



Suivi par vidéo numérique de l'expérimentation de techniques de protection du littoral du lido de Sète à Marseillan – Rapport d'avancement

Rapport final

BRGM/RP-62594-FR
août 2013



Suivi par vidéo numérique de l'expérimentation de techniques de protection du littoral du lido de Sète à Marseillan – Rapport d'avancement

Rapport final

BRGM/RP-62594-FR
août 2013

Étude réalisée dans le cadre des opérations (projets)
de Service public du BRGM 2011 PSP08LRO20

Y. Balouin

Vérificateur : De La Torre, Ywenn

Approbateur : Audibert Marc

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

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

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. BRGM/RP-62594-FR, 60 p., 36 ill., 1 annexe.

© BRGM, 2013, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

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 mars 2013. Cette période comporte un suivi témoin (avant-travaux) et une période de suivi post-aménagement pour la zone de drainage qui a été opérationnelle en juin 2012. 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. Des analyses à très haute fréquence de la nappe de jet de rive ont également été réalisées spécifiquement afin d'évaluer le fonctionnement du drainage.

Les résultats du suivi pour la période avril 2011 à mars 2013 ont permis de mettre en évidence plusieurs caractéristiques de l'évolution du site :

- Le trait de côte sur la période de suivi présente un recul très modéré (quelques mètres) et très localisé d'une année à l'autre. Il présente toutefois une variabilité saisonnière très marquée avec une largeur de plage réduite de 20 à 30 m pendant la période hivernale, et une bonne récupération au printemps, entraînant le retour à une situation quasi-initiale d'un été à l'autre ;
- le recul lors des coups de mer est important, pouvant atteindre localement près de 40 m. La reconstruction naturelle de la plage après ces événements est toutefois assez bonne et assez rapide. Les impacts sur les cordons dunaires sont en revanche plus durables. La position de la barre d'avant-côte présente une dynamique très importante lors des coups de mer avec des migrations longitudinales de plusieurs centaines de mètres, qui conditionnent très fortement la localisation des impacts sur le cordon dunaire, et contribuent de manière non-négligeable au transport sédimentaire résiduel vers le sud-ouest.

Les aménagements réalisés sur la plage du Lido sont relativement récents (près d'un an pour le drainage, et travaux encore en cours à la fin de la période d'observation pour l'atténuateur). Toutefois, les analyses spécifiques réalisées sur les secteurs expérimentaux permettent de tirer quelques conclusions préliminaires :

- L'atténuateur de houle commence à faire déferler les vagues dès lors que la hauteur significative au large atteint 1 m. Le filtrage de la houle est donc effectif. Un seul événement de tempête majeure a pu être observé en mars 2013. On note lors de cet événement que les vagues déferlent rapidement sur le géotextile, mais ce filtrage ne semble pas diminuer le déferlement sur la barre interne qui régit toujours très fortement les vagues et courants à la côte et l'évolution de la plage lors des tempêtes. Il faudra probablement quelques événements pour la barre interne et l'atténuateur trouvent une position d'équilibre. Le niveau de surcote et les impacts sur le cordon dunaire ont toutefois été supérieurs dans la zone située à proximité immédiate de l'ouvrage que dans la zone « abritée ».
- Le drainage de plage, installé depuis près d'un an, a fait l'objet d'analyses et de suivis spécifiques.
 - o L'évolution de la plage dans cette partie du Lido a toujours été en équilibre dynamique autour d'une position moyenne et l'évolution actuelle suit cette tendance, avec un recul hivernal plus ou moins prononcé, mais un retour estival du trait de côte à sa position d'origine. Le drainage de plage ne semble pas avoir modifié ce comportement jusqu'à présent.
 - o L'analyse du jet de rive met en évidence un assèchement effectif du bas de plage lorsque le drain fonctionne. Toutefois, cet assèchement 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 probablement un rôle non-négligeable sur ce phénomène ;
 - o 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) sont 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 nombre de tempêtes observées jusqu'à présent ne permet toutefois pas d'identifier un comportement spécifique qui pourrait être attribué au drain.

Ces tendances observées sur une période avec aménagement relativement courte, seront bien sûr à confirmer lors des prochains mois/prochaines années, lorsque le système plage – avant-côte aura retrouvé une position d'équilibre avec les ouvrages.

Sommaire

1. Introduction	9
1.1. PROBLEMATIQUE.....	9
1.2. OBJECTIFS	11
2. Présentation du système de suivi vidéo sur le lido de Sète	13
2.1. LE SYSTEME ARGUS	13
2.2. IMPLANTATION SUR LE LIDO DE SETE	13
2.3. CARACTERISTIQUES DU SYTEME ARGUS DE SETE	14
3. Synthèse des acquisitions vidéo d'avril 2011 à Mars 2013 (23 mois).....	17
3.1. IMAGES ET ECHANTILLONNAGE DE PIXELS OBTENUS	17
3.2. ANALYSES REALISEES.....	18
4. Résultats du suivi vidéo	21
4.1. EVOLUTION DE LA POSITION DU TRAIT DE COTE	21
4.2. EVOLUTION DE LA POSITION DE LA BARRE D'AVANT-COTE INTERNE ET RELATION AVEC LE TRAIT DE COTE	24
4.2.1. Dynamique de la barre interne	25
4.2.2. Influence de la houle dans la migration de la barre interne.....	28
4.2.3. Relation entre les cornes de la barre et les sinuosités de plage	29
4.2.4. Conclusion sur l'évolution du trait de côte et des barres d'avant-côte	31
4.3. EVALUATION DE L'EFFET DE L'ATTENUATEUR DE HOULE DANS LA ZONE DES BARRES EN CROISSANT.....	32
4.3.1. Effet atténuateur	33
4.3.2. Evolution lors du coup de mer du 2 mars puis de la tempête du 5-6 mars 2013	34
4.3.3. Conclusion sur l'évolution de la plage en arrière de l'atténuateur	37
4.4. EVALUATION DE L'EVOLUTION DANS LA ZONE © ECOPLAGE.....	38
4.4.1. Evolution du trait de côte	39
4.4.2. Evaluation de l'effet du drainage sur le jet de rive.....	41
4.4.3. Evaluation des conditions d'efficacité du drainage.....	42
4.4.4. Conclusion sur l'évolution dans la zone de drainage	43
5. Conclusion.....	45
6. Bibliographie	47

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 – Position des 2 mâts implantés sur le Lido de Sète et champs de vision des 8 caméras (fond © Orthophoto IGN).....	14
Illustration 5 - Photos des 3 caméras (C6,C7 et C8) du mât n°1 (à gauche) et des 3 points de vue correspondants.	15
Illustration 6 - Point de vue des 5 caméras (C5,C4,C3,C2 et C1) du mât 2.....	15
Illustration 7 - 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)	16
Illustration 8 – Synthèse des acquisitions vidéo des différentes caméras (1 à 8). Les interruptions sont signalées en blanc.	17
Illustration 9 - Présentation des indicateurs morphologiques et hydrodynamiques obtenus par l'outil Argus.....	18
Illustration 10 – Dates des prises de vue retenues pour l'analyse de l'évolution du trait de côte et de la position de la barre interne.....	19
Illustration 11 – Caractéristiques des périodes de tempêtes et de beau temps au cours des deux années de suivi (26/02/2011-11/03/2013).	19
Illustration 12 – Superposition des traits de côte de 2011 à 2013 sur l'ortholittorale. Sont indiqués sur différents secteurs de la plage les amplitudes des mouvements enregistrés en mètres.	22
Illustration 13 – Superposition de traits de côte de 2011 à 2013 dans le repère ARGUS.	23
Illustration 14 – Position respective des traits de côte de Juin 2011 et janvier 2013 dans le repère Argus.....	23
Illustration 15 - Découpage de la plage de Sète en 3 parties selon la variabilité de l'amplitude du trait de côte. Les images des 8 caméras sont rectifiées et combinées sur l'ensemble du site, soit près de 4.5 km.	23
Illustration 16 - Relation entre les conditions hydrodynamiques (hauteur significative Hs et Energie longitudinale Elong) et l'évolution temporelle de la plage dans la partie NE du site.	24
Illustration 17 - Position de la barre interne sur les images. En haut, sur tout le secteur couvert par les caméras ; en bas : zone Nord-Est avec des barres en croissant.	25
Illustration 18 - Suivi temporel de la position de la barre interne, chaque corne suivie est identifiée par une couleur différente	26
Illustration 19 – Séquence d'images rectifiées montrant le phénomène de linéarisation lors des plus grosses tempêtes d'ESE et l'apparition d'un nouveau croissant dans les jours qui suivent.	27
Illustration 20 - Relation entre la migration (m) des cornes (H1, H2, H3, H4, H5) et la composante longitudinale du flux d'énergie (kW/0,5h).....	28
Illustration 21 - Relation entre les conditions hydrodynamiques (Hs et Elong, en bas), le déplacement (en m) des cornes de barre (H) et des sinuosités de plages (S, voir partie 4.2.3), (en haut).Les phases numérotées 1,2 et 3 correspondent au	

comportement : 1 : peu d'évolution ; 2 migration de la barre ; 3 : linéarisation de la barre.....	29
Illustration 22 - Relation entre la position des cornes de barres et les sinuosités de la plage.....	30
Illustration 23 - Position longitudinale des cornes de la barre (point noir sur les images) et des sinuosités de plage (croix rouge sur les images) couplée avec les conditions de houles (Hs en noir sur les graphiques et Dp en bleu sur les graphiques) des 4 périodes respectives.....	32
Illustration 24 - Exemple d'image moyennées et ortho-rectifiée sur laquelle sont localisées les morphologies citées ci-après (02/03/2013).	33
Illustration 25 – Observations du déferlement sur l'atténuateur pour différentes conditions de vagues en Février et Mars 2013. A droite, images instantanées, à gauche, images moyennées sur 10 min.	34
Illustration 26 - Conditions de vagues au large de Sète du 25 février au 12 mars 2013 (Données DREAL-LR-Candhis). Les traits verticaux rouge indiquent les horaires des prises de vue vidéo utilisées pour cette analyse.....	35
Illustration 27 - Situation avant/après tempête sur la partie NE du Lido mettant en évidence le recul du trait de côte.	36
Illustration 28 - Séquence d'images vidéo au cours de l'événement du 5-6 mars 2013.....	37
Illustration 29 - Dépôts sableux sur la piste cyclable au droit du géotextile.....	38
Illustration 30 – Petite brèche dans le cordon dunaire en face de la rupture de la barre interne (à la limite NE du géotextile).	38
Illustration 31 - Comparaison des traits de côte avant (juin 2011- mars2012) et après (avril 2012 – mars 2013) l'installation du système de drainage ; position du drain en pointillé noir.	39
Illustration 32 - Comparaison de l'amplitude du trait de côte avant la pose du drain (trait bleu) et après la pose (trait jaune), position du drain en pointillé noir, sur la période du 7/06/11 au 3/03/13.....	39
Illustration 33 - Evolution temporelle du trait de côte en différents points de la zone de drainage (en haut) et hauteur significative de la houle (Hs en m, en bas) du 7/06/11 au 3/03/13.L'indication T représente les épisodes de tempêtes et C les périodes de calme.	40
Illustration 34 - Comparaison de la forme du jet de rive pour des conditions hydrodynamiques données avant et après la pose du drain. On note la forme en cloche de la nappe en absence de drain, et la forme en demi-cloche pendant le drainage.....	41
Illustration 35 - Comparaison de la forme du jet de rive pour des conditions hydrodynamiques données avant et après la pose du drain. On note une infiltration plus forte (demi-cloche) le 02/11/2011 malgré l'absence de drainage, et un jet de rive en cloche alors que le drain fonctionne le 14/12/2012.	42
Illustration 36 - Position du drain pour différentes conditions hydrodynamiques. On note que pour des niveaux d'eau maximaux compris entre 0.3 et 0.8 m, la zone de battement du jet de rive (en blanc) est localisée au-dessus du drain.	43

Liste des annexes

Annexe 1 Positionnement de la barre d'avant-côte et relation avec la forme du trait de côte d'avril 2011 à Mars 2013.....	49
---	----

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 à 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 auront 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 vont être 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.

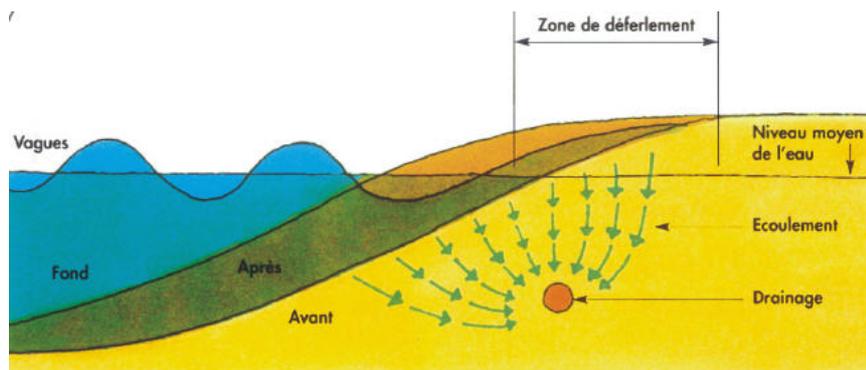


Illustration 2 – Schéma de fonction du système drainant ©Ecoplage.

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.

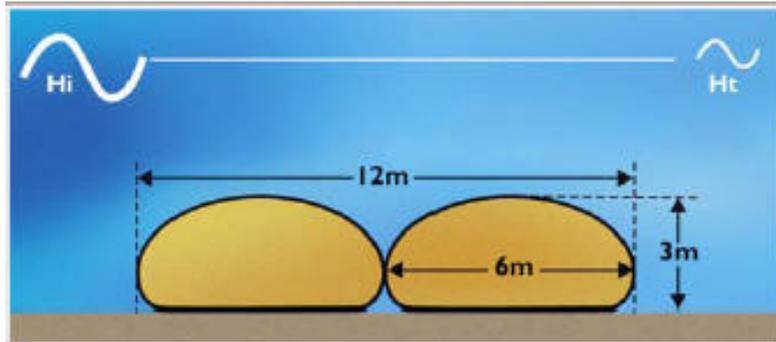


Illustration 3 – Schéma en coupe d'un ouvrage atténuateur de houle en géotextile (Egis-Eau, 2009).

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 (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/>

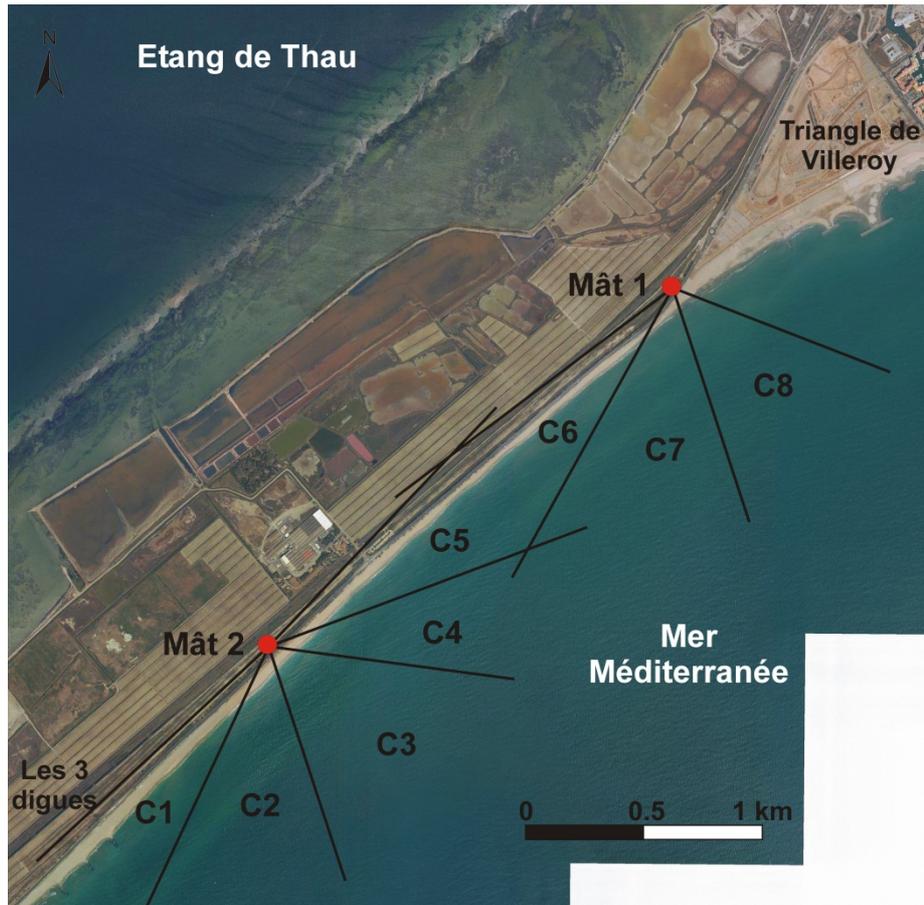


Illustration 4 – Position des 2 mâts implantés sur le Lido de Sète et champs de vision des 8 caméras (fond © Orthophoto IGN).

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 (2448x2048 pixels). Les réglages des lentilles sont différents selon les caméras pour obtenir la meilleure résolution possible au niveau du 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 carrés 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).

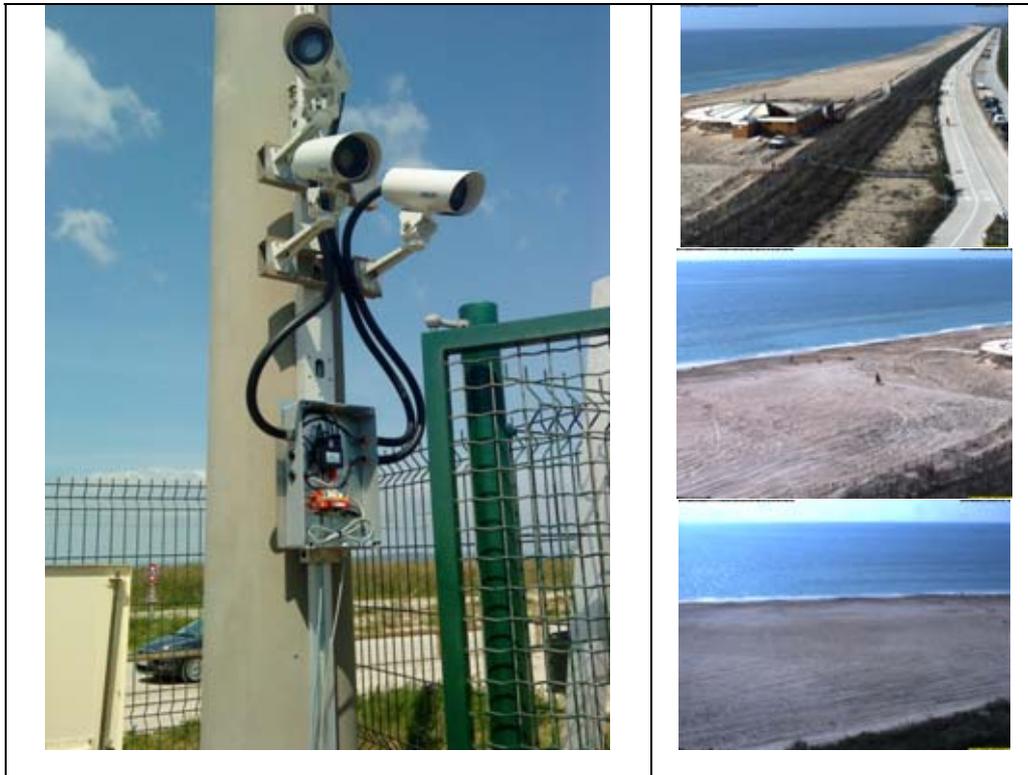


Illustration 5 - Photos des 3 caméras (C6, C7 et C8) du mât n°1 (à gauche) et des 3 points de vue correspondants.



