

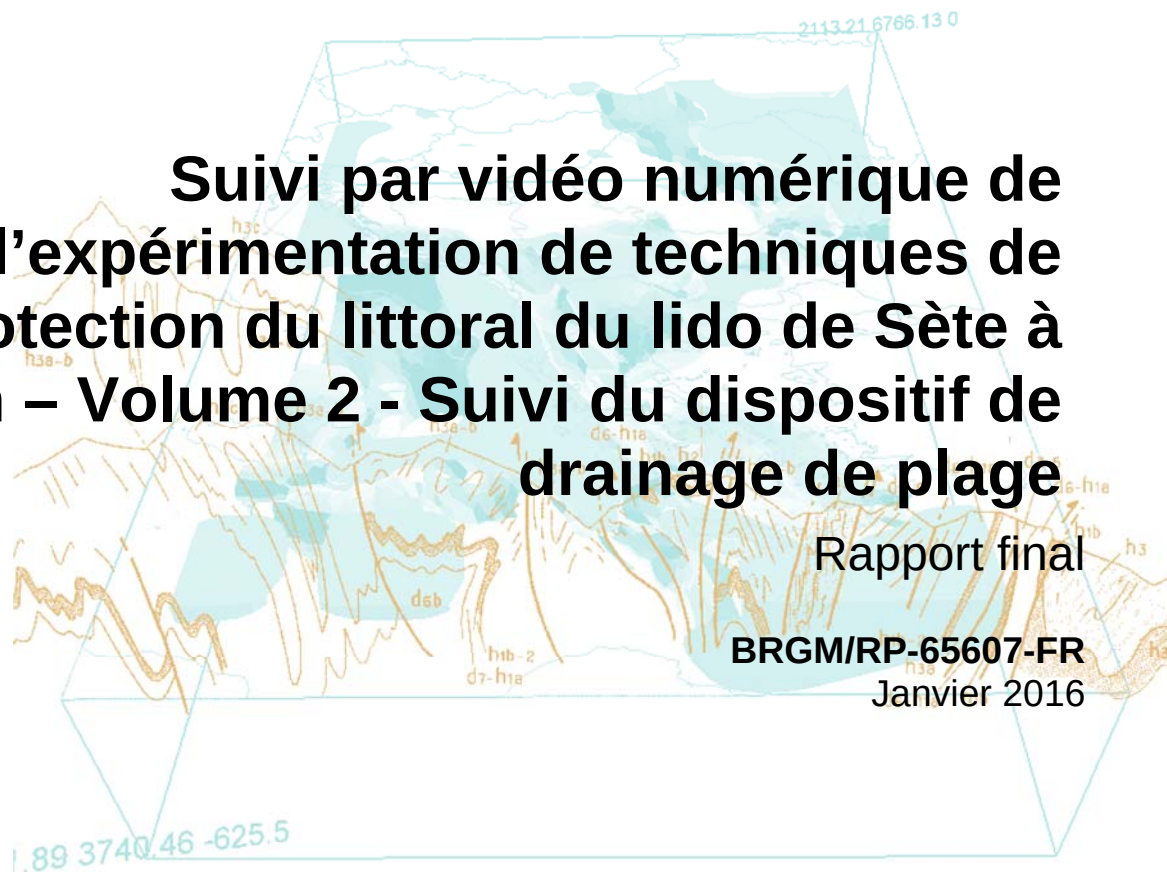


Suivi par vidéo numérique de l'expérimentation de techniques de protection du littoral du lido de Sète à Marseillan – Volume 2 - Suivi du dispositif de drainage de plage

Rapport final

BRGM/RP-65607-FR

Janvier 2016



Engagés par nature



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Suivi par vidéo numérique de l'expérimentation de techniques de protection du littoral du lido de Sète à Marseillan – Volume 2 - Suivi du dispositif de drainage de plage

Rapport final

BRGM/RP-65607-FR

Janvier 2016

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

Y. Balouin

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

Vérificateur :

Nom : Palvadeau Eric

Date : 23/02/2016

Approbateur :

Nom : Blum Ariane

Date : 25/02/2016

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

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

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 – Volume 2 : Suivi du dispositif de drainage de plage. BRGM/RP-65607-FR, Vol.2, 32 p., 23 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 dans la zone dite « Ecoplage ». Cette période comporte un suivi témoin (avant-travaux) et une période de suivi post-installation du système de drainage de plage. 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, ainsi que l'analyse plus spécifique du comportement dans la zone de jet de rive par échantillonnage de profils d'intensité de pixels.

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 :

- le trait de côte, sur cette période qui démarre au printemps 2011 et s'achève à la fin de l'été 2015, présente un recul moyen élevé (de l'ordre de 15 m en 4 ans). La variabilité saisonnière est forte, avec des reculs de l'ordre de 10 mètres lors des tempêtes hivernales, et des avancées de l'ordre de 5 mètres au printemps. Cette évolution est relativement homogène sur tout le secteur drainé alors que sur le bilan 2011/2015, la plage adjacente au NE présente une légère avancée ;
- Comme cela avait déjà pu être constaté, on observe parfois une forte infiltration du jet de rive, susceptible d'entraîner un dépôt de sable sur la plage. Toutefois, la comparaison entre les secteurs drainés et non-drainés ne permet pas de conclure à un meilleur captage au sud et à un effet positif sur la position du trait de côte. L'infiltration du jet de rive semble fortement aléatoire dans le temps et dans l'espace. L'assèchement du bas de plage n'est pas systématique, et est également observé en période d'arrêt du drain. Les conditions environnementales (précipitation, niveau de la nappe, saturation naturelle du sable en eau, vent, ...) jouent un rôle non-négligeable sur ce phénomène et il reste difficile de comprendre les mécanismes en jeu ;
- les analyses précédentes avaient mis en évidence les conditions de vagues pour lesquelles la position du drain est optimale (par rapport à la position du jet de rive sur lequel il agit). Celles-ci étaient alors relativement limitées dans le temps (environ 30%

sur la période d'observation), ce qui ne remet pas en cause l'efficacité potentielle du drain sur des périodes courtes mais constructives, notamment après une tempête. Le recul progressif du trait de côte a également modifié la position relative de la zone de jet de rive par rapport aux drains qui sont probablement plus proches aujourd'hui de la zone saturée en eau.

Les observations réalisées depuis plus de 4 ans mettent en évidence un comportement homogène de la plage avant et après l'installation du système de drainage. Le trait de côte recule avec une vitesse relativement élevée, et ce, en ayant bénéficié des apports de sable provenant du rechargement plus au nord. Cette dynamique résulte également des phénomènes complexes liés à la forte modification de la barre interne par l'atténuateur, mais les effets du drainage ne semblent pas à même d'enrayer le recul progressif de cette partie du littoral.

Sommaire

1. Introduction	7
1.1. PROBLEMATIQUE.....	7
1.2. OBJECTIFS	9
2. Présentation du système de suivi vidéo sur le lido de Sète	11
2.1. LE SYSTEME ARGUS	11
2.2. IMPLANTATION SUR LE LIDO DE SETE	11
2.3. CARACTERISTIQUES DU SYTEME ARGUS DE SETE	12
3. Synthèse des acquisitions vidéo d'avril 2011 à Septembre 2015 (53 mois).....	15
3.1. IMAGES ET ECHANTILLONNAGE DE PIXELS OBTENUS	15
3.2. ANALYSES REALISEES.....	16
4. Evaluation de l'évolution dans la zone © Ecoplage.....	18
4.1. EVOLUTION GENERALE DU TRAIT DE COTE	18
4.2. EVOLUTION DE LA DE LA PLAGE DANS LA ZONE DE DRAINAGE	20
4.3. EVALUATION DE L'EFFET DU DRAINAGE SUR LE JET DE RIVE	25
5. Conclusion.....	29
6. Bibliographie	32

Liste des illustrations

Illustration 1 – Localisation des ouvrages expérimentaux de protection du littoral (Egis-Eau, 2009).	8
Illustration 2 – Schéma de fonction du système drainant ©Ecoplage.....	8
Illustration 3 – Position des 2 mâts implantés sur le Lido de Sète et champs de vision des 8 caméras (fond © Orthophoto IGN).	12
Illustration 4 - Photos des 3 caméras (C6,C7 et C8) du mât n°1 (à gauche) et des 3 points de vue correspondants.	13
Illustration 5 - Point de vue des 5 caméras (C5,C4,C3,C2 et C1) du mât 2.	13
Illustration 6 - 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)	14

Illustration 7 – Synthèse des acquisitions vidéo des différentes caméras (1 à 8). Les interruptions sont signalées en blanc.	15
Illustration 8 - Présentation des indicateurs morphologiques et hydrodynamiques obtenus par l'outil Argus.	16
Illustration 9 – Dates des prises de vue retenues pour l'analyse de l'évolution du trait de côte.	17
Illustration 10 - Position du Drain ©Ecoplage encore actif.	18
Illustration 11 - Position respective des traits de côte de Juin 2011, 2014, 2015 (période estivale) de la position des différents ouvrages dans le repère ARGUS et des différents transects d'étude.	19
Illustration 12 - Evolution au cours du temps de la position du trait de côte au niveau de Yargus = - 100m, dans le repère ARGUS.	19
Illustration 13 - Suivi temporel du trait de côte dans la zone du drain. 5 profils ont été réalisés, 2 extérieurs à la zone du drain (bleu et vert), 1 sur la partie Nord (rouge), 1 sur la partie Sud (cyan) et 1 entre les deux (noir).	21
Illustration 14 – Impages orthorectifiées de la Caméra 3 montrant la rupture du drain au NE de la station de pompage. Le rectangle rouge indique la position des drains lors de leur installation en 2012.	22
Illustration 15 - Suivi du trait de côte sur la période post-rupture du drain. Tracé du trait de côte toutes les deux semaines sur toute la zone du drain (en haut), suivi du trait de côte tous les mois sur la partie Nord de la zone du drain (en bas à gauche) et suivi du trait de côte tous les mois sur la partie Sud (en bas à droite).	23
Illustration 16 - Evolution du trait de côte face au drain entre le 15/07/2014 et le 15/07/2015. ...	24
Illustration 17 - Position de la barre interne (en blanc) en face de la zone de drainage.	24
Illustration 18 – Profils sur lesquels le jet de rive est analysé (C4 à gauche et C3 à droite)	25
Illustration 19 – Forme du jet de rive (montée/descente) en situation « normale » (a) et en situation de forte infiltration (b).	26
Illustration 20 – Suivi temporel du jet de rive sur 60sec pour les caméras 4 et 2.	27
Illustration 21 – Images des caméras C2 (à droite) et C4 (à gauche) le 3 avril 2014 illustrant le niveau de surcote élevé sur la plage et la saturation en eau du sable.	27
Illustration 22 – Schéma illustrant le comportement du jet de rive par temps calme (A) et pour des conditions plus agitées (B) identiques à celles du 3 avril 2014.	28

Liste des annexes

Annexe 1 Suivi du jet de rive	35
-------------------------------------	----

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 (Illustration 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 accrétion 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.

