



OBSERVATOIRE CÔTE AQUITAINE

Document public

Rapport final

Evolutions interannuelles et saisonnières des plages d'Aquitaine, pour la période 2008-2019 : analyse complémentaire des suivis D-GPS et LiDAR

BRGM/RP-69870-FR

Avril 2020

Auteurs : Alexandre Nicolae Lerma, Thomas Bulteau

Avec la collaboration de : Bruce Ayache, Nicolas Bernon, Anaïs Hoareau, Cyril Mallet



Évolutions interannuelles et saisonnières des plages d'Aquitaine, pour la période 2008-2019 : analyse complémentaire des suivis D-GPS et LiDAR

BRGM/RP-69870-FR
Avril 2020

Étude réalisée dans le cadre des opérations de service public du BRGM
AP19BDX015

Vérificateur :

Nom : ROBINET Arthur
Date : 14/08/2020

Approbateur :

Nom : PEDRON Nicolas
Date : 19/08/2020
Signature :



Auteurs : Alexandre Nicolae Lerma, Thomas Bulteau

Avec la collaboration de : Bruce Ayache, Nicolas Bernon, Anaïs Hoareau, Cyril Mallet

Mots-clés : Gironde, Landes, indicateurs d'évolution, évolution décennale, stocks sédimentaires, plages, mesures D-GPS, LiDAR

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

Nicolae Lerma A., Bulteau T. (2020) - Evolutions interannuelles et saisonnières des plages d'Aquitaine, pour la période 2008-2019 : analyse complémentaire des suivis D-GPS et LiDAR. Rapport final. BRGM/RP-69870-FR, 65 p., 29 ill., 6 tab.

Synthèse

La complémentarité des bases de données disponibles à l'Observatoire de la Côte Aquitaine (OCA), en particulier les données D-GPS, acquises chaque année, depuis 2008, à la sortie de l'hiver, et les données LiDAR, acquises en automne en 2014 et annuellement depuis 2016, a permis de caractériser les évolutions des plages de la côte sableuse à l'échelle de temps pluriannuelle (2008-2019) et saisonnière (depuis 2014). L'analyse montre la très grande variabilité des comportements des plages à l'échelle décennale ainsi que dans leur processus de balance saisonnière. Trois thématiques principales sont abordées : (i) les tendances d'évolutions décennales (en situation post-hivernale), (ii) l'impact de l'hiver exceptionnel de 2013-2014 et les modalités de récupération des plages le long de la côte, (iii) la caractérisation des variations saisonnières et notamment les rechargements naturels estivaux.

Plusieurs descripteurs sont mis en place (références altimétriques, largeur de plage, pente, épaisseur relative de sédiments, volume ...) et l'analyse est menée via une méthode d'agrégation spatio-temporelle des différents levés disponibles. Ces traitements permettent de dresser un bilan des comportements du trait de côte et des volumes sédimentaires de plage pour l'ensemble de l'Aquitaine, pour la Gironde et les Landes, par cellule et lorsque c'est pertinent, par sous-cellule hydro-sédimentaire, et enfin sur 10 profils représentatifs du littoral sableux aquitain.

Une réflexion est menée sur la relation entre l'évolution du trait de côte, la capacité de reconstruction des plages et les volumes sédimentaires positionnés sur le haut de plage. Cette réflexion permet d'évaluer le volume moyen de sédiments minimum qui semblerait nécessaire pour observer un trait de côte stable. Ce modèle rétrospectif (basé sur les données observées au cours de la période 2008-2019) intègre les impacts de l'hiver 2013-2014 et la capacité de reconstruction potentielle des plages lors des années suivantes.

La relation entre les conditions de forçage hivernales et les marques d'érosion observées est discutée et montre que l'effet mémoire de plage et la notion d'équilibre morphodynamique sont fondamentaux pour évaluer et anticiper les impacts érosifs des conditions hivernales.

Ainsi, il apparaît essentiel de poursuivre les acquisitions de profils de plage à une fréquence au moins semestrielle (post-hiver et post-été) afin de quantifier (précisément) les impacts des tempêtes hivernales et d'envisager l'amélioration des capacités prédictives des outils existants comme le réseau Tempêtes de l'OCA.

Sommaire

1. Introduction	9
2. Données	11
2.1. DONNEES D-GPS.....	11
2.2. DONNEES LIDAR	12
3. Méthode	15
3.1. AGREGATION SPATIO-TEMPORELLE	15
3.2. REFERENCES ALTIMETRIQUES : IDENTIFICATION ET DEFINITIONS	16
3.2.1. Description des plages et de l'interface plage/dune.....	16
3.2.2. Position du trait de côte / pied de dune.....	17
3.3. DESCRIPTEURS DE L'ETAT DES PLAGES	18
3.3.1. Largeur et pente de plage.....	18
3.3.2. Epaisseur de sédiments	19
3.3.3. Volumes de sédiments.....	19
4. Résultats	21
4.1. POSITION DU TRAIT DE COTE	21
4.2. PROFILS MOYENS ET ENVELOPPES	22
4.3. ANALYSE SPATIALE DES DESCRIPTEURS DE L'ETAT DES PLAGES	25
4.3.1. Largeur des plages	25
4.3.2. Pente des plages	27
4.3.3. Epaisseur de sédiments	29
4.3.4. Volumes sédimentaires	30
4.3. ANALYSE DE LA VARIABILITE TEMPORELLE.....	32
4.3.1. Evolution des descripteurs de l'état des plages.....	32
4.3.2. Evolution des références altimétriques.....	34
5. Synthèse des caractéristiques des plages et des évolutions interannuelles et saisonnières	37
5.1. SYNTHESE DES EVOLUTIONS PAR PROFIL REPRESENTATIF	37
5.1.1. Profil G1.1 (Les Sables d'Argent, Nord Médoc) pour Cellule 1	37
5.1.2. Profil G3 (Le Gulp, Anse du Gulp) pour Cellule 2	38
5.1.3. Profil G6 (Le Pin Sec, Nord Gironde) pour Cellule 3.2	40
5.1.4. Profil G11 (Lacanau Océan Nord, Centre Gironde) pour Cellule 3.3	41
5.1.5. Profil G15 (Grand Crohot, Sud Gironde) pour Cellule 3.5	43
5.1.6. Profil G18 (Le Cap Ferret, Pointe du Cap Ferret) pour Cellule 4.1	44

5.1.7. Profil L3 (A.S.30, Nord Landes) pour Cellule 5.1.....	45
5.1.8. Profil L6 (Mimizan Sud, Centre Landes) pour Cellule 5.2.....	47
5.1.9. Profil L14 (Soustons-Plage, Sud Landes) pour Cellule 5.3.....	48
5.1.10. Profil L18 (La Chapelle, Sud Landes) pour Cellule 6.....	50
5.2. SYNTHÈSE DES TENDANCES D'ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE ET DES CAPACITÉS DE RECONSTRUCTION PLURIANNUELLE ET SAISONNIÈRE PAR CELLULE ET SOUS-CELLULE HYDRO-SEDIMENTAIRE.....	51
6. Discussion sur l'évolution du littoral sableux aquitain pour la période 2008-2019.....	55
6.1. RELATION ENTRE DISPONIBILITÉ SEDIMENTAIRE ET ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE.....	55
6.2. RELATION ENTRE ÉVOLUTIONS DES PLAGES ET CONDITIONS DE FORÇAGE.....	56
7. Conclusion.....	61
8. Bibliographie.....	63

Liste des illustrations

Figure 1 : Carte de localisation des acquisitions D-GPS annuelles, le long de la côte sableuse.....	11
Figure 2 : Références altimétriques utilisées pour caractériser les évolutions transversales des profils plages-dunes et identification des descripteurs géomorphologiques.....	17
Figure 3 : Méthode de recalage des profils pour le calcul des descripteurs, des profils moyens et des enveloppes... ..	18
Figure 4 : Descripteurs calculés à partir de la base de données de profils.....	19
Figure 5 : Evolution des positions du trait de côte au cours de la période 2008-2019, par profil, le long de la côte aquitaine.....	22
Figure 6 : Moyennes spatiales des profils moyens (noir) et "enveloppes min" (rouge) et "max" (bleu), calculées pour l'ensemble des transects de la côte sableuse aquitaine (traits pleins) ou pour les transects girondins (tirets) ou landais (ligne avec points). Les profils moyens sont représentés sur 120 m à partir de la valeur 10 m NGF. A gauche, profils post-hiver ; à droite, profils post-été.....	23
Figure 7 : Variabilité des caractéristiques moyennes et enveloppes (min-max) des profils de plage post-hiver par cellule et sous-cellule hydro-sédimentaires (période 2008-2019).....	24
Figure 8 : Variabilité des caractéristiques moyennes et enveloppes (min-max) des profils de plage post-été par cellule et sous-cellule hydro-sédimentaires (période 2014-2018).....	25
Figure 9 : Largeur de plage par profil, le long de la côte aquitaine.....	27
Figure 10 : Pente de plage par profil, le long de la côte aquitaine.....	28
Figure 11 : Epaisseur de sédiments par transect, le long de la côte aquitaine, et variations temporelles.....	30
Figure 12 : Volume de sable sur la plage, par transect, le long de la côte aquitaine.....	32
Figure 13 : Evolution moyenne des descripteurs "largeur de plage" et "volume de plage" pour la période 2008-2019 (à gauche, les séries temporelles représentent les situations post-hiver ; à droite, les séries temporelles illustrent la variabilité saisonnière des descripteurs pour la période 2014-2019).....	33
Figure 14 : Evolution des positions (distance horizontale) des différentes références altimétriques utilisées pour la période 2008-2019. Toutes les évolutions de positions sont données en référence à la position du trait de	

côte (6 m NGF) en avril 2008. En haut, les séries temporelles représentent les situations post-hiver et reflètent ainsi la variabilité interannuelle. En bas, les séries temporelles illustrent la variabilité saisonnière des références altimétriques pour la période 2014-2019.	35
Figure 15 : Planche de synthèse des évolutions du profil G1.1 pour la période 2008-2019.....	38
Figure 16 : Planche de synthèse des évolutions du profil G3 pour la période 2008-2019.....	39
Figure 17 : Planche de synthèse des évolutions du profil G6 pour la période 2008-2019.....	41
Figure 18 : Planche de synthèse des évolutions du profil G11 pour la période 2008-2019.....	42
Figure 19 : Planche de synthèse des évolutions du profil G15 pour la période 2008-2019.....	43
Figure 20 : Planche de synthèse des évolutions du profil G18 pour la période 2008-2019.....	45
Figure 21 : Planche de synthèse des évolutions du profil L3 pour la période 2008-2019.....	46
Figure 22 : Planche de synthèse des évolutions du profil L6 pour la période 2008-2019.....	48
Figure 23 : Planche de synthèse des évolutions du profil L14 pour la période 2008-2019.....	49
Figure 24 : Planche de synthèse des évolutions du profil L18 pour la période 2008-2019.....	51
Figure 25 : Evolution temporelle de la distance horizontale entre la position du trait de côte (6 m NGF) et les références altimétriques 2, 4, 10 m NGF à la sortie de l'hiver (a référence est la position du trait de côte en avril 2008 , symbolisée par le trait rouge).....	53
Figure 26 : Evolution temporelle de la distance horizontale entre la position du trait de côte (6 m NGF) et les références altimétriques 2, 4, 10 m NGF à l'échelle saisonnière (a référence est la position du trait de côte en avril 2014 , symbolisée par le trait rouge).....	54
Figure 27 : Relation entre évolution du trait de côte et volume sédimentaire, régression linéaire (à gauche) et logarithmique (à droite). La zone verte souligne les profils présentant une situation stable ou en accrétion pour la période 2008-2019 ; la zone rouge, les profils en érosion. Enfin la zone encadrée par des tirets noirs souligne la forte dispersion pour des valeurs comprises entre 330 et 380 m ³ /m où les profils présentent des valeurs de recul ou d'avancée de l'ordre de ± 1 m/an au cours de la période 2008-2019.	56
Figure 28 : Energie cumulée saisonnière par année, depuis 2008, pour la côte aquitaine. Valeurs moyennes établies à partir des séries temporelles pour 5 points en Gironde et 5 points dans les Landes, positionnés le long de la côte sur l'isobathe 50 m. Données horaires issues de la plateforme MARC (Modelling and Analysis for Research in Coastal environment) www.umar-lops.org/marc	57
Figure 29 : Relation entre énergie cumulée pour la période hivernale et variation annuelle du volume de sable sur la plage (différence date à date des volumes sédimentaires sur les plages). A gauche : moyennes pour l'ensemble de la côte ; au centre : moyennes pour la cote girondine ; à droite : moyennes pour côte landaise.	58

Liste des tableaux

Tableau 1 : Erreurs altimétriques des différents millésimes LiDAR	13
Tableau 2 : Largeur de plage moyenne, minimum et maximum, le long de la côte aquitaine	26
Tableau 3 : Pente de plage moyenne, minimum et maximum, le long de la côte aquitaine	28
Tableau 4 : Caractéristiques moyennes, minimum et maximum de l'épaisseur de sédiments et de ses variabilités interannuelle et saisonnière, le long de la côte aquitaine	29

Tableau 5 : Caractéristiques moyennes, minimum et maximum des volumes sédimentaires et de leurs variabilités interannuelle et saisonnière, le long de la côte aquitaine	30
Tableau 6 : Synthèse des caractéristiques et des évolutions observées des systèmes plage-dune par cellule et sous-cellule hydro-sédimentaires	52

1. Introduction

Sur le littoral aquitain, l'évolution des plages (partie aérienne) est suivie régulièrement à l'échelle régionale par l'Observatoire de la Côte Aquitaine (OCA). Différentes méthodes sont employées, telles que des levés D-GPS et LiDAR, de la photo-interprétation d'images satellites ou d'orthophotographies, et des formulaires semi-quantitatifs sur la forme et la présence des différentes structures morphologiques des plages sableuses (barres, baïnes, bermes, coins sableux, etc.).

Pour assurer le suivi de cette évolution, l'OCA s'appuie sur un réseau de 55 stations, réparties le long de la côte sableuse (sans considérer la dune du Pilat qui est un système à part). Ces stations permettent à l'OCA de réaliser des levés D-GPS sous forme de profils et ainsi mesurer les évolutions géomorphologiques des systèmes "plages-dunes" à la sortie de la saison hivernale. En 2011, en 2014, puis annuellement depuis 2016, ce suivi a été enrichi d'un levé continu LiDAR de l'ensemble de la bande côtière aquitaine.

L'exploitation de ces données D-GPS et LiDAR à l'échelle régionale a donné lieu, récemment, à plusieurs rapports et valorisations abordant notamment les thèmes suivants :

- le contrôle qualité des acquisitions LiDAR (Ulvoas et Ayache, 2018),
- la détection objective et semi-automatique du trait de côte et la détection automatique des encoches et banquettes en pied de dune (Ayache et al., 2018),
- l'analyse des impacts des tempêtes de l'hiver 2013-2014 (Bulteau et al., 2014),
- les données d'entrée dans le réseau Tempêtes de l'OCA (Bulteau et al., 2019),
- la caractérisation de l'exposition du littoral aquitain aux submersions marines (Bulteau et al., 2016),
- la caractérisation, à l'échelle régionale, des mouvements et volumes sédimentaires associés à l'hiver 2013-2014 et à la période de reconstruction entre 2014-2017 (Nicolae Lerma et al., 2019),
- la caractérisation, à l'échelle régionale, de la morphologie du cordon dunaire et le croisement entre évolutions récentes et pratiques de gestion (Bossard et Nicolae Lerma, 2020).

La maturité des techniques d'acquisition des données topographiques (ici D-GPS et LiDAR) et la profondeur des séries temporelles (plus de 10 ans pour les données D-GPS) permettent désormais d'aborder, en détails et de manière robuste, l'analyse des évolutions géomorphologiques des plages aux échelles de temps pluriannuelles et saisonnières. En effet, l'association de la base de données D-GPS (mesures réalisées en sortie d'hiver) à la base de données LiDAR (réalisée à l'automne) permet de disposer, depuis 2014, de levés complémentaires deux fois par an. Il est ainsi possible d'accéder à une information sur l'évolution saisonnière des plages. L'analyse de ces données permet de renseigner sur les morphologies caractéristiques des profils d'hiver et d'été, les morphologies liées à des périodes d'érosion majeure ou au contraire de forte disponibilité sédimentaire, mais aussi sur l'amplitude des variations des stocks de sable, ou encore les capacités de reconstruction saisonnière.

L'objectif de cette étude est d'exploiter la complémentarité des bases de données de l'OCA, afin de caractériser les évolutions des plages à plusieurs échelles de temps, au droit de la localisation des profils du réseau de suivi de la côte sableuse. Cette caractérisation est basée sur l'analyse de plusieurs descripteurs, tels que : largeur de plage, pente, épaisseur relative de sédiments, volume... Des illustrations de synthèse, permettant de représenter les évolutions des plages à l'échelle de l'ensemble de la côte et synthétisant ces évolutions au droit de quelques profils représentatifs de la côte aquitaine, sont aussi proposées.

2. Données

2.1. DONNEES D-GPS

Le D-GPS est un outil permettant de mesurer, avec précision, la position x-y-z du point où est placé le terminal GPS : de l'ordre du cm en x, y et z. Il peut être déployé rapidement, à des fréquences régulières, et les protocoles de mesure associés sont d'un haut degré de maturité. L'approche consiste à relever l'altitude de la plage le long des transects OCA et de créer ainsi des profils de plage (altitude versus distance horizontale, dans la direction transverse perpendiculaire à la plage).

Depuis 1998, l'OCA réalise au printemps (après les tempêtes hivernales) des profils plage/dune perpendiculairement au trait de côte, à partir d'un réseau géodésique de bornes fixes, implantées le long de la côte (Figure 1). Au sein de ce suivi régional, aujourd'hui constitué de 168 transects de référence, 59 profils sont levés tous les ans sur la côte sableuse (dont 4 pour la dune du Pilat).

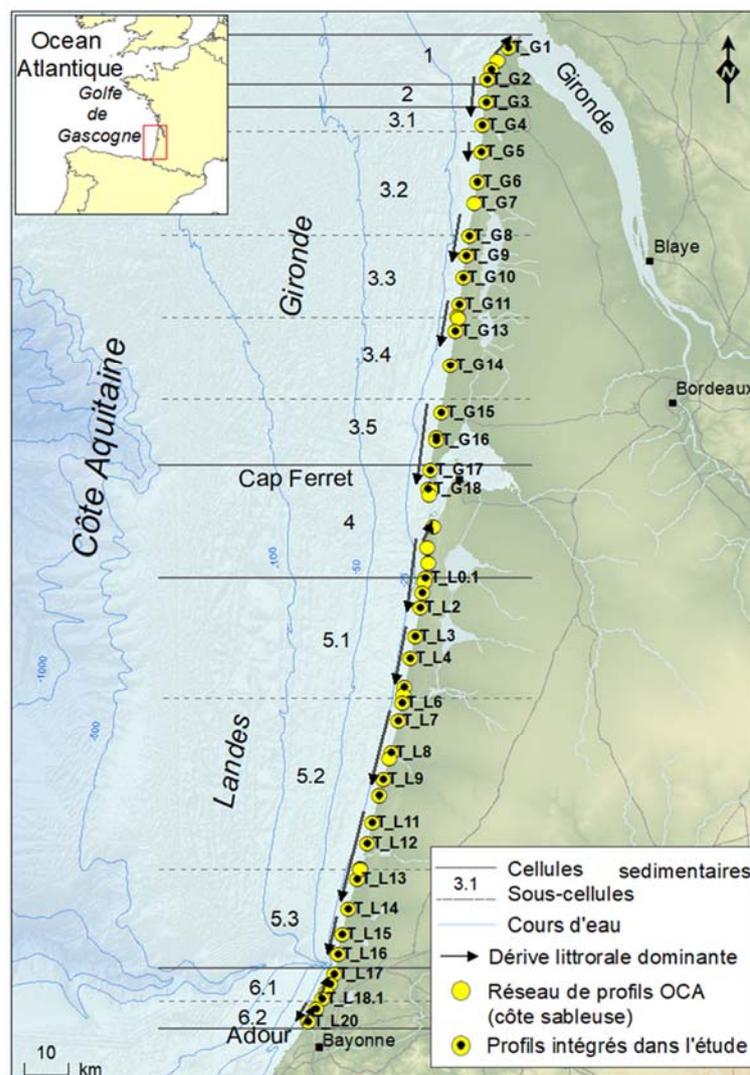


Figure 1 : Carte de localisation des acquisitions D-GPS annuelles, le long de la côte sableuse

Dans le cadre de cette étude, plusieurs contraintes ont conduit à n'exploiter qu'une partie de la base de données de l'OCA. Dans un souci d'exhaustivité et d'homogénéité des données traitées et conformément aux données disponibles sur le site de l'Observatoire de la Côte Aquitaine, les profils antérieurs à 2008 n'ont pas été considérés. En effet, les suivis de l'Observatoire, débutés en 1998 au niveau d'un nombre plus réduit de stations, se sont progressivement enrichis en 2006 et 2008, mais ne permettent pas, avant 2008, un traitement homogène de l'ensemble des stations.

Par ailleurs, pour la période 2008-2019, plusieurs transects n'ont pas été pris en compte, dans l'analyse globale, pour des raisons associées à leur emplacement (particularité locale, non applicabilité de la méthode) ou un manque de données pour la période (absence de données plus de deux années consécutives).

A ce titre, n'ont pas été considérés lors de l'analyse :

- les transects directement au contact des zones urbaines et manifestement perturbés par les aménagements côtiers (G7, G11.1, G12, L0.2, L5.1) ;
- les transects localisés dans des secteurs aux dynamiques locales particulières, telles que la proximité de l'embouchure d'un courant (L8.1, L12.1, L12.2) ;
- les transects présentant des mesures insuffisantes (EPI Soulac, Vermillon) ;
- les transects où la méthode n'est pas directement applicable du fait des caractéristiques du cordon dunaire (G19, G20, G20.1).

Après mise à l'écart de ces profils, la base de données étudiée est composée de 41 transects, dont 19 en Gironde et 22 dans les Landes.

On notera que certains transects, localisés à proximité de secteurs urbains (en aval de la dérive sédimentaire) et où des pratiques de rechargement des plages peuvent avoir lieu, sont intégrés dans la base de données. On considère pour ces transects que (i) les dates des levés (en avril pour les levés post-hiver) précèdent le plus souvent les actions de rechargement pouvant avoir lieu pour la saison touristique, (ii) que ces rechargements ne sont pas des pratiques systématiques au cours de la période 2008-2019 et n'auront qu'un impact modéré sur les valeurs moyennes observées. Enfin, qu'au regard des volumes de sable constituant l'ensemble des plages, ces pratiques représentent des volumes relativement modérés. Enfin, il convient de préciser qu'il n'existe pas d'information exhaustive sur les actions de rechargement qui permettrait de prendre en compte plus en détails ces pratiques dans l'analyse. Toutefois, on gardera à l'esprit que d'éventuels apports associés aux pratiques de gestion peuvent concerner les profils des transects G1.1 (Soulac-sur-Mer), G4 (Vendays-Montalivet), G11.1 et G12 (Lacanau), L0.1 (Biscarrosse), L6 (Mimizan), L17 (Capbreton).

2.2. DONNEES LIDAR

Le LiDAR (Light Detection And Ranging) est une technique de télédétection active qui repose sur un double système d'émission / réception de lumière. Un télémètre laser émet une faible impulsion lumineuse et reçoit en retour l'impulsion réfléchi par l'objet touché. La mesure du temps écoulé entre l'impulsion et la réception permet de calculer la distance franchie par le signal initialement émis. Cette technique est aujourd'hui utilisée avec différentes paramétrisations et sur différents types de vecteurs qui permettent de couvrir un large spectre d'usages : zones plus ou moins étendues, différents compartiments du système littoral.

Les levés aéroportés LiDAR permettent, par leur couverture (ensemble de la côte) et le faible temps d'acquisition (quelques jours ou semaines), de disposer de mesures à haute résolution (plusieurs points par mètre carré) pour une précision de l'ordre d'une dizaine de centimètres. Il existe aujourd'hui plusieurs

millésimes au sein des bases de données de l'Observatoire de la Côte Aquitaine : 2011 (IGN), 2014, 2016, 2017, 2018 (OCA en partenariat avec l'IGN). Ces données sont utilisées pour de multiples usages au sein de l'OCA (expertises, études régionales, études exploratoires...) et sont mobilisées pour l'ensemble des problématiques d'amélioration de la connaissance portées par l'OCA (Nicolae Lerma et al., 2019b). Les campagnes LiDAR sont particulièrement adaptées pour évaluer les évolutions morphologiques du littoral, ainsi que les mouvements sédimentaires entre plusieurs campagnes.

Les données topographiques LiDAR (MNT et nuages de points) des différentes campagnes ont été comparées à des levés dits de contrôle, réalisés au D-GPS (cf. Ulvoas et Ayache 2018). La comparaison de ces deux types de données permet d'évaluer la qualité de l'altimétrie du MNT et du nuage de points LiDAR (l'erreur quadratique moyenne) : un total de 1 816 points de mesure sur des terrains durs (bitume, béton), plats, vastes et dégagés (routes dégagées, parkings, terrains de sport, etc.) a été compilé et utilisé.

Le tableau 1 présente les erreurs quadratiques moyennes associées aux levés et montre que la précision des données LiDAR est conforme, voire supérieure, au standard (erreur inférieure à 20 cm) et témoigne de la bonne qualité de ces données.

