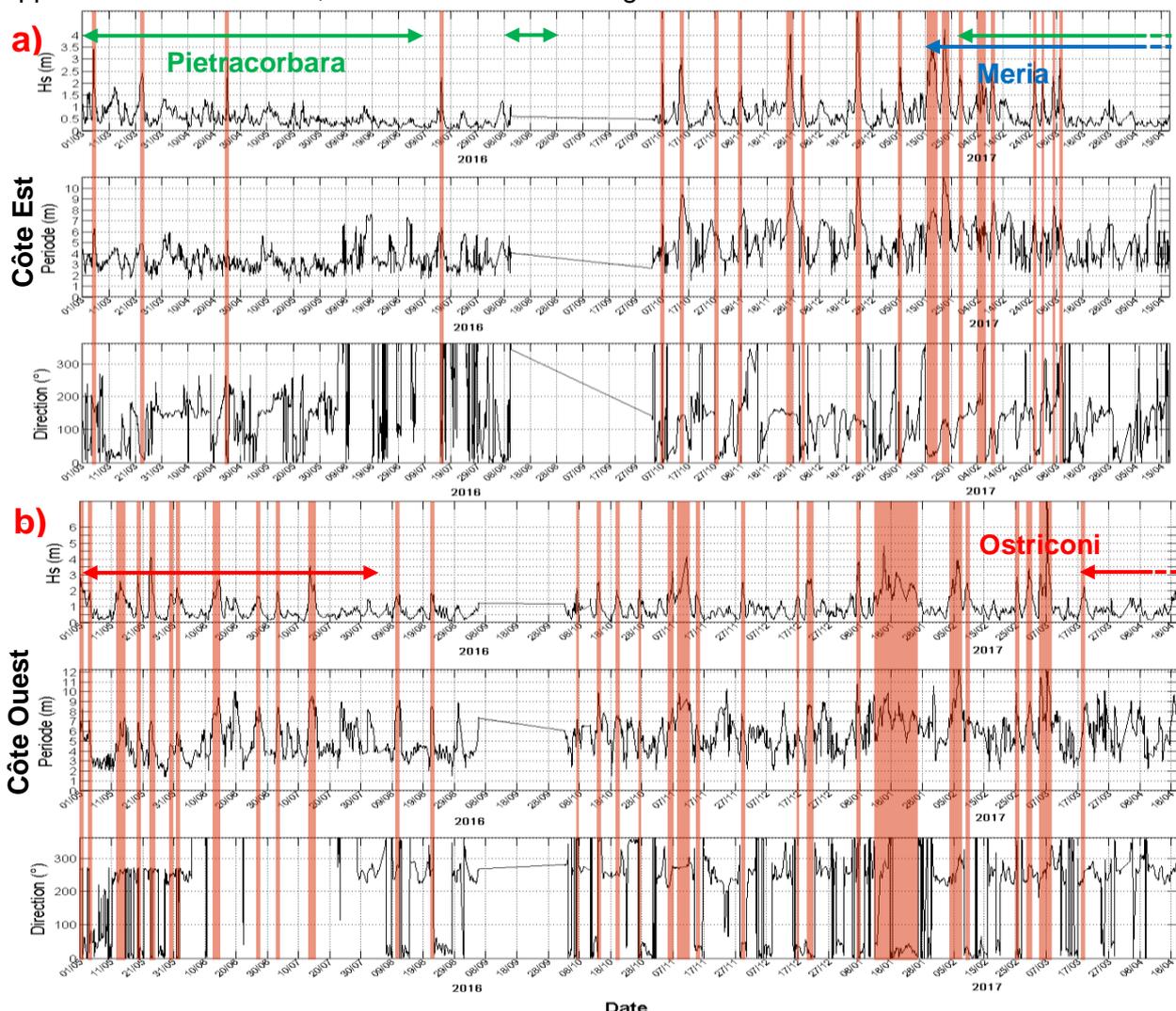


Illustration 18 – Hs : hauteur significative de la houle (m.), période (sec.) et direction (°) sur la côte Est a) de Mars 2016 à Avril 2017 et sur la côte Ouest b) de Mai 2016 à Avril 2017 (Puertos del Estado). Les flèches représentent les période d'enregistrement des caméras.

## 4.2. DYNAMIQUE DES BANQUETTES

Sur chaque site, l'évolution de la plage a été analysée, ainsi que les différentes phases de dépôt et retrait des banquettes afin de mieux comprendre le rôle des vagues sur leur dynamique.

### 4.2.1. Pietracorbara

L'illustration 19 présente l'évolution des banquettes au Nord de la plage (ligne du haut) et au Sud (ligne du bas) couplée à la puissance de la houle pendant la période d'étude sur la plage de Pietracorbara. Les cercles verts indiquent une avancée du trait de côte alors que les croix rouges indiquent un recul, les ronds jaunes indiquent l'absence de banquette. Les puissances positives correspondent à des houles de Sud et les puissances négatives à des houles de Nord.

Ce graphique laisse apparaître 13 événements provenant du Nord et 11 du Sud. Le suivi de l'état des banquettes permet de noter qu'il y a toujours une banquette au Nord ce qui n'est pas le cas au Sud.

D'autre part, le plus souvent les houles de direction Sud semblent engendrer une construction au Nord couplée à une destruction au Sud alors que les houles de Nord entraînent une construction au Sud avec destruction au Nord. Cette constatation se vérifie par exemple du 06 au 08/02/2016, du 01 au 07/03/2016, du 13 au 24/03/2016, du 31/03 au 23/04/2016, du 08 au 14/05/2016, du 05 au 08/02/2017, du 13 au 18/02/2017 ou du 06 au 10/03/2017.

Des conditions trop énergétiques semblent détruire l'ensemble des banquettes quelle que soit la direction mais s'en suit une construction importante sur le descendant de la tempête à l'image du 28/02 au 02/03/2016, du 01 au 06/04/2016, du 09 au 11/02/2017 ou du 05 au 06/03/2017. Seuls quelques événements ne suivent pas cette tendance.

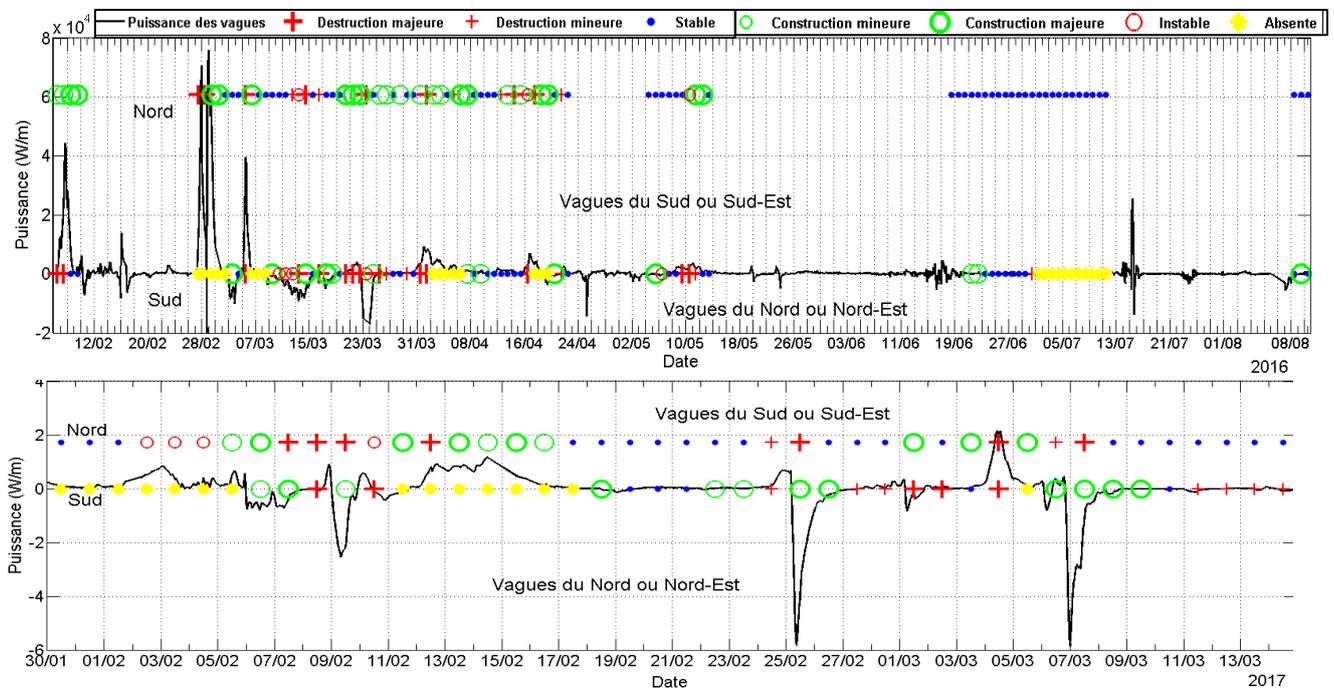


Illustration 19 – Evolution des banquettes de posidonie au Nord (ligne supérieure) et Sud (ligne inférieure) de la plage de Pietracorbara sur toute la période d'étude couplée à la puissance de la houle (Source : Puertos del Estado). Les valeurs positives indiquent des houles de direction Sud et les valeurs négatives des houles de direction Nord.



Est. Inversement, la tempête de direction Sud-Est détruit la banquette Sud et construit au Nord. Notons que celle-ci, bien plus énergétique que la tempête précédente n'entraîne une construction que sur son descendant.