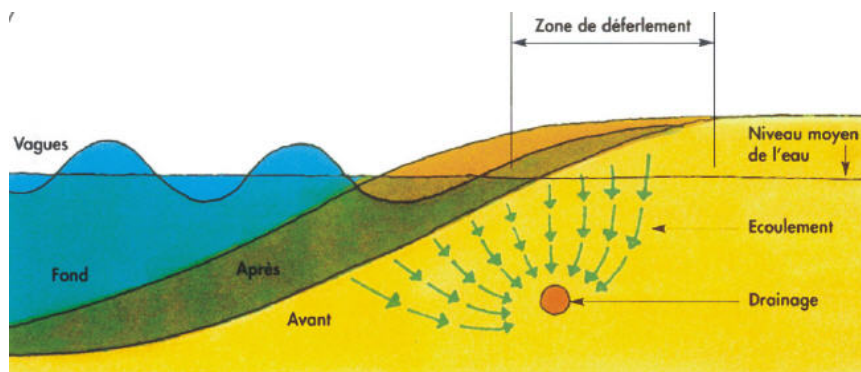


Illustration 2 – Schéma de fonction du système drainant ©Ecoplage.

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, il semble indispensable de mettre en place des outils de suivi qui permettront, 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 (Illustration 3).

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° (Illustration 5).

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

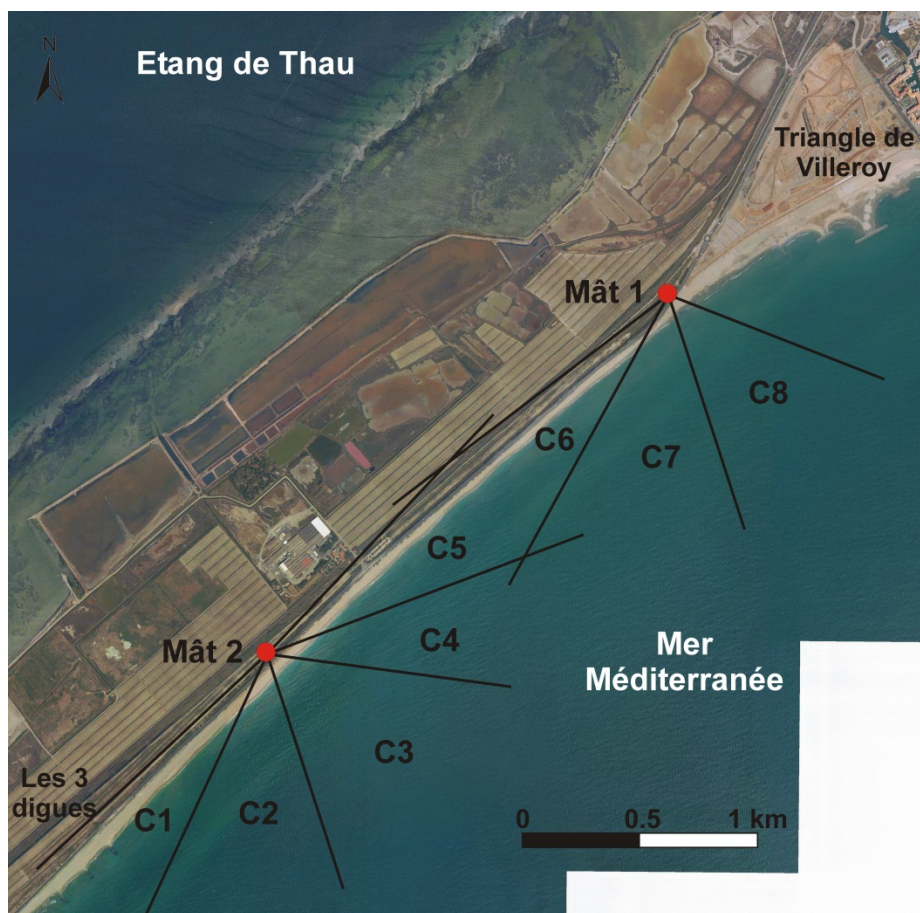


Illustration 3 – Position des 2 mâts implantés sur le Lido de Sète et champs de vision des 8 caméras (fond © Orthophoto IGN).

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° (Illustration 4) : 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° (Illustration 5).

Les images acquises par le système du lido de Sète sont de quatre types (Illustration 6):

- 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).

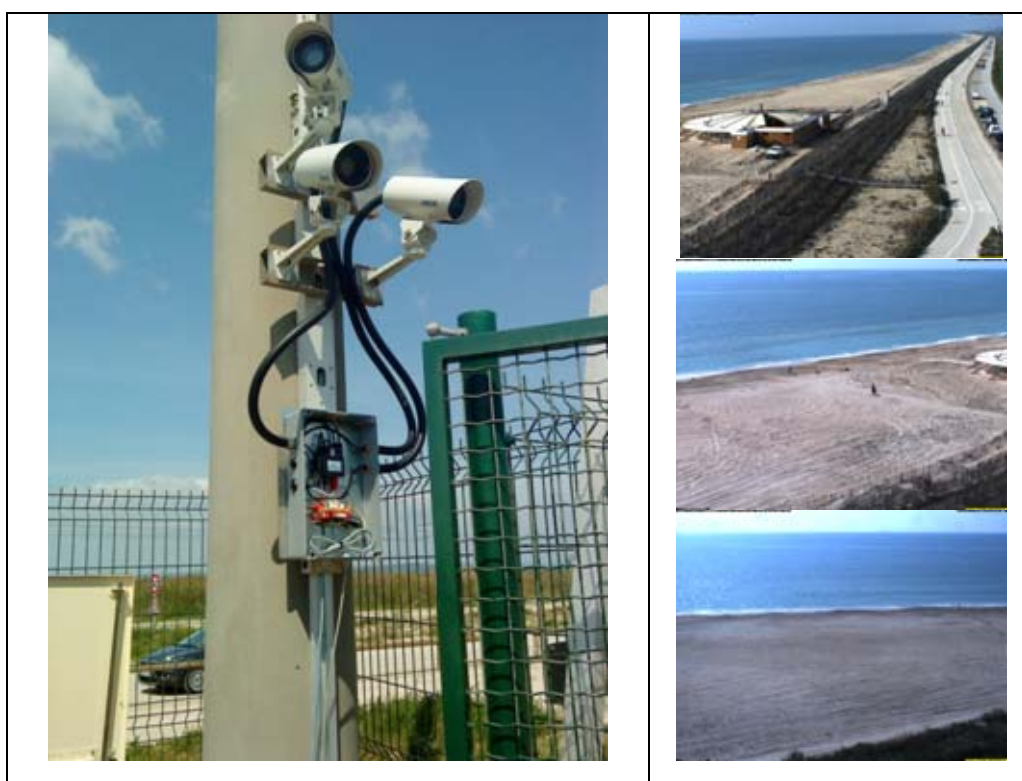


Illustration 4 - Photos des 3 caméras (C6,C7 et C8) du mât n°1 (à gauche) et des 3 points de vue correspondants.



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



Illustration 6 - 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)

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 1 000 000, ce qui représente un volume de près de 1.2 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 7 présente la synthèse des acquisitions pour les 8 caméras.

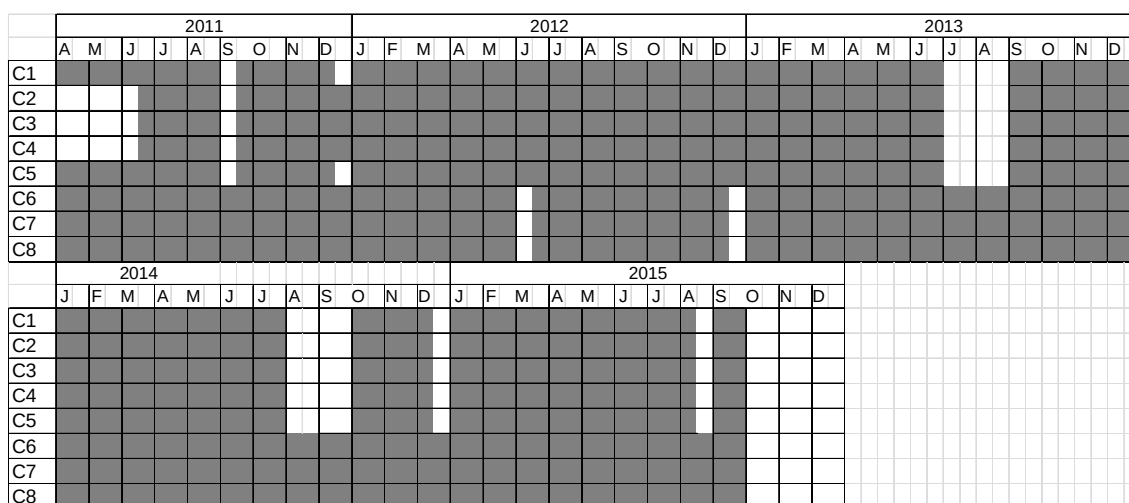


Illustration 7 – Synthèse des acquisitions vidéo des différentes caméras (1 à 8). Les interruptions sont signalées en blanc.

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 (Illustration 8). 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.

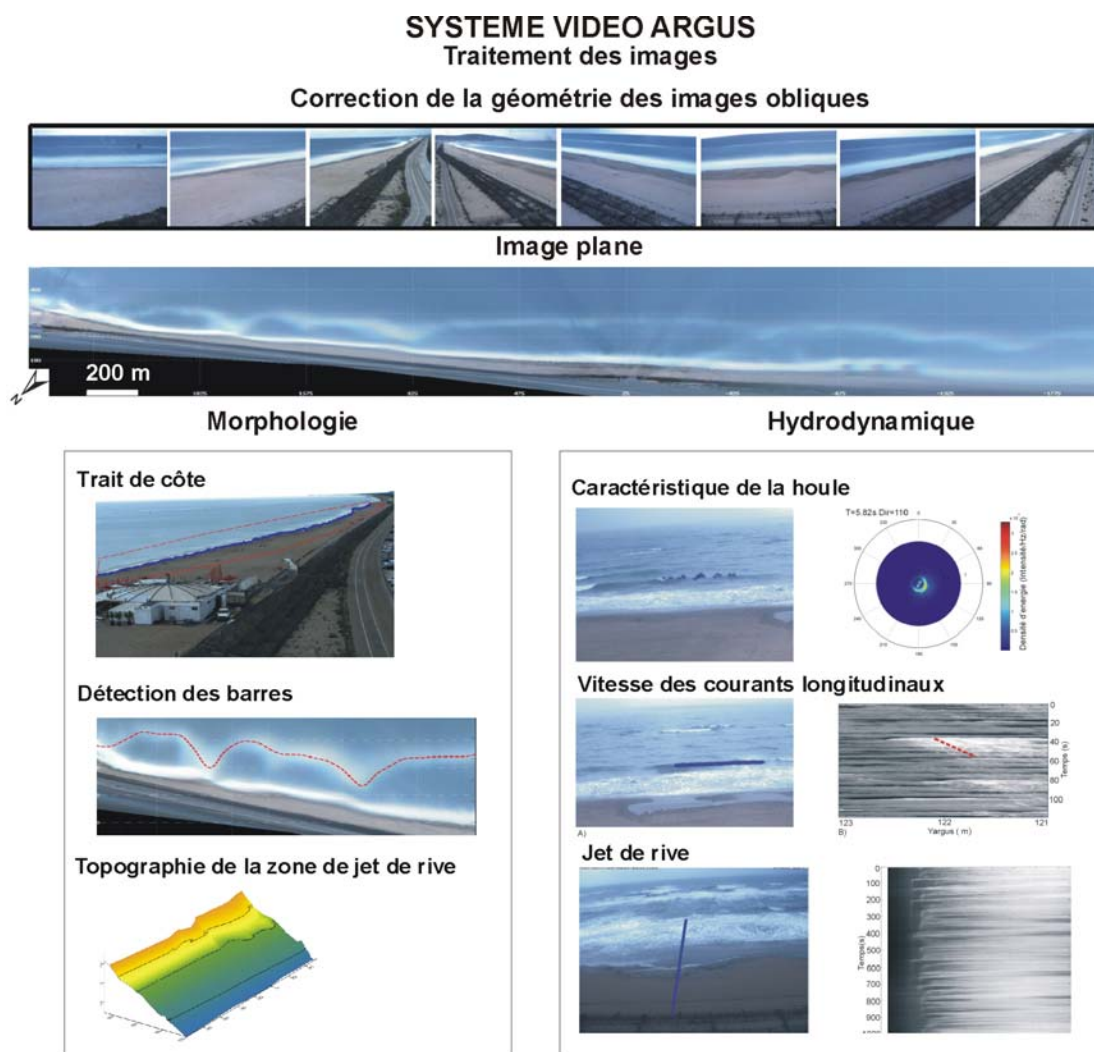


Illustration 8 - Présentation des indicateurs morphologiques et hydrodynamiques obtenus par l'outil Argus.

