

Conditions et temporalités de la remise en mobilité des dunes de la cote girondine

Alexandre NICOLAE LERMA ¹, Bruce AYACHE ¹, Bruno CASTELLE ²,
David ROSEBERY ³, Vincent MARIEU ², Olivier BURVINGT ²,
Nicolas BERNON ¹, Julie BILLY ¹, Nicolas ROBIN ⁴

1. BRGM, Direction régionale Nouvelle-Aquitaine, Pessac, France.
a.nicolaelerma@brgm.fr
2. Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, EPOC, UMR 5805, Pessac, France.
3. Office National des Forêts, Paris, France.
4. Université de Perpignan Via-Domitia, Laboratoire CEFREM UMR 5110, Perpignan, France.

Résumé :

Les dunes sont des objets complexes des systèmes littoraux sableux, contrôlées par des mécanismes d'interactions multiples et non linéaires. Sur de nombreux secteurs dans le monde, et particulièrement en climat tempéré, les systèmes dunaires littoraux sont globalement stables et fixés. Néanmoins, sous certaines conditions (forçages marins et éoliens énergétiques, disponibilité sédimentaire modérée à forte, réduction du couvert végétal...) certaines dunes littorales peuvent se remobiliser. A partir d'un jeu de données constitués de Modèles Numérique de Terrain (MNT) issus de mesures LiDAR aéroportées, collectées en 2011 puis à fréquence annuelle sur près d'une décennie de 2014 à 2023, nous proposons une analyse des évolutions du cordon dunaire de la côte Girondine sur 85 km. Les résultats montrent que suite à une séquence d'érosion marine (hiver 2013-2014), le cordon dunaire a connu une mobilité importante à échelle décennale sous l'effet des flux éoliens, entraînant des réponses morphologiques variables spatialement. Ces réponses vont de la quasi-stabilité au passage de dunes fixes à transgressives le long de linéaires de plusieurs kilomètres. On observe que la remobilisation du cordon dunaire n'est pas conditionnée par la disponibilité sédimentaire, celle-ci pouvant aussi bien apparaître en contexte de forte disponibilité que sur des sites en érosion chronique où les apports sont quasi nuls. Face aux problématiques posées par l'immobilité des cordons dunaires littoraux (i.e. réduction voire disparition des cordons bordiers), l'érosion marine potentiellement associée à des actions de gestion (écrêtage, adoucissement des pentes) peut être considérée comme une opportunité pour la remise en mobilité des dunes de front de mer.

Mots-clés : Dune littorale, Solutions fondées sur la Nature, Expérimentation *in situ*, LiDAR, Nouvelle-Aquitaine

1. Introduction

Les dunes littorales réunissent de multiples rôles et services critiques, dit « écosystémiques », pour les communautés humaines et la biodiversité (BARBIER *et al.*, 2011). Ce sont des zones de préservation d'espèces spécifiques (e.g. DELGADO-FERNANDEZ *et al.*, 2019), les principaux remparts naturels contre les aléas littoraux (érosion et submersion, e.g., SALLENGER, 2000 ; NORDSTROM *et al.*, 2007) et des zones attractives pour les activités touristiques (EVERARD *et al.*, 2010). Ainsi, les dunes littorales sont reconnues comme un élément fondamental pour l'adaptation des sociétés, au carrefour des problématiques associées aux effets du changement climatique, à la réhabilitation de la biodiversité, à la protection contre les aléas et à la pression humaine liée à l'occupation croissante des espaces littoraux.

Sur le plan géomorphologique, les dunes sont des objets complexes des systèmes littoraux sableux. Ces accumulations de sédiments positionnées à l'interface terre-mer, communément observables sur l'ensemble des côtes sableuses dans le monde, sont soumises à la fois aux forçages marins et éoliens. Au sein des littoraux de climats tempérés, bien que les raisons soient multiples et pour certaines toujours en débat, les systèmes dunaires sont globalement stables et fixés par le développement de la végétation (GAO *et al.*, 2020). Il existe toutefois de nombreux exemples plus ou moins localisés de dunes mobiles transgressives y compris sur les littoraux des latitudes tempérées (i.e. dunes mobiles migrants en fonction du régime régional des vents, HESP 2013). Toutefois, dans les conditions climatiques contemporaines, les facteurs principaux conditionnant le passage à une dynamique de dune transgressive restent encore mal identifiés et peu évalués quantitativement (HESP *et al.*, 2022).

