

**Suivi par vidéo numérique
l'expérimentation de techn
protection du littoral du lido c
– Volume 1 : Atténuateur
et recha**

BRGM/RP-65607-FR

Janvier 2016

Suivi par vidéo numérique de l'expérimentation de techniques de protection du littoral du lido de Sète à Marseillan – Volume 1 : Atténuateur de houle et rechargement

Rapport final

BRGM/RP-65607-FR

Janvier 2016

Étude réalisée dans le cadre des opérations (projets)
de Service public du BRGM 2014 PSP14LRO13

Y. Balouin

Avec la collaboration de : **Y. Colombet et F. Longueville**

Vérificateur :

Nom : Mallet Cyril

Date :

Signature :

Approbateur :

Nom : Blum Ariane

Date :

Signature :

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



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés : Lido, système ARGUS, vidéo numérique, trait de côte, barres d'avant-côte

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

Balouin, Y., Colombet, Y. et Longueville, F. (2016) – Suivi par vidéo numérique de l'expérimentation de techniques de protection du littoral du Lido de Sète à Marseillan – Rapport final. BRGM/RP-65607-FR, 48 p., 35 ill., 1 annexe.

Synthèse

Cette étude s'inscrit dans le projet de sauvegarde du lido de Sète à Marseillan. Thau Agglo a entrepris une politique innovante de défense du littoral avec le recul stratégique de la route littorale et l'expérimentation de techniques de défense contre l'érosion : un géotextile atténuateur de houle, implanté sur l'avant-côte et un système de drainage de plage ©Ecoplage. L'évaluation de ces expérimentations nécessite un suivi adapté permettant de mesurer les effets de ces systèmes sur l'évolution du littoral à moyen (quelques années) et long-terme (quelques décennies), mais également à court-terme lors des tempêtes. C'est dans ce contexte que le BRGM, en partenariat avec Thau Agglo, a engagé la mise en place d'un dispositif de suivi du littoral par vidéo numérique.

Le dispositif, de type ARGUS, a été implanté en avril 2011 par le BRGM et DELTARES (représentant ARGUS en Europe). L'installation est composée de deux mâts situés sur la partie Nord-Est du Lido, permettant le suivi d'une zone de 4 km entre le triangle de Villeroy et les trois digues. Ces mâts sont équipés de 5 et 3 caméras, reliées à un ordinateur d'acquisition et au réseau téléphonique pour le transfert d'images.

Ce rapport présente les résultats du suivi d'avril 2011 à Septembre 2015. Cette période comporte un suivi témoin (avant-travaux) et une période de suivi post-installation de l'atténuateur de houle. Les principaux indicateurs de suivi sont les positions du trait de côte et des barres d'avant-côte, à plus ou moins haute-fréquence, combinées aux mesures hydrodynamiques (houle, niveau d'eau) existantes. Sont présentées à la fois l'évolution à moyen terme et les évolutions lors des tempêtes.

Les résultats du suivi pour la période avril 2011 à septembre 2015 ont permis de mettre en évidence plusieurs caractéristiques de l'évolution du site :

- La mise en place du géotextile a entraîné dans un premier temps la quasi-linéarisation de la barre interne et le début de sa rotation pour se positionner parallèlement à l'ouvrage lors de la tempête de déc. 2013. En raison du fort couplage entre la plage émergée et la barre, le trait de côte a également tourné pour se mettre parallèle au géotextile et la barre, ce qui s'est traduit par une avancée de près de 15 m en face de l'ouvrage. Suite à cette rotation et linéarisation de la barre et du trait de côte, le système plage-avant-côte est resté quasi-stable ;
- La rotation de la barre en face du géotextile a également eu des effets sur la côte adjacente. En effet, une rupture de la barre a été observée à environ 800 m au sud-ouest de la zone de l'atténuateur. Cette rupture, liée à la rotation de la barre interne, a entraîné la migration vers le large de l'ancienne barre interne, dite résiduelle, et l'apparition d'une nouvelle barre proche de la côte ;
- Les barres et le trait de côte se sont par la suite stabilisés, formant un système complètement uniforme longitudinalement.

Le positionnement de l'atténuateur, et l'observation avant/après travaux permettent de tirer quelques conclusions sur le fonctionnement du système littoral et les effets induit par le géotextile :

- Sur la plage émergée, on note une avancée significative du trait de côte après installation du géotextile, puis une stabilisation. Les tridimensionnalités de la plage ont disparues, et les points sensibles d'érosion également. La résilience aux tempêtes la plus importante est très bonne en comparaison avec les événements similaires avant le déploiement de l'ouvrage ;
- Sur l'avant-côte, la barre interne s'est linéarisée parallèlement à l'ouvrage, permettant une atténuation plus homogène des vagues de tempête sur le littoral. L'effet s'est propagé sur la côte adjacente et on observe aujourd'hui une barre longitudinale parallèle à la côte sur l'ensemble du site.

Au vu de ces évolutions morphologiques, l'atténuateur a eu des effets très positifs sur cette partie du littoral qui semble plus stable et beaucoup plus résilient aux tempêtes.

Quelques évolutions restent à surveiller, et notamment l'apparition d'instabilités de la barre face aux extrémités du géotextile. De même, une canalisation des courants entre l'ouvrage et la côte est probable, et son effet sur la vitesse de dérive littorale reste à évaluer.

La poursuite du suivi, et la modélisation hydrodynamique permettront de mieux comprendre ces évolutions et de déterminer les facteurs ayant permis ces effets positifs de l'ouvrage.

Sommaire

1. Introduction	9
1.1. PROBLEMATIQUE	9
1.2. OBJECTIFS	12
2. Présentation du système de suivi vidéo sur le lido de Sète.....	15
2.1. LE SYSTEME ARGUS.....	15
2.2. IMPLANTATION SUR LE LIDO DE SETE	15
2.3. CARACTERISTIQUES DU SYTEME ARGUS DE SETE	16
3. Synthèse des acquisitions vidéo d'avril 2011 à Septembre 2015 (53 mois)....	20
3.1. IMAGES ET ECHANTILLONNAGE DE PIXELS OBTENUS	20
3.2. ANALYSES REALISEES	21
4. Résultats du suivi vidéo.....	24
4.1. CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES PENDANT LA DUREE DU SUIVI	24
4.2. EVOLUTION DE LA POSITION DU TRAIT DE COTE	26
4.3. EVOLUTION DU LITTORAL DANS LA ZONE AVANT LE DEPLOIEMENT DE L'ATTENUATEUR DE HOULE.....	29
4.3.1. Etude de la morpho-dynamique du système plage/avant-plage avant installation du géotextile	29
4.3.2. Morpho-dynamique naturelle de la zone Nord (400 m < Yargus < 2550 m)	30
4.3.3. Morphodynamique naturelle de la zone Sud (-1500 m < Yargus < 400 m)	36
4.4. EVOLUTION DU LITTORAL APRES LE DEPLOIEMENT DE L'ATTENUATEUR DE HOULE	39
4.4.1. Morpho-dynamique de la zone Nord juste après installation (400 m < Yargus < 2550 m)	39
4.4.2. Morpho-dynamique de la zone Nord après la période tampon	43
4.4.3. Morpho-dynamique de la zone Sud après installation du tube	43
4.5. ANALYSE DE L'EVOLUTION EVENEMENTIELLE AVANT/APRES INSTALLATION DU TUBE GEOTEXTILE	46
4.5.1. Analyse des réponses aux tempêtes fréquentes	46
4.5.2. Analyse des réponses aux tempêtes très énergétiques	47
4.5.3. Incidence sur le jet de rive, la submersion de la plage, et les dégâts en pied de dune	49

4.6. ANALYSE DES EVOLUTIONS LIEES AU RECHARGEMENT DE JANVIER 2015	50
1.1. Suivi de la période de rechargement du site	50
1.2. Evolution événementielle suite au rechargement.....	52
1.3. Action de la dérive littorale et transfert sableux vers la zone adjacente au SO	53
5. Conclusions sur les évolutions observées et les effets de l'atténuateur de houle et du rechargement sur le littoral du Lido.....	55
5.1. SYNTHÈSE DES EVOLUTIONS OBSERVEES DE 2011 A 2015	55
5.2. EVALUATION DE L'EFFICACITE DE L'ATTENUATEUR.....	57
5.3. POINTS DE VIGILANCE A SUIVRE.....	58
6. Bibliographie.....	61

Liste des illustrations

Illustration 1 – Localisation des ouvrages expérimentaux de protection du littoral (Egis-Eau, 2009).	10
Illustration 2 – Schéma de fonction du système drainant ©Ecoplage.	10
Illustration 3 – Schéma en coupe d'un ouvrage atténuateur de houle en géotextile (Egis-Eau, 2009).	11
Illustration 4 – Opération de rechargement de plage face à l'atténuateur de houle, image de la caméra 6 le 15/01/2015.;	11
Illustration 5 – Position des 2 mâts implantés sur le Lido de Sète et champs de vision des 8 caméras (fond © Orthophoto IGN).....	16
Illustration 6 - Photos des 3 caméras (C6,C7 et C8) du mât n°1 (à gauche) et des 3 points de vue correspondants.	17
Illustration 7 - Point de vue des 5 caméras (C5,C4,C3,C2 et C1) du mât 2.....	17
Illustration 8 - Types d'images collectées : image instantanée (en haut à gauche), image moyennée sur dix minutes (en haut à droite), image moyennée sur la journée(en bas à gauche) et image variance (en bas à droite).	18
Illustration 9 - Système de coordonnées ARGUS pour le lido de Sète.	18
Illustration 9 – Synthèse des acquisitions vidéo des différentes caméras (1 à 8). Les interruptions sont signalées en blanc.	20
Illustration 10 - Présentation des indicateurs morphologiques et hydrodynamiques obtenus par l'outil Argus.....	21
Illustration 11 – Dates des prises de vue retenues pour l'analyse de l'évolution du trait de côte.	22
Illustration 12 – Dates des prises de vue retenues pour l'analyse de l'évolution de la position de la barre interne.	23
Illustration 13 – Conditions hydrodynamiques lors de la période de suivi ; a) niveau marin dans le port de Sète (en m, REFMAR), b)puissance longitudinale de la houle en kW/0.5h et c) Hauteur significative de la houle à la bouée de Sète (en m, CANDHIS).....	25

Illustration 14 – Rose des houles à la bouée de Sète de Janvier 2011 à Septembre 2015. Le trait rouge indique l'orientation du trait de côte sur le Lido.	25
Illustration 15 – Superposition des traits de côte de 2011 à 2015 sur l'ortholittorale. Sont indiqués sur différents secteurs de la plage les amplitudes maximales des mouvements enregistrés en mètres.	27
Illustration 16 – Position respective des traits de côte en 2011 et 2015. Les valeurs en blanc indiquent le mouvement résultant (en m).	28
Illustration 17 – Superposition de traits de côte de 2011 à 2015 dans le repère ARGUS.	28
Illustration 18 – Photographie aérienne de la zone de l'atténuateur de houle (crédit photo : Thau Agglo).....	29
Illustration 19 - Migration des cornes de la barre interne et des sinuosités de plage (Tesson, 2012)	30
Illustration 20 – Orientation barre/TDC.....	30
Illustration 21 - Comportement 3D du système plage/avant-plage. Les points rouges indiquent les cornes de barres et les points verts les sinuosités de plage.	31
Illustration 22 - Migration des cornes dans la zone Nord (les points de couleur indiquent la position des différentes cornes parallèlement à la côte, et dans le temps).	32
Illustration 23 - Relation entre conditions hydrodynamiques (Hs, Elong) et déplacement (M) des cornes de barre (C) ou linéarisation (L).	33
Illustration 24 - Relation entre le déplacement longitudinal des cornes C1 à C6 et la puissance longitudinale maximale	34
Illustration 25 – Evolution naturelle du trait de côte sur la partie Nord. A) superposition de trait de côtesur l'ensemble de la période et B) bilan des déplacements de juin 2011 à Novembre 2012.	36
Illustration 26 – Morphologie de l'avant plage, zone Sud.....	37
Illustration 27 – Morphodynamique du système de plage/avant-plage, zone Sud.....	37
Illustration 28 – Evolution du trait de côte dans la zone sud : en haut : position successive du trait de côte pendant la période de suivi ; en bas : variation de position du trait de côte de juin 2011 à Octobre 2012.	38
Illustration 29 - Migration longshore de la barre interne en post-installation. Les points colorés indiquent la position des différentes cornes de barres.	40
Illustration 30 – Ensemble des évolutions du trait de côte et de la barre interne après l'installation du géotextile.....	41
Illustration 31 – Evolution de la position du TDC après installation du tube géotextile.....	42
Illustration 32 – Nouvelle morpho-dynamique de la zone Nord avecle tube géotextile	43
Illustration 33 – Morpho-dynamique de la zone Sud après le déploiement du géotextile.....	44
Illustration 34 – Tableau des tempêtes (données hydrodynamiques) comparées. Hs : Hauteur significative, Tp : période de pic, E moy et Epic Energie moyenne sur l'ensemble de la tempête et Energie au pic de la tempête.	46
Illustration 35 – Evolution du trait de côte causée par les tempêtes comparées : déc. 2012 et mai 2013 (en haut) novembre 2011 et avril 2014 (en bas)	47
Illustration 36 - Position du trait de côte dans le repère Argus avant et après la tempête de Mars 2013 sans géotube (en haut) et avant et après la tempête de Novembre 2014 avec géotube (en bas).....	47
Illustration 37 - Comparaison de la position relative de la crête de barre interne lors de deux tempêtes. Mars 2013 (haut) et novembre 2014 (bas).	48

Illustration 38 – Variation des longueurs swash pour des tempêtes hydrodynamiquement équivalentes	49
Illustration 39 - Images orthorectifiées des caméra c6, c7 et c8mettant en évidence la progression du rechargement en Janvier et Février 2015.....	50
Illustration 40 - Evolution de la largeur de la plage au cours du rechargement	51
Illustration 41 – Exemple de profil transverse (Y=2200m) utilisé pour l'analyse temporelle du rechargement.	51
Illustration 42 - Position transverse du trait de côte sur 3 profils de la zone de rechargement (en haut) en relation avec les conditions de houle (hauteur significative des vagues, en bas).	52
Illustration 43 - Evolution de la position des traits de côte lors des tempêtes de novembre 2014 et de mars 2015. Le trait de côte pré-tempête en rouge est reporté sur les images orthorectifiées au pic et après la tempête.	53
Illustration 44 – Image orthorectifiée de la zone de rechargement illustrant le transport des sédiments rechargés (plus sombres) vers le SO par la dérive littorale dominante.	53
Illustration 45 – Image oblique de la caméra C2 le 21 juin 2015 mettant en évidence la présence de sable rechargé (plus sombre) en bas de plage, à plus de 1 km de la zone rechargée.	54
Illustration 46 – Avancée du trait de côte sur la zone adjacente au rechargement qui bénéficie d'apports par la dérive littorale dominante.	54
Illustration 47 – images vidéo rectifiées illustrant l'évolution du littoral du Lido de Sète de 2011 à 2015.	56
Illustration 48- Evolution du trait de côte depuis le début du suivi en 2011 mettant en évidence les différentes étapes de réponse morphologique suite aux aménagements (atténuateur en 2013 et rechargement début 2015).	56
Illustration 49 – Tableau de synthèse sur les réponses morphologiques et l'évaluation de l'efficacité de l'atténuateur	57

1. Introduction

1.1. PROBLEMATIQUE

Le lido de Sète à Marseillan, frange côtière étroite séparant l'étang de Thau de la mer Méditerranée, est un littoral particulièrement sensible à l'érosion côtière et la montée du niveau marin. Il fait l'objet d'une pression socio-économique toujours plus forte, et les différentes activités qui se concentrent sur cette étroite bande de terre sont soumises à des aléas de plus en plus importants.

Cet environnement littoral, caractéristique de la côte du Languedoc-Roussillon, est formé d'un lido sableux de 12 km entre Sète et Marseillan. La plage est étroite et son évolution naturelle est contrainte par l'ancienne route nationale 112 implantée sur le cordon dunaire. En domaine sous-marin, des barres sableuses parallèles à la côte jouent un rôle important sur l'évolution du trait de côte, en dissipant l'énergie de la houle lors des tempêtes, et en stockant une quantité importante de sédiments.

La dynamique de ce littoral résulte à la fois de transferts sédimentaires éoliens affectant le système dunaire, et des relations entre la dynamique des barres d'avant-côte et de la plage lors d'événements énergétiques. Cette évolution, bien documentée (Akouango, 1997 ; Barusseau et Saint-Guilly, 1981 ; Barusseau et al., 1994 ; Certain, 2002 ; Gervais, 2012), reste cependant mal comprise. Ceci résulte principalement de la difficulté d'obtenir des informations quantitatives lors des événements énergétiques (tempêtes), qui sont responsables des variations morphologiques majeures sur ce littoral.

Par ailleurs, les aménagements mis en place durant les dernières 50 années, et en particulier la route nationale, ont considérablement perturbé la dynamique naturelle. La ressource sédimentaire diminuant (par manque d'apports naturels), les impacts des tempêtes sont de plus en plus importants sur le long terme, et entraînent des coûts de réparation des infrastructures toujours croissants.

Le maintien et la survie de ce système sont l'objet de réflexions et de projets depuis les années 90 et ont conduit au projet d'aménagement du lido mené par Thau Agglo.

Ce projet d'aménagement du site emblématique du lido de Sète à Marseillan comprend différentes orientations stratégiques, alliant le recul de l'ex RN112 le long de la voie ferrée et la réhabilitation de la plage et du cordon dunaire. Ce projet assimile les grands principes de Gestion Intégrée des Zones Côtières, et a bénéficié d'un soutien important à l'échelle locale, régionale, nationale, et européenne par le biais du programme INTERREG IIIC MESSINA (Managing European Shoreline and Sharing Information on Nearshore Areas) en 2004-2006.

A ces aménagements terrestres sont associés des travaux maritimes qui ont pour objectif de protéger la plage lors des événements érosifs en atténuant l'énergie de la houle et de maintenir la position du trait de côte. Une phase d'expérimentation de plusieurs techniques douces de protection marine est menée sur une portion du littoral du Lido afin d'évaluer la pertinence technique et économique de ces systèmes. Deux systèmes de protection sont expérimentés : un système de drainage de plage ©Ecoplage et un atténuateur de houle. La position approximative de ces ouvrages est indiquée sur l'illustration 1.



Illustration 1 – Localisation des ouvrages expérimentaux de protection du littoral (Egis-Eau, 2009).

Le système ©Ecoplage vise à favoriser le dépôt sableux en bas de plage par rabattement de la nappe phréatique par drainage (cf. ill. 2). L'objectif du drainage est de favoriser le dépôt lors de la progression du jet-de-rive et de diminuer l'entraînement du sable lors du retour de la nappe de retrait. Les résultats attendus sont donc une accréation du bas de plage et une augmentation du volume de la berme de jet de rive. La longueur totale de l'ouvrage expérimental est de 700 m.

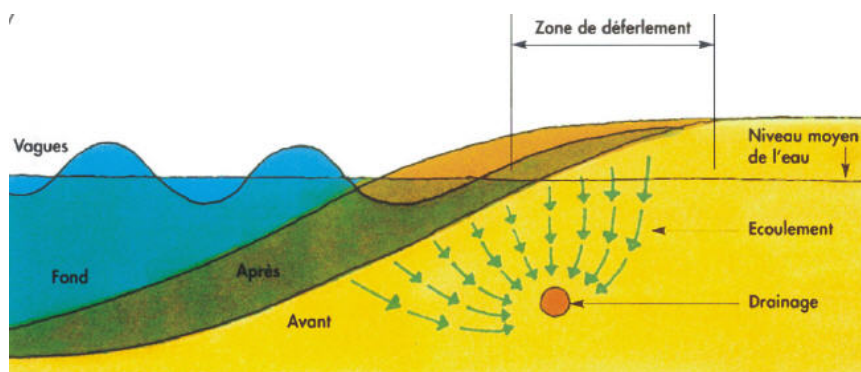


Illustration 2 – Schéma de fonction du système drainant ©Ecoplage.

L'atténuateur de houle vise à casser l'énergie des vagues de tempêtes ayant un effet érosif sur la plage. Un ouvrage en géotextile (cf. ill. 3) est ainsi positionné sur l'avant-côte pour dissiper les houles de tempêtes. L'ouvrage expérimental de 1000 m de long, situé face au littoral Nord-Est historiquement plus sensible aux tempêtes a donc pour objectif de dissiper l'énergie des vagues et ainsi de favoriser la stabilité du trait de côte, voire son avancée lors de conditions de vagues plus favorables à l'engraissement de la plage.

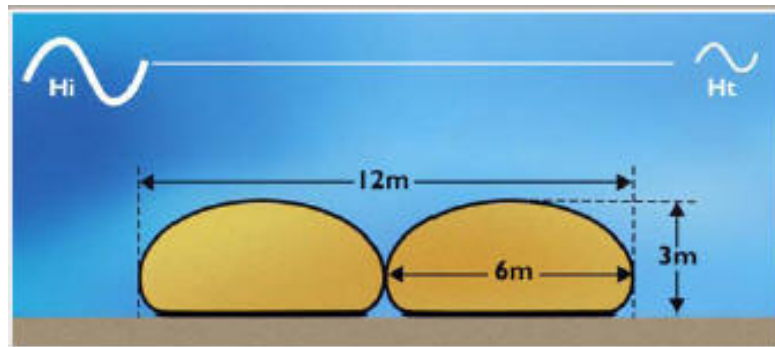


Illustration 3 – Schéma en coupe d'un ouvrage atténuateur de houle en géotextile (Egis-Eau, 2009).

De plus, un rechargement de 510 000 m³ de sable sur un linéaire de 2 km de côte a été réalisé au droit de ces ouvrages. Sur ces 510 000 m³ : 410 000 m³ ont été injectés sur la plage émergée afin de porter sa largeur à 70 m et 100 000 m³ injectés dans les petits fonds (de -2 m à 3 m) pour constituer un stock de matériaux.

Le sable est récupéré par dragage au niveau du site de la Flèche sous-marine de l'Espiguette à 40 km du site. Les travaux du rechargement se sont déroulés en plusieurs étapes :

- Un faible rechargement du 15/11/2014 au 21/11/2014 ;
- Le rechargement total du 07/12/2014 au 10/02/2015.



