

EXPLOITATION DES DONNEES ACQUISES ENTRE 2007 ET 2014
PAR LA STATION DE SUIVI VIDEO DE VALRAS-PLAGE (HERAULT)



TABLE DES MATIERES

1.	Contexte et objet de l'étude	6
1.1.	Contexte	6
1.2.	Contenu de la mission et organisation du document.....	6
2.	Présentation du site d'étude.....	7
2.1.	Situation géographique	7
2.2.	Contexte géomorphologique.....	8
2.3.	Agents météo-marins	9
2.3.1.	Le vent	9
2.3.2.	Niveau d'eau	10
2.3.3.	Les vagues	11
2.4.	Problématiques d'érosion du littoral.....	14
2.4.1.	Aménagement de l'embouchure de l'Orb.....	14
2.4.2.	Implantation des structures de protection	15
3.	Présentation des données disponibles	17
3.1.	Niveau d'eau	17
3.2.	Houle	17
3.3.	Topographie et Bathymétrie	18
3.3.1.	Levé LIDAR de la DREAL LR	18
3.3.2.	Données Etopo1	18
3.4.	Images Vidéo	18
3.4.1.	Configuration n°1 : 2007, 2008, début 2009	19
3.4.2.	Configuration n°2 : 2009 à 2014.....	20
4.	Analyse diachronique du trait de côte	21
4.1.	Préambule	21
4.2.	Filtre de la base de données.....	22
4.2.1.	Niveau d'eau	22
4.2.2.	Condition de houle	22
4.2.3.	Précision finale de la détection du trait de côte	23
4.2.4.	Images filtrées	23
4.3.	Méthodologie – Analyse Factorielle (AFC).....	24
4.4.	Evolution de la position du trait de côte – Résultats de l'AFC.....	26
4.4.1.	Littoral Est	26
4.4.2.	Littoral Ouest.....	29
4.5.	Conclusion	32
5.	Etude des niveaux d'eau atteints lors des tempêtes	33

5.1.	Méthodologie	33
5.1.1.	Identification des tempêtes sur la période d'étude	33
5.1.2.	Mise en œuvre du modèle d'agitation	33
5.1.3.	Tempête du 2 au 4 janvier 2008.....	34
5.1.4.	Tempête du 20 au 21 octobre 2009	35
5.1.5.	Tempête du 14 au 15 janvier 2010.....	36
5.1.6.	Tempête du 12 au 16 mars 2011.....	37
5.1.7.	Tempête du 24 octobre au 7 novembre 2011	38
5.1.8.	Tempête 04-08 mars 2013	39
5.2.	Conclusions.....	40
6.	Dynamique des barres sédimentaires.....	41
6.1.	Méthodologie et limitations inhérentes à la technique	41
6.2.	Dynamique de la barre interne.....	43
6.2.1.	Zoom sur les structures immergées	43
6.2.2.	Les différents types de morphologies	44
6.2.3.	Dynamique de la barre interne	45
6.3.	Dynamique de la barre externe.....	47
6.3.1.	Morphologie de la barre externe	48
6.3.2.	Dynamique de la barre externe.....	48
6.4.	Conclusions.....	50
6.4.1.	Barre interne	50
6.4.2.	Barre externe	50
7.	Fréquentation des plages.....	51
7.1.	Introduction.....	51
7.2.	Méthodologie	53
7.3.	Limitations inhérentes au site d'étude.....	54
7.4.	Traitement des données 2008-2014.....	55
7.4.1.	Distribution spatiale	55
7.4.2.	Distribution temporelle.....	58
7.5.	Conclusions.....	60
8.	Conclusions et perspectives	61
8.1.	Evolution du trait de côte	61
8.2.	Surcotes de tempêtes.....	64
8.3.	Dynamique des barres sédimentaires	64
8.4.	Fréquentation des plages	65
8.5.	Perspectives.....	66
9.	Références bibliographiques.....	67

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Situation géographique du littoral de Valras-Plage.....	7
Figure 2. Cellules sédimentaires	8
Figure 3. Statistiques de vents de 1949 à 1998 enregistrées à Sète	9
Figure 4. Ajustement de Gumbel des maximums annuels calendaires à Sète.....	10
Figure 5. Corrélogramme Hs / Tp (a) et Hs / Dirp (b). Données ANEMOC MEDIT 1726.....	11
Figure 6. Ajustement graphique des statistiques de houles extrêmes avec la loi GPD (a) et exponentiel (b).....	12
Figure 7. Plan de propagation de houle pour différentes directions d'incidence.....	13
Figure 8. Tempête à Valras-Plage.....	14
Figure 9 : Vues aériennes de Valras-Plage en 1935 (A), 1968 (B), et 1996 (C). (DURANT, 2001).....	15
Figure 10 : Descriptif de l'implantation des structures de protection côtière sur le littoral de Valras-Plage. (Orthophotographie IGN).....	16
Figure 11 : Variations du niveau d'eau enregistrées au marégraphe de Sète entre Janvier 2008 et Septembre 2014 (REFMAR-SHOM).....	17
Figure 12 : Données issues du houlographe de Sète (DREAL Languedoc-Roussillon) entre Janvier 2008 et Septembre 2014.....	17
Figure 13. Emprise du levé Lidar de 2009	18
Figure 14. Données Etopo1 Europe / Méditerranée.....	18
Figure 15 : Localisation de la station vidéo de Valras-Plage	18
Figure 16 : Vues des 6 caméras (1ère configuration 2007, 2008, début 2009)	19
Figure 17 : Cartes de résolution transversale (a) et longitudinale (b) de la station vidéo de Valras-Plage, 1ère configuration.....	19
Figure 18 : Intégration SIG d'une ortho-photographie de Valras Plage, configuration 1.....	19
Figure 19 : Vues des 4 caméras (2ème configuration, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013).....	20
Figure 20 : Cartes de résolution transversale (a) et longitudinale (b) de la station vidéo de Valras-Plage, 2ème configuration.....	20
Figure 21 : Intégration SIG d'une ortho-photographie de Valras Plage, configuration 2.....	20
Figure 22. Position du trait de côte selon la définition du SHOM (Source Géoportail IGN)	21
Figure 23 : a) Région d'Intérêt sélectionnée manuellement b) détection automatisée du trait de côte	23
Figure 24. Exemple de résultats obtenus par l'AFC sur les données vidéo de Valras-Plage.	25
Figure 25. Illustration de la morphologie de la plage sur le littoral Est de Valras-Plage.....	27
Figure 26. Résultats de l'AFC sur la partie Est du littoral de Valras-Plage.....	28
Figure 27. Illustration de la morphologie de la plage sur le littoral Ouest de Valras-Plage	30
Figure 28. Résultats de l'AFC sur la partie Ouest du littoral de Valras-Plage.....	31
Figure 29. Evolution de la surface de plage à l'Est (a), sur le secteur Ouest endigué, (c) , sur le secteur Ouest naturel (d) et sur la globalité du secteur Ouest (b).....	32
Figure 30. Etat de mer à l'échelle de la Méditerranée Occidentale (a) et à l'échelle du littoral de Valras-Plage (b) lors de la tempête du 2 au 4 janvier 2008	34
Figure 31. Evolution transversale de la position instantanée de la ligne d'eau à l'Est (a) et à l'Ouest de la station (d). Hauteurs significatives de la houle (b) et niveaux d'eau (c) relevés à Sète au cours de l'événement du 01 au 06 janvier 2008.....	34

Figure 32. Etat de mer à l'échelle de la Méditerranée Occidentale (a) et à l'échelle du littoral de Valras-Plage (b) lors de la tempête du 20 au 21 octobre 2009	35
Figure 33. Evolution transversale de la position instantanée de la ligne d'eau à l'Est (a) et à l'Ouest de la station (d). Hauteurs significatives de la houle (b) et niveaux d'eau (c) relevés à Sète au cours de l'événement du 19 au 23 octobre 2009.	35
Figure 34. Etat de mer à l'échelle de la Méditerranée Occidentale (a) et à l'échelle du littoral de Valras-Plage (b) lors de la tempête du 14 au 15 janvier 2010	36
Figure 35. Evolution transversale de la position instantanée de la ligne d'eau à l'Est (a) et à l'Ouest de la station (d). Hauteurs significatives de la houle (b) et niveaux d'eau (c) relevés à Sète au cours de l'événement 19 au 23 octobre 2009.	36
Figure 36. Etat de mer à l'échelle de la Méditerranée Occidentale (a) et à l'échelle du littoral de Valras-Plage (b) lors de la tempête du 11 au 16 mars 2011	37
Figure 37. Evolution transversale de la position instantanée de la ligne d'eau à l'Est (a) et à l'Ouest de la station (d). Hauteurs significatives de la houle (b) et niveaux d'eau (c) relevés à Sète au cours de l'événement 19 au 23 octobre 2009.	37
Figure 38. Etat de mer à l'échelle de la Méditerranée Occidentale (a) et à l'échelle du littoral de Valras-Plage (b) lors de la tempête du 11 au 16 mars 2011	38
Figure 39. Evolution transversale de la position instantanée de la ligne d'eau à l'Est (a) et à l'Ouest de la station (d). Hauteurs significatives de la houle (b) et niveaux d'eau (c) relevés à Sète au cours de l'événement 14 octobre 2011 au 09 novembre 2011.	38
Figure 40. Etat de mer à l'échelle de la Méditerranée Occidentale (a) et à l'échelle du littoral de Valras-Plage (b) lors de la tempête du 11 au 16 mars 2011	39
Figure 41. Evolution transversale de la position instantanée de la ligne d'eau à l'Est (a) et à l'Ouest de la station (d). Hauteurs significatives de la houle (b) et niveaux d'eau (c) relevés à Sète au cours de l'événement 14 octobre 2011 au 09 novembre 2011.	39
Figure 42 : Sélection de la région d'intérêt (a) ; Détection automatisée de la position de la barre externe (b). .	41
Figure 43 : Exemple de représentation des résultats d'évolution de la position des barres sédimentaires.	42
Figure 44 : Ensemble des positions de la barre interne détectées à partir du système vidéo entre Janvier 2008 et Septembre 2014.	43
Figure 45 : Structures immergées mises en évidence par les zones de déferlement comprises entre 1000m et 1600m de la station vidéo. A gauche la structure en enrochement, à droite la structure en géotextile.	43
Figure 46 : Deux exemples de morphologies linéaires présentes dans la zone Ouest du littoral de Valras-Plage.	44
Figure 47 : Deux exemples de morphologies ondulées présentes dans la zone Ouest du littoral de Valras-Plage.	44
Figure 48 : Deux exemples de morphologies en croissant présentes dans la zone Ouest du littoral de Valras-Plage.	44
Figure 49 : Bilan de l'analyse de la dynamique de la barre interne du littoral de Valras-Plage. La colonne de gauche représente des exemples de morphologie de la barre détectée par le système vidéo, la colonne centrale représente la variation de la position de la barre par rapport à sa position moyenne, et la colonne de droite représente les fluctuations de hauteur de houle à Sète.	46
Figure 50 : Ensemble des positions de la barre externe détectées à partir du système vidéo entre Janvier 2008 et Septembre 2014. (a) zone Ouest et (b) zone Est.	47
Figure 51 : Localisation de la barre externe dans la partie Ouest et Est du domaine d'étude. Les lignes rouges représentent la détection vidéo de la barre externe.	48

Figure 52 : Evolution de la position transversale de la barre externe au cours du temps. (a) Zone Est et (b) zone Ouest.....	49
Figure 53. Sélection de la zone d'intérêt (a), filtration et passage en mode binaire (b, c), et délimitation des polygones correspondant aux utilisateurs de plage (d).....	53
Figure 54 : Zone d'analyse de la fréquentation des plages à l'Est (a) et à l'Ouest du domaine (b), et exemples de structures d'accueil présentes sur la partie Est (c et d).....	54
Figure 55 : Zoom sur la zone d'occupation principale de la partie Est du domaine.....	55
Figure 56 : Carte de distribution de la fréquentation de la zone Est des plages de Valras. L'échelle de couleur correspond au pourcentage d'occupation de la zone (rouge : zones les plus fréquentées, bleu : zones les moins fréquentées).....	56
Figure 57 : Carte de distribution de la fréquentation de la zone Ouest des plages de Valras. L'échelle de couleur correspond au pourcentage d'occupation de la zone (rouge : zones les plus fréquentées, bleu : zones les moins fréquentées).....	57
Figure 58 : Distribution horaire de la fréquentation des plages dans la partie Est (colonne de gauche) et dans la partie Ouest (colonne de droite) du domaine d'étude, entre 2009 et 2014.	58
Figure 59 : Distribution mensuelle de la fréquentation des plages dans la partie Est (colonne de gauche) et dans la partie Ouest (colonne de droite) du domaine d'étude, entre 2009 et 2014.....	59
Figure 60 : Distribution annuelle de la fréquentation des plages dans la partie Est (colonne de gauche) et dans la partie Ouest (colonne de droite) du domaine d'étude.....	60
Figure 62 : Position moyenne du trait de côte estimé par le système vidéo en 2008 (trait vert) et en 20014 (trait bleu), et projection du trait de côte à l'horizon 2030.....	62
Figure 61 : Localisation de la zone sensible identifiée par l'analyse des données vidéo.....	63
Figure 63. Exemple de surcote de tempête observé sur les parties Est et Ouest du littoral de Valras-Plage en Octobre 2009.	64
Figure 64. Exemple de fréquentation sur les parties Est et Ouest du littoral de Valras-Plage en Aout 2017.....	65
Figure 65 : Couplage des données de fréquentation de plage et de la projection du trait de côte.....	66

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1. Références Altimétriques Maritimes pour les sites de Gruissan et Sète (SHOM 2012).....	10
Tableau 2. Estimation des niveaux marins maximaux instantanés au niveau du marégraphe de Sète (cm NGF) 10	
Tableau 3. Estimation des houles extrêmes au houlégraphe de Sète.....	12
Tableau 4. Caractéristiques des conditions d'agitation imposées aux frontières du modèle « Père » pour les différents « runs ».....	13
Tableau 5. Tableau de synthèse des incertitudes inhérentes à la détection de la ligne d'eau.....	23
Tableau 6. Inertie et variance expliquées par les modes issus de l'analyse factorielle 1-D de la zone Est.....	26
Tableau 7. Inertie et variance expliquées par les modes issus de l'analyse factorielle 1-D de la zone Ouest.....	29
Tableau 8 : Récapitulatif des conditions de mer enregistrées au cours des tempêtes identifiées.....	33
Tableau 9 : Elévations des niveaux d'eau (Surcote + Setup + Jet de Rive) calculées par le modèle.....	33

1. CONTEXTE ET OBJET DE L'ETUDE

1.1. CONTEXTE

Pour pallier à la fragilité de son littoral face aux assauts de la mer, le Conseil général s'est lancé depuis 2007 dans un programme de défense et de valorisation de sa côte à travers des travaux de protection et de restauration des plages (soit un investissement de 100 M€ sur 5 ans dont plus de 20 M€ financés par le Département). Parallèlement, il s'engage dans des projets européens de recherche appliquée avec ses voisins méditerranéens (projets Beachmed depuis 2002 et Coastance aujourd'hui).

Les communes de Valras-Plage et de Vendres sont situées sur la côte sableuse du Languedoc-Roussillon dans le département de l'Hérault. Les premiers signes d'érosion du littoral se sont manifestés sur Valras-Plage après l'allongement des digues du débouché de l'Orb en 1977, ce qui a conduit la collectivité à progressivement construire des ouvrages de protection. En 2007/2008 cette zone a fait l'objet d'importants travaux (3 brise-lames, 2 butées de pied et 1 rechargement de 95 000m³) partiellement financés par le département. Parallèlement, le Conseil Général de l'Hérault s'est doté d'un système innovant de suivi vidéo du littoral de Valras-Plage dans le cadre du projet Beachmed-e.

Dans le cadre du projet Coastance, dont l'objectif est d'étudier l'impact du changement climatique sur les côtes en termes d'érosion et de submersion marine, de gestion des sédiments et d'impact environnemental des ouvrages côtiers sur ce milieu sensible, le Conseil Général de l'Hérault souhaite aujourd'hui exploiter l'intégralité de la base de données de la station vidéo de Valras-Plage.

1.2. CONTENU DE LA MISSION ET ORGANISATION DU DOCUMENT

La présente étude porte sur l'exploitation des données vidéo acquises par la station de Valras-Plage depuis 2007. Cette étude se décompose en cinq parties pouvant être menées de façon concomitante selon le descriptif suivant :

- Section 2 : Présentation du site d'étude (contexte géomorphologique, agent météo marin, historique des aménagements,...)
- Section 3 : Collecte et synthèse des données existantes depuis 2007 (images vidéo, topographies, bathymétries, houle, niveau d'eau...).
- Section 4 : Etude de l'évolution du trait de côte par analyse diachronique des images vidéo et étude de l'impact des ouvrages côtiers sur la dynamique littorale.
- Section 5 : Etude de la dynamique des barres sableuses.
- Section 6 : Etude des surcotes de tempête par analyse des images vidéo couplée à des modélisations numériques de propagation de houle.
- Section 7 : Etude de la fréquentation des plages.
- Section 8 : Conclusion.
- Section 9 : Perspective

2. PRESENTATION DU SITE D'ETUDE

2.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE

En Méditerranée française, la plupart des stations balnéaires du littoral du Languedoc-Roussillon (le Grau du Roi, la Grande-Motte, Palavas, Valras, etc.) ont été construites à proximité ou sur le cordon dunaire dont la position naturelle, avant aménagement, évoluait au gré de l'érosion marine et du transport éolien. La tendance actuelle au recul de la côte oblige donc gestionnaires et aménageurs à lutter en se protégeant (digues, épis, brise-lames, rechargements,...). L'érosion côtière est ainsi devenue un enjeu d'aménagement qui ne cesse de s'amplifier avec la pression démographique (11000 à 12000 personnes attendues par km de côte méditerranéenne à l'horizon 2025 contre 5700 à 6600 en 2000).

La station balnéaire de Valras-Plage est située à l'Est du département de l'Hérault. Créée au début du XX^{ème} siècle, elle a connu un net essor à partir de la décennie 1960-1970, en liaison avec l'aménagement touristique des rivages du Languedoc-Roussillon (Mission Racine). Elle s'est développée au Sud-Ouest de l'embouchure de l'Orb, en bordure d'une large plage de sable fin longue de 2 km (Figure 1).



Figure 1 : Situation géographique du littoral de Valras-Plage.

2.2. CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE

La plage de Valras fait partie de l'unité géographique qui s'étend sur un linéaire de 63 km du Cap Leucate au Cap d'Agde, et plus particulièrement de la cellule sédimentaire E21 qui s'étend sur 6 km du Grau de Vendres à l'embouchure de l'Orb.

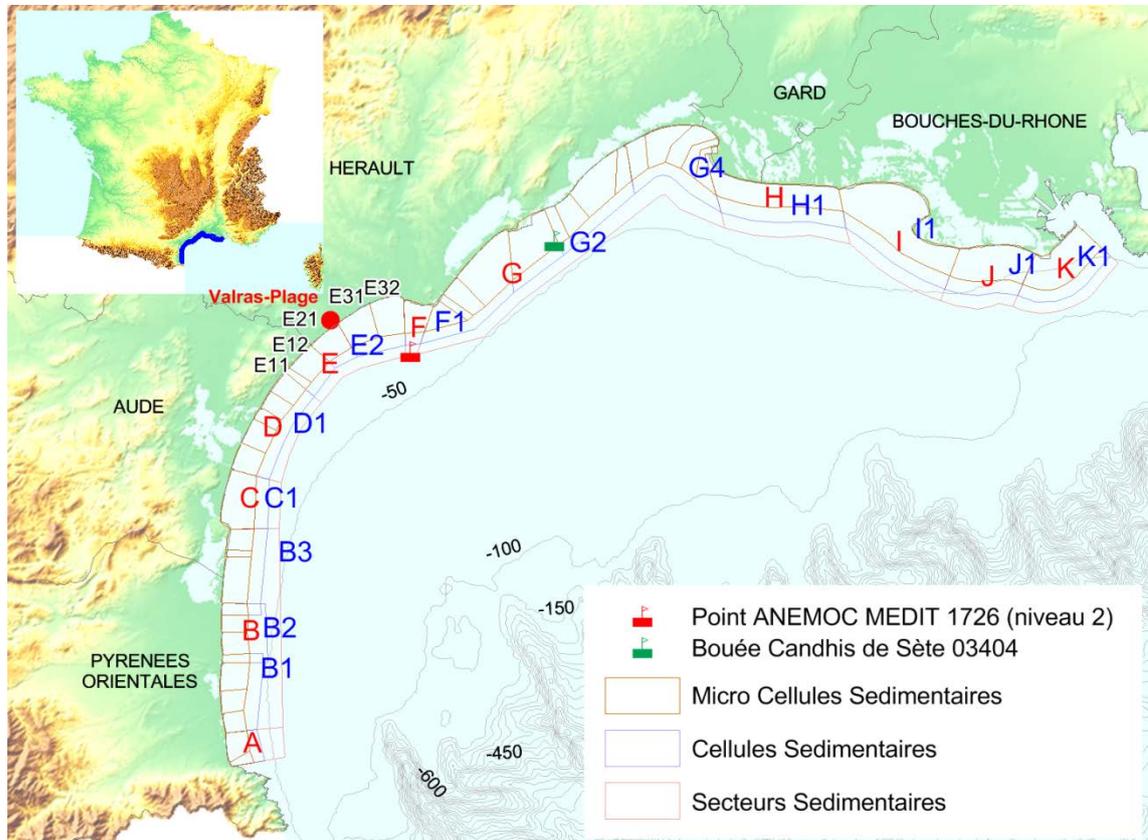


Figure 2. Cellules sédimentaires

Sur le plan morphologique, les plages de cette cellule sont bordées, à l'état naturel, par une avant dune qui peut atteindre 6 m de haut. Toutefois, à Valras-Plage, cette avant dune est aujourd'hui totalement arasée par l'urbanisation. La pente moyenne de la plage émergée est faible, comprise selon les endroits et les saisons entre 2 et 4 % et la granulométrie du matériel est généralement assez fine : à Valras, le grain médian varie entre 0,35 et 0,42 mm.

Enfin, l'avant plage a une pente moyenne de l'ordre de 1 %. Elle comporte trois barres pré-littorales situées entre 2 et 8 m de profondeur dont la morphologie est festonnée, à l'exception de la barre externe, qui est rectiligne.

2.3. AGENTS METEO-MARINS

2.3.1. Le vent

Les grands vents qui affectent le Languedoc-Roussillon sont le mistral, la tramontane, le marin et l'autan. Le mistral et la tramontane sont des vents d'origines similaires : leur déclenchement est lié à la présence d'un anticyclone sur le proche Atlantique, prolongement de celui des Açores, induisant un flux de Nord-Ouest à Nord-Est sur la France, et créant une dépression sur le golfe de Gênes. Cette situation engendre des flux de masse d'air froid canalisés par le relief (couloir rhodanien pour le mistral et les Pyrénées pour la tramontane) qui provoque un important renforcement. Très souvent, la tramontane se déclenche avant le mistral. Elle est orientée au Nord-Ouest sur l'Hérault. Elle se renforce sur l'Aude où elle prend une composante Ouest plus marquée.

Les dépressions sur le golfe du Lion provoquent l'établissement d'un régime de marin sur le Languedoc-Roussillon. Vent assez fort à fort, venant de la Méditerranée, il est très humide, doux et souffle sur l'ensemble de la région, de secteur Sud-Est dominant (13 % de vents du 120° au 160° à Montpellier Fréjorgues). Les zones littorales sont sous l'influence de brises marines de vitesses modérées qui induisent une humidité de l'air plus importante et tempèrent les fortes chaleurs estivales..

Un traitement de séries statistiques de vents de 1949 à 1998 enregistrées à Sète permet de dégager une individualisation selon trois secteurs (figures 14 et 15) :

- Des flux de NW avec pour vent dominant la Tramontane (froid et sec de secteur 300 à 340). Ce vent violent représente 36% des observations à Sète avec une résultante orientée au NNW. Il peut atteindre 135 à 153 km/h lors des phénomènes paroxysmaux.
- Des flux de NE avec le Mistral (20 à 30) pouvant atteindre 100 km/h à Sète. Il représente 15% des vents de terre sur le secteur d'étude.
- Des flux de SE, dont le marin (120 à 140) représente 15% des observations. Ce vent, chaud et humide, peut soulever des mers fortes en se conjuguant avec des houles venues du large.

Les vents de terre sont constants sur l'ensemble de l'année climatique (50% des observations). Ces vents s'opposent au vent marin généralement plus faible en fréquence et en intensité.

Azimut	2 à 4 m/s	5 à 8 m/s	> 8 m/s	total
20	1,25	1,59	1	3,85
40	1,72	2,85	0,82	5,4
60	2,2	3,73	1,24	7,19
80	2,26	3,08	0,68	6,03
100	1,76	2,21	0,79	4,77
120	2,29	2,88	2,1	7,28
140	0,37	0,46	0,27	1,12
160	0,96	1,03	0,65	2,66
180	1,26	1,18	0,58	3,03
200	1,26	1,42	0,22	2,91
220	1,08	1,56	0,52	3,16
240	1,11	1,27	0,15	2,54
260	1,06	1,56	0,52	3,16
280	1,14	2,07	1,57	4,79
300	1,18	4,15	4,42	9,77
320	1,49	5,51	8,42	15,43
340	1,42	3,1	4,13	8,66
360	1,15	1,88	1,72	4,76
Total	25,06	41,64	29,59	96,29

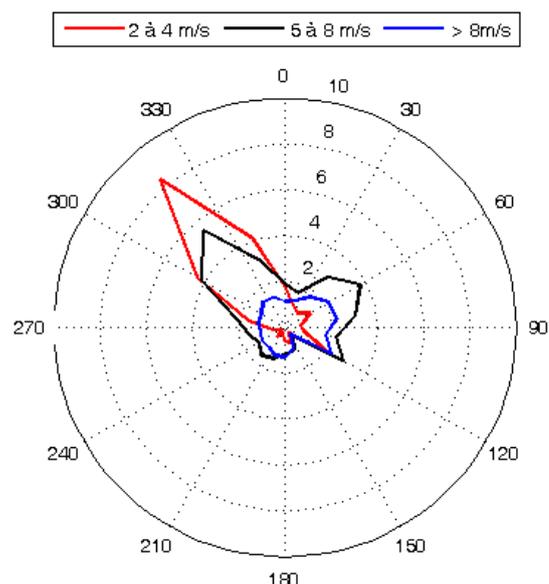


Figure 3. Statistiques de vents de 1949 à 1998 enregistrées à Sète

2.3.2. Niveau d'eau

2.3.2.1. Marée astronomique

Dans le Golfe du Lion, la marée est de type micro-tidale semi-diurne à inégalité diurne. Les Références Altimétrique Maritimes (SHOM 2012) donnent les caractéristiques de la marée aux ports de Sète et de Gruissan.

Tableau 1. Références Altimétriques Maritimes pour les sites de Gruissan et Sète (SHOM 2012)

Port	PHMA (NGF)	NM (NGF)	PBMA (NGF)
Gruissan	0.91 m	0.68 m	0.47 m
Sète	0.77 m	0.53 m	0.33 m

PHMA : niveau de plus haute mer astronomique / NM : niveau moyen / PBMA : niveau de plus basse mer astronomique

2.3.2.2. Surcote de tempête

Le phénomène de surcote consiste en une variation locale et temporaire du niveau de la mer provoquée par les variations du vent et de la pression atmosphérique. Les analyses réalisées par le CETE Méditerranée en 2010 au niveau du marégraphe du port de référence de Sète donnent les informations suivantes sur les surcotes (Tableau ci-dessous).

Tableau 2. Estimation des niveaux marins maximaux instantanés au niveau du marégraphe de Sète (cm NGF)

Période de retour	Surcote quasi-instantanée	Intervalle de confiance à 95 %	Intervalle de confiance à 70 %
1 an	85 cm	75 cm – 96 cm	80 cm – 89 cm
5 ans	105 cm	95 cm – 135 cm	99 cm – 116 cm
10 ans	114 cm	101 cm – 154 cm	107 cm – 128 cm
20 ans	123 cm	108 cm – 174 cm	114 cm – 140 cm
50 ans	135 cm	116 cm – 200 cm	123 cm – 157 cm
100 ans	144 cm	122 cm – 219 cm	130 cm – 170 cm

Ces résultats sont basés sur l'analyse des maximums annuels de niveaux marins quasi-instantanés. La figure ci-dessous présente l'ajustement de Gumbel des maximums annuels calendaires (Nb d'année : 14 ans). Le maximum mesuré est de 131 cm le 16/12/1997 et correspond à une période de retour de 35 ans.

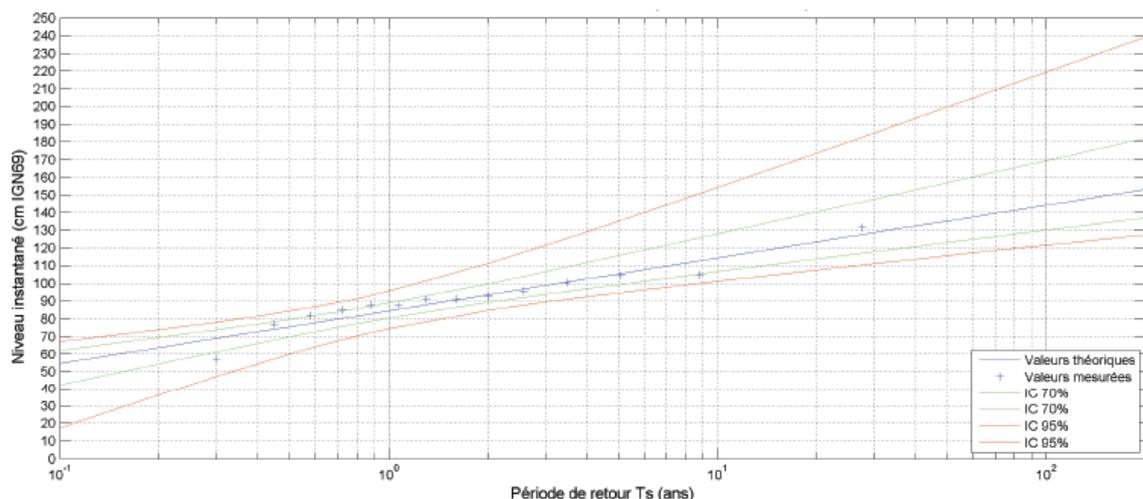


Figure 4. Ajustement de Gumbel des maximums annuels calendaires à Sète

2.3.3. Les vagues

2.3.3.1. Climat général

Les données A.N.E.M.O.C. (Atlas Numérique d'Etats de mer Océanique et Côtier) au droit de Valras (Point MEDIT 1726) permettent de caractériser les conditions d'états de mer à une profondeur d'environ 30m. Cette base de données a été construite à partir de simulations rétrospectives (hindcast) sur une période de 30 ans (du 01/01/1979 au 31/12/2008) avec le logiciel de modélisation des états de mer TOMAWAC, développé par EDF - LNHE avec le soutien du CETMEF.

