

LES DUNES SOUS-MARINES ET LEUR ÉCOSYSTÈME SOUS CONTRAINTES ANTHROPIQUES

Tome 2 - Synthèse des résultats et recommandations issus du projet DUNES



FRANCE
ÉNERGIES
MARINES

Editions



LES DUNES SOUS-MARINES ET LEUR ÉCOSYSTÈME SOUS CONTRAINTES ANTHROPIQUES

Tome 2 - Synthèse des résultats et recommandations issus du projet DUNES

AUTEURS :

Maëlle Nexer : France Energies Marines
Mahmoud Bacha : France Energies Marines et LOG, UMR 8187 CNRS, ULCO
Mathilde Bary : France Energies Marines et Laboratoire M2C,
UMR CNRS 6143, Université de Rouen Normandie
Aurélien Gangloff : France Energies Marines, DOPS/STM/SEDIM, Shom
Alexandre Robert : France Energies Marines et Ifremer
Rachid Amara : LOG, UMR 8187 CNRS, ULCO
Olivier Blanpain : France Energies Marines et Shom
Briz Parent : Oceanzoom
Clémence Caulle, Oceanzoom
Nicolas Desroy : Ifremer
Thierry Garlan : DOPS/STM/SEDIM, Shom
Sophie Le Bot : Laboratoire M2C, UMR CNRS 6143,
Université de Rouen Normandie
Nicolas Michelet : France Energies Marines
Nolwenn Quillien : France Energies Marines

Tous droits réservés.

Les textes de ce rapport de synthèse sont la propriété des partenaires du projet DUNES (EDF Renouvelables, France Energies Marines, Ifremer, Museum National d'Histoire Naturelle, RTE, Shom, Université de Rouen Normandie, Université du Littoral Côte d'Opale). Ils ne peuvent être reproduits ou utilisés sans citer la source et sans autorisation préalable. Les photos, les schémas et les tableaux (sauf indication contraire) sont protégés par le droit d'auteur. Ils restent la propriété des partenaires du projet DUNES ou de leurs auteurs (si reproduits) et ne peuvent être reproduits sous quelque forme ou par quelque moyen que ce soit, sans l'autorisation écrite préalable des partenaires du projet DUNES ou de leurs auteurs.

Citer le document comme ci-dessous :

Nexer M., Bacha M., Bary M., Gangloff A., Robert A., Amara R., Blanpain O., Parent B., Caulle C., Desroy N., Garlan T., Le Bot S., Michelet N., Quillien N.,

Les dunes sous-marines et leur écosystème sous contraintes anthropiques. Tome 2 : synthèse des résultats et recommandations issus du projet DUNES

Plouzané : France Energies Marines Editions, 2024, 56 pages.

Edition : Juin 2024

Photo couverture : Dunes sous-marines au large de Dunkerque, campagne DUNES d'août 2020

© France Energies Marines

Dépôt légal à parution

Conception graphique : rhodamine-communication.fr

Table des matières

	Page
Préface	8
Partie 1 : Contexte	10
Fiche n°1 • Les dunes sous-marines au large de Dunkerque et leur écosystème	10
1. Contexte géologique	10
2. Contexte météocéanique	11
3. Socio-écosystème des dunes sous-marines au large de Dunkerque	13
Partie 2 : Morphodynamique des dunes	14
Fiche n°2 • Méthodologie et stratégie d'analyse morphodynamique	14
1. Bathymétrie	14
2. Mesures de courant	16
3. Sédimentologie	16
Fiche n°3 • Analyse morphologique des dunes sous-marines au large de Dunkerque	18
1. Méthode	18
2. Résultats	19
3. Conclusion	23
Fiche n°4 • Calculs de flux sédimentaires associés au champ de dunes sous-marines du large de Dunkerque	24
1. Méthode	24
2. Résultats et discussion	26
3. Conclusion	29
Partie 3 : Ecosystèmes	30
Fiche n°5 • Caractérisation des communautés macrobenthiques vivant dans les dunes sous-marines	30
1. Contexte	30
2. Méthode	30
3. Résultats	32
4. Conclusion	35
Fiche n°6 • L'influence des variables physiques et biologiques sur la structure des communautés de poissons des bancs de Dunkerque	36
1. Contexte	36
2. Méthode	36
3. Résultats	37
4. Conclusion	39
Fiche n°7 • Caractérisation du zooplancton et de la méiofaune benthique des dunes sous-marines situées au large de Dunkerque	40
1. Contexte	40
2. Méthode	40
3. Résultats	40
4. Conclusion	45

Partie 4 : Recommandations	46
Fiche n°8 • Synthèse et recommandations	
1. Principaux résultats sur la morphodynamique des dunes sous-marines	46
2. Recommandations concernant l'intégration des parcs éoliens en mer dans un système dunaire	47
3. Recommandations concernant l'écosystème des dunes sous-marines	48
Bibliographie	50

Liste des figures

Page

Fig. 1 • Localisation de la zone d'étude (Bathymétrie : GEBCO)	8
Fig. 2 • a) Carte des fonds marins avec localisation des bancs sableux régionaux (Shom), b) champs de dunes sous-marines 3D développées sur le flanc nord du banc In Ratel (Shom)	10
Fig. 3 • Mesures de courant <i>in situ</i> près de Merlimont, de Calais, figure en haut à gauche) et de Dunkerque	11
Fig. 4 • Rose des vents à Dunkerque (1994-2019) (données Météo-France, in Latapy (2020) ..	12
Fig. 5 • a) localisation des trois boîtes définies pour les levés bathymétriques (fond de carte Shom), b) bathymétrie en août 2020 des trois boîtes du projet DUNES	14-15
Fig. 6 • Cages ADCP déployées dans le cadre du projet DUNES	16
Fig. 7 • Nature des fonds des trois boîtes d'étude du projet DUNES (données Shom, 2016). ...	17
Fig. 8 • Données bathymétriques a) boîte 1, b) boîte 2, c) boîte 3. Ces données ont été acquises en mars 2020 dans le cadre du projet DUNES.	18-19
Fig. 9 • Hauteur maximale (Hmax) des dunes des boîtes 1 et 3 entre novembre 2019 et juillet 2021	20
Fig. 10 • Longueur d'onde moyenne (m) des dunes des boîtes 1 et 3 entre novembre 2019 et juillet 2021	21
Fig. 11 • Taux de migration de chacune des dunes sous-marines de la boîte 1 (a) et 3 (b). Les taux maximaux et la moyenne ont été calculés sur les 20 mois de mesure.	22
Fig. 12 • Taux de migration moyens par dune pour la boîte 1 et 3 de novembre 2019 à juillet 2021 sur l'ensemble des périodes	23
Fig. 13 • Flux sédimentaires moyens pour les 6 dunes de la boîte 1 et les 10 dunes de la boîte 3 calculés entre novembre 2019 et juillet 2021	26
Fig. 14 • Conditions hydrodynamiques réalistes extraites des simulations MARS3D et WW3 sur la période L2-L3. Frottement induit pour les forçages de courant, houle et la composition des deux sur la même période.	28
Fig. 15 • Carte de la stratégie d'échantillonnage superposée au modèle numérique de terrain (résolution de 0,0002° (environ 20 m) fourni par le Shom (Shom, 2016).	30
Fig. 16 • Evolution de la position des crêtes sur A) les dunes barkhane et B) sur la dune 3D. ..	31
Fig. 17 • Photographies à la loupe binoculaire de quelques invertébrés caractéristiques des dunes au large de Dunkerque	33

Fig. 18	• Distribution de la richesse en espèces (A) et de la biomasse (B) entre les différents types de formes sédimentaires et dans la zone de référence.	34
Fig. 19	• Carte de localisation des trois principales zones d'étude (côtière, transitoire et hauturière) et des stations d'échantillonnage (chalut) dans le système de bancs de sable de Dunkerque.	36
Fig. 20	• Variations temporelles et spatiales de la densité et de la biomasse moyennes (+/- SD) des poissons dans la zone d'étude.	38
Fig. 21	• Analyse canonique des correspondances (ACC) basée sur l'abondance des espèces, les facteurs environnementaux biotiques et abiotiques étant représentés par des vecteurs.	39
Fig. 22	• Abondances relatives des principales espèces ou groupes taxonomiques de zooplancton échantillonnés. La distinction est faite entre le méroplancton et l'holoplancton.	41
Fig. 23	• Abondances absolues des diatomées benthiques standardisées pour un volume de 50 cm ³	42
Fig. 24	• Abondances relatives des groupes de méiofaune benthique présents dans les différentes boîtes aux deux saisons échantillonnées.	42
Fig. 25	• Abondances relatives des principales espèces de foraminifères benthiques (présentes à au moins 5% dans au moins un échantillon).	43
Fig. 26	• ACP d'après les abondances relatives de foraminifères benthiques pour les deux saisons : a) automne, b) printemps ; seules les espèces ayant le plus de contribution (> 0,5) sur les dimensions 1 et 2 sont présentées.	44
Fig. 27	• Schéma récapitulatif du projet DUNES	49

Liste des tableaux

Page

Tab. 1	• Caractéristiques des différentes boîtes.	14
Tab. 2	• Répartition des levés bathymétriques en fonction des conditions de vent et des marées.	15
Tab. 3	• Caractéristiques granulométriques des stations échantillonnées.	31
Tab. 4	• Valeurs des paramètres biotiques et abiotiques enregistrées dans les trois zones étudiées du littoral dunkerquois.	37
Tab. 5	• Paramètres faunistiques principaux entre les deux saisons d'échantillonnage pour le zooplancton et la méiofaune benthique.	41

Acronymes

BTA	Analyse des traits biologiques
DTS	Mesure de température distribuée
EVE	Extrême vive-eau
GOV	Chalut à grande ouverture verticale
IRI	Index of Relative Importance

Coordination et synthèse

Maëlle Nexer

Cadre de recherche, France Energies Marines
Docteur en géomorphologie

Nolwenn Quillien

Cadre de recherche, France Energies Marines
Docteur en biologie marine

Direction scientifique

Thierry Garlan

Directeur du département Sédimentologie, Shom

Remerciements

Ce travail a bénéficié d'un financement de France Energies Marines, de ses membres et partenaires, ainsi que d'une aide de l'Etat gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme des Investissements d'Avenir (ANR-10-IEED-0006-17).

Préface

Fin 2021, les éoliennes en mer représentaient 28,3 GW¹ de capacité installée en Europe dont la quasi-totalité en mer du Nord. La Commission Européenne ambitionne 300 GW de puissance installée en 2050. En 2022, la France compte un parc éolien en mer en fonctionnement et trois autres en cours de construction. D'autres parcs éoliens posés sont en phase de développement

dont le parc situé au large de Dunkerque. Ce projet de parc éolien en mer vise à installer au maximum 46 éoliennes pour une puissance maximale de 600 MW.

Ce parc éolien se situe dans un des champs de dunes sous-marines les plus remarquables de France.

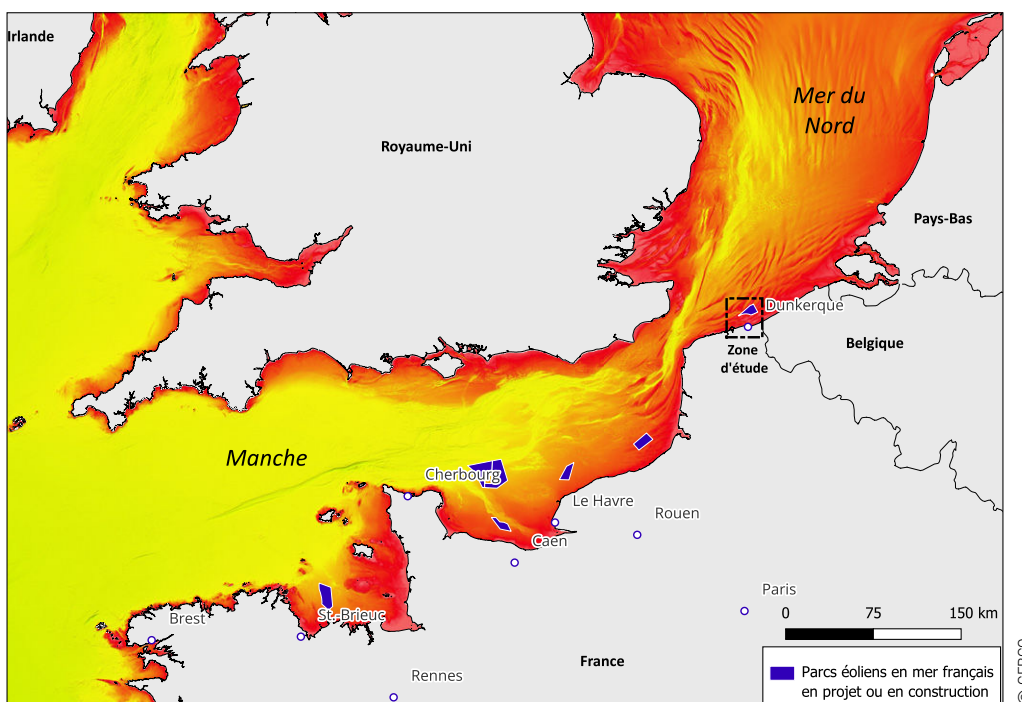


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude (Bathymétrie : GEBCO)

Les dunes sous-marines sont parmi les corps sédimentaires les plus dynamiques et sont très nombreuses sur le plateau continental, notamment au niveau de la Manche et de la mer du Nord où seront implantés un grand nombre des futurs parcs éoliens français et européens.

Les maîtres d'ouvrage de ces parcs et de leurs raccordements sont confrontés à des défis tech-

niques majeurs liés aux mouvements des dunes sous-marines. Ceux-ci peuvent en effet provoquer des phénomènes d'affouillement autour des fondations, d'ensouillage et d'affouillement des câbles. Par exemple, l'affouillement à proximité des postes électriques en mer et des fondations des éoliennes pourrait être augmenté en raison de la dynamique sédimentaire élevée des dunes

sous-marines. Le déplacement de sédiments au-dessus de câbles peut conduire à les enfouir profondément, ce qui constitue une contrainte pour leur dimensionnement thermique, ou au contraire, à les exposer aux courants, aux vagues et aux activités humaines.

Les dunes sous-marines sont des zones fonctionnelles essentielles en tant que zones d'alimentation et de reproduction pour de nombreuses espèces. Elles sont classées par la directive-cadre "Stratégie pour le milieu marin" (DCSMM) et également par le réseau Natura 2000 comme habitat clé. L'installation d'un parc éolien en mer dans ce milieu nécessite une meilleure connaissance des espèces qui y vivent, afin de mettre en place les mesures *ad hoc* pour éviter, réduire et compenser (démarche ERC) les impacts de l'installation d'éoliennes et de leurs câbles de raccordement.

Le projet DUNES a été coordonné par France Energies Marines et piloté scientifiquement par le Shom. Le projet a fédéré un consortium de huit partenaires académiques et privés aux compétences et aux contributions complémentaires.

L'objectif du projet DUNES a été de :

- Comprendre la dynamique sédimentaire et écosystémique des dunes sous-marines,

- Proposer aux développeurs de technologies et industriels du secteur des EMR des connaissances et approches complémentaires pour travailler dans des environnements comportant des dunes hydrauliques.

Le projet s'est construit autour des axes scientifiques suivants :

- Cartographie des dunes des côtes françaises métropolitaines,
- Acquisition de données haute fréquence sur la dynamique des dunes de Dunkerque,
- Compréhension de l'évolution à court terme de ces dunes sous-marines,
- Caractérisation *in situ* de la structure des écosystèmes dunaires,
- Caractérisation du fonctionnement des écosystèmes via l'étude des réseaux trophiques par analyses isotopiques.

Ce rapport fait état des résultats du projet DUNES ainsi que des recommandations à destination des parties prenantes des parcs éoliens en mer. Il vient à la suite du premier tome qui constitue une synthèse des connaissances sur les dunes sous-marines et les écosystèmes qui leur sont inféodés.

¹ *Offshore wind in Europe - key trends and statistics 2021*, Windeurope

1. Contexte géologique

En mer du Nord, les champs de dunes sous-marines sont développés sur les bancs parallèles à la côte et s'étendent sur plusieurs kilomètres. Ceux situés au large de Dunkerque sont parmi les plus remarquables du plateau continental français par leur extension et leurs dimensions.

Le site d'étude est situé à proximité du détroit du pas de Calais en mer du Nord au large de Dunkerque et de la plaine flamande qui appartient à la partie nord du Bassin parisien.

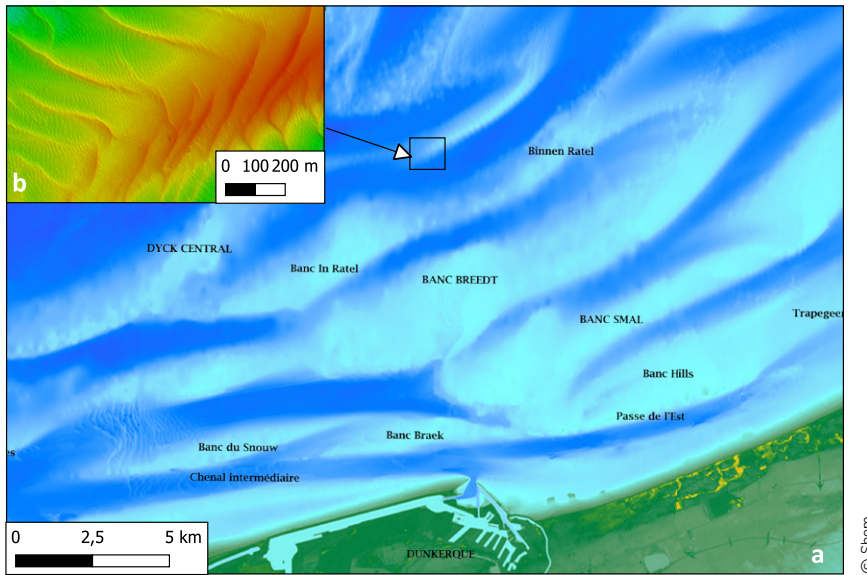


Figure 2 : (a) Carte des fonds marins avec localisation des bancs sableux régionaux et (b) Champs de dunes sous-marines 3D développées sur le flanc nord du banc In Ratel.

Les fonds marins sont composés d'un substratum rocheux datant du Mésozoïque sur lequel se trouve une couche de sédiments meubles composée d'argile des Flandres (Cénozoïque) puis de sables (Latapy, 2020). La dernière glaciation a entraîné une forte accumulation de sédiments pouvant atteindre 30 m d'épaisseur (Baeteman, 1991 ; Baeteman et Van Strijdonck, 1989 ; Sommé *et al.*, 2004, dans Latapy, 2020), qui ont été remaniés et déposés sur la topographie d'érosion périglaciaire lors de la transgression marine Holocène (Anthony et Orford, 2002 ; Bellamy, 1995 ; Hamblin *et al.*, 1992 ; Larsonneur *et al.*, 1982 ; Sommé, 1988, dans Latapy, 2020). Ces sédiments meubles sont composés de sables aux grains moyens à grossiers pour des profondeurs supérieures à 10 m (Augris *et al.*, 1990 ; Beck *et al.*, 1991 ; Van Lancker, 1999, dans Latapy, 2020). En mer du Nord, les sédiments sont regroupés en bancs sableux massifs (d'une longueur variant de 10 à 30 km), formant un réseau complexe parallèle à la côte (Latapy, 2020) (Figure 1).

Les différents travaux qui ont été menés sur la structure interne de ces bancs et sur la dynamique sédimentaire ont montré que les bancs sableux sont essentiellement composés d'unités stratigraphiques d'âge holocène (Latapy, 2020). Au large de Dunkerque, s'étendant de Gravelines à la frontière belge, plusieurs bancs sableux sont retrouvés : les bancs du Snouw, du Braek, du Breedt, Smal, in Ratel et Hills (Latapy, 2020) (Figure 2). Ces différents bancs sableux présentent un flanc raide qui est orienté vers le littoral et un flanc doux orienté vers le large, traduisant ainsi une migration des bancs vers la côte (Latapy, 2020). Des travaux réalisés sur ces bancs suggèrent que leurs déplacements sont liés aux courants de marée et à la houle, qui induisent un transport résiduel vers le rivage (Corbau, 1995 ; Tessier *et al.*, 1999, dans Latapy, 2020). Les champs de dunes sous-marines situées au large de Dunkerque sont développés sur les flancs doux de ces bancs, perpendiculairement à leur ligne de crête (Figure 2).

2. Contexte météocécannique

• Courants

Le régime hydrodynamique en mer du Nord est majoritairement influencé par les marées (Latapy, 2020). L'onde de marée se propage depuis l'Atlantique et s'amplifie en arrivant dans la Manche en raison du passage d'une mer profonde à une mer épicontinentale (Clique et Lepetit, 1986). Ainsi, au niveau de Dunkerque, le marnage est de type macro-tidal et, pour un coefficient de marée de 45, l'amplitude du marnage est de 3,5 m tandis qu'elle est de 5,5 m pour des marées de vives eaux de coefficient 95 (Shom, 2017, dans Latapy, 2020). La zone d'étude est caractérisée par un régime tidal semi-diurne.

Le courant de flot se propage vers le nord-est et vers le sud-ouest lors du jusant (Latapy, 2020). Les courants mesurés par le Shom à Dunkerque du 05/07/1978 au 19/07/1978 (Latapy, 2020) ont montré que les vitesses de courant sont généralement comprises entre 0,75 et 1 m/s lors du flot et peuvent parfois atteindre 1,25 m/s (Figure 3). Les vitesses de courant lors du jusant sont plus faibles, majoritairement comprises entre 0,5 et 0,75 m/s (Figure 3). De plus, il existe une prédominance du flot qui a pour conséquence un courant résiduel et, de fait, un transport sédimentaire orienté vers le nord-est au niveau de la zone d'étude (Corbau *et al.*, 1999 ; Héquette *et al.*, 2008, dans Latapy, 2020).