La région Nouvelle-Aquitaine de par l'étendue de ses côtes bordées de cordons dunaires, des collaborations étroites entre scientifiques et gestionnaires et de l'acquisition de mesures pérennes dans le cadre de l'Observatoire de la Côte de Nouvelle Aquitaine (OCNA), fait figure de territoire d'expérimentation pour la recherche de solution de gestion adaptative des cordons vulnérables face à l'érosion marine. Dans le cadre d'études sur les conditions de la remobilisation des cordons dunaires et afin d'étudier les évolutions induites par des séquences de mobilité éolienne consécutives à une séquence d'érosion marine (hiver 2013-2014), nous exploitons des mesures LiDAR aéroportées sur plus d'une décennie (2011 à 2023) sur l'ensemble de la côte de Gironde.

2. Site d'étude

Le cordon dunaire le long de la côte aquitaine s'étend en continue sur plus de 230 km. Héritage d'actions de gestion massives et ambitieuses, ses caractéristiques morphologiques et ses tendances d'évolution lors des dernières décennies sont très variées (BOSSARD & NICOLAE LERMA, 2020). La partie Girondine de la côte considérée ici depuis le sud de l'Anse du Gurg jusqu'à la pointe du Cap Ferret (cf.

Figure 1), soit 85 km, est caractérisée par un net gradient longitudinal Nord-Sud, s'exprimant au travers (i) des morphologies du cordon dunaire, (ii) des disponibilités sédimentaires, que (iii) des perturbations subit lors de la dernière décennie (NICOLAE LERMA *et al.*, 2022).

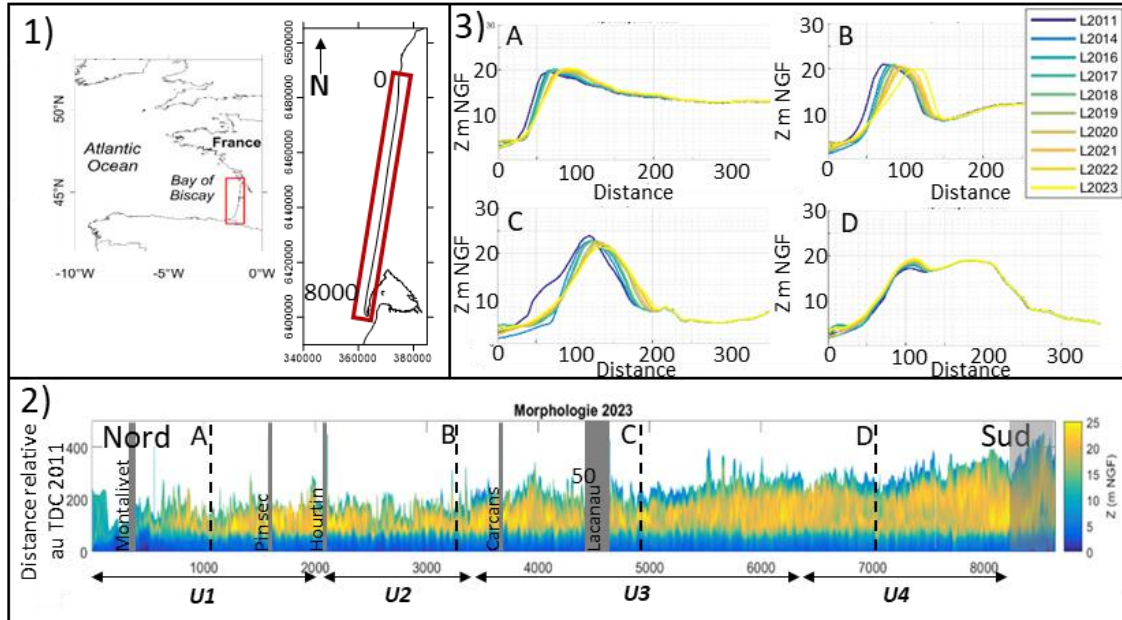


Figure 1. Localisation du site d'étude (1) et morphologie du cordon dunaire (2) le long de la côte Girondine. Le panel 3, décrit les évolutions morphologiques de profils dunaires type (A, B, C, D), localisés au sein de différentes unités (U) le long de la côte aux caractéristiques morphologiques homogènes.