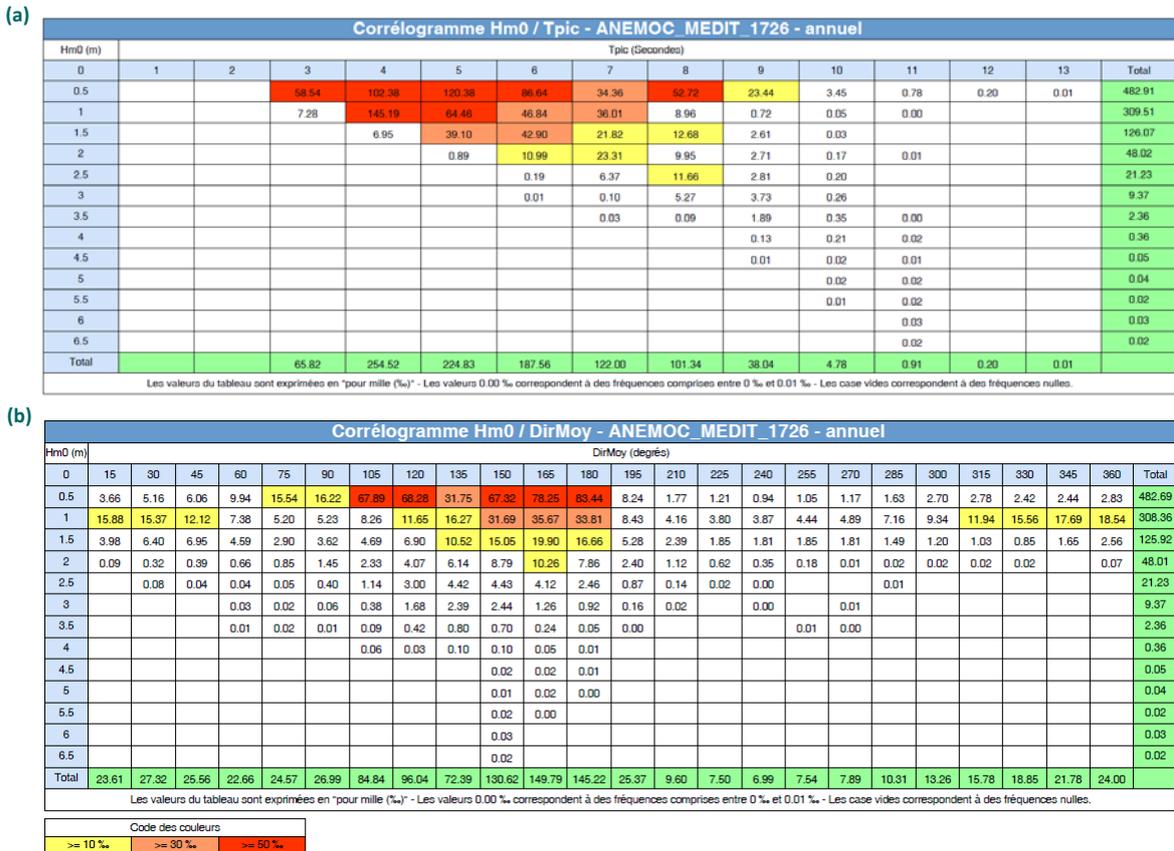


Figure 5. Corrélogramme Hs / Tp (a) et Hs / Dirp (b). Données ANEMOC MEDIT 1726.

Les figures 5a et 5b, qui représentent la probabilité d'occurrence des couples Hs¹/ Tp² et des couples Hs / Dirp³, met en évidence trois grands types d'états de mer :

- Les houles résiduelles faiblement énergétiques (Hs < 1m) de secteur Est à Sud qui sont les plus fréquentes.
- Les houles de vents de terre de direction Ouest à Nord-Est, assez fréquentes mais de faibles amplitudes (Hs < 1 m et Tp < 5s) en raison du fetch limité.
- Les houles énergétiques (Hs > 1,5 et Tp >7s) de secteur Sud à Sud-Est. Ces états de mer sont plus rares et liés aux vents marins soutenus à forts à l'origine des tempêtes les plus agressives.

¹ Hs : Hauteur significative des vagues (m)

² Tp : Période de pic (s)

³ Dirp : Direction de pic (°)

2.3.3.2. Houles extrêmes

Les données A.N.E.M.O.C. ne fournissent pas de régime extrême au point MEDIT 1726 et le point MEDIT_2809 est situé trop au large. Les ajustements statistiques des extrêmes du houlographe de Sète sont donc utilisés.

Le tableau ci-dessous présente les statistiques de houles extrêmes calculées sur un échantillon d'environ 5 ans (Du 16/02/2006 au 29/02/2012) avec deux lois d'ajustement :

- GPD (Generalized Pareto Distribution) avec un seuil de 2,75 m soit 42 événements sélectionnés (Figure 6.a)
- EXP (Exponentiel) avec un seuil de 3,25 m soit 22 événements sélectionnés (Figure 6.b)

Tableau 3. Estimation des houles extrêmes au houlographe de Sète

Période de retour	Borne inférieure de l'intervalle de confiance à 70% de H1/3 (en m)		Estimation H1/3 (en m)		Borne supérieure de l'intervalle de confiance à 70% de H1/3 (en m)	
	GPD	EXP	GPD	EXP	GPD	EXP
1 an	4,02	3,94	4,22	4,19	4,43	4,45
10 ans	4,76	5,15	5,21	5,72	5,66	6,28
30 ans	4,87	5,72	5,53	6,44	6,19	7,16
50 ans	4,89	5,99	5,65	6,78	6,41	7,58

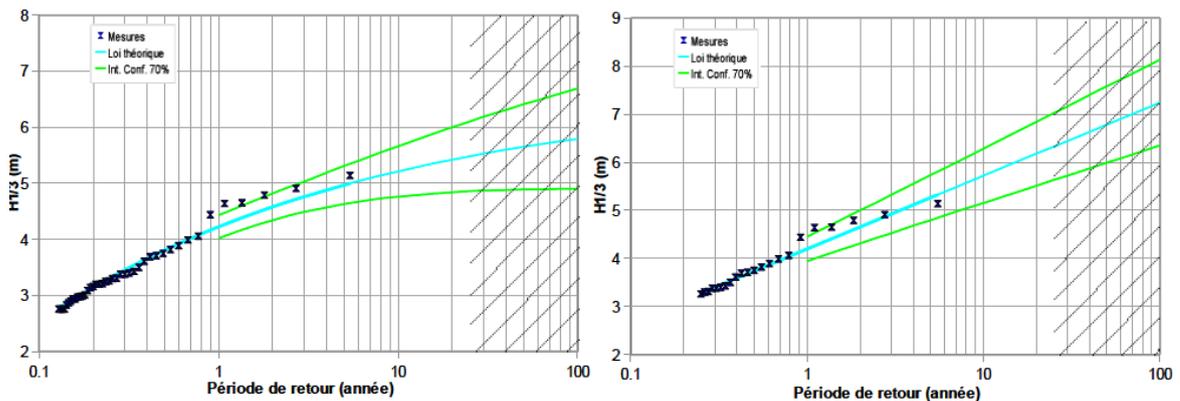


Figure 6. Ajustement graphique des statistiques de houles extrêmes avec la loi GPD (a) et exponentiel (b)

2.3.3.3. Propagation de la houle à la côte

Un modèle de propagation a été développé dans le cadre de la présente étude (Cf Rapport de phase 1).

Ce modèle, basé sur l'utilisation du code SWAN (Simulating WAVes Nearshore), permet d'obtenir des estimations précises sur les paramètres des vagues dans les zones côtières.

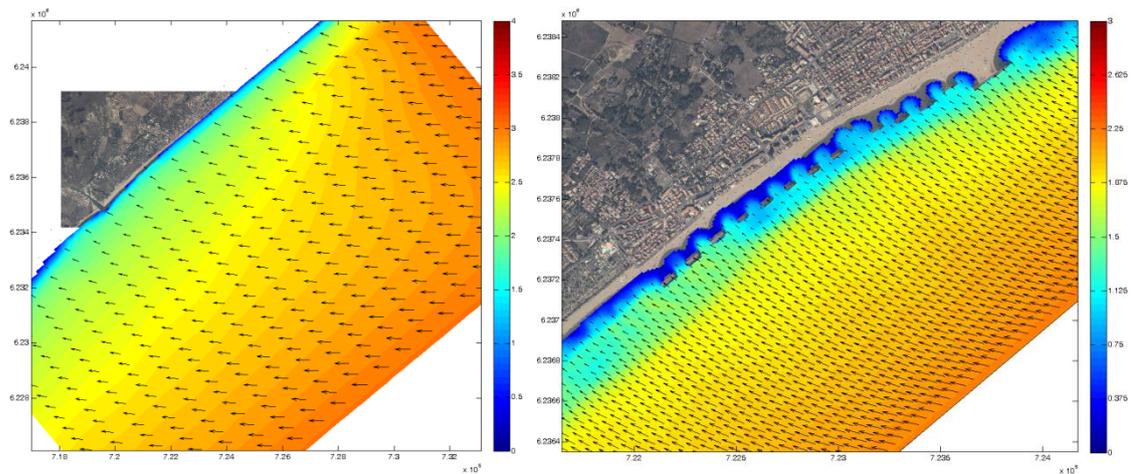
Les résultats montrent que les houles de secteur 120° à 180° sont moins amorties que les houles de provenance Est à Nord-Est ou Sud-Ouest (Tableau 4). Les simulations montrent que seules les houles de 150° arrivent avec une direction frontale.

Les houles de provenance Est (Figure 7.a) ou Sud (Figure 7.b) ne s'alignent pas complètement et engendrent respectivement du transit littoral Est-Ouest ou Ouest-Est.

Tableau 4. Caractéristiques des conditions d'agitation imposées aux frontières du modèle « Père » pour les différents « runs »

Conditions au large		Conditions à la côte	
Hs (m)	Dp (°)	Hs (m)	Dir (°)
3	60	1,32	117
3	90	1,61	125
3	120	1,71	135
3	150	1,75	145
3	180	1,68	154
3	210	1,46	162

a) Direction incidence de la houle au large : $Dp = 90^\circ$



b) Direction incidence de la houle au large : $Dp = 210^\circ$

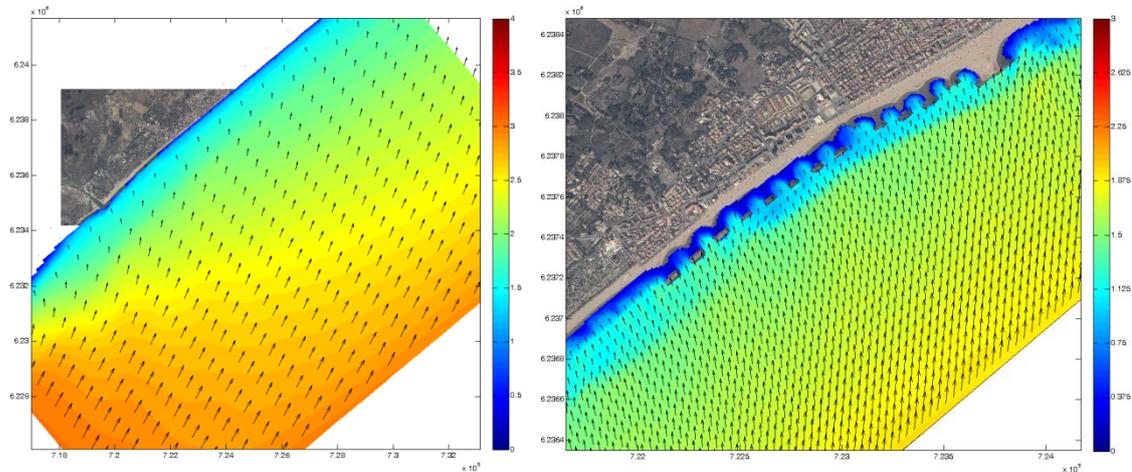


Figure 7. Plan de propagation de houle pour différentes directions d'incidence

2.4. PROBLEMATIQUES D'EROSION DU LITTORAL

Dans ce contexte morphodynamique, la plage de Valras n'a présenté aucun signe particulier de fragilité jusqu'aux 30 dernières années. Elle s'est même fortement engraisée entre 1935 et 1954 (jusqu'à 50 m de progradation pour un gain total estimé à 55.000 m², cf. DURAND, 1999), sous l'influence des apports de la crue cinquantennale de l'Orb en Décembre 1953. Par la suite, elle est restée à peu près stable jusqu'en 1968 (6000 m² de progradation entre 1954 et 1968). Sur l'ensemble de la période 1935-1968, la plage de Valras a donc enregistré une nette accrétion (61.000 m² au total).

En revanche, depuis cette époque, la plage est en très net recul puisque 82.000 m² ont été perdus entre 1968 et 1998. La recrudescence des fortes tempêtes depuis la fin des années 70 et la réduction probable des apports fluviaux en raison de l'équipement des fleuves de la région en barrage et en extraction de granulat dans leur lit, ne peuvent expliquer à eux seuls la déstabilisation du littoral observée au cours de ces 40 dernières années (DURANT, 2001).



Figure 8. Tempête à Valras-Plage

2.4.1. Aménagement de l'embouchure de l'Orb

Il semble que le processus de déstabilisation de la plage coïncide avec les travaux réalisés au débouché de l'Orb à partir du milieu des années soixante. Dans un premier temps, la construction en 1965 d'une jetée, à l'Est de l'embouchure du fleuve, s'est traduite par une forte progradation de la plage immédiatement au Nord-Est (Figure 9b).

Cette progradation, observable entre 1954 et 1968, témoigne de l'interception par la jetée d'une partie du transit sédimentaire dominant vers le Sud-Ouest. Toutefois, la déstabilisation du littoral urbanisé de Valras ne s'est manifestée que quelques années plus tard. Elle apparaît entre 1968 et 1981, période durant laquelle les jetées ont été allongées, en particulier la jetée Ouest, qui existait déjà en 1935. Ces travaux ont été effectués afin d'éviter l'ensablement du chenal d'entrée du port de plaisance édifié en 1970, tout en sécurisant son accès par mer agitée.

Les jetées de l'Orb présentent donc un double inconvénient. Par leur longueur (respectivement 300 et 400 m pour les jetées Est et Ouest), elles interceptent une bonne partie du transit dominant vers le Sud-Ouest. Par leur orientation, elles dirigent les apports de l'Orb dans le sens contraire à ce transit. Lorsque le matériau est repris par la dérive, une partie va s'accumuler contre la jetée Est, augmentant ainsi le déficit sédimentaire des plages de la zone urbanisée.

C'est pourquoi l'érosion de la plage urbaine a été rapidement augmentée (Figure 9c). A 400 m environ au Sud-Ouest de l'Orb, le recul dépasse déjà 55 m en 1981 par rapport à l'état en 1968 (soit 4,2 m par an), dont 24 m sur la seule période 1977-1981 (soit 6 m par an). Il décroît en direction du Sud-Ouest, mais en 1981, plus de 2000 m de linéaire côtier sont d'ores et déjà touchés et la surface totale de plage perdue approche 50.000 m² par rapport à 1968.

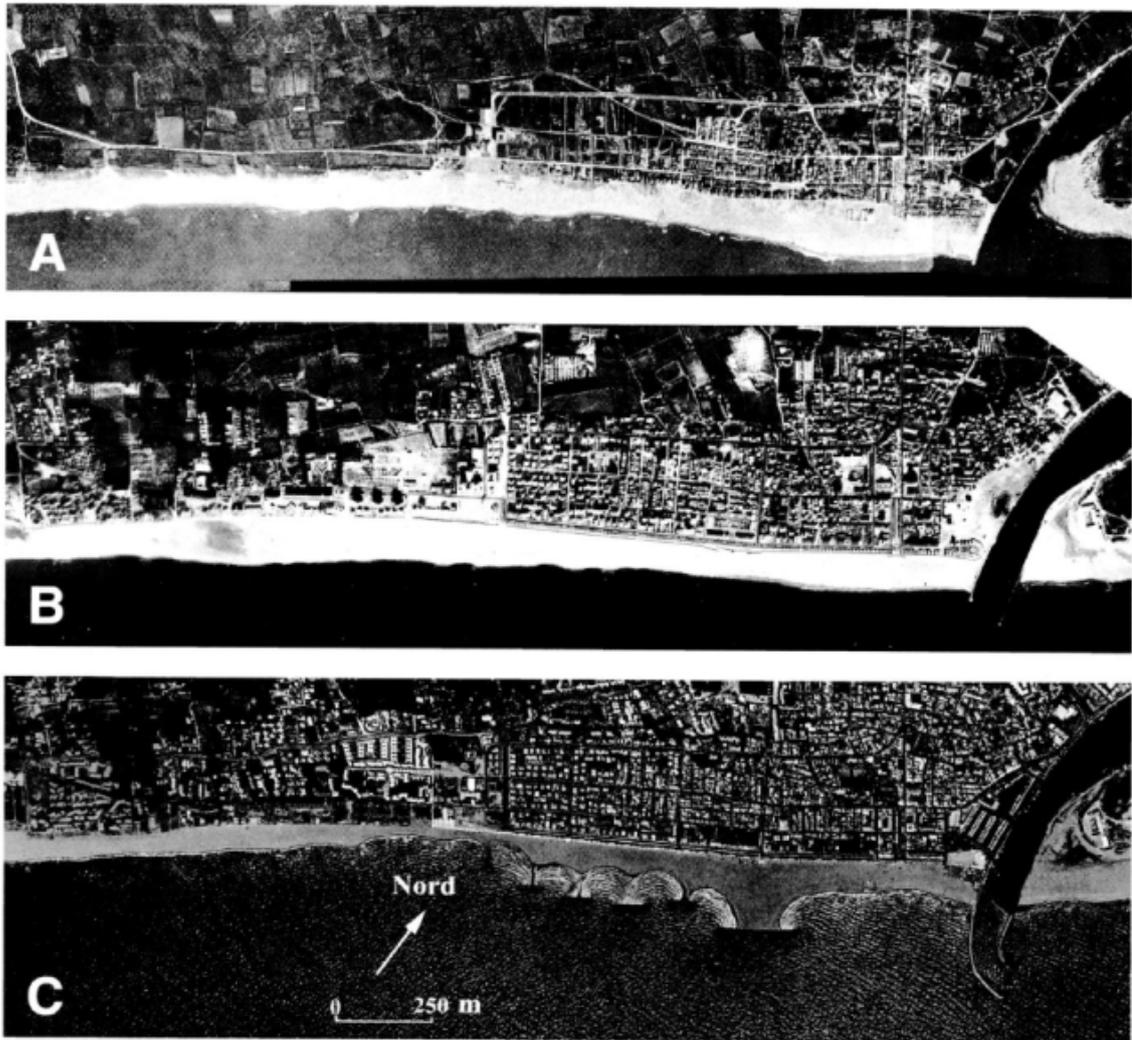


Figure 9 : Vues aériennes de Valras-Plage en 1935 (A), 1968 (B), et 1996 (C). (DURANT, 2001)

2.4.2. Implantation des structures de protection

Suite à la violente tempête de novembre 1982 (tempête cinquantennale) qui engendra des dégâts considérables sur le littoral de Valras-Plage (absence de plage sèche sur environ 400 m à l'Ouest de l'Orb, et inondation partielle de la zone urbanisée) un premier brise-lames de 200 m de long a été implanté par 6 m de fond et achevé au début de l'année 1985.

Dès 1989, on note une accélération du recul du trait de côte au Sud-Ouest de la zone du premier brise-lames (jusqu'à 45 m de recul de 1981 à 1989, soit 5,6 m par an, contre 27 m, soit 2,1 m par an, de 1968 à 1981). La protection localisée assurée par le brise-lames semble avoir eu pour impact une accélération de l'érosion en aval du sens de la dérive littorale, nécessitant la mise en place d'autres ouvrages.

Au début de 1992, quatre nouveaux brise-lames sont construits pour protéger le secteur de plage situé en aval du premier ouvrage. De façon similaire, les nouveaux ouvrages accélèrent le recul en aval de la dérive, qui doit à son tour être protégée par un épi transversal, édifié en 1995, ce qui repousse le point d'érosion maximale encore un peu plus vers le Sud-Ouest. Ainsi, environ 200 m au Sud-Ouest de l'épi, on enregistre 60 m de recul de 1992 à 1998, soit 10 m par an. À cet endroit, la plage ne mesurait plus que 30 m en 1998 contre 130 m en 1968. Désormais, le recul a atteint la limite communale Valras-Vendres (12 m de recul de 1986 à 1992 et 29 m de 1992 à 1996). Deux rechargements en sable ont été effectués en 1992 (50.000 m³) et en 1995 (22.500 m³) pour accompagner la mise en place des derniers ouvrages.

Au cours du mois de Décembre 1997, une tempête vicennale fait reculer le trait de côte de 10 m entre l'épi transversal et la limite communale Valras-Vendres. En outre, la zone urbaine a été complètement inondée sur plusieurs dizaines de mètres de largeur, particulièrement dans la zone de recul maximal, immédiatement au Sud-Ouest de l'épi.

Ainsi, en mars 1999, cinq nouveaux brise-lames ont été construits au Sud-Ouest du casino et la plage a été rechargée (55.000 m³). Au début des années 2000, tout le linéaire côtier de la zone urbanisée de Valras se trouve protégé par des ouvrages lourds, à l'exception des 500 derniers mètres avant la limite communale Valras-Vendres. Dans ce dernier secteur, on a en effet choisi de reconstituer de manière artificielle un cordon dunaire et on y a implanté deux rangées de ganivelles, dans l'espoir que cet ouvrage s'engraisse dans l'avenir et constitue un rempart protecteur.

Plus récemment, 3 nouveaux brise-lames ont été construits au droit du cordon dunaire artificiel en 2007 et 2008, permettant ainsi une protection de l'intégralité du littoral de la commune de Valras-Plage à l'Ouest du débouché de l'Orb. Ces protections ont été complétées par un rechargement de 80.000 m³ qui s'est achevé au printemps 2008. Les sables provenaient du dragage des petits fonds au droit du domaine des Orpellières sur la zone d'accumulation contre la digue Est de l'Orb.

Enfin, alors que l'érosion se déplace sur la commune voisine de Vendres, deux digues sous-marines (enrochements et géotextile) sont implantées en 2008 et 2009, au Sud-Ouest de la commune de Valras-Plage. Les objectifs poursuivis sont d'une part, limiter les érosions de la plage au droit de l'ouvrage par réduction à la fois du transport longitudinal (par écrêtement de la houle) et transversal (par blocage physique du charriage du sable) et, d'autre part, maintenir une part conséquente du transit littoral pour alimenter le littoral situé plus à l'Ouest.



Figure 10 : Descriptif de l'implantation des structures de protection côtière sur le littoral de Valras-Plage. (Orthophotographie IGN)

3. PRESENTATION DES DONNEES DISPONIBLES

3.1. NIVEAU D'EAU

Les variations de niveau d'eau, entre le mois de Janvier 2008 et de Septembre 2014, ont été récupérées à partir du marégraphe de Sète sur la base de données REFMAR du SHOM (<http://refmar.shom.fr>). Les données sont représentées en Figure 11.

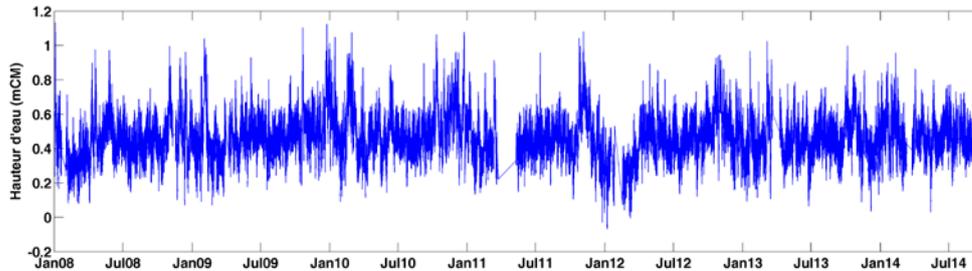


Figure 11 : Variations du niveau d'eau enregistrées au marégraphe de Sète entre Janvier 2008 et Septembre 2014 (REFMAR-SHOM).

Les hauteurs d'eau oscillent entre un minimum de -0.07 m CM et un maximum de 1.13 m CM. La hauteur d'eau moyenne sur le jeu de données est de 0.46 m CM avec une déviation standard de 0.13 m.

A noter une absence de mesure pour les périodes du 20 au 31 janvier 2008, du 10 au 17 novembre 2008, du 23 mars au 10 mai 2011 et du 26 janvier au 16 février 2012

3.2. HOULE

Les données de houle utilisées dans le cadre de cette étude sont issues du houlographe de Sète (DATAWELL MKIII) appartenant au réseau de mesures de houle du Golfe du Lion dont la DREAL Languedoc-Roussillon est maître d'ouvrage. Sa position est la suivante : 42°22.290'N et 3°46.777'E. La Figure 12 représente les données du houlographe entre le mois de Janvier 2008 et Septembre 2014. A noter une absence conséquente de données entre le mois de mai et de septembre 2009.

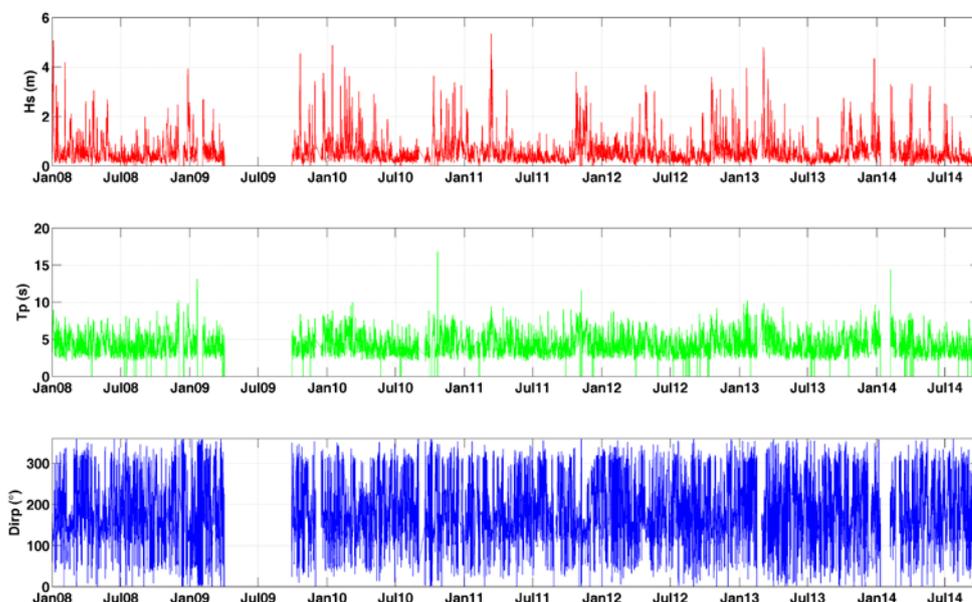


Figure 12 : Données issues du houlographe de Sète (DREAL Languedoc-Roussillon) entre Janvier 2008 et Septembre 2014.

3.3. TOPOGRAPHIE ET BATHYMETRIE

3.3.1. Levé LIDAR de la DREAL LR

La Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et Logement du Languedoc-Roussillon a réalisé en 2009 une campagne d'acquisition de données en utilisant le LIDAR bathymétrique sur toute la côte sableuse du Golfe du Lion.

Le levé a porté sur la côte sableuse comprise entre la plage du Racou à Argelès-sur-Mer et le débouché du Petit-Rhône (Figure 13). En mer, la profondeur -20 m a été atteinte dans la majorité des cas. A terre, le levé a couvert l'arrière du cordon dunaire. Au total, la superficie couverte est de 300 km² avec une résolution de 5 m par 5 m.

Ces données LIDAR sont utilisées pour générer le Modèle Numérique de Terrain dans la zone côtière entre -20 m et +5 m NGF.

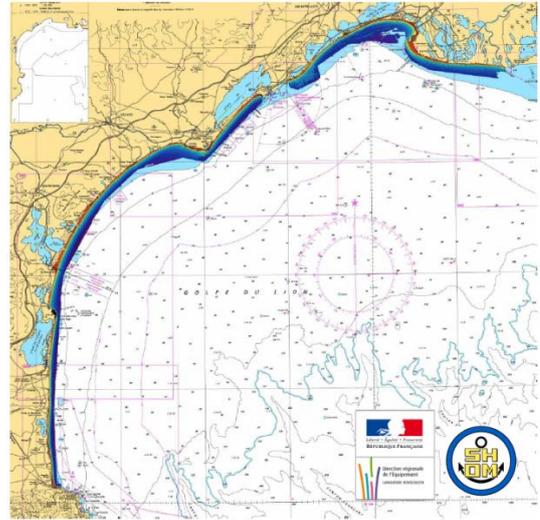


Figure 13. Emprise du levé Lidar de 2009

3.3.2. Données Etopo1

Etopo1 est une base de données topographiques et bathymétriques globales avec une résolution de 1 minute. Produites par la NOAA (National Geophysical Data Center), ces données sont accessibles librement sur internet.

Elles sont ici utilisées pour générer le Modèle Numérique de Terrain (MNT) au-delà des profondeurs atteintes par le LIDAR.



Figure 14. Données Etopo1 Europe / Méditerranée

3.4. IMAGES VIDEO

Un système de suivi vidéo CASAGEC a été installé sur Valras-Plage en Novembre 2007 dans le cadre du projet Européen INTERREG BEACHMED-e piloté par le Conseil Général de l'Hérault.

La station vidéo, implantée à une altitude de 47 m au sommet d'une tour résidentielle située à 1,5 km à l'Ouest de l'Orb (Figure ci-dessous), a vu sa configuration évoluer en 2009.



Figure 15 : Localisation de la station vidéo de Valras-Plage

3.4.1. Configuration n°1 : 2007, 2008, début 2009

Dans un premier temps, la station était composée de 6 caméras (Figure 16).