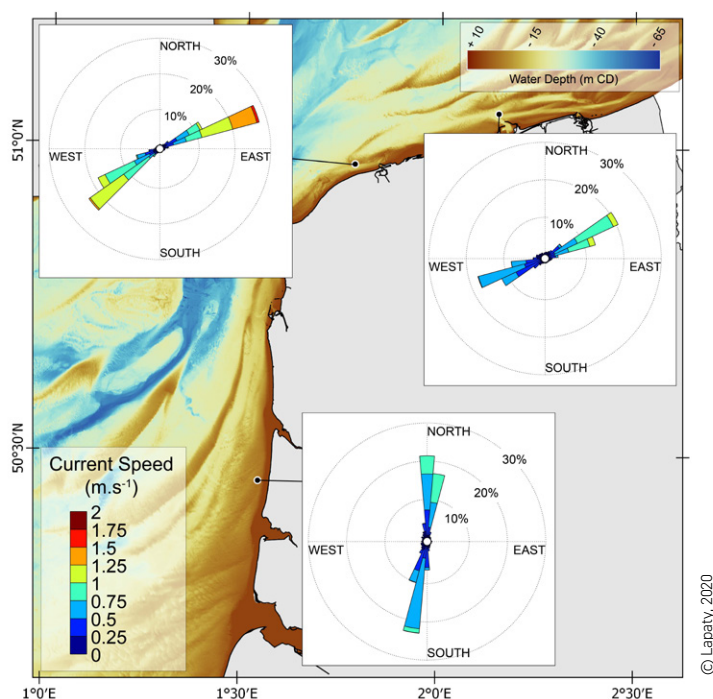


Figure 3 : Mesures de courant in situ près de Merlimont (11/02/2018 - 09/03/2018, point de mesures sud, données : Artélia *et al.*, 2019), de Calais (25/04/1975 - 13/05/1975, données : Shom) et de Dunkerque (05/07/1978 - 19/07/1978, point de mesure nord-est, données : Shom). D'après Latapy (2020).

• Houle

En ce qui concerne la houle, deux régimes principaux ont été identifiés à partir des enregistrements de la houle sur deux décennies par la bouée de Westhinder appartenant au réseau belge VLIZ (Vlaam Instituut voor de Zee) (Latapy, 2020). Ces données montrent qu'une partie des houles arrive

du sud-ouest en provenance de la Manche (Latapy, 2020). Les autres houles proviennent de deux directions, le nord-ouest et le nord-est, ce qui correspond aux houles arrivant de l'intérieur du bassin de la mer du Nord (Latapy, 2020). Moins de 50 % des houles ont une hauteur supérieure à 1 m et la hauteur moyenne des houles est de 1,05 m pour une période moyenne

de 4 à 5 s. Les données acquises par cette bouée ont également montré que, lors d'événements extrêmes, la hauteur de la houle peut dépasser 3 m avec des périodes de l'ordre de 7 à 10 s (Latapy, 2020). En se rapprochant du littoral, du fait des nombreux bancs sableux (Corbau *et al.*, 1999 ; Héquette *et al.*, 2009 ; Sipka, 1998, dans Latapy, 2020), la houle subit une importante réfraction. La houle s'atténue également en arrivant sur les bancs subtidiaux et, dans 80 % des cas, sa hauteur n'excède pas 1,2 m, tandis que sa période varie de 4 à 8 s (Clique et Lepetit, 1986, dans Latapy, 2020).

• Météorologie

Les directions dominantes des vents s'étendent du sud-sud-ouest à l'ouest-sud-ouest et sont liées aux dépressions qui viennent de l'Atlantique et qui remontent par la Manche (Cerema, 2018). Une part non-négligeable des vents provient du nord-est. Bien qu'ils soient moins fréquents, ces derniers représentent une proportion importante des vents forts (Cerema, 2018).

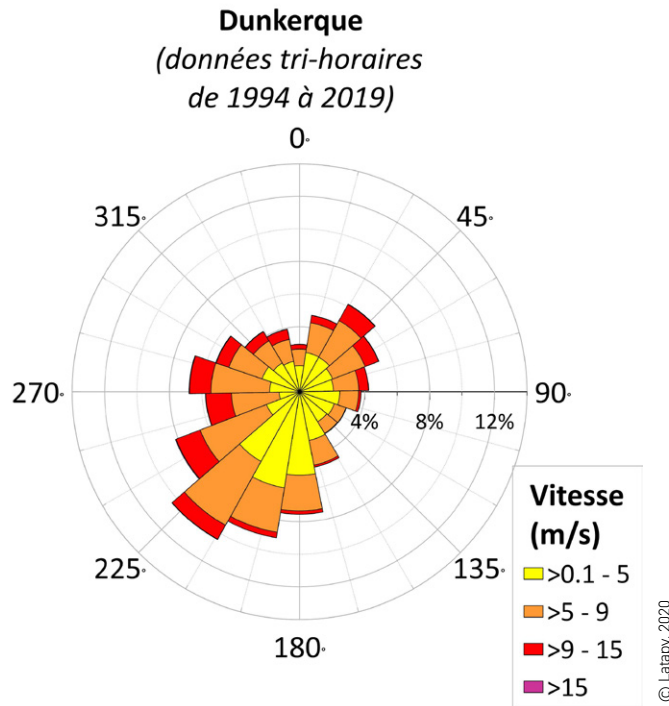


Figure 4 : Rose des vents à Dunkerque (1994-2019). Données Météo-France, dans Latapy (2020).

Concernant les vents, les données recueillies à Dunkerque (données Météo-France) montrent que sur la période comprise entre 1994 et 2019, les vents faibles (entre 0 et 32,4 km/h) ont représenté plus de 80 % des observations, les vents modérés (entre

32,4 et 54 km/h) ont représenté 14 % des enregistrements et les vents forts (supérieurs à 54 km/h), peu fréquents, ont quant à eux représenté moins de 1 % des observations (Latapy, 2020) (Figure 4).

3. Socio-écosystème des dunes sous-marines au large de Dunkerque

Les dunes sous-marines font partie de l'habitat 1110 du réseau Natura 2000 "Bancs de sable à faible couverture permanente d'eau marine" qui englobe des sous habitats.

Les bancs et les dunes sous-marines en Manche Est et mer du Nord forment un habitat particulier, propice à différentes espèces de poissons. C'est le cas des lançons, qui constituent une ressource alimentaire pour de nombreux organismes marins (oiseaux, mammifères, poissons benthodémersaux), dont plusieurs espèces de poissons d'intérêt commercial comme la sole et la plie. Amara (2003) et Eastwood *et al.* (2003) soulignent le rôle important de la zone littorale entre Calais et la frontière belge en tant que nourricerie pour plusieurs espèces de poissons et particulièrement pour les poissons plats. Considérée comme la plus importante sur le littoral français, cette zone joue un rôle majeur dans l'alimentation et le renouvellement des stocks de poissons de la région (Eastwood *et al.*, 2003).

Bien que situé devant le port de Dunkerque, le site Natura 2000² des bancs des Flandres est fréquenté par une grande partie de la flottille de pêche de la région des Hauts-de-France (constituée des

anciennes régions du Nord-Pas-de-Calais et de la Picardie). En 2012, les régions Nord-Pas-de-Calais et Picardie comptabilisaient plus de 190 navires, dont 179 actifs à la pêche toute l'année. D'autres pressions anthropiques ont un effet sur les dunes sous-marines comme l'extraction de granulats, et les parcs éoliens en mer. Le développement de l'énergie éolienne au large de Dunkerque, prévu pour les prochaines années et impliquant l'installation d'éoliennes sur les bancs de sable, pourrait entraîner des changements dans les communautés d'organismes vivant au sein de cet habitat. Dans ce contexte, les différents acteurs publics (ministère, préfectures), les gestionnaires de la pêche ainsi que ceux de la filière des énergies marines renouvelables (EMR) souhaitent une meilleure compréhension des systèmes très dynamiques que sont les écosystèmes dunaires sous-marins.

² FR3102004 - Ridens et dunes hydrauliques du détroit du Pas-de-Calais, 2008

1. Bathymétrie

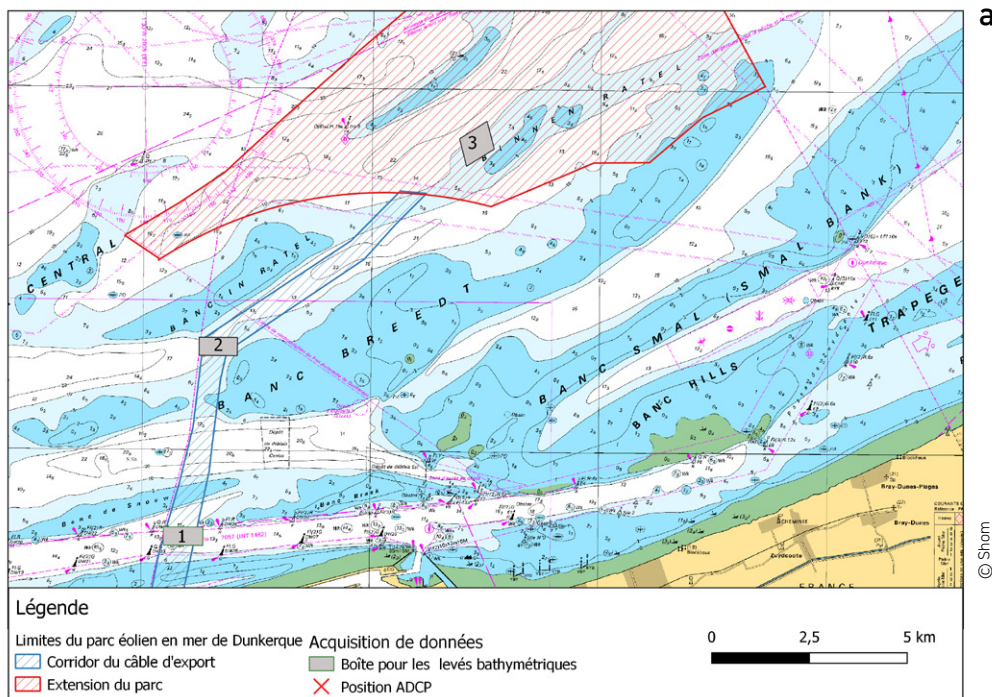
Afin de mieux connaître la dynamique des dunes sous-marines situées dans le futur parc éolien au large de Dunkerque, des données bathymétriques ont été acquises via un sondeur multi-faisceaux Kongsberg EM2040C³.

Pour comprendre l'impact des forçages (vent, vagues et courant) sur les dunes sous-marines, il a été nécessaire de réaliser de nombreux levés bathymétriques avec un pas de temps court, afin d'encadrer différentes conditions de ces forçages. Pour permettre ce type de mesure et limiter les coûts, trois boîtes ont été définies (Tableau 1). D'une surface

d'environ 0,5 km² (1 X 0,5 km), elles sont situées sur le corridor des liaisons de raccordement et dans la zone de projet du parc éolien. Elles comprennent différents types de dunes : barkhanes (en forme de croissant), rectilignes et 3D (détails sur ces types de dunes dans le tome 1, Figure 5). Huit levés bathymétriques au sein de ces trois boîtes ont été effectués sur une période de 21 mois. L'entreprise GEOxyz a réalisé l'intégralité de ces levés bathymétriques avec des paramètres d'acquisition identiques pour tous les levés

	Boîte 1	Boîte 2	Boîte 3
Distance à la côte	2 km	6,5 km	11km
Profondeur	-18 m à -12 m	-18 m à -3 m	-22 à -8 m
Position sur le parc	corridor des liaisons de raccordement (2018)	corridor des liaisons de raccordement (2018)	Poste électrique en mer
Position sur les bancs	Inter banc	Queue de banc	flanc de banc
Type de dunes	Barkhane	dunes 3D	rectiligne

Tableau 1 : Caractéristiques des différentes boîtes



³ Voir le tome 1 pour en savoir plus sur le mode de fonctionnement

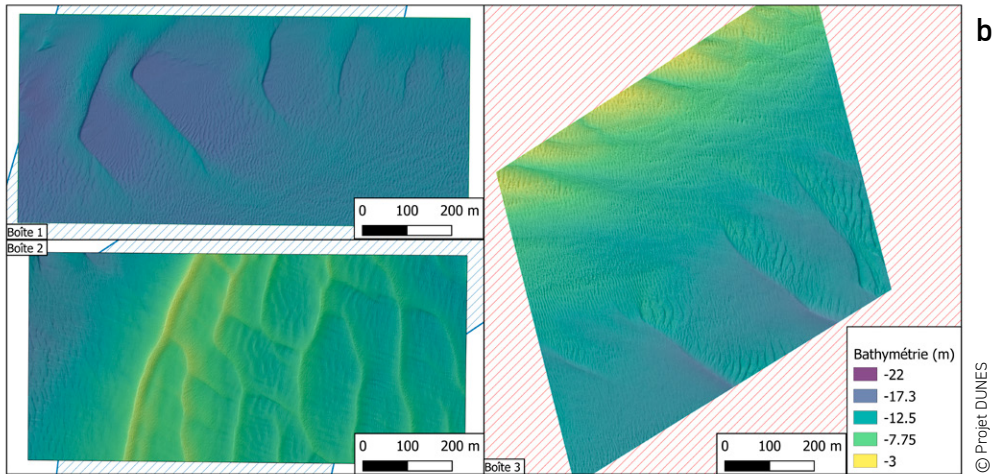


Figure 5 : (a) Localisation des trois boîtes définies pour les levés bathymétriques (fond de carte Shom), la position du corridor des câbles d'export et l'étendue du parc éolien en mer représentés sur la figure datent de septembre 2019 et (b) Bathymétrie en août 2020 des trois boîtes du projet DUNES, boîte 1 : dunes barkanes situées dans le chenal intermédiaire du Grand Port Maritime, boîte 2 : dunes sinueuses situées en queue de banc, boîte 3 : dunes rectilignes situées sur le flanc d'un banc.

Chaque levé avait un objectif de mesure précis (Tableau 2) comme l'évolution des dunes pendant un hiver pour les levés 2, 6 et 7 ou la mesure de l'évo-

lution des dunes pendant une marée d'extrême vive-eau et une tempête pour le levé 3.

		Vents	Marée	Levés	Objectif
2019	Oct.	SW	111		
	Nov.			1	Etat initial
	Déc.	NW			
2020	Janv.	SSW, WSW			
	Fév.	WNW (4)	108		
	Mars	WSW, NNE	117	2	Enregistrement de l'hiver
	Avril	NE, SW	117	3	Enregistrement d'une tempête de NE et d'une marée d'EVE
	Mai	NE, SW	108		
	Juin	SW			
	Juil.				
	Août	SW	104	4	Enregistrement de l'été
	Sept.	NW	113		
	Oct.	SW	115		
	Nov.	SW (3)	109		
Déc.	SW		5	Enregistrement de l'automne	
2021	Janv.	NW		6	Enregistrement de 2 coups de vent
	Fév.	E	101		
	Mars	W (2)	112		
	Avril		111		
	Mai	W, SW	103	7	Sortie d'hiver et état initial avant mise à l'eau ADCP
	Juin			ADCP	
	Juil.			8	Etat final après mise à l'eau ADCP

Tableau 2 : Répartition des levés bathymétriques en fonction des conditions de vent (rouge clair : épisode de vents < 90 km/h, rouge moyen : épisode de vents > 90 km/h et < 110 km/h, rouge foncé : épisodes de vents > 110 km/h) et des marées (coefficients de marée compris entre 100 et 110 en bleu clair, entre 110 et 115 en bleu moyen, et au-dessus de 115 en bleu foncé).

2. Mesures de courant

Les levés bathymétriques ont été complétés par une campagne de mesures de courant. Trois ADCP ont été déployés pendant un mois et demi au printemps 2021 (Tableau 2). Deux d'entre eux ont été positionnés en entrée et en sortie de la boîte 1, près des bouées du chenal intermédiaire du Grand port maritime de Dunkerque afin de limiter les risques d'accident avec la navigation. Le troisième ADCP a été positionné au nord de la boîte 3 dans une zone entre deux bancs exempte de dunes. Cet ADCP était localisé à proximité de la bouée EOLOS déployée afin de caractériser les conditions météocaniques dans le cadre de l'im-

plantation du parc éolien de Dunkerque. Les ADCP ont été positionnés sur des cages lestées mises à l'eau et récupérées par des plongeurs. Le dispositif est décrit dans la Figure 6. Les données ADCP n'ont pas pu être analysées dans le cadre du projet DUNES. Les données ADCP permettront d'obtenir des informations sur l'hydrodynamique (courant et houle) tandis que les données issus des hydrophones permettront d'estimer des flux sédimentaires. Ces données seront utilisées dans le cadre du projet MODULLES afin de calibrer les modèles.

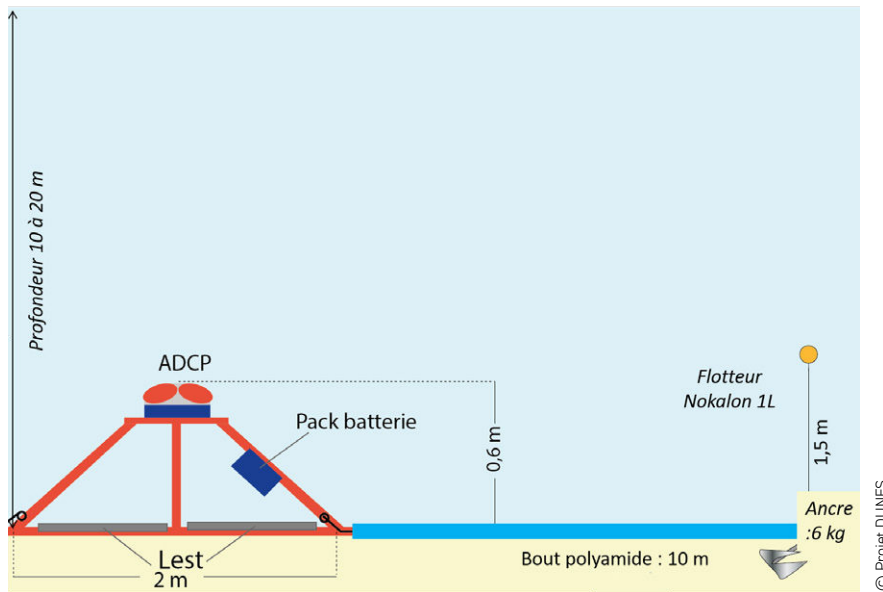


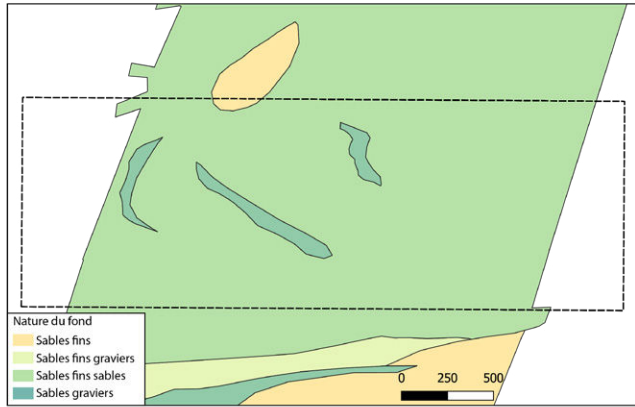
Figure 6 : Cages ADCP déployées dans le cadre du projet DUNES

3. Sédimentologie

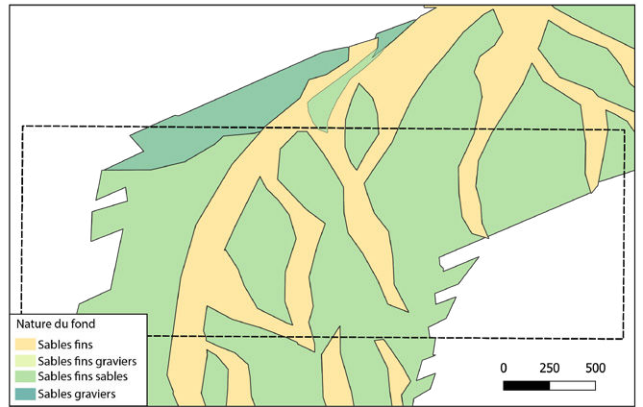
Pour le dérisquage de l'implantation du parc éolien de Dunkerque, le Shom a réalisé des cartes sédimentologiques en 2016 (Figure 7). Ces cartes montrent que les sédiments situés dans les trois boîtes sont plutôt

homogènes sur toute la zone d'étude et comprennent des sables fins à moyens, avec un assemblage de sables et graviers dans la boîte n°3.

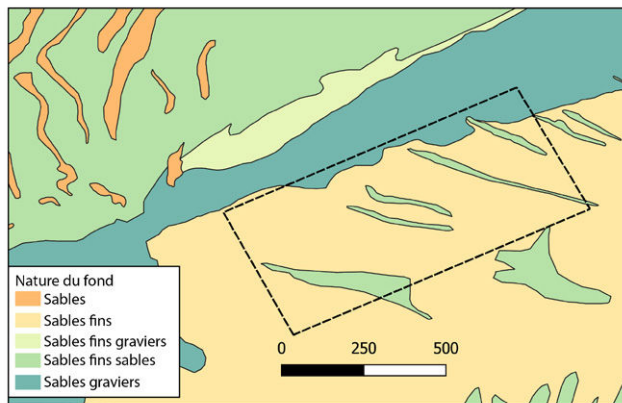
boîte 1



boîte 2



boîte 3



© Shom, 2016

Figure 7 : Nature des fonds des trois boites d'étude du projet DUNES.

Au cours du projet DUNES, une étude granulométrique a été réalisée dans le cadre de l'analyse des prélèvements de faune benthique à l'automne 2019 et au printemps 2020 aux points d'échantillonnage cartographiés dans la Figure 15 (voir page 30).

