



**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 final

BRGM/RP-60874-FR

Février 2012



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Suivi par vidéo numérique de l'expérimentation de techniques de protection du littoral du Lido de Sète à Marseillan – Phase 1 : Présentation et validation du système ARGUS

Rapport final

BRGM/RP-60874-FR

Février 2012

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

Y. Balouin

Avec la collaboration de

L. Desbiendras et J. Tesson

Vérificateur : Stépanian, A.

Approbateur : Audibert, M.

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

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., Desbiendras, L. et Tesson, J., 2012. Suivi par vidéo numérique des 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.

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 géotube atténuateur de houle, implanté sur la plage sous-marine 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 et long-terme, 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 le dispositif installé sur le lido et la validation initiale des indicateurs morphologiques dérivés de l'imagerie : la position du trait de côte et la position des barres d'avant-côte. La comparaison avec des techniques classiques de levés topo-bathymétriques (DGPS cinématique et sondeur acoustique) donne des résultats très satisfaisants et permet l'utilisation de ces indicateurs pour le suivi quantitatif des évolutions.

La première phase de suivi, d'avril 2011 à janvier 2012 constitue la phase témoin avant-aménagement. L'analyse des résultats préliminaires a permis d'identifier des comportements de morphologies d'avant-côte qui n'avaient pas pu être caractérisées jusqu'à présent par les techniques de suivi classiques :

- Le trait de côte, sur cette évolution printemps/hiver, présente un recul moyen élevé (de l'ordre de 20 m en 10 mois), qui correspond probablement plus à une évolution saisonnière qu'à un recul à long-terme ;
- Le recul lors des coups de mer successifs d'octobre-novembre a été particulièrement important, malgré des épisodes de vagues relativement modérés. 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 ;
- 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.

Ces tendances, observées sur une période relativement courte, seront bien sûr à confirmer lors des prochains mois/prochaines années. A noter cependant que très prochainement, la reconstruction naturelle de la plage devrait s'effectuer probablement au printemps 2012,.

Sommaire

1. Introduction	9
1.1. PROBLEMATIQUE	9
1.2. OBJECTIFS	12
2. Présentation du système de suivi vidéo sur le lido de Sète	14
2.1. LE SYSTEME ARGUS.....	14
2.2. CHOIX DU SITE D'IMPLANTATION SUR LE LIDO DE SETE.....	15
2.3. INSTALLATION DU SYSTEME SUR LE LIDO DE SETE	16
2.3.1. Installation des deux mâts	17
2.3.2. Installation des caméras	18
2.3.3. Système de communication	19
2.4. CARACTERISTIQUES DU SYTEME ARGUS DE SETE	20
3. Traitements d'image réalisés sur le système du Lido de Sète et validation des résultats	23
3.1. CALIBRATION ET METHODOLOGIE DE TRAITEMENT DES IMAGES.....	23
3.1.1. Calibration initiale du système ARGUS	23
3.1.2. Traitement et géo-référencement des images.....	24
3.1.3. Système de coordonnées et résolution des images	26
3.2. VALIDATION DU SYSTEME	28
3.2.1. La détection du trait de côte	28
3.2.2. La détection des barres d'avant-côte	31
4. Résultats préliminaires du suivi vidéo	35
4.1. EVOLUTION DE LA POSITION DU TRAIT DE COTE	35
4.2. EVOLUTION DE LA POSITION DE LA BARRE D'AVANT-COTE INTERNE ...	37
4.3. EVOLUTION LORS DE COUPS DE MER SUCCESSIFS.....	38
4.4. CARACTERISATION DES CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES.....	44
5. Conclusion	47

6. Bibliographie 49

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 – Principe de fonctionnement d'une station vidéo.	14
Illustration 5 – Localisation de la zone de suivi sur la bathymétrie BRGM de Novembre 2008.	16
Illustration 6 – Position des 2 mâts implantés sur le Lido de Sète et champs de vision des 8 caméras (fond © Orthophoto IGN).	16
Illustration 7 - Plan de masse du pylône avec chariot mobile supportant les caméras.	17
Illustration 8 - mise en place des mâts au Triangle de Villeroy (à gauche) et au Sud-ouest de Listel (à droite).	18
Illustration 9 - Mise en place des caméras (à gauche) et réglage des caméras sur une nacelle (à droite).	19
Illustration 10 - Schéma du système de transfert des données.	20
Illustration 11 - Photos des 3 caméras (C6,C7 et C8) du mât n°1 (à gauche) et des 3 points de vue correspondants.	21
Illustration 12 - Point de vue des 5 caméras (C5,C4,C3,C2 et C1) du mât 2.	21
Illustration 13 - 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)	22
Illustration 14 – Points de contrôle levés par DGPS lors de la phase de calibration de l'optique.	23
Illustration 15 - Schéma explicatif de l'obtention d'une image plan. Images du mât 1 lors de la tempête du 22 avril 2011.	24
Illustration 16 – Variables permettant de passer de coordonnées images (u, v) aux coordonnées réelles (x,y,z).	25
Illustration 17 - Comparaison entre deux images prises la même journée : une à 7h et l'autre à 12h le 17/05/2011.	26
Illustration 18 - Système de coordonnées ARGUS pour le lido de Sète.	26
Illustration 19 – Image ortho-rectifiée de la zone d'étude - En haut : images moyennées prises par les 8 caméras, en bas : image orthorectifiée utilisant les 8 prises de vue.	27
Illustration 20 – Image ortho-rectifiée dans une région d'intérêt de quelques centaines de mètres permettant la reconnaissance d' éléments fins comme la laisse de mer ou les croissants de plage.	27

Illustration 21 – Résolution des pixels des images rectifiées, perpendiculairement au trait de côte (en haut) et parallèlement au trait de côte (en bas).....	28
Illustration 22 - Interface pour la détection du trait de côte.....	29
Illustration 23 – Localisation du trait de côte instantané sur le scan IGN©25.	30
Illustration 24 – Comparaison du trait de côte instantané Argus et du levé GPS réalisés le 24/11/2011, repère ARGUS.	31
Illustration 25 - Interface BLIM pour la détection des barres d'avant-côte.	32
Illustration 26 – Superposition du maximal d'intensité de pixel (crête de barre ARGUS, 23/10/2011) et de la bathymétrie Astérie de septembre-octobre 2011.	33
Illustration 27 – Positions successives du trait de côte du 17/04/2011 au 09/01/2012.	36
Illustration 28 - 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.	37
Illustration 29 – Position de la crête de la barre interne identifiée par le maximum d'intensité de pixels entre avril et octobre 2011.....	38
Illustration 30 - Conditions hydrodynamiques au large de Sète (30 m de profondeur): hauteur significative Hs, période T, incidence de la houle I, Flux d'énergie et niveaux d'eaux mesurés au marégraphe de Sète. Données DREAL-LR.	39
Illustration 31 – Position de la crête de barre Argus du 23/10/2011 au 02/12/2011.....	40
<i>Illustration 32 - Evolution de la position de la barre interne au cours du suivi. Les zones claires indiquent les zones proches de la côte (cornes) et les zones sombres les plus éloignées (baies). La série temporelle de conditions de houle est indiquée sur la gauche (Données DREAL-LR).....</i>	<i>42</i>
Illustration 33 – Relation entre la mobilité des cornes de la barre interne et le flux d'énergie longitudinal de la houle au large.	43
Illustration 34 - Impact du coup de mer du 24/10: a) Image moyennée et rectifiée ; b) image oblique ; c) photographie de l'impact sur le cordon dunaire. La flèche rouge indique le point d'impact sur les différentes photographies.	44
Illustration 35 – Echantillonnage de pixels à Sète pour l'analyse des conditions hydrodynamiques. a) Utilisation de pixels pour reconstituer les séries de vagues et les spectres directionnels ; b) utilisation de pixels pour l'analyse du jet-de-rive.	45

1. Introduction

1.1. PROBLEMATIQUE

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

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

La dynamique de ce littoral résulte à la fois de transferts sédimentaires éoliens affectant le système dunaire, et des relations entre la dynamique des barres d'avant-côte et de la plage lors d'événements énergétiques. Cette évolution, bien documentée, 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 la Communauté d'Agglomération du Bassin de Thau.

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 seront 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 va être 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 jet-de-rive. Les résultats attendus sont donc une accrétion du bas de plage et une augmentation du volume de la berme. La longueur totale de l'ouvrage expérimental est de 700 m.

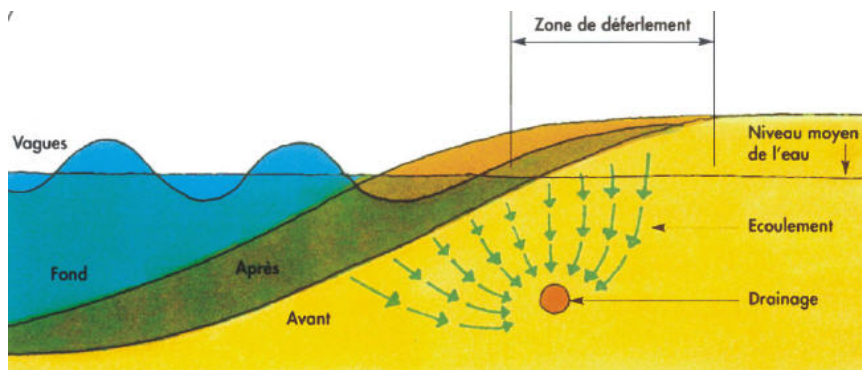


Illustration 2 – Schéma de fonction du système drainant ©Ecoplage.

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 aura 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.

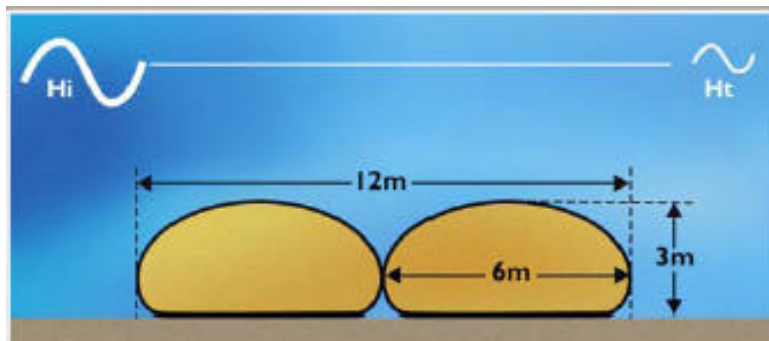


Illustration 3 – Schéma en coupe d'un ouvrage atténuateur de houle en géotextile (Egis-Eau, 2009).

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

Le suivi du littoral par technique vidéo a été développé à la fin des années 70 aux Etats-Unis (Holman et Stanley, 2007). Le principe repose sur l'acquisition à haute fréquence d'images vidéo. Cette technique est particulièrement adaptée au suivi des environnements côtiers puisqu'elle permet d'obtenir des informations quantitatives en continu, y compris lors des événements de tempêtes pendant lesquels des mesures sur le terrain sont impossibles.

La méthodologie 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. Les images sont téléchargées en temps quasi-réel pour analyse et traitement.

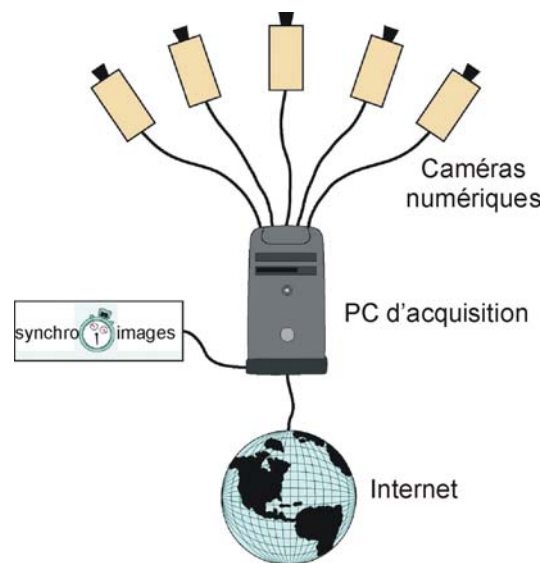


Illustration 4 – Principe de fonctionnement d'une station vidéo.

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 (actuellement plus de 70 sites dans le monde). 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. CHOIX DU SITE D'IMPLANTATION SUR LE LIDO DE SETE

Dans le cadre du projet d'aménagement du Littoral du lido de Sète à Marseillan, la phase d'expérimentation des techniques de protection douce sera réalisée sur la partie Nord-Est du lido, entre le secteur des trois digues et le triangle de Villeroy. La zone expérimentale couvrira 2 km.

La zone d'intérêt est donc particulièrement adaptée à un suivi par vidéo numérique qui permet d'obtenir des informations quantitatives sur des secteurs compris entre 0 et 4 km. A ce titre, le lido constitue un excellent site-pilote pour l'implantation d'un réseau d'observation numérique du trait de côte. L'outil permettra en effet de caractériser de manière quantitative les effets des travaux sur l'évolution de la plage, mais aussi sur les usages et la gestion de ce littoral.

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) afin d'obtenir une résolution permettant de suivre un linéaire côtier allant du triangle de Villeroy à la zone des trois épis (cf. ill. 5).