3. Données et méthodes

Dans le cadre des activités de suivi des évolutions des côtes sableuses, l'Observatoire de la côte de Nouvelle Aquitaine (OCNA), acquiert et diffuse chaque année depuis 2016 et précédemment en 2014, un levé LiDAR en automne, couvrant l'ensemble de la bande littorale de Gironde. Associée à ces levés, des orthophotographies synchrones sont acquises. Précédemment, l'IGN avait réalisé la première acquisition LiDAR couvrant l'ensemble du linéaire de la région au printemps 2011. Ces différents millésimes d'acquisition ont permis de générer des Modèles Numérique de Terrain (MNT) de résolution 1 m et dont la précision verticale a été évaluée chaque année à partir d'une base de données de plusieurs centaines de points collectées indépendamment au D-GPS le long de l'ensemble du littoral (AYACHE & BILLERE, 2023). La précision obtenue pour ces données est globalement croissante dans le temps (Tableau 1) et est équivalente ou supérieure aux performances affichées classiquement pour ce type de données.

Tableau 1. Caractéristiques des données LiDAR exploitées.

<i>Campagnes</i>	<i>Acquisition</i>	<i>Précision Z (m)</i>	<i>Nombre de point minimal au m²</i>
<i>LiDAR 2011</i>	<i>Mai</i>	<i>0.20</i>	<i>8</i>
<i>LiDAR 2014</i>	<i>Octobre</i>	<i>0.14</i>	<i>8</i>
<i>LiDAR 2016</i>	<i>Octobre</i>	<i>0.16</i>	<i>8</i>
<i>LiDAR 2017</i>	<i>Octobre</i>	<i>0.11</i>	<i>8</i>
<i>LiDAR 2018</i>	<i>Octobre</i>	<i>0.10</i>	<i>12</i>
<i>LiDAR 2019</i>	<i>Décembre</i>	<i>0.10</i>	<i>16</i>
<i>LiDAR 2020</i>	<i>Octobre</i>	<i>0.08</i>	<i>16</i>
<i>LiDAR 2021</i>	<i>Octobre</i>	<i>0.09</i>	<i>16</i>
<i>LiDAR 2022</i>	<i>Octobre</i>	<i>0.10</i>	<i>16</i>
<i>LiDAR 2023</i>	<i>Septembre</i>	<i>0.08</i>	<i>16</i>

Les données LiDAR sont traitées sous la forme de transects perpendiculaires à la côte, espacés tous les 10 mètres le long de la côte Girondine (soit ≈ 8500 transects). Au sein de chaque transect sont calculés ou localisés différents indicateurs :

- position de l'isocontour 6 m NGF, considérée ici comme le trait de côte (TDC), à l'interface plage-dune pour chaque année ;
- position du revers interne (TRI), défini comme la rupture de pente entre la dune et l'arrière-pays lors de la dernière année traitée (ici 2023) ;
- volume de la dune (V), entre la position du pied de dune (6 m NGF) et la localisation du revers interne pour chaque année.
- mobilité brute (M) calculée telle que la différence brute cumulé (gain et perte) entre deux relevés topographiques au niveau du cordon dunaire (espace entre TDC et TRI).

L'analyse des données est présentée autour de 3 Séquences, 2011-2014 (S1), 2014-2108 (S2), 2018-2023 (S3) de la période complète 2011-2023 (Figure 2). Un découpage spatial en 4 unités (U1 à U4) le long du littoral est également utilisé pour mettre en évidence des comportements relativement homogènes lors des différentes séquences. On notera que le secteur $x > 8000$ (cf. Figure 1), correspondant à la partie distale de la pointe du Cap Ferret n'est pas commenté ici. Les évolutions complexes y sont particulières et relatives à l'influence de l'embouchure du bassin d'Arcachon sur la dynamique hydro-sédimentaire.