Les distributions granulométriques sont similaires d'une dune à l'autre, à l'échelle d'une même dune et

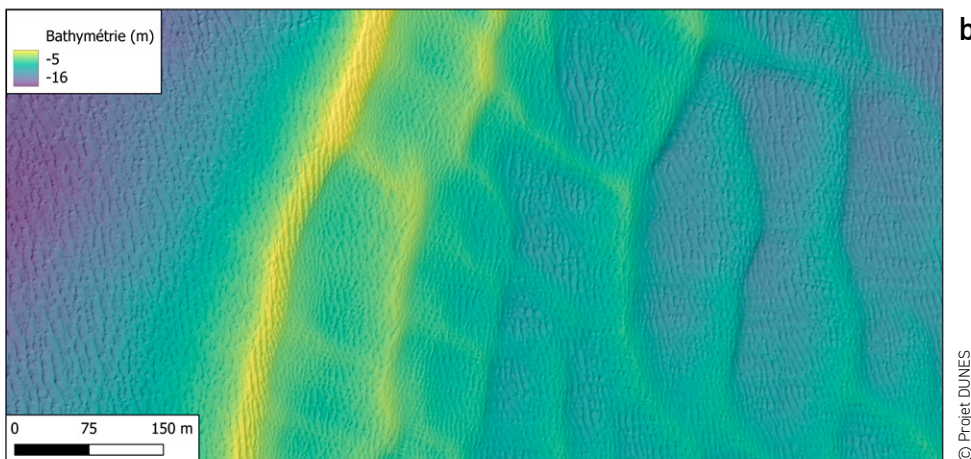
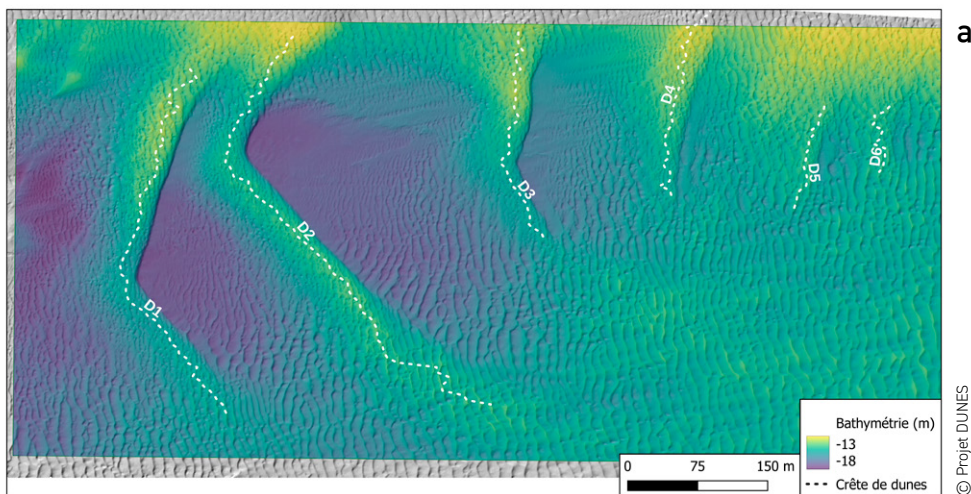
d'une campagne de prélèvement à l'autre. Les variabilités granulométriques intra- et inter-dunes, d'une part, et temporelles, d'autre part, sont donc faibles sur la zone d'étude.

Après comparaison avec l'étude de Yan *et al.* (2018), une porosité moyenne de 40 % a été retenue pour l'ensemble de la zone d'étude.

1. Méthode

À partir de huit levés bathymétriques de résolution horizontale 0,5 m, la morphodynamique des dunes présentes sur deux zones étudiées, les boîtes 1 et 3 (Figure 8), a pu être estimée en utilisant la méthodologie suivante :

- 1) Filtrage des levés bathymétriques pour s'affranchir de l'influence des figures sédimentaires secondaires (rides et petites dunes) surimposées sur les grandes et très grandes dunes étudiées afin de faciliter l'identification des crêtes et des creux
- 2) Numérisation des crêtes et des creux selon des transects espacés de 20 m et perpendiculaires à la crête (Figure 8)
- 3) Mesure et calcul des paramètres morphométriques (bathymétrie, hauteur, longueur d'onde, largeur, sinuosité, asymétrie) le long des transects
- 4) Mesure du déplacement (en m) des crêtes des grandes et très grandes dunes entre deux levés successifs suivant les transects puis calcul de leur vitesse de migration (en m/an)



© Projet DUNES

© Projet DUNES

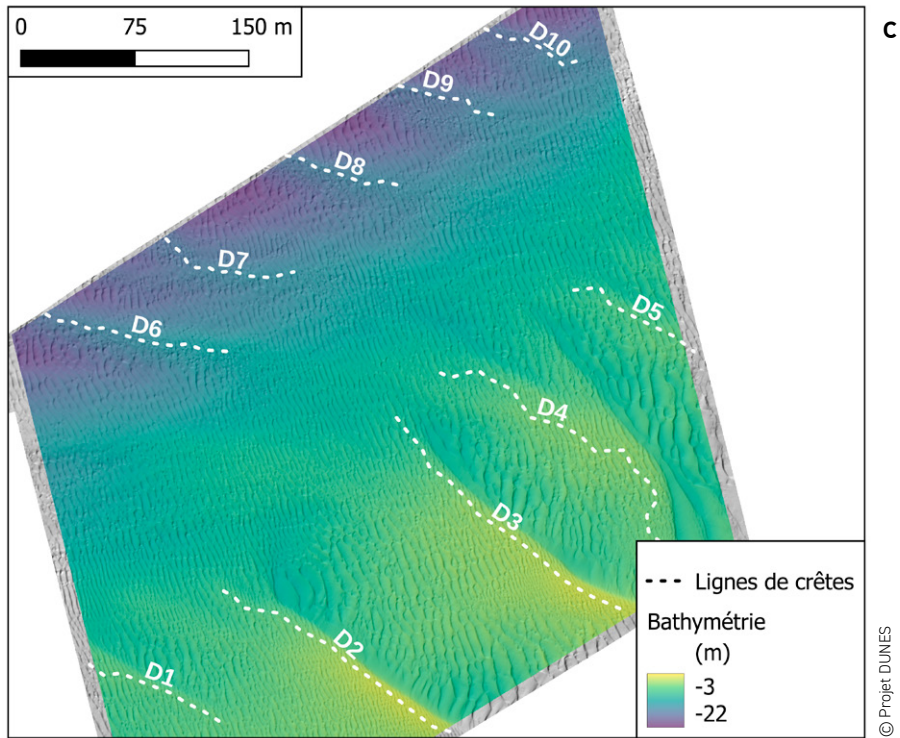


Figure 8 : Données bathymétriques : (a) boîte 1, (b) boîte 2, (c) boîte 3. Ces données ont été acquises en mars 2020 dans le cadre du projet DUNES. Les crêtes des dunes et leur numéro apparaissent pour les boîtes 1 et 3.

2. Résultats

• Morphologie des dunes

Les dunes situées à l'ouest de la boîte 1 sont de type barkhane, tandis que les dunes situées à l'est sont de plus petite dimension et sub-linéaires (Figure 8). Les dunes de la boîte 1 sont orientées nord-sud.

Les dunes présentes dans la boîte 2 sont organisées en deux familles d'orientation différentes et se croisent. Cette morphologie en 3D rend difficile l'identification des crêtes et des creux (Figure 8). Par conséquent, il a été impossible de réaliser une analyse morphométrique de ces dunes.

Les dunes comprises dans la boîte 3 sont rectilignes orientées nord-ouest/sud-est et divisées en deux groupes :

- Un groupe situé à des profondeurs < 10 m au sud, comprenant 5 dunes ;
- Un groupe situé à des profondeurs > 10 m au nord, comprenant 5 dunes.

• Hauteurs des dunes sous-marines

Les points culminants des crêtes de dunes de la boîte 1 ont des profondeurs comprises entre 13,0 et 14,3 m en moyenne sur l'ensemble des levés (écart-type : 0,07 à 0,29). (Figure 9). Dans la boîte 3, deux groupes de dunes sont clairement identifiables : un groupe de dunes situé au sud de la boîte, avec des points hauts de crêtes compris entre 12 m et 10 m de profondeur et un groupe de dunes plus profondes avec des crêtes se situant entre 18 m et 16 m de profondeur au nord.

La gamme des hauteurs maximales des dunes est identique pour les deux boîtes (Figure 9). Les dunes les plus hautes présentent des hauteurs maximales autour de 3 m tandis que les dunes les plus basses ont des hauteurs maximales autour de 1 m.

La hauteur maximale des dunes a varié au cours des 20 mois de l'étude. La hauteur des dunes les plus petites (e.g. dune 6) a été multipliée ou divisée par deux selon les périodes. Ces variations ne semblent pas corrélées avec la taille initiale des dunes.

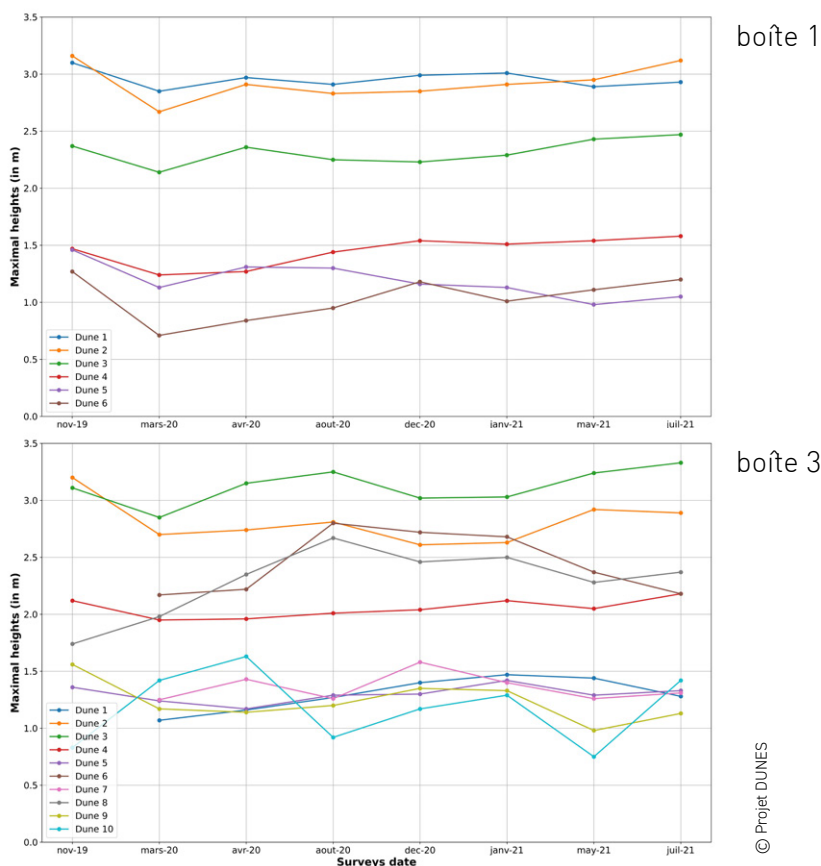
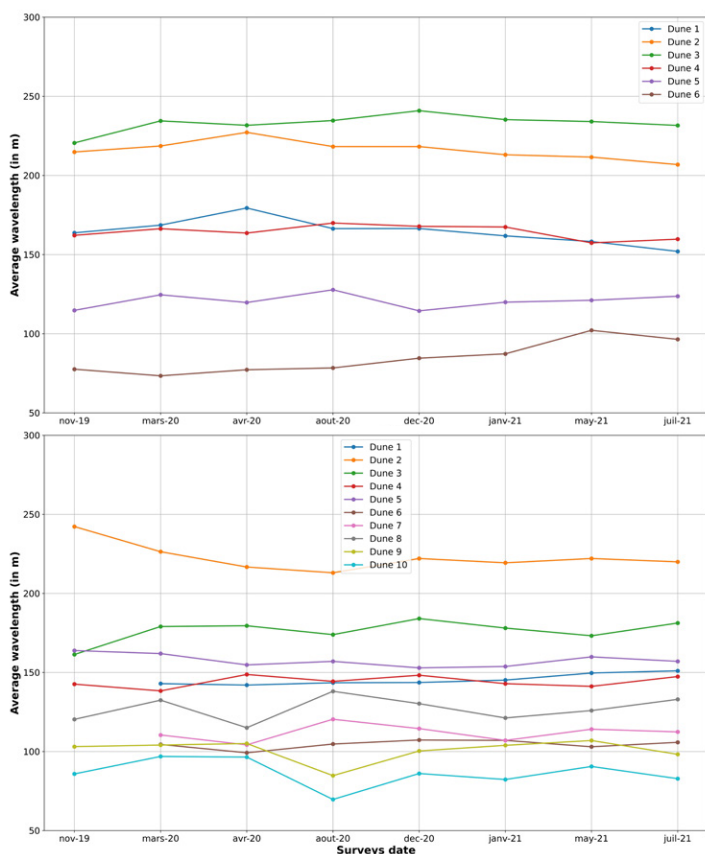


Figure 9 : Hauteur maximale (Hmax) des dunes des boîtes 1 et 3 entre novembre 2019 et juillet 2021

• Longueur d'onde

Les dunes des boîtes 1 et 3 correspondent à de grandes à très grandes dunes selon la classification d'Ashley (1990), basée sur la hauteur et la longueur d'onde des dunes. La longueur d'onde moyenne des dunes varie entre 85 et 233 m pour la boîte 1 et entre

86 et 223 m pour la boîte 3 (Figure 10). De manière générale, les plus grandes dunes présentent les plus grandes longueurs d'onde et réciproquement. Au cours du temps, les longueurs d'onde des différentes dunes ont varié entre 8 et 30 m. Cette variation semble indépendante de la dimension des dunes.



boîte 1

boîte 3

Figure 10 : Longueur d'onde moyenne (m) des dunes des boîtes 1 et 3 entre novembre 2019 et juillet 2021

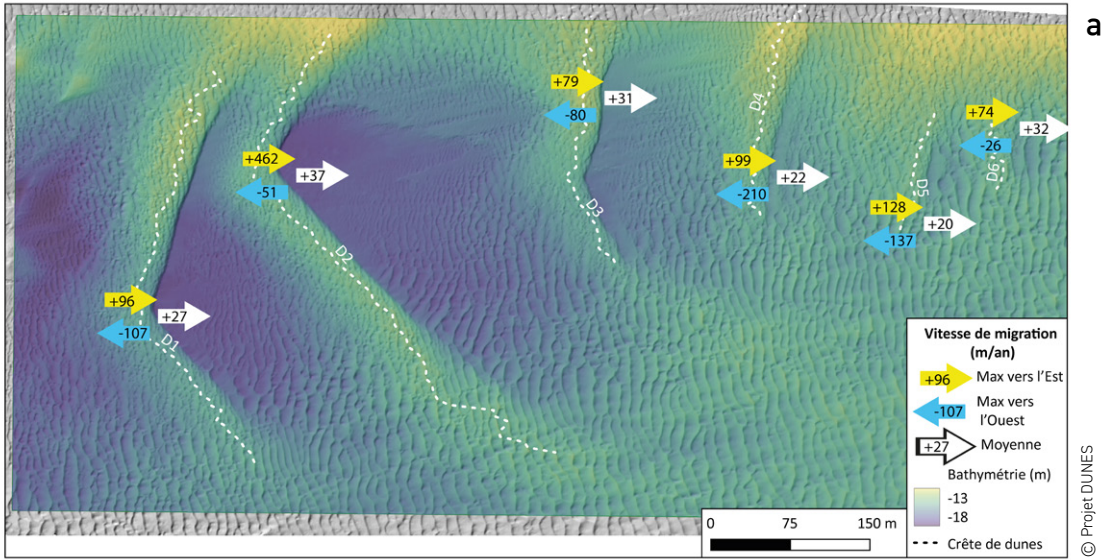
• Sinuosité

La sinuosité étant un rapport entre l'extension longitudinale (correspondant à la ligne imaginaire qui relie les deux extrémités de la crête) et la longueur réelle de la crête, les valeurs sont comprises entre 0 et 1 et sont adimensionnelles, 1 étant une dune rectiligne et 0 très sinueuse. Du fait de la présence de deux dunes barkhanes (dunes 1 et 2), les dunes de la boîte 1 sont, en moyenne, plus sinueuses que les dunes de la boîte 3. Les indices de sinuosité sont compris entre 0,67 et 0,95 pour la boîte 1, tandis que ceux de la boîte 3 sont compris entre 0,83 et 1. Au cours du temps, la sinuosité des dunes de la boîte 1 varie de façon plus importante que celle des dunes de la boîte 3. La variabilité de l'indice de sinuosité semble dépendre de la forme de la dune (barkhane ou rectiligne), de ses dimensions et de la présence ou non de corps sédimentaires surimposés.

• Dynamique des dunes

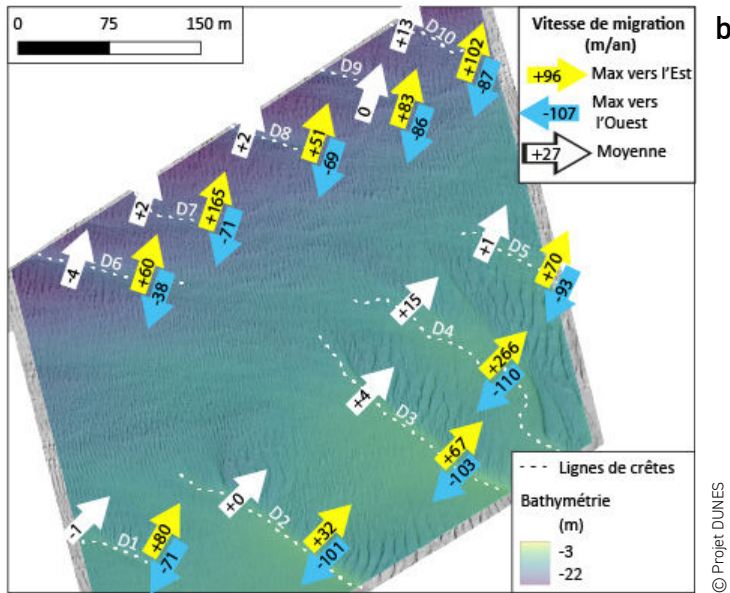
Selon les conditions hydrodynamiques auxquelles elles sont soumises, les dunes connaissent des migrations différentes. De manière théorique, les dunes se déplacent dans la direction du courant de marée dominant. À Dunkerque, la théorie se confirme et les dunes se déplacent dans la même direction que le courant de flot dirigé vers le nord-est (Figure 11). Néanmoins, entre mars et avril 2020, des vents de nord-est et d'est ont soufflés à plus de 100 km/h sur la zone, générant des houles importantes dirigées vers le sud-ouest, dans le sens inverse du courant de flot. Ces houles ont eu un impact direct sur la direction de migration des dunes qui s'est trouvée inversée (Figure 11 et Figure 12).

Par ailleurs, avec des vitesses de migrations moyennes variant entre 0 et 15 m/an, les dunes de la boîte 3 sont moins dynamiques que celles de la boîte 1 dont les vitesses de migrations moyennes sont comprises entre 20 et 37 m/an (Figure 11).



a

© Projet DUNES



b

© Projet DUNES

Figure 11 : Vitesse de migration de chacune des dunes sous-marines de la boîte 1 (a) et 3 (b). Les vitesses de migration maximales le long des transects et la moyenne ont été calculés sur les 20 mois de mesure.

Pour l'ensemble des dunes étudiées, il apparaît une très forte hétérogénéité dans le déplacement, bien

que les vitesses de migration soient toutes comprises dans le même ordre de grandeur.

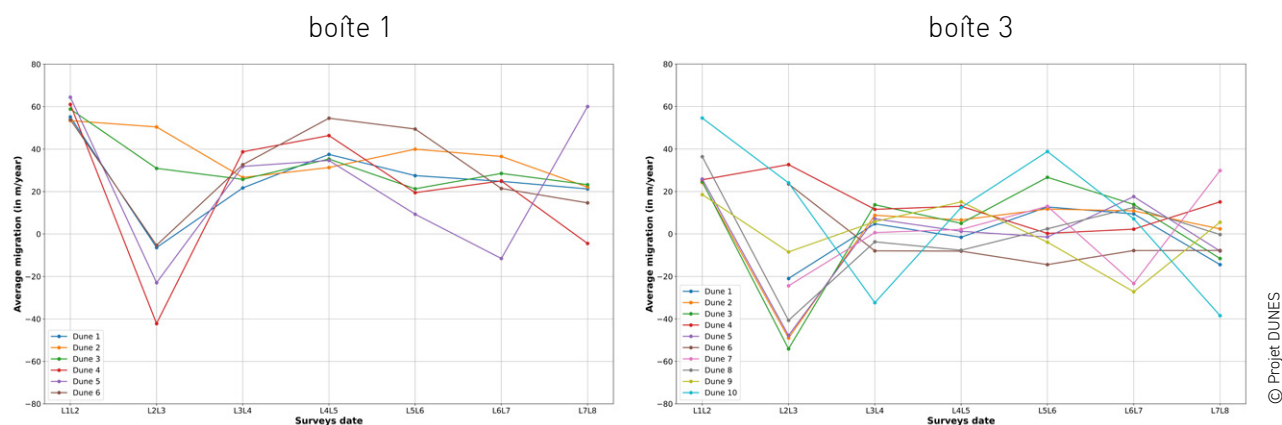


Figure 12 : Taux de migration moyens par dune pour la boîte 1 et 3 de novembre 2019 à juillet 2021 sur l'ensemble des périodes.

© Projet DUNES

2

Morphodynamique des dunes

Lors de certaines périodes, les dunes suivent toutes une migration vers l'est (pour la boîte 1) et le nord-est (pour la boîte 3). C'est le cas pendant l'hiver 2019-2020 (entre novembre 2019 et mars 2020) durant lequel les épisodes de vents soutenus proviennent surtout du sud à l'ouest. Les vitesses moyennes de migration par dune sont alors comprises entre 53 et 64,5 m/an pour les dunes de la boîte 1 et entre 18,5 et 54,6 m/an pour les dunes de la boîte 3.

Entre mars et avril 2020, malgré le renforcement des courants de flot lors des forts coefficients de marée (coefficient 117), la présence exclusive de vents de nord-nord-est et d'est a probablement renforcé les courants de jusant et certaines crêtes de dunes ont migré vers l'ouest (pour la boîte 1) et le sud-ouest (pour la boîte 3). Néanmoins, un tiers des dunes a continué de migrer vers l'est ou le nord-est, leur vitesse de migration n'étant pas toujours ralentie.