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 (Illustration 8) : 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. Illustration 9 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.

Dans la zone de drainage, une analyse spécifique est réalisée par échantillonnage de profils d'intensités de pixels dans la zone de jet de rive afin d'évaluer l'action du drainage sur l'infiltration de la nappe.

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..

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	30/07/2012	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 9 – Dates des prises de vue retenues pour l'analyse de l'évolution du trait de côte.

4. Evaluation de l'évolution dans la zone © Ecoplage

La zone sur laquelle le système de drainage de plage a été installé (Illustration 10) est un secteur qui présentait un recul modéré lors des dernières décennies, avec parfois des phases d'avancée du trait de côte. Sur la période 1992-2008, le recul moyen du trait de côte est de l'ordre de 1 m/an.

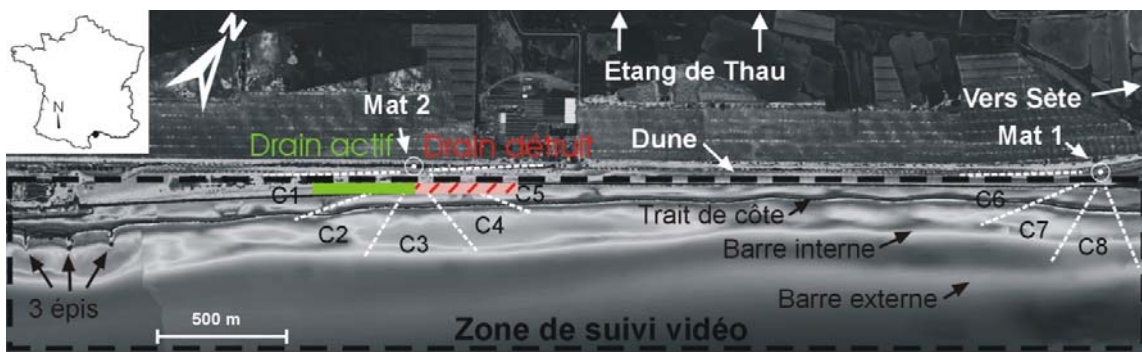


Illustration 10 - Position du Drain ©Ecoplage encore actif.

Le système de drainage ©Ecoplage a été mis en fonction en avril 2012. On dispose donc d'une année d'observation avant la mise en fonction, et de 3 ans d'observation après. Le centre du drain est localisé en face du mât 2, assurant un suivi à très haute résolution par le système vidéo.

Afin d'évaluer le rôle potentiel du drainage dans l'évolution de la plage, trois indicateurs ont été utilisés :

- L'évolution du trait de côte avant/après travaux ;
- Le rôle du drainage sur le jet de rive ;
- L'évaluation des conditions hydrodynamiques optimales pour le fonctionnement du drainage.

4.1. EVOLUTION GENERALE DU TRAIT DE COTE

Le suivi réalisé entre 2011 et 2013 (Balouin, 2013) avait mis en évidence une absence de comportement avant/après la phase de travaux et un recul progressif du trait de côte. La poursuite du suivi jusqu'à l'été 2015 confirme ces observations, avec un recul du trait de côte atteignant jusqu'à 18 m entre juin 2011 et Juin 2015 (Illustration 11).

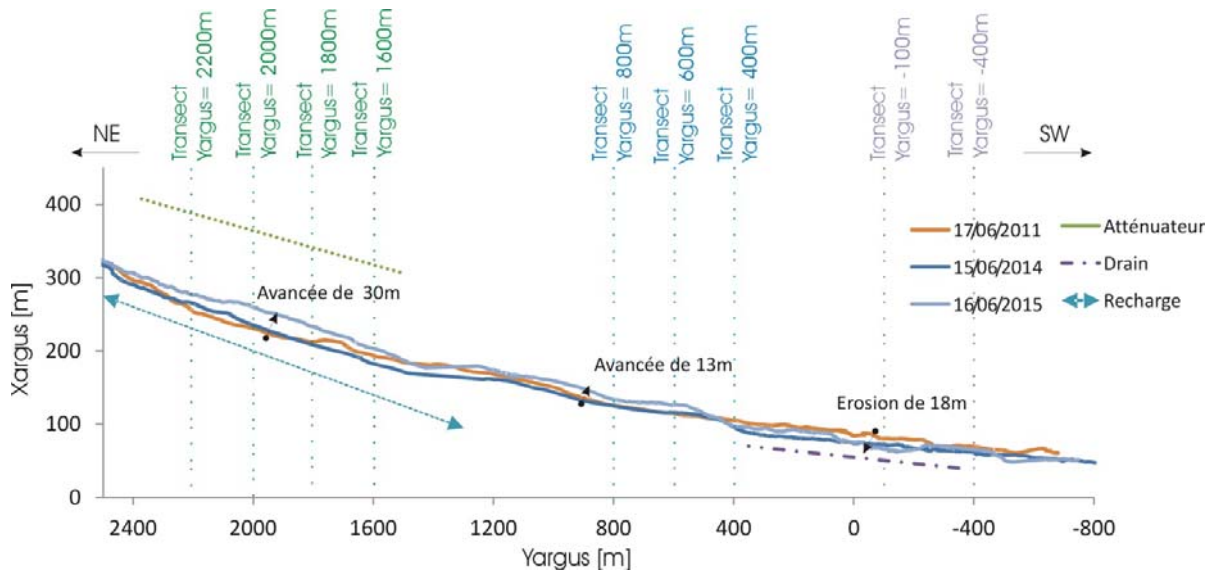


Illustration 11 - Position respective des traits de côte de Juin 2011, 2014, 2015 (période estivale) de la position des différents ouvrages dans le repère ARGUS et des différents transects d'étude.

Afin d'évaluer plus précisément la variabilité de la position du trait de côte, des profils transverses ont été étudiés. L'illustration 12 présente l'évolution de la position du trait de côte sur le profil Y=-100, soit un profil proche du mât vidéo et au milieu de la zone de drainage. Si cette évolution présente de fortes variations, principalement saisonnières et en relation avec les tempêtes, la tendance au recul sur les 4 années de suivi est bien observée. Depuis 2011, la plage face au drain a reculé de 15 m en 4 ans soit à peu près 4 m/an.

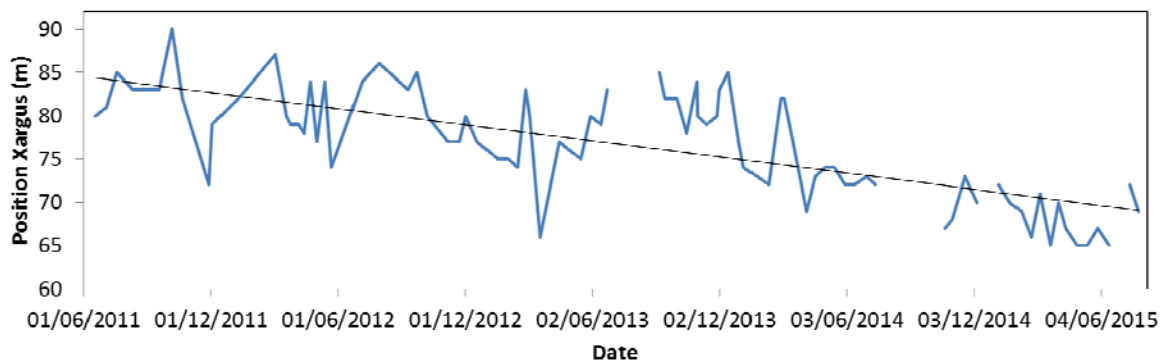


Illustration 12 - Evolution au cours du temps de la position du trait de côte au niveau de Yargus = -100m, dans le repère ARGUS.

On note une légère ré-avancée de l'ordre de 5 m en fin de suivi pendant l'été 2015 qui correspond à l'arrivée dans ce secteur du sable rechargé plus au nord (cf. Vol 1).

4.2. EVOLUTION DE LA DE LA PLAGE DANS LA ZONE DE DRAINAGE

La position du trait de côte dans la zone Ecoplage a été analysée tous les 15 jours en situation calme, et systématiquement avant/après lors des coups de mer et tempêtes. Le traitement de l'ensemble des traits de côte est réalisé avec des conditions hydrodynamiques comparables afin d'éviter les périodes éventuelles de surcote ou décote.

Ces positions successives sont ensuite analysées dans le temps pour comparer les évolutions avant/après l'installation des drains.

L'analyse de la position du trait de côte avant/après le déploiement des drains (Balouin, 2013) avait mis en évidence une variabilité saisonnière de l'ordre de 10 à 15 m avec ou sans drainage. Par ailleurs, la plage présentait un léger recul sur la période 2011-2013, sans qu'un effet du drainage soit visible.

L'illustration 13 présente la position du trait de côte sur différents profils dans et hors de la zone de drainage sur la période de 2011 à 2014. On note un recul important à chaque tempête significative (hauteur significative des vagues supérieure à 3 m) et, une récupération partielle à totale en quelques jours. L'amplitude du recul lié à ces événements est identique avant et après le déploiement des drains.

Les trois profils dans la zone des drains ($Y=5$, 100 et -100) présentent un recul léger mais continu du trait de côte, identique à celui observé en dehors de la zone ($Y=450$ et -450).

Début 2014, une rupture du drain a été observée (Illustration 14). Cette rupture résulte à la fois du recul progressif du trait de côte, et de la migration vers le SO d'une sinuosité de plage qui arrive dans la zone de drainage début 2014. Suite à cet incident, il a été signalé l'arrêt du drainage dans la partie NE du système ($Y= 0$ à 350 m). Seule la partie SO continue à fonctionner.

