Laboratoire de Morphodynamique Continentale et Côtière
UMR CNRS 6143 M2C

Morphodynamique des dunes, flux sédimentaires et leurs relations avec les communautés benthiques sur le site du futur parc éolien Dieppe-Le Tréport

Rapport du projet
« Etude des réseaux trophiques avant construction du parc éolien en mer de Dieppe Le Tréport »

(version du 15/12/2023)

Etude réalisée sous convention avec le CNRS, dans le cadre du Mémoire de Fin d'études (N° 1429)
de Théo DUFRESNE (UniLasalle), encadré par Sophie LE BOT (Univ. Rouen Normandie)
En collaboration avec Jean-Philippe PEZY, Pierre WEILL, Nathan CHAUVEL et Aurore RAOUX du laboratoire M2C

UniLaSalle Beauvais

INSTITUT POLYTECHNIQUE UNILASALLE
Formation Géosciences et Environnement
19, rue Pierre Waguet – B.P. 30313
60026 BEAUVAIS CEDEX

Le rapport est à citer comme suit :

Dufresne T., Le Bot S., Pezy J.P., Weill P., Chauvel N., Raoux A. (2023). Morphodynamique des dunes, flux sédimentaires et leurs relations avec les communautés benthiques sur le site du futur parc éolien Dieppe-Le Tréport. Rapport du projet « Etude des réseaux trophiques avant construction du parc éolien en mer de Dieppe Le Tréport », 64 p. + annexes.

Résumé

Dans le cadre de l'installation d'un futur parc éolien au large de Dieppe-Le Tréport, un projet multidisciplinaire (« Etude des réseaux trophiques avant construction du parc éolien en mer de Dieppe Le Tréport » ; porteur : Jean-Philippe Pezy) est financé par le Groupement d'Intérêt Scientifique afin de quantifier la morphodynamique des dunes sous-marines, les flux sédimentaires et de déterminer l'influence de ces paramètres physiques sur les communautés benthiques, avant l'installation du parc. Cette caractérisation sédimentaire et morphodynamique du site permet de disposer d'une situation de référence qui pourra être utilisée pour l'évaluation des effets du parc sur l'environnement naturel par comparaison avec les données des suivis réglementaires qui seront acquises après construction du parc.

Le site d'étude, situe sur la plateforme mégatidale de la Manche orientale, est couvert de corps sédimentaires composés bancs tidaux sableux eux-mêmes modelés de grandes dunes à crêtes linéaires à sinueuses. Le site peut être divisé en 4 secteurs de morphologies dunaires contrastées. Les données bathymétriques acquise en 1993, 2011 et 2018 ont permis de quantifier la morphologie des dunes et d'estimer leur vitesse de migration. Les dunes présentent des hauteurs comprises entre 2,6 et 5,5 m et sont espacées de 268 à 1652 m. Elles migrent à des vitesses de 1,89 ± 1,27 à 2,66 ± 1,38 m.an^{-1} selon le secteur étudié. Les dunes migrent généralement vers l'est mais certains régimes de vents peuvent se superposer aux régimes des courants tidaux, forçage majeur dans la zone d'étude, afin d'inverser l'orientation de migration des dunes. Combinées aux données courantométriques et granulométriques, ces interprétations ont permis de quantifier les flux sédimentaires selon plusieurs approches (formule empirique du transport par charriage de Van Rijn, 1984 : formule du « dune tracking », e.g. Hoekstra et al., 2004). Les flux sédimentaires résiduels sont de l'ordre de 83 à 126 t.m.an^{-1}.

Des analyses statistiques (CAH, ACP) ont permis de caractériser les relations entre les paramètres physiques quantifiés dans le cadre de cette étude (morphologie et migration des dunes, flux sédimentaires) et des paramètres benthiques acquis par Pezy (2017). Les analyses montrent que : (i) les dunes les plus hautes sont étroites et faiblement espacées, et (ii) le flux sédimentaire et les paramètres benthiques sont fortement anti-corrélés, mais ne montrent pas de relation avec les paramètres morphologiques des dunes.

***Mots clés** : Dieppe-Le Tréport ; Dunes sous-marines ; Morphodynamique ; Paramètres morphologiques ; Migration ; Flux sédimentaires ; Benthos ; Dune tracking ; Van Rijn ; Eolien offshore ; Analyses multivariées*

Abstract

As part of the installation of a future wind farm off the coast of Dieppe-Le Tréport, a multidisciplinary project ("Study of food networks before construction of the Dieppe Le Tréport offshore wind farm"; leader: Jean-Philippe Pezy) is funded by the Scientific Interest Group in order to quantify the morphodynamics of underwater dunes, sediment flows and to determine the influence of these physical parameters on benthic communities, before the installation of the park. This sedimentary and morphodynamic characterization of the site provides a reference situation which can be used to evaluate the effects of the park on the natural environment by comparison with the regulatory monitoring data which will be acquired after construction of the park.

The study site, located on the megatidal platform of the Eastern Channel, is covered with sedimentary bodies composed of sandy tidal banks which are themselves shaped by large dunes with linear to sinuous crests. The site can be divided into 4 sectors of contrasting dune morphologies. Bathymetric data acquired in 1993, 2011 and 2018 made it possible to quantify the morphology of the dunes and estimate their migration speed. The dunes have heights between 2.6 and 5.5 m and are spaced from 268 to 1652 m apart. They migrate at speeds of 1.89 ± 1.27 to 2.66 ± 1.38 m.year-1 depending on the sector studied. The dunes generally migrate eastwards but certain wind regimes can be superimposed on the regimes of tidal currents, a major forcing in the study area, in order to reverse the direction of migration of the dunes. Combined with current and particle size data, these interpretations made it possible to quantify sediment fluxes using several approaches (empirical formula for bedload transport of Van Rijn, 1984: "dune tracking" formula, e.g. Hoekstra et al., 2004). The residual sediment fluxes are of the order of 83 to 126 t.m.year-1.

Statistical analyzes (CAH, PCA) made it possible to characterize the relationships between the physical parameters quantified as part of this study (morphology and migration of dunes, sediment flows) and the benthic parameters acquired by Pezy (2017). The analyzes show that: (i) the highest dunes are narrow and closely spaced, and (ii) the sediment flux and benthic parameters are strongly anti-correlated, but do not show a relationship with the morphological parameters of the dunes.

Key words: Dieppe-Le Tréport; Underwater dunes; Morpho-dynamics; Morphological parameters; Migration; Sediment flows; Benthos; Dune tracking; Van Rijn; Offshore wind farm ; Multivarious analysis

Table des matières

Table des matières ... 3
Table des illustrations ... 4
Table des tableaux ... 6
Table des équations ... 7
Liste des abréviations ... 8
Introduction ... 10
I. Etat des connaissances sur les dunes ... 11
I.1. Conditions d'occurrence et de stabilité des dunes ... 11
I.2. Migration des dunes ... 15
I.3. Flux sédimentaires associés aux dunes ... 15
I.4. Le benthos associé aux fonds dunaires ... 16
II. Présentation du site d'étude ... 17
II.1. Contexte géologique ... 18
II.1.1. Géologie ... 18
II.1.2. Stocks sédimentaires ... 19
II.2. Agents forçant ... 19
II.2.1. Climat ... 19
II.2.2. Forçage hydrodynamique ... 20
II.3. Morphodynamique sédimentaire actuelle ... 24
II.3.1. La couverture sédimentaire ... 24
II.3.2. Morphodynamique des champs de dunes ... 25
II.4. Le benthos ... 27
II.4.1. Paramètres benthiques ... 27
II.4.2. Habitats et variabilités spatiales et temporelles ... 27
II.4.3. Relations entre paramètres physiques, chimiques et benthiques des fonds sédimentaires ... 28
III. Matériel et méthodes ... 29
III.1. Stratégie d'étude ... 29
III.2. Données d'entrée ... 29
III.2.1. Bathymétrie ... 29
III.2.2. Courantométrie ... 31
III.2.3. Granulométrie ... 32
III.2.4. Données benthiques ... 33
III.3. Traitement des données ... 34

III.3.1. Extraction des paramètres morphologiques des dunes 34
III.3.2. Calcul des migrations 38
III.3.3. Calcul des flux 39
IV. Résultats, interprétations & Discussion 43
IV.1. Morphologie des dunes 43
IV.1.1. Comparaison des méthodes d'extraction des paramètres morphologiques 43
IV.1.2. Analyse de la morphologie des dunes 43
IV.2. Migration des dunes 45
IV.3. Flux sédimentaires 46
IV.3.1. Flux sédimentaires obtenus par la formule empirique de Van Rijn (1984) 46
IV.3.2. Flux obtenus avec la méthode du « Dune tracking » 49
IV.3.3. Comparaison des flux estimés par les formules de Van Rijn (1984) et du « dune tracking » 50
IV.4. Utilisation des analyses multivariées pour comparer les données benthiques et physiques 51
V. Recommandations & Perspectives 56
V.1. Recommandations méthodologiques 56
V.1.1. Incertitudes sur les données 56
V.1.2. Méthodes d'extraction des paramètres morphologiques des dunes 56
V.1.3. Choix de la formule empirique de Van Rijn 57
V.2. Recommandations sur les relations entre les paramètres sédimentaires et morphodynamiques de dunes et le benthos. 57
V.3. Suivis environnementaux sur le parc éolien Dieppe-Le Tréport 58
Conclusion 59
Liste des références bibliographiques 61
Webographie 65
Annexes 66

Table des illustrations

Figure 1 : Domaine de stabilité des corps sédimentaires dans les environnements marins profonds en fonction des vitesses des courants et de la granulométrie (D'après Stow et al, 2009) 12
Figure 2 : Classification des dunes selon la sinuosité de leur crête (d'après Berné et al. (1989) et Ferret (2011) in Bary (2020) 13
Figure 3 : Paramètres morphologiques d'une dune (a : profil d'élévation à l'échelle de la dune ; b : profil d'élévation à l'échelle du champ de dune ; c : dune barkhane en vue plane horizontale) (D'après Ferret, 2011) 13

Figure 4 : Carte d'implantation du parc éolien de Dieppe/Le Tréport sur la bathymétrie de 2011 17
Figure 5 : Carte géologique de la Manche (modifiée d'après le BRGM, 2009 in Lebrec et al., 2017)... 18
Figure 6 : Paléovallées et bancs sableux en Manche et Mer du nord (rond rouge : site d'étude) (D'après Auffret et al, 1980) 19
Figure 7 : Graphique des 40 tempêtes majeures en France depuis 1980 à 2020 selon le % du territoire national touché par des rafales supérieures à 100km/h (Météo France, 2020)..... 20
Figure 8 : Marnage en Manche (d'après les modèles de marée CSTFRANCE du SHOM, ESRI, 2010 in Lazure, 2012) 21
Figure 9 : Courants en Manche. a. Courants résiduels en Manche ; b. Vitesses maximales des courants de marée en vive-eau moyenne (source : SHOM, IGN, ESRI, OSPAR ; https://archimer.ifremer.fr/doc/00327/43821/43395.pdf). 21
Figure 10 : a. Rose des vents de 1970 à 2017 mesurés au Sémaphore de Dieppe (IHCANTABRIA, 2018) b. Fréquence des rafales de vent à 10 m de hauteur (mesures quotidiennes), en fonction de leur provenance et de leur intensité (Données Météo-France) (Ferret,2011) 22
Figure 11 : Fetch présent en Manche allant jusqu'au site d'étude (Ferret, 2011) 23
Figure 12: Caractéristiques de la houle au large de Dieppe sur la période de 1979 à 2002 (données ANEMOC, point Coast-3506) (Ferret, 2011)..... 23
Figure 13 : Carte de la couverture sédimentaire en Manche orientale avec zoom sur la bordure ouest du prisme sédimentaire normand-picard (modifié d'après Vaslet et al., 1979) 24
Figure 14 : Carte bathymétrique du site d'étude (issu des campagnes de GEOXYZ de 2018) 25
Figure 15 : Carte d'implantation des courantomètres par rapport aux données bathymétriques de 2018 32
Figure 16 : Carte du D50 calculé selon une zonation spatiale des valeurs de chaque station (issue des données de la thèse de Pezy (2017)..... 33
Figure 17 : Carte des stations de prélèvements bio-sédimentaires (Pezy 2017) 34
Figure 18 : Secteurs analysés pour la récupération des paramètres physiques, représentés ici sur la bathymétrie de 2018..... 35
Figure 19 : Carte des transects par secteur générés sous QGIS..... 36
Figure 20 : Profil d'élévation du transect n°34 situé sur le secteur sud (bathymétrie de 2018) 36
Figure 21 : Paramètres calculés par l'outil BTT (Asym : asymétrie de la dune, Htrto : hauteur du creux du flanc doux par rapport à la crête, Htotr : hauteur du creux du flanc raide par rapport à la crête, Ldowncr : largeur projetée entre deux pentes descendantes (sur la trendline), Lupcr : largeur projetée entre deux pentes ascendantes (sur la trendline), Lups : largeur projetée entre le creux du flanc doux et la crête, Ldowns : largeur projetée entre le creux du flanc raide et la crête, Lthroughs : largeur entre deux creux, Ltops : largeur entre deux crêtes (longueur d'onde), Slope.l : pente du flanc raide, Slope.s : pente du flanc doux) 37
Figure 22 : Interface du logiciel Paramdunes représentant les dunes coutourées automatiquement (point blanc : sommet de la dune) 38
Figure 23 : Carte des lignes de crêtes et des transects par secteur..... 38
Figure 24 : Relation entre la hauteur des dunes et leur longueur d'onde pour l'ensemble des secteurs étudiés comparée à la relation de Flemming (1988) (sud : bleu, ouest : jaune, est : orange, centre : gris) 44
Figure 25 : Hauteur de vagues enregistrées entre fin janvier 2015 et mi-août 2016 (issu de l'AWAC D1-D5) 48
Figure 26 : Carte des stations biosédimentaires (Pezy, 2017) et des lignes de crêtes de 2011 dans le secteur d'étude. Les numéros des stations bio-sédimentaires utilisés dans l'analyse et sur les figures suivantes sont différents de ceux indiqués sur cette figure. 51

Figure 27 : Arbre hiérarchique des individus (dunes) de la zone d'étude selon la similarité de leurs variables (les nombres correspondent aux 12 dunes numérotées selon leur succession dans le fichier d'analyse) 53
Figure 28 : Décomposition de l'inertie totale sur l'ensemble des variables et individus..... 54
Figure 29 : Projection des individus (gauche) et des variables (droite) dans le plan factoriel F1-F2 obtenu par l'ACP. Clusters 1 à 4 : classes 1 à 4. 55

Table des tableaux

Tableau 1 : Classification des corps sédimentaires suivant leurs dimensions, leurs paramètres et les paramètres du milieu (Berné et al., 1989 ; Ashley, 1990 ; Ferret, 2011 in Bary, 2020) 14
Tableau 2 : Tableau des communautés benthiques principales retrouvées dans la Manche (modifié d'après Hamdi et al, 2010) 16
Tableau 3 : Récapitulatif des conditions générales du site d'étude..... 17
Tableau 4 : Tableau récapitulatif des parts de sédiments grossiers et fins sur plusieurs périodes (Ferret, 2011)..... 25
Tableau 5 : Tableau récapitulatif des cartes bathymétriques récupérées et renommées avec leur source et leur résolution 31
Tableau 6 : Tableau récapitulatif des flux instantanés calculés avec la formule de Van Rijn (1984) selon différentes formules de rugosité équivalentes (valeur de ks selon les valeurs courantométriques situées à 2,1m du fond marin) et selon deux conditions hydrodynamiques (VE et ME pointe de flot et pointe de jusant) 42
Tableau 7 : Tableau des résultats des 3 méthodes d'extraction sur le transect 34 situé dans la zone sud du projet 43
Tableau 8 : Tableau récapitulatif des moyennes des paramètres morphologiques récupérées sur les levés de 2011 et 2018 avec écart-type pour chaque secteur 45
Tableau 9 : Tableau récapitulatif des taux de migration moyens par secteur assortis des écarts-types et comparés avec les résultats d'études récentes (Lebrec et al., 2017 ; Ferret, 2011 ; Pieterse, 2021)... 46
Tableau 10 : Tableau récapitulatif des flux instantanés estimés en t/m/an, à partir de la formule de Van Rijn (1984) selon deux méthodes de calculs de ks (Nielsen, 1992 ; loi de la Paroi) pour différentes conditions de marée, avec ou sans houles en utilisant la moyenne des valeurs de vitesse de courants de pointe de flot et de pointe de jusant (VE : Vives-Eaux moyennes ; ME : Mortes-Eaux ; Moy : marées moyennes ; H : avec houles)..... 47
Tableau 11 : Tableau récapitulatif des flux cumulés estimés en t/m/an sur un cycle de marée semi-diurne, pour différentes conditions de marée et de houle et pour les quatre secteurs d'étude. Les flux cumulés sont orientés 48
Tableau 12 : Tableau des flux résiduels calculés à partir de la formule de Van Rijn (1984) sur la période février 2015 – avril 2016, pour les 4 secteurs d'étude, en t.m.an-1 et en m3.m.an-1. Les flux résiduels sont orientés vers l'Est-Nord Est. Ils comparés aux récentes études. 49
Tableau 13 : Tableau récapitulatif des flux sédimentaires résiduels calculés par la formule du « dune tracking » sur les périodes 1993-2011, 2011-2018 et 1993-2018) et sur les 4 secteurs d'étude, en $t.m.an^{-1}$ 49
Tableau 14 : Tableau des flux résiduels obtenus avec les formules de Van Rijn (1984) et du « dune tracking », en m3.m.an-1. Les flux sont tous orientés vers l'Est-Nord Est..... 50

Table des équations

Équation 1 : Formule du "dune tracking" (Hoesktra et al., 2004) 38
Équation 2 : Formule empirique de Van Rijn (1984) 39

Liste des abréviations

ACP : Analyse par Composante Principale
BTT : Bedform Tracking Tool
CAH : Classification Ascendante Hiérarchique
E : est
ESRI : Institut de Recherche des Systèmes Environnementaux
EUNIS : Système d'Information de la Nature en Europe
GIS EMDT : Groupement d'Intérêt Scientifique de l'Eolien en Mer à Dieppe/le Tréport
$g.PSLC.m^{-3}$: gramme par poids sec libre de cendre par mètre cube
H : hauteur
H/L : hauteur sur longueur d'onde
IMDC : Consultant International de Dragage Marin
k_s : rugosité équivalente
ME : mortes-eaux
Moy : moyennes-eaux
mm : millimètre
MW : mégawatt
O : ouest
N : nord
NE : nord-est
$N.m^{-2}$: newton par mètre carré
S : seconde
S : sud
SHOM : service hydrographique et océanographique de la Marine
SO : sud-ouest
$t.m.an^{-1}$: tonne par mètre par an
VE : vives-eaux
µm : micromètre
° : degré
°C : degré Celsius
% : pourcent
‰ : pour mille
λ : longueur d'onde

Glossaire

Affouillement : Action de creusement des surfaces par les eaux

Analyses multivariées : analyse de données par des lois de probabilité à plusieurs variables

Bouquet énergétique : part relative des différentes sources d'énergie dans la consommation d'un espace donné

Disponible sédimentaire : quantité de sédiment mobilisable

Dissimilarité : Manque de similitude

Endémique : espèce localisée sur une aire restreinte

Epicontinental : Qui borde un continent

Flot : marée montante

Benthos : ensemble des organismes aquatiques vivant au fond des étendues d'eau marines, lacustres ou fluviales

Jusant : marée descendante

Macrotidal : zone côtière subissant des amplitudes de marée importantes

Mode : Classe granulométrique la plus représentée dans un sédiment

Nycthémérale : migration verticale diurne sur la colonne d'eau

Monoclinal : relief structural affecté par un pendage identique, dans une direction donnée

Régression : décalage du trait de côte vers la mer

Régression linéaire : technique d'analyse de données qui prédit la valeur de données inconnues en utilisant une autre valeur de données apparentée et connue

Sémaphore : Poste établi sur le littoral, permettant de communiquer par signaux optiques avec les navires

Subtidal : concerne le compartiment marin situé sous le niveau des plus basses mers et qui est, de fait, en permanence immergé

Introduction

L'éolien en mer se développe depuis la fin du XXème siècle et constitue une solution quant à la transition énergétique et la diversification du bouquet énergétique dans le monde (Ministère de la transition énergétique, 2023). L'objectif en France est d'atteindre 40 % d'électricité renouvelable à l'horizon 2030, fixé par la loi de transition énergétique pour la croissance verte et adoptée en 2015 (Ministère de la transition énergétique, 2023). Le long des côtes de la Manche, quatre projets éoliens sont alors mis en avant : Saint-Brieuc, Courseulles-sur-Mer, Fécamp et Dieppe/Le Tréport.

Un parc éolien en mer est constitué de diverses structures (fondations d'éoliennes, postes électriques en mer, câbles). Afin d'anticiper les impacts de ces fondations sur le fond sédimentaire et les habitats benthiques, il est nécessaire de connaître la dynamique naturelle des fonds, pouvant impacter, elle-même, les infrastructures mais aussi l'écosystème environnant. Connaître la dynamique naturelle avant construction, permet d'anticiper ses effets sur les structures éoliennes (effets de charge, ensouillage/découvrement de câbles, …), mais aussi d'évaluer les perturbations de l'implantation de ses structures sur la dynamique sédimentaire, la morphologie et la nature des fonds sur le périmètre du parc et ses alentours (Bary, 2020).

L'étude menée porte sur le futur parc éolien Dieppe-Le Tréport, situé au large des côtes d'Albâtre en Seine-Maritime par des profondeurs de 10 à 30m sur des fonds sableux modelés de bancs sableux couverts de dunes sous-marines. Cette zone est soumise à des marées macrotidales et un régime de vagues de type mer du vent. Dans le cadre des suivis réglementaires du projet de construction et d'exploitation du parc, le Groupement d'Intérêt Scientifique (GIS) Éolien en Mer prévoit la réalisation d'études sur les réseaux trophiques et leur évolution, incluant en particulier un état de référence. Ce rapport quantifie les paramètres physiques présent sur le site de Dieppe/Le Tréport.
Le plan d'action de mon stage, qui est aussi le plan de ce rapport, est donc le suivant :

- Quantification de la morphologie et de la migration des dunes grâce aux cartes bathymétriques issues des campagnes de 1993, 2011 et 2018 ;
- Estimation des flux sédimentaires instantanés, à l'échelle du cycle de marée et à l'échelle annuelle ;
- Analyser les relations entre les paramètres physiques (sédimentaires, morphodynamique) et benthiques (richesse taxonomique, abondance, biomasse) des fonds sédimentaires par le biais d'analyses multivariées (ACP et CAH).

I. Etat des connaissances sur les dunes

I.1. Conditions d'occurrence et de stabilité des dunes

Les dunes sont des figures sédimentaires périodiques, mobiles et transverses (perpendiculaire au courant). Elles sont considérées ubiquistes car présentes en milieu marin jusqu'au pied du talus et en milieu terrestre jusqu'à 200m d'altitude (désert, estuaires, glacis et littoral) (Carling et al., 2000; Le Bot, 2001; Ferret, 2011).
En milieu marin, ces corps sédimentaires se forment dans des sédiments meubles non-cohésifs (Le Bot, 2001) tels que des sédiments sableux à graveleux, dont la teneur en sédiments plus fins, cohésifs, n'excède pas 15 % (Terwindt, 1971).

La distribution granulométrique du sédiment a une influence sur la taille, la forme et les types de figures de dunes (Chamley, 1987). Il existe une corrélation entre la granulométrie très grossière et la hauteur de dune. Plus le sédiment est fin, plus la dune sera large, sinueuse avec une hauteur faible et inversement (Ferret, 2011). Sur les formes barkhanoïdes, la granulométrie diminue généralement du centre vers les extrémités (Ernstsen et al., 2004)
La présence de sédiments grossiers fait apparaitre des dunes hautes avec des flancs pentus, comme les barkhanes, tandis que les sédiments fins laissent place à des dunes rectilignes 2D avec des flancs peu pentus (Ferret, 2011). Les sédiments étant plus légers, un effet de « lessivage » se met en place en exposant les sédiments grossiers à des courants plus forts (Garlan, 2004).

Les dunes sous-marines se forment généralement grâce aux agents de forçages hydrodynamiques comme les courants de marée ou la houle (Latapy, 2020). La genèse des dunes est remarquée lors d'un écoulement moyen compris entre 0,4 et 3 $m.s^{-1}$. Les barkhanes se forment, par exemple, avec des vitesses de courant supérieurs à 0.8 $m.s^{-1}$ (Berné, 1991). Ces agents influencent une irrégularité sur un fond plat (sédiments ou organismes vivants). Cette irrégularité va créer une instabilité du système d'écoulement, modifier le transport granulaire et mettre en place une cellule de circulation (Coleman et Nikora, 2011). Dans un environnement tidal, des cellules de recirculation induisent des courants résiduels entraînant l'accumulation de sédiment et par conséquent la croissance la dune (Allen, 1980). Cette croissance varie en fonction des conditions du milieu et de la variation des courants (tempêtes, marées, houles, …).

La forme des dunes sous-marines varie en fonction des conditions du milieu. Le disponible sédimentaire, la nature du sédiment (granulométrie), la profondeur d'eau et la vitesse des courants jouent un rôle majeur dans le développement de celles-ci. En domaine subtidal, ces conditions permettent de différencier plusieurs corps sédimentaires (Garlan, 2004; Ferret, 2011). Les grandes dunes linéaires représentent un apport sédimentaire et des vitesses de courants faibles avec une crête rectiligne tandis que la diminution des apports sédimentaires et l'augmentation de la vitesse des courants met en avant des formes barkhanoïdes avec des crêtes sinueuses (Figure 1)(Belderson et al., 1982; Le Bot, 2001).

De plus, les conditions climatiques peuvent influencer ces paramètres. (Berne et al., 1989) ont mis en évidence un changement de dimension de la dune en période hivernale dû au régime des vagues et aux conditions climatiques devenant plus rudes avec une tendance à l'aplatissement des dunes. Ce phénomène est remarquable en vue de la diminution de la hauteur et du lissage des flancs des dunes.

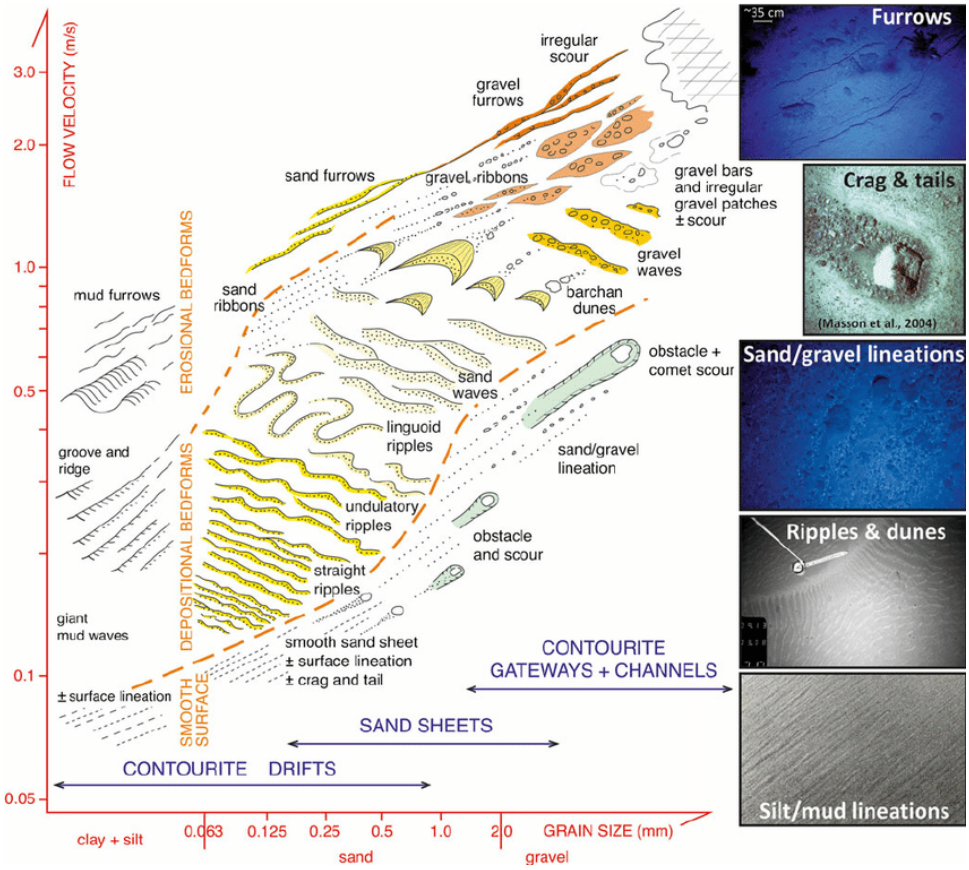


Figure 1 : Domaine de stabilité des corps sédimentaires dans les environnements marins profonds en fonction des vitesses des courants et de la granulométrie (D'après Stow et al, 2009)

La stabilité d'une dune est liée à son régime d'écoulement. Pour un sable moyen, il est noté une vitesse de mise en mouvement de 0,4 à 1 m.s^{-1}, pour les sables grossiers, une vitesse de 0.5 à 1 m.s^{-1} et pour des sables très grossiers, une vitesse de 0.6 à 1 m.s^{-1} (Amos et King, 1984).

Si la vitesse de mise en mouvement du grain est inférieure à la valeur requise, le déplacement sera restreint et inversement si la valeur est supérieure, il y aura abondance. Le courant passant à travers la dune crée des macro-turbulences sur le flanc raide, jouant un rôle important dans la migration des dunes (Best, 2005).

En outre, la suspension des sédiments décrochés de la crête suit une décantation selon l'hydrodynamisme du milieu. On parle alors de « pluie sableuse ». Sur la crête, les sédiments atteignent un point de stabilité marqueur de la limite de la hauteur de la dune et dont la valeur est fixée généralement à 35°. Les mécanismes dynamiques des dunes se résument par des avalanches, quand le seuil de stabilité est dépassé, mettant en place une accumulation causant des progradations de ces dernières vers la direction des courants résiduels (Berne et al., 1989).

Les flancs doux sont alors généralement situés entre 0.5 et 4° et les flancs raides entre 4 et 35°. Des analyses réalisées dans la Baie de San Francisco concluent un diagramme de stabilité et d'amplitude en fonction des vitesses de courants, de la granulométrie et de la bathymétrie (Rubin et McCulloch, 1980).

Les dunes sont des corps régis par les courants. L'augmentation de la vitesse de ces agents génère une variabilité de la morphologie des crêtes (Costello et Southard, 1981).

Au niveau longitudinal, il existe plusieurs formes de dunes dont les principales sont (Figure 2) :

- Les crêtes bidimensionnelles (ou crête linéaire) représentant un fort disponible sédimentaire ainsi qu'une vitesse des courants élevée de 0,5 à 1 m.s^{-1} ;
- Les crêtes tri-dimensionnelles marqueurs d'un faible disponible sédimentaire et de vitesse de courant faible (Belderson et al., 1982).

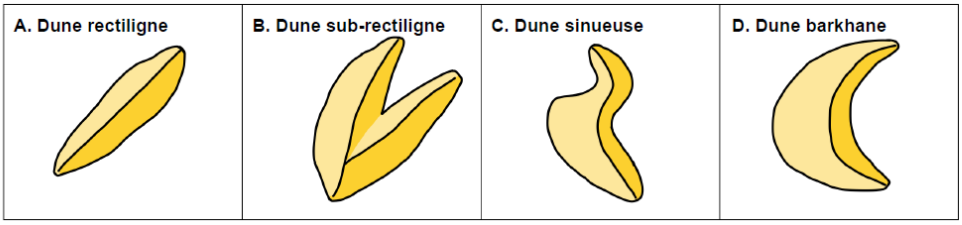


Figure 2 : Classification des dunes selon la sinuosité de leur crête (d'après Berné et al. (1989) et Ferret (2011) in Bary (2020)

La façon la plus simple de caractériser une dune est de prendre en compte ses paramètres morphologiques (Figure 3) (Le Bot, 2001). Néanmoins, une étude des côtes canadiennes faite par (Amos et King, 1984) démontre qu'il est difficile d'interpréter l'environnement de dépôts anciens selon leur morphologie car certaines morphologies se retrouvent similaires malgré des environnements de dépôts différents.