3. Conclusion

Selon le paramètre morphologique considéré, une certaine variabilité peut être observée au cours du temps pour une même dune et entre les différentes dunes. Pour des conditions hydrodynamiques (marée, houle) données, les dunes montrent une réponse similaire en termes de vitesses de migration, alors que la morphologie ne répond pas de la même manière d'une dune à une autre. L'ensemble des dunes migre à des vitesses du même ordre de grandeur en moyenne

Entre avril 2020 et juillet 2021, les forts épisodes de vent proviennent majoritairement du sud à l'ouest et quelques fois du nord à l'est. Lors de ces 16 mois, le comportement des dunes de la boîte 1 diffère de celui de la boîte 3. Les dunes de la boîte 1 migrent globalement vers l'est, à des vitesses comprises entre 9,3 et 60 m/an. Deux migrations vers l'ouest ont été observées pour la dune 5 entre janvier et mai 2021, et pour la dune 4 entre mai et juillet 2021. Pour la boîte 3, les déplacements sont contrastés entre les dunes situées au sud (1 à 5) du banc sableux et celles au nord (6 à 10). Les dunes les plus sensibles aux vents provenant d'est sont les plus petites, bien que quelques exceptions soient observées. Lors de l'analyse par transects, il ressort que, malgré une tendance de migration de la dune dans une direction, souvent, au minimum un transect présente un déplacement dans le sens contraire.

(jusqu'à un maximum observé de 462 m par an dans la boîte 1, Figure 11) vers l'est ou le nord-est selon la boîte considérée sous l'influence des courants de marée et de vents de sud à ouest. Lorsque la direction des vents est inversée et qu'ils proviennent du nord-est comme au printemps 2020, certaines dunes peuvent voir leur vitesse de migration ralentie ou bien encore leur direction de migration modifiée.

1. Méthode

Les flux sédimentaires transitant sur les fonds au large de Dunkerque constituent une donnée importante pour mieux appréhender la dynamique sédimentaire près du fond, comprendre la morphodynamique des dunes et anticiper ses effets sur les structures du futur parc éolien en mer de Dunkerque.

Deux approches ont pour cela été utilisées et comparées :

- l'approche par "dune tracking" (e.g. Hoekstra *et al.*, 2004)
- l'utilisation de formules empiriques du transport sédimentaire par charriage (Yalin, 1963 ; Van Rijn, 1984 ; Wu *et al.*, 2000).

Les flux sédimentaires estimés ont ensuite été comparés aux conditions météocéaniques.

• Calcul de flux sédimentaire par l'approche "dune tracking"

Les modifications de morphologie et la migration des dunes sont le résultat du transport sédimentaire, essentiellement par charriage. La méthode du "dune tracking" (Hoekstra *et al.*, 2004 ; Ferret, 2011 ; Schmitt et Mitchell, 2014 ; Michel, 2016) fait intervenir :

- des paramètres morphologiques de la dune (hauteur, longueur d'onde et largeur) ;
- des paramètres propres aux sédiments (porosité et masse volumique) ;
- les vitesses de migration.

Elle permet d'approcher le volume de sédiments constituant la dune qui se déplace au cours du temps :

$$Qb = cfH*(1-p) \quad \text{Eq. 1}$$

Avec : c, la vitesse de migration de la dune ; H, la hauteur de la dune ; f, le facteur de forme ; p, la porosité du sédiment.

Le facteur de forme s'obtient selon l'équation suivante :

$$f = V / (\lambda \times H) \quad \text{Eq. 2}$$

Avec λ la longueur d'onde de la dune (m) et V, la surface de la dune.

La surface des dunes s'obtient de la manière suivante :

$$V = L \times H / 2 \quad \text{Eq. 3}$$

Avec : L, la largeur de la dune

La vitesse de migration et la hauteur des dunes ont été mesurées tous les 20 m le long de chaque transect (cf. Fiche n°1). Les flux sédimentaires sont ensuite estimés pour chaque transect puis moyennés sur chaque dune.

Afin d'exprimer les flux sédimentaires en masse sédimentaire sèche (en t/m/an), les flux obtenus avec l'équation (1) sont multipliés par la masse volumique de la silice qui est le principal constituant des dunes (soit 2650 kg/m³).

Les estimations de flux sédimentaires par "dune tracking" sont présentés dans Bary (2021) et Le Bot *et al.* (2023).

• Calcul du flux sédimentaires charriés en utilisant des formules empiriques

La méthodologie de ces calculs est décrite en détail dans Michelet *et al.* (2022) qui se base sur le code développé par Blanpain (2009) en utilisant les formulations de Yalin (1963), Van Rijn (1984) et Wu *et al.* (2000).

Afin de proposer une première explication sur l'inversion de la direction de migration des dunes 1, 4, 5 et 6 de la boîte 1, l'influence des forçages hydrodynamiques est étudiée via l'estimation des flux sédimentaires associés.

L'équation utilisée pour calculer les flux sédimentaires charriés est la suivante :

$$Q_y = \frac{0,5 \cdot U \cdot (u_*^2 - u_{crit}^2)}{(s-1)g} \quad \text{Eq. 4}$$

où $U = u_c + u_b$, soit la somme de la vitesse du courant et la vitesse de la houle au fond, u_* la vitesse de frottement, u_{crit} la vitesse critique de mise en mouvement, s le rapport des masses volumiques eau/sédiment et g la constante de gravitation.

Cette équation a été appliquée en un point, situé dans la boîte 1 à 15,6 m de profondeur (niveau moyen entre les crêtes et les creux des dunes). Les caractéristiques

téristiques du courant et de l'évolution de la surface libre (surface de l'eau) ont été extraites d'une simulation MARS3D couvrant la zone Manche - Golfe de Gascogne entre novembre 2019 et juillet 2021 (Caillaud *et al.*, 2016). Les intensités et directions du courant considérées dans cette étude, sont extraites à 0,2 m au-dessus du fond. De la même manière, les caractéristiques de la houle sont extraites d'une simulation de WaveWatch3 couvrant la zone Manche - Golfe de Gascogne pour la période étudiée (Boudière *et al.*, 2013).

Les calculs ont été effectués avec un pas de temps d'une heure pour le cas en conditions réelles et un pas de temps de 5 minutes pour le cas idéalisé.

Les flux instantanés sont ensuite projetés sur l'axe est-ouest puis sommés et convertis en t/m/an ou en t/m/cycle de marée. La direction du transport du sédiment est considérée égale à celle du courant et négative pour un transport vers l'ouest ou positive vers l'est.

Le résultat final permet donc d'estimer le flux sédimentaire résiduel sur la période temporelle considérée.

• Scénarios étudiés :

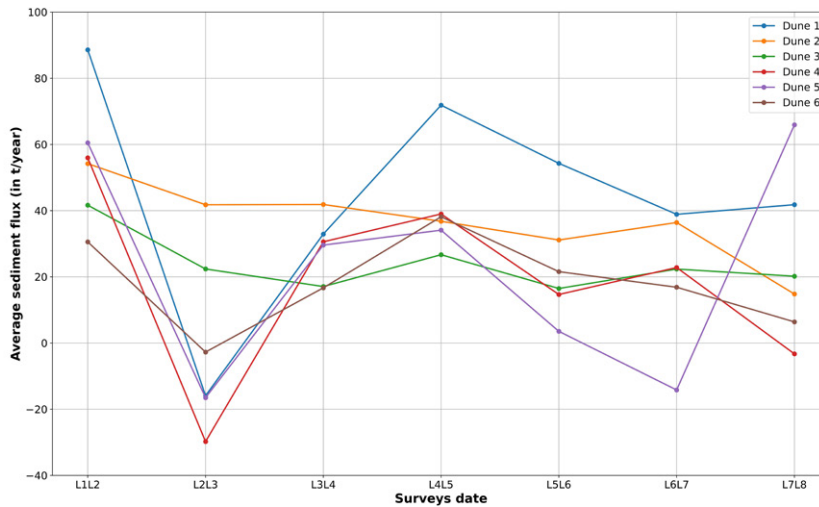
A partir des données de vents et de marée, 3 scénarii types de conditions météocéaniques ont été enregistrés via les levés bathymétriques réalisés entre novembre 2019 et juillet 2021 :

- Scénario 1 : vents de sud-ouest à ouest avec 5 à 10 % de marées exceptionnelles (coefficient > 100) (périodes entre novembre 2019 et mars 2020, entre août et décembre 2020 et entre mai et juillet 2021.
- Scénario 2 : vents de direction variable sud-sud-ouest à ouest-sud-ouest, et nord à nord-est avec moins de 2 % de marées exceptionnelles (périodes entre avril et août 2020 et entre décembre 2020 et janvier 2021)
- Scénario 3 : Vents de nord-nord-est à est-nord-est avec 1 à plus de 10 % de marées exceptionnelles (période entre mars et avril et de mai à juillet 2021)

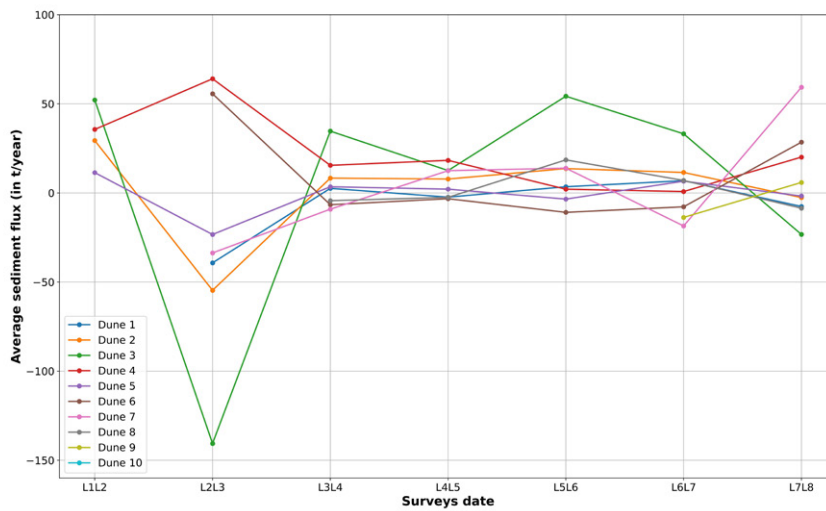
2. Résultats et Discussion

• Calcul de flux sédimentaires par l'approche "dune tracking" :

Les résultats des estimations de flux sédimentaires par l'approche "dune tracking" sont présentés dans la **Figure 13**.



boîte 1



boîte 3

© Projet DUNES

Figure 13 : Flux sédimentaires moyens pour les 6 dunes de la boîte 1 et les 10 dunes de la boîte 3 calculés entre novembre 2019 et juillet 2021

En moyenne, sur l'ensemble de la période d'étude, les flux sédimentaires calculés sont du même ordre de grandeur d'une dune à une autre.

Pour la boîte 1, ils sont, en moyenne sur l'ensemble de la période étudiée, compris entre 18,22 et 44,65 t/m/an et sont orientés vers l'est. Les dunes 1 et 2 (les plus grandes) enregistrent les flux sédimentaires moyens les plus élevés avec respectivement 46 et 40 t/m/an.

Les flux sédimentaires moyens par dune présentent une forte variabilité temporelle, en valeur absolue et en direction (Figure 13) :

- Durant les périodes de vents de sud-ouest à ouest avec 5 à 10 % de marées exceptionnelles (périodes entre novembre 2019 et mars 2020, entre août et décembre 2020 et entre mai et juillet 2021), la migration est orientée vers l'est. Elle est maximale avec des flux sédimentaires associés pouvant atteindre des valeurs variant de 38,15 t/m/an pour la dune 6 à 88,61 t/m/an pour la dune 1.

• Estimation des flux sédimentaires par l'utilisation de formules empiriques du transport sédimentaire :

Le calcul des flux sédimentaires par l'utilisation de formules empiriques a été réalisé pour la boîte 1 et pour la période entre mars et avril 2020 uniquement car ces cas ont été jugés intéressants scientifiquement (scénario 3 : Vents de nord-nord-est à est-nord-est avec plus de 10 % de marées exceptionnelles).

La Figure 14 présente les caractéristiques du courant et de la houle extraits des modèles précédemment décrits pour la période du 18/03/2020 au 16/04/2020. Les directions du courant sont symétriques avec une direction principale au pic de flot de N90° et de jusant respectivement de N270°.

- Durant les périodes de vents de direction variable sud-sud-ouest à ouest-sud-ouest et nord à nord-est avec moins de 2 % de marées exceptionnelles (périodes entre avril et août 2020 et entre décembre 2020 et janvier 2021), les flux sont orientés vers l'est et présentent des valeurs maximales plus faibles variant de 16,68 t/m/an pour la dune 6 à 54,31 t/m/an pour la dune 1,

- Durant les périodes de vents de nord-nord-est à est-nord-est avec 1 à plus de 10 % de marées exceptionnelles (période entre mars et avril 2020 et entre mai et juillet 2021), les flux sont faibles et orientés vers l'est pour les dunes 2 et 3 mais sont orientés vers l'ouest pour les dunes 1, 4, 5 et 6, indiquant une inversion des courants sous l'effet de vents nord-nord-est à est-nord-est.

Pour les dunes de la boîte 3, les flux sédimentaires moyens varient entre 6 t/m/an vers le sud-ouest et 22 t/m/an vers le nord-est.

Les intensités de courant extraites montrent une dominance de la période de flot. Pour des marées d'extrêmes vives eaux (autour du 28/03/20), la vitesse au pic de flot peut atteindre le double de celle au pic de jusant. Les données extraites de la variation de la surface libre montrent également que les pics de flot et de jusant sont synchronisés avec la pleine et la basse mer.

Durant cette période, des événements de vents forts ont pu être observés en provenance de l'est-nord-est et du nord-nord-est. La houle extraite (Figure 14) est cohérente avec ces événements et provient majoritairement du nord et du nord-nord-est. Les caractéristiques de la houle montrent que, pendant cette période, les hauteurs significatives sont inférieures à 1 m.

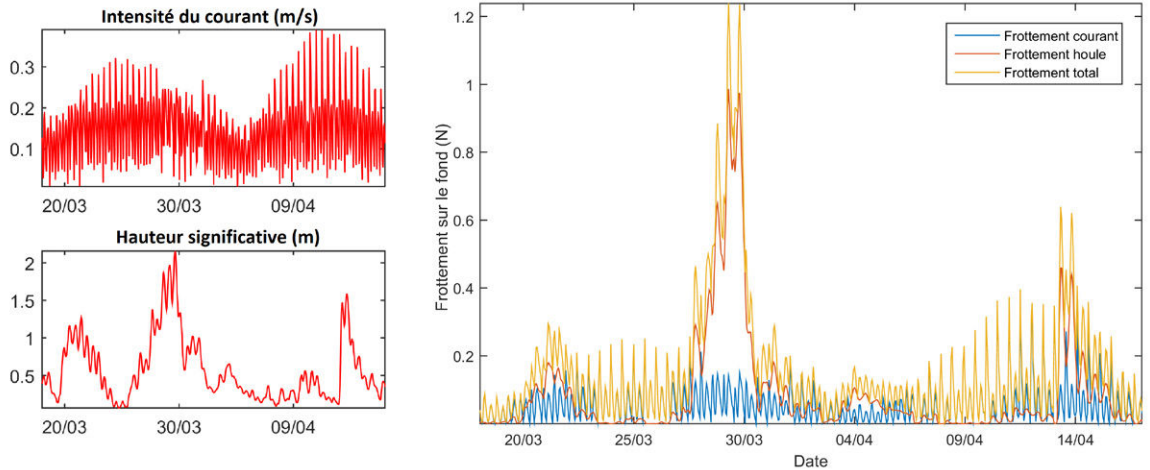


Figure 14 : Conditions hydrodynamiques réalistes extraites des simulations MARS3D et WW3 sur la période L2-L3. Frottement induit pour les forçages de courant, houle et la composition des deux sur la même période.

La Figure 14 montre également l'évolution temporelle des frottements induits par le courant, la houle et houle+courant. Il existe une dominance de l'influence de la houle sur le transport sédimentaire. En effet, la valeur estimée pour le frottement induit par le courant pour une marée d'extrême vive eau (coefficient 116) est plus faible que le frottement induit par la houle avec des hauteurs significatives aux alentours de 2 m. Dans la zone, la houle induit un frottement supplémentaire sur le fond pouvant engendrer la mise en mouvement d'une plus grande quantité de sédiment.

Durant la période du 27/03 au 30/03, on observe que les flux calculés sur un cycle de marée peuvent être presque divisés par deux entre la marée haute

et la basse mer. Cette variation n'est pas corrélée avec les maximums de hauteur de houle significative, mais les calculs montrent une migration plus importante pendant les périodes de jusant. En effet, le frottement engendré par la houle est plus important pour des hauteurs d'eau plus faibles. Ainsi, lors de la basse mer, le pic de jusant synchronisé avec une forte houle est le moteur qui explique que le flux sédimentaire peut être multiplié par deux au cours d'un cycle de marée.

Les flux estimés par équation empirique ont été confrontés aux résultats du « Dune Tracking » et sont cohérents tant par la direction des flux que par les ordres de grandeur.

3. Conclusion

Les flux sédimentaires ont été calculés :

- Avec la méthode de « Dune tracking » réalisée à partir de l'analyse morphométrique de données bathymétriques acquises dans le projet DUNES
- Par une approche empirique se basant sur les conditions hydrodynamiques (houle et courant) extraites de modèles numériques (WWIII et Mars 3D).

Ces calculs ont été réalisés dans l'objectif de mieux comprendre les phénomènes physiques et les forçages météo-marins impactant la migration des dunes sous-marines au large de Dunkerque.

D'après l'analyse réalisée par « Dune tracking » pour la boîte 1, les flux sédimentaires sont globalement dirigés vers l'est durant toute la période entre novembre 2019 et juillet 2021 sauf durant la période entre le 16/03/20 et le 18/04/2020, où ils sont inversés et dirigés vers l'ouest. Les flux estimés via les formules empiriques pour la boîte 1 en mars-avril 2020 reproduisent bien cette inversion de la direction de migration et sont du même ordre de grandeur.

La basse mer étant synchronisée avec les pics de jusant, l'influence de la houle sur le transport sédimentaire est donc maximal au moment où le courant est dirigé vers l'ouest. Un épisode de fortes vagues avec des vents provenant du nord-est engendre donc une accélération de la migration des dunes vers l'ouest, ce qui vient contrebalancer la migration résiduelle vers l'est imposée par le schéma des courants tidaux.

Cette étude reste cependant limitée. Le calcul empirique étant effectué en un point, il ne permet pas d'expliquer la variabilité entre les dunes sur une même période et notamment pourquoi la migration de certaines dunes est plus importante que d'autres. Une perspective pour répondre à ce nouveau questionnement serait de réaliser une simulation tridimensionnelle à l'échelle de la zone d'étude et de quantifier les influences de chaque processus physique sur les différentes dunes, ainsi que les interactions qu'elles peuvent avoir entre elles, avec des outils tels que CROCO ou Telemac.

En savoir +

Michelet, N., Bary, M., Blanpain, O., Le Bot, S., Nexer, M., 2022. Estimation de l'influence des conditions hydrodynamiques sur les flux sédimentaires associés à la migration des dunes au large de Dunkerque.

Actes des 17^e Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil

(Lien : https://www.paralia.fr/jngcgc/17_43_michelet.pdf)

Bary, M., 2021. Morphodynamique des dunes sous-marines et flux sédimentaires associés. Application au site éolien offshore de Dunkerque. Mémoire de stage de Master 2 GEHYD, Université de Rouen Normandie, 56 p.

Le Bot, S., Bary, M., Fournier, M., Husté, A., Michelet, N., Blanpain, O., Nexer, M., Garlan, T., 2023. Marine dune morphodynamics and associated sediment fluxes (off Dunkirk, France). Spatio-temporal variability and relations with hydrodynamic forcings. Marine and River Dune Dynamics - MARID VII - 3-5 April 2023 - Rennes, France. pages 155-162.

Michelet, N., Bary, M., Blanpain, O., Le Bot, S., Nexer, M., 2023. Estimation of marine dunes migration through sediment flux calculation and three-dimensional numerical modelling. Marine and River Dune Dynamics - MARID VII - 3-5 April 2023 - Rennes, France, pages 195-202.

1. Contexte

La connaissance actuelle des communautés macrobenthiques⁴ habitant les fonds sableux des dunes provient principalement d'études qui ont été menées à grande échelle sans spécifiquement cibler ces habitats particuliers. De plus, ces études s'attachaient à décrire la structure des communautés benthiques par une approche taxonomique et ne considéraient pas le rôle joué par les différentes espèces vivant dans les dunes sous-marines. La connaissance du fonctionnement de

l'écosystème benthique des dunes sous-marines reste donc fragmentaire, alors qu'elles sont situées dans des zones avec des régimes de vent forts et constants, propices à l'implantation de parcs éoliens en mer. Il est donc important de fournir une compréhension approfondie de la dynamique spatio-temporelle des écosystèmes dunaires, à la fois d'un point de vue structurel et fonctionnel afin d'anticiper au mieux les impacts potentiels de l'industrie des EMR.

2. Méthode

La zone d'étude s'étend sur une surface de 80 km² dans le secteur des bancs de Flandre, au large de Dunkerque. Cette zone présente l'avantage d'abriter différents types de dunes (i.e. dunes barkhanes, dunes transverses et bancs), ce qui permet d'évaluer le rôle de la morphologie du fond marin dans la structure et le fonctionnement des communautés benthiques.

La dynamique spatio-temporelle des communautés macrobenthiques a été évaluée à l'aide d'un plan d'échantillonnage stratifié. Celui-ci a été défini à partir d'un relevé bathymétrique réalisé entre 2016 et 2017 par le Service hydrographique et océanographique de la

Marine (Shom), trois types de formes morphologiques dunaires ont été identifiés (i.e. dunes barkhanes, dunes transverses et bancs) à l'intérieur de zones d'échantillonnage appelées "boîtes".

23 stations ont ainsi été réparties, dans la mesure du possible, (i) entre les différents types de dunes et (ii) entre le creux et le sommet des dunes. Cet échantillonnage stratifié a été réalisé à l'automne 2019 et a été reproduit au printemps 2020 afin d'appréhender la dynamique saisonnière. Trois stations supplémentaires (S21, S22 et S23) ont été positionnées dans une zone de référence témoin, exempte de figures sédimentaires (Figure 15).

