



OBSERVATOIRE DE LA CÔTE
NOUVELLE-AQUITAINE
Réseau d'experts au service du littoral

BRGM Nouvelle-Aquitaine
Parc technologique Europarc
24, avenue Léonard de Vinci
33600 Pessac

tél : 05 57 26 52 70
fax : 05 57 26 52 71
www.observatoire-cote-aquitaine.fr

Référence : NT_BDX-2021-033

Pessac, le 20 décembre 2021

Rédacteurs : Arthur Robinet, Nicolas Bernon, Alexandre Nicolae Lerma

Projet de référence : AP21BDX015

Diffusion externe validée par le responsable : oui non

Nom et fonction du responsable : Nicolas Pédrón, directeur régional du BRGM Nouvelle-Aquitaine

Le Directeur Régional
du BRGM Nouvelle-Aquitaine
Nicolas PÉDRON

Visa :

Liste de diffusion : Comité technique de l'OCNA

Note de l'Observatoire de la côte de Nouvelle-Aquitaine

Caractérisation et dynamiques des ondulations de plages migrant le long de la pointe du Cap Ferret observées sur la période 1984-2020 par imagerie satellite optique

Synthèse

A l'extrémité de la pointe du Cap Ferret, les barres sableuses, dénommées crochons ou ondulations de plage, possèdent une dynamique complexe. L'arrivée d'un crochon à l'extrême pointe s'accompagne d'une érosion temporaire de la plage et de la dune en amont et en aval du banc de sable, exposant périodiquement le secteur à un risque de recul du trait de côte et de submersion marine. Le déplacement de ces ondulations de plage le long de la pointe est difficile à anticiper. Pourtant, connaître les rythmes de déplacement et les conditions pouvant conduire à la stagnation ou à l'accélération des crochons est fondamental pour anticiper les évolutions du trait de côte de ce secteur. Après la création en 2020 d'une banque d'images satellite exploitables sur la période 1984-2020 couvrant la pointe du Cap Ferret, l'année 2021 a été consacrée au développement d'outils de détection robustes des ondulations de plage sur ces images, pour analyser leurs caractéristiques et leurs dynamiques d'évolution.

Au-delà des images satellite, l'analyse s'appuie sur différentes productions de l'OCNA : acquisitions topographiques lidar, levés topographiques au DGPS, trait de côte de 2017. Des résultats de modélisations numériques pour reconstituer les conditions de vagues et de marées sur la période d'étude ont également été exploités pour tenter de comprendre le rôle de ces agents de forçage dans la dynamique des ondulations de plage. Les images satellite couvrent le secteur d'étude qui s'étend sur les 5,5 derniers kilomètres de l'extrémité sud du Cap Ferret.

Véritable réseau d'experts au service du littoral, l'Observatoire de la côte de Nouvelle-Aquitaine est chargé de suivre l'érosion et la submersion sur le littoral régional. Le BRGM et 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.

La méthode mise en œuvre repose sur la classification automatique des images satellite, visant à exploiter les informations contenues dans chaque pixel pour lui attribuer une classe représentative de l'environnement où il est situé. Les classes définies correspondent aux différents environnements présents sur la pointe. Sur cette base, et après l'application d'un post-traitement pour homogénéiser les résultats, la limite sable sec / sable humide est extraite des images satellite, identifiée comme particulièrement adaptée pour détecter la présence d'une ondulation de plage, décrire sa morphologie et son évolution. La méthode est validée par comparaison avec les données topographiques disponibles.

L'analyse des évolutions dans l'espace et dans le temps de la limite sable sec / sable humide s'appuie sur un diagramme synthétique sur lequel les crêtes (apex) et les creux (points les plus proches du trait de côte) des ondulations de plage ont été identifiés, et individualisent un objet « crochon ». Cette analyse, opérée sur 12 ondulations de plage dont la trajectoire a pu être reconstituée sur l'ensemble du secteur d'étude, révèle que :

- La durée moyenne d'existence et de migration des ondulations de plage sur les deux derniers kilomètres les plus au sud de la pointe du Cap Ferret est de l'ordre de 19 mois ;
- La morphologie des ondulations de plage n'a pas varié significativement au cours de la période 1984 - 2020.

Considérant les évolutions de la limite sable sec / sable humide détectées au cours du temps, l'analyse statistique, bien que présentant une dispersion non négligeable, témoigne :

- D'une augmentation des dimensions des ondulations de plage depuis le nord vers le sud, à l'exception de l'emprise longitudinale au trait de côte qui tend à diminuer à l'extrémité sud de la pointe du Cap Ferret (entre la dune amoindrie et le musoir), quelle que soit la saison ;
- D'une tendance saisonnière affectant les emprises des ondulations de plage, avec des dimensions plus importantes en automne et en hiver, indépendamment des secteurs où se situent ces objets sur la pointe ;
- D'une augmentation de la vitesse médiane longitudinale des ondulations de plage entre le parking du pétrole et la dune amoindrie (3,2 à 3,4 m/j), puis d'un ralentissement au droit de l'extrémité sud de la pointe (1,1 m/j).

Ces constats corroborent les observations réalisées par expertise, et les renforcent en apportant une quantification des caractéristiques morphologiques et des vitesses de migration des ondulations de plage, suivant les secteurs et les saisons.

L'analyse des conditions de vagues au large et de marées à l'échelle saisonnière, susceptibles d'être à l'origine des évolutions spatiales et temporelles des ondulations de plage, ne révèle pas de corrélation significative avec la dynamique observée des ondulations de plages. Ce constat indique que la mise en place et la migration de ces morphologies répondent également à d'autres processus. La visualisation de la banque d'images suggère l'existence d'un contrôle par le contexte géomorphologique en présence (disponibilité en sédiments et configuration morphologique de la plage et de l'avant-côte). Davantage d'investigations apparaissent alors nécessaires pour mieux évaluer l'implication de ces différents processus (météo-marins et contrôle géomorphologique) sur les dynamiques observées.

Ce travail a permis de mieux connaître les caractéristiques des ondulations de plage, et permettra ainsi de mieux appréhender la dynamique de celles qui migreront le long de la pointe du Cap Ferret ces prochaines années. Les données et informations créées pourraient constituer un outil d'aide à la décision, de type recherche d'analogues d'une situation donnée, pour mieux anticiper leurs évolutions futures et optimiser la gestion du risque de recul du trait de côte qu'elles génèrent.

Introduction

Les observations sur le terrain et l'analyse de photos aériennes et d'images satellite révèlent l'existence de structures sédimentaires de plage particulières (ondulations de plage ou crochons sableux) qui se forment dans les derniers kilomètres du secteur sud de la pointe du Cap Ferret et qui migrent du nord vers le sud à des rythmes variables, jusqu'à leur disparition aux abords de l'extrémité sud de la pointe. Ce comportement est classique de la dynamique d'évolution des flèches sableuses mais leurs caractéristiques (dimensions, vitesse de migration, rôle sur l'aléa d'érosion) sont cependant encore mal évaluées. Différentes expertises menées par l'OCNA (Figure 1) ont mis en évidence qu'en aval de la dérive littorale de ces structures, l'exposition du cordon dunaire à l'aléa érosion marine est accrue lors de conditions hydrodynamiques tempétueuses (vagues énergétiques et niveaux d'eau élevés).

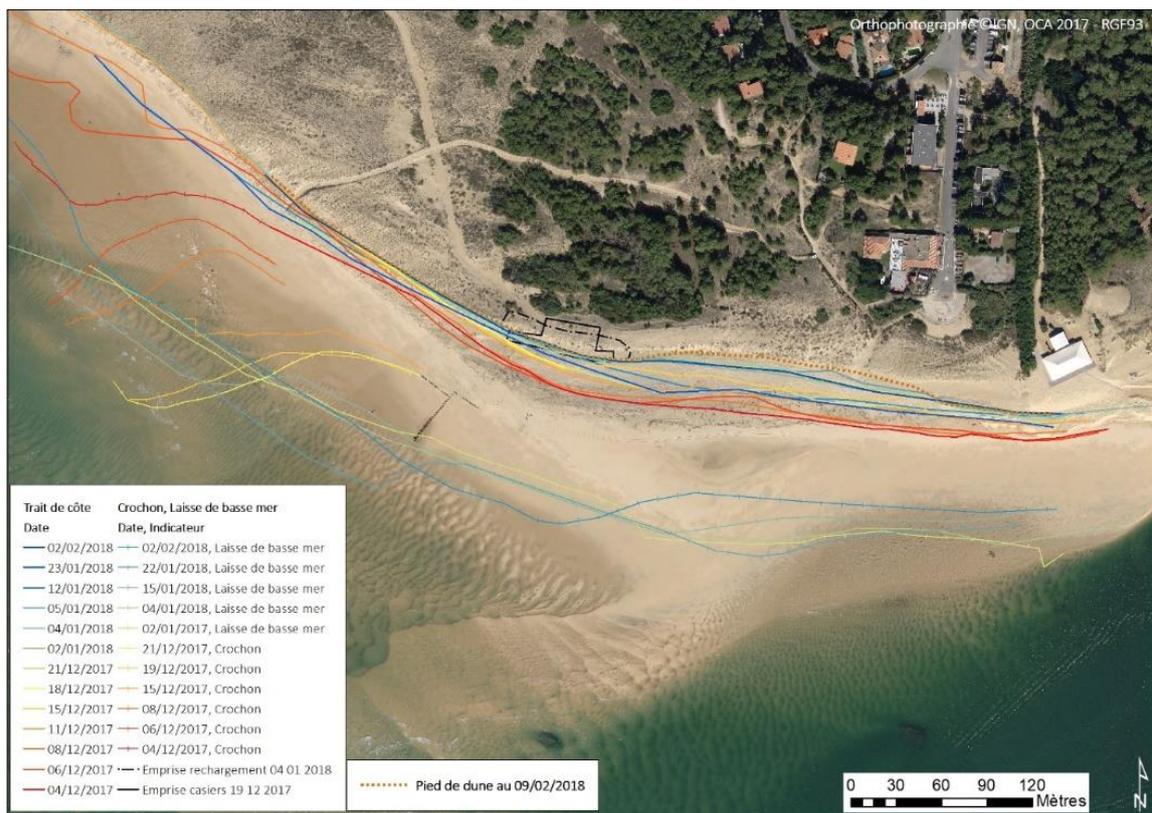


Figure 1 - Evolution de la position du pied de dune, du crochon et des lisses de haute et basse mer entre le 04/12/2017 et le 09/02/2018 (Note de l'Observatoire de la Côte Aquitaine du 20/02/2018)