Illustration 6 - Point de vue des 5 caméras (C5, C4, C3, C2 et C1) du mât 2.



Illustration 7 - 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 Mars 2013 (23 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 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 400 000, ce qui représente un volume de près de 350 Go.

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

	2011										2012										2013				
	A	M	J	J	A	S	O	N	D		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M
C1																									
C2																									
C3																									
C4																									
C5																									
C6																									
C7																									
C8																									

Illustration 8 – 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-data.wldelft.nl/sites/sete/2013/index.html>.

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 9). 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.

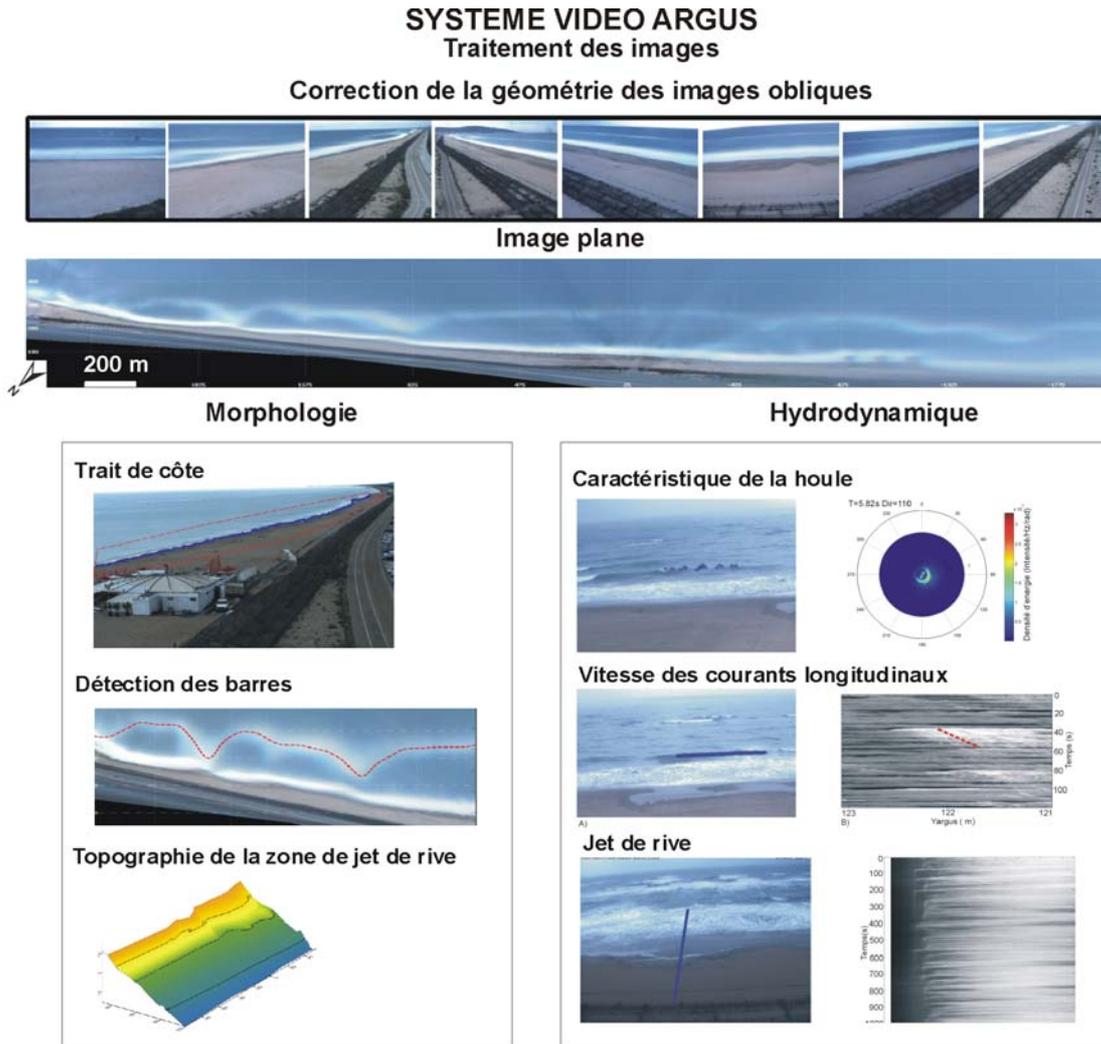


Illustration 9 - Présentation des indicateurs morphologiques et hydrodynamiques obtenus par l'outil Argus.

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

Illustration 10 – Dates des prises de vue retenues pour l'analyse de l'évolution du trait de côte et de la position de la barre interne.

Tempête T	Période	Hs Moyenne Maximum	Beau temps C	Période	Hs Moyenne Maximum
T1	22/04/11 au 23/04/11	2,0 m 3,0 m	C1	24/04/11 au 22/10/11	0,3 m 1,5 m
T2	23/10/11 au 21/11/11	1,3 m 3,7 m	C2	22/11/11 au 24/04/12	0,5 m 2,5 m
T3	25/04/12 au 29/04/12	2,2 m 3,5 m	C3	30/04/12 au 18/05/12	0,4 m 1,6 m
T4	19/05/12 au 20/05/12	1,7 m 2,9 m	C4	21/05/12 au 16/10/12	0,3 m 2,1 m
T5	17/10/12 au 10/11/12	1,0 m 3,5 m	C5	11/11/12 au 12/12/12	0,6 m 2,0 m
T6	13/12/12 au 14/12/12	2,0 m 3,1 m	C6	15/12/12 au 18/01/13	0,4 m 2,4 m
T7	19/01/13 au 20/01/13	2,6 m 3,9 m	C7	21/01/13 au 27/02/13	0,5 m 1,8 m
T8	28/02/13 au 6/03/13	1,7 m 4,7 m			

Illustration 11 – Caractéristiques des périodes de tempêtes et de beau temps au cours des deux années de suivi (26/02/2011-11/03/2013).

4. Résultats du suivi vidéo

Le système étant mis en place depuis avril 2011, nous disposons de 23 mois de suivi de la plage du lido. Une analyse des principaux indicateurs (traits de côte et positions des barres d'avant-côte) a déjà pu être réalisée pour la période initiale d'avril 2011 à janvier 2012 (Balouin *et al.*, 2012), et les parties suivantes présentent l'évolution globale du site 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. 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 49 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 12. 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 28 m au NE de la zone, alors qu'elle n'est que de 12 m au SW. On retrouve donc bien une mobilité beaucoup plus forte au NE qui a connu un recul important du trait de côte lors des dernières décennies (Certain 2002, Gervais, 2012). Dans la zone de drainage, la mobilité semble également relativement importante, mais cela s'explique partiellement par la phase de travaux qui a fortement remanié la plage dans ce secteur.

L'illustration 13 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 le plus grand recul observé au NE et dans la zone de drain correspond à Octobre 2012, alors que dans la partie centrale de la zone, ce sont plutôt les événements de fin décembre 2012 et début 2013 qui ont produit le rétrécissement de la plage le plus important.

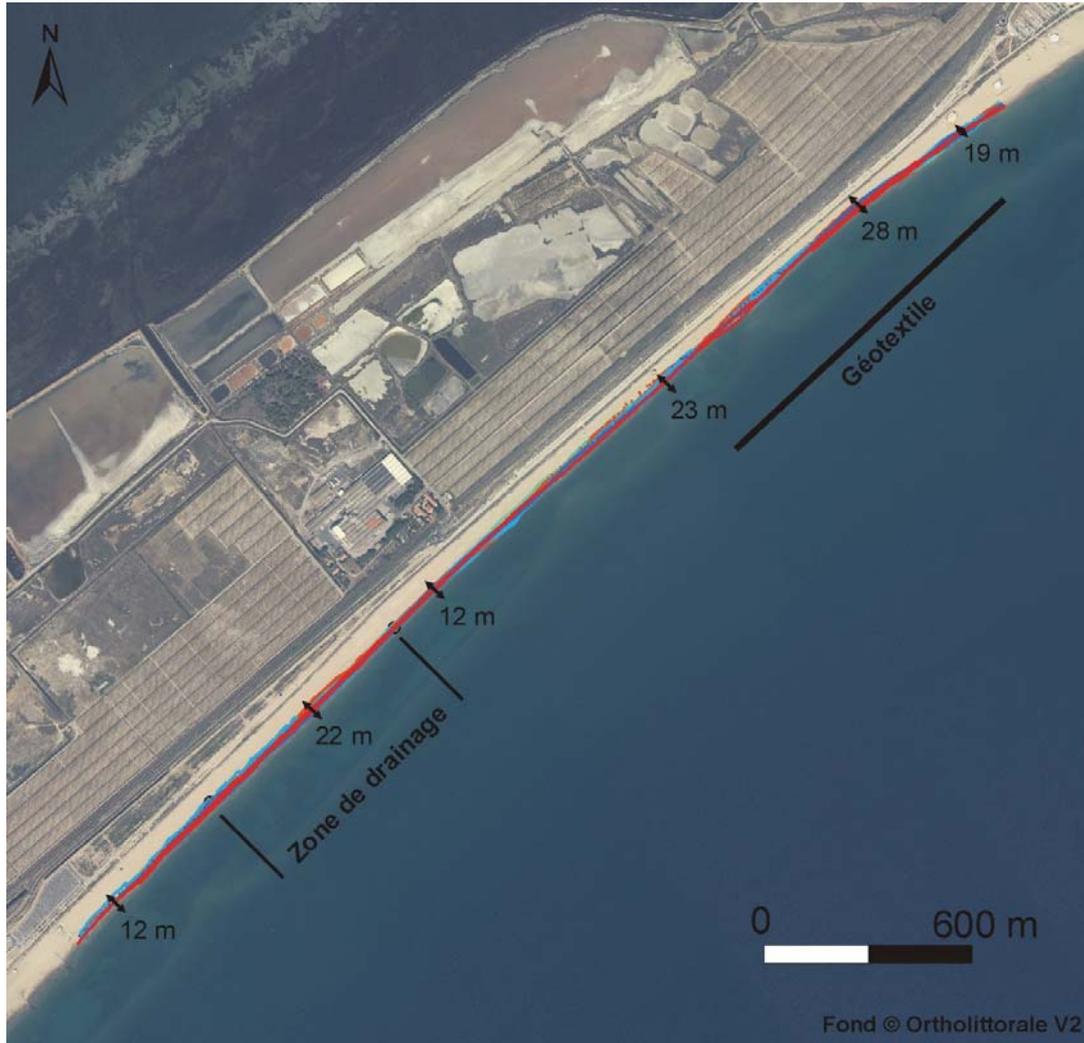


Illustration 12 – Superposition des traits de côte de 2011 à 2013 sur l'ortholittorale. Sont indiqués sur différents secteurs de la plage les amplitudes des mouvements enregistrés en mètres.

L'évolution générale de la position du trait de côte est présentée sur la figure 14. On constate que le déplacement moyen du trait de côte est de l'ordre de 5 m sur l'ensemble du site, mais la variabilité spatiale est forte, avec des secteurs en avancée et d'autre en recul. Il est important de noter que l'on compare une situation estivale (juin 2011) avec une situation hivernale (Janvier 2013). La date du 31 janvier a cependant été choisie pour ne pas prendre en compte les fortes évolutions associées à la tempête de début mars.

Les évolutions dans la zone NE où est située l'atténuateur de houle sont faibles avec des alternances d'avancées et de recul probablement liées à la migration longitudinale des sinuosités de plages. Dans la partie centrale du site, entre les deux systèmes de défense, le recul du trait de côte est plus marqué, de l'ordre de 20 m et dans la zone de drainage, un léger recul de quelques mètres est observé.

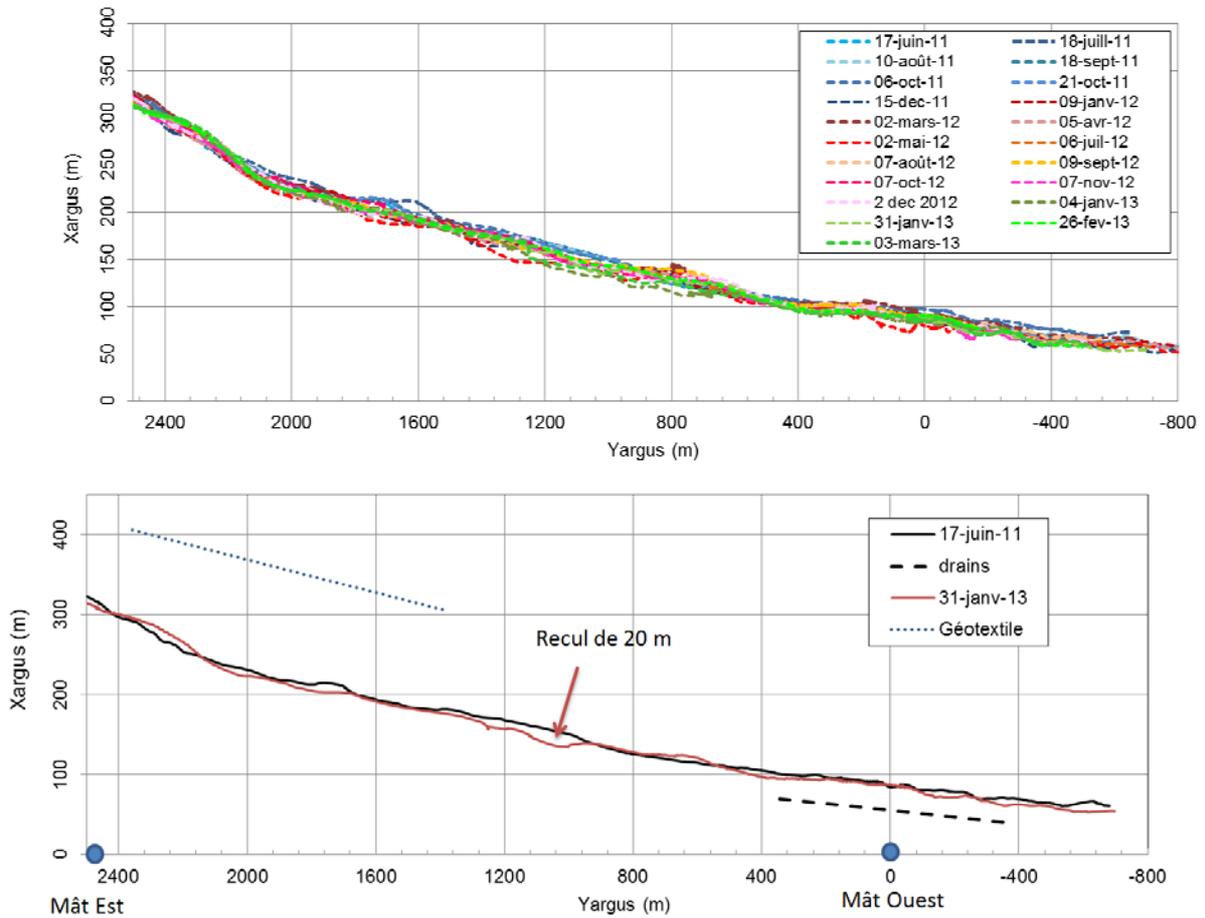


Illustration 14 – Position respective des traits de côte de Juin 2011 et janvier 2013 dans le repère Argus.

Ces évolutions sont à mettre en relation avec les morphologies sous-marines qui présentent également une variabilité spatiale et temporelle (cf. ill. 15). Les barres au NE sont de faible amplitude et très mobiles (voir partie 4.2), alors qu'en allant vers le sud et les trois digues, elles deviennent plus longues, plus éloignées de la côte, et moins mobiles.

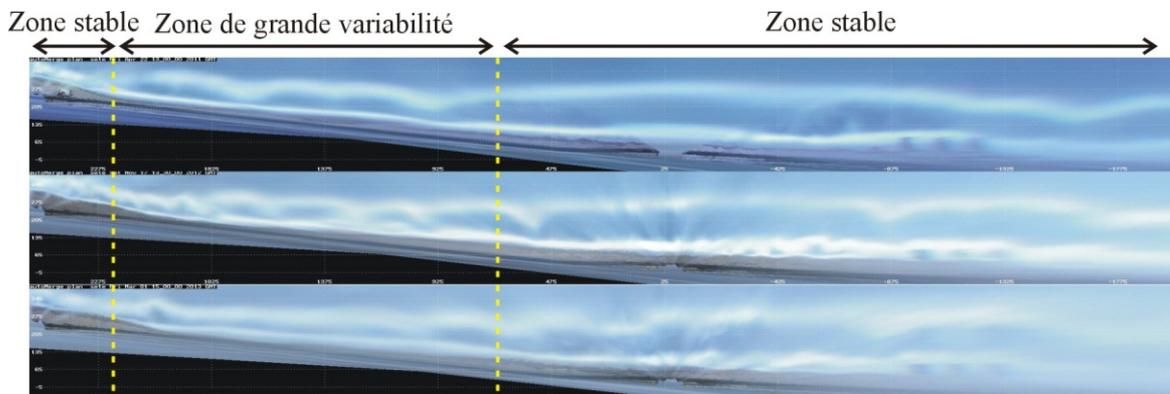


Illustration 15 - Découpage de la plage de Sète en 3 parties selon la variabilité de l'amplitude du trait de côte. Les images des 8 caméras sont rectifiées et combinées sur l'ensemble du site, soit près de 4.5 km.

Afin d'évaluer l'évolution dans le temps de la plage, la position du trait de côte a été relevée sur des profils transverses, respectivement situés à 500, 1000, 1500 et 1600 m à l'est du mât 2 (cf. illustration 16). L'évolution sur les différents profils suit globalement les mêmes tendances avec des phases d'avancée du trait de côte en été et de recul lors des phases de tempêtes, plus ou moins forts selon les événements. Comme observé précédemment, tous les profils ne présentent pas la même variabilité de position du trait de côte. Les profils 1500 et 1600, dans la zone du géotextile, montrent une plus grande variabilité, qui ne peut toutefois être mise en relation avec l'installation du système qui n'a été réalisée qu'à la fin de cette phase de suivi.