Campagnes	Date d'acquisition	Erreur altimétrique Z (m)
LiDAR 2011	5 Mars au 21 Mai	0,196
LiDAR 2014	23 - 24 Octobre	0,144
LiDAR 2016	29 - 30 Octobre	0,106
LiDAR 2017	4 - 6 et 7 Octobre	0,102
LiDAR 2018	23 - 24 Octobre	0,096

Tableau 1 : Erreurs altimétriques des différents millésimes LiDAR

A noter que la période d'acquisition des données LiDAR en 2011 recouvre partiellement celle d'acquisition des données D-GPS du printemps 2011. Pour cette raison, les données LiDAR 2011 n'ont pas été intégrées dans l'analyse qui suit, les données de la campagne D-GPS ayant été privilégiées pour cette période.

3. Méthode

3.1. AGREGATION SPATIO-TEMPORELLE

Dans le cas d'un littoral sableux ouvert (soumis directement à l'action des vagues), où la variabilité des morphologies le long de la plage (variabilité longshore) peut être très importante, la mesure des évolutions morphologiques des plages, sous forme de profils, peut être questionnée. En effet, les morphologies et les volumes de sédiments observables le long d'un profil peuvent s'avérer peu représentatifs de l'aspect global de la plage et ne mettre en évidence que des caractéristiques très locales. C'est par exemple le cas si une baie ou une barre sableuse se positionne dans l'axe d'un profil. La présence de cette figure sédimentaire aura des répercussions sur l'ensemble de la morphologie de plage le long du profil, voire au niveau du contact plage/dune et ne permettra pas de disposer d'un profil représentatif de la plage sur quelques centaines de mètres de part et d'autre du transect.

L'analyse des évolutions en profil doit donc systématiquement tenir compte de cette contrainte, particulièrement sur le littoral aquitain qui présente une variabilité de la morphologie du système plage/dune parfois importante. L'interprétation doit être accompagnée de précautions relatives à l'aspect très local de la mesure. Toutefois, deux éléments permettent de minimiser d'éventuelles mauvaises interprétations associées à cette mesure locale et de dresser des indicateurs représentatifs des caractéristiques et évolutions du littoral plus généraux.

Le premier est la disponibilité de plus de 10 ans de mesures (ici, période 2008-2019), dont 4 années à une fréquence de 2 fois par an. Pour une même localisation, les profils utilisés proviennent à la fois de données D-GPS et des données LiDAR. Compte tenu des dates d'acquisition, les données issues des campagnes D-GPS constituent la base de données de profils post-hiver. Les données issues des campagnes LiDAR constituent la base de données post-été. Ainsi, on peut raisonnablement considérer que si une ou plusieurs mesures pour un site reflètent des conditions atypiques ou particulières (e.g. présence d'une barre surdéveloppée ou d'une baie très creusée dans l'axe du profil), la multiplication des mesures dans le temps permettra d'avoir une vision relativement complète des situations potentielles au droit de ce profil et la moyenne de ces conditions pourra être considérée comme significative. Ainsi, on considère la moyenne sur 11 ans comme représentative des descripteurs calculés pour un profil.

Le second est la multiplication des sites de mesure, permettant le plus souvent de disposer de plusieurs profils, par secteurs de la côte dont les dynamiques hydro-sédimentaires sont considérées comme homogènes (BRGM et ONF, 2018) ; on parle de cellule hydro-sédimentaire. Ici aussi, d'éventuelles mesures, ponctuellement peu représentatives des conditions générales le long de la côte, seront associées à d'autres mesures issues du même environnement. Ainsi, on considère raisonnablement que la moyenne par an ou par saison, établie sur plusieurs profils, permet d'obtenir une mesure représentative des descripteurs calculés. Cependant, il reste important de rappeler que l'approche de caractérisation par profil ne permet pas de s'assurer de la parfaite représentativité des caractéristiques obtenues pour toute la côte. Enfin, certaines cellules hydro-sédimentaires peuvent présenter un nombre de profils limité. L'effectif ayant servi au calcul sera ainsi systématiquement rappelé dans le tableau de synthèse afin que cette limite potentielle puisse être prise en compte dans l'interprétation des résultats. Les statistiques à l'échelle de la côte (41 profils), ou de la Gironde (19 profils) et des Landes (22 profils), ne souffrent pas quant à eux de ce biais potentiel.

3.2. REFERENCES ALTIMETRIQUES : IDENTIFICATION ET DEFINITIONS

3.2.1. Description des plages et de l'interface plage/dune

Les références altimétriques sont couramment utilisées pour caractériser les évolutions des plages. En sélectionnant des références d'altitudes représentatives de la morphologie du système plages-dunes, et en suivant dans le temps leurs positions sur les profils, il est possible de mettre en évidence la variabilité des caractéristiques le long de la côte et les évolutions pluriannuelles et saisonnières locales du système littoral sableux.

Quatre références altimétriques sont considérées ici. Exprimées par rapport au référentiel National Géodésique Français (NGF-IGN69) et décrites en détails ci-dessous, ces références permettent de caractériser les évolutions transversales de la plage et de l'interface plage-dune. Il s'agit du haut de la zone intertidale (< 2 m NGF), du haut de plage (< 4 m NGF), du pied de dune (6 m NGF) et du front de dune (10 m NGF) (Figure 2).

La valeur de 2 m NGF a été retenue, d'une part car elle est proche de la valeur moyenne de la Pleine Mer de Vive Eau (PMVE) le long de la côte (RAM 2018 ; Bulteau et al., 2016). Cette référence est couramment utilisée pour délimiter approximativement la partie de l'estran qui est recouverte quasiment à chaque marée haute (sauf périodes de très faibles coefficients). Les évolutions morphologiques sous l'effet des vagues sont permanentes en dessous de cette valeur et peu interprétables avec les méthodes utilisées. D'autre part, lors de certaines campagnes de mesure, les levés n'ont pas pu être réalisés en dessous de cette altitude. Par ailleurs, c'est au-dessus de cette valeur de 2 m NGF, que peuvent se constituer des bermes par l'action des vagues en période calme, comme cela sera évoqué dans la suite. La valeur de 2 m NGF correspond souvent à la base des bermes lorsqu'elles sont observables.

La valeur de 4 m NGF a été retenue, car elle correspond, dans la majeure partie des profils étudiés, au front ou crête des bermes, lorsque ce type de morphologie est établi et observable sur le terrain. En tenant compte du fait que 4 m NGF correspondent à la hauteur de 1 à 1,5 m au-dessus du niveau de la plus haute marée astronomique, l'hypothèse peut être faite que l'érosion à ces contours est liée à des conditions marines énergétiques. Dans certains secteurs du littoral (plutôt au nord de la Gironde ou au sud du bassin d'Arcachon), des formes d'accumulation associées à des dynamiques éoliennes peuvent également être observées à ces altitudes.

La valeur de 6 m NGF correspond à l'élévation moyenne du pied de dune pour l'ensemble du littoral (Nicolae Lerma et al., 2019a). La topographie de la plage est variable du nord au sud de la côte, et la hauteur du pied de dune varie en moyenne entre environ 5 m NGF au nord (cellules hydro-sédimentaires 1 et 2) et environ 7 m NGF au sud (cellule 6). La hauteur du pied de dune à certains endroits peut également varier selon les saisons, étant potentiellement exposée à l'érosion des tempêtes hivernales (abaissement du pied de dune) et à l'accumulation rapide de sable liée aux vents favorables (élévation du pied de dune). Cependant, la valeur de 6 m NGF est significative et cohérente pour caractériser les évolutions de la transition plage-dune, le long de la côte, aux échelles spatio-temporelles régionales et interannuelles.

Enfin, la référence 10 m NGF représente la position de la partie aval du front de dune et caractérise directement la progradation ou le retrait du front dunaire en général. La hauteur du front de dune peut atteindre des valeurs significativement plus hautes (jusqu'à plus de 20 m) le long de la côte. Toutefois, la valeur de 10 m permet de suivre les évolutions de position et de morphologie du front de dune, sur l'ensemble des profils, de manière satisfaisante (excepté le profil G4 où le front dunaire ne dépasse pas 8 m NGF).

A partir des références altimétriques précitées, une terminologie est proposée et utilisée dans la suite de l'étude (Figure 2). La plage est définie comme la partie du profil située entre le pied de dune (6 m NGF) et le niveau moyen de la mer (proche de 0,5 m NGF).

La zone intertidale supérieure est la partie comprise entre 0,5 et 2 m NGF.

Le bas de plage correspond à la partie de la plage comprise entre 0,5 m NGF et 4 m NGF et c'est généralement dans la partie haute (entre 2 et 4m) de ce compartiment que les bermes se développent.

Le haut de plage est compris entre 4 m et 6 m NGF où, lors des périodes de tempête, le déferlement des vagues peut entraîner de fortes érosions et lors des périodes de houle plus calmes, les sédiments s'accumulent progressivement grâce aux transits éoliens.

Enfin la partie du profil comprise entre 6 m NGF et 10 m NGF est considérée comme la partie aval du front de dune. La valeur 10 m NGF constitue donc la limite haute des analyses réalisées et de ce qui est considéré comme l'interface plage-dune. Cette valeur a été retenue car elle permet de tenir compte de la présence potentielle d'une banquette ou d'une avant-dune, dans les différentes analyses réalisées, mais également de la variabilité de la hauteur du trait de côte globalement comprise entre 5 m et 7 m NGF, le long de la côte.

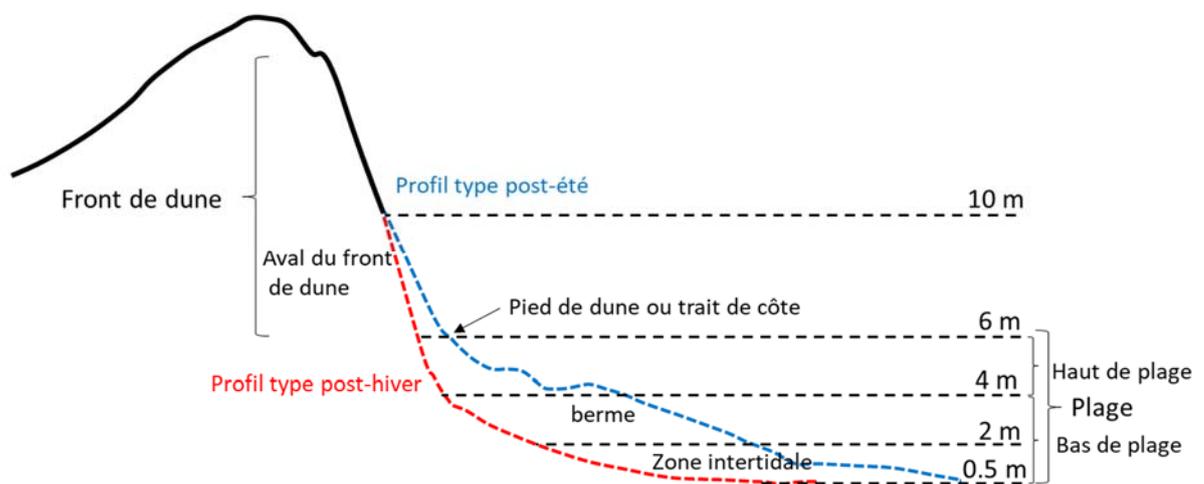


Figure 2 : Références altimétriques utilisées pour caractériser les évolutions transversales des profils plages-dunes et identification des descripteurs géomorphologiques

Sont représentés en rouge et bleu, les profils types que l'on peut observer respectivement en sortie d'hiver et d'été. Cette distinction morphologique, caractéristique des évolutions saisonnières, sera étudiée dans la suite du texte.

3.2.2. Position du trait de côte / pied de dune

L'utilisation du terme « trait de côte » est très commune et généralisée dans les études sur le littoral. Bien que la position du trait de côte et l'analyse de ses évolutions ne permettent pas de caractériser la dynamique côtière dans toute sa diversité et sa complexité, il n'en n'est pas moins un descripteur indispensable pour identifier les tendances d'évolution du littoral. Le trait de côte permet simplement et efficacement de délimiter les secteurs en érosion (où le trait de côte recule) ou en accrétion (où le trait de côte avance).

L'évolution du trait de côte dans le temps est donc un indicateur d'érosion (ou d'accrétion). Son étude permet d'identifier la perte ou le gain de terre sur la mer après une tempête, une saison ou plusieurs années, selon la fréquence des suivis. Pour la côte sableuse aquitaine, il est défini par l'OCA comme la séparation entre la dune et la plage, correspondant selon la configuration géomorphologique à l'un et/ou l'autre des descripteurs suivants (hors secteurs aménagés) :

- rupture de pente topographique,
- pied de falaise dunaire,

● limite de végétation dunaire.

La valeur de 6 m NGF correspond à l'élévation moyenne du pied de dune sur l'ensemble du littoral (Nicolae Lerma et al., 2019a). Elle sert ici à caractériser les évolutions de la transition plage/dune, le long de la côte, aux échelles spatio-temporelles régionales et interannuelles.

3.3. DESCRIPTEURS DE L'ETAT DES PLAGES

Afin de permettre une comparaison des morphologies de plage entre les différentes dates de levés et considérant que la position en abscisse des références altimétriques est mobile dans le temps (e.g. recul du trait de côte), une opération de recalage des profils dans un référentiel relatif commun a été réalisée. Ainsi, chacun des profils disponibles a été découpé pour ne conserver que la partie du profil comprise entre 10 m et 0,5 m NGF (Figure 3). Le changement de référentiel est ainsi fait en considérant la position de la référence 10 m de chaque profil comme égale à 0. Cette manipulation permet de comparer la morphologie des profils en les superposant, de déterminer la largeur de la plage, la position des descripteurs morphologiques tels que la berme et de quantifier les stocks de sable, dans un référentiel commun. Ce traitement de l'ensemble des profils de plage disponibles permet également de calculer des profils idéalisés ou statistiques, comme le profil moyen et les bornes supérieures et inférieures de l'enveloppe des profils (cf. Figure 3), ou encore des profils types hivernaux ou estivaux.

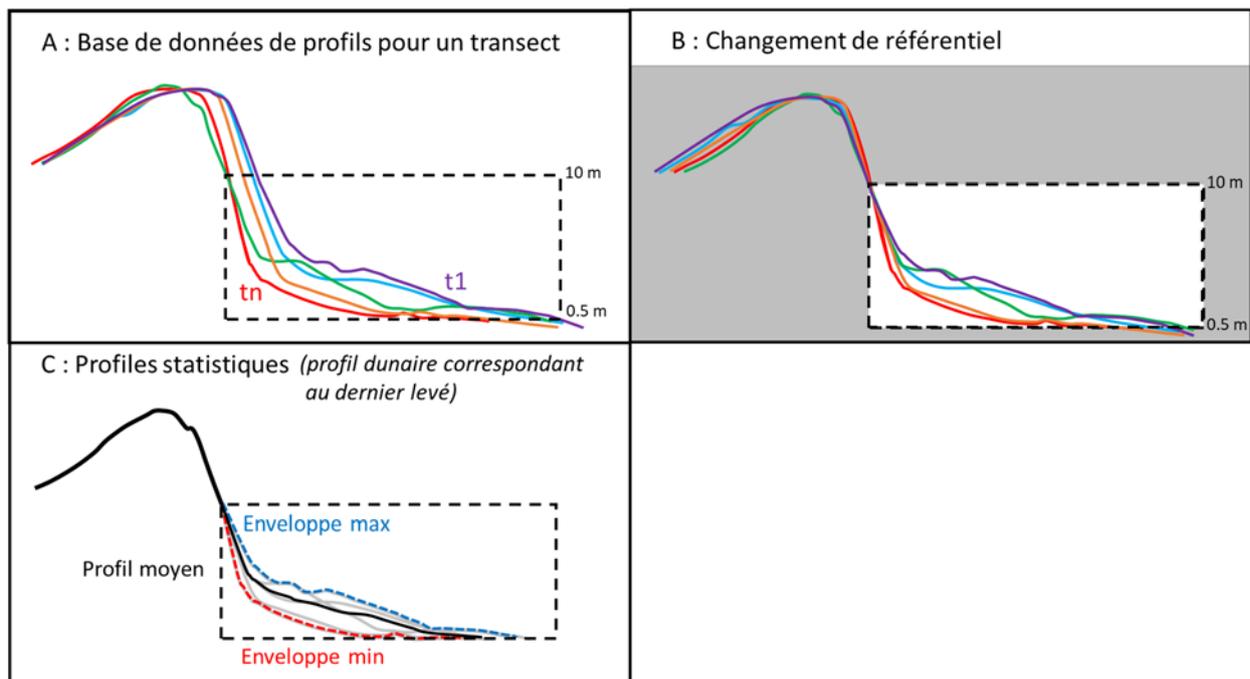


Figure 3 : Méthode de recalage des profils pour le calcul des descripteurs, des profils moyens et des enveloppes

3.3.1. Largeur et pente de plage

Pour décrire la morphologie des plages, nous utilisons la largeur de la plage (L) qui est ici définie comme la distance horizontale entre les références altimétriques 2 et 6 m NGF ; soient respectivement le niveau des marées hautes (ou le pied de la berme saisonnière) et le trait de côte. De cette valeur de largeur de plage est déduite un autre descripteur : la pente du haut de plage (β), calculée entre ces deux références altimétriques (cf. Figure 4, 1).

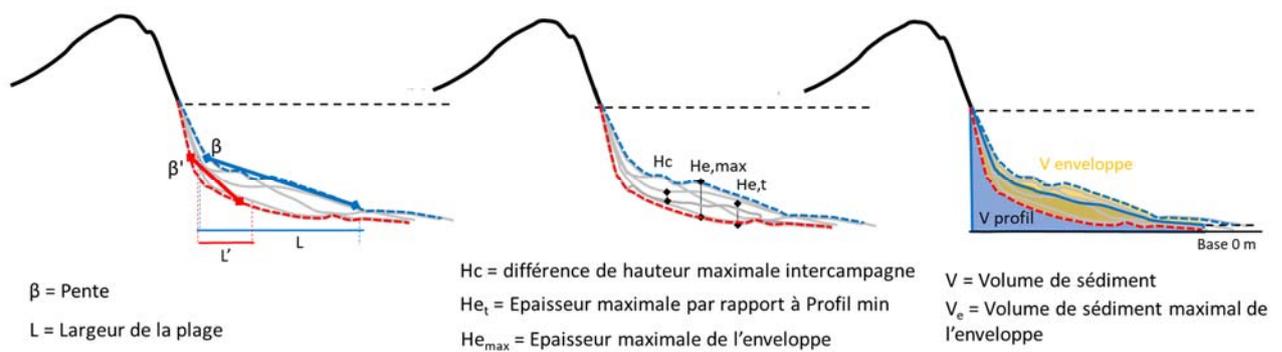


Figure 4 : Descripteurs calculés à partir de la base de données de profils

3.3.2. Epaisseur de sédiments

Deux types de descripteurs de hauteur sont utilisés. Le premier type détermine la hauteur maximale relative au profil "enveloppe min". Il traduit l'épaisseur maximale de sédiments relatifs à cette base. Ce type de descripteur est décliné en deux sous-descripteurs : $H_{e,t}$, le maximum de hauteur entre le profil d'une campagne quelconque par rapport au profil "enveloppe min" et $H_{e,max}$, l'écart maximal entre les bornes supérieures et inférieures de l'enveloppe des profils. Le second type de descripteurs propose de déterminer le maximum de différence de hauteur, le long du profil, entre deux campagnes de mesures successives. On détermine ainsi $H_{c,i}$ lorsque les deux campagnes concernées sont des campagnes post-hiver séparées par une année, et $H_{c,s}$ lorsque l'écart se réduit à une saison (été-hiver). La Figure 4 (2) illustre les descripteurs ainsi définis.

3.3.3. Volumes de sédiments

Une estimation du volume de sable sur la plage (en m^3/m) est réalisée, pour chaque profil, entre la position de la référence altimétrique 10 m NGF et le niveau moyen de la mer (ici 0,5 m NGF) relativement à la valeur de base 0 m NGF. Cette estimation ne présage pas de la disponibilité absolue de sable sur la plage, car dans de nombreux secteurs de la côte, et comme en témoignent les abaissements exceptionnels des plages lors de l'hiver 2013-2014, des paléosols ou des couches de sédiments grossiers ou indurés peuvent apparaître approximativement en dessous de 2 m NGF. Les sédiments ou le substrat en dessous de ces niveaux ne peuvent donc pas être considérés comme directement mobilisables. Toutefois, cette estimation, calculable de manière homogène pour chacune des campagnes de mesure, permet la comparaison relative des stocks de sable positionnés sur la plage et la caractérisation de leurs dynamiques (variabilités interannuelles et saisonnières). La Figure 4 (3) illustre les descripteurs ainsi définis.

4. Résultats

Dans un premier temps (§4.1), c'est à dire avant application de la méthode de recalage des profils présentée au chapitre précédent, une analyse des évolutions spatio-temporelles du trait de côte, au travers de la référence altimétrique 6 m NGF, a été réalisée. Les résultats présentés dans cette section seront ensuite discutés notamment par rapport aux conditions globales de forçage pour la période 2008-2019 et à la disponibilité sédimentaire.

Par la suite (§4.2, 4.3, 4.4), la méthode de recalage a été appliquée à l'ensemble des profils de la côte sableuse. Les résultats permettent de dresser un bilan à l'échelle de l'ensemble du littoral en déclinant l'analyse des évolutions aux unités "Gironde" et "Landes", et lorsque cela est pertinent (nombre de profils suffisants pour représenter la variabilité des descripteurs le long du littoral) à l'échelle des cellules hydro-sédimentaires et sous-cellules hydro-sédimentaires.

Les résultats sont présentés en illustrant les caractéristiques spatio-temporelles moyennes de la côte aquitaine. On présente ensuite les caractéristiques spatiales des différents descripteurs le long de la côte, puis les évolutions temporelles des descripteurs, sur une période de 11 ans, pour les unités "Gironde" et "Landes". Ces évolutions sont enfin comparées aux évolutions des conditions de forçage au cours de la même période.

Ces analyses sont ensuite enrichies à l'échelle locale sur la base de 10 profils sélectionnés. Ces profils illustrent les évolutions contrastées le long du littoral et sont représentatifs des tendances observables à l'échelle de leur cellule hydro-sédimentaire.

A noter que dans la section 4.2, bien que certains descripteurs soient corrélés entre eux (e.g. largeur et pente de plage, épaisseur de sédiments et volume, largeur de plage et volume) et que leur analyse séparée présente une certaine redondance, ils constituent pour chacun d'entre eux des critères utiles, notamment pour une évaluation rapide des états de plage. Ils sont par ailleurs couramment utilisés de manière opérationnelle (actions de gestion du littoral). Le choix a donc été fait de détailler leurs caractéristiques de manière relativement indépendante.

4.1. POSITION DU TRAIT DE COTE

La position planimétrique de la référence 6 m NGF (approximativement le TDC) est représentée Figure 5. On constate que, pour la période 2008-2019, les évolutions de la position planimétrique du trait de côte ont pu varier dans des proportions importantes, selon les sites de mesure.

En moyenne, pour l'ensemble de la côte, le recul est de 6,4 m au cours de la période, avec de très fortes disparités à l'échelle des cellules hydro-sédimentaires. Le recul est en moyenne de 12,8 m en Gironde et seulement de 0,9 m dans les Landes.

Les cas les plus extrêmes de reculs sont ceux des profils G1.1 et G2 au sein de la cellule 1. Le TDC au niveau de ces profils a exclusivement connu des reculs, qui atteignent respectivement 36 et 66 m en 11 ans. Les reculs observés sur les profils des cellule 2 à cellule 3.4 sont de l'ordre de 10 m (compris entre 7 et 14 m de recul). La Figure 5 permet également de constater que, au cours de la période, plusieurs profils ont connu des évolutions pluriannuelles variables de la position du TDC. On constate, par exemple au niveau de la cellule 3.5, que la position du trait de côte a varié de plus ou moins 10 m et que la position en 2019 est équivalente à celle de 2008.

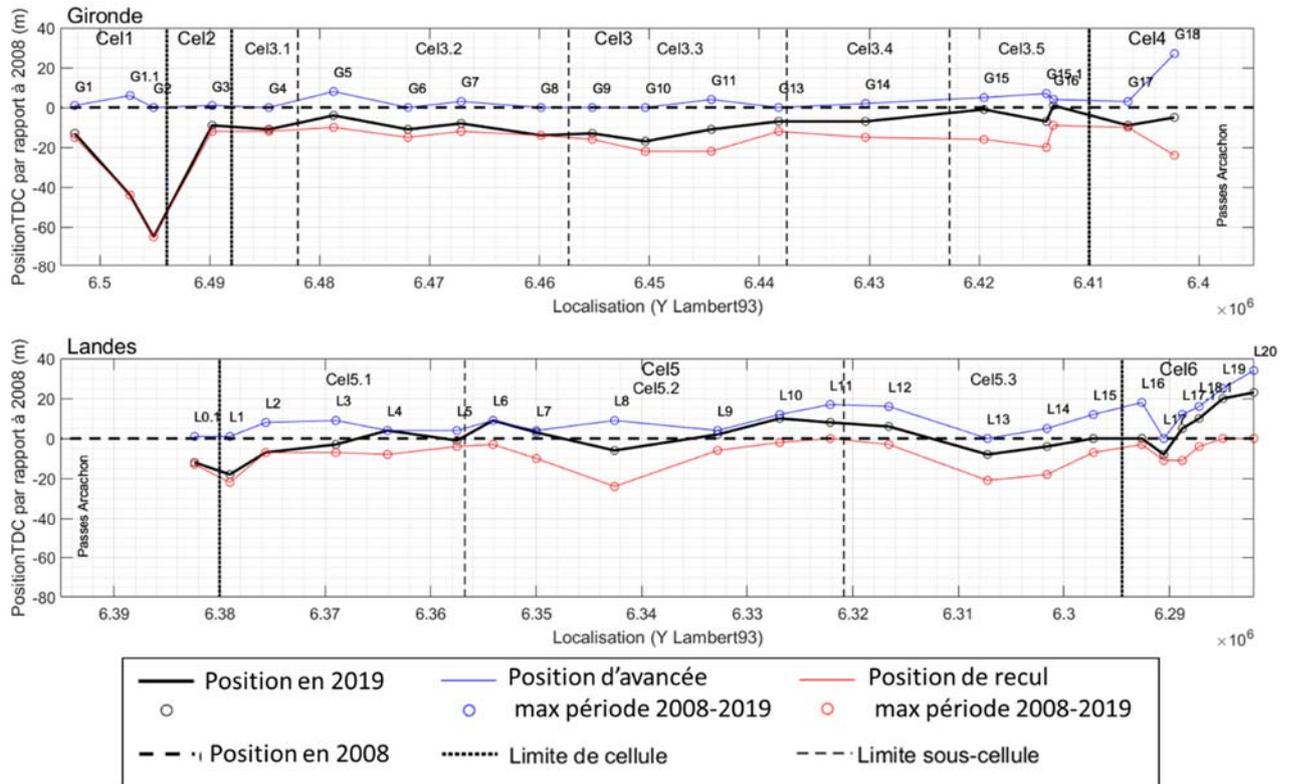


Figure 5 : Evolution des positions du trait de côte au cours de la période 2008-2019, par profil, le long de la côte aquitaine

Le 0 représente la position du trait de côte en 2008 ; la courbe noire, la différence de position entre 2008 et 2019 ; la courbe rouge, la position de recul par rapport à 2008 la plus importante observée pour la période 2008-2019 et enfin la courbe bleue, la position d'avancée maximale par rapport à la position en 2008.