Les images time-stack couplées aux conditions hydrodynamiques vérifient cette tendance et apportent une précision supplémentaire. L'illustration 21 correspond à l'évolution de deux profils. Le premier est au Nord ① de la plage et le second au Sud ②. La première phase, du 04 au 07/03/2016 est caractérisée par une stabilité relative (légère avancée au Sud et recul au Nord) sous une houle de secteur Nord. La houle voit ensuite son intensité augmenter et change de direction. Après une période de retrait global, la banquette Nord s'accroît énormément (avancée de plus de 20 m) alors que la banquette Sud a totalement disparue. La seconde phase, du 12 au 15/03/2016 est plus homogène avec un retrait progressif au Nord et une avancée au Sud sous

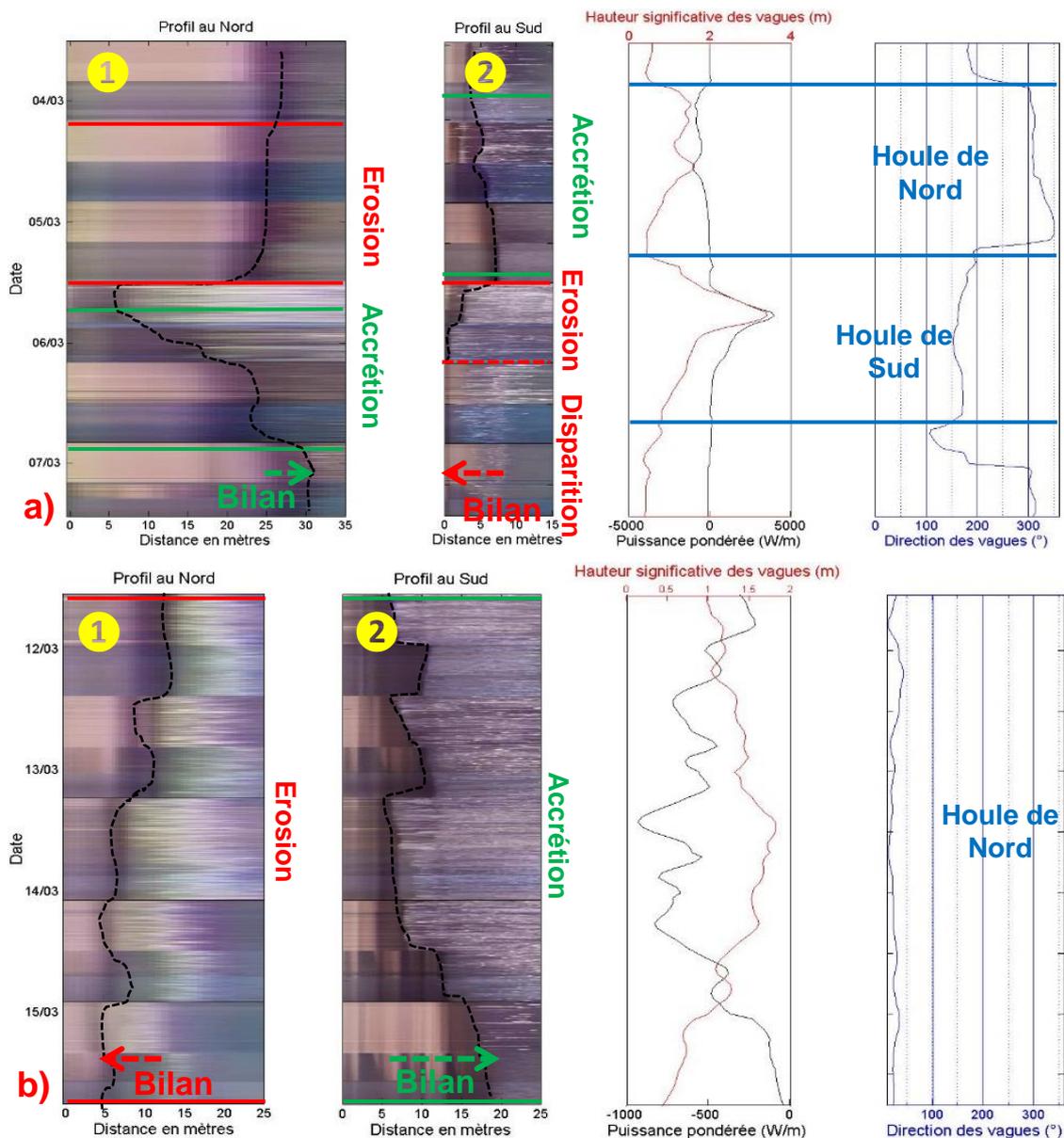


Illustration 21 – Evolution de deux profils time-stacks au Nord et Sud de la plage de Pietracorbara di 04 au 07/03/2016 a) et du 12 au 15/03/2016 b) couplés aux conditions hydrodynamiques (Puertos del Estado). Les différentes phases d'avancée et recul des banquettes sont différenciées par les lignes de couleurs. La limite banquette/eau est surlignée en pointillés noirs.

une houle de direction Nord. Notez le retrait généralisé lorsque la houle dépasse les 1,5m le 13/03.

Les outils de time-stack (évolution d'un profil dans le temps) et de graphiques dynamiques sont particulièrement adaptés pour identifier les seuils. Rappelons que l'erreur sur les données hydrodynamiques ne permet pas de fixer leur valeur. L'influence de la direction et de l'intensité de la houle est constatée sur toute la période d'étude.

#### 4.2.2. Meria

L'illustration 22 représente l'évolution des banquettes au Nord (ligne supérieure) et Sud (ligne inférieure) de la plage de Meria couplée à la puissance de la houle au cours de la période d'étude. Ce graphique fait ressortir 6 évènements de Sud et 4 de Nord, la diminution de la houle à partir du printemps est nettement identifiable.

Contrairement à la plage de Pietracorbara, une banquette est toujours présente au Sud mais pas forcément au Nord. Leur dynamique semble tout de même répondre aux changements de directions des vagues. Ainsi, tout comme à Pietracorbara, des houles de secteur Nord ont tendance à construire au Sud et détruire au Nord et inversement pour des houles de Sud. Ceci se vérifie notamment du 22 au 25/01/2017, du 27 au 30/01/2017 ou du 04 au 11/02/2017. Une construction sur le descendant des tempêtes est également notée les 15/02/2017, 26/02/2017, 06/03/2017 ou 28/03/2017.

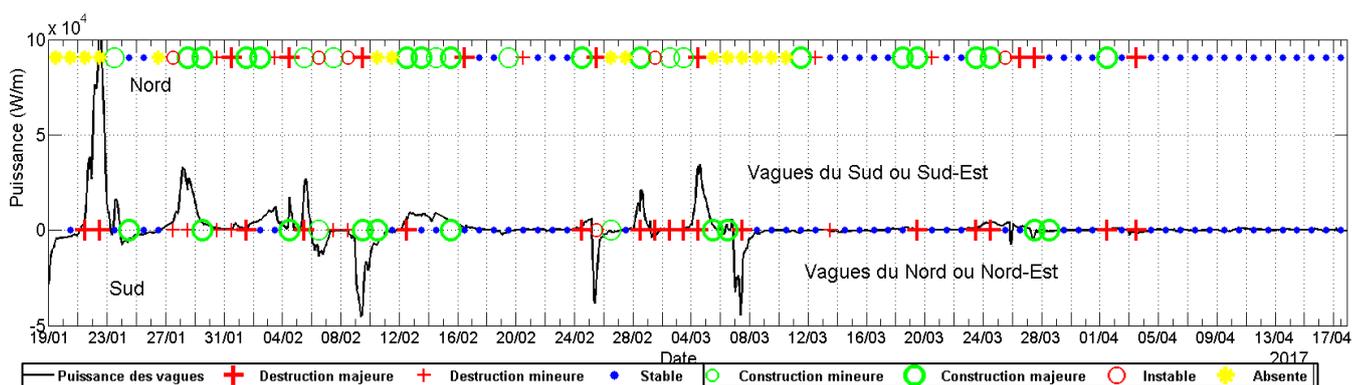


Illustration 22 – Evolution des banquettes de posidonie au Nord (ligne supérieure) et Sud (ligne inférieure) de la plage de Meria sur toute la période d'étude couplée à la puissance de la houle (Source : Puertos del Estado). Les valeurs positives indiquent des houles de direction Sud et les valeurs négatives des houles de direction Nord.

L'illustration 23 est un zoom sur la période du 08 au 14 Février 2017. Elle est caractérisée par des houles importantes de secteur Nord-Est du 08 au 09/02 avec un pic à 2,5 m (selon nos données) suivies de houles du secteur Sud-Est ne dépassant pas 1,75 m du 12 au 14/02 (Cf. Illustration 23.d)). L'illustration 23.a), b) et c) présente les images moyennées et redressées de la plage avant et après ces évènements. Les traits de côtes initiaux (pré-tempêtes) sont représentés par les pointillets rouges (07/02) et bleus (11/02). Des variations sont déjà bien visibles, en particulier au Nord de la plage.

L'illustration 23.e) et f) présente l'évolution du trait de côte entre ces dates consécutives. Les lignes rouges et vertes représentent ici l'évolution à l'échelle de 4 fois la réalité. Elles montrent un retrait au Nord et une accumulation au Sud après la tempête de Nord puis une accumulation importante sur toute la partie Nord et Centre suite à l'évènement de Sud.