Pour cette étude, les paramètres morphologiques considérés sont :

- La hauteur (H) (en m) représente l'amplitude verticale maximale d'une dune ;
- La longueur d'onde (λ) (en m) correspond à la distance entre deux crêtes de dunes successives. Ce paramètre n'est pas toujours représentatif comme dans le cas des dunes isolées (Le Bot, 2001);
- La longueur projetée (en m) sur les deux flancs de la dune, doux (Ld) et raides (Lr). Cette longueur est la distance horizontale entre chaque creux de la dune et sa crête. D'ailleurs, les pentes des flancs peuvent être différentes selon la polarité de la dune influençant les longueurs projetées de celle-ci. Le ratio de ses deux longueurs permet de mettre en avant le côté symétrique ou asymétrique de la dune ;
- La largeur (L) (en m) représente la distance entre les deux creux amont et aval de la dune ;
- La surface de la dune (S) (en m²) calculée en fonction de la longueur et de la largeur ;
- Le facteur de forme (f) (sans unité) qui est une valeur représentative de la forme générale de la dune ;
- La sinuosité (s) des dunes est le ratio de l'extension longitudinale (E) (correspondant à la ligne imaginaire qui relie les deux extrémités de la crête) et de la longueur réelle de la crête (Lc) (Belderson et al., 1982).

Des essais de synthèse sur les dunes hydrauliques tidales actuelles ont permis de définir des hauteurs de dunes allant de 6cm jusqu'à une dizaine de mètres et une longueur d'onde allant de 60 cm à plusieurs centaines de mètres (Berne et al., 1989). Cependant, les hauteurs de dunes dépassent rarement les 20m sauf en mer d'Irlande où elles peuvent atteindre les 35,5m d'amplitude par 91,5m de profondeur (Landeghem et al., 2009).

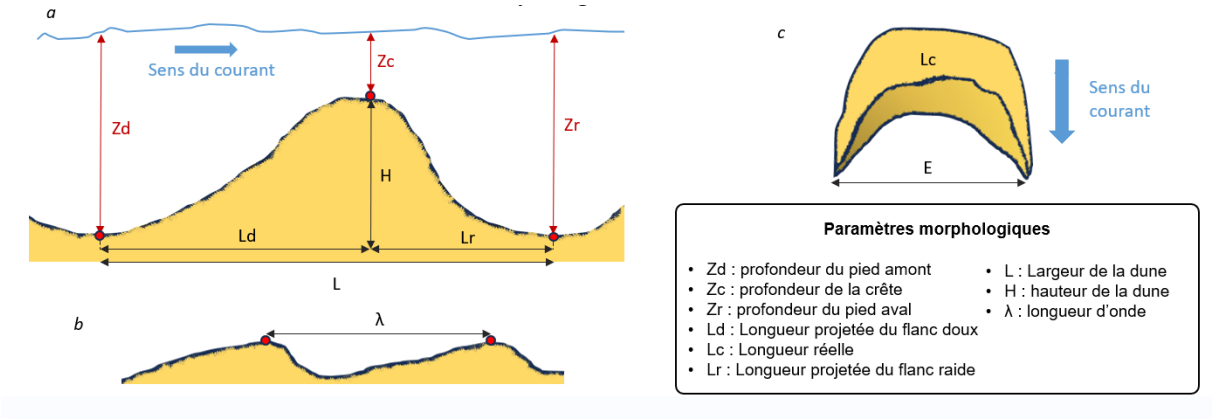


Figure 3 : Paramètres morphologiques d'une dune (a : profil d'élévation à l'échelle de la dune ; b : profil d'élévation à l'échelle du champ de dune ; c : dune barkhane en vue plane horizontale) (D'après Ferret, 2011)

La polarité est une donnée qualitative permettant de connaitre la direction de migration des dunes (Le Bot, 2001) et non quantitative (Schmitt et Mitchell, 2014). Elle est perpendiculaire au courant de marée, généralement en fonction des courants résiduels (Schmitt et Mitchell, 2014) et de la granulométrie (Landeghem et al., 2009). Michel (2016) a montré que les dunes intertidales de la Baie de Somme, au niveau de la Pointe du Hourdel peuvent inverser leur polarité à chaque marée ou sur plusieurs cycles de marée.

La période d'une marée comporte un jusant et un flot. Des courants unidirectionnels ou courants tidaux asymétriques entre le flot et le jusant peuvent être à l'origine des changements de morphologie de la dune, générant une forme allant du trochoïdal (dune symétrique) à l'asymétrie entre le flanc doux et le flanc raid (Le Bot, 2001), avec un flanc doux moins incliné que le flanc raide.

Les corps sédimentaires peuvent être visibles à différentes échelles (Tableau 1) :

- Les corps principaux dans la Manche sont représentés par des dunes de plusieurs kilomètres avec une sinuosité variable en fonction de la vitesse du courant, de la hauteur de la dune et de plusieurs autres paramètres morphodynamiques ;
- Des champs de dunes peuvent apparaitre quand le disponible sédimentaire est élevé et inversement, des dunes peuvent se retrouver isolées en contexte de disponible sédimentaire faible ;
- Les corps secondaires (surimposés) se situent sur les flancs doux des dunes jusqu'à la crête et sont suffisamment grands (dans la zone d'étude) avec des longueurs supérieures à 5m. L'amplitude de ces corps peuvent aller de la dizaine de centimètres à plusieurs mètres. L'asymétrie des dunes montre ainsi une migration du bas vers le haut de la dune principale. Des études (Dalrymple, 1984 ; Idier et al., 2002 ; Idier et Astruc, 2004, in (Ferret, 2011)) montrent une vitesse de déplacement plus élevée pour les corps surimposés par rapport aux figures sédimentaires principales. Ces corps surimposés se forment généralement sur des pentes inférieures à 15° (Carling et al., 2000). De plus, ils se caractérisent par une diminution de la longueur d'onde et une augmentation de la hauteur le long de leur flanc doux (creux amont de la crête).

Tableau 1 : Classification des corps sédimentaires suivant leurs dimensions, leurs paramètres et les paramètres du milieu (Berné et al., 1989 ; Ashley, 1990 ; Ferret, 2011 in Bary, 2020)

Corps sédimentaire	**Rides**	**Dune**				**Bancs sableux**
		Petite	Moyenne	Grande	Très grande	
Disponible sédimentaire	Faible à fort	Faible (dunes 3D) à fort (dunes 2D)				Fort
Vitesse des courants (m.s^{-1})	< 0,5	0,5 à 0,6				1
Direction de la crête par rapport au courant principal	Perpendiculaire	Perpendiculaire (± 20°)				Parallèle (± 20°)
Hauteur (m)	< 0,06	0,06 – 0,25	0,25 – 0.5	0,5 - 3	> 3	> 10
Longueur d'onde (m)	< 0,6	0,6 - 5	5 - 10	10-100	>100	>1000
Granulométrie	Sables < 0,8	Sables aux graviers				Sables souvent fins

I.2. Migration des dunes

Les dunes sont des corps reliques à mobiles, leur morphologie peut donner des indications sur la direction principale de transport sédimentaire et donc de migration des dunes. C'est essentiellement le transport par charriage qui est responsable de la dynamique des dunes. Dès que le transport par suspension devient prépondérant, la migration des dunes est inhibée.

La migration est directement liée au volume de sédiments transportés. Plus le corps sédimentaire est grand, plus la vitesse de migration diminue et vice et versa (Ferret, 2011). Les dunes de plus de 7m de hauteur dépassent rarement les 25 $m.an^{-1}$ (Langhorne, 1973). Par ailleurs, des dunes avec des morphologies similaires peuvent évoluer différemment selon la condition du milieu mais aussi selon la granulométrie (Ferret, 2011). Au nord du Tréport, les bancs sableux appelés « Ridens de Dieppe » ont une migration moyenne de 40 $m.an^{-1}$ (Le Bot, 2001)

La faible intensité des courants hydrodynamiques et l'apparition de sédiments cohésifs peuvent rendre la dune moribonde voir fossile (Trentesaux et al., 2008). Les courants de marée, facteurs importants dans la migration des dunes, agissent comme un agent forçant sur les flux charriés. En Baie du Mont-Saint-Michel, où le marnage est élevé, les dunes atteignent une migration de 20 $m.an^{-1}$ à 80 $m.an^{-1}$ (Ehrhold, 1999).

Les déplacements importants sont souvent enregistrés pendant les périodes de tempêtes. En effet, l'impact de la houle est effectif dans la Manche puisque la profondeur d'eau est généralement faible. Le Bot et Trentesaux (2004) montrent des vents forts de direction opposée au courant tidal résiduel pouvant modifier la dynamique sédimentaire voire l'inverser. Ce changement de direction du transport sédimentaire, bien que temporaire, est parfois visible et enregistré dans la structure interne de la dune (Le Bot et Trentesaux, 2004). Dans le cas des barkhanes, Ernstsen et al. (2004) démontrent un gradient d'augmentation des taux de migration du centre vers les extrémités des dunes (perpendiculairement au courant), permettant ainsi la formation de barkhanes.

I.3. Flux sédimentaires associés aux dunes

Les flux sont le résultat des forçages hydrodynamiques appliqués aux sédiments sur le fond marin. Appréhender la dynamique des flux permet d'en apprendre plus sur les quantités transportées et ainsi prévoir l'installation des différentes infrastructures dans le cadre d'un parc éolien en mer (Carter et al., 2014). Les transports de sédiments en Manche sont généralement issus des forçages tidaux représentés par des marées symétriques à asymétriques (Ferret, 2011). Dans l'estuaire de la Seine, les flux sont compris entre 0,3 et 37,8 $g.m.s^{-1}$, ce qui peut donner un ordre de grandeur pour la présente étude (Grenard-Grand et al., 2021).
La dynamique sédimentaire est régie par la granulométrie et le disponible sédimentaire du milieu. La houle, quant à elle, joue un rôle en facilitant la mise en mouvement du sédiment et en augmentant ou ralentissant les courants selon sa direction de provenance.
Il existe plusieurs mécanismes de transport sédimentaire :

- La suspension est un processus mettant en avant le transport du grain au travers de la colonne d'eau. (Németh, 2003) développe une formule de transport en suspension dans un modèle numérique, afin de connaitre la quantité de flux sédimentaire transporté uniquement par suspension. Cette formule ne sera pas utilisée dans cette étude ;
- Le charriage (continu ou interrompu) touche généralement des sédiments de moyenne à grande taille tels que des graviers en les faisant rouler, glisser ou sauter sur un petit laps de temps. Le charriage est le responsable principal de la migration des dunes dans la Manche.

En milieu aqueux, le transport sédimentaire est complexe puisqu'il dépend d'une multitude de facteurs qui peuvent être granulométriques et/ou hydrodynamiques (taille, forme, propriétés du grain, vitesse du fluide porteur, densité, viscosité et type d'écoulement) (Chamley, 1987).

I.4. Le benthos associé aux fonds dunaires

Le benthos représente l'ensemble des espèces vivant en interaction avec le fond marin. Ces espèces sont généralement présentes dès les premiers centimètres du fond marin en organismes vagiles à proximité du fond, ou en espèces directement liées au substratum, l'épibenthique, ou encore en espèces directement présentes à l'intérieur des fonds, l'endobenthique (Dauvin et al., 2010).

Plusieurs paramètres permettent de caractériser l'espèce benthique : poids, développement, reproduction, durée de vie, dispersion, taille (qui représente un critère majeur dans la classification des espèces) et types trophiques et activités de l'organisme (Warwick et Clarke, 1984).

Selon Mare (1942), le benthos peut être subdivisé en trois catégories :

- Le microbenthos considérant la taille des espèces inférieures à 45µm ;
- Le méiobenthos de 45µm à 1mm ;
- Le macrobenthos supérieur à 1mm.

Les habitats physiques sont référencés dans la classification EUNIS (Annexe A). Il existe un grand nombre de communautés présentes en Manche. Cette classification met en avant cinq communautés benthiques majoritaires associées aux fonds marins de la Manche et témoigne de l'influence du fond marin sur la répartition du benthos (Tableau 2) (Hamdi et al., 2010).

Tableau 2 : Tableau des communautés benthiques principales retrouvées dans la Manche (modifié d'après Hamdi et al, 2010)

Communauté	Caractéristique
Cailloutis à épibiose sessile (A4.13_FR01)	Forts courants, profondeur d'eau entre 20 et 50m, faciès à Modiolus modiolus, 80% de la composition sédimentaire
Gravelle à Branchiostoma lanceolatum (A5.135)	Zone de transition entre sables moyens et cailloutis, 50% de la composition sédimentaire, faciès à Céphalocordé *Amphioxus lanceolatus* et l'oursin *Spatangus purpureus*
L'hétérogène envasé (A5.43_FR03)	Présent dans les dépressions inter bancs caractérisant un écotone (zone de transition entre les communautés des cailloutis et des sables fins), sédiment hétérogène, faciès à espèces endofaunes
Sables fins à moyens propres à Ophelia borealis (A5.251)	Essentiellement dans les bancs sableux à sables fins et moyens sans pélites, communauté oligospécifique, faciès à polychète *Ophelia borealis* et l'oursin *Echinocardium cordatum*.
Sables fins envasés à Abra alba (A5.244)	Courants faibles des zones côtières, faciès à *Abra alba*, polychète *Pectinaria* (*Lagis*) *koreni* et échinoderme *Ophiura ophiura*.

Ces espèces se répartissent selon les conditions du milieu dans lequel elles prospèrent. Trois notions apparaissent majoritairement sur le sujet : la profondeur d'eau, la qualité de l'eau et la nature du sédiment (Dauvin et al., 2010). De nombreuses études ont montré que la distribution des communautés benthiques peut être remarquée selon les conditions hydrodynamiques du milieu. La migration des dunes, la quantité de flux sédimentaires associés et les forçages hydrodynamiques du milieu en font partie (Claubaut et Davoult, 1989; Snelgrove et Butman, 1994; Erard, 1997 in Pezy, 2017).

II. Présentation du site d'étude

Le futur parc éolien en mer de Dieppe-Le Tréport est localisé au large de la côte d'Albâtre sur le plateau épicontinental, sur le prisme sédimentaire normand-picard au nord-ouest de la France dans la Manche orientale (Dauvin, 2012). Le parc éolien concerne une surface d'environ 15 km de long sur 7 km de large, soit 92km². Le site se situe environ entre 15 et 17km de la côte (Figure 4). Le futur parc éolien sera composé de 62 éoliennes représentant une capacité de 496 MW.

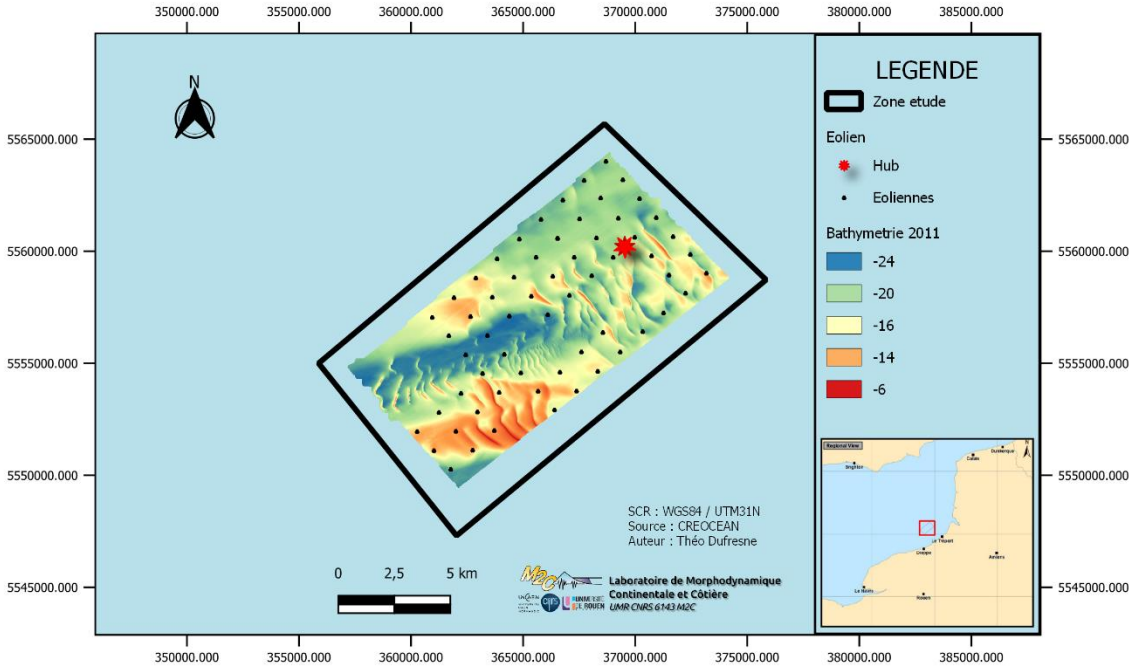


Figure 4 : Carte d'implantation du parc éolien de Dieppe/Le Tréport sur la bathymétrie de 2011

Le tableau ci-dessous récapitule l'ensemble des paramètres physiques et chimiques du milieu de la zone d'étude (Tableau 3) :

Tableau 3 : Récapitulatif des conditions générales du site d'étude

Paramètres	Valeur	Source
Coordonnées	50°04'N ; 1°00'E 50°12'N ; 1°15'E (WGS 84)	(Roberts, 2015)
Bathymétrie	10 à 30m de fond	(Ferret, 2011)
Pente	Faiblement penté	(Michel, 2016)
Température de l'eau (Moyenne surface/profondeur)	hiver (7,5°C) ; été (16,3°C)	(Pezy, 2017)
Salinité	35 et 35.5 ‰ au large en Manche	(Pezy, 2017)
Turbidité	0.6 à 3.1 (entre été et hiver 2015)	(Pezy, 2017)

II.1. Contexte géologique

II.1.1. Géologie

Situé sur la marge passive nord-Atlantique, le prisme sédimentaire normand-picard regroupe principalement les faciès du Tertiaire ainsi que de la fin du Mésozoïque. Le site est caractérisé par des sédiments Holocène posés sur des dépôts Pléistocène. Le Crétacé représente une couche de craie, partiellement faillée, de quelques milliers de mètres (Lebrec et al., 2017) dont l'épaisseur varie en fonction de l'endroit étudié (Figure 5).

Le demi-graben issu de la marge passive, présent sur la Manche orientale, met en avant des failles rejouées au Tertiaire (Boillot et Musellec, 1975) comblées par des faciès sédimentaires. Le Tertiaire, quant à lui, représente la partie orientale relativement stable protégée par une couche monoclinale de sédiments.

La bordure Ouest du prisme sédimentaire normand-picard est le résultat d'un remaniement des sédiments pendant la transgression flandrienne Holocène ainsi que d'une production endémique bioclastique importante (Augris et al., 2004) permettant la création de bancs sédimentaires. Les fonds marins de la zone d'étude sont principalement constitués de sédiments sablo-graveleux (Vaslet et al., 1979).

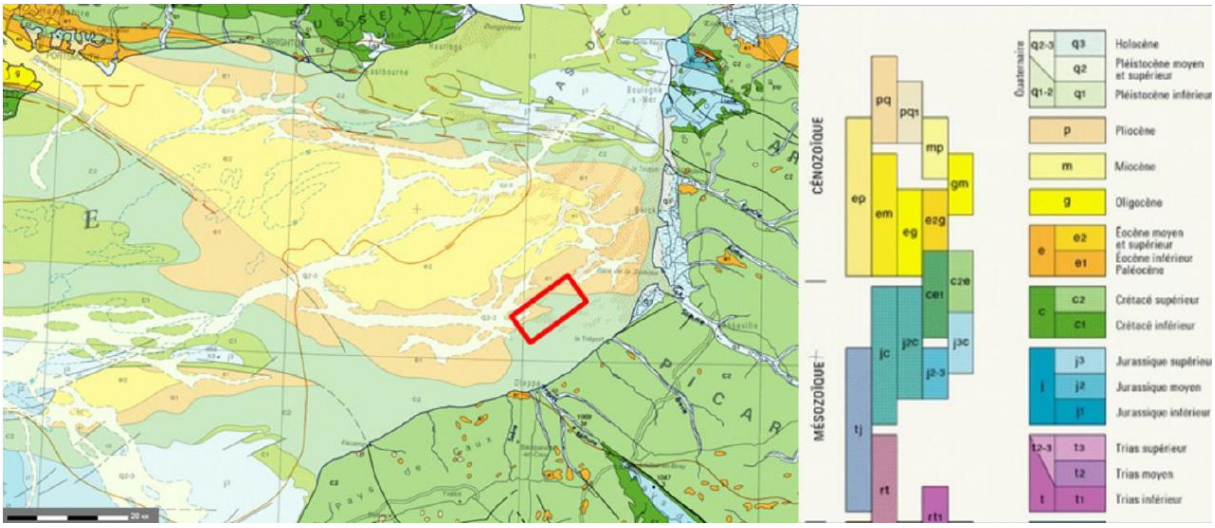


Figure 5 : Carte géologique de la Manche (modifiée d'après le BRGM, 2009 in Lebrec et al., 2017)

Smith (1985) émet l'hypothèse d'une inondation creusant la paléo-vallée de la Manche à partir d'un lac situé au sud de la mer du nord (Figure 6) (Guilcher, 1951). D'autres études parlent de périodes de régression et de transgression creusant au fur et à mesure la craie de l'anticlinal du Weald-Artois (détroit du Pas-De-Calais aujourd'hui). D'après Auffret et al. (1985), le comblement de la paléo-vallée se serait fait par dépôts alluvionnaires de 200 à 380m lors des phases de régression.

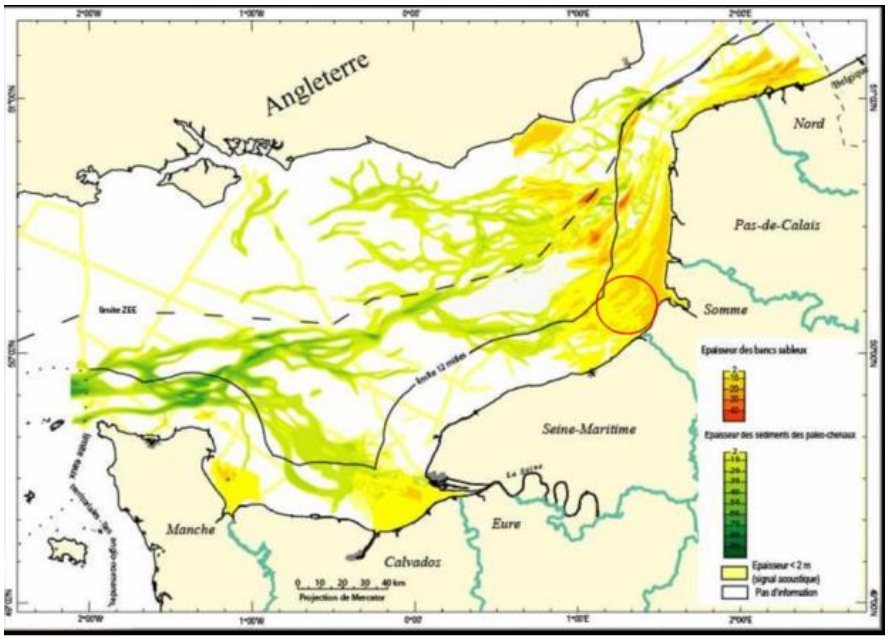


Figure 6 : Paléovallées et bancs sableux en Manche et Mer du nord (rond rouge : site d'étude) (D'après Auffret et al, 1980)

II.1.2. Stocks sédimentaires

Les stocks sédimentaires présents sur les fonds de la Manche sont principalement concentrés dans les bancs tidaux sableux et les dunes sous-marines sablo-graveleuses. Ces stocks présentent une épaisseur variable, pouvant atteindre la soixantaine de mètres. Une étude réalisée par Auffret et al. (1985) estime le volume de stock sédimentaire en Manche à plus de 18 milliards de m^3. Grenard-Grand et al. (2021) estime l'évolution du volume de sédiment mobilisable dans le prisme sédimentaire normand-picard à environ 4 milliards (± 18,8) de $m^3.an^{-1}$. Depuis le XIXème siècle, le prisme normand-picard suit une tendance à l'érosion marquée à l'est et au large. Cette érosion est représentée par un différentiel de 0,5m au niveau du site d'étude (Grenard-Grand et al., 2021).
L'évolution du stock sédimentaire suit l'épaisseur des sédiments. Un stock peu épais à tendance à se stabiliser tandis qu'un stock épais aura une forte évolution. Il est possible de prendre en compte l'accrétion présente en Baie de Veys. Cette zone comprend un stock sédimentaire élevé avec une perte de sédiment vers le large (Grenard-Grand et al., 2021).

II.2. Agents forçant

II.2.1. Climat

La houle fait partie des agents dynamiques les plus importants dans la morphodynamique des dunes. La variabilité des agents forçant est liée aux fluctuations climatiques à grandes échelles, en particulier l'Oscillation Nord-Atlantique (NAO). Cette fluctuation est la source majeure de la variabilité interannuelle à décennale de la circulation atmosphérique en Atlantique nord (Hurrel, 1995). Elle est basée sur une différence de pression atmosphérique entre les Açores et l'Islande, plus importante que la normale en phase positive. Les vents dominants O – SO sont renforcés en hiver au-delà du 45°N induisant une augmentation de l'activité de tempête. En phase négative, la différence de pression est réduite et les effets sont inversés. Les vents d'ouest se retrouvent affaiblis (Ferret, 2011).

De plus, les tempêtes, évènements de grandes ampleurs, ainsi que les fluctuations climatiques à moyen terme représentent un facteur principal influençant la dynamique des dunes sur le long terme. Sur la zone d'étude, on dénombre 40 jours de tempêtes par an de 1979 à 2002 au cours desquels la houle dépasse une hauteur de 1,5m (Météo France, 2020). Cette durée peut atteindre 80 jours par an dans le secteur ouest. L'Europe du Nord voit une augmentation du nombre de tempêtes depuis 1970 (Figure 7) ou une augmentation de leur intensité.

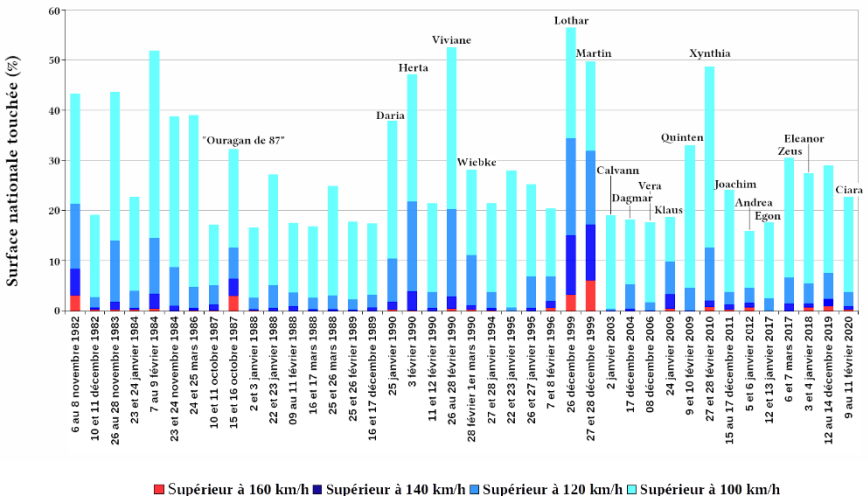


Figure 7 : Graphique des 40 tempêtes majeures en France depuis 1980 à 2020 selon le % du territoire national touché par des rafales supérieures à 100km/h (Météo France, 2020)

II.2.2. Forçage hydrodynamique

L'hydrodynamisme complexe régit les déplacements sédimentaires dans la Manche orientale. Les agents forçant qui influencent la dynamique sédimentaire sont nombreux. Dans cette étude, seuls les agents principaux seront présentés.

II.2.2.1. La marée

La marée est une combinaison de forces astronomiques telles que l'attraction gravitationnelle et la force centrifuge agissant sur le déplacement de masse d'eau à court terme (courant instantané) et long terme (courant résiduel). A long terme, les courants résiduels suivent des cycles de 14 jours appelés cycles de mortes-eaux/vives-eaux (ME/VE). La classification de ces cycles de marée se fait selon le coefficient de marée moyen (Mortes-eaux moyennes = 45 ; Moyennes-eaux = 75 ; Vives-eaux moyennes = 90). Les coefficients de marée nécessaires pour la mise en place de mouvement sédimentaires sont généralement supérieurs à 50 à l'ouest de la zone d'étude et 55 au nord-est (Ferret, 2011). Le régime des marées est qualifié de macro à méga tidal, avec une dominance tidale sur le marnage.
En Manche, les cycles de marée sont semi-diurnes, c'est-à-dire qu'ils mettent en avant deux périodes de flot et deux périodes de jusant par jour (Lazure et Desmare, 2012). En outre, les conditions de marée sont renforcées depuis le rétrécissement du détroit du Pas-De-Calais au nord. D'après les données du SHOM, les marées auraient un déplacement de 3.7 nœuds en période de vives-eaux moyennes et une circulation résiduelle de 27000 à 50000 $m^3.s^{-1}$ (Pezy, 2017).

Le marnage représente la hauteur maximale entre une pleine mer et une basse mer consécutive (Lazure, 2012). Il atteint 8 à 8.5m en vives-eaux moyennes au large de Dieppe (Ferret, 2011). L'influence de la marée semi-diurne combinée à la profondeur d'eau de 10m à l'est et de 30m au nord de la zone d'étude (Ferret, 2011) démontre un marnage à Dieppe pouvant aller de 8,5 jusqu'à 10m suivant le régime des marées de vives-eaux (SHOM, 1986). A l'extrême, dans la baie du Mont-Saint-Michel, le marnage peut aller jusqu'à 15m (Lazure, 2012) (Figure 8).

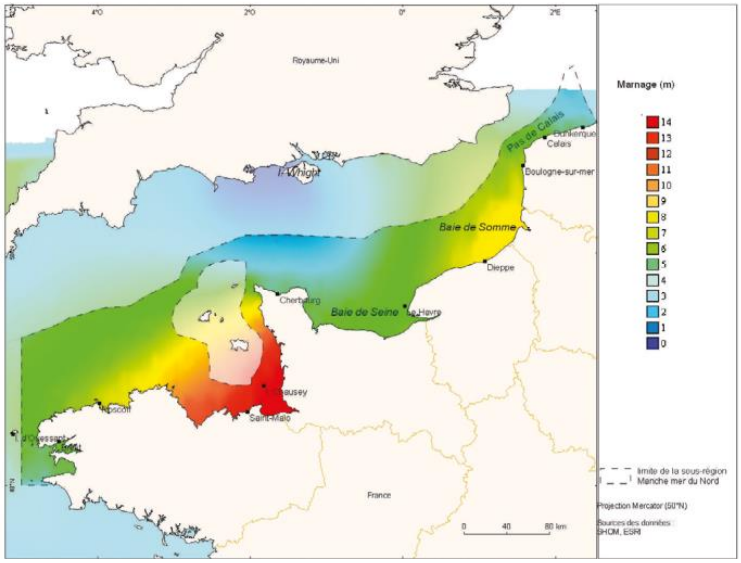


Figure 8 : Marnage en Manche (d'après les modèles de marée CSTFRANCE du SHOM, ESRI, 2010 in Lazure, 2012)

La zone d'étude est majoritairement influencée par les courants tidaux variables en fonction du cycle tidal, avec une période d'environ 12 heures et 25 minutes. D'après une certaine étude, les courants résiduels mettent en avant un transport résiduel sédimentaire du prisme picard vers l'est allant de l'Atlantique à la mer du nord (Lazure, 2012). Les orientations générales des courants tidaux étant : flot E-NE (N°60) et jusant O-SO (N°240) dans la zone d'étude (Ferret, 2011) (Figure 9). Par ailleurs, ces courants suivent une trajectoire lagrangienne avec des déplacements de masse d'eau par cycles tidaux de moins de 2cm.s^{-1}.

D'après les données de 2012 du SHOM, les courants de marée restent généralement faibles, de 0.5 à 1 m.s^{-1}. Les vitesses maximales de courants dans la Manche peuvent cependant atteindre les 6 m.s^{-1} au niveau du Raz Blanchard. Ferret (2011) met en évidence des vitesses de courants tidaux pendant la période de flot, supérieures aux vitesses de courants au jusant (20 à 30% de plus) ce qui a pour cause un gradient hydrodynamique décroissant avec une diminution visible vers l'est, voir rotatif sur certains secteurs.

