



Erosion et régénération des cordons dunaires le long de la façade Atlantique européenne

Olivier BURVINGT¹, Bruno CASTELLE¹, Vincent MARIEU¹

1. Université de Bordeaux, UF Sciences de la Terre et Environnement, UMR CNRS
5805 EPOC. Allée Geoffroy Saint-Hilaire, CS 50023, 33615 Pessac, France.
olivier.burvingt@u-bordeaux.fr

Résumé :

Comprendre l'évolution passée et future des cordons dunaires représente à la fois un enjeu scientifique mais également sociétal et économique puisque que ces dunes représentent des barrières naturelles face à la submersion marine et au recul du trait de côte. En s'appuyant sur une importante base de données LiDAR aéroportées couvrant plusieurs années marquées par des tempêtes extrêmes, cette étude permet d'étudier les périodes d'érosion et de reconstruction des cordons dunaires dans un contexte de tempêtes extrêmes à l'échelle du littoral Atlantique européen.

Huit cordons dunaires, s'étendant du nord-ouest de l'Angleterre au sud-ouest de la France et fortement exposés aux vagues des tempêtes de l'hiver 2013/2014, furent sélectionnés pour cette étude. La comparaison quantitative et qualitative des réponses dunaires a montré que les caractéristiques du système de barres sableuses d'avant côte et la morphologie des dunes avaient un rôle prépondérant dans l'uniformité et l'amplitude des processus d'érosion. Les résultats de cette étude ont également montré que les taux et vitesses de reconstruction sont très variables parmi les huit sites d'étude six ans après les tempêtes (de 29 à 100%). La reconstruction dunaire peut prendre différentes formes, avec un retour progressif du profil de dune à l'état pré-tempête, ou une translation du profil de dune en hauteur. Les modalités de reconstruction de ces dunes, qui doivent encore être approfondies, apportent de précieuses informations quant aux possibilités d'adaptation d'une partie des cordons dunaires européens à la montée du niveau marin et à une possible fréquence accrue d'événements de tempête.

Mots-clés :

Environnement littoral, Cordons dunaires, Dynamique sédimentaire, Tempêtes extrêmes.

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

1. Introduction

Les cordons dunaires représentent des zones d'intérêt quant à l'évaluation des risques côtiers car ils représentent des barrières naturelles face à la submersion marine et au recul du trait de côte. De plus, ce sont généralement des espaces naturelles qui jouent un rôle important pour la biodiversité (refuges pour invertébrés et petits mammifères, nidification, etc.) (GROOTJANS *et al.*, 2008). Malgré l'intérêt scientifique qui a été porté à ces environnements côtiers lors des dernières décennies (PYE, 1983 ; HESP & WALKER, 2013, VAN IJZENDOORN *et al.*, 2021), la compréhension de la dynamique sédimentaire le long des cordons dunaires reste incomplète et nécessite d'être approfondie afin de mieux appréhender leur évolution future. Cette étude a pour objectif d'étudier l'érosion et la reconstruction de différentes dunes suite à des événements extrêmes de tempête. Pour la première fois, l'analyse de la dynamique des cordons dunaires est faite à l'échelle européenne en s'appuyant sur des données de LIDAR aéroportées collectées le long de divers cordons dunaires localisés sur le pourtour du littoral atlantique européen. Ces données collectées entre 2011 et 2020 englobent les tempêtes de l'hiver 2013/14, période mesurée comme la plus énergétique depuis au moins 1948 (MASSELINK *et al.*, 2016).

2. Méthodologie

2.1 Sites d'études

Huit sites d'études comportant des cordons dunaires localisés sur la façade atlantique européenne ont été sélectionnés en fonction de la disponibilité des données LiDAR (tableau 1), et de leur exposition aux vagues incidentes des tempêtes circulant le long des côtes atlantiques européennes (ouest, nord-ouest). Trois sites sont situés dans le nord-ouest (Formby, Merseyside) et sud-ouest de l'Angleterre (Penhale et Gwithian, Cornwall), et 5 sites sont situés dans le nord-ouest (Notre-Dame-de-Monts, Vendée) et le sud-ouest de la France (Carcans, Lacanau et Truc Vert en Gironde ; Lette Blanche dans les Landes) (figure 1). Ces différents cordons dunaires offrent une grande diversité en termes de largeur (de 100 à 300 m), de hauteur (de 15 à 60 m), de forme et de végétation, donnant l'opportunité d'étudier la dynamique sédimentaire des cordons dunaires sur un large spectre d'environnement côtiers.



Figure 1. Localisation des huit sites d'étude en Angleterre et en France ; Photographies aériennes de trois d'entre eux : (a) Formby beach (© National Trust); (b) Penhale (©South West Coast Path - a photo tour); (c) Lacanau (©Danièle Schneider).

Tableau 1. Sites d'étude et dates d'acquisition des données LiDAR.

