



Perturbation des processus et du transport éolien par une dune anthropique soumise à un vent de terre grâce à l'utilisation de modélisation par Computational Fluid Dynamics (CFD)

**Antoine LAMY¹, Thomas Andrew George SMYTH², Nicolas ROBIN¹,
Patrick HESP³**

1. CEFREM, UMR CNRS 5110, Université de Perpignan Via-Domitia, 66100 Perpignan, France.

antoine.lamy.1@univ-perp.fr

2. Department of Biological and Geographical Sciences, School of Applied Sciences, University of Huddersfield, England, United Kingdom.

T.AG.Smyth@hud.ac.uk

3. Beach and Dune Systems (BEADS) Laboratory, College of Science and Engineering, Flinders University, Bedford Park, South Australia.

patrick.hesp@flinders.edu.au

Résumé :

Les dunes côtières sont à l'origine de nombreux services écosystémiques rendus, comprenant la protection contre l'érosion ainsi que les risques d'inondations lors des tempêtes. Sur ces systèmes, les interventions humaines sont devenues communes au cours du dernier siècle. Leur évolution à court terme est relativement bien comprise. En revanche, l'impact de ces méthodes de gestion sur la dynamique éolienne après plusieurs décennies de mise en place reste méconnu. La dune présente sur le littoral de Leucate-plage (golfe du Lion) a été entièrement construite par l'Homme au début des années 2000. Des différences dans son mode de construction, notamment par la présence ou non d'un cœur rocheux au sein de la dune, à mener à des évolutions géomorphologiques différentes. La partie Sud de la dune présente entre autres une pente aval bien moins prononcée (12° contre 28° sur la partie Nord) et une double crête. L'impact de ces deux modes de constructions sur les processus éoliens a été exploré par le biais de Computational Fluid Dynamics (CFD). Les résultats montrent une atténuation dans la zone sous le vent de la dune plus forte sur la partie Nord ainsi que le développement d'une zone de séparation lors de vents perpendiculaires non présente sur la partie Sud. Ces différences de processus entraînent un transport éolien inégal entre le Nord et le Sud de la dune. Cette étude montre que l'héritage morphologique de la dune lié aux méthodes de construction a une influence sur son évolution et sur la perturbation de l'écoulement du vent même après plusieurs décennies.

Mots-clés :

Modélisation, Dynamique éolienne, Ingénierie dunaire, Transport sédimentaire.

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

1. Introduction

Les dunes côtières sont l'un des écosystèmes les plus importants en Europe, elles abritent une grande diversité d'espèces animales et végétales (MARTINEZ & PSUTY, 2004). Elles jouent également un rôle de protection face aux tempêtes marines et aux submersions. Cependant, les zones côtières subissent une forte pression anthropique accentuée par le développement du tourisme et de l'habitat résidentiel (VAN DER MAAREL, 2003). Les côtes méditerranéennes ont été particulièrement touchées avec une destruction partielle ou totale concernant 75% des dunes côtières (GEHU, 1985). Dans ce contexte, les actions de l'Homme ont favorisé la stabilisation dunaire par la pose de ganivelles, de plantations ou encore en agissant sur la forme des dunes (ARENS *et al.*, 2001 ; ROBIN *et al.*, 2021). Dans certains cas, des structures sableuses jouant le rôle de digue ont été construites pour protéger les terres intérieures (RAUWOENS *et al.*, 2023). Ces dunes artificielles peuvent avoir été construites sur une base solide, telle que des tubes de géotextile ou des enrochements (MAXIMILIANO-CORDOVA *et al.*, 2023). L'action de stabilisation de ces dunes artificielles est bien comprise contemporanément à leur édification (RAUWOENS *et al.*, 2023). Cependant, leurs évolutions morphologiques plusieurs décennies après leur construction, restent méconnues. Les systèmes dunaires évoluent entre autres par des phénomènes de rétroaction entre les processus éoliens et la forme des dunes (ARENS *et al.*, 2001 ; WALKER & NICKLING, 2002). La morphologie des dunes peut perturber l'écoulement éolien, en créant une accélération du vent sur sa crête, menant à une augmentation des vitesses de cisaillement et du transport éolien (WALKER & NICKLING, 2002 ; HESP *et al.*, 2005). Dans certains cas de direction et de morphologie dunaire, une séparation du flux d'air peut avoir lieu dans la zone sous le vent, menant à des vents inverses au sens d'incidence (WALKER & NICKLING, 2002). Plus le relief dunaire est élevé avec une pente sous le vent forte, plus la séparation du flux sera développée. Cela peut permettre aux vents de terre de transporter du sable du haut de plage vers le pied de dune (WALKER & NICKLING, 2002 ; LYNCH *et al.*, 2009). Cette étude a été réalisée sur le système dune-plage de Leucate dans le golfe du Lion, présentant une dune artificielle laissée en libre évolution depuis 20 ans. Elle vise à mieux comprendre l'influence de l'héritage morphologique anthropique sur les processus éoliens.