4. Résultats

4.1 Séquences d'évolution du système plage-dune

Le différentiel obtenu pour la première période S1, permet de mettre en évidence l'érosion marine des fronts dunaires apparue à la suite à l'hiver 2013-2014. On observe conformément aux travaux de CASTELLE *et al.*, 2017 et NICOLAE LERMA *et al.*, 2019, une érosion considérable ($DV_{2011-2014} \approx 7.5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$), associée un recul du TDC atteignant plusieurs dizaines de mètres sur l'ensemble de la côte girondine et dont la forme de type « méga cusp » est très marquée (Figure 2). On note, lors de cette séquence, que la mobilité au niveau des dunes sous l'effet des forçages éoliens est très modérée.

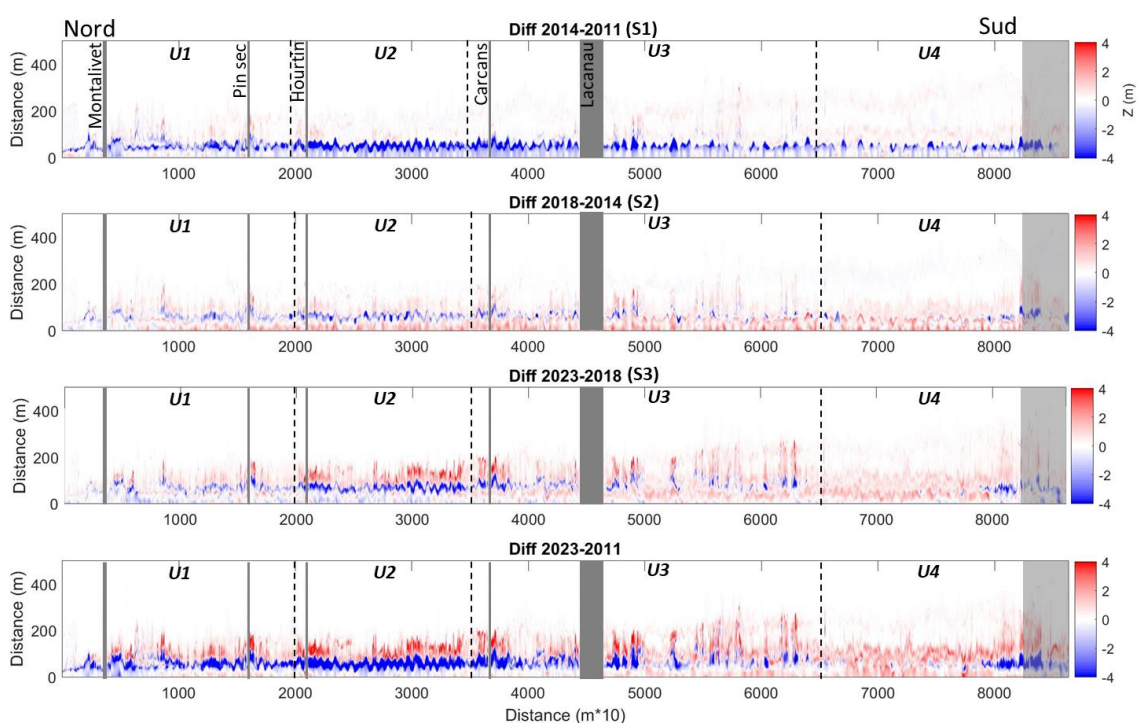


Figure 2. Différentiels topographiques du système haut de plage/dune depuis l'iso contours 2,5 m/NGF (\approx limite PHMA, Plus Hautes Marées Astronomiques) jusqu'à l'arrière-dune (TRI) pour les périodes S1, S2 et S3 ainsi que pour l'ensemble de la période d'étude 2011-2023.