Parmi les profils étudiés, le profil G18 (cellule 4.1) a connu les plus grandes variabilités, avec une position comprise entre +27 et -22 m. Toutefois, le recul entre 2008 et 2019 est équivalent aux valeurs observées pour le reste de la côte girondine (environ 10 m).

Sur la côte landaise, les plus forts reculs constatés, pour la période, sont de l'ordre de 20 m au nord de la cellule 5.1. Plus au sud, du centre de la cellule 5.1 au centre de la cellule 5.2, les données montrent une relative stabilité de la position du TDC, au cours de la période. Encore plus au sud, les profils L10 à L12 (cellules 5.2 et 5.3) présentent des avancées significatives du TDC pour la période, de l'ordre de 10 m et jusqu'à 14 m (profil L12.1). Cette partie de la côte a quasiment, exclusivement, connu une phase d'accrétion entre 2008 et 2019. A partir du centre de la cellule 5.3, on observe plutôt une stabilité tout au long de la période, excepté pour le profil L13. Enfin les profils de la cellule 6 présentent des évolutions contrastées, avec un recul net de l'ordre de 10 m, au profil L17, et une avancée nette croissante vers le sud de la cellule qui atteint jusqu'à 20 m au profil L20.

4.2. PROFILS MOYENS ET ENVELOPPES

Une première illustration (Figure 6) représente les caractéristiques moyennes des profils étudiés, à l'échelle de l'ensemble de la côte, ainsi que pour les unités "Gironde" et "Landes", en distinguant les profils post-hiver et les profils post-été. Les caractéristiques moyennes permettent de distinguer les grandes caractéristiques saisonnières des plages de la côte aquitaine. On peut constater que ces caractéristiques, moyennes des profils sur la côte girondine d'une part et landaise d'autre part, sont relativement proches. Les hauts de plage en Gironde sont toutefois notablement plus bas (avoisnant 1 m de différence). En

revanche, dans la zone intertidale, à une centaine de mètres du pied de dune, les profils moyens des plages girondines et landaises se confondent.

On peut également observer, comme principale différence, la présence d'une berme saisonnière, caractérisée par un bombement du profil de plage, entre 40 et 100 m, par rapport à la référence 10 m NGF. Cette berme apparaît clairement plus développée pour les profils des plages des Landes par rapport à ceux de la Gironde.

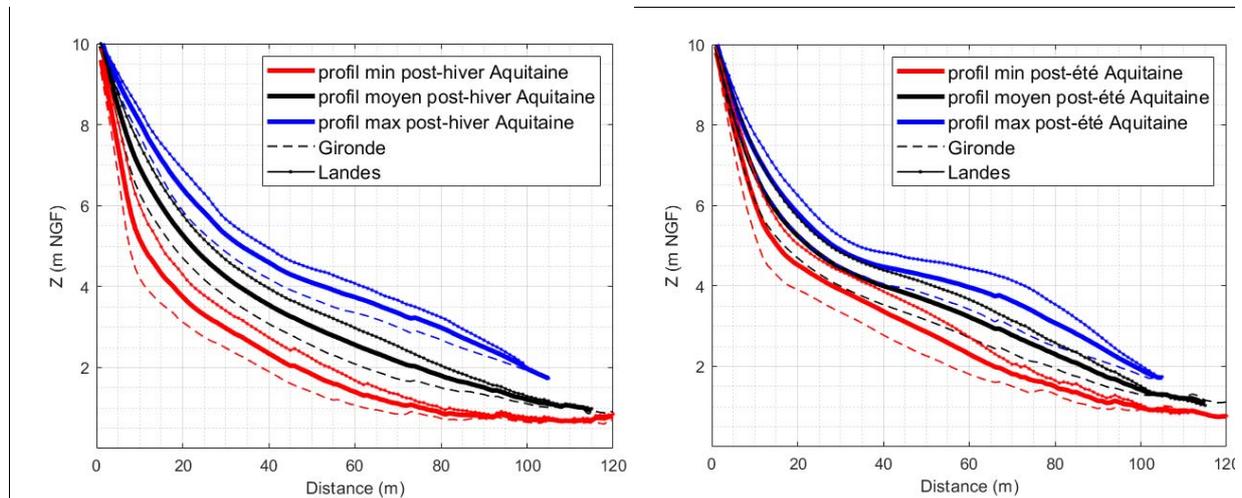


Figure 6 : Moyennes spatiales des profils moyens (noir) et "enveloppes min" (rouge) et "max" (bleu), calculées pour l'ensemble des transects de la côte sableuse aquitaine (traits pleins) ou pour les transects girondins (tirets) ou landais (ligne avec points). Les profils moyens sont représentés sur 120 m à partir de la valeur 10 m NGF. A gauche, profils post-hiver ; à droite, profils post-été.

Ces moyennes spatio-temporelles sont également proposées pour les profils "enveloppe min" et "max" et les profils moyens par cellule et sous-cellule hydro-sédimentaires (Figure 7, Figure 8). Ces figures illustrent la grande variabilité des configurations observées par localisation et l'intérêt descriptif des caractéristiques moyennes, min et max des profils à l'échelle de la côte.

La variabilité de la morphologie est nettement plus faible pour les cellules 1 et 2, où les plages sont principalement plates à faiblement concaves et où le pied de dune se situe plutôt autour de 5 m NGF.

La situation opposée est observée à l'extrême sud des Landes, dans la cellule 6, où les plages sont généralement plus larges et où la variabilité des morphologies observées est très forte. On y observe parfois une forme convexe des profils classiques des secteurs en accrétion, aussi accentuée par la nature des sédiments (plus grossiers) et la présence régulière de bermes superposées. Ici, la rupture de pente caractérisant le trait de côte peut atteindre 7 à 8 m NGF.

Entre les deux, les plages présentent globalement des caractéristiques de plages intermédiaires. Si les plages de Gironde et des Landes sont assez proches en terme de morphologie, on note toutefois un gradient nord-sud qui, comme cela sera vu dans les chapitres suivants, s'exprime pour l'ensemble des descripteurs (largeur, pente, volume, épaisseur de l'enveloppe...).

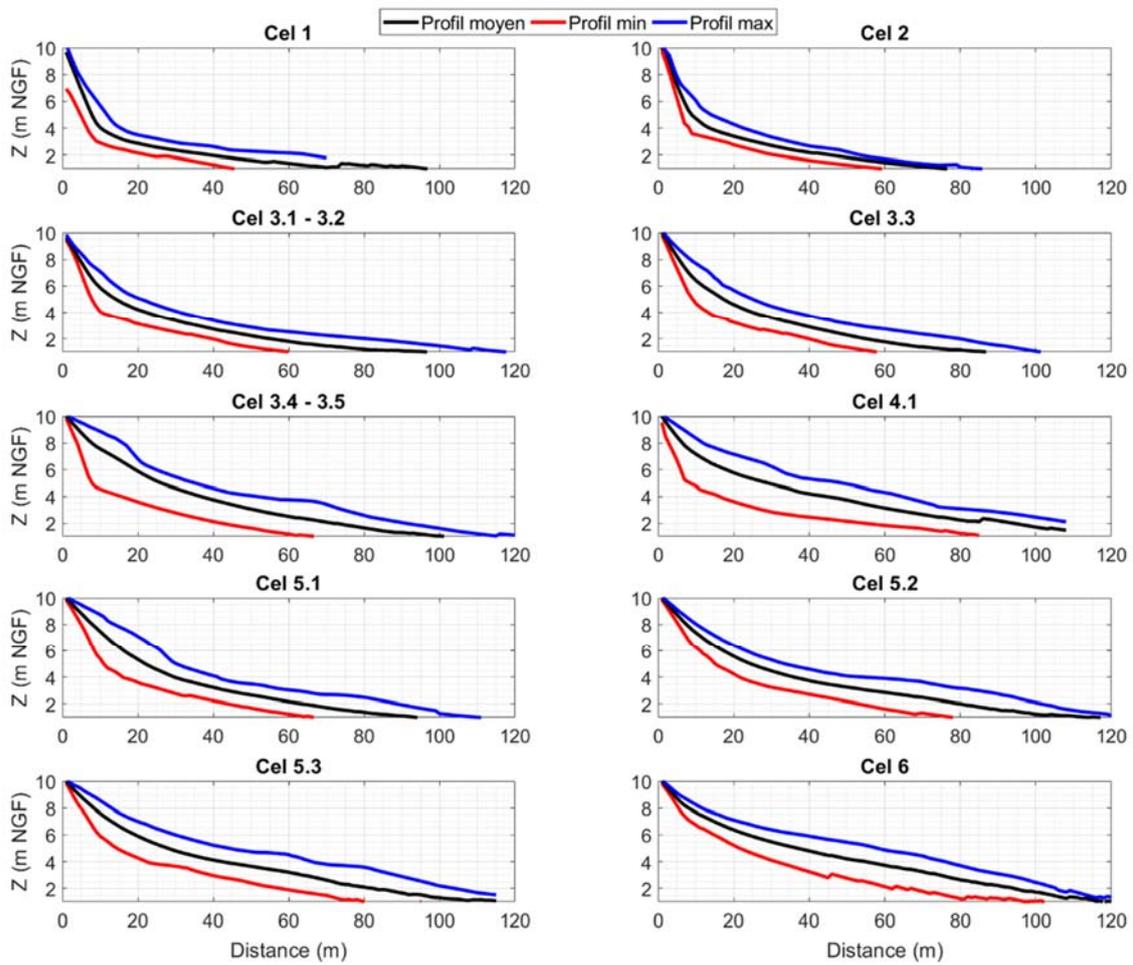


Figure 7 : Variabilité des caractéristiques moyennes et enveloppes (min-max) des profils de plage post-hiver par cellule et sous-cellule hydro-sédimentaires (période 2008-2019)

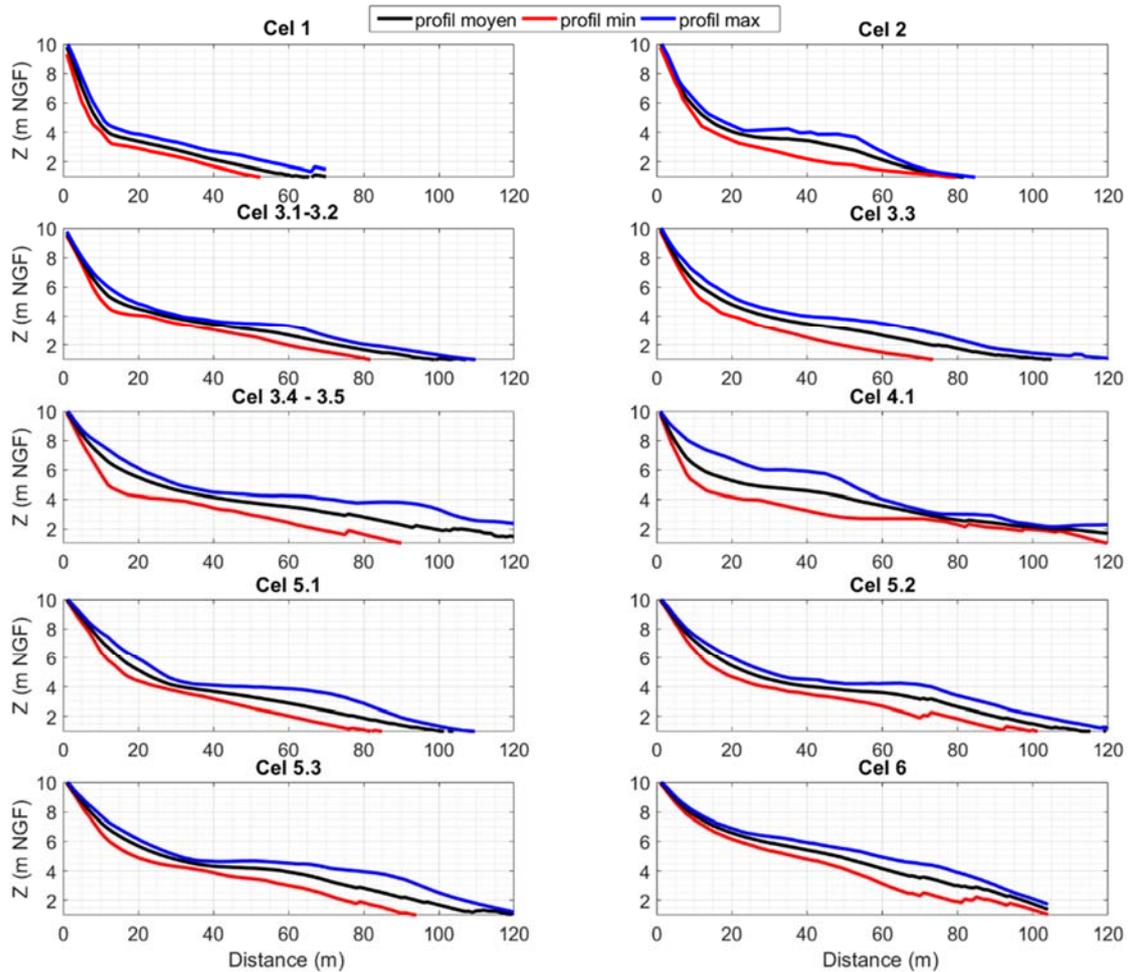


Figure 8 : Variabilité des caractéristiques moyennes et enveloppes (min-max) des profils de plage post-été par cellule et sous-cellule hydro-sédimentaires (période 2014-2018)

4.3. ANALYSE SPATIALE DES DESCRIPTEURS DE L'ETAT DES PLAGES

4.3.1. Largeur des plages

Les plages de la côte aquitaine (comprises entre 2 et 6 m NGF) sont en moyenne d'une largeur $L = 51$ m, en situation post-hiver (moyenne établie sur l'ensemble des données disponibles pour la période 2008-2019) et $L = 65$ m en situation post-été (moyenne établie sur l'ensemble des données disponibles pour la période 2014-2018). On observe toutefois une grande variabilité spatiale et temporelle aux échelles de temps interannuelle et saisonnière. Les valeurs de référence par cellule hydro-sédimentaire et par grand ensemble sont présentées dans le Tableau 2 ci-dessous.

		Largeur de plage (entre 2 et 6 m NGF) en m				
		Tous profils confondus			Post-hiver	Post-été
Secteur	Nombre de transect	moy	min	max	moy	moy
Cel1	3	32	23	45	32	33
Cel2	1	40	26	57	36	50
Cel3	13	51	29	90	45	66
Cel4	2	58	31	99	53	71
Cel5	17	61	35	90	57	69
Cel6	5	59	35	82	58	62
Gironde	19	49	23	99	45	63
Landes	22	59	35	90	57	66
Total	41	55	23	99	51	65

Tableau 2 : Largeur de plage moyenne, minimum et maximum, le long de la côte aquitaine

Plus en détails (Figure 9), on observe que les plages les plus étroites sont celles du Nord-Médoc (cellule 1 et cellule 2) où les valeurs moyennes sont inférieures ou égales à 40 m, avec un minimum de 23 m en moyenne pour le profil G2. Au centre de la côte girondine (cellules 3.1, 3.2 et 3.3), les valeurs moyennes sont proches de la moyenne régionale et sont comprises entre 45 et 55 m. On observe une augmentation des largeurs moyennes au sein des cellules 3.4 et 3.5, avec des valeurs supérieures à 60 m en moyenne. Au sein de la cellule 4.1, les largeurs sont de l'ordre de la moyenne pour les plages girondines (49 m) à la racine du Cap Ferret, puis atteignent près de 90 m au niveau du Cap Ferret. Sur la côte des Landes, les valeurs moyennes sont comprises entre 45 et 72 m. On observe une nette progression de ces valeurs du nord vers le sud. Les largeurs, proches de la moyenne régionale au sein de la cellule 5.1, avoisinent ou dépassent les 60 m au sein des cellules 5.2 et 5.3. Les largeurs de plage sont plus réduites au sein de la cellule 6, du fait d'un changement net de morphologie des plages au sud de Capbreton.

En ce qui concerne la variabilité interannuelle observée du descripteur "largeur de plage" pour chacun des profils, elle suit globalement la même organisation que celle des valeurs moyennes. De manière générale, on constate une variabilité globale (largeur max vs largeur min pour l'ensemble de la période étudiée) plus forte là où les largeurs moyennes sont plus importantes. Les plages les plus larges sont identifiées au sein des cellules 3.4 à 4 (au nord des passes du bassin d'Arcachon) avec des valeurs pouvant dépasser 100 m et atteindre 180 m. Les plus petites largeurs observées par profil sont quant à elles, nettement plus homogènes, généralement comprises entre 20 et 40 m, le long de la côte. On note toutefois un gradient nord-sud avec les valeurs les plus faibles dans le Nord-Médoc (cellule 1) où les plages sont quasi inexistantes et le sud des Landes où ces valeurs peuvent dépasser 40 m.

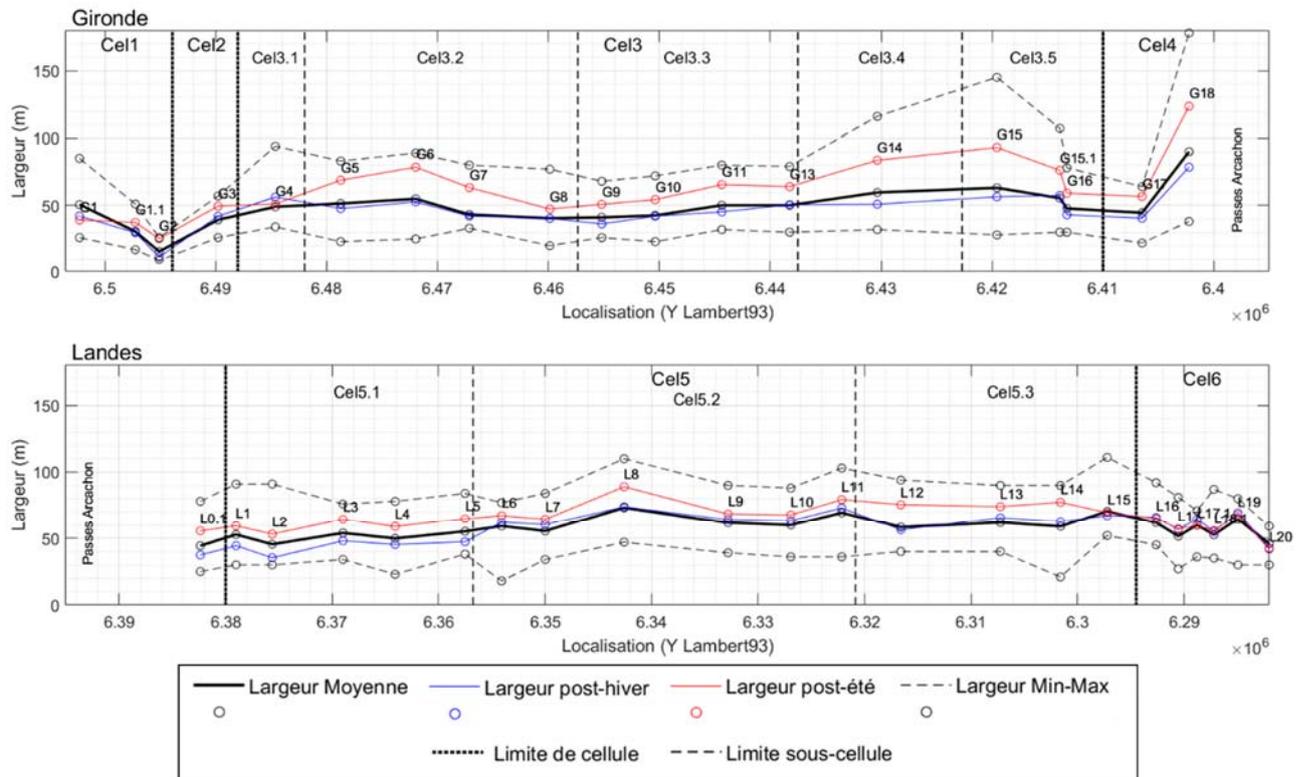


Figure 9 : Largeur de plage par profil, le long de la côte aquitaine

La variabilité saisonnière (courbes bleue et rouge sur la Figure 9 et Tableau 2) apporte un éclairage supplémentaire sur la dynamique des largeurs de plage. On constate que les différences de largeur entre les situations post-hiver (largeur de plage réduite) et post-été (largeur de plage étendue) sont supérieures sur la côte girondine que sur la côte landaise. Ces différences entre la largeur moyenne post-hiver et post-été sont communément supérieures à 30 m en Gironde et atteignent plus de 40 m au sein des cellules 3.5 et 4. La variabilité saisonnière des largeurs de plage est plus faible sur la côte landaise, communément comprise entre 10 et 20 m.

4.3.2. Pente des plages

La description des pentes de plage de la partie haute du profil (comprise entre 2 et 6 m) et de leur variabilité le long de la côte suit logiquement une distribution comparable à celle des largeurs de plage (Figure 10). La logique est toutefois inverse, là où les plages sont larges : les pentes sont généralement plus faibles. En moyenne à l'échelle régionale, les pentes de plage sont de 7,8 % en situation post-hiver et de 6,2 % en situation post-été. On remarque des différences notables entre les moyennes de la côte girondine avec 8,9 % et 6,3 % et de la côte landaise avec 7,1 % et 6,0 % respectivement en situation post-hiver et post-été (cf. Tableau 3 Tableau 4). Ces différences apparaissent logiques du fait du changement morphologique saisonnier classique du haut de plage (cf. Figure 2) et de l'élargissement des plages en été. Enfin, on retiendra également qu'en considérant les valeurs moyennes post-hiver et post-été, même si les différences le long de la côte peuvent être de plusieurs degrés, les pentes de plage restent globalement comprises entre 5 et 10 %.

Les valeurs maximales observées montrent que les pentes de plage peuvent atteindre ponctuellement des valeurs supérieures à 15 %. Deux situations particulières conduisent à ces résultats : la première, lorsque les profils sont très fortement marqués par des érosions hivernales ayant fortement réduit la largeur de plage ; la seconde est directement liée au cas de la cellule 1, où les profils présentent des configurations

de très faible largeur de plage avec un pied de falaise dunaire autour de 5 m NGF. Dans ce cas spécifique, bien que l'indicateur ait été calculé (entre 2 et 6 m NGF), il est peu représentatif.

Enfin, on remarque que les pentes minimales sont de l'ordre de 5 %, parfois plus faibles, correspondant généralement à des situations de profils estivaux.