Sites d'étude	Dates d'acquisition des données LiDAR
Formby (Merseyside, UK)	2013, 2014, 2016, 2017, 2018, 2020
Penhale (Cornwall, UK)	2012, 2014, 2016, 2017, 2018
Gwithian (Cornwall, UK)	2012, 2014, 2016, 2017, 2019, 2020
Notre-Dame-des-Monts (Vendée, France)	2013, 2015, 2017, 2018, 2019, 2020
Carcans (Gironde France)	2011, 2014, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020
Lacanau (Gironde, France)	2011, 2014, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020
Truc vert (Gironde, France)	2011, 2014, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020
Lette Blanche (Landes, France)	2011, 2014, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020

2.2 Données LiDAR aéroportées

Les données LiDAR aéroportées ont été utilisées dans de nombreuses études sur la dynamique sédimentaire lors des deux dernières décennies (SALLENGER *et al.*, 2001;

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

BURVINGT *et al.*, 2017 ; NICOLAE-LERMA *et al.*, 2019). Elles offrent notamment l'avantage de couvrir de larges étendues de plages et de dunes permettant une analyse d'ensemble des systèmes côtiers. Des modèles numériques de terrains, d'une résolution spatiale de 1 m, sont créés à partir de l'interpolation des données LiDAR pour chaque campagne de mesures. Ces modèles ont une précision verticale comprises entre 10 et 15 cm (SALLENGER *et al.*, 2001 ; NICOLAE-LERMA *et al.*, 2019), offrant une marge d'erreur appropriée pour l'analyse de processus sédimentaires côtiers sur une échelle de temps annuelle, comme c'est le cas dans cette étude. Les plages des différents sites étudiés présentent une dynamique sédimentaire saisonnière avec une alternance de périodes d'érosion en hiver et de périodes de régénération en été. Etant donné que les campagnes LiDAR ne sont pas toujours réalisées à la même saison, les différents MNT ont été tronqués pour n'inclure que le haut de plage et les cordons dunaires, ces zones présentant des variations saisonnières négligeables comparées aux variations annuelles. Les données utilisées pour cette étude couvrent la période de 2011 à 2020 (tableau 1) et sont en libre accès dans le cadre de programmes régionaux ou nationaux sur le suivi des environnements côtiers (*Environment Agency - National LIDAR Programme, National Network of Regional Coastal Monitoring Programmes of England, Observatoire des Sciences de l'Univers de Nantes Atlantique, Observatoire de la Côte Nouvelle Aquitaine*).

2.3 Variables topographiques

Afin d'étudier la réponse des cordons dunaires aux tempêtes extrêmes et leur régénération, trois variables ont été sélectionnées : le volume de sédiment par mètre linéaire V (m^3/m), la position cross-shore du pied de dune X_{pied} (m), et l'élévation de la crête de dune $Z_{\text{crête}}$ (m). Ces variables sont calculées à partir de chaque MNT correspondant à une campagne de relevés LiDAR, permettant l'obtention de séries multi-annuelles pour chaque site d'étude.

La forte hétérogénéité des cordons dunaires rendant difficile l'extraction automatique de ces variables, les valeurs de ces variables ont été extraites manuellement sur des séries de transects espacés de 50 m le long des huit sites d'étude. Les valeurs sont ensuite moyennées sur l'ensemble du cordon dunaire.

3. Résultats

3.1 Evolution multi-annuelle

Les séries multi-annuelles de volume de sédiment par mètre linéaire V (m^3/m), de position cross-shore du pied de dune X_{pied} (m), et de l'élévation de la crête de dune $Z_{\text{crête}}$ (m) montrent que les tempêtes extrêmes de l'hiver 2013/2014 ont eu un fort impact sur l'ensemble des cordons dunaires étudiés ici (figure 2).