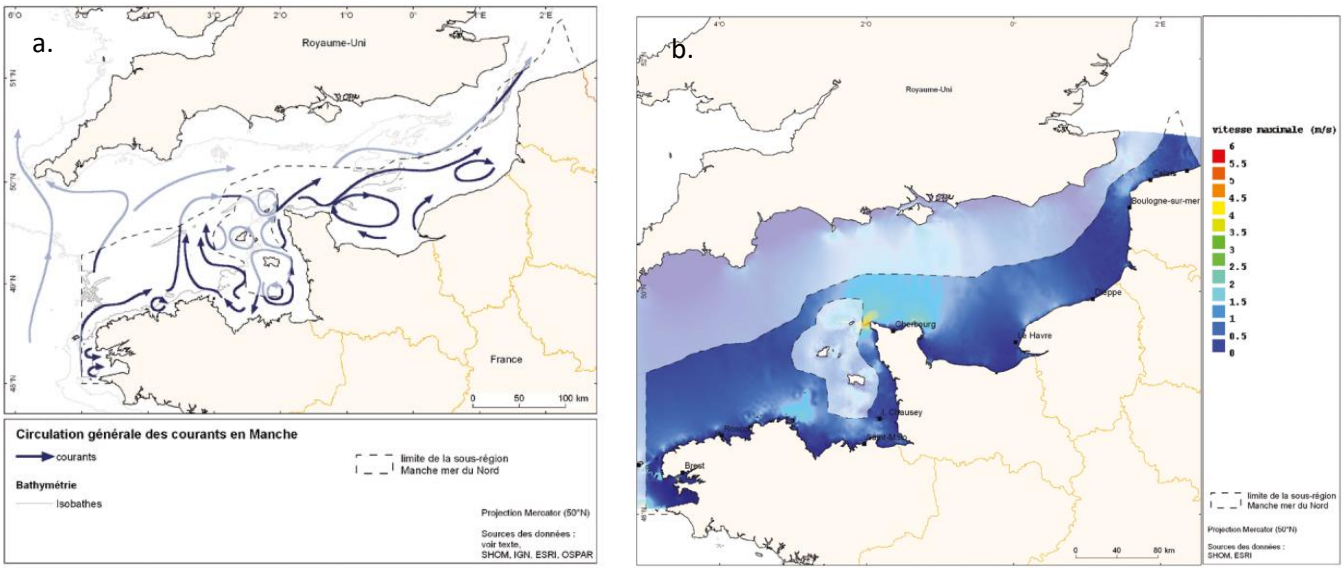


Figure 9 : Courants en Manche. a. Courants résiduels en Manche ; b. Vitesses maximales des courants de marée en vive-eau moyenne (source : SHOM, IGN, ESRI, OSPAR ; https://archimer.ifremer.fr/doc/00327/43821/43395.pdf).

II.2.2.2. Les vents et la houle

Le vent est le deuxième phénomène physique le plus important en Manche après les courants tidaux. La rose des vents, proposée ci-dessous (Figure 10) montre une orientation générale à 260° des vents. Ces données ont été recueillies de 1970 à 2017 sur le Sémaphore de Dieppe situé en bordure de falaise (Torres, 2018). Les données de Météo France montrent des vents provenant de l'ouest pouvant dépasser les 16 m.s^{-1}. De plus, le graphique de fréquence de rafales issu des données de Météo France montre une majorité d'occurrence de vent venant de l'ouest (270°) notant l'importance de ces vents sur la colonne d'eau.

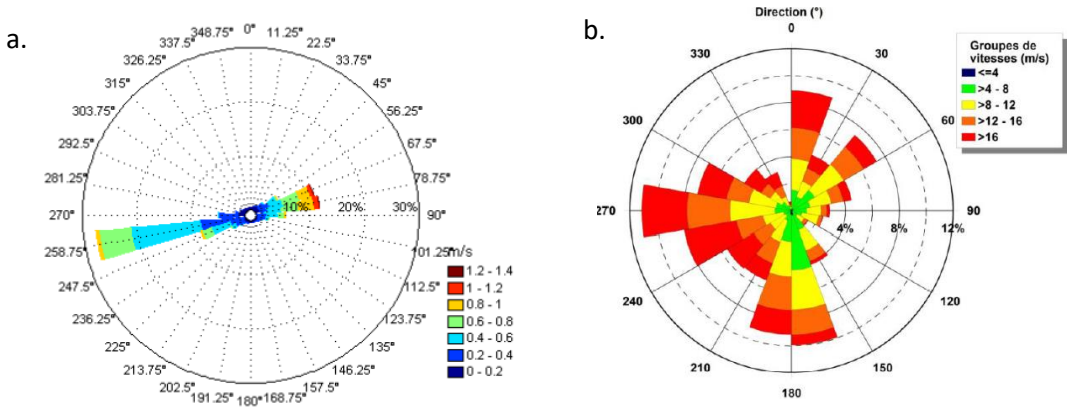


Figure 10 : a. Rose des vents de 1970 à 2017 mesurés au Sémaphore de Dieppe (IHCANTABRIA, 2018) b. Fréquence des rafales de vent à 10 m de hauteur (mesures quotidiennes), en fonction de leur provenance et de leur intensité (Données Météo-France) (Ferret,2011)

Les ondulations périodiques de la surface de l'eau, générées par la friction du vent, exercent une influence sur le fond marin (Bellesort et Migniot, 1986). Le transit est d'autant plus intense que l'augmentation des vents sud-ouest est forte et réciproquement. Ces flux pourraient même s'inverser avec des forts vents venants du nord-est. Un vent nord peut inverser le flux, sur l'ensemble de la colonne d'eau, en condition de marée moyenne si celui-ci dure quelques jours avec une vitesse de 5 m.s^{-1} (Lazure, 2012). Une étude faite par (Grochowski et al., 1993) ainsi que les mesures du Sémaphore de Dieppe indiquent des vents allant de 2 à 12 m.s^{-1} venant généralement d'ouest et issus de la dépression océanique irlandaise (NAO). Pour exemple, le fetch, distance sur laquelle les vents avancent sans obstacles apparents, montre une provenance ouest avec une proportion de 60% s'établissant sur moins de 100km (Figure 12). Les vents faibles contraires (<4,5 m.s^{-1}) viennent de l'est (vents de terre) ou du nord-est (des houles provenant de la mer du Nord) (Michel, 2016). Selon Ferret (2011) ainsi que de nombreux auteurs, la vitesse des vents influe sur la hauteur des houles. L'étude de Ferret démontre que pour des vents d'une vitesse de 6 à 8 m.s^{-1}, on obtient une hauteur significative de 1 à 2m de houle, pour ceux de 9 et 12 m.s^{-1}, une hauteur de houle de 2.5m et 3m respectivement. Ces vents créés des houles de direction ouest (270°) majoritairement (Figure 12).

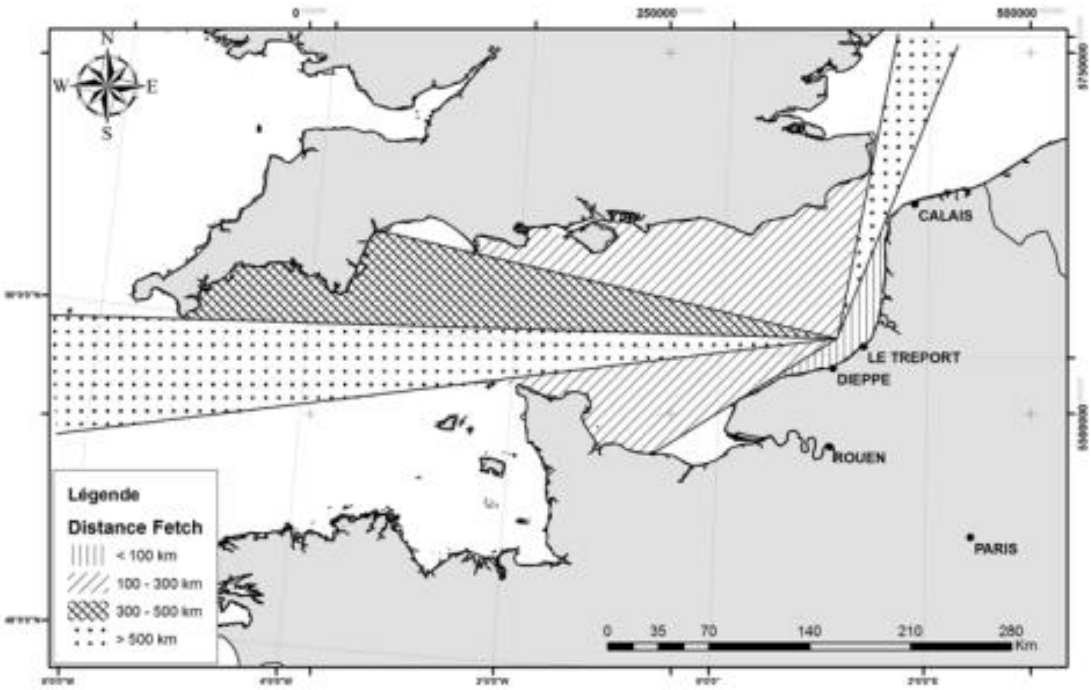


Figure 11 : Fetch présent en Manche allant jusqu'au site d'étude (Ferret, 2011)

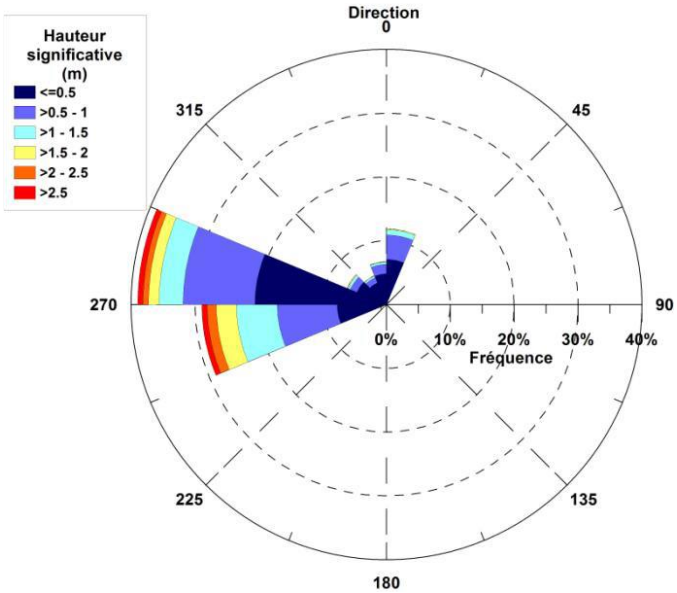


Figure 12: Caractéristiques de la houle au large de Dieppe sur la période de 1979 à 2002 (données ANEMOC, point Coast-3506) (Ferret, 2011)

La Manche orientale représente un sous-bassin avec un système hydrosédimentaire divergent à la pointe du Cotentin (Ferret, 2011). La houle Atlantique, originaire de l'ouest, se retrouve diffractée à la pointe (Grochowski et al., 1993) engendrant des hauteurs significatives souvent inférieures à 50 cm ou comprises entre 50cm et 1m (Michel, 2016) avec des périodes entre 3 et 6s (issu de l'ANEMOC, CETMEF et EDF). Les hauteurs maximales annuelles ont été mesurées à 4,2m, décennale à 5,8m et centennale à 7,3m.

L'augmentation de la variabilité de la hauteur des vagues entraîne l'atténuation de la croissance des formes de fond. Comme pour les courants de marée, la houle peut se retrouver dissipée dans la colonne d'eau à cause des frottements dus à une bathymétrie faible entrainant ainsi des morphologies différentes (Ferret, 2011).

II.3. Morphodynamique sédimentaire actuelle

II.3.1. La couverture sédimentaire

La nature du sédiment, cohésif (vases et silts) ou non-cohésif (sables-galets), agit sur les flux sédimentaires. Les matériaux présents en Manche sont un mélange de matériaux bioclastiques marins et de particules terrigènes (Vaslet et al., 1979). Larsonneur propose en 1982 une classification pour les sédiments du fond de la Manche basée sur la taille du mélange de grains composant le sédiment et sur la teneur en carbonates. Cette classification sera prise en considération pour le reste de l'étude (Annexe B). Dans cette classification, les fractions suivantes sont considérées :
Cailloutis > 4mm ; 2mm < graviers < 4mm ; 0,063mm < sables < 2mm ; sédiments vaseux <0,063mm

Les sédiments présents au large de Dieppe, sont de nature hétérogène et non-cohésifs allant des grains siliceux aux carbonates (Figure 13). La majeure partie de la zone d'étude se compose de sédiments lithoclastiques tels que de la craie, du silex, des coquilles, des grains de quartz, des grains de glauconie, des agrégats (amas de particules), des phosphates, des oxydes et des particules « divers » (Ferret, 2011) avec une composition relativement constante sur la zone d'étude. Les bancs sableux sont composés de sables principalement quartzeux avec un mode compris la plupart du temps entre 160 et 500µm (Dewez, 1988). Cette information sera prise en compte par la suite dans les calculs de flux sédimentaires.

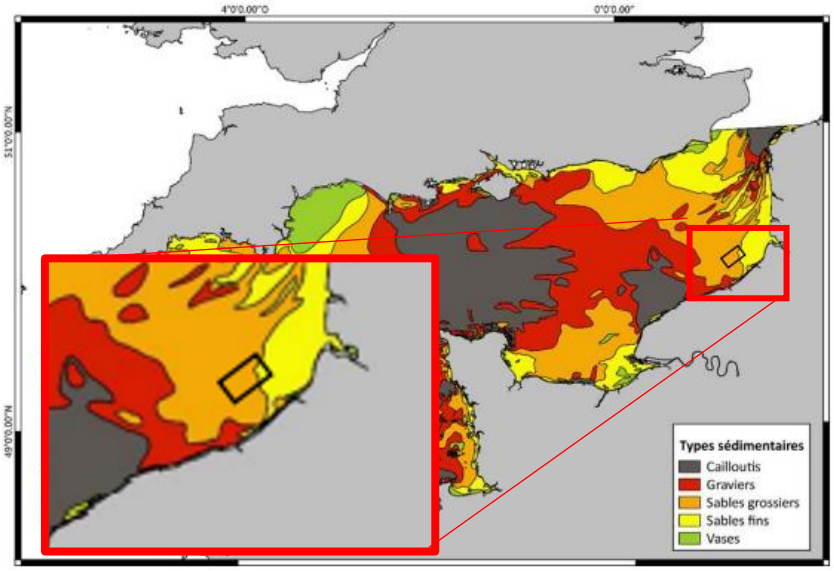


Figure 113 : Carte de la couverture sédimentaire en Manche orientale avec zoom sur la bordure ouest du prisme sédimentaire normand-picard (modifié d'après Vaslet et al., 1979)

Les analyses granulométriques et les observations sur les modes mettent en avant un gradient d'affinement des sédiments d'ouest en est sur la bordure du prisme picard passant du sédiment gravulo-sableux aux sables moyens à fins homogènes et biens triés (Auffret et al., 1985). Le tableau ci-dessous montre la diminution des graviers et l'augmentation des quantités de sable sur la bordure ouest du prisme picard depuis 1971 (Tableau 4) (respectivement 781km² et 695km² jusqu'en 2011) (Ferret, 2011). En 2014, les graviers ensablés représentent 52,1% du parc pour 26% de sables graveleux, 19,7% de sables moyens et 2.2% de sédiments mixtes entre les sables graveleux et les sables moyens (Pezy, 2017). Les sédiments en dessous de 63µm tel que la vase restent rares. Ils sont toutefois visibles sur les environnements littoraux comme la Baie de Somme (Dupont & Hommeril, 1981).

Tableau 4 : Tableau récapitulatif des parts de sédiments grossiers et fins sur plusieurs périodes (Ferret, 2011)

Année	Sédiments grossiers (en %)	Sédiments fins (en %)
1971-1976	83%	16%
2008	70% à l'ouest	25 %
2014	52,1% (graviers ensablés)	19,7% (Sédiment moyen à fin)

II.3.2. Morphodynamique des champs de dunes

D'après la carte bathymétrique de 2018 (Figure 14), la bathymétrie globale de la zone d'étude se situe entre -6 et 25m. La présence d'alternance de bancs de sable orientés ouest-est fait varier la bathymétrie au niveau des crêtes de -6 à -15m. Un « tunnel » de plusieurs kilomètres se met en place dans la partie ouest (partie en bleue) avec des gradients pouvant atteindre 27° mais la majeure partie du parc se place sur des fonds plats avec quelques champs de dunes, représentant un gradient de 1.5° (Lebrec et al., 2017).
La bathymétrie est un paramètre essentiel dans la prise en compte de la morphologie des dunes. D'après (Langhorne, 1973), la profondeur d'eau influence la croissance des dunes. Plus la profondeur d'eau est faible, plus les courants tidaux et les courants issus de la houle ont un effet cisaillant sur les crêtes de dunes et participent ainsi à leur érosion (partie I.0). Augris et al. (2004) proposent une hypothèse sur le site ouest du prisme sédimentaire normand-picard. Cette hypothèse, validée par Ferret (2011), met en évidence une importante érosion ou forte accrétion des crêtes de dunes, dû aux changements des conditions hydrodynamiques entre 1937 et 1993.

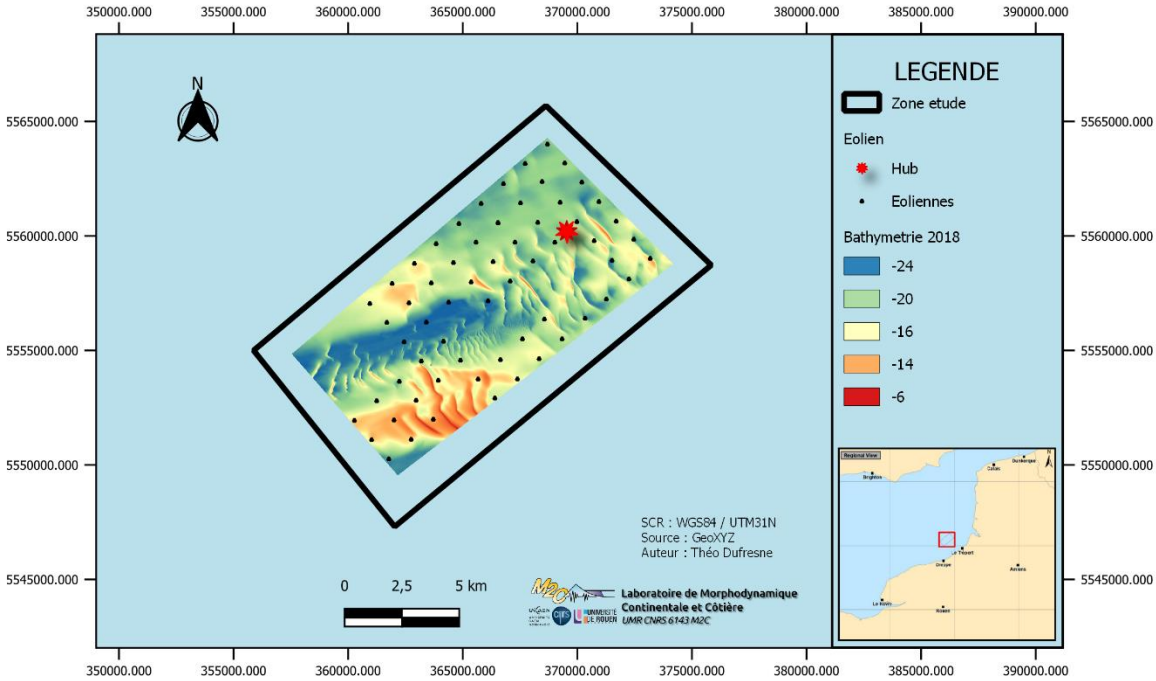


Figure 124 : Carte bathymétrique du site d'étude (issu des campagnes de GEOXYZ de 2018)

II.3.2.1. Morphologie des dunes

Le site comporte une soixantaine de dunes de morphologies différentes. Ces corps sédimentaires sont des marqueurs de la dynamique sédimentaire à l'ouest du prisme picard et se développent selon le disponible sédimentaire et la vitesse de courant (Belderson et al., 1982). Comme dit précédemment, les dunes présentes dans la zone d'étude représentent des barkhanes (allant jusqu'à

11m de hauteur maximum), des dunes rectilignes, des blancs sableux, des rubans sableux (aussi appelés « Ridens de Dieppe », parallèles aux courants tidaux et pouvant aller jusqu'à 6.5km de largeur pour 250m de longueur) et des rides (Ferret, 2011).
En Manche, les très grandes dunes comportent des hauteurs moyennes entre 3.2 et 4.8m et des longueurs d'ondes moyennes de 547 à 646m (Berne et al., 1989). Ces moyennes sont pseudo-représentatives dans le cadre du site d'étude où les longueurs d'ondes des dunes principales sont moyennées à 700m pour les barkhanes et à 1300m pour les grandes dunes 2D. La dynamique faible du milieu laisse apparaître des pentes faibles de dunes (2 à 8-10°) (Ferret, 2011).

II.3.2.2. Migration des dunes

La migration générale de la zone d'étude s'effectue vers l'E-NE (selon des études à l'échelle pluri-décennale). Cette migration résulte d'un apport sédimentaire faible à moyen à l'ouest, et fort à l'est ainsi que d'un gradient hydrodynamique responsable de la variation morphologique des dunes (Belderson et al., 1982 in Ferret 2011). Selon l'étude réalisée par Ferret (2011), la dynamique des grandes dunes reste peu active, avec des vitesses de déplacement moyen entre 0.8 et 6,6m.an^{-1} pour des pas de temps pluri décennales, et entre 17 et 27m.an^{-1} sur des pas de temps annuels. Les déplacements peuvent dépasser 20m en quelques cycles semi-diurnes. (Berné, 1991) note que les dunes géantes tidales présentent des taux de migration compris entre 0 et 70m.an^{-1}.
Sur des pas de temps courts, les flux charriés sont dus aux dunes surimposées. En période calme, une immobilité ou un déplacement vers l'est est remarqué et en période agitée, les migrations peuvent se retrouver immobiles ou démontrer un déplacement vers l'ouest.
Sur le long terme, les dunes suivent les courants résiduels de marée en se déplaçant vers l'est. Les barkhanes surimposées à l'ouest se déplacent plus vite (1.5 à 3 fois) que les barkhanes isolées et la majorité des dunes migrent vers l'est (Ferret, 2011).

II.3.2.3. Les Flux sédimentaires associés aux champs de dunes

Les transports de sédiments se font grâce à la mise en mouvement des grains. Pour Ferret (2011), avec un disponible sédimentaire réel, la granulométrie devrait régir le contrôle des flux sédimentaires. A l'ouest, le D50 peut dépasser les 2mm. Combiné à une marée moyenne de coefficient 70, il faut une houle dont la hauteur significative est supérieure à 1,25m lors du flot et supérieure à 1,5m lors du jusant. En outre, l'hypothèse de Ferret met en avant un transport sédimentaire plus important lors des évènements de tempêtes. Une houle peut modifier la direction des courants et la quantité de sédiments transportés de 10 à 100 fois pour une hauteur significative de houle de 1,5 m, et jusqu'à 1000 fois pour des houles annuelles. Au total, les flux les plus importants se produisent en hiver et en automne lors des phénomènes de précipitations importantes et lorsque la végétation ne protège pas assez de l'érosion (Ponsolle, 2019). Une étude conclut des flux sédimentaires compris entre 5.62g.m.s^{-1} et 615.33g.m.s^{-1} (sur une période de 2007-2008 donc annuelle) (Ponsolle, 2019). D'après le projet SELINE, les flux sédimentaires compris entre 1913 et 2019 dans la zone d'étude atteignent 125,6m^3.m.an^{-1}. Ce résultat représente une valeur lissée et homogène sur le temps. Les études permettent de donner des ordres de grandeur qui seront comparés aux résultats de la présente étude.
Toujours selon Ferret (2011), les flux sont maximaux lors de marées de VE et minimum lors des marées de ME. En cas de forçage tidal seul, les flux observés lors du flot sont supérieurs à ceux induits par le jusant, et cela, quel que soit le coefficient de marée considéré sur une période annuelle. Les sédiments sont plus souvent mobilisés par les pics de flot que par les pics de jusant (environ 20% de plus) sur l'axe E-NE.

II.4. Le benthos

L'étude du réseau trophique est importante dans la réalisation de projet éolien. L'analyse de la répartition des espèces, leur mode de vie et les interactions qu'elles peuvent avoir avec le fond marin. L'approche écosystémique réalisée par Pezy (2017) met en avant deux communautés benthiques, la communauté de la gravelle à *Branchiostoma lanceolatum* et la communauté des sables fins à moyens propres à *Ophelia borealis* (présentes dans la classification EUNIS) pour trois habitats sédimentaires (« Circalittoral coarse sediment (A5.14) », « Infralittoral coarse sediment (A5.13) » et « Circalittoral mixed sediments (A5.44)) (Annexe A).

II.4.1. Paramètres benthiques

Les résultats des paramètres suivants seront comparés dans cette étude afin d'interpréter la relation entre les phénomènes physiques et les habitats benthiques.

L'abondance représente le nombre d'individus par m². Les prélèvements bio-sédimentaires dans les secteurs au sud et à l'est de la zone d'étude (Ferret, 2011) mettent en avant 1420 individus et 85 espèces différentes. Ces prélèvements représentent trois surfaces d'environ 1km². Cette abondance est dû à la répartition spatiale des espèces qui suivent une dispersion larvaire selon l'hydrodynamisme du milieu (Salomon et al., 1991).

La biomasse est calculée selon le poids sec libre de cendre (PLSC) : PLSC = Poids Sec – Poids Calciné. Tout comme les abondances, les biomasses varient grandement entre les sites et les saisons (Pezy, 2017). Sur le site d'étude, la biomasse est supérieure en hiver, avec une valeur moyenne de 0,56 g.PSLC.m^{-3}. En été, la valeur atteint 0,20 g.PSLC.m^{-3}. Sur la zone de DLT, les valeurs de biomasse sont parmi les plus élevées de la Manche en hiver alors qu'en été elles sont parmi les plus faibles. Ces données sont en adéquation avec les résultats d'abondance proposés par Pezy (2017) mais pas avec celles des études antérieures qui prônent des résultats inverses sur le compartiment supra benthos.

Le pourcentage de matière organique a été fixé entre 0,5 % à 5,7% et est plus important durant l'été que l'hiver (selon le test statistique de Tukey) avec des valeurs plus élevées dans les graviers ensablés (2,7%) que dans les sables moyens (0,7%).

La richesse taxonomique représente l'addition des nombres de taxon pour chaque station. Pour la présente étude, cette richesse varie de 27 à 79 taxons.

II.4.2. Habitats et variabilités spatiales et temporelles

La zone d'étude est divisée en deux facteurs influençant l'organisation trophique (Pezy, 2017), la géographie et la granulométrie. Une même communauté benthique est présente au niveau des graviers ensablés et des sables graveleux et une seconde communauté est observable au niveau des sables moyens.

Selon Pezy (2017), la catégorie benthique la plus diversifiée est l'endofaune, puis l'épifaune vagile/holosuprabenthos et enfin l'épifaune vagile. Les campagnes réalisées entre l'hiver 2014 et l'été 2016 pour l'étude de Pezy (2017) mettent en avant 30 zones de prélèvement (stations). Dans cette étude, seulement 20 seront interprétées car les autres ne sont pas présentes dans la zone étudiée.

Le benthos est principalement dominé par des annélides polychètes, les échinodermes puis les crustacés et les bivalves. Trois espèces particulières sortent majoritairement de l'étude : l'amende de mer *Glycymeris glycymeris* ; la palourde rose *Polititapes rhomboides* ; le céphalocordé *Branchiostoma lanceolatum* (Pezy, 2017). Les espèces étudiées sont représentées majoritairement au niveau des dunes. On dénote l'absence d'*Abra prismatica* et de *Clausinella fasciata* malgré la typologie EUNIS, représentant normalement les espèces caractéristiques du milieu. Selon Ferret, 2011 cette absence est probablement dû à l'étude à grande échelle de la typologie comparée aux échantillonnages fait en 2008 (dont 27 prélèvements de 0.1m²). 90% de la biomasse sur le site est suspensivore (essentiellement bivalves) et dénote une faible activité anthropique. Elle est principalement dominée par les mollusques

bivalves et un céphalocordé, avec *Glycymeris glycymeris* et *Branchiostoma lanceolatum* sur les graviers ensablés et les sables graveleux, *Polititapes rhomboides* sur les sables graveleux (Pezy, 2017).

L'affinement des sédiments se reflète d'ailleurs sur la richesse taxonomique, les abondances et la biomasse. (Pezy, 2017). On passe de la communauté des graviers plus ou moins ensablés à *Branchiostoma lanceolatum*, à la communauté des sables fins à moyens propres à *Ophelia borealis*. Cette évolution est associée à un gradient de diminution de l'abondance et de la richesse spécifique (Ferret, 2011).
Au niveau du lien granulométrie/benthique, Ferret (2011) dénote une variabilité inter-dunes totale de 30% contre 10% de variabilité intra-dunes démontrant ainsi un lien entre la répartition spatiale des espèces selon la nature du sédiment.

II.4.3. Relations entre paramètres physiques, chimiques et benthiques des fonds sédimentaires

La zone dédiée au futur parc éolien de Dieppe/Le Tréport est représentée par 307 invertébrés benthiques. D'après certaines études (Ehrhold, 1999), le benthos agit sur la rugosité du milieu, les propriétés géotechniques du sédiment et l'hydrodynamisme par la diminution de la vitesse du courant en cas d'organisation en colonies. L'envasement dû à la présence de crépidules peut en être un exemple. La bioturbation par accrétion, compactage et rejet peut créer une discontinuité sur le fond marin, permettant la genèse ou la destruction de rides (Dauvin, 1997). De plus, la présence de coquilles de bivalves permet la production de carbonates.
Ainsi, les paramètres biologiques peuvent être influencés par la morphologie des structures à grandes échelles. La diminution des espèces du pied vers le sommet des dunes en est une preuve (Dauvin 1997). Néanmoins, la grande diversité des paramètres physiques, chimiques et benthiques empêche d'identifier un facteur influent majeur (Ferret, 2011).
D'après une étude réalisée par (Foveau, 2009), la distribution des communautés macrobenthiques est régie en partie par la couverture sédimentaire. Quatre communautés ont semblé être pérennes sur le temps en Manche : l'assemblage des sables moyens dunaires ; l'assemblage des sables grossiers ; l'assemblage des graviers plus ou moins ensablés et l'assemblage des cailloutis.

Le benthos est impacté par les activités anthropiques et ce par des facteurs physiques, chimiques et biologiques (Pezy, 2017). L'impact des éoliennes en mer pendant la phase de construction génère un stress sonore dû au battage des pieux créant ainsi une dégradation locale des habitats et une migration forcée des espèces (Pezy, 2017). En phase d'exploitation, de nouvelles espèces s'introduisent avec les nouveaux substrats (matelas de bétons, …) créant une compétition pour les ressources (Wilhelmsson, 2010) ce qui peut causer des problèmes pour les espèces sessiles, peu répandues, possédant de faibles capacités de renouvellement ou de recolonisation (OSPAR Commission, 2008). En contrepartie, cet afflux crée un effet positif car un nouvel écosystème se met en place protégé, par l'effet réserve. Le chalutage du fond pendant les activités halieutiques peut influencer la structure du sol, mettant en suspension les éléments fins et faisant resurgir les éléments grossiers sur la traîne de pêche (Rice, 2006 in Pezy, 2017).

III. Matériel et méthodes

III.1. Stratégie d'étude

Les objectifs de cette étude sont :

- La détermination des paramètres morphologiques des dunes du secteur d'étude ;
- La quantification des taux de migration des crêtes de dunes ;
- Le calcul des flux sédimentaires selon les méthodes de « Dune tracking » et de formules empiriques telle que celle de « Van Rijn » ;
- La relation entre les paramètres physiques et benthiques.

L'étude de ces sujets permet d'obtenir des résultats supplémentaires concernant la morphodynamique des dunes sur le site de DLT. Pour répondre à ces objectifs, 10 levés bathymétriques ont été récupérées ainsi que des données liées à la granulométrie, au courantométrie et au benthos. Malheureusement, certaines cartes bathymétriques ne sont pas complètes et ne pouvaient pas être interprétées correctement. Cette étude sera donc faite sur les cartes dites « complètes » de la zone d'étude.

Les paramètres morphologiques ont été obtenus selon trois méthodes : la méthode manuelle sur QGIS 3.16, l'automatisation sur Matlab et les calculs sur le logiciel Paramdunes. Par ailleurs, une étude comparative a été réalisée pour mettre en évidence la méthode la plus pertinente.

Les migrations des dunes ont été calculées sur les lignes de crête de 3 cartes bathymétriques (1993, 2011 et 2018) selon deux méthodes : le calcul par matrice de distance sur QGIS et les calculs automatiques sur Paramdunes.

Les flux sédimentaires, quant à eux, ont été calculés sur Excel, sur plusieurs pas de temps, de l'instantané à l'annuel en passant par les cycles de marées, et selon deux méthodes : l'une utilisant les paramètres morphologiques des dunes et l'autre les données granulométriques et courantométriques des stations.

Des analyses multivariées sont alors proposées pour connaître la relation entre ces paramètres physiques (morphologie, migration, flux sédimentaire) et les paramètres benthiques résumés dans la thèse de Pezy (2017) ainsi que les résultats des paramètres morphologiques, de migration et de flux de la présente étude. En outre, la totalité des résultats sera comparée à ceux de différentes études qui ont pu se faire le site de DLT et sur d'autres sites, notamment l'étude Ponsolle (2019) sur le prisme sédimentaire picard.