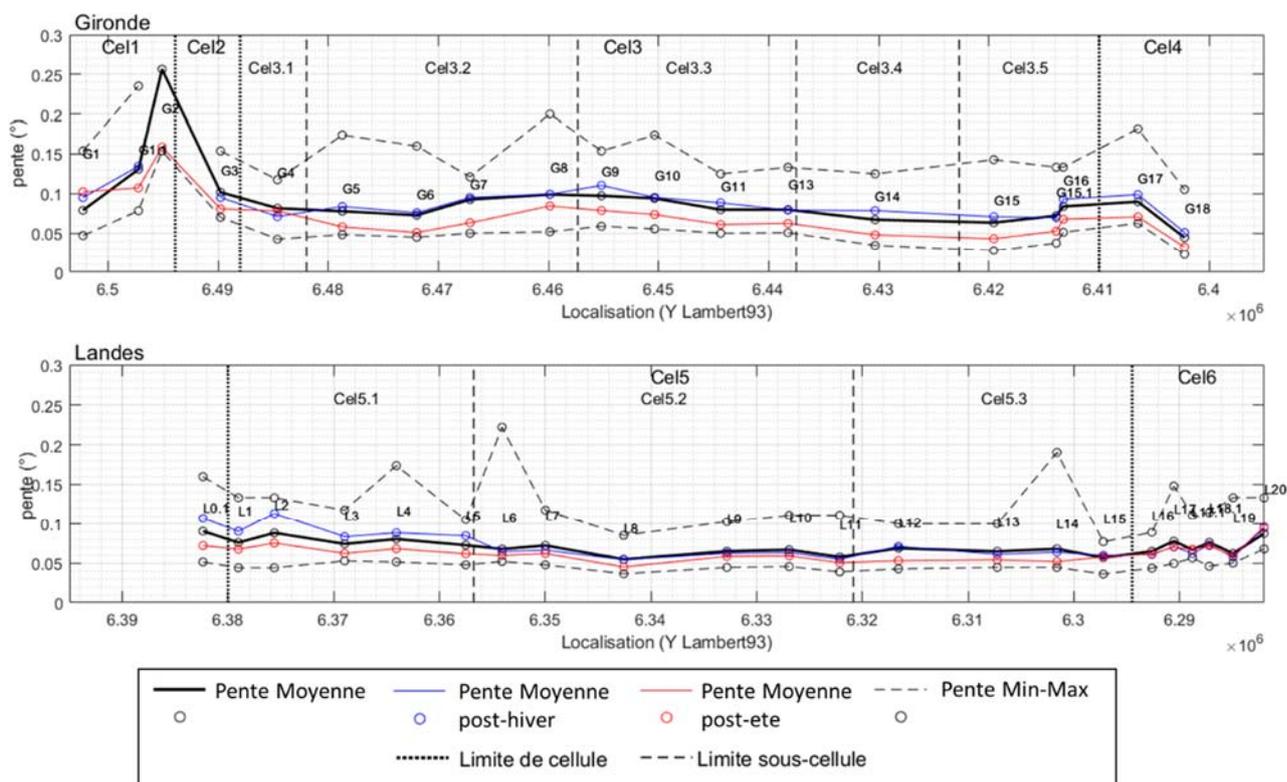


Figure 10 : Pente de plage par profil, le long de la côte aquitaine

		Pente de plage (entre 2 et 6m NGF) en m/m				
		Tous profils confondus			Post-hiver	Post-été
Secteur	Nombre de transect	moy	min	max	moy	moy
Cel1	3	0.17	0.11	0.26	0.19	0.14
Cel2	1	0.11	0.07	0.15	0.12	0.08
Cel3	13	0.09	0.05	0.14	0.09	0.07
Cel4	2	0.08	0.05	0.14	0.09	0.07
Cel5	17	0.07	0.05	0.12	0.08	0.06
Cel6	5	0.07	0.05	0.12	0.07	0.07
Gironde	19	0.10	0.04	0.26	0.09	0.06
Landes	22	0.07	0.04	0.12	0.07	0.06
Total	41	0.09	0.04	0.26	0.08	0.06

Tableau 3 : Pente de plage moyenne, minimum et maximum, le long de la côte aquitaine

4.3.3. Epaisseur de sédiments

Sur l'ensemble de la côte, la variabilité des hauteurs de sable est importante autant à l'échelle interannuelle, où elle peut être en moyenne de l'ordre de 1,3 m, qu'à l'échelle saisonnière où elle atteint 1,5 m (Tableau 4, Figure 11). La variabilité interannuelle est ainsi légèrement plus faible que la variabilité saisonnière. C'est particulièrement vrai en Gironde où les variations d'épaisseur interannuelles en haut de plage sont de 1,1 m en moyenne, contre 1,5 m en moyenne pour les variations d'épaisseur saisonnières. L'épaisseur maximale de l'enveloppe des observations (He_{max}) est de 3,7 m en moyenne avec des valeurs relativement proches en Gironde et dans les Landes, respectivement 3,5 m et 3,9 m.

		Epaisseur de sédiment en m/m							
		He_t	He_{max}	Hc,i			Hc,s		
Secteur	Nombre de transect	moy	max	moy	min	max	moy	min	max
Cel1	3	1.6	3.0	1.1	0.5	1.7	1.2	0.8	1.7
Cel2	1	1.6	2.7	0.7	0.3	1.2	1.1	0.4	1.8
Cel3	13	2.0	3.6	1.1	0.5	1.8	1.5	1.1	1.9
Cel4	2	2.3	3.6	1.5	0.8	2.3	1.6	1.1	2.4
Cel5	17	2.3	3.7	1.4	0.7	2.2	1.5	1.2	1.9
Cel6	5	2.8	4.7	1.8	0.9	3.0	1.8	1.2	2.4
Gironde	19	2.0	3.5	1.1	0.3	2.3	1.5	0.4	2.4
Landes	22	2.4	3.9	1.5	0.7	3.0	1.6	1.2	2.4
Totale	41	2.2	3.7	1.3	0.3	3.0	1.5	0.4	2.4

Tableau 4 : Caractéristiques moyennes, minimum et maximum de l'épaisseur de sédiments et de ses variabilités interannuelle et saisonnière, le long de la côte aquitaine

Plus en détails (Figure 11), la lecture des variabilités max et min, par profil, montre que les situations peuvent être très contrastées d'une campagne à l'autre. En effet, on peut observer, selon les années, des variations de la hauteur du sable de l'ordre de 2 à 2,5 m des cellules 1 à 3.3, puis supérieures à 2,5 m jusqu'à 3,5 m au niveau des cellules 3.3 à 4.1. Ces différences maximales inter-campagnes augmentent également du nord vers le sud, sur la côte des Landes, de 2 à 3 m, au niveau des cellules 5.1 et 5.2 ; elles peuvent dépasser 3,5 m dans le sud des Landes.

On note que, sur la côte landaise, la variabilité interannuelle est supérieure à la variabilité saisonnière. A l'inverse, les variabilités saisonnières les plus importantes sont constatées au sein des cellules 3.4 et 3.5, où elles sont en moyenne presque deux fois plus importantes que les variabilités interannuelles moyennes.

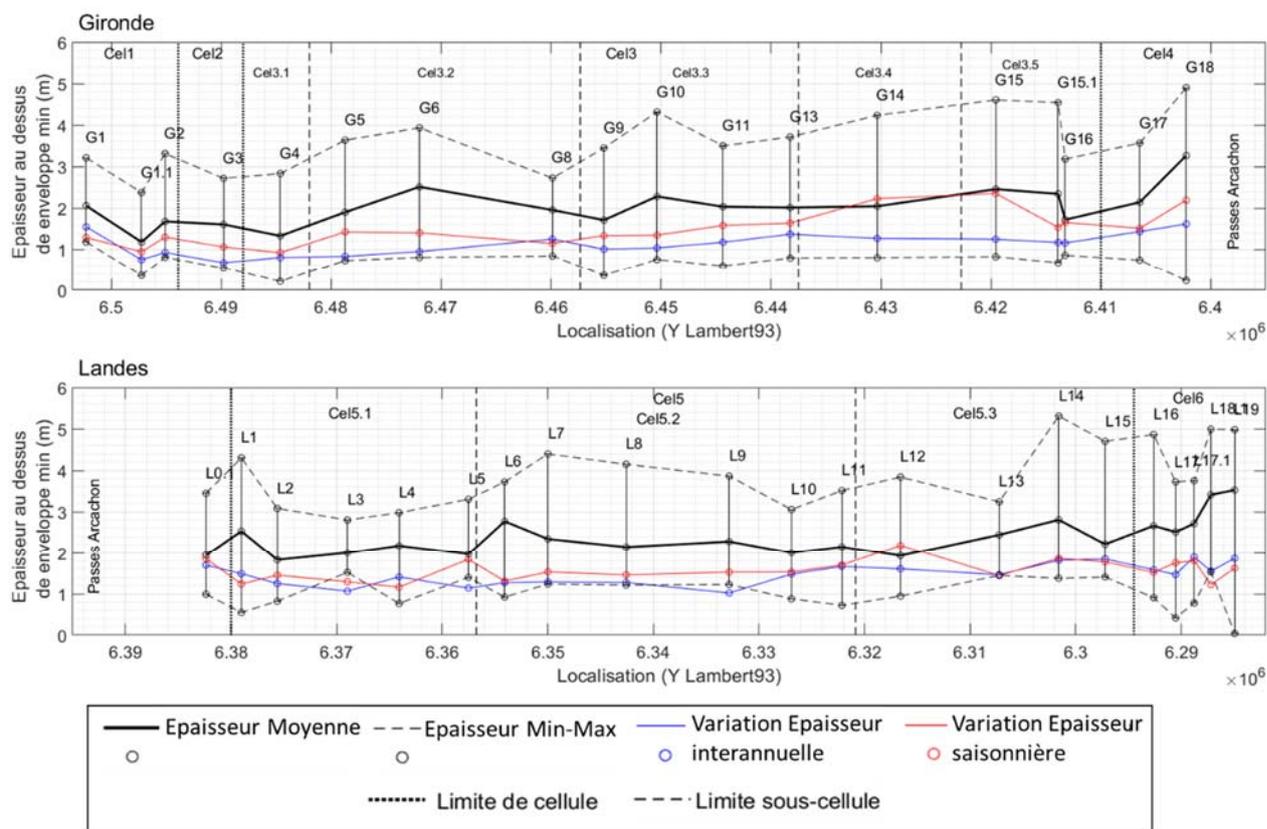


Figure 11 : Epaisseur de sédiments par transect, le long de la côte aquitaine, et variations temporelles

La Figure 11 replace la variabilité observée par rapport au profil min et permet d’apprécier la notion d’épaisseur de sédiment par rapport à la situation théorique la plus dégradée observée.

4.3.4. Volumes sédimentaires

Comme décrit ci-avant (cf. §3.4.3), les volumes sédimentaires en m³/m sont présentés ici en valeurs relatives par rapport à une base correspondant à 0 m NGF, pour un profil interrompu à la valeur du niveau marin moyen (0,5 m NGF, Figure 12 et Tableau 5). La comparaison des volumes relatifs offre une vision complémentaire et cohérente avec les autres indicateurs précédemment renseignés.

		Volume de sédiment en m ³ /m											
		Volume plage			Volume de l'enveloppe (tous profils confondus)	Volume post-hiver	Volume post-été	Différences interannuelles			Différences saisonnières		
Secteur	Nombre de transect	moy	min	max	moy	moy	moy	moy	min	max	moy	min	max
Cel1	3	199	99	362	265	195	207	59	18	122	76	23	110
Cel2	1	234	136	318	165	215	292	19	2	45	51	22	103
Cel3	13	331	123	686	351	311	390	62	34	102	101	69	134
Cel4	2	430	170	860	379	439	489	81	55	121	81	46	124
Cel5	17	381	182	693	362	364	417	86	67	120	77	41	100
Cel6	5	457	158	810	329	460	494	68	36	104	54	28	103
Gironde	19	317	99	860	343	297	372	62	2	122	95	22	134
Landes	22	392	158	810	351	393	435	80	36	120	71	28	103
Totale	41	349	99	860	345	349	405	72	2	122	82	22	134

Tableau 5 : Caractéristiques moyennes, minimum et maximum des volumes sédimentaires et de leurs variabilités interannuelle et saisonnière, le long de la côte aquitaine

On constate que les volumes stockés sur les plages sont en moyenne de 349 m³/m, en situation post-hiver et de 405 m³/m, en situation post-été. La différence est notable entre les plages de Gironde avec 297 et 372 m³/m et celles des Landes 393 et 435 m³/m, respectivement en situations post-hiver et post-été.

Le volume de l'enveloppe des profils observés permet d'apprécier la variabilité globale des volumes sédimentaires au long de la période (2008-2019). Ainsi les enveloppes représentent des volumes en moyenne sur l'ensemble de la côte de l'ordre de 345 m³/m. Les moyennes pour la Gironde et les Landes sont proches, respectivement 343 et 351 m³/m.

Les situations de volumes stockés sur les plages, en comparant les différents profils aux échelles interannuelle et saisonnière, peuvent être très contrastées. Au cours de la période étudiée de 2008 à 2019, les stocks de sable peuvent varier en moyenne du simple au double (multiplié par 1,87 pour l'ensemble de la côte, 2,05 pour les plages de Gironde et 1,71 pour les plages des Landes). Dans les cas les plus extrêmes (en Gironde, cellule 3 et cellule 4), les volumes observés au niveau des plages sont plus de 4 fois plus importants entre la situation la plus favorable (post-été 2016) et la plus dégradée (post-hiver 2014).

La variabilité spatiale est très forte selon les profils. En Gironde, les valeurs moyennes sur la période peuvent être comprises entre 151 m³/m au sud de la cellule 1 et jusqu'à 606 m³/m au niveau de la pointe du Cap Ferret. Sur la côte landaise, cette variabilité est moindre, comprise entre 293 et 472 m³/m, excepté à l'extrême sud (cellule 6).

Les valeurs maximales des volumes de sédiments observables connaissent également de fortes variabilités, le long de la côte. Les valeurs maximales constatées les plus faibles sont dans le Nord-Médoc (244 m³/m) et les plus importantes au sein des cellules 3.4, 3.5, 4.1 (comprises entre 600 et 850 m³/m). Dans les Landes, ces valeurs sont de l'ordre de 500 à 600 m³/m, excepté en cellule 6.2, où les valeurs atteignent plus de 800 m³/m (Figure 12).

Les moyennes saisonnières montrent de forts contrastes des stocks de sable disponibles sur les plages en situation post-été par rapport à la situation post-hiver.

Le contraste saisonnier est plus fort en Gironde où, en moyenne, les stocks sont supérieurs de 22 % en situation post-été par rapport à la situation post-hiver, contre 15 % dans les Landes. En moyenne, sur l'ensemble de la côte, c'est environ 19 % de sable qui est disponible en plus lors de la saison estivale par rapport à la situation post-hiver.

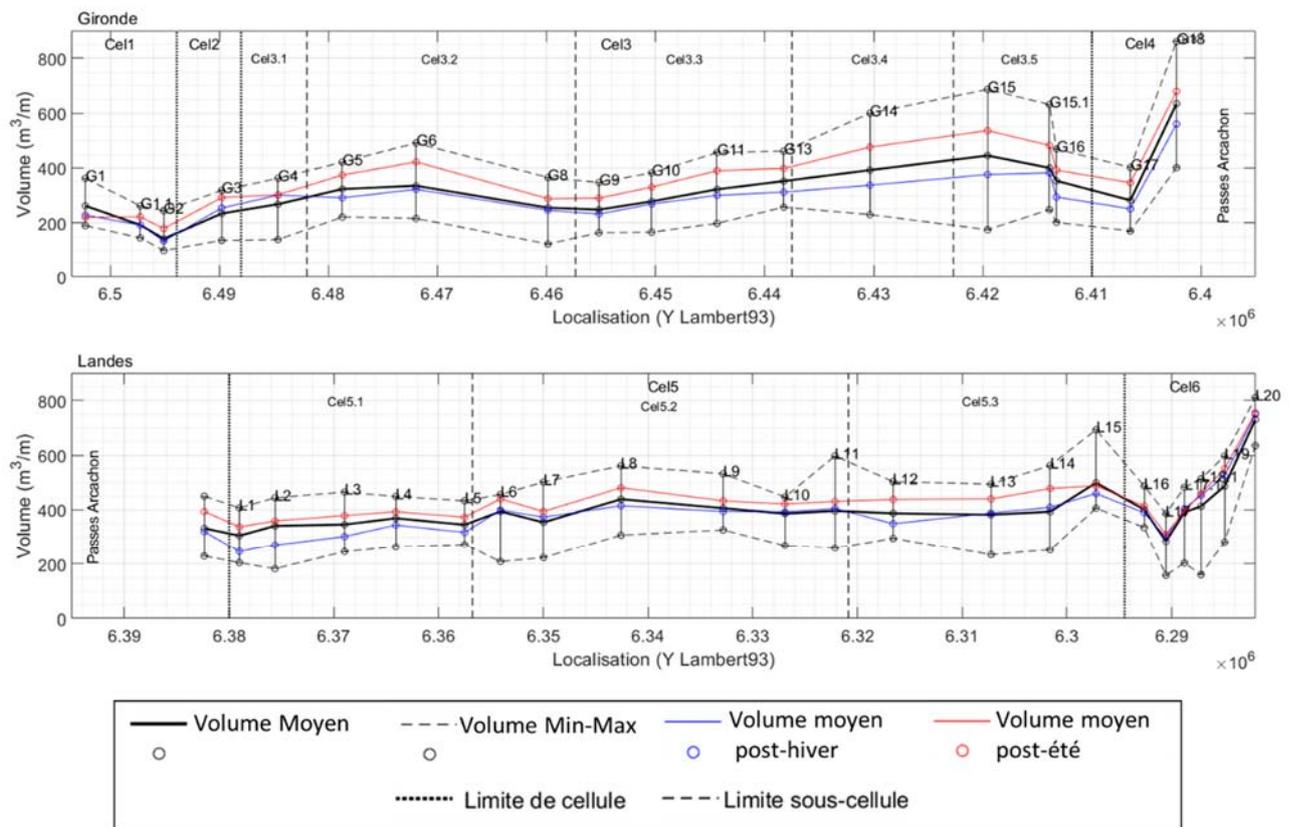


Figure 12 : Volume de sable sur la plage, par transect, le long de la côte aquitaine

4.3. ANALYSE DE LA VARIABILITE TEMPORELLE

4.3.1. Evolution des descripteurs de l'état des plages

On propose, dans cette partie, de présenter les évolutions temporelles des descripteurs "largeur" (L) et "volume" (V) de plage, calculés pour la période 2008-2019 (Figure 13). Comme évoqué précédemment, ces descripteurs sont partiellement corrélés entre eux, ainsi qu'aux autres descripteurs calculés. Ils soulignent une tendance commune. On résume ici l'analyse à ces deux descripteurs, car ces deux variables sont les plus communément utilisées pour décrire, de manière synthétique, l'état des plages et permettent d'être comparées aux conditions de forçage et à leur variabilité dans le temps. Afin de simplifier l'interprétation et présenter des résultats résumant les grandes tendances, seules les moyennes à l'échelle de tout le littoral aquitain (effectif 41) et par grand ensemble géographique (Gironde (effectif 19) ou Landes (effectif 22)) sont présentées ici. L'analyse des évolutions temporelles des descripteurs "largeur" et "volume" de plage est réalisée pour la période 2008-2019, pour les variations interannuelles, et la période 2014-2019 pour les variations saisonnières (cf. Figure 13).

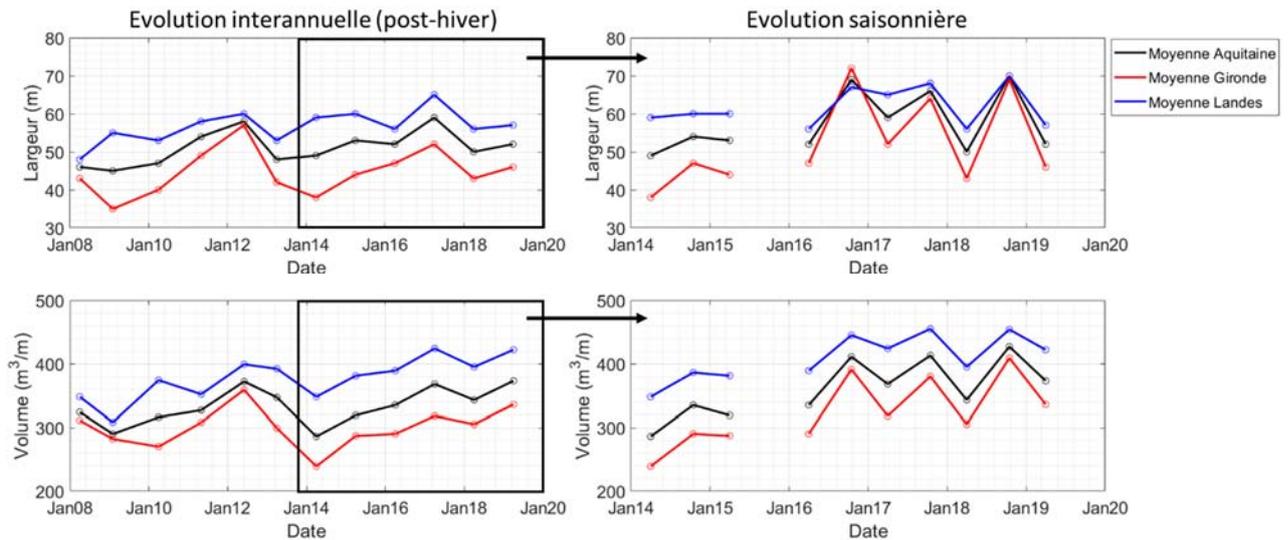


Figure 13 : Evolution moyenne des descripteurs "largeur de plage" et "volume de plage" pour la période 2008-2019 (à gauche, les séries temporelles représentent les situations post-hiver ; à droite, les séries temporelles illustrent la variabilité saisonnière des descripteurs pour la période 2014-2019)

Des tendances nettes pour les deux descripteurs se dégagent au cours de la période 2008-2019. On constate :

- **une tendance à la hausse des descripteurs** pour les unités géographiques considérées (tendance moyenne globale, moyenne Gironde, moyenne Landes). Cela se traduit par l'extension moyenne des largeurs de plage et l'augmentation des volumes de sédiments positionnés sur les plages pour la période considérée (et ce, en intégrant les effets de l'hiver 2013-2014).

Si les données sont regardées uniquement en situation post-hivernale, les tendances sur la décennie suivent une hausse modérée et les volumes en 2019, pour l'ensemble de l'Aquitaine, sont les plus importants au cours de la période et équivalents aux volumes observés en 2012 ;

- **un comportement différent du littoral de la Gironde par rapport à celui des Landes.** Au-delà du fait que les descripteurs "largeur" et "volume" de plage présentent des valeurs significativement supérieures en moyenne dans les Landes, on constate également une plus grande stabilité des descripteurs dans cette partie du littoral, par rapport à la Gironde. L'aspect plus dynamique des évolutions en Gironde sur la période semble compenser les années les plus défavorables. Ainsi, depuis la fin de l'hiver 2016, les courbes des différents descripteurs se sont rapprochées. Pour le descripteur "largeur de plage", on constate même que les valeurs en Gironde sont plus importantes que dans les Landes à l'automne 2016 (Figure 13).
- **un impact relativement limité de l'hiver 2013-2014, sur le long terme, pour les descripteurs calculés.** En effet, si la hausse globale des descripteurs observée lors des mesures post-hiver de 2011 et 2012 peut être imputable en partie à des mesures plus tardives dans la saison, la situation à la sortie de l'hiver 2013-2014 suit une tendance à la diminution des valeurs des différents descripteurs déjà observables à la fin de l'hiver 2012-2013. En revanche, on constate (hors effets saisonniers) une augmentation dans les années suivantes des différents descripteurs. Les données de la campagne post-hiver 2017-2018 cassent la tendance d'accumulation progressive des sédiments sur les plages, observable depuis l'hiver 2014. Les volumes sédimentaires et la largeur de plage restent cependant à des valeurs élevées par rapport au reste de la période étudiée. Enfin, grâce à un fort rechargement estival naturel en 2018 et un hiver clément (2018-2019), les valeurs post-hiver 2018-2019 présentent des valeurs à la hausse par rapport à la fin de l'hiver 2017-2018.

4.3.2. Evolution des références altimétriques

La Figure 14 ci-dessous permet de décrire les évolutions des positions des différentes références altimétriques utilisées pour la période 2008-2019. Toutes les évolutions de positions sont données en référence à la position moyenne du trait de côte de chaque ensemble géographique en avril 2008. Comme précédemment, afin de simplifier l'interprétation et présenter des résultats résumant les grandes tendances, les évolutions sont étudiées à l'échelle de tout le littoral aquitain (effectif 41) et par grand ensemble géographique (Gironde (effectif 19) ou Landes (effectif 22)). Dans un second temps, les évolutions interannuelles et saisonnières sont examinées par cellule et sous-cellule hydro-sédimentaires.

On observe d'abord que le suivi dans le temps des références 2 et 4 m NGF permet d'illustrer la grande dynamique des systèmes "plages" aux échelles saisonnière et interannuelle. La mobilité plus modérée des références 6 et 10 m NGF reflète quant à elle les évolutions pluriannuelles.

Les résultats sont nettement différents en Gironde et dans les Landes. Aussi nous proposons de décrire ces évolutions séparément.

Sur la côte girondine, l'impact de l'hiver 2013-2014 a été nettement plus important que sur la côte landaise. L'ensemble du système (compris ici entre les altitudes 2 et 10 m NGF) a en effet fortement reculé dans cette partie nord du littoral aquitain (en moyenne entre 10 et 15 m). L'effet est d'autant plus important qu'il intervient alors que l'année 2012 présentait la situation la plus favorable depuis 2008 en termes de largeur de plage et de volume sédimentaire, et que l'année 2013 présentait déjà un recul important au niveau de la plage (références 2 et 4 m NGF). Après le recul brutal de 2013-2014, les références d'altitude suivent des trajectoires différentes pour la période 2014-2019 :

- la référence 2 m NGF tend à légèrement progresser vers l'océan (en moyenne plus de 5 m à la sortie de l'hiver 2018-2019, par rapport à la position 2014) ;
- la référence 4 m NGF suit une dynamique assez marquée de progression vers l'océan, traduisant la constitution progressive de banquettes en haut de plage (en moyenne plus de 5 m à la sortie de l'hiver 2018-2019, par rapport à la situation de 2014) ;
- la référence 6 m NGF (approximativement le trait de côte) est relativement stable (en moyenne - 0,4 m à la sortie de l'hiver 2018-2019, par rapport à la situation de 2014) ;
- la référence 10 m NGF a tendance à reculer progressivement (en moyenne - 5 m à la sortie de l'hiver 2018-2019, par rapport à la situation de 2014). Ce comportement est associé aux dynamiques éoliennes que subissent les fortes pentes des fronts dunaires suite à un épisode d'érosion marine majeure. En effet, suite à une érosion marine massive, les falaises dunaires sont éolisées (soumises à des dynamiques intenses de déplacement des sédiments sous l'effet du vent), les pentes très abruptes des falaises dunaires s'adoucissent peu à peu et on voit apparaître des caudeyres frontaux. Ces formes aux dynamiques lentes (contrairement à l'érosion marine) sont actives plusieurs années après l'hiver (3 à 5 ans) et induisent la déstabilisation du front dunaire par érosion éolienne.