Illustration 4 – Opération de rechargement de plage face à l'atténuateur de houle, image de la caméra 6 le 15/01/2015.;

Cette phase d'expérimentation nécessite la mise en place d'un suivi quantitatif adapté permettant l'analyse technique de ces aménagements, notamment :

- leur comportement en termes de réduction du phénomène d'érosion, due à une atténuation de la houle;
- leur capacité à maintenir la position du trait de côte à échelle pluriannuelle ;
- leur effet sur la dynamique de la plage lors des tempêtes et sur la reconstruction post-tempête ;
- les seuils hydrodynamiques à partir desquels la réponse morphologique est irréversible, pour les différentes techniques utilisées.

Le suivi expérimental doit, pour atteindre ces objectifs :

- assurer une grande répétitivité des mesures pour comprendre le rôle des aménagements dans les évolutions observées ;
- être en mesure d'obtenir des informations quantitatives sur l'hydrodynamique et la réponse morphologique lors des tempêtes ou forts coup de mer qui représentent la contribution majeure au remaniement du littoral.

Dans ce contexte, la mise en place des outils de suivi permettra, non seulement d'analyser le comportement naturel de ce système côtier à long terme, mais également de quantifier les modifications comportementales engendrées par les aménagements. Cette observation approfondie et continue contribuera à l'amélioration des connaissances et l'évaluation des techniques de protection sur la zone expérimentale, et permettra de définir les stratégies de protection du Lido de Sète à Marseillan.

1.2. OBJECTIFS

Afin de permettre l'acquisition de données sur le site expérimental à la fois sur le long terme (pluriannuel) et lors des épisodes climatiques majeurs, il paraît indispensable de disposer d'un outil :

- autonome, afin de garantir la continuité des mesures;
- avec un pas de temps d'acquisition programmable (de quelques minutes à plusieurs jours), afin de s'adapter aux différentes échelles de suivi (long terme ou haute fréquence) ;
- adapté aux évolutions attendues suite à l'installation des ouvrages expérimentaux.

La vidéo numérique est un outil innovant multithématique et pluridisciplinaire dont l'installation sur le Lido de Sète à Marseillan peut :

- apporter des possibilités nouvelles en matière de suivi du littoral et d'évaluation des systèmes de protection en offrant un suivi en temps réel et permanent (y compris durant les coups de mer) ;
- offrir par ailleurs (c'est-à-dire pas dans le cadre de ce projet) aux collectivités locales et aux administrations de l'Etat d'autres applications.

Le système de vidéo numérique offre donc une plus-value en matière de surveillance du trait de côte en assurant un **suivi à plusieurs échelles temporelles, de manière autonome et continue** (donc indépendamment des conditions météorologiques) et fournit ainsi des données originales quantitatives inaccessibles à l'heure actuelle avec les moyens de suivi classiques.

Ce système de suivi permanent du trait de côte par imagerie numérique est utilisé pour **évaluer la capacité de différentes techniques de protection douce à réduire les processus érosifs** sur le littoral.

Sur ce site, la mise à disposition des données collectées peut permettre de créer une base d'information au contenu novateur et exploitable selon plusieurs axes :

- suivi long terme (pluriannuel ou saisonnier) afin de permettre une quantification de la dynamique du trait de côte et **d'évaluer les effets des aménagements sur le maintien de la position du trait de côte** à l'échelle pluriannuelle. Ce suivi long-terme permettra également d'analyser la capacité de récupération de la plage et d'estimer les seuils hydrodynamiques à partir desquels la réponse morphologique devient irréversible. Le suivi de la zone adjacente naturelle servira de témoin pour évaluer les effets des aménagements;

- suivi haute-fréquence (sur des événements ciblés) afin de permettre une meilleure compréhension des processus en jeu dans la dynamique littorale : influence des conditions hydro-météorologiques sur l'évolution des plages, impact des événements exceptionnels (tempêtes, surcotes marines, ...), mécanismes de récupération des plages post-tempête ... Ce suivi événementiel permettra notamment de caractériser le comportement des défenses marines lors d'événements particulièrement érosifs, et en particulier leurs effets sur l'hydrodynamique (courants de surface, houle).

2. Présentation du système de suivi vidéo sur le lido de Sète

2.1. LE SYSTEME ARGUS

La méthodologie, développée à la fin des années 70 aux Etats-Unis (Holman et Stanley, 2007), repose sur l'installation d'une ou plusieurs caméras haute résolution le long du littoral. Celles-ci sont pilotées par une station de commande. Le système est configuré pour recueillir automatiquement des images qui sont de trois types: les images instantanées, les images moyennées sur 10 min et les variances (cf. § 2.3). Les images sont téléchargées en temps quasi-réel pour analyse et traitement.

Plusieurs systèmes d'acquisition ont été développés dans le monde. ARGUS est le pionnier de ces développements et a bénéficié des travaux d'une grande communauté scientifique (Holman & Stanley, 2007). Le système actuel de troisième génération permet l'acquisition synchronisée de plusieurs caméras, la gestion et le traitement des banques d'images, ainsi que des outils permettant l'échantillonnage de pixels ou de groupes de pixels pour l'analyse des conditions hydrodynamiques. Le système est complètement opérationnel et bénéficie des mises à jour continues de la communauté d'utilisateurs. Ce sont notamment ces caractéristiques, ainsi que la qualité des images du système de 3^{ème} génération qui ont orienté le choix de ce système pour le suivi du Lido de Sète. Le système est développé par le CIL¹ (Coastal Imaging Lab., Université d'état de l'Oregon, USA) et commercialisé en Europe par DELTARES. Le système du lido de Sète constitue la première installation d'ARGUS sur le littoral français.

2.2. IMPLANTATION SUR LE LIDO DE SETE

Pour répondre aux objectifs d'observation des techniques de protection, l'implantation de deux systèmes vidéo a été nécessaire. Ceux-ci sont positionnés à proximité des zones d'expérimentation, au niveau du Triangle de Villeroy, et à 500 m au Sud-Ouest du château de Villeroy (Listel). Le positionnement des deux stations vidéo a nécessité la mise en place de deux supports physiques (mâts de 19 m hors-sol soit environ 21 m au-dessus du niveau moyen des mers) afin d'obtenir une résolution permettant de suivre un linéaire côtier allant du triangle de Villeroy à la zone des trois digues (3 épis) soit 4 km de linéaire côtier (cf. ill. 5).

Le mât 1 (au NE) comporte 3 caméras et permet de visionner sur 110°. Le mât 2 (au SO) comporte 5 caméras pour une vision à 180° (cf. ill. 6).

¹ <http://cil-www.coas.oregonstate.edu/>

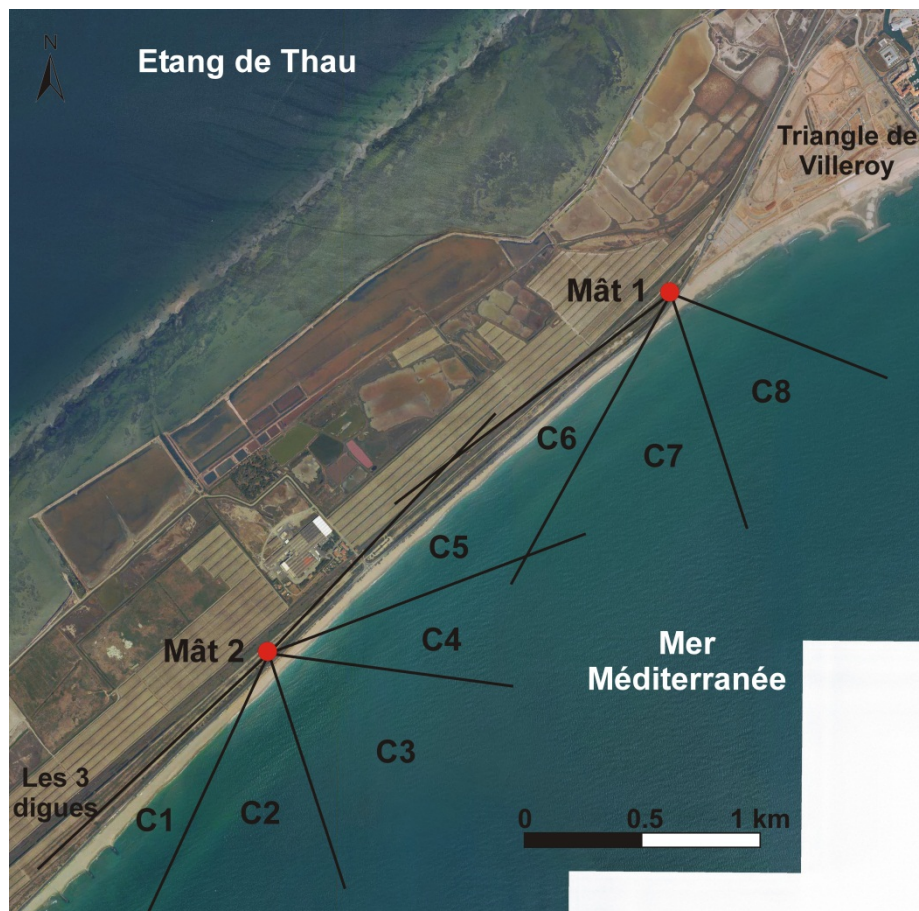


Illustration 5 – Position des 2 mâts implantés sur le Lido de Sète et champs de vision des 8 caméras (fond © Orthophoto IGN).

2.3. CARACTERISTIQUES DU SYTEME ARGUS DE SETE

Le système ARGUS du lido de Sète est composé de huit caméras vidéos numériques réparties sur deux mâts de 19 m hors-sol, soit environ 21 m au-dessus du niveau moyen des mers.

Les caméras installées sont des capteurs couleurs à 5 Mpixels (2448×2048 pixels). Les réglages des lentilles sont différents selon les caméras pour obtenir la meilleure résolution possible au niveau de trait de côte. Le mât 1, situé au Nord-Est, est composé de 3 caméras permettant un angle de vue de 110° (cf. ill. 5) : 2 caméras perpendiculaires à la côte et une caméra parallèle à la côte. Le mât 2, situé au Sud-Ouest, est composé de 5 caméras permettant la vision à 180° (cf. Ill. 6).

Les images acquises par le système du lido de Sète sont de quatre types (Cf. Ill. 7):

- une image moyennée sur la journée ;
- une image instantanée (snapshot);
- une image moyennée (time-exposure ou timex) sur un temps d'exposition de 10 min;
- une image « variance » (variance image) : somme des carrées de déviation par rapport à la valeur moyenne.

L'image moyennée « timex » est le produit ARGUS le plus utilisé car il permet de détecter plus facilement le trait de côte et la position des barres d'avant-côte.

L'acquisition des images se fait toutes les demi-heures en début de chaque demi-heure et seulement pour les horaires de la journée (entre 06 h et 20 h en période estivale).



Illustration 6 - Photos des 3 caméras (C6,C7 et C8) du mât n°1 (à gauche) et des 3 points de vue correspondants.



Illustration 7 - Point de vue des 5 caméras (C5,C4,C3,C2 et C1) du mât 2.



Illustration 8 - Types d'images collectées : image instantanée (en haut à gauche), image moyennée sur dix minutes (en haut à droite), image moyennée sur la journée(en bas à gauche) et image variance (en bas à droite).

Pour faciliter les traitements d'images, un repère Argus a été mis en place (Illustration 9). La coordonnée X est positive vers la mer (perpendiculairement au trait de côte) avec pour origine le mât 2 ; la coordonnée Y est positive vers le NE avec pour origine le mât 2.

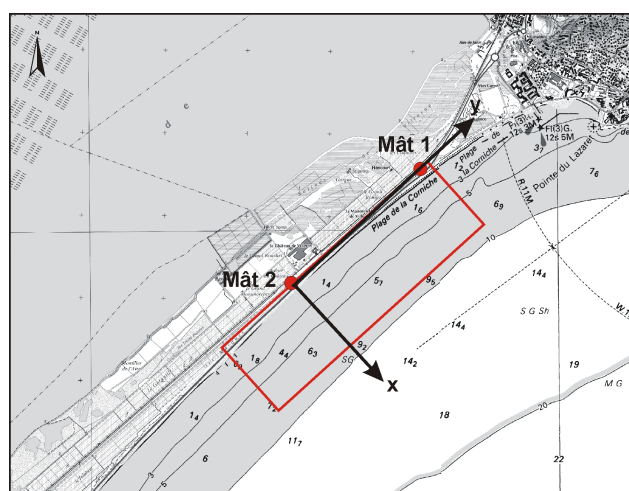


Illustration 9 - Système de coordonnées ARGUS pour le lido de Sète.

Les procédures de traitement des images et la validation initiale des indicateurs dérivés des images (position du trait de côte, position des barres d'avant-côte sont présentées dans le rapport RP-60874-FR (Balouin et al., 2012).

3. Synthèse des acquisitions vidéo d'avril 2011 à Septembre 2015 (53 mois)

3.1. IMAGES ET ECHANTILLONNAGE DE PIXELS OBTENUS

L'installation du système vidéo a été réalisée en 2 étapes : une première intervention en avril 2011, lors de laquelle les caméras 1, 5, 6, 7 et 8 ont été positionnées, et une seconde étape en juin 2011 pour la mise en place des caméras 2 à 4. Depuis l'installation du système, un grand nombre d'images vidéo ont été acquises avec une fréquence d'une image/30 minutes jusqu'au mois de juin 2012, puis 3 images par heure (heure fixe, heure fixe + 15 min, heure fixe + 30 min). Le total des images intégrées à la base est d'environ 1 300 000, ce qui représente un volume de près de 1.3 To.

Quelques interruptions ont eu lieu suite à la rupture des communications radio entre les deux mâts ou suite à des coupures électriques. L'illustration 9 présente la synthèse des acquisitions pour les 8 caméras.

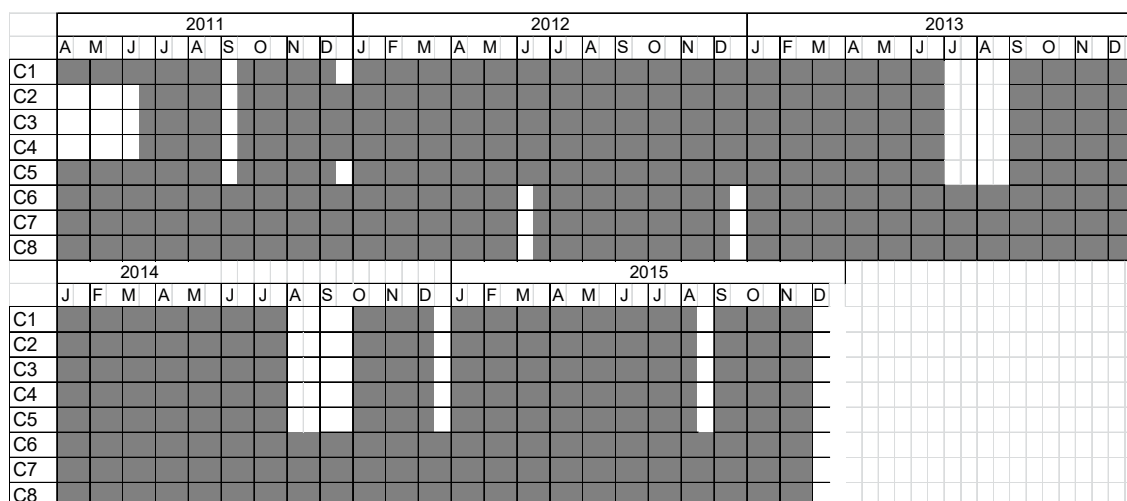


Illustration 10 – Synthèse des acquisitions vidéo des différentes caméras (1 à 8). Les interruptions sont signalées en blanc.

L'intégralité des images instantanées et moyennées sont disponibles en ligne sur le site internet dédié à la station vidéo Argus de Sète <http://argus-public.deltares.nl/>.

Par ailleurs, des échantillonnages de pixels sont réalisés quotidiennement à une fréquence horaire afin d'enregistrer des séquences de 10 min dans la zone de jet de rive, dans le déferlement, et en plusieurs points de l'avant-côte. Ces données permettent l'analyse des caractéristiques de l'hydrodynamique côtière (Balouin *et al.*, 2012). Elles permettent notamment d'obtenir la période et la direction de la houle, l'extension et la fréquence du jet de rive, la vitesse des courants longitudinaux de surface (cf. illustration 10). Ces échantillonnages sont lancés quotidiennement afin d'obtenir une banque de données la plus exhaustive possible des conditions hydrodynamiques avant et lors des travaux, qui servira de référence pour évaluer les effets potentiels des aménagements sur les conditions de vagues, de courants et de surcote.

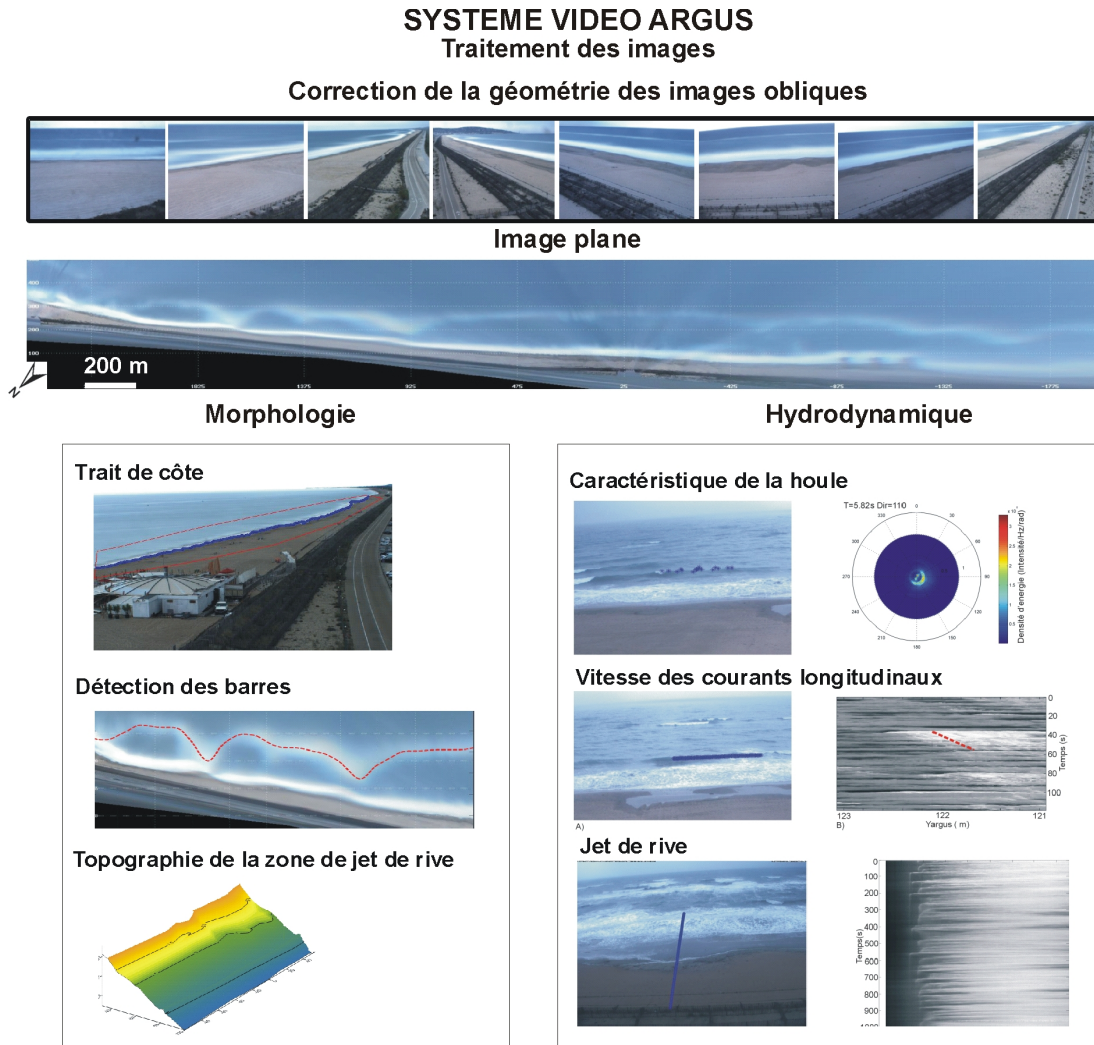


Illustration 11 - Présentation des indicateurs morphologiques et hydrodynamiques obtenus par l'outil Argus.

3.2. ANALYSES REALISEES

Afin d'évaluer l'évolution du site et l'efficacité potentielle des ouvrages de défense, deux indicateurs principaux sont suivis sur le long terme (cf. Ill. 9) : la position du trait de côte à intervalle de temps régulier (à minima tous les 15 jours) et pour des conditions hydrodynamiques de très faible énergie ; la position des barres d'avant-côte qui sont détectées par le système dès lors que la houle atteint 1 m de hauteur significative pour la barre interne, et lorsqu'elle atteint 3 m pour la barre externe plus lointaine et plus profonde. L'illustration 10 indique les dates choisies pour le suivi de ces deux indicateurs.

Par ailleurs, une analyse spécifique est réalisée en période de tempête afin de mieux appréhender les évolutions rapides de la plage et de l'avant-côte, et d'évaluer le fonctionnement naturel/protégé du site.

Depuis le démarrage de l'observation, les tempêtes sont restées relativement modérées (hauteur de vagues n'atteignant pas le seuil de période de retour annuelle). Toutefois, plusieurs coups de mer ont été enregistrés, parfois dans des intervalles de temps réduits et ont entraîné des modifications significatives de la morphologie du site. Ces événements, et leurs caractéristiques, sont listés dans l'illustration 11.

Dates des levés du trait de côte					
17/06/2011	25/03/2012	23/11/2012	14/07/2013	19/03/2014	08/01/2015
03/07/2011	26/03/2012	02/12/2012	31/04/2013	06/04/2014	24/01/2015
18/07/2011	29/03/2012	18/12/2012	15/08/2013	19/04/2014	09/02/2015
02/08/2011	05/04/2012	04/01/2013	31/08/2013	03/05/2014	23/02/2015
10/08/2011	08/04/2012	18/01/2013	06/09/2013	16/05/2014	08/03/2015
18/09/2011	13/04/2012	31/01/2013	14/09/2013	01/06/2014	23/03/2015
06/10/2011	22/04/2012	14/02/2013	01/10/2013	15/06/2014	04/04/2015
20/10/2011	24/04/2012	26/02/2013	15/10/2013	02/07/2014	30/04/2015
21/10/2011	02/05/2012	03/03/2013	30/10/2013	15/07/2014	15/05/2015
24/11/2011	13/05/2012	08/03/2013	31/10/2013	30/07/2014	30/05/2015
28/11/2011	22/05/2012	09/03/2013	13/11/2013	15/08/2014	16/06/2015
30/11/2011	06/07/2012	19/03/2013	28/11/2013	01/09/2014	30/06/2015
03/12/2011	30/07/2013	31/03/2013	02/12/2013	14/09/2014	15/07/2015
15/12/2011	07/08/2012	15/04/2013	15/12/2013	03/10/2014	28/07/2015
18/12/2011	29/08/2012	29/04/2013	30/12/2013	22/10/2014	10/08/2015
09/01/2012	09/09/2012	17/05/2013	06/01/2014	02/11/2014	
21/02/2012	22/09/2012	31/05/2013	11/02/2014	20/11/2014	
19/03/2012	07/10/2012	14/06/2013	28/02/2014	07/12/2014	
24/03/2012	07/11/2012	24/06/2013	05/03/2014	23/12/2014	

Illustration 12 – Dates des prises de vue retenues pour l'analyse de l'évolution du trait de côte.