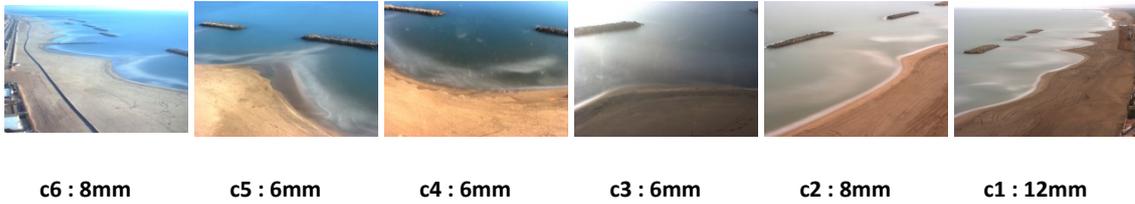


Figure 16 : Vues des 6 caméras (1ère configuration 2007, 2008, début 2009)

Les Figure 17(a) et Figure 17(b) représentent respectivement les résolutions dans les directions transversales et longitudinales de la station vidéo. Dans cette configuration on obtient une résolution transversale inférieure à 1m et une résolution longitudinale inférieure à 30m le long du trait de côte.

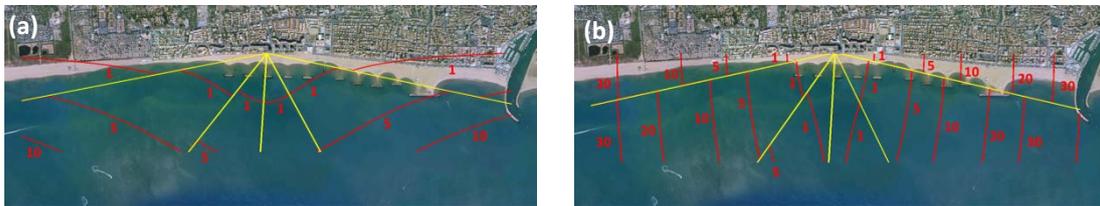


Figure 17 : Cartes de résolution transversale (a) et longitudinale (b) de la station vidéo de Valras-Plage, 1ère configuration

La station est opérationnelle à partir du 30 novembre 2007 mais présente des défaillances au cours de l'année 2008 empêchant l'acquisition de données (Juillet, Aout, Octobre, Novembre, Décembre). Cette configuration permet une observation de quasiment tout le linéaire côtier allant de l'embouchure de l'Orb à l'embouchure de l'Aude.

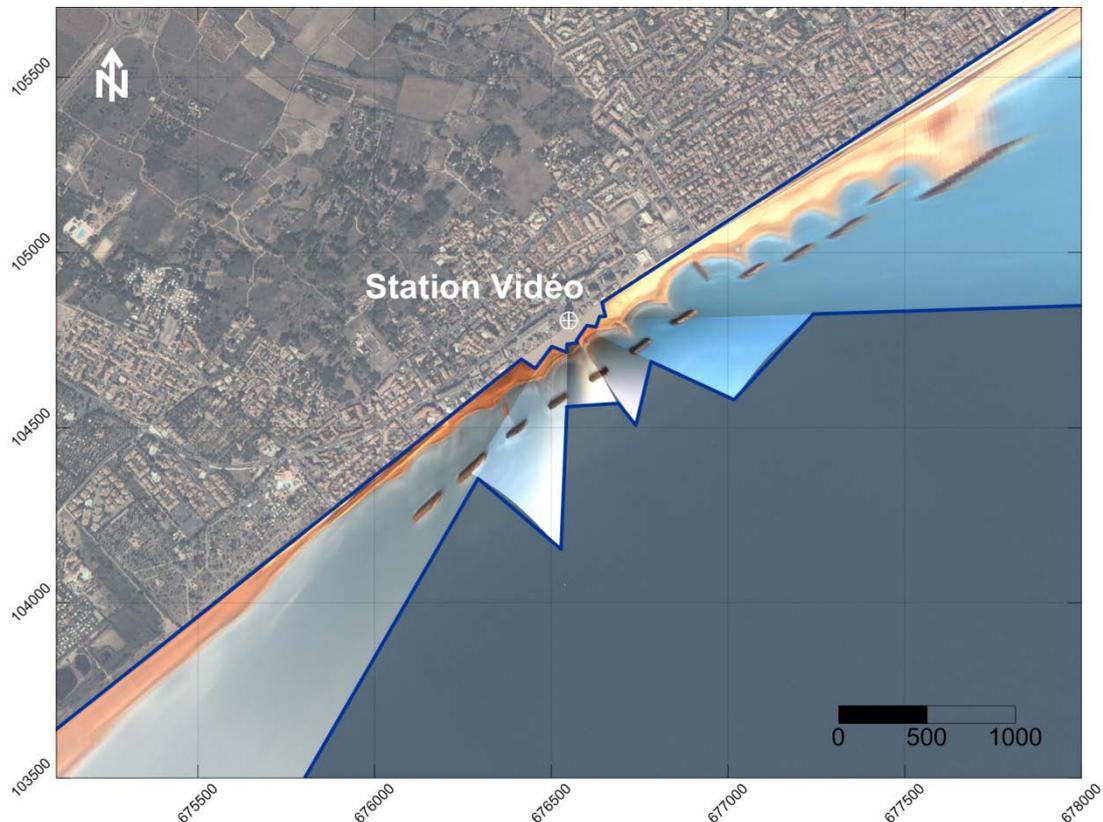


Figure 18 : Intégration SIG d'une ortho-photographie de Valras Plage, configuration 1

3.4.2. Configuration n°2 : 2009 à 2014

La 2^{ème} configuration de la station est composée de 4 caméras à partir du 21 janvier 2009. Les quatre caméras CCD sont orientées de la partie Ouest vers la partie Est de la plage et couvrent ainsi un linéaire côtier d'environ 3,5 km. Les caméras c2 et c4 sont des zooms des caméras c1 et c3.

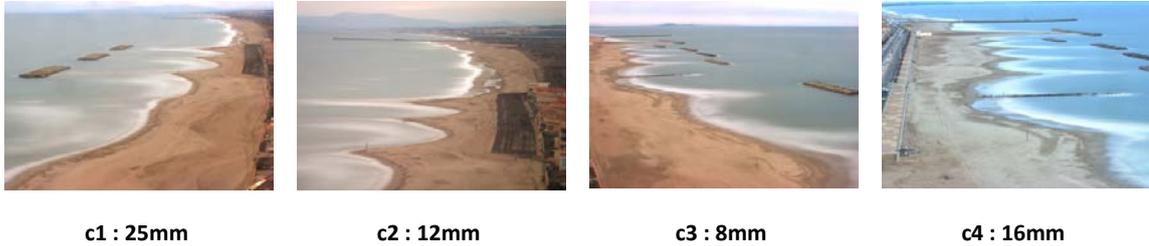


Figure 19 : Vues des 4 caméras (2^{ème} configuration, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013)

Dans cette configuration on obtient une résolution transversale inférieure à 1m et une résolution longitudinale inférieure à 20m le long du trait de côte (Figure 20 (a) et Figure 20(b)).



Figure 20 : Cartes de résolution transversale (a) et longitudinale (b) de la station vidéo de Valras-Plage, 2^{ème} configuration

La station est opérationnelle à partir du 21 janvier 2009. En 2010, une défaillance du PC entraîne un manque de données vidéo de Juin à Décembre. La station est de nouveau opérationnelle à partir du 1^{er} février 2011.

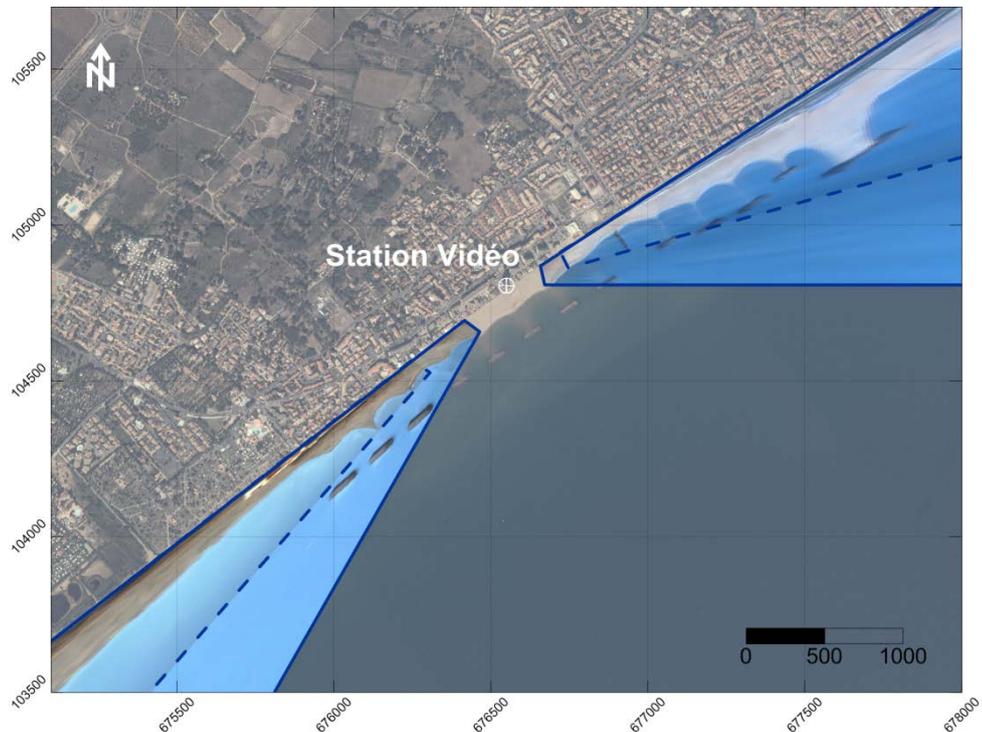


Figure 21 : Intégration SIG d'une ortho-photographie de Valras Plage, configuration 2

4.2. FILTRE DE LA BASE DE DONNEES

Dans le but de réaliser une analyse diachronique de l'évolution du trait de côte, la base de données des images vidéo a été filtrée en fonction des niveaux d'eau et des conditions de houle enregistrés par le marégraphe et le houlographe de Sète.

La hauteur de la surface peut être estimée par l'équation suivante :

$$Z_l = Z_0 + \eta_p + \eta_v + \eta_m + \eta_{SW}$$

où Z_0 est le niveau de marée, η_p l'effet barométrique inverse (pression atmosphérique), η_v l'effet du vent, η_m est l'élévation moyenne de la surface libre engendrée par le déferlement des vagues (set-up) et η_{SW} est le niveau maximum du jet de rive.

Z_0 , η_p et η_v sont directement renseignés par le marégraphe de Sète.

η_m et η_{SW} peuvent être renseignés par des équations paramétriques forcées par les hauteurs de houle mesurées à la bouée de Sète.

4.2.1. Niveau d'eau

Le niveau d'eau retenu pour réaliser l'analyse diachronique du trait de côte est de 0.45 m CM \pm 0.04 m.

Ce niveau d'eau correspond à la moyenne du niveau d'eau sur l'ensemble du set de données (2007-2014).

La pente au niveau du trait de côte est estimée à partir des données LIDAR 2009. La pente moyenne sur l'ensemble du domaine d'étude est d'approximativement 3 %. Ainsi, une différence de niveau d'eau de 8 cm engendre une variation transversale de position du trait de côte de \pm 1.3 m.

4.2.2. Condition de houle

Lors du déferlement des vagues à la côte, l'élévation du plan d'eau est modifiée. Afin de pouvoir isoler un maximum d'images vidéo, il est nécessaire de définir les conditions de houle limites permettant d'obtenir un set de données représentatif de la dynamique annuelle du trait de côte, tout en limitant au maximum les variations d'élévation du plan d'eau.

Il existe deux phénomènes engendrant une variation d'élévation du plan d'eau :

- Set-up : Dans la zone de déferlement, la hauteur significative des vagues diminue et on assiste à une élévation de la surface libre moyenne, plus communément appelée Set-up.
- Jet de rive : Le jet de rive est une nappe d'eau, d'épaisseur décroissante vers le haut, qui monte sur un rivage, sous l'impulsion que lui a donné une vague lors de son déferlement.

Ces deux phénomènes sont proportionnels à la hauteur et la période de la houle, ainsi qu'à la pente de la plage.

Les critères retenus pour réaliser le filtre de la base de données image en fonction des conditions d'agitation sont :

- une hauteur significative de houle inférieure ou égale à 0.6 m
- une période de houle inférieure ou égale à 5.5 s.

Ainsi pour une pente de 3%, le set-up est de l'ordre de 8 cm, et la hauteur du jet de rive est de 5 cm.

Au final la variation transversale de la ligne d'eau est de d'environ \pm 2.2 m.

4.2.3. Précision finale de la détection du trait de côte

La précision de la mesure de la position du trait de côte (position instantanée de la ligne d'eau) résulte donc de la somme de la variation transversale du plan d'eau en fonction du filtre de marée et de houle, à laquelle s'ajoute la résolution transversale du système vidéo. Le tableau ci-dessous synthétise l'ensemble des incertitudes et donne la précision résultante qui est de l'ordre de ± 4.5 m sur l'ensemble du trait de côte.

Tableau 5. Tableau de synthèse des incertitudes inhérentes à la détection de la ligne d'eau

Source d'incertitude	Incertainitude
Niveau d'eau (marée / Surcote ou décote)	± 1.3 m
Vagues (Set-up / Run-up)	± 2.2 m
Résolution transversale des images	± 1 m
Total	$\approx \pm 4.5$ m

4.2.4. Images filtrées

Les positions des différents traits de côte sont obtenues à partir d'un algorithme automatisé basé sur une technique de segmentation (MORICHON et al, 2007 ; DAILLOUX, 2008 ; RIHOUEY et al, 2008). Cet algorithme est appliqué à une région d'intérêt sélectionnée manuellement sur les images Timex (Figure ci-dessous).

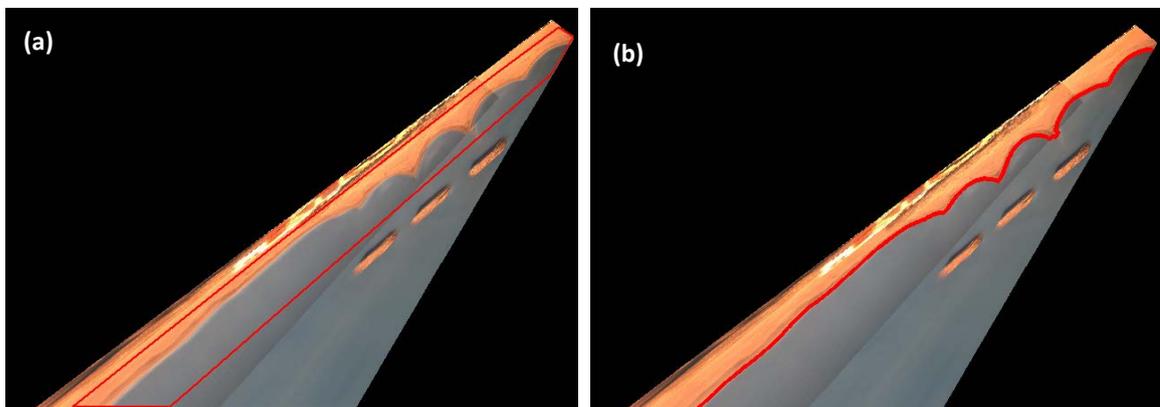


Figure 23 : a) Région d'Intérêt sélectionnée manuellement b) détection automatisée du trait de côte

En moyenne, 2 images par mois ont pu être filtrées selon les critères précisés ci-avant soit au total d'environ 160 traits de côte détectés à l'Est et à l'Ouest.

Par ailleurs la différence d'exposition entre les deux zones d'étude ne permet pas toujours d'obtenir l'information vidéo simultanément à l'Est et à l'Ouest du domaine.

4.3. METHODOLOGIE – ANALYSE FACTORIELLE (AFC)

Au regard du nombre important de données, l'utilisation d'une méthode statistique est requise pour appréhender les tendances d'évolution et mettre en évidence les morphologies significatives.

L'utilisation des méthodes d'Analyse Factorielle (AFC) pour l'étude de l'évolution morphologique des plages sableuses a vu le jour au milieu des années 70 (WINANT et al., 1975). De nombreux auteurs ont ensuite utilisé l'analyse factorielle pour analyser des séries temporelles de profils de différents types de plages (AUBREY, 1979 ; OSTROWSKI ET AL., 1990 ; PRUSZAK, 1993 ; WIJNBERG & TERWINDT, 1995 ; RIHOUEY, 2004, RIHOUEY, 2009, FAIRLEY, 2009).

Le principe de la méthode consiste à exprimer la position du trait de côte y par des combinaisons linéaires de produits de fonctions spatiales et de fonctions temporelles. Pour cela chaque trait de côte, mesuré à un instant t , est discrétisé en N_y distance transversale y situées à des positions longitudinales x régulières. Cela impose donc que la longueur des traits de côte soit constante.

Considérons un échantillon de N_t traits de côte comportant chacun N_y positions transversales y . Ainsi, l'objectif de l'analyse factorielle 1-D est d'exprimer les données sous la forme :

$$y(x,t) = \sum_p C_p(t) e_p(x)$$

où e_p sont les vecteurs propres de la matrice des corrélations A et C_p les modes temporels correspondants. Les coefficients de A sont donnés par :

$$a_{ij} = \frac{1}{N_t} \sum_{t=1}^{N_t} y(i,t) y(j,t)$$

A est une matrice $N_y * N_y$ symétrique réelle. Elle est donc diagonalisable dans \mathcal{R} , possède N_y valeurs propres λ_p avec $1 \leq p \leq N_y$ et les vecteurs propres correspondant aux valeurs propres λ_p satisfont l'équation matricielle :

$$A e_p = \lambda_p e_p$$

Un résultat important de cette diagonalisation est que la somme des valeurs propres est égale à la trace de la matrice A . Ainsi, chaque valeur propre représente un certain pourcentage de l'inertie des données initiales. De plus si λ_1 et $e_1(x)$ sont respectivement la plus grande valeur propre et son vecteur propre associé, la fonction $e_1(x) \sqrt{\lambda_1}$ représente la position moyenne de trait de côte, et s'ajuste au mieux à la matrice A au sens des moindres carrées :

$$\sum_{i,j} (a_{ij} - \lambda_1 e_1(i) e_1(j))^2 = \text{minimum}$$

Enfin, les coefficients C_p , ou modes propres temporels, sont donnés par :

$$C_p(t) = \sum_x h(x,t) e_p(x)$$

Dans le cas de l'exploitation des données de trait de côte de la station vidéo de Valras-Plage, les deux zones (Est et Ouest) sont traitées séparément en raison de l'hétérogénéité de l'échantillonnage temporelle.

La figure ci-dessous illustre les résultats obtenus par l'AFC sur les données vidéo de Valras-Plage.

Le premier mode spatial (Figure 24.a) représente la position moyenne du trait de côte au cours de la période d'étude. Le mode temporel (Figure 24.b) associé $C_1(t)$ représente les variations transversales de la morphologie moyenne du trait de côte.

Le second mode spatial (Figure 24.c) est lié aux zones où les variations du trait de côte sont les plus importantes (les tombolos) et à l'apparition de « beach-cups » sur la partie naturelle. Le mode temporel (Figure 24.d) associé $C_2(t)$ représente les phases de progradation / destruction des tombolos et des « beach-cups ».

Le troisième mode spatial (Figure 24.e) est également lié à la morphologie des tombolos et « beach-cups ». Le mode temporel associé (Figure 24.f) $C_3(t)$ représente les phases de progradation / destruction.

La Figure 24.g, qui représente la reconstruction du trait de côte par combinaison linéaire des modes de l'AFC à un instant t (points rouges sur les modes temporels), illustre la morphologie de la plage observée à cette date.

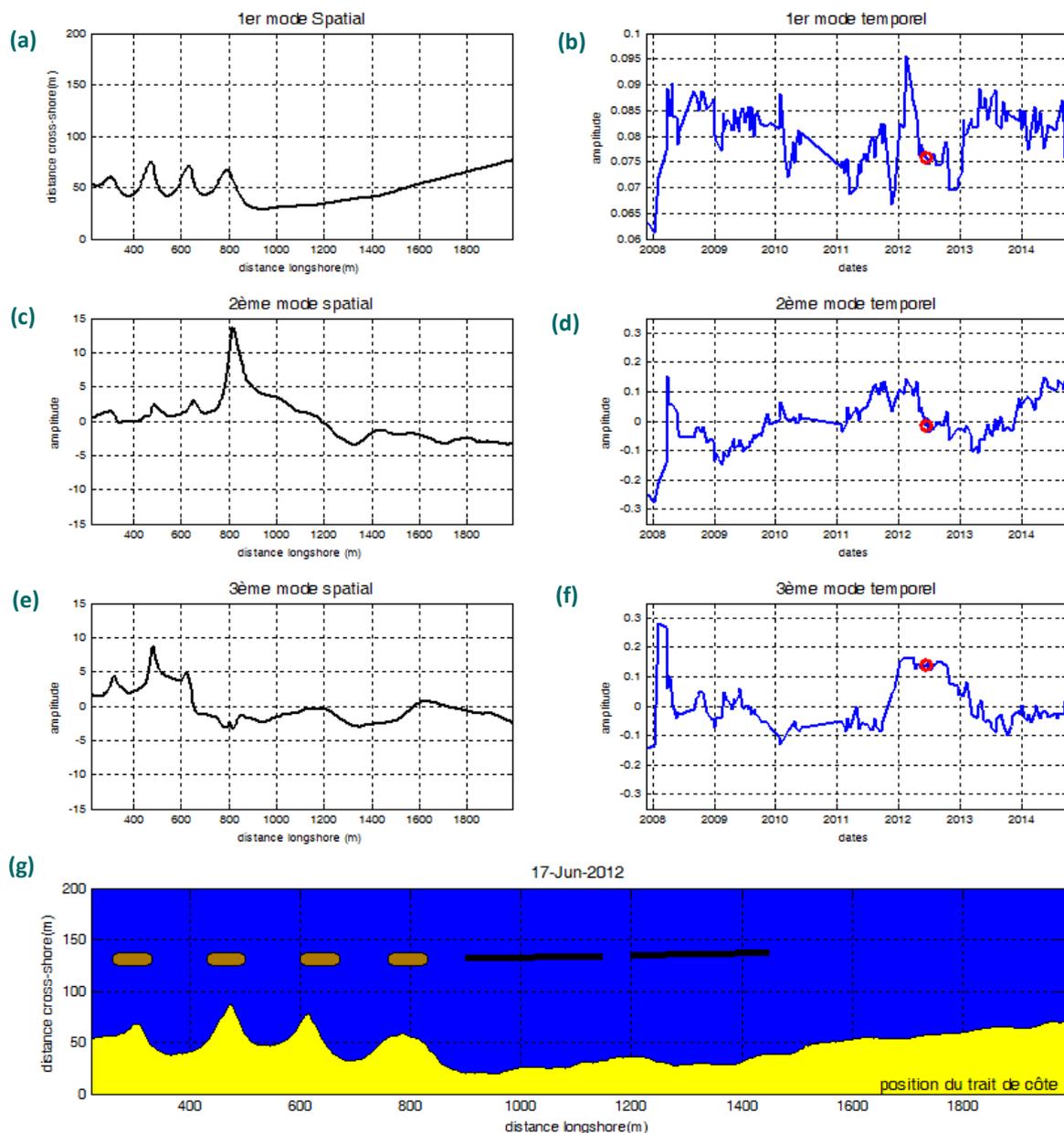


Figure 24. Exemple de résultats obtenus par l'AFC sur les données vidéo de Valras-Plage.

4.4. EVOLUTION DE LA POSITION DU TRAIT DE COTE – RESULTATS DE L'AFC

4.4.1. Littoral Est

4.4.1.1. Analyse des valeurs propres

Les 4 premières valeurs propres, qui représentent un certain pourcentage de l'inertie des données initiales, montrent que les quatre modes associés expliquent en moyenne 99,9 % de l'inertie des données initiales (Tableau 6). Le premier mode, qui représente la position moyenne du trait de côte au cours de la période d'étude, explique 98,5 % de l'inertie initiale.

Tableau 6. Inertie et variance expliquées par les modes issus de l'analyse factorielle 1-D de la zone Est

mode	Inertie (%)	Inertie cumulée (%)	Variance (%)	Variance cumulée (%)
1	98,5	98,5	61,7 15,3 10,3	61,7 77,0 87,3
2	0,89	99,4		
3	0,22	99,8		
4	0,15	99,9		

Les trois modes d'ordre supérieur, qui représentent les fluctuations autour de la position moyenne du trait de côte, représentent 87% des variations au cours de la période d'étude. Le second mode et le troisième mode prennent respectivement en compte 61 % et 15 % de la variance résiduelle. Enfin, le quatrième mode prend en compte 10 % de la variance résiduelle et ne sera pas étudié dans la suite de l'étude.

4.4.1.2. Analyse des modes propres

Le premier mode spatial, qui représente la position moyenne du trait de côte au cours de la période d'étude, met en évidence la présence de tombolos bien formés sur le littoral Est. Le mode temporel associé $C_1(t)$ représente les variations transversales de la morphologie moyenne du trait de côte.

Les fortes valeurs de $C_1(t)$ (Figure 26.a et d), correspondent à des périodes où la plage est en accretion (Figure 25.a et d). Inversement, les faibles valeurs de $C_1(t)$ (Figure 26.c et e) correspondent à des périodes où le trait de côte recule (Figure 25.c et e). On observe ainsi une alternance de phase d'avancée et de recul du trait de côte au gré des événements de tempête. Concernant l'évolution à long terme, si le trait de côte s'est révélé relativement stable entre 2007 et 2009, on observe une tendance nette à l'érosion à partir de 2010.

Les second et troisième modes spatiaux sont liés à la morphologie des tombolos et les modes temporels associés représentent les phases de progradation / destruction des tombolos.

Le second mode temporel traduit une évolution de la morphologie de la plage au cours de la période d'étude. Les valeurs positives de $C_2(t)$ jusqu'en 2010 (Figure 26.a et f) correspondent à des tombolos développés de façon homogène sur l'ensemble de domaine (Figure 25. a et f). Les valeurs négatives de $C_2(t)$ à partir de 2011 (Figure 26.c et e) correspondent à des tombolos moins développés à mesure que l'on se rapproche de l'épi (Figure 25. c et e). Ce changement de signe de $C_2(t)$ traduit donc également une tendance nette à l'érosion à partir de 2010, particulièrement marquée au niveau de l'épi.

Le troisième mode temporel est lié aux phases de progradation / destruction des tombolos. Les valeurs positives de $C_3(t)$ (Figure 26.d) correspondent à des périodes où les flèches de tombolos sont bien développées (Figure 25. d). Inversement, les valeurs négatives de $C_3(t)$ (Figure 26.b) correspondent à des périodes où les flèches de tombolos sont peu développées (Figure 25. b). La diminution de l'amplitude des variations de $C_3(t)$ au cours de la période d'étude traduit probablement la diminution du disponible sédimentaire nécessaire à la formation de tombolos bien développés.

a) 30 novembre 2007



b) 05 mars 2010



c) 4 avril 2014



d) 25 décembre 2008



e) 22 septembre 2014



f) 03 juin 2010



Figure 25. Illustration de la morphologie de la plage sur le littoral Est de Valras-Plage

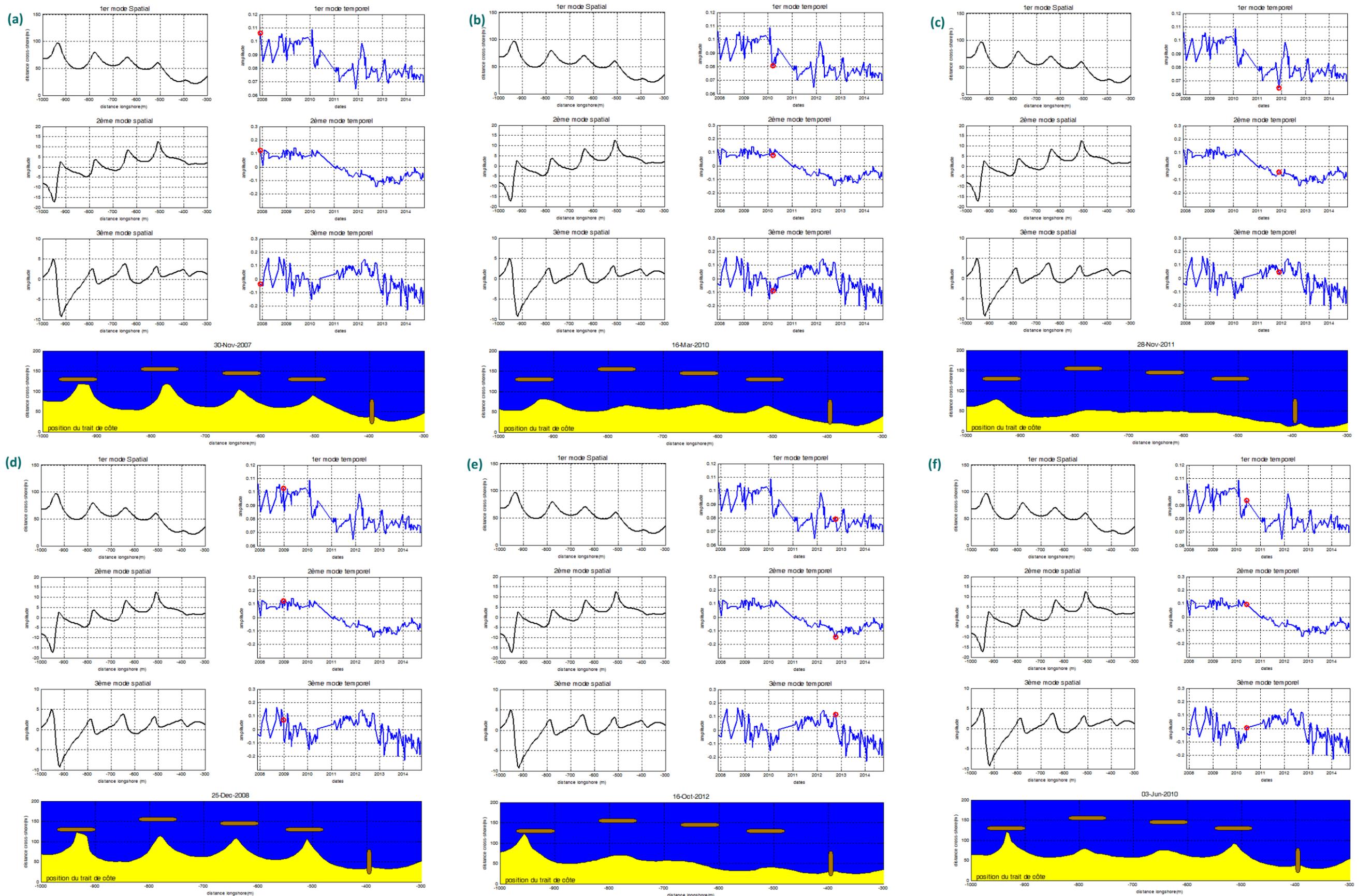


Figure 1. Résultats de l'AFC sur la partie Est du littoral de Valras-Plage

4.4.2. Littoral Ouest

4.4.2.1. Analyse des valeurs propres

Les 4 premières valeurs propres, qui représentent un certain pourcentage de l'inertie des données initiales, montrent que les quatre modes associés expliquent en moyenne 99,8 % de l'inertie des données initiales (Tableau 7). Le premier mode, qui représente la position moyenne du trait de côte au cours de la période d'étude, explique 99 % de l'inertie initiale.