Le littoral landais apparaît nettement plus stable ; l'impact de l'hiver 2013-2014 est à la fois moins brutal et relativement vite effacé :

- pour les références 2 et 4 m NGF, un retour est constaté, dès avril 2017, à des positions plus occidentales qu'en avril 2013 et même qu'en 2012 (position la plus avancée par rapport au trait de côte pour la période 2008-2016). On note bien également les variations saisonnières avec de fortes avancées de la référence 4 m NGF, en situation estivale, du fait de la constitution de bermes importantes ;
- la référence 6 m NGF a subi un recul notable en 2013-2014 (- 10 m), mais dès l'année suivante, cette position a progressé vers l'océan. Entre 2014 et 2019, la position a progressé de 6,5 m et est en moyenne plus avancée (de l'ordre de 2 m) que la position en 2008 ;

- pour la référence 10 m NGF, le recul du front de dune est de 3 m lors de l'hiver 2013-2014 et la position est stable depuis. Ceci peut s'expliquer par le fait que, comparativement à ce qui fut observé en Gironde, les falaises dunaires post-hiver 2013-2014 dans les Landes étaient moins prononcées ou les entailles n'atteignaient pas nécessairement l'altitude de 10 m NGF. De plus, les sites, connaissant une érosion chronique dans les Landes, sont peu nombreux voire inexistants sur certaines parties de la côte. Des transferts de sable entre la plage et la dune peuvent ainsi se faire plus facilement, ce qui se traduit même par une légère avancée lors des dernières mesures de 2019.

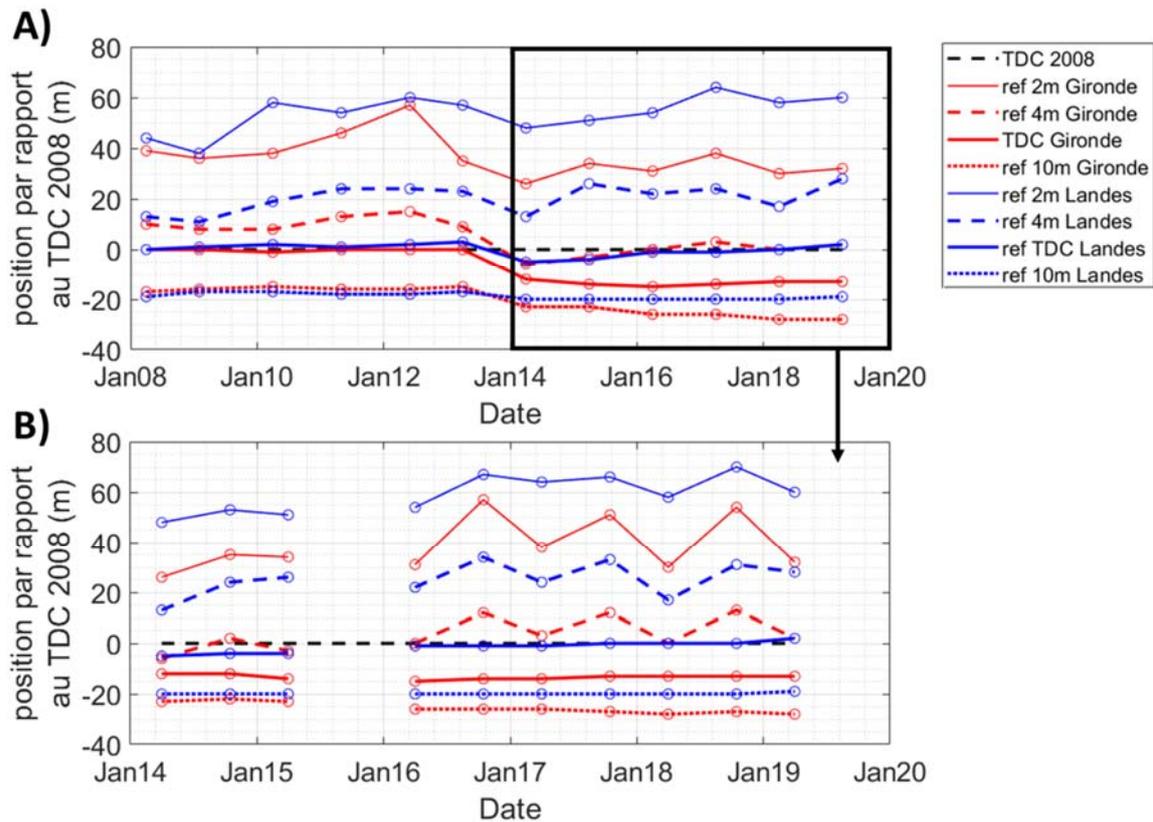


Figure 14 : Evolution des positions (distance horizontale) des différentes références altimétriques utilisées pour la période 2008-2019. Toutes les évolutions de positions sont données en référence à la position du trait de côte (6 m NGF) en avril 2008. En haut, les séries temporelles représentent les situations post-hiver et reflètent ainsi la variabilité interannuelle. En bas, les séries temporelles illustrent la variabilité saisonnière des références altimétriques pour la période 2014-2019.

Les parties précédentes ont proposé une analyse descriptive des différences spatiales, le long des 230 km de la côte sableuse aquitaine, puis une analyse temporelle sur plus de 11 ans (période 2008 à 2019). On propose dans le chapitre suivant de synthétiser ces résultats par sous-cellule hydro-sédimentaire et par profil représentatif des dynamiques de sa sous-cellule ou cellule d'appartenance.

5. Synthèse des caractéristiques des plages et des évolutions interannuelles et saisonnières

5.1. SYNTHÈSE DES ÉVOLUTIONS PAR PROFIL REPRESENTATIF

Afin de synthétiser les résultats présentés dans la section précédente, une brève analyse sur 10 profils (1 par cellule ou sous-cellule hydro-sédimentaire) est proposée ci-dessous. Ces profils sont considérés comme représentatifs de la dynamique observable au sein de leur cellule hydro-sédimentaire. Leur analyse succincte s'appuie sur une planche de synthèse illustrant : 1) l'évolution du profil pour la période 2008-2019, 2) l'impact de l'hiver 2013-2014, 3) l'enveloppe de variabilité de la morphologie de la plage, 4) les profils post-hiver et post-été disponibles et constitutifs de l'enveloppe, 5) l'évolution des références altimétriques pour la période 2008-2019, 6) les volumes sédimentaires disponibles sur les plages au cours de la période 2008-2019.

5.1.1. Profil G1.1 (Les Sables d'Argent, Nord Médoc) pour Cellule 1

Le profil G1.1, situé dans la cellule hydro-sédimentaire du Nord-Médoc, est le profil indiquant les plus forts taux de recul, au cours de la période 2008-2019 (recul du TDC de 45 m), après le G2, situé dans la même cellule (recul du TDC de 70 m). Mis à part l'extrême nord de la cellule (Banc Saint Nicolas), le secteur est globalement en érosion, avec parfois des taux de recul considérables. On constate que l'impact de l'hiver 2013-2014 a été notable sur ce profil, mais est resté inférieur à 10 m. L'hiver 2013-2014 semble surtout avoir eu comme effet particulier d'accélérer une tendance érosive déjà marquée et constatée ici depuis 2008. Après 2014 et malgré des rechargements de plages artificiels réguliers, la tendance érosive s'est accélérée et le recul est de plusieurs mètres par an (Figure 15).

En terme de disponibilité sédimentaire, les estrans étant très bas et plats et le contact plage-dune étant caractérisé par une falaise dunaire, les volumes sont parmi les plus faibles de l'ensemble du littoral avec, en moyenne post-hiver, des volumes inférieurs à 200 m³/m et des rechargements estivaux inférieurs ou égaux à 30 m³/m. L'enveloppe de variabilité est au maximum de 2 m. Le contraste morphologique saisonnier est faible : l'estran étant généralement plat avec des paléosols sous-jacents et potentiellement apparents en hiver ; en été, de modestes bermes (inférieures à 1 m de hauteur) peuvent apparaître potentiellement issues d'apport de sables artificiels.

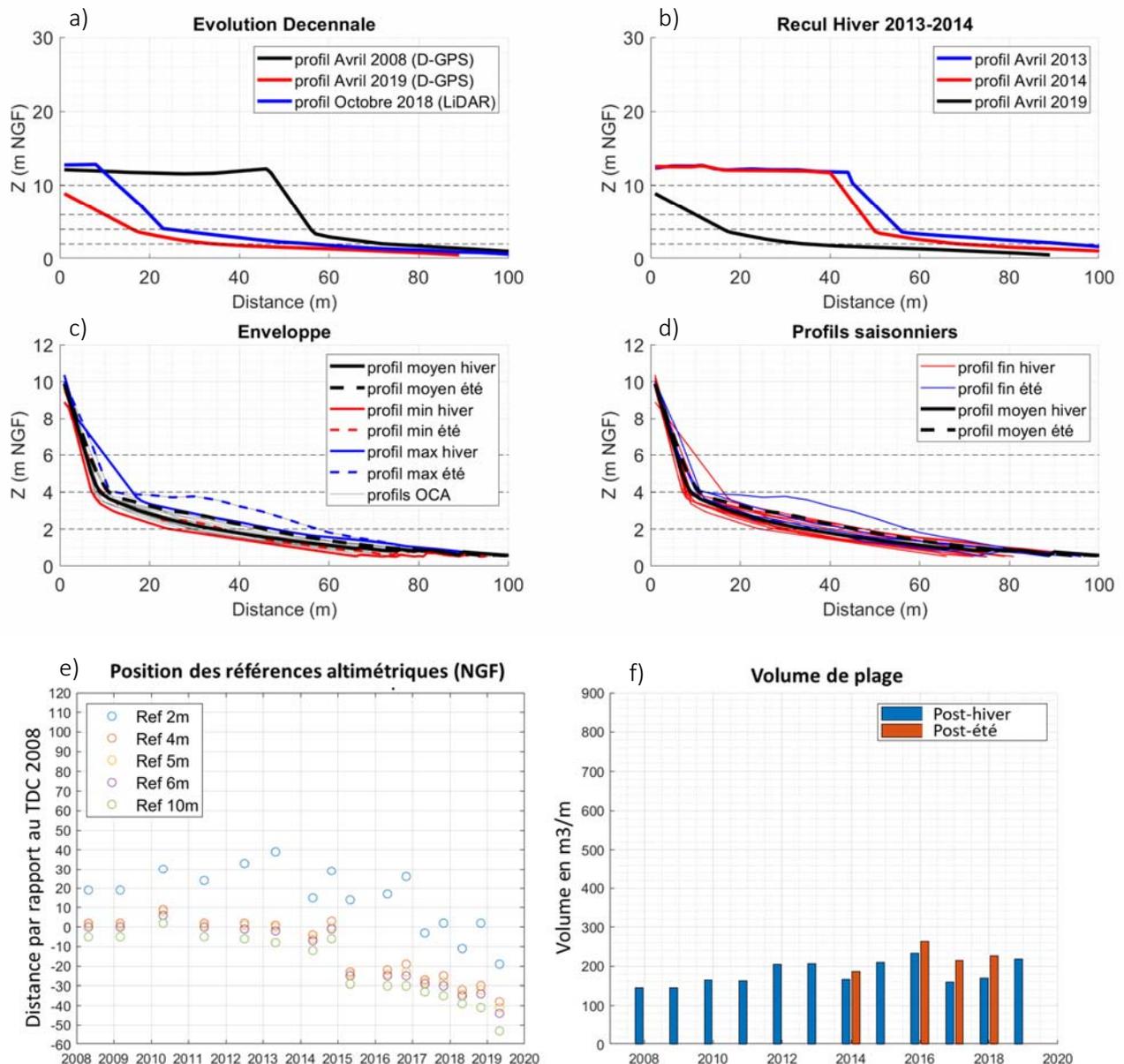


Figure 15 : Planche de synthèse des évolutions du profil G1.1 pour la période 2008-2019

a) évolution du profil sans recalage pour la période 2008-2019. b) impact de l'hiver 2013-2014. c) enveloppe de variabilité de la morphologie de la plage. d) profils post-hiver et post-été disponibles et constitutifs de l'enveloppe. e) distance horizontale entre le trait de côte 2008 (référence 6 m NGF) et les positions des différentes références altimétriques, pour la période 2008-2019. f) volumes sédimentaires disponibles sur les plages au cours de la période 2008-2019.

5.1.2. Profil G3 (Le Gurp, Anse du Gurp) pour Cellule 2

Le profil G3 est localisé dans la cellule 2. Il est le seul profil au sein de cette cellule relativement atypique et peu étendue. Il n'est ainsi pas possible de s'assurer de son caractère tout à fait représentatif des évolutions et des caractéristiques de l'ensemble de la cellule, comme c'est le cas pour les autres profils présentés. On peut constater, au cours de la période 2008-2019, deux tendances d'évolution du TDC

relativement différentes (Figure 16) : pour la période 2008-2014, on note une érosion progressive entre 2008 et 2013 (- 4 m) et l'érosion d'une dizaine de mètres pendant l'hiver 2013-2014 (- 8 m) ; pour la période suivante de 2014 à 2019, on note une accrétion progressive qui se traduit par une accumulation des volumes de sable au niveau de la plage et une avancée progressive de l'ensemble des références altimétriques. Au cours de cette période, le TDC a légèrement progressé de 4 m par rapport à son maximum de recul en 2014.

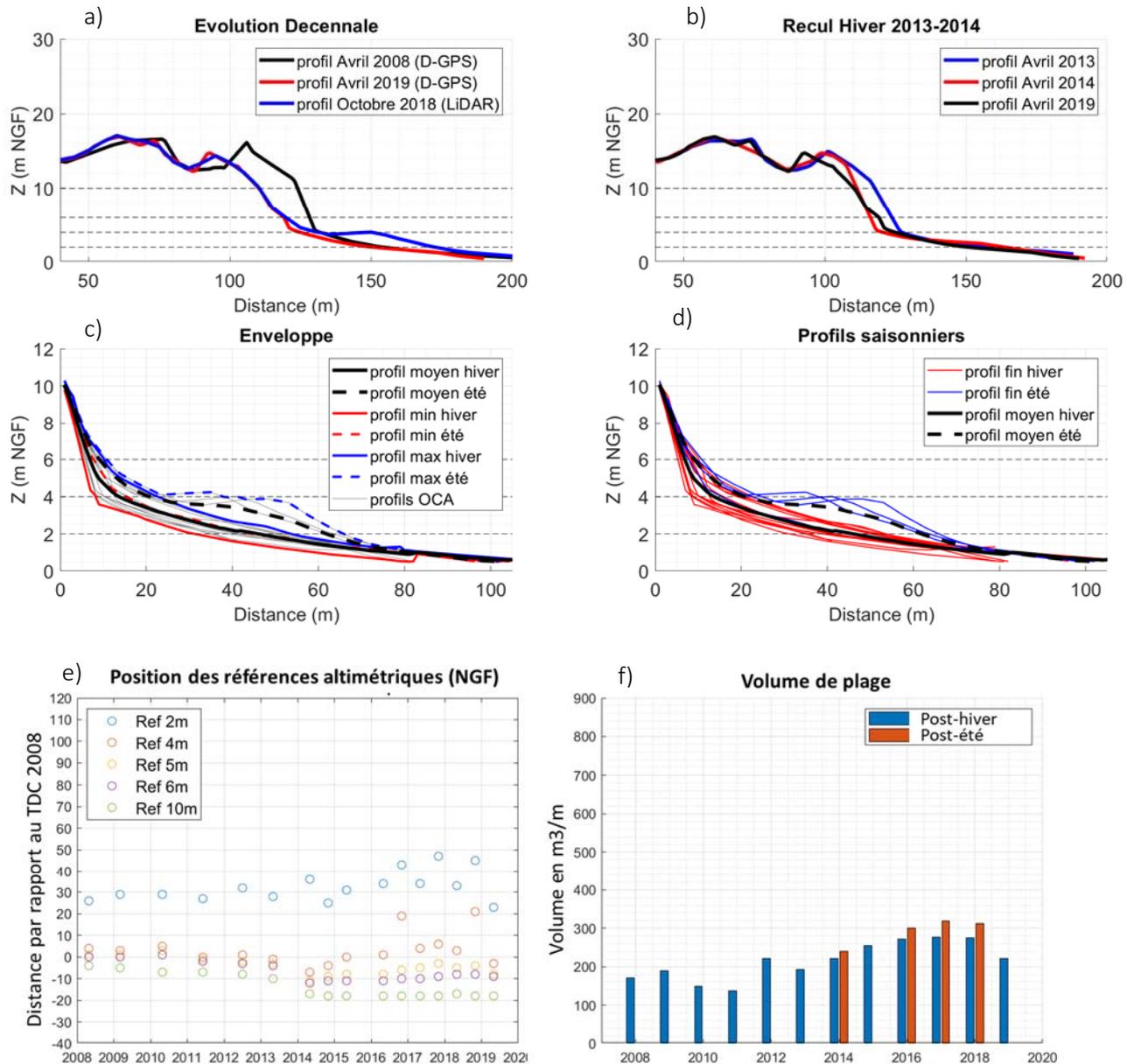


Figure 16 : Planche de synthèse des évolutions du profil G3 pour la période 2008-2019

a) évolution du profil sans recalage pour la période 2008-2019. b) impact de l'hiver 2013-2014. c) enveloppe de variabilité de la morphologie de la plage. d) profils post-hiver et post-été disponibles et constitutifs de l'enveloppe. e) distance horizontale entre le trait de côte 2008 (référence 6 m NGF) et les positions des différentes références altimétriques, pour la période 2008-2019. f) volumes sédimentaires disponibles sur les plages au cours de la période 2008-2019.

Les volumes sédimentaires, au niveau des plages, sont inférieurs à 300 m³/m, voire à 200 m³/m, certaines années et l'enveloppe de variabilité sédimentaire est limitée à 2,5 m d'épaisseur. A l'échelle saisonnière, on observe que des bermes estivales importantes (de l'ordre de 2 m de hauteur) se mettent en place. Les profils moyens estivaux et hivernaux sont donc contrastés et montrent une certaine disponibilité sédimentaire.

5.1.3. Profil G6 (Le Pin Sec, Nord Gironde) pour Cellule 3.2

Le profil G6, localisé au sein de la cellule 3.2, est représentatif des tendances d'évolution et des caractéristiques des profils de plage du secteur Nord Gironde. Ce secteur subit une érosion chronique depuis 2008, avec un recul de l'ordre de 10 m entre 2008 et 2019. Si on le compare au reste de la côte girondine, l'érosion lors de l'hiver 2013-2014 a été légèrement inférieure à celle des secteurs plus au sud, mais les capacités de reconstitution des plages sont également inférieures (Figure 17). Le TDC est globalement localisé à une position équivalente à celle post-hiver 2013-2014, même si on observe une relativement bonne disponibilité sédimentaire ces dernières années (depuis 2017). Les volumes de sable sont globalement inférieurs à 300 m³/m, en situation post-hivernale, et l'enveloppe de variabilité est comprise entre 3 m et 3,5 m d'épaisseur. On observe de fortes variations saisonnières avec la constitution de bermes de 1 à 2 m de hauteur.

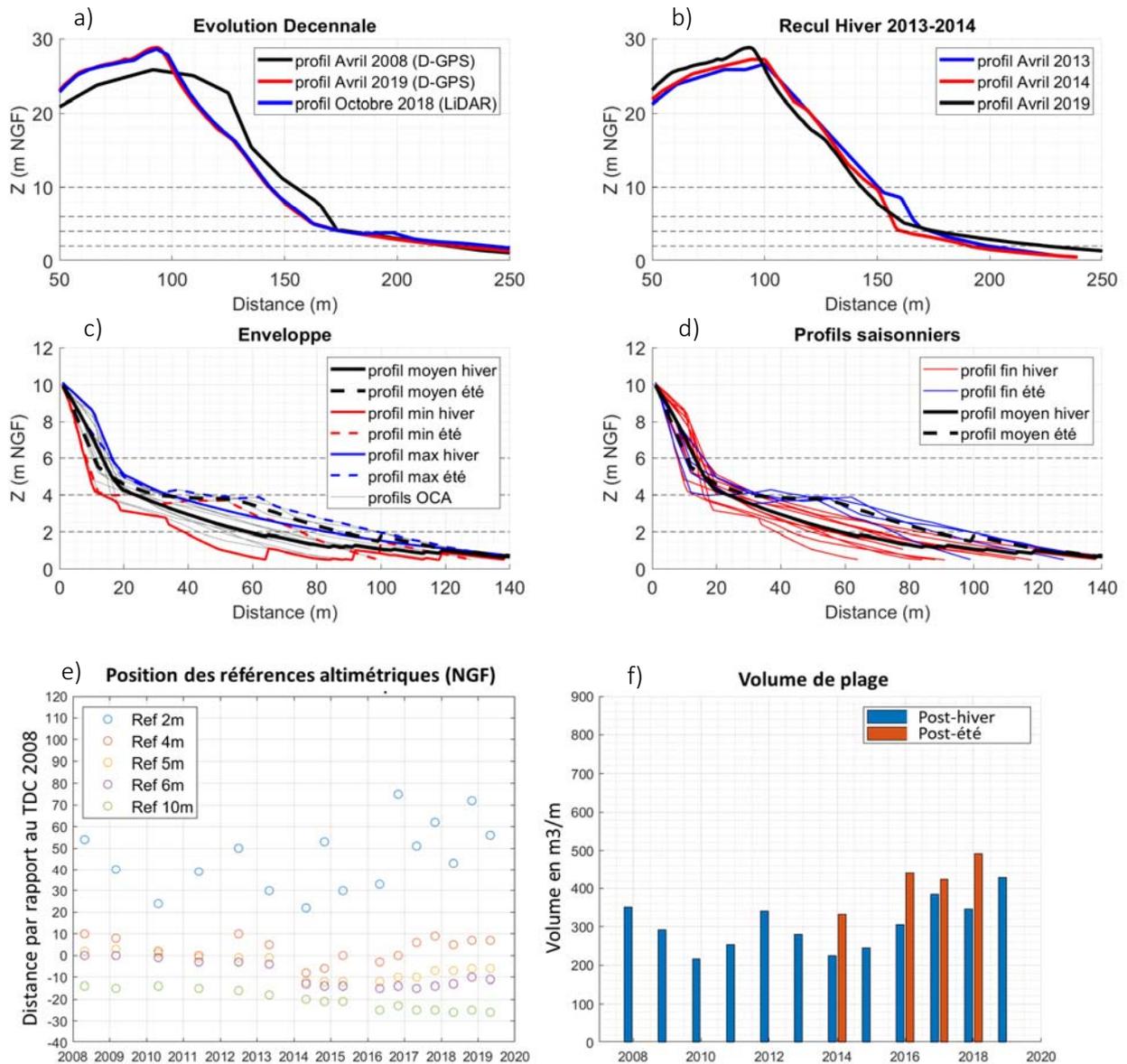


Figure 17 : Planche de synthèse des évolutions du profil G6 pour la période 2008-2019

a) évolution du profil sans recalage pour la période 2008-2019. b) impact de l'hiver 2013-2014. c) enveloppe de variabilité de la morphologie de la plage. d) profils post-hiver et post-été disponibles et constitutifs de l'enveloppe. e) distance horizontale entre le trait de côte 2008 (référence 6 m NGF) et les positions des différentes références altimétriques pour la période 2008-2019. f) volumes sédimentaires disponibles sur les plages au cours de la période 2008-2019.

5.1.4. Profil G11 (Lacanau Océan Nord, Centre Gironde) pour Cellule 3.3

Le profil G11, situé au nord de Lacanau, est globalement représentatif des situations observables au centre de la côte girondine (cellule 3.3). Le recul entre 2008 et 2019 y est de l'ordre de 10 m (ici 12 m) et l'impact de l'hiver 2013-2014 a été majeur avec des reculs observés de 25 m (ici 18 m). On note toutefois une bonne capacité de reconstruction des plages, se traduisant par la progression de l'ensemble des références altimétriques et notamment du TDC (+ 8 m depuis 2014).

En matière de volumes sédimentaires disponibles, ils sont en moyenne de 300 m³/m, en situation post hivernale, avec une forte capacité de rechargement estival, en moyenne de 90 m³/m. Les contrastes saisonniers sont nets avec la création des bermes saisonnières potentiellement bien développées en haut de plage (2 m de hauteur) (Figure 18). L'enveloppe de variabilité atteint un maximum de 3,5 m d'épaisseur en haut de plage.