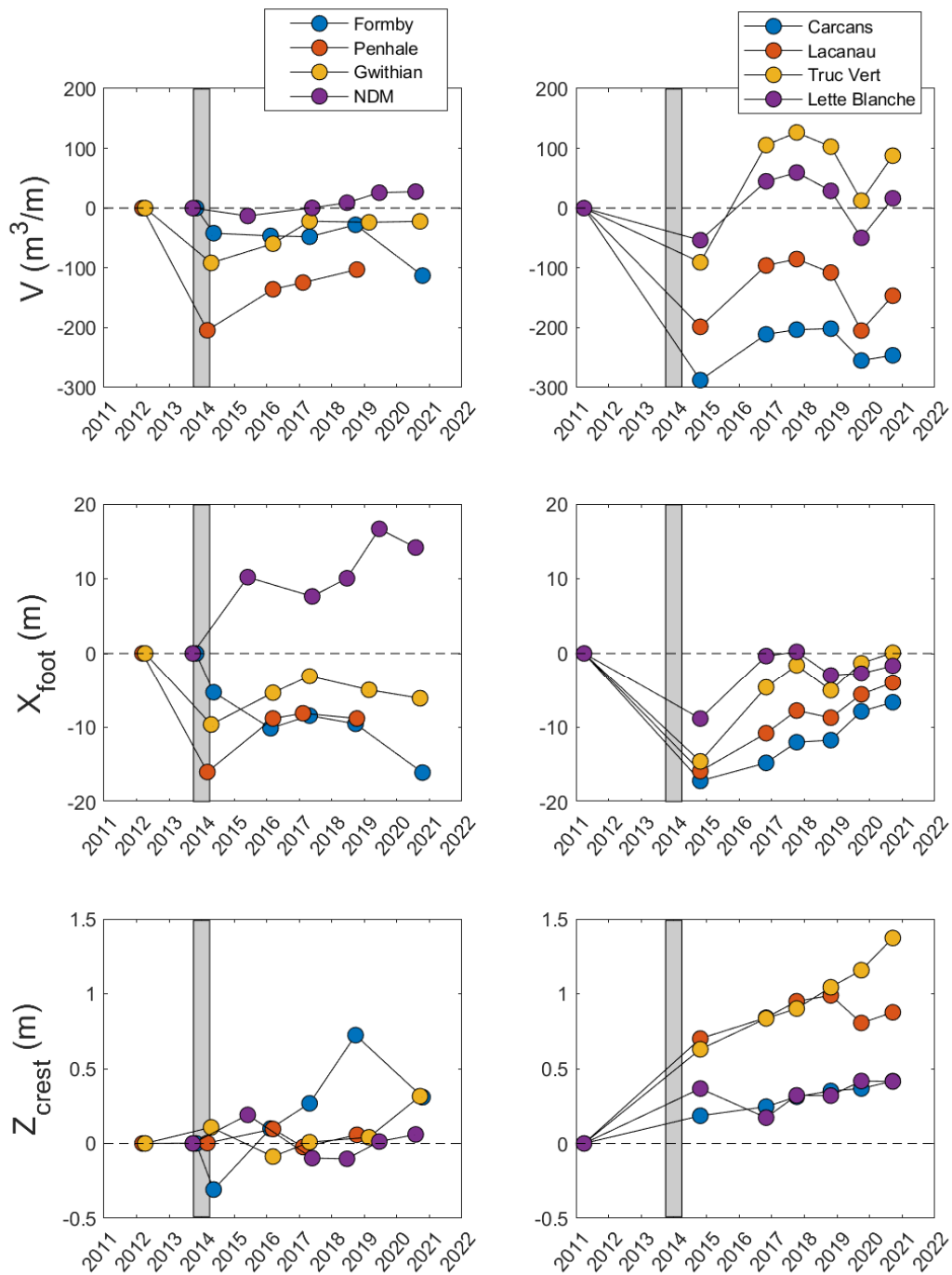


Figure 2. Séries temporelles de volume de sédiment par mètre linéaire V (m^3/m), de position cross-shore du pied de dune X_{pied} (m), et de l'élévation de la crête de dune $Z_{crête}$ (m) des huit sites d'étude pour la période 2011-2020. Une bande grise a été ajoutée pour marquer l'hiver 2013-2014.

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

Les cordons dunaires ont perdu entre -20 et -300 m³/m et ont reculé de 5 à 20 m, mis à part les dunes de Notre-Dame-de-Monts qui ont avancé de 10 m. L'élévation des crêtes de dunes est restée relativement stable pour les sites localisés au sud-ouest de l'Angleterre et a diminué à Formby (-0,4 m). En revanche, une augmentation de la hauteur de crête de 20 à 70 cm a été observée le long de tous les cordons dunaires des sites français. Ces événements de tempêtes ont eu un impact durable sur les cordons dunaires sélectionnés pour cette étude puisque certains sites ne présentent pas ou peu de régénération lors des 6 années suivant ces événements. Le cordon dunaire situé à Formby beach a continué de reculer et s'érodé tandis les deux autres cordons dunaires situés en Angleterre ont amorcé une reconstruction plus moins complète, avec une récupération de 44 % du volume sédimentaire 4 ans après à Penhale, et de 71 % du volume 6 ans après à Gwithian. A Notre-Dame-de-Monts, la régénération fut totale trois ans suivant les événements de tempête. Les sites du Truc Vert et Lette Blanche ont récupéré encore plus rapidement et ont même vu leurs volumes sédimentaires augmenter par rapport aux volumes pré-tempêtes. A contrario, les cordons dunaires de Carcans et Lacanau ont récupéré seulement 29 et 57 % des volumes perdus lors des 3 années suivant les événements de tempête, avant que de nouveaux phénomènes d'érosion fassent disparaître les volumes recouverts. Des tendances similaires sont observables concernant la position du pied de dune pour chaque site d'étude tandis que l'évolution des hauteurs de crête varie fortement. Aucune réelle tendance ne peut être observée pour l'évolution de la hauteur de crête des cordons dunaires en Angleterre et à Notre-Dame-de-Monts les années suivant les événements de tempête tandis que les hauteurs sont restées stables (Carcans et Lette Blanche) ou ont continué d'augmenter de 0,5 à 1 m (Lacanau et Truc Vert) le long du littoral Aquitain.