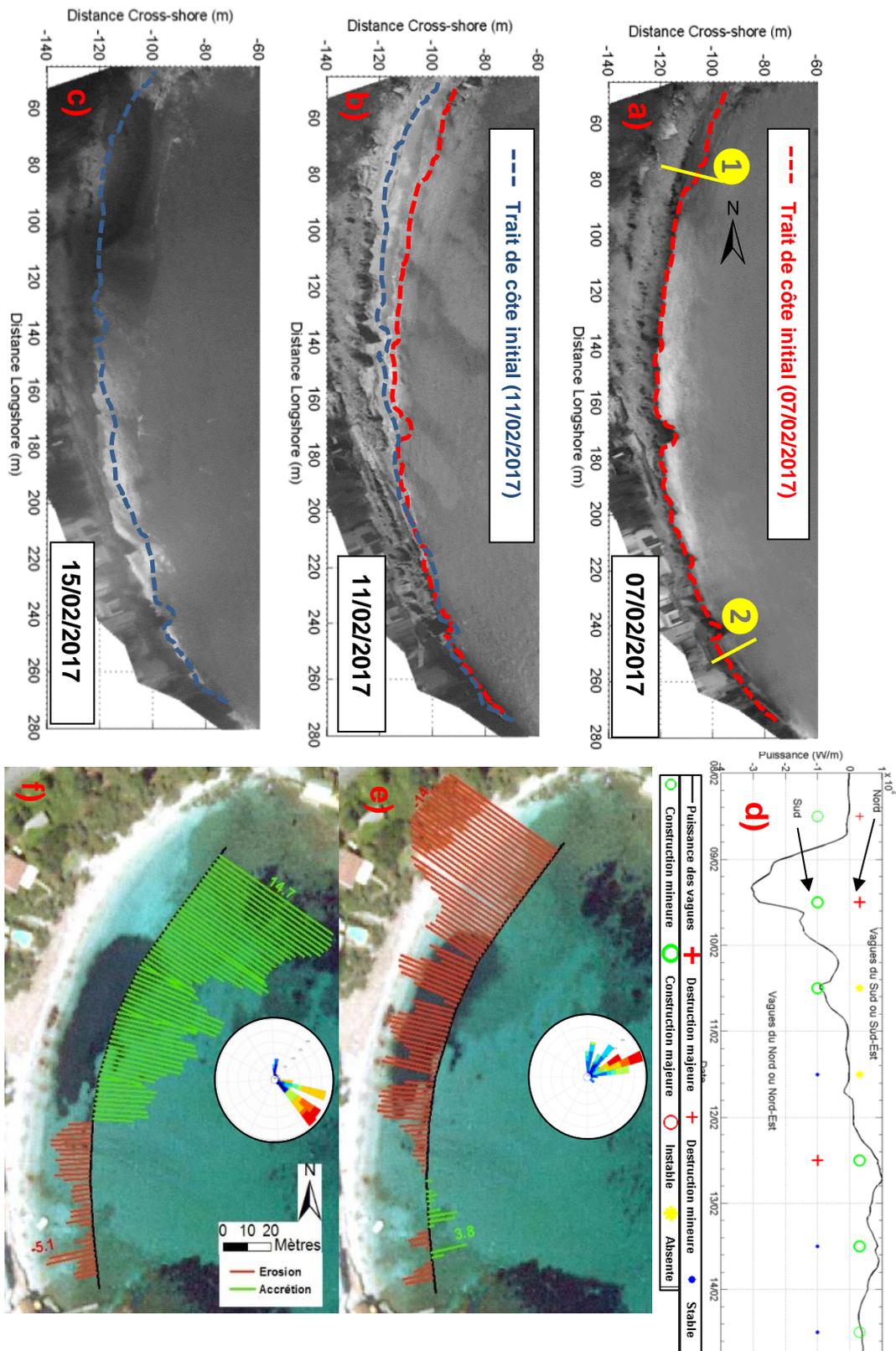
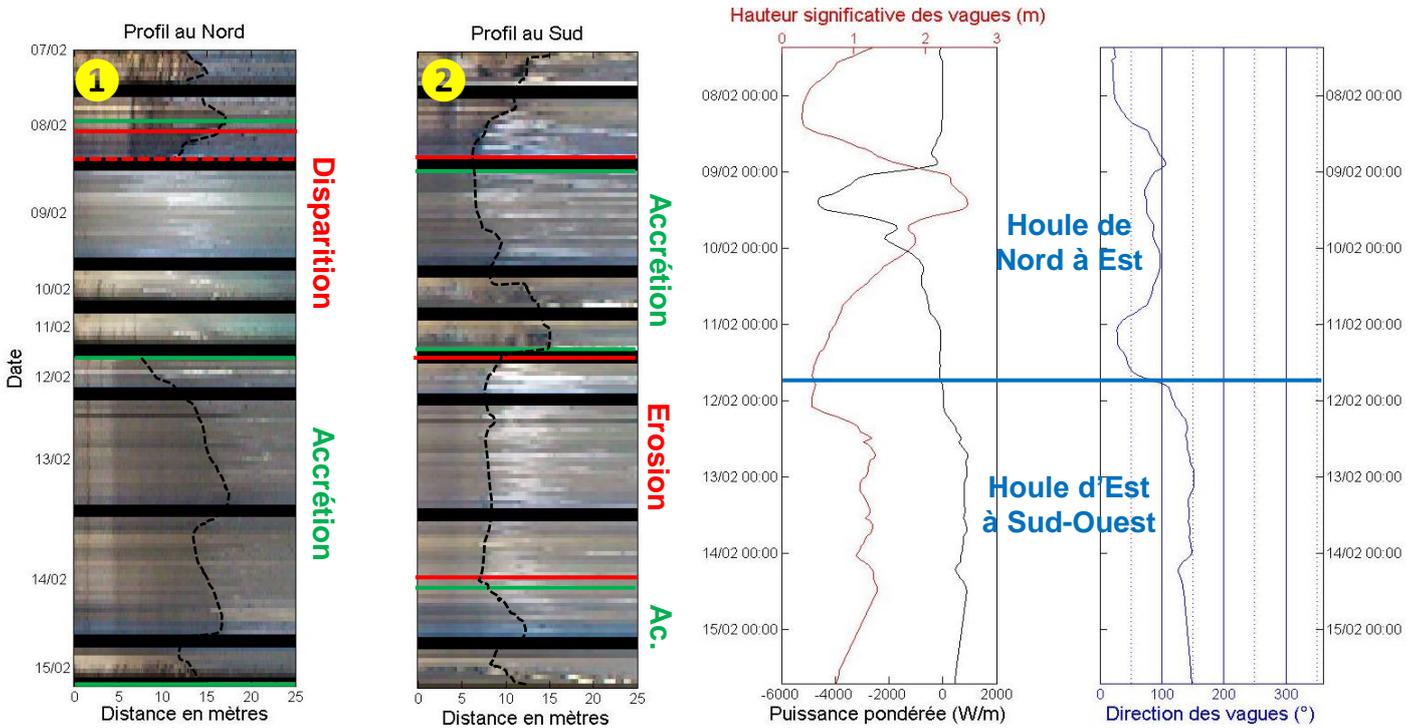


Illustration 23 – Images moyennées et redressées du 07 a), 11 b) et 15/02/2017 c), les traits de côte du 07 et 11 Février sont représentés en pointillés. Puissance de la houle couplée à la dynamique des banquettes au Nord et Sud de la plage d). Evolution du trait de côte sur la plage de Meria du 07 au 11/02/2017 e) et du 11 au 14/02/2017 f) couplée aux conditions hydrodynamiques (Puertos del Estado), sur fond orthophotographique (© IGN-BD\_ORTHO © 2007, Système de coordonnées : RGF 93 – Lambert 93).

Les profils time-stack de la même période constatent une évolution similaire (Cf. *Illustration 24*). Rappelons que l'angle normal de la plage de Meria est de  $120^\circ$  (Cf. *Partie 2.1*), les houles inférieures à cette valeur arrivent donc avec une incidence Nord. Le profil au Sud **2** commence par perdre de la banquette, puis en gagne dès lors que la houle augmente. La houle fluctue alors entre Nord et Est. Lorsque celle-ci vire au Sud-Est, les banquettes s'érodent à nouveau. Le profil Nord **1** subi d'abord un fort retrait suivi d'un dépôt important avec les houles de Sud-Est. Le rôle de la direction de la houle sur la dynamique des banquettes constaté sur cet exemple se vérifie tout au long de la période d'étude (et 15).