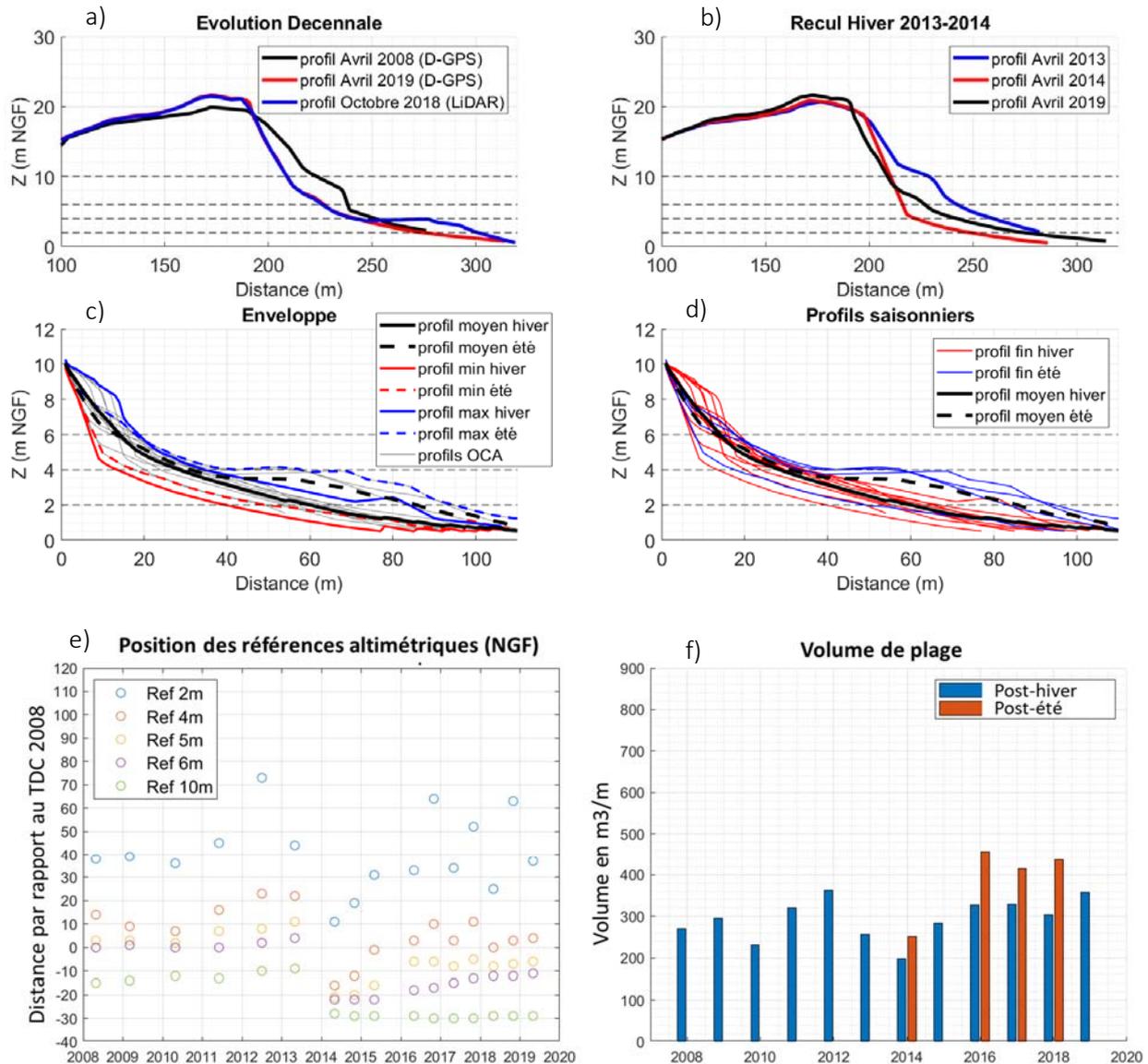


Figure 18 : Planche de synthèse des évolutions du profil G11 pour la période 2008-2019

a) évolution du profil sans recalage pour la période 2008-2019. b) impact de l'hiver 2013-2014. c) enveloppe de variabilité de la morphologie de la plage. d) profils post-hiver et post-été disponibles et constitutifs de l'enveloppe. e) distance horizontale entre le trait de côte 2008 (référence 6 m NGF) et les positions des différentes références altimétriques pour la période 2008-2019. f) volumes sédimentaires disponibles sur les plages au cours de la période 2008-2019.

5.1.5. Profil G15 (Grand Crohot, Sud Gironde) pour Cellule 3.5

Le profil G15 illustre bien la particularité de la sous-cellule 3.5. Ce secteur est relativement stable et ne présente pas de recul du trait de côte, pour la période 2008-2019. L'impact de l'hiver 2013-2014 y a cependant été majeur avec des reculs très importants (ici de 22 m). Toutefois, une reconstitution rapide du haut de plage permet de considérer ce bilan stable à l'échelle de la décennie.

L'enveloppe de variabilité est parmi les plus larges de l'ensemble du littoral, atteignant un maximum (H_{emax}) de 4,6 m. Les très forts contrastes saisonniers sont illustrés par la constitution de bermes massives lors de la période estivale (Figure 19). A part l'année 2014, les volumes sédimentaires y sont en moyenne supérieurs à 400 m³/m et les rechargements estivaux peuvent atteindre plus de 200 m³/m.

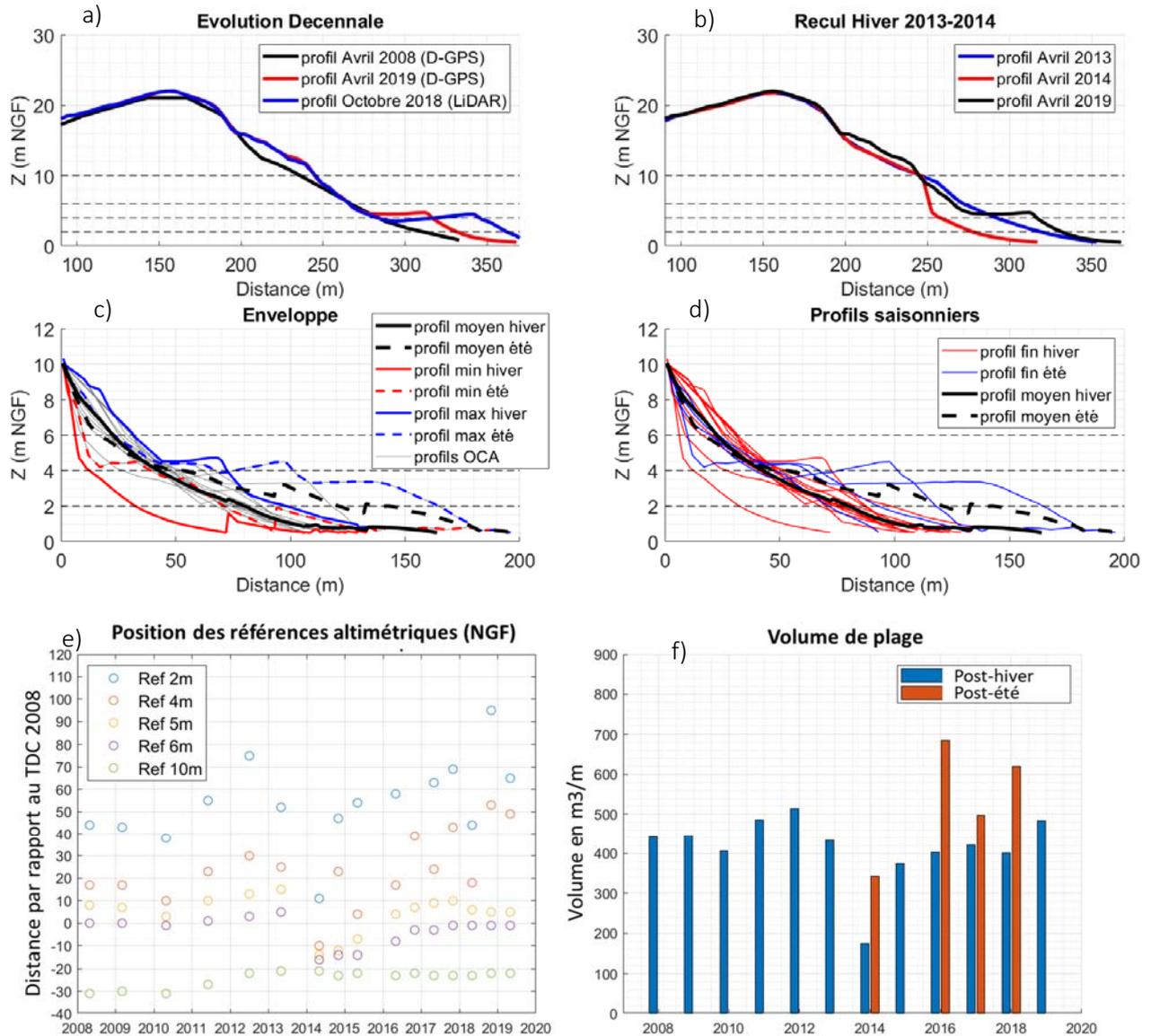


Figure 19 : Planche de synthèse des évolutions du profil G15 pour la période 2008-2019

a) évolution du profil sans recalage pour la période 2008-2019. b) impact de l'hiver 2013-2014. c) enveloppe de variabilité de la morphologie de la plage. d) profils post-hiver et post-été disponibles et constitutifs de l'enveloppe. e) distance horizontale entre le trait de côte 2008 (référence 6 m NGF) et les positions des différentes références altimétriques pour la période 2008-2019. f) volumes sédimentaires disponibles sur les plages au cours de la période 2008-2019.

5.1.6. Profil G18 (Le Cap Ferret, Pointe du Cap Ferret) pour Cellule 4.1

Le profil G18 illustre les dynamiques particulières de la pointe du Cap Ferret. L'ensemble des caractéristiques étudiées est atypique pour cette partie du littoral, du fait des dynamiques associées à la proximité des passes du bassin d'Arcachon (influence des courants de marée) et la très grande disponibilité sédimentaire à cette extrémité sud de la côte girondine. Ainsi, on observe un recul du trait de côte relativement faible pour la période 2008-2019 (- 5 m), mais qui ne reflète pas les très grandes variations de morphologie de l'interface plage-dune dans ce secteur, aux échelles de temps interannuelle et saisonnière (Figure 20). On constate en effet que l'ensemble des références altimétriques a connu de très fortes variations, liées au grand dynamisme des plages et du front de dune (déplacements éoliens). Comme caractéristique atypique, on peut ajouter l'impact de l'hiver 2013-2014, qui est quasiment nul à la sortie de l'hiver 2014. En revanche, les conséquences de l'hiver 2015-2016 (deuxième plus énergétique de la période étudiée, cf. Chapitre 6) sont spectaculaires, avec un recul du trait de côte de 40 m. La morphologie de l'ensemble de l'interface plage-dune est fortement modifiée, mais la capacité de récupération est forte, comme le montre la progression du TDC de 20 m entre 2016 et 2019. La dynamique locale est associée à la circulation de bancs de sable massifs en zone intertidale, voués à se transformer en crochons s'enroulant autour de l'extrémité de la pointe du Cap Ferret. Cette dynamique explique la disponibilité globalement massive, mais également la grande variabilité des volumes sédimentaires disponibles. L'enveloppe de variabilité est supérieure à 4,5 m et les volumes sédimentaires peuvent varier du simple au double (de 400 m³/m à plus de 800 m³/m) à l'échelle de temps interannuelle. Le mode de variabilité dominant des volumes de sable est donc interannuel. A l'échelle de temps saisonnière, les variations observées sont de l'ordre de 100 à 150 m³/m, ce qui est du même ordre de grandeur que pour le reste de la côte, excepté pour les cellules 3.4 et 3.5 où les variations de volumes sont supérieures et peuvent atteindre 200 m³/m.

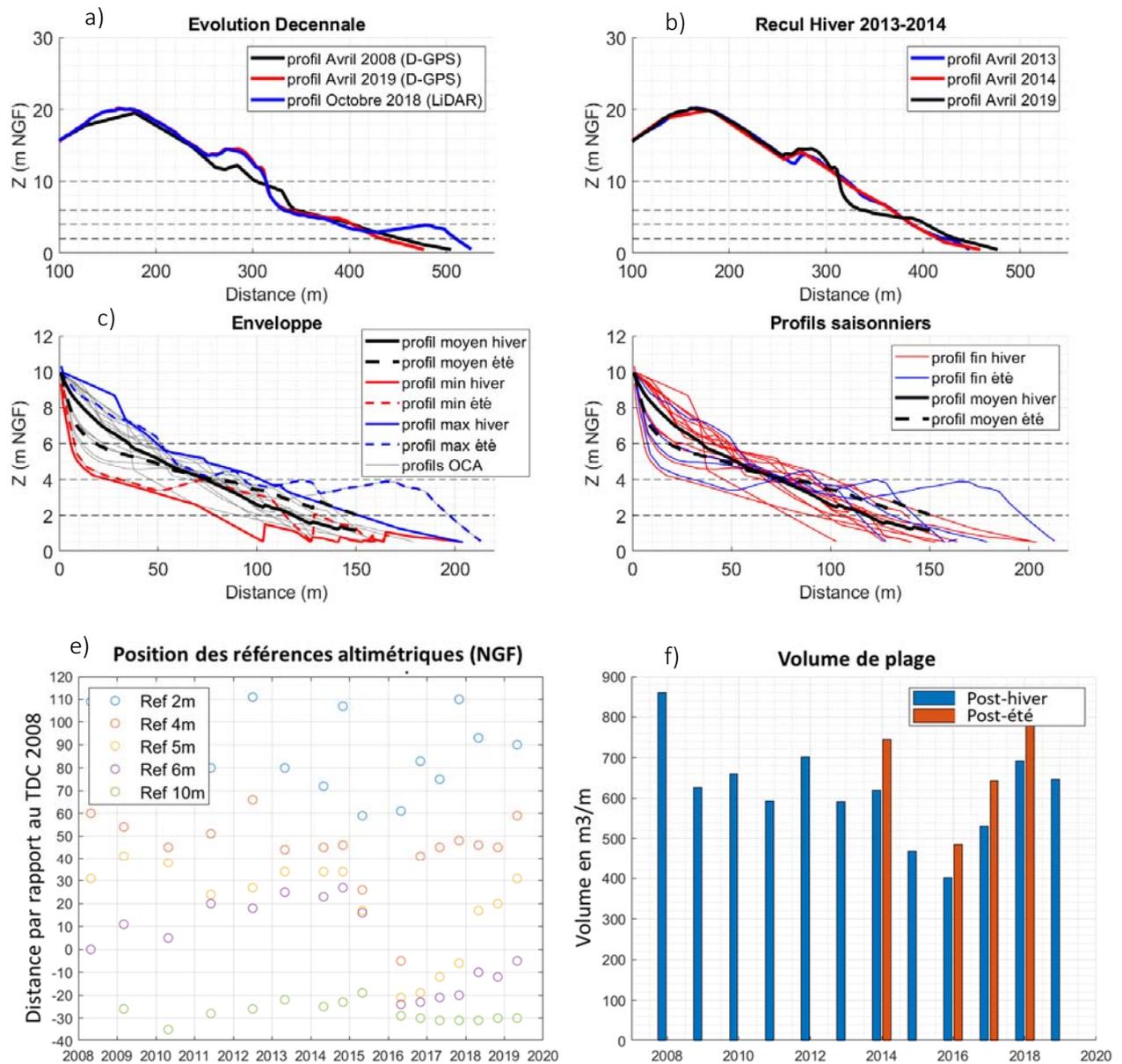


Figure 20 : Planche de synthèse des évolutions du profil G18 pour la période 2008-2019

a) évolution du profil sans recalage pour la période 2008-2019. b) impact de l'hiver 2013-2014. c) enveloppe de variabilité de la morphologie de la plage. d) profils post-hiver et post-été disponibles et constitutifs de l'enveloppe. e) distance horizontale entre le trait de côte 2008 (référence 6 m NGF) et les positions des différentes références altimétriques pour la période 2008-2019. f) volumes sédimentaires disponibles sur les plages au cours de la période 2008-2019.

5.1.7. Profil L3 (A.S.30, Nord Landes) pour Cellule 5.1

Le profil L3 au nord de la côte landaise est représentatif des caractéristiques et des évolutions de cette partie du littoral (sous-cellule 5.1). Le secteur est en léger recul au cours de la période 2008-2019 (pour ce profil, un recul du TDC de 3 m, Figure 21). Pour la période 2008-2013, on constate plutôt une avancée des différentes références d'altitude (e.g. avancée de 8 m du TDC), puis l'hiver 2013-2014 provoque un recul

du TDC de 11 m. Après 2014, la reconstruction est lente et ne permet pas en 2019 de retrouver une position équivalente à 2008.

Du point de vue des disponibilités sédimentaires, les volumes de plage peuvent varier significativement à l'échelle pluriannuelle entre 250 et 450 m³/m. Bien que l'on remarque des différences de volumes notables entre profils post-hiver et post-été, les rechargements estivaux sont en moyenne inférieurs à 100 m³/m et les bermes estivales parfois peu marquées. L'enveloppe de variabilité est importante, de l'ordre de 3 m à 3,5 m.

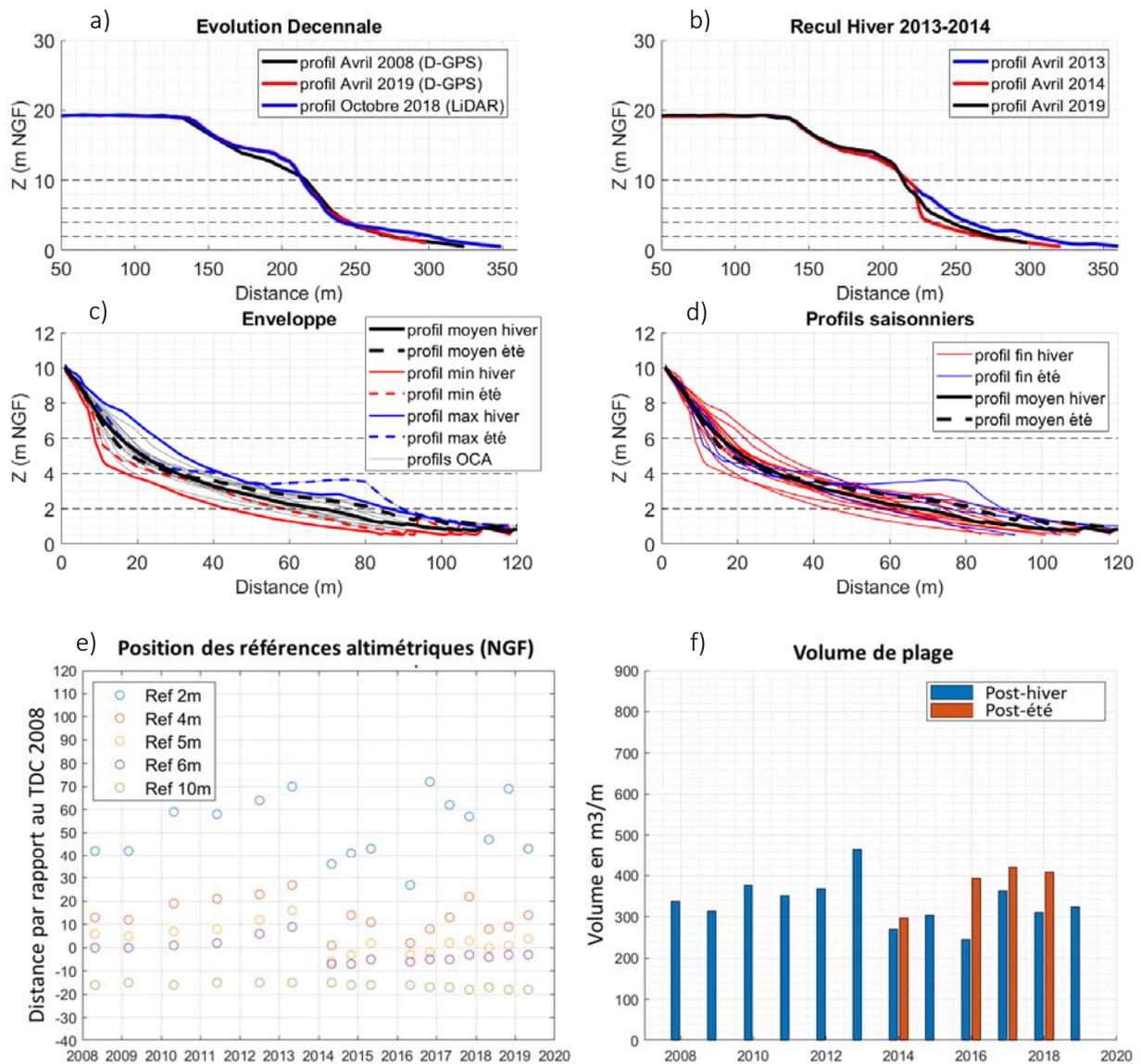


Figure 21 : Planche de synthèse des évolutions du profil L3 pour la période 2008-2019

a) évolution du profil sans recalage pour la période 2008-2019. b) impact de l'hiver 2013-2014. c) enveloppe de variabilité de la morphologie de la plage. d) profils post-hiver et post-été disponibles et constitutifs de l'enveloppe. e) distance horizontale entre le trait de côte 2008 (référence 6 m NGF) et les positions des différentes références altimétriques pour la période 2008-2019. f) volumes sédimentaires disponibles sur les plages au cours de la période 2008-2019.

5.1.8. Profil L6 (Mimizan Sud, Centre Landes) pour Cellule 5.2

Le profil L6, au centre de la côte landaise, est représentatif des caractéristiques et des évolutions de cette partie du littoral (sous-cellule 5.2). Le secteur est globalement stable ou en accrétion et ne présente pas de recul significatif du trait de côte pour la période 2008-2019 (ici une avancée du TDC de 9 m, cf. Figure 22). L'impact de l'hiver 2013-2014 a pu être important, mais une forte disponibilité en sédiments a permis une reconstruction rapide des plages (ici +12 m depuis 2014).

En matière de volumes sédimentaires disponibles, la situation la plus dégradée est celle de 2008-2009. Les volumes depuis 2010 sont compris entre 350 et 450 m³/m. L'enveloppe de variabilité est comprise entre 3,5 et 4 m d'épaisseur, illustrant cette grande disponibilité en sédiments. Toutefois, la variabilité saisonnière (rechargement estival) est assez faible : en moyenne de l'ordre de 50 m³/m. Les contrastes saisonniers sont peu nets, les bermes de haut de plage n'étant pas toujours démantelées lors de la période hivernale.

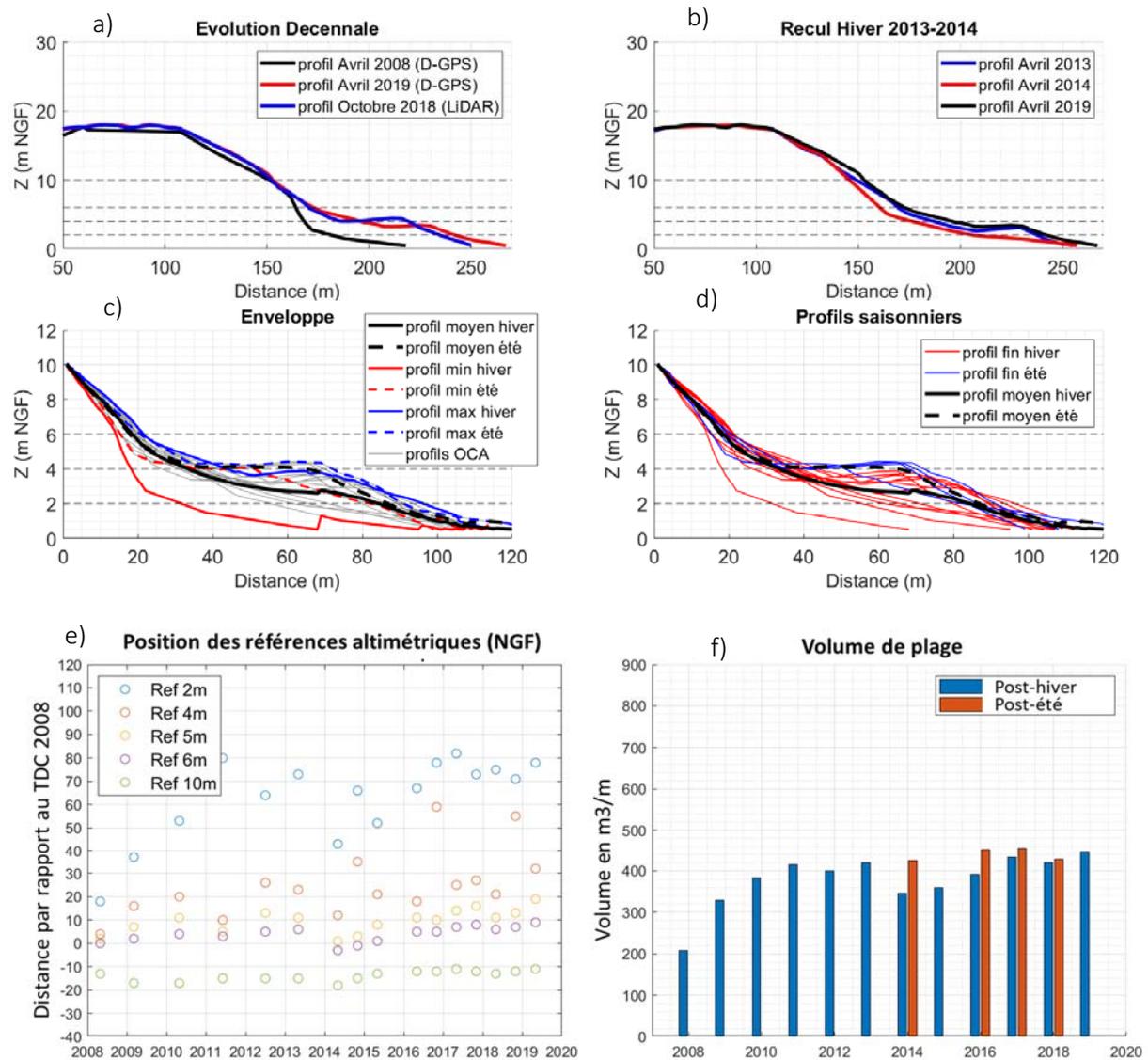


Figure 22 : Planche de synthèse des évolutions du profil L6 pour la période 2008-2019

a) évolution du profil sans recalage pour la période 2008-2019. b) impact de l'hiver 2013-2014. c) enveloppe de variabilité de la morphologie de la plage. d) profils post-hiver et post-été disponibles et constitutifs de l'enveloppe. e) distance horizontale entre le trait de côte 2008 (référence 6 m NGF) et les positions des différentes références altimétriques pour la période 2008-2019. f) volumes sédimentaires disponibles sur les plages au cours de la période 2008-2019.