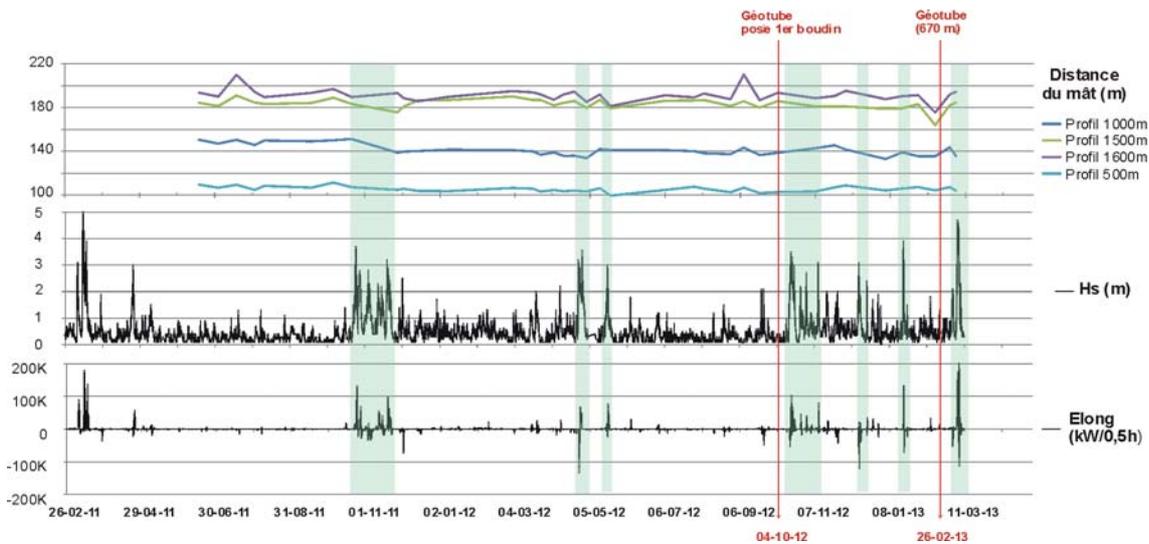


Illustration 16 - Relation entre les conditions hydrodynamiques (hauteur significative H_s et Energie longitudinale E_{long}) et l'évolution temporelle de la plage dans la partie NE du site.

4.2. EVOLUTION DE LA POSITION DE LA BARRE D'AVANT-COTE INTERNE ET RELATION AVEC LE TRAIT DE COTE

Grace à la localisation du déferlement sur les images moyennées sur 10 min, on déduit la position de la barre sous-marine. Cette localisation est possible dès lors que la hauteur des vagues au large atteint 1 à 2 m (cf. ill. 17). Ces conditions étant relativement fréquentes (les vagues sont supérieures à 1m environ 20% du temps), on peut suivre de manière satisfaisante l'évolution de la position et de la forme de la barre dans le temps. Cette information est particulièrement importante sur la plage du Lido car la barre interne constitue un atténuateur naturel de la houle qui contribue fortement à l'évolution de la plage émergée et des points d'impacts.

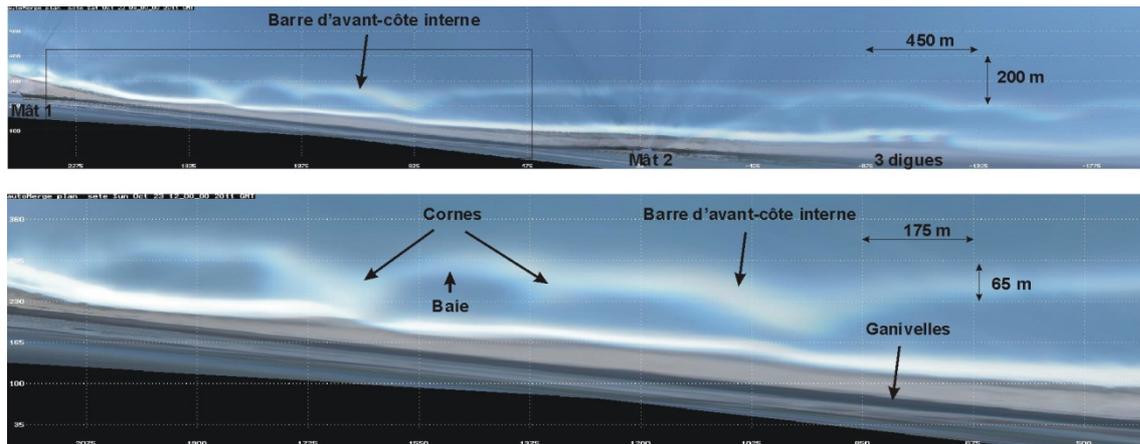


Illustration 17 - Position de la barre interne sur les images. En haut, sur tout le secteur couvert par les caméras ; en bas : zone Nord-Est avec des barres en croissant.

4.2.1. Dynamique de la barre interne

Les barres peuvent se déplacer aussi bien longitudinalement que transversalement. Cependant, l'erreur de positionnement de la crête étant estimée à plus ou moins 10 m et la migration transversale étant en générale limitée à quelques dizaines de mètres (ce qui reste inférieure à la zone de déferlement), seules les variations longitudinales de la barre interne sont étudiées ici. La position de la barre a été relevée sur notre période de 2 ans dès que les conditions hydrodynamiques permettaient de la visualiser lors d'épisodes de fortes énergies (Cf. III. 15), à partir de 62 images (cf. annexe 1). Les cornes sont notées H1, H2, H3, H4, H5 et H6 de l'ouest vers l'est. La figure ci-dessous (Cf. III. 18) a été divisée en plusieurs périodes selon le comportement de la barre. Les périodes notées « M » correspondent à des événements de migrations tandis que les périodes notées « R » équivalent à des phases où il y a peu de variations.

L'analyse des positions longitudinales successives de la barre sur 2 ans met en évidence une migration principale des croissants vers le SO de plusieurs centaines de mètres. Le déplacement des cornes est respectivement (de H1 à H4) de 450 m, 475 m, 565 m et 685 m entre le début et la fin de la période d'étude.

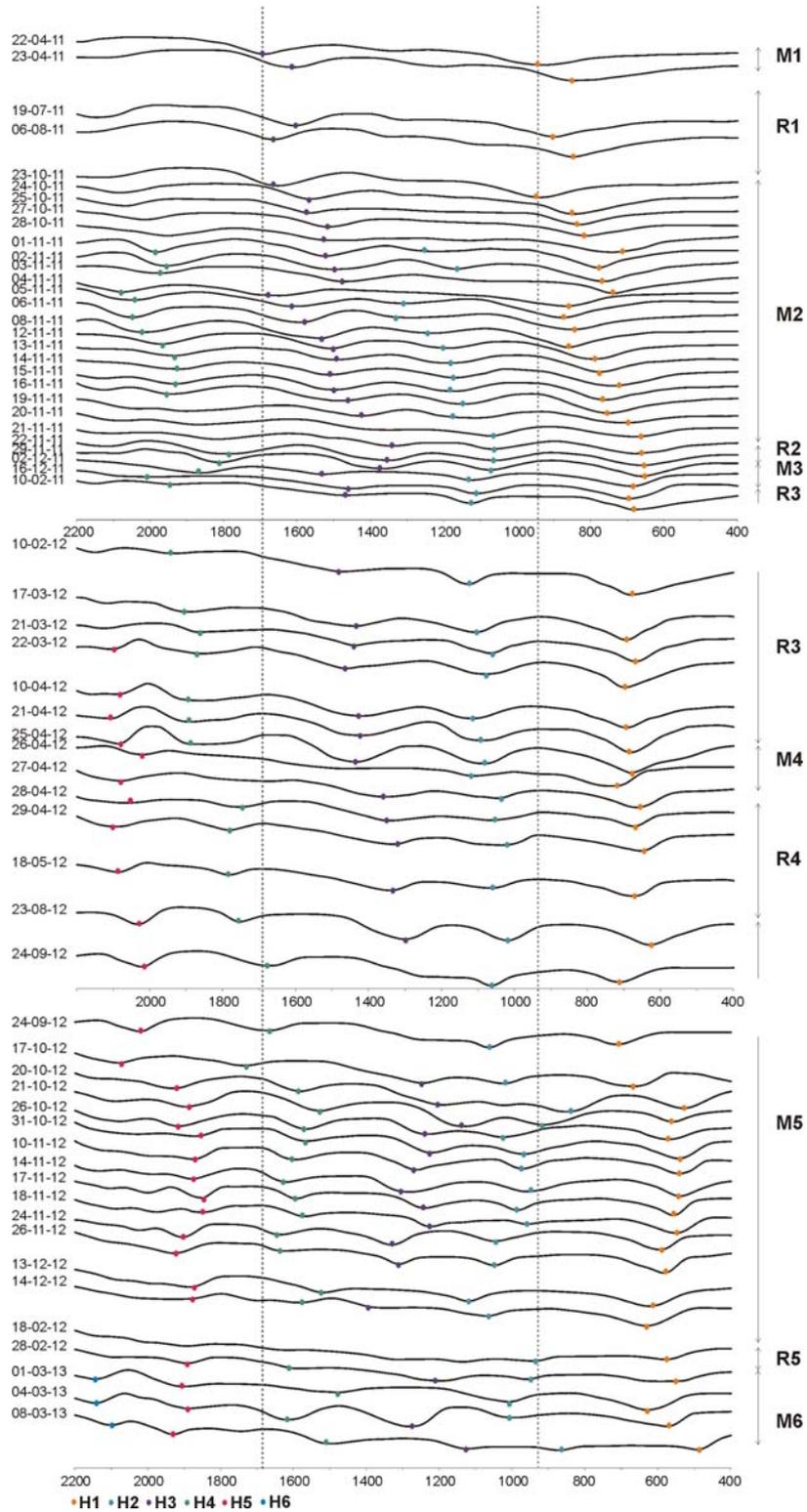


Illustration 18 - Suivi temporel de la position de la barre interne, chaque corne suivie est identifiée par une couleur différente

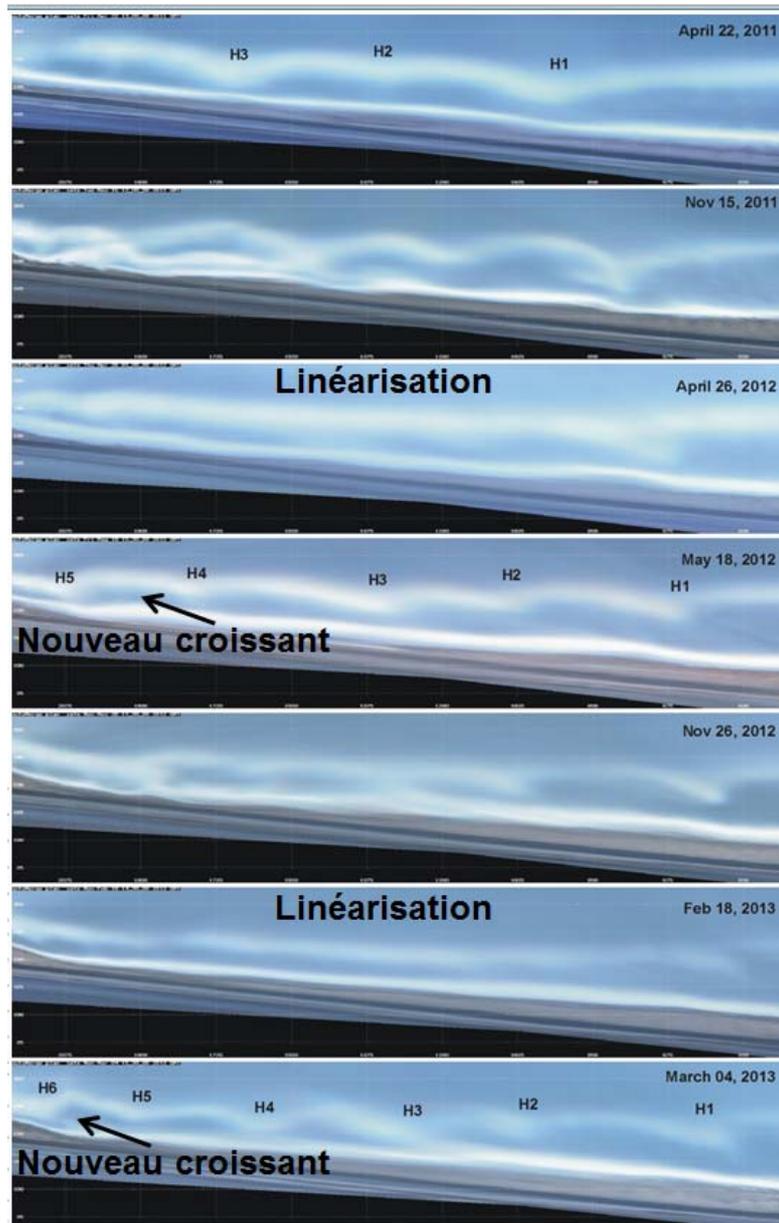


Illustration 19 – Séquence d’images rectifiées montrant le phénomène de linéarisation lors des plus grosses tempêtes d’ESE et l’apparition d’un nouveau croissant dans les jours qui suivent.

Les différentes phases de migration ont des directions variant entre le SO et le NE selon la direction principale de la houle. Plus les cornes se dirigent vers le SO, plus l’amplitude des déplacements diminue. Cela peut s’expliquer par le fait que, vers le SE, la barre s’éloigne de la plage induisant des circulations d’eau différentes entre le rivage et la barre interne (Gervais, 2012 ; Balouin et al., 2013).

La migration progressive des motifs en croissant s’effectue à l’occasion des coups de mer pour lesquels les directions de vagues sont obliques. Au cours des deux années de suivi, de nouveaux croissants sont apparus au NE et ont commencé leur migration vers le SE. Cette apparition est généralement associée à un événement de tempête plus intense qui modifie fortement pendant quelques heures la forme de la barre. Suite à ces événements, les croissants se reforment très rapidement, et un nouveau croissant apparaît au NE. Ceci a été observé à deux occasions : mars-avril 2012 et mars 2013 (cf. ill. 18, 19 et 20).

4.2.2. Influence de la houle dans la migration de la barre interne

Comme indiqué précédemment, la migration de la barre interne est fortement liée aux conditions hydrodynamiques. Plus les vagues arrivent obliquement à la côte, plus la vitesse de migration de la barre est importante. L'énergie longitudinale de la houle est un indicateur permettant de prendre en compte à la fois l'obliquité des vagues et leurs caractéristiques (période, hauteur, durée). Cet indicateur a été évalué de deux manières différentes : en intégrant toute l'énergie déployée lors de la tempête, ou en calculant l'énergie au pic de celle-ci. L'illustration 20 présente la corrélation entre ces deux indicateurs et le déplacement de la barre évalué par la mobilité des cornes de croissant. Les résultats, malgré une corrélation variable, montrent une bonne relation entre l'énergie au pic et les déplacements (coefficient de corrélation entre 0.4 et 0.65), alors que l'énergie totale de toute la tempête présente une corrélation plus faible (0.2 à 0.3).

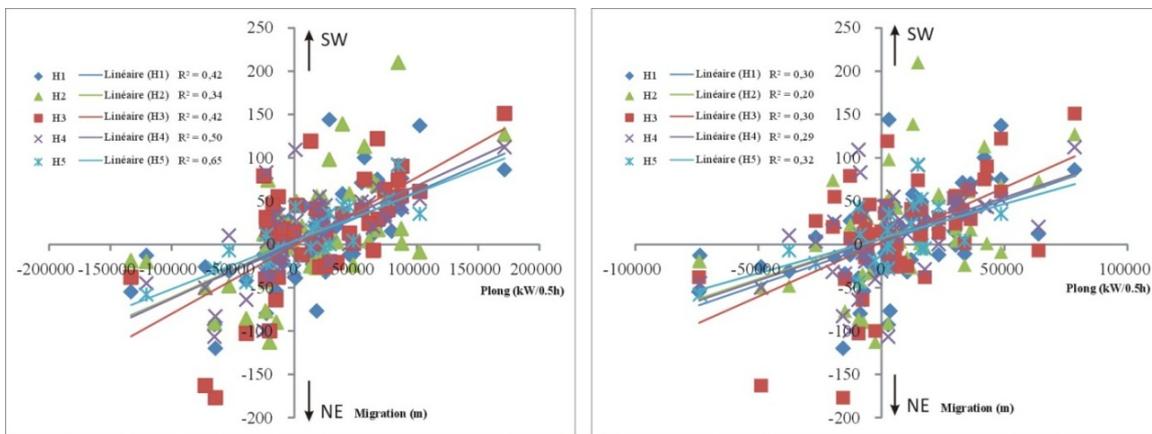


Illustration 20 - Relation entre la migration (m) des cornes (H1, H2, H3, H4, H5) et la composante longitudinale du flux d'énergie (kW/0,5h).

Ces résultats suggèrent que le pic de tempête joue un rôle plus important sur les barres que la durée de la tempête. Le déplacement des barres s'effectue donc essentiellement au moment où l'agitation est maximale, au pic d'intensité de chaque tempête (Gervais *et al.*, 2011 ; Balouin *et al.*, 2013).

De plus, on constate que les valeurs de corrélation des cornes situées au NE, H4 et H5 sont supérieures ($R^2 = 0,5$ et $0,65$) à celles obtenues avec H1, H2 et H3 ($0,42$; $0,34$ et $0,42$). Cela peut s'expliquer par le fait qu'en migrant vers le SO, les barres s'éloignent de la côte et deviennent plus profondes. Elles sont donc moins affectées par les conditions de vagues que les barres plus superficielles du NE.

A l'inverse durant les périodes de calme, il n'y a pas ou peu d'évolution dans le déplacement ou la forme de la barre (Cf. Ill. 21). Trois comportements sont répertoriés, notés 1 pour une absence d'évolution, 2 pour une migration et 3 pour une linéarisation de la barre et l'apparition d'une nouvelle corne.

Sur la totalité du suivi, on observe une migration nette de l'ensemble des croissants vers le SO, de l'ordre de 500 m.

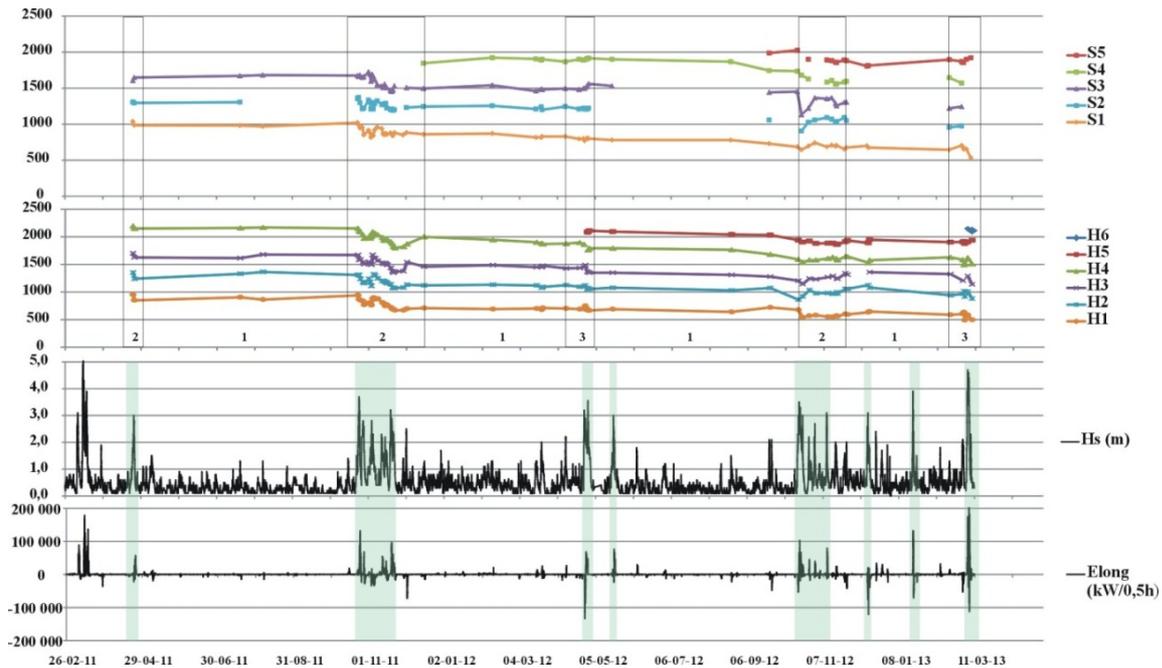


Illustration 21 - Relation entre les conditions hydrodynamiques (H_s et $Elong$, en bas), le déplacement (en m) des cornes de barre (H) et des sinuosités de plages (S , voir partie 4.2.3), (en haut). Les phases numérotées 1, 2 et 3 correspondent au comportement : 1 : peu d'évolution ; 2 migration de la barre ; 3 : linéarisation de la barre.