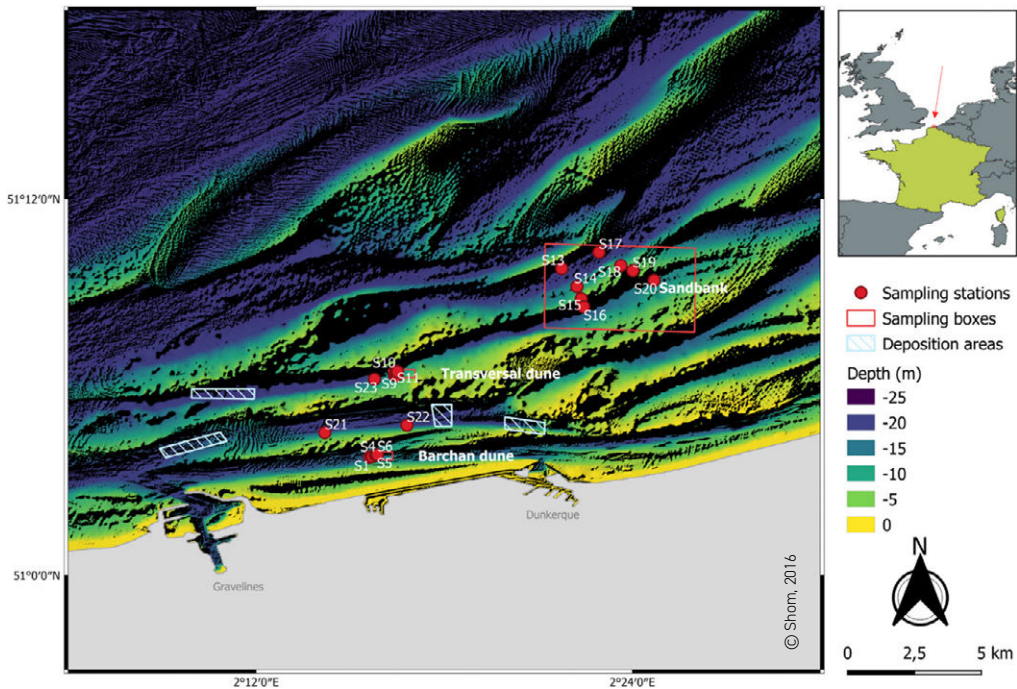


Figure 15 : Carte de la stratégie d'échantillonnage superposée au modèle numérique de terrain (résolution de 0,0002° (environ 20 m) fourni par le Shom. Les détails sur la dune 3D et sur la dune barkhane sont représentés sur la Figure 16. Les zones hachurées représentent les zones de dépôt des sédiments dragués par le Grand port maritime de Dunkerque.

⁴ Macrobenthique : taille > 1 mm

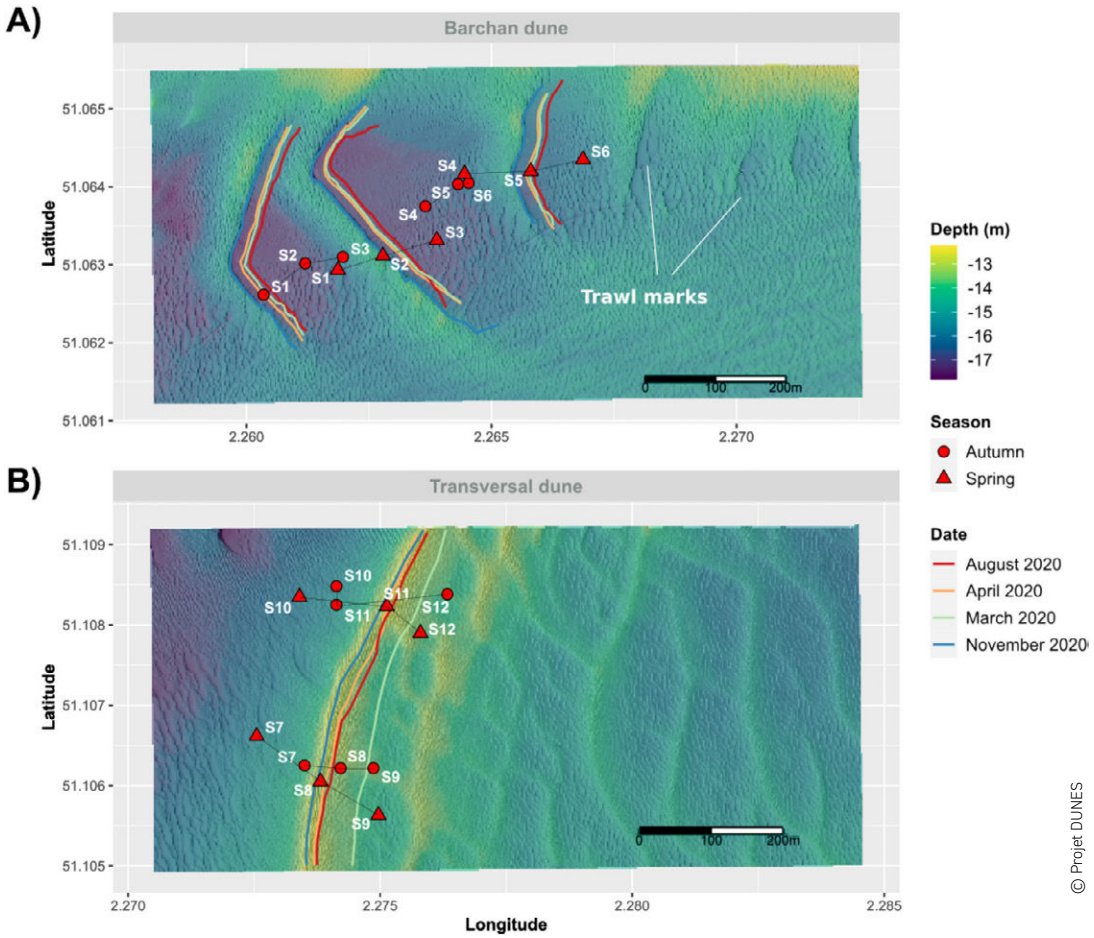


Figure 16 : Evolution de la position des crêtes sur [A] les dunes barkhane et [B] sur la dune 3D. Les lignes de crête sont superposées à la carte bathymétrique obtenue en novembre 2019. La position de chaque station d'échantillonnage est également indiquée. La hauteur des dunes barkhane et de la dune transversale était respectivement de 3 et 4 m. Leur longueur d'onde était d'environ 50 m.

	Dunes barkhanes	Dunes 3D	Bancs	Zone de référence
Station d'échantillonnage (S)	1 à 6	7 à 12	13 à 20	21 à 23
Boîte	1	2	Proche boîte 3	-
Taille des grains (μm)	$327 \pm 35 \mu\text{m}$	$397 \pm 144 \mu\text{m}$	$269 \pm 32 \mu\text{m}$	$(246,75 \pm 40,5 \mu\text{m})$
Indice de tri	$1,72 \pm 0,68$	$1,70 \pm 0,55$	$1,51 \pm 0,41$	$1,24 \pm 0,03$
Teneur en vase	$1,1 \pm 0,9 \%$			$1,3 \pm 1,4 \%$

Tableau 3 : Caractéristiques granulométriques des stations échantillonnées

Trois réplicas ont été collectés à chaque station d'échantillonnage en utilisant une benne Van Veen (0,1 m²). Les échantillons ont été tamisés sur le bateau et conservés dans une solution de formol tamponné à 4,5 %. Au laboratoire, les échantillons ont été déformolés puis les organismes macrobenthiques ont été extraits avant d'être identifiés à la loupe binoculaire et au microscope, dénombrés et pesés (poids sec libre de cendre). Un réplica supplémentaire a été échantillonné par station pour l'étude des caractéristiques sédimentaires (taille des grains, indice de tri, proportion de vase, taux de matière organique).

La diversité structurelle des communautés benthiques a été évaluée en calculant plusieurs indicateurs résumant la distribution des espèces présentes à chaque station : la richesse spéci-

fique⁵ (S), l'abondance totale, la biomasse totale ainsi que la régularité de Pielou⁶ (J'). La diversité fonctionnelle des communautés benthiques a, quant à elle, été étudiée à l'aide d'une analyse des traits biologiques (BTA). Les traits sélectionnés étaient la mobilité, la fragilité, la position par rapport au substrat, la taille moyenne, le mode d'alimentation, la durée de vie, le développement des œufs, le développement larvaire et le stade de vie. La matrice de traits utilisée a été publiée via le portail SEANOE d'Ifremer⁷.

Des analyses statistiques (uni- et multivariées) ont ensuite été menées pour évaluer la contribution du type de dunes, de la saison et de la position sur la dune aux caractéristiques sédimentaires ainsi qu'à la diversité structurelle et fonctionnelle macrobenthiques.

3. Résultats

• Caractéristiques générales des communautés benthiques

De manière générale, les organismes macrobenthiques collectés dans la zone de Dunkerque sont soit caractéristiques de la communauté à *Nephtys cirrosa*, présente dans les sédiments sableux bien triés, soit de la communauté à *Ophelia borealis* que l'on trouve dans les sédiments sableux grossiers. Dans cette étude, les communautés macrobenthiques étaient principalement dominées par trois espèces d'annélides : *Lanice conchilega*, *Spiophanes bombyx* et *Magelona filiformis*. Cependant, ce résultat doit être traité avec prudence et ne doit pas être considéré comme une caractéristique des habitats de sables mobiles. En effet, la population de *Lanice conchilega* était uniquement composée d'individus juvéniles et n'a été observée que lors du suivi réalisé au printemps. Les communautés macrobenthiques de la zone de Dunkerque sont oligospécifiques, avec 14 ± 6 espèces/m², et présentent de faibles densités [1338 ± 4919 ind/m²] et de faibles valeurs de biomasse [2921 ± 4003 mg AFDW/m²]. Ceci s'explique par les contraintes naturelles particulièrement fortes impo-

sées par les déplacements constants des différentes structures sédimentaires présentes sur le fond marin. Ces chiffres sont cohérents avec ceux obtenus au cours d'études historiques réalisées à proximité de Dunkerque et dans les zones de dunes de la partie belge du sud de la mer du Nord. Ces contraintes environnementales se reflètent d'ailleurs également dans la composition en traits fonctionnels. En effet, la plupart des organismes sont des dépositivores ou des prédateurs/charognards mobiles. La plupart des espèces ont un cycle de vie court et une productivité élevée, en relation avec leur petite taille, ce qui permet une recolonisation rapide et la capacité de supporter des taux de mortalité élevés. Certaines espèces sont également émergentes (par exemple *Gastrosaccus spinifer*) et/ou suffisamment mobiles (par exemple *Bathyporeia pelagica*, *Bathyporeia elegans*, *Urothoe brevicornis*) pour éviter l'enfouissement susceptible de se produire pour les espèces sessiles/fixées lors des migrations des dunes. Pour cette raison, les espèces sessiles et les suspensivores étaient presque absentes de la zone étudiée.

⁵ Indice de diversité

⁶ L'indice d'équitabilité de Pielou permet de mesurer la répartition des individus au sein des espèces, indépendamment de la richesse spécifique. Sa valeur varie de 0 (dominance d'une des espèces) à 1 (équirépartition des individus dans les espèces).
Grall, J. & Coic, N., 2005 - Synthèse des méthodes d'évaluation de la qualité du benthos en milieu côtier. Rebut, 48, 90.

⁷ <https://www.seanoe.org/data/00696/80785/> -

Robert, A.E., Quillien N., Bachà M., Caille C., Nexas M., Parent B., Garlan T., Desroy N., 2021. Biological traits of macroinvertebrates associated with subtidal sandy benthos. SEANOE. <https://doi.org/10.17882/80785>

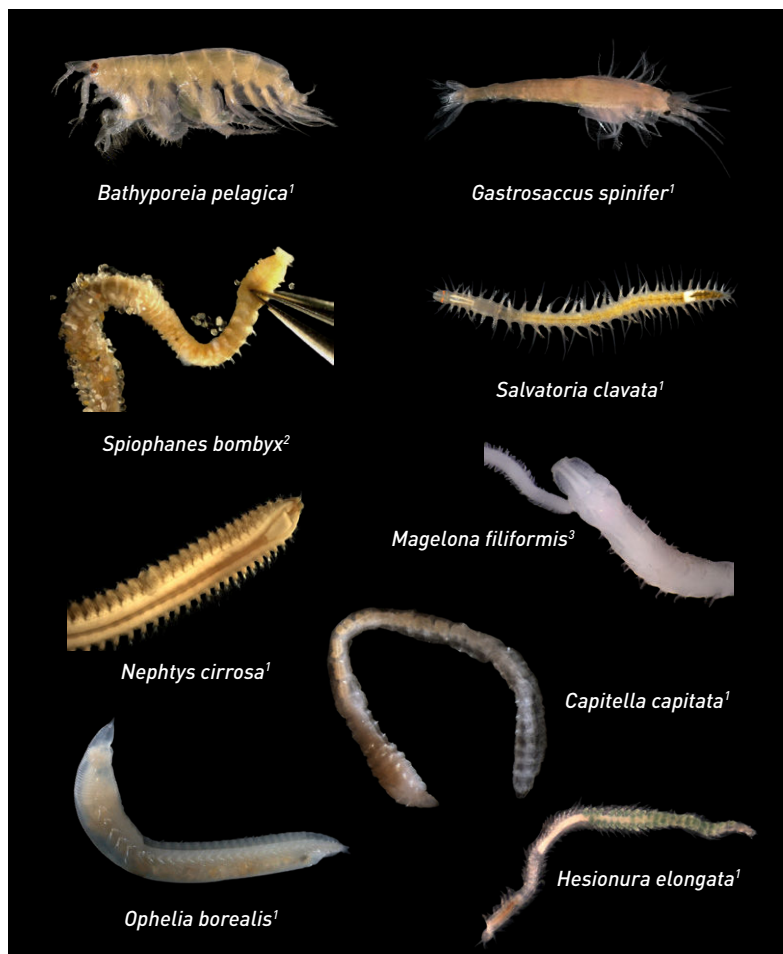


Figure 17 : Photographies à la loupe binoculaire de quelques invertébrés caractéristiques des dunes au large de Dunkerque.

© ¹Hans Hillewaert, ²Lisa Latry (MNHN Dinard), ³Dr Katie Mortimer-Jones

• **Les communautés benthiques varient avec le type de dune**

Les caractéristiques sédimentaires des dunes barkhanes et transverses sont significativement différentes de celles du banc de sable et de la zone de référence (Tableau 3). En effet, les sédiments des dunes transverses et des dunes barkhanes sont plus grossiers et moins triés que ceux du banc de sable et de la zone de référence. La teneur en vase est remarquablement faible quel que soit le type dunaire,

mais affiche des valeurs plus élevées pour la dune barkhane et dans la zone de référence. Ces changements de composition de la matrice sédimentaire induisent, en retour, des différences dans la structure et le fonctionnement des communautés benthiques. Ainsi, des gradients clairs de richesse spécifique et de biomasse ont effectivement été observés entre la dune transverse, la dune barkhane, le banc de sable et la zone de référence (Figure 18).

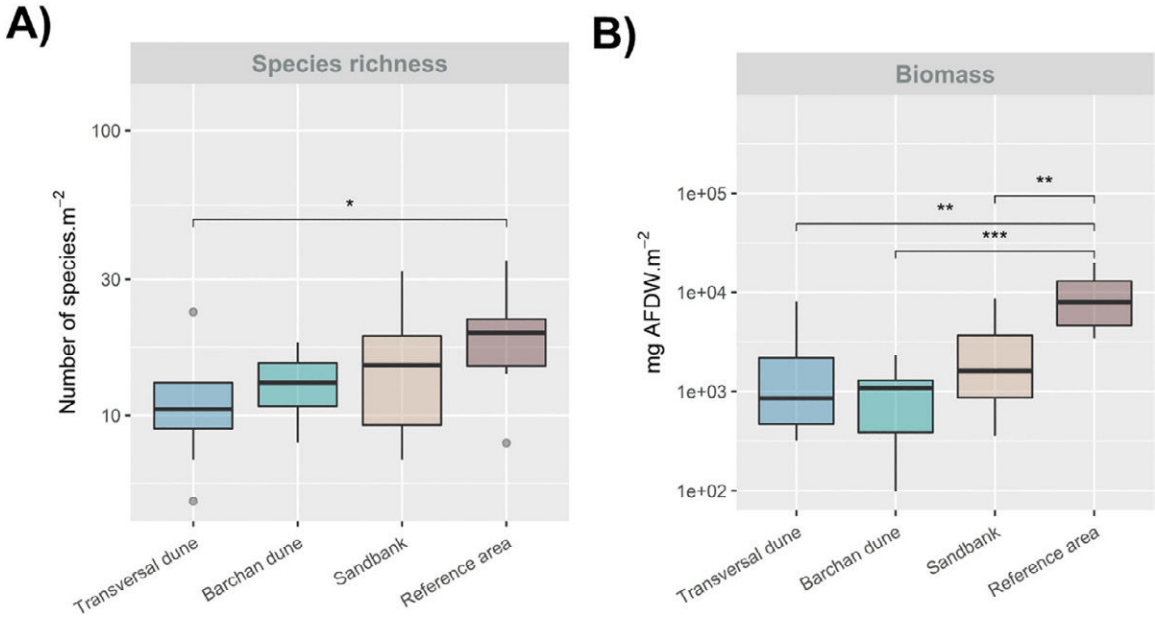


Figure 18 : Distribution de la richesse en espèces (A) et de la biomasse (B) entre les différents types de formes sédimentaires et dans la zone de référence. Les différences statistiques ont été évaluées grâce aux tests de Wilcoxon par paire. Les étoiles indiquent la valeur p des tests : "****" : p-value <0.001 ; "****" : p-value <0.01 ; "**" : p-value <0.05

© Projet DUNES

D'un point de vue fonctionnel, les résultats de la présente étude sont conformes au schéma classique de succession espèces/traits le long de sources de perturbations naturelles ou anthropiques telles que le chalutage de fond. Les zones les moins perturbées sont caractérisées par des carnivores/prédateurs et des espèces de grande taille tandis que les zones perturbées sont dominées par des déposivores, des petits organismes et des organismes à courte durée de vie.

Si les caractéristiques sédimentaires diffèrent selon le type de dunes, notre étude a également mis en évidence des variations intra-dunes, entre le creux et le sommet des structures sédimentaires. La granulométrie est homogène pour la dune barkhane. La taille médiane des grains augmente entre le creux et la crête des dunes transverses et une légère diminution de la taille des grains a été observée entre le creux et la crête du banc de sable.

Bien qu'un gradient dans les caractéristiques sédimentaires ait été observé, il pourrait ne pas être suffisamment marqué pour avoir une influence significative sur la distribution des organismes macrobenthiques (la granulométrie médiane se

situait approximativement entre 250 et 300 µm sur le banc de sable et entre 300 et 450 µm sur les dunes transverses). Ensuite, il est possible que les forts déplacements/mouvements sédimentaires sur les flancs de la dune transverse induisent une homogénéisation à petite échelle de la faune benthique au sein des formes sédimentaires étudiées. Les vitesses de migration des dunes enregistrées à Dunkerque sont en effet supérieures à celles mesurées dans les études précédentes, ce qui suggère un taux de remaniement sédimentaire bien supérieur.

Il faut noter que l'échosondeur du navire a été utilisé pour positionner précisément les stations d'échantillonnage sur les fonds marins. Malgré cela, la taille relativement petite des dunes et la force des courants de marée rendent le positionnement sur la dune (crête ou creux) très difficile. Ces difficultés sont cependant inhérentes à ce type d'étude à petite échelle.

Une augmentation des indicateurs de diversité structurelle et fonctionnelle a été observée entre la campagne d'automne et celle de printemps. Ceci représente un schéma bien connu en domaine benthique côtier en raison :

- du recrutement des larves et des juvéniles au printemps en lien avec l'augmentation de la production primaire et secondaire du plancton,

- des mortalités et des migrations d'espèces en hiver

Ici, le recrutement printanier est caractérisé par des concentrations très élevées de juvéniles de *Lanice conchilega* ainsi que par des densités fortes de certaines espèces telles que *Magelona filiformis*, *Hesionura elongata*, *Crangon crangon*, *Spio martinensis*, *Bathyporeia gracilis*, *Eumida sanguinea* et *Salvatoria clavata*. Ceci vient renforcer les observations réalisées par plusieurs auteurs en mer du Nord.

A notre connaissance, aucune étude n'a mis en évidence le rôle des apports massifs en juvéniles dans le fonctionnement des écosystèmes benthiques, au printemps. Les juvéniles entrent-ils en compétition avec les adultes pour la nourriture et/ou l'occupation de l'espace ? Les juvéniles permettent-ils de stimuler la production macrobenthique en fournissant une source de nourriture pour les petits prédateurs macrobenthiques ? Comment les juvéniles modifient-ils les flux biogéochimiques au printemps ? Ces questions représentent un axe de recherche qu'il serait intéressant d'approfondir.

4. Conclusion

La présente étude montre que la dynamique dunaire est responsable de l'homogénéisation des communautés benthiques sur le flanc des dunes. Elle nuance la théorie écologique selon laquelle l'hétérogénéité spatiale de l'habitat promeut un certain degré de diversité locale en générant un plus grand nombre de niches écologiques (MacArthur et Wilson, 1967 ; Thrush *et al.*, 2006 ; Tilman, 1982) : l'amélioration de la biodiversité ne peut être attendue que si les caractéristiques topographiques, à la fois dans l'espace et dans le temps, sont relativement stables.