III.2. Données d'entrée

III.2.1. Bathymétrie

Des données bathymétriques au format raster ont été mises à disposition dans le cadre du parc éolien en mer de Dieppe Le Tréport (Annexe C). Des données bathymétriques de l'UMR M2C (Ferret, 2011) des années 2007 et 2008 ont également été utilisées. Ces cartes sont issues de campagnes d'acquisition utilisant des sondeurs mono et multifaisceaux (MBES) (MOSAG07, doi.org/10.17600/7070130 ; MOSAG08, doi.org/10.17600/8070100). Les sondeurs multifaisceaux permettent de mesurer la hauteur d'eau (sur une bande transversale au déplacement du bateau dont la largeur dépend de la profondeur d'eau et de l'ouverture angulaire du faisceau acoustique émis) en utilisant le temps de parcours du rayon sonore (Bisquay, 2006).

Pour cette étude, les données bathymétriques de 1993, 2011 et 2018, qui offrent une couverture bathymétrique complète de la zone du futur parc éolien, ont été préférentiellement analysées. Ces données présentent une précision verticale d'environ 0,3 m. En complément, les levés de 2012, 2016

et 2020, qui couvrent partiellement la zone d'étude, ont été analysés pour obtenir des vitesses de migration sur certaines dunes (portions de dunes) sur des pas de temps plus courts.

Tableau 5 : Tableau récapitulatif des cartes bathymétriques récupérées et renommées avec leur source et leur résolution

Nom	Date d'acquisition	Source	Résolution
Bathy_1993*	1993	SHOM	15m
Bathy_2007	Juillet-Aout 2007	Ferret, 2011	4m
Bathy_2008	Juillet-Aout 2008	Ferret, 2011	4m
Bathy_2011	Mai-Juillet 2011	GeoXYZ	5m
Bathy_2012	2012	GTEC	4m
Bathy_2014	2014	GTEC	2m
Bathy_2015	2015	GTEC	1m
Bathy_2016	Mars 2016	GTEC	0,85m
Bathy_2018	Avril 2018	GTEC	1m
Bathy_2020	Avant avril 2020	GTEC	0,2m

* : données acquises au sondeur monofaisceau, contrairement à tous les autres levés acquis au sondeur multifaisceaux.

III.2.2. Courantométrie

Des données de courantométrie ont été mises à disposition dans le cadre du parc éolien en mer de Dieppe Le Tréport (Roberts, 2015). Parmi celles-ci, des données issues d'un courantomètre « AWAC » (appelé D1-D5), implanté à environ 1,5 km au Sud-Est de la zone du futur parc éolien, apportent des informations sur les vitesses de courant ainsi que leur direction sur la totalité de la colonne d'eau de février 2015 à avril 2016.
Le courantomètre fût installé sur la partie sud-est de la zone d'étude (Figure 15) et fût complémenté par un DWR (appelé D1-D3), implanté de février 2015 à novembre 2016. Les données de ce courantomètre n'ont pas été analysées dans le cadre de cette étude. Bien que ce courantomètre soit situé à plusieurs kilomètres à l'extérieur de la zone du futur parc éolien et dans un creux entre deux dunes sableuses, les données pourraient apporter des informations intéressantes sur la variabilité annuelle des courants à proximité de la zone d'étude. Les données ont été acquises à raison d'une mesure toutes les 10 minutes. Chaque mesure résulte de la moyenne sur une minute de mesures effectuées au pas d'une seconde. Le « beam » étant de 1s, les données ont été moyennées sur l'ensemble de la période afin d'éviter l'aléas dû aux turbulences sur la colonne d'eau. La tête du courantomètre est placée à 0,6m du fond et les premières données sont enregistrées 0,5m plus haut (« blanking »de 0,5 m). Les données sur la colonne d'eau ont donc été récupérées à partir de 1,1m au-dessus du fond, tous les mètres jusqu'à la surface, l'appareil faisant une moyenne des mesures au pas de 5 cm sur l'ensemble du mètre.

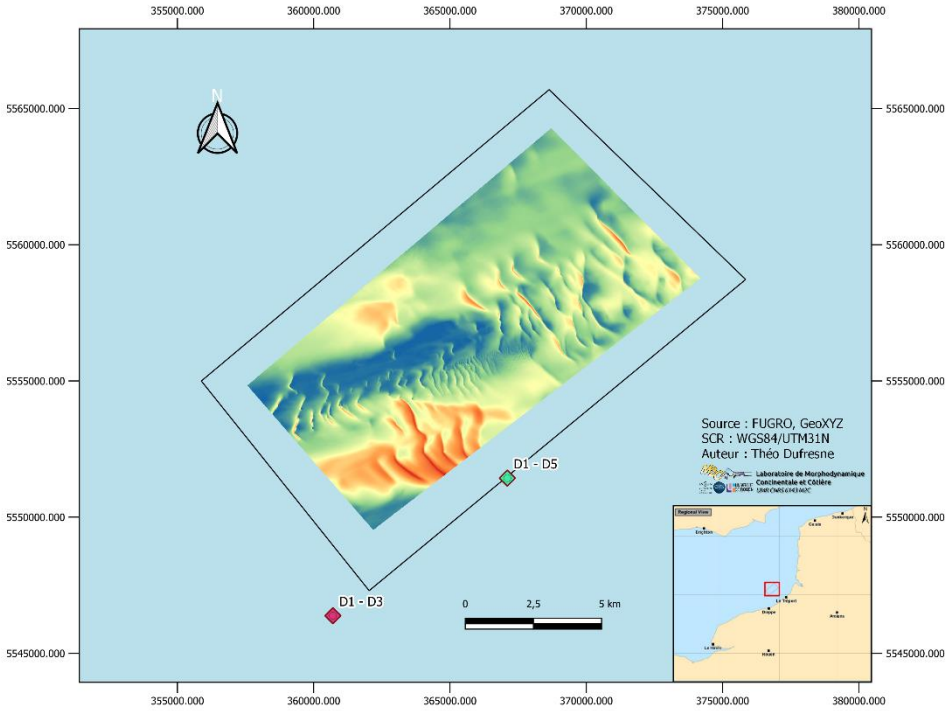


Figure 135 : Carte d'implantation des courantomètres par rapport aux données bathymétriques de 2018

III.2.3. Granulométrie

Les données granulométriques sont issues de prélèvements réalisés sur 30 stations dont 25 simultanément avec des données benthiques. Ces prélèvements et leur analyse granulométrique ont été réalisées dans le cadre de la thèse de J.P Pezy (2017). Les stations GX (X : numéro de station) suivent la même nomenclature que les stations BXi récupérées par Pezy (2017). Comme exemple, G1 correspond à B1i. Ces données ont permis d'obtenir les cartes de tri, moyenne et D50 (Figure 16). Dans cette étude, le D50 sera le seul paramètre utilisé lors des calculs de flux sédimentaires. Néanmoins, il est intéressant de remarquer les résultats de la carte du tri et de la moyenne des grains afin de déterminer la véracité de la répartition du D50 (Annexes D et E).

Le D50 donne la valeur médiane des tailles de grain. Comme dit précédemment, les grains présents sur site sont hétérogènes. Ils couvrent une large gamme granulométrique allant des graviers (D50=3mm) aux sables fins (D50=0,2mm) en passant par des sables grossiers à moyens (D50 variant entre 1,2 et 0,5 mm, respectivement) (Figure). Le D50 représente la taille à laquelle les grains (fins, moyens et grossiers dans notre étude) se trouvent en proportion égale (50%/50%). Toutefois, l'homogénéité relative à l'est met en évidence un D50 similaire au D90, soit une moyenne de taille de 0.25-4mm (Ferret, 2011).

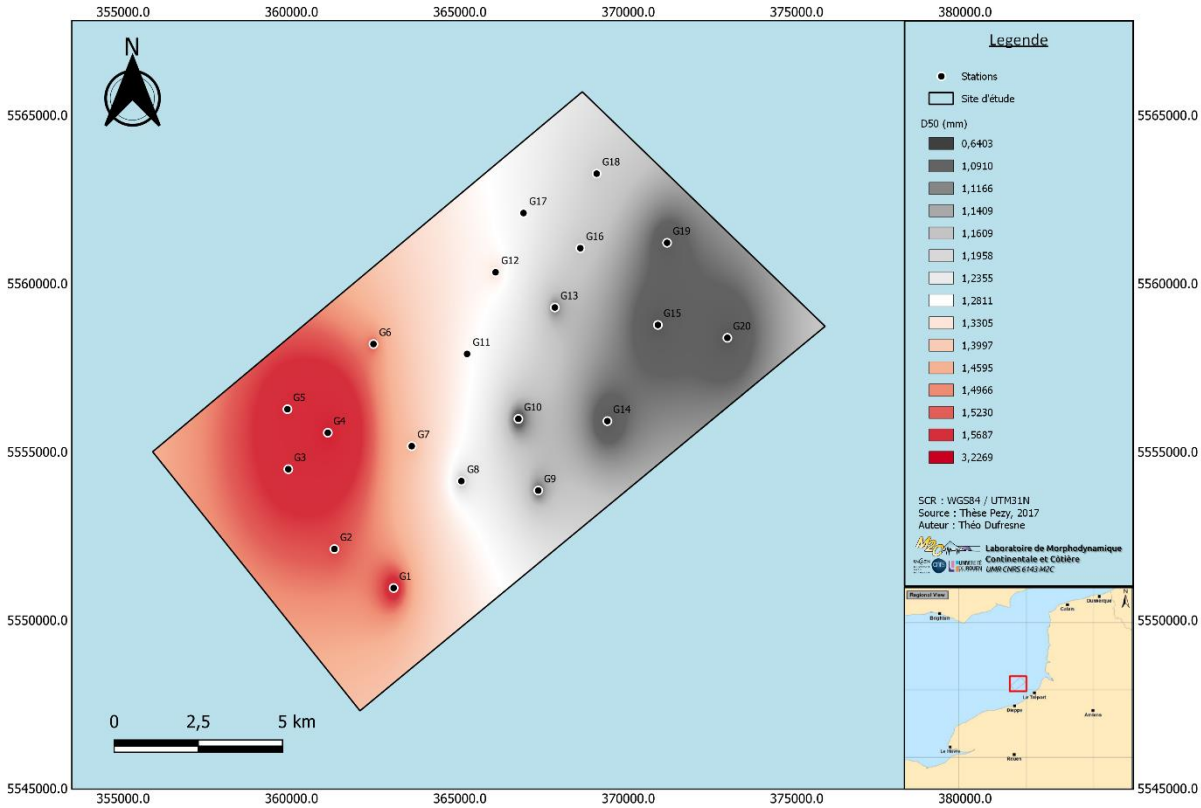


Figure 16 : Carte du D50 calculé selon une zonation spatiale des valeurs de chaque station (issue des données de la thèse de Pezy (2017)

Le tri des sédiments permet de représenter au mieux la répartition des tailles de grains dans l'espace. La carte de tri, extrapolée selon les données granulométriques de la thèse de Pezy (2017) montre un sédiment mieux trié à l'est et non trié à l'ouest. Les valeurs du tri vont de 0.7 à 1.9mm et sont représentées par l'unité phi, unité référence dans les calculs granulométriques (Annexe D).

La moyenne des grains permet de voir la répartition des tailles de grains dans un échantillon. Si la médiane est différente de la moyenne, la taille de D50 sera moins représentative et inversement. Pour cette étude, la moyenne des grains est plus proche de la médiane à l'est qu'à l'ouest, démontrant une hétérogénéité plus forte à l'ouest dans les sables moyens (Annexe E).

III.2.4. Données benthiques

A cela se rajoute les données benthiques et granulométriques (traitées par tamisage) issues de la thèse de Pezy (2017) (Figure 17) : abondance, biomasse et richesse taxonomique. Ces données sont issues de 25 prélèvements bio-sédimentaires récoltés entre l'été 2014 et l'hiver 2016 (campagnes réalisées en 2022 dans le cadre du projet « Etude des réseaux trophiques avant construction du parc éolien en mer de Dieppe/Le Tréport »). Afin de comparer les données physiques et benthiques, les stations non comprises dans la zone d'étude n'ont pas été analysées.

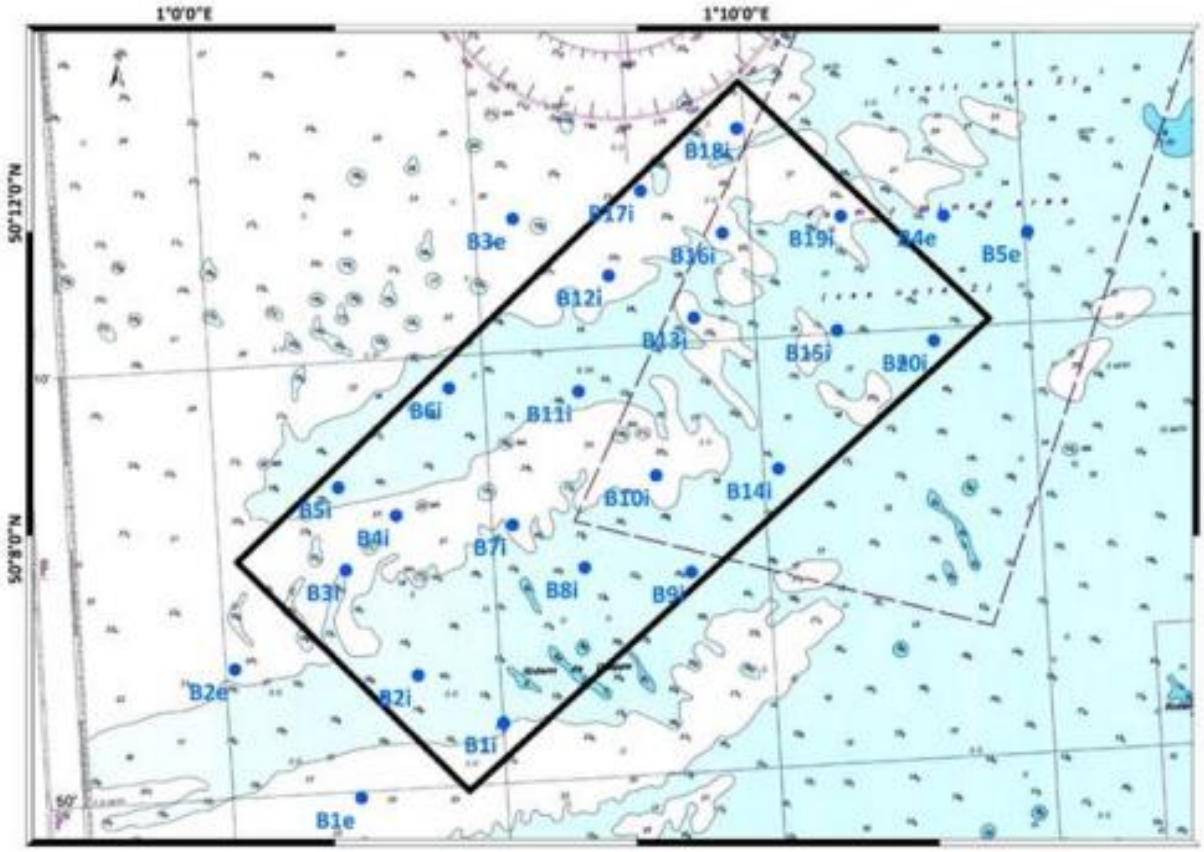


Figure 17 : Carte des stations de prélèvements bio-sédimentaires (Pezy 2017)

III.3. Traitement des données

III.3.1. Extraction des paramètres morphologiques des dunes

L'extraction des paramètres morphologiques s'est faite selon trois méthodes : l'extraction manuelle ; la méthode dite « Bedform Tracking Tool » ; l'utilisation du logiciel Paramdunes. La zone d'étude étant très grande (15km sur presque 10km) avec des morphologies de dune différentes, quatre secteurs distincts ont été récupérés et seront comparés dans les parties suivantes (Figure 18). Le but étant de définir une moyenne des paramètres physique selon chaque secteur et les transects qui les coupent (Annexe F).

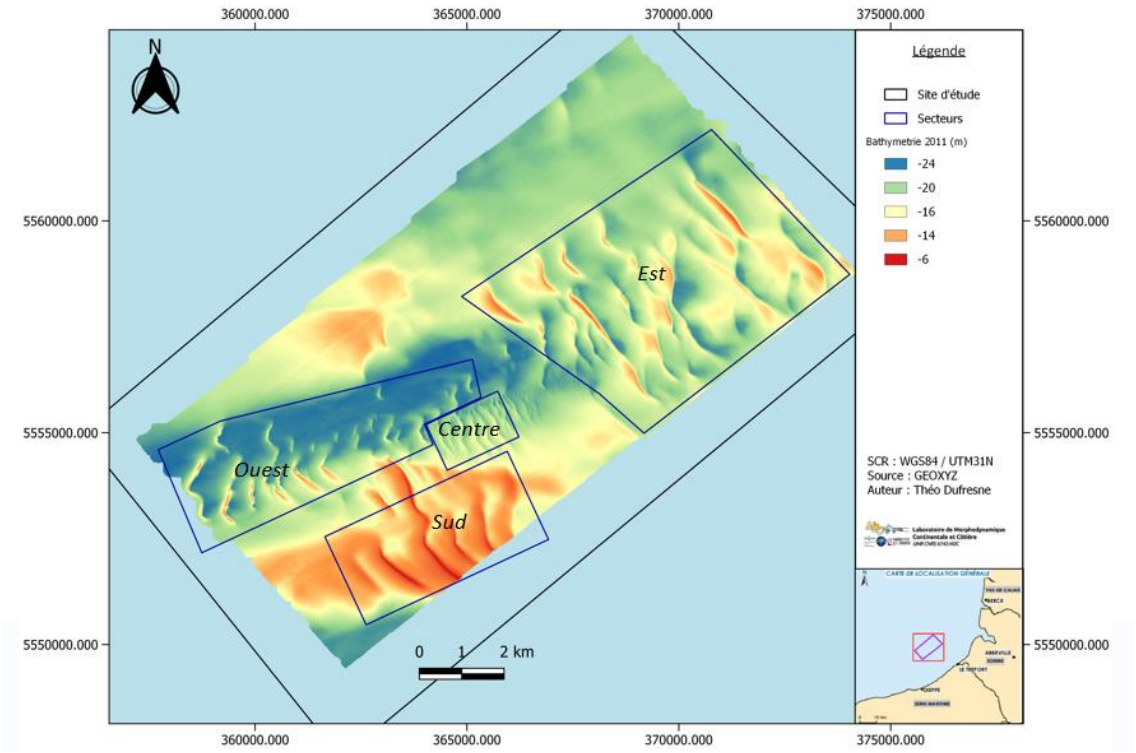


Figure 1814 : Secteurs analysés pour la récupération des paramètres physiques, représentés ici sur la bathymétrie de 2018

III.3.1.1. Traitement des cartes bathymétriques

Les cartes bathymétriques de 1993, mai-juillet 2011 et avril 2018 ont été traitées sur QGIS afin de récupérer les paramètres morphologiques de la plupart des dunes présentent dans la zone d'étude (Annexe G). Le choix a été fait de ne pas les filtrer afin de garder les paramètres de base et de ne pas prendre en considération des profils d'élévation non réels. Dans certaines zones, la hauteur des dunes est faible même si toutes les dunes retenues ont une hauteur supérieure à 1m. Un filtre passe-bas supprimerait cette dune pour mettre en avant la tendance générale de pente, ce qui n'est pas souhaité.

Afin de récupérer les paramètres morphologiques, des transects ont été créés tous les 100m avec une orientation de 60°. Cette orientation suit les courants résiduels de marée, agents forçant majeurs dans la morphodynamique des dunes de la zone d'étude (Ferret, 2011).
Ces transects ont été découpés selon les quatre secteurs prédéfinis. Chacun représentant un groupement de dunes avec une morphologie différente (Figure 19) :

- Le sud avec des champs de barkhanes ;
- L'est avec des grandes dunes pseudo-rectilignes ;
- Le centre comportant un champ de petites dunes ;
- L'ouest avec des barkhanes isolées.

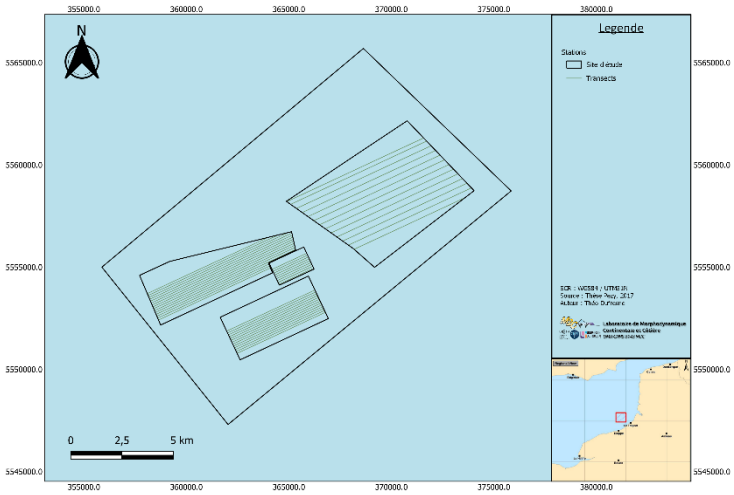


Figure 159 : Carte des transects par secteur générés sous QGIS

III.3.1.2. Extraction manuelle

Chaque transect intersectant une carte bathymétrique peut être ressorti sous forme de profils d'élévations grâce à l'outil « Profile tool » présent dans les extensions de QGIS. Les distances et les hauteurs le long du profil d'élévation sont alors récupérées. La stratégie fût de récupérer les points clés de chaque dune afin de calculer différents paramètres morphométriques des dunes dans une table Excel (Figure 20 ; Figure 3).

La bathymétrie de la crête et des deux creux de chaque dune ;

- Les largeurs projetées du flanc raide et du flanc doux ;
- La longueur d'onde entre la crête de la dune amont et la crête étudiée ;
- La longueur d'onde entre la crête de la dune aval et la crête étudiée.

Une fois ces paramètres acquis, des calculs sont faits afin de récupérer :

- Le ratio entre les longueurs projetées du flanc raide et du flanc doux ;
- La largeur moyenne de la dune ;
- La longueur d'onde moyenne de la dune ;
- La hauteur de la dune ;
- La surface de la dune ;
- Le facteur de forme.

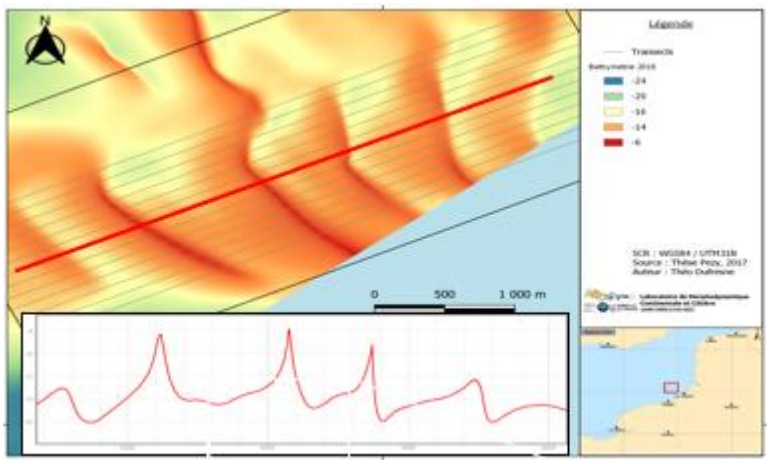


Figure 20 : Profil d'élévation du transect n°34 situé sur le secteur sud (bathymétrie de 2018)

III.3.1.3. L'outil « Bedform Tracking Tool » (BTT)

Le BTT ou « Bedform Tracking Tool » est une succession de scripts codés sous Matlab permettant l'extraction des paramètres morphologiques des dunes étudiées sur un profil d'élévation. Le BTT calcule ces paramètres après avoir corrigé le profil de la pente régionale du fond (redressement du profil). De plus, l'outil provient des travaux de Van der Mark en 2007 dont l'article rassemble les détails du fonctionnement général de cet outil, tandis que la publication de Van der Mark et al. (2008) représente l'application de ce dernier à un site d'étude. A noter que celui-ci n'est pas téléchargeable en ligne depuis les articles cités précédemment.

Les paramètres ressortant de l'automatisation de l'extraction des paramètres morphologiques sont résumés dans la Figure 21. Cette automatisation permet d'obtenir des valeurs de pentes en degrés difficilement calculables par une méthode manuelle.

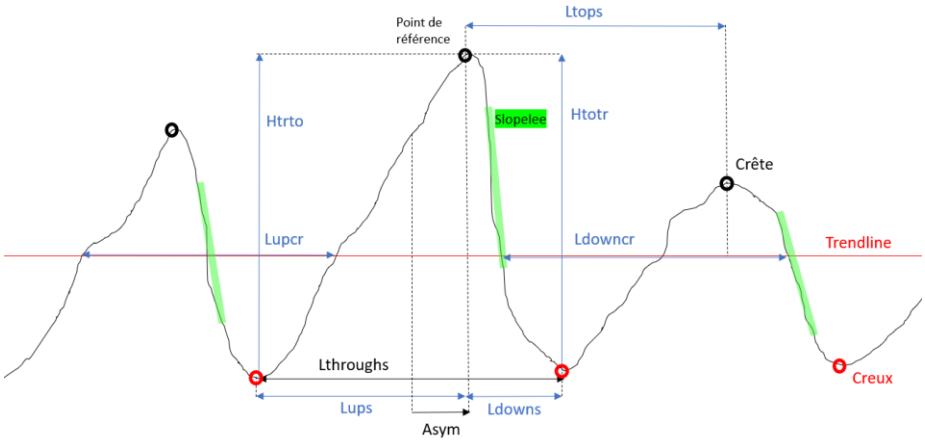


Figure 21 : Paramètres calculés par l'outil BTT (Asym : asymétrie de la dune, Htrto : hauteur du creux du flanc doux par rapport à la crête, Htotr : hauteur du creux du flanc raide par rapport à la crête, Ldowncr : largeur projetée entre deux pentes descendantes (sur la trendline), Lupcr : largeur projetée entre deux pentes ascendantes (sur la trendline), Lups : largeur projetée entre le creux du flanc doux et la crête, Ldowns : largeur projetée entre le creux du flanc raide et la crête, Lthroughs : largeur entre deux creux, Ltops : largeur entre deux crêtes (longueur d'onde), Slope.l : pente du flanc raide, Slope.s : pente du flanc doux)

III.3.1.4. L'outil Paramdunes

Paramdunes est un logiciel développé par le SHOM permettant d'extraire les paramètres morphologiques (Longueur d'onde, hauteur, extension, surface, longueur du flanc doux, longueur du flanc raide, degré de pente du flanc doux et degré de pente du flanc raide) et les lignes de crête de chaque dune à partir d'un fichier shapefile point. L'outil calcule ces paramètres en contourant automatiquement les surfaces comportant une dune et en prenant en compte le point le plus haut de la crête de chaque dune (point blanc) (Figure 22).

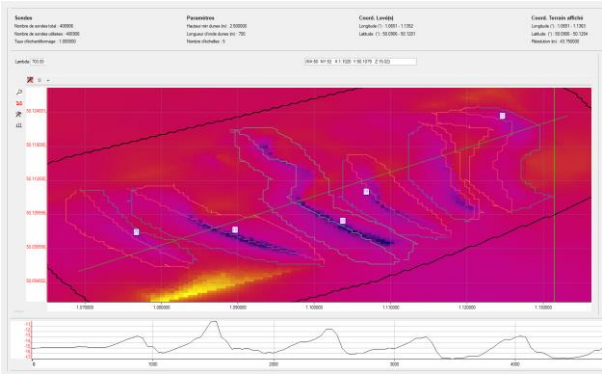


Figure 22 : Interface du logiciel Paramdunes représentant les dunes coutourées automatiquement (point blanc : sommet de la dune)

III.3.2. Calcul des migrations

La migration représente la distance séparant les crêtes entre deux relevés, divisée par le temps entre ces deux mêmes relevés. Dans cette étude, trois migrations ont été calculées : 1993-2011 ; 2011-2018 ; 1993-2018. Dans les deux méthodes, la migration 2011-2018 est celle la plus représentative et la plus proche des données de courantométrie (2015-2016) et de granulométrie (2014-2016). Ces migrations ont été calculées sur 47 dunes (6 au sud, 12 à l'est, 7 au centre et 20 à l'ouest) (Figure 23). Deux méthodes ont été utilisées afin d'extraire les lignes de crêtes sur les deux relevés. La comparaison de l'extraction manuelle et l'extraction sous le logiciel Paramdunes (développé par le SHOM) sur le secteur sud permet de choisir la méthode la mieux adaptée pour le calcul des migrations des dunes. Le test réalisé sur Paramdunes ne permet pas d'obtenir des résultats concluants. Il a donc été décidé de réaliser uniquement une extraction manuelle sur QGIS (Annexe H).

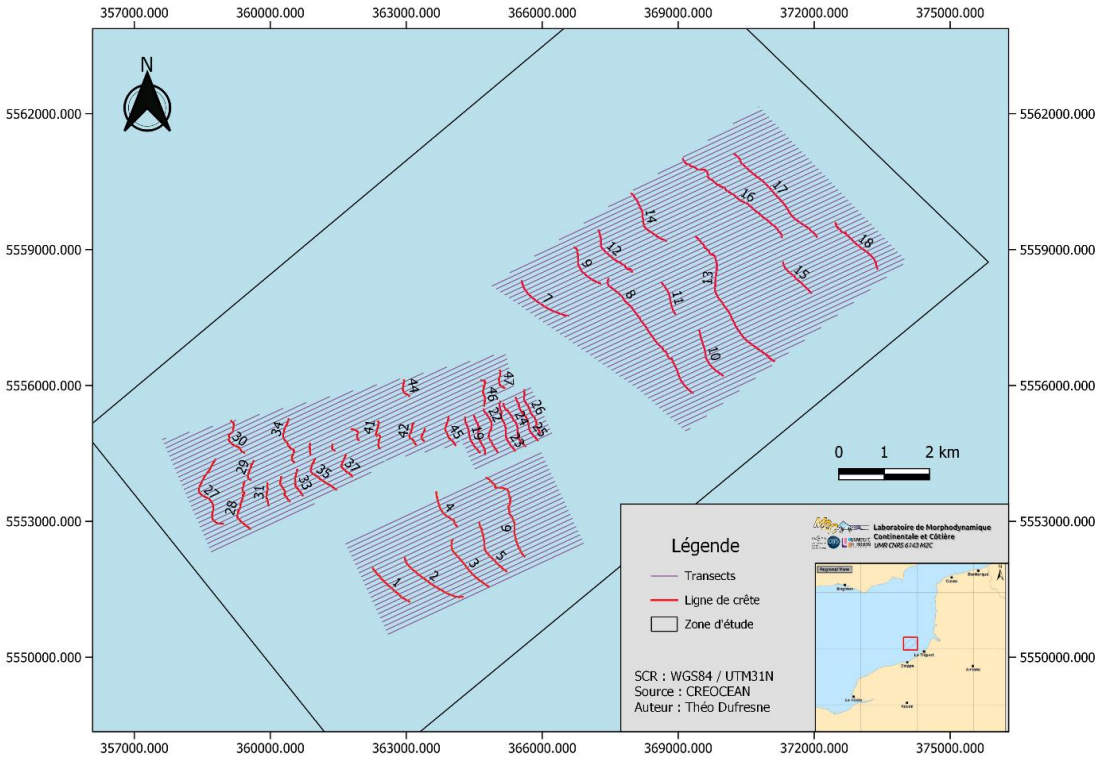


Figure 23 : Carte des lignes de crêtes et des transects par secteur

Les migrations ont été calculées grâce à une matrice de distance sous QGIS et obtenues par l'intersection des transects avec les lignes de crêtes (Annexe I). Ces lignes de crêtes ont été tracées à partir de raster d'exposition des relevés 1993, 2011 et 2018. Le tracé étant fait à l'œil, la précision des

lignes sur le raster d'exposition permet d'obtenir une ligne de crête quasi-réelle. Les points représentant les intersections ont donc un espacement de 100m sur une même ligne de crête. La distance entre deux points sur un même transect et sur deux levés différents permet d'obtenir une migration selon la direction principale des courants résiduels.
Une marge d'erreur se crée avec la différence de résolution entre les levés. Le raster 1993 montre une résolution de 15m tandis que le raster de 2018 montre une résolution de 1m réduisant la précision entre les lignes de crête.

III.3.3. Calcul des flux

L'évaluation du transport sédimentaire se fait par le biais de calculs mathématiques. Les formules utilisées représentent essentiellement les flux de charriage, mécanisme dominant dans la zone d'étude. Dans cette étude, le « dune tracking » (Hoekstra et al., 2004; Ferret, 2011; Schmitt et Mitchell, 2014; Michel, 2016) et la formule empirique de Van Rijn seront interprétées. Les calculs de flux seront évalués aux échelles de temps instantanés, du cycle de marée et annuelles.