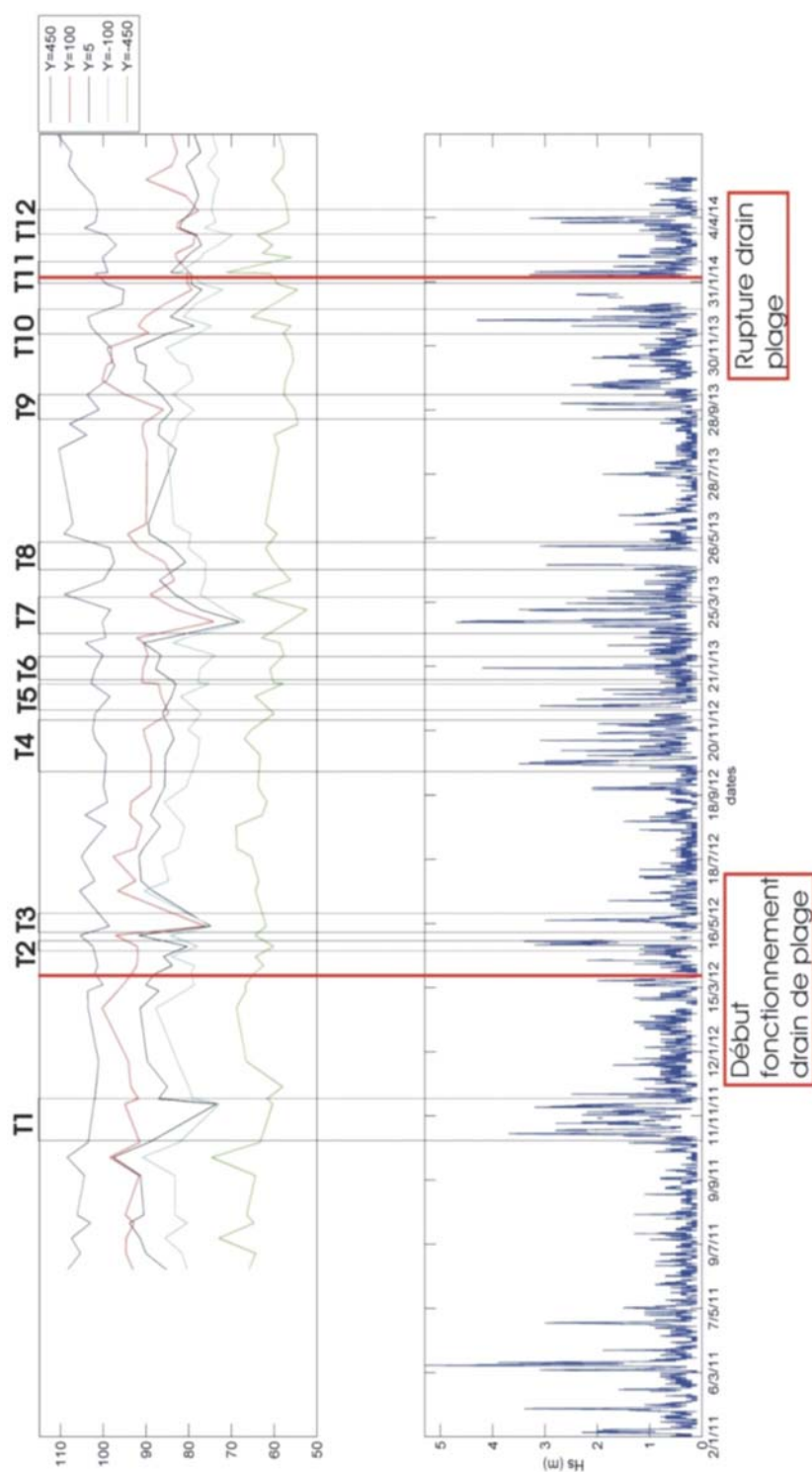


Illustration 13 - Suivi temporel du trait de côte dans la zone du drain. 5 profils ont été réalisés, 2 extérieurs à la zone du drain (bleu et vert), 1 sur la partie Nord (rouge), 1 sur la partie Sud (cyan) et 1 entre les deux (noir).



Illustration 14 – Impages orthorectifiées de la Caméra 3 montrant la rupture du drain au NE de la station de pompage. Le rectangle rouge indique la position des drains lors de leur installation en 2012.

Le tracé du trait de côte toutes les deux semaines a été réalisé à la suite de la rupture du drain (Illustration 15). Le suivi révèle une avancée du trait de côte au Nord et un léger recul avec alternance de recul/avancée au sud (drain actif). Lors des mois suivants (Illustration 15, en bas), l'avancée se confirme au nord (environ 5 m) alors qu'au sud, la position du trait de côte est stable avec des secteurs en léger recul et d'autres en avancée.

Sur la dernière année de suivi (juillet 2014 à juillet 2015), ces observations se confirment (Illustration 16), avec une avancée de 8 m au nord et un trait de côte plus stable au sud, mais qui présente tout de même des secteurs où le recul atteint 10 m.

Si l'avancée dans la partie nord peut s'expliquer par les effets collatéraux liés à l'atténuateur de houle et au rechargement (Cf. Vol1), le recul au sud semble traduire l'érosion chronique déjà observée.

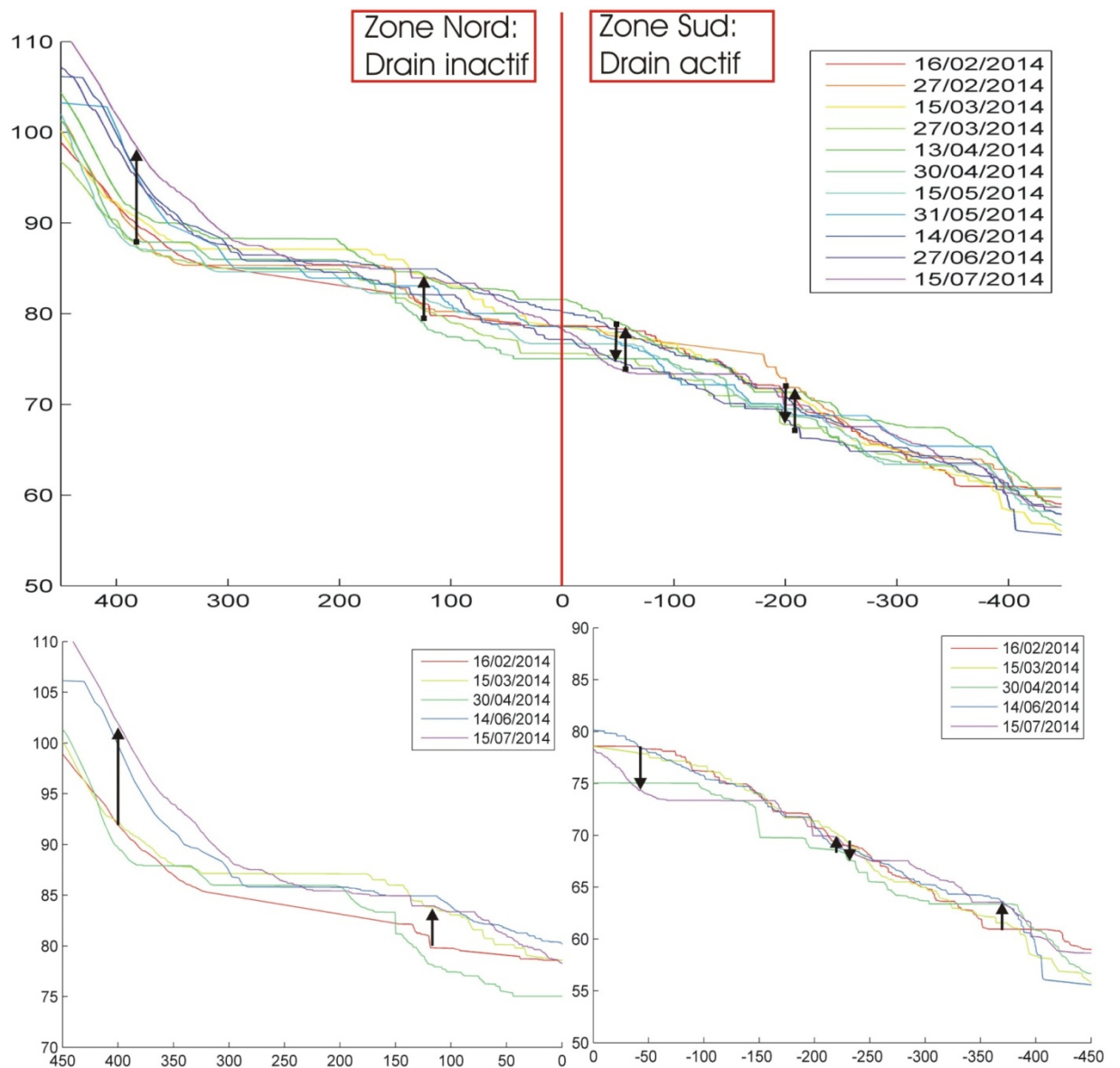


Illustration 15 - Suivi du trait de côte sur la période post-rupture du drain. Tracé du trait de côte toutes les deux semaines sur toute la zone du drain (en haut), suivi du trait de côte tous les mois sur la partie Nord de la zone du drain (en bas à gauche) et suivi du trait de côte tous les mois sur la partie Sud (en bas à droite).

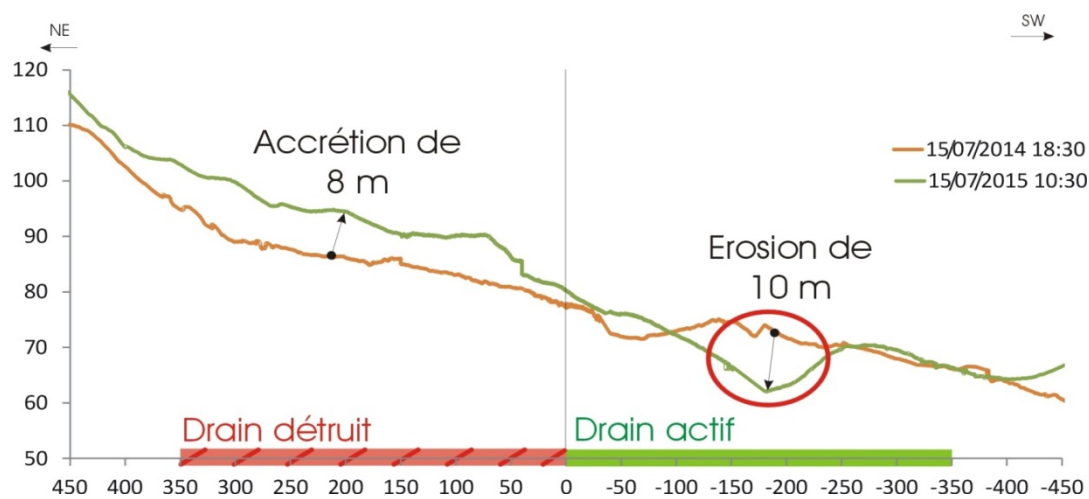


Illustration 16 - Evolution du trait de côte face au drain entre le 15/07/2014 et le 15/07/2015.

La morphologie de l'avant-côte peut également expliquer la variabilité de comportement des deux secteurs. En effet, suite à la rotation de la barre interne après installation de l'atténuateur (Cf. Vol1), une nouvelle barre interne s'est développée très près de la côte. Si elle semble relativement stable dans la zone nord entre 2014 et 2015, elle a migré vers le SO. Le croissant en 2014 (zone plus blanche et plus proche de la côte) était localisé à $-125 < Y < -250$ m. En 2015, ce croissant a migré vers le SE et est localisé à $-250 \text{ m} < Y < -500$ m et s'est localement attachée à la plage, générant une sinuosité positive du trait de côte au point de contact (Illustration 17).