Le mât 1 comporte 3 caméras et permet de visionner sur 110°. Le mât 2 comporte 5 caméras pour une vision à 180°. Le positionnement des deux stations permet de suivre le linéaire côtier du triangle de Villeroy aux trois épis, soit 4 km (cf. ill. 6).

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

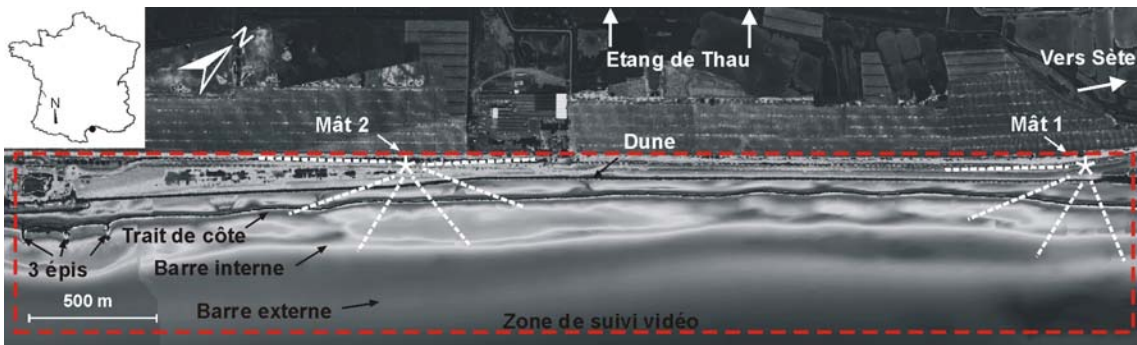


Illustration 5 – Localisation de la zone de suivi sur la bathymétrie BRGM de Novembre 2008.

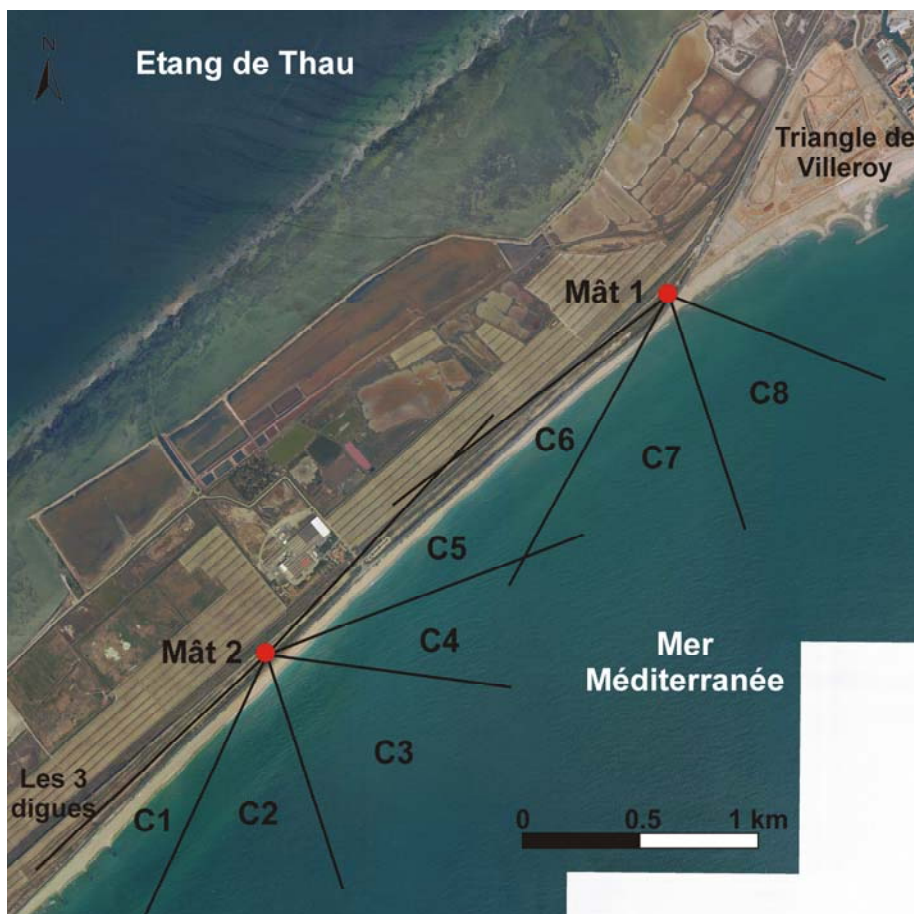


Illustration 6 – Position des 2 mâts implantés sur le Lido de Sète et champs de vision des 8 caméras (fond © Orthophoto IGN).

2.3. INSTALLATION DU SYSTEME SUR LE LIDO DE SETE

L'installation du système sur le littoral du lido a nécessité une phase de conception et d'obtention des autorisations préalables (mise à disposition du terrain, travaux

d'implantation des mâts, raccordements électriques et téléphoniques, aviation civile, CNIL, plans de raccordements). Les autorisations ont été obtenues courant 2010, et l'implantation a débuté fin 2010.

2.3.1. Installation des deux mâts

Les caractéristiques des mâts implantés sont en accord avec les autorisations obtenues qui préconisaient notamment la couleur gris clair des mâts, l'absence d'échelle et la présence d'un enclos. Pour faciliter la maintenance et répondre à ces préconisations, le système retenu est constitué d'un mât béton avec massif enterré, sans échelle, et avec un chariot de support des caméras facilitant la maintenance du système (cf. ill. 7).

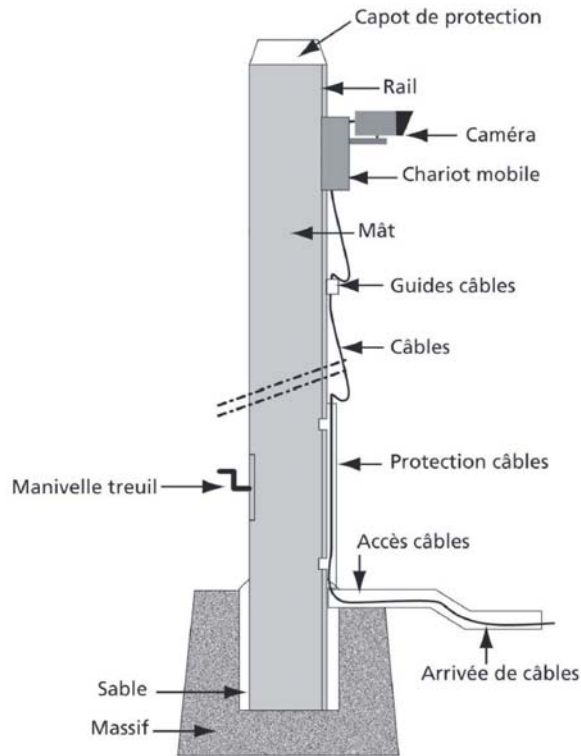


Illustration 7 - Plan de masse du pylône avec chariot mobile supportant les caméras.

Parmi les candidatures obtenues, le prestataire Travesset a été retenu pour la fourniture et l'installation des mâts. Les deux mâts supportant les caméras ont été installés en novembre 2010 (cf. ill. 8). Ils ont été placés sur une dalle en béton de deux mètres de profondeur.

Le mât 1 est disposé à côté du sanitaire de Villeroy dans lequel il est raccordé au réseau électrique et téléphonique. Pour le deuxième mât, il a fallu raccorder le site. Une borne ERDF dédiée a été installée en bordure de la piste cyclable. Les armoires

techniques possèdent leur propre compteur électrique pour l'alimentation du PC, des caméras et des outils de communications ADSL et radio.

2.3.2. Installation des caméras

L'installation des caméras s'est organisée en deux phases : la semaine du 11 Avril et du 13 Juin 2011. La première étape est la mise en place des caméras sur les chariots (cf. ill. 9 à gauche). Les caméras sont reliées à un boîtier assurant le lien entre l'armoire technique et les caméras pour la transmission des informations et l'alimentation électrique des caméras. La seconde étape est le réglage des caméras (cf. ill. 9 à droite). A l'aide d'une nacelle, on peut procéder au réglage de l'angle de vue et au réglage des lentilles des caméras pendant qu'une autre personne, au pied du mat, vérifie les réglages sur l'ordinateur.



Illustration 8 - mise en place des mâts au Triangle de Villeroy (à gauche) et au Sud-ouest de Listel (à droite).



Illustration 9 - Mise en place des caméras (à gauche) et réglage des caméras sur une nacelle (à droite).

2.3.3. Système de communication

L'autonomie de la station vidéo repose sur un système de communication efficace entre les caméras et les armoires techniques, entre les deux mâts et entre la station sur site et les ordinateurs d'archivage et de traitement à Montpellier.

Si la liaison caméras / armoire technique est filaire, la communication d'un mât à l'autre est réalisée par une liaison radio (cf. Ill. 10). Cela permet de centraliser toutes les images au niveau du mât 1 pour leur transfert par internet vers le centre de traitement. Une ligne ADSL dédiée a été installée au niveau du mât 1 pour ce transfert. Elle permet à la fois le transfert automatique des images et des campagnes de mesures vers le serveur d'archivage et de traitement installé dans les locaux du BRGM à Montpellier. La connexion ADSL permet l'envoi des images en temps quasi-réel, et celles-ci sont mises en ligne sur la page internet dédiée environ 30 min après leur acquisition.

Pour des raisons d'espace de stockage et de transfert par internet, les images sont prétraitées sur site. Ainsi, la séquence vidéo de 10 min obtenue chaque demi-heure est moyennée sur site et seule l'image moyennée est transférée par internet et archivée. Les séquences vidéo à 2 Hz (2 images par seconde) peuvent toutefois être enregistrées lors de campagnes spécifiques d'acquisition.

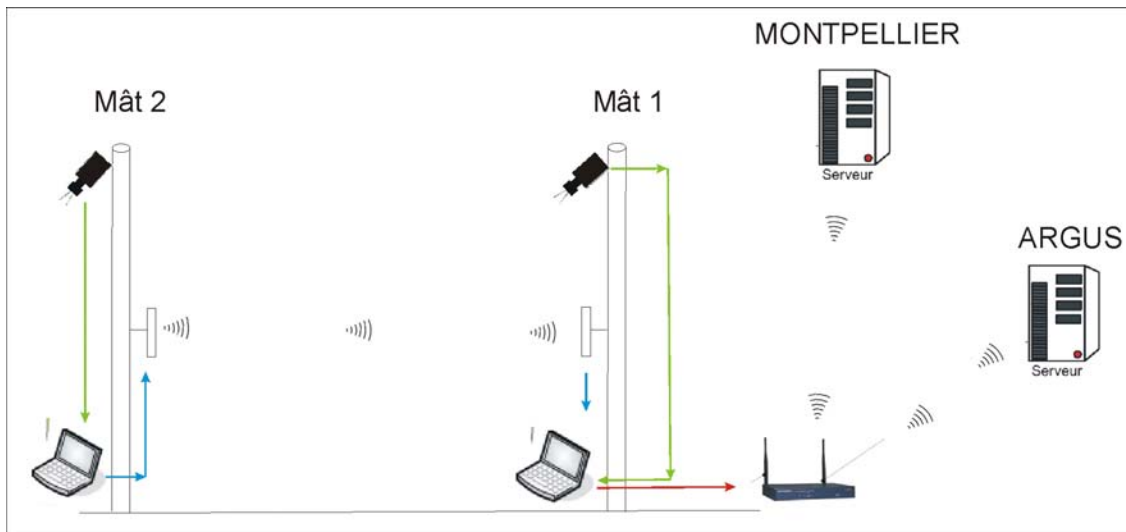


Illustration 10 - Schéma du système de transfert des données.

2.4. 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 de trait de côte. Le mât 1, situé au Nord-Est, est composé de 3 caméras permettant un angle de vue de 110° (cf. ill. 11) : 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. 12).

Les images acquises par le système du lido de Sète sont de quatre types (Cf. Ill. 13):

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

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

L'acquisition des images se fait toutes les demi-heures en début de chaque demi-heure et seulement pour les horaires de la journée (entre 06 h et 20 h en période estivale). Les images moyennées sont obtenues en moyennant chaque pixel sur les dix premières minutes de chaque demi-heure. Pour les images « variance », on calcule la variance de chaque pixel sur le même temps d'exposition.