2. Site d'étude

La plage de Leucate est située au Sud-Ouest du golfe du Lion, caractérisée par un environnement micro tidale (marnage < 0.3 m) dominé par les vagues (ALEMAN *et al.*, 2011). Les vents de terre de Nord-Ouest sont majoritaires (> 70 % du temps, dépassant les 28 m/s 10 à 30 jours dans l'année) face aux vents marins d'Est à Sud-Est (< 25 % du temps). Le système dunaire est peu développé, composé d'une unique dune présentant une élévation maximale de 4.5 m NGF, pour une largeur de 7 à 15 m. L'arrière et la crête

de la dune sont végétalisées et par endroit, la crête de la dune est aplatée par la présence d'un chemin piétonnier. Avant les années 70, la dune actuelle était absente et le lido était coupé par de multiples embouchures. Entre les années 1970 et 2003, à la suite du développement du tourisme, une route traversant le lido du Nord au Sud au niveau de l'actuelle position de la dune a été implantée. Elle a été ensuite déconstruite en 2003, puis progressivement une dune a été créée en remplacement. Cependant, l'édification de celle-ci s'est faite avec des méthodes de construction différentes. En effet, la partie Sud est composée d'un socle de deux lignes rocheuses issues de la déconstruction de la route, puis comblée par du sable de dragage. Alors que la partie Nord est uniquement composée d'un monticule de sable issu du même dragage. Rapidement, cette nouvelle dune artificielle s'est fait coloniser par la végétation, la fixant à sa position actuelle et suivant la morphologie post-travaux. En raison d'un mode de construction non homogène, les parties Nord et Sud de la dune présentent des morphologies différentes. La dune Nord a une forme symétrique, avec une pente face et sous le vent de respectivement 28 et 30°, alors qu'au Sud, elle est asymétrique avec respectivement une pente face et sous le vent de 12° et 30°.

3. Méthodologie

3.1 Modélisation de la dynamique éolienne

L'écoulement du vent est modélisé grâce au logiciel de Computational Fluid Dynamics (CFD), OpenFOAM. L'algorithme SIMPLE associé aux équations RANS produit une solution à l'équilibre, moyennée dans le temps. Les turbulences sont modélisées avec le modèle RNG k- ϵ . Cette méthode de calcul a fourni des résultats probants dans la capacité à modéliser les processus éoliens sur les dunes côtières (HESP & SMYTH, 2016; NGUYEN *et al.*, 2022). La validité du modèle a été testée par comparaison avec des mesures d'observation in-situ, grâce à 9 stations anémométriques à 0.30 m au-dessus de la surface du sol, disposées sur un profil perpendiculaire au profil dune-plage (voir Figure 1). Les résultats montrent une bonne corrélation ($r^2 > 0.9$ pour les vitesses et directions du vent). Le domaine de calcul a été généré à partir d'un MNT LiDAR de la zone, soit un volume de calcul de $120 \times 100 \times 52$ m. La taille des cellules du domaine diminue graduellement, du sommet ($2.5 \times 2.5 \times 2.5$ m) à la surface ($0.3 \times 0.3 \times 0.15$ m), soit plus de 3 millions de cellules. Un z_0 de 0.07 m est appliqué sur la partie du domaine recouverte de végétation et de 0.0005 m pour la partie sableuse. En accord avec les vents observés, les simulations sont faites avec un vent incident de 15 et 20 m/s dans les directions 290, 310 et 330° (respectivement 10°, 30° et 40° par rapport à la perpendiculaire de la dune). Ces vents ont été appliqués aux entrées du domaine à une altitude de 10 m puis distribués selon l'équation 1 :

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z+z_0}{z_0} \right) \quad (1)$$

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

avec $U(z)$ la vitesse du vent à la hauteur z , u_* la vitesse de cisaillement, κ est la constante de Von Karman (0.4187) et z_0 la longueur de rugosité.