Dates Levés barres				
22/04/2011	29/11/2011	24/11/2012	27/07/2013	31/03/2014
23/04/2011	02/12/2011	26/11/2012	28/07/2013	02/04/2014
19/07/2011	16/12/2011	13/12/2012	28/09/2013	03/04/2014
06/08/2011	10/02/2012	14/12/2012	29/09/2013	04/04/2014
15/10/2011	17/03/2012	18/12/2012	03/10/2013	04/04/2014
22/10/2011	21/03/2012	28/12/2012	04/10/2013	19/05/2014
23/10/2011	22/03/2012	01/03/2013	19/10/2013	21/05/2014
24/10/2011	10/04/2012	04/03/2013	21/10/2013	28/06/2014
25/10/2011	21/04/2012	08/03/2013	23/10/2013	04/07/2004
27/10/2011	23/04/2012	17/03/2013	17/11/2013	19/07/2014
28/10/2011	25/04/2012	23/03/2013	18/11/2013	10/08/2014
01/11/2011	26/04/2012	24/03/2013	19/12/2013	17/09/2014
02/11/2011	27/04/2012	28/03/2013	22/12/2013	19/09/2014
03/11/2011	28/04/2012	01/04/2013	25/12/2013	29/09/2014
04/11/2011	29/04/2012	04/04/2013	28/12/2013	12/10/2014
05/11/2011	18/05/2012	14/04/2013	04/01/2014	03/11/2014
06/11/2011	23/08/2012	25/04/2013	16/01/2014	04/11/2014
08/11/2011	24/09/2012	26/04/2013	18/01/2014	11/11/2014
12/11/2011	17/10/2012	30/04/2013	30/01/2014	14/11/2014
13/11/2011	20/10/2012	15/05/2013	03/02/2014	27/11/2014

14/11/2011	21/10/2012	18/05/2013	05/02/2014	30/11/2014
15/11/2011	26/10/2012	08/06/2013	15/02/2014	15/01/2015
16/11/2011	31/10/2012	16/06/2013	24/02/2014	16/01/2015
19/11/2011	10/11/2012	17/06/2013	22/03/2014	21/02/2015
20/11/2011	14/11/2012	18/06/2013	28/03/2014	22/03/2015
21/11/2011	17/11/2012	19/06/2013	29/03/2014	
22/11/2011	18/11/2012	26/07/2013	30/03/2014	

Illustration 13 – Dates des prises de vue retenues pour l'analyse de l'évolution de la position de la barre interne.

4. Résultats du suivi vidéo

Le système étant mis en place depuis avril 2011, nous disposons de 54 mois de suivi de la plage du lido. Une analyse des principaux indicateurs (traits de côte et positions des barres d'avant-côte) déjà suivis dans les rapports précédents est présentée, intégrant l'ensemble des connaissances acquises depuis l'installation du système vidéo.

Ces résultats s'intéressent à la fois à l'évolution globale de la plage et de l'avant-côte, le fonctionnement lors des tempêtes, et l'évaluation des techniques de lutte contre l'érosion qui ont été installées lors de ce suivi, respectivement en avril 2012 pour le drainage, et au cours de l'hiver 2012-2013 pour l'atténuateur de houle.

4.1. CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES PENDANT LA DUREE DU SUIVI

Etant donnée son orientation, la plage du Lido de Sète est soumise à des houles principalement frontales (voir l'énergie longitudinale, Illustration 14). Toutefois, lors des tempêtes hivernales (pour des hauteurs significatives au large supérieures à 3 m), les vagues peuvent provenir du secteur Sud et/ou du secteur ESE (Illustration 15).

Lors de la période de suivi, on constate une assez grande variabilité des conditions hydrodynamiques. Si les périodes hivernales présentent généralement des hauteurs de vagues supérieures, on observe, notamment en 2014, un étalement de la période des tempêtes qui surviennent jusqu'à la fin du printemps avec des coups de mer encore significatifs début Juillet.

Les tempêtes les plus importantes sont celles de mars 2013 et de novembre 2014, avec des hauteurs de vagues de l'ordre de 5 m au large, et des directions de provenance d'ESE.

Lors de ces événements, on observe une élévation moyenne du plan d'eau, liée à la surcote de tempête, généralement de l'ordre de 50 à 60 cm, mais ayant atteint 1.1 m en novembre 2014.

Le secteur étant plutôt caractérisé par une énergie globale modérée, les périodes inter-tempêtes sont le plus souvent caractérisées par des vagues inférieures à 50 cm, des périodes de l'ordre de 4 à 6 secondes et des directions de provenance principalement d'Est/Sud-Est.

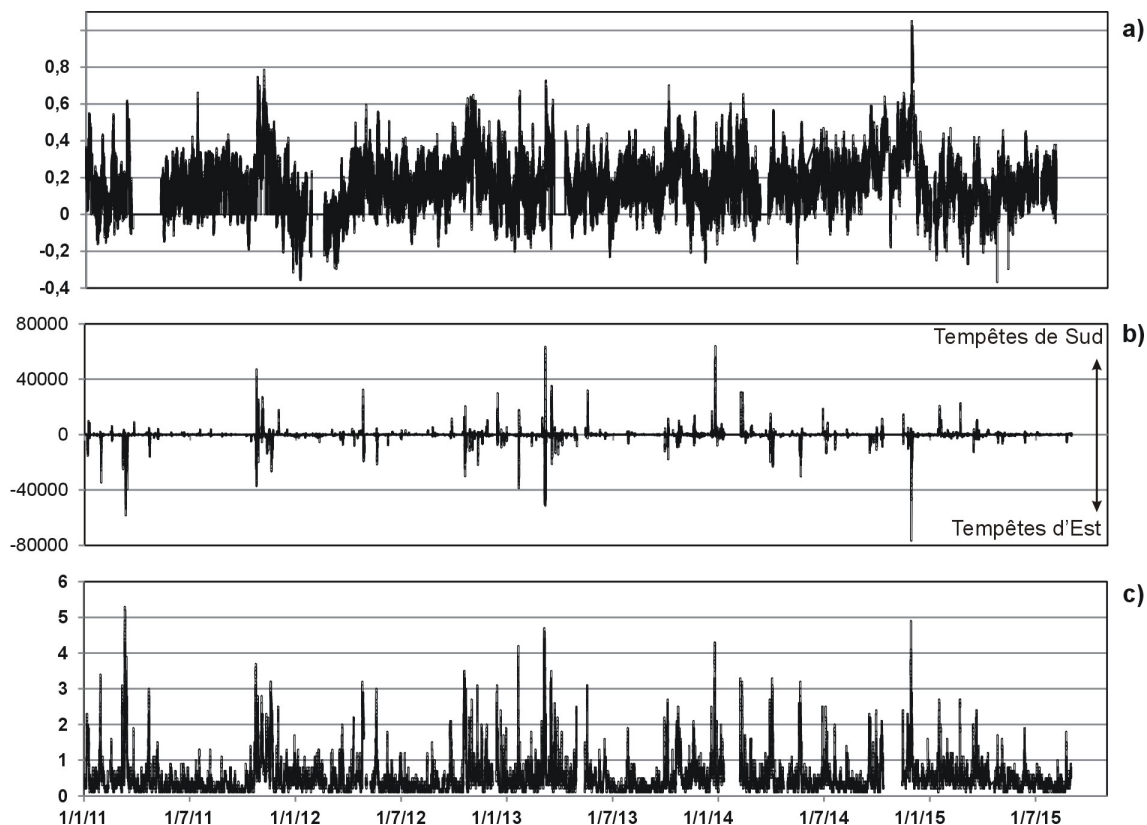


Illustration 14 – Conditions hydrodynamiques lors de la période de suivi ; a) niveau marin dans le port de Sète (en m, REFMAR), b) puissance longitudinale de la houle en kW/0.5h et c) Hauteur significative de la houle à la bouée de Sète (en m, CANDHIS).

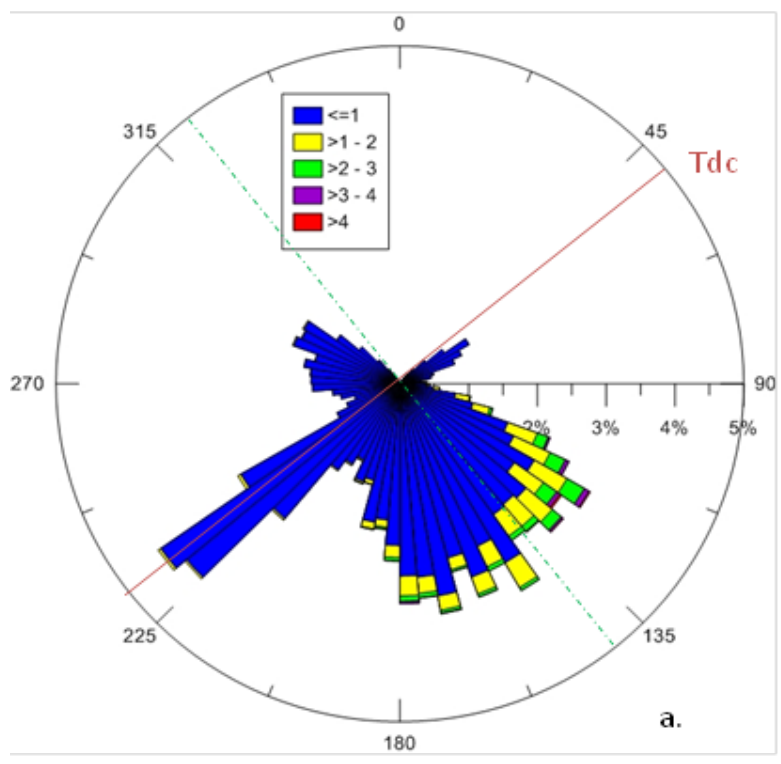


Illustration 15 – Rose des houles à la bouée de Sète de Janvier 2011 à Septembre 2015. Le trait rouge indique l'orientation du trait de côte sur le Lido.

4.2. EVOLUTION DE LA POSITION DU TRAIT DE COTE

Afin d'évaluer l'évolution de la position du trait de côte (soit le contact terre-mer instantané), les images ont été sélectionnées afin de s'assurer de la comparabilité des différents traits de côte instantanés produits par la vidéo. Des conditions de vagues très calmes sont choisies, avec des vents faibles et un marnage faible afin de comparer des situations pour lequel le niveau d'eau est stable et peu perturbé par les conditions météo-marines.

Un total de 110 traits de côte instantanés a ainsi été sélectionné. L'erreur de positionnement de ces traits de côte est de l'ordre de 5 m, ce qui correspond à l'erreur d'un levé classique par GPS. Une fois positionnés sur les images vidéo, ces traits de côte ont été convertis en Lambert 93. Ils sont présentés sur l'illustration 15. La superposition de ces nombreux traits de côte ne permet pas d'analyser la vitesse d'érosion, mais elle donne une évaluation de l'amplitude des déplacements du trait de côte lors du suivi. Cette amplitude des déplacements n'est pas homogène le long du site. Ainsi, elle atteint 80 m au NE de la zone, alors qu'elle n'est que de 26 m au SW. On retrouve donc bien une mobilité beaucoup plus forte au NE qui connaît a connu un recul important du trait de côte lors des dernières décennies (Certain 2002, Gervais, 2012). Il faut toutefois prendre en compte l'effet du rechargement de 2015 dans cette variabilité. Avant la période de rechargement, la mobilité du trait de côte était de l'ordre de 50 m. Dans la zone de drainage, la mobilité est également relativement importante eu égard à la largeur de plage. Une partie de cette mobilité peut s'expliquer par les travaux d'installation des drains au début du suivi, mais également par une tendance érosive plus marquée ces dernières années.

L'évolution générale de la position du trait de côte est présentée sur la figure 16. On constate que le déplacement moyen du trait de côte est très variable. Ainsi, la position des traits de côte des mois de Juin 2011 à juin 2015 met en évidence un très fort contraste entre le secteur NE et le secteur SO. Dans le secteur NE, l'avancée du trait de côte est importante, atteignant 30 m. La quasi-totalité de cette avancée est observée entre juin 2013 et 2014 et entre juin 2014 et juin 2015. Dans la partie SO de la zone suivie (secteur @ecoplage), le recul est progressif et atteint plus de 16 m sur la totalité de la période (4.5 ans).

L'illustration 16 présente la même superposition, mais dans un repère Argus (en mètre, avec pour point d'origine le mât SO). Seuls quelques traits de côte y sont reportés pour pouvoir identifier les périodes de plus grands reculs ou de plus grandes avancées. On note ainsi que la plus grande avancée observée au NE correspond à la période comprise entre juin 2014 et juin 2015. Dans la partie centrale, c'est également lors de la dernière année que la position du trait de côte a le plus évolué, alors que dans la zone de drainage, le recul semble progressif tout au long de la période de suivi (2011-2015).

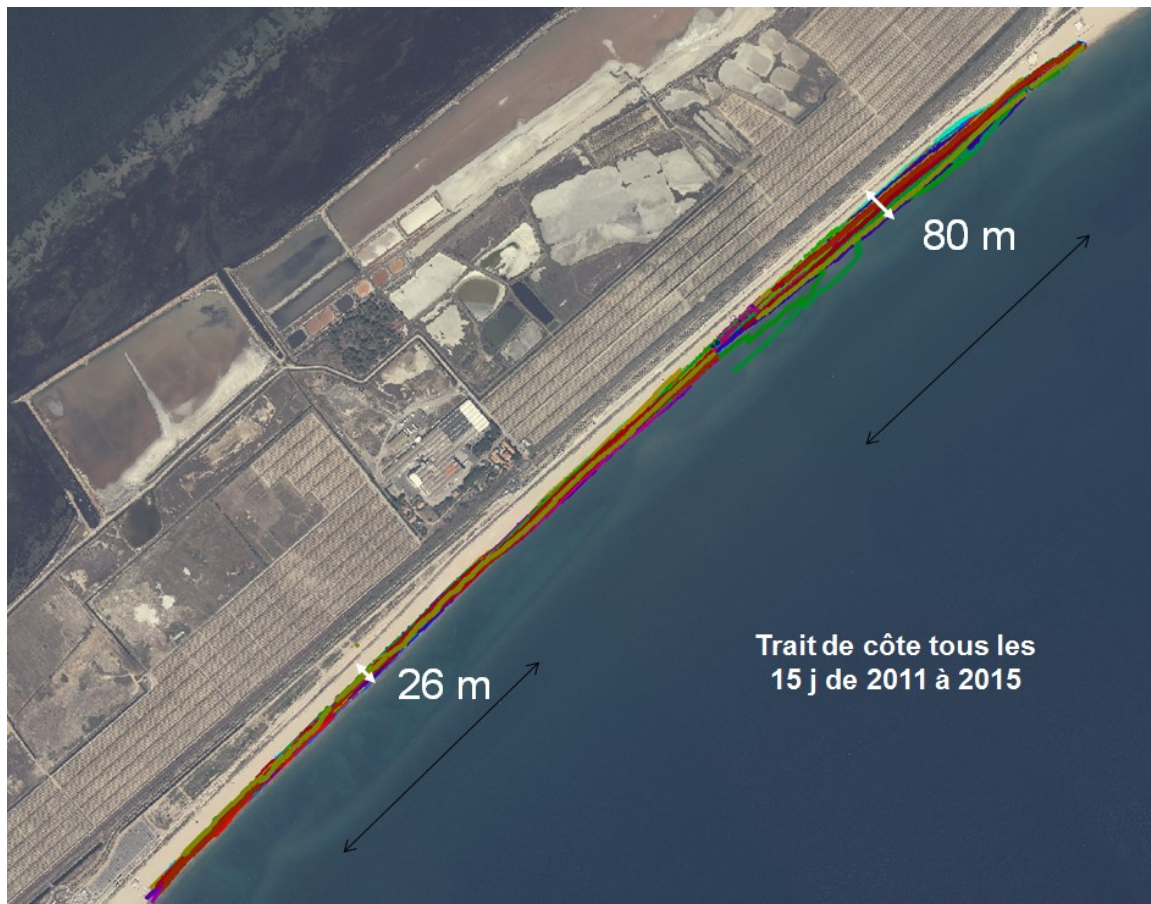


Illustration 16 – Superposition des traits de côte de 2011 à 2015 sur l'ortholittorale. Sont indiqués sur différents secteurs de la plage les amplitudes maximales des mouvements enregistrés en mètres.

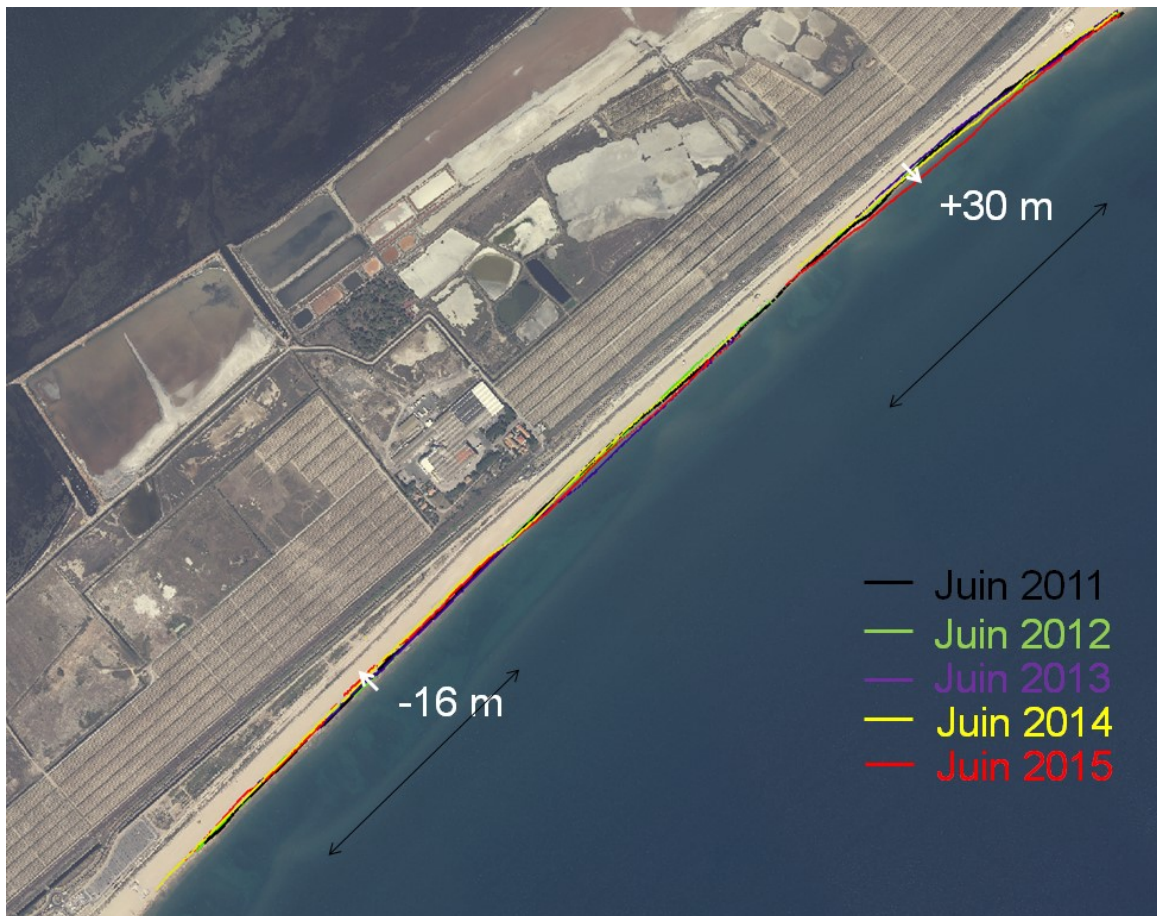


Illustration 17 – Position respective des traits de côte en 2011 et 2015. Les valeurs en blanc indiquent le mouvement résultant (en m).

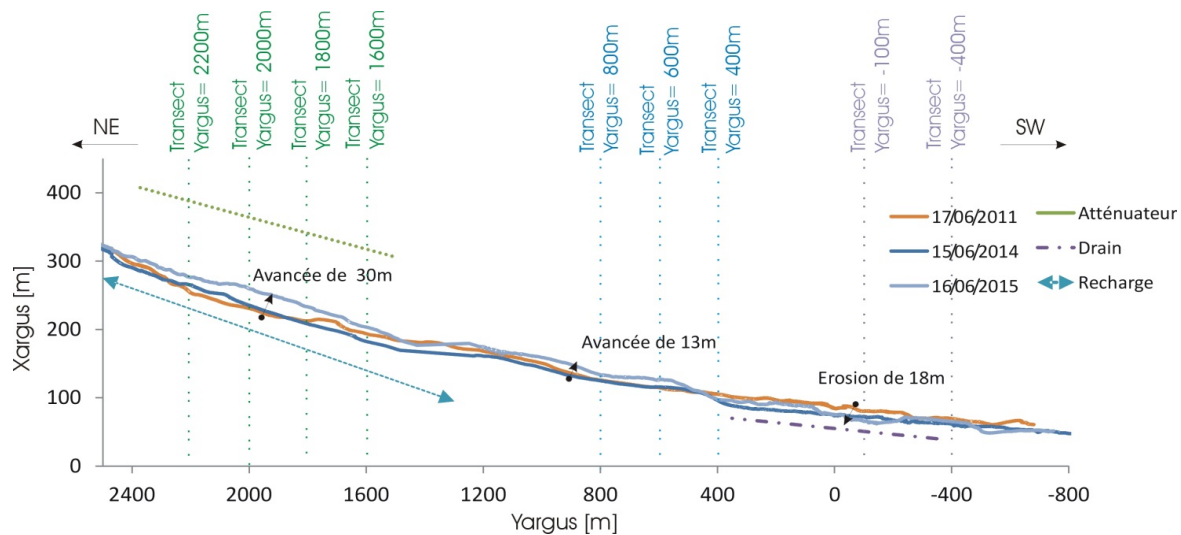


Illustration 18 – Superposition de traits de côte de 2011 à 2015 dans le repère ARGUS.