3.2 Réponses des cordons dunaires aux tempêtes extrêmes

La comparaison des MNT pré- et post-tempêtes permet d'identifier différents types de réponses morpho-sédimentaires de cordons dunaires aux tempêtes extrêmes parmi les sites étudiés. La première différence majeure réside dans la variabilité longshore de ces réponses. Les sites de Formby, Penhale, Gwithian et Notre-Dame de-Monts présentent une réponse relativement uniforme sur l'ensemble du cordon dunaire (figure 3). En revanche, la réponse des cordons dunaires situés en Nouvelle-Aquitaine (Carcans, Lacanau, Truc Vert, Lette Blanche) montrent une forte variabilité longshore avec une alternance de zones de forte érosion donnant à la dune une forme concave, et de zones où la dune ne montre pas ou peu de marques d'érosion (figure 3).

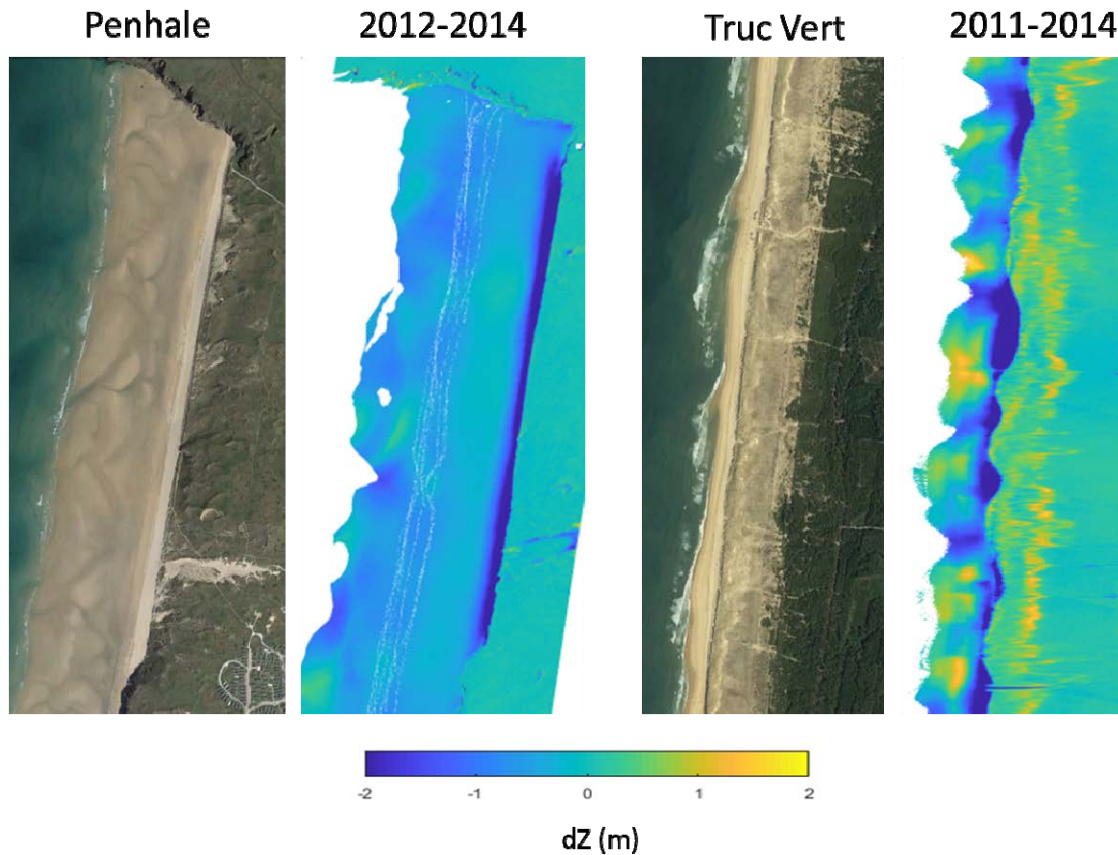


Figure 3. Images satellitaires et différentiels de MNT LiDAR pré-tempête (2011-2012) et post-tempête (2014) de deux sites d'étude (Penhale et Truc vert).