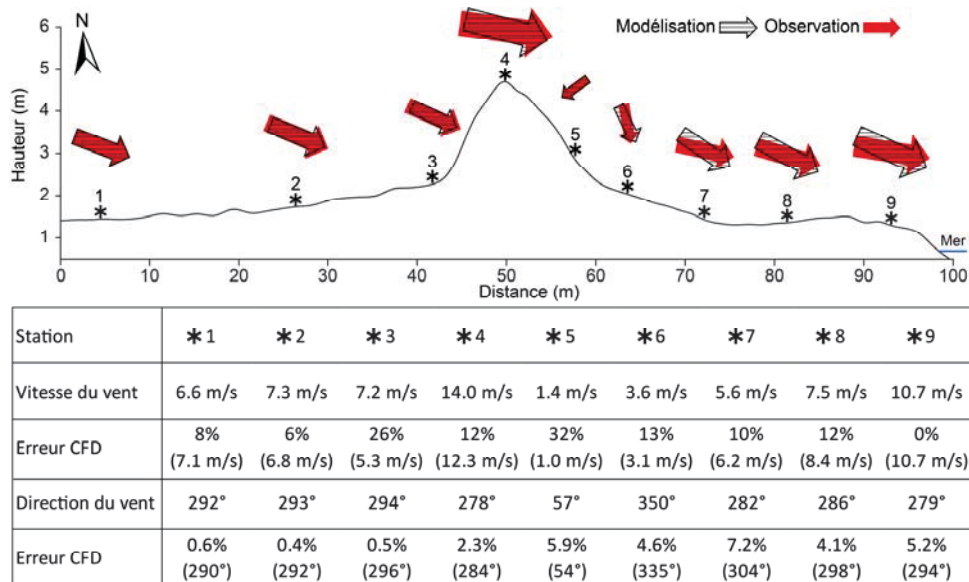


Figure 1. Comparaison entre observation et modélisation sur 1 minute de donnée moyennée au niveau de 9 stations instrumentées à l'aide de WindSonic 2D. Les flèches montrent la direction du vent de manière planimétrique.

3.2 Modélisation du transport sédimentaire

Le transport sédimentaire est calculé à la surface du domaine en utilisant la formule de LETTAU & LETTAU (1977) décrite par l'équation 2:

$$q = C \sqrt{\frac{d}{D}} \frac{\rho}{g} (u_* - u_{*t}) u_*^2 \quad (2)$$

avec q le taux de transport en kg/m/s, C une constante empirique égale à 4.2, D est la taille du grain de référence, 0.25 mm, d est la taille des grains, ρ est la densité de l'air, 1.2466 kg/m³, g est la gravité et u_{*t} est la vitesse de cisaillement seuil (0.40 m/s pour cette étude), obtenue grâce à l'équation 3 :

$$u_{*t} = A \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho}} g d \quad (3)$$

D'après le travail de Smyth et Hesp (SMYTH & HESP, 2015), les vitesses de cisaillement sont calculées à la surface du domaine par le biais de la contrainte de cisaillement τ en utilisant l'équation 4 :