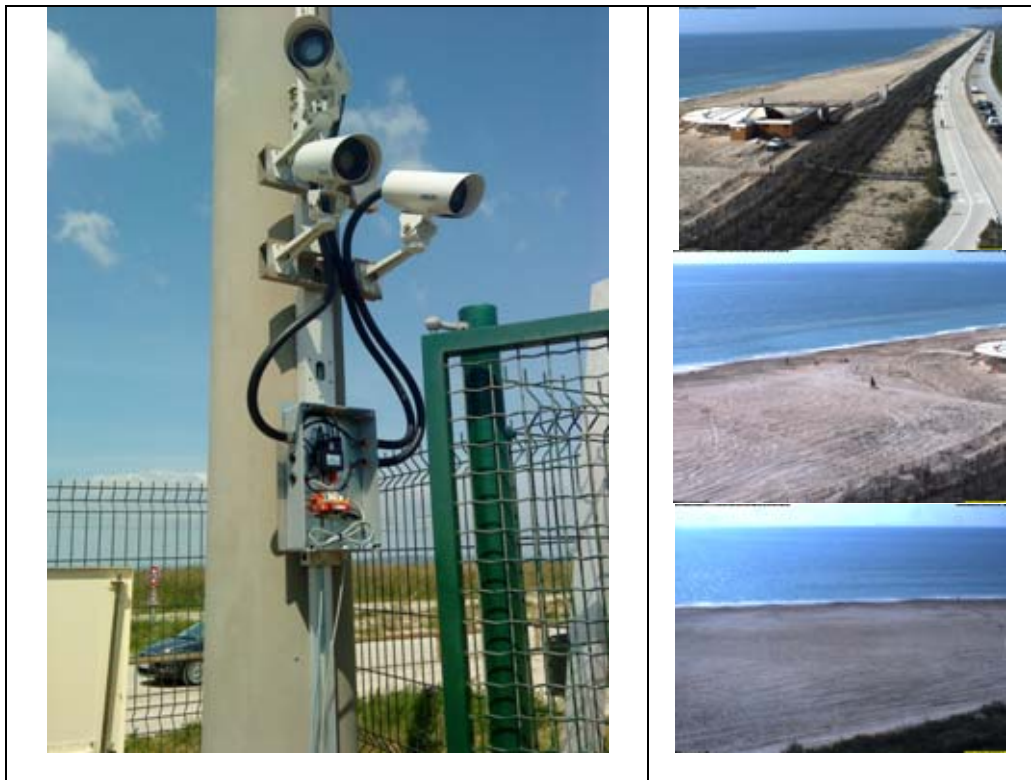


Illustration 11 - Photos des 3 caméras (C6,C7 et C8) du mât n°1 (à gauche) et des 3 points de vue correspondants.



Illustration 12 - Point de vue des 5 caméras (C5,C4,C3,C2 et C1) du mât 2.



Illustration 13 - 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)

3. Traitements d'image réalisés sur le système du Lido de Sète et validation des résultats

Les traitements des images sont de deux types : un traitement de base visant à rectifier et géo-référencer les images ; et un traitement thématique visant à extraire les indicateurs d'évolution du littoral (position du trait de côte, position des barres d'avant-côte). A l'installation du système, un calage de l'instrumentation optique par des mesures in-situ est nécessaire. Les parties suivantes décrivent cette calibration initiale, les traitements d'images et leur validation.

3.1. CALIBRATION ET METHODOLOGIE DE TRAITEMENT DES IMAGES

3.1.1. Calibration initiale du système ARGUS

La mise en place du réseau nécessite une phase de calibration du système par calage de l'instrumentation optique sur des points cibles fixes. Cette calibration est réalisée une première fois lors du déploiement du système ; elle a ensuite lieu une fois par an lors des opérations de maintenance afin d'assurer la validité du système sur le long terme.

Cette calibration consiste d'une part à obtenir les paramètres nécessaires au traitement : distances entre caméras, orientation des capteurs, altitudes des capteurs, et d'autre part à obtenir des points de contrôle qui permettront de valider les équations de photogrammétrie. Ces mesures ont été réalisées lors de la 2^{ème} phase d'installation à l'aide d'un DGPS cinématique centimétrique. Près de 50 points ont ainsi été acquis pour calibrer l'optique du système. L'illustration 14 présente quelques points de contrôle dans le champ de vision de la caméra C6.



Illustration 14 – Points de contrôle levés par DGPS lors de la phase de calibration de l'optique.

3.1.2. Traitement et géo-référencement des images

Avant de pouvoir traiter les informations contenues dans les images, il est nécessaire de s'affranchir des déformations engendrées par les optiques ainsi que celles provenant du positionnement des caméras. Des méthodes de photogrammétrie sont utilisées pour effectuer des corrections géométriques et rectifier les images. On passe ainsi d'images obliques à des images "en plan" géo-référencées (cf. ill. 15) sur lesquelles un traitement thématique peut ensuite être réalisé.

Le principe de géo-référencement est le suivant. Les images obtenues sont en coordonnées « image » (u, v) (cf. ill. 16). Il est nécessaire de convertir les images en coordonnées géodésiques (x, y, z) grâce à des points de contrôle (Ground Control Points : GCP). La relation entre les coordonnées x, y, z et les coordonnées u, v est appelée « solution géométrique », et est donnée par :

$$U = \frac{A \cdot x + B \cdot y + C \cdot z + D}{E \cdot x + F \cdot y + G \cdot z + I}$$

$$V = \frac{H \cdot x + J \cdot y + K \cdot z + L}{E \cdot x + F \cdot y + G \cdot z + I}$$

où les variables A à L dépendent des coordonnées de la caméra (x_c, y_c, z_c) et des angles de la caméra ($\varphi, \tau, \theta, \delta$). (x_c, y_c, z_c) sont mesurés par GPS sur le terrain, mais ($\varphi, \tau, \theta, \delta$) sont difficiles à mesurer. C'est pourquoi les points de contrôle au sol sont utilisés pour résoudre les équations.

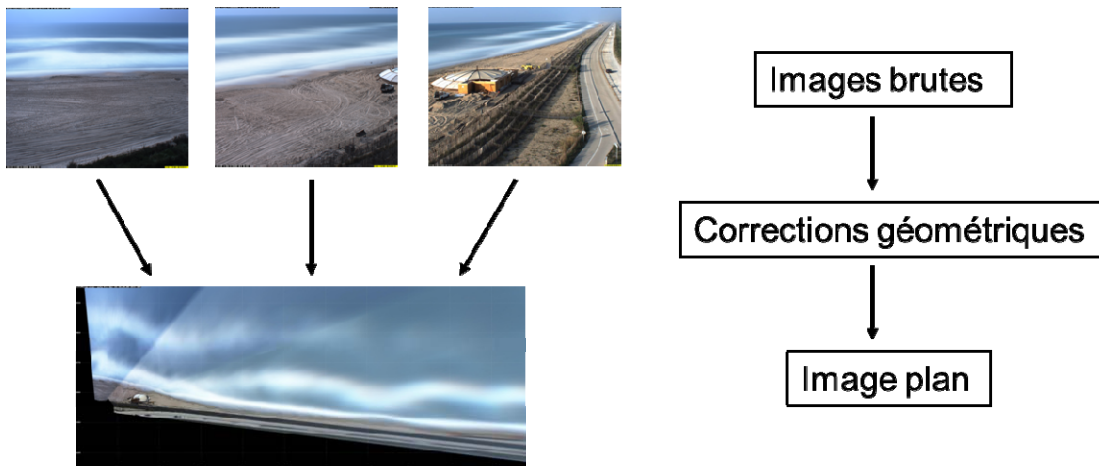


Illustration 15 - Schéma explicatif de l'obtention d'une image plan. Images du mât 1 lors de la tempête du 22 avril 2011.

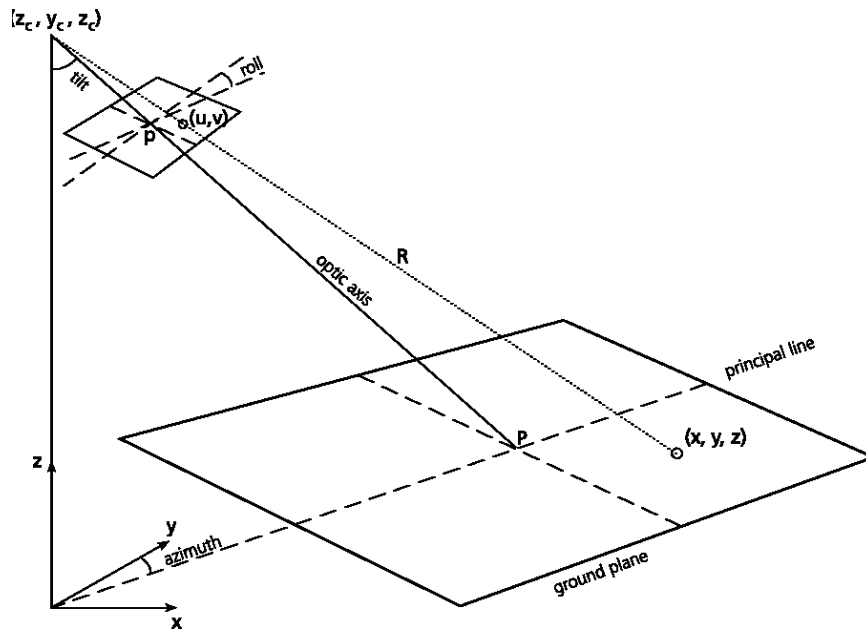


Illustration 16 – Variables permettant de passer de coordonnées images (u, v) aux coordonnées réelles (x, y, z) .

Les géométries sont définies à l'aide de l'interface ARGUS permettant de localiser finement les points de contrôle sur les images et de résoudre les équations de photogrammétrie. Lorsque la station ARGUS est totalement fixe, la solution de géométrie peut être appliquée automatiquement à l'ensemble des images pour les ortho-rectifier. L'opérateur réalise donc le pointé des points de contrôle sur une image afin de générer la solution de géométrie qui pourra ensuite être appliquée à l'ensemble de images.

Dans le cas de Sète, un mouvement des mâts a été identifié, dû vraisemblablement à une dilatation de la structure en fonction de la température. On observe donc une légère oscillation au cours de la journée (cf. ill. 17). Cette oscillation modifie légèrement les prises de vue et la solution géométrique doit par conséquent être recherchée pour toutes les images individuellement, ce qui augmente considérablement les temps de traitement. Un outil de reconnaissance automatique de points homologues est en cours d'évaluation pour le calcul automatique des géométries individuelles de chaque image.



Illustration 17 - Comparaison entre deux images prises la même journée : une à 7h et l'autre à 12h le 17/05/2011.

3.1.3. Système de coordonnées et résolution des images

Le système de coordonnées est propre au système Argus de Sète (cf. ill. 18). Il est centré sur le mât 2. L'axe y est parallèle à la côte et positif vers le mont St Clair et l'axe x est perpendiculaire à la côte et positif vers le large.

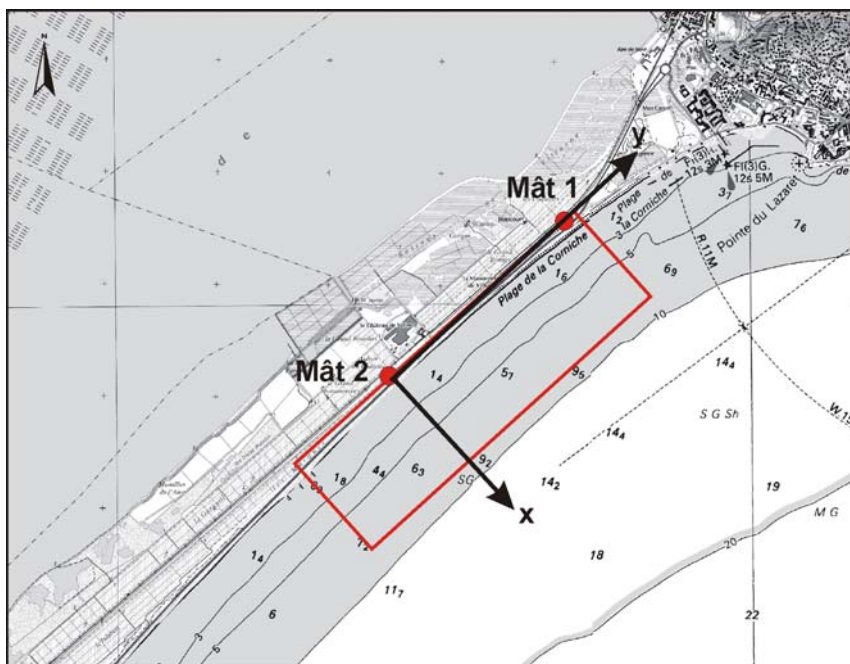


Illustration 18 - Système de coordonnées ARGUS pour le lido de Sète.

Ce système permet donc d'obtenir des images « plan » en coordonnées métriques dans un repère parallèle à la plage. La combinaison des images des 8 caméras permet

ainsi de reconstituer une carte géo-référencée sur les 4 km de la zone d'étude (cf. ill. 19).

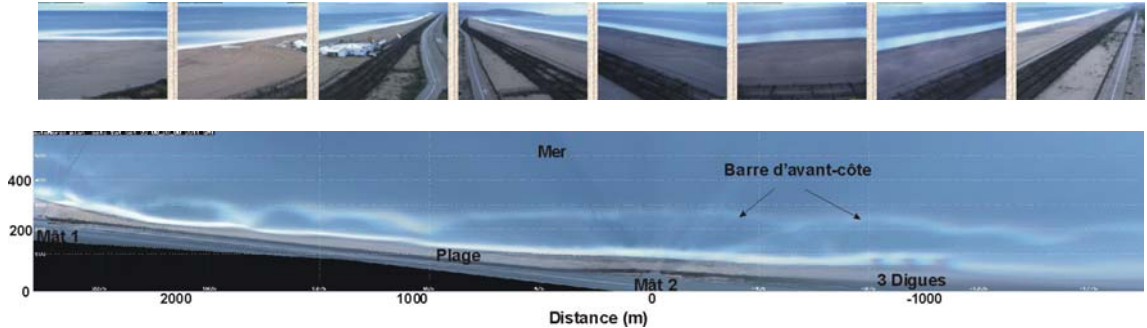


Illustration 19 – Image ortho-rectifiée de la zone d'étude - En haut : images moyennées prises par les 8 caméras, en bas : image orthorectifiée utilisant les 8 prises de vue.