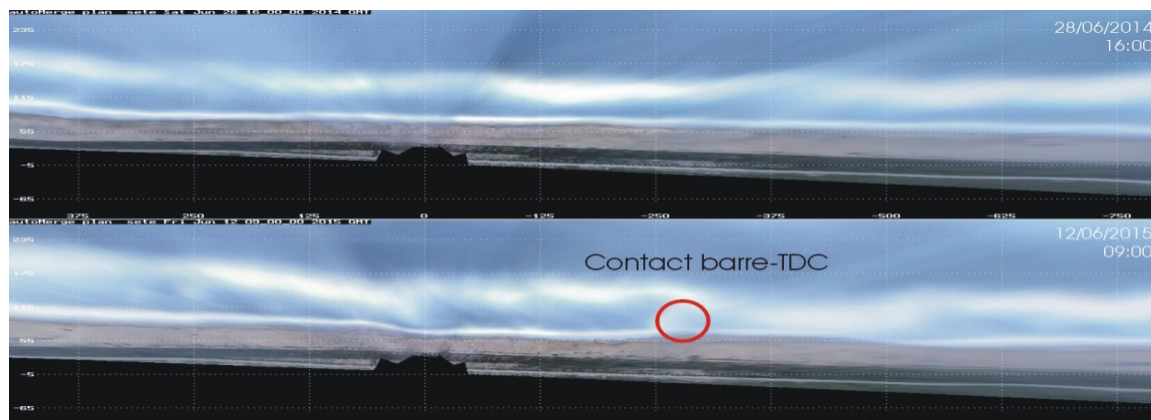


Illustration 17 - Position de la barre interne (en blanc) en face de la zone de drainage.

4.3. EVALUATION DE L'EFFET DU DRAINAGE SUR LE JET DE RIVE

En 2013, une étude spécifique sur le comportement du jet de rive a été réalisée pour évaluer l'effet du drainage sur la nappe de jet de rive. L'objectif principal du drainage est d'augmenter l'infiltration de cette nappe d'eau de mer pour réduire l'entraînement des grains de sable lorsque la nappe se retire.

Les résultats obtenus en 2013 avaient montré un effet potentiel sur l'infiltration, sans pour autant que celui-ci soit systématique. Le phénomène semblait aléatoire et les conditions d'assèchement de la basse plage restaient peu fréquentes et fortement méconnues.

Afin d'appuyer ces observations réalisées sur une période courte de suivi, les analyses ont été poursuivies tout au long de l'année 2014. Des profils d'intensité de pixel ont été récoltés quotidiennement dans la zone de drainage pour analyser le comportement du jet de rive (Illustration 18). Un profil est extrait sur la partie nord (caméra C4, Illustration 18-gauche) et un autre sur la partie Sud (caméra C2, Illustration 18-droite) de la zone du drain. L'objectif est d'une part d'analyser la dynamique du jet de rive dans la zone de drainage, mais également d'analyser les différences de comportement entre la zone nord où le drain est inactif, et la zone sud.

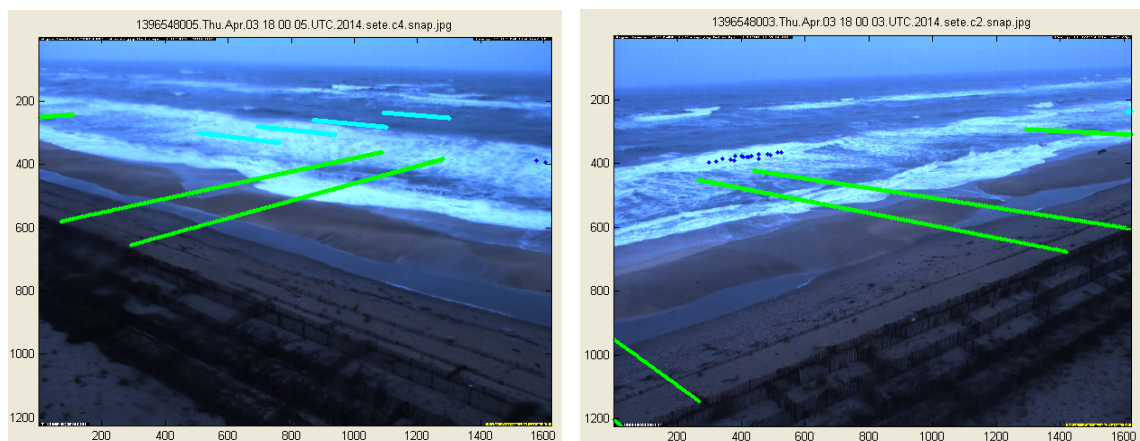


Illustration 18 – Profils sur lesquels le jet de rive est analysé (C4 à gauche et C3 à droite)

Le jet de rive se décompose en deux phases, une phase de montée de la nappe sur la plage et une phase de redescente. En situation « normale », la durée des deux phases est identique et on observe en conséquence une parabole (Illustration 19-a). Lorsque l'infiltration d'eau est efficace, on observe la montée de la nappe, puis la disparition de celle-ci, formant donc une parabole tronquée (Illustration 19-b).

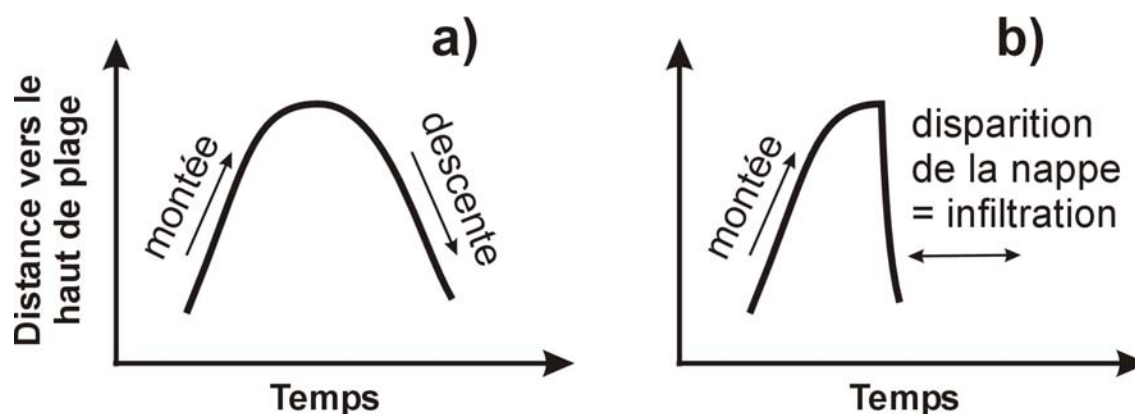


Illustration 19 – Forme du jet de rive (montée/descente) en situation « normale » (a) et en situation de forte infiltration (b).

Le suivi temporel du jet de rive (Illustration 20 et Annexe 1) révèle que pour la zone Nord quel que soit la hauteur significative des vagues, le jet de rive forme une parabole dans le temps (montée/retour). Ceci implique que la quantité d'eau lors du retour est équivalente à celle lors du déferlement. Très peu d'eau est absorbé par la plage ce qui implique un transport sédimentaire lors du retrait de la nappe. En comparaison, dans la zone Sud, on remarque que pour des hauteurs significatives de vague supérieures à 2 m, la forme du jet de rive dans le temps ne correspond pas à une parabole entière (Illustration 20 – 03/04/14). Sur la redescente, il y a disparition du jet de rive, ce qui correspond à l'infiltration de l'eau et donc à la préservation des sédiments sur le bas de plage. Cette infiltration reste toutefois difficilement imputable au système de drainage car le niveau de surcote le 3 avril est tel que la zone de jet de rive n'est pas positionnée sur les drains et la plage est par ailleurs saturée en eau (Illustration 21).

Dates (jj/mm/yy)	Hs (m)	C4 (Nord) (r-53 ; r-68)	C3 (Sud) (r-59 ; r-73)
29/03/14	2.3	timestack of swash zone time (s) cross-shore location (m)	timestack of swash zone time (s) cross-shore location (m)

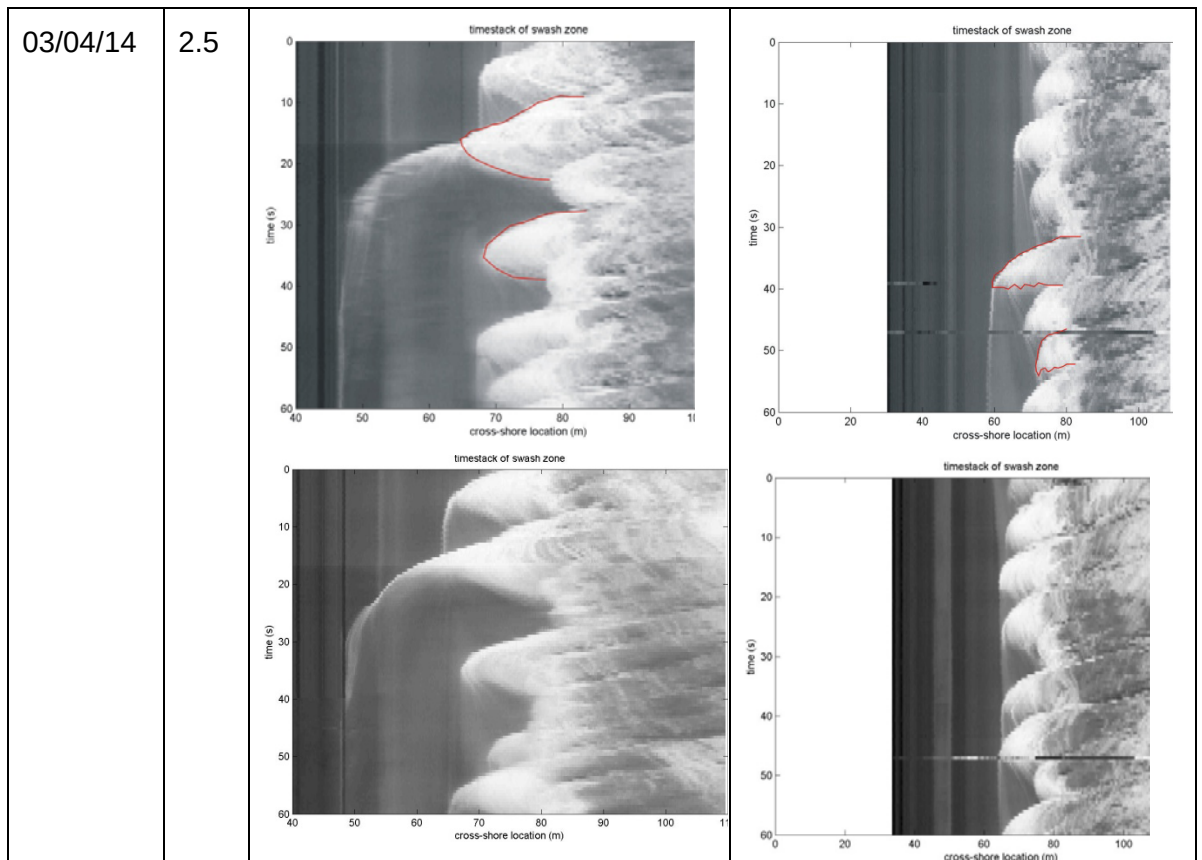


Illustration 20 – Suivi temporel du jet de rive sur 60sec pour les caméras 4 et 2.