4.2.3. Relation entre les cornes de la barre et les sinuosités de plage

La plage de Sète possède de grandes sinuosités au niveau du bas de plage qui peuvent être assimilées à des méga-croissants d'une centaine de mètres de long. Ces avancées de la plage sur la mer sont généralement situées en face des cornes de la barre interne, on dit qu'elles sont en « phase ». L'étude de la position de ces sinuosités (cf. ill. 21) montre des déplacements longitudinaux très semblables à ceux des barres pendant les tempêtes. La position relative des cornes de barres et des sinuosités est présentée sur l'illustration 22.

De manière générale, on note que les cornes des croissants sont positionnées en face des sinuosités. A l'exception de quelques points particuliers, la position est identique pour les sinuosités situées au NE, et on note un léger décalage vers le SO qui peut s'expliquer par l'éloignement progressif de la barre.

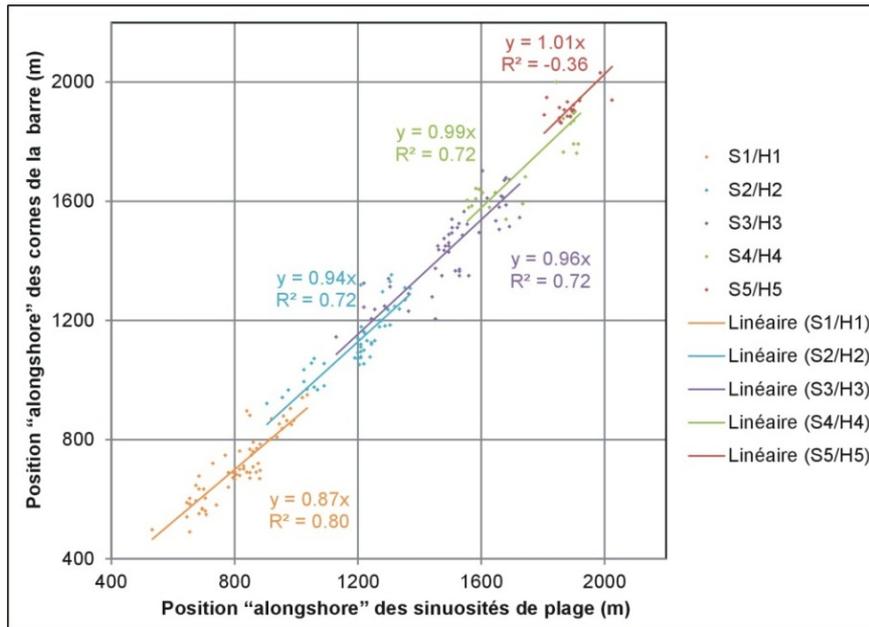


Illustration 22 - Relation entre la position des cornes de barres et les sinuosités de la plage.

Toutefois, dans certaines situations particulières, on note un décalage important entre les deux morphologies qui se retrouvent en antiphase (sinuosité en face de la baie du croissant). L'analyse de ces situations particulières a permis de mettre en évidence un décalage temporel dans la migration progressive des deux morphologies. Lors des épisodes de tempêtes, la barre migre très rapidement (jusqu'à 200 m en quelques heures). Les sinuosités de plage sont toutefois moins sensibles et demeurent souvent à la même place, même si une légère migration peut être observée en raison de l'érosion préférentielle du flanc de la sinuosité qui fait face à la houle.

Ces positions en antiphase ont été observées lors des tempêtes d'octobre et novembre 2011, avril 2012 et novembre 2012. Ces 4 événements ont des conditions hydrodynamiques post-tempêtes différentes ce qui conduit à des comportements variables pour les sinuosités de plage (Cf. Illustration 23).

Lors des tempêtes de novembre 2011 et octobre-novembre 2012, les deux morphologies se sont retrouvées en antiphase après le pic de tempête, et ont retrouvées leur position en phase après la migration progressive des sinuosités de plage. Le processus a duré entre 6 et 18 jours. Lors des deux autres événements, les morphologies en antiphase après la tempête n'ont plus bougé et sont restées en antiphase jusqu'à l'événement suivant.

Cette différence de comportement morphologique constatée entre les deux groupes de tempêtes s'explique par la variabilité des conditions hydrodynamiques. Lors des tempêtes du premier groupe, les conditions après-tempête sont restées relativement énergétiques avec des hauteurs de vagues atteignant plus de 2 m dans les jours qui ont suivi. Lors des tempêtes du 2^{ème} groupe, les conditions de vagues sont retombées très rapidement après le pic de tempête. Cette décroissance très rapide des vagues pourrait expliquer la non-migration des sinuosités de plage, alors que dans l'autre cas, les conditions hydrodynamiques modérées ont pu favoriser une mobilité sédimentaire dans la zone de jet de rive et entraîner le retour en phase.

Ces résultats mettent en évidence la forte interaction entre les morphologies sous-marines et la plage émergée, soulignant la protection naturelle de la plage par les barres d'avant-côte, et la forte variabilité longitudinale des reculs observés lors des tempêtes.

4.2.4. Conclusion sur l'évolution du trait de côte et des barres d'avant-côte

Les résultats du suivi pour la période avril 2011 à mars 2013 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'hiver 2013, présente un recul moyen élevé (de 5 à 20 m selon les secteurs). Cette évolution traduit essentiellement le fonctionnement saisonnier du site. En effet, le profil hivernal de la plage est beaucoup plus concave, et on observe généralement une variation de largeur de la plage de 10 à 20 m entre l'été et l'hiver. La comparaison des traits de côte de l'été 2011 à l'été 2012 montre un recul plus modéré et plus localisé, la partie la plus touchée étant celle située au Nord-Est ;
- le recul lors des coups de mer successifs d'octobre-novembre a été particulièrement important, malgré des conditions d'énergie des vagues relativement modérées. Il atteint localement près de 40 m. La reconstruction naturelle de la plage après ces événements est toutefois assez bonne et assez rapide. L'évolution observée lors de ces événements important correspond souvent à un transfert sableux du bas de plage vers le haut de plage. Il n'y a donc pas de forte perte de volume sableux, mais une tendance à une augmentation générale de la pente de la plage et de la dune, favorisant les franchissements du cordon lors des tempêtes successives ;
- la barre d'avant-côte présente une dynamique très importante lors des coups de mer avec des migrations longitudinales de plusieurs centaines de mètres, qui sont corrélées avec la direction et l'énergie longitudinale de la houle au large ;
- la position des barres d'avant-côte joue un rôle important dans l'évolution de la plage émergée, que ce soit par l'atténuation de l'énergie des tempêtes ou par l'augmentation locale du niveau d'eau à la côte permettant au jet de rive de toucher le pied du cordon dunaire.

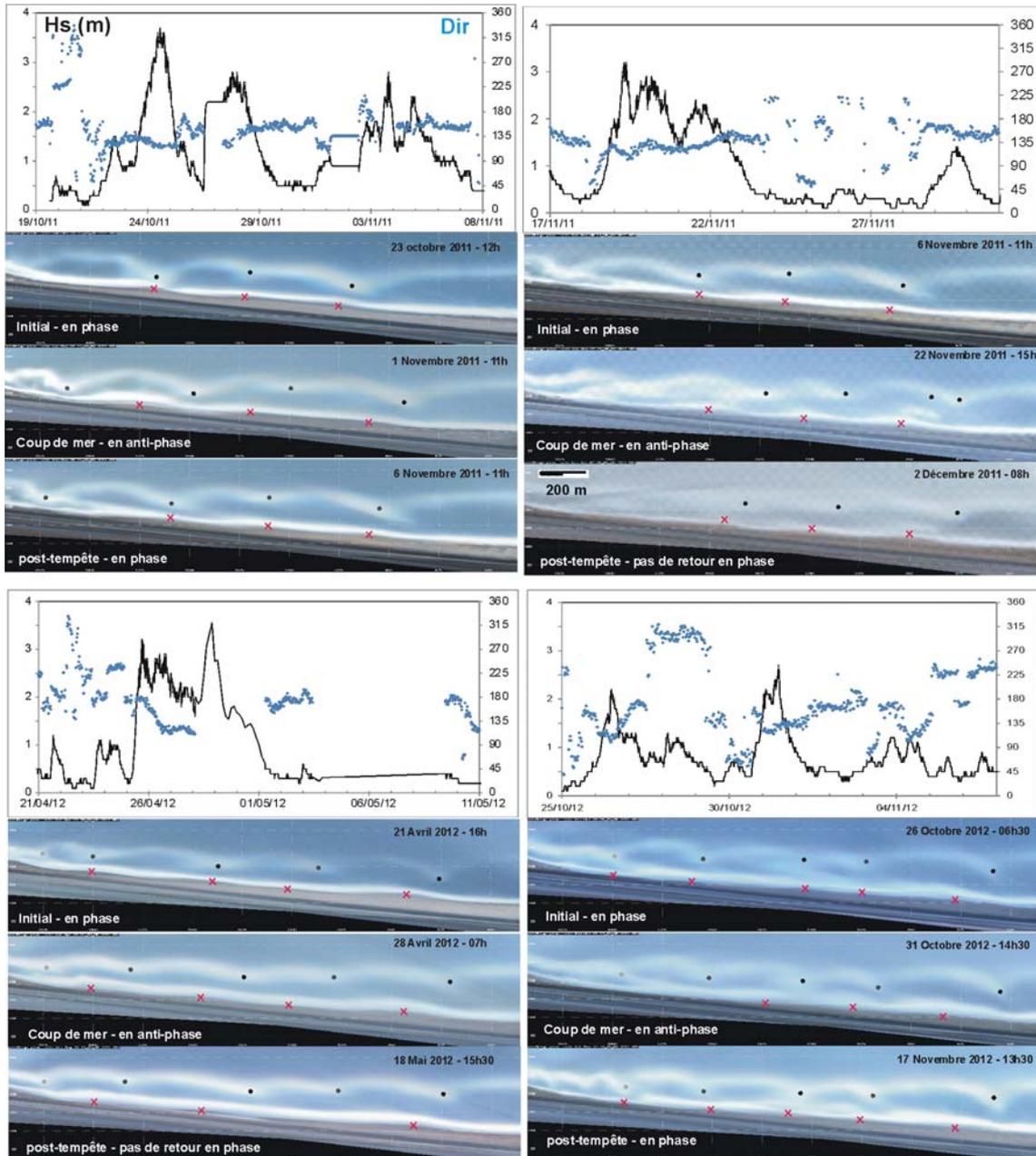


Illustration 23 - Position longitudinale des cornes de la barre (point noir sur les images) et des sinuosités de plage (croix rouge sur les images) couplée avec les conditions de houles (H_s en noir sur les graphiques et D_p en bleu sur les graphiques) des 4 périodes respectives.

4.3. EVALUATION DE L'EFFET DE L'ATTENUATEUR DE HOULE DANS LA ZONE DES BARRES EN CROISSANT

La mise en place de l'atténuateur de houle s'étant terminée en Mai 2013, les résultats obtenus jusqu'à présent ne permettent donc pas d'évaluer l'efficacité de cet ouvrage sur l'évolution de la plage.

Toutefois, la tempête de début Mars 2013, relativement importante, a eu lieu alors que les 2/3 environ de l'atténuateur étaient installés, permettant donc de décrire le comportement de l'ouvrage partiel et de la plage.

Sur les images rectifiées, moyennées sur 10 min, on peut observer les zones de déferlements qui indiquent la position des morphologies sous-marines, qu'elles soient naturelles ou artificielles. L'illustration 24 permet ainsi d'identifier le positionnement de la barre interne, mais également le positionnement de l'atténuateur de houle plus au large. Les positions déduites de ces morphologies et du géotextile sont dépendantes de la hauteur des vagues qui va conditionner la largeur de la zone de déferlement. La position visible sur les images suivantes est donc relative à la hauteur de vagues et ne doit pas être interprétée comme un déplacement de la morphologie ou du tube. Seules les images prises lors de conditions de vagues comparables peuvent être utilisées pour interpréter des déplacements des morphologies sous-marines. Les modifications de formes de la barre d'avant-côte traduisent en revanche des modifications réelles.

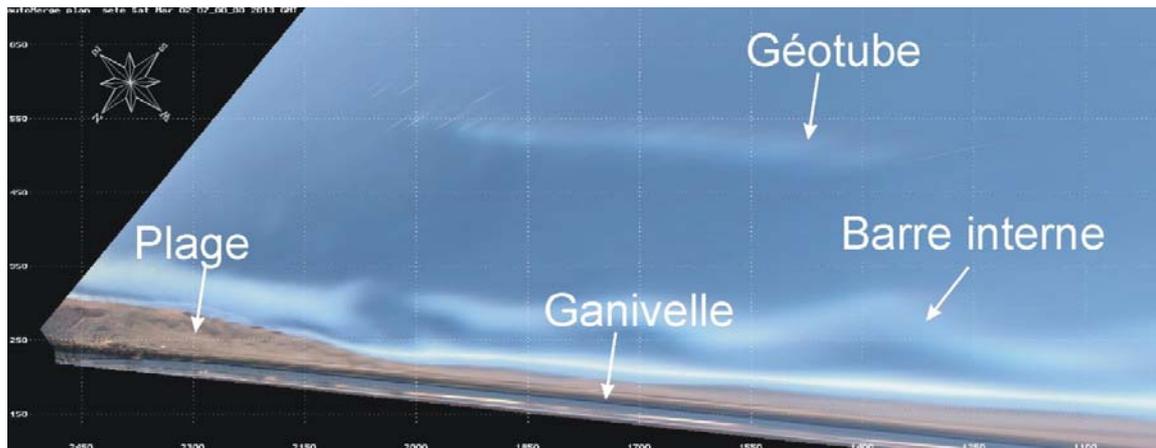


Illustration 24 - Exemple d'image moyennée et ortho-rectifiée sur laquelle sont localisées les morphologies et aménagements (02/03/2013).

4.3.1. Effet atténuateur

Malgré la construction partielle de l'ouvrage, on peut évaluer le rôle des géotextiles dans le déferlement au large des vagues. L'illustration 25 présente une vue partielle de la caméra 6 permettant l'observation du déferlement sur l'atténuateur. Dès lors que les vagues au large atteignent une hauteur significative de 1 m, le déferlement commence à apparaître, et l'image moyennée sur 10 min montre clairement une zone de déferlement linéaire le long de l'ouvrage. Pour des vagues atteignant 2 m de Hs au large, l'intensité de la dissipation d'énergie sur l'ouvrage et sur la barre interne est forte. Pour des hauteurs de vagues supérieures, la zone comprise entre l'atténuateur et la côte est dite saturée, c'est-à-dire que le déferlement y est généralisé.

Ces résultats préliminaires mettent en évidence une dissipation de l'énergie de la houle pour des hauteurs de vagues très faibles (1m). Le filtrage de la houle par déferlement sur l'ouvrage est donc avéré, et ce pour des hauteurs de vagues bien inférieures à ce qui était prévu par les simulations réalisées avant les travaux.

On constate cependant que le déferlement sur la barre interne reste similaire à celui constaté avant la construction de l'atténuateur. A partir de 1m de hauteur significative, ce déferlement est observé. Cela signifie que si une partie de la houle est filtrée par le géotextile, cela ne semble pas modifier significativement le comportement de l'hydrodynamique entre l'ouvrage et la côte.



Illustration 25 – Observations du déferlement sur l'atténuateur pour différentes conditions de vagues en Février et Mars 2013. A droite, images instantannées, à gauche, images moyennées sur 10 min.

4.3.2. Evolution lors du coup de mer du 2 mars puis de la tempête du 5-6 mars 2013

Le début du mois de mars a été caractérisé par la succession d'un petit coup de mer (Hs de 2 m) puis d'une tempête d'ESE avec des hauteurs significatives des vagues atteignant près de 5 m (cf. illustration 26). Les périodes de la houle sont restées modérées (inférieure à 9s).

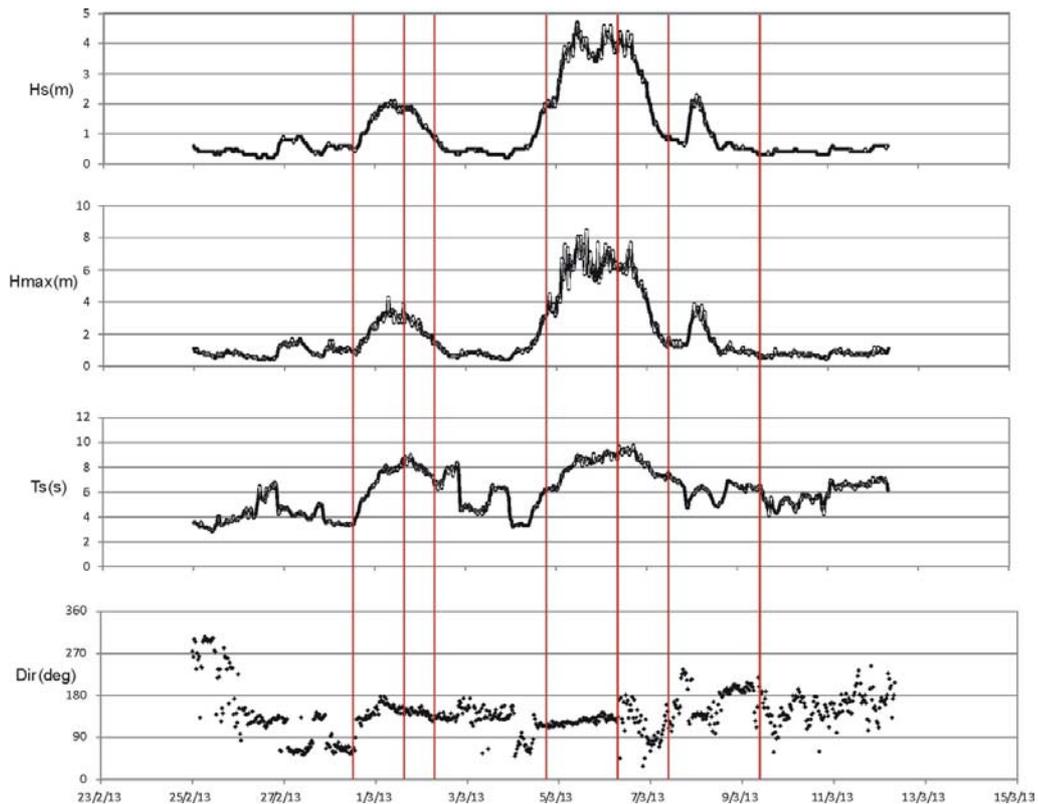


Illustration 26 - Conditions de vagues au large de Sète du 25 février au 12 mars 2013 (Données DREAL-LR-Candhis). Les traits verticaux rouge indiquent les horaires des prises de vue vidéo utilisées pour cette analyse.