$$u_* = \sqrt{\left(\frac{\tau}{\rho}\right)} \quad (4)$$

4. Résultats

4.1 Dynamiques de l'écoulement du vent de l'arrière-dune à la crête de dune

Les résultats de la modélisation sont présentés sous forme de deux profils 2D distincts sur la partie Nord (P1, forme symétrique) et Sud (P2, forme asymétrique). Une représentation planimétrique est également présentée uniquement pour la direction dominante des vents (310°). La pente face au vent de la dune engendre une forte accélération du vent, avec un maximum au niveau de la crête de dune. Cependant, cette accélération n'est pas uniforme selon la forme de la dune et la direction du vent incident. En effet, sur la partie Nord (P1) le vent est accéléré d'un facteur 1.6 à 1.8 par rapport au vent incident, respectivement pour des vents obliques de 330 et 310°. Celle-ci atteint un facteur 2 lors d'un vent perpendiculaire (290°, Figure 2). En revanche, sur la partie Sud (P2) l'accélération est caractérisée par deux pics en lien avec les deux sommets de la dune, l'un côté amont et l'autre à l'extrémité aval. Sur ce second profil, l'accélération atteint un facteur 1.8 à 2.1 pour les vents obliques (330 et 310°) et jusqu'à 2.3 pour le vent perpendiculaire (290°, Figure 2). Pour chacune des simulations de vent oblique, un changement angulaire du vent s'opère au passage de la pente face au vent de la dune de 15° vers la perpendiculaire. Ce comportement est plus marqué sur P1 présentant une pente plus uniforme (Figure 2).

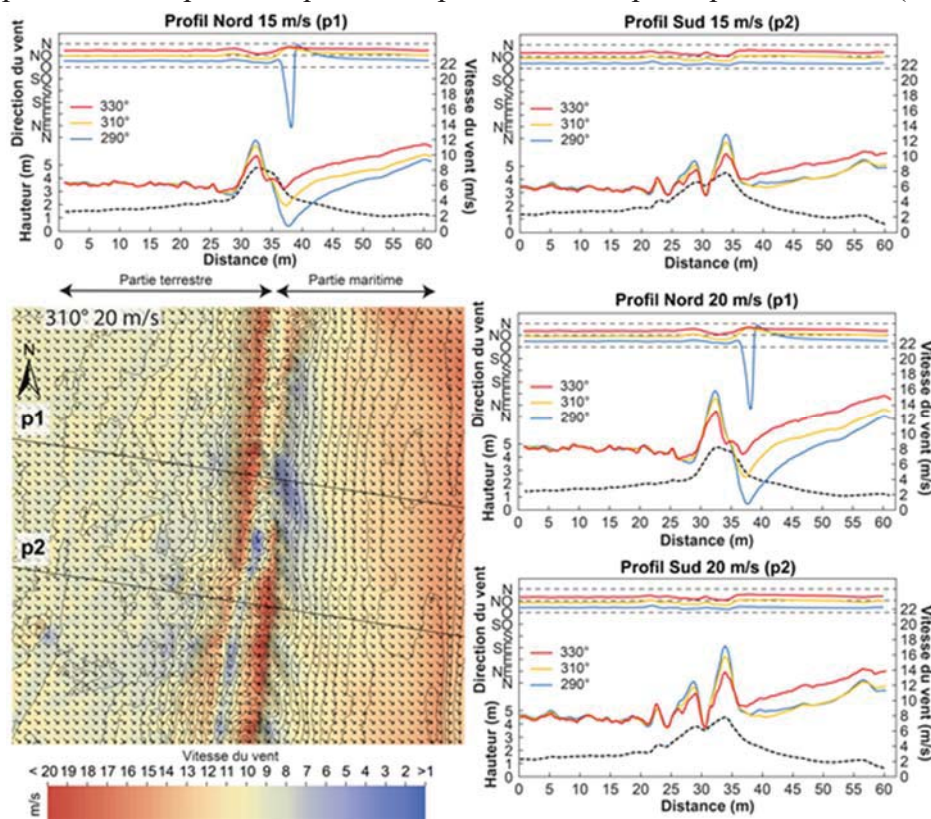


Figure 2. Modélisation sur le profil Nord (P1) et Sud (P2) de la dune pour des vents de 15 et 20 m/s dans les directions 290, 310 et 330°. Représentation planimétrique de la zone d'étude soumise à un vent de 310° à 20 m/s.