III.3.3.1. La méthode du « Dune tracking »

Cette formule prend en considération la morphologie et la migration des dunes ainsi que la porosité du milieu (Équation 1). Elle fût reprise par (Soulsby, 1997) avec l'ajout de la porosité, par Hoekstra et al., (2004), Schmitt et mitchell, (2014) et a été validé par modélisation numérique par Michel (2016). Cette formule propose un résultat en $m^3.m.an^{-1}$. Afin d'exprimer les flux sédimentaires en masse sédimentaire sèche (en $t.m.an^{-1}$), les flux sédimentaires obtenus sont multipliés par la masse volumique de la silice (soit 2650 $kg.m^3.s^{-1}$) et rapporté en tonne et en année :

Équation 1 : Formule du "dune tracking" (Hoesktra et al., 2004)

$$\boldsymbol{Qb = c\,x\,H\,x\,((L\,x\,H/2)/(\lambda\,x\,H))\,x\,(1 - \phi)}$$

$$(Qb = c \times H \times f \times (1 - \Phi))$$

Où V = (H * L) / 2 Où f = V / (H * λ)

Avec :

- Qb : quantité de sédiment déplacée (en $m^3.m.an^{-1}$)
- c : vitesse de migration des dunes (en $m.an^{-1}$)
- H : hauteur des dunes (en m)
- L : largeur des dunes (en m)
- λ : longueur d'onde des dunes (en m)
- V : surface des dunes (en m²)
- f : facteur de forme de la dune
- Φ : porosité du sédiment (0,4 : valeur généralement utilisé pour des sables moyens dans la Manche)

III.3.3.2. Formule empirique de Van Rijn (1984)

La formule de Van Rijn (1984) met en avant les données courantométriques et granulométriques du secteur étudié (Équation 2). Dans cette étude, ces données n'ont pu être acquises qu'à un seul endroit (D1-D5). L'ensemble des résultats issus de cette formule seront extrapolés à l'échelle des quatre secteurs étudiés. La formule de Van Rijn (1984) est conditionnée par le diamètre médian des grains (D50) qui doit être situé entre 200 et 2000µm, ce qui est le cas pour la plupart de la zone étudiée sauf sur la zone ouest.

Équation 2 : Formule empirique de Van Rijn (1984)

$$Qb = 0{,}053(((\rho s/\rho)-1)*g)^{0,5} * D50^{0,5} * D^{*-0,3} ((\tau - \tau cr)/ \tau cr)^{2,1}$$

Avec :

- Qb : quantité de sédiment charrié (en $m^3.m.s^{-1}$)
- ρs : masse volumique du sédiment (en $kg.m^{-3}$)
- ρ : masse volumique de l'eau de mer (en $kg.m^{-3}$)
- g : accélérateur de la pesanteur terrestre (9.81 $m^2.s^{-1}$)
- D50 : médiane de la répartition des grains (en m)
- D* : diamètre adimensionnel du grain
- **τ** : tension de cisaillement (en $N.m^{-2}$)
- **τ**cr : contrainte critique de mise en mouvement (en $N.m^{-2}$)

III.3.3.2.1. Masse volumique du sédiment

Le sédiment est globalement composé de quartz (masse volumique = 2650 $kg.m^{-3}$). Le sédiment de ce type de granulométrie présente une porosité de 40%, remplie par de l'eau de mer dont la masse volumique a été défini à 1027 $kg.m^{-3}$ en raison de la pression du milieu. Donc la masse volumique du sédiment est égale à (2650*0,6) + (1027*0,4) soit 2000 $kg.m^{-3}$.
La densité relative du sédiment représente la masse volumique du sédiment sur la masse volumique de l'eau, soit 2000 /1027 = 1,95.

III.3.3.2.2. Granulométrie du sédiment

Le D50 est extrait sur les quatre secteurs suivant une interpolation grâce à l'outil « Statistique zonale ». Les statistiques se font à partir de 20 stations présentes à l'intérieur de la zone d'étude.
Le diamètre adimensionnel du grain est calculé comme suit :

$$D^* = (g*(s-1)/v^2)^{1/3} *D50$$

Avec :

- s : densité relative du sédiment (1,95)
- v : viscosité cinématique du fluide ($1{,}2*10^{-6}$ $m^2.s^{-1}$)

III.3.3.2.3. Paramètres courantométriques de l'équation

La contrainte, ou tension, de cisaillement près du fond (**τ**) représente la force de frottement exercée par le fluide sur le fond. Cette contrainte se calcule comme suit :

$$\tau = \rho * u_*^2$$

Où : $u_* = Ku(z) / \ln (z/z_0)$
Où : $z_0 = ks / 30$ (selon les résultats expérimentaux de Nikuradse)
Avec :

- ρ : masse volumique de l'eau (en $kg.m^{-3}$) ;
- u_* : la vitesse de frottement (valeurs calculées à partir des données du courantomètre « AWAC » à 2,1m du fond) ;
- K : constante de Von Karman (0,4) ;
- u(z) : la vitesse du courant à la hauteur z du fond (en m/s). Ici la hauteur choisie est de 2,1m en raison de la similarité entre valeur de la courbe de régression linéaire et la valeur réelle sur l'ensemble des conditions hydrodynamiques (Annexe J). De plus, cette hauteur permet de représenter au mieux la vitesse des courants sans turbulences ;
- z : hauteur choisie (en m) ;
- z_0 : la longueur de rugosité (en m) ;
- k_s : rugosité équivalente lié à la taille des grains ou des corps sédimentaires (cf partie

III.3.3.2.4.).

La contrainte critique (τ_{cr}) représente la valeur de la contrainte de frottement au-delà de laquelle les grains sont considérés comme mobiles. La mise en mouvement est possible quand $\tau cr > \tau$. Le déplacement sera alors effectué par charriage. Si la force de contrainte augmente le déplacement se fera en saltation puis en suspension. Sur la zone d'étude, cette force est générée majoritairement par les flux hydrodynamiques tels que la houle ou les courants tidaux (Ferret, 2011).

$$\tau_{cr} = \rho * u_{*cr}^2$$

Où : $u_{*cr} = (\theta_{cr} * ((s-1)*g*D50)^{1/2}$

Avec :

- ρ : masse volumique de l'eau (1027 kg/m^3)
- u_{*cr} : la vitesse de frottement critique
- θ_{cr} : paramètre de mobilité de Shields

Le paramètre de mobilité de Shields (θ_{cr}) se calcule selon plusieurs conditions :

- $\theta_{cr} = 0,14 * D^{*-0,64}$ Si $4 < D^* \leq 10$
- $\theta_{cr} = 0,04 * D^{*-0,1}$ Si $10 < D^* \leq 20$
- $\theta_{cr} = 0,0013 * D^{*0,29}$ Si $20 < D^* \leq 150$

Dans cette étude, le D* est situé entre 20,87 et 28,89.

III.3.3.2.4. Estimation de la rugosité équivalente

Une bonne estimation de la rugosité équivalente est primordiale pour une bonne estimation des flux transportés. La rugosité équivalente (ks) est influencée par la taille des particules sédimentaires et par la présence et la taille des formes de fond (e.g. rides, dunes) (Le Hir, 2008).

La loi de La Paroi (Von Karman, 1930, modifiée par Nikuradse, 1933) permet d'estimer les valeurs de ks et de u* à partir des mesures courantométriques. Une régression linéaire est utilisée sur les profils verticaux de vitesses des courants en utilisant le logiciel Spider sous Python (Tableau 6). Cette méthode d'estimation du ks est robuste mais n'est pas automatisée. Le calcul doit donc être réitéré pour chaque mesure de la chronique de courantométrie ; cette solution n'a donc pas été retenue.
Afin d'estimer le ks sur l'ensemble de la chronique, différentes formules empiriques d'estimation du ks ont été testées :

- La rugosité de peau, liée à la taille des grains, relative à un fond sans rides/dunes :
  - $k_s = D$ (ici le D correspond à la valeur médiane de taille de grain (D50)) ;
  - $k_s = D * 3$;
- La rugosité de forme relative à un fond couvert de rides/dunes :
  - $k_s = 8\ H^2/\lambda$ (Nielsen, 1992 in Le Hir 2008) ;
  - $k_s = 27,7\ H^2/\ \lambda$ (Grant & Madsen, 1986 in Le Hir, 2008) ;
  - $k_s = 1,1H *(1-e^{-25H/\lambda})$ (Van Rijn, 1984 in Le Hir, 2008).

Afin d'évaluer la formule la plus adéquate, les valeurs de flux instantanés obtenus avec ces différentes formules de ks sont comparées avec les valeurs obtenues avec la loi de paroi pour 4 instants de la chronique courantométrique (pointes de flot et de jusant en morte-eau et vive-eau moyennes) (Tableau 6, Annexe J), les valeurs issues de la régression linéaire obtenues avec la loi de la Paroi étant considérées comme valeurs de référence.
Les deux formules suivantes fournissent les meilleurs résultats : $k_s = 8\ H^2/\lambda$ (Nielsen, 1992 in Le Hir 2008) et $k_s = D50 * 3$ qui seront donc utilisées dans cette étude afin de calculer les flux sédimentaires sur le chronique courantométrique.

Tableau 6 : Tableau récapitulatif des flux instantanés calculés avec la formule de Van Rijn (1984) selon différentes formules de rugosité équivalentes (valeur de ks selon les valeurs courantométriques situées à 2,1m du fond marin) et selon deux conditions hydrodynamiques (VE et ME pointe de flot et pointe de jusant)

Méthode	Point à 2,1m NON adapté à la courbe (Régression linéaire)		Point à 2,1m adapté à la courbe (Régression linéaire)		Ordre de grandeur
	ME Jusant (29/06/2015 0:00)	ME Flot (28/06/2015 17:40)	VE Jusant (05/08/2015 12:50)	VE Flot (05/08/2015 19:20)	
Régression linéaire (Loi de la Paroi)	2,17E-04	1,10E-01	5,91E-03	5,91E-03	**(-1) à -4**
Ks = 1,1*Hr(1-e(-25Hr/Lo)) (Van Rijn, 1984)	3,87E-03	9,76E-02	1,82E-01	5,72E-02	-1 à -3
Ks = D50 (Nikuradse in Van Rijn)	5,87E-08	6,57E-05	1,37E-04	3,37E-05	-4 à -8
Ks = D50*3 (Nikuradse in Van Rijn)	5,29E-07	1,10E-04	2,24E-04	5,82E-05	-4 à -7
Ks = 8 Hr^2/Lo (Nielsen, 1992)	1,09E-04	3,38E-03	6,40E-03	1,95E-03	**-3 à -4**
Ks = 27,7 Hr^2/Lo (Grant & Madsen, 1986)	4,89E-04	1,33E-02	2,50E-02	7,76E-03	-2 à -4

IV. Résultats, interprétations et discussion

IV.1. Morphologie des dunes

IV.1.1. Comparaison des méthodes d'extraction des paramètres morphologiques

La méthode d'extraction manuelle reste la plus précise et la plus représentative même si elle demande beaucoup de temps. Elle sera donc utilisée dans cette étude. En effet, les extractions sous BTT peuvent être perturbées par la présence de corps surimposés (dans cette étude, ce sont les caractéristiques des plus grandes formes qui sont recherchées) et sont effectuées sur la partie centrale des profils, causant une perte d'information sur les dunes situées aux extrémités du profil. De plus, l'utilisation d'une tendance générale de la pente du fond sur une zone comportant des morphologies différentes de dunes peut engendrer une mauvaise estimation des paramètres morphologiques. Par ailleurs, l'outil BTT n'est pas adapté dans le cas de champs de dunes non-sinusoïdales, c'est-à-dire lorsque les dunes ne se succèdent pas de manière continue (présence d'espaces plats entre les dunes).

Etant donné la superficie importante de la zone étudiée, le logiciel Paramdunes propose une résolution de données trop faible (43,5m, contre 1 à 15 m au maximum de résolution originelle des données bathymétriques). S'il est demandé à ParamDunes d'utiliser la résolution d'origine des données bathymétriques (1 à 15m), la capacité machine des ordinateurs n'est pas suffisante pour calculer le MNT résultant, et le travail doit alors être réalisé en plusieurs fois sur des zones d'emprise restreinte qui oblige à découper des dunes. Les dunes ne sont ainsi pas analysées dans leur intégralité ce qui génère des erreurs dans l'estimation de leurs paramètres morphologiques. La taille de zone maximale pouvant être utilisée dans Paramdunes avec la résolution optimale est d'environ 1km. Or, la plupart des dunes sur la zone d'étude possèdent des longueurs d'onde supérieures à 700m et seraient mal décrites au pas d'1 km.

Le tableau ci-dessous (Tableau 7) représente les valeurs des paramètres morphologiques calculées par les trois méthodes sur le transect 34 situé dans le secteur sud de la zone d'étude (localisation du transect sur la Figure 16). Les valeurs de référence sont issues de la méthode d'extraction manuelle et en comparant ces valeurs aux autres méthodes, des écarts importants sont à noter en particulier pour la largeur de dune moyenne, la longueur d'onde moyenne, la hauteur moyenne et la surface transversale.

Tableau 7 : Tableau des résultats des 3 méthodes d'extraction sur le transect 34 situé dans la zone sud du projet

Méthode	Asymétrie	Bathymétrie			Largeur				Longueur d'onde			Hauteur			Surface	Facteur de forme
	P	*Zc*	*Zr*	*Zd*	*Lr*	*Ld*	*la*	*L*	*λr*	*λd*	*λmoy*	*Hcr*	*Hcd*	*H*	*V*	*f*
Manuelle (Référence)	0,36	-7,40	-14,61	-14,15	188,37	525,22	0,36	713,59	578,40	886,44	732,42	7,21	6,75	7,09	2529,17	0,49
BTT	0,46	-7,40	-14,61	-14,15	190,09	384,94	0,49	575,03	575,03	888,69	731,86	6,98	6,10	6,69	1923,10	0,39
Paramdunes	0,14	-6,95	-14,52	-14,08	280,14	371,23	0,75	650,39	547,75	497,87	522,81	7,13	7,02	9,63	3131,63	0,62

IV.1.2. Analyse de la morphologie des dunes

La longueur d'onde et la hauteur sont des paramètres-clés de la description de la morphologie des dunes. Les dunes des secteurs sud et ouest représentent des barkhanes avec des longueurs d'onde moyenne de 700m (Tableau 8). Ces résultats peuvent être biaisés par l'isolement des barkhanes, modifiant la valeur moyenne des longueurs d'onde. Néanmoins, cette valeur moyenne est aussi retrouvée dans les résultats de Ponsolle (2019).

Flemming (1988) réalise une étude mettant en avant une relation entre la hauteur et la longueur d'onde sur 1491 dunes et rides. Cette étude a permis par la même occasion de différencier les rides des dunes

et de déterminer que la hauteur des dunes était 8 à 10 fois plus petite que leur longueur d'onde (Flemming, 1988, in Le Bot, 2001). L'équation qui en ressort en est :

$$H_{moy} = 0{,}0677\lambda / 0{,}8098 \text{ et } H_{max} = 0{,}16\lambda 0{,}84 \ (H = 8^* \lambda) \text{ avec un } R^2 \text{ de } 0{,}98$$

Dans cette étude, la relation entre H et L des dunes de l'ensemble de la zone d'étude montre un coefficient de corrélation assez faible (R^2 = 0,36) (Figure 24) ce qui peut s'expliquer par une différenciation morphologique entre les différents secteurs. Toutefois, dans le secteur sud, ce coefficient est de 0,80, probablement dû à l'aspect sinusoïdal des dunes, non observé sur les autres secteurs (Annexe K).
Flemming (1988) note qu'un rapport H/L de 0,06 au minimum indique qu'une dune à atteint sa morphologie d'équilibre. Les résultats pour la zone étudiée montrent un coefficient nettement supérieur avec une valeur d'environ 0,18, démontrant que les dunes ont atteint leur morphologie d'équilibre.

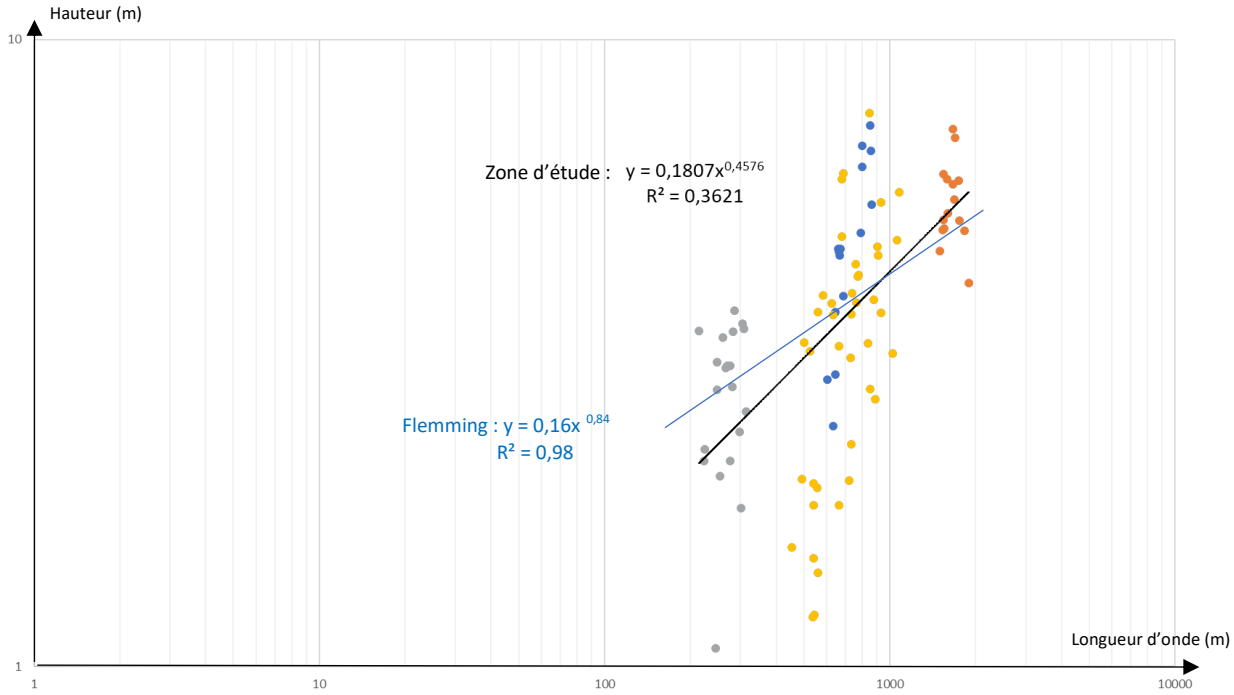


Figure 24 : Relation entre la hauteur des dunes et leur longueur d'onde pour l'ensemble des secteurs étudiés comparée à la relation de Flemming (1988) (sud : bleu, ouest : jaune, est : orange, centre : gris)

- L'asymétrie des dunes est visible sur les longueurs projetées des flancs de la dune. En effet, la longueur projetée du flanc doux est majoritairement plus élevée (de 2 à 10 fois la valeur de la longueur projetée du flanc raide). La polarité des dunes est observée vers l'Est ;
- Le calcul de la sinuosité met en avant le caractère rectiligne de la majorité des dunes. Cette sinuosité reste proche de 1, valeur pour laquelle les dunes sont considérées comme totalement rectilignes ;
- Les paramètres morphologiques sont récupérés le long des transects. La variabilité morphologique transversale des dunes peut modifier les résultats obtenus sur la moyenne de chaque paramètre. Pour des dunes comme les barkhanes, les profils prélevés sur les extrémités des dunes ont des morphologies complétement différentes des profils présents sur la crête. Cette différence est moins présente sur les autres dunes de la zone d'étude. De plus, certaines dunes du secteur sont entremêlées et causent un problème quant au choix des points clés. Les dunes du secteur est disparaissent transversalement créant ainsi un décalage pouvant aller jusqu'à 1000m de largeur entre chaque profil d'élévation ;
- Les résultats de l'étude de Ponsolle (2019), réalisée sur le secteur ouest du prisme sédimentaire

picard lors des années 2008 et 2010, montrent des résultats similaires aux résultats ci-dessous. En effet, les dunes observées avoisinent les 700m de longueur d'onde dans les deux cas. Les longueurs projetées des deux flancs expriment aussi les mêmes ordres de grandeurs. Cette similarité permet de démontrer une variabilité temporelle peu marquée sur les longueurs et largeurs des dunes sur l'ensemble de la zone d'étude. Néanmoins, la comparaison des hauteurs de dunes montre une variabilité temporelle entre la période 2008-2010 et 2011-2018 avec des valeurs moyennes passant de 7,32 à 4,77m pour les barkhanes situées à l'ouest du prisme sédimentaire picard. Cette observation pourrait mettre en avant un régime de tempête plus intense lors de la période 2011-2018 (17 évènements) (partie II.0) agissant sur le régime de houle et par conséquent l'arasement du sommet des dunes marines.

Le tableau ci-dessous référence les moyennes des paramètres par secteur pour les trois levés bathymétriques 1993, 2011 et 2018. De plus, les dunes récupérées représentent les dunes majeures dans chaque secteur. Les dunes surimposées ne sont pas prises en compte dans cette étude (Tableau 8).

Tableau 8 : Tableau récapitulatif des moyennes des paramètres morphologiques récupérées sur les levés de 2011 et 2018 avec écart-type pour chaque secteur

Secteur (Nombre de dunes)	λ (m)	H (m)	f (m)	S (m²)	Lr (m)	Ld (m)	Sinuosité
Sud (6)	723,24 ± 36,47	4,77 ± 1,25	0,49 ± 0 ,06	1768,41 ± 336,64	224,09 ± 16,34	488,13 ± 25,69	1,08 ± 0,07
Est (12)	1652,27 ± 128,87	5,52 ± 0,76	0,47 ± 0,4	4232,18 ± 1229,39	191,82 ± 9,45	1341,66 ± 116,32	1,08 ± 0,21
Centre (7)	268,45 ± 13,52	2,65 ± 0,87	0,48 ± 0,37	347,29 ± 51,64	69,67 ± 5,67	186,51 ± 9,87	1,07 ± 0,05
Ouest (20)	722,33 ± 42,37	3,53 ± 0,76	0,45 ± 0,21	1271,92 ± 401,57	188,03 ± 8,56	471,10 ± 23,91	1,15 ± 0,45

IV.2. Migration des dunes

Les résultats obtenus par la matrice des distances sur QGIS mettent en évidence une migration moyenne de 2,37 m.an^{-1} pour l'ensemble de la zone d'étude. En se concentrant sur chaque secteur, les résultats obtenus sont similaires aux récentes études faites par NGI (Lebrec et al., 2017) et l'IMDC (Pieterse, 2021) (Tableau 9) ;

- L'extraction des distances de migration est manuelle et aidée par l'utilisation de cartes d'ombrage/exposition combinées à des coupes verticales (outil « Profile tool »).
- Les taux de migration ont été calculés sur une période de 25 ans (1993-2018), 18 ans (1993-2011), 7 ans (2011-2018), 2 ans (2018-2020) et 1 an (2011-2012, 2015-2016). Les vitesses de migration des dunes sont comprises entre 1,85 (écart-type : 1,27) et 8,05 (écart-type : 12,12) m/an, avec des vitesses qui diminuent : (i) de l'Ouest vers l'Est (gradient spatial), et (ii) lorsque les périodes d'études sont plus longues.
- Les valeurs obtenues dans cette étude sont similaires (du même ordre de grandeur) aux vitesses de migration enregistrées par Ferret (2011), Lebrec et al. (2017) et Ponsolle (2019) pour des pas de temps comparables et des dunes situées sur ou alentour la zone du futur parc éolien. Pour des pas de temps pluri-annuels à pluri-décennaux, les vitesses de migration sont inférieures à 4 m/an et peu variables d'un secteur à l'autre et d'une dune à une autre, alors que pour des périodes d'1 à 3 ans, ces vitesses sont beaucoup plus variables (comprises entre 1,18 et 27,7 m/an). Sur des pas de temps pluriannuels ou plus longs, la vitesse de migration moyenne des dunes semble s'homogénéiser. Sur des pas de temps inférieures à 2-3 ans, elle est fluctuante.

- Ferret (2011) démontre des vitesses de migration dunaire différentes selon le pas de temps considéré sur une même zone étudiée : les vitesses de déplacement des dunes pour son étude sont entre 1,4 et 5 m.an^{-1} à l'échelle pluri-annuelle à pluri-décennale, entre 17,1 et 27,7 m.an^{-1} sur le pas de temps annuel, et peuvent dépasser 20 mètres en quelques cycles semi-diurnes. Par ailleurs, la direction de migration des dunes est orientée vers l'Est-Nord Est en moyenne sur des pas de temps supérieurs à quelques années, mais peut être orientée dans la direction opposée, vers l'Ouest-Sud Ouest sur des pas de temps inférieurs (Ferret, 2011 ; Ponsolle, 2019). Cette inversion de la migration est observée lorsque la période est concernée par un régime de houles soutenu (Ferret, 2011). Il serait donc intéressant d'acquérir des données bathymétriques sur des pas de temps plus courts (cycle de marée, hebdomadaire, mensuel, annuel) afin de disposer d'une estimation des vitesses de migration sur ces pas de temps, pour des conditions météo-marines types.

Tableau 9 : Tableau récapitulatif des taux de migration moyens par secteur et par période assortis des écarts-types et comparés avec les résultats d'études récentes (Lebrec et al., 2017 ; Ferret, 2011).

Etude		Présente étude						Lebrec et al. (2017)	Ferret (2011)			Ponsolle (2019)
Période d'étude		*1993-2018*	*1993-2011*	*2011-2018*	*2018-2020*	*2011-2012*	*2015-2016*	*2011-2018*	*1937-1993*	*1993-2007*	*2007-2008*	*2008-2010*
Secteur d'étude	Sud	2,4 (1,14)	2,45 (1,58)	2,41 (1,50)	NA	4,24 (3,09)	NA	2,4	NA	NA	NA	18,3
	Est	1,89 (1,27)	1,85 (1,45)	2,07 (1,53)	5,32 (6,24)	5,82 (5,05)	8,05 (12,12)	1,6	5 (0,25)	1,4-4,3 (0,70)	17,1 (11,6)	
	Centre	2,52 (1,13)	1,86 (1,19)	4,02 (2,70)	1,18 (1,4)	7,1 (9,13)	NA	2,6	NA	NA	27,7 (13,2)	
	Ouest	2,66 (1,38)	2,46 (1,61)	3,1 (1,89)	5,58 (4,99)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	

IV.3. Flux sédimentaires

Les flux sédimentaires ont été estimés sur différents pas de temps et selon plusieurs approches (formules empiriques du transport par charriage par Van Rijn, 1984, et formule du "dune tracking", Hoekstra et al., 2004) avec pour objectif de : (i) disposer d'ordres de grandeurs des flux sédimentaires pour différents pas de temps, et (ii) de comparer les résultats obtenus avec les 2 approches.

IV.3.1. Flux sédimentaires obtenus par la formule empirique de Van Rijn (1984)

Les flux sédimentaires ont été estimés à partir de la formule empirique de van Rijn (1984) de transport par charriage sous l'effet des courants de marée. Le transport par charriage étant le mode de transport qui contrôle principalement la dynamique des dunes, les flux estimés permettront d'approcher les flux associés à la morphodynamique des dunes. Les flux ont été estimés sur différents pas de temps, depuis l'instant jusqu'à l'année (période 2015-2016 comprise dans la période 1993-2018 d'étude de la morphologie et de la migration des dunes).

IV.3.1.1. Flux instantanés

La formule de Van Rijn a été utilisée pour estimer les flux instantanés pour des conditions hydro-météo-marines types : marées de morte-eau, moyenne et vive-eau, avec et sans houle. Les flux ont été calculés à partir de la moyenne des vitesses de pointe des courants de flot et de jusant pour les cycles semi-diurne où les conditions de marée et de houle sont identifiées (Tableau 10).
Les calculs ont été effectués selon la loi de k_s qui parait la plus optimale pour l'étude (partie III.3.3.2.4.), soit ks = 8 H²/λ (Nielsen, 1992) et la loi de la Paroi. Ces deux méthodes ont pu être comparées.

- Les résultats sont équivalents à des flux de 10^{-2} à 10^{-4} t.m.an^{-1} * pour l'ensemble de la gamme des conditions météo-marines. Ferret (2011) a obtenu des flux instantanés moyens de 1 à 7*10^{-}

* Les valeurs de flux instantanés et cumulés sur un cycle semi-diurne sont donnés en t/m/an dans un souçi de comparaison facilitée avec les valeurs de flux résiduels qui seront calculées par la suite sur la base de périodes annuelles à pluridécennales.

[4] t.m.an^{-1} sur la période 2007-2008 pour des conditions similaires à partir des formules de Van Rijn (1984) et de Yalin (1963). Ces résultats sont comparables.

- Les résultats obtenus par les 2 méthodes (loi de paroi et Nielsen, 1992) montrent des écarts pouvant aller jusqu'à 2 ordres de grandeur. Les écarts sont faibles (maximum 1 ordre de grandeur) pour les conditions de vive-eau, et augmentent en conditions de morte-eau et de houle. Ces résultats montrent la nécessité de mieux prendre en compte les interactions non-linéaires houle-courant afin d'obtenir une bonne estimation des flux sédimentaires dans ces conditions.
- Pour des conditions de marée croissantes (de morte-eau à vive-eau), on observe une augmentation des flux sédimentaires charriés. Pour des conditions de houles croissantes, on tend à observer une diminution des flux instantanés charriés en vive-eau, mais une augmentation de ces flux en marée moyenne et morte-eau. Une estimation plus fine, intégrant une meilleure prise en compte des interactions courant-houle et du ks, est nécessaire pour confirmer ce point. Ferret (2011) note une augmentation d'1 à 2 et 2 à 3 ordres de grandeur des flux charriés instantanés pour des conditions de houles moyennes (Hs=1,5m, T=7s) et annuelles (Hs=4,2m), respectivement.
- Au sein de la zone du futur parc éolien, les flux sédimentaires charriés instantanés peuvent être considérés comme similaires pour un même scénario de conditions hydrodynamiques. Les écarts sont au maximum d'un ordre de grandeur entre les secteurs Ouest, Centre, Sud et Est.

Tableau 10 : Tableau récapitulatif des flux instantanés estimés en t/m/an, à partir de la formule de Van Rijn (1984) selon deux méthodes de calculs de ks (Nielsen, 1992 ; loi de la Paroi) pour différentes conditions de marée, avec ou sans houles en utilisant la moyenne des valeurs de vitesse de courants de pointe de flot et de pointe de jusant (VE : Vives-Eaux moyennes ; ME : Mortes-Eaux ; Moy : marées moyennes ; H : avec houles)

	Ks = 8 Hr²/Lo (Nielsen, 1992)				Régression linéaire (Loi de la Paroi)			
	Sud	Est	Centre	Ouest	Sud	Est	Centre	Ouest
VE (Coeff 90)	6,40E-03	2,83E-03	1,09E-02	5,46E-03	5,91E-03	5,57E-03	4,65E-03	3,48E-03
VEH (Coeff 90)	1,92E-03	1,08E-03	1,90E-03	9,19E-04	2,69E-03	3,64E-03	3,03E-03	2,27E-03
ME (Coeff 45)	3,38E-03	9,17E-04	2,44E-03	1,36E-03	5,24E-03	7,06E-03	5,90E-03	4,44E-03
MEH (Coeff 45)	2,37E-03	5,08E-04	1,10E-03	9,22E-04	5,52E-02	7,38E-02	6,20E-02	4,70E-02
Moy (Coeff 75)	4,51E-03	1,43E-03	6,15E-03	4,74E-03	6,28E-04	8,59E-04	7,12E-04	5,26E-04
MoyH (Coeff 75)	1,01E-02	6,66E-03	2,59E-02	5,60E-03	7,33E-04	1,01E-03	8,33E-04	6,13E-04

IV.3.1.2. Flux cumulés sur un cycle de marée semi-diurne

Les flux cumulés ont été calculés sur les 4 secteurs de la zone d'étude et comparés avec les résultats obtenus par Ferret (2011).
Le tableau ci-dessous résume les résultats de flux cumulés pour différentes conditions hydrodynamiques (Tableau 11).

- Les valeurs de flux cumulés vont de 10^{-1} à 10^{-3} t/m/an [†].
- Les valeurs de flux cumulés augmentent avec l'augmentation des coefficients de marée. Avec la houle, ils augmentant pour les conditions de vives-eaux et de marées moyennes mais diminuent pour les conditions de mortes-eaux. Cette observation met en avant un effet de la houle sur la quantité de sédiments déplacés. En conditions de mortes-eaux, les couranst sont plus facilement ralentis voire inversés par l'action des houles, conduisant à des flux cumulés moindres vers l'Est.
- Les flux cumulés sont similaires à l'échelle de la zone étudiée. Les différences de valeurs de flux entre les 4 secteurs d'étude sont jugées non significatives.