5.1.9. Profil L14 (Soustons-Plage, Sud Landes) pour Cellule 5.3

Le profil L14, situé au sud de la côte landaise, est représentatif des caractéristiques et des évolutions de la sous-cellule 5.3. Le secteur est globalement stable ou en faible recul pour la période 2008-2019 (ici un recul du TDC de 4 m, cf. Figure 23). L'impact de l'hiver 2013-2014 a pu être très important (ici -13m), mais la disponibilité en sédiments a permis une reconstruction rapide et ce bilan globalement stable.

La disponibilité sédimentaire est nettement plus importante depuis 2015 où elle s'établit au-dessus de 400 m³/m, alors qu'elle était plutôt comprise entre 250 et 350 m³/m au cours de la période 2008-2014. L'enveloppe de variabilité est importante et peut atteindre 4 m. Enfin les contrastes saisonniers sont

relativement faibles au regard de la disponibilité sédimentaire. Le rechargement estival est en moyenne ici de l'ordre de $70 \text{ m}^3/\text{m}$ et les bermes estivales peuvent persister lors de la saison hivernale en haut de plage.

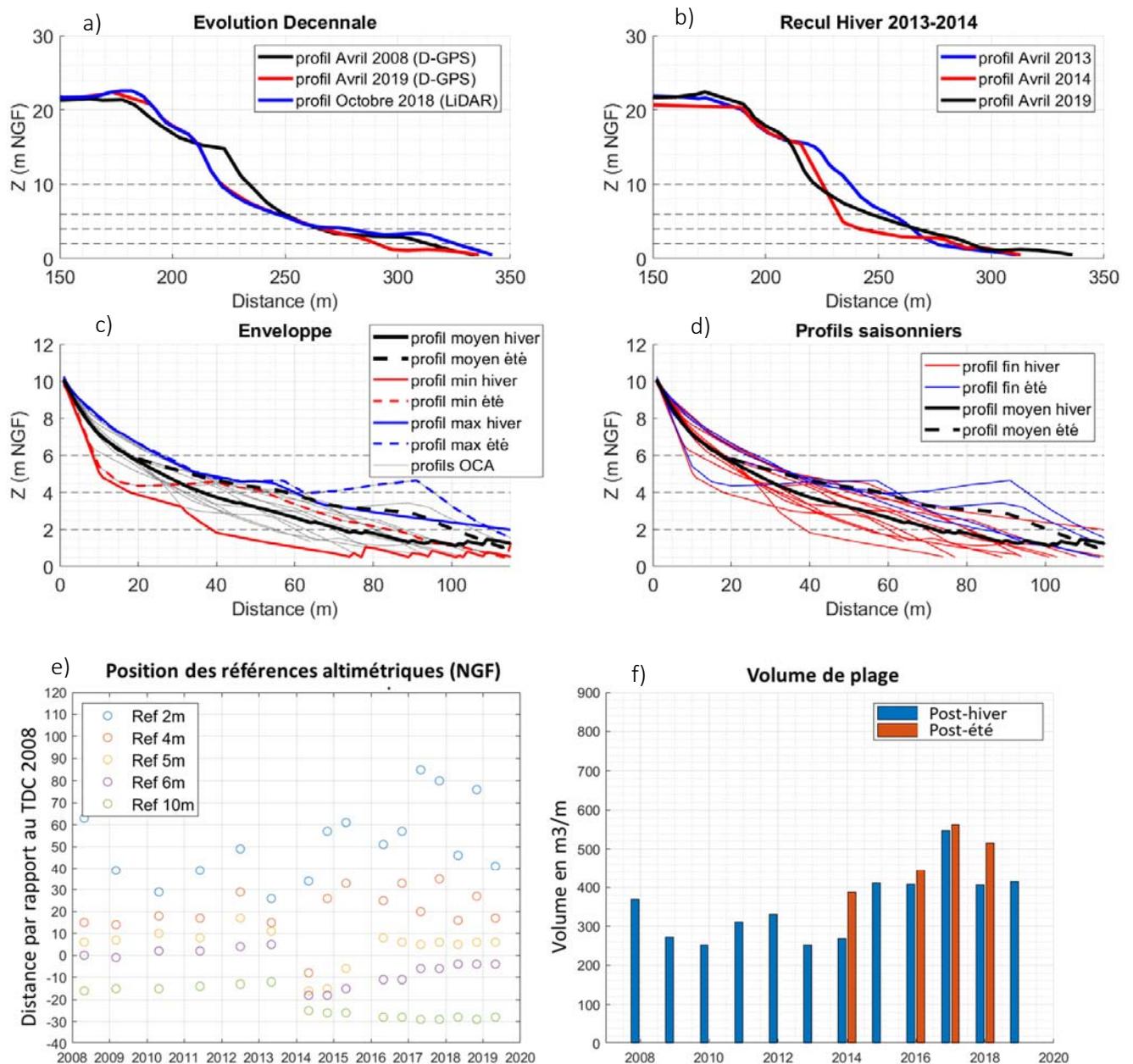


Figure 23 : Planche de synthèse des évolutions du profil L14 pour la période 2008-2019

a) évolution du profil sans recalage pour la période 2008-2019. b) impact de l'hiver 2013-2014. c) enveloppe de variabilité de la morphologie de la plage. d) profils post-hiver et post-été disponibles et constitutifs de l'enveloppe. e) distance horizontale entre le trait de côte 2008 (référence 6 m NGF) et les positions des différentes références altimétriques pour la période 2008-2019. f) volumes sédimentaires disponibles sur les plages au cours de la période 2008-2019.

5.1.10. Profil L18 (La Chapelle, Sud Landes) pour Cellule 6

Le profil L18 illustre bien les caractéristiques particulières et les évolutions de la partie sud des Landes (cellule 6). Les plages y sont nettement plus pentues que sur le reste de la côte, constituées d'une succession de bermes, et le cordon dunaire y est nettement plus bas et étroit. L'évolution du profil autour de la position du trait de côte peut être importante ; ici, pour la période 2008-2019, il est globalement stable, mais la référence altimétrique de 6 m NGF utilisée pour le caractériser (cf. §3.2) est discutable car le trait de côte peut, dans ce secteur, se situer nettement plus haut (au-delà de 7 m NGF). L'impact de l'hiver 2013-2014 y a été relativement modéré avec des reculs du trait de côte de quelques mètres (Figure 24).

Le décaissement de l'estran comme l'installation de bermes peut entraîner des différences de morphologie et d'épaisseur de sédiments très importantes atteignant ici 5,6 m au niveau du haut de plage. Les contrastes saisonniers sont peu marqués et des bermes peuvent être observées même en situation post-hivernale. Enfin les volumes de plage sont très importants, compris ici entre 370 et 650 m³/m, notamment du fait d'une plage très pentue au profil bombé.

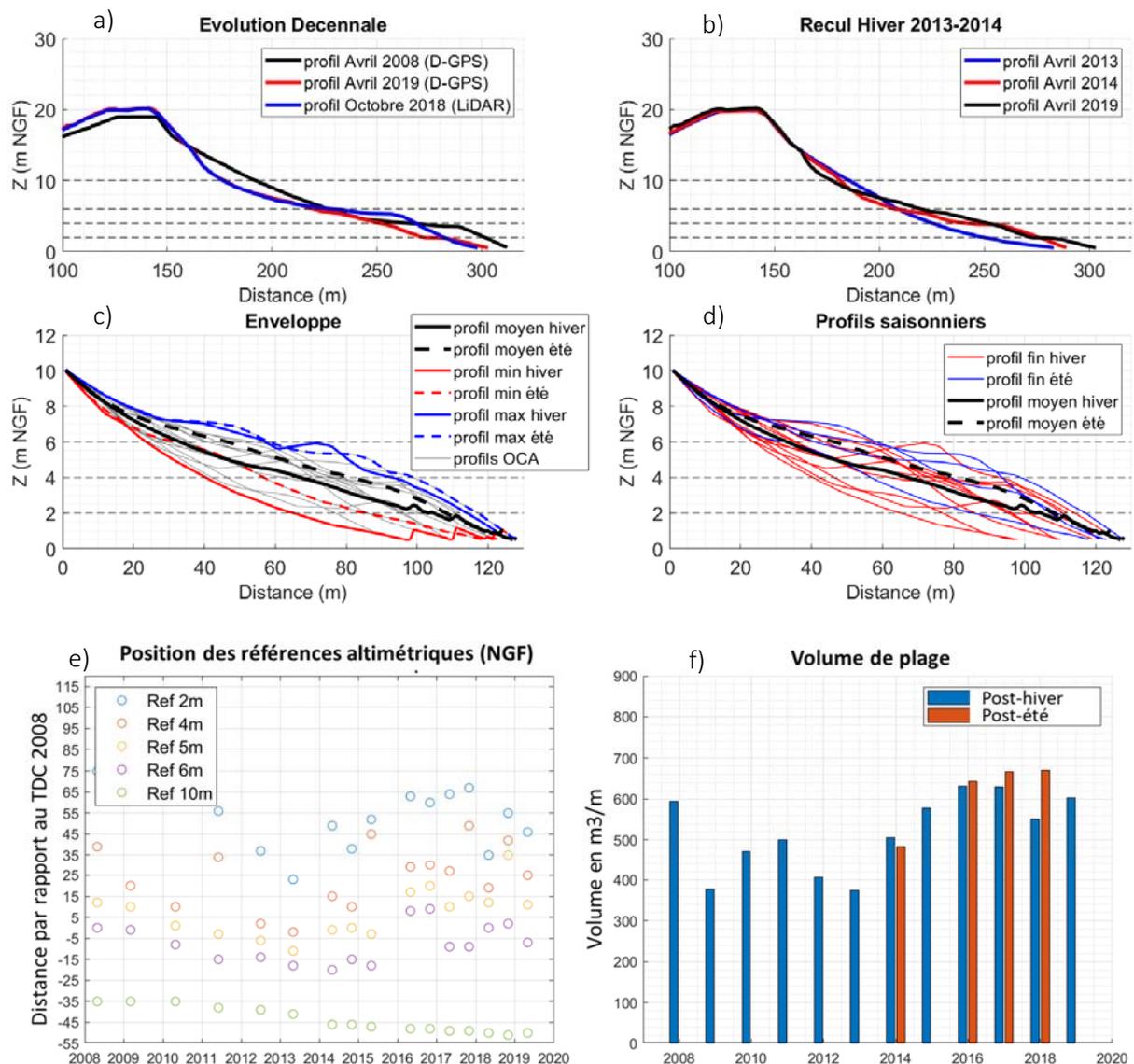


Figure 24 : Planche de synthèse des évolutions du profil L18 pour la période 2008-2019

a) évolution du profil sans recalage pour la période 2008-2019. b) impact de l'hiver 2013-2014. c) enveloppe de variabilité de la morphologie de la plage. d) profils post-hiver et post-été disponibles et constitutifs de l'enveloppe. e) distance horizontale entre le trait de côte 2008 (référence 6 m NGF) et les positions des différentes références altimétriques pour la période 2008-2019. f) volumes sédimentaires disponibles sur les plages au cours de la période 2008-2019.

5.2. SYNTHÈSE DES TENDANCES D'ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE ET DES CAPACITÉS DE RECONSTRUCTION PLURIANNUELLE ET SAISONNIÈRE PAR CELLULE ET SOUS-CELLULE HYDRO-SEDIMENTAIRE

Cette section présente une synthèse des évolutions des caractéristiques générales (Tableau 6) et des références altimétriques (Figure 25 et Figure 26) par cellule et, lorsque c'est pertinent, par sous-cellule (nombre de profils et tendance d'évolution). On propose ainsi une quantification des contrastes

observables à l'échelle du littoral, tant d'un point de vue de l'érosion à moyen terme (période de 11 ans) que sur les capacités de récupération des systèmes plages-dunes après un hiver exceptionnel (2013-2014). Cette analyse est également illustrée pour les dynamiques saisonnières pour la période 2014-2019 (Figure 26).

Segment de côte	Tendance d'évolution du TDC au cours de la dernière décennie	Capacité de recharge pluriannuelle (2 à 3 ans)	Capacité de recharge estival	Morphologie estivale
Cellule 1	Forte érosion chronique (≈ 10 m/an)	Absente ou Faible (< 30 m ³ /m)	Faible (max ≈ 70 m ³ /m ; moy ≈ 30 m ³ /m)	Légère berme/non systématique
Cellule 2 et Cellules 3.1 et 3.2	Erosion chronique ($\approx 1-2$ m/an)	Faible (max ≈ 50 m ³ /m ; moy ≈ 5 m ³ /m)	Notable (max ≈ 70 m ³ /m ; moy ≈ 50 m ³ /m)	Légère berme quasi systématique
Cellules 3.3, 4.1, 5.1	Erosion chronique (≈ 1 m/an)	Notable (max ≈ 110 m ³ /m ; moy ≈ 5 m ³ /m)	Important (max ≈ 140 m ³ /m ; moy ≈ 90 m ³ /m)	Berme systématique
Cellules 3.4, 3.5, 5.3	Stable ($-0,5$ m/an à $+0,5$ m/an)	Importante (max ≈ 100 m ³ /m ; moy ≈ 20 m ³ /m)	Très important (max ≈ 160 m ³ /m ; moy ≈ 90 m ³ /m)	Berme systématique
Cellule 6	Très contrastée mais stable en moyenne	Importante (max ≈ 100 m ³ /m ; moy ≈ 20 m ³ /m)	Faible (max ≈ 60 m ³ /m ; moy ≈ 10 m ³ /m)	Bermes superposées
Cellule 5.2	En accrétion ($\geq 0,5$ m/an)	Importante (max ≈ 80 m ³ /m ; moy ≈ 20 m ³ /m)	Important (max ≈ 100 m ³ /m ; moy ≈ 50 m ³ /m)	Berme systématique

Tableau 6 : Synthèse des caractéristiques et des évolutions observées des systèmes plage-dune par cellule et sous-cellule hydro-sédimentaires

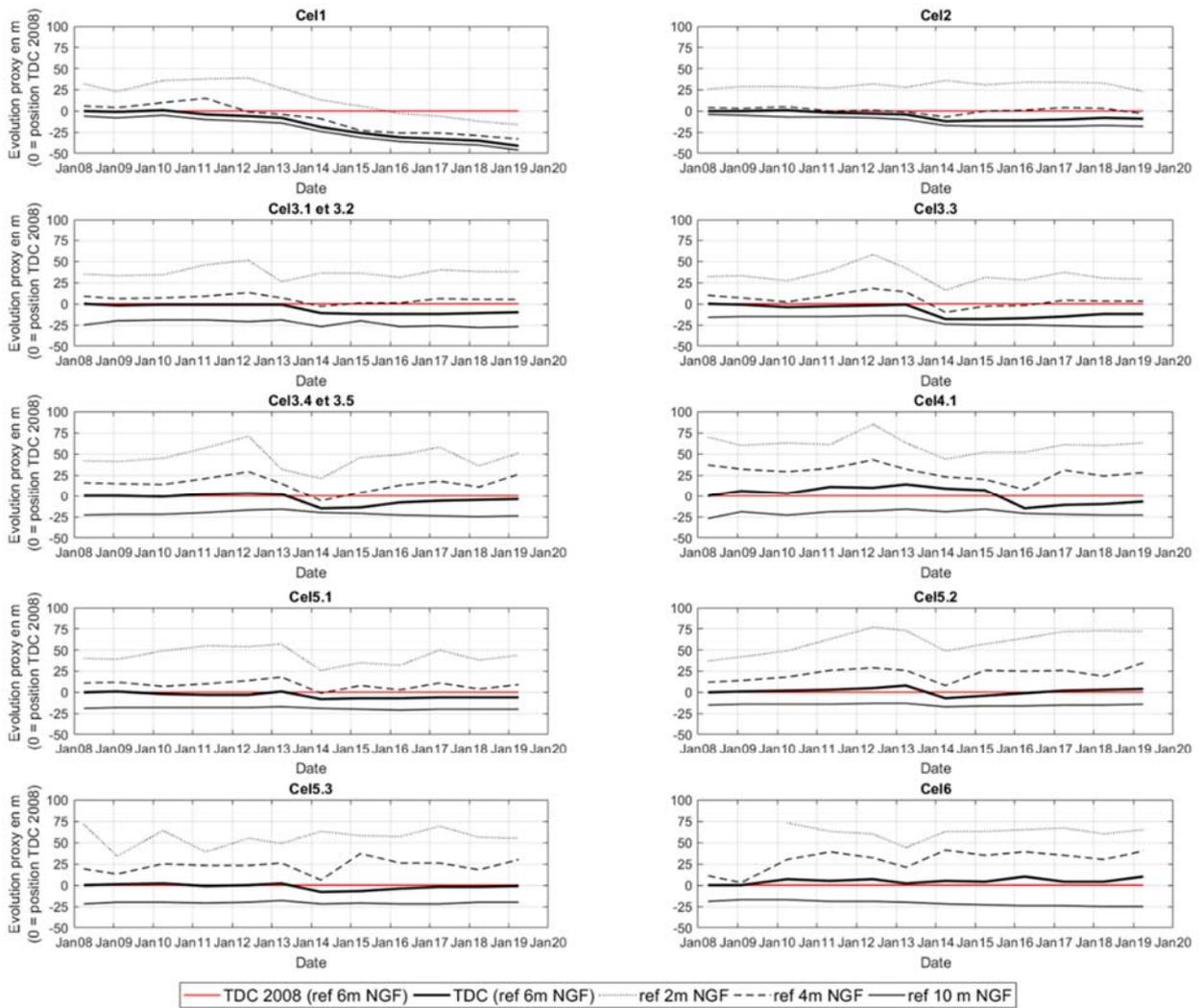


Figure 25 : Evolution temporelle de la distance horizontale entre la position du trait de côte (6 m NGF) et les références altimétriques 2, 4, 10 m NGF à la sortie de l'hiver (a référence est la position du trait de côte en **avril 2008**, symbolisée par le trait rouge)

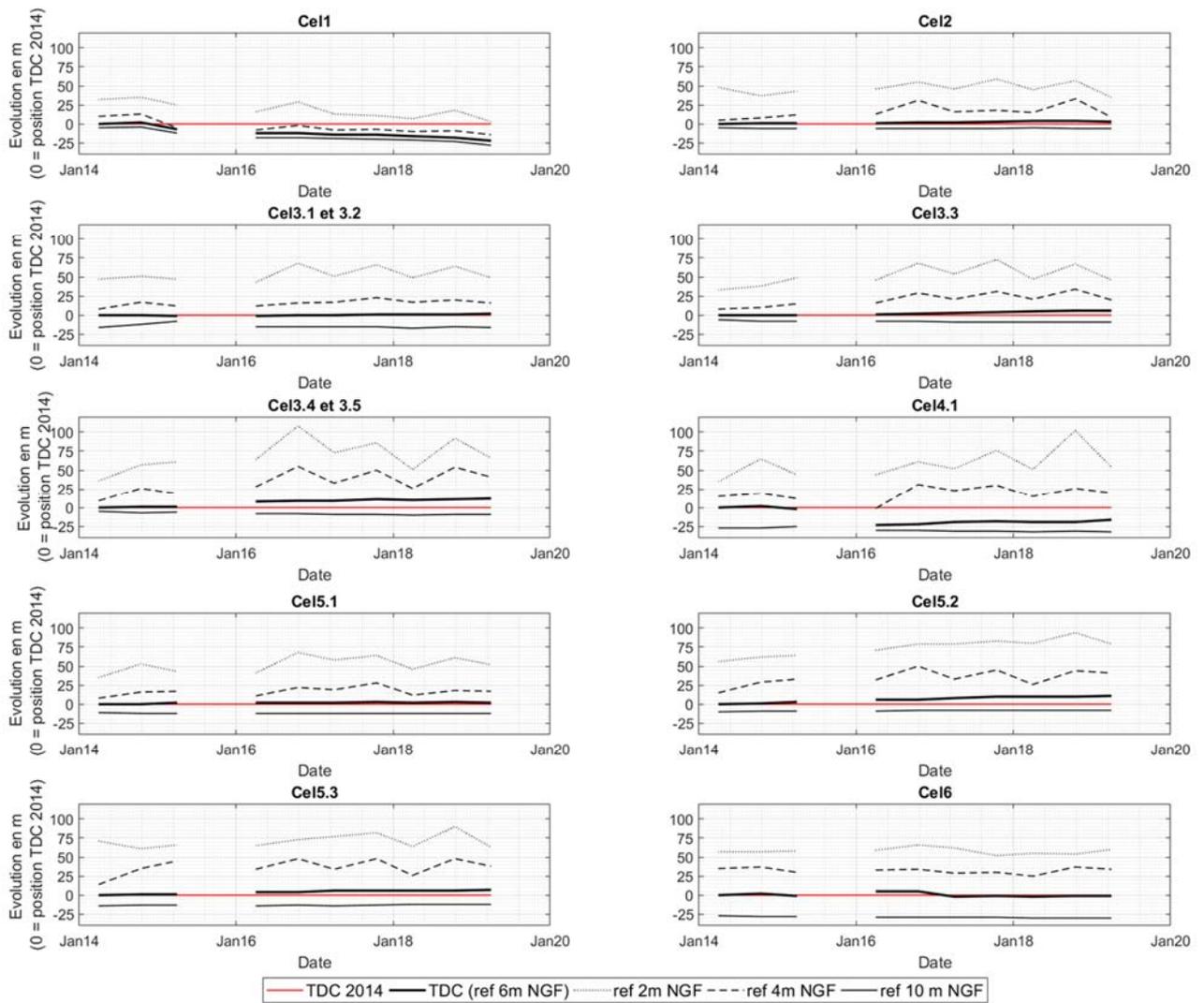


Figure 26 : Evolution temporelle de la distance horizontale entre la position du trait de côte (6 m NGF) et les références altimétriques 2, 4, 10 m NGF à l'échelle saisonnière (a référence est la position du trait de côte en **avril 2014**, symbolisée par le trait rouge)

6. Discussion sur l'évolution du littoral sableux aquitain pour la période 2008-2019

Les chapitres précédents ont présenté les évolutions spatio-temporelles des descripteurs par grand ensemble, cellule, sous-cellule et pour 10 profils représentatifs du littoral. On se propose à présent d'analyser les relations entre la disponibilité sédimentaire et l'évolution du trait de côte, le long du littoral sableux, puis entre l'évolution du trait de côte, la disponibilité sédimentaire et la variation des forçages marins au cours de la dernière décennie.

6.1. RELATION ENTRE DISPONIBILITE SEDIMENTAIRE ET EVOLUTION DU TRAIT DE COTE

Le facteur premier des différences d'évolution entre les côtes girondine et landaise, corroboré par l'ensemble des descripteurs analysés dans cette étude (en particulier volume, largeur et épaisseur), est la disponibilité sédimentaire au sein du système "plage". L'analyse des différents descripteurs montre que la disponibilité sédimentaire suit globalement le même gradient que celui des évolutions du trait de côte pour la période étudiée : le recul du trait de côte est plus important là où les volumes sont les plus faibles et inversement, il est plus stable, voire progresse, là où les volumes sont les plus importants. Cette relation, qui peut paraître intuitive, n'est vraie, à l'échelle de l'ensemble de la côte, que du fait des caractéristiques particulières de la côte aquitaine :

- le littoral est quasi uniformément exposé aux forçages météo marins ;
- le littoral est quasi continu (excepté les passes du bassin d'Arcachon et les courants landais) permettant un transfert des sédiments le long de l'ensemble de la côte ;
- la dérive littorale et les mouvements sédimentaires y est donc continu, de direction homogène et peu perturbée par les courants de marée (excepté au niveau des passes du bassin d'Arcachon) ;
- les sédiments ne sont pas limités dans leur mobilité du fait de l'absence de contrainte géologique (e.g. cap ou platier rocheux) et de l'emprise relativement faible des secteurs artificialisés.

Ainsi, la Figure 27 montre une corrélation significative entre volume de plage et évolution du trait de côte pour la période. La relation linéaire est équivalente si l'on considère la moyenne des volumes post-hiver pour la période 2008-2019 ($R^2 = 0,61$; $RMSE = 9,5 \text{ m}^3/\text{m}$) ou la moyenne des volumes saisonniers au cours de la période 2014-2019 ($R^2 = 0,62$; $RMSE = 9,2 \text{ m}^3/\text{m}$). Une relation logarithmique permet d'améliorer le résultat avec $R^2 = 0,76$ et $0,75$ respectivement, tout en prenant en compte le fait que la relation entre volume et recul du trait de côte ne peut physiquement pas être linéaire pour les plus faibles valeurs de volume.