Illustration 21 – Images des caméras C2 (à droite) et C4 (à gauche) le 3 avril 2014 illustrant le niveau de surcote élevé sur la plage et la saturation en eau du sable.

Sur la totalité des dates analysées, on note une variabilité importante de la forme du jet de rive, sans qu'aucun comportement n'indique clairement une meilleure infiltration dans la zone de drainage. Cette infiltration semble favorisée par les variations de

pentres sur la plage, souvent dans des situations où le jet de rive s'effectue plus haut sur la plage (au-dessus de la berme), à une position relativement éloignée des drains (Illustration 22). Le jet de rive s'effectue alors souvent dans une dépression en arrière-plage, ce qui explique l'absence de nappe de retrait.

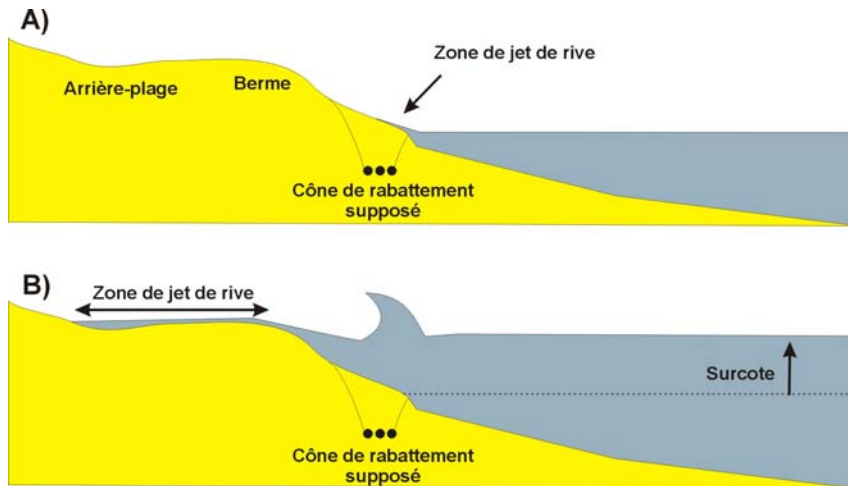


Illustration 22 – Schéma illustrant le comportement du jet de rive par temps calme (A) et pour des conditions plus agitées (B) identiques à celles du 3 avril 2014.

La comparaison entre le comportement du jet de rive dans la zone ©Ecoplage et sur la plage adjacente ne permet pas de conclure à une meilleure infiltration dans la zone drainée.

5. Conclusion

Afin de suivre et d'évaluer l'efficacité des techniques de lutte contre l'érosion, un système vidéo ARGUS a été implanté en 2011 sur le littoral du lido de Sète à Marseillan. Le système équipé de 8 caméras permet de couvrir une zone d'étude de 4 km du triangle de Villeroy aux Trois Dignes.

Le système d'acquisition et de transfert des images est opérationnel depuis avril 2011 et nous disposons donc de près de deux ans de suivi qui permettent de caractériser le fonctionnement du littoral avant travaux, et l'évolution constatée depuis que le système de drainage ©Ecoplage a été mis en place en juin 2012.

Afin de suivre l'évolution du littoral avant/pendant et après les travaux de protection, la position du trait de côte est analysée afin de définir les évolutions à moyen et long terme du littoral, mais également pour l'évaluation des réponses rapides lors des événements de tempêtes. Pour l'évaluation des effets induits par le système ©Ecoplage, un indicateur supplémentaire a été étudié : le comportement du jet de rive. L'analyse porte sur les phénomènes d'infiltration de la nappe de retrait en comparant des observations avant/après travaux, mais également entre la zone drainée et la zone adjacente.

Les quatre ans d'observation ont permis de mettre en évidence plusieurs caractéristiques de l'évolution du site :

- le trait de côte, sur cette période qui démarre au printemps 2011 et s'achève à la fin de l'été 2015, présente un recul moyen élevé (de l'ordre de 15 m en 4 ans). La variabilité saisonnière est forte, avec des reculs de l'ordre de 10 mètres lors des tempêtes hivernales, et des avancées de l'ordre de 5 mètres au printemps. Cette évolution est relativement homogène sur tout le secteur drainé alors que sur le bilan 2011/2015, la plage adjacente au NE présente une légère avancée ;
- la rupture des drains sur la partie NE du site début 2014 a entraîné l'arrêt du fonctionnement de la moitié du système de drainage. La comparaison de la zone nord (non drainée) et de la zone sud (drainée) ne permet pas de conclure à un meilleur captage au sud et à un effet positif sur la position du trait de côte. Celle-ci oscille autour d'une position moyenne, présentant un léger recul dans la semaine suivant la rupture du drain, alors que dans la zone nord, on observe une légère avancée du trait de côte. Ces comportements sont à mettre en relation avec la dynamique des barres sur l'avant-côte proche, qui protège localement la plage, et peuvent fournir du sable à la plage émergée en s'accolant à celle-ci. Le comportement dans la zone de jet de rive a été particulièrement analysé pour évaluer l'infiltration de la nappe de retrait. Comme cela avait déjà pu être constaté (Balouin, 2013), on observe parfois une forte infiltration du jet de rive, susceptible d'entraîner un dépôt de sable sur la plage. Toutefois, cette infiltration semble fortement aléatoire dans le temps et dans l'espace. L'assèchement du bas de plage n'est pas systématique, et est également observé en période d'arrêt du drain. Les conditions environnementales (précipitation, niveau de la nappe, saturation naturelle du sable en eau, vent, ...) jouent un rôle non-négligeable sur ce phénomène et il reste difficile de comprendre les mécanismes en jeu ;
- les analyses précédentes avaient mis en évidence les conditions de vagues pour lesquelles la position du drain est optimale (par rapport à la position du jet de rive sur lequel il agit). Celles-ci étaient alors relativement limitées dans le temps (environ 30%

sur la période d'observation), ce qui ne remet pas en cause l'efficacité potentielle du drain sur des périodes courtes mais constructives, notamment après une tempête. Le recul progressif du trait de côte a également modifié la position relative de la zone de jet de rive par rapport aux drains qui sont probablement plus proches aujourd'hui de la zone saturée en eau.

Les observations réalisées depuis plus de 4 ans mettent en évidence un comportement homogène de la plage avant et après l'installation du système de drainage. Le trait de côte recule avec une vitesse relativement élevée, et ce, en ayant bénéficié des apports de sable provenant du rechargement plus au nord. Cette dynamique résulte également des phénomènes complexes liés à la forte modification de la barre interne par l'atténuateur, mais les effets du drainage ne semblent pas à même d'enrayer le recul progressif de cette partie du littoral.

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.

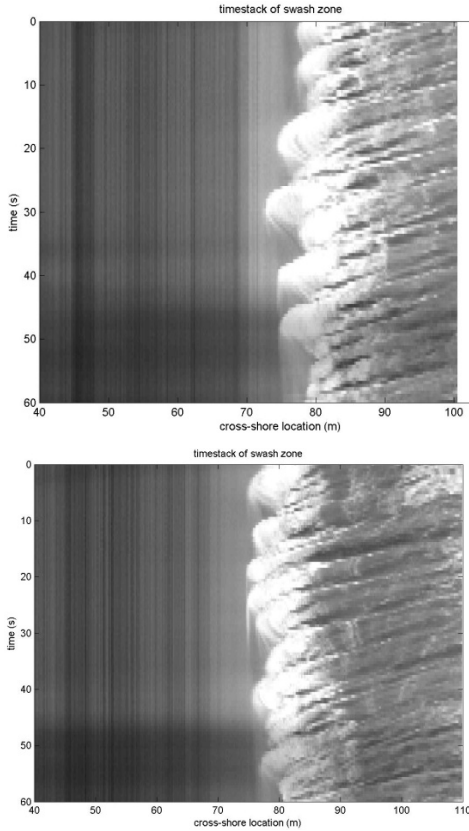
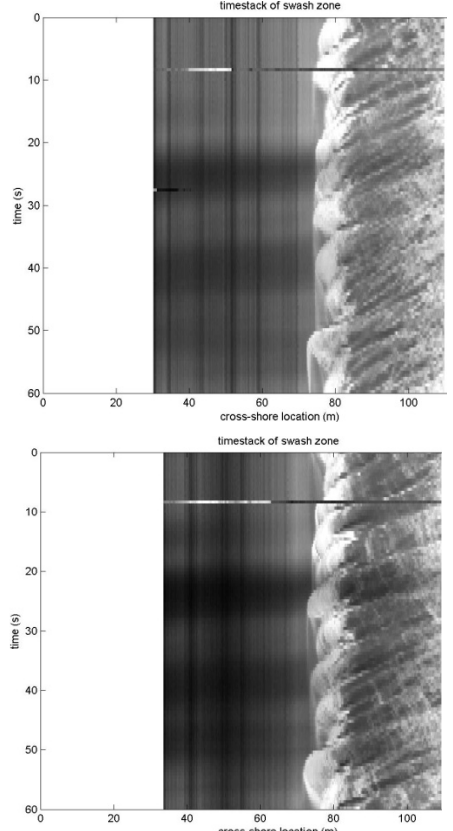
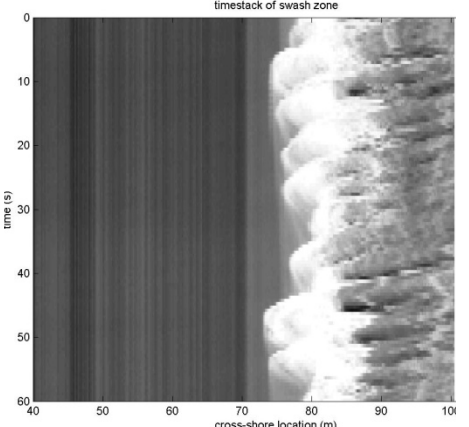
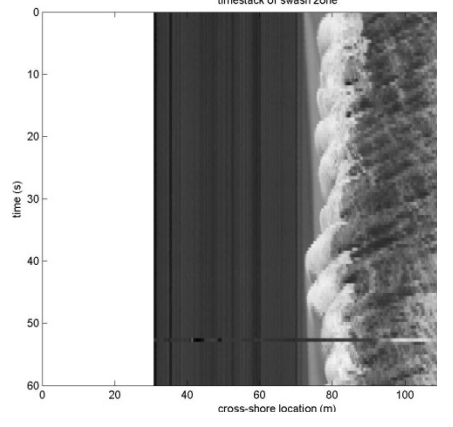
Gervais, M., Balouin, Y., Thiebot, J., Certain, R., Belon, R., Pedreros, R., Robin, N., Berné, S., 2011. Morphodynamic evolution of nearshore bars in response to winter storms (Lido de Sète, NW Mediterranean). *Journal of Coastal Research*, SI 64, 1855-1860.