Tableau 7. Inertie et variance expliquées par les modes issus de l'analyse factorielle 1-D de la zone Ouest

mode	Inertie (%)	Inertie cumulée (%)	Variance (%)	Variance cumulée (%)
1	99,0	99,0		
2	0,41	99,4	40,5	40,5
3	0,22	99,6	22	62,5
4	0,14	99,8	14,4	76,9

Les trois modes d'ordre supérieur, qui représentent les fluctuations autour de la position moyenne du trait de côte, représentent presque 77 % des variations au cours de la période d'étude. Le second mode et le troisième mode prennent respectivement en compte 40,5 % et 22 % de la variance résiduelle. Enfin, le quatrième mode prend en compte 15 % de la variance résiduelle et ne sera pas étudié dans la suite de l'étude.

Il est important de noter que l'analyse factorielle a été réalisée avec et sans la prise en compte du rechargement sableux effectué entre Janvier et Avril 2008. Aucune modification notable n'a été observée sur les résultats. Le rechargement est donc intégré à l'analyse.

4.4.2.2. Analyse des modes propres

Le premier mode spatial, qui représente la position moyenne du trait de côte au cours de la période d'étude, met en évidence la présence de 4 tombolos bien formés en arrière des brise-lames et d'une plage plus « rectiligne » en arrière des structures immergées et sur le littoral naturel. Le mode temporel associé $C_1(t)$ représente les variations transversales de la morphologie moyenne du trait de côte.

La forte augmentation de $C_1(t)$ entre 2007 et 2008 (Figure 28.b et c) correspond au rechargement de 94 000 m³ mis en œuvre entre Janvier et Avril 2008 (Figure 27.b et c). Les faibles valeurs de $C_1(t)$ (Figure 28.a) correspondent à des périodes où le trait de côte est reculé comme en Décembre 2007 avant le rechargement (Figure 27.a) ou en Décembre 2011 après une longue tempête (Figure 27.f). On observe par ailleurs une alternance de phases d'avancée et de recul du trait de côte au gré des événements de tempête. Concernant l'évolution à long terme, on observe une tendance à l'érosion suite au rechargement avec nette accélération depuis 2010. Alors que la situation se stabilise entre 2011 et 2012, la tendance s'inverse au cours de l'année 2013. Le trait de côte retrouve sa position post rechargement et semble stable jusqu'à la fin de la période de suivi (Figure 28.d, Figure 27.d).

Les second et troisième modes spatiaux sont liés à la morphologie des tombolos en arrière des brise-lames, et aux « beach-cups » en arrière des structures immergées et sur le littoral naturel. Plus précisément, le second mode représente des « beach-cups » de longueur d'onde de l'ordre de 200m alors que le troisième mode représente des « beach-cups » de longueur d'onde de l'ordre de 400m.

Les modes temporels associés représentent les phases de progradation / destruction des tombolos et des « beach-cups ». Les fortes amplitudes des valeurs de $C_2(t)$ et $C_3(t)$ entre 2007 et 2008 (Figure 28.b et c) correspondent aux phases de rechargement mises en œuvre en arrière des brises lames. Sur le reste de la période, les résultats montrent une tendance à la formation de plus petit « beach-cups » (200m) lors des phase de recul du trait de côte (faible valeur de $C_1(t)$ et forte valeur de $C_2(t)$, Figure 28.e), alors

que des structures plus grosses apparaissent lors des phases d'avancée du trait de côte (forte valeur de $C_1(t)$ et forte valeur de $C_3(t)$, Figure 28.f).

a) 01 décembre 2007



b) 01 février 2008



c) 26 mars 2008



d) 2 septembre 2013



e) 28 aout 2011



f) 09 décembre 2011



Figure 27. Illustration de la morphologie de la plage sur le littoral Ouest de Valras-Plage

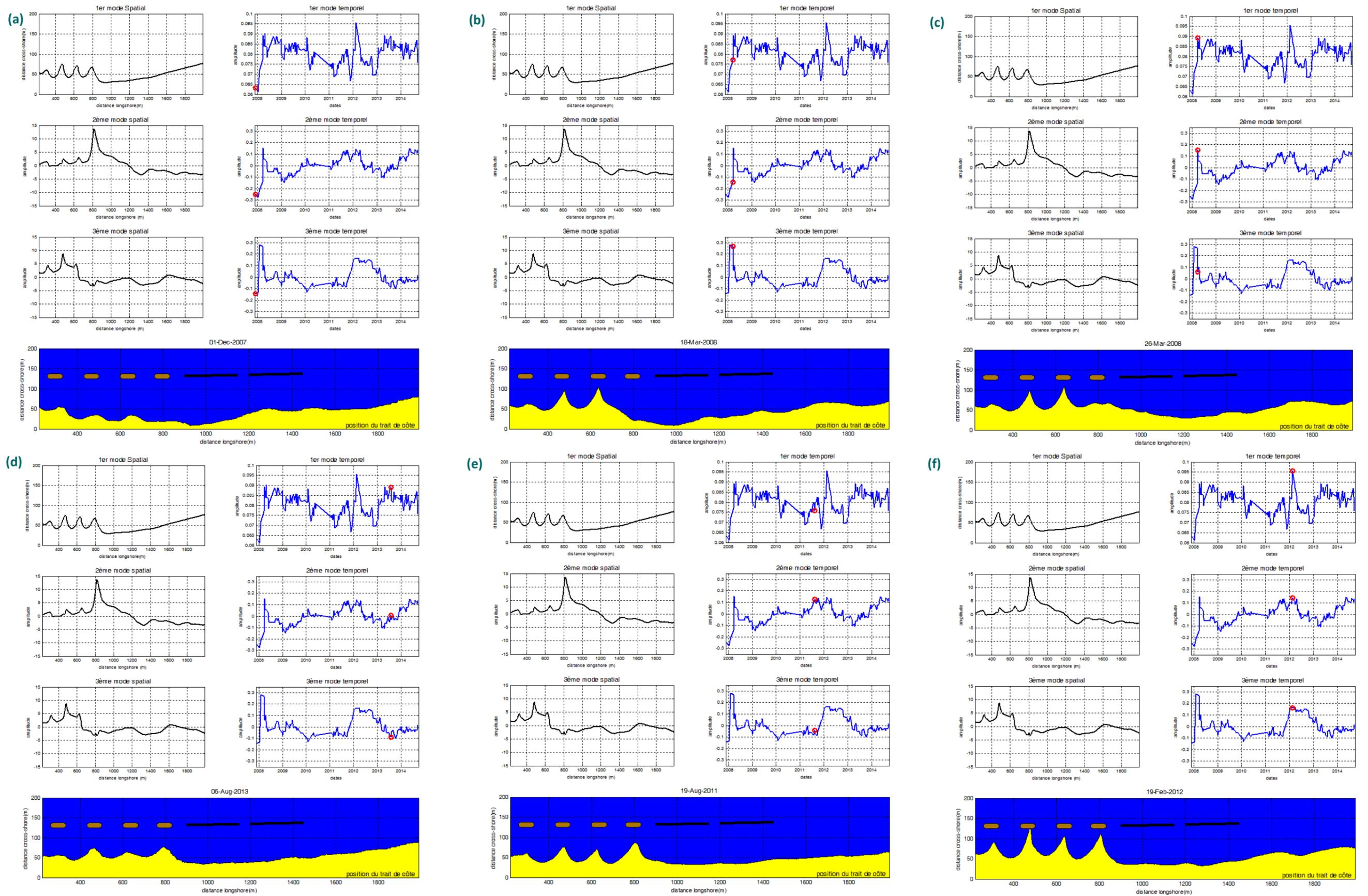


Figure 2. Résultats de l'AFC sur la partie Ouest du littoral de Valras-Plage

4.5. CONCLUSION

Un algorithme de détection automatisé, basé sur une technique de segmentation, a permis d'extraire environ 160 positions de trait de côte entre Décembre 2007 et Septembre 2014. Une technique d'analyse statistique multivariée (AFC) a été mise en œuvre pour dégager les tendances spatio-temporelles sur les parties Est et Ouest du littoral de Valras-Plage.

Les premiers modes spatio-temporels de l'AFC, qui représentent respectivement la morphologie moyenne du trait de côte et sa fluctuation dans le temps, montrent que le secteur Est présente une tendance érosive significative, alors que le secteur Ouest est relativement stable. En termes d'évolutions de surface de plage, cette situation se traduit par un taux moyen d'évolution de $-2589 \text{ m}^2/\text{an}$ à l'Est (Figure 29.a) et de $-446 \text{ m}^2/\text{an}$ à l'Ouest (Figure 29.b), la zone Ouest endiguée étant plutôt stable ($+434 \text{ m}^2/\text{an}$, Figure 29.c) et la zone naturelle en léger recul ($-880 \text{ m}^2/\text{an}$, Figure 29.d)

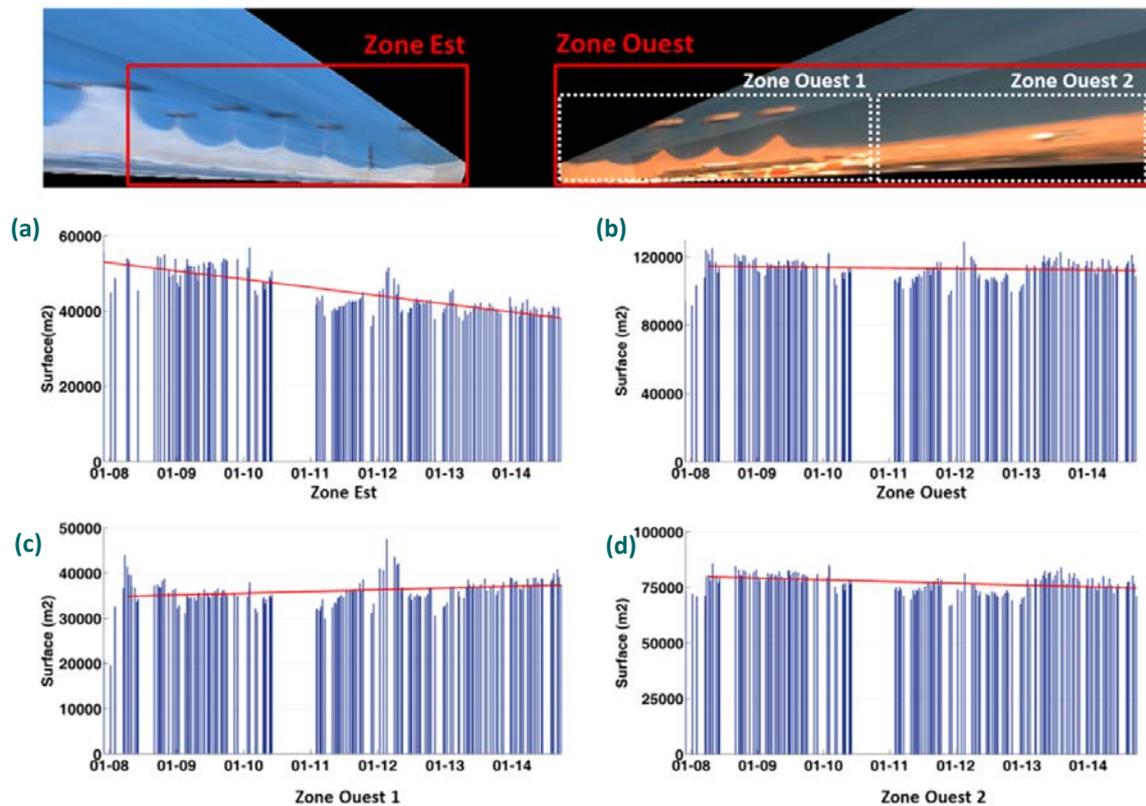


Figure 29. Evolution de la surface de plage à l'Est (a), sur le secteur Ouest endigué, (c), sur le secteur Ouest naturel (d) et sur la globalité du secteur Ouest (b).

Les second et troisième modes spatio-temporels de l'AFC sont liés à la dynamique des tombolos sur les secteurs endigués et des « beach-cups » sur la partie naturelle. On observe ainsi un changement de la configuration des tombolos à l'Est avec une tendance nette à l'érosion à partir de 2010, particulièrement marquée au niveau de l'épi. A l'Ouest, les tombolos apparus après la construction des derniers brise-lames et le rechargement de début 2008 présentent une configuration relativement stable sur la période d'étude. A l'arrière des ouvrages immergés et sur la partie naturelle, les traits de côte sont souvent caractérisés par la présence de morphologies tridimensionnelles (« beach-cups ») dont la longueur d'onde varie de 200 à 400 m à mesure que l'on s'avance vers le débouché de l'Aude.

5. ETUDE DES NIVEAUX D'EAU ATTEINTS LORS DES TEMPETES

5.1. METHODOLOGIE

5.1.1. Identification des tempêtes sur la période d'étude

Le littoral du Languedoc-Roussillon est fortement concerné par les aléas érosion et submersion marine. La DREAL Languedoc-Roussillon assure un suivi de l'évolution du trait de côte et des conditions d'agitation via la gestion d'un réseau de mesures de houle et de niveau d'eau. Lors des tempêtes significatives, la DREAL Languedoc-Roussillon édite des rapports de synthèse disponibles sur son site internet. Sur la période 2008-2014, couverte par le suivi vidéo, 6 tempêtes majeures ont ainsi été identifiées. Un récapitulatif des conditions de mer enregistrées au cours de ces tempêtes est présenté sur le Tableau 8. L'ensemble des niveaux d'eau sont exprimés selon le Zéro Hydrographique (ZH/Ref = 0.297 m, SHOM 2012).

Tableau 8 : Récapitulatif des conditions de mer enregistrées au cours des tempêtes identifiées.

Dates	Niveau Marin (m CM)	Hs (m)	Période (s)	Direction (°N)
02-04 Jan. 2008	1.13	5.08	9.01	100/120
20-22 Oct. 2009	1.1	4.54	8.02	110/130
14-15 Jan. 2010	1.05	4.87	8.29	120/140
11-16 Mar. 2011	0.91	5.34	9.09	120/140
Oct. Nov. 2011	1.08	3.79	8.11	120/140
04-08 Mar. 2013	1.02	4.79	9.09	120/140

5.1.2. Mise en œuvre du modèle d'agitation

Pour chacune des 6 tempêtes, un modèle d'agitation a été mis en œuvre en le forçant aux frontières par les données de houle issues de la bouée de Sète et en imposant le niveau d'eau du marégraphe de Sète.

Les équations de calcul de la hauteur de jet de rive ont été utilisées avec une pente moyenne de 3%.

Les élévations de niveau d'eau estimées par le modèle pour chacune des tempêtes identifiées sont présentées dans le Tableau 9.

Tableau 9 : Elévations des niveaux d'eau (Surcote + Setup + Jet de Rive) calculées par le modèle.

Dates	Ntot min (m CM)	Ntot moy (m CM)	Ntot max (m CM)
02-04 Jan. 2008	2.04	2.22	2.41
20-22 Oct. 2009	2.04	2.24	2.44
14-15 Jan. 2010	1.89	2.09	2.29
11-16 Mar. 2011	1.87	2.09	2.3
Oct. Nov. 2011	1.84	2.03	2.21
04-08 Mar. 2013	1.9	2.1	2.29

Par ailleurs, les rejeux du modèle PREVIMER sont utilisés pour appréhender la tempête à l'échelle de la Méditerranée. Enfin, les données issues de la station vidéo de Valras-Plage sont utilisées pour valider les niveaux d'eau atteints via la détection des laisses de tempêtes.

5.1.3. Tempête du 2 au 4 janvier 2008

La tempête a débuté le matin du 3 janvier, après un changement radical de direction du vent, par un renforcement du vent d'Est à Sud Est avec des rafales atteignant l'après-midi 90 à 110 km/h. Ces rafales ont atteint 110 à 120 km/h en soirée, voire 130 km/h, générant de très fortes vagues dans la nuit (Figure 30). La hauteur significative a atteint 5.08 m (Figure 31.b), ce qui est proche d'un évènement décennal. Le niveau d'eau a atteint 1.13 m CM au marégraphe de Sète (Figure 31.c), ce qui correspond à un évènement annuel (Tableau 2).

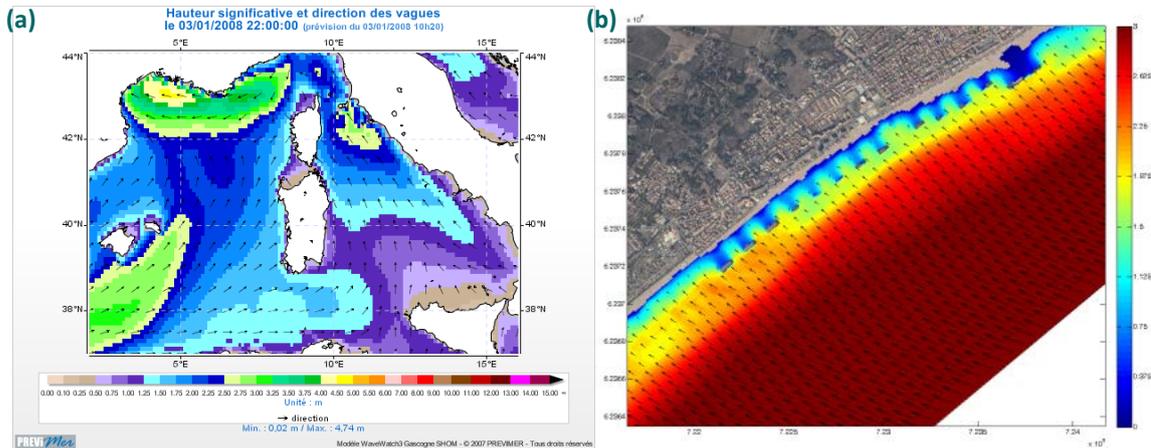


Figure 30. Etat de mer à l'échelle de la Méditerranée Occidentale (a) et à l'échelle du littoral de Valras-Plage (b) lors de la tempête du 2 au 4 janvier 2008

Les modélisations montrent que le niveau d'eau dynamique (intégrant Set-Up et Run-up) a atteint 2.2 m en moyenne le long du littoral de Valras, ce qui correspond à l'altitude du pied du perré du front mer (données LIDAR). Ces résultats corroborent les niveaux maximaux observés par le système vidéo (Figure 31.b). L'étude de la position instantanée du trait de côte montre un « recul » important le 4 Janvier de l'ordre de 60 m dans la zone naturelle à l'Ouest du domaine, et d'environ 100 m au niveau des tombolos à l'Est du domaine. La submersion des tombolos explique les fortes valeurs de recul par rapport aux zones intermédiaires.

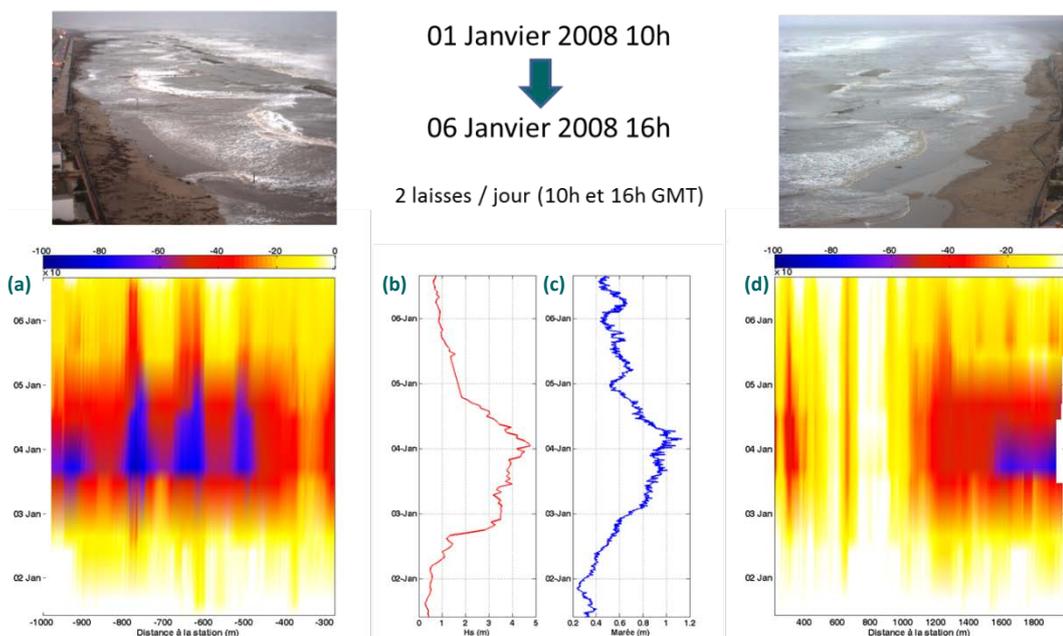


Figure 31. Evolution transversale de la position instantanée de la ligne d'eau à l'Est (a) et à l'Ouest de la station (d). Hauteurs significatives de la houle (b) et niveaux d'eau (c) relevés à Sète au cours de l'évènement du 01 au 06 janvier 2008.

5.1.4. Tempête du 20 au 21 octobre 2009

La tempête a débuté le 20 Octobre avec une chute de la pression atmosphérique et un renforcement des vents de Sud à Sud-Est avec des rafales atteignant l'après-midi 90 à 100 km/h. L'état de la mer s'est aussi renforcé et la houle de Sud-Sud Est a atteint 3.26 m de hauteur significative à Sète à la mi-journée. Après, une courte accalmie en fin de journée, les vents se sont de nouveau renforcés dans la nuit et la houle a atteint son maximum (Hs = 4.54 m) dans la matinée. Le niveau d'eau a atteint 1.10 m CM au marégraphe de Sète (Figure 33.c)

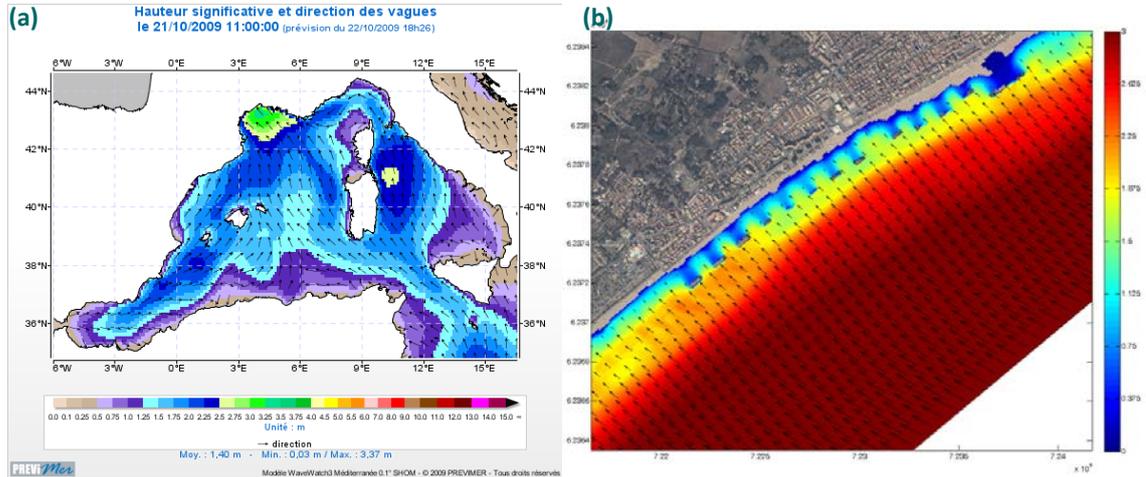


Figure 32. Etat de mer à l'échelle de la Méditerranée Occidentale (a) et à l'échelle du littoral de Valras-Plage (b) lors de la tempête du 20 au 21 octobre 2009

Les modélisations montrent que le niveau d'eau dynamique (intégrant Set-Up et Run-up) est de 2.2 m en moyenne le long du littoral de Valras. Ces résultats sont légèrement surestimés par rapport aux niveaux maximaux observés par le système vidéo. Cette surestimation s'explique par le fait que la tempête était moins violente à l'Ouest du Golfe du Lion. Les données vidéo montrent un recul moins conséquent dans la partie naturelle à l'Ouest (~30 m). Même si les tombolos sont submergés (recul maximum de la partie Est) la laisse de tempête n'atteint que partiellement le pied du perré.

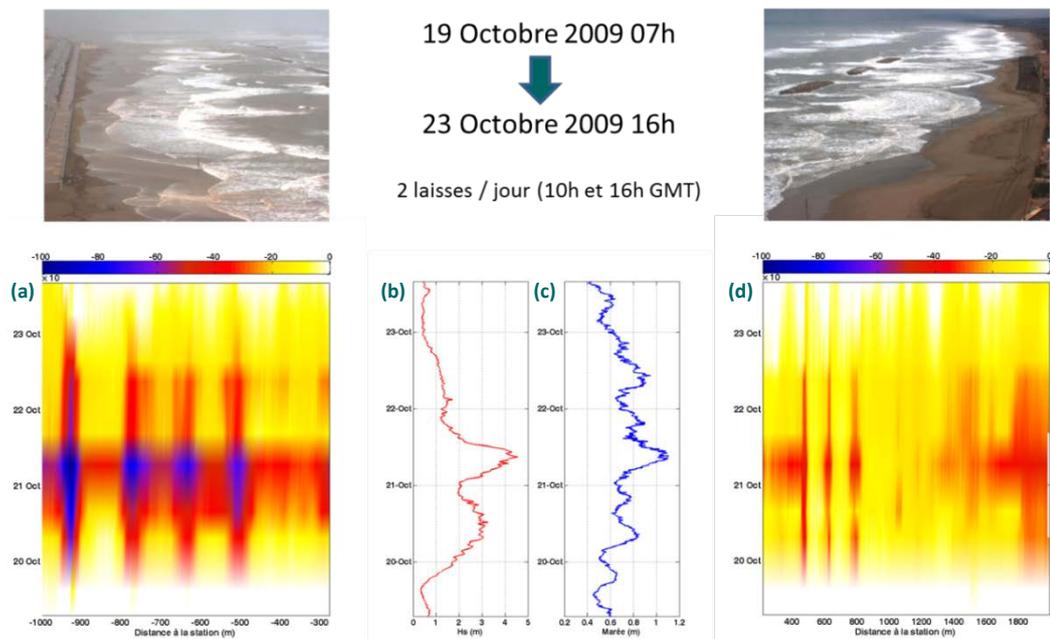


Figure 33. Evolution transversale de la position instantanée de la ligne d'eau à l'Est (a) et à l'Ouest de la station (d). Hauteurs significatives de la houle (b) et niveaux d'eau (c) relevés à Sète au cours de l'événement du 19 au 23 octobre 2009.

5.1.5. Tempête du 14 au 15 janvier 2010

La tempête a débuté dans la nuit du 13 au 14 janvier 2010 avec une chute de la pression atmosphérique et un renforcement des vents de Sud à Sud-Est avec des rafales atteignant l'après-midi 80 à 90 km/h. L'état de la mer s'est aussi renforcé et la houle d'Est à Sud-Est a atteint 4.87 m (Figure 35.b) de hauteur significative à Sète à la mi-journée. Le niveau d'eau a atteint 1.05 m CM au marégraphe de Sète (Figure 34.c)

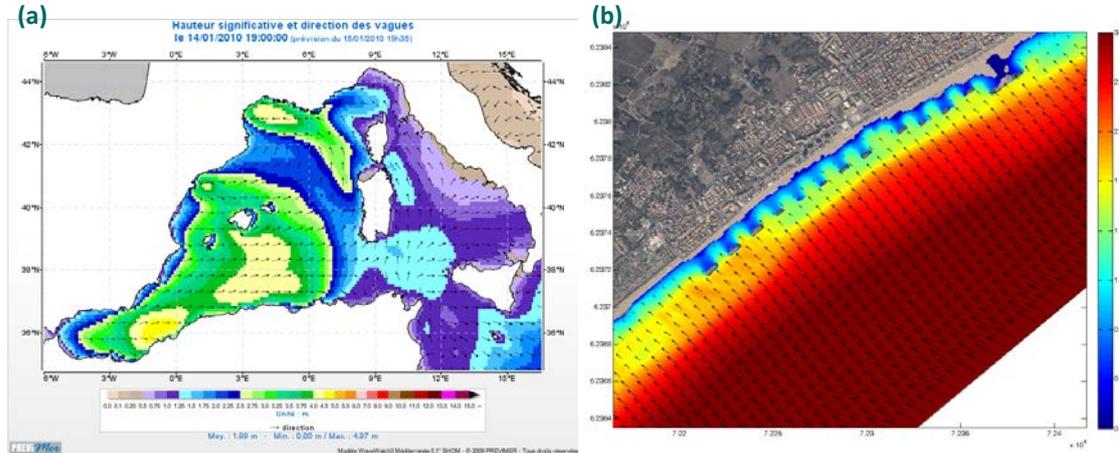


Figure 34. Etat de mer à l'échelle de la Méditerranée Occidentale (a) et à l'échelle du littoral de Valras-Plage (b) lors de la tempête du 14 au 15 janvier 2010

Les modélisations montrent que le niveau d'eau dynamique (intégrant Set-Up et Run-up) a atteint 2.10 m en moyenne le long du littoral de Valras, ce qui correspond à l'altitude du pied du perré du front mer (données LIDAR). Les mesures vidéo montrent que l'impact de la tempête est plus important dans la partie Est du domaine et plus particulièrement au niveau des tombolos. De plus, les résultats montrent un retour à l'équilibre rapide du système.