Durant S2, on observe une accrétion considérable au niveau des hauts de plages avec pour U2-U3 et U4, une capacité à combler en grande partie les formes de baies issues de l'érosion observée lors de S1. Au total, cette reconstruction se traduit par un retour de volumes des sables équivalents aux érosions, à minima pour U3 et U4. Toutefois, à part quelques exceptions locales, les transferts de sable des hauts de plage aux dunes restent faibles.

Lors de S3, deux évolutions se démarquent. Au niveau des plages, U1 et U2 connaissent des situations contrastées alternant spatialement érosion ou accrétion alors que U3 et U4 poursuivent de manière uniforme une période d'accrétion au niveau du haut de plage.

Au niveau des dunes, on observe quatre situations différentes selon les unités. Pour U1, des transferts éoliens modérés associés à des érosions des crêtes dunaires et des accumulations en arrière de l'ordre du mètre sont observées. Pour U2, des évolutions nettement plus importantes caractérisées par des érosions des crêtes de front de mer et des accumulations en arrière de plusieurs mètres sont observées, principalement dans l'axe des baies issues de l'érosion lors de S1. Pour U3, le même type de comportement est constaté avec toutefois des érosions et des dépôts éoliens plus limités sauf en quelques localisations. Enfin, pour U4, on constate essentiellement de l'accumulation éolienne localisée au niveau de la partie avant du cordon dunaire (Figure 1, Profil D).

4.2 Mobilité du système dunaire

Le ratio entre M et V permet de déterminer la mobilité relative à une période de temps en indiquant la part du cordon dunaire ayant connu des évolutions morphologiques. La Figure 3 illustre cette mobilité relative aux séquences S1, S2 et S3 ainsi que pour la période complète d'étude 2011-2023.

Ainsi, on observe pour U1 entre 2011 et 2023, une mobilité en moyenne de 10,7 %, mais très variable spatialement, comprise entre 2 et 40 % ou plus localement. Elle est principalement liée à l'érosion marine (S1) en particulier, pour les secteurs les plus mobiles. Plus généralement, l'évolution au cours des trois séquences est relativement comparable. Les évolutions morphologiques sont relativement limitées et consistent le plus souvent en des accumulations en arrière de la crête (voir Figure 1 profil A).

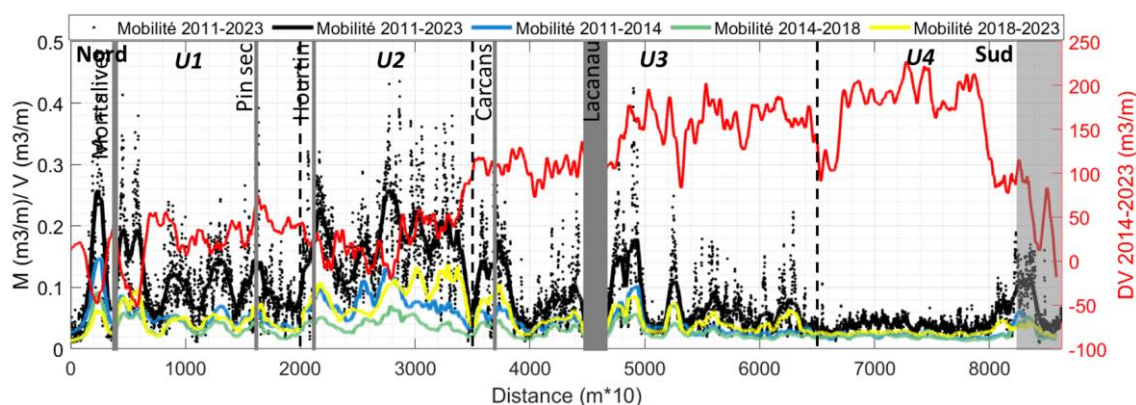


Figure 3. Ratio mobilité dunaire (M) versus volume dunaire (V) relatif aux différentes périodes de temps étudiées et évolutions des volumes dunaires sur la période S2+S3 le long du littoral. Les points représentent la mesure par profils et les courbes des moyennes glissantes sur 1 km.