L'Observatoire de la côte de Nouvelle-Aquitaine a engagé des actions au cours des deux dernières années visant à exploiter l'imagerie satellite. Ce support, disponible à une fréquence temporelle soutenue et grandissante sur la période 1984-2020, fournit un grand nombre d'informations sur une grande emprise spatiale. Du fait de missions satellitaires publiques pour soutenir la science, une base de données importante d'images Landsat et Sentinel est accessible gratuitement. De plus, le CNES a rassemblé des images provenant d'autres satellites (SPOT) sur la période 1984-2015 sur quelques sites pilotes en France, dont le Bassin d'Arcachon, constituant une base de données libre d'accès parmi les plus riches au monde.

Dans le cadre d'un stage de fin d'études réalisé en 2020 (Devanne, 2020 ; OCNA, 2021), les images satellite disponibles sur la pointe du Cap Ferret ont été collectées pour constituer une banque d'images exploitables. En 2021, l'OCNA a mis au point la détection automatique d'un descripteur des ondulations de plage, la limite sable sec / sable humide, dont l'analyse des évolutions spatiale et temporelle révèle les caractéristiques et la dynamique complexe de ces structures sédimentaires. Ces connaissances intéressent particulièrement les gestionnaires du littoral qui œuvrent dans ce secteur pour la protection et le maintien

du cordon dunaire. La présente note développe ce travail effectué dans le cadre du programme 2021 de l'Observatoire.

Site d'étude

La pointe du Cap Ferret s'est édifiée au cours des 3 000 dernières années, conduisant à la fermeture partielle et progressive de l'estuaire de La Leyre, et à la mise en place du Bassin d'Arcachon. Elle est située à l'extrémité nord de l'embouchure de la lagune, qui est une des discontinuités majeures de la côte sableuse de la région Nouvelle-Aquitaine (BRGM et ONF, 2018) (Figure 2).

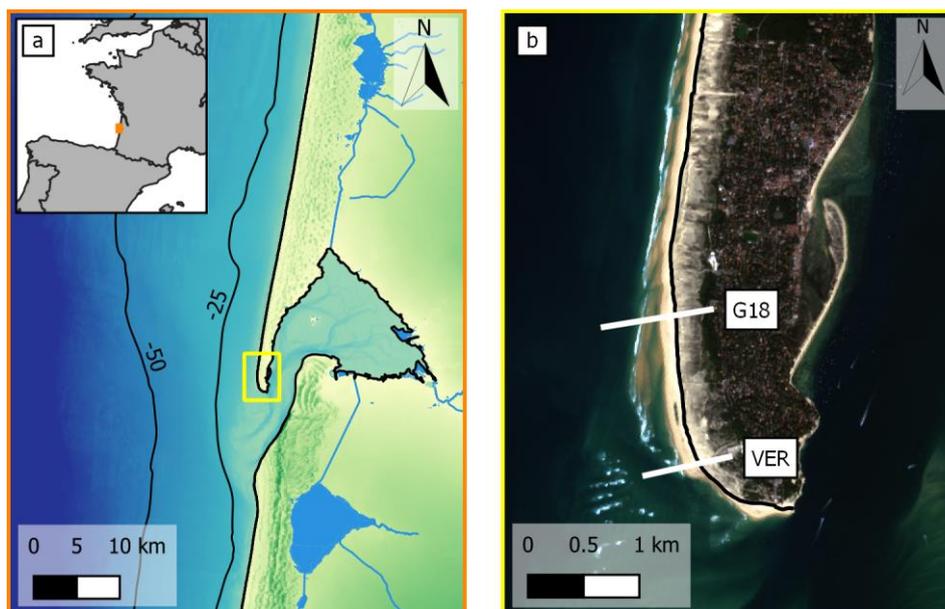


Figure 2 - Localisation de la pointe du Cap Ferret. (a) Littoral nord et sud du Bassin d'Arcachon (Nouvelle-Aquitaine, France). (b) Image Sentinel-2 du 11 octobre 2017 montrant le secteur sud de la pointe du Cap Ferret. La courbe noire indique la position du trait de côte (pied de dune) dérivée des mesures lidar IGN/OCNA d'octobre 2017. Les traits blancs localisent les transects où des profils topographiques de plage sont régulièrement réalisés par l'OCNA.

Le littoral ouest de cette pointe est exposé aux vagues océaniques et est constitué de plages sableuses bordées par un cordon dunaire. A l'extrémité sud, une digue a été construite à partir de 1985 et étendue progressivement pour tenter d'atténuer localement la tendance de recul du système plage-dune qui l'affecte depuis la fin des années 70.

La marée au large de la pointe du Cap Ferret présente un régime semi-diurne et est méso à macro tidale. Pour une marée de vives-eaux moyenne (coefficient de 95), le marnage est d'environ 3,91 m (Shom, 2017).

Le climat de vagues au large est énergétique, fortement modulé par les saisons et présente une dominance de vagues en provenance des directions ouest et nord-ouest (Butel *et al.*, 2002). Une hauteur significative des vagues moyennes de 1,7 m et une période pic moyenne de 11 s sont observées à la bouée CANDHIS située à 20 km au large de la pointe du Cap Ferret (Castelle *et al.*, 2015).

Sur la majeure partie de la pointe, du fait d'isobathes relativement parallèles et d'une incidence de dominantes de O et NO, les conditions au large sont assez représentatives des conditions incidentes, moyennant la dissipation d'énergie par frottement et réfraction en interaction avec les fonds. Du fait de la présence des courants tidaux et des nombreux bancs de sable au large de l'extrémité sud, les conditions de vagues incidentes sont vraisemblablement plus impactées avec une atténuation par les courants tidaux et une réfraction complexe sur les nombreux bancs subtidaux présents dans l'embouchure.

Excepté à l'extrémité sud de la Pointe, on observe classiquement sur la côte sableuse aquitaine, une forte dynamique sédimentaire saisonnière : durant la période hivernale, la hauteur et la pente de plage diminuent au profit d'un accroissement et d'un éloignement des barres sableuses intertidales et subtidales vers le large. Durant la période estivale, une dynamique opposée est observée, avec une migration des barres sableuses vers la côte, la formation d'une berme et une élévation de la plage.

A l'extrême sud de la Pointe, la dynamique sédimentaire est plus complexe, relativement indépendante des cycles saisonniers, avec une variabilité longitudinale très importante, marquée par la formation de crochons - que l'on appellera ondulations de plage - et de plateformes intertidales très développées (Figure 3).



Figure 3 - Ondulations de plage se propageant sur le littoral à l'extrémité sud de la pointe du Cap Ferret sur la période 02/2019 - 02/2020. Les transects numérotés correspondent au cadre d'analyse mis en œuvre dans la suite de l'étude.

Données

Images satellite

La base de données d'images satellite est constituée d'images optiques acquises par les satellites Landsat 5, 7 et 8 (NASA, USGS), Sentinel-2A et Sentinel-2B (ESA), et SPOT 1,2,4,5 (CNES, acquisitions dans le cadre du programme Kalideos). Suite à une défaillance technique sur le capteur de Landsat 7 survenue le 31 mai 2003, les images acquises par ce satellite après cette date présentent des lignes de pixels sans donnée mesurée. Ces images dégradées n'ont pas été utilisées dans ce travail. Au total 569 images ont pu être exploitées pour conduire des analyses sur le secteur sud de la pointe du Cap Ferret entre 1984 et 2020 (images sans nuage et sans problème de radiométrie). Ce chiffre tient compte des images qui ont été retirées de la base de données après le contrôle visuel des résultats de classifications (voir section Classifications des images). La Figure 4 indique le nombre d'images exploitables par année, en distinguant chaque mission satellitaire.

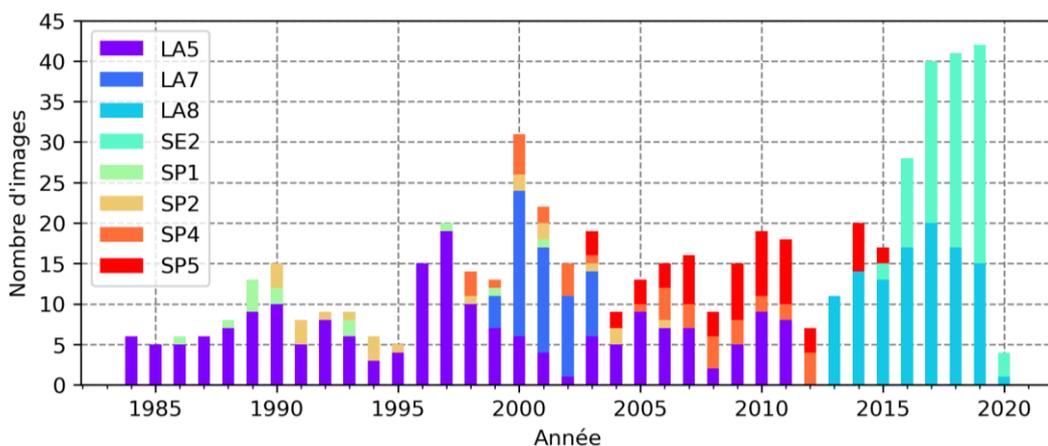


Figure 4 - Nombre d'images satellite exploitables par année et répartition par mission spatiale.