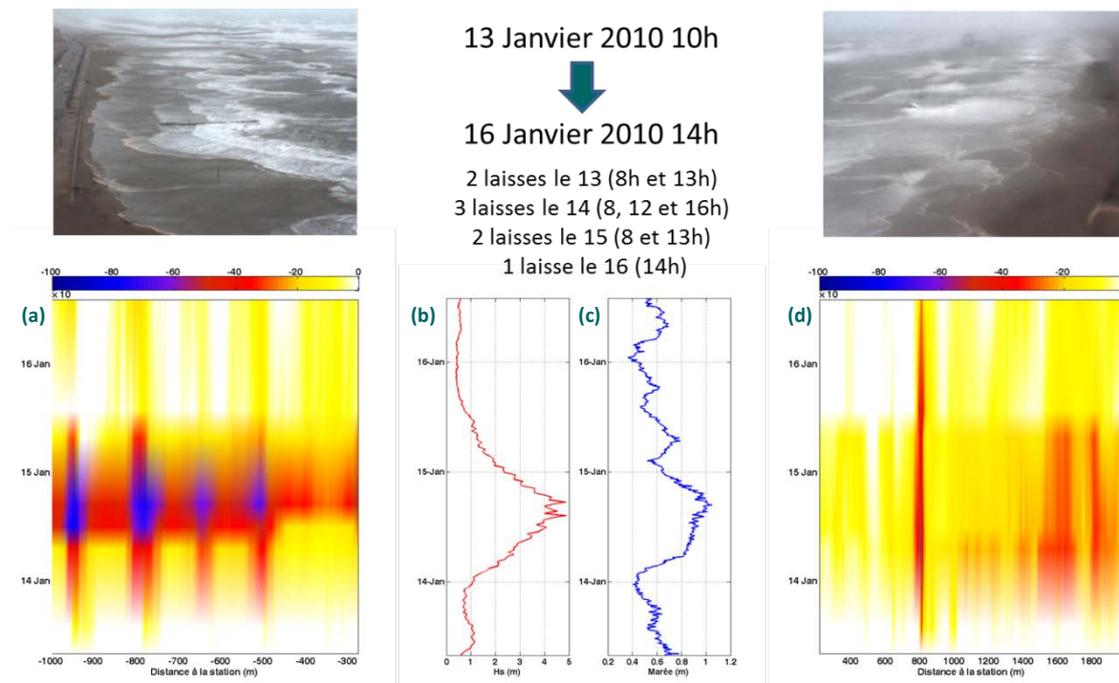


Figure 35. Evolution transversale de la position instantanée de la ligne d'eau à l'Est (a) et à l'Ouest de la station (d). Hauteurs significatives de la houle (b) et niveaux d'eau (c) relevés à Sète au cours de l'événement 19 au 23 octobre 2009.

5.1.6. Tempête du 12 au 16 mars 2011

La tempête a débuté le 11 mars et deux chutes successives de la pression atmosphérique ont été observées sur la période. Les vents de secteurs Est à Sud-Est ont été d'une forte intensité et le pic de houle a été mesuré le 12 mars avec une houle d'Est à Sud-Est qui a atteint 5.34 m (Figure 37.b) de hauteur significative à Sète, ce qui est de l'ordre d'un évènement décennal. Le niveau d'eau a atteint 0.91 m CM au marégraphe de Sète (Figure 37.c)

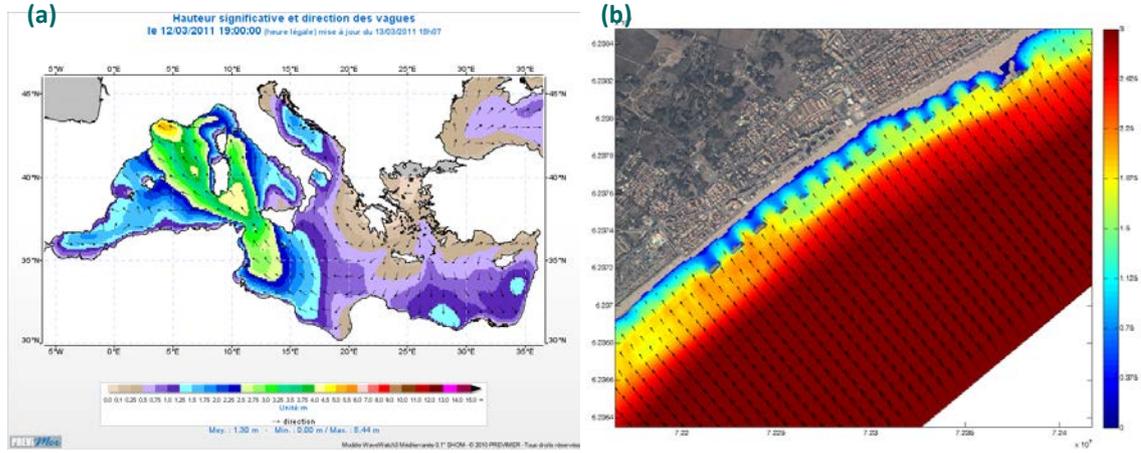


Figure 36. Etat de mer à l'échelle de la Méditerranée Occidentale (a) et à l'échelle du littoral de Valras-Plage (b) lors de la tempête du 11 au 16 mars 2011

Les modélisations montrent que le niveau d'eau dynamique (intégrant Set-Up et Run-up) a atteint 2.10 m en moyenne le long du littoral de Valras, ce qui correspond à l'altitude du pied du perré du front mer. Les mesures vidéo montrent un « recul » plus faible (entre 30 m et 50 m) que pour les précédentes tempêtes. Néanmoins, l'intégralité du littoral est impactée et le retour à l'équilibre est plus long.

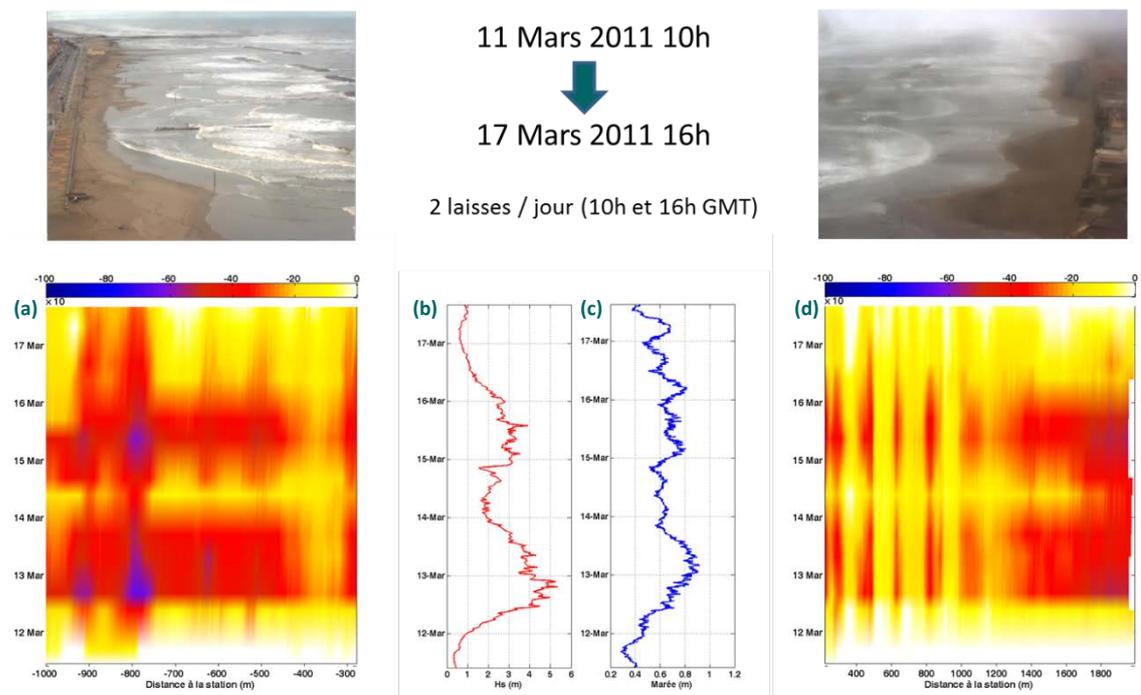


Figure 37. Evolution transversale de la position instantanée de la ligne d'eau à l'Est (a) et à l'Ouest (d) de la station. Hauteurs significatives de la houle (b) et niveaux d'eau (c) relevés à Sète au cours de l'évènement 19 au 23 octobre 2009.

5.1.7. Tempête du 24 octobre au 7 novembre 2011

Entre le 24 et le 6 novembre plusieurs épisodes Cévenol ont touché le Languedoc Roussillon accompagnés de deux chutes successives de pression atmosphérique. Les vents de secteurs Est à Sud-Est ont été d'une forte intensité et le pic de houle a été mesuré le 24 octobre avec une houle d'Est à Sud-Est qui a atteint 3.8 m (Figure 39.b) de hauteur significative à Sète. Le niveau d'eau a atteint 1.08 m CM au marégraphe de Sète (Figure 39.c).

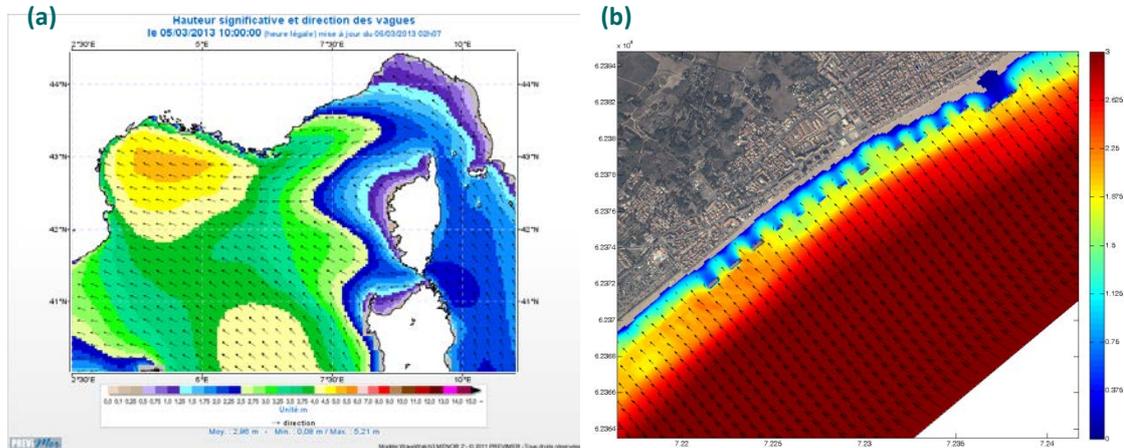


Figure 38. Etat de mer à l'échelle de la Méditerranée Occidentale (a) et à l'échelle du littoral de Valras-Plage (b) lors de la tempête du 11 au 16 mars 2011

Les modélisations montrent que le niveau d'eau dynamique (intégrant Set-Up et Run-up) a atteint 2 m en moyenne le long du littoral de Valras. Les mesures vidéo montrent 2 phases de « recul » généralisé (entre 30 m et 50 m) coïncidant avec les pics de houle de 24 Octobre et du 3 Novembre. Les reculs maximaux sont observés au niveau des tombolos (> 60 m). Néanmoins, l'intégralité du littoral est impactée et le retour à l'équilibre est plus long.

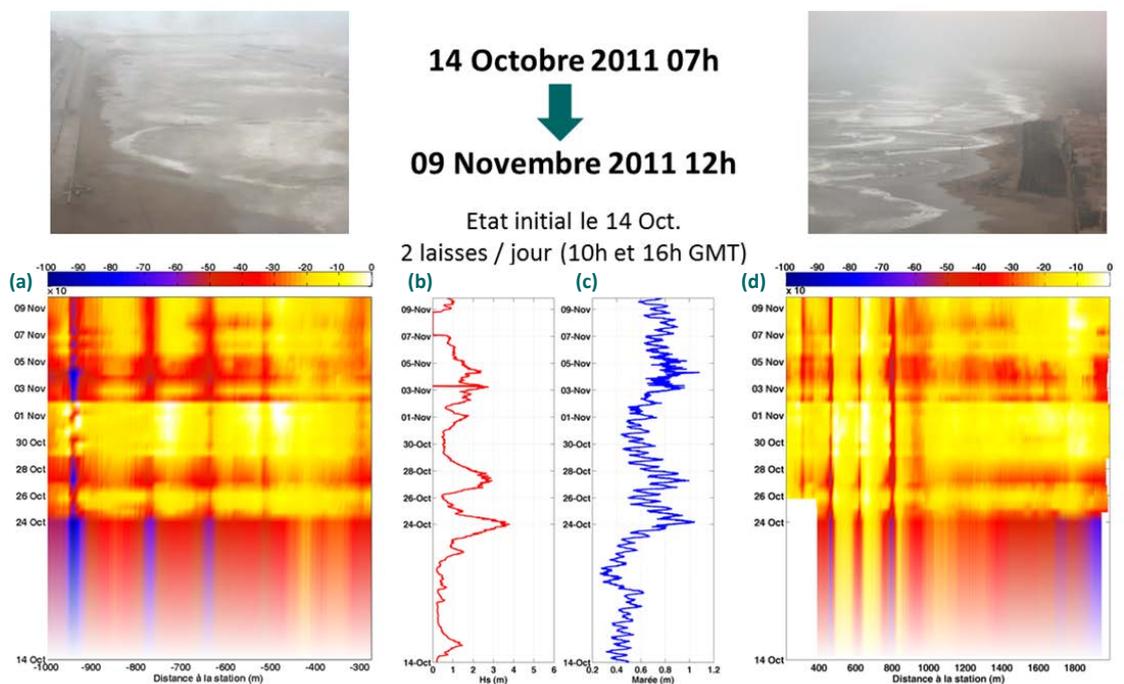


Figure 39. Evolution transversale de la position instantanée de la ligne d'eau à l'Est (a) et à l'Ouest de la station (d). Hauteurs significatives de la houle (b) et niveaux d'eau (c) relevés à Sète au cours de l'événement 14 octobre 2011 au 09 novembre 2011.

5.1.8. Tempête 04-08 mars 2013

La tempête a débuté dans la nuit du 04 au 05 mars 2013 avec une chute de la pression atmosphérique et un renforcement des vents de Sud à Sud-Est. Les vents de secteurs Est à Sud-Est ont été d'une forte intensité et le pic de houle a été mesuré le 05 mars avec une houle d'Est à Sud-Est qui a atteint 4.8 m (Figure 41.b) de hauteur significative à Sète. Le niveau d'eau a atteint 1.02 m CM au marégraphe de Sète (Figure 41.c).

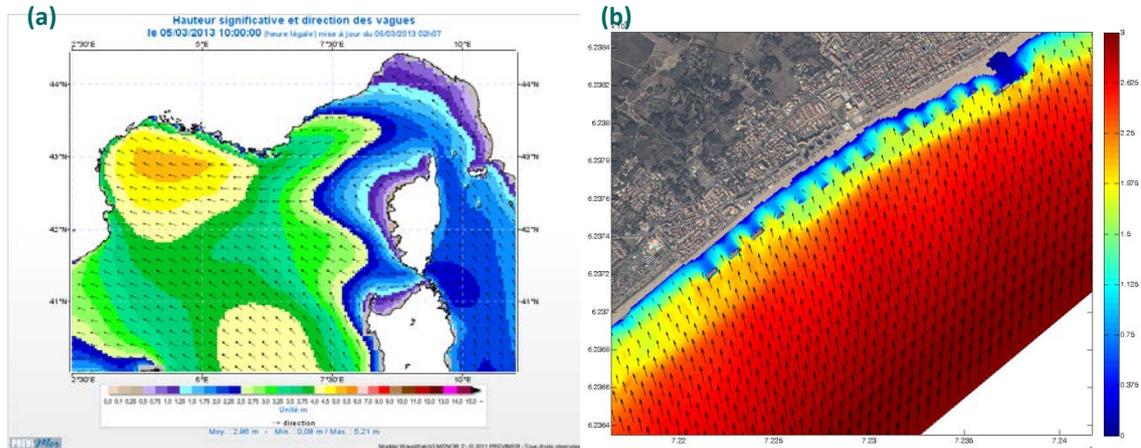


Figure 40. Etat de mer à l'échelle de la Méditerranée Occidentale (a) et à l'échelle du littoral de Valras-Plage (b) lors de la tempête du 11 au 16 mars 2011

Les modélisations montrent que le niveau d'eau dynamique (intégrant Set-Up et Run-up) a atteint 2.1 m en moyenne le long du littoral de Valras. Les mesures vidéo montrent une phase de « recul » généralisé (entre 40 m et 50 m) coïncidant avec le pic de houle du 05 Mars. Les reculs maximaux sont observés au niveau des tombolos (> 60 m). Le retour à l'équilibre est plus rapide dans la partie Ouest et une majorité du linéaire retrouve sa position initiale le 8 Mars. Dans la partie Est, un recul moyen d'environ 10m est encore observé le 10 Mars.

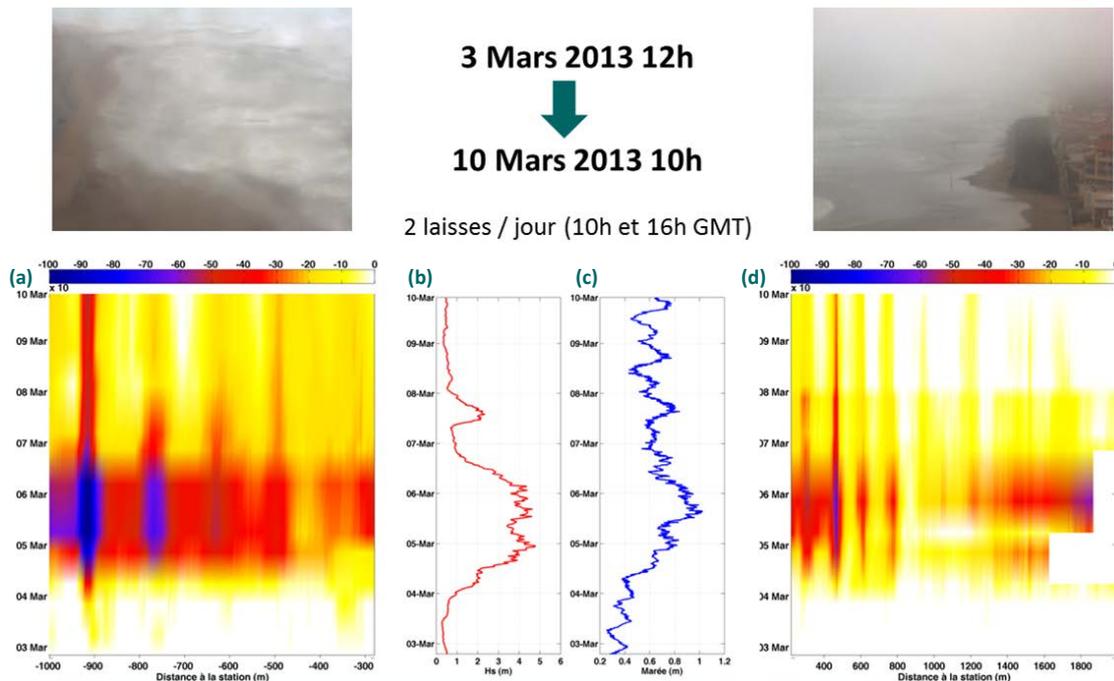


Figure 41. Evolution transversale de la position instantanée de la ligne d'eau à l'Est (a) et à l'Ouest de la station (d). Hauteurs significatives de la houle (b) et niveaux d'eau (c) relevés à Sète au cours de l'événement 14 octobre 2011 au 09 novembre 2011.

5.2. CONCLUSIONS

Dans cette partie de l'étude, six évènements majeurs de tempête ont été isolés à partir des observations de la DREAL-LR. Un modèle d'agitation a été spécifiquement développé dans le but de mieux appréhender l'impact de ces évènements sur la position de la laisse de mer. Les mesures vidéo sont utilisées ici pour valider en partie les résultats de l'approche numérique (position de la laisse de mer la plus « reculée »), et pour améliorer la compréhension de la dynamique de la laisse de mer à des échelles temporelles plus fines.

De manière générale, les données issues du modèle numérique correspondent aux observations vidéo. Même si certaines surestimations du modèle numérique apparaissent, elles s'expliquent par la dynamique de la tempête à l'échelle du Golfe du Lion (variation de hauteurs de houle entre les données de la bouée de Sète et les conditions d'agitation au droit du littoral de Valras-Plage) et par les approximations réalisées lors de la mise en place du modèle (pente moyenne, etc.).

Au final cette analyse a permis de mettre en avant les points suivants :

- Les mesures vidéo et la modélisation numérique montrent que pour les six évènements de tempête retenus, la laisse de haute mer atteint le pied du perré de haut de plage, ou se situe juste à proximité. Ce résultat est observé sur la majorité du littoral de Valras-Plage, à l'exception de la zone du dernier tombolo à l'Est, et au pied de la station vidéo où le disponible sédimentaire est plus important. La zone la plus sensible se situe au droit de l'épi en enrochement. A l'Ouest du domaine, la laisse de mer atteint les ganivelles sans les submerger pour chacun des évènements retenus. La zone naturelle située plus à l'Ouest, enregistre elle un « recul » de la laisse de tempête plus important.
- De manière générale les données vidéo montrent un « recul » conséquent de la laisse au droit des tombolos. La faible pente enregistrée au niveau de ces structures engendre une submersion totale de ces avancées sableuses au cours des évènements de tempête. Il en résulte une distance de « recul » de la laisse comprise entre 70 m et 100 m, ce qui correspond à la distance entre la pointe du tombolo et le pied du perré. De la même manière, le faible disponible sédimentaire des zones situées entre les tombolos justifie les taux plus faibles de « recul » de la laisse de mer (entre 30m et 50m). Néanmoins les distances de recul évaluées par la vidéo correspondent à la distance entre le trait de côte en période calme et le pied du perré.
- L'ensemble des résultats montre une réponse quasi instantanée du système, avec un recul de la position de la laisse simultanée à l'augmentation de la hauteur significative de la houle. Le retour à l'équilibre est lui plus long à se mettre en place. Malgré des conditions d'agitation plus faibles, la laisse de mer met plus de temps à retrouver sa position initiale. Ce phénomène est principalement observé au droit des tombolos et est plus marqué dans la partie Est du domaine.

6. DYNAMIQUE DES BARRES SEDIMENTAIRES

6.1. METHODOLOGIE ET LIMITATIONS INHERENTES A LA TECHNIQUE

L'étude de la dynamique des barres sableuses via l'exploitation d'images moyennées pendant 10 min (Timex) est à l'origine des premiers développements des systèmes vidéo du suivi du littoral (Lippmann et Holman, 1989). En effet, la génération d'images Timex permet de connaître la position moyenne de déferlement des vagues et de déduire la morphologie des barres sableuses.

Dans le but de minimiser la variabilité de la zone de déferlement et d'obtenir un maximum d'images, la base de données photo a été filtrée en fonction du niveau d'eau et des paramètres de houle. A partir du jeu de données sélectionné, la position de la barre de déferlement est obtenue à l'aide d'un algorithme de type BLIM (Bar Line Intensity Maximum Tool, Pape et al. 2010). La technique consiste à sélectionner manuellement une zone d'intérêt comprenant la zone de déferlement. Les intensités de pixels en niveau de gris sont ensuite traitées de façon à obtenir la valeur maximale de l'intensité le long de différents profils transversaux (Lippmann & Holman, 1989). Ce maximum est associé à la crête de la barre (Armaroli & Ciavola, 2011). L'erreur de positionnement de la crête de barre est de quelques mètres en longitudinal, et de l'ordre de 10m en transversal.

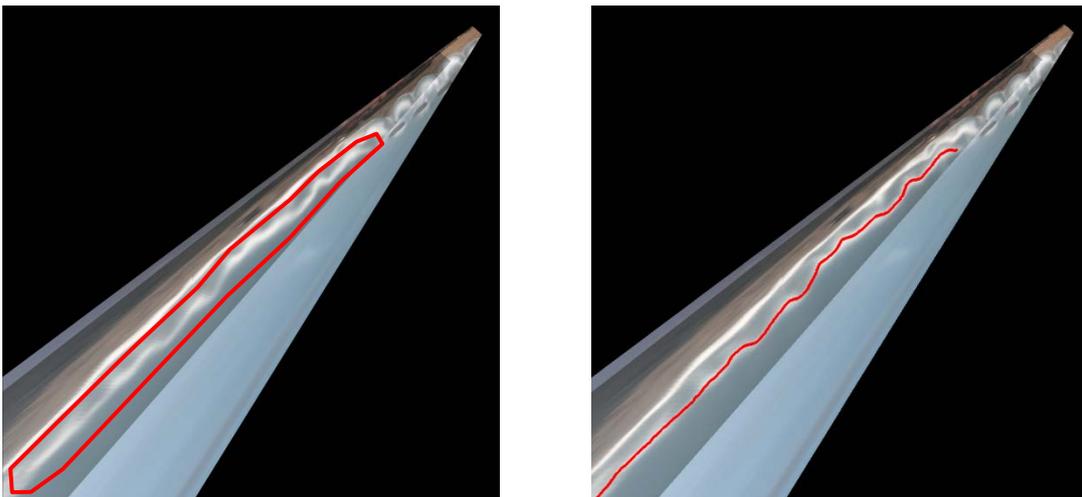


Figure 42 : Sélection de la région d'intérêt (a) ; Détection automatisée de la position de la barre externe (b).

Les images de la station vidéo ont été filtrées en fonction d'un niveau d'eau fixé à $0.45 \text{ m} \pm 0.1$, puis projetées sur une grille de $1 \times 1 \text{ m}$. Les données obtenues sont les suivantes :

- Concernant la barre interne, l'analyse est effectuée uniquement dans la partie Ouest du domaine entre 1000 et 3500 m de la station puisque l'ensemble de la zone protégée (de l'embouchure de l'Orb jusqu'à 1000m à l'Ouest de la station) ne comporte pas de barre interne. Un total de 58 images projetées ont été isolées entre Décembre 2007 et Septembre 2014, soit environ 1 donnée par mois à l'exception des mois d'été.
- Concernant la barre externe, l'analyse est effectuée sur l'ensemble du domaine couvert par les caméras, soit de l'embouchure de l'Orb jusqu'à environ 3500 m à l'Ouest de la station. Un total de 34 séries d'images ont été isolées entre Décembre 2007 et Septembre 2014. La fréquence d'échantillonnage correspond aux périodes d'agitation importante, soit principalement les mois de Janvier à Avril et les mois d'Octobre à Décembre.

Les données sont regroupées dans une matrice de type $Y(t,X)$, soit l'ensemble des positions transversales (Y) en fonction du temps (t) et de la position longitudinale (X).

Dans le but de pouvoir évaluer la dynamique des barres, les positions obtenues sont comparées à la position moyenne de la barre $Y_x(t)$ de la manière suivant (VAN ENCKEVORT & RUESSINK, 2002 part. 2) :

$$D(t,x) = Y(t,X) - Y_x(t).$$

L'écart par rapport à la moyenne (D) est ainsi obtenu pour chacune des barres détectées. Un exemple de représentation de la matrice D est présenté en Figure 43. Dans cette figure :

- les données négatives sont représentées par des couleurs froides (vert et bleu) et correspondent à une progression de la barre vers la côte,
- les données positives sont représentées par des couleurs chaudes (jaune et rouge) et correspondent à une progression de la barre vers le large.

Ainsi, une forme festonnée de la barre apparaît sur la figure par une alternance horizontale de couleur chaude et froide. La migration de la barre est observable par un déplacement vertical d'une bande de couleur.

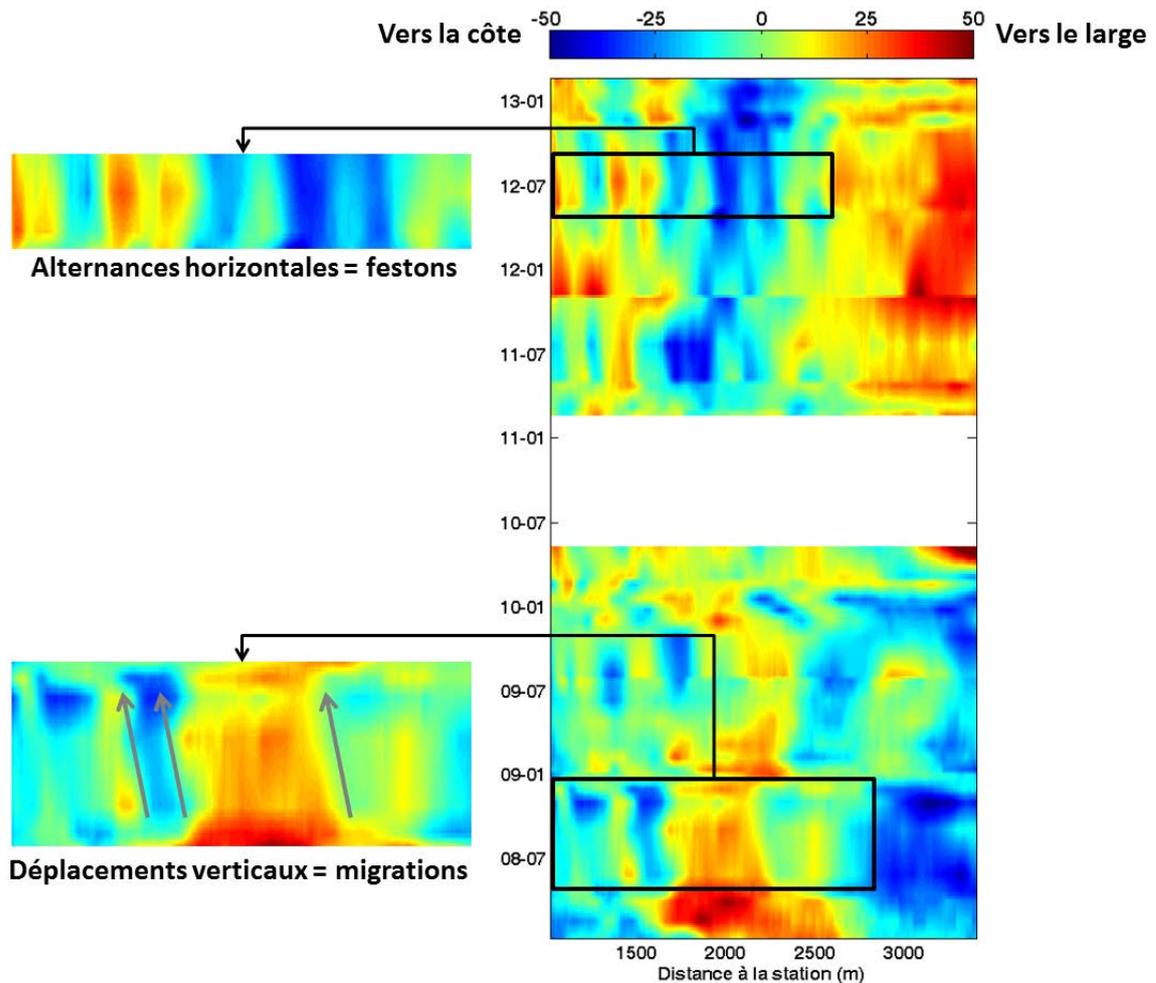


Figure 43 : Exemple de représentation des résultats d'évolution de la position des barres sédimentaires.

6.2. DYNAMIQUE DE LA BARRE INTERNE

L'ensemble des détections de barre interne réalisées à partir du système vidéo entre le mois de Janvier 2008 et le mois de Septembre 2014 est présenté en Figure 44.