Suivant une approche basée sur les traits biologiques, van Denderen *et al.* (2015) ont constaté que les perturbations naturelles (remaniement des dunes) et les perturbations anthropiques (chalu- tage des fonds) induisent une sélection similaire des traits biologiques. En conséquence, ces auteurs ont montré qu'il n'y avait pas d'effet décelable du chalu-

tage de fond sur les communautés benthiques exposées à de fortes perturbations naturelles. Comme vu précédemment, la composition des traits dans la zone de Dunkerque est très similaire à la composition des traits rapportés dans les zones exposées à des perturbations anthropiques. Les espèces pourraient donc être capables d'éviter ou de récupérer rapidement après un événement de perturbation physique, tel que l'ensouillage des câbles. De plus, bien qu'il existe des variations entre les zones dunaires et les zones de référence, un degré relativement élevé de chevauchement est observé entre les différentes communautés. Compte tenu de tous ces éléments, on peut raisonnablement prédire que les activités humaines sur les zones de sable mobile auront probablement un impact limité, tant dans l'espace que dans le temps.

En savoir +

Robert, A.E., Quillien, N., Bacha, M., Caille, C., Nixer, M., Parent, B., Desroy, N., 2021. Sediment migrations drive the dynamic of macrobenthic ecosys-

tems in subtidal sandy bedforms. *Marine Pollution Bulletin*, vol. 171, 112695 <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112695>

L'influence des variables physiques et biologiques sur la structure des communautés de poissons des bancs de Dunkerque

1. Contexte

L'étude se concentre sur plusieurs bancs de sable au large de Dunkerque, de la côte vers le large (respectivement) : Saint-pol, Snouw, Braek, Breedt, In Ratel et Binnen Ratel, rassemblés dans trois zones distinctes (côte, zone transitoire et offshore).

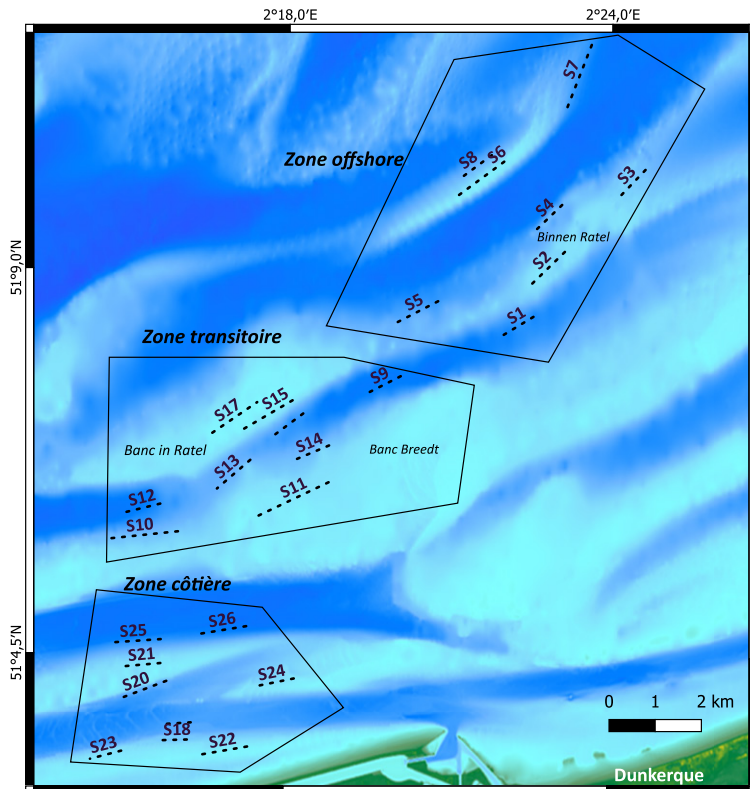
L'objectif de cette étude est de fournir la première analyse détaillée des assemblages de poissons démersaux et d'invertébrés appartenant à la méga-faune vivant dans les bancs de sable situés au large de Dunkerque.

2. Méthode

Un total de 26 stations a été échantillonné au cours de deux campagnes océanographiques (septembre 2019 et mai 2020) (Figure 19). L'engin d'échantillonnage utilisé était un chalut de fond à grande ouverture verticale (GOV) avec une hauteur de tête de 3 m, une longueur de 15,4 m et une ouverture horizontale du chalut de 11 m. Le chalut GOV est adapté à la capture d'espèces démersales et benthopélagiques. Les chalutages ont été effectués pendant la journée

à une vitesse moyenne de 2,5 nœuds pendant 15 à 20 min.

Les 26 stations échantillonnées mesurent 1 km de long et sont réparties sur les bancs contenant des dunes sous-marines autour des boîtes sélectionnées pour le projet. Compte tenu de la taille du chalut, il n'a pas été possible de réaliser une étude à l'échelle des dunes et dans les boîtes.



© Projet DUNES

Figure 19 : Carte de localisation des trois principales zones d'étude (côtère, transitoire et hauturière) et des stations d'échantillonnage (chalut) dans le système de bancs de sable de Dunkerque.

Les variables physico-chimiques de l'eau (température et salinité) ont été enregistrées à l'aide d'une sonde multiparamètre à chaque station d'échantillonnage et la concentration de chlorophylle a en surface (comme indicateur de la production primaire) a été dérivée d'images satellites⁸. L'abondance des invertébrés mégafauniques collectés lors des campagnes de chalutage a été utilisée comme proxy de la production de proies benthiques (Day *et al.*, 2020) et certains groupes appartenant à la mégafaune ont été considérés comme des variables explicatives biotiques (abondances de *Crangon crangon* et *Liocarcinus holsatus*), qui sont les mieux corrélées à la structure de l'assemblage et peuvent potentiellement

expliquer les variations observées au sein de la communauté de poissons.

Après chaque chalutage, les captures ont été entièrement triées à bord : les invertébrés de la mégafaune et les poissons démersaux ont été séparés, identifiés jusqu'au niveau taxonomique le plus bas, comptés et pesés (poids total humide). Si le nombre d'individus d'une espèce de poisson était supérieur à 30, un sous-échantillon représentatif de 30 individus était pesé. Afin de standardiser les captures entre chaque chalut et de permettre les comparaisons, les abondances de poissons et d'invertébrés mégafauniques ont été exprimées en nombre d'individus par 1000 m².

3. Résultats

La caractérisation environnementale des zones de suivi a révélé que tous les paramètres (biotiques et abiotiques) (Tableau 4) sont significativement différents entre les deux saisons. La température, la salinité et la densité d'invertébrés mégabenthiques (individus appartenant à 24 espèces) sont significativement plus élevées en automne (Tableau 4).

Inversement, la concentration de chlorophylle a de surface était significativement plus élevée au printemps. Notre étude montre également que toutes les variables environnementales, à l'exception de la salinité, sont significativement différentes entre les trois zones d'échantillonnage (côtière, transitoire, au large).

Saisons	Zone	Température (°C)	Salinité (PSU)	Chl a (mg.m ⁻³)	Mégafaune (indiv.1000m ²)
Automne 2019	Côtière	18,03 ± 0,02	34,73 ± 0,01	3,85 ± 0,21	10,84 ± 21,34
	Transition	18,03 ± 0,07	34,69 ± 0,02	3,29 ± 0,11	1,33 ± 2,57
	Au large	17,86 ± 0,01	34,61 ± 0,03	2,82 ± 0,13	0,41 ± 0,36
Printemps 2020	Côtière	14,33 ± 0,022	33,78 ± 0,06	6,79 ± 0,59	8,39 ± 25,09
	Transition	13,99 ± 0,07	33,81 ± 0,02	7,03 ± 0,25	0,20 ± 0,14
	Au large	13,84 ± 0,12	33,80 ± 0,06	5,08 ± 0,78	0,34 ± 0,34

Tableau 4 : Valeurs des paramètres biotiques et abiotiques enregistrées dans les trois zones étudiées du littoral dunkerquois

Un total de 37 espèces de poissons a été inventorié au cours des deux campagnes d'échantillonnage (Tableau 4).

La plupart des poissons capturés au cours des deux saisons sont des juvéniles souvent issus d'espèces d'importance commerciale et représentent 90 %

des captures totales. Les six familles les plus abondantes (sur 25 échantillonnées, calcul fait sur la base de l'abondance totale) sont les *Trachinidae* (24 %), les *Clupeidae* (14 %), les *Ammodytidae* (13 %), les *Gobiidae* (10 %), les *Pleuronectidae* (10 %) et les *Soleidae* (8 %), représentant 79 % des captures totales.

⁸ <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>

L'influence des variables physiques et biologiques sur la structure des communautés de poissons des bancs de Dunkerque

En termes d'IRI⁹, les espèces de poissons dominantes étaient, par ordre d'importance respectif, la petite vive *Echiichthys vipera* (21 %), la plie *Pleuronectes platessa* (11 %), le merlan *Merlangius merlangus* (11 %), le petit lançon *Ammodytes tobianus* (9 %), la sole *Solea solea* (8 %), le grand lançon *Hyperoplus lanceolatus* (6 %), et le sprat *Sprattus sprattus* (6 %), représentant ensemble 75 % de l'IRI total. Une variation temporelle de l'abondance a été observée. Par exemple, certaines espèces dominantes en termes de densité (ind/1000 m²) comme *S. sprattus*, *T. vipera*, *T. trachurus*, *P. minutus*, *S. solea* et *P. platessa* sont

essentiellement présentes en automne et représentent 79 % de la densité totale de poissons, alors que d'autres espèces telles que *A. tobianus*, *M. merlangus*, *H. lanceolatus* et *L. limanda*, sont plus abondantes au printemps et représentent 73 % de la densité totale.

De manière générale, la densité et la biomasse totales des poissons varient dans le temps et dans l'espace avec des valeurs plus importantes au printemps qu'à l'automne (Figure 20), excepté dans la zone offshore pour laquelle les résultats sont inversés.

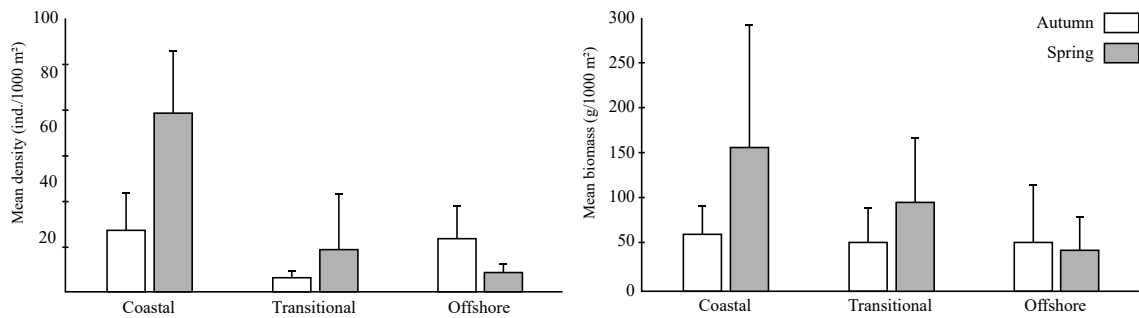


Figure 20 : Variations temporelles et spatiales de la densité et de la biomasse moyennes (+/- SD) des poissons dans la zone d'étude. Blanc = automne, Gris = printemps.

La richesse spécifique est significativement plus élevée dans la zone côtière que dans les zones de transition ou au large mais les autres indicateurs de diversité (Shannon et Equitabilité de Pielou) ne montrent pas de différences significatives en fonction de la zone, ni de la saison.

D'autre part, les analyses multivariées conduites dans cette étude ont montré que les variables environnementales (abiotiques et biotiques) expliquaient de manière significative la structure des assemblages de poissons ($p < 0,05$) de l'ensemble des bancs de

sable inclus dans cette étude (Figure 21). La distance à la côte et la mégafaune sont les variables environnementales expliquant plus de 50 % des variations observées dans la structure de la communauté de poissons dans les bancs de sable de Dunkerque. De façon complémentaire, le deuxième axe montre un gradient saisonnier et sépare les espèces capturées au printemps avec une préférence pour une concentration élevée de chlorophylle *a* (en haut) des espèces avec une préférence pour des températures plus élevées (en bas) en automne.

⁹ L'IRI est un indice développé par Pinkas et al. (1971) et qui regroupe les principales méthodes d'évaluation de la biodiversité (abondance, biomasse et fréquence d'occurrence) en un seul indice : $IRI = [N \% + W \%] * FO \%$, où $N \%$, $W \%$ et $FO \%$ sont l'abondance relative, la biomasse et la fréquence d'occurrence, respectivement.

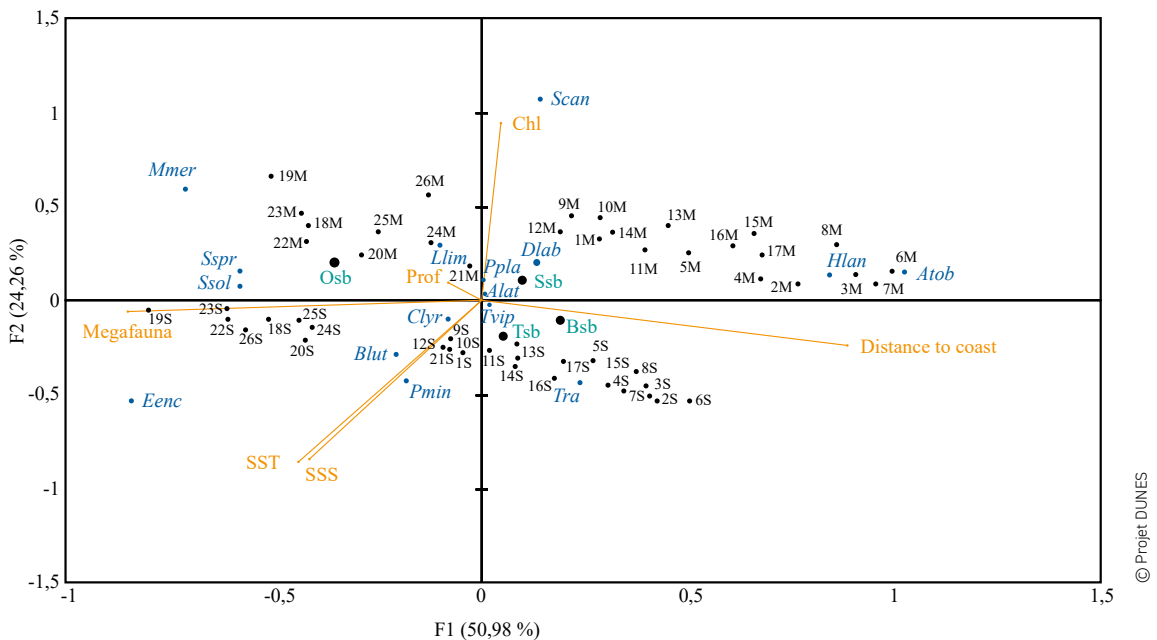


Figure 21 : Analyse canonique des correspondances (ACC) basée sur l'abondance des espèces, les facteurs environnementaux biotiques et abiotiques étant représentés par des vecteurs. Voir le tableau 2 pour les abréviations des espèces. Codes des échantillons : le numéro représente la station (1-26) et la lettre le mois d'échantillonnage (S : septembre, M : mai). Habitats de bancs de sable (Osb : Hors banc de sable, Tsb : Haut du banc de sable, Ssb : Side sandbank, Bsd : Base of the sandbank.)

4. Conclusion

La présente étude est la première à analyser la mégafaune et l'assemblage de poissons habitant les bancs de sable situés au large de Dunkerque. Cette étude apporte des connaissances clés qui permettront d'étudier l'influence du développement des parcs éoliens, ainsi que d'autres activités anthropiques, dans des environnements de dunes sous-marines. En particulier, nous observons des variations saisonnières au sein de la communauté de poissons (maximum de diversité et d'abondance atteint au printemps pour la zone côtière) et des particularités en termes de structure des communautés selon le gradient côte-large. De surcroît, cette étude montre que les variables environnementales (biotiques et

abiotiques) jouent un rôle dans la structuration des assemblages de poissons.

Les zones étudiées sont sous l'influence d'activités anthropiques établies depuis longtemps (pêche, dragage/clapage de sédiments) et les résultats obtenus intègrent donc les pressions induites par ces activités. Par ailleurs, la méthode d'échantillonnage de l'ichtyofaune mise en œuvre (chalut à grande ouverture verticale) ne permet pas de cibler les petites formations dunaires (barkhanes et dunes transverses) qui sont spatialement moins étendues que l'emprise d'un trait de chalut et qui sont perpendiculaires au courant dominant (alors que le chalut doit être employé dans le sens du courant).

En savoir +

Publication en préparation intitulée « Fish and megafaunal composition and assemblage inhabiting sandbanks of Dunkerque: environmental factor

influence » (Bacha M., Quillien N., Robert A., Galan T., Desroy N., Rabhi K., Schaffer D., Amara R.)

1. Contexte

Dans le cadre de l'étude de l'écosystème des dunes sous-marines au large de Dunkerque, nous avons étudié la méiofaune¹⁰ benthique ainsi que le zooplancton, des organismes relativement moins étudiés dans des zones caractérisées par un substrat meuble sableux composé de nombreuses dunes. De plus, ces zones présentent de faibles abondances d'espèces appartenant à la méiofaune comparative-

ment aux zones de plus faibles granulométries, plus proches de la côte ou en zone intertidale.

Pour mettre en évidence une potentielle relation entre les morphologies dunaires rencontrées au large de Dunkerque, nous avons réalisé le même échantillonnage que pour la faune benthique (voir **Fiche 5** pour plus de détail).

2. Méthode

Un total de 22 stations a été échantillonné au cours de deux sessions d'échantillonnage (voir **Fiche 5** et **Figure 15** pour les détails de la stratégie d'échantillonnage).

Plus spécifiquement, pour la méiofaune benthique, un échantillon d'environ 100 mL de sédiment a été prélevé à la surface de chaque benne, au moyen d'un tube vertical. Immédiatement après prélèvement, les échantillons de sédiment ont été placés dans une solution de formol à 4 %. Dans les jours suivant l'échantillonnage, du rose Bengal à 1 g/L a été ajouté aux échantillons pour colorer la matière organique, pendant au moins deux semaines. Les échantillons

ont ensuite été tamisés à 63, 125, 150, et 500 μm . Les fractions 150-500 μm ont été séparées. Les fractions 125-150 μm et 150-500 μm ont été observées à la loupe binoculaire pour identifier la méiofaune, avec une attention particulière pour les foraminifères benthiques.

Parmi les 22 stations, 8 ont été échantillonnées dans la colonne d'eau pour le zooplancton à l'aide d'un filet vertical avec une maille de 20 μm . Un volucompteur a permis la mesure du volume d'eau filtré. Chaque échantillon a directement été congelé après échantillonnage. Une fraction de chaque échantillon a ensuite été décompté pour le zooplancton.

3. Résultats

• Zooplancton

L'étude du zooplancton donne des résultats très contrastés entre les deux saisons. Le nombre d'espèces présentes est identique au printemps et à l'automne, mais les abondances au sein des espèces sont plus importantes au printemps qu'à l'automne (**Tableau 5**). La diversité des espèces de zooplancton diminue légèrement au printemps par rapport à l'automne (**Tableau 5**).

La proportion d'holoplancton¹¹ (83,8 \pm 13,1 %) est toujours largement dominante par rapport au méroplancton¹² (15,3 \pm 13,6 %) (**Figure 22**). Cependant, la proportion de méroplancton augmente signifi-

cativement au printemps (26,8 \pm 9,0 %) par rapport à l'automne (3,8 \pm 2,3 %). Cette augmentation est majoritairement causée par la forte présence de larves d'oursins (pluteus). Le méroplancton est essentiellement constitué de larves de crustacés.

On remarque également des variations d'abondance au sein de l'assemblage zooplanctonique entre les différentes boîtes (**Figure 22**). Des espèces comme *Acartia clausi*, *Sagitta* sp. sont relativement plus abondantes sur la boîte 3. Au contraire, des larves de crustacés ou *Euterpina acutifrons* sont plus abondantes dans les boîtes 1 et 2 (dunes barkhanes et dunes 3D).

¹⁰ Méiofaune : organismes < 1 mm.

¹¹ Holoplancton : organisme planctonique pendant tout son cycle de vie

¹² Méroplancton : organisme qui passe une partie de son cycle de vie sous la forme benthique

	Automne (octobre)	Printemps (mai)	TOTAL
Zooplancton			
Nb. d'espèces total	15	14	17
Richesse spécifique	9,3 ± 1,2	10,7 ± 1,0	10 ± 1,3
Indice de Shannon (H')	2,00 ± 0,35	2,17 ± 0,45	2,08 ± 0,40
Équitabilité [Pielou]	0,59 ± 0,10	0,67 ± 0,12	0,63 ± 0,12
Méiofaune benthique			
Nb. de taxons total	14	13	15
Nombre d'individus (ind./50 cm ³)	228 ± 169	684 ± 977	456 ± 735
Richesse taxonomique	5,1 ± 1,9	5,2 ± 1,6	5,1 ± 1,7
Indice de Shannon (H')	1,5 ± 0,5	1,4 ± 0,3	1,4 ± 0,4
Équitabilité [Pielou]	0,7 ± 0,1	0,6 ± 0,1	0,6 ± 0,1
Foraminifères benthiques			
Nb. d'espèces total	55	36	63
Nombre d'individus (ind./50 cm ³)	69 ± 50 ; (6 à 223)	122 ± 148 ; (8 à 901)	96 ± 113 ; (6 à 901)
Richesse spécifique	6,0 ± 3,0	4,9 ± 1,5	5,5 ± 2,5
Indice de Shannon (H')	2,0 ± 0,7	1,5 ± 0,5	1,8 ± 0,6
Équitabilité [Pielou]	0,82 ± 0,12	0,69 ± 0,20	0,76 ± 0,17

Tableau 5 : Paramètres faunistiques principaux entre les deux saisons d'échantillonnage pour le zooplancton et la méiofaune benthique.