Trait de côte

Le trait de côte produit par l'OCNA par digitalisation sur la base des orthophotographies et du lidar acquis en octobre 2017 (Figure 2) a été utilisé pour créer la ligne de référence définissant l'origine des transects discrétisant longitudinalement la pointe du Cap Ferret (voir section Extraction de la limite sable sec / sable humide).

Profils de plage

Depuis 2001, l'OCNA réalise des profils de plage le long d'une cinquantaine de transects situés sur la côte girondine et landaise (Nicolae Lerma et Bulteau, 2020). A partir de 2008, ces levés sont réalisés annuellement au printemps.

Depuis 2014 et annuellement depuis 2016, à l'automne, l'OCNA commande l'acquisition de levés lidar topographiques le long du littoral de l'ex-région Aquitaine. Aucun levé n'a été réalisé en 2015 et le levé prévu à l'automne 2019 n'a pu être réalisé qu'en janvier 2020. Les Modèles Numérique de Terrain issus de ces données lidar ont été utilisés pour extraire les profils de plage au niveau des transects OCNA, complétant ainsi la base de données de profils de plages issues des mesures in situ effectuées au printemps (Nicolae Lerma et Bulteau, 2020). Au niveau de la zone d'étude, ces données topographiques sont disponibles au droit de deux transects (VER et G18 ; Figure 2).

Vagues et marées

Les conditions de vagues utilisées pour appréhender la dynamique des ondulations de plage sont extraites d'une réanalyse d'états de mer mise à disposition par Xavier Bertin (Laboratoire LIENSs, Université de La Rochelle – CNRS). Cette réanalyse a été réalisée avec le modèle WaveWatch III et forcée par les vents CFSR entre janvier 1980 et décembre 2021. L'extraction est faite à un point de grille proche de la localisation de la bouée Cap Ferret (Réseau CANDHIS, campagne 03302) située à environ 20 km au large de la pointe du Cap Ferret par 54 m de fond.

La marée astronomique a été reconstruite à l'aide du logiciel MATLAB et de la toolbox T_Tide (Pawlowicz et al., 2002) en s'appuyant sur la base de données d'harmoniques de marées de l'IFREMER générée à partir du modèle hydrodynamique MARS calibré pour le littoral français. La marée astronomique a été prédite au large de la pointe du Cap Ferret au niveau de l'iso-contour 10 m.

Méthodes

Classification des images

Tout comme dans les travaux de Vos *et al.* (2019), un classifieur de type « réseau de neurone perceptron multicouches » a été mis en œuvre pour classifier les images satellite en différentes classes de surfaces. Ce travail de classification a été réalisé à l'aide du logiciel Python et de la bibliothèque de fonctions scikit-learn (Pedregosa *et al.*, 2011) et en considérant 8 classes de surfaces possibles (Tableau 1).

Nom	Zone urbaine et forêt	Dune végétalisé	Sable sec	Sable humide	Sable très humide	Déferlement	Eau peu profonde	Eau profonde
Valeur	1	2	3	4	5	6	7	8
Couleur associée	Gris	Vert	Orange clair	Marron Clair	Marron	Blanc-bleu	Bleu clair	bleu

Tableau 1 – Classes de surfaces utilisées dans la classification des images satellite.

Pour chacune des missions satellite, la base de données d'échantillons d'apprentissage a été constituée en sélectionnant des pixels appartenant aux différentes classes de surfaces sur plusieurs images de cette mission. Les images utilisées comme support pour générer ces bases de données d'apprentissage ont été sectionnées de telle sorte à couvrir une large gamme de conditions environnementales.

En parallèle de l'étape d'apprentissage, une étape de validation des classifieurs a été réalisée. Le classifieur est d'abord entraîné en utilisant 70 % de la base de données d'échantillons d'apprentissage puis les performances de classification sont évaluées sur les 30 % restants. Pour chacune des missions satellite, le pourcentage moyen (10 répétitions) de pixels dont la valeur de classe a été correctement prédite est de l'ordre de 95-97 %. Ce résultat très satisfaisant valide la méthode de classification employée.

Des post-traitements automatique et manuel ont toutefois été requis. Le post-traitement automatique a consisté à éliminer les petits groupes de pixels d'une même classe isolés au sein de grands ensembles d'une classe différente. Un léger lissage a également été appliqué (Figure 5). Le post-traitement manuel a consisté à identifier et exclure de la suite des analyses les images classifiées pour lesquelles la classification semble visuellement médiocre au niveau de l'interface entre les classes de sable sec et sable humide. Cette interface constitue en effet le descripteur recherché pour caractériser les ondulations de plage.

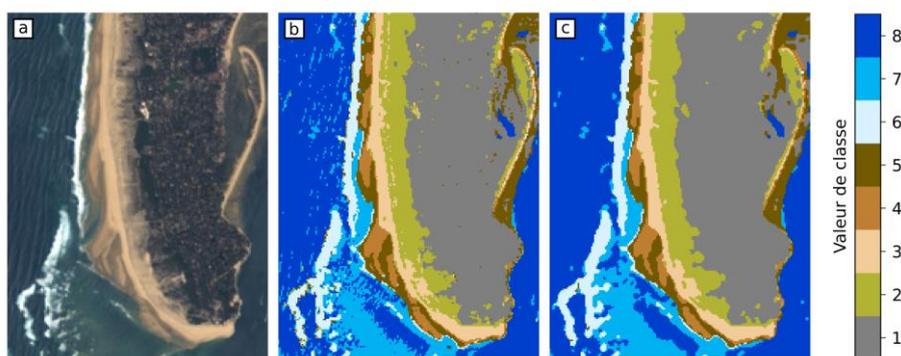


Figure 5 - Illustration du résultat de la classification d'une image satellite. (a) Image Landsat 8 du 10/06/2017. (b) Image classifiée brute. (c) Image classifiée nettoyée.

Extraction de la limite sable sec / sable humide

Un ensemble de transects orientés perpendiculairement à la côte (Figure 6) a été créé pour extraire la limite sable sec / sable humide depuis les images classifiées, et faciliter le traitement automatique de cette donnée (Figure 7). Ces transects sont distribués le long de la pointe du Cap Ferret sur un linéaire d'environ 5,5 km et sont espacés les uns des autres de 10 m à leur origine (côté terre). L'origine de ces transects se trouve sur une ligne de référence représentant l'orientation générale du littoral de la Pointe du Cap Ferret.

Elle a été dérivée du trait de côte de 2017 (OCNA), simplifiée et translaturée vers l'intérieur des terres pour permettre une prise en compte du secteur d'étude sur toute la période observée.

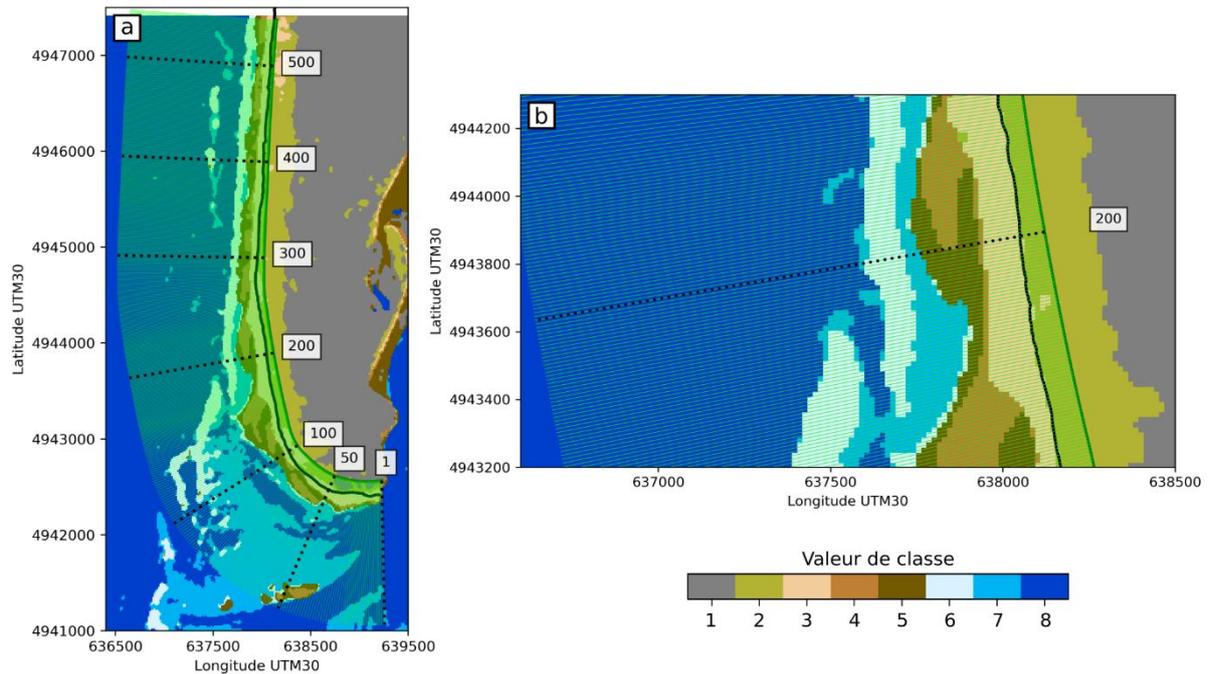


Figure 6 – Transects (traits vert clair) utilisés pour discrétiser longitudinalement la pointe du Cap Ferret et pour extraire les limites interclasses depuis les images classifiées. A titre indicatif, certains transects sont mis en valeur par un trait en pointillés noir et les numéros de transects correspondants sont fournis dans les boites blanches. La courbe verte indique la ligne de référence utilisée pour définir l'origine des transects.