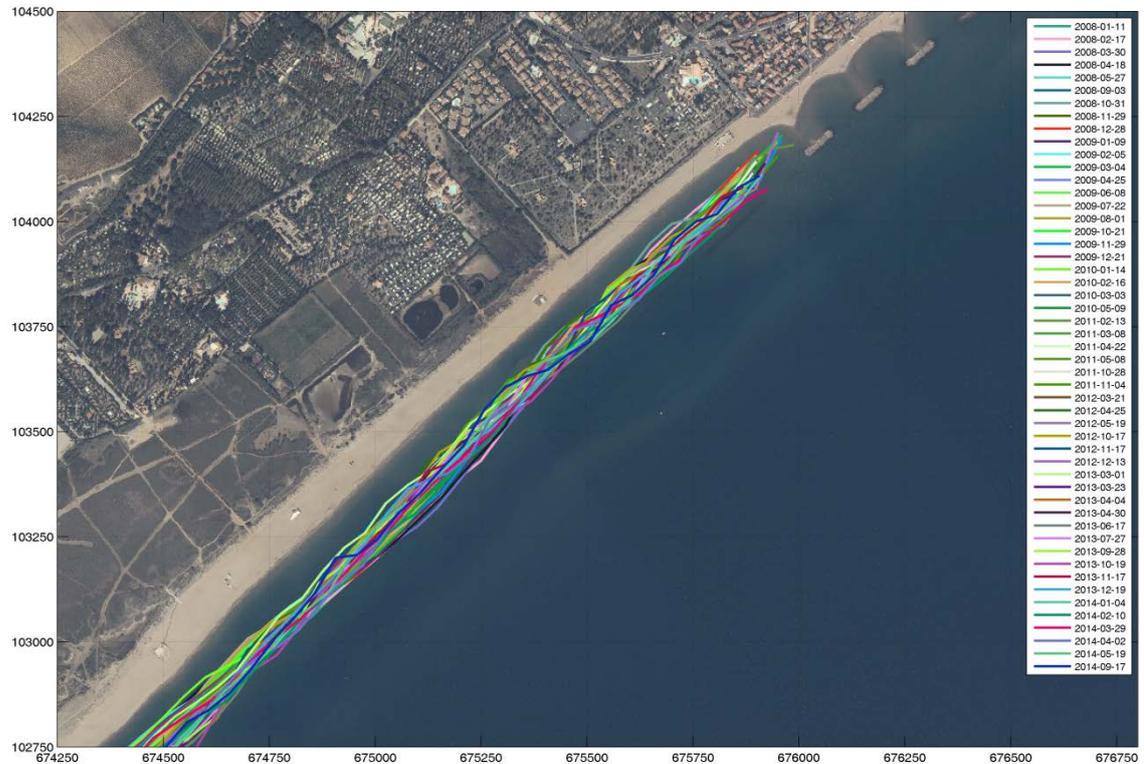


Figure 44 : Ensemble des positions de la barre interne détectées à partir du système vidéo entre Janvier 2008 et Septembre 2014.

6.2.1. Zoom sur les structures immergées

La présence des structures immergées sont observables sur certaines des images vidéo par la présence de deux zones de déferlement rectilignes situées entre 1000m et 1600m de la station, comme le montre la Figure 45.

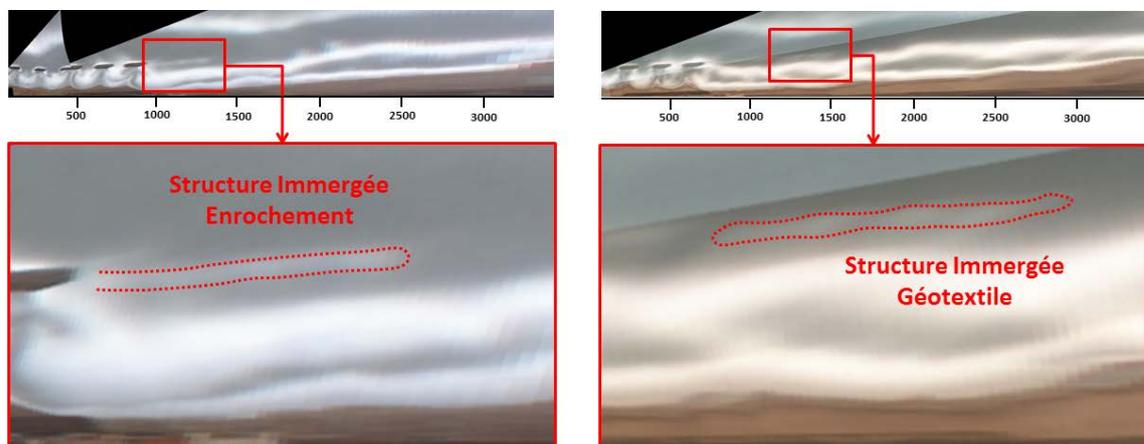


Figure 45 : Structures immergées mises en évidence par les zones de déferlement comprises entre 1000m et 1600m de la station vidéo. A gauche la structure en enrochement, à droite la structure en géotextile.

La présence de la zone de déferlement au niveau des structures immergées n'est cependant observée que pour des houles supérieures à 1.9m pour la structure en enrochements et 2.5m pour la structure en géotextile.

En revanche, pour chacune des données analysées, les images montrent la présence d'une barre sédimentaire située entre les structures immergées et la plage. Cette portion de la barre interne possède des caractéristiques différentes de celles observées dans la zone naturelle (entre 1600 m et 3500 m). Elle présente 1 à 2 croissants dans la majorité des cas. Ces croissants sont de faibles dimensions, avec une distance crête à crête d'environ 180 à 230 m.

La présence d'une barre interne démontre un niveau d'agitation important. Les structures immergées ne permettent donc pas de limiter l'action des vagues de façon à initier la formation de structure de type tombolo.

6.2.2. Les différents types de morphologies

Les résultats montrent trois types de morphologies :

- Une première morphologie dite « linéaire » : cette morphologie est caractérisée par une tridimensionnalité quasi nulle (Figure 46). Aucune structure dans l'axe longitudinal n'est apparente.

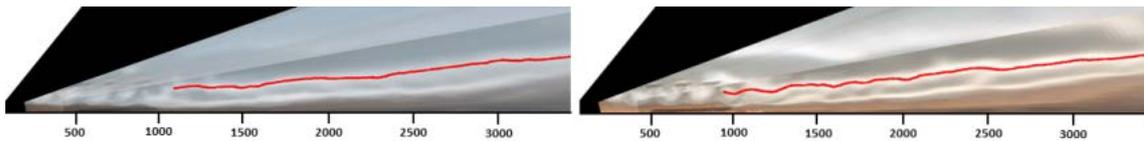


Figure 46 : Deux exemples de morphologies linéaires présentes dans la zone Ouest du littoral de Valras-Plage.

- Une seconde morphologie dite « ondulée » : cette morphologie est caractérisée par la présence d'un croissant ou plusieurs croissants aux dimensions importantes, situé entre 1600m et 3300m de la station (Figure 47). La distance crête à crête moyenne est d'environ 1500m et l'amplitude moyenne est d'environ 40m. De plus on note l'oscillation de la morphologie de la zone protégée (de 1000m à 1600m de la station) entre une tridimensionnalité marquée des croissants et une morphologie quasi-linéaire.

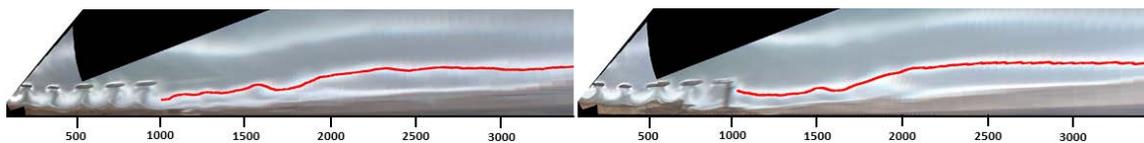


Figure 47 : Deux exemples de morphologies ondulées présentes dans la zone Ouest du littoral de Valras-Plage.

- Une troisième morphologie dite « en croissant » : cette morphologie est caractérisée par une tridimensionnalité importante de l'ensemble de la barre (Figure 48). La forme sinusoïdale de la barre s'observe entre 1000m et 3500m de la station. Les croissants sont de plus faibles dimensions avec une distance crête à crête comprise entre 230m et 280m et une amplitude variant entre 10m et 20m.

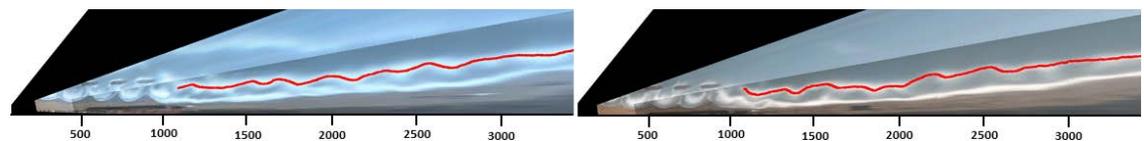


Figure 48 : Deux exemples de morphologies en croissant présentes dans la zone Ouest du littoral de Valras-Plage.

Ces résultats coïncident avec ceux obtenus par les différentes études liées à l'analyse des barres sédimentaires du Golfe du Lion (FERRER 2010, BALOUIN et al. 2012, ROBIN 2010, GERVAIS 2012).

6.2.3. Dynamique de la barre interne

Les résultats permettant d'évaluer la dynamique de la barre interne sont présentés en Figure 49. La figure centrale représente les fluctuations de D , l'écart de la position de la barre par rapport à sa position moyenne (Section 6.1). Le graphique de droite représente les fluctuations de houle enregistrées par la bouée de Sète. La colonne de gauche représente des exemples de morphologie de la barre interne obtenue à partir du système vidéo.

Au début du set de données la barre interne possède une morphologie de type ondulée avec la présence d'un croissant aux dimensions très importantes, avec une distance crête à crête supérieure à 2000m et une amplitude d'environ 40m (exemple de ce type de morphologie sur l'image vidéo du 17 Février 2008, Figure 49). Cette morphologie est présente jusqu'au mois d'Avril, période pendant laquelle le climat de houle est énergétique ($Hs_{moy} = 0.7m$, $Hs > 1.5m$ pendant 260h).

Au début de l'été 2008, alors que le climat de houle perd en intensité ($Hs_{moy} = 0.4m$, $Hs > 1.5m$ pendant 85h) la morphologie de la barre est modifiée. Le croissant principal s'aplatit en se rapprochant de la côte. Des formes festonnées apparaissent principalement entre 1000m et 2000m de la station vidéo. La barre interne prend donc une forme dite en croissant (exemple de ce type de morphologie sur l'image vidéo du 3 Septembre 2008, Figure 49). Au début de l'année 2010, un régime de houle important engendre un aplatissement global de la barre. La morphologie de type linéaire est bien représentée sur l'exemple du 9 Mai 2010 sur la Figure 49.

L'analyse globale des données montre que ces deux configurations (morphologie en croissant et morphologie linéaire) vont s'alterner au cours du temps, principalement en fonction des conditions d'agitation. En période calme, la barre interne se rapproche de la côte et gagne en tridimensionnalité, alors qu'en période plus agitée, la barre interne s'éloigne et devient de plus en plus rectiligne. Cependant ce phénomène n'est pas toujours observé, il est possible d'observer temporairement une forme en croissant de la barre au cours d'évènement énergétique.

A partir du début de l'année 2013, la barre interne a tendance à migrer vers le large à l'extrémité du domaine (entre 2500 m et 3000 m de la station). Lorsque la barre interne recule elle vient alimenter la barre externe. Cette tendance est plus marquée en hiver qu'en période estivale.

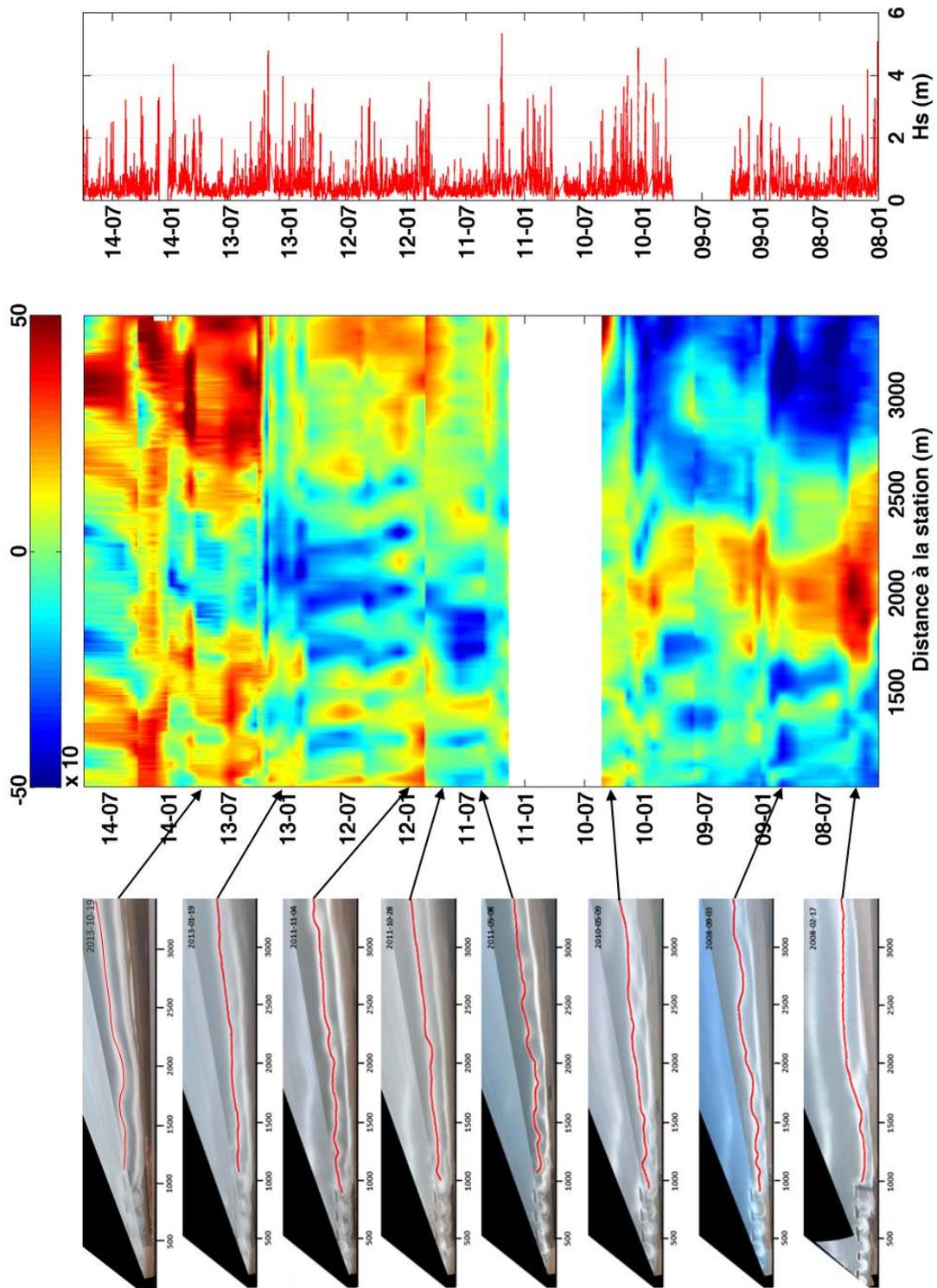


Figure 49 : Bilan de l'analyse de la dynamique de la barre interne du littoral de Valras-Plage. La colonne de gauche représente des exemples de morphologie de la barre détectée par le système vidéo, la colonne centrale représente la variation de la position de la barre par rapport à sa position moyenne, et la colonne de droite représente les fluctuations de hauteur de houle à Sète.

6.3. DYNAMIQUE DE LA BARRE EXTERNE

Les principales détections de barre externe réalisées à partir du système vidéo entre le mois de Janvier 2008 et le mois de Septembre 2014 sont présentées en Figure 50.

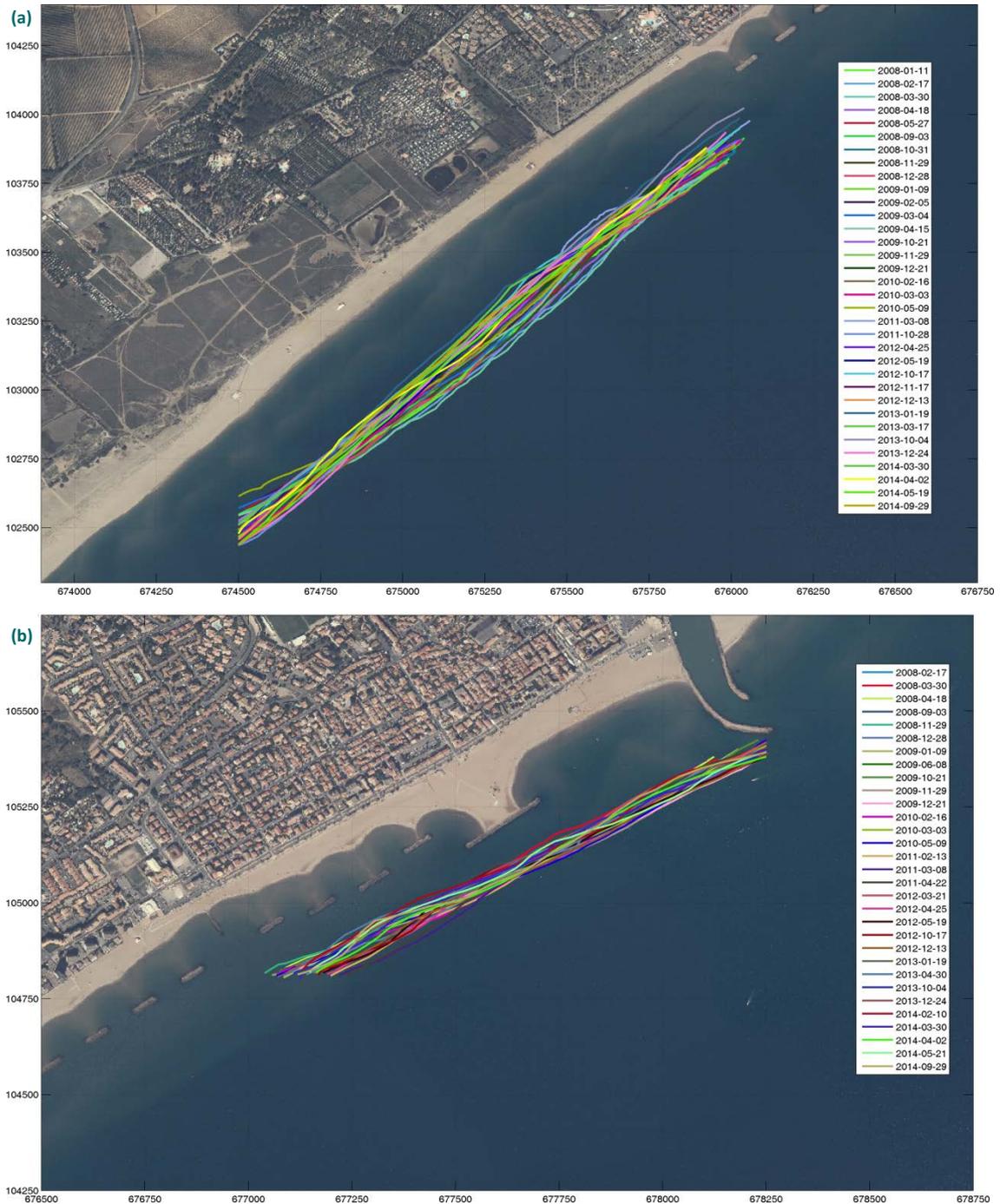


Figure 50 : Ensemble des positions de la barre externe détectées à partir du système vidéo entre Janvier 2008 et Septembre 2014. (a) zone Ouest et (b) zone Est.

6.3.1. Morphologie de la barre externe

La barre externe est très nettement observable sur la bathymétrie LIDAR de 2009 (Figure 51). Elle possède des caractéristiques différentes à l'Ouest et à l'Est du domaine :

- A l'Ouest : la barre est située entre 280m et 300m du trait de côte. Oscillant d'une morphologie ondulée à oblique, la forme de la barre externe varie peu au cours du temps.
- A l'Est : la barre est située entre 180m et 200m du trait de côte à l'arrière des tombolos. Les résultats montrent que la barre s'éloigne vers le large entre le dernier tombolo et l'embouchure de l'Orb (à environ 250m du trait de côte). De plus, dans cette zone, on note la présence d'une barre intermédiaire qui vient périodiquement alimenter la barre externe. La morphologie de la barre est principalement rectiligne sur l'ensemble de la zone Est, et varie peu au cours du temps.

De manière générale, les principales caractéristiques de la barre externe du littoral de Valras Plage correspondent aux données issues des différentes études liées aux barres sédimentaires du littoral méditerranéen (FERRER 2010, ROBIN 2010, GERVAIS 2012).

Un exemple de détection de la barre externe par le système vidéo est présenté en Figure 51. Les lignes rouges correspondent à la position de la barre obtenue à partir du système vidéo. La position transversale de la barre externe obtenue par le système vidéo (ligne rouge, Figure 51) correspond au relevé LIDAR dans une gamme de précision identique à celle trouvée dans la littérature (~10m).

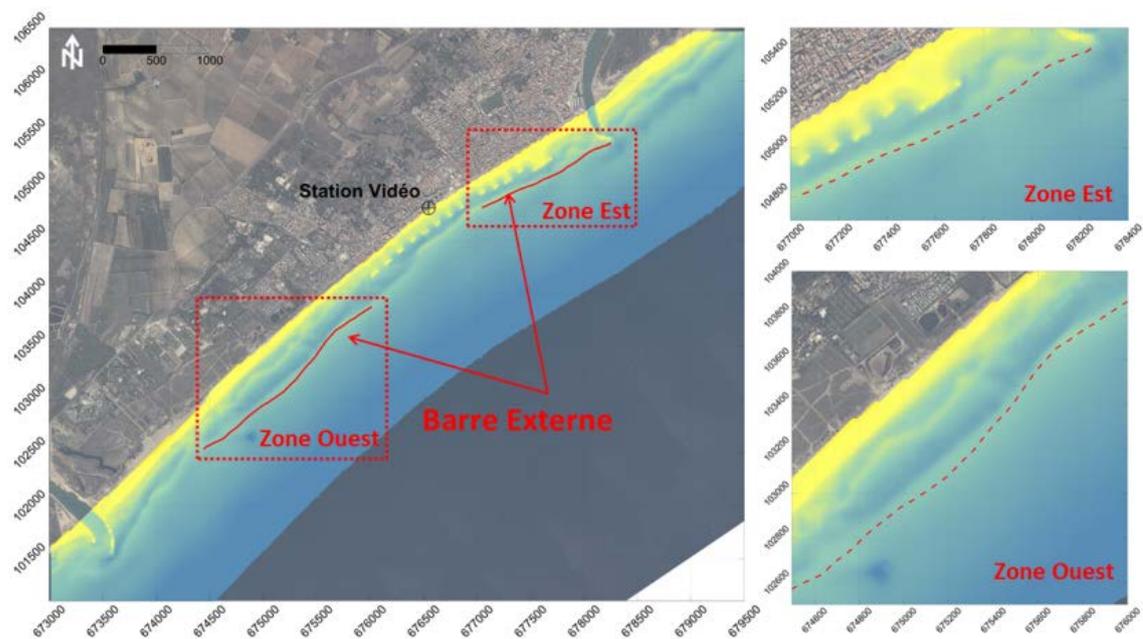


Figure 51 : Localisation de la barre externe dans la partie Ouest et Est du domaine d'étude. Les lignes rouges représentent la détection vidéo de la barre externe.

6.3.2. Dynamique de la barre externe

En raison de la très faible tridimensionnalité de la barre externe en partie Est et Ouest du domaine, la représentation des résultats sous forme de graphique, utilisée dans la Figure 49, n'est pas envisagée dans cette partie. En revanche, comme cela a été réalisé au cours de l'étude de VAN ENCKEVORT & RUESSINK (2002, part. 1), la position transversale de la barre est moyennée longitudinalement pour chaque date. Il en résulte une position transversale moyenne pour chacune des barres détectées par le système vidéo. Ces résultats sont ensuite centrés par rapport à la position moyenne de la barre dans le

temps. Ainsi, de façon identique à l'analyse de la barre interne, les valeurs positives correspondent à une migration de la barre vers le large et les valeurs négatives à une migration vers la côte.

Les résultats de l'analyse sont présentés en Figure 52.

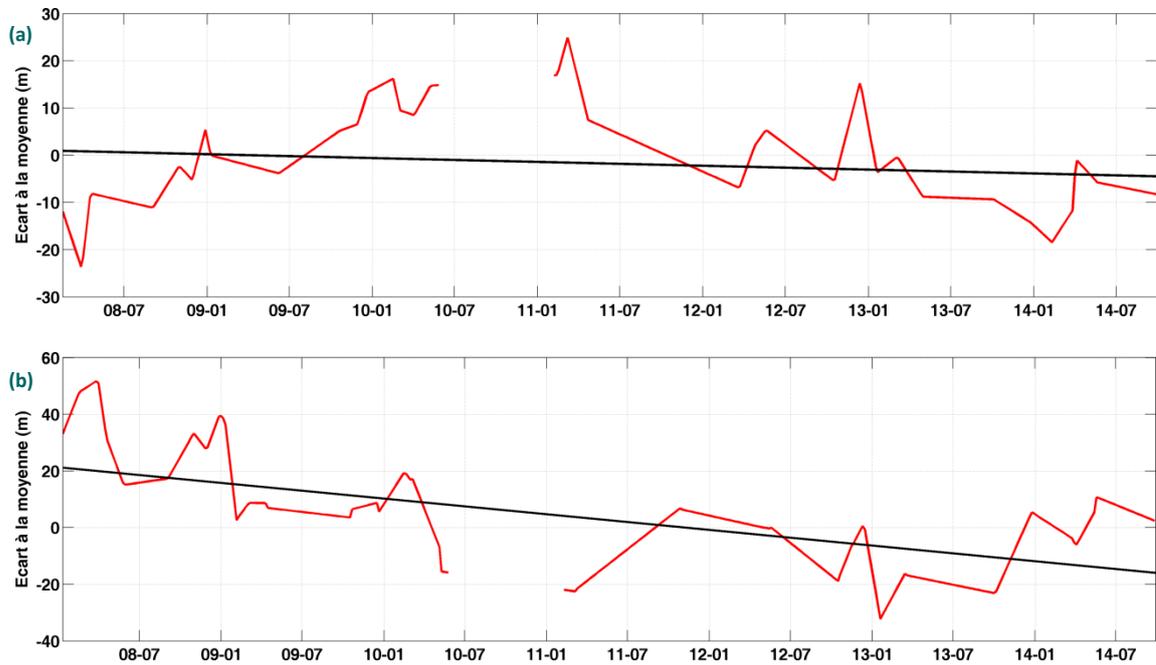


Figure 52 : Evolution de la position transversale de la barre externe au cours du temps. (a) Zone Est et (b) zone Ouest.

La barre externe située à l'Est du domaine a tendance à migrer vers la côte entre 2008 et 2011. Cette tendance s'inverse sur le reste du set de données, entre début 2011 et fin 2014. L'évolution globale de la barre tend à migrer vers le large d'environ 1m par an.

A l'Ouest du domaine, la barre migre vers le large jusqu'au début de l'année 2014. Bien que la tendance s'inverse à la fin du set de données, la barre montre une migration globale de 6.45 m / an entre début 2008 et fin 2014.

6.4. CONCLUSIONS

L'acquisition de données vidéo haute fréquence sur le littoral de Valras-Plage a permis de réaliser une analyse de la dynamique de la barre interne et externe entre Janvier 2008 et Septembre 2014. Les positions de barre sédimentaire sont extraites des images moyennées de type Timex à partir d'un algorithme de type BLIM qui permet d'obtenir une approximation de la position de la crête de la barre avec une précision d'environ 1m longitudinalement, et d'environ 10m transversalement.

6.4.1. Barre interne

L'intégralité de la zone protégée du littoral de Valras-Plage ne possédant pas de barre interne, la première partie de cette analyse est consacrée à la partie Ouest du domaine, au niveau de la zone naturelle située entre 1000m et 3500m de la station vidéo. Dans cette zone, la barre interne a pu être détectée 58 fois, soit environ 1 image par mois à l'exception des périodes estivales où la barre n'est pas visible sur les images vidéo.

Trois principales morphologies ont été définies en fonction de la tridimensionnalité de la barre. Au début de l'analyse, une morphologie de type ondulée est présente jusqu'au moins d'avril. Ce type de morphologie n'est pas observé sur le reste de la période. La perturbation engendrée par le rechargement de sable pourrait être responsable d'une modification globale de la morphologie de la barre interne. En effet, l'analyse de la morphologie entre le mois d'Avril 2008 et le mois de Septembre 2014 montre une alternance entre une forme en croissant et une forme linéaire principalement corrélée au niveau d'agitation. De façon générale, la tridimensionnalité de la barre diminue avec l'augmentation de la hauteur de la houle.

De plus, le système vidéo a permis d'analyser l'impact des structures de protection immergées en enrochements et en géotextile. Bien que ces structures permettent un déferlement de la houle, la présence de barre interne entre les structures et le trait de côte souligne une limitation de leur rôle protecteur. Les morphologies de type tombolo ne sont pas formées à l'arrière de ces structures.

6.4.2. Barre externe

Bien que l'analyse de la barre externe ait pu être réalisée dans les parties Est et Ouest du domaine, seules 34 séries d'images ont pu être isolées, l'apparition de la barre externe étant limitée à des conditions d'agitation extrêmes ($H_s > 2.5m$).

La morphologie de la barre externe oscille entre une forme ondulée et oblique, soulignant une faible tridimensionnalité de la barre. Les variations longitudinales étant très faibles, les positions transversales des barres ont été moyennées longitudinalement. Ainsi une position transversale moyenne est obtenue pour chaque mesure. Les résultats montrent qu'à l'Est du domaine, la barre externe migre vers le large d'environ 1 m/an, alors qu'à l'Ouest du domaine, elle migre d'environ 6 m/an.

Pour conclure, aucune corrélation entre la dynamique de la barre externe et la dynamique de la barre interne n'ont pu être mise en avant.

7. FREQUENTATION DES PLAGES

7.1. INTRODUCTION

La connaissance des flux de visiteurs sur le littoral, qu'il soit naturel ou aménagé, apparaît aujourd'hui comme un pré-requis indispensable à toute opération de gestion, de conservation et d'aménagement.

Dans la littérature on trouve plusieurs procédés, aux moyens financiers et humains divers, mis en œuvre pour quantifier la fréquentation des plages. Ne considérant pas les études de nature sociologique et culturelle existantes à ce sujet, cinq méthodes sont présentées ci-après.