Les observations vidéo durant cette période permettent d'identifier les comportements de l'avant-côte et de la plage.

Le 1^{er} mars à 15h, la houle atteint près de 2 m. On observe alors un fort déferlement et une forte dissipation sur le géotextile et sur la barre d'avant-côte. L'atténuation sur le géotextile apparaît dès lors que la hauteur significative des vagues est de l'ordre de 1 m. On note que le déferlement sur la barre interne est important pour ces conditions, et probablement supérieur à celui observé sur le tube.

L'évolution lors de ce petit coup de mer est très localisée (cf. image du 2 mars sur l'illustration 24). Le premier croissant de la barre interne (en partant du NE) est rompu (probablement par les courants de retour comme cela a pu être quantifié par le passé (Gervais, 2012)). La conséquence est un recul localisé du trait de côte au droit de ce feston qui ne protège plus la plage (Cf. ill. 27 et 28). La submersion est très faible (inondation du bas de plage). Les deux autres festons visibles sur les images évoluent peu. Cette stabilité peut être attribuée à l'éloignement progressif de la barre vers le sud-ouest, ou à une atténuation partielle de l'énergie par le géotextile, limitant l'effet de la houle sur la barre interne.

L'évènement du 5-6 mars est beaucoup plus important et des dégâts ont été observés sur le terrain (franchissement de la dune sur environ 300 m de l'entrée 29 à 32, avec dépôt sableux traversant la piste cyclable, voie de bus et parking ; franchissement plus localisés au-delà de l'entrée 32 ; brèche et épandage sableux à côté de l'entrée 35, visite du 5 et 7 mars).

Lors de cet évènement, la zone de surf est saturée (déferlement sur tout le secteur), et l'identification des morphologies est plus délicate. On note une dissipation de l'énergie plus

intense sur le géotextile (le 6 mars à 7h), une inondation totale de la plage, et le franchissement de la dune par les eaux (voir les flèches rouge sur l'illustration 3). Les images plus détaillées indiquent que la zone de franchissement et de brèches est localisée à l'ouest du tube, et le secteur au droit du tube est concerné par des franchissements plus localisés, avec des épandages sableux pouvant toutefois atteindre la voie de bus (Cf. III. 29 et 30).

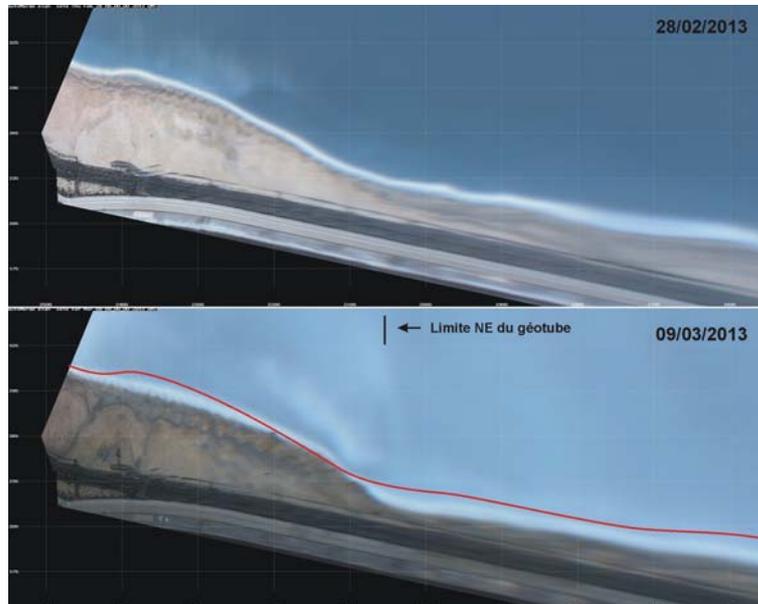
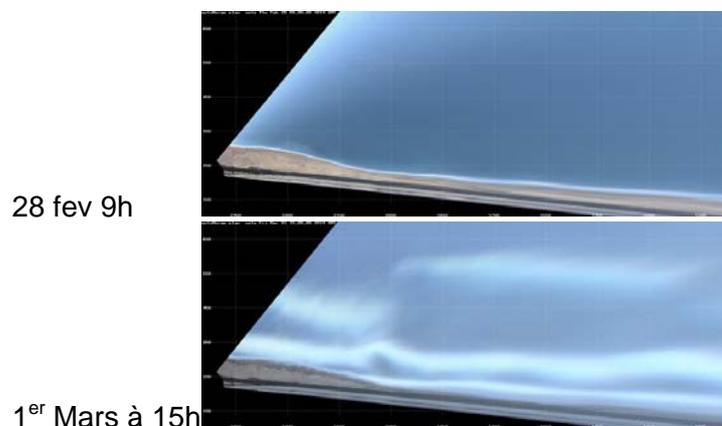


Illustration 27 - Situation avant/après tempête sur la partie NE du Lido mettant en évidence le recul du trait de côte.

Le retour à des conditions de beau temps s'effectue le 7 mars avec l'atténuation progressive de la houle (qui est encore amortie par la barre interne et plus faiblement par le géotextile). Le 9 mars, les conditions sont revenues à la normale.

L'évolution du trait de côte pendant cet événement se traduit par un recul moyen de l'ordre de 10 m (cf. illustration 26). Ce recul est plus accentué au niveau de la rupture de la barre interne, au droit de la limite NE du géotextile. Au droit du géotextile, le recul est légèrement plus modéré. Il est important de noter que la reconstruction de la plage est encore en cours, et que le recul observé n'est probablement que provisoire.



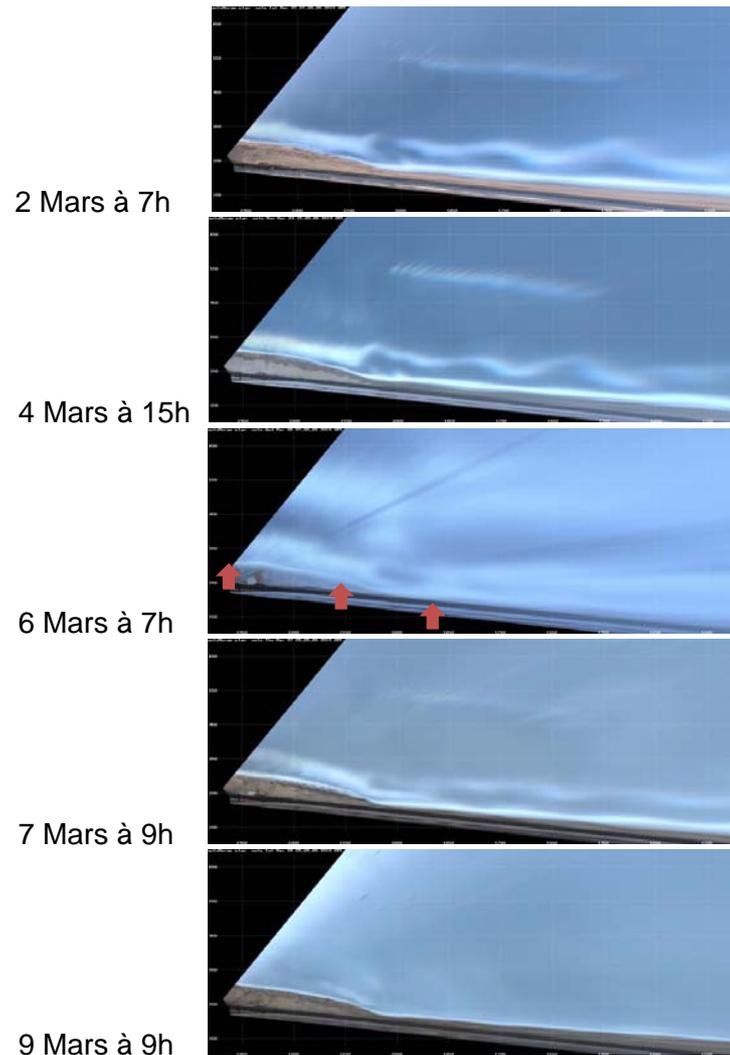


Illustration 28 - Séquence d'images vidéo au cours de l'événement du 5-6 mars 2013.

4.3.3. Conclusion sur l'évolution de la plage en arrière de l'atténuateur

Les observations lors de la tempête permettent de tirer les conclusions suivantes :

1. l'atténuation de la houle sur le géotextile est observée, à partir d'une hauteur significative de la houle de l'ordre de 1 m, et tout au long de l'événement. La dissipation d'énergie est supérieure à celle qui s'effectuait sur la barre externe avant l'installation du tube ;
2. le déferlement et la dissipation sur la barre interne sont vraisemblablement peu modifiés, et observés dès lors que $H_s \sim 1$ m ;
3. la submersion lors de l'événement est importante, avec l'inondation totale de la plage ; la création d'une brèche, et le franchissement du cordons sur plusieurs centaines de mètres. Les impacts majeurs sont observés au niveau de la rupture de la barre interne, située face à la limite du tube, mais également, dans une moindre mesure, au droit du tube ;
4. le recul du trait de côte lors de cet événement est de l'ordre de 10 m dans le secteur qui est historiquement le plus touché. Ce recul reste provisoire car la reconstruction de la plage post-tempête n'est pas achevée. Lors de l'automne 2011, des reculs de l'ordre de 25 m

avait été constatés sur ce même secteur pour une tempête légèrement plus modérée (Hs~4m).

5. Ce premier événement majeur depuis l'installation d'un linéaire significatif de géotextile (environ 600 m sont installés) met en évidence une atténuation de la houle, mais l'impact sur les motifs de la barre interne est encore limité, et c'est toujours celle-ci qui semble jouer un rôle majeur sur l'évolution du trait de côte et la localisation des impacts.



Illustration 29 - Dépôts sableux sur la piste cyclable au droit du géotextile.



Illustration 30 – Petite brèche dans le cordon dunaire en face de la rupture de la barre interne (à la limite NE du géotextile).

4.4. EVALUATION DE L'EVOLUTION DANS LA ZONE © ECOPLAGE

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 d'une année d'observation après. 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.

4.4.1. Evolution du trait de côte

L'objectif du système de drainage est de faciliter le dépôt sédimentaire dans la zone de jet de rive pendant des conditions hydrodynamiques constructives (hors périodes de tempêtes). Il vise ainsi à stabiliser la position du trait de côte et à raidir la pente du bas de plage.

La position du trait de côte a été obtenue grâce au suivi vidéo en utilisant strictement des images pour lesquelles les conditions hydrodynamiques sont équivalentes. Il s'agit des conditions de beau temps, sans vagues ni surcote ou décote, afin d'assurer la comparaison des traits de côte instantanés obtenus.

L'installation du drain de plage a pour but de diminuer le transport de sédiments dans la zone de jet de rive. En asséchant le bas de plage, induit par le rabattement de la nappe phréatique, le drain de plage stoppe l'arrachement du sable par la nappe descendante du jet de rive et retient le sable apporté par la houle. Il doit donc en théorie contribuer à une réduction de l'érosion du trait de côte (stabilisation voire avancée). La comparaison de l'évolution du trait de côte avant et après l'installation du drain permet d'avoir un premier résultat sur l'efficacité du drain (Cf. III. 31 et 32). Dans les deux cas, l'amplitude des mouvements du trait de côte est similaire et varie entre 10 et 15 m selon les périodes hivernales et estivales.

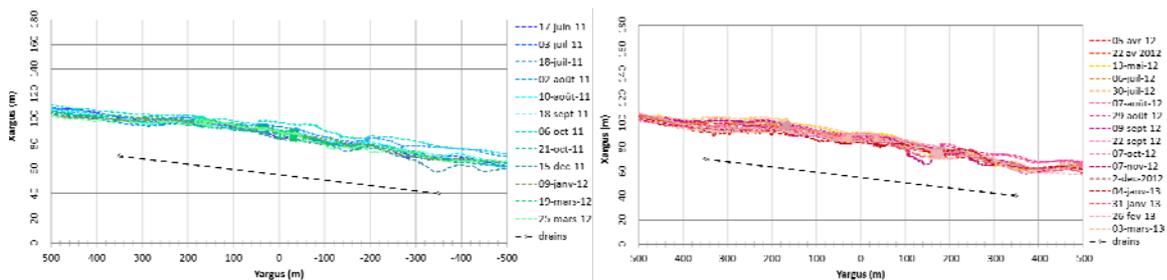


Illustration 31 - Comparaison des traits de côte avant (juin 2011- mars2012) et après (avril 2012 – mars 2013) l'installation du système de drainage ; position du drain en pointillé noir.

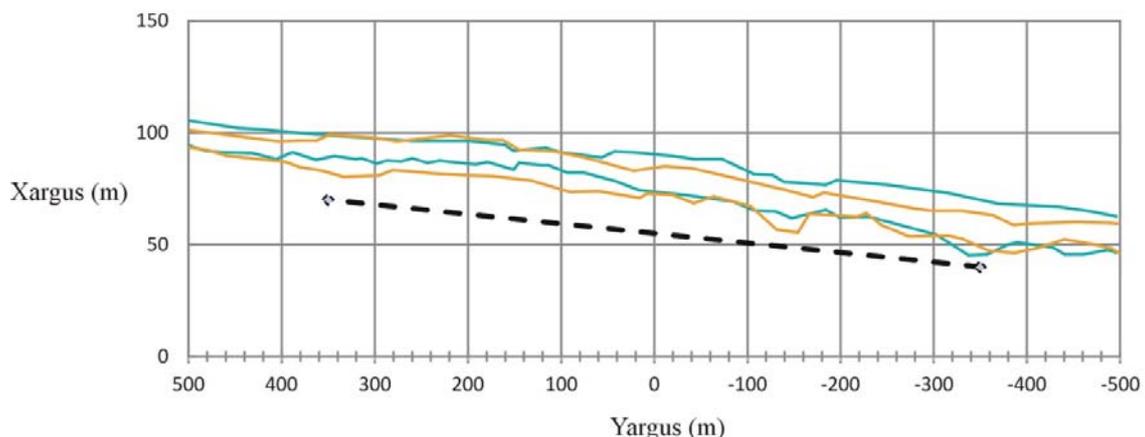


Illustration 32 - Comparaison de l'amplitude du trait de côte avant la pose du drain (trait bleu) et après la pose (trait jaune), position du drain en pointillé noir, sur la période du 7/06/11 au 3/03/13

Afin d'avoir une meilleure idée de l'évolution temporelle de la plage, différents profils ont été réalisés à des Yargus fixés (distance longitudinale du mât Ouest, positive vers Sète), dans la

zone du drain et en dehors : 450 m, 100 m, 5 m, -100 m et -450 m. L'évolution du trait de côte selon les différents profils peut être en partie expliquée par les conditions météo marines, la hauteur significative suffit généralement à la compréhension des mouvements du trait de côte (Cf. III 33). Les profils entre -100 m et 100 m sont compris dans la zone du drain tandis que ceux de 450 m et -450 m sont en dehors.

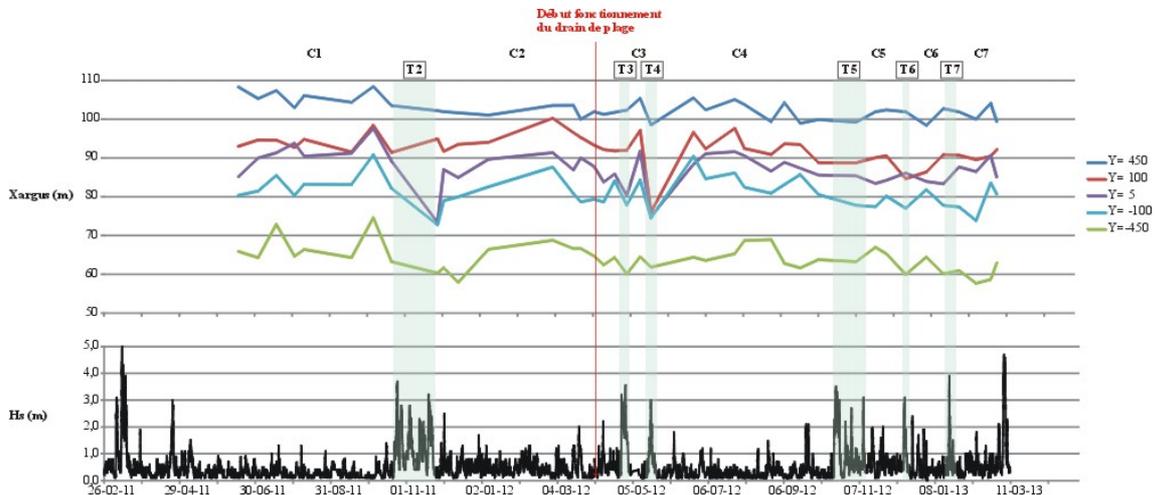


Illustration 33 - Evolution temporelle du trait de côte en différents points de la zone de drainage (en haut) et hauteur significative de la houle (Hs en m, en bas) du 7/06/11 au 3/03/13. L'indication T représente les épisodes de tempêtes et C les périodes de calme.

Le trait de côte oscille durant la période d'étude au gré des saisons, le profil Y=-450 m retranscrit particulièrement bien ses variations. A chaque épisode de fortes houles (noté T, zone verte) pour lesquelles Hs > 3 m, on observe un recul du trait de côte quel que soit le profil observé. A l'inverse, les avancées du trait de côte correspondent à des périodes de faible agitation hydrodynamique (C) pendant les saisons estivales (apport de sables par les houles de beau temps) ou pendant la reconstruction post-tempête de la plage. Les amplitudes de recul ou avancée du trait de côté varie d'un profil à l'autre. Les tempêtes T2 et T4 ont engendré les plus forts reculs. Durant T2, le profil Y=5m recule d'une quinzaine de mètre tandis que le profil Y=-100 m ne recule que de 5 m environ. Le profil Y=100 m montre une légère avancée, qui peut être expliquée par la présence d'une barre sous-marine très proche de la côte dans ce secteur.

La période d'étude comporte une phase sans le drain et une phase avec le drain. Chaque profil oscille autour d'une position d'équilibre qui reste inchangée après l'installation du drain. Le recul lors d'une tempête est de l'ordre de 10 m, et lors de la reconstruction de la plage post-tempête dans les situations C2 (sans le drain) et C4 (avec le drain), le trait de côte retrouve sa position initiale. Cependant, dans le cas de C2 la reconstruction semble se faire de manière continue tandis que pour C4, le trait de côte se reconstruit rapidement au début avant d'évoluer de manière continue.

Ces éléments restent insuffisants pour évaluer le rôle du drain dans les évolutions observées qui restent très similaires avant et après les travaux.

4.4.2. Evaluation de l'effet du drainage sur le jet de rive

Une étude complémentaire sur le fonctionnement du drain a été menée afin d'évaluer les effets éventuels sur la nappe du jet de rive. En effet, 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. L'extraction le long de profils perpendiculaires à la côte permet de suivre dans le temps la position de cette nappe et d'observer une éventuelle augmentation de l'infiltration.

L'évolution naturelle du jet de rive sur la plage est une montée progressive de l'eau puis sa redescente. La limite supérieure de la nappe va donc avoir une forme de parabole ou de cloche, la vitesse de montée étant quasi-identique à la vitesse de descente. Le fonctionnement du drain devrait induire l'aspiration par gravité de l'eau, provoquant la réduction (voire la suppression) de la phase descendante de la langue d'eau. Dans ces conditions, la limite supérieure du jet de rive va former une demi-cloche, où seule la phase montante est présente. Les images traitées avec le module pixpack de la chaîne ARGUS mettent en évidence ces deux formes de jet de rive, en cloche et en demi-cloche (Cf. III 34).