[†] Les valeurs de flux instantanés et cumulés sur un cycle semi-diurne sont donnés en t/m/an dans un souçi de comparaison facilitée avec les valeurs de flux résiduels qui seront calculées par la suite sur la base de périodes annuelles à pluridécennales.

- Les valeurs de flux cumulés présentent au maximum un ordre de grandeur d'écart avec les valeurs obtenues par Ferret (2011) pour des conditions hydrodynamiques similaires, sur la période 2007-2008. Ce résultat tend à monter que les flux sédimentaires à l'échelle du cycle semi-diurne présente peu de variabilité sur et aux alentours de la zone d'étude.

Tableau 11 : Tableau récapitulatif des flux cumulés estimés en t/m/an sur un cycle de marée semi-diurne, pour différentes conditions de marée et de houle et pour les quatre secteurs d'étude. Les flux cumulés sont orientés

Cycle de marée (coefficient)	Sud	Est	Centre	Ouest
Vives-Eaux (Coeff 90)	8,65E-02	1,40E-01	1,37E-01	1,38E-01
Vives-Eaux avec houle (>1m) (Coeff 90)	1,07E-01	1,50E-01	1,60E-01	1,40E-01
Mortes-Eaux (Coeff 45)	1,97E-02	3,63E-02	3,87E-02	3,51E-02
Mortes-Eaux avec houle (>1m) (Coeff 45)	8,36E-03	1,78E-02	1,35E-02	1,13E-02
Marées moyennes (Coeff 65)	4,12E-02	7,37E-02	7,65E-02	5,91E-02
Marées moyennes avec houle (>1m) (Coeff 75)	6,37E-02	9,25E-02	9,64E-02	6,60E-02

IV.3.1.3. Flux résiduels annuels

Les flux résiduels ont été estimés au pas de temps annuel sur la base d'une chronique courantométrique (Roberts, 2015 ; cf partie 3.2.2). Cette chronique couvre la période février 2015-avril 2016. Néanmoins, une partie des données courantométriques viennent à manquer (Figure 25). En effet, aucune donnée n'a été enregistrée sur les périodes de septembre 2015 et de fin novembre 2015 à mi-janvier 2016, créant ainsi un « trou » dans les données courantométriques. Les périodes manquantes concernent essentiellement la période hivernale, très énergétique. Les flux cumulés calculés ici sont donc essentiellement indicateurs des conditions printanière à automnale. Les flux résiduels ont donc été calculés sur 1,059 an, soit un an et quelques jours. Ce chiffre fait référence au nombre de données courantométriques récupérées toutes les 10 minutes sur l'ensemble de la période d'étude et converties en année.

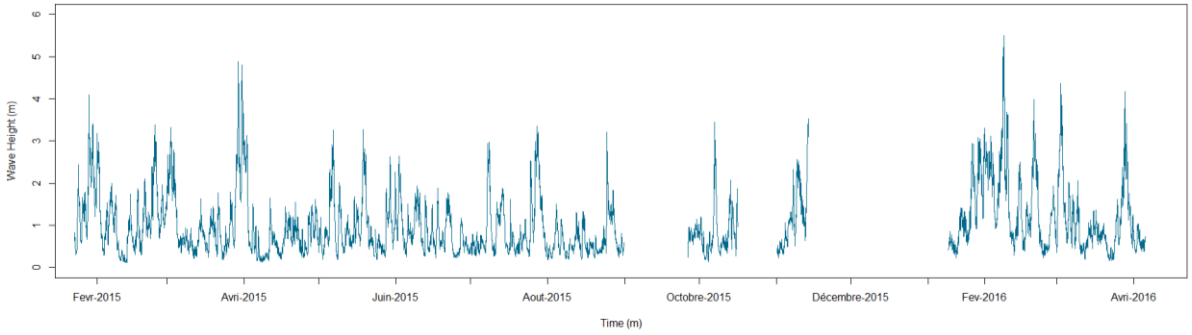


Figure 25 : Hauteur de vagues enregistrées entre fin janvier 2015 et mi-août 2016 (issu de l'AWAC D1-D5)

Le tableau ci-dessous (Tableau 12) récapitule les flux résiduels orientés SO-O/NE-E calculés grâce à la formule de Van Rijn (1984) (en $m^3.m.an^{-1}$ et en $t.m.an^{-1}$) dans le cadre de cette étude. Ils sont comparés avec les flux moyens calculés par Ponsolle (2019) et Ferret (2011).

- Les flux résiduels annuels ont été calculés en ne prenant en compte que les flux dans la direction principale des courants marée, soit N220°-N270° et N40°-N90°. Ils sont donc sous-estimés.
- La formule de k_s de Nielsen (1992 ; ks = 8 H^2/λ) utilisée pour les calculs de flux instantanés donne des résultats élevés (une moyenne de 800 $m^3.m.an^{-1}$ contre 29 $m^3.m.an^{-1}$ pour l'étude de Ponsolle, 2019). Il a donc été préféré une formule de k_s basé sur une rugosité de grain.

- Les moyennes des valeurs de flux résiduels sont estimées entre 83 et 126 t.m.an^{-1} pour l'ensemble de la zone d'étude sur la période 2015-2016. Ces résultats sont comparables à ceux obtenus par Ponsolle (2019) pour les périodes 2007-2008, 2008-2010 et 2010-2013 (entre 74 et 347 t.m.an^{-1}) et Ferret (2011) pour la période 2007-2008 où les ordres de grandeur d'écart vont de 0 à 1 (1 à 198 t/m/an). Les différences peuvent être dues aux pas de temps et surtout aux périodes de mesure au cours desquelles les conditions de vents et de houle diffèrent ;

Tableau 12 : Tableau des flux résiduels calculés à partir de la formule de Van Rijn (1984) sur la période février 2015 – avril 2016, pour les 4 secteurs d'étude, en t.m.an-1 et en m3.m.an-1. Les flux résiduels sont orientés vers l'Est-Nord Est. Ils comparés aux récentes études.

Flux résiduels orientés (SW-W-NE-E) sur la période 2015-2016			Ponsolle,2019	Ferret,2011
	Van Rijn (m3/m/an)	Van Rijn (t/m/an)	Flux moyen (Ponsolle,2019) Période 1 à 3 ans	Flux moyen
Sud	31,64	83,84		
Est	47,47	125,81	27,98 à 131,08 m3/m/an	1,58 à 108,17 t/m/an
Centre	46,53	123,31	soit 74,14 à 347,36 t/m/an	
Ouest	41,39	109,70		

IV.3.2. Flux obtenus avec la méthode du « Dune tracking »

Schmitt et Mitchell (2014) ont démontré que la méthode du dune tracking pouvait être utilisée sur l'échelle annuelle, ce qui n'était pas le cas avant, avec la formule de Hoekstra (2004). Dans cette étude, la méthode du dune tracking fait référence à des données pluriannuelles. Le tableau ci-dessous récapitule les moyennes des flux intégrés sur trois périodes interlevés (1993-2011, 2011-2018 et 1993-2018), selon la méthode du dune tracking, en tonne par mètre par an (Tableau 13).

- Les flux sédimentaires résiduels obtenus par la formule du « dune tracking » sont compris entre 3,72 ± 0,99 et 9,77 ± 4,90 t.m.an^{-1}. Ces flux sont légèrement plus importants sur la période 2011-2018 (7,79 à 9,77 t/m/an) comparativement aux périodes 1993-2011 (3,72 à 8,79 t/m/an) et 1993-2018 (4,88 à 8,22 t/m/an). On peut supposer que l'augmentation du pas de temps conduit à un lissage, comme c'est le cas pour la migration des dunes.
- Les valeurs de flux résiduels obtenues sont comparables avec des valeurs issues de la littérature, avec des écarts allant du même ordre de grandeur et jusqu'à 2 ordres de grandeur de plus. Les simulations numériques établies par Blanpain (2009) fournissent des valeurs allant de 17,57 à 125,51 t.m.an-1 sur la base d'une année-type des conditions de marée et de houles. Dans l'étude de Ponsolle (2019), la valeur de flux est comprise entre 18,6 et 374,2 t.m.an-1, sur la base de périodes d'1 à 3 ans. Au large de Dunkerque, Bary (2020) obtient des flux compris entre 19,55 à 46,22 t.m.an-1 sur la base de périodes d'étude mensuelles. Les différences de pas de temps d'étude peuvent ici expliquer les différences sur les valeurs de flux, le flux résiduel diminuant lorsque le pas de temps augmente.

Tableau 13 : Tableau récapitulatif des flux sédimentaires résiduels calculés par la formule du « dune tracking » sur les périodes 1993-2011, 2011-2018 et 1993-2018) et sur les 4 secteurs d'étude, en t.m.an^{-1}

Secteur	1993-2011	2011-2018	1993-2018
Sud	8,79 ± 4,43	8,65 ± 2,35	8,22 ± 3,09

Est	7,22 ± 3,49	9,77 ± 4,90	7,68 ± 4,01
Centre	3,72 ± 0,99	8,10 ± 2,22	4,88 ± 1,15
Ouest	5,89 ± 3,77	7,79 ± 4,27	5,90 ± 3,32

- La méthode du « dune tracking » utilise des paramètres morphologiques (H, L, longueur d'onde). Les résultats sont donc moins bien estimés dans le cas de dunes de formes complexes (cas des dunes du secteur Ouest en particulier). Dans notre étude, la valeur moyenne de chaque paramètre morphologique est utilisée pour chaque dune, permettant d'approche au mieux la forme moyenne de la dune. Ces valeurs moyennes peuvent être néanmoins sensibles au nombre de transects utilisés et au nombre de points récupérés sur chaque transect lors de l'extraction des paramètres morphologiques.

IV.3.3. Comparaison des flux estimés par les formules de Van Rijn (1984) et du « dune tracking »

Les flux « dune tracking » sont d'un ordre de grandeur plus petits que les flux Van Rijn (1984) (Tableau 14). D'après les études de comparaison des flux estimés par diverses formules (e.g. Camenen et Larroudé, 2003), cet écart peut être considéré comme peu significatif, et les 2 méthodes d'estimation comme fournissant des résultats similaires.

Les flux « dune tracking » sont calculés sur la base d'une période de temps plus longue (1993-2018) comparativement aux flux résiduels « Van Rijn » estimés sur la période 2015-2016. Sur les pas de temps plus longs les vitesses de migration des dunes sont plus faibles, et conduisent à des flux résiduels plus faibles (la formule du « dune tracking » utilise la vitesse de migration des dunes).

De plus, les flux Van Rijn ont été calculés sur une période couvrant un printemps, un été et un automne. Or, dans ce secteur de la Manche Orientale, les périodes agitées de l'hiver (avec houles) génèrent des périodes d'inversion de flux sédimentaire en direction de l'O-SO, qui conduisent à une diminution du flux résiduel annuel (Ferret, 2011). Aussi, les flux « van Rijn », calculés dans cette étude sur l'année 2015-2016, tronquée de son hiver, sont vraisemblablement surestimés par rapport aux flux réels sur l'ensemble de cette année.

Tableau 14 : Tableau des flux résiduels obtenus avec les formules de Van Rijn (1984) et du « dune tracking », en m3.m.an-1. Les flux sont tous orientés vers l'Est-Nord Est.

Secteur	Flux résiduels Van Rijn (période 2015-2016)	Flux résiduels "Dune tracking" (période 1993-2018)
Sud	31,64 $m^3.m.an^{-1}$	8,22 ± 30,9 $m^3.m.an^{-1}$
Est	47,47 $m^3.m.an^{-1}$	7,68 ± 40,1 $m^3.m.an^{-1}$
Centre	46,53 $m^3.m.an^{-1}$	4,88 ± 1,15 $m^3.m.an^{-1}$
Ouest	41,39 $m^3.m.an^{-1}$	5,90 ± 3,32 $m^3.m.an^{-1}$

Ces résultats pourraient aussi montrer que : (i) le transport par charriage ne participe qu'en partie à la migration des dunes sur la zone d'étude, et/ou (ii) le disponible sédimentaire est peut-être limité. En effet, les flux van Rijn (1984) correspondent à la totalité du transport par charriage sur le site pour des conditions de disponible sédimentaire considéré comme infini, alors que les flux « dune tracking » sont dépendants des volumes dunaires réellement déplacés.

IV.4. Utilisation des analyses multivariées pour comparer les données benthiques et physiques

La comparaison des variables benthiques et physiques selon des analyses multivariées comme l'analyse en composantes principales (ACP) et la classification ascendante hiérarchique (CAH) permet de de mettre en évidence les relations entre les variables, et d'analyser la ressemblance entre les individus (ici, les dunes). Pour ce faire, les analyses ont été réalisées sur les variables suivantes grâce aux package « factoshinny » (programmé par Pauline Vaissié, Astrid Monge et François Husson), présent dans la librairie de Rstudio : hauteur (H), longueur d'onde (λ), surface (S), migration (c), longueurs projetées du flanc doux (Ld) et du flanc raide (Lr), sinuosité (s), flux intégrés sur la période 2011-2018 selon la méthode du dune tracking (Flux), D50, richesse taxonomique, abondance et biomasse.
Les paramètres physiques étaient disponibles pour 12 dunes pour ces analyses. Dans le cadre de l'étude statistique, un individu représente une dune. Ces 12 dunes correspondent aux dunes les plus proches de 12 stations de prélèvements bio-sédimentaires présents dans la zone d'étude (Figure 26).
Le but de ces analyses est de mettre en évidence des relations entre les paramètres physiques et les caractéristiques des communautés benthiques, et de voir si une organisation spatiale des faciès bio-morpho-sédimentaires se dégage sur la zone d'étude.

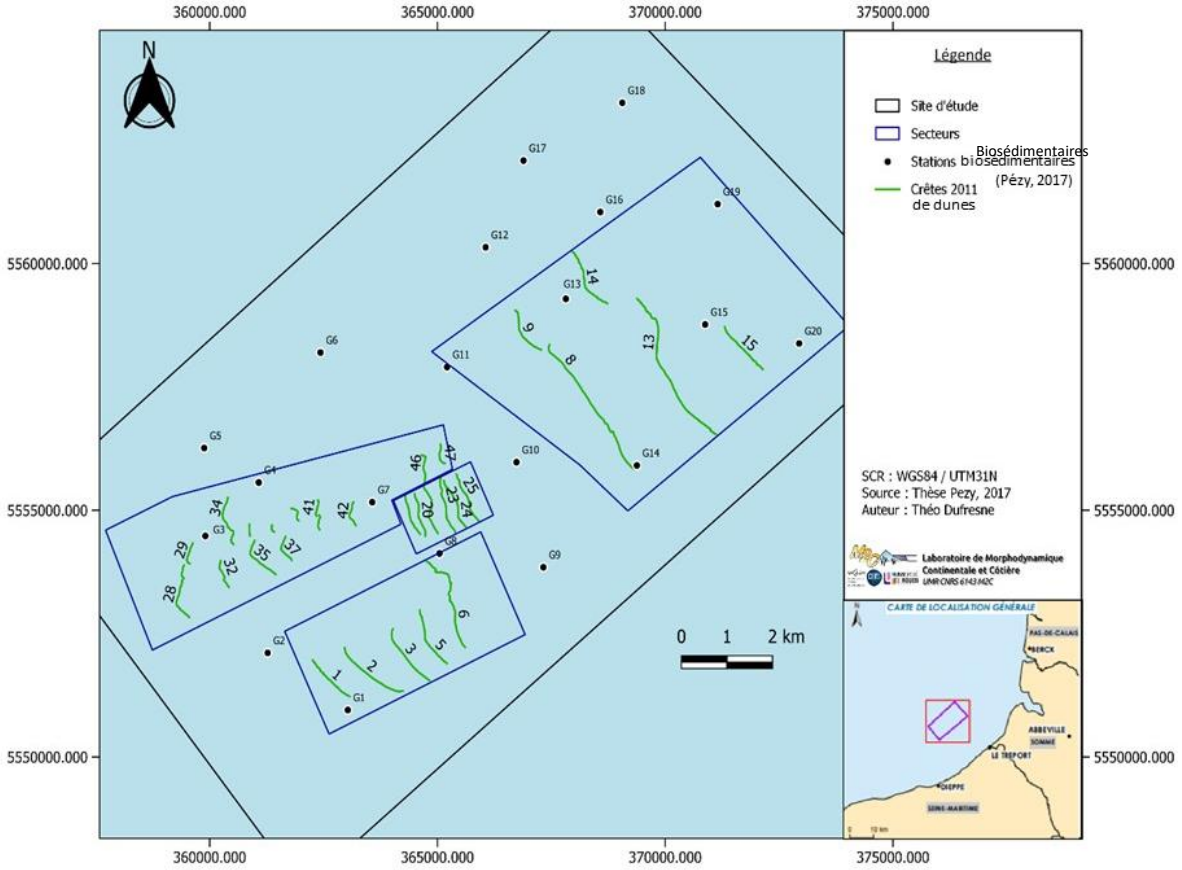


Figure 26 : Carte des stations biosédimentaires (Pezy, 2017) et des lignes de crêtes de 2011 dans le secteur d'étude. Les numéros des stations bio-sédimentaires utilisés dans l'analyse et sur les figures suivantes sont différents de ceux indiqués sur cette figure.

IV.4.1. Analyse multivariée CAH

La classification ascendante hiérarchique est une méthode de regroupement qui se base sur le calcul de la dissimilarité entre les individus. Cette classification fait apparaître 4 classes d'individus, qui coïncident avec les 4 secteurs d'étude définis (Figure 27). Cette analyse conforte la délimitation des 4 secteurs d'étude, réalisée à priori et basée sur une évaluation visuelle de la morphologie des dunes sur les MNTs bathymétriques.

La classification montre que les relations entre les différents paramètres peut varier en fonction du secteur étudié :

- La **classe 1** est composée d'individus tels que les dunes du centre. Dans ce secteur, les dunes sont de grandes dimensions, soumises à une dynamique sédimentaire importante, et abritent des communautés benthiques peu abondantes et peu diversifiées ;
- La **classe 2** est composée d'individus tels que la dune du secteur est. Ce groupe est caractérisé par de faibles valeurs de migration des dunes et de flux sédimentaires ;
- La **classe 3** est composée d'individus des dunes du secteur sud, caractérisé par un sédiment grossier et de faibles valeurs de longueurs de flancs à contrario de hauteurs importantes, indiquant des dunes plus étroites (moins larges) mais aussi plus hautes que dans les autres secteurs ;
- La **classe 4** est composée des dunes du secteur ouest. Ce groupe est caractérisé par des sédiments dunaires plus grossiers, où la biomasse, l'abondance et la richesse taxonomique sont plus élevées.

Cette classification vérifie l'hypothèse de la répartition des espèces benthiques en fonction de la morphologie des dunes et de la granulométrie des sédiments les composant. Ces résultats montrent que les espèces benthiques sont sensibles aux variations morpho-sédimentaires des dunes : morphologie et migration des dunes, mais aussi flux sédimentaires associés.

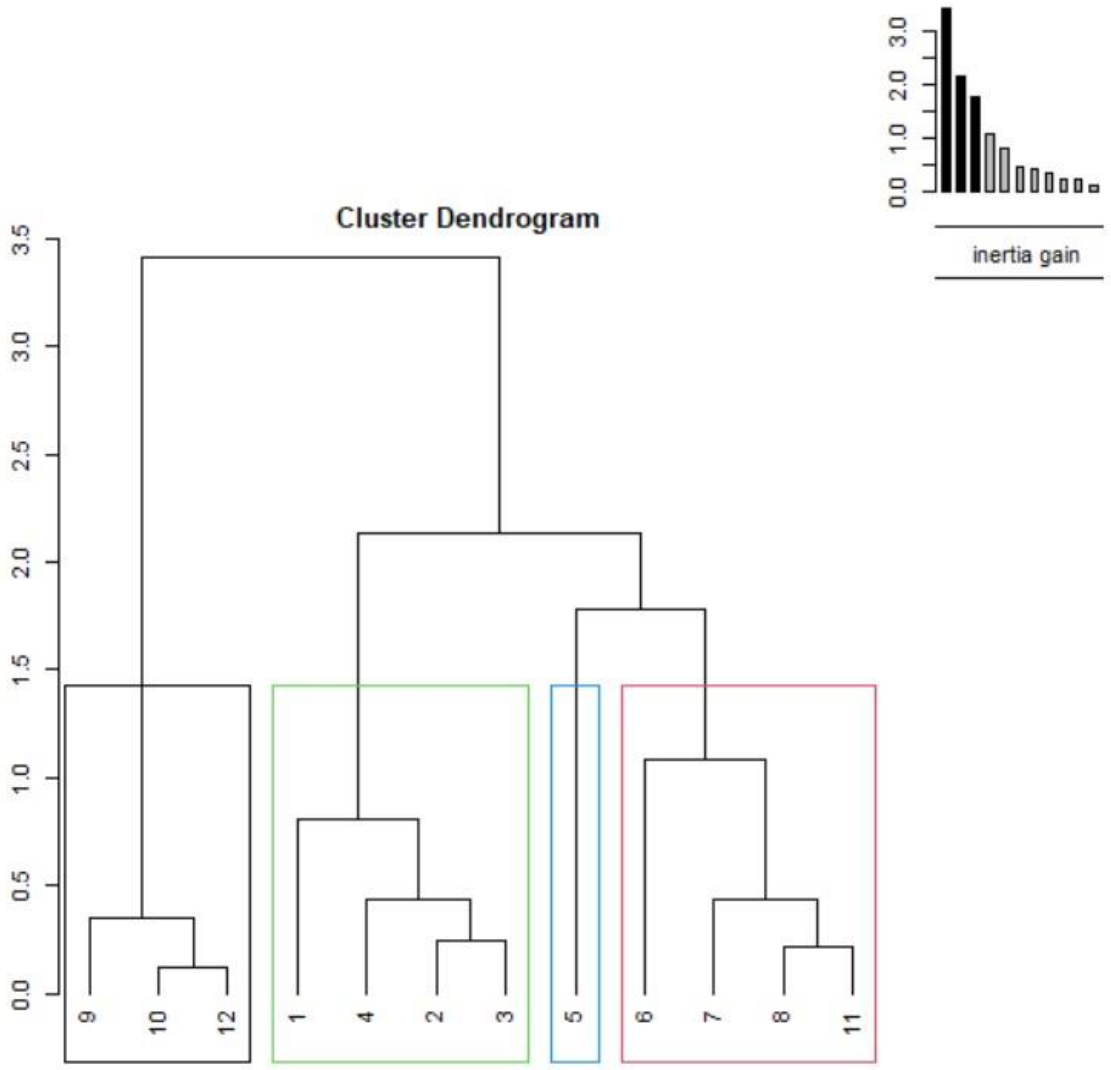


Figure 27 : Arbre hiérarchique des individus (dunes) de la zone d'étude selon la similarité de leurs variables (les nombres correspondent aux 12 dunes numérotées selon leur succession dans le fichier d'analyse)

IV.4.2. Analyse multivariée ACP

L'analyse en composantes principales est une méthode de statistique descriptive permettant de représenter de façon simple et assimilable des informations statistiques en les schématisant. Elle consiste à rechercher les directions de l'espace où les corrélations entre n variables aléatoires sont les plus fortes.

L'inertie des axes factoriels indique d'une part si les variables sont structurées et suggère d'autre part le nombre judicieux de composantes principales à étudier (Figure 28). Cette inertie est calculée selon la variabilité des individus. Les 2 premiers axes de l'analyse expriment 58.73% de l'inertie totale du jeu de données. Cela signifie que 58.73% de la variabilité totale du nuage des individus (ou des variables) sont représentés dans ce plan. C'est un pourcentage assez important, et le premier plan représente donc convenablement la variabilité contenue dans une grande part du jeu de données actif. Cette valeur est supérieure à la valeur référence de 52.56% estimée par le package « factoshinny ». La variabilité expliquée par ce plan est donc significative. Les deux dimensions choisies pour l'analyse ACP seront donc la première et la deuxième.

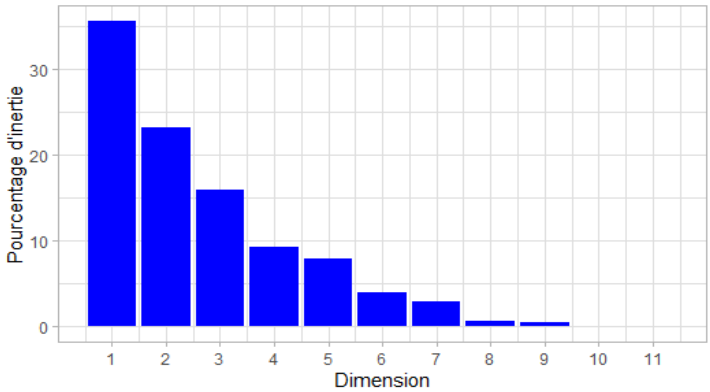


Figure 28 : Décomposition de l'inertie totale sur l'ensemble des variables et individus

Les individus et les variables ont été projetés dans le plan formé par les 2 premiers axes (Figure 29). Les variables libellées sont celles qui sont les mieux représentées dans le plan. Deux variables sont fortement corrélées ou anti-corrélées lorsqu'elles sont respectivement proches ou situées dans le quadrant opposé par rapport à l'origine des deux axes du plan. Deux variables positionnées orthogonalement par rapport à l'origine des deux axes du plan ne montrent pas de relation particulière :

- Les paramètres morphologiques des dunes sont fortement corrélés (Ld, Lo, S, et dans une moindre mesure la longueur d'onde) mais anti-corrélés avec la hauteur (H), indiquant que les dunes les plus hautes sont étroites, faiblement espacées et présentent une section transversale de surface restreinte. Ces paramètres morphologiques ne montrent pas de relation avec les flux sédimentaires et les paramètres benthiques.
- La vitesse de migration des dunes est anti-corrélées avec leur surface transversale ;
- Les fux sédimentaires sont corrélés avec la vitesse de migration des dunes, mais très anti-corrélés avec les paramètres benthiques ;
- Les paramètres benthiques sont corrélés entre eux ainsi qu'avec la granulométrie (D50) ;

L'analyse montre donc une relation très forte entre la dynamique sédimentaire et les caractéristiques du benthos : fortes abondance, biomasse et richesse taxonomique lorsque la dynamique sédimentaire est plus faible. Par contre, il semble ne pas exister de relation entre la morphologie des dunes et les caractéristiques du benthos.

Les résultats de l'analyse montrent que, lorsque les fonds sont plus grossiers, ils abritent aussi des communautés benthiques diversifiées (richesse spécifique), abondantes et productives (biomasse). Par contre, dans ce cas, les flux sédimentaires sont plus faibles. Ces résultats sont cohérents avec ce qui est classiquement observé dans la littérature. Une analyse similaire réalisée par Ferret (2011), sur un champ de dunes proche de notre zone d'étude, avait montré des résultats un peu différents : les flux sédimentaires sont plus importants sur les fonds plus grossiers abritant des

communautés benthiques diversifiées (richesse spécifique), abondantes et productives (biomasse).

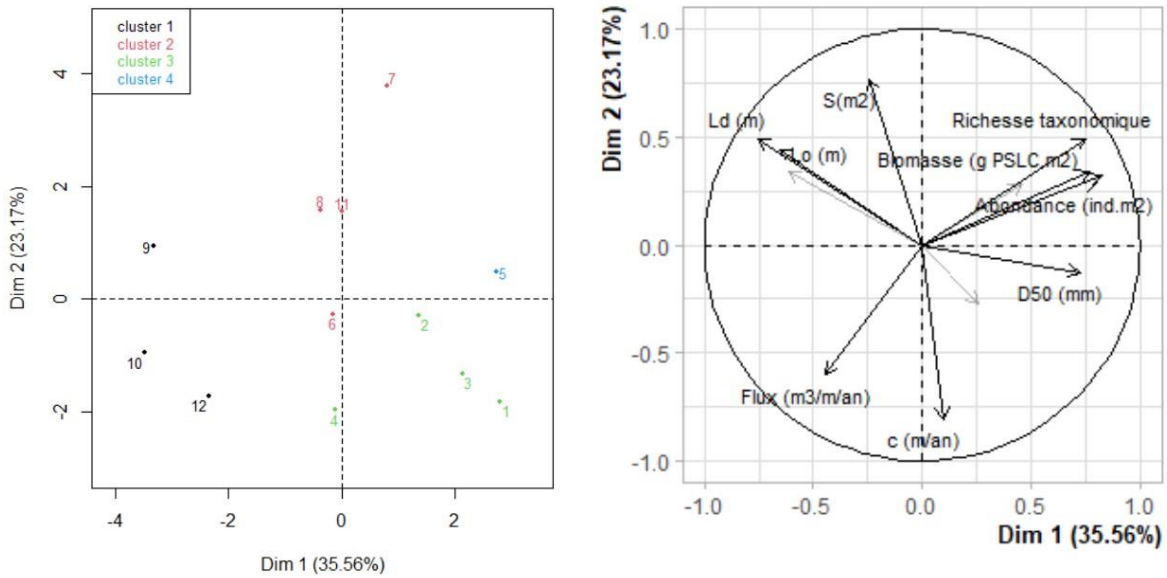


Figure 29 : Projection des individus (gauche) et des variables (droite) dans le plan factoriel F1-F2 obtenu par l'ACP. Clusters 1 à 4 : classes 1 à 4.

V. Recommandations & Perspectives

V.1. Recommandations méthodologiques

V.1.1. Incertitudes sur les données

L'acquisition de la bathymétrie avec un sondeur multifaisceaux permet l'exploration du fond marin sur un large couloir, entraînant ainsi une grande résolution des mesures (d'autant plus que l'envergure des faisceaux est réduite) (Bisquay, 2006). La donnée bathymétrique utilisée dans cette étude ne présente pas la même résolution. Les levés de 2011 et 2018, acquis au sondeur multifaisceaux, présentent de fortes résolutions (3m en 2011, 1m en 2018) alors que le levé de 1993, acquis au sondeur monofaisceau dispose d'une résolution de 15 m seulement.

Cette incertitude associée aux données bathymétriques plus anciennes (antérieures aux années 2000) génère des incertitudes pouvant atteindre la vingtaine de mètres pour la localisation des crêtes et creux inter-dunes (et donc des paramètres-clés de la morphologie des dunes). Cette incertitude se propage dans le calcul de la vitesse de migration des dunes et des flux sédimentaires.

De nouvelles campagnes bathymétriques sur l'ensemble de la zone du parc en 2025 permettraient d'obtenir un pas de temps similaire entre 2018-2025 et 2011-2018 et de comparer ces périodes interlevés.

Pour les données courantométriques, de nouvelles mesures peuvent être effectuées à l'avenir sur le même emplacement que D1-D5 afin de de disposer de mesures sur d'autres périodes avec des conditions hydrodynamiques différentes. Il serait intéressant de disposer de nouvelles mesures sur des secteurs du futur parc éolien sur lesquels la morphologie (des dunes en particulier) est différente afin de préciser la variabilité de l'hydrodynamique sur la zone.

Les échantillons granulométriques disponibles ont permis de caractériser la granulométrie sur les fonds de la zone du futur parc éolien. De nouvelles campagnes granulométriques peuvent être réalisées en simultané de futurs compagnes « benthiques » pour échantillonner différents endroits clés d'une même dune. Cet échantillonnage permettrait d'observer la variabilité granulométrique intradune. Parmi ces endroits clés, il est possible de citer le creux amont, le creux aval, la ligne de crête, le flanc doux et le flanc raide. Il serait, par ailleurs, intéressant de réaliser des prélèvements sur une dune de chaque secteur morphologique.

V.1.2. Méthodes d'extraction des paramètres morphologiques des dunes

La méthode manuelle fût celle utilisée pour l'extraction des paramètres morphologiques de chaque dune. Cependant, l'intérêt pour les méthodes d'automatisation ne doit pas être écarté. Le traitement avec l'outil BTT reste plus rapide et permet de couvrir plus d'espace. Il est néanmoins nécessaire de prendre en considération des zones de morphologie dunaire sinusoïdale sans quoi, des erreurs conséquentes, en particulier sur la quantification de la longueur d'onde, des largeurs de flanc et des pentes des flancs peuvent être commises par le code Matlab (un formulaire de prise en main de l'outil BTT est disponible au laboratoire M2C CNRS de l'Université de Rouen).

Paramdunes propose un calcul de valeurs moyennes des paramètres morphologiques des dunes qui nécessite une description bathymétrique de la forme complète de la dune. Or, l'extension des levés bathymétriques disponibles et le découpage des secteurs de morphologies dunaires différentes ne permet pas toujours de satisfaire ce critère. Par ailleurs, le logiciel utilise énormément de mémoire, et les calculs, pourtant réalisés par secteur dunaire (sur une surface limitée) n'ont pas pu être effectués avec une résolution satisfaisante (résolution de 43,5 m au mieux pour que le calcul aboutisse). Une raison d'utilisation de ce logiciel est la modélisation des lignes de crête pour le calcul des migrations des dunes.