Selon les applications recherchées, on sélectionne une région d'intérêt (ROI) sur les images. L'utilisation de l'ensemble des prises de vue (4 km) permet par exemple d'avoir une vision globale de l'évolution des barres d'avant-côte ou du trait de côte, mais la résolution est alors plus faible en raison des moyens de calcul nécessaires à la rectification. Ainsi, pour une image ortho-rectifiée sur 4 km, la résolution appliquée pour un pixel est de l'ordre de 5 m.

Lorsque l'on veut analyser des processus particuliers plus fins comme la position des laines de mer ou la génération de croissants de plage dans la zone de jet de rive (cf. ill. 20), on sélectionne une ROI plus adaptée (quelques centaines de mètres) dans laquelle on peut augmenter considérablement la résolution du pixel (10-20 cm).

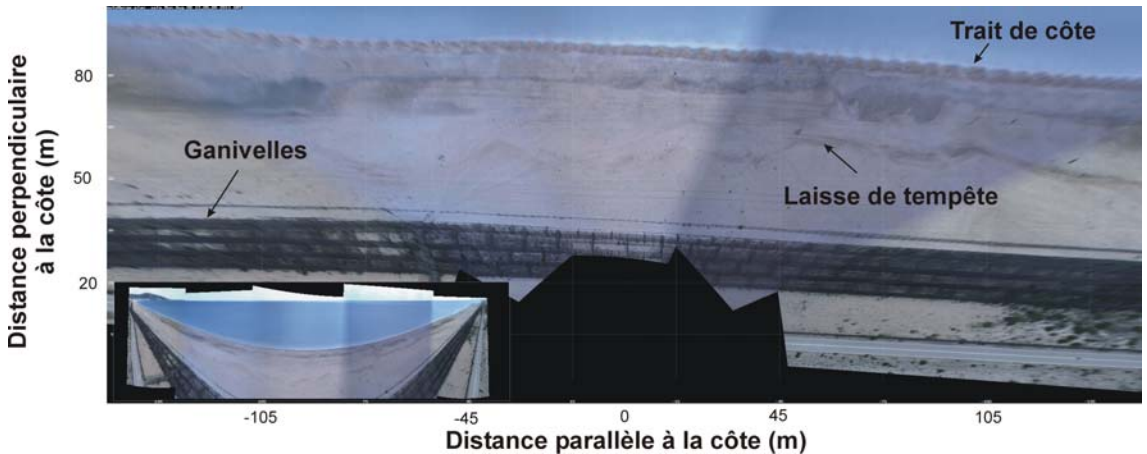


Illustration 20 – Image ortho-rectifiée dans une région d'intérêt de quelques centaines de mètres permettant la reconnaissance d'éléments fins comme la laisse de mer ou les croissants de plage.

La résolution finale de l'image dépend toutefois de l'optique choisie et de la distance entre les caméras et la zone d'intérêt (cf. ill. 21). La résolution des images est très

bonne dans la direction perpendiculairement à la plage (de 0.1 à 4 m à plus de 1000 m de la station). La résolution parallèlement à la plage est de moins de 1 m à proximité de la station à 30 m (à 1500 m de la station).

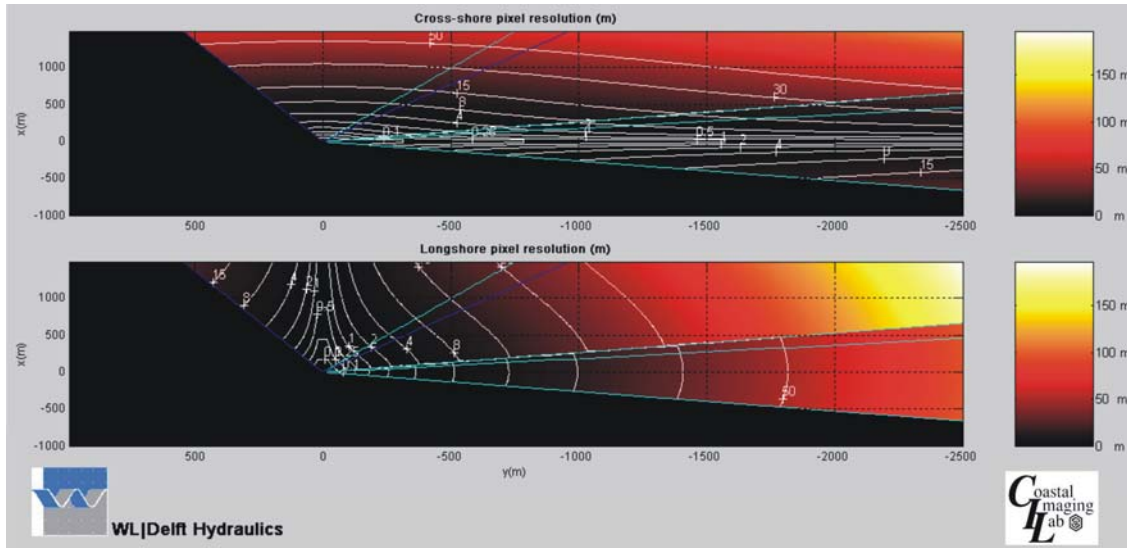


Illustration 21 – Résolution des pixels des images rectifiées, perpendiculairement au trait de côte (en haut) et parallèlement au trait de côte (en bas).

3.2. VALIDATION DU SYSTEME

Une fois le système installé, calibré et les modalités de suivi définies, le traitement thématique peut être réalisé. Celui-ci vise notamment à suivre des indicateurs morphologiques permettant d'évaluer l'évolution du littoral avant et après l'installation des ouvrages expérimentaux de défense. Les indicateurs principaux sont :

- le positionnement du trait de côte, en relation avec les conditions hydrodynamiques et les aménagements ;
- la localisation des barres d'avant-côte lorsque les conditions météo-marines le permettent.

Il convient toutefois d'évaluer la qualité de ces indicateurs provenant du suivi vidéo en les confrontant à des données acquises sur le site par d'autres techniques, notamment par des levés topo-bathymétriques ou des levés GPS du trait de côte.

3.2.1. La détection du trait de côte

Méthodologie

La détection du trait de côte est réalisée en utilisant les images obliques des différentes caméras. Sur chacune des images, on définit une région d'intérêt dans le

secteur du trait de côte (cf. ill. 22). Le trait de côte identifié correspond à la zone de jet-de-rive. En travaillant sur les images moyennées sur 10 min, on observe une zone blanche dans la zone de jet-de-rive. L'analyse des intensités de pixel dans ce secteur fait donc ressortir la position moyenne du trait de côte, qui correspond au trait de côte instantané. Ce trait de côte instantané est défini par l'interface terre-mer et dépend donc des conditions de vagues et de surcote. En période calme, ce trait de côte instantané correspond au trait de côte obtenu par analyse de photographies aériennes ou par levé GPS. En période de tempête en revanche, le niveau d'eau étant rehaussé par la surcote, il n'est pas comparable aux traits de côte obtenus par d'autres techniques. Lors de ces événements, le recul éventuel du trait de côte instantané n'est pas représentatif d'un recul lié à l'érosion mais uniquement une limite du jet-de-rive positionnée plus haut sur la plage en raison de la surcote.

Il convient par conséquent d'être très attentif aux conditions hydrodynamiques si l'on veut utiliser la position du trait de côte instantané pour décrire l'érosion ou l'accrétion d'une plage.



Illustration 22 - Interface pour la détection du trait de côte.

Les traits de côte extraits sur les images des différentes caméras sont ensuite combinés sur toute la zone d'étude et exportés en coordonnées Argus et par la suite transformés en coordonnées dans le système géodésique Lambert 93. L'illustration 23 présente le trait de côte instantané obtenu le 21 Octobre 2011 à 9h.

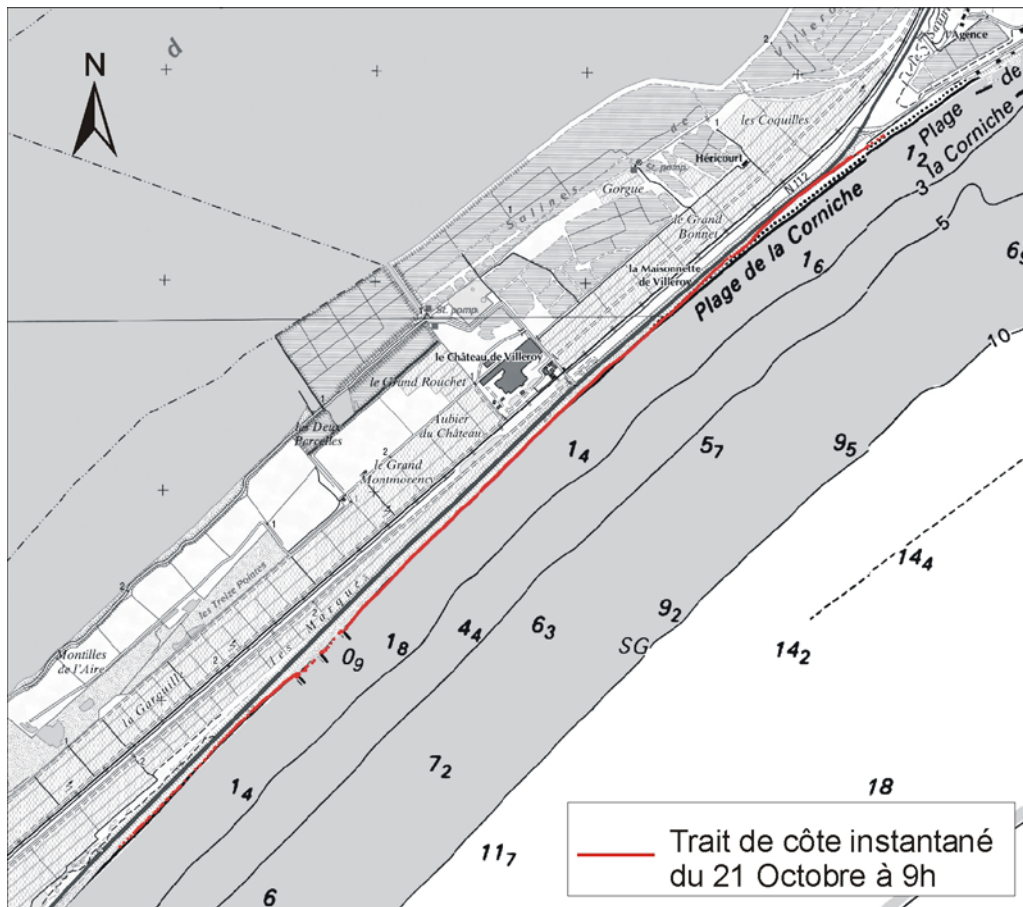


Illustration 23 – Localisation du trait de côte instantané sur le scan IGN©25.

Validation

Afin de valider la position du trait de côte instantané produit par le traitement d'images, des levés GPS ont été réalisés sur le terrain. L'illustration 24 présente la superposition des traits de côte obtenus par les deux méthodes. De manière générale, les deux techniques donnent des résultats très similaires avec des écarts qui peuvent atteindre 5 m au maximum, mais qui sont de l'ordre du mètre sur la quasi-totalité du linéaire. Ces résultats sont donc très satisfaisants si l'on considère que la position du trait de côte par les techniques classiques est en général précise à quelques mètres, en raison de l'évaluation par l'opérateur sur le terrain de la position moyenne de la zone de jet-de-rive.

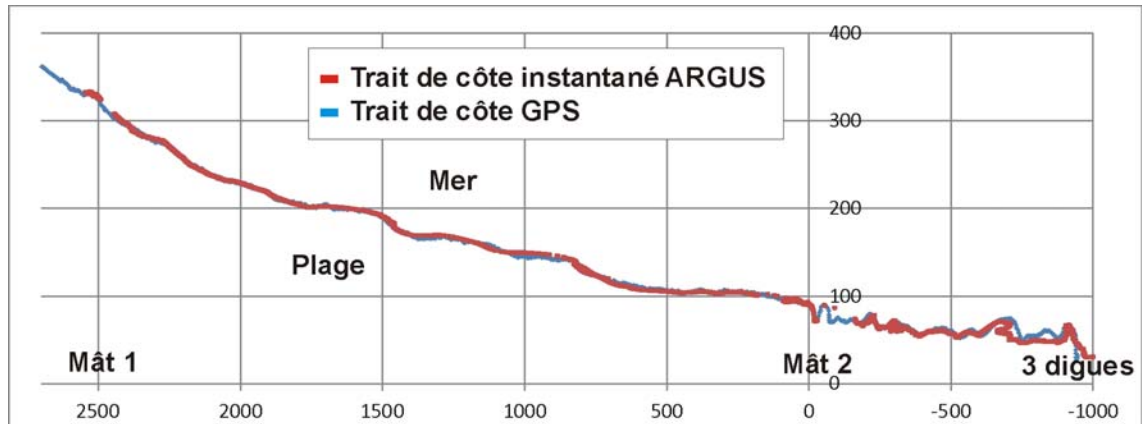


Illustration 24 – Comparaison du trait de côte instantané Argus et du levé GPS réalisés le 24/11/2011, repère ARGUS.