4.3. EVOLUTION DU LITTORAL DANS LA ZONE AVANT LE DEPLOIEMENT DE L'ATTENUATEUR DE HOULE

L'atténuateur déployé début 2013 (cf. illustration 18) a eu une incidence importante sur la morphologie de l'avant-côte et de la plage émergée. Pour évaluer cette incidence, plusieurs indicateurs ont été évalués : la dynamique naturelle du système plage/avant-plage avant l'installation du géotextile ; la dynamique après installation et l'évolution dans le temps de la position du trait de côte au cours des différentes phases des aménagements.



Illustration 19 – Photographie aérienne de la zone de l'atténuateur de houle (crédit photo : Thau Agglo)

4.3.1. Etude de la morpho-dynamique du système plage/avant-plage avant installation du géotextile

Le système Argus a été installé en avril 2011 et a permis le suivi de la morpho-dynamique naturelle de la zone sur une période de près de 2 ans avant installation du tube géotextile (mai 2011 à janvier 2013).

La morphologie et la dynamique de la barre interne d'avant-côte du site de Sète est facilement analysable de par sa faible profondeur d'immersion permettant un déferlement des vagues dès 1 m de hauteur significative. Le suivi est donc réalisé pour des conditions de houle de Hs supérieure à 1 m.

Trois principaux types de comportement des barres ont été déterminés lors d'études préalables (Gervais et al., 2011) :

- 1- Un comportement de migration longitudinale (2D) du motif de barre et de ses irrégularités dans le sens de la dérive ;
- 2- Un comportement transversal (2D). En effet, la principale conséquence d'une tempête, et la plus connue, concerne le recul vers le large des barres ;

- 3- Un comportement tridimensionnel (3D) pour lequel les irrégularités des barres transverses-chenaux et des barres en festons sont linéarisées lors d'une tempête. Les tempêtes tendent à former des barres plus homogènes et linéaires, avant de reformer sur le tombant, ou lors des périodes ultérieures de plus petites vagues, des formes de croissant sur la barre.

La dynamique des barres a un impact direct sur la dynamique du trait de côte (Wright et Short, 1984 ; Tesson, 2012). Il a été montré sur le site de Sète qu'avant l'installation du tube, la plage possédait de grandes sinuosités se matérialisant par une avancée de plage sur la mer et s'étalant sur une centaine de mètres. En état stable, ces « méga-croissants » se situent en face des cornes de barre et lors de la migration des croissants de barre soumis à de fortes houles, un déséquilibre se crée et les sinuosités de plage tendent à se repositionner. Ce phénomène est décrit sur l'illustration 20 et sera étudié avec la présence de l'ouvrage.

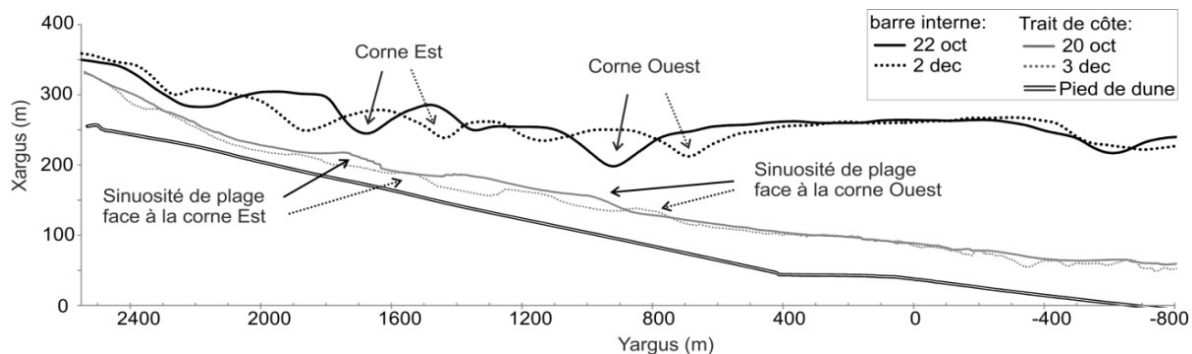


Illustration 20 - Migration des cornes de la barre interne et des sinuosités de plage (Tesson, 2012)

4.3.2. Morpho-dynamique naturelle de la zone Nord (400 m < Yargus < 2550 m)

La zone Nord est une zone instable avec un système de plage/avant-plage très mobile et où les submersions et destructions de plage et d'arrière plage ont été les plus importantes.

La barre d'avant côte n'est pas parallèle au rivage puisqu'elle s'en rapproche au NE et s'en écarte au SO (Illustration 21).

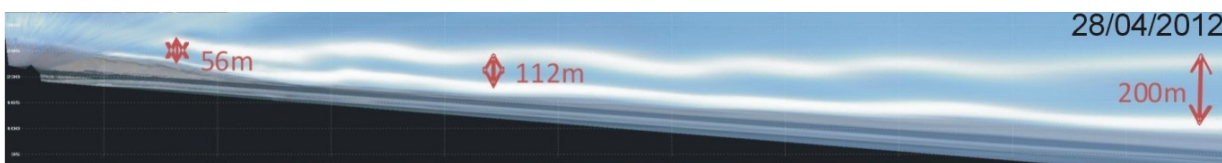


Illustration 21 – Orientation barre/TDC

a) Evolution tridimensionnelle (barre festonnée et trait de côte avec sinuosités)

La dynamique naturelle du comportement tridimensionnel de la barre repose sur une alternance de linéarisation de celle-ci sous l'impact des fortes houles obliques (Illustration 22-A) et de festonnage lors de retour au calme avec des houles frontales dites reconstructives. Il apparaît parfois que certaines cornes de barre s'allongent (Illustration 22-A/D) voire disparaissent. Elles se créent au NE (Illustration 22-D), là où la barre d'avant côte est proche du rivage, puis se développent en migrant vers le Sud sous l'effet de la dérive littorale. En réponse aux modifications de la barre, le trait de côte subit des évolutions avec un décalage temporel par rapport à celles de la barre (Illustration 22-A/C/D/E).

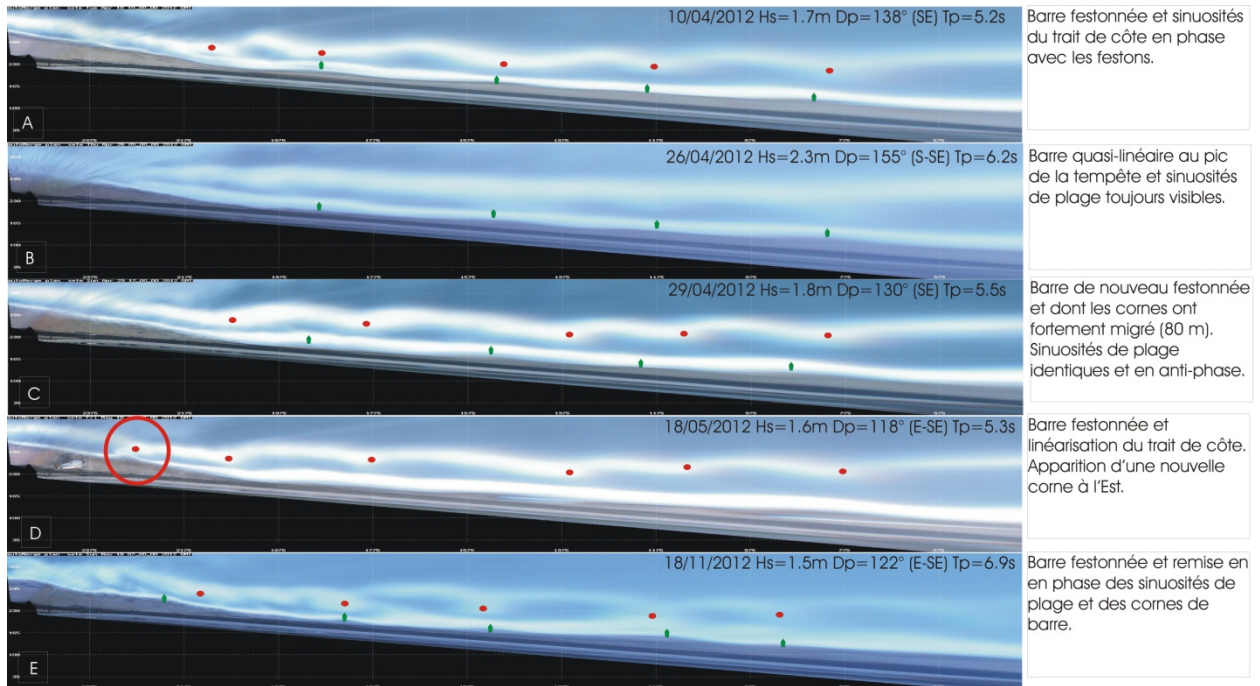


Illustration 22 - Comportement 3D du système plage/avant-plage. Les points rouges indiquent les cornes de barres et les points verts les sinuosités de plage.

L'état stable de l'évolution 3D correspond à une position en phase des cornes et sinuosités (Illustration 22-A/E) et lors de courant de dérive importante par mer forte, un état instable est imposé (position antiphase Illustration 22-C) (Balouin et *al.*, 2013). Cet état instable provient de la migration longitudinale des cornes de barres qui migrent plus rapidement que les sinuosités de plage. Ce phénomène est étudié dans la partie suivante.

b) Evolution longitudinale (cornes de barre et sinuosités de plage)

Le tracé des barres en fonction du temps dans le système de coordonnées Argus lors d'épisodes de forte énergie permet le suivi longitudinal du déplacement des croissants lorsque celles-ci sont festonnées. Ce suivi est réalisé par pointage en couleur de la position des cornes de barre au cours du temps. On note respectivement les cornes C1 (jaune), C2 (vert), C3 (violet), C4 (bleu), C5 (rouge), C6 (noir), C7 (bleu marine) et C8 (rose), de l'Ouest vers l'Est (Illustration 22).

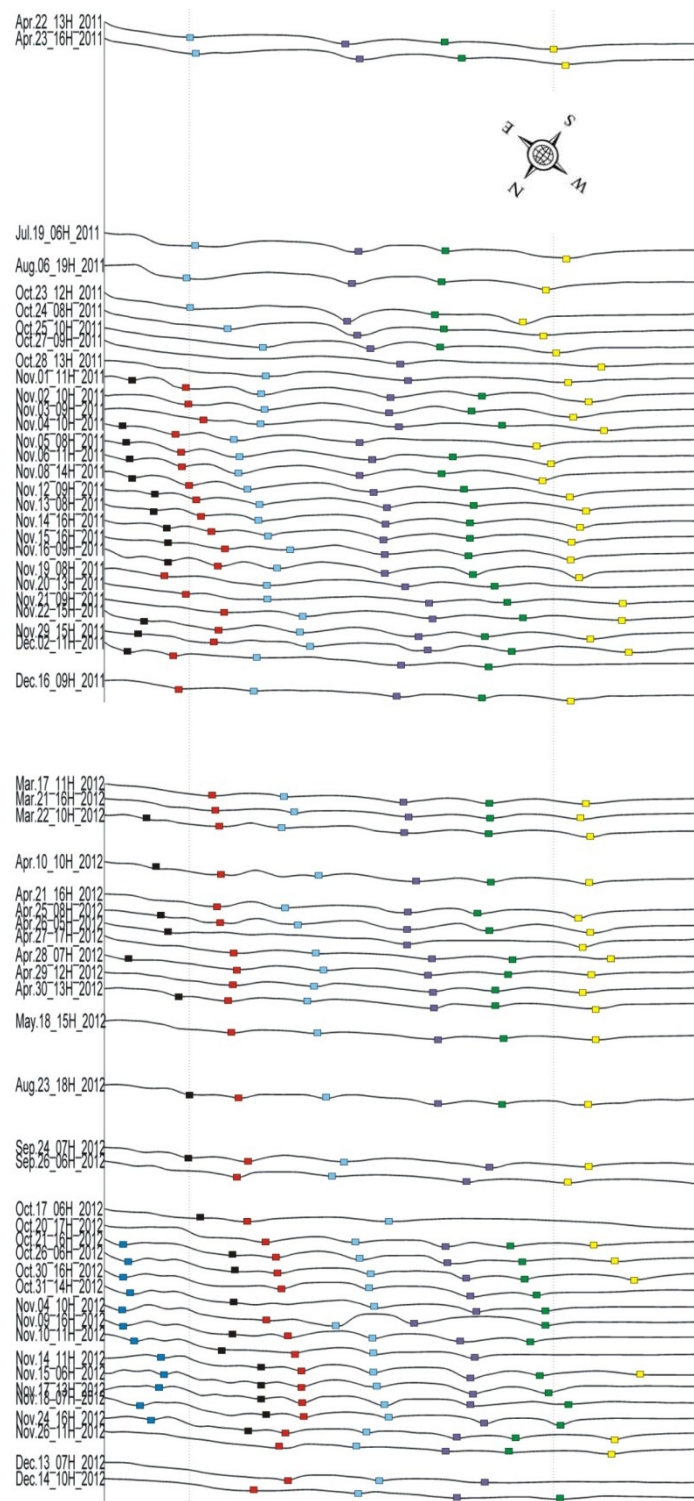


Illustration 23 - Migration des cornes dans la zone Nord (les points de couleur indiquent la position des différentes cornes parallèlement à la côte, et dans le temps).

Le suivi de la position des cornes au cours du temps révèle une migration générale de centaines de m de la barre vers le Sud-Ouest. En effet, la corne C4 située initialement en Y=2225 m dans le système Argus au 22 avril 2011 se positionne en Y=1637 m au 14 décembre 2012 (fin d'installation du tube, janvier 2013). Elle révèle donc un déplacement d'environ 590 m vers le Sud-Ouest sur cette période. Cette tendance se retrouve sur l'ensemble des autres

cornes suivies puisque la corne C1 s'est déplacée de 380 m, la corne C2 de 410 m et la corne C3 de 500 m.

A plus petite échelle (du jour ou de l'heure), plusieurs phénomènes sont perceptibles : les cornes vont se déplacer tantôt vers le Nord-Est tantôt vers le Sud-Ouest ; sur une même barre, les cornes ne se déplacent pas nécessairement dans le même sens et pas nécessairement avec le même taux de migration. En effet, entre le 23 octobre et le 24 octobre 2011 (houle d'Est/Sud-Est), l'ensemble des cornes s'est dirigé vers le Sud-Ouest alors qu'entre le 21 novembre et le 22 novembre 2011 (houle du Sud/Sud-Est) elles se sont dirigées vers le Nord-Est. En revanche, entre le 05 novembre 2011 et le 06 novembre 2011 (houle de front), les cornes C1, C2 et C3 se sont dirigées vers le Nord-Est alors que les cornes C4, C5 et C6 vers le Sud-Ouest.

Le même type de suivi a été réalisé pour les sinuosités de plage et révèle la même tendance migratoire avec un temps de décalage. Les migrations et les créations les plus importantes se font à la suite d'une tempête ou entre deux tempêtes et suivent le sens de migration des cornes de barre. La vitesse de migration reste néanmoins inférieure à celle des festons.

De manière à déterminer les raisons de la migration des cornes de barre et des sinuosités de plage, la migration a été confrontée aux données hydrodynamiques (Illustration 24).

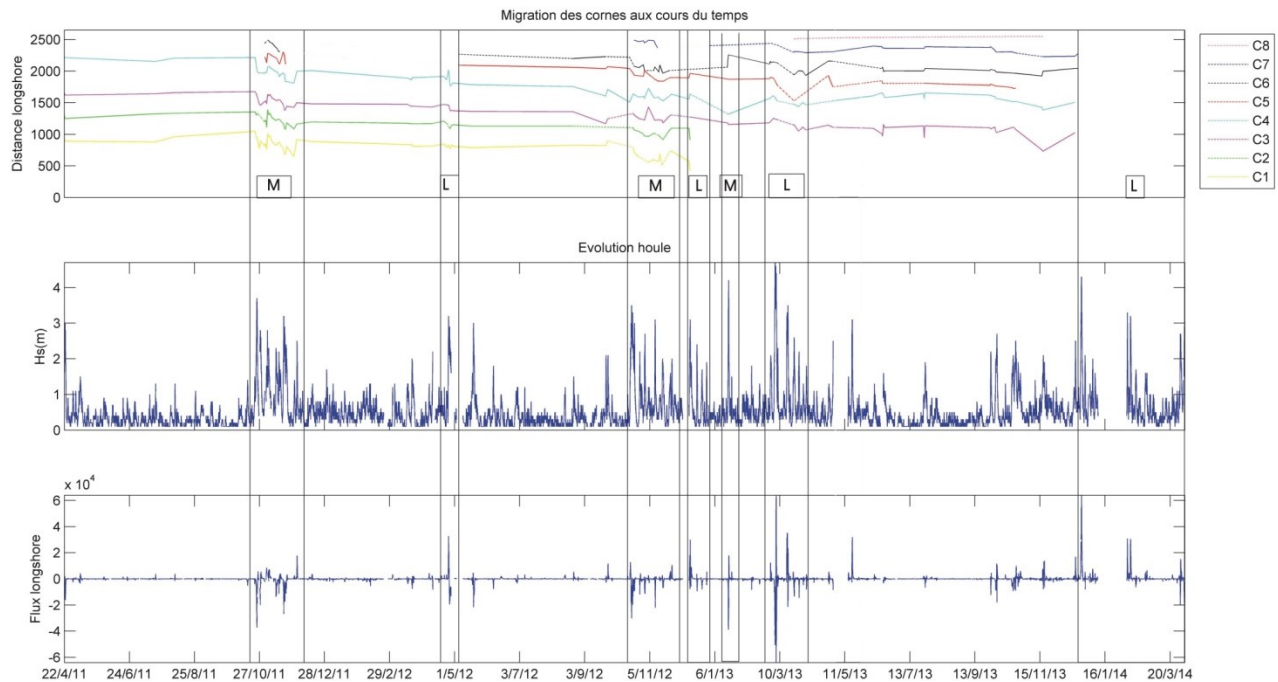


Illustration 24 - Relation entre conditions hydrodynamiques (H_s , $Elong$) et déplacement (M) des cornes de barre (C) ou linéarisation (L).

La houle joue un rôle essentiel dans la migration des cornes et celle des sinuosités de plage (Illustration 24). La barre interne suit un cycle au cours de notre période d'étude à la fréquence des événements énergétiques. Pour chaque épisode de forte agitation avec des houles obliques et où $|\text{flux long}| > 2 \cdot 10^4 W/0.5h$, une migration longitudinale des cornes se produit (octobre 2011, novembre 2012...) comme l'avait déjà montré Gervais (2012). Pour un flux longitudinal très élevé ($> 3 \cdot 10^4 W/0.5h$) la barre se linéarise (mai 2012, janvier et mars 2013 et décembre 2014). A la suite d'une linéarisation et lors du retour au calme, des instabilités naissent sur la barre au niveau des anciennes houles cornes et systématiquement une nouvelle

instabilité apparaît à l'Est de la barre (cf. Illustration 22), où la distance relative à la côte est faible. Sous l'influence de houles de faible énergie, ces instabilités se développent en croissants bien marqués qui vont à leur tour peu bouger lors de période de calme, migrer sous l'influence de houles obliques et se linéariser lors de coups de mer importants.

On confronte ensuite les taux de déplacement longitudinal de chaque corne à l'énergie longitudinale maximale de la houle au large (Illustration 25). Des études préliminaires comparant la migration de la barre en fonction du pic du flux longitudinal d'énergie et la migration en fonction du flux d'énergie intégré sur toute la période d'agitation ont montré que la migration est majoritairement induite par le pic de la tempête (Balouin et al., 2013).

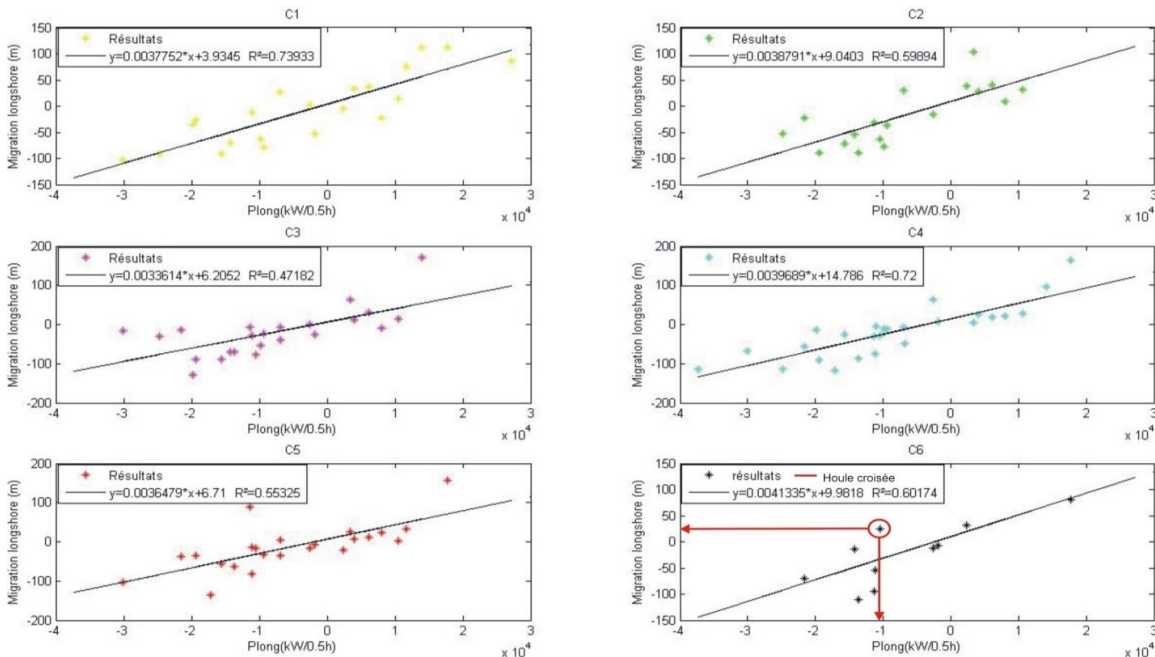


Illustration 25 - Relation entre le déplacement longitudinal des cornes C1 à C6 et la puissance longitudinale maximale

Le déplacement de chacune des cornes de barre montre une forte dépendance vis-à-vis de l'énergie longitudinale maximale entre chaque tempête. Pour une houle de S-SE, les cornes se déplacent vers le NE et inversement pour une houle d'E-SE, elles se déplacent vers le SO. Pour des conditions de « non-agitation » (cycle de tramontane) où l'énergie longitudinale reste faible, la migration est quasiment inexistante. Pour certaines tempêtes, l'utilisation de l'énergie maximale n'est pas représentative de la migration car il y a des changements de direction des vagues de houle en intensification sur toute la période d'agitation (houle croisée). C'est notamment le cas pour des données de la corne C6 où la migration se fait vers le SO alors que la puissance longitudinale maximale est négative.