La seconde différence majeure observée dans le type de réponse morpho-sédimentaire aux tempêtes extrêmes est principalement due à la hauteur du cordon dunaire. Dans le cas de cordons dunaires relativement bas dont la crête est aux environs d'une dizaine ou quinzaine de mètres (Formby, Notre-Dame de Monts), cette crête est soit érodée par effet d'avalanche (Formby) (figure 4), ou elle recule de quelques mètres par effet de translation complète de l'ensemble du cordon dunaire (Notre-Dame-de-Monts) (figure 4). Concernant les cordons dunaires dont la crête est supérieure à une vingtaine de mètres (Penhale, Gwithian, Carcans, Lacanau, Truc Vert, Lette Blanche), cette dernière n'est pas affectée par l'érosion qui se concentre sur le pied et face de la dune (figure 4). Le pied de dune recule tandis que la pente de la face de dune devient plus abrupte produisant un escarpement le long du cordon dunaire.

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

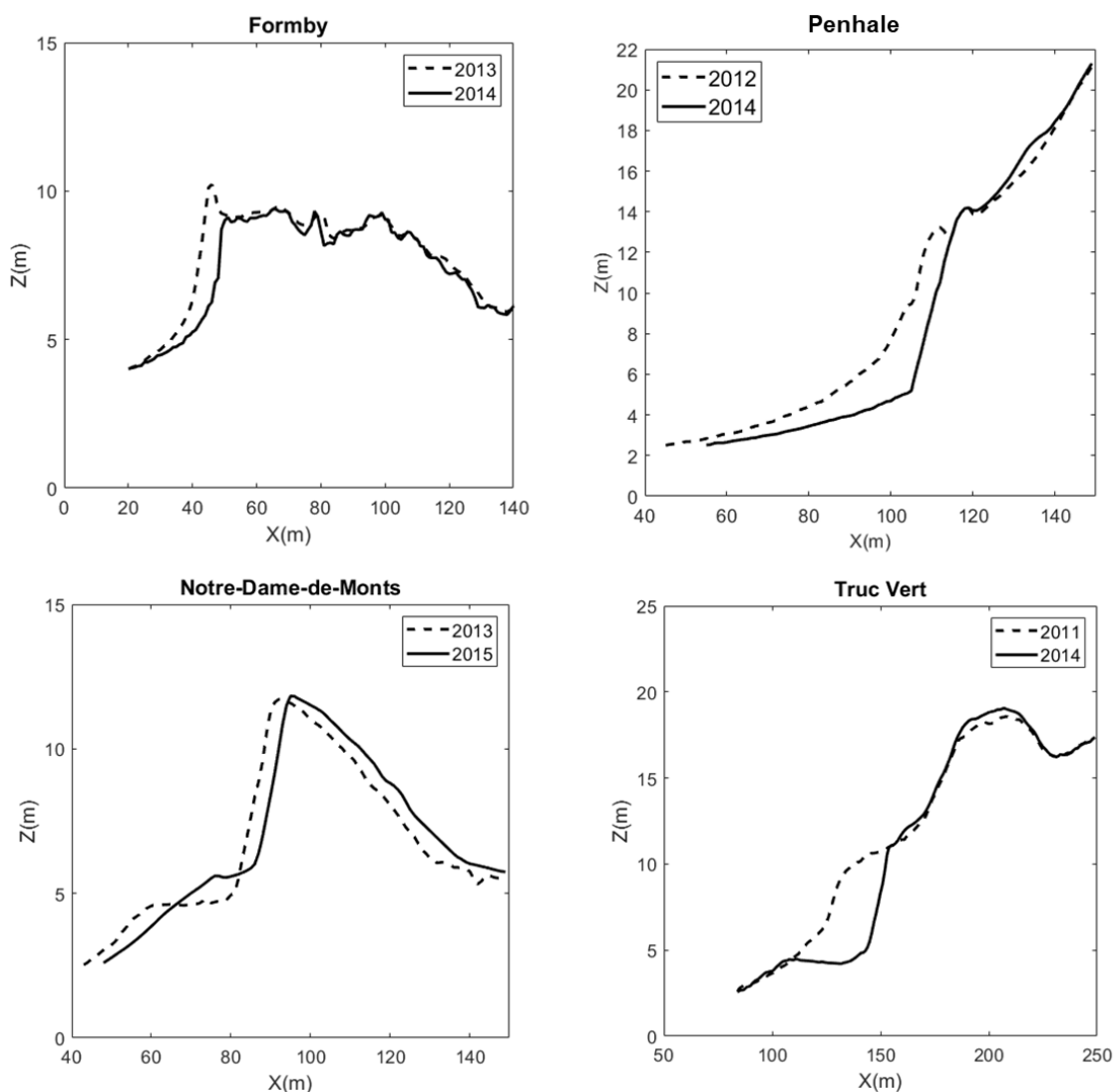


Figure 4. Profils pré-tempêtes (2011, 2012, 2013) et post-tempêtes (2014, 2015) représentatifs de 4 sites d'étude (Formby, Penhale, Notre-Dame-de-Monts et Truc Vert).