4.2 Dynamiques de l'écoulement du vent de la face sous le vent de la dune à la plage

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

Dans la zone sous le vent de la dune, le flux d'air a un comportement très différent selon la forme de la dune. Concernant P1, la vitesse du vent est déjà réduite à l'approche de la pente sous le vent, où elle décélère rapidement. La vitesse est d'autant plus atténuée que le vent est perpendiculaire. Dans ce cas-là, peu importe la vitesse de vent incidente, au pied de la dune le vent sera proche de 0 m/s. Cette observation est due à l'occurrence d'une séparation du flux d'air au niveau de la crête de dune, créant une boucle de recirculation au niveau du pied de dune. Celle-ci est présente uniquement lors de vent perpendiculaire (290° , Figure 2) et de faible largeur (2 m). La partie Sud de la dune ne présente pas de séparation, et la vitesse du vent est plus élevée sur la seconde crête de la dune située proche de la pente sous le vent. Cela entraîne une vitesse du vent sur la pente moins atténuée, avec des vitesses au pied de dune supérieures à 6 et 8 m/s, respectivement pour les vents incidents de 15 et 20 m/s (Figure 2). Sur cette partie Sud de la dune, les vents accélèrent moins vite en s'éloignant de la dune que sur la partie Nord. Dans les deux cas, un vent plus oblique induit une décélération du vent moins forte ainsi qu'une déviation du vent vers la parallèle à la dune plus prononcée.

4.3 Vitesse de cisaillement et transport éolien

Les vitesses de cisaillement ainsi que le transport éolien sont présentées uniquement à partir de la zone sous le vent de la dune, car l'arrière et la crête de dune sont végétalisées, empêchant le transport éolien. Sur l'ensemble de la zone d'étude, les vitesses de cisaillement présentent une distribution semblable aux vitesses de vent, avec une augmentation graduelle en s'éloignant du relief dunaire. Cependant, des disparités sont observées dans la zone sous le vent de la dune. Au Nord (P1), lors d'un vent perpendiculaire générant une boucle de recirculation, les vitesses de cisaillement sont systématiquement sous la vitesse seuil (0.40 m/s). Aucun transport de sédiment n'est donc possible dans cette zone, seuls les vents les plus obliques (330°) pourront produire des vitesses de cisaillement suffisantes pour initier un transport, restant cependant peu significatif (voir Figure 3). En revanche, dans la zone sous le vent et au pied de la dune Sud (P2), les vitesses de cisaillement sont au-dessus du seuil et permettent d'initier le transport de sédiment sur la pente et au niveau du pied de la dune. Les taux de transport γ sont similaires peu importe la direction du vent. En s'éloignant du pied de dune, les vents très obliques de 330° permettent un transport plus important, semblable à celui observé au niveau de P1. Globalement, les taux de transport s'équilibrent au niveau de la berme de la plage et sont similaires entre la partie Nord et Sud du système.