Les régressions donnent une assez bonne estimation de la vitesse de migration lors de la tempête. Excepté pour les cornes C3 et C5, la pente de la droite augmente avec la jeunesse de la corne (C1 : 0.00378 ; C2 : 0.00388 ; C4 : 0.00397 ; C6 : 0.00413) ce qui indique une migration de corne plus rapide au NE, dans le secteur où les barres sont très proches de la côte.

Enfin, il semblerait que deux pics de même intensité mais d'incidence opposée ne font pas migrer les barres avec la même amplitude. Par exemple, sur le suivi de la corne C6, une houle d'Est de puissance longitudinale de 2.10^4 kW/0.5h a fait migrer la corne d'environ 180 m alors que pour une houle du Sud de même puissance la corne n'a migré que d'environ 120 m.

c) Evolution transverse (migration barre et avancée/recul du trait de côte)

L'étude de l'évolution *cross-shore* (perpendiculaire au trait de côte ou transverse) de la barre reste assez complexe à déterminer du fait de la migration longitudinale des festons dans le sens de la dérive et de la largeur du déferlement qui varie fortement selon la section étudiée, car l'immersion de la barre et sa distance à la côte changent. Ainsi, cette migration n'a pas été quantifiée mais seule la tendance générale a été retenue et reste très approximative : une forte migration vers le large de la barre apparaît pour des houles de $H_s > 3$ m. Sur toute la période analysée, le bilan est une variation de distance barre/Xargus nulle à l'Est, un recul de quelques mètres au centre et une variation nulle à l'Ouest.

Le suivi des évolutions du trait de côte met en revanche en évidence des phénomènes d'avancée et de recul inhomogènes sur la période d'étude (Illustration 26).

On note que sur la période de juin à octobre 2011 (période de calme), la morphologie de plage n'a pas changé de manière marquante. Entre octobre et décembre 2011, plusieurs coups de mer du Sud ($H_s > 2$ m) ont eu lieu et le trait de côte a subi plusieurs reculs atteignant une vingtaine de m. Après décembre 2011, une nouvelle période de calme permet une légère avancée du trait de côte puis un nouveau recul d'une dizaine de mètres apparaît à la suite du coup d'avril 2012. L'été calme de 2012 est bénéfique puisqu'une avancée de la plage est visible, permettant un retour à la situation observée à la fin de l'hiver 2011. Un nouvel épisode énergétique apparaît au début de l'hiver 2012 faisant reculer le trait de côte d'une vingtaine de mètres.

On note aussi que certaines portions de plage situées entre 2100 m et 2300 m et entre 400 m et 600 m (zones quasi-stables) semblent être moins sujettes aux oscillations lors des coups de mer. L'amplitude d'évolution est de l'ordre de 3 m contre 20 m pour la partie centrale où l'érosion est importante pour les coups ayant une hauteur significative supérieure à 2 m.

L'Illustration 26-B montre très nettement la tendance érosive subite par la côte entre 900 m et 2200 m. Sur l'année et demi d'enregistrement, la plage a reculé à cette position d'environ 20 m. Les deux sections quasi-stables sont visibles et se situent entre 2200 m et 2550 m et 500 m et 900 m avec une tendance à l'accrétion.

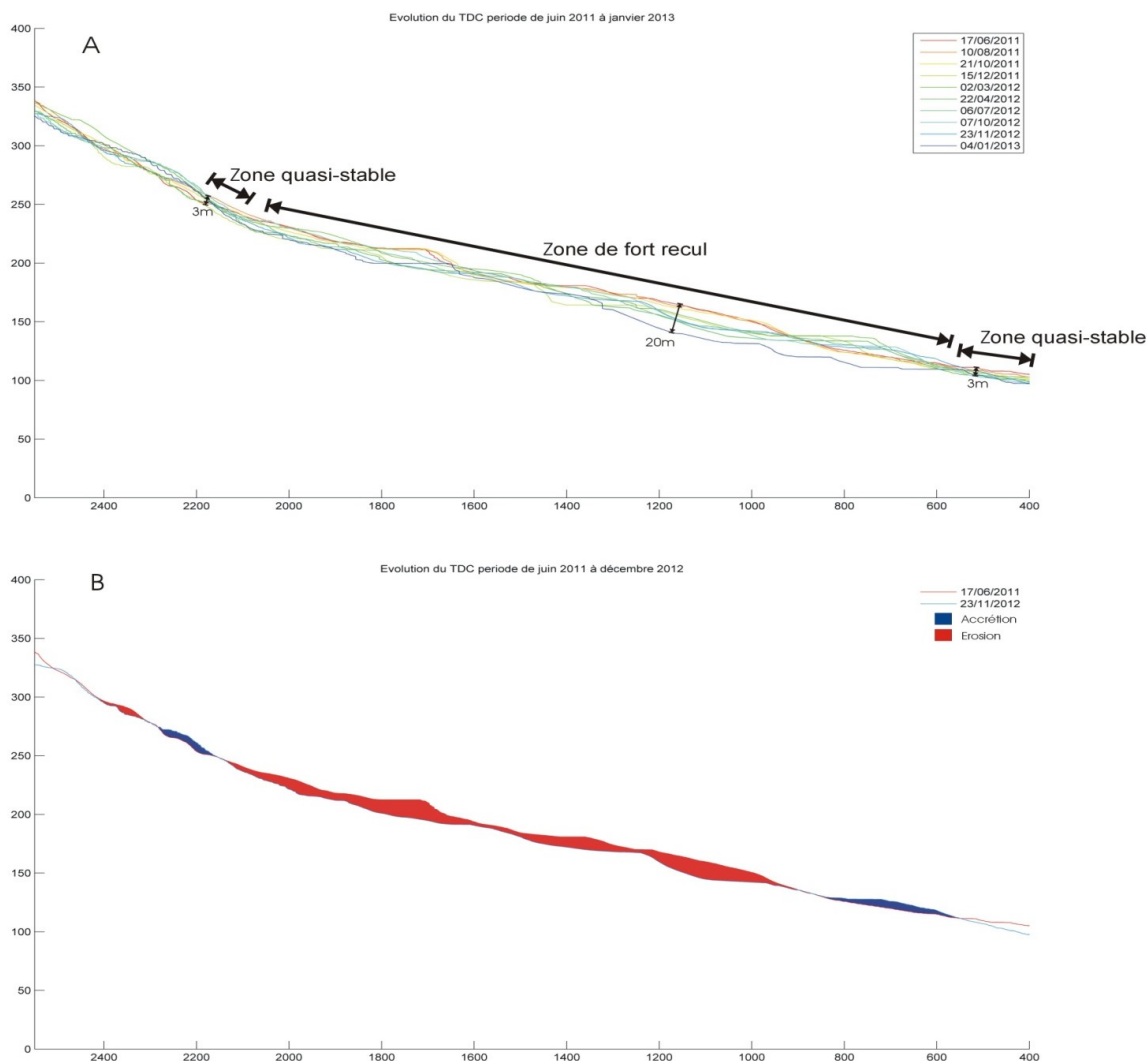


Illustration 26 – Evolution naturelle du trait de côte sur la partie Nord. A) superposition de trait de côtes sur l'ensemble de la période et B) bilan des déplacements de juin 2011 à Novembre 2012.

4.3.3. Morphodynamique naturelle de la zone Sud (-1500 m < Yargus < 400 m)

La zone Sud, contrairement à la zone Nord, est une zone relativement stable. Malgré cette stabilité, certaines zones sont fortement submergées lors de tempêtes. Il est nécessaire de s'y intéresser de manière à contrôler l'impact du tube géotextile sur le littoral adjacent.

La zone Sud est délimitée par 3 épis situés en Yargus = -950 m. Contrairement à la zone Nord, la barre interne d'avant côte est quasiment parallèle au rivage sur toute la longueur et est composée de croissants très étendus pouvant atteindre 1500 m de long (Illustration 27).

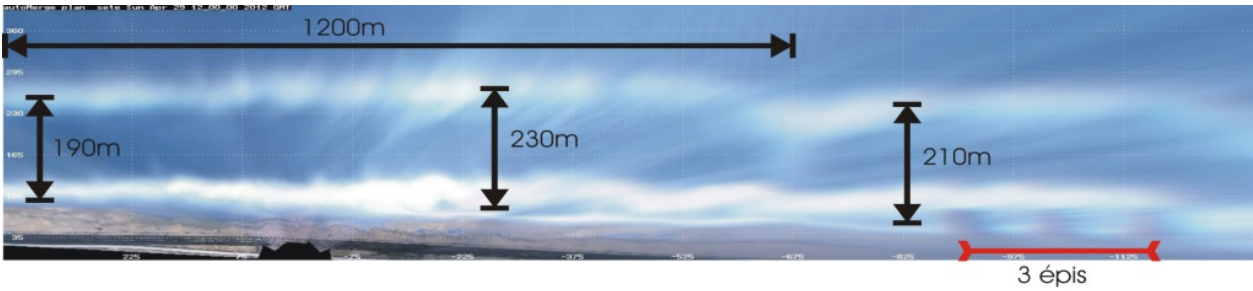


Illustration 27 – Morphologie de l'avant plage, zone Sud

La barre plus éloignée et plus immergée que dans la zone Nord migre moins vite longitudinalement. D'avril 2011 à janvier 2013, la barre a migré de 250 m au SO contre 590 m pour la corne C4 (illustration 24/25). Le trait de côte est fortement linéarisé lors de tempête d'Est car moins protégé par la barre interne (Illustration 28-E). A partir de mai 2012, une nouvelle barre festonnée tend à se décrocher de la côte et à délinéariser le trait de côte (Illustration 28-D).

Le suivi du TDC sur cette période montre un recul général d'environ 5 m sur les deux dernières années avec certaines zones qui n'ont quasiment pas bougées (Cf. Illustration 28).

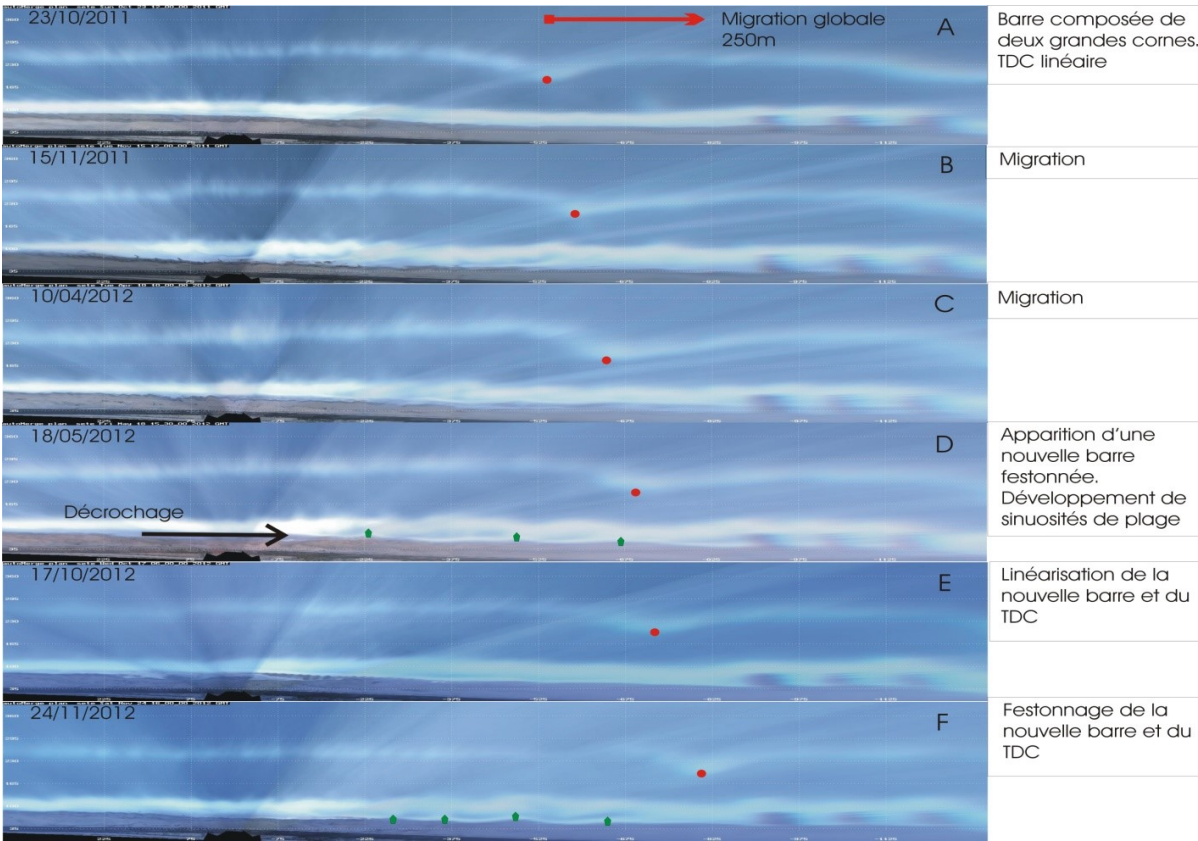


Illustration 28 – Morphodynamique du système de plage/avant-plage, zone Sud.

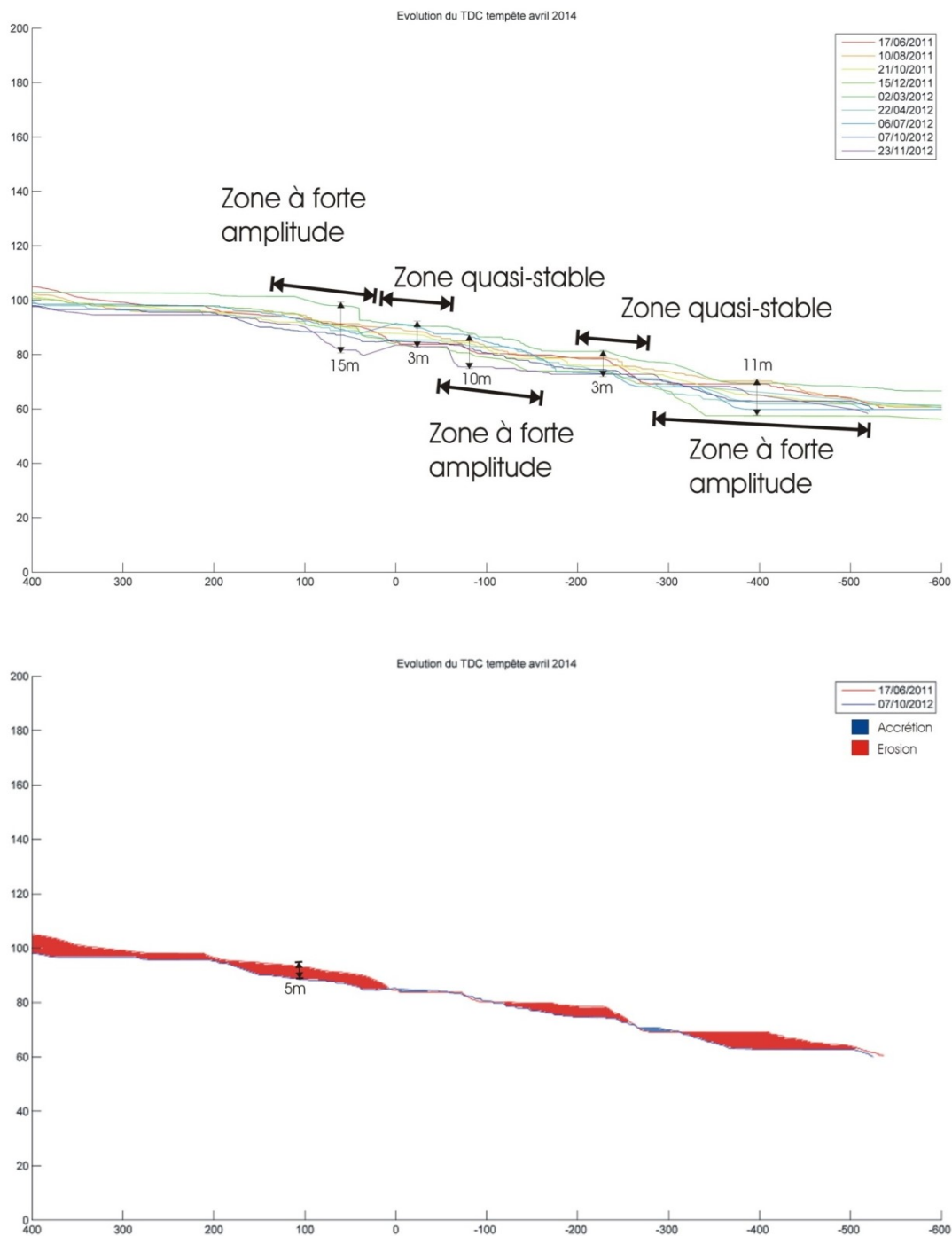


Illustration 29 – Evolution du trait de côte dans la zone sud : en haut : position successive du trait de côte pendant la période de suivi ; en bas : variation de position du trait de côte de juin 2011 à Octobre 2012.

4.4. EVOLUTION DU LITTORAL APRES LE DEPLOIEMENT DE L'ATTENUATEUR DE HOULE

Le système Argus a permis le suivi de la morpho-dynamique du système plage/avant-plage depuis l'installation du géotextile, c'est-à-dire sur une période d'une année et demie, de février 2013 à septembre 2014.

4.4.1. Morpho-dynamique de la zone Nord juste après installation (400 m < Yargus < 2550 m)

A la suite de l'installation du tube géotextile, des modifications de la morphodynamique de la zone ont été visibles. Ces modifications semblent contribuer à la recherche d'un état de stabilité du système plage/avant-plage, et concernent aussi bien les évolutions tridimensionnelles que transverses et longitudinales. Cette période de recherche de stabilité du système s'étend de janvier 2013 (fin d'installation du géotextile) à fin 2013.

a) Evolution longitudinale (barre interne et trait de côte)

Pendant cette période post-installation, la barre interne reste festonnée de manière moins prononcée mais le suivi de la migration longitudinale des cornes reste possible. Il en est de même pour les sinuosités de plage.

La tendance générale de migration longitudinale reste vers le SO. En effet, le suivi de la corne C3 révèle une migration de l'ordre de 160 m vers le SO entre le 28 février 2013 et la tempête de Noël, la corne C4 de 105 m, C5 de 160 m, C6 de 95 m et C7 de 55 m. Les cornes qui se positionnent au niveau des extrémités du tube (C4 et C7) ont donc migré moins vite que les autres cornes et la vitesse de migration n'augmente plus du Sud au Nord. En globalité, le taux de migration est moins élevé qu'avant l'installation du tube géotextile, mais ceci peut s'expliquer par l'occurrence des houles du Sud qui a augmentée.

La création des cornes se fait toujours au NE. On peut noter que la corne C7 se crée à l'extrémité Est du tube et sa migration oscille autour de cette position (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

La migration des sinuosités de plage reste en adéquation avec la migration des cornes de barre (Illustration 31). En position stable, les cornes et les sinuosités sont en phase et lors de coup de mer d'énergie importante, elles sont en antiphase. La migration des sinuosités se fait avec un temps de décalage par rapport aux cornes de barre.

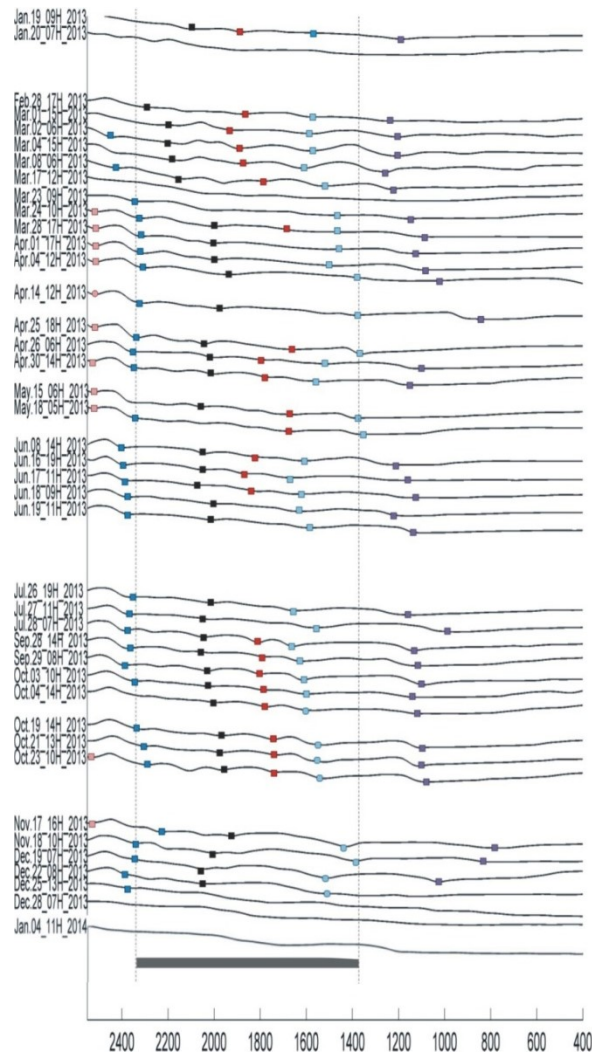


Illustration 30 - Migration longshore de la barre interne en post-installation. Les points colorés indiquent la position des différentes cornes de barres.

b) Evolution 3D et cross-shore (barre interne, barre externe, TDC)

Avant installation du tube géotextile, il a été montré que la barre interne d'avant- côte alternait entre morphologie linéaire (suite de coups de mer obliques) et morphologie festonnée (reconstruction par houle frontale). La barre externe n'étant que rarement visible (nécessité de houle de Hs supérieure à 3 m) car immergée profondément, son changement de morphologie (migration, linéarisation) était peu perçu. Elle se présentait majoritairement sous forme festonnée avec de très larges croissants (l'un est visible Illustration 31-A).