Le secteur U2, est celui qui connaît la plus forte mobilité relative en moyenne (17,5 %). Celle-ci peut atteindre 25 % du volume dunaire et même 35 à 40 % localement. Avec une grosse partie de l'évolution causée par l'érosion marine puis une mobilité liée au

processus éoliens, d'abord de manière limitée lors de la période S2, puis considérablement accentuée lors de S3. Sur de nombreuses parties de ce secteur, les dunes ont adopté un profil de dune transgressive et connaissent ainsi des évolutions morphologiques importantes et des rythmes de migration de plusieurs mètres par an (cf. Figure 1 profil B).

Le secteur U3, présente également des situations très contrastées avec des secteurs stables et des secteurs parmi les plus mobiles de la côte girondine (entre 30 et 40 % du volume dunaire mobilisé, cf. Figure 1, profil C). Plus généralement, la mobilité moyenne est de 7,4% et est relativement régulière lors de période S1, S2 et S3.

Enfin, le secteur U4, connaît très peu de mobilité relative (en moyenne 3,7 %) principalement du fait des dimensions importantes des édifices dunaires. L'accumulation de sédiment sur ces secteurs entraîne toutefois des évolutions morphologiques notables caractérisées par l'accumulation en arrière de la crête de dune constituant progressivement un bourrelet (cf. Figure 1, profil D).

4.3 Bilan sédimentaire des dunes

Sur l'ensemble de la période 2011-2023, on observe des bilans sédimentaires considérablement différents le long de la côte. Pour U1 et U2, les bilans sont négatifs du fait de l'érosion marine lors de S1 et de faibles capacités d'accumulation par transfert éolien avec respectivement pour les périodes S1 (S2+S3) des valeurs de $-48,8 \text{ m}^3/\text{m}$ ($+13,4 \text{ m}^3/\text{m}$) et de $-120,2 \text{ m}^3/\text{m}$ ($+3,2 \text{ m}^3/\text{m}$). Pour U3, le bilan est légèrement positif du fait d'une accumulation éolienne importante $-55,9 \text{ m}^3/\text{m}$ ($+94,4 \text{ m}^3/\text{m}$). Enfin pour U4, le bilan est largement positif avec $-7,3 \text{ m}^3/\text{m}$ ($+122,6 \text{ m}^3/\text{m}$) témoignant d'une érosion plus faible lors de S1 et d'une forte capacité à l'accumulation lors de S2 et S3. Cette accumulation est par ailleurs favorisée par une disponibilité sédimentaire forte au niveau des hauts de plages (NICOLAE LERMA *et al.*, 2022).

En considérant, en parallèle de M, DV entre 2014 et 2023 (Figure 3), on peut observer le très net gradient Nord-Sud de l'accumulation de sable sur le cordon dunaire. On constate ainsi que la mobilité du cordon dunaire est décorrélée de l'apport en sable avec des dunes adoptant des comportements de dunes transgressives de manière relativement indépendante de l'apport de sable issu de transferts éoliens. Ceci souligne que la migration du cordon et en particulier l'évolution progressive en dune transgressive n'est pas conditionnée par l'apport en sable nouveau.

3. Discussion et conclusion

Le long de la côte girondine, la réponse du cordon dunaire à la fois à l'érosion marine et aux flux éoliens est très contrastée spatialement. La remise en mobilité allant jusqu'à l'état de dune transgressive, répond par ailleurs à des temporalités variées. De manière plus contrastée que ce qui est conclu dans des études récentes (HESP *et al.*, 2022 ; ROBIN *et al.*, 2023), qui évoquent que dans les conditions climatiques contemporaines,

le facteur principal conditionnant le passage à une dynamique de dune transgressive est la disponibilité ou l'apport de sédiment, postérieur ou non, à un ou des épisodes d'érosions marines des fronts dunaires, on constate qu'à minima le long de 15-20 kilomètres (U2) le passage à une évolution de type dunes transgressives, n'est pas associée à des apports sédimentaires conséquents. Toutefois, cette dynamique de « rollover » n'est pas uniquement associée à une remobilisation des stocks en place (cannibalisation) mais peut également, comme observé plus classiquement, être associée à l'augmentation progressive des volumes de la dune (notamment au sein du secteur U3). On observe qualitativement 4 étapes communes pour les secteurs passant de dunes fixes à transgressives :