3.2.2. La détection des barres d'avant-côte

Méthodologie

La détection des barres est basée sur l'identification sur les images du déferlement. Les vagues déferlant dans les zones les moins profondes, elles vont notamment permettre de localiser la crête des barres d'avant-côte. Lorsque les conditions hydrodynamiques sont telles que le déferlement se produit sur les barres, l'utilisation d'images moyennées sur 10 min va permettre de positionner la zone de déferlement qui apparaîtra en blanc sur les images.

La première étape pour l'analyse de ces morphologies est la sélection des images. Celles-ci doivent avoir une définition et un contraste suffisant pour l'analyse, mais elles doivent également correspondre aux conditions hydrodynamiques optimales pour voir les barres et leur associer une position exacte. La position du déferlement qui est utilisée pour l'analyse dépend évidemment des caractéristiques de la houle au large, et il convient donc de toujours utiliser des images correspondant à une hydrodynamique donnée et similaire pour toutes les images analysées.

La détection de la barre sur les images est réalisée à l'aide de la boîte à outils BLIM (POPE, 2008, cf. ill. 25). Les images obliques obtenues sont rectifiées et géo-référencées pour former des images plan qui sont par la suite analysées pour extraire le maximum d'intensité de pixel qui est associé à la crête de la barre.

L'analyse des images a permis d'identifier le seuil à partir duquel les vagues commencent à déferler sur la barre interne. Ce déferlement commence dès lors que la hauteur significative de la houle au large atteint 1 m. Ces conditions étant relativement fréquentes, cela permet de positionner la crête des barres assez régulièrement et pas uniquement lors des tempêtes comme cela était initialement envisagé. De plus, lors des tempêtes très énergétiques, avec des hauteurs de houles importantes

(Supérieures à 4 m) le déferlement se fait sur toute l'avant-côte et la position des barres n'est alors plus détectable.

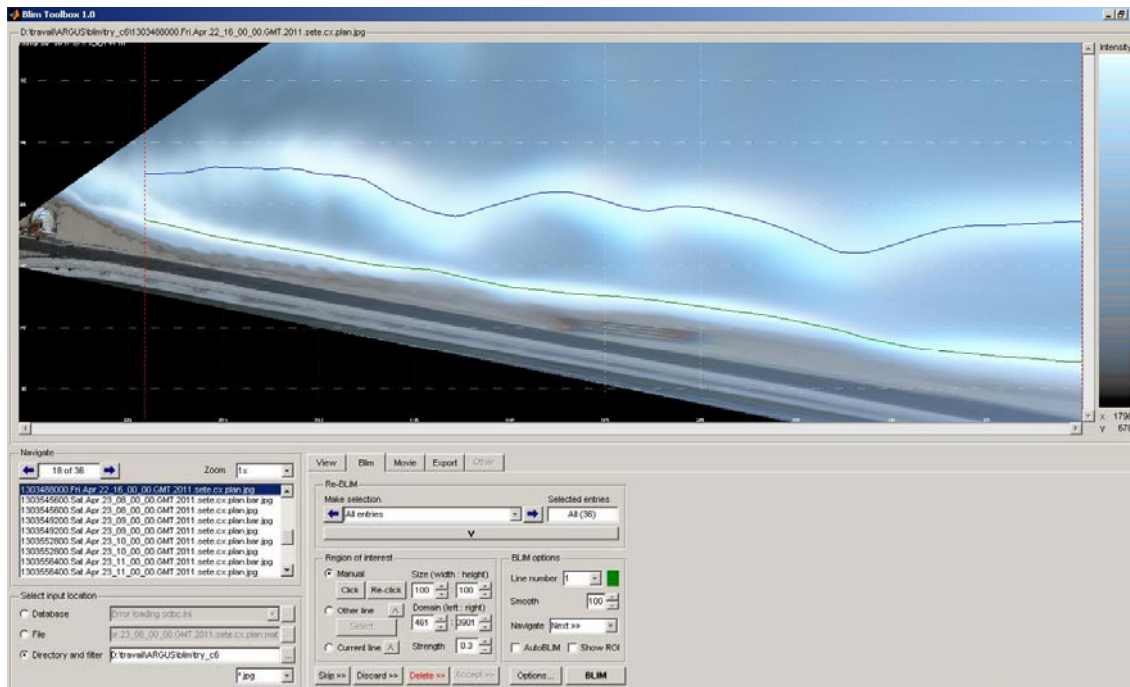


Illustration 25 - Interface BLIM pour la détection des barres d'avant-côte.

Validation

Afin de valider la position des barres d'avant-côte détectée sur les images, une comparaison a été réalisée avec un levé bathymétrique classique mono-faisceau effectué pour Thau Agglo par la société Astérie en septembre-octobre 2011. Les conditions de détection des barres ont été atteintes le 23 octobre 2011, et la position de la crête de barre est donc obtenue quelques semaines après le levé bathymétrique.

L'illustration 26 présente la superposition de la crête de barre (maximum de l'intensité des pixels) avec le levé bathymétrique. Les résultats mettent en évidence une très bonne représentation de la forme générale de la barre qui forme des oscillations (croissants) irréguliers. La position des cornes des croissants longitudinalement est très bonne. Perpendiculairement au trait de côte, on note un léger décalage (entre 5 et 20 m) entre la crête ARGUS et la position réelle de la barre. L'intensité maximale des pixels est plus proche de la plage que la barre réelle. Cela peut résulter de plusieurs phénomènes : soit le déferlement n'était pas assez fort ce jour-là (hauteur significative au large de 1 m), entraînant un faible déferlement sur la crête, et pas de déferlement sur le revers de la barre ; soit la position de la barre a légèrement changé entre le levé bathymétrique et la prise de vue.

Les résultats sont toutefois très satisfaisants et l'intensité maximale des pixels identifiée sur les images permet donc de positionner la crête des barres d'avant-côte

avec une précision de l'ordre de 10 m, ce qui est totalement comparable avec les autres méthodologies existantes (interprétation de photographies, bathymétries).

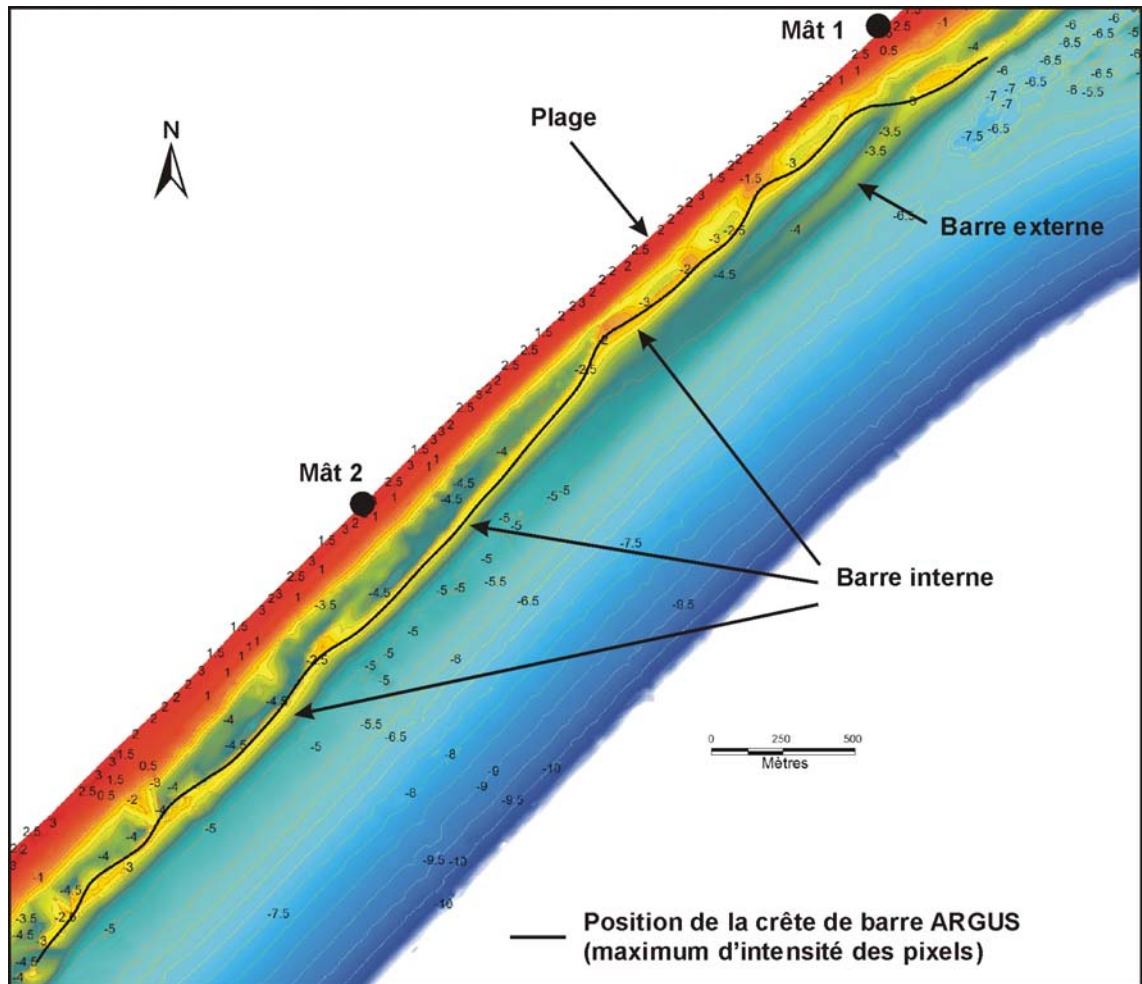


Illustration 26 – Superposition du maximal d'intensité de pixel (crête de barre ARGUS, 23/10/2011) et de la bathymétrie Astérie de septembre-octobre 2011.

4. Résultats préliminaires du suivi vidéo

Le système étant mis en place depuis avril 2011, nous disposons de 9 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 cette période qui, à l'exception des coups de mer successifs d'octobre-novembre 2011, est restée relativement calme.

Les parties suivantes présentent les résultats préliminaires obtenus sur ce suivi d'avril 2011 à janvier 2012.

4.1. EVOLUTION DE LA POSITION DU TRAIT DE COTE

Afin d'évaluer l'évolution de la position du trait de côte, 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 17 traits de côte instantanés a ainsi été sélectionné. Une fois positionnés sur les images vidéo, ces traits de côte ont été convertis en Lambert 93. Ils sont présentés sur l'illustration 27.

L'évolution observée n'est pas représentative d'une évolution à moyen ou long-terme car elle concerne une période s'étendant du printemps à l'hiver. Elle illustre donc essentiellement une évolution saisonnière.

Les résultats indiquent en effet un recul assez prononcé du trait de côte, en particulier dans la partie NE de la zone. Dans ce secteur (cf. ill. 27, à droite), la position du trait de côte est relativement stable du printemps à l'automne 2011 : une oscillation de quelques mètres est observée, sans tendance érosive nette. A l'automne, on constate un fort recul lors des coups de mer successifs de fin octobre - début novembre. Le recul du trait de côte est très localisé et seul deux secteurs présentent un très fort recul (de 40 à 48 m) avec des impacts importants sur le cordon dunaire et les ganivelles. Sur les autres secteurs, l'impact de ces événements moyennement énergétiques est réduit. Après ces coups de mer, on assiste à la reconstruction naturelle de la plage qui regagne environ 20 m en quelques mois. Le recul moyen sur toute la période est de l'ordre de 21 à 22 m. Ce recul peut être temporaire et partiellement ou totalement compensé par la reconstruction naturelle de la plage à la fin de la période hivernale. Seule la comparaison printemps 2011 / printemps 2012 pourra confirmer ou infirmer cette tendance érosive.

Dans le secteur de Listel et la zone destinée à expérimenter le dispositif ©Ecoplage, les oscillations du traits de côte sont plus modérées. L'amplitude des mouvements est de l'ordre de 15 m, et le recul résiduel entre avril 2011 et janvier 2012 est de l'ordre de 10 m.