*Illustration 24 – Evolution de deux profils time-stacks au Nord et Sud de la plage de Meria couplés aux conditions hydrodynamiques (Puertos del Estado). Les différentes phases d'avancée et recul des banquettes sont différenciées par les lignes de couleurs. La limite banquette/eau est surlignée en pointillés noirs.*

### 4.2.3. Ostriconi

L'illustration 25 représente l'évolution des banquettes au Nord (ligne supérieure) et Sud (ligne inférieure) de la plage de l'Ostriconi couplée à la puissance de la houle au cours de la période d'étude. Notez que la plage de l'Ostriconi étant située à l'ouest, les puissances positives indiquent des houles de Nord et les puissances négatives de houles de Sud (l'inverse des sites précédents). Ce graphique met en avant 9 événements de Sud pour seulement 3 de Nord (dont un de faible envergure du 09 au 13/05) attestant d'une nette dominance des houles du Sud-Ouest sur cette plage, du moins pour la période du printemps 2017. Les houles de Sud entraînent très clairement une construction des banquettes au Nord comme par exemple du 17 au 21/03, le 10/04, du 17 au 18/04, du 23 au 25/04, le 30/04, du 02 au 04/05 et le 21/05. Les événements de Nord entraînent très clairement une avancée au Sud à l'image du 01 au 02/04, du 19 au 20/04 et du 09 au 13/05. Néanmoins, le comportement de cette plage apparaît plus complexe que les deux autres. En effet, sur le graphique, il est fréquent de noter une construction au Nord et au Sud simultanée, ce qui contrairement aux plages précédentes ne correspond pas à un dépôt généralisé en post-tempête mais plutôt à la construction en certains points localisés de banquettes au Nord comme au Sud. L'explication de ce phénomène sera abordée par la suite. L'illustration 25 présente une succession de deux événements hydrodynamiques représentatifs des comportements observés à l'Ostriconi. Le premier, apparaît du 02 au 04/04/2017 avec une direction Nord, il est suivi d'un second provenant du Sud du 10 au 12/04/2017 (Cf. Illustration 25.e)). L'illustration 25.a), b), c) et d) sont des images moyennées et redressées situées entre ces événements. Les traits de côtes pré-tempêtes sont représentés en pointillés rouges et bleus.

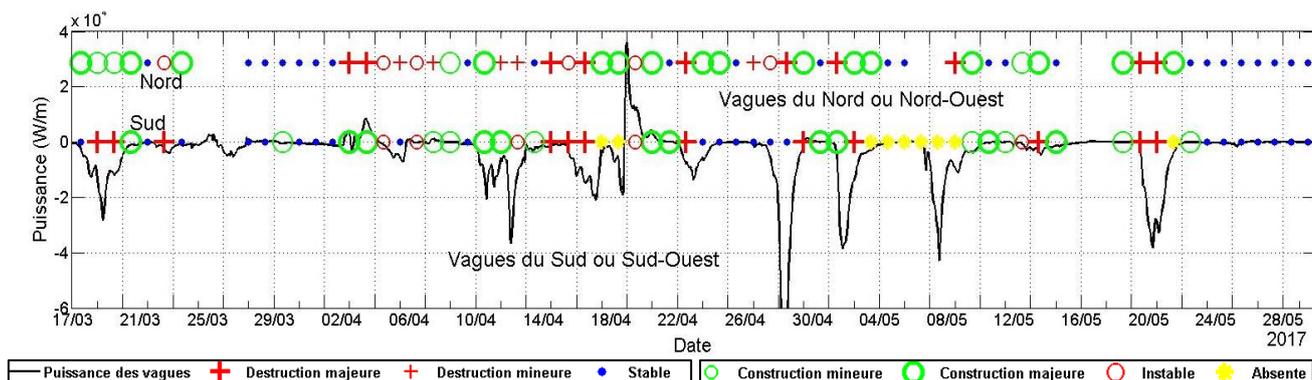


Illustration 25 – Evolution des banquettes de posidonie au Nord (ligne supérieure) et Sud (ligne inférieure) de la plage de Meria sur toute la période d'étude couplée à la puissance de la houle (Source : Puertos del Estado). Les valeurs positives indiquent des houles de direction Sud et les valeurs négatives des houles de direction Nord.

L'illustration 26.f) correspond à l'évolution du trait de côte entre le 01 et le 03 Avril 2017. Période caractérisée par des houles métriques du quart Nord-Ouest, elle a occasionné un transfert global de la posidonie vers le Sud avec formation d'une grosse banquette au Sud. L'illustration 26.b) présente l'évolution du trait de côte entre le 09 et le 11 Avril 2017 pour des houles de même ampleur mais de secteur Sud-Ouest, elles ont engendré un net déplacement de la posidonie vers le Nord.

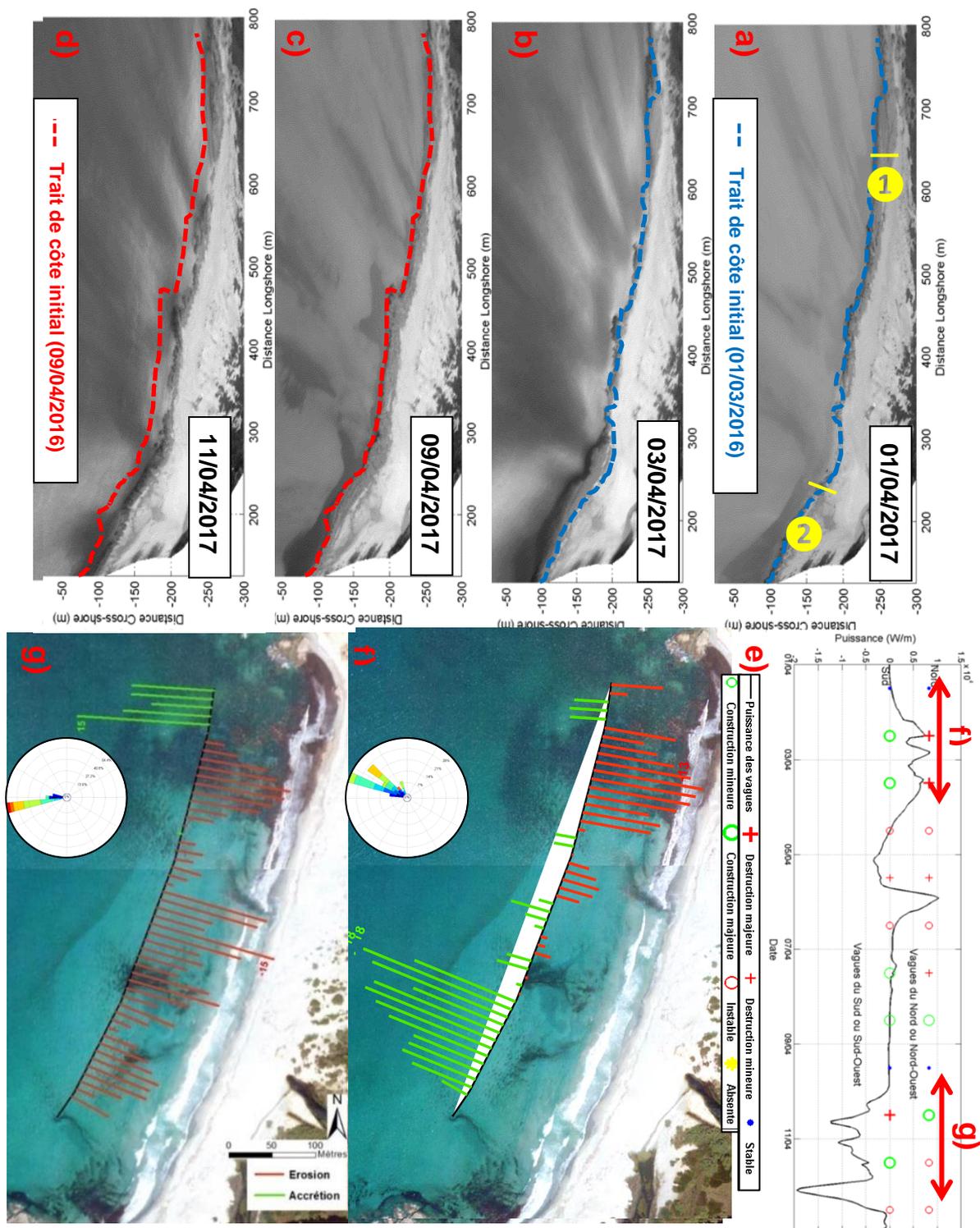


Illustration 26 – Images moyennées et redressées de la plage de l’Ostriconi du 01 a), 03 b), 09 c) et du 11/04/2017 d). Puissance de la houle en fonction de la dynamique des banquettes au Nord et Sud de la plage e). Evolution du trait de côte du 01 au 03/04/2017 f) et du 09 au 11/04/2017 g) couplée aux conditions hydrodynamiques (Puertos del Estado), sur fond orthophotographique (© IGN-BD\_ORTHO © 2007. Svtstème de coordonnées : RGF 93 – Lambert 93).

L’illustration 27 présente l’évolution de deux profils time-stack, un au Nord ① et un Sud ② pour les mêmes périodes. A savoir, du 01 au 03/04/2017 a) et du 09 au 11/04/2017 b). Ces

figures vérifient les tendances observées plus haut avec un retrait au Nord ainsi qu'une avancée au Sud des banquettes lors de la première phase puis vice-versa lors de la seconde phase. D'autre part, Le pic de houle du 02/04 entraîne un retrait global, le seuil de hauteur de vagues maximale de construction est donc dépassé, réciproquement, les banquettes se stabilisent le 09/04 lorsque la houle est au plus bas. Les changements d'intensité de la houle coïncident donc également avec la dynamique des banquettes.