- la déstabilisation par l'érosion marine (S1)
- la reconnexion des flux sédimentaires entre la plage et le haut de la dune (S2)
- l'éolisation du plateau et de l'arrière de la dune associé au déclin de la végétation par la perturbation éolienne (S2-S3) ;
- le transfert des stocks sédimentaires vers le revers de dune entraînant la migration vers l'intérieur des terres (S3)

De nombreux aspects restent à approfondir afin de mieux évaluer quantitativement le rôle des facteurs biotiques (couverture et type de végétation), et abiotiques (forme des dunes, pente, granulométrie, intervention des gestionnaires...) favorisant ou limitant la remise en mobilité. On constate toutefois que face aux problématiques posées par l'immobilité du cordon dunaire (recul chronique du trait de côte), une séquence d'érosion marine potentiellement associée à des actions de gestion spécifiques (écrêtage, adoucissement des pentes), peut être considérée comme une opportunité pour la remise en mobilité des cordons dunaires. Ces résultats offrent des perspectives importantes dans la cadre d'une gestion adaptative des cordons vulnérables face à l'érosion marine.

4. Remerciements

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du Projet DUNES « Espaces des transitions » cofinancé par la convention de Recherche Région Nouvelle Aquitaine-BRGM. Nos remerciements vont également aux co-financeurs du projet et à l'OCNA pour la mise à disposition des données.

5. Références bibliographiques

BARBIER E.B., HACKER S.D., KENNEDY C., KOCH E.W., STIER A.C., SILLIMAN B.R. (2011). *The value of estuarine and coastal ecosystem services*. Ecological monographs, 81(2), 169-193.

BOSSARD V., NICOLAE LERMA A. (2020). *Geomorphologic characteristics and evolution of managed dunes on the South West Coast of France*. Geomorphology, 367, 107312.

- 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.
- DELGADO-FERNANDEZ I., DAVIDSON-ARNOTT R.G., HESP P.A. (2019). *Is 're-mobilisation' nature restoration or nature destruction? A commentary*. *Journal of Coastal Conservation*, 23, 1093-1103.
- EVERARD M., JONES L., WATTS B. (2010). *Have we neglected the societal importance of sand dunes? An ecosystem services perspective*. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 20(4), 476-487.
- GAO J., KENNEDY D.M., KONLECHNER T.M. (2020). *Coastal dune mobility over the past century: A global review*. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 44(6), 814-836.
- HESP P.A. (2013). *Conceptual models of the evolution of transgressive dune field systems*. *Geomorphology*, 199, 138-149.
- HESP P.A., DA SILVA M., MIOT DA SILVA G., BRUCE D., KEANE R. (2022). *Review and direct evidence of transgressive aeolian sand sheet and dunefield initiation*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 47(11), 2660-2675.
- NICOLAE LERMA A., CASTELLE B., MARIEU V., BULTEAU T., BERNON N., ROBINET A., MALLET C. (2022), *Decadal beach-dune profile monitoring along a 230-km high-energy sandy coast : Aquitaine, southwest France*. *Applied Geography*, 139, 102645.
- NICOLAE LERMA A., AYACHE B., ULVOAS B., PARIS F., BERNON N., BULTEAU T., MALLET C. (2019). *Pluriannual beach-dune evolutions at regional scale: Erosion and recovery sequences analysis along the Aquitaine coast based on airborne LiDAR data*. *Continental Shelf Research*, 103974
- NORDSTROM K.F., JACKSON, N.L., HARTMAN J.M., WONG M. (2007). *Aeolian sediment transport on a human-altered foredune*. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 32(1), 102-115.
- ROBIN N., BILLY J., NICOLAE LERMA A., CASTELLE B., HESP P.A., ROSEBERY D., MIOT DA SILVA G. (2023). *Natural remobilization and historical evolution of a modern coastal transgressive dunefield*. *Earth Surface Processes and Landforms*. Volume48, Issue5, Pages 1064-1083
- SALLENGER JR A.H. (2000). *Storm impact scale for barrier islands*. *Journal of coastal research*, 890-895.