La première méthode est illustrée par une étude commandée par l'Agence française de l'ingénierie touristique (AFIT) à la fin des années 1990 (Dolle et al., 2000). Cette étude propose une méthode en quatre points : évaluation du nombre d'usagers de la plage à partir de photographies aériennes, enquête auprès des usagers, observations in situ (pratiques de stationnement, mouvements des visiteurs sur la plage, etc.) et entretiens avec des élus, des techniciens et d'autres intervenants sur la plage. La première étape est basée sur des photographies aériennes en prise de vue oblique, sur lesquelles sont identifiés des groupes d'individus, dénombrés ensuite dans des bandes d'égale largeur perpendiculaires au rivage. Ceci permet d'établir une première évaluation de l'occupation de la plage, donnant lieu notamment à des représentations par histogrammes sur cartes. Une seconde exploitation des données aériennes consiste à repérer des groupes d'usagers et à les rapporter à des surfaces de plage indépendamment des bandes perpendiculaires de la méthode précédente. Aucune indication n'est donnée sur les paramètres de prise de vue (altitude, focale, etc.), mais les auteurs de l'étude indiquent que la prise de vue verticale serait à privilégier dans l'hypothèse d'une reproduction de la méthode.

La deuxième méthode consiste en l'installation de système de comptage des visiteurs accédant à des sites naturels «sensibles». Les équipements peuvent être des planchers sensibles ou bien des cellules infrarouges, très discrètement insérés dans le milieu, qui comptabilisent le nombre de passages parfois à l'insu des usagers. On les retrouve dans les parcs naturels, sur les sites du Conservatoire du littoral, et de plus en plus sur divers sites d'intérêt écologique, naturel et paysager. Dans le cas des plages urbaines, les accès sont nombreux, si bien qu'il n'est pas concevable de recourir à ces équipements qui, par ailleurs, impliquent investissement et entretien. De plus cette technique ne permet que la mesure des flux et ne renseigne pas sur la répartition spatiale des usagers sur plage.

Une troisième possibilité d'évaluation est l'observation sur le terrain, éventuellement assortie d'enquêtes et de comptages manuels assistés. L'opération consiste à parcourir la plage et à dénombrer les usagers avec un compteur manuel que l'on actionne à chaque fois que l'on repère une personne. En extérieur, elle ne semble pas avoir fait l'objet d'applications rapportées par écrit, ce que l'on peut interpréter comme une difficulté de mise en œuvre. Pourtant, selon les sites, on peut parfaitement imaginer qu'un comptage organisé de façon méthodique avec plusieurs opérateurs puisse fournir des résultats intéressants. Mis à part le coût évidemment substantiel de la main-d'œuvre pour procéder au comptage, l'avantage décisif de cette méthode réside dans le très faible coût du matériel d'acquisition de l'information. Toutefois, pour ce procédé comme pour le précédent, la donnée produite ne permet pas de connaître l'occupation spatiale de la plage par les usagers et ne peut être réalisé à haute fréquence (par exemple toutes les heures, chaque jour, sur une période donnée).

Des études réalisées sur l'île de Ré par le CNRS ou par le Conservatoire des Espaces Naturels du Languedoc-Roussillon (programme LIFE LAG'Nature, 2009-2011) regroupent ces deux méthodes avec la mise en place comptages d'usagers, l'étude de photographies aériennes et la réalisation d'enquêtes. Malgré les moyens mis en œuvre dans ces campagnes, les seuls résultats obtenus sont des valeurs

moyennes de densité d'occupation et du nombre de personnes par mètre linéaire sur les plages étudiées. Ces résultats, qui permettent de distinguer les plages plus ou moins fréquentées sur le littoral étudié, demeurent cependant limités. En effet, l'évolution de la fréquentation sur différentes périodes n'est pas abordée, ni la répartition des usagers sur la plage.

La quatrième méthode, utilisée sur la plage des Ponchettes à Nice (Robert et *al.*, 2007), avait pour objectif d'étudier la fréquentation de la plage à la fois spatialement et temporellement à partir de photographies prises manuellement toutes les heures depuis une tour, à une altitude permettant de visualiser la totalité de la plage. Les photographies sont traitées manuellement par digitalisation des différentes personnes présentes sur la plage. La faisabilité du repérage des usagers est évaluée en jouant sur les contrastes et les agrandissements des images et en confrontant avec les photographies voisines. La photo offre une grande richesse d'informations sur la fréquentation des plages étant donné qu'elle permet de visualiser la répartition spatiale des usagers et de localiser certaines zones d'intérêt sur les plages comme les accès, la zone de baignade surveillée ou les douches. Bien que cette méthode apporte des résultats intéressants, les dénombrements produits sont à prendre comme des ordres de grandeurs étant donné que le niveau de résolution des appareils utilisés ne garantit pas toujours de bien distinguer chaque individu sur la plage, notamment dans la zone la plus éloignée de la prise de vue. La mise en œuvre d'une telle méthode présente l'avantage d'être peu coûteuse et facile à mettre en œuvre mais l'acquisition de données n'est pas pérenne et le traitement des images rudimentaire. Les résultats obtenus sont intéressants mais pas suffisants pour étudier avec précision la fréquentation des plages et proposer des solutions en termes de gestion et d'aménagement. De plus, le traitement des images ne repose pas sur une technique de détection précise ce qui engendre un travail fastidieux et peu fiable contrairement à l'utilisation d'une technique de photogrammétrie par exemple.

La dernière méthode, mise en œuvre sur une plage de Santander (Jimenez et *al.*, 2007 ; Guillén et *al.*, 2007), est basée sur l'utilisation de système vidéo similaire à celui Valras Plage. Les études sont réalisées à l'aide d'un algorithme d'analyse des images, permettant de quantifier et localiser les usagers sur la plage. Une fonction de Kernel dite « salt and pepper » est utilisée pour repérer les individus : en comparant l'intensité d'un pixel avec les pixels voisins et par rapport à une valeur seuil établie, l'algorithme permet de repérer les zones de plage occupées. Une étape de calibration –validation de l'algorithme est indispensable afin d'ajuster les paramètres de détection (par exemple la valeur du seuil) à la zone étudiée : la position des usagers sur la plage est définie manuellement sur une sélection d'images de la base de données et la calibration est réalisée de manière itérative. L'algorithme est ensuite ajusté afin que la valeur seuil et la fonction de Kernel soient adaptées à chaque zone étudiée. La fonction de Kernel dépend de la résolution de la caméra ainsi que de la densité d'usagers tandis que le seuil est défini à partir des valeurs de teinte, saturation et brillance des pixels « occupés » en comparaison aux pixels de plage vide. Une fois la calibration réalisée et les paramètres de détection validés, l'algorithme est appliqué à la totalité des images et permet d'estimer le nombre et la localisation des usagers sur la plage. Divers résultats sont présentés : évolution du nombre d'usagers au cours d'une journée, histogrammes présentant la position des usagers par rapport à un repère particulier sur la plage (entrée principale, trait de côte) et cartes colorées localisant le nombre d'usagers sur la plage (valeurs estimées et valeurs détectées). Cette étude est très intéressante de par la méthode utilisée et les résultats accessibles. En effet, l'utilisation d'un système vidéo est une stratégie adaptée à l'étude de fréquentation des plages étant donné qu'elle permet d'avoir des données en continu et pérennes et de couvrir de larges étendues de plage. Le traitement des images par des algorithmes adaptés à l'étude en question et aux propriétés propres des images s'avère être une méthode robuste permettant d'obtenir des résultats fiables.

A l'instar des travaux cités ci-avant CASAGEC INGENIERIE a développé et utilisé des algorithmes pour étudier la fréquentation des plages de Biarritz (Anjalbert, 2008). Cette technique est ici mise en œuvre sur les plages de Valras.

7.2. METHODOLOGIE

La technique de détection automatisée utilisée dans le cadre du suivi de la fréquentation des plages est basée sur un algorithme de comparaison de l'intensité des pixels présents dans une région d'intérêt.

L'algorithme se divise en 3 étapes :

- Sélection d'une zone d'intérêt qui sera utilisée pour l'ensemble du set de données sélectionné (Figure 53.a),
- Application d'un filtre de lissage puis transformation de la matrice en binaire (Figure 53.b et c),
- Détection des différents polygones délimitant les utilisateurs de la plage (Figure 53.d).

Les coordonnées des zones détectées sont ensuite utilisées pour réaliser différents types d'analyses statistiques (cartes d'occupation des zones, fréquentation horaire moyenne, fréquentation saisonnière). Il est important de noter que cette méthode permet d'évaluer une fréquentation de plage en termes de surface d'occupation (m²). La technique ne permet pas de mesurer le nombre de personnes présents sur les plages.

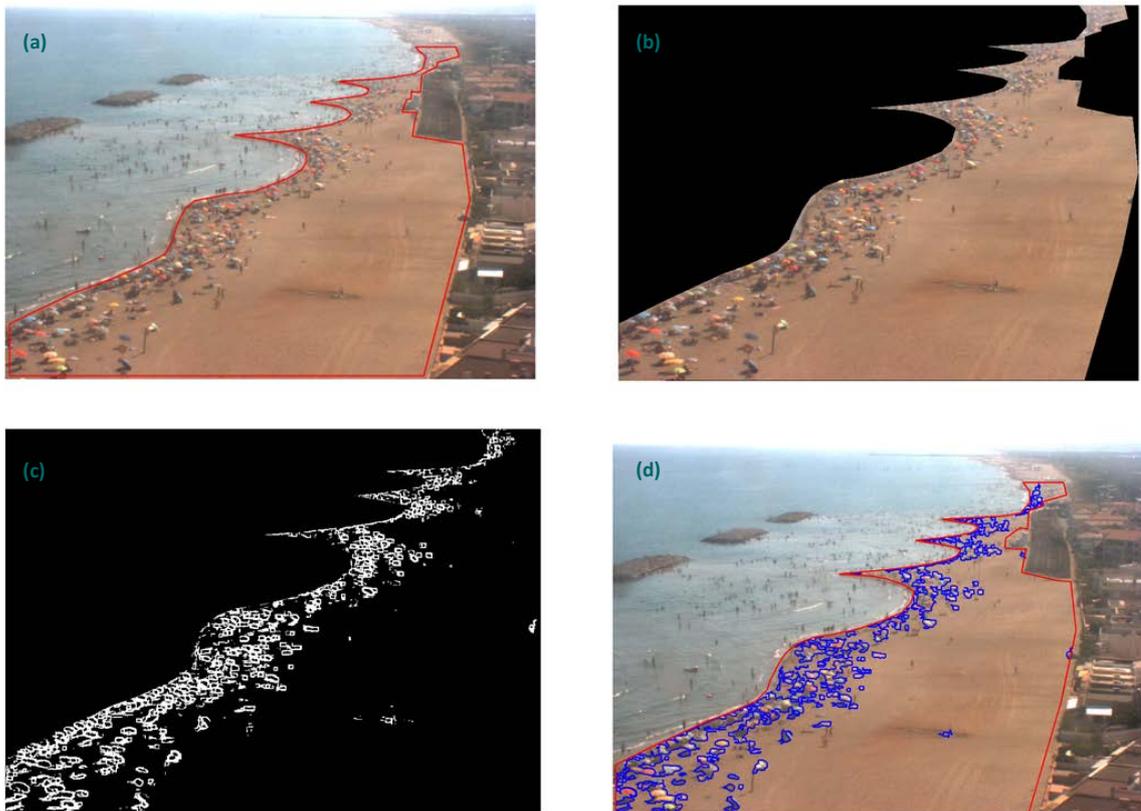


Figure 53. Sélection de la zone d'intérêt (a), filtration et passage en mode binaire (b, c), et délimitation des polygones correspondant aux utilisateurs de plage (d).

7.3. LIMITATIONS INHERENTES AU SITE D'ETUDE

Dans cette partie de l'étude, les caméras 1 et 4 sont utilisées respectivement pour analyser la partie Ouest et Est du domaine. Plusieurs paramètres limitent l'analyse de la fréquentation des plages du littoral de Valras plage :

- La précision de la technique dépend directement de la résolution du système vidéo. Il n'est donc pas envisagé d'analyser la fréquentation des plages au-delà d'une distance d'1 km à l'Est du domaine (Figure 54.a) et delà d'1.6 km à l'Ouest du domaine (Figure 54.b).
- Lors de la période estivale une multitude de structures d'accueil des utilisateurs de la plage (cabane, chemin d'accès, fauteuils, etc.) peuvent limiter de façon importante la couverture du suivi particulièrement sur la partie Est du domaine (Figure 54.c et d). La forme et localisation de ces structures varie au cours des années.

Les zones de suivi ainsi sélectionnées représentent environ 50 000 m² dans la zone Est et 35 000 m² dans la zone Ouest.



Figure 54 : Zone d'analyse de la fréquentation des plages à l'Est (a) et à l'Ouest du domaine (b), et exemples de structures d'accueil présentes sur la partie Est (c et d).

7.4. TRAITEMENT DES DONNEES 2008-2014

L'analyse de la fréquentation des plages de Valras a été réalisée à partir des données suivantes :

- A l'exception des étés 2008 et 2010 où la station vidéo n'était pas opérationnelle (Section 3.4), l'ensemble des données estivales ont été traitées entre 2009 et 2014.
- La période d'analyse débute le 1^{ier} Juin et se termine le 30 septembre de chaque année. En amont et en aval de ces dates, le faible niveau de fréquentation des plages correspond à la limite de détection de l'algorithme de traitement.
- Le suivi est réalisé entre 10h et 20h heures locales.

1200 images par caméra et par an sont ainsi traitées, soit un total d'environ 14 000 images (7000 heures de suivi).

7.4.1. Distribution spatiale

La mesure de la distribution spatiale de la fréquentation des plages est réalisée de la manière suivante :

- L'ensemble des images vidéo sont traitées par l'algorithme de détection automatisée (Section 7.2),
- Pour chaque images, l'intérieur des polygones est pondéré par le chiffre 1 alors que l'extérieure est pondéré par le chiffre 0,
- Une fois l'ensemble des données traitées, les matrices ainsi obtenues sont sommées puis normalisées,
- La matrice finale représente le pourcentage maximal d'occupation en chaque point de la zone de suivi.

Les résultats sont présentés en Figure 56 et Figure 57.

Les zones d'occupations principales sont très nettement concentrées dans une bande d'environ 20 m de large, parallèle au trait de côte, et située au plus bas niveau de la plage sèche. Sur l'ensemble de l'espace restant, les résultats montrent une occupation quasi nulle, à l'exception des zones de douches ou d'accès aux plages. La surface d'occupation moyenne représente environ 25 % de la surface totale. Cette distribution est commune aux parties Est et Ouest de la zone d'étude, et se retrouve pour chacune des années de suivi.

Dans la partie Est du domaine, la partie la plus étroite de la plage, au droit de l'épi, correspond au pic de fréquentation. La zone d'occupation est plus large (environ 30 m), et s'étend à proximité du perré de front de mer.

Cette zone se situe au droit de deux accès majeur à la plage, situé au début de la promenade. Un zoom de cette partie est présenté en Figure 55.

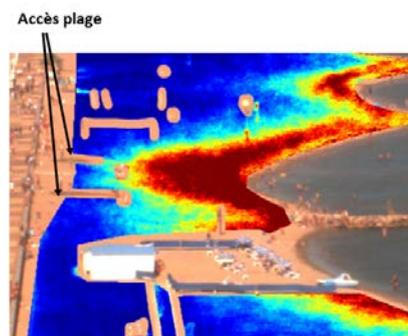


Figure 55 : Zoom sur la zone d'occupation principale de la partie Est du domaine

Dans la partie Ouest du domaine, la distribution est globalement homogène le long du trait de côte jusqu'au droit du camping La Plage & Bord de Mer. Les résultats montrent que le taux de fréquentation est globalement plus faible à l'Ouest du domaine, particulièrement entre la station vidéo et l'extrémité de la zone de ganivelle. Dans cette zone, les accès aux plages sont plus limités que dans les autres parties du domaine de suivi (absence de promenade sur le haut de plage).

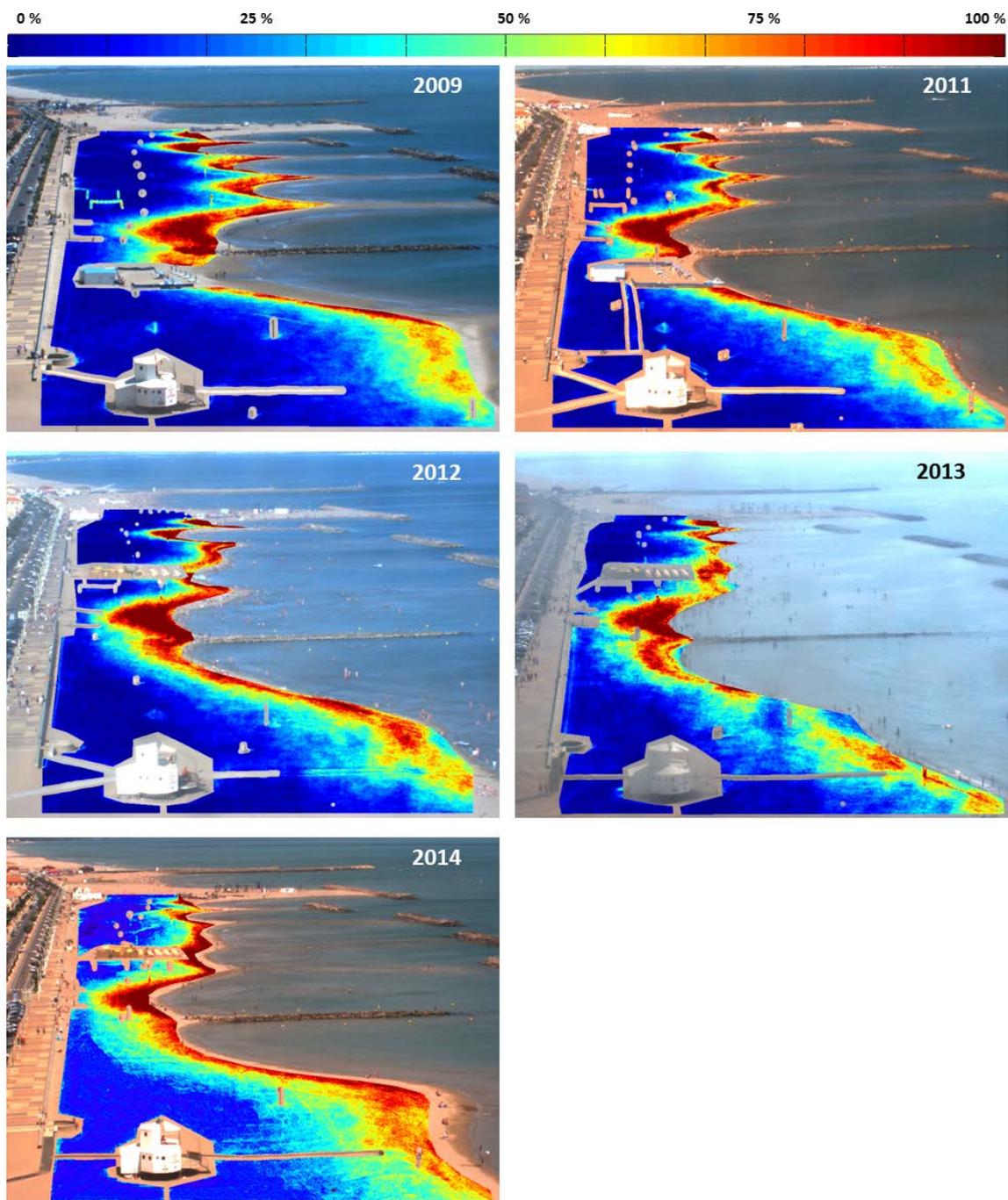


Figure 56 : Carte de distribution de la fréquentation de la zone Est des plages de Valras. L'échelle de couleur correspond au pourcentage d'occupation de la zone (rouge : zones les plus fréquentées, bleu : zones les moins fréquentées)

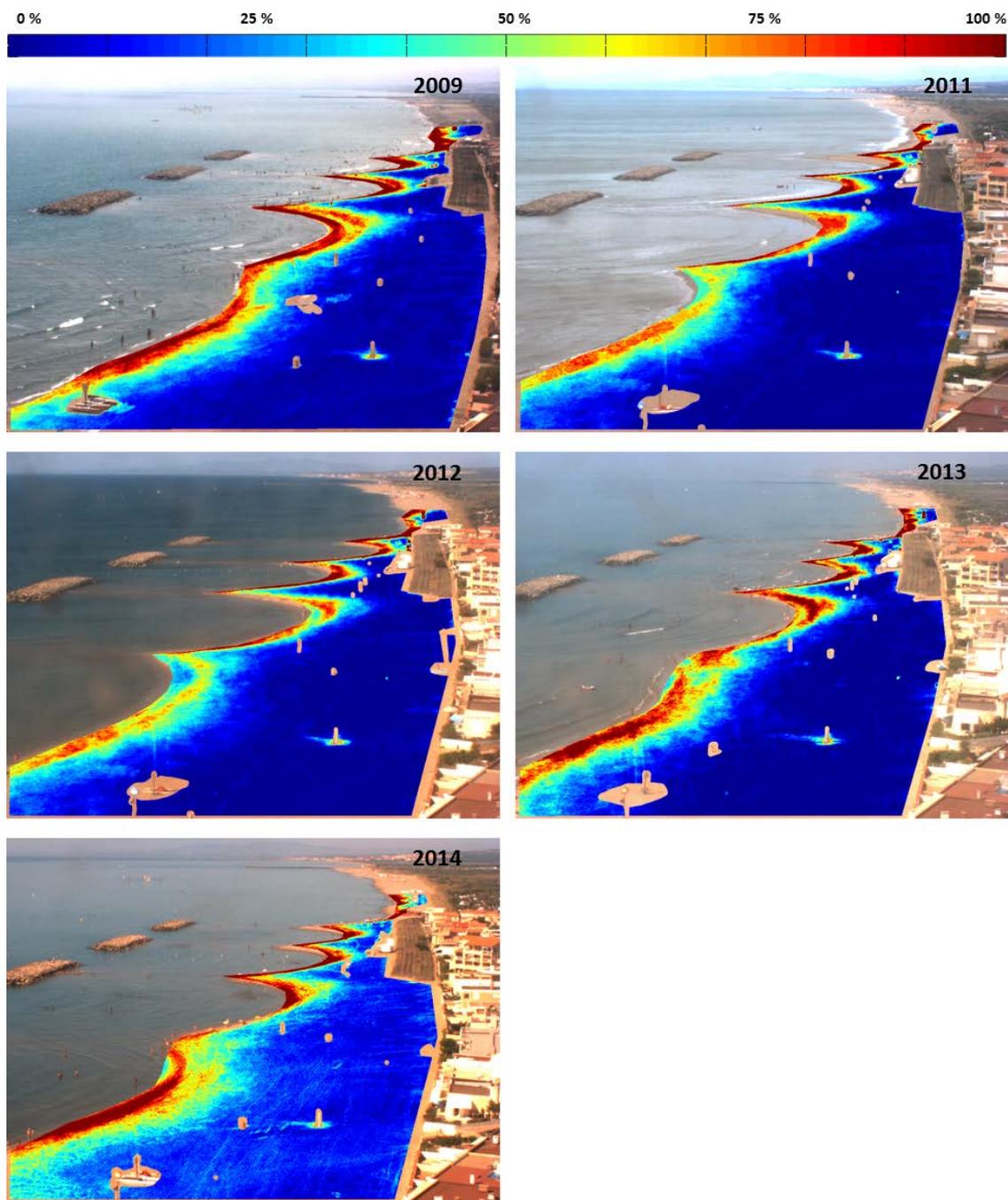


Figure 57 : Carte de distribution de la fréquentation de la zone Ouest des plages de Valras. L'échelle de couleur correspond au pourcentage d'occupation de la zone (rouge : zones les plus fréquentées, bleu : zones les moins fréquentées)

7.4.2. Distribution temporelle

L'analyse de la distribution temporelle de la fréquentation des plages est réalisée de la manière suivante :

- L'ensemble des images vidéo sont traitées par l'algorithme de détection automatisée (Section 7.2),
- La surface d'occupation de la plage est calculée et enregistrée,
- Les données de surface sont ensuite traitées par des outils statistiques permettant d'obtenir des surfaces d'occupation moyenne par heure, par mois et par an.

7.4.2.1. Echelle journalière

A l'échelle journalière, la distribution est centrée autour de deux périodes de fréquentation principales. Une première période en fin de matinée entre 11h et 12h, puis une seconde en fin d'après-midi entre 16h et 18h. A 17h (pic de fréquentation journalier) la surface d'occupation représente le double de la surface enregistré à 12h.

Cette distribution est commune aux parties Est et Ouest du domaine d'étude. En termes de surface occupé, les valeurs de surface d'occupation sont plus faible plus faible dans la partie Ouest que dans la partie Est.

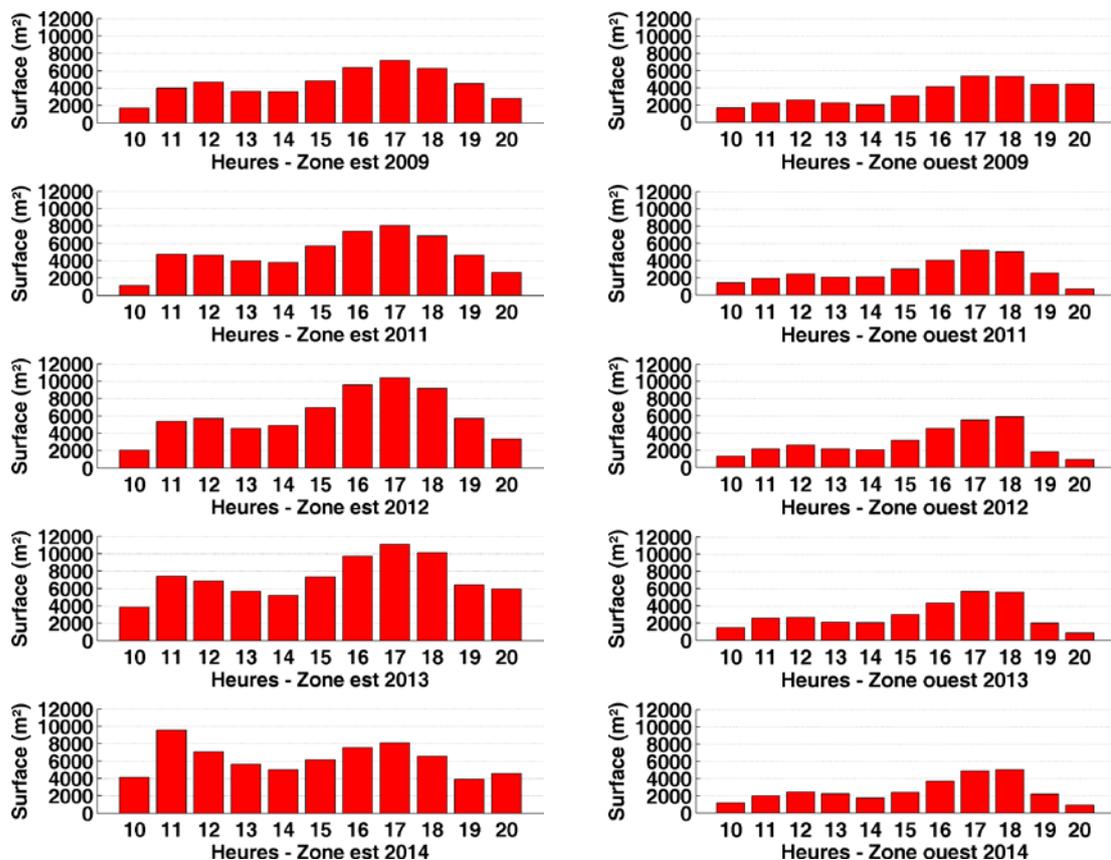


Figure 58 : Distribution horaire de la fréquentation des plages dans la partie Est (colonne de gauche) et dans la partie Ouest (colonne de droite) du domaine d'étude, entre 2009 et 2014.

7.4.2.2. Echelle mensuelle

A l'échelle mensuelle, la distribution est centrée sur le mois d'aout pour chacune des années de suivi et pour la partie Est et Ouest du domaine d'étude. Alors que l'augmentation de la surface d'occupation est généralement linéaire entre le mois de Juin et le Mois d'Aout, une diminution brutale est enregistrée au mois de Septembre. Au cours de l'année 2014, le taux de fréquentation est malgré tout resté relativement important pendant le dernier mois de suivi.

Comme vu précédemment, les valeurs de surface d'occupation sont plus faibles dans la partie Ouest que dans la partie Est.

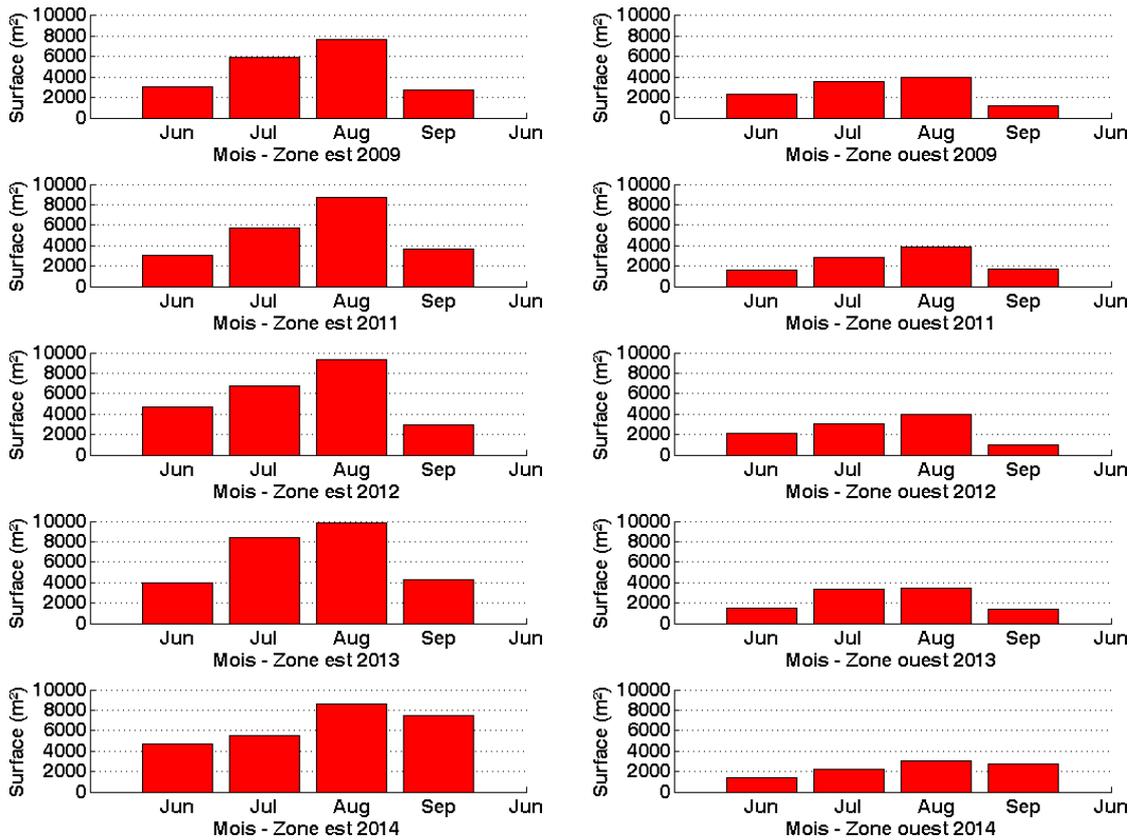


Figure 59 : Distribution mensuelle de la fréquentation des plages dans la partie Est (colonne de gauche) et dans la partie Ouest (colonne de droite) du domaine d'étude, entre 2009 et 2014.