On constate sur de nombreuses périodes analysées que la présence du drain modifie le comportement de la nappe du jet de rive qui vraisemblablement monte sur la plage, s'infiltre et ne redescend pas vers la mer (forme en demi-cloche).

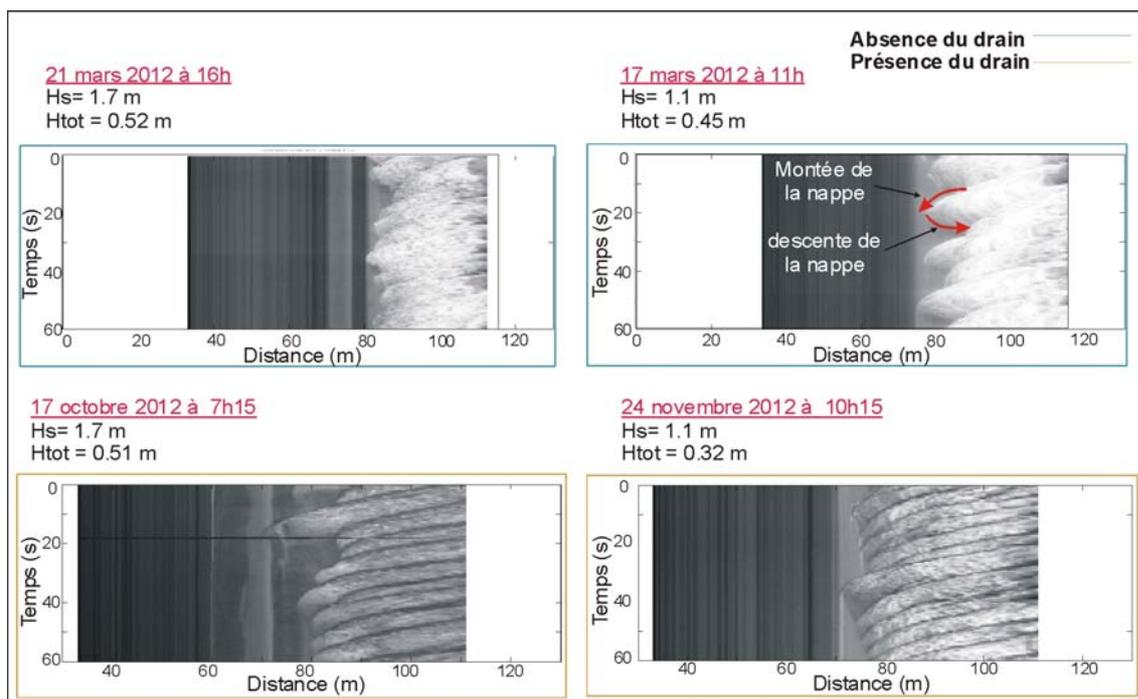


Illustration 34 - Comparaison de la forme du jet de rive pour des conditions hydrodynamiques données avant et après la pose du drain. On note la forme en cloche de la nappe en absence de drain, et la forme en demi-cloche pendant le drainage.

Cependant, il n'est pas possible de généraliser cette remarque. On trouve des contre-exemples, des périodes où le drain est censé être actif mais où la forme du jet de rive est une cloche et inversement (Cf. III 35). Les conditions de fonctionnement du drain en relation avec la forme sont encore à déterminer. De fortes précipitations engendrant la saturation de la plage nuit à l'efficacité du drain, de même une plage totalement sèche peut avoir le même effet

drainant que le drain, provoquant une forme de jet de rive en demi-cloche (infiltration de l'eau naturelle).

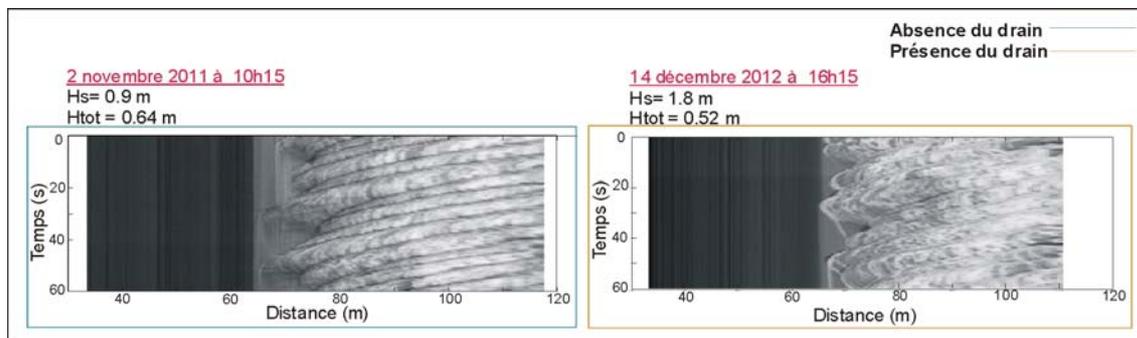


Illustration 35 - Comparaison de la forme du jet de rive pour des conditions hydrodynamiques données avant et après la pose du drain. On note une infiltration plus forte (demi-cloche) le 02/11/2011 malgré l'absence de drainage, et un jet de rive en cloche alors que le drain fonctionne le 14/12/2012.

4.4.3. Evaluation des conditions d'efficacité du drainage

Une autre approche a été effectuée pour déterminer l'efficacité du système ©Ecoplage dans la stabilisation de l'érosion de la plage. Il s'agit d'évaluer les conditions hydrodynamiques pour lesquelles le drain est en mesure d'avoir un effet sur la plage et d'estimer ainsi la durée de fonctionnement efficace de l'ouvrage.

Le drain n'est fonctionnel que lorsqu'il se trouve dans la zone de jet de rive, c'est-à-dire ni submergé comme c'est le cas lors des tempêtes, ni découvert avec les drains très éloignés de la zone de jet de rive comme cela peut être le cas en été quand la plage est plus large ou quand il n'y a pas suffisamment de houle.

Après analyse des conditions hydrodynamique, des images et de la position instantanée du trait de côte par rapport à la position du drain (cf ill. 36), deux seuils ont été définis :

- un seuil de niveau d'eau (altitude NGF) pour lequel le niveau maximal du jet de rive, comprenant la marée, la surcote, le gonflement lié au déferlement et le jet de rive, atteint 0.3 m. En dessous de ce niveau, les conditions hydrodynamiques sont extrêmement calmes et la zone de jet de rive quasi-inexistante et dans tous les cas trop éloignée de la position du drain ;
- un seuil de 0.8 m au-delà duquel tout le bas de plage est complètement inondé et le drain est donc complètement sous l'eau et ne joue plus aucun rôle sur le jet de rive.

L'analyse des données de hauteur d'eau totale depuis la mise en marche du drain a permis d'estimer la durée pendant laquelle le niveau maximal est entre les deux seuils, intervalle qui correspond à un fonctionnement « efficace » du drain. Sur les valeurs de hauteur d'eau totale sur la période du 23/03/2012 au 11/03/2013, on obtient une durée d'environ 118 j/ an, soit 32% de l'année. Si l'on considère que le jet de rive est inexistant pour les conditions très calmes ($H_s < 0.3m$), cette durée efficace est de l'ordre de 23% du temps sur un an.

Cette durée d'action du drain sur le jet de rive est faible, mais ne présume pas de l'efficacité réelle du drain. En effet, même si le drainage n'a aucun effet pendant de longues périodes, il peut agir efficacement à des moments spécifiques, comme après une tempête, et de ce fait, contribuer au rechargement naturel post-tempête et au maintien de la position du jet de rive.

Les périodes post-tempêtes sont donc particulièrement cruciales pour évaluer l'efficacité de cet ouvrage. Leur nombre reste pour l'instant trop limité pour pouvoir comparer le fonctionnement naturel du site et le fonctionnement avec drainage.



Illustration 36 - Position du drain pour différentes conditions hydrodynamiques. On note que pour des niveaux d'eau maximaux compris entre 0.3 et 0.8 m, la zone de battement du jet de rive (en blanc) est localisée au-dessus du drain.

4.4.4. Conclusion sur l'évolution dans la zone de drainage

Le suivi spécifique réalisé dans la zone de drainage depuis 2011 a permis d'obtenir des informations sur l'évolution de la plage avant et après travaux. Les résultats mettent en évidence un comportement relativement similaire lors des deux périodes. Les reculs lors des tempêtes sont du même ordre de grandeur et les reconstructions post-tempête également. Le trait de côte présente un recul progressif faible, en accord avec les observations réalisées depuis 2008 qui montraient une stabilité de la plage dans ce secteur.

L'analyse approfondie du jet de rive a mis en évidence une infiltration plus importante lorsque le drain fonctionne. Toutefois, de nombreuses observations contradictoires d'assèchement ou non du bas de plage par le système ont été faites, et il reste difficile de préciser la contribution relative du drain et des conditions météo-marines (vent, pluie, vagues) dans la dynamique du jet de rive et son rôle sur l'évolution du trait de côte.

Les conditions de vagues et de niveau d'eau les plus optimales pour que le drainage soit efficace ont été déterminées. Elles correspondent à environ 30% du temps, ce qui reste faible mais ne remet pas en question l'efficacité du drain qui peut avoir un effet court mais constructif, notamment après une tempête.

Le nombre de tempêtes observées jusqu'à présent ne permet pas d'identifier un comportement spécifique qui pourrait être attribué au drainage, et des observations supplémentaires sont donc nécessaires pour statuer sur le rôle du drain dans la reconstruction post-tempête de la plage.

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 les aménagements ont été mis en place : en juin 2012 pour le système de drainage ©Ecoplage, en mars 2013 pour le géotextile atténuateur de houle.

Afin de suivre l'évolution du littoral avant/pendant et après les travaux de protection, deux indicateurs morphologiques principaux sont extraits de l'imagerie vidéo. Il s'agit de la position du trait de côte et de la position des barres d'avant-côte qui sont analysées 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. Les résultats du suivi pour la période avril 2011 à mars 2013 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'hiver 2013, présente un recul moyen élevé (de l'ordre de 10 à 20 m selon les secteurs). Cette évolution traduit essentiellement le fonctionnement saisonnier du site. En effet, le profil hivernal de la plage est beaucoup plus concave, et on observe généralement une variation de largeur de la plage de 10 à 20 m entre l'été et l'hiver. La comparaison des traits de côte de l'été 2011 à l'été 2012 montre un recul plus modéré et plus localisé, la partie la plus touchée étant celle située au Nord-Est ;
- le recul lors des coups de mer successifs d'octobre-novembre a été particulièrement important, malgré des conditions d'énergie des vagues relativement modérées. Il atteint localement près de 40 m. La reconstruction naturelle de la plage après ces événements est toutefois assez bonne et assez rapide. Les impacts sur les cordons dunaires sont en revanche durables. L'évolution observée lors de ces événements importants correspond souvent à un transfert sableux du bas de plage vers le haut de plage. Il n'y a donc pas de forte perte de volume sableux, mais une tendance à une augmentation générale de la pente de la plage et de la dune, favorisant les franchissements des cordons lors des tempêtes successives ;
- la position de la barre d'avant-côte est assez stable lors de la période estivale, mais présente une dynamique très importante lors des coups de mer avec des migrations longitudinales de plusieurs centaines de mètres, qui sont corrélées avec la direction et l'énergie longitudinale de la houle au large ;
- la position des barres d'avant-côte joue un rôle important dans l'évolution de la plage émergée, que ce soit par l'atténuation de l'énergie des tempêtes ou par l'augmentation locale du niveau d'eau à la côte permettant au jet de rive de toucher le pied du cordon dunaire. Elles jouent également un rôle non-négligeable dans le transit sédimentaire résiduel du NE vers le SO, car leur migration progressive vers le SO se traduit par une perte à moyen terme du sable situé au NE.

Les aménagements réalisés sur la plage du Lido sont relativement récents (près d'un an pour le drainage, et travaux encore en cours à la fin de la période d'observation pour l'atténuateur). Toutefois, les analyses spécifiques réalisées sur les secteurs expérimentaux permettent de tirer quelques conclusions préliminaires :

- L'atténuateur de houle commence à faire déferler les vagues dès lors que la hauteur significative au large atteint 1 m. Le filtrage de la houle est donc effectif. Un seul événement de tempête majeure a pu être observé en Mars 2013. On note lors de cet événement que les vagues déferlent rapidement sur le géotextile, mais ce filtrage ne semble pas diminuer le déferlement sur la barre interne qui régit toujours très fortement les vagues et courants à la côte et l'évolution de la plage lors des tempêtes. Il faudra probablement quelques événements pour que la barre interne et l'atténuateur trouvent une position d'équilibre. Le niveau de surcote et les impacts sur le cordon dunaire ont toutefois été supérieurs dans la zone située à proximité immédiate de l'ouvrage que dans la zone « abritée ».
- Le drainage de plage, installé depuis près d'un an, a fait l'objet d'analyses et de suivis spécifiques.
 - o L'évolution de la plage dans cette partie du Lido a toujours été qualifiée d'assez stable, et l'évolution actuelle suit cette tendance, avec un recul hivernal plus ou moins prononcé, mais un retour estival du trait de côte à sa position d'origine. Le drainage de plage ne semble pas avoir modifié ce comportement jusqu'à présent ;
 - o l'analyse du jet de rive met en évidence un assèchement effectif du bas de plage lorsque le drain fonctionne. Toutefois, cet assèchement 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 probablement un rôle non-négligeable sur ce phénomène ;
 - o 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) sont 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 nombre de tempêtes observées jusqu'à présent ne permet toutefois pas d'identifier un comportement spécifique qui pourrait être attribué au drain.

Ces tendances observées sur une période avec aménagement relativement courte, seront bien sûr à confirmer lors des prochains mois/prochaines années, lorsque le système plage – avant-côte aura retrouvé une position d'équilibre avec les ouvrages.

6. Bibliographie

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.

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., 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.

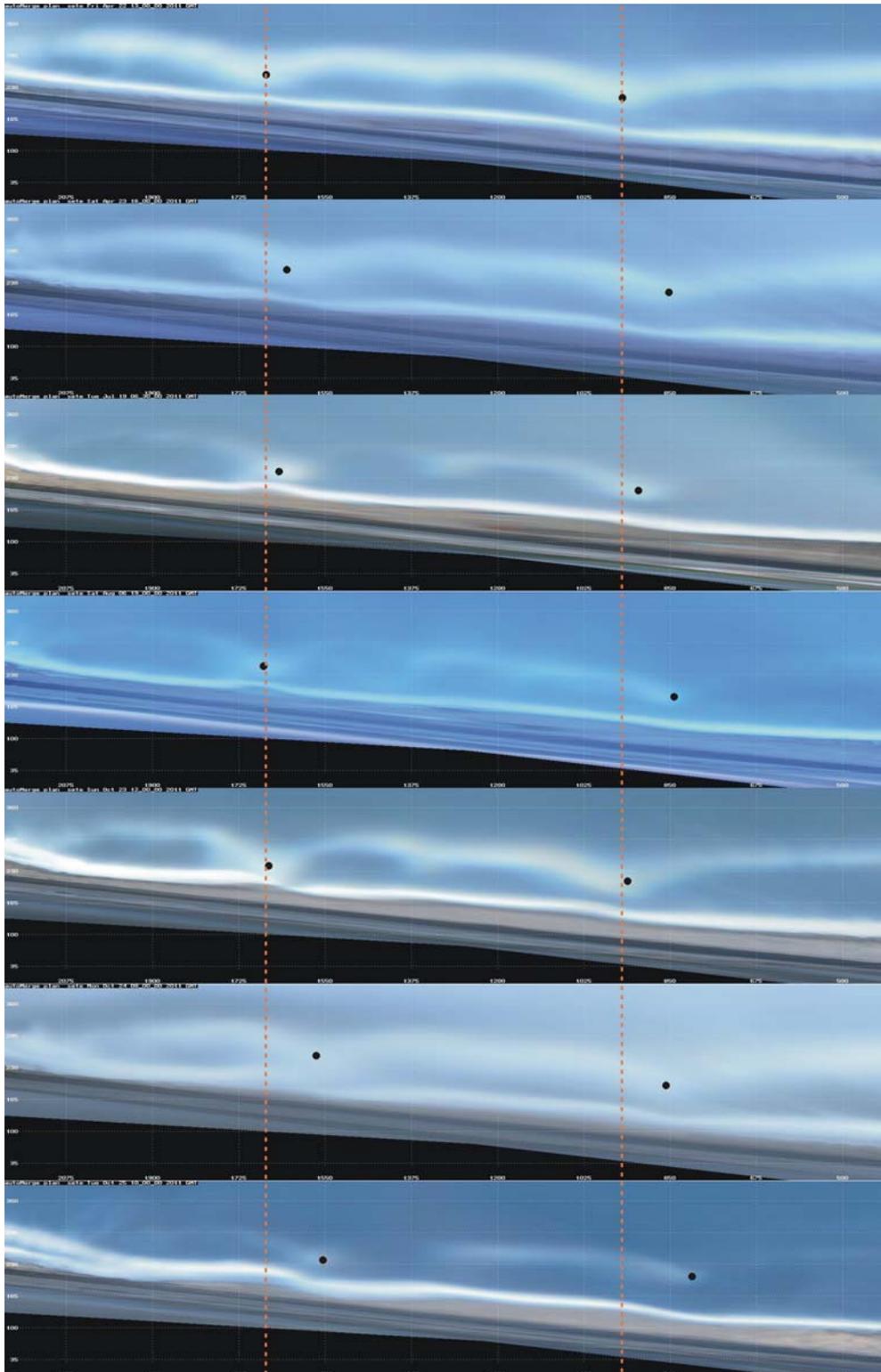
Gervais, M., Balouin, Y., Thiebot, J., Certain, R., Belon, R., Pedreros, R., Robin, N., Berné, S., 2011. Morphodynamic evolution of nearshore bars in response to winter storms (Lido de Sète, NW Mediterranean). *Journal of Coastal Research*, SI 64, 1855-1860.