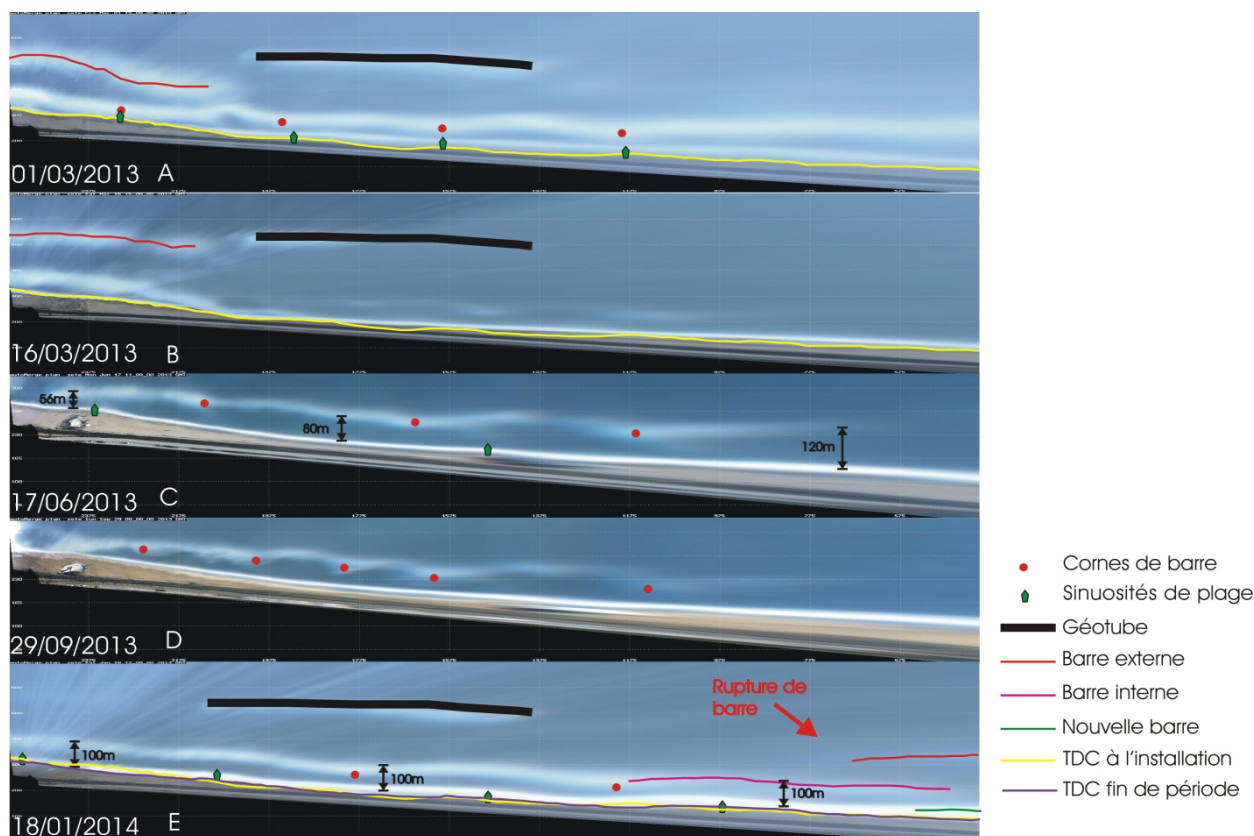


Illustration 31 – Ensemble des évolutions du trait de côte et de la barre interne après l'installation du géotextile

La première évolution, perçue à la suite de l'installation du tube et forcée par la tempête de mars 2013, est le redressement de la barre externe qui vient se joindre aux extrémités du tube (Illustration 31A/B). Il semble que ce redressement de la barre externe a un impact sur la morphologie de la barre interne et du trait de côte. A la suite du coup de mai 2013, une des cornes de la barre interne disparaît laissant place à l'allongement des trois autres, processus visible sur le trait de côte puisqu'il passe de 4 sinuosités en phase à 2 en antiphasse (Illustration 31-C). Les petits coups de mer de l'été 2013 permettent le re-festonnage de la barre interne : elle passe de trois festons à cinq (Illustration 31-C/D). A cette date, l'orientation de la barre par rapport à la côte n'est pas parallèle : elle s'en rapproche au NE et s'en écarte au SO.

L'étape tournante de la réadaptation de la morphodynamique à l'installation du géotextile apparaît à la suite de la tempête de Sud de Noël 2013 ($H_s > 4$ m, $T_p > 8$ s). La barre interne se linéarise (plus que 2 cornes visibles) et pivote (Illustration 32-B). Son écartement par rapport à la côte est constant sur toute la longueur (~100 m) et une nouvelle morphodynamique semble s'être définie avec la mise en parallèle du géotextile et de la barre externe avec la barre interne et le trait de côte (Illustration 31-E). Un phénomène de rupture de barre naît à la suite de la tempête : la barre interne se dissocie en deux bancs de sable dont l'un migre vers le large alors que l'autre plonge vers la côte (Illustration 31-E). Lors de la migration du premier banc vers le large, une barre semble se décrocher de la côte.

Cette période tampon révèle une forte linéarisation et une avancée du trait de côte avec une zone d'accrétion à l'arrière du tube encore peu marquée. Le suivi du trait de côte, entre le début de cette période et la fin, ne permet pas de définir si celui-ci a pivoté autour d'un point

(érosion au Nord et accrétion au Sud) ou si le taux d'accrétion n'est pas constant sur toute la longueur (accrétion au Nord plus importante que l'accrétion au Sud). Ces deux cas favorisent la mise en parallèle du trait de côte au système d'avant plage.

Entre mars et mai 2013, plusieurs épisodes très énergétiques à dominante Est ont fait reculer le trait de côte d'environ 5 m, excepté au niveau des zones de quasi-stabilité qui sont caractérisées par un changement de position du trait de côte de faible amplitude. Une avancée du trait de côte est visible entre la période de calme de mai à septembre 2013, avec le repositionnement du trait de côte à sa situation d'origine, voire un dépassement à l'Est. Les coups de mer frontaux d'octobre font fortement reculer la plage à l'ouest (~10 m) alors qu'elle n'a que très peu bougé à l'Est et à l'arrière du tube. La forte tempête du Sud de décembre 2013 semble avoir causé un recul inhomogène du trait de côte puisque celui-ci s'est déplacé d'environ 5 m à l'Est, 10 m à l'arrière du tube et 20 m à l'ouest. Enfin, le retour au calme d'avril 2014 a permis une forte avancée du trait de côte à l'arrière du tube et à l'extrémité Est de celui-ci (Illustration 32-A).

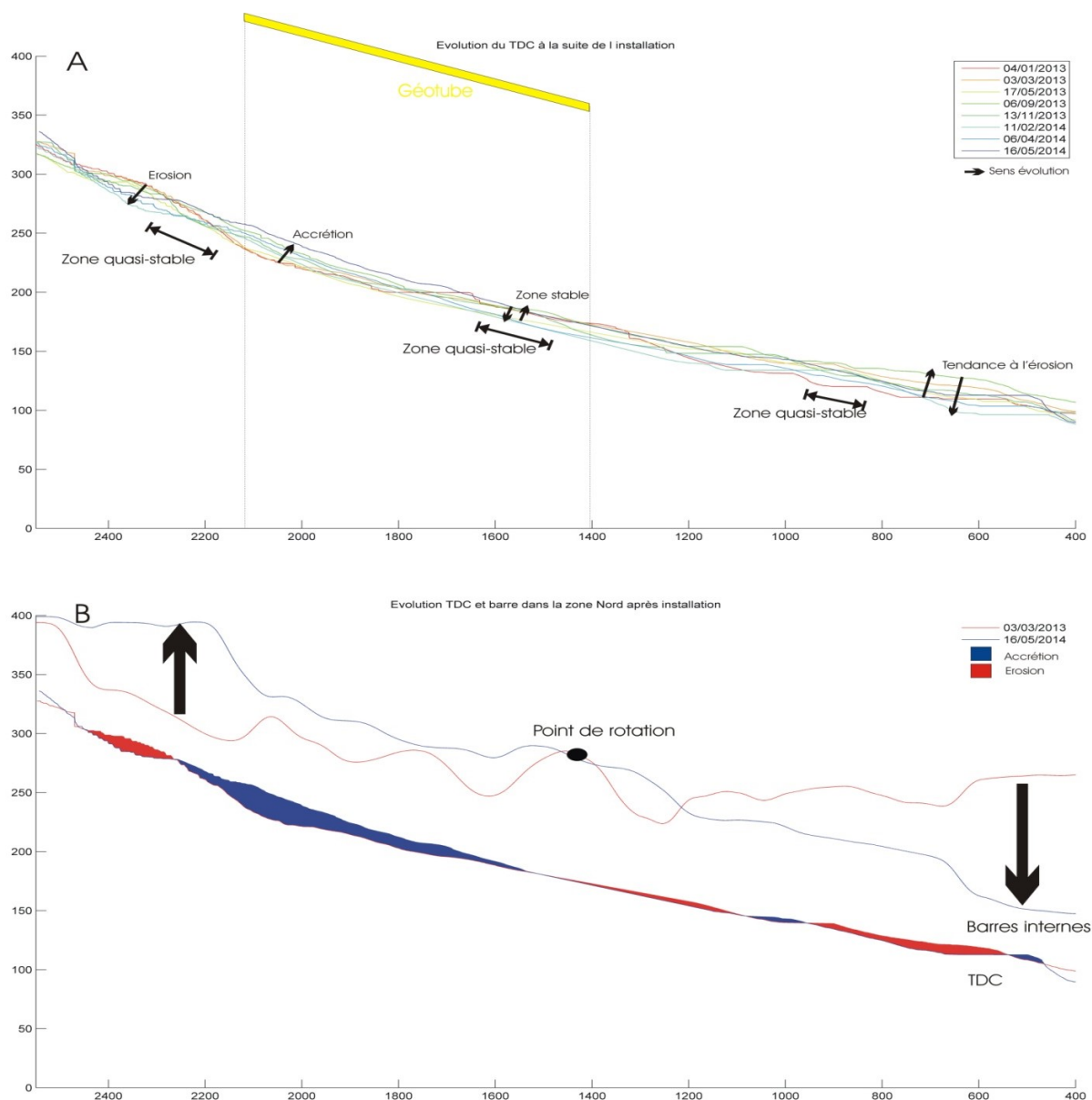


Illustration 32 – Evolution de la position du TDC après installation du tube géotextile

Les modifications du trait de côte les plus importantes sont au NE avec une zone de forte érosion en Yargus = 2400 m (-15 m) et une zone de forte accrétion en $2300 \text{ m} < \text{Yargus} < 1600 \text{ m}$ (+25 m). Sur ces deux zones, l'avancée et le recul du trait de côte se sont faits progressivement entre janvier 2013 et mai 2014. Au SO, on note une alternance de zones d'érosion, d'accrétion et de stabilité mais dont la tendance générale reste à l'érosion avec un recul moyen de l'ordre de 6 m. Un point de rotation du trait de côte peut donc être défini entre ces deux zones en Yargus = 1450 m. L'ensemble de ces processus d'accrétion/érosion a contribué à la linéarisation du trait de côte, avec une érosion générale du trait de côte excepté à l'arrière du tube géotextile (Illustration 32-B).

4.4.2. Morpho-dynamique de la zone Nord après la période tampon

Il a été montré précédemment que la tempête de décembre 2013 a été une phase tournante dans la réponse morphologique de la zone à l'installation du tube géotextile. Une nouvelle morphodynamique semble s'être installée depuis janvier 2014. La barre externe s'est linéarisée et est maintenant accolée à l'extrémité NE du tube, formant une géométrie linéaire sur $1200 \text{ m} < \text{Yargus} < 2550 \text{ m}$ (Illustration 33-zone 1). La barre interne est parallèle au système barre externe NE/tube géotextile avec une fosse externe (entre la barre interne et le tube) de largeur constante d'environ 170 m. La barre interne se linéarise lors de coups de mer très énergétiques mais, des instabilités apparaissent (création au NE) et migrent à l'arrière du tube géotextile (Illustration 33-zone 2) lors du retour au calme et de houles obliques peu énergétiques. Enfin, deux instabilités immobiles sont présentes sur la barre interne au niveau des extrémités du tube géotextile (Illustration 33-zone 3), avec une forte accrétion au niveau de l'instabilité Sud de la barre. En réponse à ces évolutions, le trait de côte est parallèle au système d'avant plage et présente deux sinuosités au niveau des extrémités du tube et face aux instabilités de la barre interne (Illustration 33-zone 4). La largeur de la fosse interne est elle aussi constante et d'environ 90 m. Le TDC est complètement linéaire à l'arrière du tube et les sinuosités toujours observées dans ce secteur ont disparues. Dans le secteur de la rupture de barre plus au SO, la barre interne et la nouvelle barre interne du Sud se sont réalignées (Illustration 33-zone 5) n'en formant plus qu'une alors que l'ancienne barre migre vers le large (Illustration 33-zone 6).

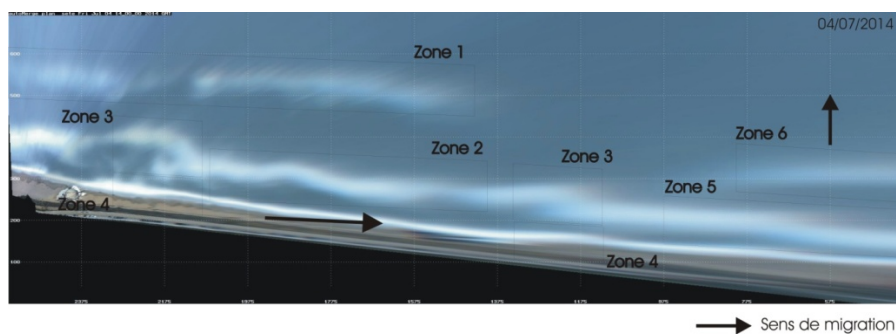


Illustration 33 – Nouvelle morpho-dynamique de la zone Nord avec le tube géotextile

4.4.3. Morpho-dynamique de la zone Sud après installation du tube

La morpho-dynamique de la zone Sud semble s'être modifiée pendant et à la suite de la réorganisation de la zone Nord. La première modification apparaît sur la barre ex-interne

devenue externe : après l'installation du tube, celle-ci s'est totalement linéarisée (disparition de la corne de barre, **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Illustration 34-A/C) et s'est éloignée de la côte d'une cinquantaine de m pour se mettre au niveau de l'ouvrage (Xargus~340 m, **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Illustration 34-E). La linéarisation de la barre externe dans cette zone a suivi la linéarisation dans la zone Nord (coup d'Est de mars 2013) puisqu'elle apparaît à la suite du coup du SE de mai 2013. L'éloignement de la barre apparaît brutalement à la suite de la tempête de Noël 2013 au moment de la rupture de barre au Nord (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.-C**).

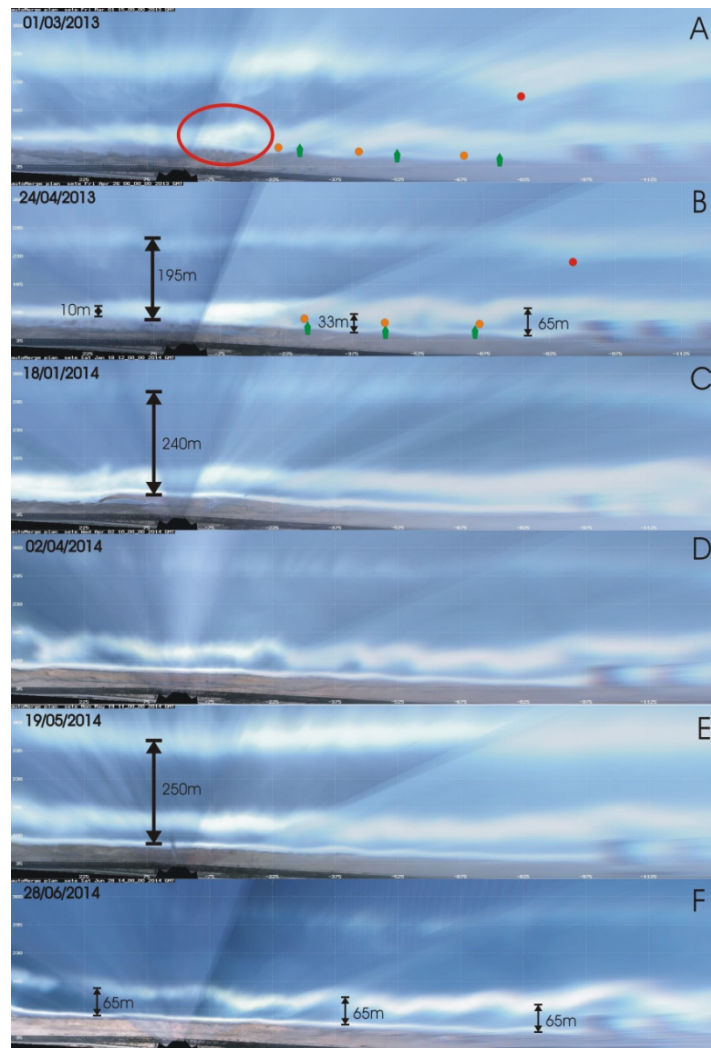


Illustration 34 – Morpho-dynamique de la zone Sud après le déploiement du géotextile

La deuxième modification concerne la nouvelle barre interne qui se détache progressivement de la plage. Suite à l'installation (février 2013), celle-ci a migré vers le large tout en restant oblique par rapport au rivage (10 m au NE contre 65 m au SO). Son comportement entre février 2013 et la tempête de décembre 2013 est semblable à celui observé sur la barre interne de la zone Nord avant installation du géotextile. En effet, sa dynamique repose sur une alternance de festonnages et de linéarisations suite à des coups forts d'Est, avec migration des cornes de barre selon l'incidence de la houle (Illustration 34-A/B). En réponse aux migrations des cornes de barre, les sinuosités de plage migrent elles aussi, avec une position en phase après une période de calme (position stable) et en antiphase

lors de coups de mer violents (position instable). La génération des cornes de barre se fait aussi à l'Est, là où la barre est rapprochée de la côte (Illustration 34-A).

En réponse à la tempête de Noël 2013, et suite à la rupture de la barre interne dans la zone Nord, la nouvelle barre interne de la zone Sud a migré vers le large pour s'attacher à la barre interne de la zone Nord. Elle a pivoté et s'est positionnée parallèlement à la côte (~65 m, Illustration 34-F). Sa morphologie alterne entre barre linéaire (résultant de coups énergétiques d'Est) et barre festonnée. L'impact des cornes de moindre amplitude sur le trait de côte semble peu prononcé puisque celui-ci est resté linéaire malgré leur présence (Illustration 34-D/F).

4.5. ANALYSE DE L'EVOLUTION EVENEMENTIELLE AVANT/APRES INSTALLATION DU TUBE GEOTEXTILE

Afin d'évaluer le rôle du géotextile face aux tempêtes, 2 tempêtes post-installation sont comparées à 2 tempêtes de mêmes caractéristiques pré-installation du tube. La comparaison de tempêtes quasi-identiques permet d'évaluer l'efficacité du géotextile face à leur impact. Cette étude préliminaire s'intéresse au trait de côte post et pré-tempête et aux migrations de barre.

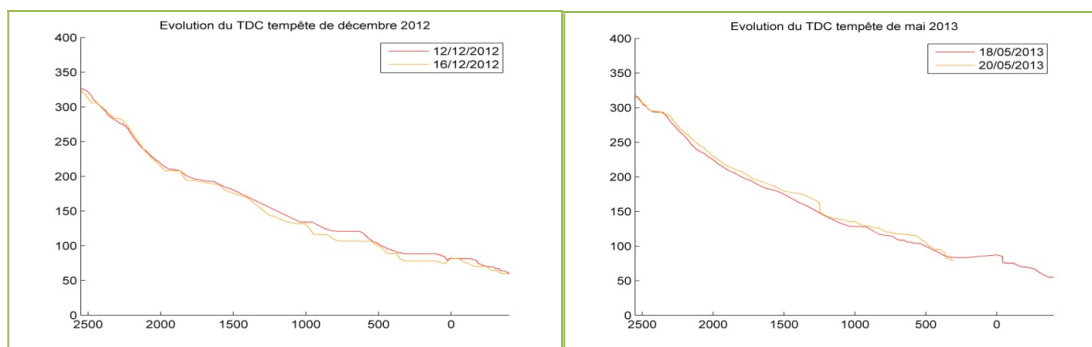
4.5.1. Analyse des réponses aux tempêtes fréquentes

Les coups de mer ou tempêtes fréquentes sont les événements pour lesquels la hauteur significative des vagues atteint plus de 3 m (Gervais, 2012). C'est à partir de ce seuil que les morphologies sur l'avant-côte et sur la plage commencent à être modifiées.

Afin d'illustrer la variabilité des réponses de la plage avant/après l'installation de l'atténuateur, les événements suivants ont été étudiés (Illustration 35) :

	Avant installation		Après installation	
Dates	18/23 Nov 2011	13/14 Dec 2012	01/04 Avr 2014	18 Mai 2013
Hs max (m)	3.2	3.1	3.3	3.1
Tp moy (s)	7	6.5	7.2	7
Incidence (°)	-20 (E-SE)	40 (S-SE)	-20 (E-SE)	40 (S-SE)
E moy (W/0.5h)	-1263221	351903	-985178	514543
E pic (W/0.5h)	-25000	30000	-22000	30000

Illustration 35 – Tableau des tempêtes (données hydrodynamiques) comparées. Hs : Hauteur significative, Tp : période de pic, E moy et Epic Energie moyenne sur l'ensemble de la tempête et Energie au pic de la tempête.