3.3 Régénération des cordons dunaires

L'étude des séries temporelles pluri-annuelles ont montré de grandes variations en termes de reconstruction parmi les cordons dunaires étudiés. Contrairement aux autres sites, le cordon dunaire situé à Formby ne montre aucune régénération et est en érosion chronique. Concernant les sites du sud-ouest de l'Angleterre (Penhale, Gwithian), la reconstruction du cordon dunaire se limite au pied et à la partie basse du versant dunaire (figure 5), ressemblant à un retour graduel vers une configuration pré-tempête. En revanche, la reconstruction des cordons dunaires de la côte Aquitaine (Carcans, Lacanau, Truc Vert, Lette Blanche) s'apparente à un exhaussement de la crête de dune au détriment d'un raidissement de la face avant.

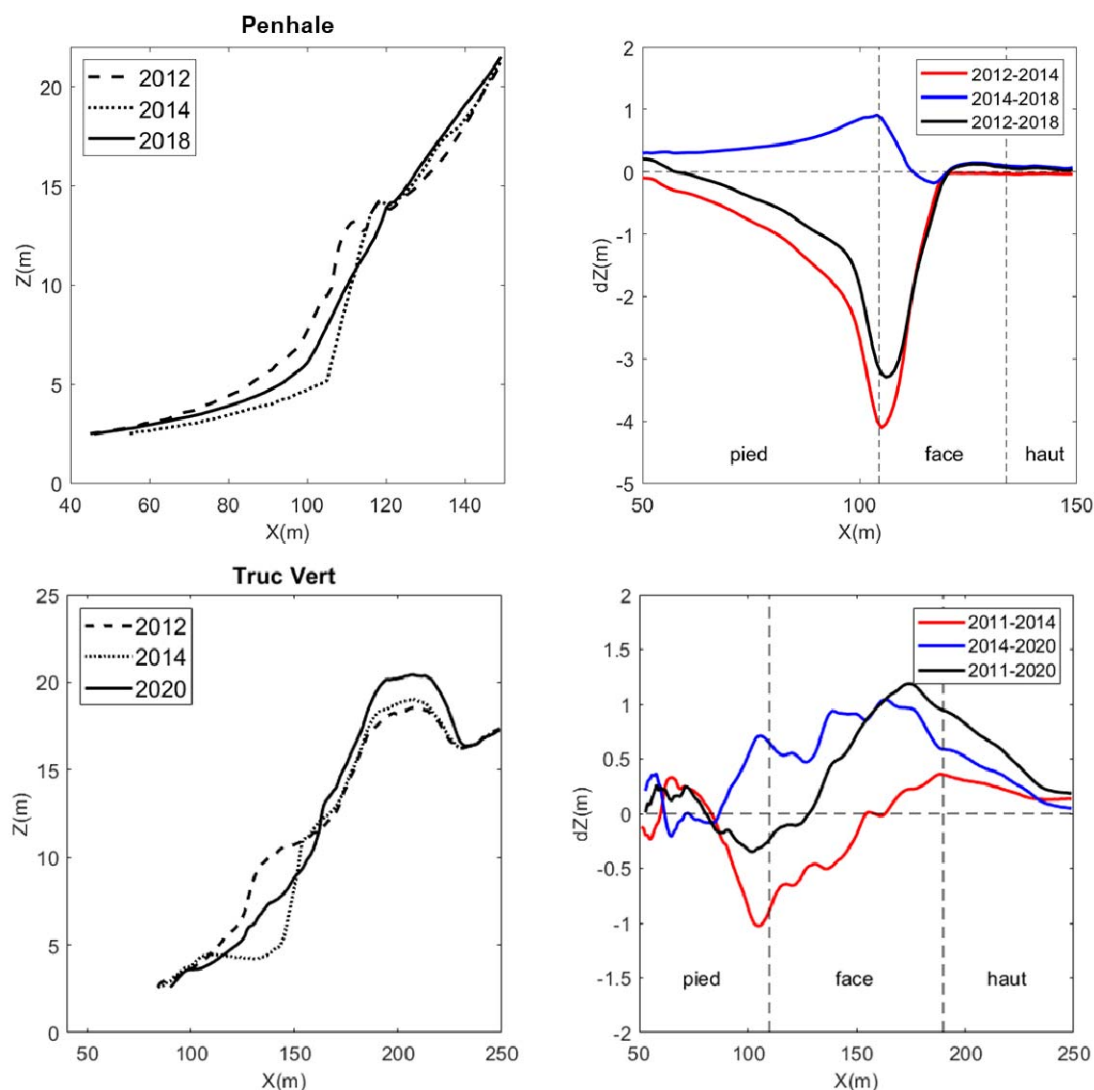


Figure 5. Profils de dunes représentatifs des sites de Penhale et Truc Vert (panel de gauche), et courbes moyennes de différentiel de hauteurs entre les profils pré-tempêtes (2012-2014, 2011-2014), post-tempêtes (2014-2018, 2014-2020) et sur l'ensemble de la période (2011-2020, 2012-2018).