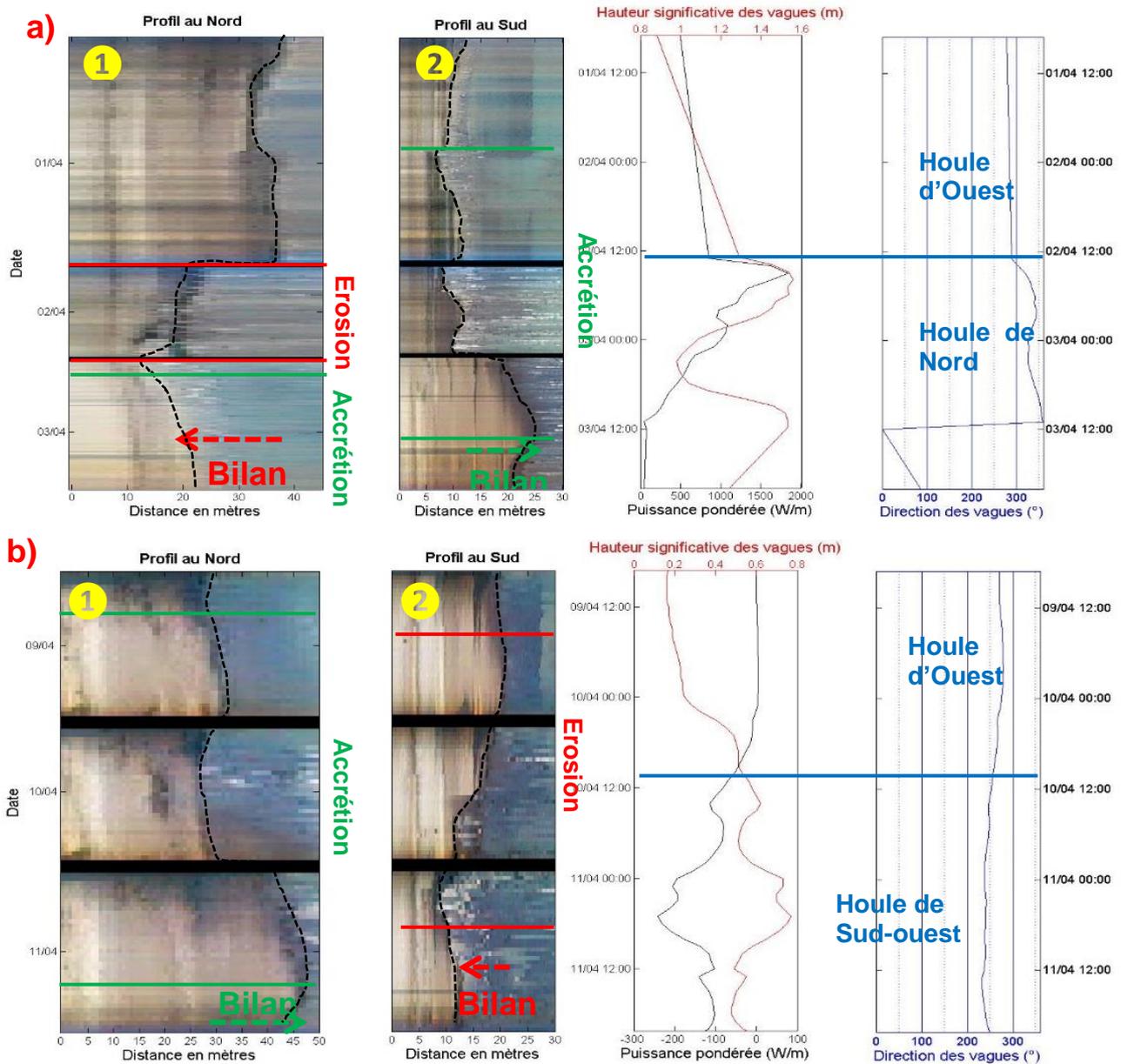


Illustration 27 – Suivi de deux profils Time-stacks au Nord et Sud de la plage de l'Ostriconi 01 au 03/04/2017 a) et du 09 au 11/04/2017 b). couplés aux conditions hydrodynamiques (Puertos del Estado). La limite banquette/eau est surlignée en pointillés noirs. Les différentes phases sont différenciées par des lignes de couleur.

Néanmoins, la plage de l'Ostriconi montre des résultats bien plus contrastés. Cette plage a la particularité de présenter des structures immergées bien marquées (identifiées sur les images moyennées), se rapprochant d'un système barre/chenal, qui pourrait influencer le transit de posidonie. En fonction des conditions hydrodynamiques, elles s'apparentent à des « Rythmic Bar and Beach » (RBR) ou des « Transversal Bar and RIP » (TBR) selon la classification de *Wright and Short 1987*. L'illustration 28 présente la position digitalisée sur une image moyennée a) des banquettes, structures immergées, chenaux (Cf. *Gallop et al. 2009*) et du panache de posidonie ainsi que leur position géo-référencée b). La posidonie au large forme une masse éparsée et diffuse alors que lorsqu'elle se rapproche du bord, elle se concentre dans les chenaux. Les banquettes, quant à elles, sont formées directement en face des chenaux. La présence du système Barres/chenaux semble donc être un facteur important gérant l'emplacement potentiel des banquettes. Les chenaux situés entre chaque barre fonctionneraient comme un rail pour la posidonie facilitant le passage de la barrière que constituent les structures immergées. Ils paraissent fonctionner tantôt vers le large (courants d'arrachement) détruisant la banquette et tantôt vers le rivage apportant de nouvelles feuilles sur la plage. L'illustration 28.c) est une image moyennée du 06 Avril 2016 de la plage de l'Ostriconi, sur laquelle se phénomène est particulièrement bien marqué. Cette dynamique des banquettes est vérifiée tout au long de l'étude.

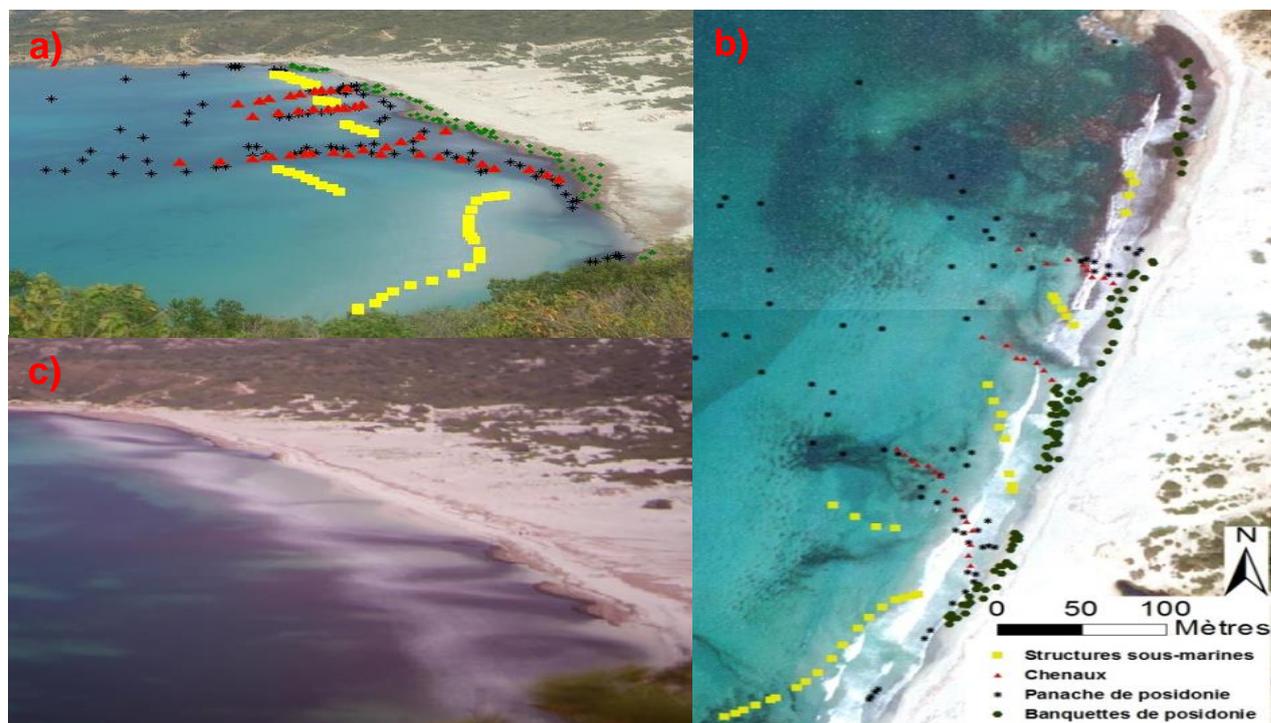


Illustration 28 – Position digitalisée des structures immergées, chenaux, panache et banquettes sur une image moyennée du 06/04/2017 de la plage de l'Ostriconi a). Equivalent géoréférencé sur fond orthophotographique (© IGN-BD\_ORTHO © 2007, Système de coordonnées : RGF 93 – Lambert 93) b).

Image moyennée du 06/04/2016.

#### 4.2.4. Dynamique générale

L'étude des trois sites a permis de dégager un comportement général des banquettes de posidonie. Les exemples précédents ont été choisis pour leur représentativité des tendances observées sur chaque plage pendant la période d'étude.