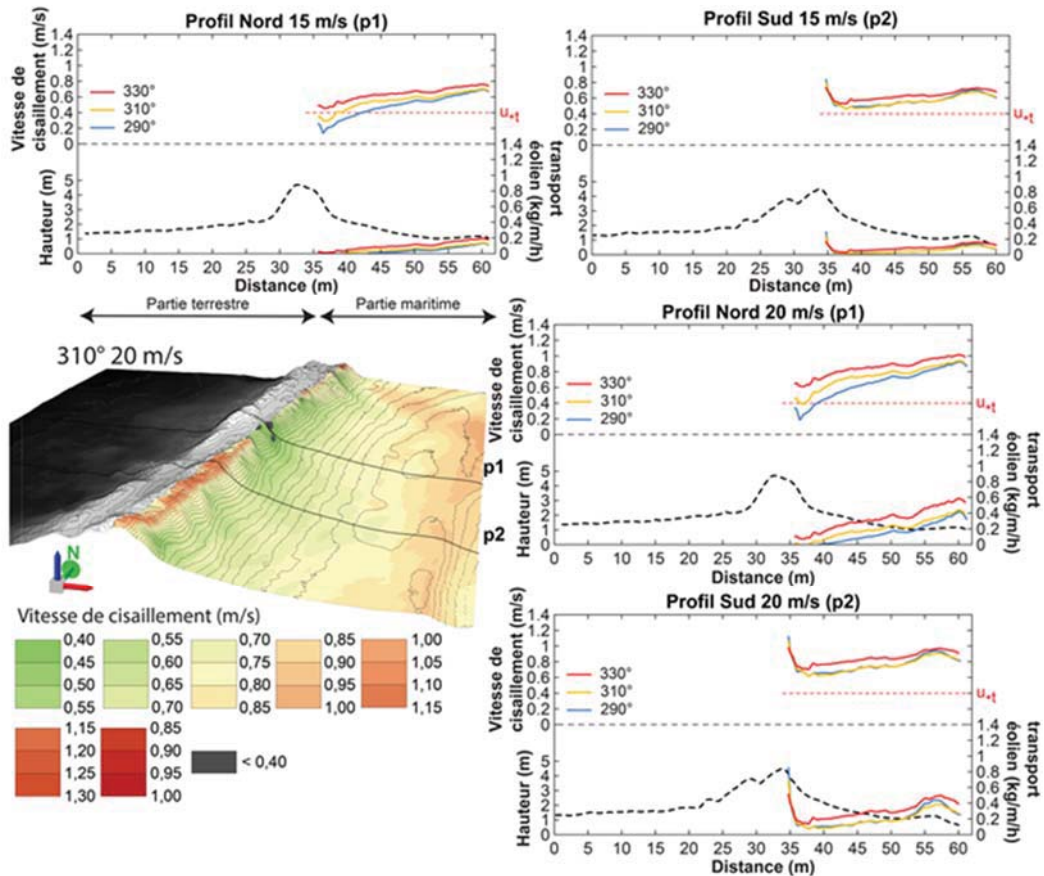


Figure 3. Modélisation des vitesses de cisaillement et du transport éolien sur le profil Nord (P1) et Sud (P2) de la dune pour des vents de 15 et 20 m/s dans les directions 290, 310 et 330°. Représentation planimétrique des vitesses de cisaillement de la zone d'étude soumise à un vent de 310° à 20 m/s.

5. Discussion et conclusion

Les résultats ont montré une déviation de 15° de la direction du vent (vers un axe perpendiculaire à la dune) au niveau de la pente face au vent lors des vents obliques. Ces observations concordent avec la littérature, tout comme la présence d'une accélération maximale observée au niveau de la crête de dune (HESP *et al.*, 2005). Cependant, en raison de la morphologie asymétrique de la partie Sud (double crête et pente face au vent plus douce et plus longue), l'accélération se fait par deux pics de vitesses, atteignant des maximales légèrement supérieures à la partie Nord. Concernant l'allure du flux d'air dans la zone sous le vent de la dune, cette étude montre que seul le vent perpendiculaire associé à une forme symétrique et à une pente forte permet la séparation du flux. Le développement préférentiel d'une séparation du flux lors de vent perpendiculaire est semblable aux observations de Lynch et al (LYNCH *et al.*, 2009) et de Hesp et Smyth (HESP & SMYTH, 2019). Cependant, les vents y sont inférieurs au seuil de déplacement des sédiments, ne permettant pas un apport de sable pour la dune. A contrario, la partie Sud de la dune permet un transport éolien dans la zone sous le vent, mais celui-ci est

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

dirigé vers l'extrémité maritime de la plage du fait de l'absence de boucles de recirculation. En effet, l'écoulement du vent y est uniquement dévié. L'occurrence de la séparation du flux dépend donc de la direction du vent incident et de la forme de la dune, tel que l'ont observé Parsons *et al.*, et Hesp et Smyth (PARSONS *et al.*, 2004 ; HESP & SMYTH, 2019). Malgré des similitudes dans le comportement de l'écoulement du vent par rapport à la littérature existante, cette étude est la première à observer une séparation du flux au passage d'une dune côtière aussi peu développée (2.5 m de haut et 10-15 m de large). Ces résultats montrent donc que même des dunes côtières de faible dimension peuvent avoir un impact significatif sur l'écoulement du vent et sur le transport éolien qui en résulte. Cette étude atteste également de l'importance du choix des méthodes de construction utilisées pour édifier une dune artificielle. En effet, celles-ci exerceront une influence sur son évolution même après plusieurs décennies et auront un impact sur les processus éoliens affectant la morphologie de tout le système dune-plage.