V.1.3. Choix de la formule empirique de Van Rijn

Au large de Dieppe, la dynamique des sédiments composants les dunes est contrôlée principalement par le transport dit charrié. La formule empirique de Van Rijn est généralement utilisée pour le calcul des flux sédimentaires sur le domaine de la Manche (Le Bot, 2001; Ferret, 2011). Les résultats des précédentes études tel que celle de Ferret (2011) ont permis de comparer les valeurs issues des calculs sur plusieurs formules empiriques. La formule de Van Rijn est adaptée pour l'estimation des flux sur la zone du futur parc puisqu'elle est valide pour une valeur de D50 entre 0,2 et 2cm ce qui est le cas des sédiments présents dans la zone d'étude. Cependant, cette formule calcule seulement les flux charriés. Il serait intéressant de prendre en compte le transport total afin d'estimer les flux des sédiments transportés par suspension et de les comparer avec les flux charriés. De plus, la formule de Van Rijn retenue utilise une valeur de D50 pour représenter le sédiment, adaptée dans le cas de sédiments homogènes. Il serait intéressant d'utiliser une formule à granulométrie étendue de sorte à prendre en compte l'hétérogénéité de taille des particules du sédiment, en particulier présente dans les sédiments situés dans l'Ouest de la zone (partie III.2.4).

D'après Ferret (2011), les flux calculés par des formules empiriques de transport sont quasiment toujours supérieurs aux volumes déplacés. Dans le cadre de cette étude, le même résultat est obtenu : les flux charriés Van Rijn sont un ordre de grandeur plus importants que les flux "dune tracking. Ce résultat peut indiquer qu'une partie seulement du flux charrié participe à la migration des dunes. Des ajustements des formules utilisées (Van Rijn, "Dune tracking") pourraient par ailleurs permettre d'améliorer l'estimation de ces flux :

- Les formules empiriques du transport sédimentaire considèrent un stock sédimentaire inépuisable. Il serait intéressant de pouvoir ajuster cette variable en fonction du disponible sédimentaire réel (la forme non systématiquement sinusoïdale des dunes atteste d'ailleurs d'un disponible sédimentaire qui n'est pas systématiquement infini) (e.g. Vah et al., 2021). Il estimerait ce que le fluide est capable de transporter si la couche de sédiments est inépuisable ou non (avec possible surestimation du débit solide dans le premier cas). L'évolution des stocks sédimentaires a été analysée en Manche Orientale au cours des 2 derniers siècles (Grenard-Grand et al., 2021) ; il serait intéressant de prendre en compte cette évolution pour l'estimation des flux sédimentaires futurs ;
- Etant donné l'hétérogénéité de taille des particules à l'Ouest de la zone, il serait intéressant d'utiliser un coefficient de masquage-exposition et un calcul de flux intégrant une granulométrie étendue (e.g. Wu et al., 2000) ;
- Dans cet environnement peu profond (entre 6 et 24 m de profondeur d'eau), la houle joue un rôle important sur le transport sédimentaire. L'effet de la houle sur le transport doit donc être prise en compte dans de futures estimations des flux.

V.2. Recommandations sur les relations entre les paramètres sédimentaires et morphodynamiques de dunes et le benthos.

La comparaison des paramètres physiques et benthiques laisse place à une vaste possibilité d'analyses. Dans cette étude, les relations entre 12 variables bio-morpho-sédimentaires et 12 dunes ont été analysées. Les résultats montrent une forte corrélation entre les caractéristiques des communautés benthiques (biomasse, abondance, richesse spécifique), la granulométrie du sédiment et la dynamique sédimentaire (flux sédimentaires). Au contraire, la morphologie des dunes semble avoir peu d'influence sur les caractéristiques benthiques.

Une étude entièrement dédiée à ce sujet permettrait de préciser les résultats. Cette étude aurait pour but de comparer les données benthiques et physiques acquises simultanément (dans la présente étude, les données physiques datent de 2011 et 2018 contre 2014 à 2016 pour les données benthiques).

Les échantillonnages benthiques ont été effectués sur 30 stations permettant de couvrir l'ensemble de la zone d'étude. Un rééchantillonnage du benthos combiné à un rééchantillonnage granulométrique et morphologique (partie V.1.1) permettrait d'observer la variabilité intra-dunaire sur plusieurs pas de temps en plusieurs endroits-clés (pied, flancs, crête des dunes) pour une dune de chaque secteur morphologique.

Il est possible de faire une approche entre la biomasse et les conditions du milieu. Dans un milieu favorable à son développement, l'espèce aura plus tendance à se développer ce qui fera croitre sa biomasse (Pezy,2017). Par exemple, l'amande de mer (*Glycymeris glycymeris*) et la palourde rose (*Polititapes rhomboides*) se développent majoritairement dans les sédiments grossiers tels que les sables graveleux et les graviers ensablés. Une comparaison de la biomasse pour chaque espèce par rapport aux données physiques permettrait de voir leur répartition en fonction des conditions du milieu. Pour cela, l'analyse de redondance (analyse canonique), appelée RDA, prend en considération les variables explicatives comme les paramètres morphologiques des dunes et des variations expliquées comme les différentes espèces composant le benthos.

V.3. Suivis environnementaux sur le parc éolien Dieppe-Le Tréport

La présente étude a permis d'acquérir des connaissances sur la morphoydnamique naturelle des dunes présentes sur la zone du futur parc éolien Dieppe-Le Tréport. Elle montre que les dunes sont fortement dynamiques (redonner ici la moyenne des vitesses de migration de tes dunes) et que les flux sédimentaires associés sont importants (redonner la valeur moyenne des flux de pointe de flot ou jusant, et la valeur moyenne des flux résiduels annuels).

Au sein des parcs éoliens, il existe une réciprocité des effets entre morphodynamique des fonds sédimentaires et des dunes d'une part et structures éoliennes implantées d'autre part. Aussi, une fois le parc construit, un suivi de ces effets est prévu. D'après nos résultats, il semble important de suivre la déformation des dunes lors de leur passage autour des structures éoliennes (piles, câbles, ...) et l'évolution de leur vitesse de migration ainsi que les flux sédimentaires associés, et ce pour différentes conditions hydrodynamiques (marée, houle) afin de disposer d'éléments quantifiés sur :

- Les effets de charge exercés par les volumes sédimentaires sur les structures construites ;
- Les risques d'exposition des structures (e.g. câbles) ;
- Les modifications éventuelles de voies de transport des sédiments et des quantités de sédiment transférées, au sein et à l'aval-dérive de la zone du parc.

Conclusion

La compréhension de la morphodynamique du milieu dunaire marin est un sujet important à prendre en compte pour l'installation d'infrastructures en mer. Le futur parc éolien de Dieppe-Le Tréport est situé sur un prisme sédimentaire sablo-graveleux qui s'étend entre Dieppe et le détroit du Pas-de-Calais par des profondeurs de 5 à 25 m, dans un environnement soumis à de fortes marées (régime macrotidal) et par des houles de type mer du vent. Le partage des données de bathymétrie, granulométrie, courantométrie et sur le benthos aquises dans le cadre des études pour le parc éolien en mer de Dieppe Le Tréport et de précédents travaux universitaires (Pezy, 2017 ; Ferret, 2011 ; Ponsolle, 2019) ont permis de fournir une synthèse sur les caractéristiques morpho-sédimentaires et dynamiques des fonds dunaires du futur parc éolien, synthèse qui permet de disposer d'un état anté-construction de la zone. Plus particulièrement, notre étude offre de nouveaux résultats concernant les paramètres morphologiques des dunes (i), la migration de celles-ci (ii), les quantités de sédiments transportés (iii) et la relation entre ces paramètres physiques et benthiques (iv).

L'étude a permis de distinguer quatre secteurs de morphologies différentes composés de très grandes dunes présentant des longueurs de 723m, 1652m, 268m, 722m et des hauteurs de 4,77m, 5,52m, 2,65m et 3,53m, respectivement pour les secteurs sud, est, centre et ouest. Les dunes situées à l'ouest de la zone étudiée représentent des barkhanes, corps sédimentaire comprenant des valeurs de hauteurs élevées pour des valeurs de longueur d'onde faible tandis que les dunes à l'est symbolisent des corps espacés et de hauteur élevée. Outre le secteur ouest, les crêtes des dunes sont majoritairement pseudo-rectilignes avec une sinuosité faible. En outre, la forme des dunes est généralement asymétrique avec des longueurs projetées de flanc doux de 2 à 10 fois supérieures à celles des flancs raides. Cette observation est présente sur l'ensemble des dunes de la zone étudiée et démontre une polarité est.

Les vitesses de migration sont : (i) inférieures à 4 m/an et peu variables d'un secteur à l'autre et d'une dune à une autre, pour des pas de temps pluri-annuels à pluri-décennaux, mais (ii) beaucoup plus variables (comprises entre 1,18 et 27,7 m/an) pour des périodes d'1 à 3 ans. Sur des pas de temps pluriannuels ou plus longs, la vitesse de migration moyenne des dunes semble s'homogénéiser. Sur des pas de temps inférieures à 2-3 ans, elle est fluctuante. La migration des dunes suit généralement l'orientation du courant résiduel de marée (vers l'Est) mais montre parfois des directions de migration dans la direction opposée (vers l'Ouest) pour les pas de temps courts (inférieurs à 2-3 ans), vraisemblablement en réponse à des conditions météo-marines plus variables sur ces pas de temps. Un gradient est observé sur la zone d'étude, avec une vitesse de migration des dunes qui décroît de l'Ouest vers l'Est.

Les flux sédimentaires ont été calculés sur plusieurs pas de temps et selon plusieurs méthodes. La formule du « dune tracking » (Hoekstra, 2004), basée sur le volume de sédiment dunaire déplacé, montre des valeurs de flux sédimentaires résiduels allant de 3,72 ± 0,99 et 8,79 ± 4,43 $t.m.an^{-1}$ selon la période concernée (1993-2011 / 2011-2018 / 1993-2018). La formule empirique de Van Rijn (1984) basée sur les données courantométriques et granulométrique, a été utilisée pour calculer les flux sédimentaires charriés instantanés (10^{-2} à 10^{-4} $t.m.an^{-1}$), les flux résiduels à l'échelle d'un cycle de marée semi-diurne (10^{-1} à 10^{-3} $t.m.an^{-1}$) et les flux résiduels annuels (83 à 126 $t.m.an^{-1}$).Ces résultats suivent majoritairement les conclusions et les valeurs des précédents travaux réalisés par les laboratoires de recherche (Ferret 2011, Ponsolle 2019, Blanpain 2009 pour les morphologies et les valeurs de flux sédimentaires) et les bureaux d'étude (NGI et IMDC pour les migrations ; Lebrec et al., 2017 ; Pieterse, 2021). Ferret (2011) obtient des valeurs autour d'1,2 t/m/an à partir de flux résiduels calculés sur des cycles semi-diurnes de vives-eaux sans vagues (formule empirique). Blanpain (2009) quant à lui, trouve des valeurs entre 4,8 et 47,6 t/m/an, à partir de flux résiduels annuels (formule empirique). Ponsolle (2019) conclue des valeurs entre 7,1 et 141,6 à partir de flux résiduels sur des périodes d'1 à 3 ans ("dune tracking") qui sont comparables avec les flux résiduels obtenus dans la présente étude (entre 3,7 et 8,8), à partir de flux résiduels sur des périodes de 7 à 18 ans.

Des relations ont pu être mises en évidence entre les paramètres physiques (morphologie et migration des dunes, sédiment, flux sédimentaires) et des paramètres caractéristiques des communautés benthiques (richesse spécifique, abondance, biomasse). Les analyses montrent que : (i) les dunes les plus hautes sont étroites et faiblement espacées, et (ii) le flux sédimentaire et les paramètres benthiques sont fortement anti-corrélés, mais ne montrent pas de relation avec les paramètres morphologiques des dunes. Les 4 secteurs de dunes de morphologie différente, identifiés dans notre étude (secteur Ouest, Centre, Sud, Est), sont confirmées par l'analyse CAH et peuvent être décrits par les paramètres bio-morpho-sédimentaires. Dans le secteur du centre, les dunes sont soumises à une dynamique sédimentaire importante, et abritent des communautés benthiques peu abondantes et peu diversifiées. Dans le secteur est (cf classe 2), les dunes présentent de faibles valeurs de migration et de flux sédimentaire, sans signature particulière concernant les caractéristiques du benthos. Dans le secteur sud (cf classe 3), les dunes, de sédiment plus grossier, étroites, migrent vite. Dans le secteur ouest (cf classe 4), la dune présente de fortes valeurs d'abondance, de biomasse et de richesse spécifique du benthos. Il serait intéressant de proposer une nouvelle étude consacrée uniquement à la relation entre les différentes variables du milieu (benthiques et physiques) afin de prendre en compte plus de paramètres selon une même chronologie.

Dans le cadre des suivis du futur parc éolien, il sera important de suivre la déformation des dunes lors de leur passage autour des structures éoliennes et l'évolution de leur vitesse de migration ainsi que les flux sédimentaires associés, et ce pour différentes conditions hydrodynamiques (marée, houle) afin de disposer d'éléments quantifiés sur : (i) les effets de charge (volumes sédimentaires) sur les structures construites, (ii) les risques d'exposition des structure, ou encore (iii) les modifications éventuelles de voies de transport des sédiments et des quantités de sédiment transférées, au sein et à l'aval-dérive de la zone du parc.

Liste des références bibliographiques

ALLEN, J.R.L., 1980. Sand waves: A model of origin and internal structure. Sedimentary Geology, volume 26, n° 4. p. 281-328.

AMOS, C.L., ET KING, E.L., 1984. Bedforms of the Canadian eastern seaboard: A comparison with global occurrences. Marine Geology, volume 57, n° 1. p. 167-208.

AUFFRET ET AL., 1985. La Manche orientale. Norois, volume 127, n° 1. p. 464-464.

AUGRIS, C., CLABAUT, P., DRÉVÈS, L., LA TORRE, Y. DE, ET INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE POUR L'EXPLOITATION DE LA MER (EDS)., 2004. Evolution morpho-sédimentaire du domaine littoral et marin de la Seine-Maritime. Plouzané : Brest : Ifremer : Diffusion, ALT Brest. 159 p. ISBN 978-2-84433-132-8.

BELDERSON, R.H., JOHNSON, M.A., ET KENYON, N., 1982. Bedforms. p. 27-57.

BELLESORT, B., ET MIGNIOT, C., 1986. Catalogue sédimentologique des côtes françaises. Côtes de la Manche et de l'Atlantique, de la Baie du Mont-Saint-Michel à la frontière espagnole. p. 135-230.

BERNÉ, S., 1991. Architecture et dynamique des dunes tidales : exemples de la marge atlantique française. These de doctorat : Lille 1.

BERNE, S., ALLEN, G., AUFFRET, J.P., CHAMLEY, H., DURAND, J., ET WEBER, O., 1989. Essai de synthèse sur les dunes hydrauliques géantes tidales actuelles. Bull. Soc. Geol. Fr., volume 6, p. 1155-1160.

BEST, J., 2005. Kinematics, Topology and Significance of Dune-Related Macroturbulence: Some Observations from the Laboratory and Field. *In*: Fluvial Sedimentology VII. John Wiley & Sons, Ltd. p. 41-60.

BISQUAY, H., 2006. Sondeurs multifaisceaux. Comment ça marche ?

BLANPAIN, O., 2009. Dynamique sédimentaire multiclasse : de l'étude des processus à la modélisation en Manche. These de doctorat : Rouen.

BOILLOT, G., ET MUSELLEC, P., 1975. Origine de la Manche d'après une carte géologique au 1:1000000e. p. 21-27.

BOLLE, A., MATHYS, M., ET HAERENS, P., 2013. How the Belgian wind farm business made us discover the challenging environment of marine sand dunes. p. 45-52.

Camenen B., Larroudé P. (2003).*Comparison of sediment transport formulae for a coastal environment.* Coastal Eng., 48 : 111-132.

CARLING, WILLIAMS, GÖLZ, ET KELSEY., 2000. The morphodynamics of fluvial sand dunes in the River Rhine, near Mainz, Germany. II. Hydrodynamics and sediment transport. Sedimentology, volume 47, n° 1. p. 253-278.

CARTER, L., GAVEY, R., TALLING, P., ET LIU, J., 2014. Insights into Submarine Geohazards from Breaks in Subsea Telecommunication Cables. Oceanography, volume 27, n° 2. p. 58-67.

CHAMLEY, H., 1987. Sédimentologie. Dunod. 175 p. ISBN 978-2-04-012337-6.

CLAUBAUT, P., ET DAVOULT, D., 1989. Interactions biocénoses benthiques-sédiment en contexte infratidal à haute énergie (Pas-de-Calais, France). Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, volume 308, p. 1249-1356.

COLEMAN, S.E., ET NIKORA, V.I., 2011. Fluvial dunes: Initiation, characterization, flow structure. Earth Surface Processes and Landforms, volume 36, n° 1. p. 39-57.

COSTELLO, W.R., ET SOUTHARD, J.B., 1981. Flume experiments on lower-flow-regime bed forms in coarse sand. Journal of Sedimentary Research, volume 51, n° 3. p. 849-864.

DAUVIN, J.-C., 1997. Les biocénoses marines et littorales françaises des côtes atlantiques, Manche et Mer du Nord. Synthèse, menaces et perspectives - Publications scientifiques du Muséum national d'Histoire naturelle, Paris [en ligne].359 p.

DAUVIN, J.-C., 2012. Are the eastern and western basins of the English Channel two separate ecosystems? Marine Pollution Bulletin, volume 64, n° 3. p. 463-471.

DAUVIN, J.-C., ALIZIER, S., BESSINETON, C., CUVILLIEZ, A., CARTER, L., GARCIA, C., JANSON, A.-L., JOURDE, J., LESOURD, S., LOZACH, S., MORIN, J., RUELLET, T., SPILMONT, N., ET TOUS RUIS, A., 2010. Le benthos de l'estuaire de la Seine. p. 76.

DEWEZ, S., 1988. Sédimentation et dynamique en Manche orientale (de la Baie d'Authie au Cap d'Alprech). These de doctorat : Lille 1.

DUPONT, JP. 2014. Relations entre Bios et phénomènes sédimentaires intertidaux: le modèle de la baie de Somme., 1981. S. l. : s. n. 1 p.

EHRHOLD, A., 1999. Dynamique de comblement d'un bassin sédimentaire soumis à un régime mégatidal : exemple de la baie du Mont-Saint-Michel. These de doctorat : Caen.

ERARD, C., 1997. Dauvin, J.-C. (ed.). — Les biocénoses marines et littorales françaises des côtes Atlantique, Manche et mer du Nord. Synthèse, menaces et perspectives. Laboratoire de Biologie des Invertébrés marins et Malacologie (BIMM) et Service du Patrimoine naturel (SPN), Institut d'Ecologie et Gestion de la Biodiversité (IEGB), Muséum national d'Histoire naturelle, Paris. 1997. Revue d'Écologie (La Terre et La Vie), volume 52, n° 2. p. 189-190.

ERNSTSEN, V., NOORMETS, R., WINTER, C., BARTHOLOMÄ, A., FLEMMING, B., ET BARTHOLDY, J., 2004. Development of subaqueous barchan dunes due to lateral grain size variability. *In*: Marine Sandwave and River Dune Dynamics II. 1 Avril 2004,

FERRET, Y., 2011. Morphodynamique de dunes sous-marines en contexte de plate-forme mégatidale (Manche orientale). Approche multi-échelles spatio-temporelles. 354 p., Thèse de doctorat : Université de Rouen

FLEMMING, B., 1988. Process and pattern of sediment mixing in a microtidal coastal lagoon along the west coast of South Africa. *In*: 1 Janvier 1988, p. 275-288.

FOVEAU, A., 2009. HABITATS ET COMMUNAUTES BENTHIQUES DU BASSIN ORIENTAL DE LA MANCHE : ETAT DES LIEUX AU DEBUT DU XXIème SIECLE. 308 p.

GARLAN, T., 2004. Apports de la modélisation dans l'étude de la sédimentation marine récente. 181 p., Université de Lille 1

GRENARD-GRAND, E., TESSIER, B., LE BOT, S., ET PONSOLLE, J., 2021. Stocks sédimentaires subtidaux le long des côtes normandes. Distribution et mobilité depuis le XIXème siècle. Journées Unité Halieutique Manche Mer du Nord, IFREMER, 16 au 18 Novembre 2021, Mont Saint Aignan.

GROCHOWSKI, N.T.L., COLLINS, M.B., BOXALL, S.R., ET SALOMON, J.C., 1993. Sediment transport predictions for the English Channel, using numerical models. Journal of the Geological Society, volume 150, p. 683-695.

GUILCHER, A., 1951. La formation de la mer du Nord, du Pas-de-Calais et des plaines maritimes environnantes. Géocarrefour, volume 26, n° 3. p. 311-329.

HAMDI ET AL., 2010. Carte des habitats physiques selon la typologie EUNIS dans... *In* : ResearchGate [en ligne]. Date de consultation : 06/09/2023. Disponible sur : <https://www.researchgate.net/figure/Carte-des-habitats-physiques-selon-la-typologie-EUNIS-dans-le-bassin-oriental-de-la_fig7_329116106>.

HOEKSTRA, P., BELL, P., VAN SANTEN, P., ROODE, N., LEVOY, F., ET WHITEHOUSE, R., 2004. Bedform migration and bedload transport on an intertidal shoal. Continental Shelf Research, volume 24, n° 11. p. 1249-1269.

HUANG, Y., BAO, Y., ZHANG, M., LIU, C., ET LU, P., 2015. Analysis of the mechanism of seabed liquefaction induced by waves and related seabed protection. Natural Hazards, volume 79, n° 2. p. 1399-1408.

HURREL, J.W., 1995. Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and Precipitation | Science. , volume 269, p. 676-679.

LANDEGHEM, K.J.J.V., WHEELER, A.J., MITCHELL, N.C., ET SUTTON, G., 2009. Variations in sediment wave dimensions across the tidally dominated Irish Sea, NW Europe. Marine Geology, volume 263, n° 1-4. p. 108-119.

LANGHORNE, D.N., 1973. A sandwave field in the Outer Thames Estuary, Great Britain. Marine Geology, volume 14, n° 2. p. 129-143.

LAPIERRE, F., BOILLOT, G., DUNHAM, K.C., ET SMITH, A.J., 1997. Contribution à l'etude géologique et sédimentologique de la Manche orientale. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, volume 279, n° 1288. p. 177-187.

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. phdthesis : Université du Littoral Côte d'Opale. 295 p, Thèse de doctorat

LE BOT, E., 2001. Morphodynamique de dunes sous-marines sous influence des marées et des tempêtes. Processus hydro-sédimentaires et enregistrement. Exemple du Pas-de-Calais. Université de Lille. 311 p., Thèse de doctorat

LE BOT, S., ET TRENTESAUX, A., 2004. Types of internal structure and external morphology of submarine dunes under the influence of tidal and wind-driven processes (Dover Strait, Northern France). p. 143-168.

LE HIR, P., 2008. Aide mémoire de dynamique sédimentaire. Brest : Ifremer. 74 p.

LEBREC, U., VANNESTE, M., BANDINI-MAEDER, A., RODRIGUES, A.B., ET VANNESTE, M., 2017. Ground Model Update & Geotechnical Scoping. NGI. 201 p.

MARE, M.F., 1942. A study of a marine benthic community with special reference to the micro-organisms. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, volume 25, n° 3. p. 517-554.

MÉTÉO FRANCE., 2020. Tempêtes et changement climatique | Météo-France.

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. These de doctorat : Université de Rouen.

NÉMETH, A.A., 2003. Modelling offshore sand waves. [en ligne] Date de consultation : 05/09/2023. Disponible sur : <https://research.utwente.nl/en/publications/modelling-offshore-sand-waves>.

OSPAR COMMISSION., 2008. Assessment of the Environmental Impact of Offshore Wind-Farms | Tethys.35 p.

PEZY, J.-P., 2017. Approche écosystémique d'un futur parc éolien en Manche orientale : exemple du site de Dieppe-Le Tréport.

PIETERSE, A., 2021. RA21.111_SeabedMobilityAnalysis-update_v3.0. IMDC. 40 p.

PONSOLLE, J., 2019. Les dunes sous-marines comme marqueurs du transfert sédimentaire large-littoral. Exemple du prisme sédimentaire picard (bassin oriental de la Manche). Université de Rouen. 67 p. Mémoire de Master 2 GEHYD

ROBERTS, T., 2015. Measurement Campaign for Le Tréport Offshore Wind Zone. Fugro. 29 p.

RUBIN, D.M., ET MCCULLOCH, D.S., 1980. Single and superimposed bedforms: a synthesis of San Francisco Bay and flume observations. Sedimentary Geology, volume 26, n° 1. p. 207-231.

SALOMON, J.C., GUEGUENIAT, P., ET BRETON, M., 1991. Mathematical Model of 125Sb Transport and Dispersion in the Channel. *In*: KERSHAW, P.J., WOODHEAD, D.S. Radionuclides in the Study of Marine Processes. Dordrecht : Springer Netherlands. p. 74-83.

SCHMITT, T., ET MITCHELL, N.C., 2014. Dune-associated sand fluxes at the nearshore termination of a banner sand bank (Helwick Sands, Bristol Channel). Continental Shelf Research, volume 76, p. 64-74.

SHOM., 1986. Courants de marée dans la Manche et sur les côtes françaises de l'Atlantique / Service hydrographique de la marine.287 p.

SNELGROVE, P., ET BUTMAN, C.A., 1994. Animal-sediment relationships revisited: cause versus effect. Oceanography and Marine Biology [en ligne]

SOULSBY, R., 1997. Dynamics of Marine Sands: A Manual for Practical Applications. Thomas Telford. 280 p. ISBN 978-0-7277-2584-4.

TAORMINA, B., BALD, J., WANT, A., THOUZEAU, G., LEJART, M., DESROY, N., ET CARLIER, A., 2018. A review of potential impacts of submarine power cables on the marine environment: Knowledge gaps, recommendations and future directions. Renewable and Sustainable Energy Reviews, volume 96, p. 380-391.

TERWINDT, J.H.J., 1971. Sand waves in the southern bight of the North Sea. Marine Geology, volume 10, n° 1. p. 51-67.

TORRES, I., 2018. IH-DATA. IH Cantabria. 7 p.

TRENTESAUX, A., MALENGROS, D., LEROY, P., BABONNEAU, N., RABINEAU, M., SAHABI, M., MAAD, N., ET MHAMDI, N., 2008. Uncommonly-deep giant dunes offshore the Moroccan Atlantic Coast.

Vah, M., Jarno, A., Le Bot, S., Ferret, Y., Marin, F. (2020). Bedload transport and bedforms migration under sand supply limitation. *Environ Fluid Mech* 20, 1031–1052.

VAN DER MARK, C.F., BLOM, A., ET HULSCHER, S.J.M.H., 2008. Quantification of variability in bedform geometry. Journal of Geophysical Research, volume 113, n° F3. p. F03020.

VAN RIJN, L.C., 1984. Sediment transport, part I: bed load transport. Journal of hydraulic engineering, volume 110, n° 10. p. 1431-1456.

VASLET, D., LARSONNEUR, C., ET AUFFRET, J.P., 1979. Carte des sédiments superficiels de la Manche=Map of the superficial sediments of the English Channel. 1:500000. · GéoProdig, portail d'information géographique.

WARWICK, R.M., ET CLARKE, K.R., 1984. Species size distributions in marine benthic communities. Oecologia, volume 61, n° 1. p. 32-41.

WILCOCK, P.R., ET CROWE, J.C., 2003. Surface-based Transport Model for Mixed-Size Sediment.

WILHELMSSON, D., 2010. Greening blue energy : identifying and managing the biodiversity risks and opportunities of offshore renewable energy [en ligne].

WU, W., WANG, S.S.Y., ET JIA, Y., 2000. Nonuniform sediment transport in alluvial rivers. Journal of Hydraulic Research, volume 38, n° 6. p. 427-434.

YALIN, M.S., 1963. An Expression for Bed-Load Transportation. Journal of the Hydraulics Division, volume 89, n° 3. p. 221-250.

Webographie

FRANCE ENERGIES MARINES., 2023. Éolien posé. *In* : France Energies Marines [en ligne]. Date de consultation : 05/09/2023. Disponible sur : <https://www.france-energies-marines.org/eolien-pose/>.

GIS EMDT., 2020. Lancement du Groupement d'Intérêt Scientifique (GIS) Éolien en Mer. *In* : Éoliennes en Mer Dieppe Le Tréport [en ligne].

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE., 2023. Eolien en mer. *In* : Ministères Écologie Énergie Territoires [en ligne]. Date de consultation : 05/09/2023. Disponible sur : <https://www.ecologie.gouv.fr/eolien-en-mer-0>.