Des règles de décision ont ensuite été appliquées le long de chaque transect pour gérer les situations particulières et favoriser l'obtention d'une limite sable sec / sable humide homogène spatio-temporellement. Par exemple, en l'absence de classe sable sec le long d'un transect, la position de la limite sable sec / sable humide est située au niveau de la limite entre la classe de dune végétalisée et la classe de sable humide. Autre exemple, lorsque le transect passe au niveau d'une zone de plage présentant une morphologie complexe avec une zone intertidale très développée, plusieurs limites sable sec / sable humide sont présentes. Dans cette situation la limite sable sec / sable humide retenue est celle située la plus offshore parmi celles qui ne se trouvent pas au large de pixels appartenant aux classes de sable très humide ou marine (*i.e.* déferlement, eau peu profonde, eau profonde, voir Tableau 1). Cette restriction garantit que la limite sable sec / sable humide retenue ne se trouve pas sur une barre intertidale déconnectée du haut de plage (Figure 7).

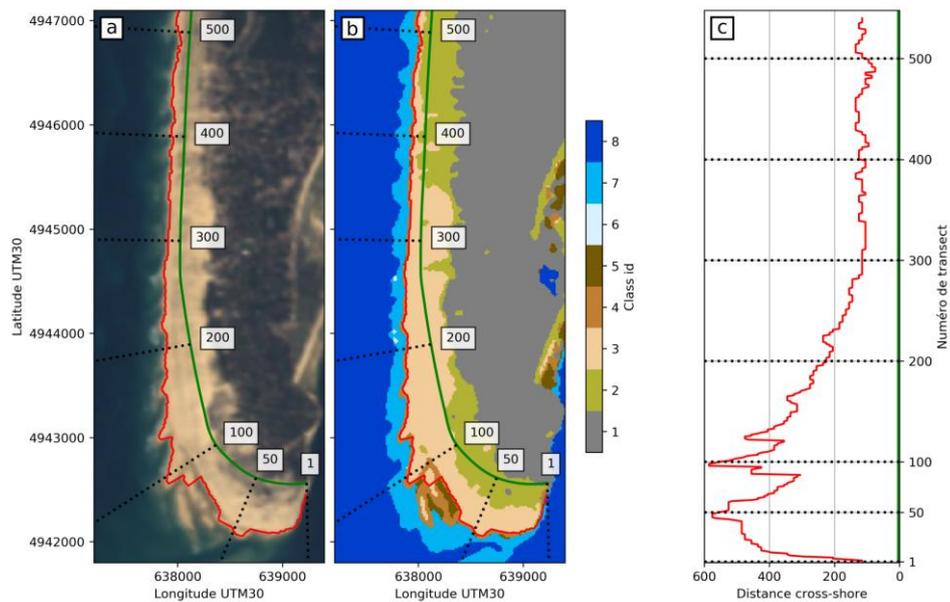


Figure 7 – Illustration de l'extraction de la limite sable sec / sable humide le long de la pointe du Cap Ferret à partir d'une image satellite. (a) Image Landsat 5 du 26/07/1984. (b) Image classifiée et nettoyée. (c) Distance cross-shore de la limite sable sec humide extraite de l'image classifiée et nettoyée et où la valeur 0 correspondant à l'origine des transects. Sur les trois panels la courbe rouge et la courbe verte indiquent respectivement la limite sable sec / sable humide et la ligne de référence définissant l'origine des transects. Les traits en pointillés noirs localisent certains transects et sont fournis à titre indicatif.

Comparaison avec les données in situ

Pour évaluer si la limite sable sec / sable humide extraite des images satellite offre un indicateur valable pour décrire la dynamique de la plage, l'évolution temporelle de la position transversale au littoral (ou cross-shore) de cette limite a été comparée avec l'évolution temporelle de la position cross-shore de la limite entre le haut de plage et le bas de plage, dérivée des profils DGPS mesurés au droit des transects G18 et VER (Figure 2, traits blancs). Cette limite offshore peut-être définie comme l'intersection entre le profil de plage et la côte d'élévation 1,5 m NGF, valeur qui correspond approximativement à l'élévation de la marée haute moyenne prédite au large de la pointe du Cap Ferret. Pour rendre cette comparaison possible, la position cross-shore de la limite sable sec / sable humide extraite des images satellite le long des transects définis dans la section précédente a été interpolée longitudinalement au niveau des transects G18 et VER.

Mise en évidence et caractérisation des ondulations de plage

La concaténation temporelle de la limite sable sec / sable humide extraite sur chacune des images satellite, permet de générer un digramme spatio-temporel, appelé timestack, qui permet de décrire les formes et leurs évolutions dans le temps des ondulations de plage le long de la pointe du Cap Ferret.

Pour mettre en relief la variabilité sur le court terme (de la semaine à plusieurs mois voire années) et les ondulations de plage qui migrent parfois rapidement, les tendances d'évolutions spatio-temporelles sur les moyen et long termes (de plusieurs années à plusieurs décennies) ont été retirées du timestack (voir section Résultats). Ces tendances ont été calculées en appliquant au timestack brut une moyenne glissante spatio-temporelle calculée sur une fenêtre de 5 ans dans la direction temporelle et sur une fenêtre de 11 transects dans la direction longitudinale. Une fenêtre temporelle relativement longue a été utilisée du fait du déplacement relativement lent de ces structures sableuses (pouvant durer plusieurs années) et ainsi ne

pas altérer leur détection sur des périodes de temps plus courtes. En revanche, une fenêtre spatiale relativement petite (de l'ordre de 100 à 200 m en fonction de la courbure de la côte) a été utilisée car l'orientation de la plage varie très fortement à l'approche de la pointe, tout comme l'exposition aux forçages hydrodynamiques (vagues et courants de marée).

En utilisant le timestack où l'on a ainsi retiré les tendances d'évolution sur les moyen et long termes et l'effet liée à la courbure du trait de côte, un travail de digitalisation a été réalisé pour tracer les trajectoires spatio-temporelles suivies par les crêtes des principales ondulations de plages et des creux situés en amont et en aval de chacune de ces crêtes. Cette digitalisation a été réalisée sur SIG par 3 opérateurs indépendants disposant de l'ensemble des données (images brutes, images classifiées, couche d'information transects) mais sans contrainte méthodologique imposée. Les résultats largement concordants ont été réunis au sein d'une couche vecteur (cf. Figure 10). Plusieurs descripteurs caractérisant la dynamique et les formes des ondulations de plage ont enfin été définis : l'emprise parallèlement à la côte (longshore), l'emprise perpendiculairement à la côte (cross-shore), et la vitesse longitudinale de la crête du crochon.

Descripteurs des forçages marins

Pour étudier le rôle des forçages marins (vagues et courant de marée) dans la dynamique de plage le long de la pointe du Cap Ferret, différents descripteurs ont par ailleurs été utilisés :

- La puissance des vagues au large (P) qui rend compte du caractère morphogène des vagues incidentes.
- Le transport sédimentaire longshore total (Q_s) au sein de la zone de surf qui fournit un proxy du renforcement/affaiblissement des processus longshore le long de la pointe du Cap Ferret résultant de l'action des vagues.
- Le marnage maximum journalier (M) qui fournit un proxy de l'intensité des courants de marée auxquels l'extrémité sud de la pointe du Cap Ferret est exposée.

La puissance est calculée en utilisant les conditions de vagues au large via l'équation $P = \frac{1}{16} \rho_e g H_s^2 C_g$ où ρ_e est la masse volumique de l'eau, g l'accélération gravitationnelle terrestre, H_s la hauteur significative des vagues et C_g la vitesse de groupe (Komar and Inman, 1971).

Le transport sédimentaire longshore est calculé dans le nord de la zone d'étude via la formulation proposée par Ashton and Murray (2006) $Q_s = K H_s^{\frac{12}{5}} T^{\frac{1}{5}} \cos^{6/5}(\beta) \sin \beta$ où K est une constante, T la période des vagues et β est l'angle d'incidence des vagues au large par rapport à l'orientation moyenne de la côte entre les transects 300 et 548.

Le marnage maximum journalier est simplement calculé comme la variation maximale du niveau d'eau entre la marée haute et la marée basse.

Résultats

Relation entre limite sable sec / sable humide et limite offshore du haut de plage

Les évolutions temporelles de la position cross-shore de la limite au large du haut de plage mesurée (2008-2020) et de la limite sable sec /sable humide dérivée des images satellite (1984-2020) au niveau des transects G18 et VER (Figure 2) sont représentées sur la Figure 8. La comparaison de ces deux séries temporelles sur la période 2008-2020 révèle que les variabilités saisonnière et interannuelle de ces deux indicateurs sont similaires. Ce constat est particulièrement vérifié sur les 5 dernières années, où les données satellite et topographiques sont plus fréquentes et régulières. Il démontre la pertinence de la

limite sable sec / sable humide comme descripteur de la limite du haut de plage et pour retracer la dynamique passée des ondulations de plage sur la période d'étude (1984-2020). Les limites de cette méthode, c'est-à-dire les facteurs pouvant altérer la capacité de la limite sable sec / sable humide à décrire la limite offshore du haut de plage, sont discutés dans la section Discussion.