7.4.2.3. Echelle annuelle

Les évolutions annuelles de la fréquentation des plages de Valras montrent que :

- Dans la partie Est du domaine : le taux de fréquentation est en nette augmentation entre 2009 et 2013 (60 % d'augmentation en 4 ans), alors qu'il baisse en 2014 pour retrouver des valeurs proches de celles enregistrées en 2012.
- Dans la partie Ouest du domaine : le taux de fréquentation est en légère baisse sur la totalité des années de suivi (baise d'environ 15% entre 2009 et 2014).

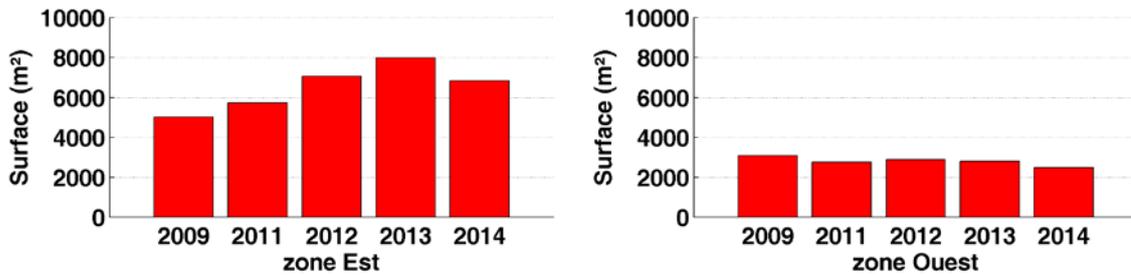


Figure 60 : Distribution annuelle de la fréquentation des plages dans la partie Est (colonne de gauche) et dans la partie Ouest (colonne de droite) du domaine d'étude.

7.5. CONCLUSIONS

Cette section concernant l'étude de la fréquentation de plage a fait l'objet d'une revue bibliographique afin de bien situer l'utilisation des systèmes vidéo dans l'état de l'art.

La technique de détection automatisée basée sur un algorithme de comparaison de l'intensité des pixels a permis d'obtenir des résultats intéressants.

En effet, 2 zones représentant approximativement 50 000 m² de plage dans la partie Est de domaine et 35 000 m² dans la partie Ouest du domaine, ont pu être suivies de façon horaire entre le 1^{er} juin et le 30 septembre. Un total de 7000 heures de suivi a donc permis de réaliser un bilan dont les principales conclusions sont les suivantes :

- Une occupation des plages plus importante dans la partie Est du domaine d'étude, conséquence de la commodité des accès plage.
- Une distribution des utilisateurs de plage dans une bande d'environ 20 m de large située à proximité du trait de côte (25% de la surface total), et une quasi absence d'occupation dans le reste du domaine.
- Deux pics journaliers d'occupation aux alentours de 11h et 17h.
- Une augmentation régulière du taux de fréquentation entre le mois de Juin et le mois d'Aout, suivi d'une brusque diminution du taux au cours du mois de Septembre.
- Une augmentation nette du taux de fréquentation dans la partie Est au cours des 6 années de suivi et une légère diminution dans la partie Ouest.

8. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Si la plage de Valras n'a présenté aucun signe de fragilité milieu du 20^{ème} siècle en enregistrant un engraissement de 55 000 m² entre 1935 et 1954, les aménagements de l'embouchure de l'Orb au milieu des années 60 coïncident avec les premiers signes de déstabilisation de la plage. Entre 1968 et 1981, le rallongement des digues de l'embouchure de l'Orb a engendré une perturbation du transit sédimentaire orienté vers le Sud-Ouest. Il en résulte une érosion moyenne d'environ 4.2m par an des plages situées à l'Ouest de l'embouchure.

Cette érosion continue, à laquelle s'ajoutent des évènements de tempête majeurs qui peuvent engendrer des perturbations importantes (inondation, submersion, destruction de l'urbanisme), a conduit à la mise en place d'une succession de différents types de protections côtières (brise lames, épis, ganivelles, ouvrage immergés, etc.). Le constat d'une augmentation de l'érosion dans la zone située directement à l'Ouest de la dernière structure implantée, aboutit à la construction de 15 brise-lames sur un linéaire d'environ 3km entre 1985 et 2009.

Pour pallier à la fragilité de son littoral face aux assauts de la mer, le Conseil Général de l'Hérault s'est lancé depuis 2007 dans un programme de défense et de valorisation de sa côte à travers des travaux de protection et de restauration des plages (soit un investissement de 100 M€ sur 5 ans dont plus de 20 M€ financés par le Département). Parallèlement, le CG34 s'est engagé dans des projets européens de recherche appliquée avec ses voisins méditerranéens (projets Beachmed depuis 2002 et Coastance aujourd'hui). C'est dans le cadre de ces différents projets européens que la collectivité s'est dotée d'un système innovant de suivi du littoral de Valras-Plage.

La station vidéo de Valras-Plage est opérationnelle depuis le mois de Janvier 2008. Installée au sommet de la Tour Bel Horizon à une hauteur de 47m, elle était initialement composée de 6 caméras permettant d'observer le littoral sur un rayon d'environ 2km. Une modification de la configuration de la station a été réalisée au début de l'année 2009. Cette nouvelle configuration à 4 caméras possède deux zooms, rajoutés aux extrémités Est et Ouest du domaine pour privilégier un suivi plus précis dans un rayon de 3km autour de la station.

Le présent document constitue la restitution finale liée au marché SP11DDL03 intitulé « Exploitation des données acquises par la station de suivi vidéo de Valras-Plage (Hérault) ». Dans cette étude, les données vidéo sont traitées suivant différentes approches que sont l'analyse diachronique de la position du trait de côte, l'analyse de la surcote des tempêtes, l'étude de la dynamique des barres sédimentaires, et l'analyse de la fréquentation des plages.

8.1. EVOLUTION DU TRAIT DE COTE

Dans le but d'analyser la dynamique de la position du trait de côte, un ensemble d'environ 160 séries d'images vidéo ont été isolées et traitées à l'aide d'un algorithme de segmentation permettant d'obtenir la position (X,Y) du trait de côte avec une précision de ±5m. Au regard du nombre important de données, l'utilisation d'une méthode statistique de type analyse factorielle (AFC) a été privilégiée. Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

- Un changement de la configuration des tombolos dans la partie Est. Une tendance nette à l'érosion apparaît à partir de 2010, particulièrement au niveau de l'épi.
- Une certaine stabilité des tombolos situés à l'Ouest.
- La présence régulière de morphologies tridimensionnelles à l'arrière des ouvrages immergés et dans la zone naturelle, dont la longueur d'onde varie de 200 à 400m vers l'Ouest.

- Le secteur Ouest présente une relative « stabilité » avec un taux d'évolution de la surface de plage de l'ordre de $-450 \text{ m}^2/\text{an}$. La zone protégée par les brise-lames une tendance à l'accrétion ($+434 \text{ m}^2/\text{an}$) alors la surface zone naturelle à tendance à diminuer ($-880 \text{ m}^2/\text{an}$).
- Le secteur Est montre une tendance érosive significative avec un taux d'évolution de surface de plage de $-2589 \text{ m}^2/\text{an}$.

Ces taux d'évolution ont été utilisés pour projeter la position du trait de côte à l'horizon 2030. Ces résultats, qui n'intègrent pas d'éventuelles modifications climatiques (augmentation du niveau marin, augmentation du rythme des tempêtes, etc.) sont présentés à titre indicatif et ne peuvent être retenus comme une projection précise.

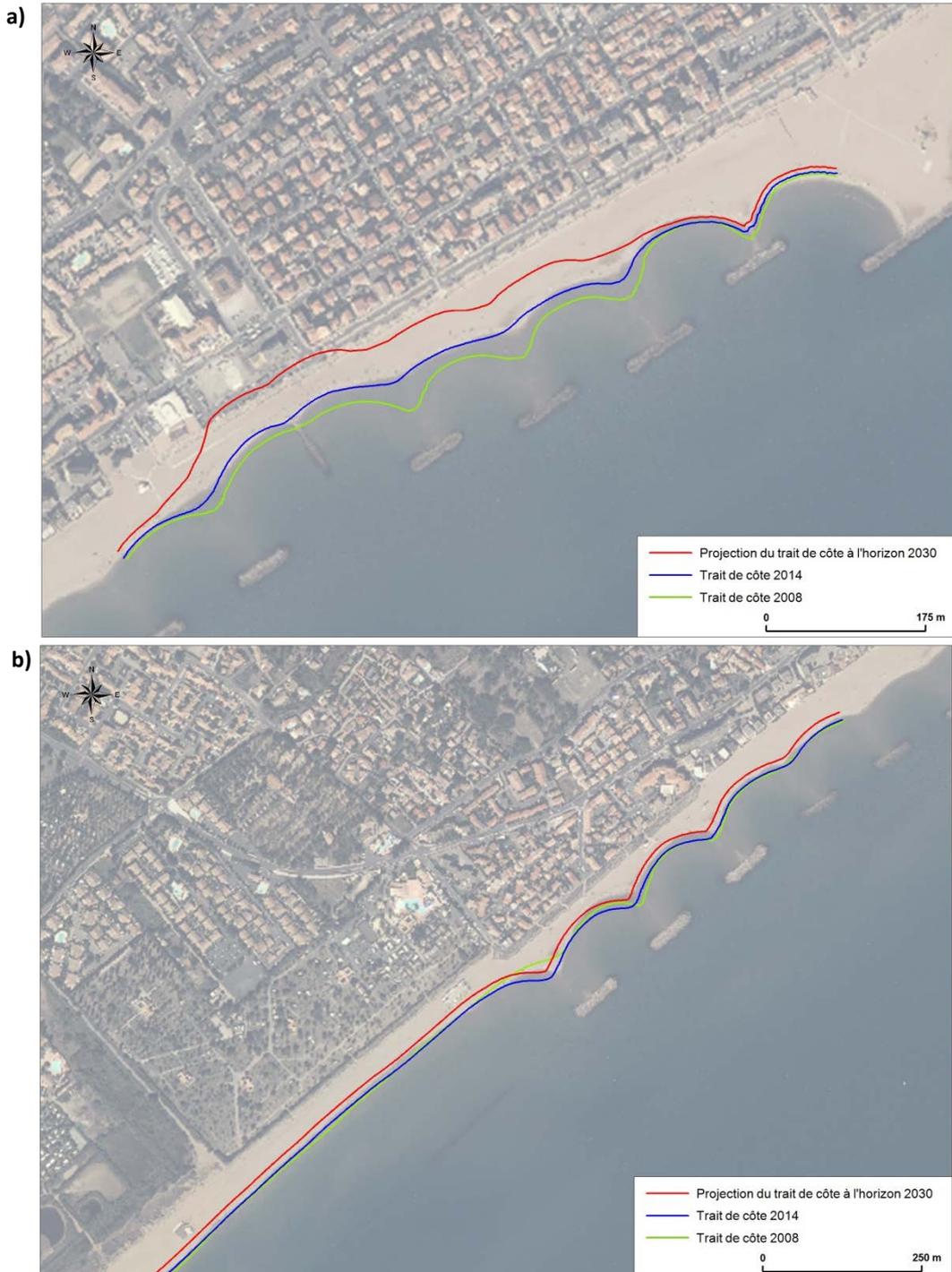


Figure 61 : Position moyenne du trait de côte estimé par le système vidéo en 2008 (trait vert) et en 2014 (trait bleu), et projection du trait de côte à l'horizon 2030.

Dans la zone Est (**Erreur ! Source du renvoi introuvable..a**), la projection montre qu'à l'horizon 2030 la position du trait de côte au droit de l'épi en enrochement est située à l'arrière de perré sur un linéaire d'environ 700 m de part et d'autre de la structure. A l'Est de l'épi la largeur de plage augmente progressivement mais la surface global diminue très nettement. Dans la zone Ouest (**Erreur ! Source du renvoi introuvable..b**), la position du trait de côte varie très peu. A l'horizon 2030, le trait de côte n'attend ni la zone de ganivelle, ni le pied de dune dans la partie naturelle.

Au sein du secteur Est, la zone située à proximité de l'épi en enrochement constitue une zone à alea fort (**Erreur ! Source du renvoi introuvable..**) pour les raisons suivantes :

- Plus faible largeur de plage du littoral,
- Taux d'érosion croissant d'Est en Ouest jusqu'à l'épi,
- Perré atteint par la laisse de tempête pour chacun des évènements retenus.

De plus, la présence de bâtiments situés à proximité du perré (Casino et résidences particulières), et le fait que la zone coïncide avec le taux de fréquentation de plage le plus élevé, en fait une zone à enjeux majeur.

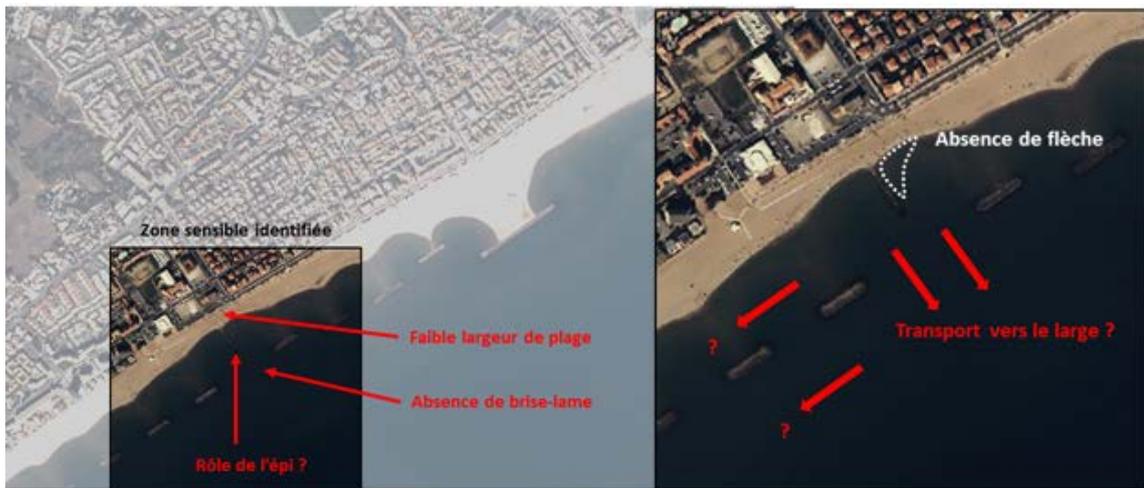


Figure 62 : Localisation de la zone sensible identifiée par l'analyse des données vidéo.

L'épi construit en 1995 est la seule structure transversale sur l'ensemble du littoral de Valras. Alors que l'ensemble des structures de protection sont constitués de brise-lames séparés les uns des autres d'environ 60 m, cette zone est ouverte vers le large sur plus de 160 m. Le rôle de l'épi est difficilement observable dans la mesure aucune flèche sableuse ne se forme en amont de la structure.

On peut donc supposer que les sédiments peuvent être transporté à l'intérieur de l'espace « brise-lame/trait de côte » et ainsi alimenter la partie située à l'Ouest de l'épi. Par ailleurs, l'action des vagues peut engendrer un transport sédimentaire orienté vers le large. Une partie du sable transportée peut ensuite être remis dans le système via l'alimentation de la barre externe et le transit Est-Ouest.

8.2. SURCOTES DE TEMPETES

Concernant l'analyse des surcotes de tempête, les données issues du marégraphe et du houlographe de Sète, ainsi que les observations réalisées par la DREAL-LR, ont permis d'isoler les 6 événements les plus énergétiques. L'utilisation combinée d'un modèle numérique et des observations vidéo, a permis de mettre en évidence les points suivants :

- Le niveau d'eau atteint lors des tempêtes correspond à l'altitude du pied du perré situé en haut de plage dans la partie Est du domaine et plus particulièrement au droit de l'épi en enrochement. A l'Ouest du domaine la laisse de tempête est contrainte par la zone de protection en ganivelles, alors qu'elle « recule » de façon plus conséquente à l'arrière des ouvrages immergés et dans la zone naturelle.



Figure 63. Exemple de surcote de tempête observé sur les parties Est et Ouest du littoral de Valras-Plage en Octobre 2009.

- Pour chacun des six événements retenus l'ensemble des tombolos est submergé, à l'exception du tombolo situé le plus à l'Est.
- Au cours d'un événement de tempête, le niveau d'eau monte simultanément à la hauteur significative de la houle. Le retour vers l'état d'équilibre est initié lors du début de la diminution de la houle, mais met plus de temps à s'établir définitivement. Ce phénomène est principalement observé au droit des tombolos dans la partie Est de domaine.

8.3. DYNAMIQUE DES BARRES SEDIMENTAIRES

Les positions des barres internes et externes ont été extraites des images vidéo à l'aide d'un algorithme basé sur la variation d'intensité des pixels. Ainsi, l'analyse de 58 positions de barre interne (partie Ouest du domaine comprise entre les ouvrages immergés et la zone naturelle) et 34 position de barre externe (partie Est et Ouest du domaine) ont permis de mettre en avant les points suivants :

- La barres interne possède trois types de morphologies identifiées en fonction de la tridimensionnalité de la barre (morphologie linéaire, ondulée ou en croissant). Alors qu'au début du set de données, la morphologie de type ondulée semble stable, les perturbations engendrées par le rechargement de plage (début de l'année 2008) modifient de la morphologie de la barre. Jusqu'à la fin de l'année 2012, la morphologie de la barre oscille entre une forme en croissant et une forme linéaire. A partir de 2013, la barre présente une forme ondulée à l'extrémité du domaine (entre 2500 m et 3000 m de la station) qui a tendance à venir périodiquement alimenter la barre externe.
- Les variations de morphologie de la barre interne sont principalement corrélées avec le niveau d'agitation. La tridimensionnalité de la barre diminue avec l'augmentation de la hauteur de houle.

- Les résultats montrent que les ouvrages immergés permettent un déferlement de la houle, mais leur impact est cependant limité. En effet la présence d'une barre interne à l'arrière de ces structures souligne un niveau d'agitation important.
- La morphologie de la barre externe oscille entre une forme ondulée et oblique, soulignant une faible tridimensionnalité de la barre.
- La barre externe migre progressivement vers la côte d'environ 1.97 m/an dans la partie Est du domaine, et elle migre vers le large d'environ 8.11 m/an dans la partie Ouest du domaine.
- L'analyse combinée des variations de la position du trait de côte et de la position de la barre interne montrent une interaction forte. Les résultats montrent :
 - Une similarité dans les caractéristiques des morphologies tridimensionnelles : les « beach-cups » présents au niveau du trait de côte ont les mêmes longueurs d'ondes que les croissants présents au niveau de la barre interne. Ces longueurs d'ondes varient d'environ 200m au niveau des ouvrages immergés à 400m au niveau de la zone naturelle.
 - Une similarité dans l'apparition des structures tridimensionnelles : les changements morphologiques de la barre interne et du trait de côte apparaissent simultanément en fonction des conditions d'agitation. La tridimensionnalité augmente à la suite d'un événement de tempête lorsque la houle diminue.

8.4. FREQUENTATION DES PLAGES

L'étude de la fréquentation des plages au cours des périodes estivales a pu être réalisée à partir d'un algorithme de détection automatisée innovant. Un ensemble de plus 14 000 images vidéo, soit plus de 7 000 heures de suivi, ont permis de mettre en avant les points suivants :

- La répartition spatiale des utilisateurs de plages est concentrée sur une bande de 20 m de large situé à proximité du trait de côte, alors que le reste de la plage est très peu occupé voir abandonné. La zone de fréquentation la plus large se situe au droit de l'épi en enrochement, là où la plage est la plus étroite.
- L'occupation des plages est plus importante dans la partie Est du domaine d'étude, conséquence de la commodité des accès plage. De plus, le taux de fréquentation de la partie Est a globalement augmenté lors des 6 années de suivi (+ 60% entre 2009 et 2014) alors qu'il tend à diminuer dans la partie Ouest.



Figure 64. Exemple de fréquentation sur les parties Est et Ouest du littoral de Valras-Plage en Août 2017.

- Deux pics de fréquentation sont enregistrés au cours de la journée (11h et 17h). Le taux d'utilisateurs augmente au cours de la saison et atteint son pic au mois d'Août. Le taux diminue ensuite rapidement au cours du mois de Septembre.

In fine, les données de fréquentation de plage ont été croisées avec les projections du trait de côte de la partie Est à moyen termes. Les résultats sont présentés sur la figure ci-contre.

La largeur de plage initiale étant d'environ 40 m et le taux de recul annuel d'environ 2m/an au niveau de l'épi, la projection montre une arrivée à la saturation de la plage en termes de fréquentation à échéance 2024.

Cette projection constitue une information importante et justifie d'initier des réflexions d'intervention sur ce secteur.

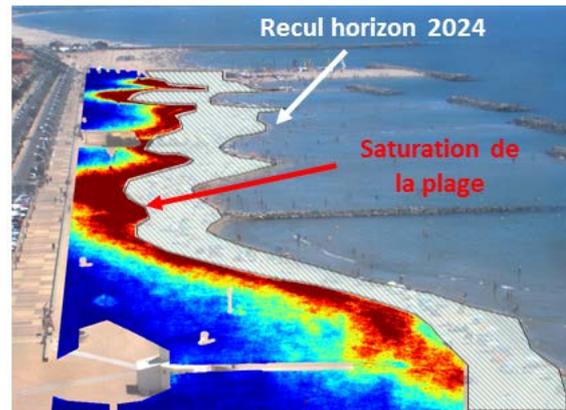


Figure 65 : Couplage des données de fréquentation de plage et de la projection du trait de côte

8.5. PERSPECTIVES

Les résultats de cette étude confirment l'intérêt des systèmes de suivi vidéo en termes d'outils d'analyse de la dynamique des littoraux sableux. Les échelles spatio-temporelles couvertes par ce type de système permettent une analyse haute fréquence des principaux processus contrôlant la dynamique littorale mais aussi la fréquentation des espaces littoraux. Toutefois l'approche vidéo nécessite d'être croisée avec d'autres techniques (mesures in-situ, modélisation) pour pouvoir dresser un bilan morpho-sédimentaire complet en terme de processus et d'emprise.

Il est cependant possible, dans la mesure où les observations vidéo sont suffisamment longues, de croiser les enjeux inhérents aux usages de la plage avec l'aléa érosion, permettant ainsi d'accompagner la définition de stratégies intégrées de gestion du trait côte. Ainsi, les projections du trait de côte à moyen terme justifie d'initier des réflexions d'intervention sur le secteur Est de Valras-Plage.

La suppression de l'épi en enrochement et le remplacement de cette protection par une structure en brise-lame doit être mise à l'étude. L'opportunité de recharger la plage à l'arrière du nouveau brise-lame et sur le secteur Est doit également être envisagé à travers une analyses globale des enjeux.

Enfin, le système de suivi vidéo doit être maintenu en fonctionnement pour accompagner les prises de décisions et évaluer l'efficacité des politiques publiques d'aménagements du littoral de Valras-Plage.

9. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AUBREY, D. G. (1979). Seasonal patterns of onshore/offshore sediment movement. *Journal of Coastal Research*, 84(C10), 6347-6354.
- BALOUIN Y., DESBIENDRAS L., GERVAIS M., TESSON J., 2012. Dynamique à haute fréquence des barres d'avant côte en milieu microtidal : suivi vidéo du Lido de Sète, Golfe du Lion. XII^{ième} Journées Nationales de Génie Civil-Côtier, Cherbourg.
- BCEOM (2004). Etude générale pour la protection du littoral de l'Orb à Aude – Phases 1, 2 et 3. Rapport d'étude.
- CETE Méditerranée (2010). Traitement des séries marégraphiques du Golfe du Lion. Extraction et étude statistique des évènements de référence.
- DAILLOUX D. (2008). Video measurements of the Adour plume dynamic and its surface water optical characteristics. Thèse de Doctorat de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour.
- DOLLE C., ROCHER A., SCHNEIDER M., DORMOIS R. (2000). Fréquentation touristique des plages. Étude de clientèles. Paris: AFIT, coll. «Les Cahiers de l'AFIT», 48 p. ISBN: 2-910388-64-6
- DREAL Languedoc Roussillon (2008). Analyse de la tempête marine sur le littoral Languedoc- Roussillon du 02 au 04 Janvier 2008.
- DREAL Languedoc Roussillon (2009). Analyse de la tempête marine sur le littoral Languedoc- Roussillon du 20 au 22 Octobre 2009.
- DREAL Languedoc Roussillon (2010). Analyse de la tempête marine sur le littoral Languedoc- Roussillon du 14 et 15 Janvier 2010.
- DREAL Languedoc Roussillon (2011). Analyse de la tempête marine sur le littoral Languedoc- Roussillon du 12 et 16 Mars 2011.
- DREAL Languedoc Roussillon (2011). Analyse de la tempête marine sur le littoral Languedoc- Roussillon du mois d'Octobre et de Novembre 2011.
- DREAL Languedoc Roussillon (2013). Analyse de la tempête marine sur le littoral Languedoc- Roussillon du 4 au 8 Mars 2013.
- DURAND P. (1999). L'évolution des plages de l'ouest du golfe du Lion au xxe siècle. Cinématique du trait de côte, dynamique sédimentaire, analyse prévisionnelle. Thèse de doctorat, Université Lyon II, 2 vol., 461 p.
- DURAND P. (2001). Érosion et protection du littoral de Valras-Plage (Languedoc, France). Un exemple de déstabilisation anthropique d'un système sableux, *Géomorphologie*, 7,55-68
- FERER P. (2010). Morphodynamique à multi-échelles du trait de côte (prisme sableux) du golfe de Lion depuis le dernier optimum climatique. Thèse de Doctorat de l'université de Perpignan Via Domitia.
- FERLEY I., DAVIDSON M., KINGSTON K., PHILLIPS R. (2009). Empirical orthogonal function analysis of shoreline changes behind two different designs of detached breakwater. *Coastal Engineering*, 56, 1097-1108.
- GERVAIS M. (2012). Impacts morphologiques des surcôtes et vagues de tempêtes sur le littoral méditerranéen. Thèse de Doctorat de l'université de Perpignan Via Domitia.
- HOLMAN R.A., SALLENGER A.H. (1989). Setup and Swash on a Natural Beach. *Journal of Geophysical Research*, 90, 945-953.

- JIMENEZ, J. A., OSORIO, A., MARINO-TAPIA, I., DAVIDSON, M., MEDINA R., KROON, A., ARCHETTI, A., CIAVOLA, P., AARNINKHOF, S.G.J. (2007). Beach recreation planning using video-derived coastal state indicators, *Coastal Engineering*, 54 (6-7), 507-521
- GUILLEN J, GARCIA-Olivares .A, Ojeda E., Osorio A., Chic O., and González R. (2008) Long-Term Quantification of Beach Users Using Video Monitoring. *Journal of Coastal Research: Volume 24, Issue 6*: pp. 1612 – 1619.
- KROON A., DAVIDSON M.A., AARNINKHOF S.G.J., ARCHETTI R., ARMAROLI C., GONZALES M., MEDRI S., OSORIO A., AAGAARD T., HOLMAN R.A., SPANHOFF R. (2007). Application of remote sensing video systems to coastline management problems. *Coastal Engineering*, 54, 496-505.
- MORICHON D., DAILLOUX D., AARNINKHOF S., ABADIE, S., 2007. Using a shore-based video system to hourly remote storm water plumes (Adour River, Bay of Biscay), *Journal of Coastal Research*, 24 (sp3), 133-140.
- OSTROWSKI, R., PRUSZAK, Z. and ZEIDLER, R. B. (1990). Multi-scale Nearshore and beach changes. 22nd International conference of Coastal Engineering, Delft.
- PRUSZAK, Z. (1993). The analysis of beach profile change using Dean's method and empirical orthogonal functions. *Coastal Engineering*, 19, 245-261.
- RIHOUEY, D., (2004). Analyse statistique de l'évolution morphodynamique des plages sableuses - Application aux sites d'étude du Programme National d'Environnement Côtier et aux plages d'Anglet. Thèse de Doctorat de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour.
- RIHOUEY D., BLANGUY A., DUGOR J., DAILLOUX D. (2008). Technique vidéo appliquée à la topographie de la plage intertidale. 10^{ème} Journées Nationales Génie Côtier / Génie Civil. Sophia-Antipolis, France.
- RIHOUEY D., DUGOR J., DAILLOUX D., MORICHON D. (2009). Application of remote sensing video systems to coastal defence monitoring, *Journal of Coastal Research*, SI 56, 1582-1586.
- ROBIN N., CERTAIN R., VANROYE C., BARUSSEAU J.P., BOUCHETTE F. (2010). Typologie des abris d'avant côte du golfe du Lion et impacts des ouvrages côtiers : apport de la technologie LIDAR. XI^{ème} Journées Nationales de Génie Civil-Côtier, Les Sables d'Olonne.
- ROBERT, S., SILLERE, G., LIZIARD, S., (2008). Évaluer et représenter le nombre d'utilisateurs sur une plage urbaine (Les Ponchettes, Nice), M@ppemonde 91 (2008.3).
- SHOM (2012). Références Altimétriques Maritimes, Edition 2012.
- VAN ENCKEVORT I.M.J., RUESSINK B.G., (2002). Video observations of nearshore bar behavior. Part 1: Alongshore uniform variability. *Continental Shelf Research*, 23, 501-512.
- VAN ENCKEVORT I.M.J., RUESSINK B.G., (2002). Video observations of nearshore bar behavior. Part 2: Alongshore non-uniform variability. *Continental Shelf Research*, 23, 501-512.
- WIJNBERG, K. M. AND TERWINDT, J. H. J. (1995). Extracting decadal morphological behaviour from high resolution, long term bathymetric surveys along the Holland coast using eigenfunction analysis. *Marine geology*, 126, 301-330.
- WINANT, C. D., INMAN, D. L. AND NORDSTROM, C. E. (1975). Description of seasonal beach changes using empirical eigenfunctions. *Journal of Geophysical Research*, 80(15), 1979-7986.