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

Positionnement de la barre d'avant-côte et relation avec la forme du trait de côte d'avril 2011 à Mars 2013



22 avril 2011 à 13h
 Hs= 1.7m
 Dp= 142° S-SE
 Ts= 6.7s

23 avril 2011 à 16h
 Hs= 2.2m
 Dp= 115° E-SE
 Ts= 6.5s

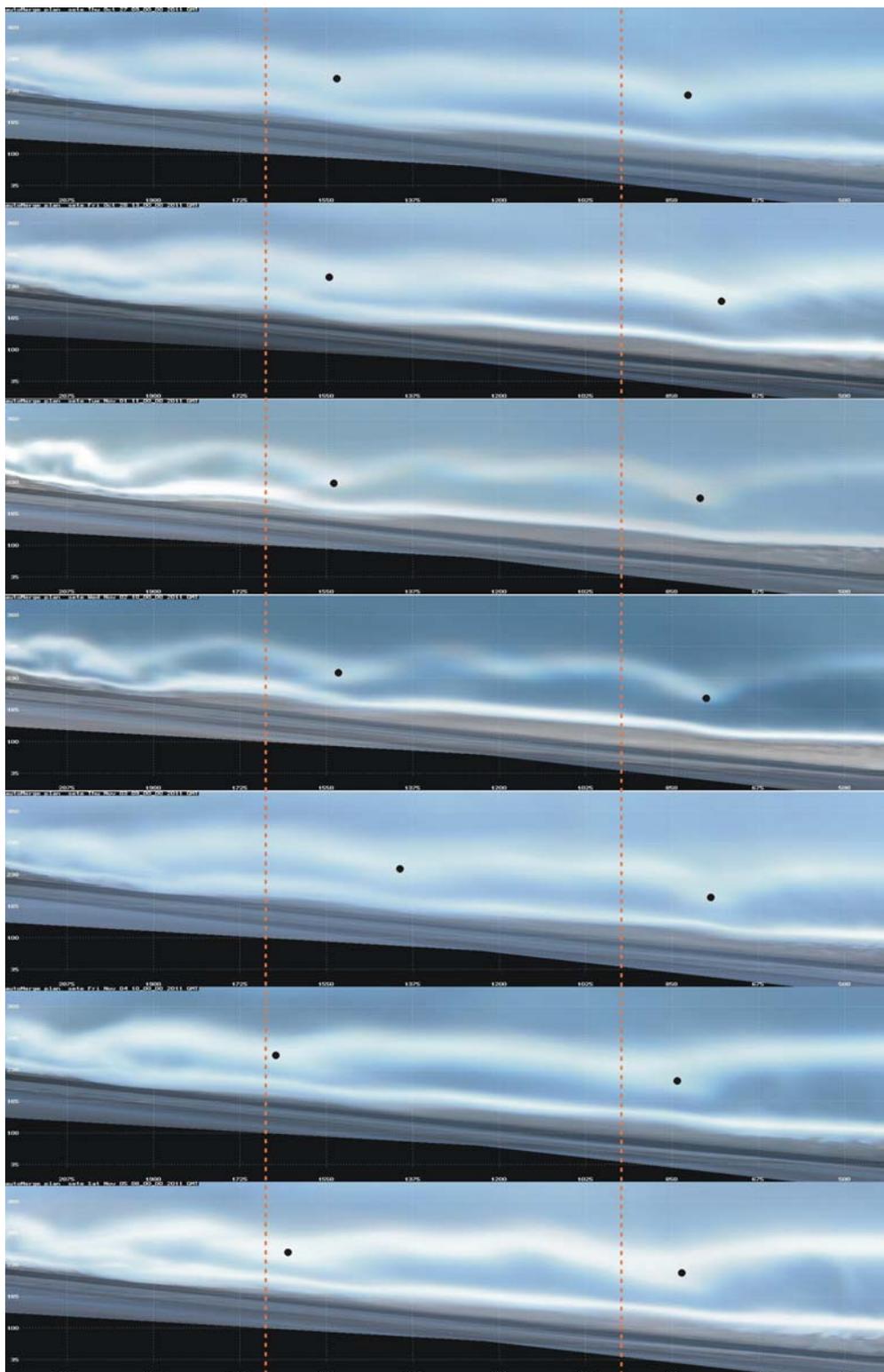
19 juillet 2011 à 6h30
 Hs= 1.3m
 Dp= 180° S
 Ts= 5s

6 août 2011 à 19h
 Hs= 1.1m
 Dp= 179° S
 Ts= 4.9s

23 octobre 2011 à 12h
 Hs= 1.2m
 Dp= 120° E-SS
 Ts= 5s

24 octobre 2011 à 8h
 Hs= 3m
 Dp= 119° E-SS
 Ts= 7.2s

25 octobre 2011 à 10h
 Hs= 1.2m
 Dp= 138° SE
 Ts= 6.3s



27 octobre 2011 à 9h
 Hs= 2.2m
 Dp= 119° E-SE
 Ts= 6.2s

28 octobre 2011 à 13h
 Hs= 2m
 Dp= 147° S-SE
 Ts= 7.5s

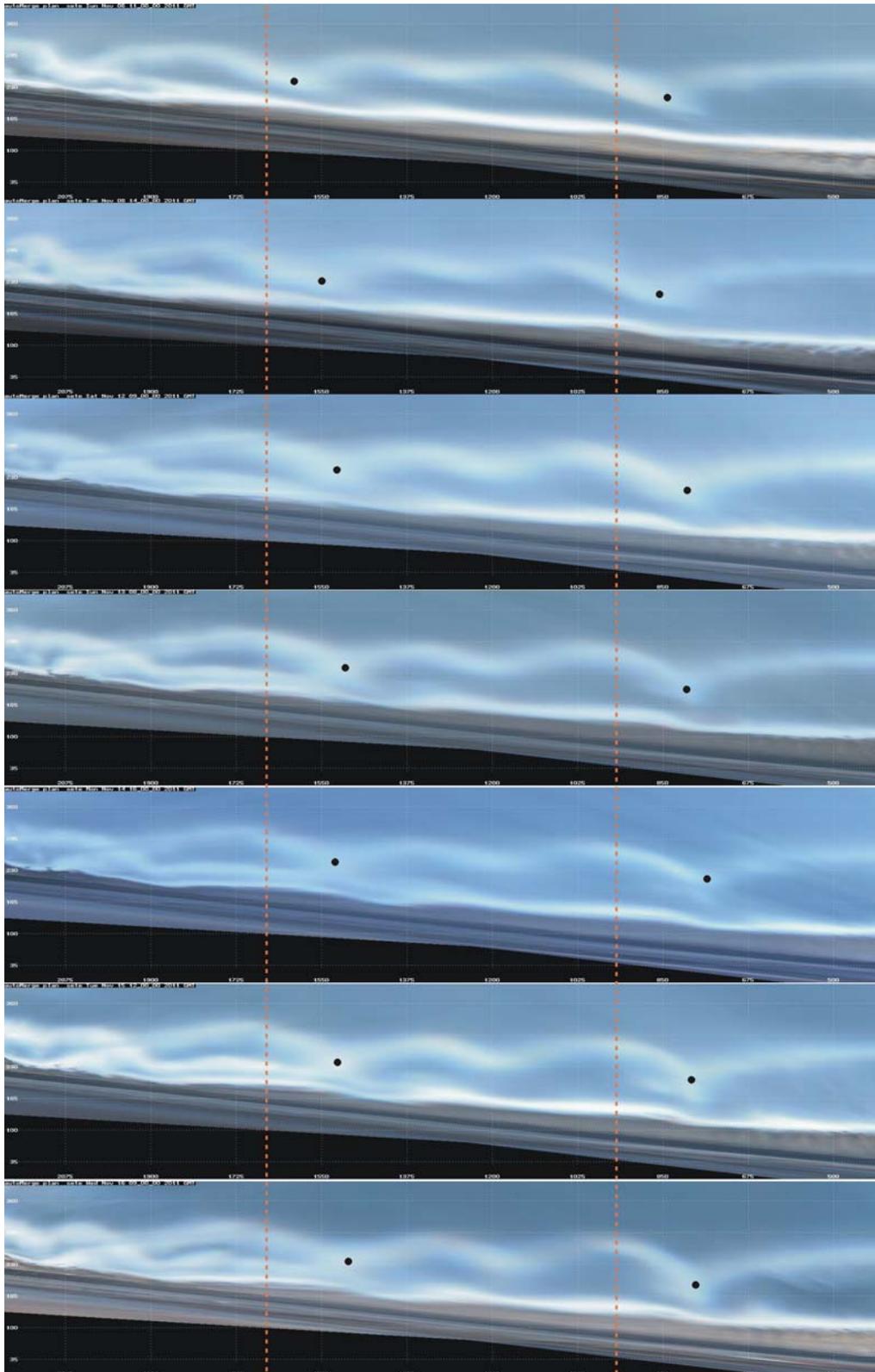
1 novembre 2011 à 11h
 Hs= 1.2m
 Dp= 112° E-SE
 Ts= 5.2s

2 novembre 2011 à 10h
 Hs= 1.2m
 Dp= 105° E-SE
 Ts= 4.8s

3 novembre 2011 à 9h
 Hs= 2.6m
 Dp= 139° SE
 Ts= 6.4s

4 novembre 2011 à 10h
 Hs= 2m
 Dp= 153° S-SE
 Ts= 7.2s

5 novembre 2011 à 8h
 Hs= 2.3m
 Dp= 137° SE
 Ts= 8.4s



6 novembre 2011 à 11h
 Hs= 1.5m
 Dp= 122° E-SE
 Ts= 7.1s

8 novembre 2011 à 14h
 Hs= 1.4m
 Dp= 147° S-SE
 Ts= 7.6s

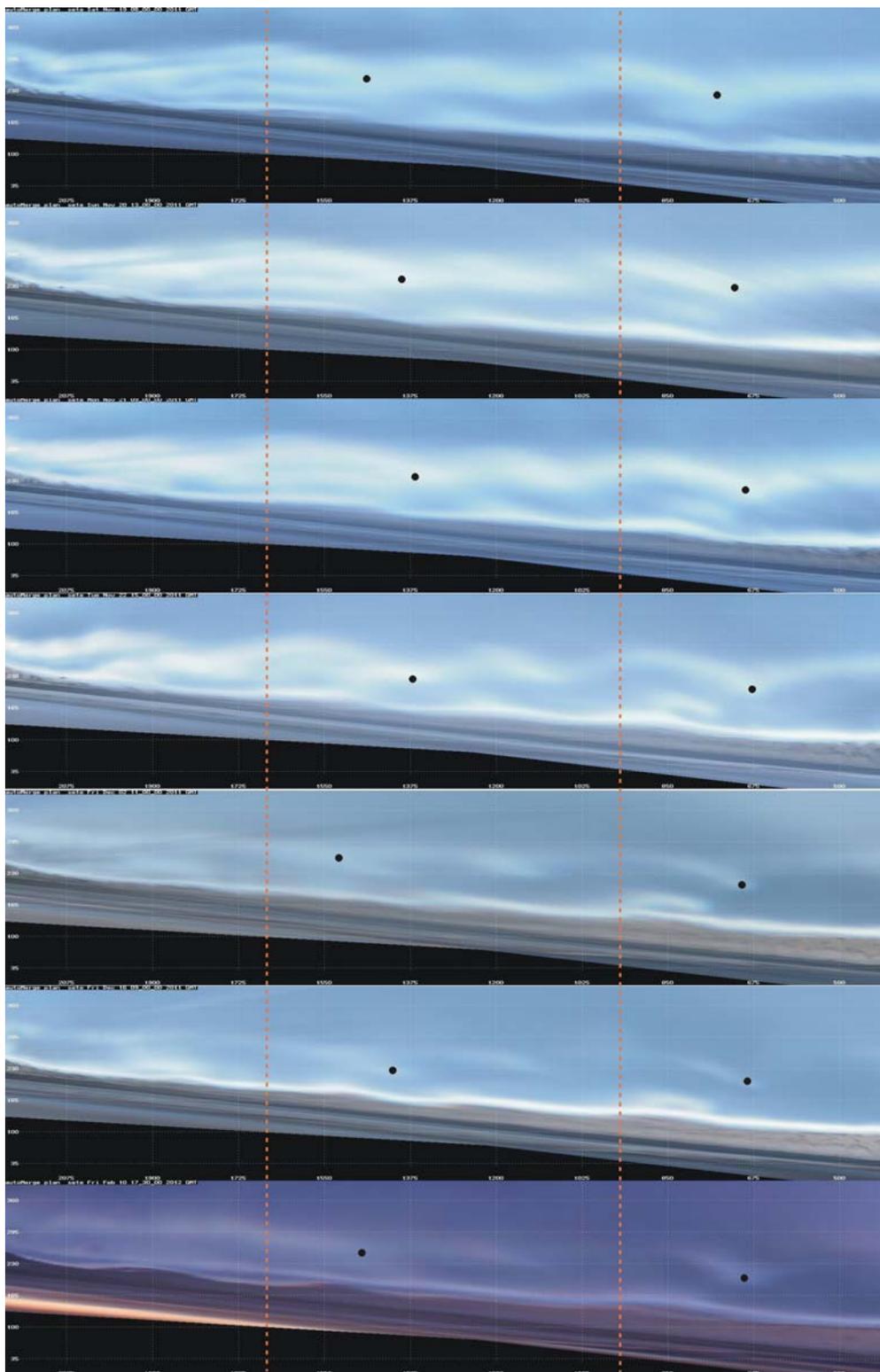
12 novembre 2011 à 9h
 Hs= 1.7m
 Dp= 114° E-SE
 Ts= 5.7s

13 novembre 2011 à 8h
 Hs= 1.5m
 Dp= 126° (E)-SE
 Ts= 5s

14 novembre 2011 à 16h
 Hs= 1.4m
 Dp= 115° E-SE
 Ts= 4.9s

15 novembre 2011 à 16h
 Hs= 1.4m
 Dp= 139° SE
 Ts= 5.3s

16 novembre 2011 à 9h
 Hs= 1.5m
 Dp= 154° S-SE
 Ts= 6s



19 novembre 2011 à 8h
 Hs= 3m
 Dp= 114° E-SE
 Ts= 6.6s

20 novembre 2011 à 13h
 Hs= 2.3m
 Dp= 124° E-SE
 Ts= 6.4s

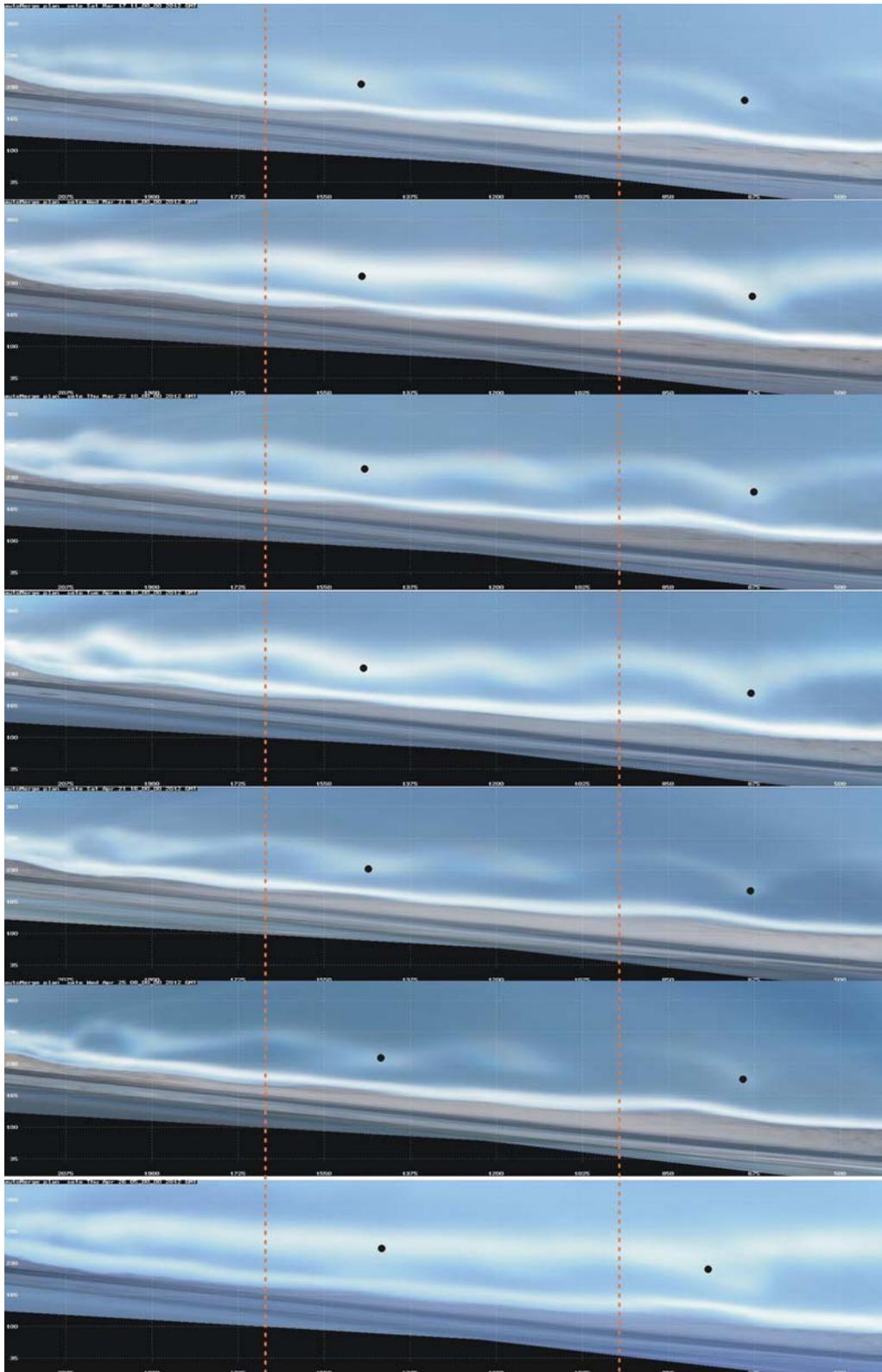
21 novembre 2011 à 9h
 Hs= 2m
 Dp= 124° E-SE
 Ts= 6.4s

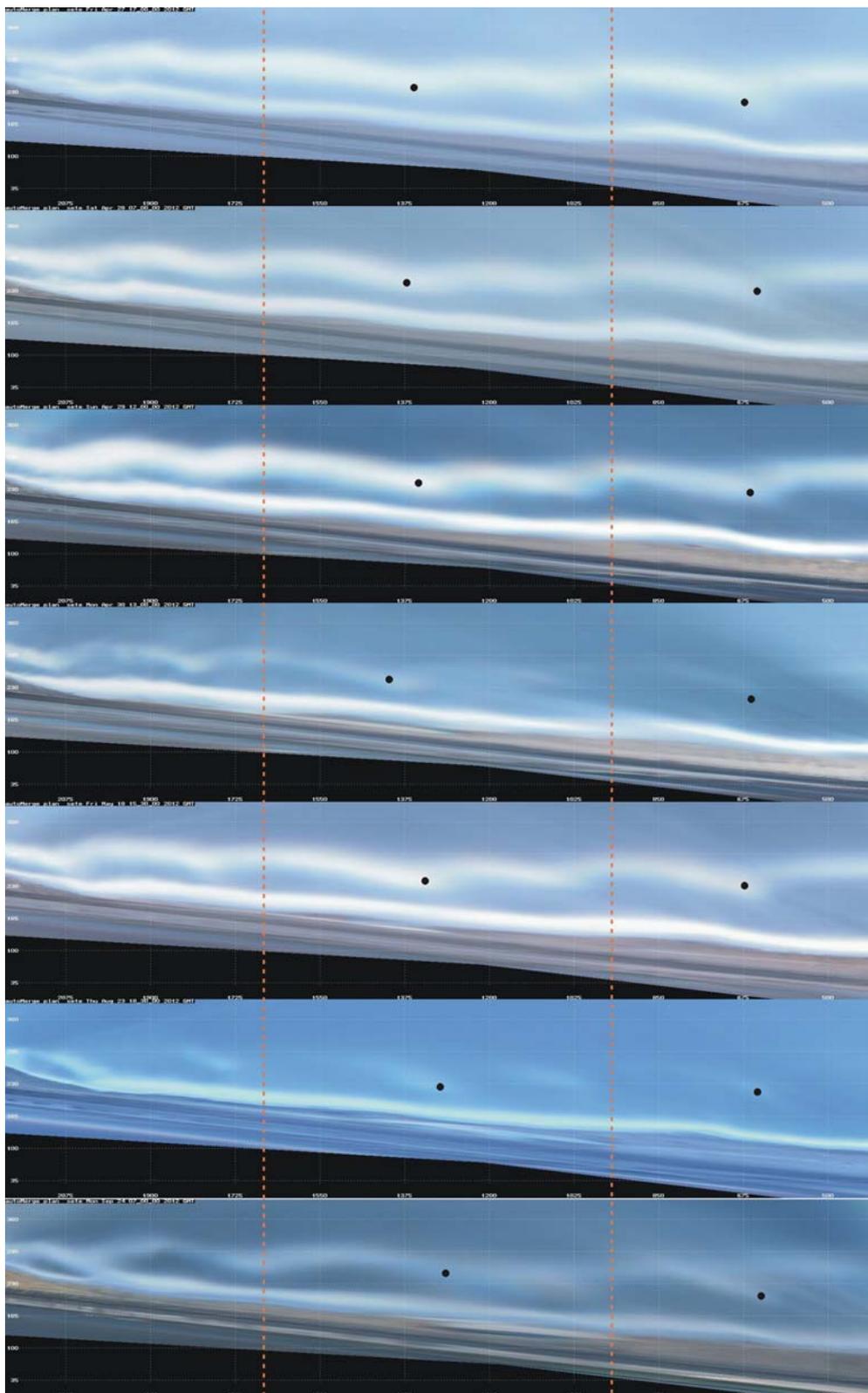
22 novembre 2011 à 15h
 Hs= 1.4m
 Dp= 150° S-SE
 Ts= 7.7s