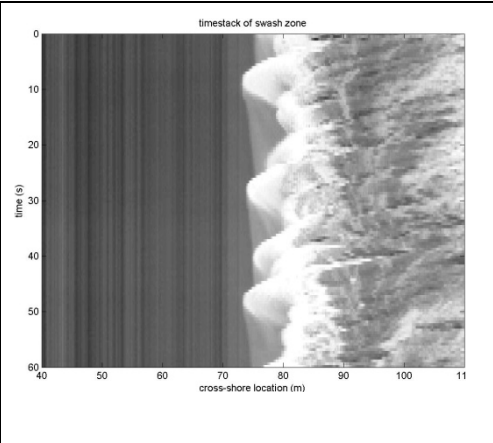
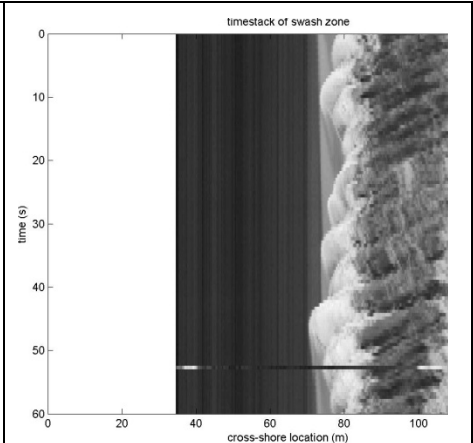
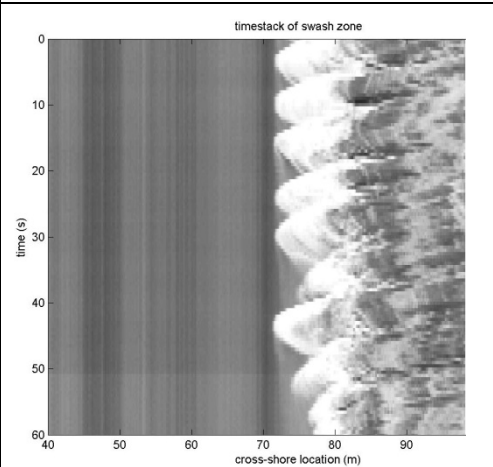
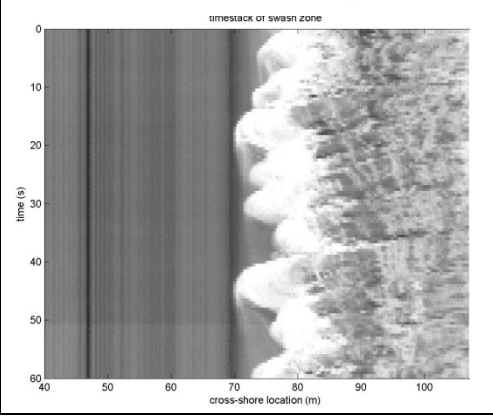
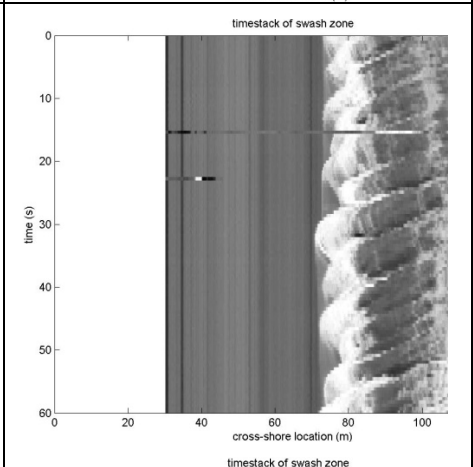
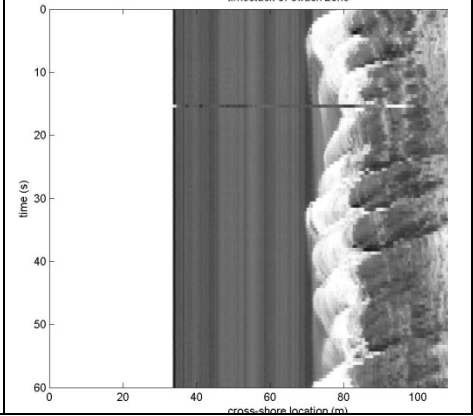
Gervais, M., Balouin, Y. and Belon, R., 2012. Morphological response and coastal dynamics associated with major storm events along the Gulf of Lions coastline, France. *Geomorphology* 143-144:69-80.

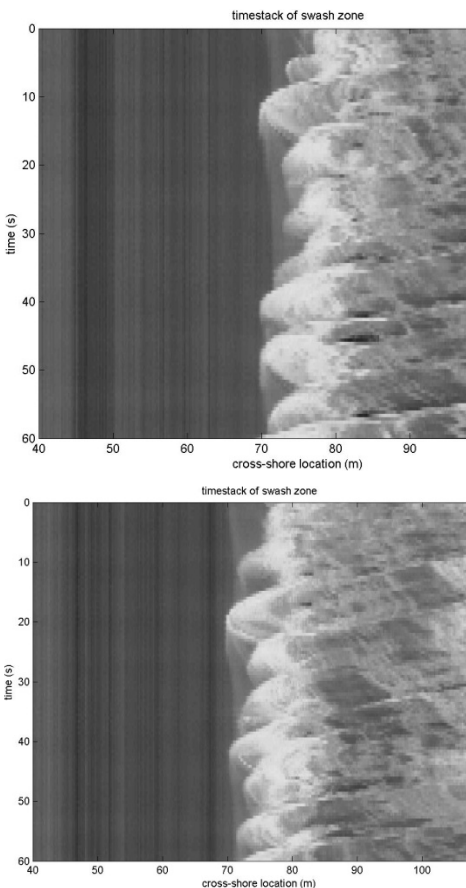
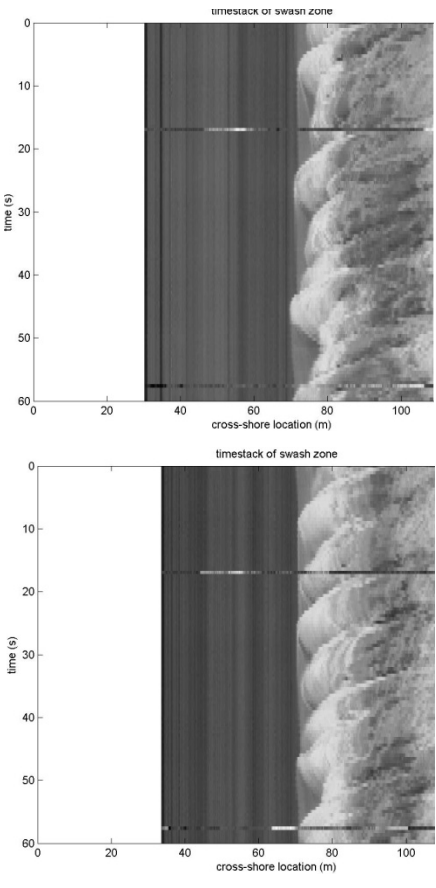
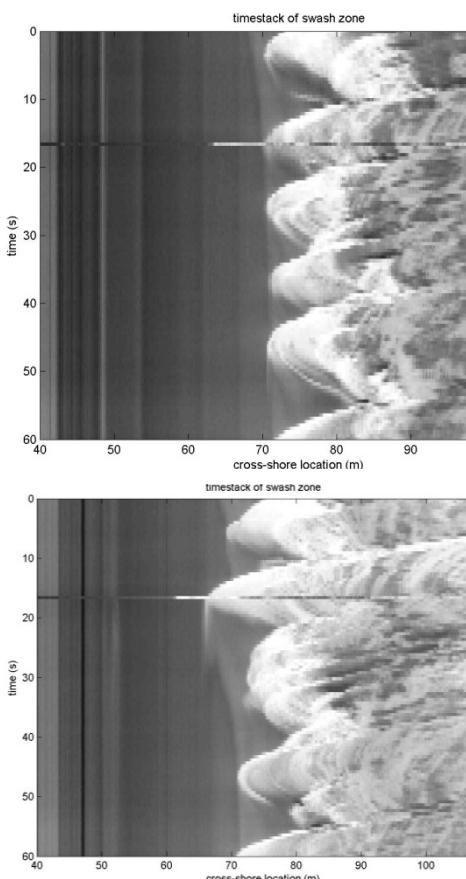
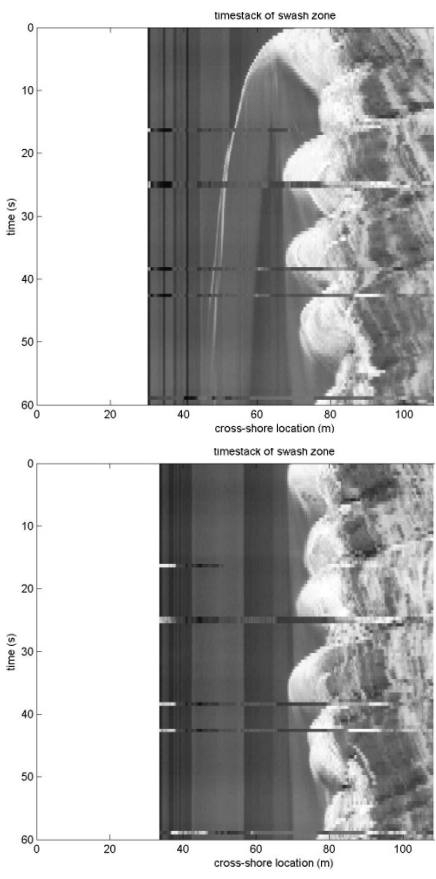
Holman, R.A. and Stanley, J., 2007. The history and capabilities of ARGUS. *Coastal Engineering* 54: 477-491.

Annexe 1

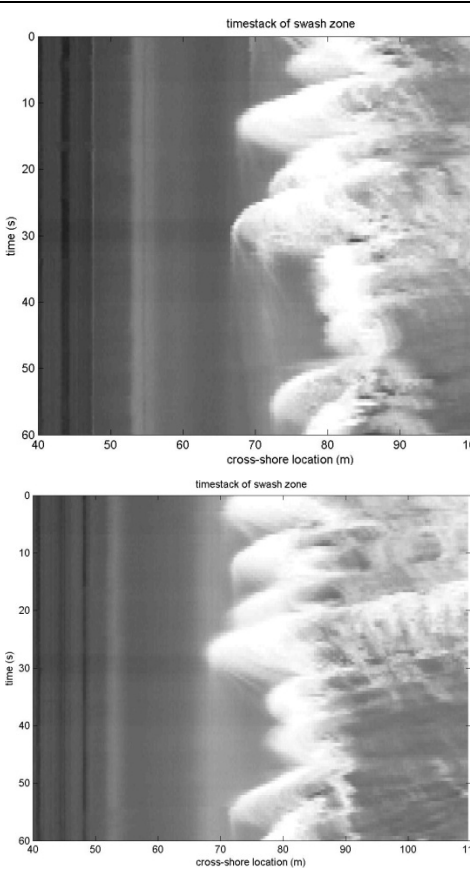
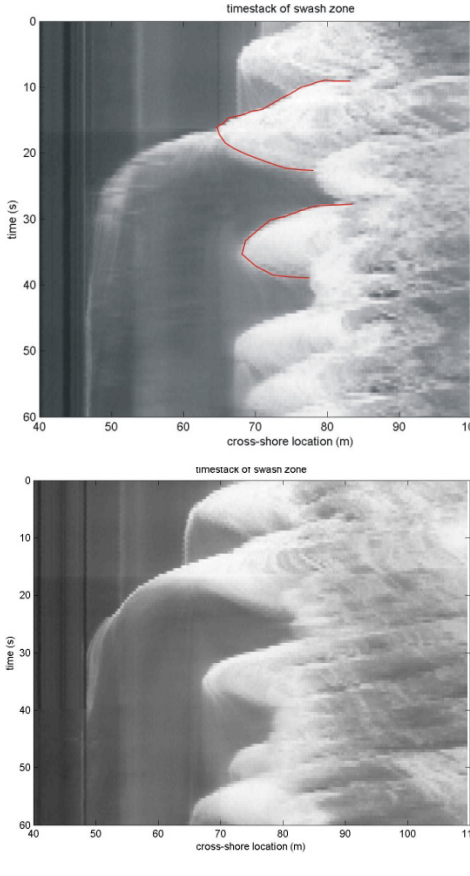
Suivi du jet de rive