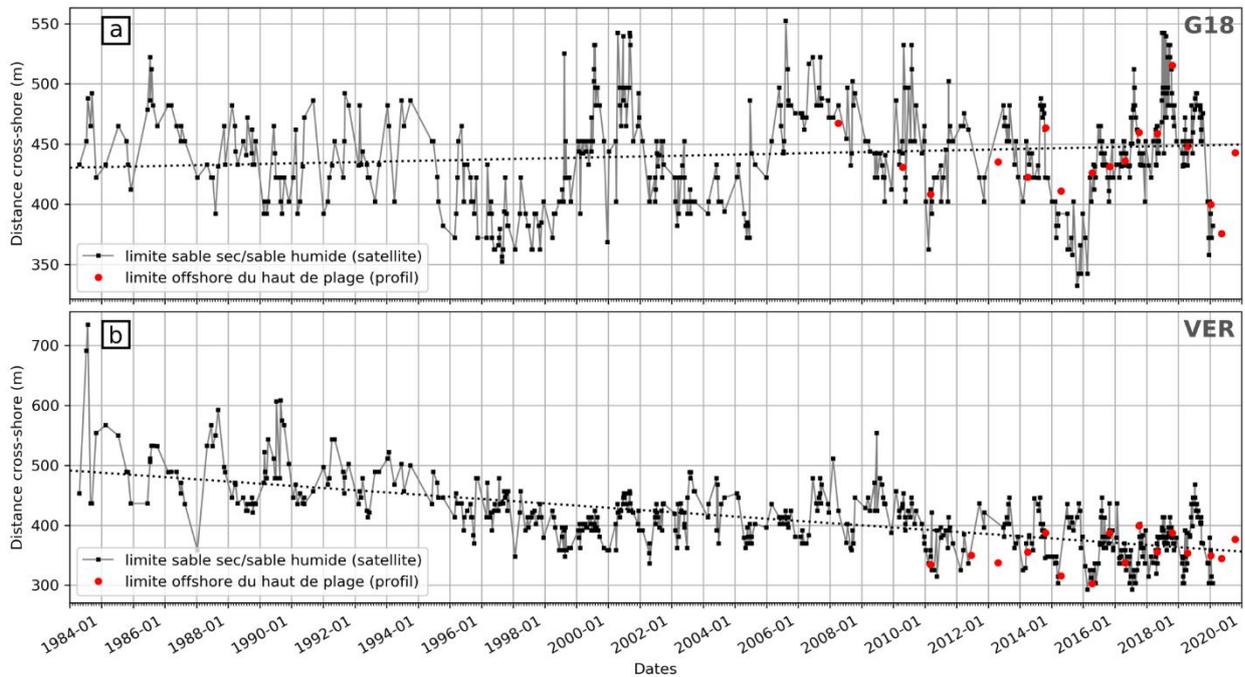


Figure 8 - Séries temporelles des positions cross-shore de la limite sable sec / sable humide extraite des images satellite (carré noir) et de la limite offshore du haut de plage issue des profils DGPS (rond rouge) au niveau des transects G18 (a) et VER (b) sur la période 2008-2020. Les positions de la limite sable sec / sable humide sont reliées par des traits gris pour aider à la lecture des variations date à date. La ligne en pointillés noirs indique la tendance long-terme de la position cross-shore de la limite sable sec / sable humide, calculée par régression linéaire sur toute la période d'étude.

L'analyse de la Figure 8 sur la période 1984-2020 révèle que des évolutions relativement contrastées sont visibles le long des transects G18 et VER. On observe en premier lieu une tendance au recul de la limite sable sec / sable humide d'environ $-3,7$ m/an au droit du transect VER, alors que le long du transect G18 la position de cette limite montre une légère accrétion sur le long-terme ($+0,5$ m/an). On constate aussi la présence de variabilités saisonnière et interannuelle importantes le long des deux transects, caractérisées par des variations de la position cross-shore de la limite sable sec / sable humide pouvant atteindre jusqu'à 100 à 150 m.

Evolution spatio-temporelle du haut de plage

La Figure 9a présente le timestack de la position cross-shore de la limite sable sec / sable humide le long des transects discrétisant longitudinalement la pointe du Cap Ferret entre 1984 et 2020. Considérant que cette limite est un descripteur de la limite offshore du haut de plage, cette figure permet de représenter de manière synthétique les évolutions spatio-temporelles de l'emprise du haut de plage vers le large. Une analyse visuelle de la Figure 9a révèle la présence d'une importante variabilité spatio-temporelle de la limite du haut de plage, particulièrement marquée au sud du transect 300. Cette variabilité traduit la présence d'ondulations du haut de plage qui couvrent généralement plusieurs dizaines de transects, *i.e.* qui s'étendent longitudinalement sur plusieurs centaines de mètres, et qui migrent vers l'extrémité sud de la pointe du Cap Ferret sur des durées variables de l'ordre de quelques mois à quelques années.

Cette variabilité intègre également le recul du trait de côte de la pointe du Cap Ferret observé au cours des dernières décennies. Elle est mise en évidence par la diminution progressive de la position de la limite sable sec / sable humide par rapport à l'origine des transects entre les transects 0 et 200, secteur d'environ 2 km tout au sud de la pointe du Cap Ferret (Figure 7, Figure 9a,b). Par exemple, la position cross-shore moyenne de la limite sable sec / sable humide le long du transect 50 est de 525 m sur la période 1984-1993 tandis qu'elle n'est plus que de 247 m sur la période 2010-2019 (278 m de recul). Le timestack révèle aussi la présence d'une tendance spatiale nord-sud avec une position cross-shore de la limite sable sec / sable humide moins élevée au nord qu'au sud d'au moins 100 m (Figure 9a,b). Cette tendance spatiale est essentiellement liée aux critères de positionnement utilisés pour définir l'origine des transects dans les terres.

Cette étude s'intéressant uniquement à la dynamique des ondulations de plage qui se produit sur des périodes de temps réduites, les tendances à moyen et long termes (de plusieurs années à plusieurs décennies) et l'effet lié à la courbure du trait de côte (Figure 9b) ont été soustraites au timestack original (Figure 9a). Le résultat, illustré sur la Figure 9c, fait ainsi ressortir la variabilité spatio-temporelle liée à la présence et à la migration des ondulations de plage. La Figure 9c permet notamment une inter-comparaison visuelle de ces morphologies visibles à différentes dates et localisations longshore. Au sud du transect 300 et durant toute la période d'étude, les variations de la largeur du haut de plage à l'échelle saisonnière et interannuelle apparaissent essentiellement causées par la migration vers le sud de ces ondulations de plage.

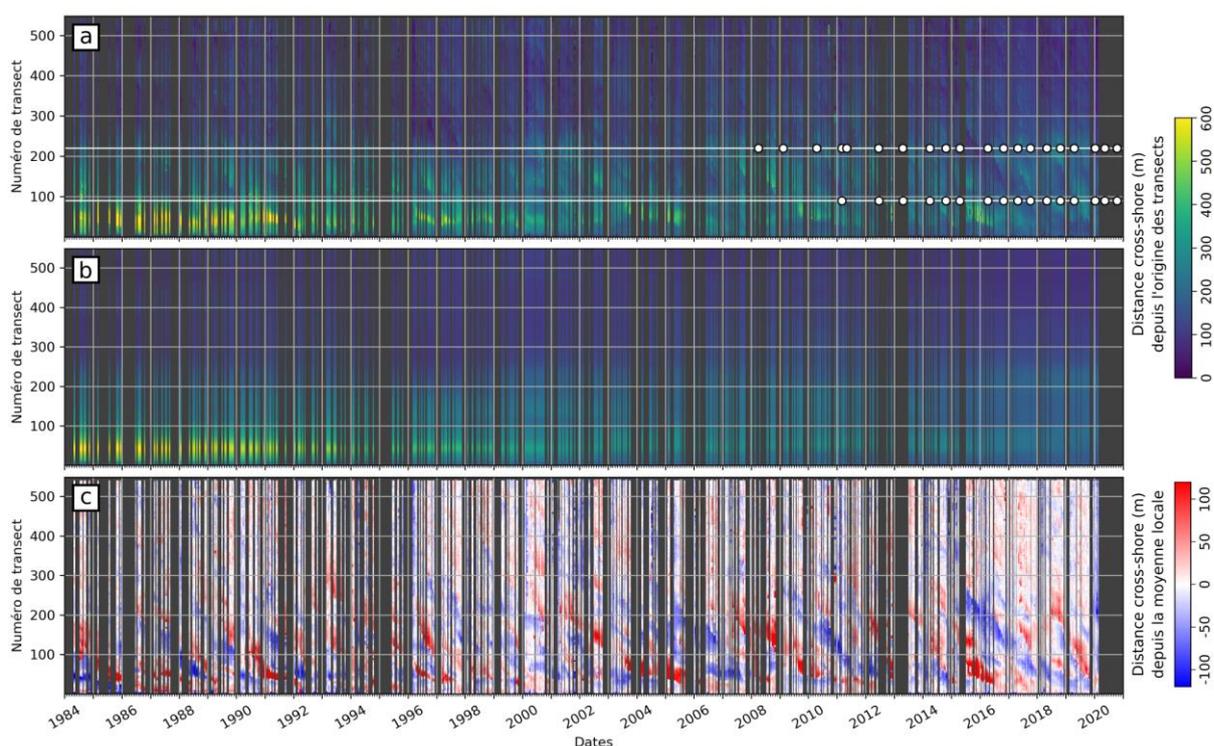


Figure 9 - (a) Timestack de la position cross-shore de la limite sable sec / sable humide le long de transects discrétisant longitudinalement la pointe du Cap Ferret. Les lignes blanches indiquent la localisation longshore des transects G18 et VER et les ronds blancs indiquent les dates de réalisation des profils OCNA. (b) Moyenne glissante spatio-temporelle du timestack présenté en (a) calculée avec une fenêtre temporelle de 5 ans et une fenêtre spatiale de 11 transects. (c) Timestack présenté en (a) auquel la tendance spatio-temporelle présentée en (b) a été soustraite.