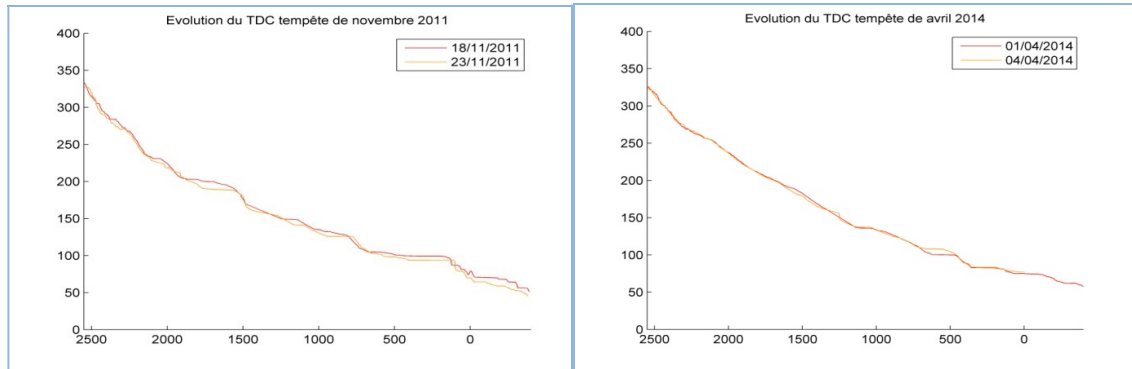


Illustration 36 – Evolution du trait de côte causée par les tempêtes comparées : déc. 2012 et mai 2013 (en haut) novembre 2011 et avril 2014 (en bas)

La comparaison de la position du trait de côte en post et pré-tempête est réalisée par temps calme juste avant et juste après la tempête, de manière à caractériser l'impact des houles considérées. Pour des houles de S/SE, l'érosion du trait de côte avant installation du tube est majoritairement impliquée par la migration des sinuosités de plage, avec un recul moyen pour novembre 2011 de 1 à 2 m. Avec le géotextile, pour une tempête de mêmes caractéristiques, le trait de côte ne semble pas avoir subi de recul mais une avancée d'ordre métrique à l'arrière du tube (Illustration 36-haut). En revanche, pour des houles d'E/SE, le trait de côte avec tube géotextile ne semble avoir subi aucune évolution, alors que sans ouvrage celui-ci a reculé d'environ 2 m (Illustration 36-bas).

4.5.2. Analyse des réponses aux tempêtes très énergétiques

Les tempêtes de Mars 2013 et celle de novembre 2014 ont été des tempêtes très énergétiques. Les hauteurs significatives pour ces deux événements sont respectivement de 4.7 et 4.9 m (Illustration 37). Les deux tempêtes ont la même puissance (~180 000 W/0.5h) et sont de même direction (~120°N). La différence entre les deux est l'état initial du milieu. L'un est pendant la période de pose du géotextile (tempête de Mars 2013) et l'autre est après (tempête de Novembre 2014).

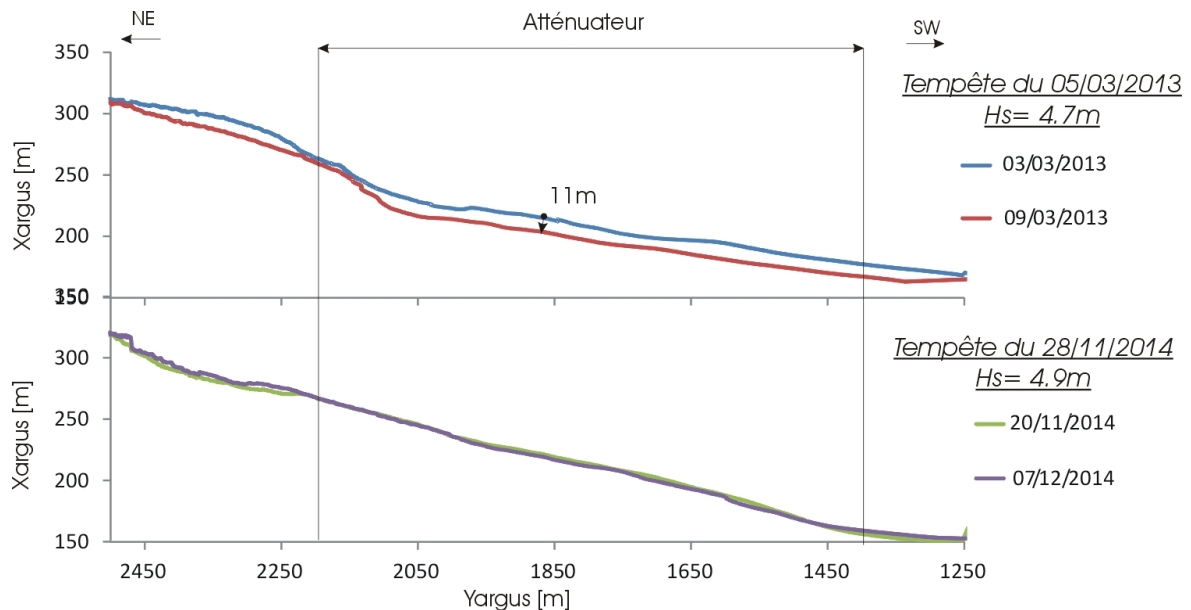


Illustration 37 - Position du trait de côte dans le repère Argus avant et après la tempête de Mars 2013 sans géotube (en haut) et avant et après la tempête de Novembre 2014 avec géotube (en bas)

L'illustration 36 présente les positions des traits de côte juste avant et après la tempête de Mars 2013 et celle du 28 Novembre 2014.

La grande différence entre les réponses morphologiques observée est la stabilisation du trait de côte face à l'atténuateur. En effet un recul, de 11 m est observé lors de la tempête de Mars alors qu'en Novembre le trait de côte est resté stable. En Mars 2013, les images ont montré un franchissement de la dune avec des épandages sableux pouvant atteindre la voie de bus (Balouin, 2013). Pour la tempête de Novembre 2014, la plage a été submergée mais le trait de côte a retrouvé son état initial quasiment immédiatement.

La barre interne, avant la pose du géotextile, présentait des fortes sinuosités. Lors d'épisode de tempêtes, elle pouvait migrer de plusieurs centaines de mètres en quelques heures (Balouin, 2013) entraînant ainsi une érosion de la plage.

L'illustration 38 compare la position de la barre interne pendant la tempête de Mars 2013 (avant la pose de l'atténuateur) avec celle pendant la tempête du 28 Novembre 2014 (après l'installation du géotube). Les migrations de la barre sont maximales pendant le pic de la tempête, mais les images à ce moment-là sont difficiles à analyser la comparaison de la position des barres se fait donc en prenant des hauteurs significatives identiques pendant le montant puis le tombant de la tempête.

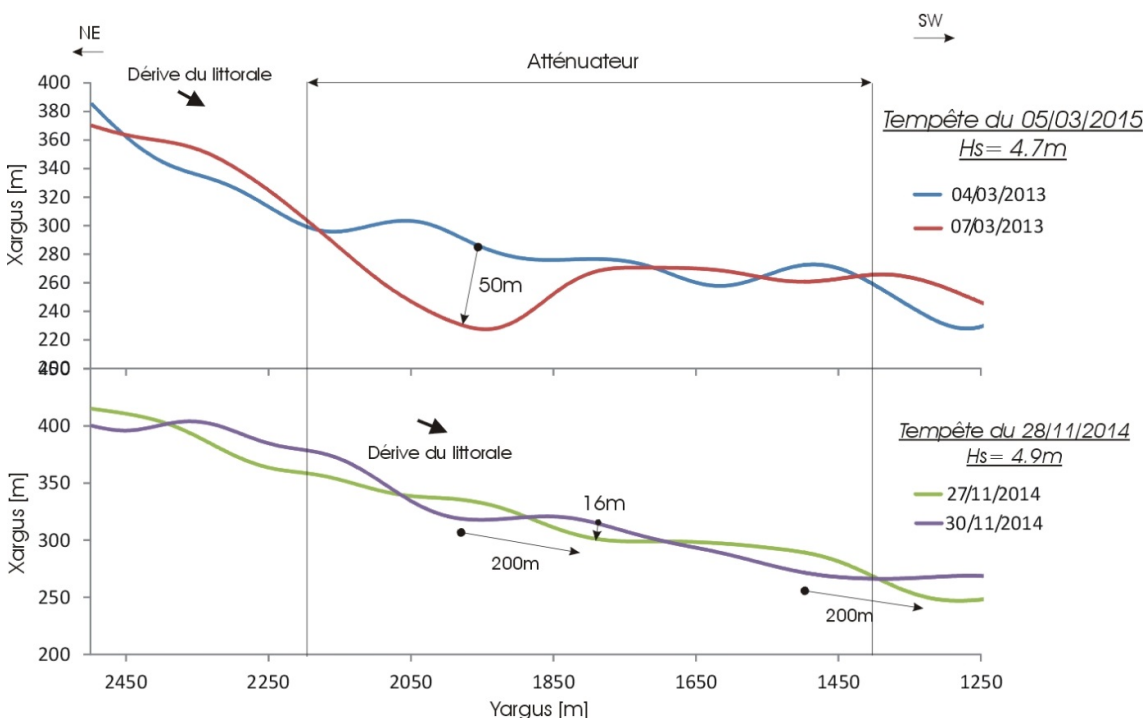


Illustration 38 - Comparaison de la position relative de la crête de barre interne lors de deux tempêtes. Mars 2013 (haut) et novembre 2014 (bas).

Les positions successives des crêtes de barres montrent bien la linéarisation de la barre déterminée lors des études précédentes. Elle présente toujours des forts déplacements longitudinalement de 200 m, dans la direction de la dérive littorale. En revanche, on note une mobilité transverse beaucoup plus importante pour la tempête de Mars 2013, avec des déplacements atteignant 50 m alors que la crête de barre en novembre 2014 est relativement stable (déplacement de l'ordre de 16 m principalement lié au déplacement longitudinal).

4.5.3. Incidence sur le jet de rive, la submersion de la plage, et les dégâts en pied de dune

La morphologie 3D de la plage et la forme du trait de côte ont une importance capitale en ce qui concerne la longueur de submersion et la force des courants d'arrachement. L'illustration 39 compare l'extension de la submersion des tempêtes équivalentes de novembre 2011 et d'avril 2014. Pour la tempête de novembre 2011, le trait de côte se compose de sinuosités et la submersion de plage est très importante au niveau des baies alors qu'elle est peu élevée au niveau des bosses de plage. Pour la tempête d'avril 2014, le trait de côte étant quasi-linéaire permet une élévation du jet de rive constante le long du rivage.

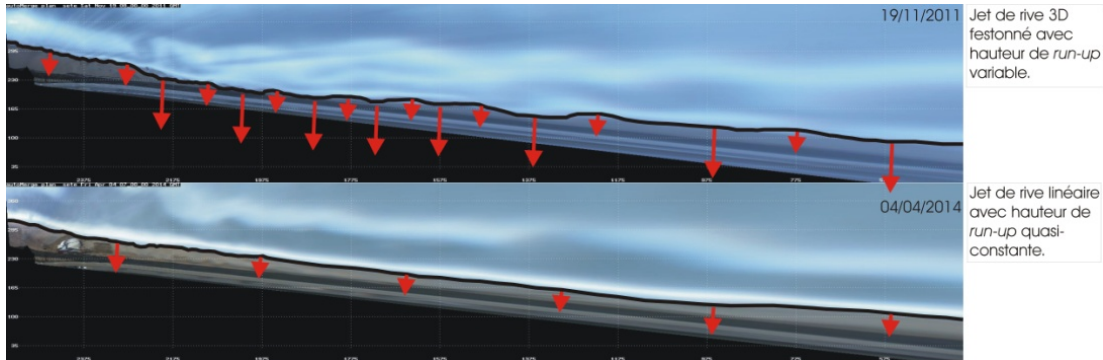


Illustration 39 – Variation des longueurs swash pour des tempêtes hydrodynamiquement équivalentes

4.6. ANALYSE DES EVOLUTIONS LIEES AU RECHARGEMENT DE JANVIER 2015

Un rechargement de 510 000 m³ de sable sur un linéaire de 2 km de côte a été réalisé fin 2014 à début 2015. Sur ces 510 000 m³, 410 000 m³ ont été injectés sur la plage émergée afin de porter sa largeur à 70 m et 100 000 m³ injectés dans les petits fonds (de -2 m à 3 m) pour constituer un stock de matériaux. Le sable est récupéré par dragage au niveau du site de la Flèche sous-marine de l'Espiguette, à 40 km du site.

Les travaux du rechargement se sont déroulés en plusieurs étapes :

- Un faible rechargement du 15/11/2014 au 21/11/2014
- Le rechargement total du 07/12/2014 au 10/02/2015, interrompu à plusieurs reprises en raison des conditions météorologiques défavorables.

1.1. Suivi de la période de rechargement du site

Le remblaiement en sable de la plage s'est effectué en deux fois avec deux techniques différentes (Illustration 40) :

- la première était de déposer le sable linéairement en remontant vers le NE ;
- la seconde était de partir du point final et de constituer un dôme de sable qui ensuite s'étalerait sur l'ensemble de la zone.

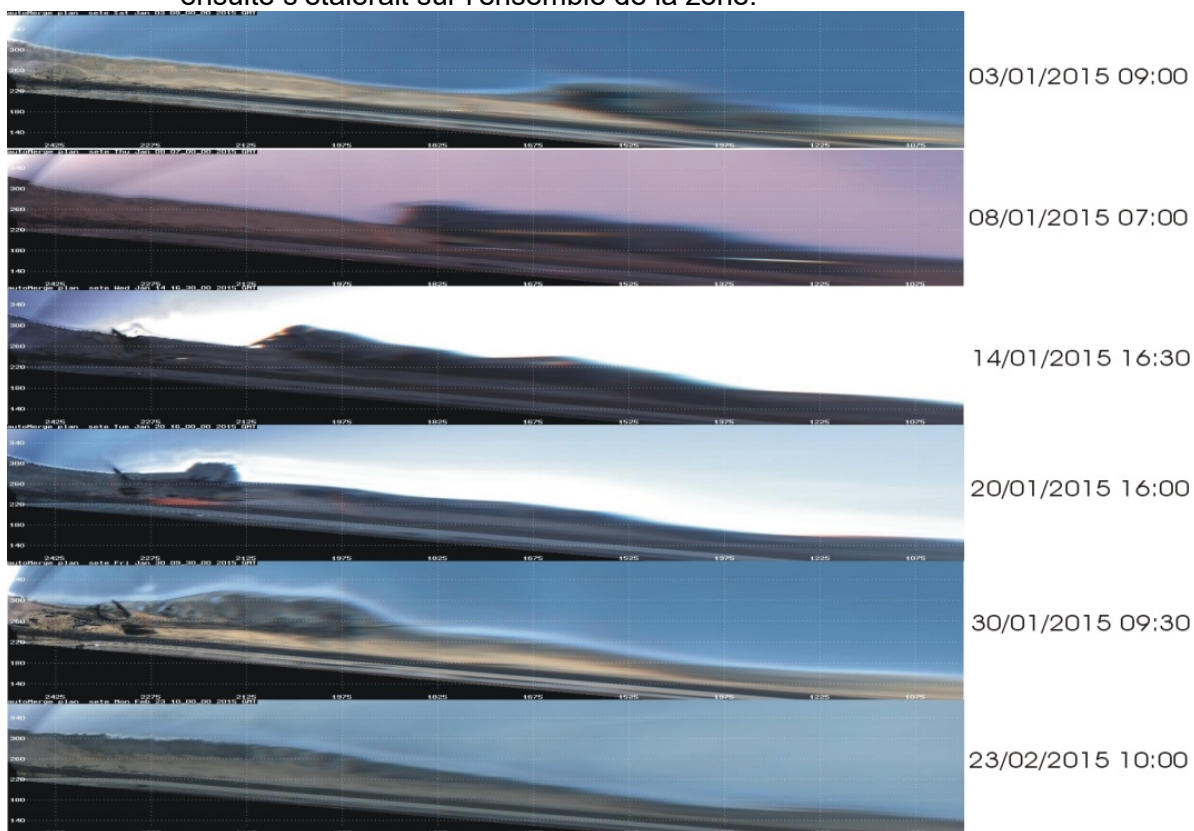


Illustration 40 - Images orthorectifiées des caméras c6, c7 et c8 mettant en évidence la progression du rechargement en Janvier et Février 2015.

La position du trait de côte dans ce secteur avant et après le rechargement (Illustration 41) témoigne d'une avancée significative de la plage. Au cours du rechargement, l'alimentation en sable permet d'atteindre localement une largeur de plage (de la ganivelle au trait de côte) de 94 m, et une fois le sable remanié et stabilisé, un atteint une largeur de plage de l'ordre de 70 m.

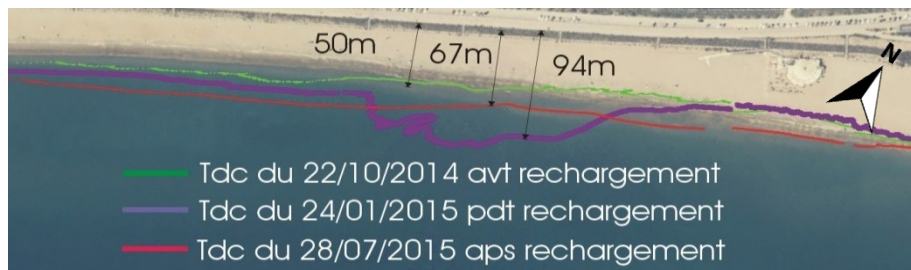


Illustration 41 - Evolution de la largeur de la plage au cours du rechargement

Pour mieux comprendre la dynamique de stabilisation du rechargement, Illustration 43 présente l'évolution temporelle de la position du trait de côte sur 3 profils situés respectivement à $Y_{\text{Argus}}=2200$ m ; 2000 m et 1800 m (Illustration 42).

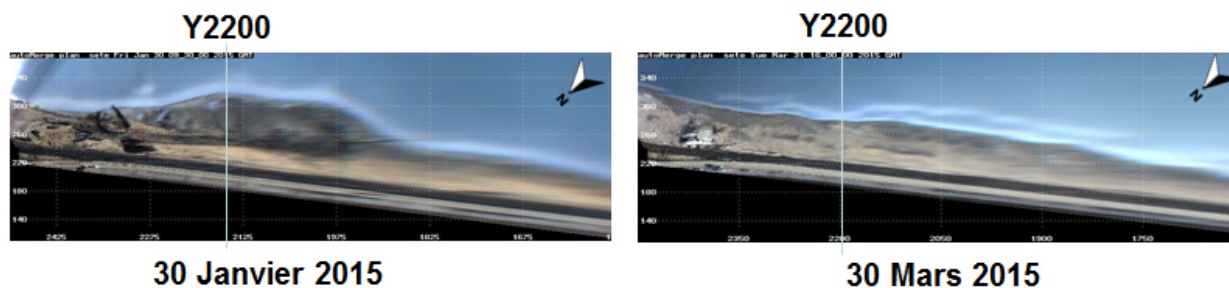


Illustration 42 – Exemple de profil transverse ($Y=2200$ m) utilisé pour l'analyse temporelle du rechargement.

De Juin à Décembre 2014, la position du trait de côte sur les trois profils est homogène et se traduit par une très faible mobilité. On observe notamment l'absence de recul lors de la tempête de Novembre 2014, malgré une hauteur de vagues atteignant près de 5 m.

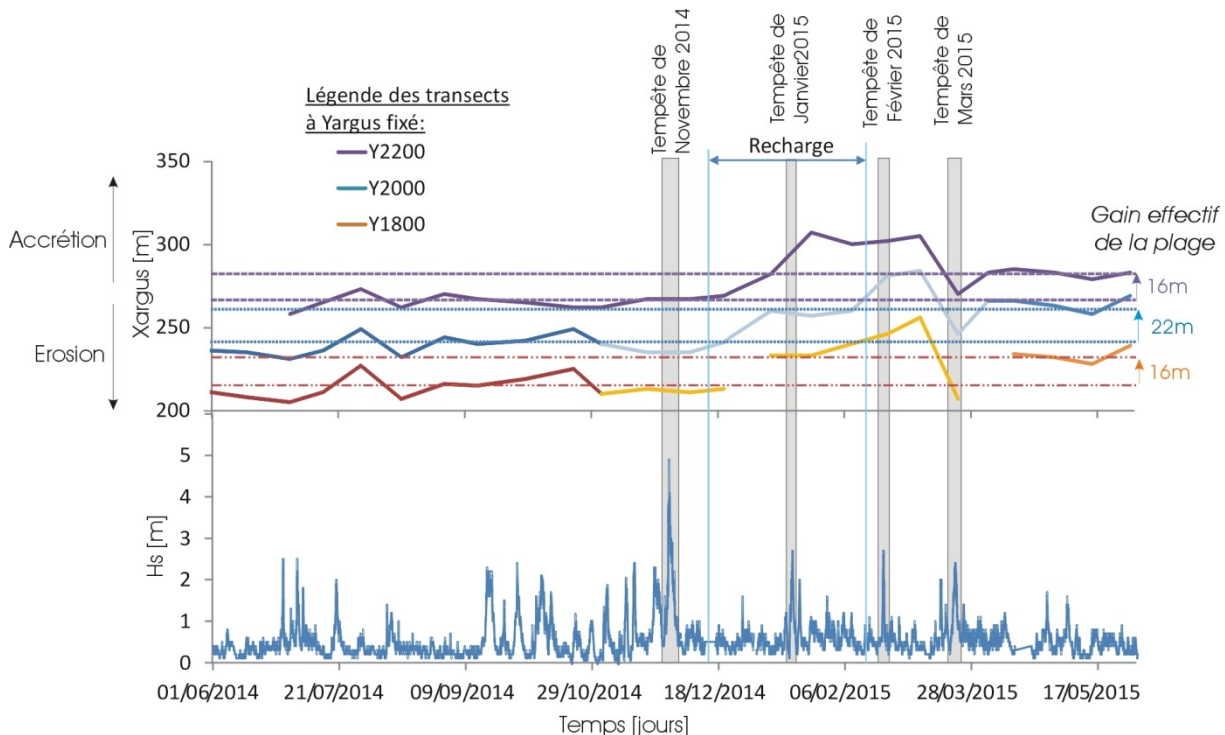


Illustration 43 - Position transverse du trait de côte sur 3 profils de la zone de rechargement (en haut) en relation avec les conditions de houle (hauteur significative des vagues, en bas).

Début Janvier 2015, on observe une avancée importante du trait de côte sur les 3 profils, même si cette avancée est assez hétérogène du fait de la technique de rechargement. L'avancée moyenne est de l'ordre de 50 m. Le trait de côte se stabilise alors jusqu'à la tempête de Mars 2015 qui entraîne un recul significatif de la plage. Suite à cette tempête modérée, un important volume de sable s'est déplacée sur l'avant-côte et une partie de ce stock regagne la plage en quelques jours. On revient alors à une phase de stabilité du trait de côte qui semble traduire un nouvel équilibre post-rechargement. Le gain effectif résiduel pour la plage est alors compris entre 16 et 22 m.

1.2. Evolution événementielle suite au rechargement

Les tempêtes du sud de Janvier et Février 2015 (Illustration 43), qui ont eu lieu respectivement pendant et après le rechargement, n'ont pas influencé de manière significative la position du trait de côte. Elles ont contribué au décalage de la quantité de sédiment plus vers le SW. Par contre, la tempête de Mars 2015, de direction Sud et d'intensité moyenne, a diminué fortement la largeur de plage, enregistrant un recul de plus de 20 m (Illustration 44).