2 décembre 2011 à 11h
 Hs= 1.4m
 Dp= 177° S-(SSE)
 Ts= 6.3s

16 décembre 2011 à 9h
 Hs= 1m
 Dp= 178° S-(SSE)
 Ts= 6.3s

10 février 2012 à 17h30
 Hs= 1.2m
 Dp= 111° E-SE
 Ts= 6.7s





27 avril 2012 à 17h
 Hs= 2.2m
 Dp= 118° E-SE
 Ts= 7.1s

28 avril 2012 à 7h
 Hs= 1.7m
 Dp= 130° (E)-SE
 Ts= 6.5s

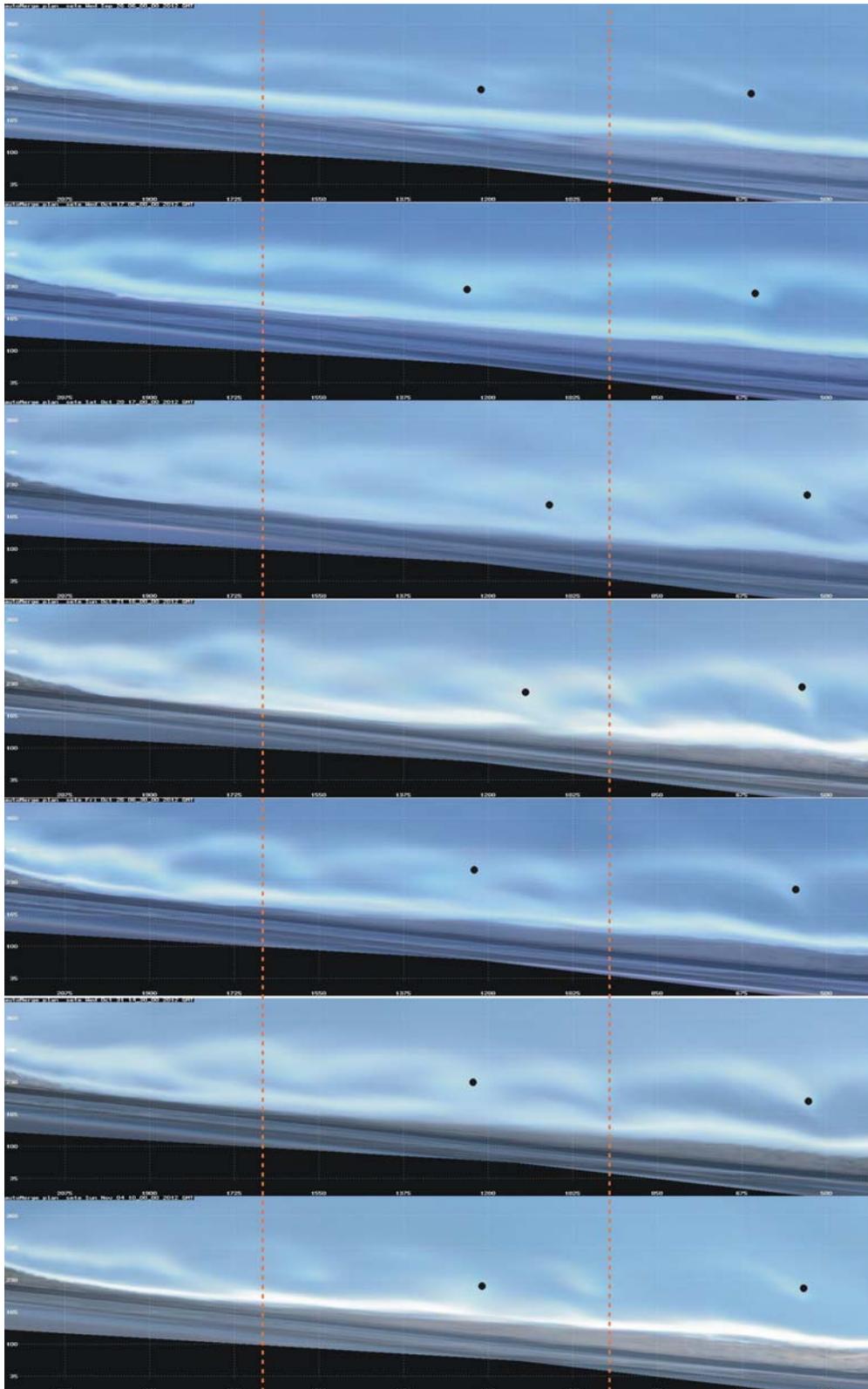
29 avril 2012 à 12h
 Hs= 1.8m
 Dp= 130° (E)-SE
 Ts= 8.5s

30 avril 2012 à 13h
 Hs= 1.1m
 Dp= 138° SE
 Ts= 5.5s

18 mai 2012 à 15h30
 Hs= 1.6m
 Dp= 118° E-SE
 Ts= 5.3s

23 août 2012 à 18h30
 Hs= 1m
 Dp= 107° E-SE
 Ts= 4.3s

24 septembre 2012 à 7h
 Hs= 1.6m
 Dp= 138° SE
 Ts= 5.9s



26 septembre 2012 à 6h
 Hs= 1.2m
 Dp= 173° S-(SSE)
 Ts= 5.3s

17 octobre 2012 à 6h
 Hs= 1.6m
 Dp= 176° S-(SSE)
 Ts= 5.7s

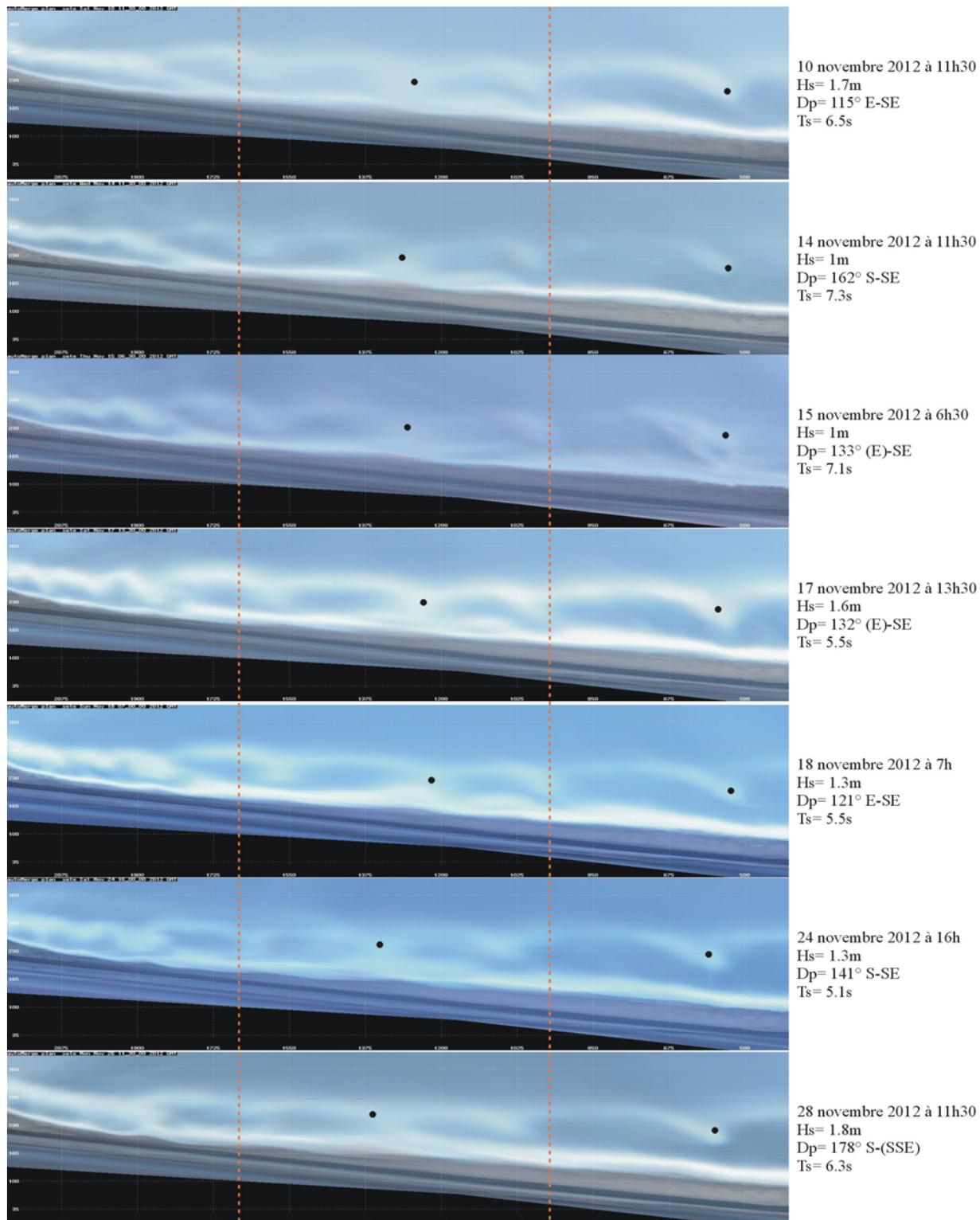
20 octobre 2012 à 17h
 Hs= 1.8m
 Dp= 131° (E)-SE
 Ts= 6.3s

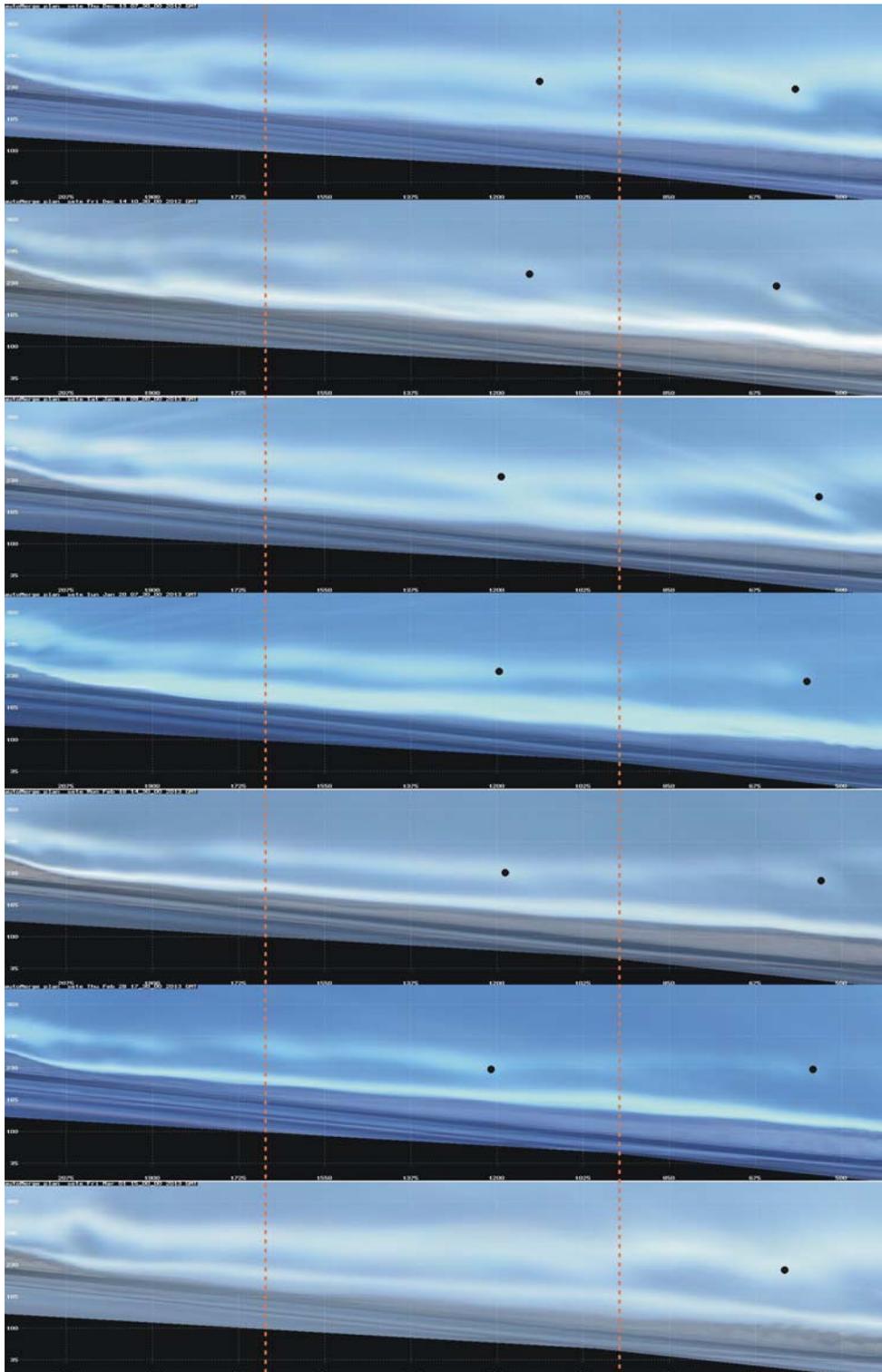
21 octobre 2012 à 16h
 Hs= 1.3m
 Dp= 132° (E)-SE
 Ts= 6s

26 octobre 2012 à 6h30
 Hs= 1.4m
 Dp= 114° E-SE
 Ts= 4.8s

31 octobre 2012 à 14h30
 Hs= 1.5m
 Dp= 132° (E)-SE
 Ts= 7.2s

4 novembre 2012 à 10h
 Hs= 1.2m
 Dp= 111° E-SE
 Ts= 5.2s





13 décembre 2012 à 7h30
 Hs= 2.2m
 Dp= 188° S-SO
 Ts= 6.2s

14 décembre 2012 à 10h30
 Hs= 1.3m
 Dp= 153° S-SE
 Ts= 5.6s

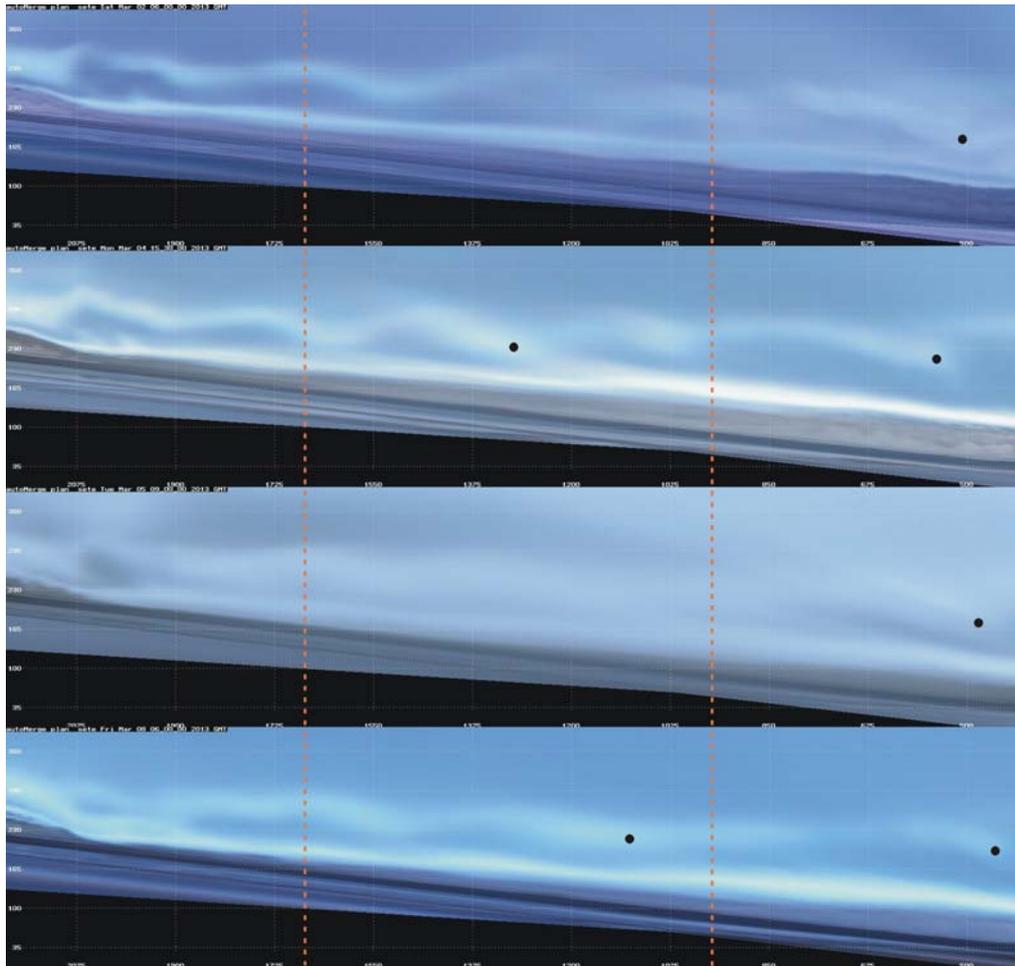
19 janvier 2013 à 9h
 Hs= 1.7m
 Dp= 118° E-SE
 Ts= 6.1s

20 janvier 2013 à 7h30
 Hs= 1.8m
 Dp= 167° S-SE
 Ts= 6.5s

18 février 2013 à 14h30
 Hs= 1.3m
 Dp= 111° E-SE
 Ts= 5.9s

28 février 2013 à 17h30
 Hs= 1m
 Dp= 128° (E)-SE
 Ts= 5.5s

1 mars 2013 à 15h
 Hs= 1.7m
 Dp= 139° SE
 Ts= 8.7s



2 mars 2013 à 6h
Hs= 1m
Dp= 125° (E)-SE
Ts= 7.3s

4 mars 2013 à 15h30
Hs= 1.5m
Dp= 115° E-SE
Ts= 5.3s

5 mars 2013 à 9h
Hs= 3.6m
Dp= 120° E-SE
Ts= 8.1s

8 mars 2013 à 6h
Hs= 1.7m
Dp= 141° S-SE
Ts= 6.3s



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