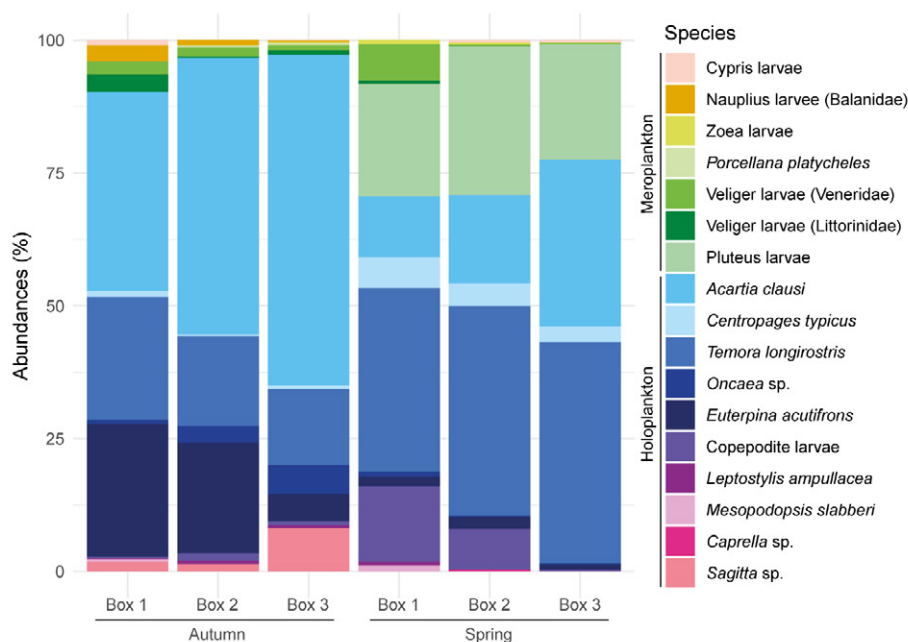


Figure 22 : Abondances relatives des principales espèces ou groupes taxonomiques de zooplancton échantillonnés. La distinction est faite entre le méroplancton et l'holoplancton.

Caractérisation du zooplancton et de la méiofaune benthique des dunes sous-marines situées au large de Dunkerque

• Méiofaune benthique

Les abondances absolues de méiofaune sont plus importantes au printemps (Figure 23) et pour la boîte 3 située sur un banc en général.

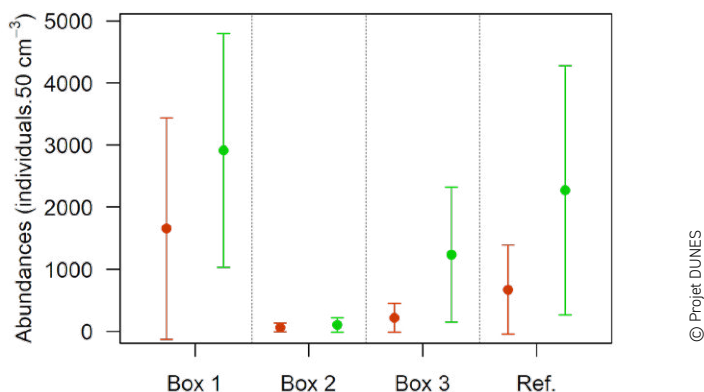


Figure 23 : Abondances absolues des diatomées benthiques standardisées pour un volume de 50 cm³.

La méiofaune benthique est largement dominée par les nématodes (30-70 %) surtout pour la boîte 3 (banc sableux) et les stations de références (55-70 %). Les nématodes sont plus abondants au printemps (Figure 24). Les foraminifères benthiques présentent ensuite les plus fortes abondances, essentiellement au niveau des boîtes 1 et 2 (dunes barkhanes et transverses) (31-50 %), et à l'automne où leurs proportions (46-50 %) dépassent celles des nématodes (30-39 %).

Ensuite, dans une moindre mesure, les annélides (3-15 %) et les copépodes (1,5-9,5 %) sont un peu moins présents dans la boîte 1 (dunes barkhanes).

Parmi les échantillons de méiofaune benthique ont aussi été observées des diatomées. Ces diatomées benthiques sont significativement plus nombreuses au printemps (Figure 23).

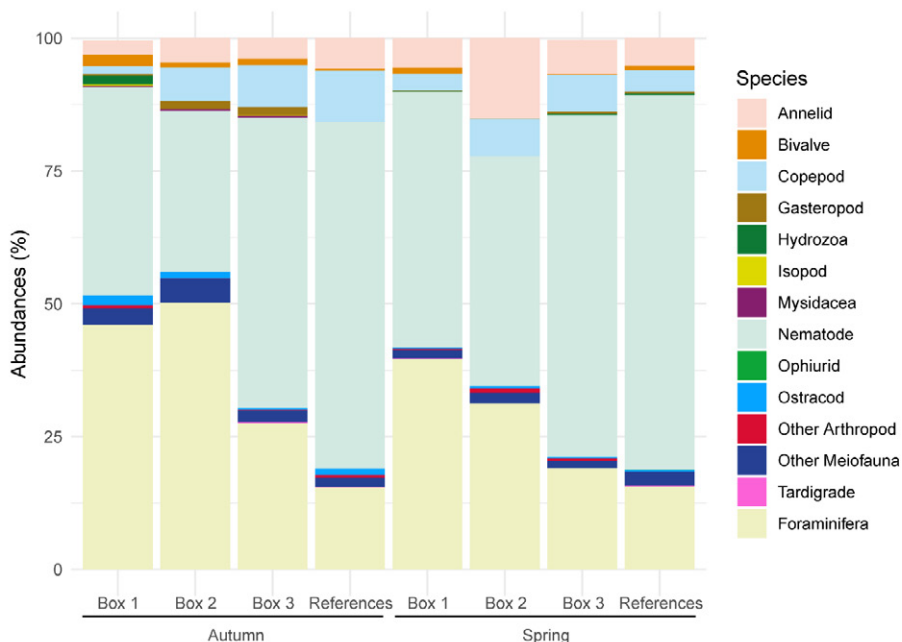


Figure 24 : Abondances relatives des principales espèces ou groupes taxonomiques de zooplancton échantillonnés. La distinction est faite entre le méroplancton et l'holoplancton.

• Foraminifères benthiques

Les foraminifères benthiques sont présents dans la zone d'étude avec des abondances assez faibles mais typiques des milieux sableux. Les espèces de foraminifères benthiques sont différentes entre les deux saisons (Figure 25). Les assemblages de ces micro-organismes sont moins diversifiés mais sont composés d'espèces représentées par un plus grand nombre d'individus au printemps. Les principales espèces présentes en automne sont *Deuterammina dublinensis* (31,3 ± 21,3 %), *Ammonia batava* (7,3 ± 10,5 %) et *Quinqueloculina seminula* (2,0 ± 3,5 %) ; au printemps ce sont *Saccamina* sp. (42,5 ± 24,7 %), *Deuterammina dublinensis* (31,9 ± 22,2 %), *Ammonia batava* (7,3 ± 10,5 %), et *Lepidodeuterammina ochracea* (5,7 ± 8,2 %) (Figure 25). On peut noter aussi la présence de *Criboelphidium magellanicum* en automne et *Spirillina vivipara* au printemps.

Notre étude montre deux principaux types de structure des communautés de foraminifères : répartition d'espèces principales. Certaines espèces vont plutôt avoir des variations d'abondance relative saisonnières et d'autres espèces vont au contraire se répartir de différentes manières suivant le type de dune et avoir des variations d'abondance assez peu marquées suivant les saisons.

La composition des assemblages de foraminifères varie relativement peu en fonction de la zone d'échantillonnage. On observe toutefois une abondance relative de *Deuterammina dublinensis* moins importante dans la zone de référence, où l'on a observé, en revanche, davantage de foraminifères à coquille souple. On observe également une abondance relative de *Saccamina* sp. plus importante dans la zone de référence, quelle que soit la saison étudiée.

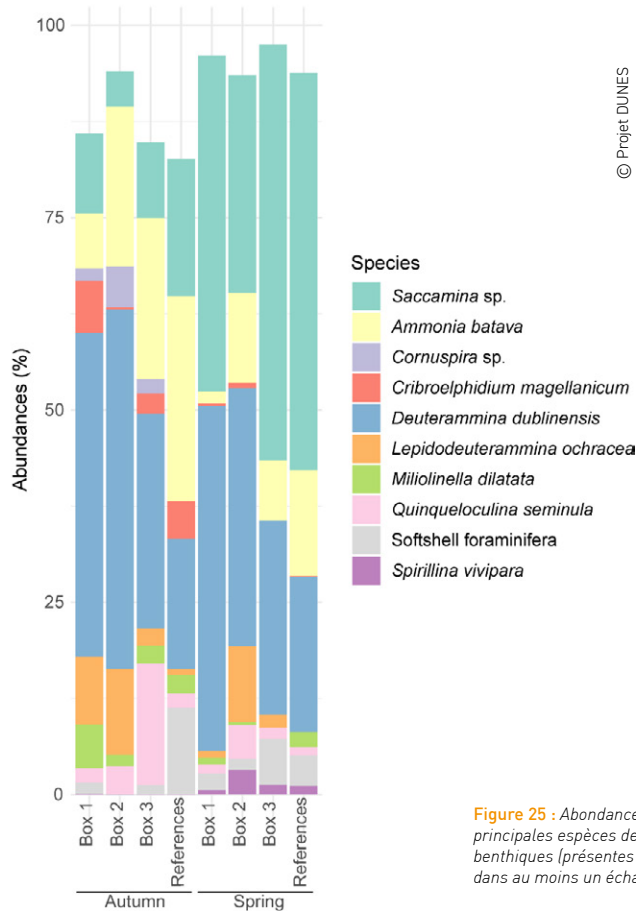


Figure 25 : Abondances relatives des principales espèces de foraminifères benthiques (présentes à au moins 5 % dans au moins un échantillon).

© Projet DUNES

Caractérisation du zooplancton et de la méiofaune benthique des dunes sous-marines situées au large de Dunkerque

L'analyse multivariée (Figure 26) permet de bien mettre en évidence l'influence de la typologie de la formation dunaire sur les assemblages de foraminifères. Pour chacun de ces types de formation les espèces dominantes varient. On remarque que *Deuterammina dublinensis* n'est pas très impactée par la variation saisonnière et reste abondante

surtout aux stations des boîtes 1 et 2. Au contraire, des espèces comme *Quinqueloculina seminula*, *Lepidodeuterammina ochracea* ou *Saccamina* sp. semblent montrer certaines variations saisonnières avec une présence plus marquée en automne pour les deux premières boîtes et au printemps pour la dernière.

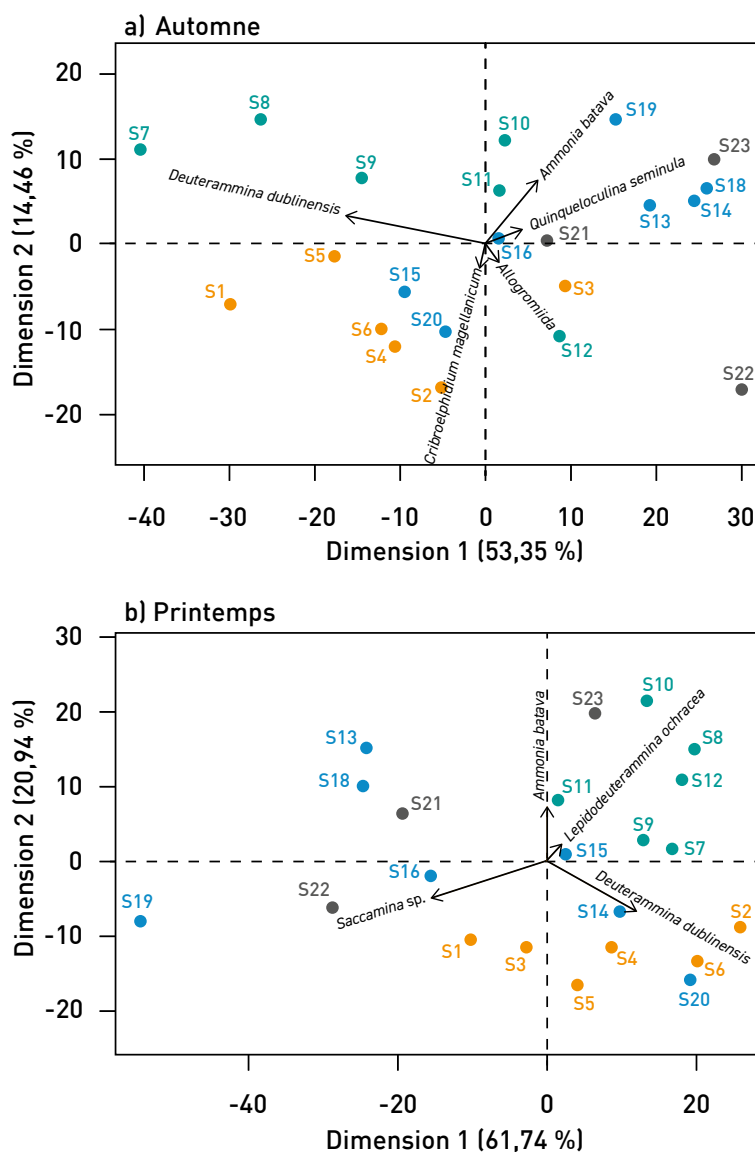


Figure 26 : ACP d'après les abondances relatives de foraminifères benthiques pour les deux saisons : (a) automne, (b) printemps ; seules les espèces ayant le plus de contribution (> 0,5) sur les dimensions 1 et 2 sont présentées. Les couleurs correspondent aux différentes boîtes : orange, Chenal (boîte 1) ; vert, Nord Breedt (boîte 2), bleu, Binen Ratel (boîte 3) ; et gris foncé, stations de références.

Lepidodeuterammia ochracea (Scott, 1999; Murray, 2014), *Quinqueloculina seminula* (Alve et al., 2016; Bouchet et al., 2021) sont connues pour vivre dans des environnements sableux du nord de l'Europe. De plus, *Q. seminula* se déplace assez rapidement à travers les sables (Deldicq et al., 2020).

Beaucoup d'espèces dominantes présentées (par exemple *L. ochracea*, *S. vivipara*, *D. dublinensis*, *Saccamina* sp.) ici sont épifaunales (de Nooijer et al., 2008; Murray, 2014). Cela pourrait expliquer le maintien de leur présence dans un milieu très dynamique.

4. Conclusion

Le volume des échantillons est relativement faible et les études peuvent se faire sur des navires de relativement petite taille. La grande diversité de la faune rencontrée rend également avantageux ce type d'étude. La séparation par liquides de hautes densités (Parent et al., 2018) facilite grandement le traitement des échantillons de foraminifères benthiques, en particulier en milieux sableux. Si cette technique n'a pas été utilisée dans la présente étude, son impact sur le traitement d'autres groupes méiofaunistiques pourrait être potentiellement intéressant à observer. En effet, ces méthodes sont très largement utilisées sur de nombreux groupes taxonomiques.

La répartition de la méiofaune benthique est très dépendante de l'organisation des couches superficielles du sédiment. L'analyse de la faune benthique a été faite à l'aide d'une benne Van Veen qui a pour inconvénient de ne pas très bien préserver la surface du sédiment. L'étude de la méiofaune benthique profiterait d'un moyen d'échantillonnage préservant la surface du sédiment (Schönfeld et al., 2012). Ce type d'échantillonneur reste cependant difficile à

mettre en œuvre. Deux facteurs principaux peuvent limiter son utilisation dans la zone de Dunkerque : 1) les courants rendent difficile la tenue verticale du câble et du carottier, et 2) la granulométrie sableuse nuit à la bonne fermeture du carottier, ce qui peut provoquer le lessivage du sédiment prélevé lors de la remontée.

Il existe une très forte variabilité saisonnière de la méiofaune benthique et du zooplancton entre l'automne (octobre) et le printemps (mai). Cette variabilité se traduit par des changements marqués dans les espèces dominantes. Elle est très certainement liée aux apports en matière organique s'accumulant sur les fonds sableux suite aux blooms de plancton (méroplancton en particulier) qui est l'une des sources de nourriture de ces groupes d'organismes.

Les différents environnements dunaires sous-marins étudiés montrent de très nettes différences de communautés de méiofaune.

Formées par l'action combinée des courants marins et de la houle, les dunes sous-marines sont des structures sédimentaires relativement fréquentes dans les futures zones d'implantation des parcs éoliens en mer envisagés en Manche et mer du Nord. Dans le cadre du raccordement des éoliennes, la pose de câbles sur les fonds marins impliquera des travaux de tranchage et de dragage des dunes présentes. En 2019, le projet DUNES s'est proposé d'étudier l'évolution naturelle de ces écosystèmes dont les dynamiques sédimentaires et biologiques étaient mal comprises, afin d'améliorer les connaissances nécessaires à l'évaluation de l'impact de ce type de travaux.

Le projet a permis :

- d'enrichir les connaissances des processus physiques et du fonctionnement naturel des dunes hydrauliques,
- de mettre à jour un SIG en accès libre dédié aux champs de dunes et aux bancs de sable,¹³
- de caractériser à une fine échelle la structure des réseaux trophiques des dunes pour comprendre le fonctionnement de ces systèmes particuliers,
- de formuler des recommandations méthodologiques pour évaluer les impacts d'activités anthropiques sur les écosystèmes dunaires.

1. Principaux résultats de l'analyse des relevés *in situ*

Les dunes sous-marines situées au large de Dunkerque drapent des bancs tidaux du sud de la mer du Nord. Elles ont plusieurs formes : barkhane (Figure 26), rectiligne et transverse. Elles ont une hauteur comprise entre 1 et 3 m et une longueur d'onde moyenne comprise entre 100 et 200 m (Figure 26). Leur hauteur peut cependant être très variable au cours du temps, tout comme leur longueur d'onde.

• Principaux résultats sur la composition du lit sédimentaire

De manière générale, les distributions granulométriques sont similaires d'une dune à une autre et à l'échelle d'une même dune. Les échantillons prélevés sur la zone montrent un sédiment pouvant être qualifié de légèrement graveleux avec une forte proportion de sable moyen composant environ 95 % du lit. Un mélange de gravier et de vase compose les 5 % restant. Sur la zone, le diamètre médian du sable s'étend de 275 à 381,2 µm classant ce sédiment dans la catégorie des sables moyens.

• Principaux résultats sur la migration des dunes

Dans la zone, la migration des dunes est dirigée vers le nord-est avec une moyenne d'environ 30 m/an pour la boîte 1 (Figure 26) et quelques mètres par an pour la boîte 3. Les moteurs de la dynamique dunaire sont les courants de marée et particulièrement le flot qui est plus important dans la zone d'étude. Les dunes sous-marines montrent également une forte

réactivité aux tempêtes : un évènement de fort vent de nord-est est capable d'inverser la direction de migration des dunes sous-marines.

• Principaux résultats sur la connaissance des écosystèmes des dunes sous-marines au large de Dunkerque

Le réseau trophique développé sur les dunes sous-marines est composé de quatre guildes (Figure 26) :

- Les producteurs primaires représentés par des blooms de *Phaeocystis*,
- Les dépositivores et suspensivores benthiques composés de communauté à *Nephtys cirrosa* en majorité,
- Les petits prédateurs benthiques comprenant un grand nombre de poissons juvéniles au printemps (lançons, soles) et de mégafaune benthique,
- Les prédateurs représentés par 37 espèces de poissons.

La présente étude montre que les dunes de différentes morphologies (dunes barkhanes, 3D, bancs) sont colonisées par des communautés de petits organismes de fond différentes. Les organismes de plus grande taille (communautés macrobenthiques) présentent de faibles densités et de faibles valeurs de biomasse qui s'expliquent par les contraintes

¹³ <https://data.shom.fr/donnees#001=eyJljbpbMTg1NjM1Ljk5Mz4M4Njg0NDExLDY1OTkxNzYuMTA50Tk5NDdldCJ6lJoxMCwicil6MCwib-Ci6W3sidHlwZSI6IkiOVEVSTkFMX0xwUUVSIlwiaWRlbnRpZmllci6l6lRVTkVTX1BZUI9QTkdfMzg1N19XTVRlIiwib3BhY2I0eSI6MSwidmLzaWJpbG10eSI6dHJ1ZX0seyJ0eXBlljoisUSURVJ0QUxTFFZRViILCjJpZGVudGlmaWVYljoirRkRDX0dFQkNPX1BZUI1QTkdfMzg1N19XTVRlIiwib3BhY2I0eSI6MSwidmLzaWJpbG10eSI6dHJ1ZX1dfQ==>

naturelles particulièrement fortes imposées par le remaniement constant des différentes structures sédimentaires présentes sur le fond marin.

La plupart des poissons capturés au cours des deux saisons de l'étude sont des juvéniles souvent issus d'espèces d'importance commerciale et représentent 90 % des captures totales. Leur abondance varie en fonction des saisons. Certaines espèces sont plus présentes en automne qu'au printemps et inversement. Les espèces sont plus nombreuses sur la zone côtière qu'au large, elles y sont aussi plus abondantes. De nombreux juvéniles de poissons sont présents au large au printemps : la zone de dunes sous-marines a donc une fonction de zone de nurserie pour les poissons et probablement d'autres organismes marins.

D'un point de vue fonctionnel, les résultats sont conformes au schéma classique de succession des espèces le long de perturbations naturelles ou anthropiques telles que le chalutage de fond : les zones les moins perturbées sont caractérisées par des carnivores (prédateurs) et des espèces de grande taille, tandis que les zones perturbées sont dominées par des dépositives, des petits organismes et des organismes à courte durée de vie. Les espèces sessiles et les suspensivores étaient presque absents de la zone étudiée.

Ce réseau trophique est simpliste. Du fait de son environnement très dynamique et en perpétuel remaniement, il est aussi très résilient (Figure 26).

2. Recommandations concernant l'intégration des parcs éoliens en mer dans un système dunaire

L'analyse morphodynamique des dunes souligne l'importance des volumes sédimentaires mobilisables et la variabilité spatio-temporelle de ces volumes mobiles. La mobilité des dunes sous-marines est maximale lors d'évènements extrêmes (marées et tempêtes). Il sera donc nécessaire de prendre en compte cette dynamique lors de la définition de l'architecture des parcs éoliens et leur raccordement (tracés des corridors de câble, position des éoliennes et du poste électrique en mer). Nous recommandons aux porteurs de projet d'éviter si possible les zones ayant la plus forte dynamique afin que les contraintes sur les composants (fondations, câbles) des parcs éoliens en mer soient maîtrisées.