6. Remerciements

Ce travail portant la référence EUR TESS N° ANR-18-EURE-0018 a bénéficié d'une aide de l'Etat gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme Investissements d'avenir. Les auteurs remercient l'Obscat, le parc naturel marin du Golfe du Lion et le PEPR IRiMA pour leur soutien financier. Ce travail est soutenu par une bourse doctorale ministérielle accordée par le gouvernement français.

7. Références bibliographiques

- ALEMAN N., ROBIN N., CERTAIN R., VANROYE C. (2011). *Typology of nearshore bars in the Gulf of Lions (France) using LIDAR technology*. Journal of Coastal Research.
- ARENS S.M., BAAS A.C.W., VAN BOXEL J.H., KALKMAN C. (2001). *Influence of reed stem density on foredune development*. Earth Surface Processes and Landforms 26, 1161–1176. <https://doi.org/10.1002/esp.257>
- GEHU J.-M. (1985). *European dune and shoreline vegetation*. Council of Europe.
- HESP P.A., DAVIDSON-ARNOTT R., WALKER I.J., OLLERHEAD J. (2005). *Flow dynamics over a foredune at Prince Edward Island, Canada*. Geomorphology 65, 71–84. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.08.001>
- HESP P.A., SMYTH T.A.G. (2016). *Jet flow over foredunes*. Earth Surf. Process. Landforms 41, 1727–1735. <https://doi.org/10.1002/esp.3945>
- HESP P.A., SMYTH T.A.G. (2019). *CFD flow dynamics over model scarps and slopes*. Physical Geography 42, 1–24. <https://doi.org/10.1080/02723646.2019.1706215>
- LYNCH K., JACKSON D.W.T., COOPER J.A.G. (2009). *Foredune accretion under offshore winds*. Geomorphology 105, 139–146. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.12.011>
- MARTINEZ M.L., PSUTY N.P. (2004). *Coastal Dunes, Ecological Studies*. Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74002-5>

- MAXIMILIANO-CORDOVA C., SILVA R., MENDOZA E., CHAVEZ V., MARTINEZ M.L., FEAGIN R.A. (2023). *Morphological Performance of Vegetated and Non-Vegetated Coastal Dunes with Rocky and Geotextile Tube Cores under Storm Conditions*. JMSE 11, 2061. <https://doi.org/10.3390/jmse11112061>
- NGUYEN D., HILTON M., WAKES S. (2022). *Wind flow dynamics and sand deposition behind excavated foredune notches on developed coasts*. Earth Surf Processes Landf 47, 1698–1719. <https://doi.org/10.1002/esp.5341>
- PARSONS D.R., WALKER I.J., WIGGS G.F.S. (2004). *Numerical modelling of flow structures over idealized transverse aeolian dunes of varying geometry*. Geomorphology 59, 149–164. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2003.09.012>
- RAUWOENS P., STRYPSTEEN G., DERIJCKERE J., BONTE D., PROVOOST S., VERWAEST T., MUYLAERT S., BESIEN P.V. (2023). *Strengthening coastal defence with artificial dunes*. Int. Conf. Coastal. Eng. 51. <https://doi.org/10.9753/icce.v37.sediment.51>
- ROBIN N., BILLY J., CASTELLE B., HESP P., NICOLAE LERMA A., LAPORTE-FAURET Q., MARIEU V., ROSEBERY D., BUJAN S., DESTRIEATS B., MICHALET R. (2021). *150 years of foredune initiation and evolution driven by human and natural processes*. Geomorphology 374, 107516. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107516>
- SMYTH T.A.G., HESP P.A. (2015). *Aeolian dynamics of beach scraped ridge and dyke structures*. Coastal Engineering 99, 38–45. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.02.011>
- VAN DER MAAREL E. (2003). *Some remarks on the functions of European coastal ecosystems*. Phytocoenologia 33, 187–202. <https://doi.org/10.1127/0340-269X/2003/0033-0187>
- WALKER I.J., NICKLING W.G. (2002). *Dynamics of secondary airflow and sediment transport over and in the lee of transverse dunes*. Progress in Physical Geography: Earth and Environment 26, 47–75. <https://doi.org/10.1191/0309133302pp325ra>

Thème 2 – Dynamique sédimentaire