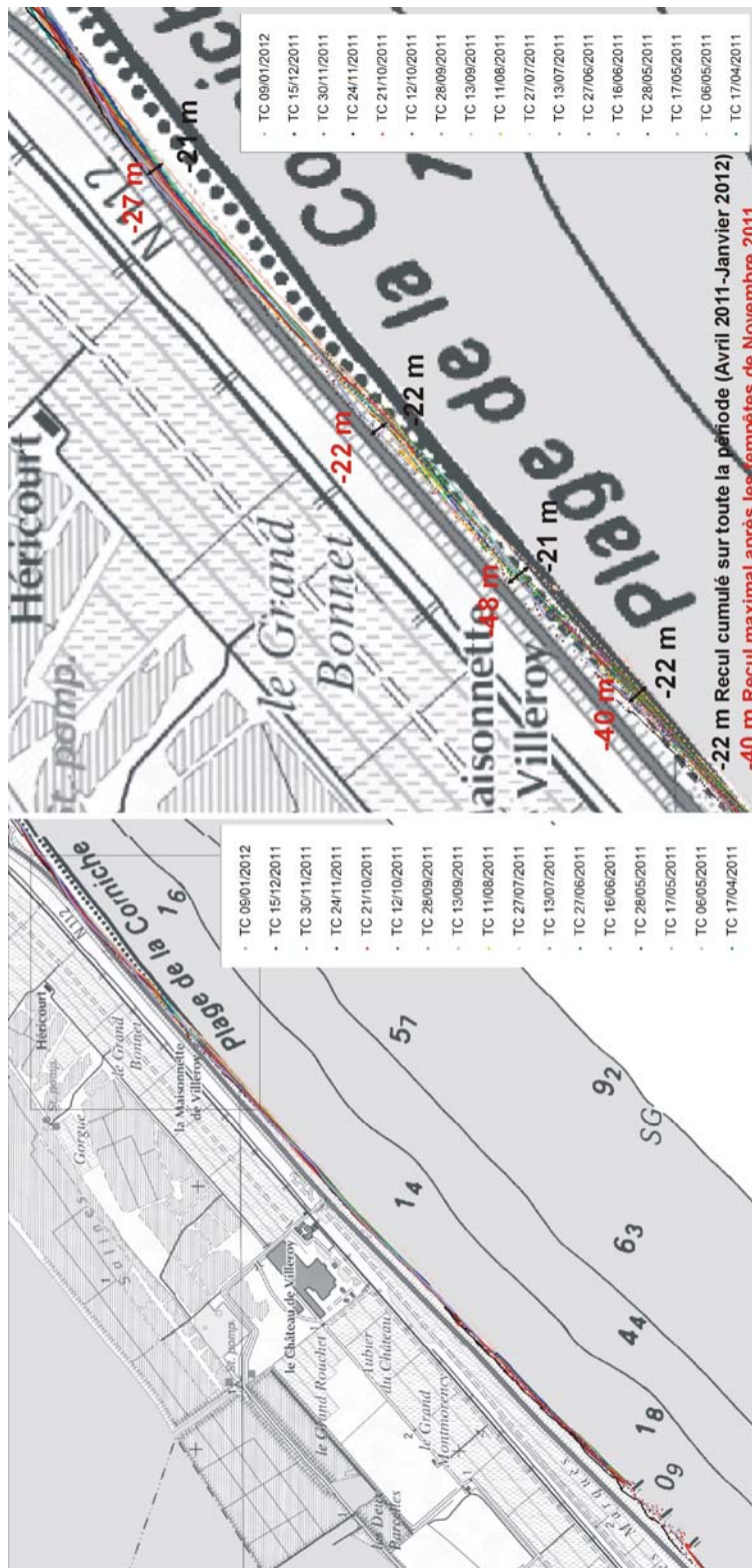


Illustration 27 – Positions successives du trait de côte du 17/04/2011 au 09/01/2012.

Dans la partie Sud-Est du secteur Ecoplage, jusqu'aux 3 digues, les mouvements ont une plus grande amplitude. Le recul lors des événements de l'automne atteint 25 à 30 m (juste après les tempêtes), même si la reconstruction dans ce secteur est très bonne, avec un recul moyen sur l'ensemble de la période de suivi de l'ordre de 10 m.

De manière générale, on observe sur cette évolution, du printemps 2011 à l'hiver 2012, un recul généralisé sur l'ensemble du secteur suivi. Ce recul traduit manifestement une évolution saisonnière et non une tendance à long-terme. La moyenne du recul est de l'ordre de 10 m sur l'ensemble du lido, à l'exception de la zone du triangle de Villeroy où le recul atteint plutôt une valeur de l'ordre de 20 m. Les coups de mer successifs de l'automne ont eu des impacts très localisés et très importants sur la position du trait de côte. Dans le secteur de Villeroy, le recul peut atteindre localement près de 30 m pour ces événements d'intensité très inférieure à la tempête d'occurrence annuelle. Dans la zone au Nord-Est des 3 digues, le recul est également assez marqué, atteignant 15 à 20 m après les coups de mer successifs.

La poursuite du suivi, et la comparaison des deux périodes de printemps (2011 et 2012) permettra de confirmer ou d'infirmer les tendances de recul observées.

4.2. EVOLUTION DE LA POSITION DE LA BARRE D'AVANT-COTE INTERNE

Lors de la période de suivi, les conditions hydrodynamiques sont restées relativement modérées et n'ont pas permis d'observer le déferlement sur la barre externe qui n'a donc pas pu être localisée. Les levés bathymétriques d'octobre et décembre 2011 confirment par ailleurs la disparition de la barre externe sur la quasi-totalité du secteur (cf. ill. 26 et 28). Seul un replat est observé dans la zone où la barre externe était présente il y a quelques mois, voire quelques années.

Le suivi de l'évolution des morphologies pré-littorales ne concerne donc que la barre interne.

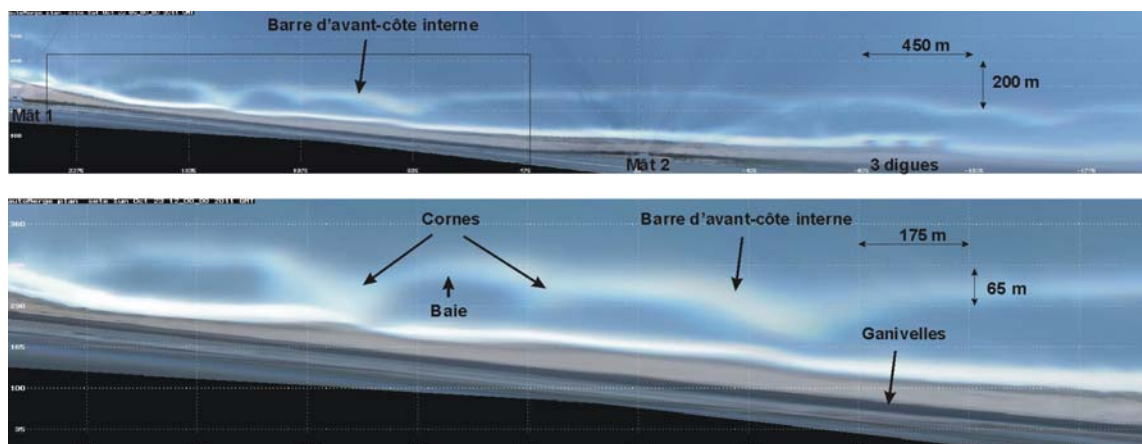


Illustration 28 - Position de la barre interne sur les images. En haut, sur tout le secteur couvert par les caméras ; en bas : zone Nord-Est avec des barres en croissant.

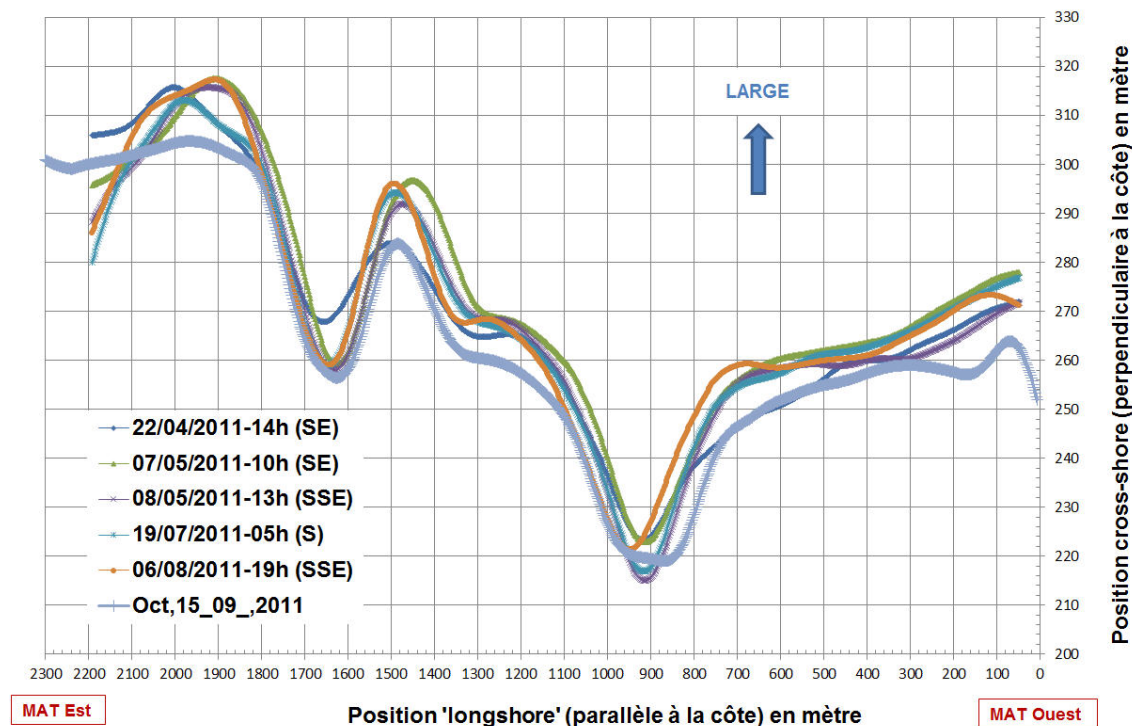


Illustration 29 – Position de la crête de la barre interne identifiée par le maximum d'intensité de pixels entre avril et octobre 2011.

L'illustration 29 présente la position de la crête de barre obtenue sur l'imagerie vidéo. Comme sur l'illustration 28, on observe la présence de trois cornes de croissants principale et une corne secondaire à 1350 m du point de référence (Mât 2). Du mois d'avril au mois d'octobre, les conditions de vagues sont restées relativement calmes et la position des croissants reste très stable longitudinalement. On observe une légère variation de la position perpendiculaire à la côte (de l'ordre de 10 m) qui est probablement liée aux légères variations du déferlement dans les prises de vues sélectionnées. Cette variation perpendiculaire reste dans la limite de résolution de la technique et n'est pas interprétée comme un mouvement réel de la barre. Il en résulte donc une grande stabilité des motifs de la barre interne d'avril à début octobre, ce qui est en accord avec les observations bathymétriques réalisées de 2008 à 2010, qui mettent en évidence une bonne préservation des motifs tant que la hauteur des vagues au large n'atteint pas 3 m (Gervais *et al.*, 2012).

4.3. EVOLUTION LORS DE COUPS DE MER SUCCESSIFS

Du 24 octobre au 23 novembre 2011, plusieurs coups de mer se sont succédés, avec des hauteurs significatives des vagues au large atteignant près de 4 m pour le premier événement et de l'ordre de 3 m pour les 3 coups de mer suivants (cf. ill. 30). Ces conditions, qui restent inférieures à la période de retour annuelle en ce qui concerne la hauteur des vagues, sont les plus énergétiques depuis l'installation du système vidéo.

Elles ont donc permis de suivre les évolutions rapides associées à ces coups de mer successifs.

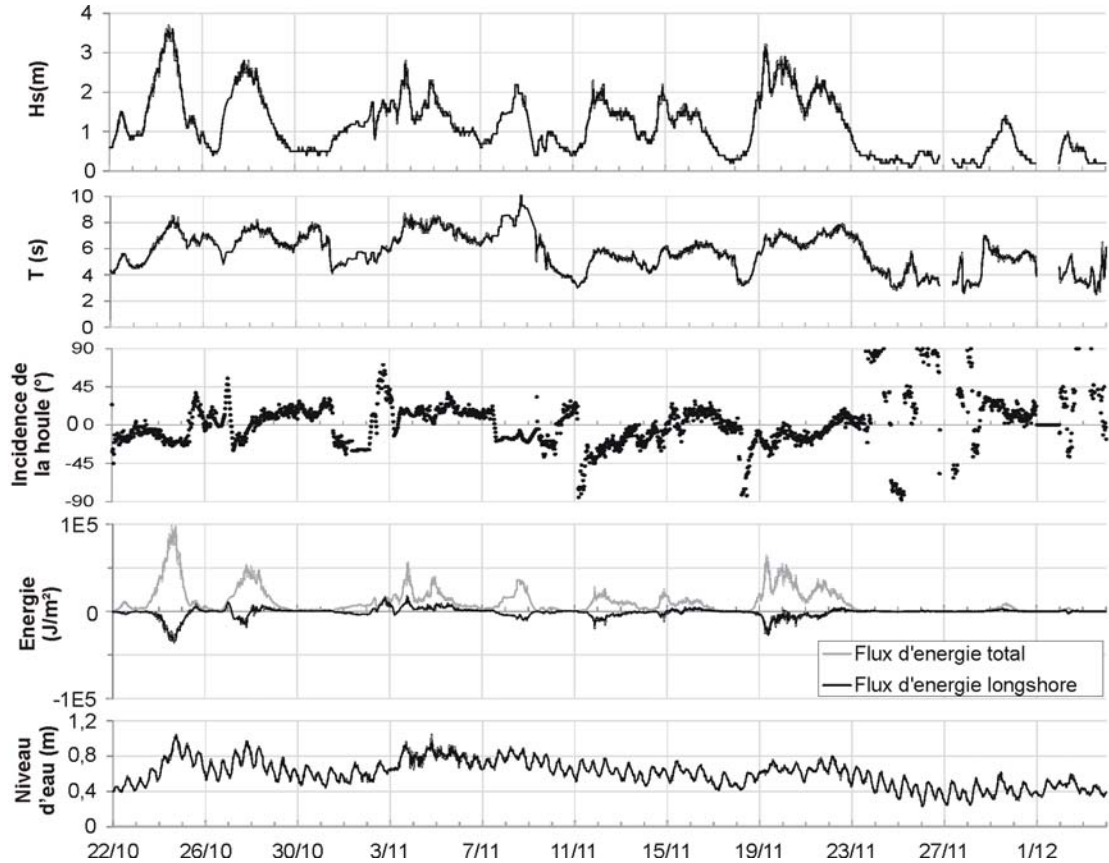


Illustration 30 - Conditions hydrodynamiques au large de Sète (30 m de profondeur): hauteur significative H_s , période T , incidence de la houle I , Flux d'énergie et niveaux d'eaux mesurés au marégraphe de Sète. Données DREAL-LR.