Dans le cas des câbles sous-marins, si ce type d'évitement n'est pas possible, il sera nécessaire d'enfouir les câbles à une profondeur supérieure à la hauteur des dunes sous-marines environnantes. Si cette dernière option n'est pas réalisable, nous recommandons de réaliser des levés bathymétriques ou sonar après chaque évènement extrême, afin de prévenir tout risque d'affouillement ou de sur-enfouissement des câbles.

De la même façon, si des éoliennes ou le poste électrique en mer doivent être posés dans des zones où les dunes sous-marines sont très dynamiques, la caractérisation de l'affouillement des fondations devra être menée en prenant en compte cette mobi-

lité sédimentaire particulière. La connaissance de cet affouillement permettra de dimensionner de façon optimale les protections anti-affouillements et les fondations des éoliennes et des postes électriques en mer.

Le projet DUNES a permis de définir les meilleurs outils pour étudier l'évolution des dunes et prévenir leurs effets sur les composants de parcs éoliens et leur raccordement. La dynamique des dunes est très réactive aux épisodes de forts vents et de fortes marées, il semble donc important de contrôler les fonds marins en effectuant des levés bathymétriques après de tels épisodes. Pour acquérir des données sur la **morphologie des dunes** il est possible d'utiliser des sondeurs multifaisceaux qui permettront la réalisation de **modèles numériques de terrain** (MNT) de résolution de l'ordre de 50 cm. Ceux-ci sont utiles pour réaliser des analyses morphométriques pour suivre précisément le déplacement des dunes. Cette résolution permet de visualiser l'intégralité des structures dunaires pour analyser leur morphologie.

Deux technologies n'ont pas été testées dans le projet DUNES mais s'avèrent intéressantes dans le cadre du développement d'un parc éolien en mer et de son raccordement. Le **sonar** peut être utilisé pour donner une image de la nature des fonds (nécessitant une calibration par des prélèvements de sédiments de surface, réalisés à la benne) avec une résolution

autour de 10 cm. Connaître l'épaisseur sédimentaire permet également d'apprécier les effets que pourraient avoir le mouvement des dunes sous-marines sur les composants de parcs éoliens et leur raccordement ; cette épaisseur peut être évaluée à l'aide de mesures de sismique réflexion très haute résolution. La **mesure de température distribuée** (DTS) réalisée via la fibre optique présente dans les câbles inter-éoliennes et de raccordement permet de connaître la température locale des câbles dans leur environnement. Une fois les parcs mis en service, cette technologie permettra, après des développements méthodologiques sur l'analyse de données DTS, de mettre en évidence un surenfouissement important ou un déenfouissement lié au passage de dunes sous-marines.

Pour compléter ces données sur les fonds marins, il peut être intéressant d'acquérir en parallèle des

données hydrodynamiques via des ADCP situés proche de la ou des zones étudiées. Ces ADCP doivent être immergés sur des pas de temps courts pour éviter leur ensablement.

Afin d'étudier précisément l'évolution des dunes sous-marines à proximité d'un parc éolien et de son raccordement, il est nécessaire de définir plusieurs zones d'observation réparties à différentes profondeurs et contenant si possible des trains de dunes de différents types (barkhane, rectilignes, 3D, etc.).

Enfin, le projet DUNES a démontré l'intérêt de compléter les résultats acquis sur le terrain par la mise en place de modèles numériques pour comprendre la dynamique des dunes à différentes échelles. Ce type d'analyse est mené dans le cadre du projet MODULLES¹⁴.

3. Recommandations concernant l'écosystème des dunes sous-marines

Les principales recommandations du projet DUNES portent sur les protocoles d'échantillonnage pour l'étude de l'écosystème des dunes sous-marines, ainsi que l'identification de leurs limites :

- **Etude du benthos (macro et méiobenthos) et du zooméioplancton** : l'utilisation de la Benne Van Veen (benthos) et le filet bongo (zooplancton), à raison de 3 bennes/station d'échantillonnage pour la faune et une pour le milieu physique (granulométrie) est recommandée.

Limites : il est difficile d'obtenir des prélèvements à l'échelle de dunes barkhanes car cette structure sédimentaire est courbe et de petite taille (quelques mètres de hauteur et de largeur) et les dimensions d'un navire océanographique ne permettent pas un positionnement suffisamment précis.

- **Etude des poissons pélagiques, démersaux et benthopélagiques** : la réalisation de traits de chalut à grande ouverture verticale d'1 km de long est recommandée. Le nombre de traits et leur localisation est à adapter selon les sites en fonction de leur morphologie et du nombre d'habitats.

Limites : il est impossible d'obtenir des prélèvements à l'échelle d'une dune car les traits de chalut sont supérieurs à la taille de l'objet.

Bien que ces écosystèmes soient par nature résilients au remaniement et à la dynamique sédimentaire, il sera potentiellement nécessaire de réaliser des campagnes de suivi de ces écosystèmes en fonction du site et des impacts anticipés. Par exemple, nous pouvons nous attendre à une augmentation de la fraction pélagique autour des piles ce qui pourrait modifier la structure des communautés benthiques, à faible échelle spatiale, dans la zone.

Par ailleurs, il serait intéressant de modéliser à fine échelle l'écosystème au large de Dunkerque afin de répondre aux questions soulevées au cours du projet DUNES sur les liens entre les différentes guildes trophiques et les modifications éventuelles induites par la présence d'un parc sur le fonctionnement de l'écosystème « dunes sous-marines ».

¹⁴ <https://www.france-energies-marines.org/projets/modulles/>

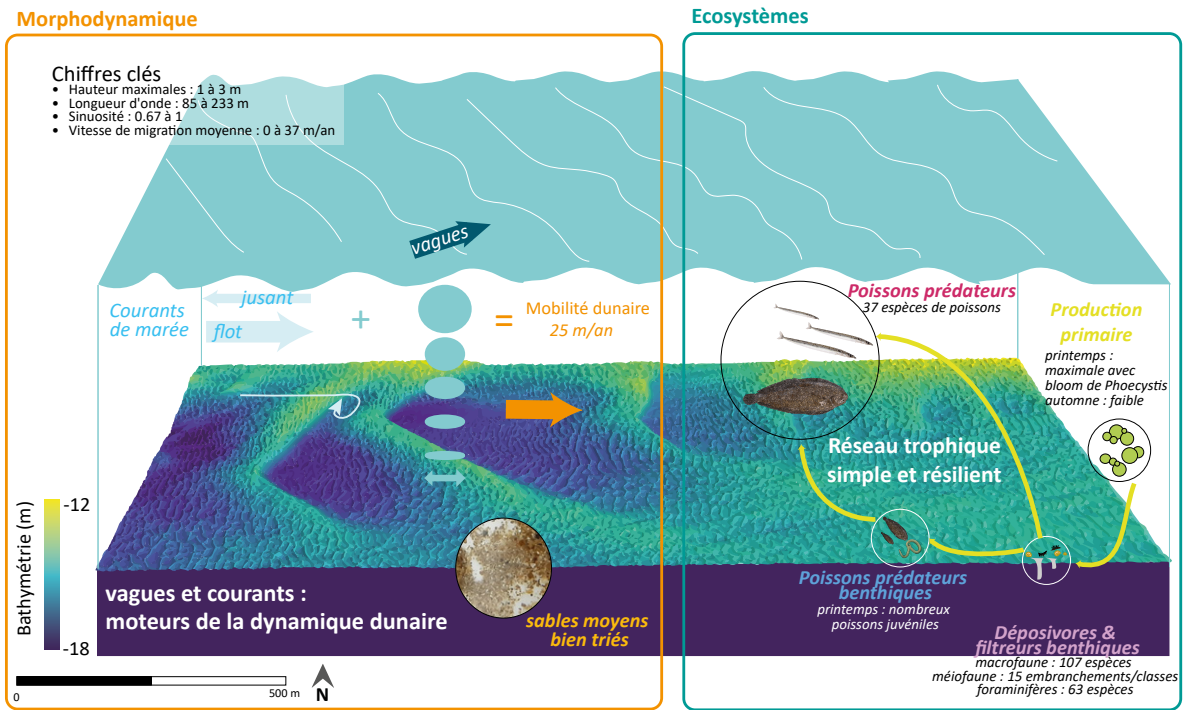


Figure 27 : Schéma récapitulatif du projet DUNES

Bibliographie

- Alve, E., Korsun, S., Schönfeld, J., Dijkstra, N., Golikova, E., Hess, S., Husum, K.,** 2016. ForAMBI: A sensitivity index based on benthic foraminiferal faunas from North-East Atlantic and Arctic fjords, continental shelves and slopes. *Marine Micropaleontology*, vol. 122, pages 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2015.11.001>
- Amara, R.,** 2003. Seasonal ichthyodiversity and growth patterns of juvenile flatfish on a nursery ground in the Southern Bight of the North Sea (France). *Environmental Biology of Fishes*, vol. 67, pages 191-201. <https://doi.org/10.1023/A:1025646622066>
- Anthony, E., Orford J.,** 2002. Between Wave- and Tide-Dominated Coasts: the Middle Ground Re-visited. *Journal of Coastal Research Special Issue*, vol. 36, pages 8-15. <https://doi.org/10.2112/1551-5036-36.sp1.8>
- Augris, C., Clabaut, P., Vicaire, O.,** 1990. Le domaine marin du Nord-Pas de Calais. *Nature, morphologie et mobilité des fonds*. Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer, 96 p.
- Baeteman, C.,** 1991. Chronology of coastal plain development during the Holocene in West Belgium. *Quaternaire*, vol. 2 (3), pages 116-125. <https://doi.org/10.3406/quate.1991.1960>
- Baeteman, C., Van Strijdonck, M.,** 1989. Radiocarbon dates on peat from the Holocene coastal deposits in West Belgium. *Quaternary Sea-level Investigations from Belgium*, vol. 241, pages 59-91.
- Bary, M.,** 2021. Morphodynamique des dunes sous-marines et flux sédimentaires associés. Application au site éolien offshore de Dunkerque. Mémoire de stage de Master 2 GEHYD, Université de Rouen Normandie, 56 p.
- Beck, C., Clabaut, P., Dewez, S., Vicaire, O., Chamley, H., Augris, C., Hoslin, R., Caillot, A.,** 1991. Sand bodies and sand transport paths at the English Channel-North Sea border: morphology, hydrodynamics and radioactive tracing. *Oceanologica Acta*, vol. 11, pages 111-121.
- Bellamy, A.G.,** 1995. Extension of the British landmass: evidence from shelf sediment bodies in the English Channel. Geological Society, London, Special Publications, vol. 96 (1), pages 47-62. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1995.096.01.05>
- Blanpain, O.,** 2009. Dynamique sédimentaire multiclasse: de l'étude des processus à la modélisation en Manche. Thèse de doctorat, Université de Rouen, 397 p.
- Bouchet, V.M.P., Frontalini, F., Francescangeli, F., Sauriau, P.-G., Geslin, E., Martins, M.V.A., Almogi-Labin, A., et al.,** 2021. Indicative value of benthic foraminifera for biomonitoring: Assignment to ecological groups of sensitivity to total organic carbon of species from European intertidal areas and transitional waters. *Marine Pollution Bulletin*, vol. 164, 112071. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112071>
- Boudiere, E., Maisondieu, C., Arduin, F., Accesi, M., Pineau-Guillou, L., Lepasqueur, J.,** 2013. A suitable ocean hindcast database for the design of Marine energy converters. *International Journal of Marine Energy*, vol. 3-4, pp e40-e52. <https://doi.org/10.1016/j.ijome.2013.11.010>
- Caillaud, M., Petton, S., Dumas, F., Rochette, S., Vasquez, M.,** 2016. Rejeu hydrodynamique à 500 m de résolution avec le modèle MARS3D-AGRIF - Zone Manche Gascogne. <http://doi.org/10.12770/3edee80f-5a3e-42f4-9427-9684073c87f5>
- Cerema,** 2018. Dynamiques et évolution du littoral Synthèse des connaissances de la frontière Belge à la pointe du Hurdel, Fascicule 1, 498 p.
- Clique, P.M., Lepetit J.-P.,** 1986. Catalogue sédimentologique des côtes françaises : côtes de la mer du Nord et de la Manche. Laboratoire national d'hydraulique, Eyrolles, Paris, 420 p.
- Corbau, C.,** 1995. Dynamique sédimentaire en domaine Macrotidale : exemple du littoral du Nord de la France (Dunkerque). Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologiques de Lille 1.

- Corbau, C., Tessier, B., Chamley, H.,** 1999. Seasonal Evolution of Shoreface and Beach System Morphology in a Macrotidal Environment, Dunkerque Area, Northern France. *Journal of Coastal Research*, vol. 15 (1).
- Day, L., Le Bris, H., Saulnier, E., Brind'Amour, A., Pinsivy, L.,** 2020. Benthic prey production index estimated from trawl survey supports the food limitation hypothesis in coastal fish nurseries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 235, 106594. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106594>
- de Nooijer, L.J., Duijnste, I.A.P., Bergman, M.J.N., van der Zwaan, G.J.,** 2008. The ecology of benthic foraminifera across the Frisian Front, southern North Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 78, issue 4, pages 715-726. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2008.02.015>
- Deldicq, N., Seuront, L., Langlet, D., Bouchet, V.,** 2020. Assessing behavioural traits of benthic foraminifera: implications for sediment mixing. *Marine Ecology Progress Series*, vol. 643, pages 21-31. <https://doi.org/10.3354/meps13334>
- Ferret, Y.,** 2011. Morphodynamique de dunes sous-marines en contexte de plateforme mégatidale (Manche Orientale). Approche multi-échelles spatio-temporelles. Thèse de doctorat, Université de Rouen, 296 p.
- Hamblin, R.J.O., Crosby, A., Balson, P., Jones, S., Chadwick, I., Arthur, M.,** 1992. The geology of the English Channel, HMSO for the British Geological Survey, 106 p.
- Héquette, A., Hemdane, Y., Anthony, E.J.,** 2008. Sediment transport under wave and current combined flows on a tide-dominated shoreface, northern coast of France. *Marine Geology*, vol. 249 (3-4), pages 226-242. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2007.12.003>
- Hoekstra, P., Bell, P., Van Santen, P., Roode, N., Levoy, F., Whitehouse, R.,** 2004. Bedform migration and bedload transport on an intertidal shoal. *Continental Shelf Research*, vol. 24 (11), pages 1249-1269. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2004.03.006>
- Héquette, A., Ruz, M.H., Maspataud, A., Sipka, V.,** 2009. Effects of nearshore sand bank and associated channel on beach hydrodynamics : implications for beach and shoreline evolution, *Journal of Coastal Research*, Special issue 56, pages 59-63
- Latapy, A.,** 2020. Influence des modifications morphologiques de l'avant-côte sur l'hydrodynamisme et l'évolution du littoral des Hauts-de-France depuis le XIXe siècle. Océanographie. Thèse de doctorat, Université du Littoral Côte d'Opale, 295 pages
- Larsonneur, C., Bouysse, P., Auffret, J.-P.,** 1982, The superficial sediments of the English Channel and its Western Approaches. *Sedimentology*, vol. 29, pages 851-864. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1982.tb00088.x>
- Le Bot, S., Bary, M., Fournier, M., Husté, A., Michelet, N., Blanpain, O., Nexer, M., Garlan, T.,** 2023. Marine dune morphodynamics and associated sediment fluxes (off Dunkirk, France). Spatio-temporal variability and relations with hydrodynamic forcings. *Marine and River Dune Dynamics – MARID VII – 3-5 April 2023 – Rennes, France*. pages 155-162.
- MacArthur, R.H., Wilson, E.O.,** 1967. The Theory of Island Biogeography. Princeton University Press, 224 p.
- Michel, C.,** 2016. Morphodynamique et transferts sédimentaires au sein d'une baie mégatidale en comblement (Baie de Somme, Manche Est). Stratégie multi-échelles spatio-temporelles. Thèse de doctorat, Université de Rouen, 325 p.
- Murray, J. W.,** 2014. Ecology and Palaeoecology of Benthic Foraminifera. Routledge, New York, USA. 397 p.
- Michelet, N., Bary, M., Blanpain, O., Le Bot, S., Nexer, M.,** 2022. Estimation de l'influence des conditions hydrodynamiques sur les flux sédimentaires associés à la migration des dunes au large de Dunkerque, Actes XVII^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, pages 411-422.

- Michelet, N., Bary, M., Blanpain, O., Le Bot, S., Nexer, M.** 2023. Estimation of marine dunes migration through sediment flux calculation and three-dimensional numerical modelling. *Marine and River Dune Dynamics - MARID VII - 3-5 April 2023 - Rennes, France*, pages 195-202.
- Parent, B., Barras, C., Jorissen, F.**, 2018. An optimised method to concentrate living (Rose Bengal-stained) benthic foraminifera from sandy sediments by high density liquids. *Marine Micropaleontology*, vol. 144, pages 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2018.07.003>
- Schönfeld, J., Alve, E., Geslin, E., Jorissen, F., Korsun, S., Spezzaferrri, S.**, 2012. The FOBIMO (FOraminiferal Blo-MONitoring) initiative - Towards a standardised protocol for soft-bottom benthic foraminiferal monitoring studies. *Marine Micropaleontology*, vol. 94-95, pages 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2012.06.001>
- Scott, G.A.**, 1999. Contemporary ecology and stable isotope geochemistry of benthic foraminifera in the Celtic Sea. *School of Ocean Sciences, University of Wales, Bangor*. 287 p.
- Schmitt T., Mitchell N.C.**, 2014. Dune-associated sand fluxes at the nearshore termination of a banner sand bank (Helwick Sands, Bristol Channel). *Continental Shelf Research*, vol. 76, pages 64-74. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2014.01.003>
- Shom (2017)**. *Annuaire des Marées 2019, Ports de France Métropole, Tome 1*.
- Sipka, V.**, 1998. Les plages macrotidales du Nord-Pas-de-Calais : contexte environnemental et caractérisation morphodynamique. Thèse de doctorat, Université Littoral Côte d'Opale.
- Sommé, J.**, 1988. La plaine maritime française de la mer du Nord : évolution holocène et héritage pléistocène. *Hommes et Terres du Nord*, vol. 1(1), pages 273-281. <https://doi.org/10.3406/htn.1988.3083>
- Sommé, J., Cunat-Bogé, N., Vanhoorne, R., Wouters, K.**, 2004. La Formation de Loon : les dépôts pléistocènes marins profonds de la plaine maritime du Nord de la France [The Loon formation : the marine pleistocene deep deposits in the coastal plain of northern France]. *Quaternaire*, vol. 15 (4), pages 319-327. <https://doi.org/10.3406/quate.2004.1778>
- Tilman, D.**, 1982. Resource competition and community structure. Princeton University Press, 296 p.
- Tessier, B., Corbau, C., Chamley, H., Auffret, J.-P.**, 1999. Internal Structure of Shoreface Banks Revealed by High-Resolution Seismic Reflection in a Macrotidal Environment (Dunkerque Area, Nor-thern France), *Journal of Coastal Research*, vol. 15 (3), pages 593-606.
- Thrush, S.F., Gray, J.S., Hewitt, J.E., Ugland, K.I.**, 2006. Predicting the Effects of Habitat Homogenization on Marine Biodiversity. *Ecological Applications*, vol. 16, pages 1636-1642. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2006\)016\[1636:P-TEOHH\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2006)016[1636:P-TEOHH]2.0.CO;2)
- Van Denderen, P.D., Bolam, S.G., Hiddink, J.G., Jennings, S., Kenny, A., Rijnsdorp, A.D., Van Kooten, T.**, 2015. Similar effects of bottom trawling and natural disturbance on composition and function of benthic communities across habitats. *Marine Ecology Progress Series*, vol. 541, pages 31-43. <https://doi.org/10.3354/meps11550>
- Van Lancker, V.R.M.**, 1999. Sediment and morphodynamics of a siliciclastic near coastal area, in relation to hydrodynamical and meteorological conditions: Belgian Continental Shelf. Thèse de doctorat, University of Ghent, 1999.
- Van Rijn, L.C.**, 1984. Sediment transport, part I: bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 110(10), pages 1431-1456. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:10\(1431\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:10(1431))
- Wu, W., Wang, S.S.Y, Jia, Y.** 2000. Nonuniform sediment transport in alluvial rivers. *Journal of Hydraulic Research*, vol. 38, pages 427-434. <https://doi.org/10.1080/00221680009498296>
- Yalin, M.S.**, 1977. *Mechanic of sediment transport*. Oxford: Pergamon Press, 298 p.
- Yan, Y., Zhang, L., Luo, X., Li, C.**, 2018. A new method for calculating the primary porosity of unconsolidated sands based on packing texture: Application to modern beach sand. *Marine and Petroleum Geology*, vol. 98, pages 384-396. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.08.033>

Formées par l'action combinée des courants marins et de la houle, les dunes sous-marines sont des structures sédimentaires relativement fréquentes dans les futures zones d'implantation des parcs éoliens en mer envisagés en Manche et mer du Nord. Dans le cadre du raccordement des éoliennes, la pose de câbles sur les fonds marins impliquera des travaux de tranchage et de dragage des dunes présentes. De 2019 à 2022, le projet DUNES s'est proposé d'étudier l'évolution naturelle de ces écosystèmes dont les dynamiques sédimentaires et biologiques étaient mal comprises, afin d'améliorer les connaissances nécessaires à l'évaluation de l'impact de ce type de travaux. Il a été coordonné par France Energies Marines et piloté scientifiquement par le Shom. Le projet a fédéré un consortium de neuf partenaires académiques et privés aux compétences et aux contributions complémentaires.

Le projet DUNES a permis :

- d'enrichir les connaissances des processus physiques et du fonctionnement naturel des dunes hydrauliques,
- de mettre à jour un SIG en accès libre dédié aux champs de dunes et aux bancs de sable,
- de caractériser à une fine échelle la structure des réseaux trophiques des dunes pour comprendre le fonctionnement de ces systèmes particuliers,
- de formuler des recommandations méthodologiques pour évaluer les impacts d'activités anthropiques sur les écosystèmes dunaires.



Bâtiment Cap Océan
Technopôle Brest Iroise
525, avenue Alexis de Rochon
29280 PLOUZANÉ

02 98 49 98 69

www.france-energies-marines.org

ISBN 978-2-493115-38-6



9 782493 115386