Caractéristiques des ondulations de plage

Le timestack présenté en Figure 9c a été utilisé pour digitaliser les trajectoires spatio-temporelles parcourues par les crêtes des ondulations de plage (distance maximale cross-shore de la limite sable sec / sable humide) et par les creux (distance minimale cross-shore de la limite sable sec / sable humide) qui les

bordent (Figure 10). La digitalisation s'appuie également sur l'analyse des images satellite brutes et classifiées. Au total, 147 lignes de crête ont été digitalisées. Dans quelques rares cas, certaines ondulations de plage ont une trajectoire décrite par plusieurs lignes de crêtes successives que nous avons choisies de ne pas connecter spatio-temporellement du fait d'évolutions de plage trop importantes ou inconnues entre deux images successives (*i.e.* trop faible disponibilité des images satellite, comme lors de l'hiver 2013-2014). Considérant ces lacunes de données, le nombre d'ondulations de plage détectées par la méthode peut être légèrement inférieur au nombre de structures réelles, en lien avec la disponibilité des images.

Une analyse visuelle des trajectoires digitalisées montre qu'au nord du transect 300, seulement quelques ondulations de plage de petite emprise spatiale ont pu être identifiées. Ceci s'explique principalement par les dimensions modestes des ondulations dans ce secteur. La Figure 10 révèle également que les ondulations de plage les plus étendues spatialement se forment majoritairement entre les transects 200 et 300 et connaissent une diminution drastique de leur vitesse de migration au sud du transect 100. En considérant uniquement les ondulations de plage formées au nord du transect 200 et ayant migré au moins jusqu'au sud du transect 100 (soit 12 ondulations), le temps de résidence moyen est de 262 jours entre les transects 101 et 200 et de 313 jours entre les transects 1 et 100. Ainsi, la durée moyenne durant laquelle les principales ondulations du haut de plage ont persisté et migré le long des 2 derniers kilomètres les plus au sud de la pointe du Cap Ferret est de 18 à 19 mois. Enfin, l'analyse visuelle indique que les ondulations de plage présentent une gamme de valeurs d'emprise spatiale (parallèlement et perpendiculairement à la plage) qui n'a pas varié significativement au cours de la période 1984-2020.

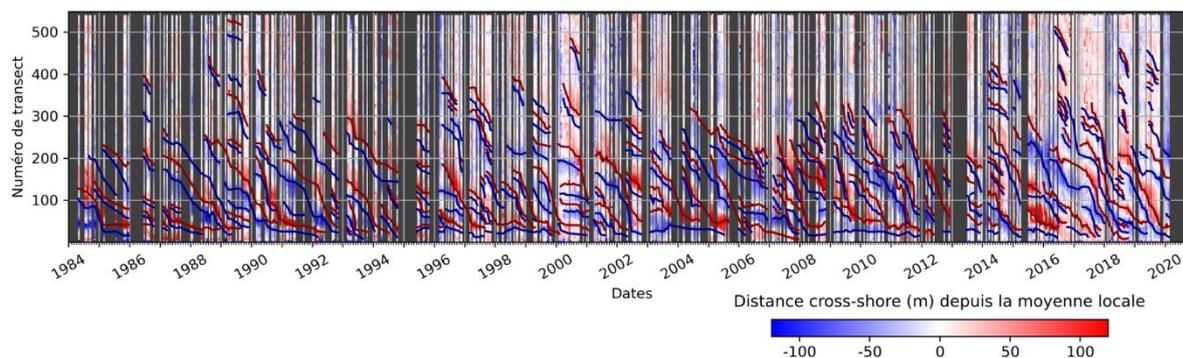


Figure 10 - Timestack présenté dans la Figure 9c avec une superposition des trajectoires spatio-temporelles des crêtes (courbes rouge foncé) et creux (courbes bleu foncé) des ondulations de plages qui ont été digitalisées manuellement.

Les valeurs des descripteurs d'ondulations de plage présentés dans la section méthode (emprises longshore et cross-shore, vitesse de migration) sont calculées pour chacune des lignes de crête aux dates auxquelles une limite sable sec / sable humide est définie. L'analyse statistique de ces valeurs pour différents secteurs de côte et pour les différentes saisons de l'année a permis de faire émerger quelques constats généraux sur les caractéristiques des ondulations de plage migrant le long de la pointe du Cap Ferret (Figure 11). Le littoral est découpé en secteurs de 50 transects du sud vers le nord (Figure 11, en abscisse), sauf pour le dernier secteur le plus au nord qui s'étend du transect 251 au transect 400 afin de disposer d'un échantillon suffisant pour une analyse statistique, compte-tenu du plus faible nombre d'ondulations de plage détectées au-delà du transect 250.

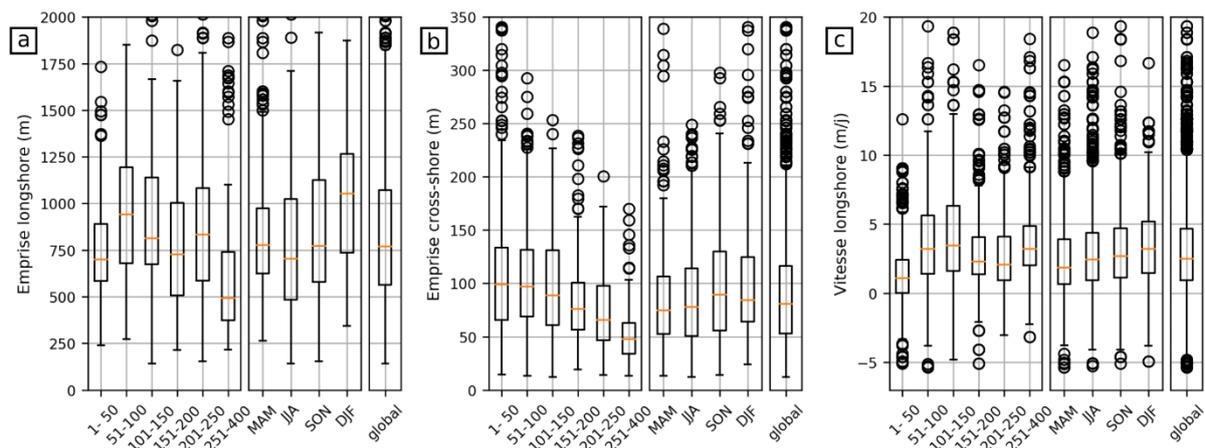


Figure 11 - Valeurs statistiques de l'emprise longshore (a) de l'emprise cross-shore (b) et de la vitesse longshore (c) des ondulations de plage calculées pour différents secteurs de côte (panel de gauche), pour différentes saisons de l'année (panel du centre) et toutes données confondues (panel de droite). Les saisons printemps, été, automne et hiver correspondent respectivement aux mois complets de mars-avril-mai, juin-juillet-août, septembre-octobre-novembre et décembre-janvier-février. La vitesse longshore est définie positive lorsque la crête de l'ondulation de plage se déplace vers le sud. Le trait orange dans les panels indique la valeur médiane.

Toutes saisons confondues, l'emprise longshore des ondulations de plage tend à augmenter du nord vers le sud avec des valeurs médianes de 493 m et 943 m dans les secteurs 251-400 et 51-100, respectivement (Figure 11a, panel de gauche). L'emprise longshore se réduit significativement ensuite dans le secteur 1-50, avec une valeur médiane autour de 700 m. Tous secteurs confondus, l'emprise longshore est plus faible du printemps à l'automne, avec des valeurs médianes saisonnières autour de 775 m, comparativement à la saison hivernale durant laquelle la valeur médiane est de 1052 m (Figure 11a, panel du centre).

Toutes saisons confondues, l'emprise cross-shore des ondulations de plage augmente constamment du nord vers le sud avec des valeurs médianes de 48 m et 97 m dans les secteurs 251-400 et 51-100, respectivement (Figure 11b, panel de gauche). L'emprise cross-shore reste ensuite similaire dans le dernier secteur 1-50. Tous secteurs confondus, l'emprise cross-shore augmente légèrement du printemps à l'automne et conserve sensiblement les mêmes ordres de grandeur ensuite en hiver (Figure 11b, panel du centre).

Toutes saisons confondues, la vitesse longshore des crêtes d'ondulations de plage diminue sensiblement au passage du secteur 251-400 vers le secteur 201-250 avec une valeur médiane qui passent de 3,2 m/jour à 2,1 m/jour (Figure 11c, panel de gauche). Cette vitesse augmente ensuite significativement dans les secteurs 101-150 et 51-100 où elle atteint 3,4 m/jour et 3,2 m/jour respectivement. Enfin, la vitesse longshore diminue significativement dans le secteur 1-50 avec une valeur médiane de 1,1 m/an. Tous secteurs confondus, la vitesse longshore des crêtes d'ondulations de plage augmente légèrement du printemps à l'hiver, avec des valeurs médianes saisonnières de 1,9 m/jour à 3,2 m/jour, respectivement (Figure 11c, panel du centre).

En résumé, les ondulations de plage détectées dans le nord de la zone d'étude migrant vers le sud semblent ralentir à partir du transect 250. Ce ralentissement semble associé à un accroissement significatif de l'emprise longshore et cross-shore. A mesure que les ondulations de plages migrent ensuite vers le sud vers une zone située autour du transect 100, leur vitesse longshore augmente de nouveau ainsi que leur emprise spatiale. Ensuite, au sud du transect 100, leur vitesse tend à diminuer en s'approchant de l'extrémité sud de la pointe du Cap Ferret. Cette évolution s'accompagne en premier lieu d'un allongement puis d'une réduction de l'emprise longshore des ondulations, tandis que leur emprise cross-shore reste relativement constante. Enfin, l'analyse saisonnière suggère que du printemps à l'automne l'emprise cross-shore des ondulations de plage augmente tandis que l'emprise longshore reste relativement stable. Puis en hiver, l'emprise longshore augmente significativement tandis que l'emprise cross-shore reste

relativement stable voire diminue très légèrement. Cette dynamique est corrélée avec un léger accroissement progressif de la vitesse du printemps à l'hiver.