Lors des coups de mer de fin octobre et novembre 2011, l'évolution de la forme et de la position de la barre est complexe et à mettre en relation avec les vagues au large et leur direction de provenance. L'illustration 31 présente les différentes prises de vue d'octobre à décembre 2011 pour lesquelles les conditions de déferlement sont comparables et permettent le positionnement de la barre interne.

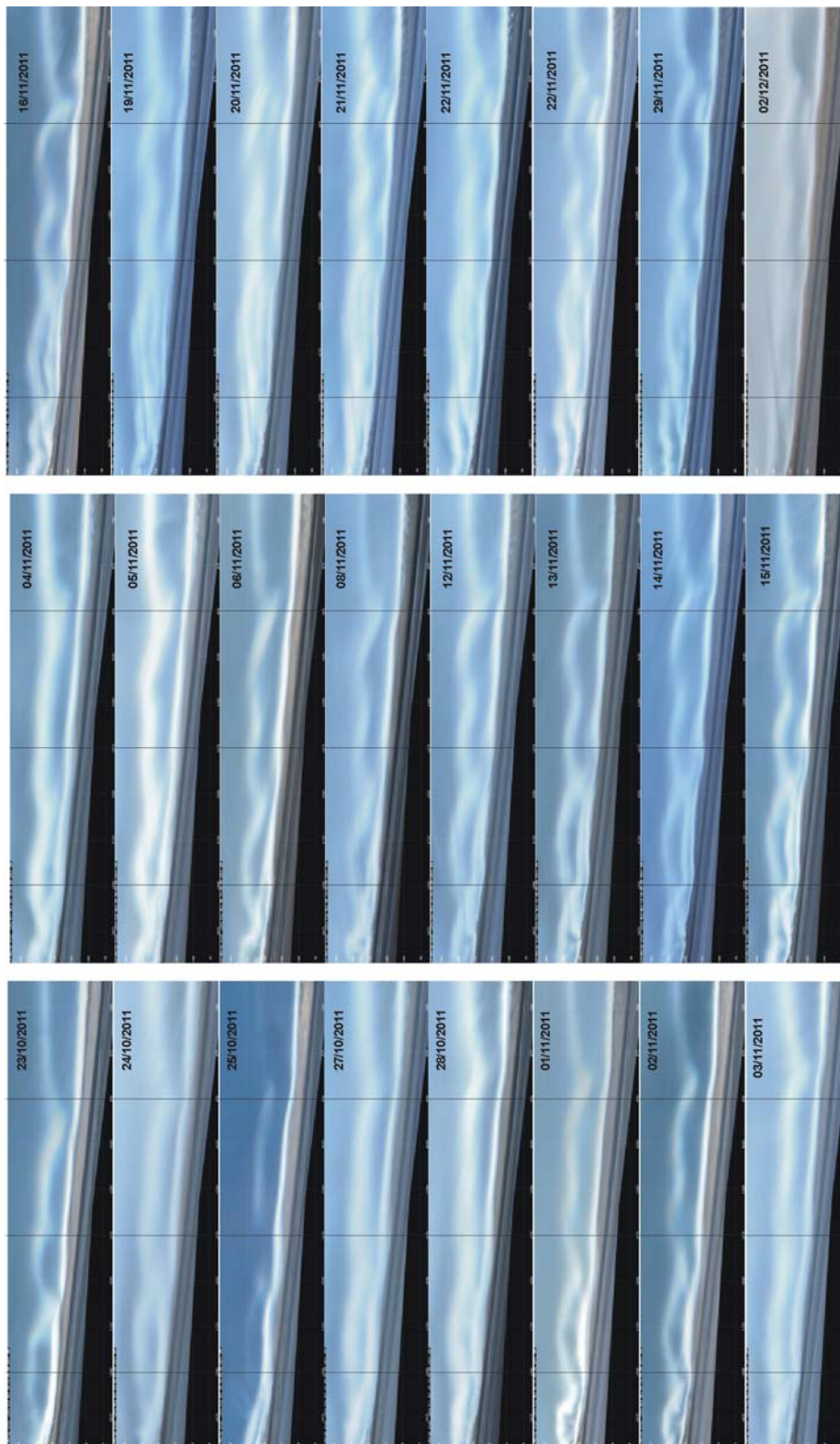


Illustration 31 – Position de la crête de barre Argus du 23/10/2011 au 02/12/2011.

Afin de quantifier les déplacements et modifications du motif de la barre interne lors des coups de mers successifs, une analyse de la position de la ligne de crête a été réalisée (Balouin *et al.*, 2012). Le suivi de la ligne de crête sur cette période permet d'analyser l'évolution de la position et de la forme de la barre interne à partir de 23 images, soit, en moyenne, un suivi de la barre tous les 3 jours. L'illustration 32 présente l'évolution de la ligne de crête au cours du temps. La position cross-shore (perpendiculaire à la côte) de la barre par rapport à une position moyenne est estimée tous les mètres. L'évolution temporelle de cette ligne de crête montre une très nette migration longitudinale des croissants avec des déplacements des cornes pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres d'un jour à l'autre. L'évolution cross-shore reste limitée à quelques dizaines de mètres et n'est donc pas considérée comme significative en raison de l'erreur de positionnement de la crête estimée à plus ou moins 10 m. L'évolution de la forme générale de la barre est relativement limitée, la forme des croissants restant constante sur la quasi-totalité de la période d'observation.

Du 23 au 28/10, on observe nettement deux cornes dans la zone d'étude (zones plus claires sur l'illustration 32), appelées corne Est et Ouest. Elles migrent de façon similaire vers le Sud-Ouest sur 200 m. La période du 28 au 1/11 présente une stabilité de la position des cornes, suivi par une brève migration de la corne Est vers le SO de 80 m. Entre le 3 et le 4/11, les cornes migrent rapidement vers le NE de 230 m (et 120 m). On observe ainsi une augmentation de la distance entre les deux cornes tandis qu'une nouvelle corne apparaît au milieu. Le 5/11 la tendance s'inverse. Les trois cornes migrent progressivement de 200 m vers le SO jusqu'au 18/11. La migration s'accélère entre le 19 et le 22/11 avec un décalage de 100 m dans la même direction. La période du 23 au 29/11 présente peu de mouvement. La corne Est présente un léger décalage de 30 m vers le SO, participant à diminuer la longueur d'onde des croissants. Entre le 29/11 et le 2/12 les cornes se déplacent finalement de respectivement 90 m et 25 m pour la corne Est et Ouest, vers le NE.

Lors de la période de suivi, les conditions énergétiques sont restées modérées à fortes, n'atteignant pas les seuils habituellement considérés comme morphogènes dans ce secteur (Gervais *et al.*, 2012). Toutefois, les résultats ont montré une dynamique importante des barres d'avant-côte avec des migrations longitudinales pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres. Cette migration dépend essentiellement de l'incidence de la houle et du flux d'énergie longitudinal qui dépend de la hauteur des vagues, de leur période et de leur direction de provenance. Les résultats (cf. ill. 33) semblent montrer que la vitesse de migration présente une bonne corrélation ($r^2 = 0.6$ pour la corne Est et 0.8 pour la corne Ouest) avec l'énergie longitudinale au pic de la tempête, ce qui signifie que la mobilité des barres se produit essentiellement au pic des tempêtes.

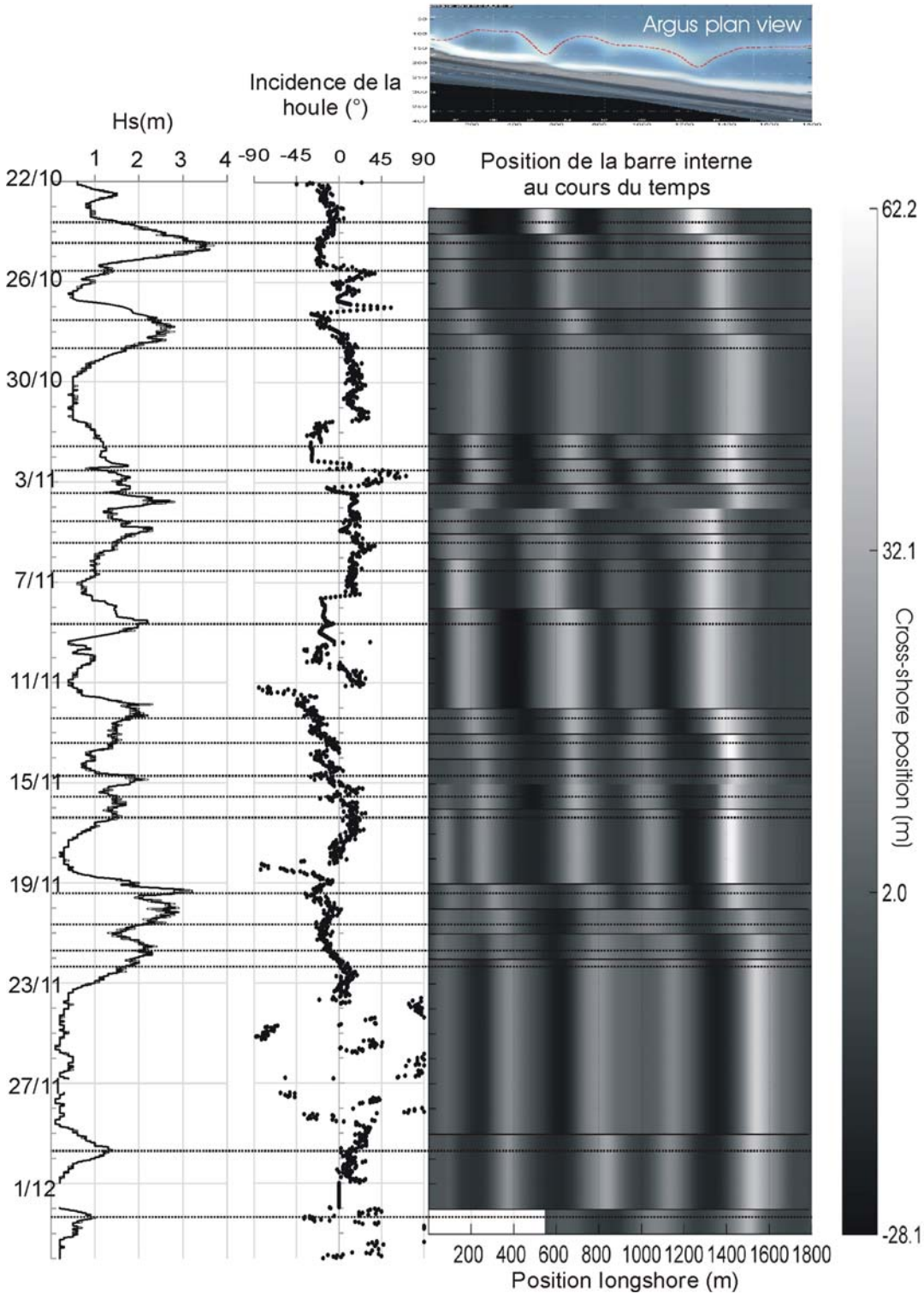


Illustration 32 - Evolution de la position de la barre interne au cours du suivi. Les zones claires indiquent les zones proches de la côte (cornes) et les zones sombres les plus éloignées (baies). La série temporelle de conditions de houle est indiquée sur la gauche (Données DREAL-LR).