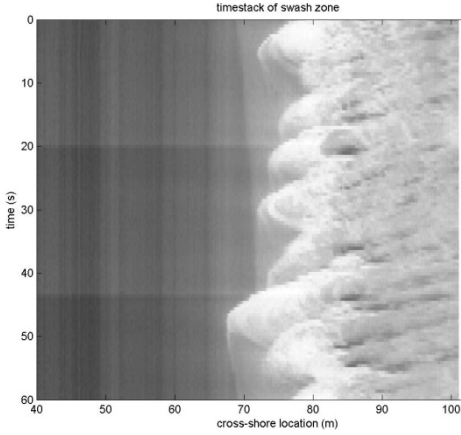
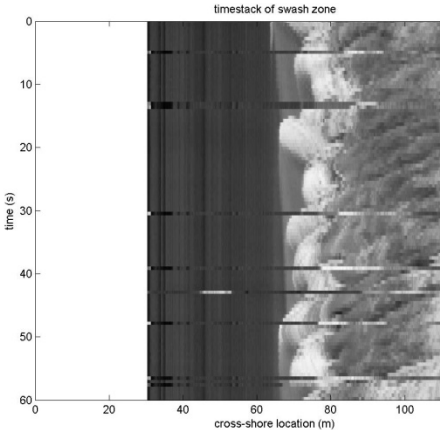
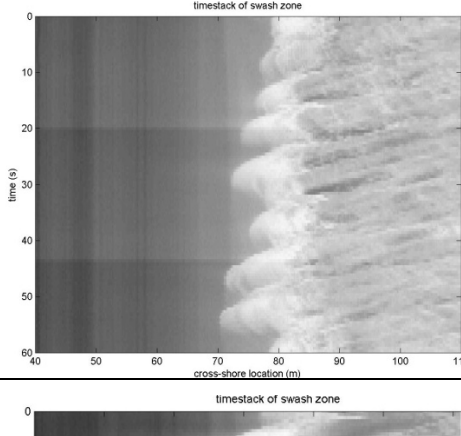
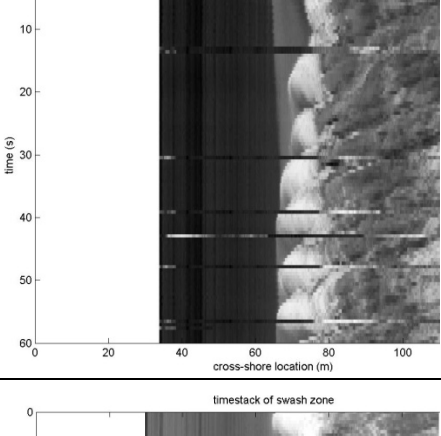
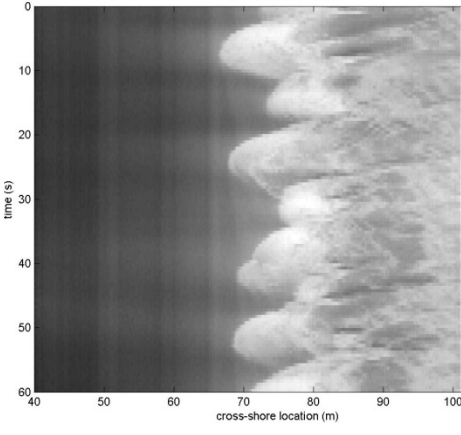
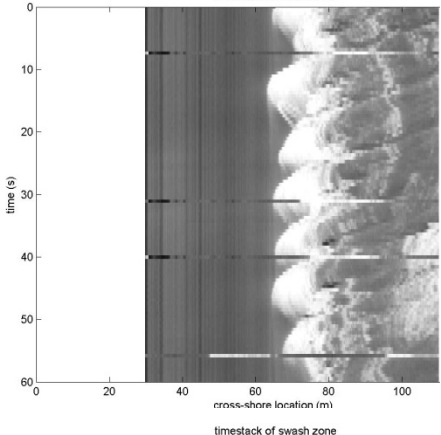
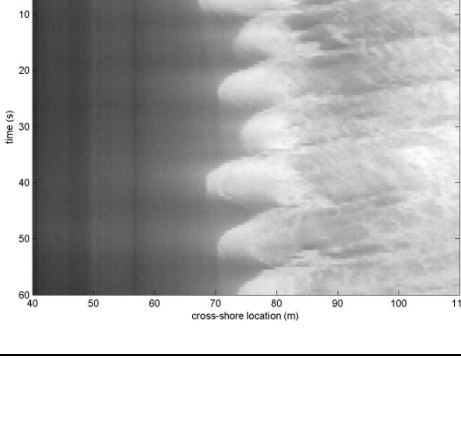
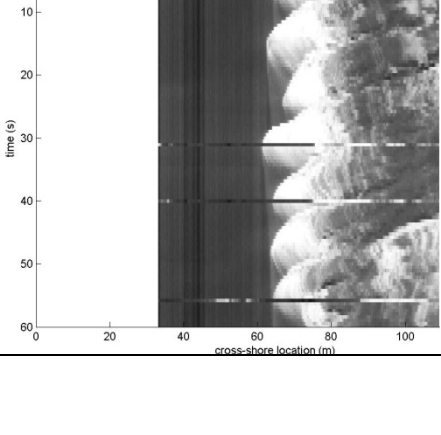
Dates (jj/mm/yy)	Hs (m)	C4 (Nord) (r-53 ; r-68)	C3 (Sud) (r-59 ; r-73)
24/02/14	1.5		
25/02/14	1.5		

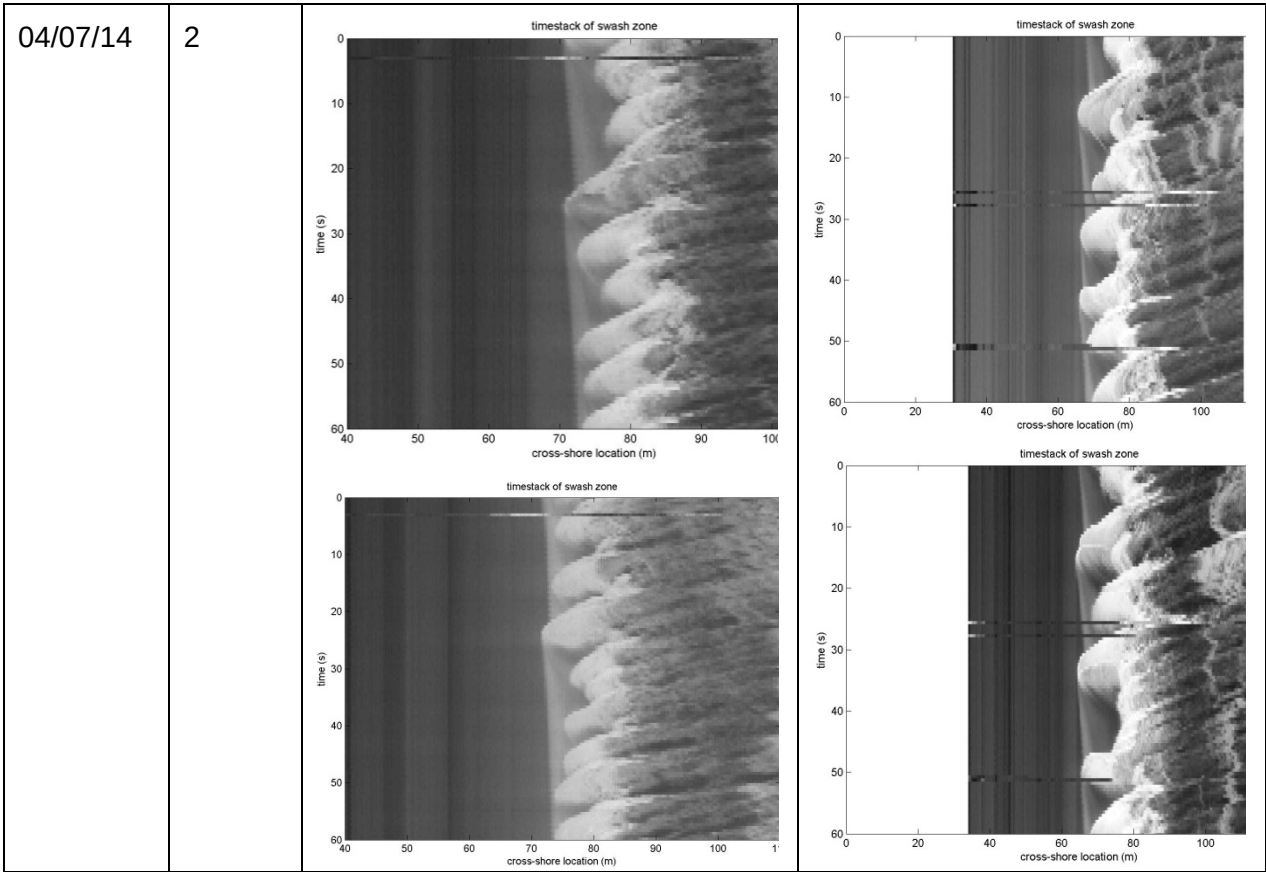
			
29/03/14	1.8	 	 

29/03/14	2.3		
30/03/14	2		

02/04/14 2	0 10 20 30 40 50 60 time (s) timestack of swash zone 40 50 60 70 80 90 100 cross-shore location (m) 0 10 20 30 40 50 60 time (s) timestack of swash zone 40 50 60 70 80 90 100 cross-shore location (m)	0 10 20 30 40 50 60 time (s) timestack of swash zone 0 20 40 60 80 100 cross-shore location (m) 0 10 20 30 40 50 60 time (s) timestack of swash zone 0 20 40 60 80 100 cross-shore location (m)
03/04/14 2	0 10 20 30 40 50 60 time (s) timestack of swash zone 40 50 60 70 80 90 100 cross-shore location (m) 0 10 20 30 40 50 60 time (s) timestack of swash zone 40 50 60 70 80 90 100 cross-shore location (m)	0 10 20 30 40 50 60 time (s) timestack of swash zone 0 20 40 60 80 100 cross-shore location (m) 0 10 20 30 40 50 60 time (s) timestack of swash zone 0 20 40 60 80 100 cross-shore location (m)

03/04/14	2.3		
	2.5		

04/07/14	2.4	 timestack of swash zone time (s) cross-shore location (m)	 timestack of swash zone time (s) cross-shore location (m)
		 timestack of swash zone time (s) cross-shore location (m)	 timestack of swash zone time (s) cross-shore location (m)
04/07/14	2.3	 timestack of swash zone time (s) cross-shore location (m)	 timestack of swash zone time (s) cross-shore location (m)
		 timestack of swash zone time (s) cross-shore location (m)	 timestack of swash zone time (s) cross-shore location (m)





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