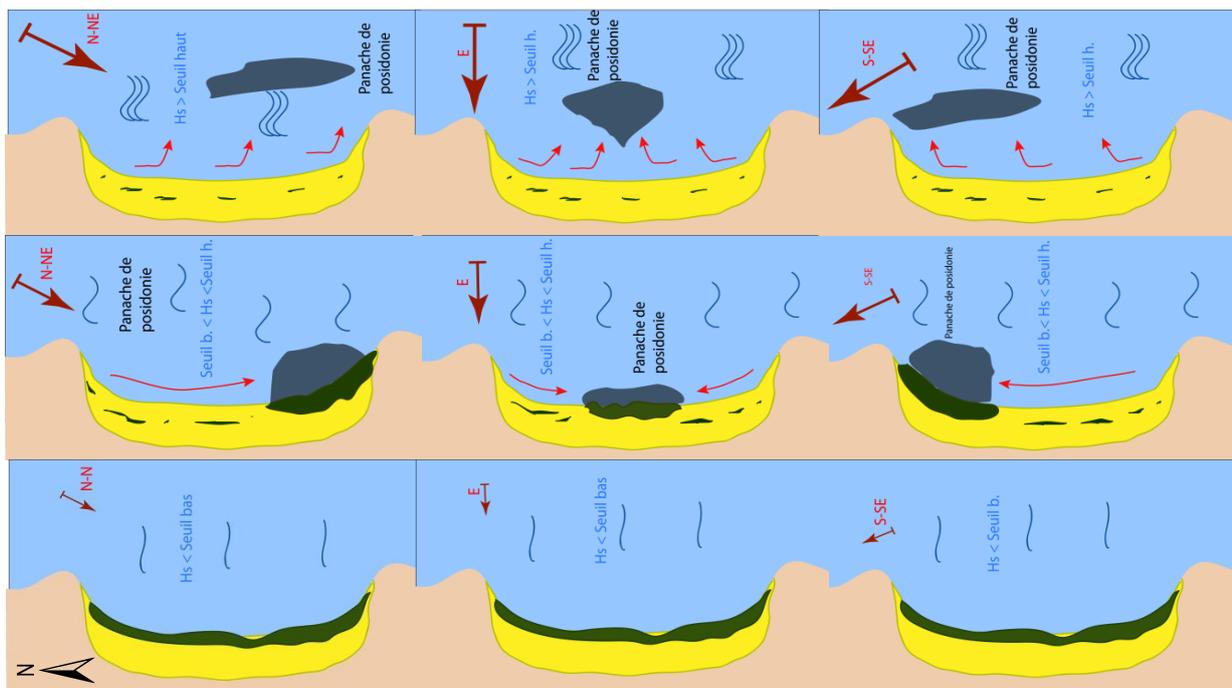
D'une part, la formation des banquettes est identique sur tous les sites. Deux mécanismes de dépôts ont été identifiés. Par accumulation latérale, la houle pousse les feuilles qui s'accumulent sur la plage (Cf. *Illustration 30.a*). Par projections successives, la houle vient frapper la banquette et une partie de la posidonie présente dans l'eau est projetée et se dépose par-dessus celle-ci (Cf. *Illustration 30.b*). L'accumulation latérale est généralement observée pour des houles faibles à modérées et la construction par projection pour des houles plus intenses.



*Illustration 30 – Construction par accumulation latérale a) et par projection b). La banquette fraîchement déposée est limitée par les pointillets.*

D'autre part, sur chaque site, les banquettes évoluent clairement et rapidement en fonction de la direction et de l'intensité de la houle. Lorsque les vagues sont en dessous d'un seuil bas, les banquettes restent stables et les feuilles en mer se déposent au fond de l'eau. Au-dessus d'un seuil haut, la tendance générale est à la destruction. Entre les deux, la plupart des fluctuations sont observées. La direction de la houle détermine ensuite les zones de construction et de destruction. Les houles de Nord entraînant un transfert vers le Sud et les houles de Sud un transfert vers le Nord. Ainsi, le comportement des banquettes suit la rotation de plage observée sur les plages de poche (i.e. *Bryan et al., 2013, Harley et al., 2015, Biausque et al., 2016*).

La morphologie des plages influence cette rotation. Par exemple, les banquettes sont plus solides au Nord de Pietracorbara et au Sud de Meria pour un régime de houle similaire. La plage



*Illustration 29 – Modèle conceptuel d'évolution des banquettes de posidonie sur une plage type.*

de l'Ostriconi, plus grande et pourvue de structures sédimentaires immergées répond encore différemment.

Le seuil bas de début de déplacement et le seuil haut de destruction peuvent différer en fonction des caractéristiques de chaque plage. Ils peuvent aussi varier en fonction de l'emplacement sur la plage et surtout de l'épaisseur de la banquette puisque plus la banquette est haute et compacte plus la houle devra être puissante pour la déstabiliser. Le comportement d'une plage de poche type, simplifiée, est présenté dans un modèle conceptuel en *Illustration 29*.

### 4.3. ROLE PROTECTEUR

Il existe donc plusieurs mécanismes et paramètres influant sur la formation et la destruction des dépôts dont découlent différents types de banquettes. L'effet protecteur peut être de différente nature et plus ou moins avéré selon le du type de construction.

#### 4.3.1. Posidonie immergée ou « panache de posidonie »

Les feuilles de posidonie dans l'eau ou « panache de posidonie », fluctuent au gré de la houle. Lorsqu'elles se trouvent en position proche du rivage, leur concentration a tendance à augmenter. L'eau prend alors un aspect sombre et brillant. Cette forte concentration modifie les propriétés de l'eau et la rend plus visqueuse, ce qui peut localement atténuer considérablement le déferlement. Les images moyennées et redressées présentées en *Illustration 31.a) et b)* font ressortir ce comportement. La posidonie même immergée semble donc atténuer la houle. La protection générée par le panache reste toutefois limitée puisque au-delà d'un seuil une grande partie des feuilles est emportée au large et la concentration du panache chute.

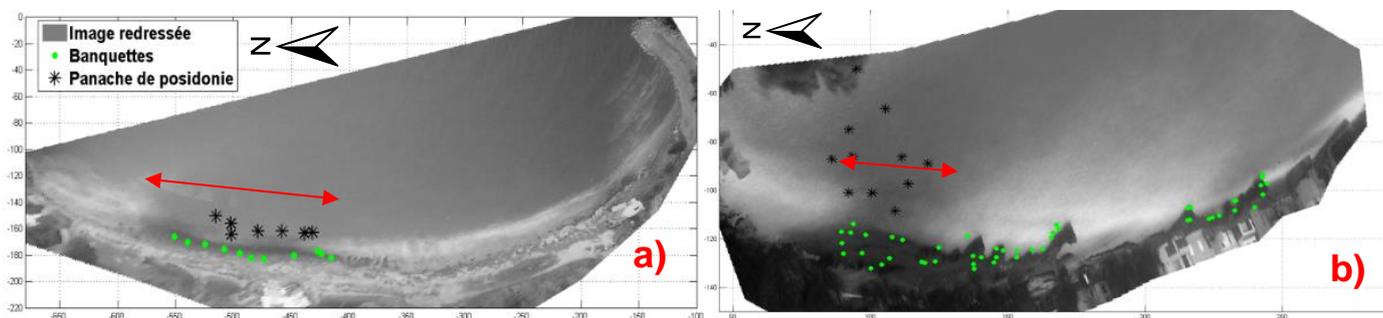


Illustration 31 – Images moyennées et redressées de la plage de Pietracorbara a) et Meria b), les points verts représentent la position des banquettes et les étoiles noires celle du panache.

#### 4.3.2. Posidonie émergée ou « banquettes de posidonie »

Au-dessus d'un seuil haut de houle, la tendance générale est à la destruction (Cf. Partie 4.1.4). Les vagues viennent frapper les banquettes avec force, ce qui les déstabilisent et engendre un retrait progressif. La rapidité de ce recul dépend de l'état de maturité de la banquette et du temps de montée en puissance de la houle. Des paramètres secondaires tels que la pression atmosphérique ou le vent on-shore peuvent accentuer la surcote et donc l'érosion des banquettes. De manière générale, une tempête avec un pic  $\geq 2$  m (selon nos données) entraîne la destruction presque totale des banquettes conventionnelles (Cf. *Illustration 19, 13 et 16*), seules les parties les plus hautes peuvent éventuellement résister. La protection procurée par ce type de banquettes serait donc limitée à la période de désassemblage.

Rappelons que les houles du Sud ont tendance à déplacer la posidonie vers le Nord, c'est donc la partie Sud de la plage qui est la plus exposée à ces évènements. L'illustration 31 montre l'évolution du trait de côte après deux tempêtes de direction Sud sur la plage de Pietracorbara, la première montre l'évolution entre le 31 Mars et le 6 Avril 2016 a) et la seconde entre le 28 Février et le 5 Mars 2017 b). Dans le premier cas, il n'y a pas de banquette au Sud de la plage avant la tempête alors que dans le second cas une banquette estimée à 1,3 m de haut et 15 m de large en moyenne est présente. La banquette disparaît dans son intégralité pendant l'évènement. Néanmoins, le recul estimé entre les traits de côte avant et après tempête est inférieur lorsqu'il y a une banquette à l'état initial. Alors que la houle était bien plus violente dans l'exemple avec posidonie. Notons que l'extrême Sud de la plage subie tout de même un recul conséquent, cela pourrait s'expliquer par la faible ampleur de la banquette à cet endroit qui représente ici seulement 0,4 m de haut pour 2 m de large. Ce qui suppose que la quantité de posidonie serait un paramètre important dans la protection engendrée par la banquette. Puisque plus le volume de celle-ci sera important, plus son démantèlement demandera du temps et de l'énergie.