L'existence de secteurs au sein desquels les ondulations de plage présentent des caractéristiques communes (Figure 11) permettent de proposer un découpage de la zone d'étude en 4 zones où les descripteurs sont qualifiés et synthétisés dans le Tableau 2.

Zone	Localisation (intervalle de transect)	Emprise longshore	Emprise cross-shore	Vitesse longshore
1	1-50	Intermédiaire	Elevée	Faible
2	51-150	Elevée	Elevée	Elevée
3	151-250	Intermédiaire	Intermédiaire	Intermédiaire
4	251-400	Faible	Faible	Elevée

Tableau 2 – Segmentation de la zone d'étude en 4 zones au sein desquels les ondulations de plage semblent présenter des caractéristiques communes

La Figure 11 montre cependant que les différences observées entre les distributions des valeurs de descripteurs classées par secteur ou par saison sont en général assez faible relativement à l'étalement des distributions. Cela suggère que les évolutions des ondulations de plage ne sont pas seulement contrôlées par leur position le long du littoral de la pointe du Cap Ferret, ou par la saison. D'autres mécanismes plus complexes se réalisant à des échelles de temps différentes sont impliqués.

Discussion

Limites et perspectives

Ce travail s'appuie sur des méthodes et des hypothèses qui présentent certaines limites et qu'il convient de prendre en compte pour l'interprétation des résultats.

En premier lieu, l'homogénéité des résultats de classification dépend fortement de l'homogénéité de la qualité et des caractéristiques des images satellite utilisées. Dans le cas d'images satellite de type « top-of-atmosphere » comme celles utilisées dans ce travail, il n'est pas rare d'avoir des variations sensibles de la dynamique des couleurs de différentes images acquises par un même capteur satellite. Il en résulte alors des erreurs potentielles de classification telles que la classification de zones de sable sec ou de dune végétalisée en zone de sable humide. Dans ce travail, il a été fait le choix de retirer manuellement les quelques images conduisant à des images classifiées visiblement erronées (e.g. présence de zones de sable humide ou sable très humide là où de la dune végétalisée est présente).

La comparaison de la position cross-shore de la limite sable sec / sable humide avec des données mesurées in situ révèle que cette limite permet en grande partie de s'affranchir des variations du niveau d'eau (sous l'effet principalement de la marée) lors de la prise de vue et peut être utilisée comme descripteur de la limite offshore du haut de plage. Cependant, la position de la limite sable sec /sable humide reste impactée par plusieurs facteurs environnementaux (niveau marin élevé, température, insolation et/ou vent favorisant l'assèchement de la plage par exemple) qui peuvent conduire à des erreurs de positionnement difficilement quantifiables de la limite offshore du haut de plage. Ces perturbations environnementales contribuent à l'aspect bruité qui se retrouve dans les séries temporelles et le timestack de la position cross-shore de la limite sable sec / sable humide présentés dans la Figure 8 et la Figure 9. De fait, il est vraisemblable qu'une part de la variabilité date à date de la position cross-shore de la crête des ondulations de haut de plage résulte de ces effets environnementaux. La méthode permet toutefois de limiter ces artefacts dans l'étude des évolutions spatiale et temporelle de cette limite sable sec / sable humide. En

effet, elle est réalisée (i) à partir d'une homogénéisation de l'interprétation de trois opérateurs de la trajectoire de chaque ondulation (de la position de la limite sable sec / sable humide, de sa continuité spatio-temporelle), et (ii) au travers d'une analyse statistique des descripteurs d'un échantillon de plusieurs ondulations de plage. Dans le cas où la variabilité date à date de tous les descripteurs serait finement étudiée, il conviendrait d'enrichir la base de données à l'aide d'images complémentaires acquises par d'autres satellites (ex : FORMOSAT-2, Landsat-7 dégradées) et/ou d'exclure les dates auxquelles les perturbations environnementales seraient significatives, ou encore, d'appliquer une correction basée par exemple sur la pente de plage (e.g. Vos *et al.*, 2019, Castelle *et al.*, 2021).

Rôle du forçage hydrodynamique

La variabilité des descripteurs du forçage hydrodynamique (vagues et marée) aux échelles mensuelle et saisonnière peut être explorée par la réalisation des boîtes à moustaches présentées dans la Figure 12.

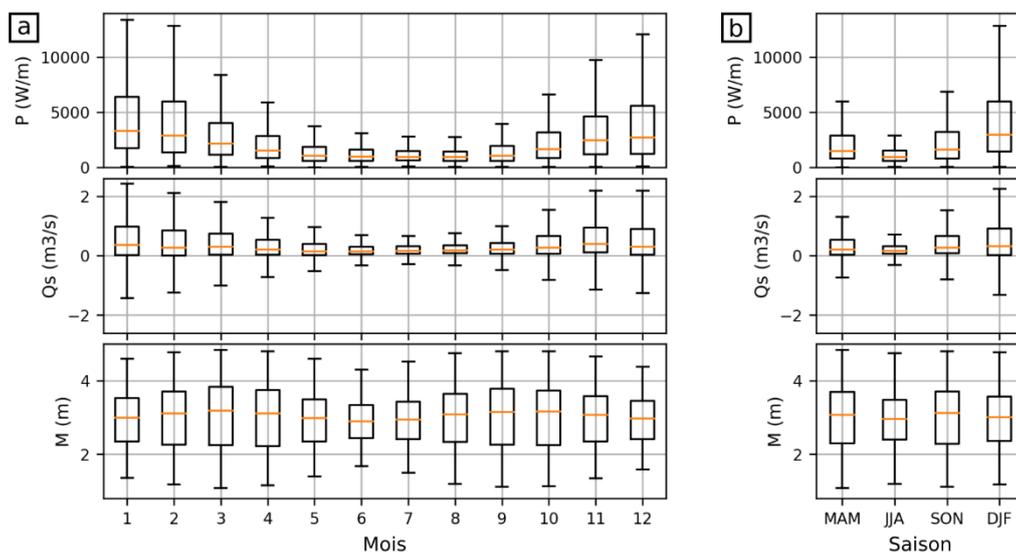


Figure 12 - Valeurs statistiques mensuelles (a) et saisonnières (b) de la puissance des vagues au large (haut), du transport sédimentaire longshore total au sein de la zone de surf et dans le nord de la zone d'étude (centre) et du marnage journalier maximum (bas). Les saisons printemps, été, automne et hiver correspondent respectivement aux mois complets de mars-avril-mai, juin-juillet-août, septembre-octobre-novembre et décembre-janvier-février. Le transport est défini positif lorsque le sable est transporté vers le sud du secteur. Le trait orange dans les panels indique la valeur médiane.

Cette analyse statistique appliquée à la puissance des vagues au large et au transport sédimentaire total longshore au nord de la zone d'étude, révèle une forte saisonnalité de ces deux descripteurs (Figure 12). La puissance des vagues est maximale en hiver, minimale en été et est modérée à l'automne et au printemps (Figure 12a). Le transport longshore est majoritairement dirigé vers le sud et suit le même cycle saisonnier que la puissance des vagues au large (Figure 12b).

En revanche, cette analyse appliquée aux données de marée montre que le marnage maximum journalier est maximisé au printemps et à l'automne, respectivement durant les mois de mars et de septembre, et qu'il est minimisé en été et en hiver, respectivement durant le mois de juin et de décembre (Figure 12a). Ainsi, l'intensité maximale des courants de marée lors du flot et du jusant à l'extrémité de sud de la pointe du Cap Ferret devraient suivre des variations mensuelles et saisonnières similaires.

Sur la côte aquitaine, sur les plages dominées par l'action des vagues, la variabilité saisonnière des conditions de vagues provoque une forte variabilité des volumes de sable positionnés en haut de plage (Castelle *et al.*, 2007, Nicolae Lerma et Bulteau, 2020). La migration préférentielle vers le sud des ondulations du haut de plage le long de la pointe du Cap Ferret (Figure 10, Figure 11c) résulte de la dominance d'un transport sédimentaire longshore dirigé vers le sud tout au long de l'année (Figure 12b).

L'intensification du transport longshore en hiver pourrait être un des facteurs conduisant à l'augmentation de l'emprise longshore et de la vitesse de migration des ondulations de plage constatée à cette saison. En période estivale, l'alimentation du haut de plage en sable (en lien avec des conditions de vagues moins énergétiques) pourrait expliquer l'augmentation de l'emprise cross-shore des ondulations de plage sur la période de l'été à l'automne (Figure 11b).

Cependant, ce mécanisme ne concernerait que la zone pleinement exposée aux vagues (*e.g.* au nord du transect 200), car à proximité de l'extrémité sud de la pointe du Cap Ferret, la dynamique des barres intertidales est impactée par les courants de marée.

Le rôle joué par la marée est plus délicat à mettre en évidence. Les analyses statistiques réalisées aux échelles mensuelle et saisonnière comme potentiel indicateur des courants de flot et de jusant au niveau de l'extrémité sud de la pointe du Cap Ferret ne permettent pas d'identifier un lien direct entre la marée et la dynamique spatio-temporelle des ondulations de plage. Il est toutefois vraisemblable que les courants de marée, une bathymétrie irrégulière et les ouvrages (i) empêchent les ondulations de plage de contourner l'extrémité sud de la pointe du Cap Ferret et (ii) diffusent au sein du delta de jusant une partie des volumes de sable apportés par les ondulations de plage à l'extrémité sud de la pointe.

Pour confirmer le rôle des courants (et du transport sédimentaire associé) induit par les vagues et la marée le long de la pointe du Cap Ferret, au gré des saisons, sur la dynamique spatio-temporelle des ondulations de plage, des analyses complémentaires et plus approfondies sont requises. Ces analyses devront toutefois se concentrer sur les périodes de temps où les intervalles de temps sans données sont courts (quelques semaines) relativement aux échelles de temps impliquées dans la dynamique des ondulations de plage.