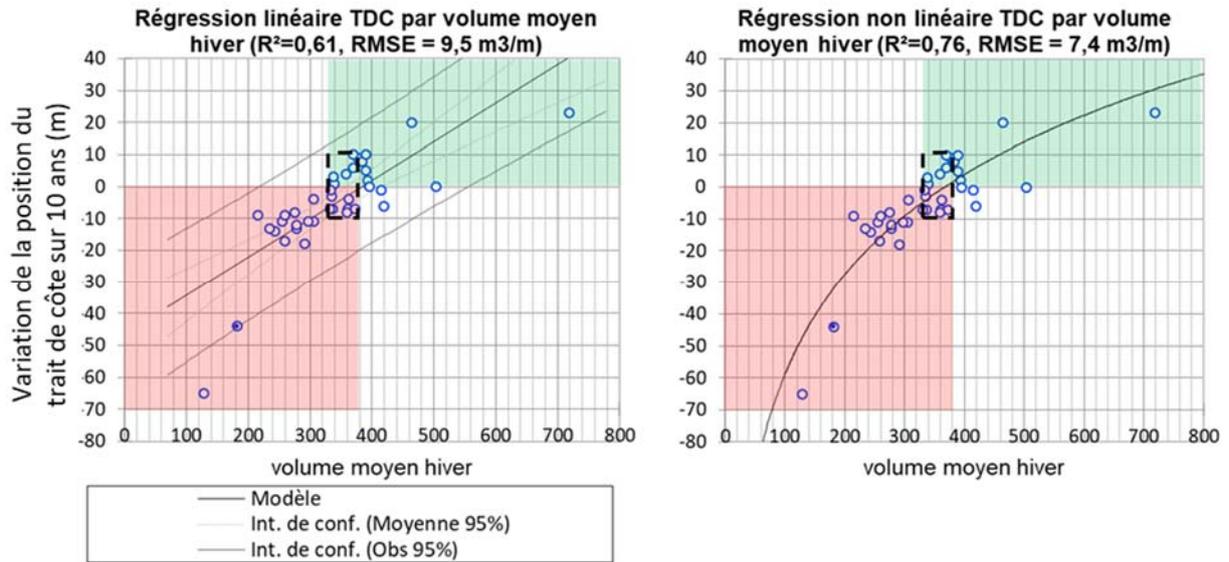


Figure 27 : Relation entre évolution du trait de côte et volume sédimentaire, régression linéaire (à gauche) et logarithmique (à droite). La zone verte souligne les profils présentant une situation stable ou en accrétion pour la période 2008-2019 ; la zone rouge, les profils en érosion. Enfin la zone encadrée par des tirets noirs souligne la forte dispersion pour des valeurs comprises entre 330 et 380 m³/m où les profils présentent des valeurs de recul ou d'avancée de l'ordre de ± 1m/an au cours de la période 2008-2019.

Selon les deux modèles calculés et au regard des évolutions pour la période 2008-2019, la disponibilité sédimentaire suffisante pour observer un trait de côte stable est comprise entre 370 et 380 m³/m (valeur moyenne interannuelle sur 11 ans en situation post-hivernale). On observe toutefois une assez grande dispersion des évolutions du trait de côte pour des volumes compris entre 330 et 380 m³/m (zone encadrée par des tirets noirs sur la Figure 27). Pour ces valeurs de volume moyen, les tendances et les évolutions de la position du trait de côte sont comprises entre ± 10 m. On note qu'aucun profil, présentant une situation stable ou en accrétion dans la période, ne présente des valeurs de volume moyen post-hiver inférieures à 330 m³/m (zone verte, Figure 27). A l'inverse, on n'observe aucun site où le trait de côte est stable pour des volumes en dessous de 330 m³/m et pour des valeurs inférieures à 300 m³/m, les reculs constatés sont de l'ordre de 10 m ou plus (zone rouge, Figure 27).

6.2. RELATION ENTRE EVOLUTIONS DES PLAGES ET CONDITIONS DE FORÇAGE

Comme on a pu le voir dans la section précédente, la corrélation entre volumes sédimentaires disponibles sur les plages et évolution du trait de côte est significative. La plus faible disponibilité des sédiments sur la côte girondine est liée à la fois à un déficit en apports exogènes (apports en sable depuis l'estuaire de la Gironde étant considérés comme quasi-nuls de nos jours) et la dominante de transport associée à la dérive littorale le long de la côte (dominante nord-sud des cellules 2 à 6, Idier et al., 2013) qui entraînent, à long terme, l'accentuation des différences d'évolutions entre le nord (déficit chronique marqué) et le sud de la côte sableuse aquitaine (relative stabilité). Alors que la côte landaise montre d'une part des comportements plus homogènes le long de la côte et d'autre part des évolutions temporelles moins marquées, la côte girondine concentre les situations les plus contrastées (secteurs en très forte érosion, secteurs où les descripteurs présentent leurs valeurs extrêmes et où les variations interannuelles et saisonnières sont maximales, plus forte réactivité aux hivers les plus énergétiques et rythme rapide de récupération partielle).

On peut également supposer que les comportements contrastés entre les côtes girondine et landaise puissent être imputés (en partie au moins) à une différence d'exposition aux conditions de tempêtes en hiver (Figure 28). Toutefois, l'analyse des niveaux d'eau atteints sur les plages (Nicolae Lerma et al., 2019a)

et de la différence de l'énergie libérée par les évènements successifs de l'hiver (Figure 28) ne permet pas de justifier l'intensité significativement plus forte de l'érosion des plages sur la côte girondine par rapport à la côte landaise. Pour illustrer cela, on peut d'abord observer la Figure 28 où l'énergie cumulée moyenne au large pour les unités géographiques "Gironde" et "Landes" est calculée en établissant la moyenne pour 5 points en Gironde et 5 points dans les Landes, positionnés le long de la côte, sur l'isobathe 50 m. On constate que l'énergie moyenne est inférieure de 18 % en moyenne dans les Landes par rapport à la Gironde, toutefois, cette différence ne semble pas être de nature à expliquer les différences d'évolution observées.

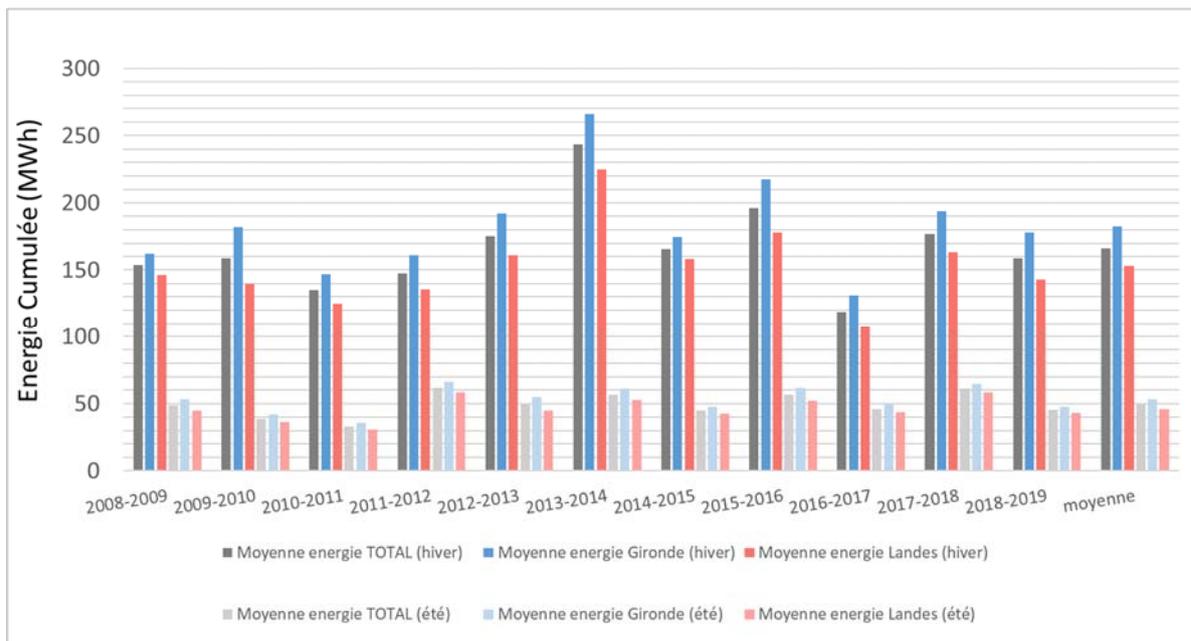


Figure 28 : Energie cumulée saisonnière par année, depuis 2008, pour la côte aquitaine. Valeurs moyennes établies à partir des séries temporelles pour 5 points en Gironde et 5 points dans les Landes, positionnés le long de la côte sur l'isobathe 50 m. Données horaires issues de la plateforme MARC (Modelling and Analysis for Research in Coastal environment) www.umr-lops.org/marc

Ceci est corroboré par la relation peu significative lorsque l'on compare l'énergie cumulée pour l'année entière ou pour la période hivernale, avec les évolutions des références altimétriques ou les volumes moyens disponibles sur les plages. Dans ces cas, les valeurs de coefficient de détermination sont inférieures à $R^2 = 0,3$, ce qui est considéré comme non significatif. La corrélation est plus importante lorsque l'énergie cumulée des conditions de houle, date à date, est mise en relation avec la différence des volumes moyens, date à date, pour l'ensemble de la côte (ces volumes représentent la différence en moyenne de quantité de sédiments positionnés sur le haut de plage). Dans ce cas, le coefficient de détermination est de $R^2 = 0,42$ avec toutefois une grande dispersion, et elle est réduite à $R^2 = 0,41$ lorsque que l'on considère les volumes moyens uniquement en Gironde et à $R^2 = 0,20$ pour les Landes (Figure 29).

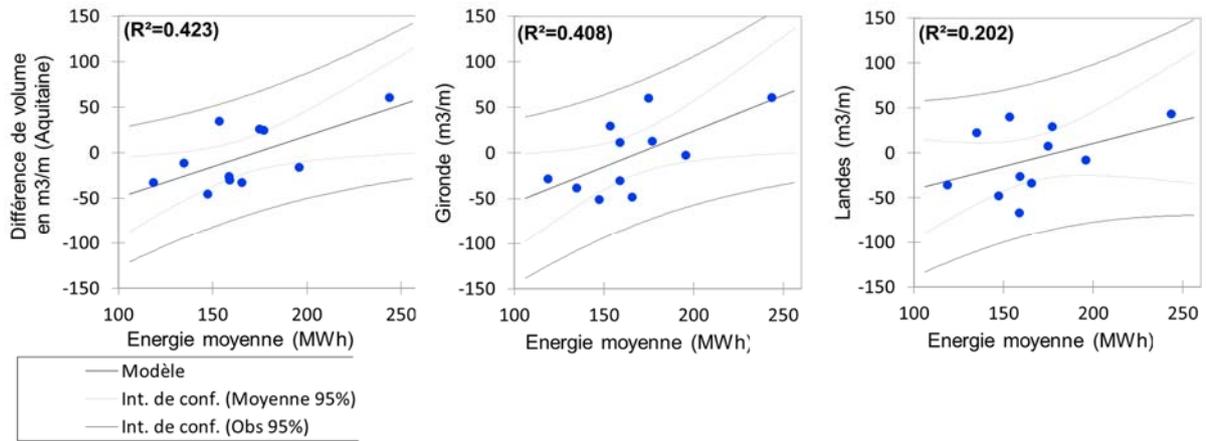


Figure 29 : Relation entre énergie cumulée pour la période hivernale et variation annuelle du volume de sable sur la plage (différence date à date des volumes sédimentaires sur les plages). A gauche : moyennes pour l'ensemble de la côte ; au centre : moyennes pour la cote girondine ; à droite : moyennes pour côte landaise.

Bien qu'il semble évident que les conditions de forçage jouent un rôle fondamental dans les évolutions interannuelles des volumes de plage ou dans l'évolution de la position du trait de côte, la relation ne peut être établie simplement pour deux raisons principales.

La première est que, lors d'un évènement, des vagues de même énergie peuvent avoir une action constructive (apport de sédiments sur la plage) ou destructrice (érosion de la plage). Le bilan à l'échelle d'un évènement dépend de la situation morphologique de la plage, de celle des petits fonds, mais est également fonction des hauteurs d'eau ou de la concomitance du pic d'énergie des vagues avec la marée haute par exemple. L'impact d'un évènement ne peut être déterminé uniquement en considérant l'énergie cumulée de la houle lors de l'évènement.

La seconde est la notion d'équilibre morphodynamique et « l'effet mémoire » des plages. Ainsi, lors d'un évènement énergétique, une situation où les stocks de sable en haut de plage sont importants est propice à ce que l'érosion (en volume) de la plage soit importante. A énergie égale, plus une plage est chargée en sédiments, plus la capacité d'érosion relative est forte. La forme du profil de la plage tendra plus rapidement vers une situation d'équilibre relative à l'énergie libérée par la tempête. C'est par exemple le cas de l'hiver 2012-2013, où les plages étaient particulièrement riches en sable en fin d'été 2012 et ont connu une forte érosion alors que l'hiver a présenté des conditions énergétiques moyennes.

A l'inverse, lorsque le déficit sédimentaire est très important suite à un hiver très érosif car extrêmement énergétique (e.g. 2013-2014), on observe que les années suivantes, la tendance globale semble être au stockage de sable sur les plages permettant de revenir à une position d'équilibre et ce, malgré des saisons hivernales très énergétiques (comme ce fut le cas en 2015-2016, deuxième hiver plus énergétique de la période).

Une fois la situation d'équilibre rétablie, un nouvel hiver modérément énergétique pourra conduire à des érosions significatives, comme lors de l'hiver 2017-2018.

La connaissance de la disponibilité sédimentaire des plages à l'entrée de l'hiver, mise en relation avec la tendance associée à l'impact des hivers précédents (stabilité sur plusieurs années, forte disponibilité, tendance à la reconstruction...) est donc fondamentale pour apprécier le risque d'érosion durant l'hiver, et ce, au moins autant que les conditions météo-marines de l'hiver. Il est donc nécessaire de poursuivre les efforts de mesures saisonnières (via les acquisitions LiDAR en particulier) qui permettront de mieux comprendre et anticiper le rôle de ces effets "mémoires" sur les érosions hivernales.

L'analyse des évolutions passées, comme la prédiction de l'impact des hivers à venir sur le trait de côte ou en matière de volume érodé, est donc très complexe et impose de considérer le système plage-dune à différentes échelles de temps, l'impact érosif dépendant en effet de paramètres s'exprimant à la fois à une courte échelle de temps (évènementielle comme l'effet d'une tempête isolée ou d'un groupe de tempêtes), à l'échelle saisonnière (nombre d'évènements et intensité des tempêtes hivernales et rechargement estival) et à l'échelle interannuelle (à travers la dépendance aux hivers précédents). On pourrait ajouter à cela d'éventuelles tendances à long terme dues au déficit chronique de sédiments ou à l'élévation du niveau de la mer.

7. Conclusion

L'exploitation conjointe de données D-GPS, acquises par l'Observatoire de la Côte Aquitaine chaque année, depuis 2008, à la sortie de l'hiver et des données LiDAR, acquises en automne en 2014 et annuellement depuis 2016, a permis d'étudier les évolutions géomorphologiques des plages sableuses d'Aquitaine au cours de la période 2008-2019. Ces évolutions ont été analysées à travers la dynamique spatio-temporelle de plusieurs descripteurs (références altimétriques, largeur de plage, pente, épaisseur relative de sédiments, volume ...). Les résultats montrent la très grande variabilité des comportements des plages à l'échelle décennale, des capacités de reconstruction suite à l'hiver 2013-2014, ainsi que dans les processus de balance saisonnière des stocks de sable.

L'analyse, à l'échelle décennale et sur l'ensemble du littoral sableux, a permis de proposer une relation entre évolution du trait de côte et volumes sédimentaires disponibles sur les plages, à la sortie de l'hiver. L'ajustement statistique montre que la stabilité du trait de côte sur les 11 années étudiées (et notamment grâce à une forte capacité de récupération, suite à un hiver d'intensité extrême) est attendue pour des plages où les volumes sédimentaires disponibles sont compris en moyenne entre 370 et 380 m³/m (situation post-hiver).

On constate, en analysant la distribution des données observées, que des situations contrastées (évolutions de la position du trait de côte comprises entre ± 1 m/an) peuvent être observées pour des plages constituées de volumes sédimentaires compris entre 330 et 370 m³/m. En revanche, dans tous les cas où les volumes moyens post-hiver sont inférieurs à 330 m³/m, on observe toujours des situations de recul du trait de côte. Pour des valeurs inférieures à 300 m³/m, les reculs observés sont de l'ordre de 10 m voire plus.

A l'échelle de l'ensemble de l'Aquitaine, on constate que les volumes stockés sur les plages sont en moyenne de 349 m³/m, en situation post-hiver. La différence est notable entre les plages de Gironde (297 m³/m) et celles des Landes (393 m³/m). Ces chiffres, au regard du modèle établi, sont de nature à expliquer la différence de trajectoire d'évolution entre les plages de Gironde (globalement en déficit sédimentaire par rapport à la valeur d'équilibre) et celles des Landes (aux volumes légèrement supérieurs et globalement en équilibre ou en accrétion au cours de la période). Ils traduisent les effets à long terme des grandes caractéristiques de la côte sableuse aquitaine, à savoir un tarissement des apports exogènes depuis plusieurs milliers d'années (dernière période glaciaire) et un transit quasi continu des sédiments depuis le nord, au profit du sud de la côte, du fait de la dérive littorale.

Cette analyse est également soulignée par l'évolution du trait de côte (considéré ici à la valeur 6 m NGF). En moyenne sur l'ensemble de la côte, le recul est de 6,4 m au cours de la période, avec de très fortes disparités à l'échelle des cellules hydro-sédimentaires. Le recul est en moyenne de 12,8 m en Gironde et seulement de 0,9 m dans les Landes. Mais le littoral a connu des évolutions pluriannuelles variables de la position du TDC, allant dans les cas les plus extrêmes à des reculs continus qui atteignent 66 m en 11 ans dans la cellule 1 ; des situations témoignant de très fortes dynamiques, comme dans la sous-cellule 3.5 où la position du trait de côte a varié de plus ou moins 10 m et dont la position en 2019 est équivalente à celle de 2008 ; ainsi que des secteurs en accrétion pendant la période, comme au centre des Landes (sous-cellule 5.2) avec une avancée du trait de côte de l'ordre de 10 m pendant la période.

A l'échelle saisonnière, les variations de morphologies (présence ou absence de berme) et de volumes associées aux rechargements naturels estivaux présentent également de grandes variabilités à l'échelle de l'ensemble de la côte. Quasi inexistantes dans le Nord-Médoc ou à l'extrême sud des Landes, les rechargements estivaux peuvent être de plus de 200 m³/m au sud de la Gironde (cellule 3.4 à la pointe du Cap Ferret). En moyenne, sur l'ensemble du littoral sableux, c'est environ 16 % de sédiments qui sont positionnés au-dessus du niveau moyen de la mer à la fin de l'été par rapport à la situation post-hiver (soit

405 m³/m en situation post-été contre 349 m³/m en situation post-hiver). Les contrastes saisonniers sont globalement plus forts en Gironde où en moyenne les stocks sont supérieurs de 25 % en situation post-été par rapport à la situation post-hiver (soit 372 m³/m contre 297 m³/m), alors que le rapport est de 11 % dans les Landes (soit 435 m³/m contre 393 m³/m). Concernant les références altimétriques étudiées, le suivi, dans le temps des références 2 et 4 m NGF, illustre la grande dynamique des systèmes-plages à l'échelle saisonnière. Les références permettent d'apprécier la présence des bermes estivales dont la base est proche de la valeur 2 m NGF et la crête proche de 4 m NGF.

Enfin en 2019, en moyenne globale, ainsi que pour les unités géographiques "Gironde" et "Landes", on observe une tendance à la hausse des descripteurs étudiés par rapport à 2008 et ce en intégrant les effets de l'hiver 2013-2014. Cela se traduit d'une part par l'extension moyenne des largeurs de plage (+ 6 m soit + 12 %), d'autre part par l'augmentation des volumes de sédiments positionnés sur les plages (+ 93 m³/m, soit 22 %). A l'échelle de l'Aquitaine, les valeurs post-hiver en 2019 sont équivalentes à celles de 2012 qui constituaient le maximum avant l'hiver 2013-2014. On constate également 5 ans après, un impact relativement limité de l'hiver 2013-2014 pour les descripteurs calculés. En effet, en analysant les données à l'échelle décennale, la situation à la sortie de l'hiver 2013-2014 est suivie d'une forte augmentation lors des années suivantes des différents descripteurs et cela en dépit d'un hiver énergétique en 2015-2016. En 2017, pour certains secteurs du littoral (principalement dans les Landes), les reculs observés en 2014 sont comblés. Les données de la campagne post-hiver 2018 cassent la dynamique d'accumulation des sédiments sur les plages, observable depuis l'hiver 2014. Les volumes sédimentaires et la largeur de plage restent cependant à des valeurs élevées par rapport au reste de la période étudiée. Enfin, grâce à un fort rechargement naturel estival en 2018 et un hiver clémente en 2018-2019, les valeurs post-hiver 2019 présentent des valeurs à la hausse par rapport à celles post-hiver 2018.

La connaissance de la disponibilité sédimentaire des plages à l'entrée de l'hiver, mise en relation avec la tendance associée à l'impact des hivers précédents (stabilité sur plusieurs années, forte disponibilité, tendance à la reconstruction...) est fondamentale pour apprécier le risque d'érosion durant l'hiver, et ce, au moins autant que les conditions météo-marines de l'hiver. Il est donc nécessaire de poursuivre les efforts de mesures saisonnières (via les acquisitions LiDAR en particulier) qui permettront de mieux comprendre et anticiper notamment le rôle des « effets mémoires » sur les érosions hivernales. Approcher ces questions permettra de mieux anticiper les impacts des tempêtes hivernales et d'envisager l'amélioration des capacités prédictives de l'impact des tempêtes au sein des outils existants comme le réseau "Tempêtes" de l'OCA.

Par ailleurs, il apparaît fondamental de poursuivre ces suivis sur le long terme, afin de mieux comprendre entre autres, (i) les relations entre indicateurs climatiques globaux (type NAO ou WEPA) et les périodes d'érosion ou de reconstruction, (ii) prédire les capacités de résilience des systèmes plage-dune, (iii) identifier les effets du changement climatique sur les systèmes de plages sableuses. Ces questions fondamentales pour la gestion des espaces littoraux et leurs aménagements, ainsi que pour être en mesure d'anticiper leurs futures évolutions, ne peuvent être traitées que grâce à des programmes de mesure pérennes sur le long terme, à l'échelle de l'ensemble de la côte aquitaine.

8. Bibliographie

- Ayache B., Nicolae Lerma A., Ulvoas B. (2018) – Evolution géomorphologique de la côte Sableuse en Gironde et dans les Landes, entre 2011 et 2017, à partir de l'exploration du LiDAR. Rapport finale, BRGM/RP-67187-FR, 49P. 18 fig, 8 tab, 4 ann
- Bossard et Nicolae Lerma (Accepté). Geomorphologic characteristics and evolution paths of profiled and managed dunes on the South West Coast of France, *Geomorphology*,
- BRGM et ONF (2018) – Atlas morphodynamique de la côte sableuse Aquitaine. Rapport final. BRGM/RP-67152-FR, 280p., 227 ill., 6 ann.
- Bulteau T., Mugica J., Mallet C., Garnier C., Rosebery D. Maugard F., Nicolae Lerma A., Nahon A. and Millescamps B. (2014). Evaluation de l'impact des tempêtes de l'hiver 2013-2014 sur la morphologie de la côte Aquitaine. Rapport final BRGM/RP-63797-FR, 68p.
- Bulteau T., Nicolae Lerma A., and Mugica J. (2016). Caractérisation de l'exposition du littoral aquitain à l'aléa submersion marine. Rapport final. BRGM/RP-63802-FR
- Bulteau T., Paris F., Nicolae Lerma A., Muller H. (2019) – Le réseau tempêtes de l'Observatoire de la Côte Aquitaine. Rapport final. BRGM/RP-67418-FR, 72 p., 45 fig., 6 tabl., 6 ann.
- Idier, D., Castelle, B., Charles, E., & Mallet, C. (2013). Longshore sediment flux hindcast: spatio-temporal variability along the SW Atlantic coast of France. *Journal of Coastal Research*, (65), 1785-1790.
- Nicolae Lerma A., Ayache B., Ulvoas B., Paris F., Bernon N., Bulteau T., Mallet C. (2019a) - Pluriannual beach-dune evolutions at regional scale: Erosion and recovery sequences analysis along the aquitaine coast based on airborne LiDAR data. *Continental Shelf Research* 189, 103974
- Nicolae Lerma A., Bulteau T., Ayache B., Garnier C., Bernon N., Mallet C., Maugard F., Rosebery D. (2019b) - Acquisition et valorisation des données de l'Observatoire de la Côte Aquitaine. Rapport final. BRGM/RP-69242-FR, 71 p., 26 fig., 11 tabl., 1 ann.
- Ulvoas B. et Ayache B. 2018 – Contrôle qualité des levés LiDAR IGN-OCA 2011, 2014, 2016 et 2017 du littoral aquitain. Rapport final, BRGM/RP-67188-FR, 155p



OBSERVATOIRE CÔTE AQUITAINE

Réseau d'experts au service du littoral



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

BRGM Nouvelle-Aquitaine

Parc Technologique Europarc
24, Avenue Léonard de Vinci
33600 Pessac - France
Tél. : 05 57 26 52 70

A propos de l'Observatoire de la Côte Aquitaine

Véritable réseau d'experts au service du littoral, l'Observatoire de la Côte Aquitaine est chargé de suivre l'érosion et la submersion sur le littoral régional. Le BRGM ainsi que l'ONF sont les porteurs techniques du projet, financé par l'Europe (FEDER), l'État, la Région Nouvelle-Aquitaine, les départements de la Gironde, des Landes, des Pyrénées-Atlantiques, le Syndicat intercommunal du bassin d'Arcachon (SIBA), le BRGM et l'ONF.

Le rôle de l'Observatoire est de mettre au service de l'ensemble des acteurs du littoral un outil scientifique et technique d'aide à la décision, à la gestion et à la prévention des risques côtiers. L'Observatoire de la Côte Aquitaine travaille en étroite collaboration avec le GIP Littoral et les universités de Bordeaux (unité mixte de recherche EPOC) et de Pau et des Pays de l'Adour (laboratoire SIAME) ainsi que le Centre de la mer de Biarritz (programme ERMMA), le Conservatoire du Littoral et le Cerema.

L'enjeu : accompagner les stratégies de développement durable de manière à prendre en compte l'évolution morphologique du littoral et les richesses de son patrimoine naturel tout en s'adaptant au changement climatique.

Les actions de l'Observatoire sont multiples : mesures, suivis, expertises, diffusion des données et information vers le grand public... www.observatoire-cote-aquitaine.fr