4. Discussion et conclusions

Les tempêtes de l'hiver 2013/2014, représentant la période hivernale la plus énergétique depuis 1948 (MASSELINK *et al.*, 2016), ont entraîné de forts changements géomorphologiques le long du littoral atlantique européen qui ont été largement documentés (BLAISE *et al.*, 2015 ; CASTELLE *et al.*, 2015 ; MASSELINK *et al.*, 2015 ; BURVINGT *et al.*, 2017; NICOLAE-LERMA *et al.*, 2022). Cette étude apporte de nouveaux éléments permettant de dresser un bilan à l'échelle continentale de l'impact de ces tempêtes sur la partie dunaire du littoral, mais aussi d'identifier et quantifier les processus de régénération suites à ces tempêtes extrêmes.

L'analyse de l'évolution de 8 cordons dunaires lors des 10 dernières années a montré que la série de tempête de l'hiver 2013/2014 ont transformé les systèmes dunaires à plus ou moins long terme puisque la majorité de ces systèmes ne présente qu'une régénération partielle, ou présente un profil post-tempête différent de celui pré-tempête.

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

La variété des réponses des cordons dunaires aux tempêtes observée ici montre que chaque cordon dunaire a un comportement spécifique, cependant des similarités ont pu être observées. La réponse non-uniforme de la dune du Truc Vert aux tempêtes de l'hiver 2013/14 qui fut attribuée à la position des barres sableuses d'avant côte par CASTELLE *et al.* (2015), a également été observée ici le long des cordons dunaires de Lacanau et de Lette Blanche. Malgré la différence d'amplitude des volumes de sable érodés, ces résultats suggèrent que des processus sédimentaires similaires ont eu lieu sur de nombreux kilomètres le long du littoral Aquitain. En revanche, la réponse des cordons dunaires fut uniforme sur deux sites du sud-ouest de l'Angleterre (Penhale et Gwithian), qui correspondent à de longues plages dont les barres d'avant côte sont plus éloignées du trait de côte (VALIENTE *et al.*, 2019).

Les taux de régénération des cordons dunaires, varient également entre les différents sites d'étude, et dépendent principalement des sources sédimentaires mobilisables et des conditions environnementales propres à chaque site. Les résultats présentés ici montrent également l'importance de la réponse aux tempêtes et de la morphologie dunaire dans le contrôle des processus de régénération. Les dunes petites ayant été relativement peu impactées, telles qu'en Vendée, se sont très rapidement reconstruites. Les dunes à forte pente, comme Penhale et Gwithian, montrent des signes de régénération lents et continus au pied et dans la partie basse du versant dunaire, dû à un fort escarpement sur l'intégralité du cordon qui réduit fortement le transfert de sable de la plage aux dunes (CHRISTIANSEN & DAVIDSON-ARNOTT, 2004; MASSELINK *et al.*, 2022). En revanche, la régénération est plus dynamique sur les dunes moins hautes et moins pentues comme observé le long des plages d'Aquitaine, avec une forte accumulation de sable au niveau du pied et de la crête de dune tandis que les avants de dune ont tendance à se reconstruire plus lentement. Cette forme de régénération démontre une forme de résilience à la montée du niveau marin, et ceci conforte les résultats de récentes études démontrant que les évolutions du trait de côte en réponse à la montée du niveau marin ont une amplitude bien inférieure aux changements observés lors des événements de tempête et de régénération (DAVIDSON-ARNOTT & BAUER, 2021 ; HARLEY *et al.*, 2022). Les vitesses et taux de régénération des cordons dunaires ne pouvant se résumer à la taille et pente des dunes, de futures analyses sur différents paramètres tels que la largeur de plage (ITZIN *et al.*, 2021 ; NICOLAE-LERMA *et al.*, 2022), la disponibilité sédimentaire (DAVIDSON *et al.*, 2022), le climat de vents (COHN *et al.*, 2018), la couverture végétale (DURAN & MOORE, 2013), etc., doivent être approfondies. Le contexte géologique et hydrodynamique à plus grande échelle spatiale et temporelle doit aussi être pris en compte, lorsque les données disponibles le permettent, afin d'expliquer des tendances à plus long terme, comme c'est le cas pour le site de Formby qui ne montre aucun signe de régénération et qui fut en érosion chronique ces 10 dernières années.

5. Références bibliographiques

BLAISE E., SUANEZ S., STEPHAN P., FICHAUT B., DAVID L., CUQ V., AUTRET R., HOURON J., ROUAN M., FLOCH F., ARDHUIN F., CANCOUËT R., DAVIDSON R., COSTA S., DELACOURT C. (2015). *Bilan des tempêtes de l'hiver 2013–2014 sur la dynamique du recul du trait de côte en Bretagne*. Géomorphologie Relief Processus Environnement, Vol. 21, pp. 267-292.