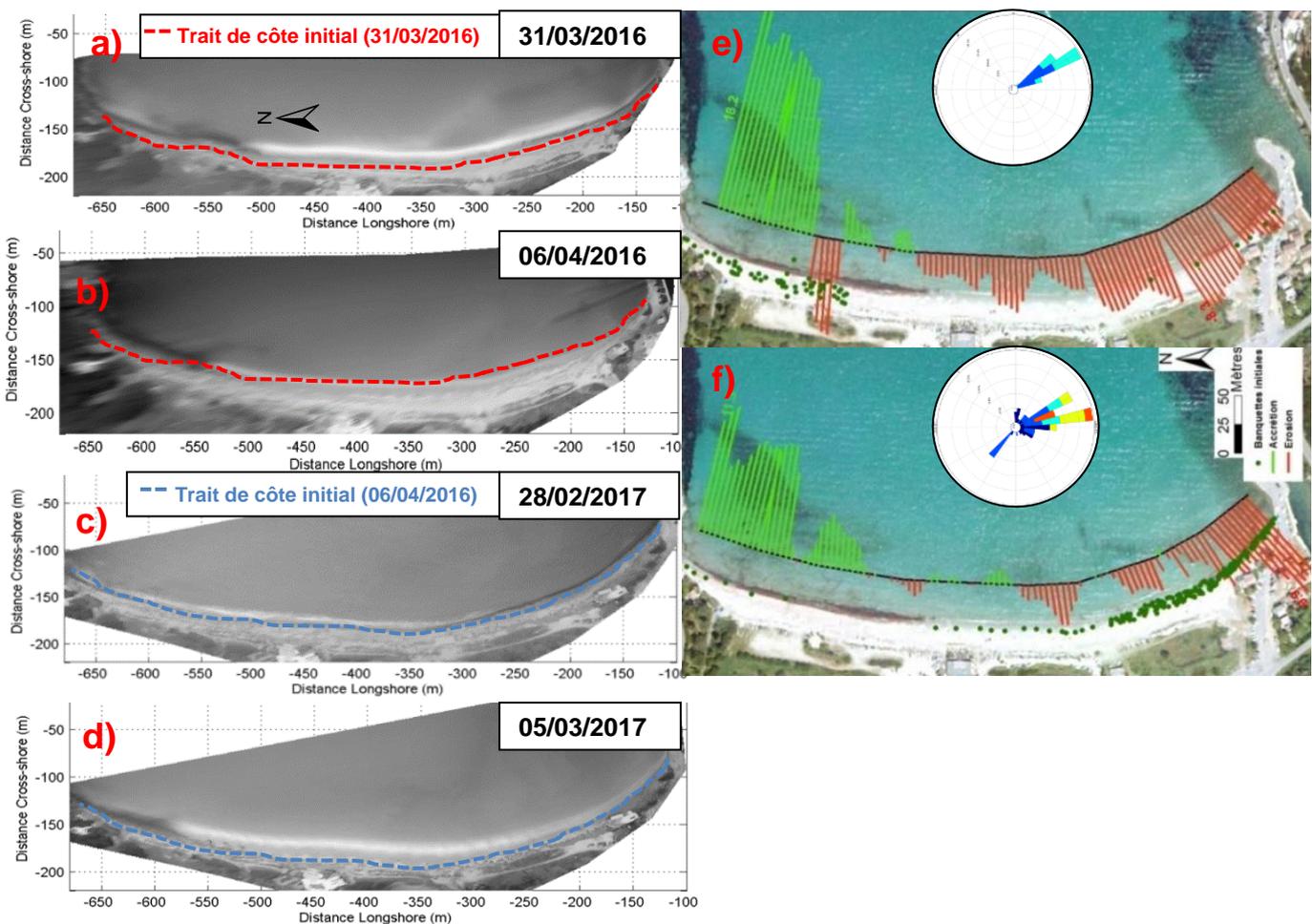
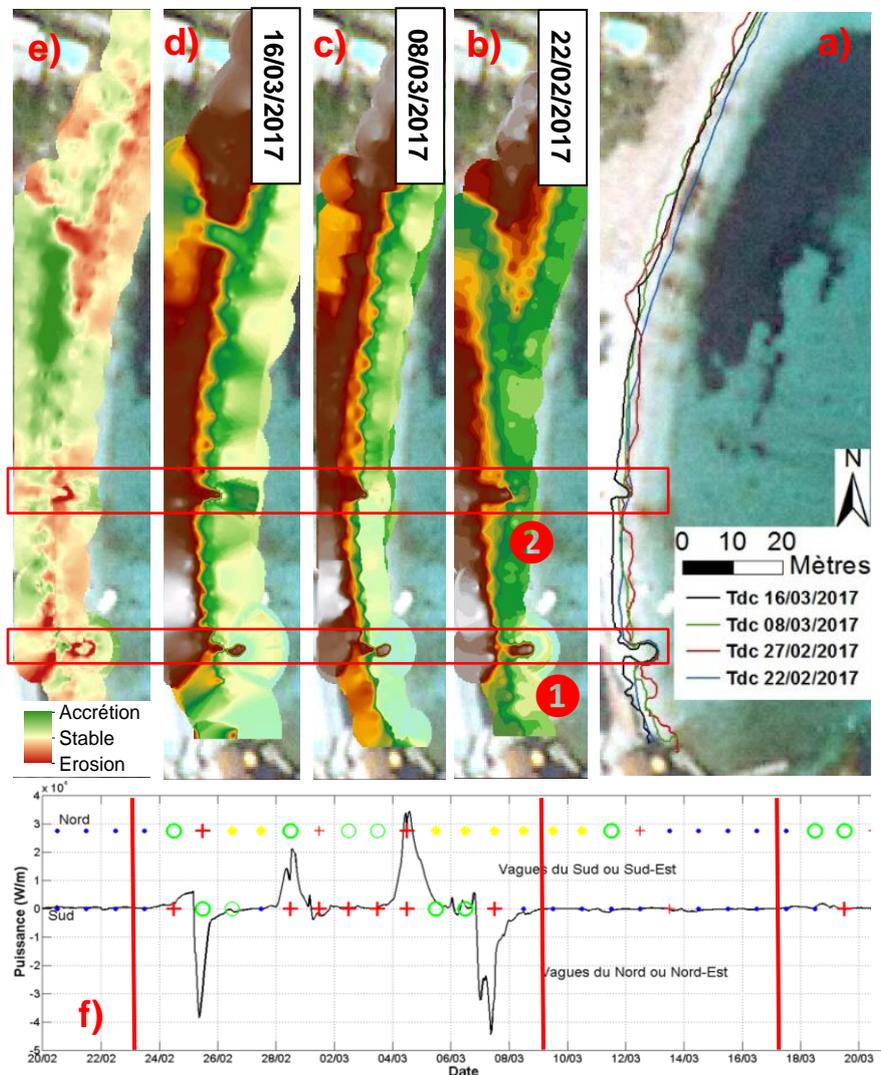


Illustration 32 – Evolution du trait de côte sur la plage de Pietracorbara du 31/03 au 06/04/2016 a) et du 28/02 au 05/03/2017 b) couplée aux conditions hydrodynamiques (Puertos del Estado, sur fond cartographique (© IGN-BD\_ORTHO © 2007, Système de coordonnées : RGF 93 – Lambert 93).

### 4.3.3. Cas particuliers

En revanche, une banquette au Sud de la plage de Meria ne suit pas la dynamique évoquée plus haut. En effet, elle a résisté à plusieurs tempêtes et remaniements. Elle se présente sous la forme de plusieurs mottes ou éperons dont certains sont rattachés entre eux et d'une épaisseur pouvant dépasser les 3 mètres (Cf. *Illustration 32*). Ces formations sont facilement identifiables lors des événements de tempêtes quand la majeure partie des banquettes est détruite. L'un de ces éperons représente une avancée d'environ 4 m sur le reste du trait de côte (❶). Leur évolution a été observée tout au long de l'étude. L'éperon situé le plus au centre (❷) a été rapidement détruit au cours d'un événement atteignant les 2 mètres de houle, notons qu'il était positionné dans la zone la moins protégée de la plage. Les autres structures ont résisté pendant toute la période d'étude soit 5 mois.

Le suivi du trait de côte obtenu au GPS différentiel (Cf. *Illustration 33.a*) vérifie la stabilité observée sur les images. Malgré des changements majeurs sur toute la plage engendrés par plusieurs tempêtes dépassant les 2 mètres de houles, les deux éperons les plus avancés (numéros 1 et 2 sur l'*Illustration 32 et 24*) n'ont quasiment pas reculé.



*Illustration 33 – Evolution du trait de côte (DGPS) a), modèle numérique d'élévation b), c), d) et différentiel d'élévation entre le 22/02 et le 16/03/2017 e) au Nord de la plage de Meria, sur fond orthophotographique (© IGN-BD\_ORTHO © 2007, Système de coordonnées : RGF 93 – Lambert 93). Puissance de la houle (Puertos del Estado) couplée à la dynamique des banquettes.*

L'illustration 33.b), c) et d) expose un modèle d'élévation de la plage obtenu à l'aide de campagnes topographiques ciblées autour d'évènements énergétiques de Février à Mars 2017. Les éperons y sont clairement identifiables. Entre chaque campagne, des variations métriques d'élévations sont observées correspondants aux changements de position de la posidonie. L'illustration 33.e) représente le différentiel topographique entre le 22/02 et le 16/03/2017. Les éperons semblent suivre une évolution différente et reculer progressivement contrairement au reste de la posidonie dont la position fluctue entre avec chaque tempête. Ils tendent à se détacher du trait de côte avec le temps, phénomène particulièrement visible sur l'éperon numéro 1.