Cette variation de réponse de la plage émergée entre novembre 2014 et Mars 2015 traduit la non-stabilité du stock sableux au mois de mars. Le sédiment ayant juste été déposé présente probablement des volumes et des pentes qui ne correspondent pas à l'hydrodynamique du site, et cette érosion massive de la plage aérienne n'est pas surprenante. L'illustration 43 montre bien sur les différents transects ce recul important, qui est suivi d'une reconstruction naturelle partielle rapide. Sans cet événement, la plage aurait probablement atteint un nouvel équilibre en quelques semaines, avec une largeur résultante légèrement plus importante.

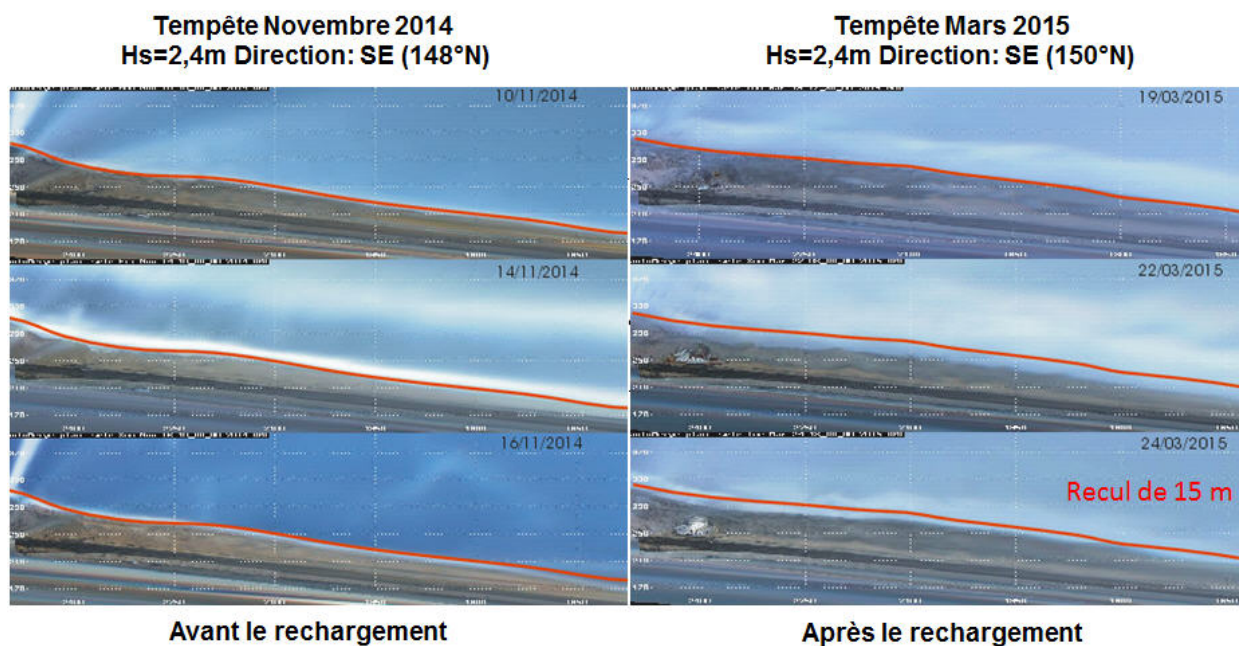


Illustration 44 - Evolution de la position des traits de côte lors des tempêtes de novembre 2014 et de mars 2015. Le trait de côte pré-tempête en rouge est reporté sur les images ortho-rectifiées au pic et après la tempête.

1.3. Action de la dérive littorale et transfert sableux vers la zone adjacente au SO

Au centre du Lido de Sète (Yargus = 300 m-1250 m) aucun ouvrage n'a été installé permettant de suivre la progression naturelle de la zone. Avant le rechargement la zone enregistrait une érosion constante comme l'ensemble du site d'une vingtaine de mètres (Balouin, 2013). La recharge ayant lieu plus au Nord, le secteur en a bénéficié, notamment grâce à la dérive littorale, qui a déplacé le stock sédimentaire (Illustration 45 et 45).

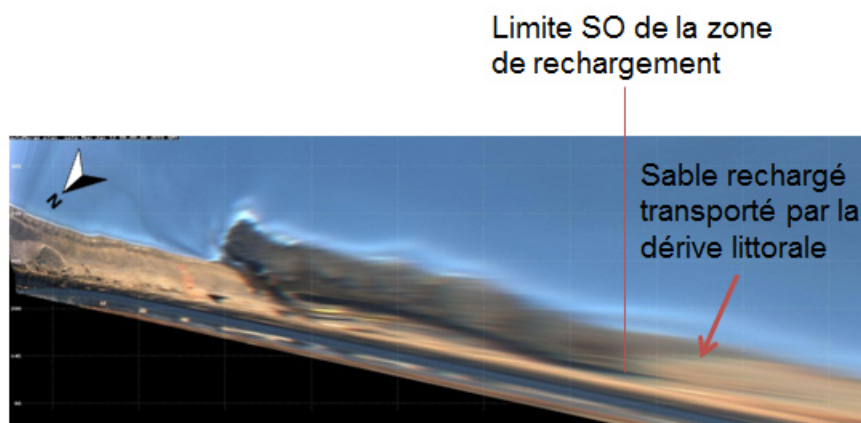


Illustration 45 – Image orthorectifiée de la zone de rechargement illustrant le transport des sédiments rechargés (plus sombres) vers le SO par la dérive littorale dominante.



Illustration 46 – Image oblique de la caméra C2 le 21 juin 2015 mettant en évidence la présence de sable rechargé (plus sombre) en bas de plage, à plus de 1 km de la zone rechargée.

Ce transport par la dérive littorale du sable rechargé entraîne un gain sédimentaire non seulement pour la zone rechargée mais également pour la zone adjacente au SO. L'illustration 47 met en évidence une avancée du trait de côte dans la zone adjacente qui atteint environ 10 m dans la zone à proximité du rechargement et quelques mètres dans le secteur plus au sud à proximité des 3 digues.

Le taux de transport reste délicat à établir en raison de l'absence de données sur l'épaisseur du sable rechargé. Toutefois, on note l'apparition de sable plus sombre rechargé face au mât SO à partir de juin 2015, ce qui représente un déplacement de plus de 1500 m en 6 mois.

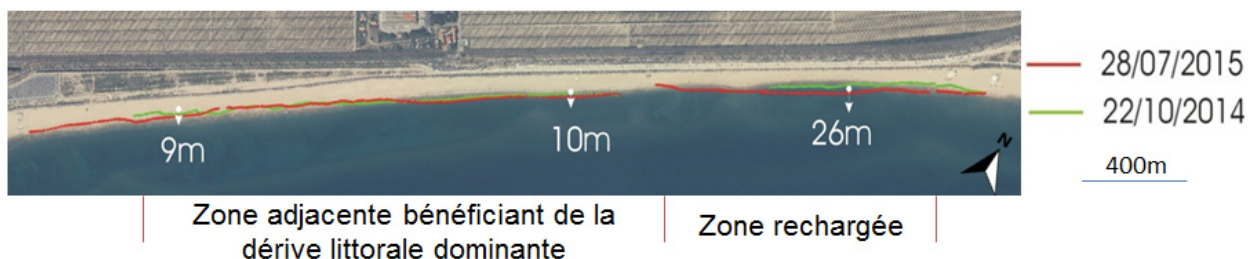


Illustration 47 – Avancée du trait de côte sur la zone adjacente au rechargement qui bénéficie d'apports par la dérive littorale dominante.

5. Conclusions sur les évolutions observées et les effets de l'atténuateur de houle et du rechargement sur le littoral du Lido

5.1. SYNTHÈSE DES ÉVOLUTIONS OBSERVÉES DE 2011 À 2015

La mise en place de l'atténuateur a fortement modifié la morphodynamique du site, que ce soit derrière le géotextile ou sur la zone adjacente.

Dans son état initial (Illustration 48), le trait de côte présentait des sinuosités marquées, en miroir avec les barres d'avant-côte en croissant. La barre d'avant-côte formait un angle important avec le trait de côte, s'éloignant de la côte vers le SO. En conséquence, dans la partie nord-est du Lido, la dynamique de la plage était fortement contrainte par celle de l'avant-côte. Cette dynamique se caractérisait par une migration des morphologies sous l'effet des houles, avec un mouvement résultant vers le sud-ouest. Lors des tempêtes les plus violentes, les barres pouvaient migrer rapidement longitudinalement, se retrouvant en antiphasse avec les sinuosités de plage et favorisant l'apparition de points vulnérables sur la plage. Dans ces secteurs, l'atténuation naturelle de l'énergie des vagues par la barre était amoindrie, entraînant une propagation plus importante du jet de rive sur la plage, avec des dégâts sur les ganivelles et des franchissements localisés.

La mise en place du géotextile a entraîné dans un premier temps la quasi-linéarisation de la barre interne et le début de sa rotation pour se positionner parallèlement à l'ouvrage lors de la tempête de déc. 2013. En raison du fort couplage entre la plage émergée et la barre, le trait de côte a également tourné pour se mettre parallèle au géotextile et la barre, ce qui s'est traduit par une avancée de près de 15 m en face de l'ouvrage. Suite à cette rotation et linéarisation de la barre et du trait de côte, le système plage-avant-côte est resté quasi-stable.

La rotation de la barre en face du géotextile a également eu des effets sur la côte adjacente. En effet, une rupture de la barre a été observée à environ 800 m au sud-ouest de la zone de l'atténuateur (Illustration 48). Cette rupture, liée à la rotation de la barre interne, a entraîné la migration vers le large de l'ancienne barre interne, dite résiduelle, et l'apparition d'une nouvelle barre proche de la côte. Ce mécanisme de migration, appelé NOM (Net offshore migration) prend généralement plusieurs années et c'est effectué ici en quelques semaines.

Les barres et le trait de côte se sont par la suite stabilisés, formant un système complètement uniforme longitudinalement (Illustration 48).

Temporellement, dans la zone de l'atténuateur, quatre phases d'évolution ont pu être décrites (Illustration 49):

- La phase pré-travaux, caractérisée par un recul progressif du trait de côte avec des vitesses atteignant localement 5 m/an ;
- La phase d'adaptation après le déploiement de l'atténuateur, pendant laquelle les évolutions ont été de faible ampleur, jusqu'à la tempête de déc. 2013 qui a entraîné la rotation rapide du système ;
- Une phase d'équilibre caractérisée par une grande stabilité des morphologies côtières (barres, trait de côte) et une uniformité longitudinale ;

- La phase de rechargement, qui a entraîné une avancée rapide du trait de côte derrière l'atténuateur, puis un recul lors du coup de mer de mars 2015, positionnant le trait de côte dans une nouvelle position d'équilibre avec une largeur de plage de l'ordre de 70 m.

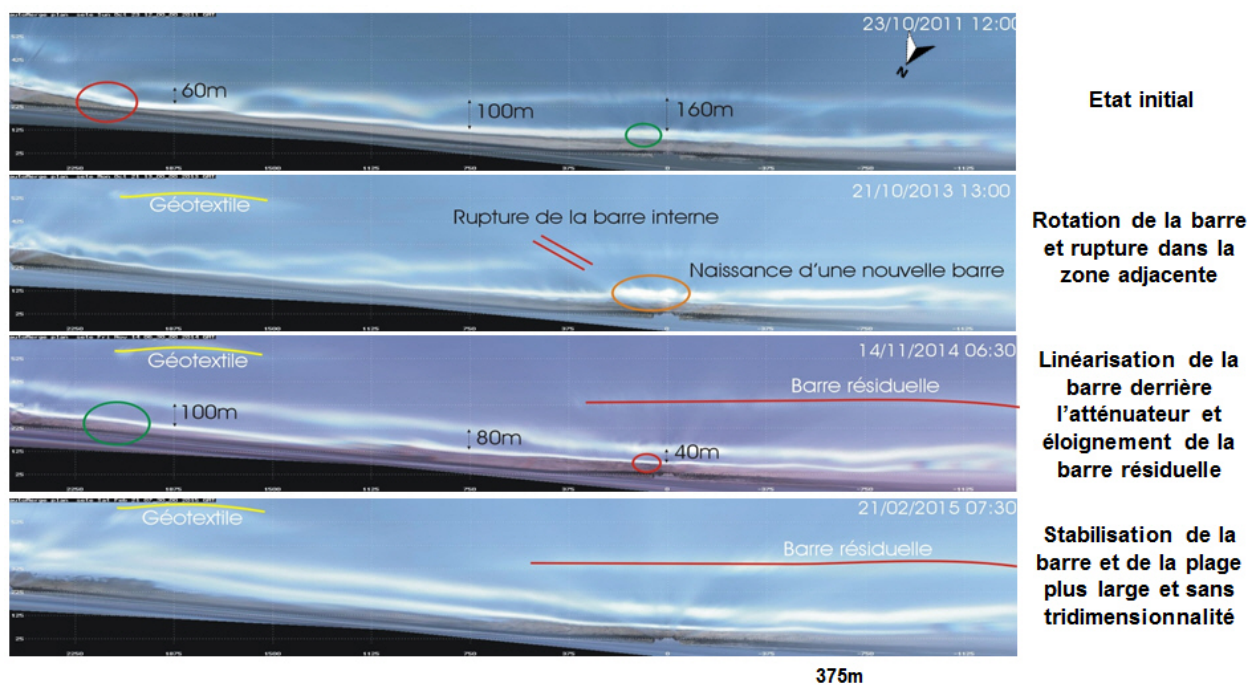


Illustration 48 – images vidéo rectifiées illustrant l'évolution du littoral du Lido de Sète de 2011 à 2015.

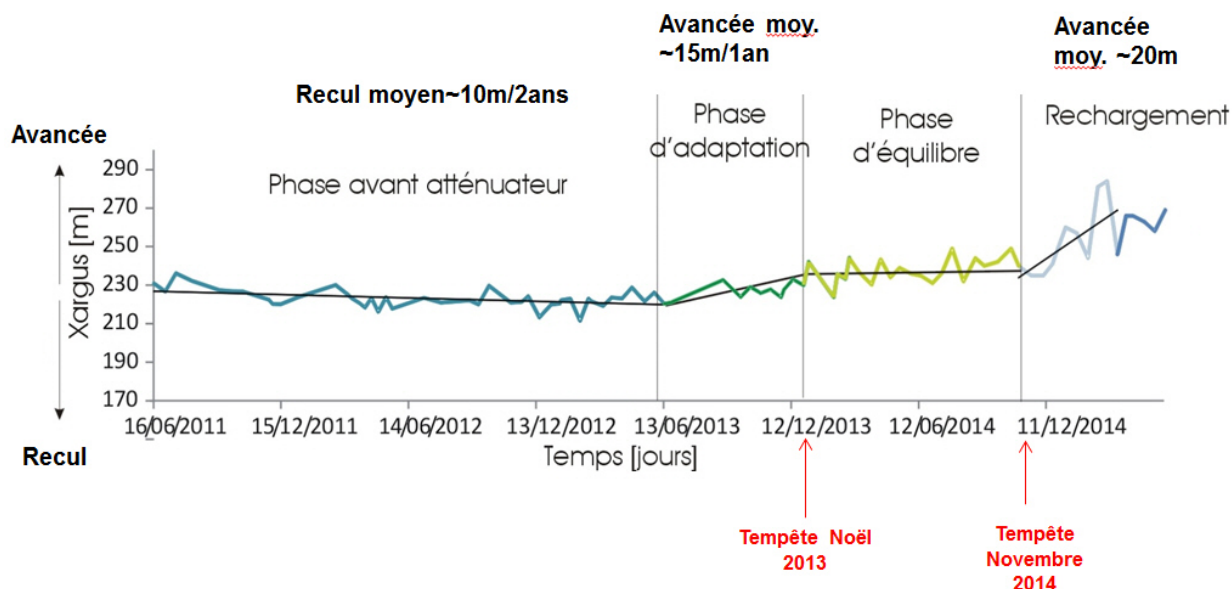


Illustration 49- Evolution du trait de côte depuis le début du suivi en 2011 mettant en évidence les différentes étapes de réponse morphologique suite aux aménagements (atténuateur en 2013 et rechargement début 2015).

5.2. EVALUATION DE L'EFFICACITE DE L'ATTENUATEUR

Les évolutions observées de 2011 à 2015 ont permis d'illustrer les réponses morphologiques suite au déploiement de l'atténuateur de houle début 2013. L'illustration suivante présente la synthèse des observations et l'évaluation de l'efficacité de l'ouvrage. Il convient de noter que ces observations ne concernent pas le suivi de l'intégrité de l'ouvrage ou d'un affouillement éventuel, qui ne sont pas accessibles par un suivi vidéo.

Compartiment littoral	Réponse morphologique	Evaluation de l'efficacité
Plage émergée	Avancée du trait de côte de l'ordre de 15 m derrière l'ouvrage, puis une stabilisation de sa position	Effet très positif
Plage émergée	Linéarisation du trait de côte, disparition des sinuosités et de la variabilité tridimensionnelle	Effet très positif
Plage émergée	Diminution du jet de rive pendant les tempêtes et diminution des dégâts sur le pied de dune et les ganivelles	Effet très positif
Plage émergée	Très forte résilience pour des tempêtes majeures (vagues au large supérieures à 5 m)	Effet très positif
Avant-côte	Déferlement sur l'ouvrage pour des hauteurs de vagues au large supérieures à 1 m	Effet positif
Avant-côte (derrière l'atténuateur)	Linéarisation de la barre et stabilisation de sa position parallèlement à l'ouvrage	Effet positif du point de vue morphologique, mais la modification des courants, notamment de la dérive littorale, reste à évaluer
Avant-côte (derrière l'atténuateur)	Perturbations et courants de retour aux extrémités de l'ouvrage	Pas d'effets négatifs observés mais perturbations à surveiller et à prendre en compte pour la poursuite de l'aménagement
Avant-côte (côte adjacente)	Rupture de la barre interne et migration vers le large favorisant l'apparition d'une nouvelle barre interne proche de la côte	Effet positif de la génération d'une barre longitudinale uniforme, mais érosion probable pour alimenter la nouvelle barre interne
Avant-côte	Probable augmentation du courant de dérive avec migration rapide du sable rechargé	Pas d'effets négatifs observés, mais à surveiller car le stock sédimentaire au NE est faible

Illustration 50 – Tableau de synthèse sur les réponses morphologiques et l'évaluation de l'efficacité de l'atténuateur

5.3. POINTS DE VIGILANCE A SUIVRE

Le suivi de la zone a mis en évidence des effets possibles de l'atténuateur sur la courantologie et sur le transit sédimentaire. Ces observations restent préliminaires et nécessitent d'être confirmées ou infirmées par des observations in-situ ou de la modélisation hydrodynamique.

Les perturbations observées aux extrémités de l'atténuateur sont également à suivre pour caractériser leur influence sur l'évolution morphologique et sur la stabilité du trait de côte. La prolongation de 250 m de l'atténuateur à l'automne 2015 fournira des données décisives pour comprendre les phénomènes à l'extrémité du géotextile et observer les modifications comportementales associées à l'extension de la structure.

La poursuite des observations permettra également d'analyser la durabilité du rechargement, en liaison avec les événements érosifs (tempêtes marines), mais également en liaison avec la dérive littorale dominante, potentiellement modifiée par l'atténuateur qui canalise les écoulements entre l'ouvrage et la côte.

6. Bibliographie

- Akouango, E., 1997. Morphodynamique et dynamique sédimentaire dans le golfe du Lion. Contribution à l'étude de la zone côtière dans l'actuel et le quaternaire récent. Thèse de Doctorat, Université de Perpignan, 191 p.
- Balouin, Y., 2013. Suivi par vidéo numérique de l'expérimentation de techniques de protection du littoral du Lido de Sète à Marseillan – Rapport d'avancement. Rapport BRGM RP-62594-FR, 60 p., 36 ill., 1 annexe
- Balouin, Y., Desbiendras, L., et Tesson, J., 2012. Suivi par vidéo numérique de l'expérimentation de techniques de protection du littoral du Lido de Sète à Marseillan – Phase 1 : présentation et validation du système Argus. Rapport BRGM RP-60874-FR, 49 p., 35 ill.
- Balouin, Y., Tesson, J. and Gervais, M., 2013. Cuspate shoreline relationship with bar dynamics during storm events – field observations at Sète beach, France. *Journal of Coastal Research*, SI 65, p.440-445.
- Barusseau, J.P., Saint-Guily, B., 1981. Disposition, caractères et mode de formation des barres d'avant-côte festonnées du littoral du Languedoc-Roussillon (France). *Ocea. Acta.* 4, 297-304.
- Barusseau, J.P., Descamps, C., Radulescu, M., Akouango, E., Gerbe, A., 1994. Morphosedimentary multiyear changes on a barred coast (Gulf of Lion, Mediterranean Sea, France). *Marine Geology*, 122, 47-62.
- Certain, R., 2002. Morphodynamique d'une côte sableuse microtidale à barres : le Golfe du Lion (Languedoc - Roussillon). Thèse de Doctorat, Université de Perpignan, 209 p.
- Egis-Eau, 2009. Protection et aménagement durable du Lido de Sète à Marseillan. Dispositif expérimental ECOPLAGE ® et ouvrage atténuateur de houle. Dossier d'enquête publique. ENS_85369P. 492p.
- Gervais, M., 2012. Impact morphologiques des surcotes et vagues de tempêtes sur le littoral méditerranéen. *Thèse de 3^{ème} cycle*, Université de Perpignan Via Domitia, 355 p. + annexes.
- Gervais, M., Balouin, Y., Thiebot, J., Certain, R., Belon, R., Pedreros, R., Robin, N., Berné, S., 2011. Morphodynamic evolution of nearshore bars in response to winter storms (Lido de Sète, NW Mediterranean). *Journal of Coastal Research*, SI 64, 1855-1860.
- Gervais, M., Balouin, Y. and Belon, R., 2012. Morphological response and coastal dynamics associated with major storm events along the Gulf of Lions coastline, France. *Geomorphology* 143-144:69-80.
- Holman, R.A. and Stanley, J., 2007. The history and capabilities of ARGUS. *Coastal Engineering* 54: 477-491.



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

BRGM Languedoc-Roussillon
1039, rue de Pinville
34000 -Montpellier - France
Tél. : 04 37 15 79 80