<http://dx.doi.org/10.4000/geomorphologie.11104>

BURVINGT O., MASSELINK G., RUSSELL P., SCOTT T. (2017). *Classification of beach response to extreme storms*. Geomorphology, Vol. 295, pp. 722-737.

<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.07.022>

CHRISTIANSEN M., DAVIDSON-ARNOTT R. (2004). *The effects of dune ramps on sediment supply to coastal foredunes, Skallingen Denmark*. Geografisk Tidsskrift, Vol. 104.

COHN N., RUGGIERO P., DE VRIES S., KAMINSKY G.M. (2018). *New insights on coastal foredune growth: the relative contributions of marine and aeolian processes*. Geophysical Research Letters. Vol. 45 (10), pp. 4965-4973.

<https://doi.org/10.1029/2018GL077836>

DAVIDSON S.G., HESP P.A., DA SILVA M., DA SILVA G.M. (2022). *Flow dynamics over a high, steep, erosional coastal dune slope*. Geomorphology, Vol. 402.

<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108111>

DAVIDSON-ARNOTT R.G.D., BAUER B.O. (2021). *Controls on the geomorphic response of beach-dune systems to water level rise*. Journal of Great Lakes Research, Vol. 47 (6), pp. 1594-1612. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2021.05.006>

DURÁN O., MOORE L.J. (2013). *Vegetation controls on the maximum size of coastal dunes*. Proceedings of the National Academy of Sciences, Vol. 110 (43).

<https://doi.org/10.1073/pnas.1307580110>

GROOTJANS A.P., ADEMA E.B., BEKKER R.M., LAMMERTS E.J. (2008). *Why coastal dune slacks sustain a high biodiversity*. In: Martínez M.L., Psuty N.P. (eds) Coastal Dunes. Ecological Studies, Vol. 171. Springer, Berlin, Heidelberg.

https://doi.org/10.1007/978-3-540-74002-5_6

HESP P.A., WALKER I.J. (2013). *Coastal dunes*. Editor(s): John F. Shroder, Treatise on Geomorphology, Academic Press, pp. 328-355, ISBN: 9780123747396

HARLEY M.D., MASSELINK G., RUIZ DE ALEGRIA-ARZABURU A., VALIENTE N.G., SCOTT T. (2022). *Single extreme storm sequence can offset decades of shoreline retreat projected to result from sea-level rise*. Communications Earth & Environment 3, Vol. 112. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00437-2>

ITZKIN M., MOORE L.J., RUGGIERO P., HACKER S.D., BIEL R.G. (2021). *The relative influence of dune aspect ratio and beach width on dune erosion as a function of storm duration and surge level*. Earth Surface Dynamics, Vol. 9, pp. 1223-1237.

<https://doi.org/10.5194/esurf-9-1223-2021>

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

- MASSELINK G., SCOTT T., DAVIDSON M., RUSSELL P., CONLEY D. (2015). *The extreme 2013/2014 winter storms: hydrodynamic forcing and coastal response along the southwest coast of England*. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 41, pp. 378–391. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.3836>
- MASSELINK G., CASTELLE B., SCOTT T., DODET G., SUANEZ S., JACKSON D., FLOC'H F. (2016). *Extreme wave activity during 2013/2014 winter and morphological impacts along the Atlantic coast of Europe*. *Geophysical Research Letters*, Vol. 43 (5), pp. 2135-2143. <https://doi.org/10.1002/2015GL067492>
- MASSELINK G., BROOKS S., POATE T., STOKES C., SCOTT T. (2022). *Coastal dune dynamics in embayed settings with sea-level rise – Examples from the exposed and macrotidal north coast of SW England*. *Marine Geology*, Vol. 450. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2022.106853>
- 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*, Vol. 189. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.103974>
- NICOLAE-LERMA A., CASTELLE B., MARIEU V., ROBINET A., BULTEAU T., BERNON N., MALLET C. (2022). *Decadal beach-dune profile monitoring along a 230-km high-energy sandy coast: Aquitaine, southwest France*. *Applied Geography*, Vol. 139. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2022.102645>
- PYE K. (1983). *Coastal dunes*. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, Vol. 7 (4), pp. 531-557. <https://doi.org/10.1177/030913338300700403>
- SALLENGER A.H.J., KRABILL W., SWIFT R., BROCK J., (2001). *Quantifying hurricane-induced coast-al changes using topographic lidar*. *Coastal Dynamics '01 Proceedings* pp. 1007-1016. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA. <http://dx.doi.org/10.1061/40566260103>
- VALIENTE N.G., MASSELINK G., SCOTT T., CONLEY D., MCCARROLL R.J. (2019). *Role of waves and tides on depth of closure and potential for headland bypassing*. *Marine Geology*, Vol. 407. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2018.10.009>
- VAN IJZENDOORN C.O., DE VRIES S., HALLIN C., HESP P.A. (2021). *Sea level rise outpaced by vertical dune toe translation on prograding coasts*. *Scientific Reports*, Vol. 11. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92150-x>