Ce type de formation fixe donc le trait de côte mais sur une ampleur limitée. Cette catégorie de banquette n'a été observée à l'heure actuelle que sur cette plage. D'autres cas similaires sont nécessaire afin d'évaluer les modalités de formation et destruction, particulièrement en termes d'épaisseur et de temps de compaction.

## 5. Conclusion

Dans le cadre de cette étude, un protocole de suivi de la dynamique des banquettes de posidonies ainsi que de leur rôle protecteur sur l'évolution de la position du trait de côte a été mis en place sur trois sites pilotes, Pietracorbara, Meria et l'Ostriconi.

Le suivi a été réalisé au moyen d'appareils photographiques time-lapse entre mars 2016 et mai 2017.

Ce suivi a pu mettre en avant la forte mobilité de ces banquettes durant un événement énergétique ; en l'espace de quelques heures la plage peut subir plusieurs phases de retrait et de dépôt des banquettes. La dynamique des banquettes semble être directement liée à la structure de la banquette, à la hauteur et direction de provenance de la houle.

Des seuils énergétiques liés à la hauteur de la houle semble également se dégager, un seuil bas en dessous duquel aucune mobilité de la banquette n'est observée, et un seuil haut à partir duquel l'ensemble de la banquette est totalement détruite. Ces seuils sont variables d'une plage à l'autre en fonction notamment de la structure de la banquette présente sur la plage.

Le rôle protecteur des banquettes de posidonies a également pu être mis en évidence de plusieurs manières, que ce soit sur l'atténuation des vagues à la côte ou sur une réelle limitation du recul du trait de côte.

Ces informations permettent de mieux comprendre la dynamique des banquettes et d'entrevoir des possibilités de gestion de ces banquettes pour une meilleure protection de la plage vis-à-vis de l'érosion côtière.

Il reste cependant des incertitudes sur le volume de feuilles mortes de posidonies nécessaire à une bonne protection de la plage, sur l'interaction entre l'herbier submergé et les feuilles mortes déposés sur la plage, sur la détermination des seuils de déplacement et destruction des banquettes...

Par ailleurs, l'objectif de l'étude étant la compréhension du rôle de la dynamique des banquettes sur l'évolution du trait de côte, les suivis n'ont pas concernés des périodes d'enlèvement des banquettes. Afin de bien caractériser l'effet de cet enlèvement avant la période estivale, un suivi spécifique à plus long terme devra être mis en place, de préférence sur plusieurs sites présentant des modes de gestion différents de ces banquettes.

Ce suivi photographique montre le potentiel de cette technologie pour l'observation au sens large du littoral. De nombreuses autres applications sont possibles comme les limites atteintes par la mer lors d'un événement tempétueux, le suivi de la fréquentation des plages, le comptage de bateaux au mouillage, le suivi de la végétation ou de la présence d'espèces telles que les oiseaux par exemple...



## 6. Bibliographie

**Abadie A**, Lejeune P, Pergent G, Gobert S (2016). From mechanical to chemical impact of anchoring in seagrasses : The premises of anthropogenic patch generation in *Posidonia oceanica* meadows. *Marine Pollution Bulletin*, Volume 109, Issue 1, 15 August 2016, 61–71.

**Agostini S.**, Marchand B., Pergent G. (2002). Temporal and spatial changes of seagrass meadows in a Mediterranean coastal lagoon. *Oceanologica Acta* Volume 25, Issue 6, November–December 2002, 297–302.

**Almar R.**, Bonneton P., Senechal N., & Roelvink D. (2009). Wave celerity from video imaging: A new method. Paper presented at the *Proceedings of the Coastal Engineering Conference*, 661-673.

**Astruc D.**, Cazin S., Cid E., Eiff O., Lacaze L., Robin P., Toublanc F., Cáceres I. A stereoscopic method for rapid monitoring of the spatio-temporal evolution of the sand-bed elevation in the swash zone. *Coastal Engineering*. 60. P. 11-20.

**Balouin Y.**, Balouin, Y., Belon, R., 2014. Evolution of Corsican pocket beaches. In: Green, A.N. and Cooper, J.A.G. (eds.), *Proceedings 13th International Coastal Symposium* (Durban, South Africa), *J. of Coast. Res.*, Special Issue No. 70, pp. 096-101, ISSN 0749-0208.

**Bailey**, D.G., and R.D. Shand, (1996). Determining large-scale sand bar behaviour, *Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing*, Lausanne, Switzerland, pp. 637-640.

**Biausque**, M., Senechal, N., Blossier B., Bryan K.R., (2016). *J. of Coast. Res.*,: Special Issue 75 - *Proceedings of the 14th International Coastal Symposium*, Sydney, 6-11 March 2016: 353-357. doi: <http://dx.doi.org/10.2112/SI75-071.1>

**Bryan**, K. R., Foster, R., & MacDonald, I., 2013. Beach Rotation at Two Adjacent Headland-Enclosed Beaches. *J. of Coast. Res.*, 2095-2100.

**Cancemi G., Buron K., 2008.** Erosion du littoral et suivi des banquettes de Posidonie sur les plages de Corse. *DIREN Corse / E.V.E.Mar.*, 42 p.

**Cancemi G., Buron K., 2010.** Récolte des données sur le retrait des banquettes de posidonie par les communes littorales corses et sensibilisation. Rapport *EVEMar /DREAL Corse*, 46 p.

**Gallop**, S. L., Bryan, K. R., & Coco, G. (2009). Video observations of rip currents on an embayed beach. *Journal of Coastal Research*, (SPEC. ISSUE 56), 49-53.

**Gómez-Pujol**, L., Orfila, A., Álvarez-Ellacuría, A., Terrados, J. and Tintoré, J., 2013. *Posidonia oceanica* beach-caster litter in Mediterranean beaches: a coastal videomonitoring study. *Proceedings 12th International Coastal Symposium* (Plymouth, England), *J. of Coast. Res.*, Special Issue No. 65, pp. 1768-1773, ISSN 0749-0208.

**Harley**, M.D., Turner, I.L., Short A.D., (2015). New insights into embayed beach rotation: The importance of wave exposure and cross-shore processes. *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 120, 1470–1484, doi:10.1002/2014JF003390.

**Holland**, K.T., R.A. Holman, T.C. Lippmann, J. Stanley, and N. Plant, (1997). Practical use of video imagery in nearshore oceanographic field studies, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 22, 81-91.

**Holman** R.A., Asbury H., Sallenger Jr., Lippman T.C., Haines J.W. (1993). The Application of Video Imagery to the Study of Nearshore Processes. *Oceanography*. Vol. 16. No. 3. p. 78-85.

**Hsu** J.R.C., Silverster R., Xia Y.M. (1989). Generalities on static equilibrium bays. *Coastal Engineering*, Vol. 12, pp 353-369. [http://dx.doi.org/10.1016/0378-3839\(89\)90012-4](http://dx.doi.org/10.1016/0378-3839(89)90012-4)

**Leredde** Y., Begny K., Michaud H., Jacob C., Schwartz T., Thorin S., Marsaleix P. (2016). L'atténuation des vagues par les herbiers de Posidonies, un service écosystémique contre l'érosion côtière. *XIVèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil Toulon* doi:10.5150/jngcgc.2016.063

**Lippman** T.C., and Holman R.A. (1989). Quantification of Sand Bar Morphology: A Video Technique Based on Wave Dissipation. *J. of Geophys. Res.*, Vol. 94, NO. C1, p. 995-1011.

**Loureiro** C., Ferreira O., Cooper J.A.G. (2009). Contrasting Morphologic behavior at embayed beaches in Southern Portugal. *J. of Coast. Res.*, Vol. SI56pp 83-87.

**Palmsten** M.L., Holman R.A. a Laboratory investigation of dune erosion using stereo video. *Coastal Engineering*. 60. p. 123-135.

**Short** A.D., Masselink G. (1999). Embayed and structurally controlled beaches. In: Short A.D. (Ed.), *Handbook of beach and shoreface dynamics*. John Wiley and Sons, Chichester, pp 230-249.

**Simeone**, S., De Falco, G. (2013). Posidonia oceanica banquette removal: sedimentological, geomorphological and ecological implications. Proceedings 12th International Coastal Symposium (Plymouth, England *J. of Coast. Res.*, Special Issue No. 65, pp. 1045-1050, ISSN 0749-0208.

**Simeone**, S., De Falco, G. (2012). Morphology and composition of beach-cast Posidonia oceanica litter on beaches with different exposures. *Geomorphology* 151-152, p. 224–233.

**The WAMDI GROUP**®, (1988). The WAM Model – A Third Generation Ocean Wave Prediction Model.

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

**Wright**, L.D., Short, A.D. (1984) Morphodynamic variability of surf zone and beaches: a synthesis. *Mar. Geol.* 56, p. 93–118.

**Yasso**, W. E. (1965). Plan Geometry of Headlands-Bay Beaches. Department of Geology, Columbia University, 30 pages



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](http://www.brgm.fr)

**Direction régionale du BRGM en Corse**

Immeuble Agostini  
ZI de Furiani

20 600 – Bastia – France

Tél. : 04 95 58 04 33