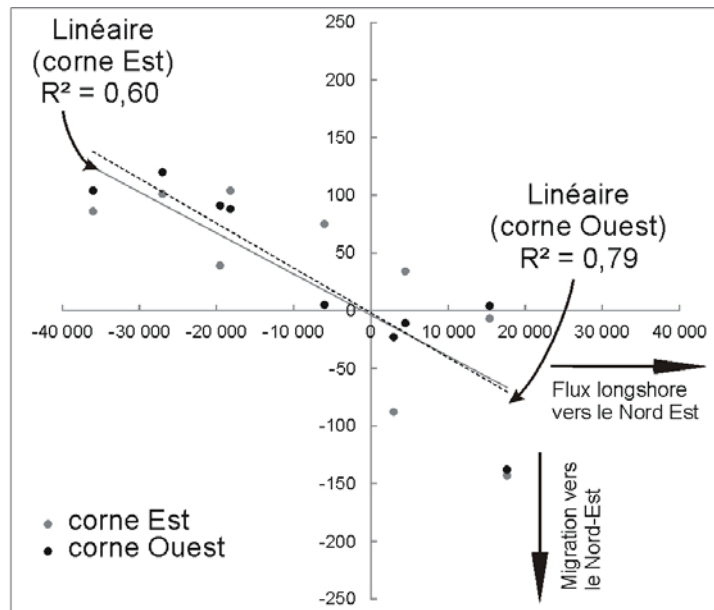


Illustration 33 – Relation entre la mobilité des cornes de la barre interne et le flux d'énergie longitudinal de la houle au large.

Les migrations observées sont importantes, atteignant plusieurs centaines de mètres pour des conditions de vagues relativement modérées. Ces évolutions rapides n'avaient jusqu'à présent pas pu être caractérisées par les levés topo-bathymétriques classiques qui ne permettent pas de suivre les évolutions à haute fréquence, et qui sont contraints par les conditions météo-océanographiques. Lors de ce mois de coups de mer successifs, un levé classique en bateau n'aurait pu être réalisé, et un levé après la série de tempêtes n'aurait pas permis d'appréhender la complexité des déplacements de la barre interne.

Cette mobilité de la barre est importante car elle induit une réponse en « miroir » de la plage émergée, et elle joue un rôle non négligeable sur les niveaux d'eau atteints sur la plage. L'illustration 34 présente l'impact de la tempête du 24 octobre sur la partie Nord-Est de la zone de suivi. On note clairement une inondation plus importante de la plage en 2 points de la zone, respectivement à 1500 m et 1950 m du point de référence (Mât 2). Ces deux secteurs sont également les secteurs où la barre interne est localisée très proche de la côte. Quelques mètres à dizaines de mètres séparent la corne de la barre interne de la plage.

La position de la corne joue donc un rôle non négligeable sur le niveau d'eau atteint localement. Les vagues arrivant très près de la plage sans être dissipées par la barre viennent déferler avec toute leur énergie à proximité de la plage, entraînant une surélévation locale du niveau d'eau, qui permet au jet-de-rive d'atteindre le cordon dunaire qui a été fortement touché lors de cet événement.

Cela confirme le rôle important des barres d'avant-côte sur l'évolution de la plage. Si ces barres sont volumineuses et à une certaine distance de la côte, elles jouent un rôle d'atténuateur d'énergie et limitent les phénomènes érosifs au niveau du trait de côte.

Lorsqu'elles sont positionnées très près du littoral, elles peuvent jouer un rôle localement sur l'élévation du niveau d'eau sur la plage, ce qui augmente la vulnérabilité du cordon dunaire.

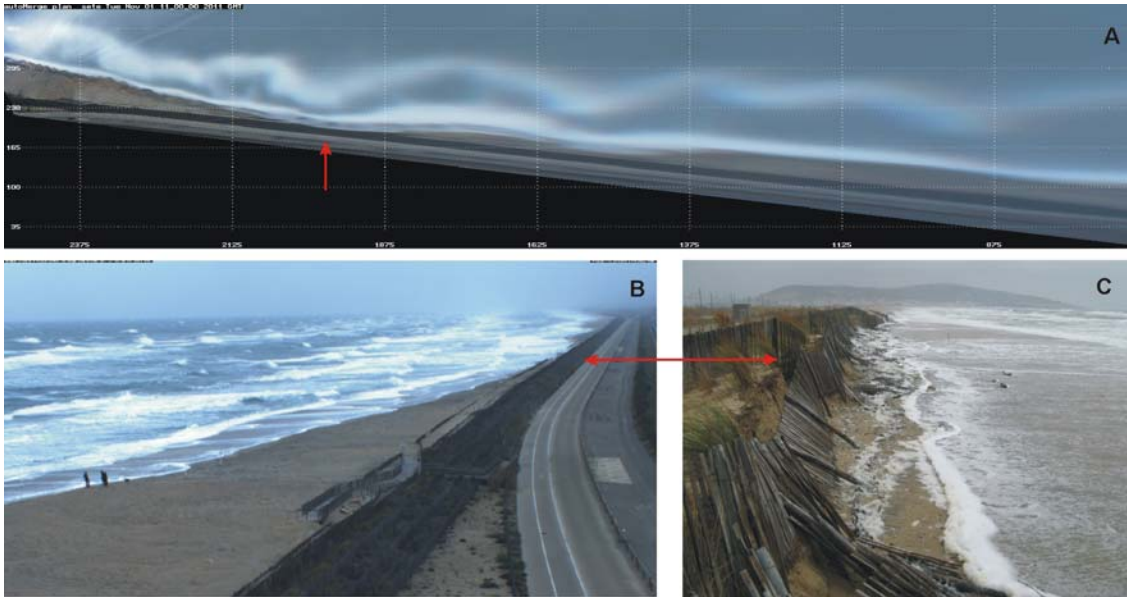


Illustration 34 - Impact du coup de mer du 24/10: a) Image moyennée et rectifiée ; b) image oblique ; c) photographie de l'impact sur le cordon dunaire. La flèche rouge indique le point d'impact sur les différentes photographies.

Ces observations correspondent à des tempêtes d'amplitude modérée, et l'absence de grosse tempête depuis l'installation du système vidéo ne permet pas de généraliser ces observations qui seront réétudiées lors des prochains coups de mer.

4.4. CARACTERISATION DES CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES

L'acquisition des images à haute-fréquence (2 Hz) et l'échantillonnage des pixels permettent d'obtenir des informations sur les conditions hydrodynamiques. On peut ainsi, à partir de la variation d'intensité d'un pixel, reconstituer une série temporelle qui permet de visualiser le passage des vagues (intensité plus forte liée au déferlement, cf. Ill. 35-a), et en déduire la période de la houle.

L'échantillonnage de plusieurs pixels simultanément permet de reconstituer des spectres de vagues et donc d'obtenir la direction de la houle à la côte (cf. ill. 35-a).

L'échantillonnage de profils de pixels permet de caractériser les courants de surface liés au déferlement ou encore les séquences et caractéristiques du jet-de-rive (cf. ill. 35-b). On obtient alors la distance parcourue par le jet-de-rive sur la plage, et son évolution dans le temps, ce qui donne à la fois une indication sur la période de la houle et sur la largeur de la zone de jet de rive. Cette mesure est particulièrement pertinente pour l'évaluation du système ©Ecoplage dont l'objectif principal est de drainer les écoulements dans la zone de jet-de-rive pour faciliter les dépôts sableux.

Ces différents indicateurs des conditions hydrodynamiques ont été acquis lors des derniers mois et sont en cours d'évaluation à l'aide de mesures in-situ.

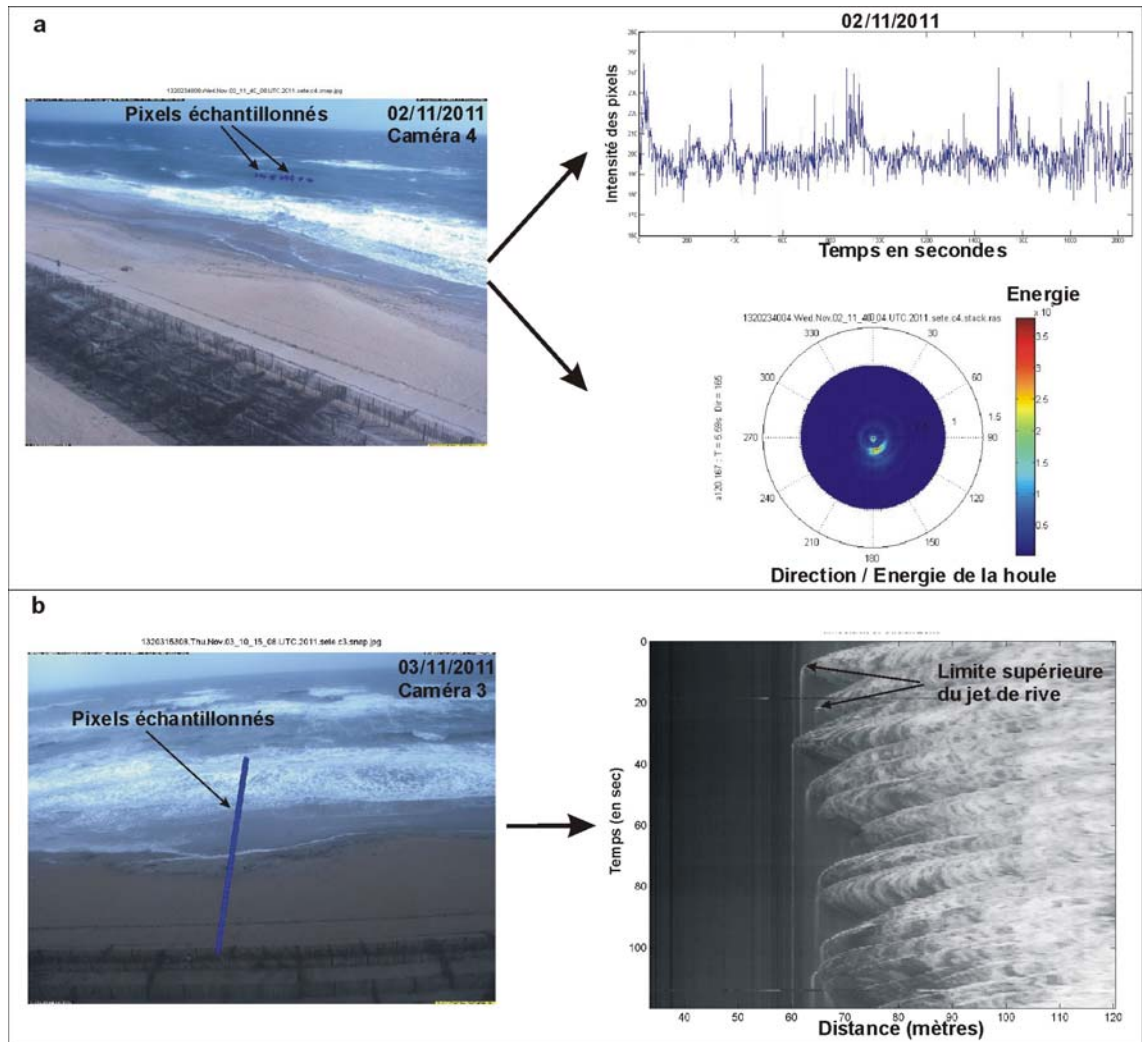


Illustration 35 – Echantillonnage de pixels à Sète pour l'analyse des conditions hydrodynamiques. a) Utilisation de pixels pour reconstituer les séries de vagues et les spectres directionnels ; b) utilisation de pixels pour l'analyse du jet-de-rive.

5. Conclusion

Afin de suivre et d'évaluer l'efficacité des techniques de luttés 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 Digues.

Le système d'acquisition et de transfert des images est opérationnel depuis avril 2011 et les résultats sont maintenant transférés en temps quasi-réel vers le BRGM Montpellier pour traitement et analyses. Les calibrations de l'optique ont été réalisées à l'aide de levés DGPS dédiés qui permettent de résoudre les équations de photogrammétrie et obtenir des images ortho-rectifiées de la plage et de l'avant-côte.

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. Les indicateurs produits par le système vidéo ont été confrontés à des données de terrain topobathymétriques et levés DGPS du trait de côte. La comparaison des produits vidéo/levés DGPS donne des résultats très satisfaisants et les positions obtenues sont validées par les observations sur le terrain, permettant donc une utilisation de ces indicateurs pour le suivi quantitatif des morphologies côtières.

Les indicateurs morphologiques sont analysés afin de définir les évolutions à moyen et long terme du littoral, mais également pour l'analyse des réponses rapides lors des événements de tempêtes. Les résultats préliminaires pour la période avril 2011 à janvier 2012 ont permis de mettre en évidence plusieurs caractéristiques de l'évolution du site :

- le trait de côte, sur cette évolution printemps/hiver, présente un recul moyen élevé (de l'ordre de 20 m en 10 mois), qui correspond probablement plus à une évolution saisonnière qu'à un recul à long-terme ;
- 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 ;
- 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.

Ces tendances observées sur une période relativement courte, sans prendre en compte une reconstruction naturelle éventuelle au printemps 2012, seront bien sûr à confirmer lors des prochains mois/prochaines années.

6. Bibliographie

Balouin, Y., Desbiendras, L., Gervais, M. et Tesson, J., 2012. Dynamique à haute fréquence des barres d'avant-côte en milieu microtidal : suivi vidéo du Lido de Sète, Golfe du Lion. XIIèmes journées nationales Génie Civil- Génie Côtier, Cherbourg, juin 2012, soumis.

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.



Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

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