Auto-organisation et disponibilité sédimentaire

Les faibles différences dans les distributions des descripteurs d'ondulation de plage (emprise longshore, emprise cross-shore et vitesse longshore de la crête) par secteurs et par saisons présentées dans la Figure 11, ainsi que l'absence de relation claire entre les facteurs de forçages et le comportement des structures sableuses considérées individuellement, suggèrent que d'autres mécanismes entrent en jeu dans la dynamique spatio-temporelle des ondulations de plage. L'analyse visuelle des images satellite et de la Figure 10 indique que les ondulations de plage sont issues des systèmes barres-bâines, dont les barres s'engraissent suffisamment pour se connecter au haut de plage. Au sein de la zone d'étude, les systèmes barres-bâines sont présents au nord du transect 200. Lors de leur migration vers le sud et notamment à l'approche de la zone incurvée (au sud du transect 150 où l'orientation du trait de côte évolue d'une direction N-S vers une direction O-E), l'évolution spatio-temporelle des ondulations de plage ne semble plus uniquement liée à la dynamique interne des systèmes barres-bâines auxquels elles sont associées. Cette auto-organisation des systèmes barres-bâines vers une dynamique plus complexe se traduit par une modification des caractéristiques des ondulations de plage (vitesses variables, évolutions morphologiques).

Par exemple, entre août 2018 et octobre 2018, on peut observer l'accolement d'une ondulation de plage de petite emprise située au niveau du transect 300 avec une de plus grande emprise située au niveau du transect 200, augmentant alors significativement l'emprise spatiale de cette dernière (Figure 13). De nombreux épisodes de coalescence de ce type ont pu être observés tout au long de la période d'étude. L'analyse visuelle des images satellite et de la Figure 10 montre aussi que les ondulations de plage qui atteignent l'extrémité sud-est de la zone d'étude, puis stagnent à ce niveau, ne disparaissent en général que lorsqu'une nouvelle ondulation se met en place dans les zones situées plus au nord et à l'ouest. Ces observations suggèrent qu'un contrôle notable puisse être exercé par la disponibilité en sédiments sur la dynamique spatio-temporelle des ondulations de plage situées en aval de la dérive littorale.

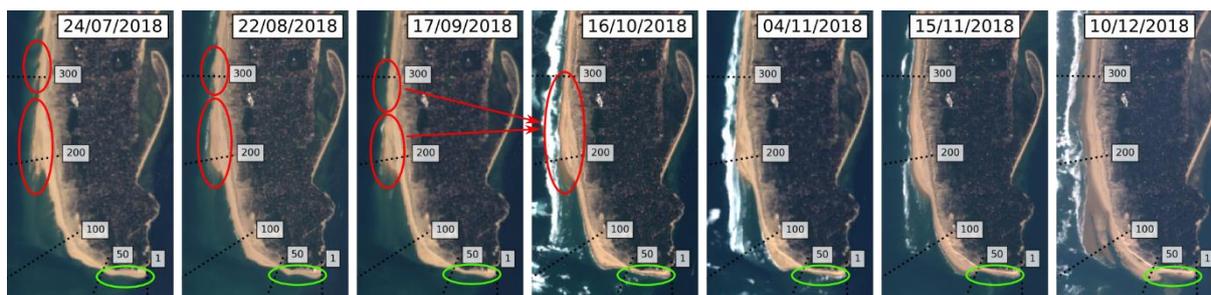


Figure 13 - Illustration d'interactions se produisant entre des ondulations de plage adjacentes le long de la pointe du Cap Ferret. Les cercles et flèches rouges localisent un phénomène d'accolement d'une petite ondulation de plage avec une autre dont l'emprise spatiale est supérieure. Les cercles verts indiquent le phénomène d'amaigrissement des ondulations du haut de plage situées en aval-dérive d'une ondulation de plage migrant à l'extrémité sud de la pointe.

Conclusion

La constitution et l'exploitation d'une base de données d'images satellite sur la pointe du Cap Ferret riches de 569 images a permis de retracer les évolutions spatio-temporelles de la limite au large du haut de plage entre avril 1984 et février 2020 et sur un linéaire d'environ 5,5 km. L'analyse de ces évolutions révèle la présence d'ondulations de plage (dans le plan horizontal) qui persistent dans le temps et qui migrent du nord jusqu'à l'extrémité sud de la pointe, où les volumes de sable transportés par ces structures sont ensuite diffusés en zone subtidale. L'origine de ces morphologies semble liée à la présence des systèmes barres-baines dont la structuration classiquement observée plus au nord de la zone d'étude est ici perturbée à l'approche de l'embouchure. Cette perturbation est imputée à de larges modifications des courants et des transports de sédiments associés depuis le nord vers le sud de la zone d'étude, en lien avec l'influence croissante des courants de marée de l'embouchure et les modifications morphologiques de l'avant-côte (delta de marée et orientation du trait de côte).

L'analyse de la limite sable sec / sable humide en tant que descripteur des ondulations de plage a permis de quantifier les caractéristiques morphologiques et la vitesse de migration de ces objets, en fonction de la saison et de leur localisation au sud de la pointe du Cap Ferret. Ces enseignements renforcent la connaissance empirique existante par l'apport de nouvelles données quantitatives basées sur 36 années d'observation.

Certaines composantes de la dynamique spatio-temporelle de ces ondulations de plage semblent être influencées par les forçages hydrodynamiques extérieurs (vagues et courants de marée). Toutefois, une part de leur dynamique apparaît attribuable à des processus d'auto-organisation générant un contrôle géomorphologique local sur l'extrême pointe.

Dans ce contexte, la seule considération des forçages hydrodynamiques extérieurs apparaît insuffisante pour expliquer précisément les évolutions des ondulations de plage présentes sur la pointe du Cap Ferret. Néanmoins, ce travail a permis de mieux connaître les caractéristiques des ondulations de plage, et permettra ainsi de mieux appréhender la dynamique de celles qui migreront le long de la pointe du Cap Ferret ces prochaines années. Les données et informations créées pourraient constituer un outil d'aide à la décision, de type recherche d'analogues d'une situation donnée, sur la base des situations et évolutions historiques des ondulations de plage, pour mieux anticiper leurs évolutions futures et optimiser la gestion du risque de recul du trait de côte qu'elles génèrent.

Références

Ashton, A.D., Murray, A.B., 2006. High-angle wave instability and emergent shoreline shapes: 1. Modeling of sand waves, flying spits, and capes. *Journal of Geophysical Research*, 111, F04011.

- Bossard, V., Nicolae Lerma, A., 2020. Geomorphologic characteristics and evolution of managed dunes on the South West Coast of France. *Geomorphology*, 367, 107312.
- BRGM, ONF, 2018. Atlas morphodynamique de la côte sableuse aquitaine. Rapport final, BRGM/RP-67152-FR, 280p.
- Butel, R., Dupuis, H., Bonneton, P., 2002. Spatial variability of wave conditions on the French Atlantic coast using in situ data. *Journal of Coastal Research, Special Issue 36*, 96–108.
- Castelle, B., Bonneton, P., Dupuis, H., Sénéchal, N., 2007. Double bar beach dynamics on the high-energy meso-macrotidal French Aquitanian Coast: A review. *Marine Geology*, 245, 141–159.
- Castelle, B., Marieu, V., Bujan, S., Splinter, K.D., Robinet, A., Senechal, N., Ferreira, S., 2015. Impact of the winter 2013-2014 series of severe Western Europe storms on a double-barred sandy coast: Beach and dune erosion and megacusp embayments. *Geomorphology*, 238, 135–148.
- Castelle, B., Bujan, S., Ferreira, S., Dodet, G., 2017. Foredune morphological changes and beach recovery from the extreme 2013/2014 winter at a high-energy sandy coast. *Marine Geology*, 385, 41–55.
- Castelle, B., Bujan, S., Marieu, V., Ferreira, S., 2020. 16 years of topographic surveys of rip-channelled high-energy meso-macrotidal sandy beach. *Scientific Data* 7, 410.
- Castelle, B., Masselink, G., Scott, T., Stokes, C., Konstantinou, A., Marieu, V., Bujan, S., 2021. Satellite-derived shoreline detection at a high-energy meso-macrotidal beach. *Geomorphology*, 383, 107707.
- Devanne T., 2020. Analyse de la dynamique de la plage et des barres sableuses à l'extrême pointe du Cap Ferret. Rapport de stage de fin d'études. 36p, 17 fig., 6 ann.
- Falqués, A., 2003. On the diffusivity in coastline dynamics. *Geophysical Research Letters*, 30, 2119.
- Komar, P.D., Inman, D.L., 1970. Longshore sand transport on beaches. *Journal of Geophysical Research*, 75(30), 5914–5927.
- Nicolae Lerma, A., Bulteau, T., 2020. Evolutions interannuelles et saisonnières des plages d'Aquitaine, pour la période 2008-2019 : analyse complémentaire des suivis DGPS et LiDAR. Rapport final, BRGM/RP-69870-FR.
- Observatoire de la côte de Nouvelle-Aquitaine, 2021 - Fiche de valorisation du stage de Thibault Devanne. Note OCNA NT_BDX-2021-001. 7 p., 7 fig.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., Lentz, S., 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Computers & Geosciences*, 28(8), 929-937.
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., Duchesnay, E., 2011. Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12(85), 2825–2830.
- Shom, 2017. Références altimétriques marines. Edition 2017.
- Vos, K., Splinter, K.D., Harley, M.D., Simmons, A., Turner, I.L., 2019. CoastSat: A Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. *Environmental Modelling & Software*, 122, 104528.