Annexes

Table des Annexes

Annexe A : Carte des habitats physiques selon la Classification EUNIS du bassin oriental de la manche (modifié d'après Hamdi et al., 2010 in Pezy, 2017

Annexe B : Classification de Larsonneur (1982)

Annexe C : Cartes bathymétriques acquises pour l'étude (A : 1993, B : 2007, C : 2008, D : 2011, E : 2012, F : 2014, G : 2015, H : 2016, I : 2018, J : 2020

Annexe D : Carte du tri des grains issue des données de la thèse de Pezy (2017

Annexe E : Carte de la moyenne des grains issue des données de la thèse de Pezy (2017

Annexe F : Morphologie par secteur avec profil d'élévation

Annexe G : Moyenne des paramètres morphologiques et migrations par dune récupérés sur chaque dune (dans l'ordre : longueur d'onde, hauteur, facteur de forme, migration, longueur projetée du flanc raide, longueur projetée du flanc doux, sinuosité)

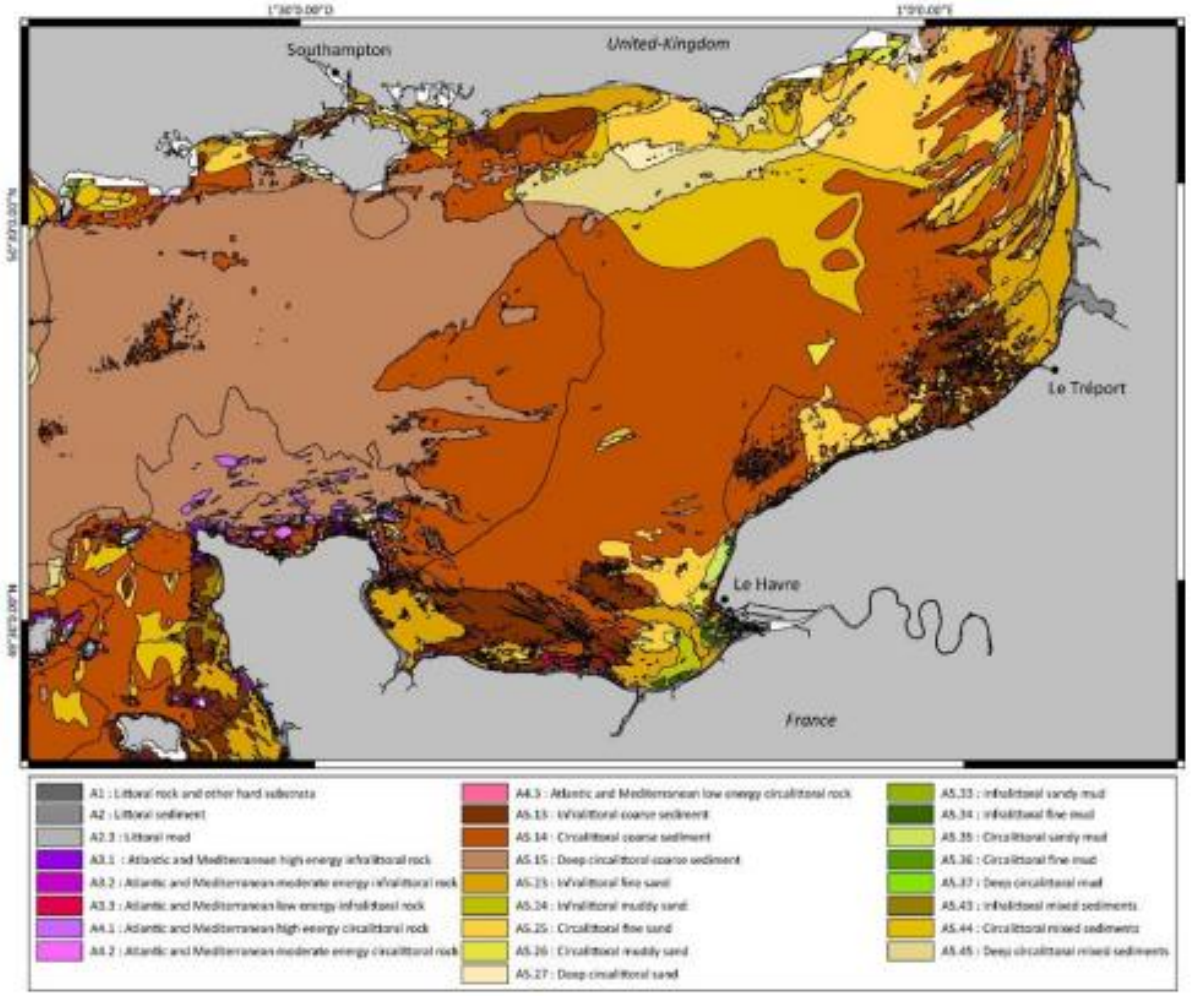
Annexe H : Méthodologie d'extraction des lignes de crêtes sous le logiciel Paramdunes

Annexe I : Méthodologie d'extraction manuelle des distances entre les lignes de crête des levés de 2011 et de 2018 pour calcul des migrations

Annexe J : Régression linéaire des vitesses de courant selon la hauteur sur la colonne d'eau sur différentes conditions de marée à un instants t (*A : pour la pointe de flot, B : pour la pointe de jusant, C : date de récupération des conditions hydrodynamiques) (ME : mortes-Eaux, MEH : mortes-eaux avec houle, Moy : moyennes-eaux, MoyH : moyennes-eaux avec houle, VE : vives-eaux, VEH : vives-eaux avec houle)*

Annexe K : Relation Hauteur/Longueur sur les quatre secteurs étudiés et selon les trois années des levés étudiés (1993, 2011, 2018)

Annexe A : Carte des habitats physiques selon la Classification EUNIS du bassin oriental de la manche (modifié d'après Hamdi et al., 2010 in Pezy, 2017)



Annexe B : Classification de Larsonneur (1982)

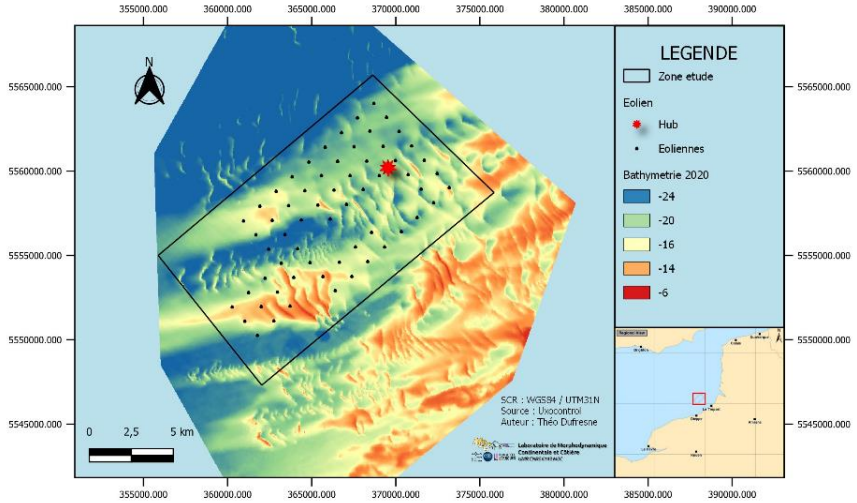
SUBDIVISIONS PRINCIPALES	CAILLOUTIS OU COQUINITES L < 5% - GAL + COQ ≥ 50%		GRAVIERS L < 5% - GAL + COQ < 50% Md ≥ 2 mm		SABLES L < 5% - S + L > 50% - Md < 2 mm					SÉDIMENTS VASEUX L ≥ 5%		
SÉDIMENTS LITHOCLASTIQUES	CAILLOUTIS LITHOCLASTIQUES		GRAVIERS LITHOCLASTIQUES		SABLES LITHOCLASTIQUES					SÉDIMENTS VASEUX		
					15% < Sup. à 2 mm < 50%		Sup. à 2 mm < 15% FRACTION DOMINANTE					
calcaire < 30%	GAL+COQ≥70% CL1 a C.litho.	GAL+COQ<70% CL1 b C. litho-graveleux (sable-graveleux)	GAL+COQ≥15% GL1 a Gr. litho-caillouteux (coquillier)	GAL+COQ<15% GL1 b Gr. litho.	GAL+COQ≥GR SL1 a S.litho.cail.(coquillier)	GR>GAL+COQ SL1 b * S.litho. graveleux	Sup. à 0,5 mm SL1 c * S.litho.grossier	de 0,2 à 0,5 mm SL1 d S.litho.fin	de 0,05 à 0,2 mm SL1 e Sablon. litho.	L < 25% VL1 a Sed. (sable) litho-vaseux (silto-argileux) ∅	25% ≤ L < 75% VL1 b Vase (silts.arg.) sableuse (grav. ou cail.) ∅	L ≥ 75% VL1 c Vase (silto-argileuse) ∅
SÉDIMENTS LITHO-BIOCLASTIQUES	CAILLOUTIS LITHO-BIOCLASTIQUES		GRAVIERS LITHO-BIOCLASTIQUES		SABLES LITHO-BIOCLASTIQUES					SEDIMENTS VASEUX CALCAREUX		
					15% ≤ Sup. à 2 mm < 50%		Sup. à 2 mm < 15% FRACTION DOMINANTE					
30% ≤ calcaire < 50%	GAL+COQ≥70% CL2 a C.litho-bio. coquillier	GAL+COQ<70% CL2 b C.litho-bio.graveleux (sab.grav.)	GAL+COQ≥15% GL2 a Gr. litho.bio.coquillier ou caillouteux	GAL+COQ<15% GL2 b * Gr. litho.bio.	GAL+COQ≥GR SL2 a S.litho-bio.caillouteux ou coquillier	GR>GAL+COQ SL2 b * S.litho.bio-graveleux	Sup. à 0,5 mm SL2 c * S.litho-bio.grossier	de 0,2 à 0,5 mm SL2 d S.litho.bio.fin	de 0,05 à 0,2 mm SL2 e Sablon litho. bio.	L < 25% VL2 a Sed. (sable) litho-bio. vaseux (silto-argileux) ∅	25% ≤ L < 75% VL2 b Marne sableuse ∅ (grav. ou cail.) ou coq.	L ≥ 75% VL2 c Marne ∅
SÉDIMENTS BIO-LITHOCLASTIQUES	COQUINITES LITHOCLASTIQUES		GRAVIERS BIO-LITHOCLASTIQUES		SABLES BIO-LITHOCLASTIQUES					SEDIMENTS CARBONATES VASEUX		
					15% ≤ Sup. à 2 mm < 50%		Sup. à 2 mm < 15% FRACTION DOMINANTE					
50% ≤ calcaire < 70%	COQ+GAL≥70% CB1 a Coq.litho.	COQ+GAL<70% CB1 b Coq.litho.grav. (sab.grav.)	COQ+GAL≥15% GB1 a Gr.bio.litho.coquillier (caillouteux)	COQ+GAL<15% GB1 b * Gr. litho.bio.	COQ+GAL>GR SB1 a * S.bio litho. coq. (caillouteux)	GR>COQ+GAL SB1 b * S. bio litho graveleux	Sup. à 0,5 mm SB1 c * S.bio. litho. grossier	de 0,2 à 0,5 mm SB1 d S. bio. fin	de 0,05 à 0,2 mm SB1 e Sablon bio-litho.	L < 25% VB1 a * Sed. (sable) bio-litho. vaseux (silto-argileux) ∅	25% ≤ L < 75% VB1 b * Marne calcaire sableuse (gra. ou cail. ou coq.)	L ≥ 75% VB1 c Marne calcaire
SÉDIMENTS BIOCLASTIQUES	COQUINITES		GRAVIERS BIOCLASTIQUES		SABLES BIOCLASTIQUES					SEDIMENTS CALCAIRES VASEUX		
					15% ≤ Sup. à 2 mm < 50%		Sup. à 2 mm < 15% FRACTION DOMINANTE					
calcaire ≥ 70%	COQ+GAL≥70% CB2 a Coquinite	COQ+GAL<70% CB2 b Coq. gravel (sable. grav.)	COQ+GAL>15% GB2 a Gr. bio. coquillier	COQ+GAL<15% GB2 b * Gr. bio.	COQ>GR SB2 a * S.bioclastique coquillier	GR>COQ SB2 b * S. bio. graveleux	Sup. à 0,5 mm SB2 c * S.bio. grossier	de 0,2 à 0,5 mm SB2 d S.bio. fin	de 0,05 à 0,2 mm SB2 e Sablon bio.	L < 25% VB2 a * Sed.(sable) bio-vaseux (silto-argileux) ∅	25% ≤ L < 75% VB2 b * Boue calcaire sableuse (grav. ou coq.)	L ≥ 75% VB2 c Boue calcaire

GAL = Galets, COQ ≥ 20mm = Coquilles, GR = Graviers, S = Sables, L = Lutites,
∅ Sédiments silto-argileux, argilo-silteux ou argileux.

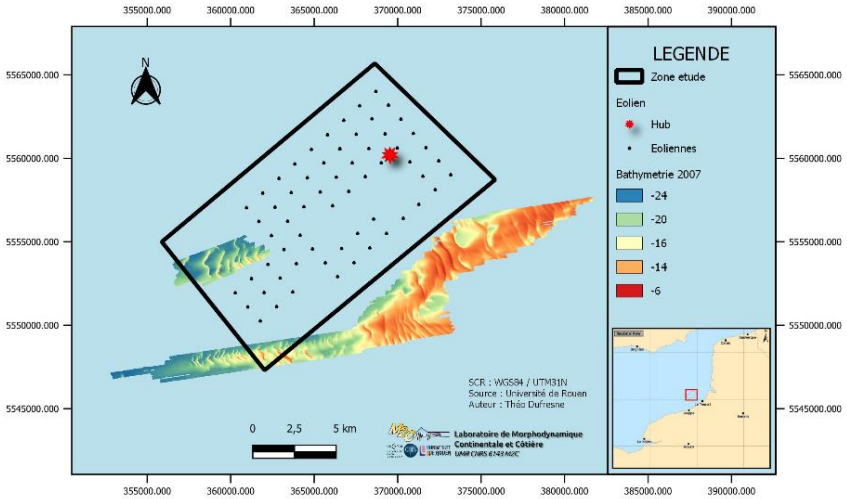
* Sédiments pouvant en outre être qualifiés de zoogènes (z) ou de phycogènes (p)

Annexe C : Cartes bathymétriques acquises pour l'étude (A : 1993, B : 2007, C : 2008, D : 2011, E : 2012, F : 2014, G : 2015, H : 2016, I : 2018, J : 2020)

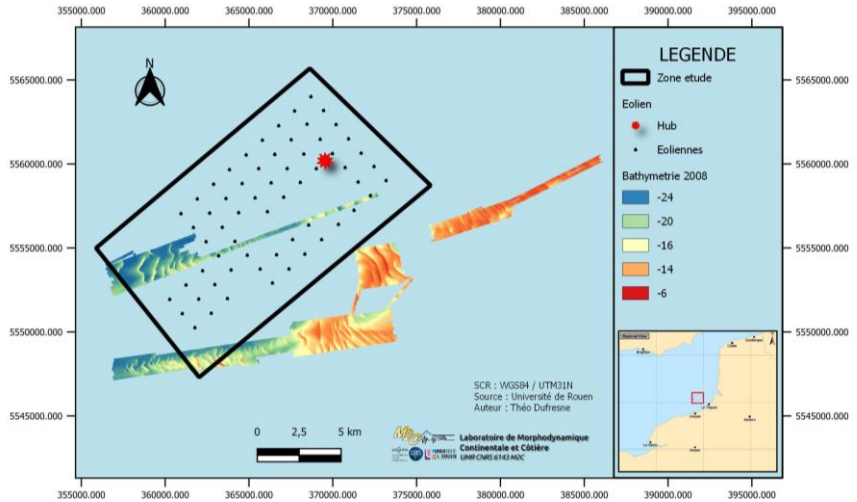
A



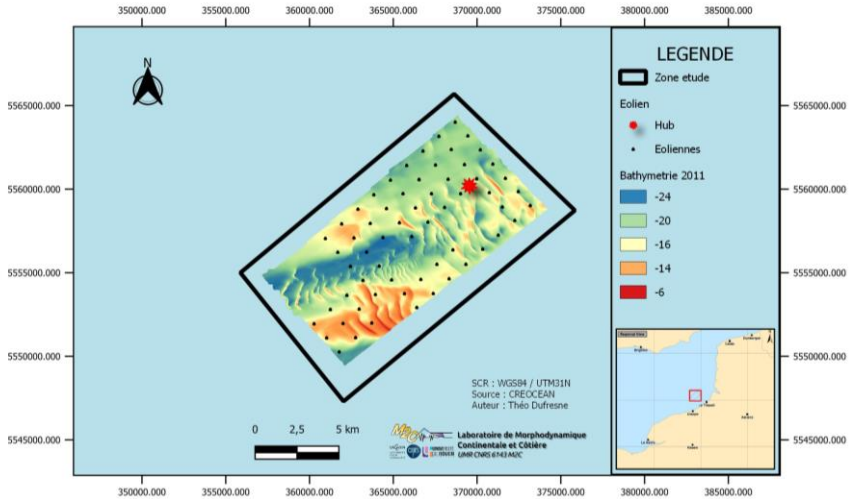
B



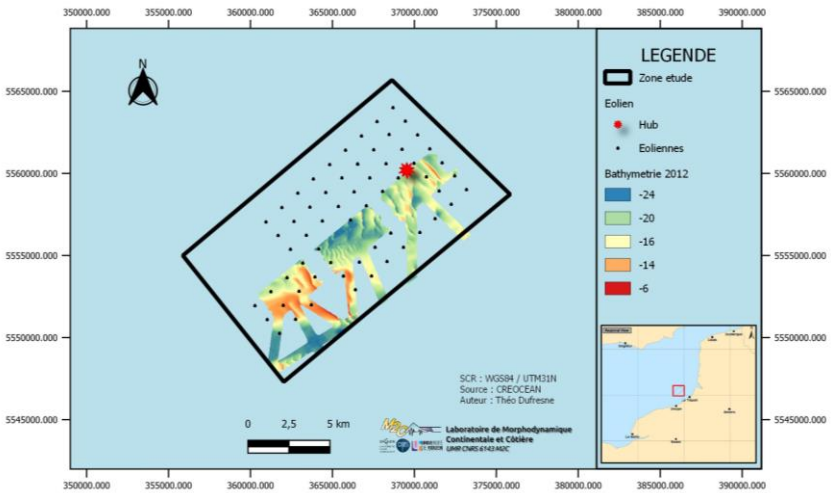
C



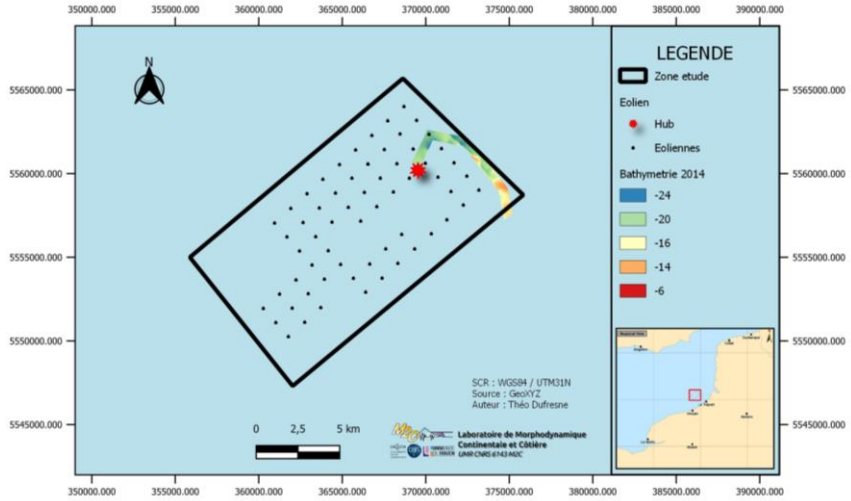
D



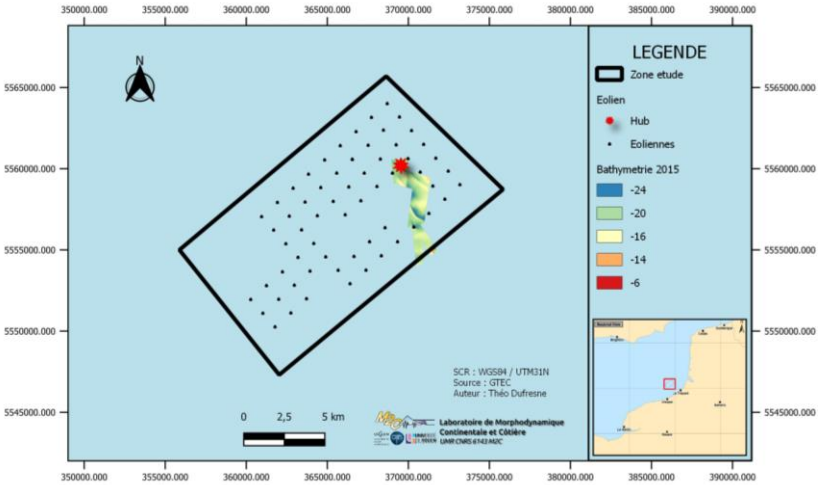
E


LEGENDE
Zone etude
Eolien
Hub
Eoliennes
Bathymetrie 2012
-24
-20
-16
-14
-6
SCR : WGS84 / UTM31N
Source : CREOCEAN
Auteur : Théo Dufresne
0 2,5 5 km
Laboratoire de Morphodynamique Continentale et Côtière

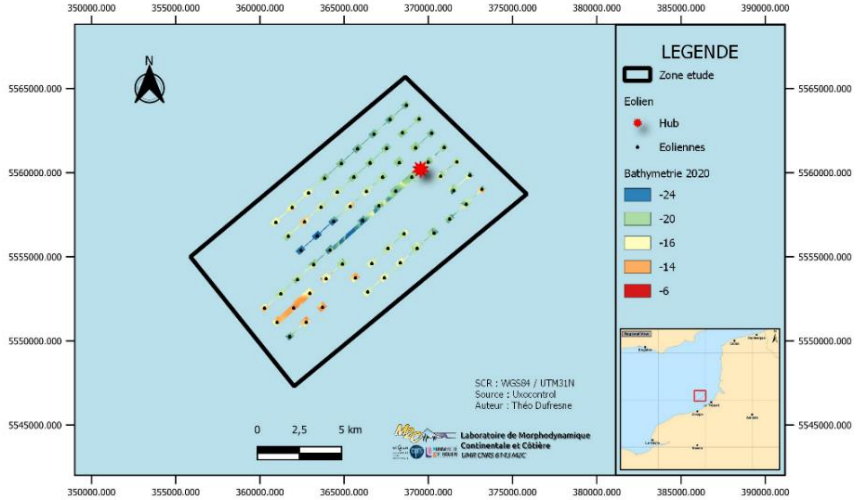
F


LEGENDE
Zone etude
Eolien
Hub
Eoliennes
Bathymetrie 2014
-24
-20
-16
-14
-6
SCR : WGS84 / UTM31N
Source : GeoXYZ
Auteur : Théo Dufresne
0 2,5 5 km
Laboratoire de Morphodynamique Continentale et Côtière

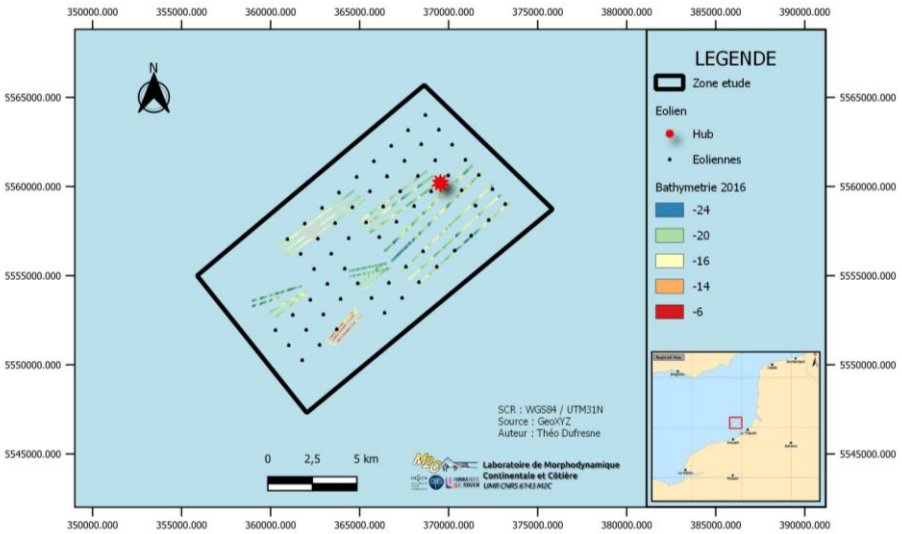
G


LEGENDE
Zone etude
Eolien
Hub
Eoliennes
Bathymetrie 2015
-24
-20
-16
-14
-6
SCR : WGS84 / UTM31N
Source : GTEC
Auteur : Théo Dufresne
0 2,5 5 km
Laboratoire de Morphodynamique Continentale et Côtière

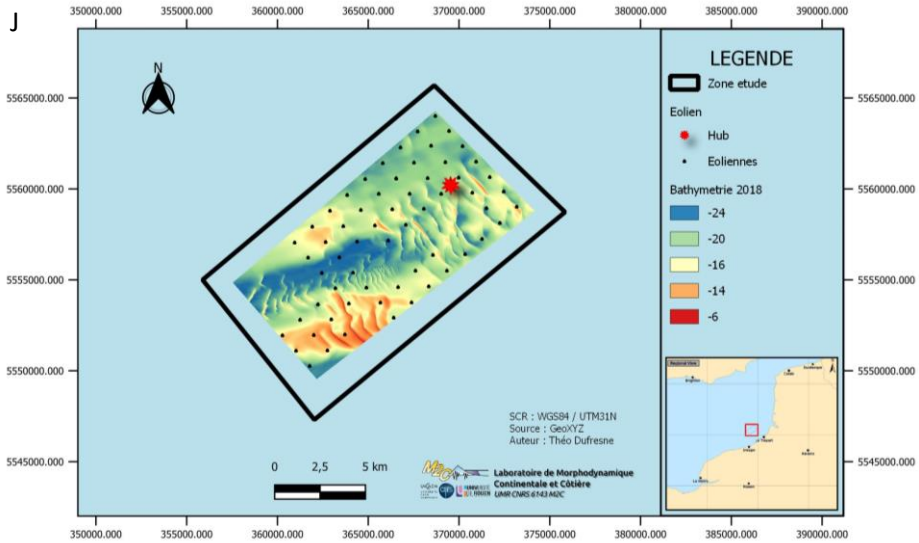
H


LEGENDE
Zone etude
Eolien
Hub
Eoliennes
Bathymetrie 2020
-24
-20
-16
-14
-6
SCR : WGS84 / UTM31N
Source : Uxocontrol
Auteur : Théo Dufresne
0 2,5 5 km
Laboratoire de Morphodynamique Continentale et Côtière

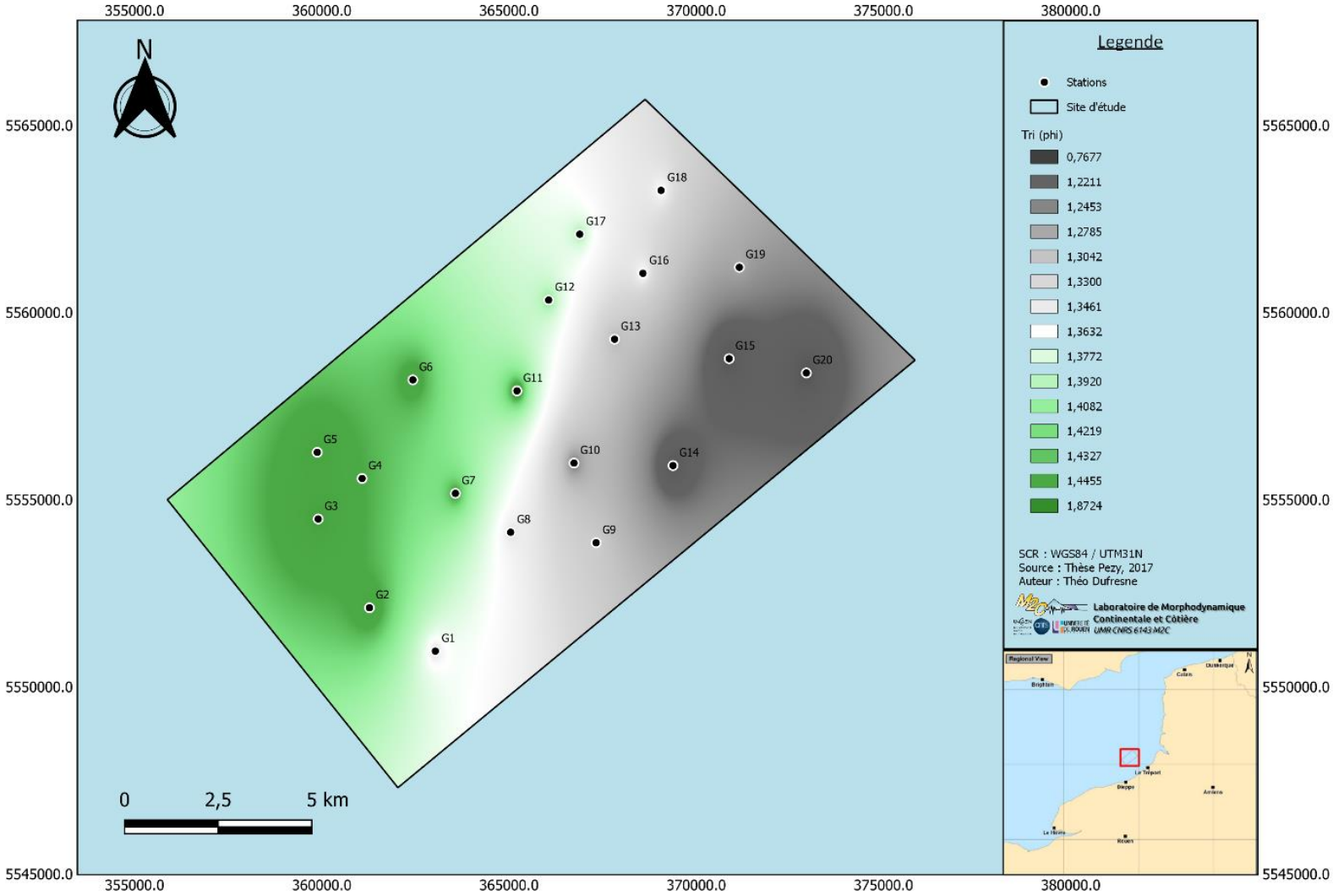
I


LEGENDE
Zone etude
Eolien
Hub
Eoliennes
Bathymetrie 2016
-24
-20
-16
-14
-6
N
SCR : WGS84 / UTM31N
Source : GeoXYZ
Auteur : Théo Dufresne
0 2,5 5 km
Laboratoire de Morphodynamique Continentale et Côtière
UMR CNRS 6143 M2C
350000.000
355000.000
360000.000
365000.000
370000.000
375000.000
380000.000
385000.000
390000.000
5565000.000
5560000.000
5555000.000
5550000.000
5545000.000

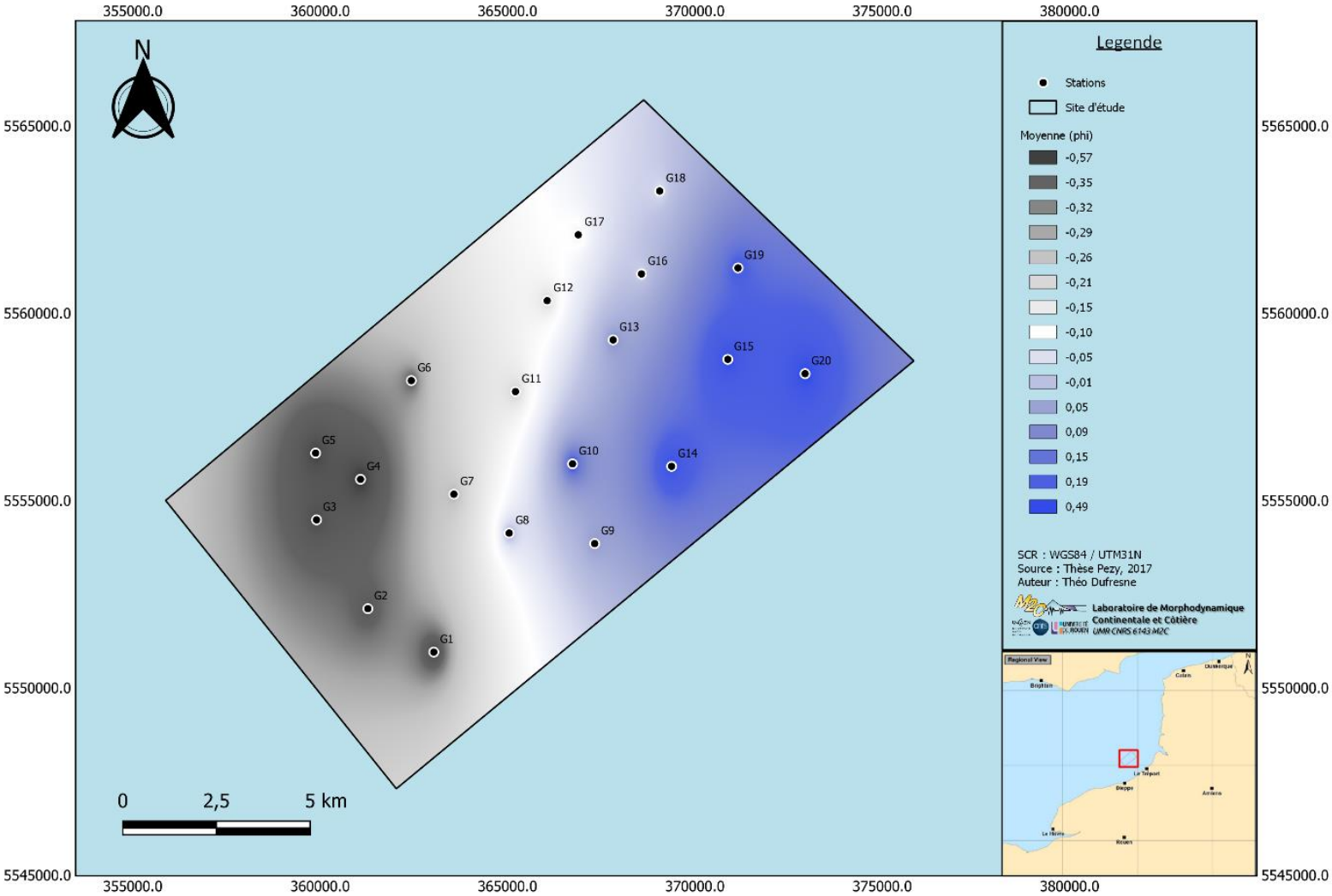
J


LEGENDE
Zone etude
Eolien
Hub
Eoliennes
Bathymetrie 2018
-24
-20
-16
-14
-6
N
SCR : WGS84 / UTM31N
Source : GeoXYZ
Auteur : Théo Dufresne
0 2,5 5 km
Laboratoire de Morphodynamique Continentale et Côtière
UMR CNRS 6143 M2C
350000.000
355000.000
360000.000
365000.000
370000.000
375000.000
380000.000
385000.000
390000.000
5565000.000
5560000.000
5555000.000
5550000.000
5545000.000

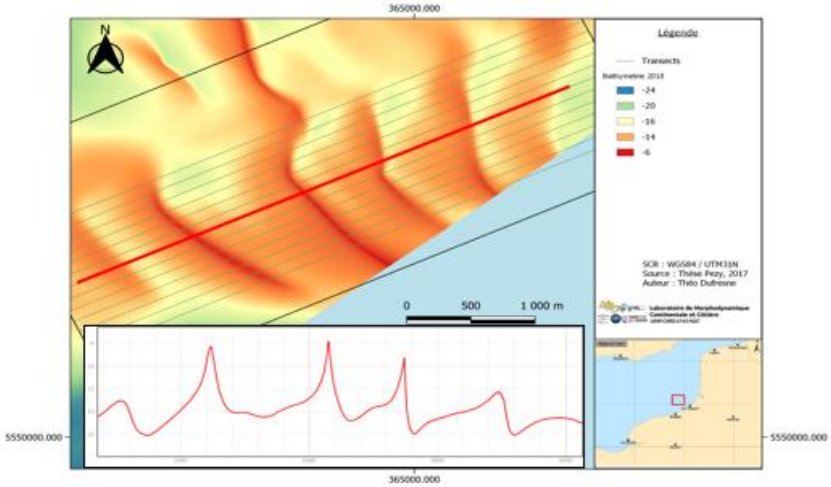
Annexe D : Carte du tri des grains issue des données de la thèse de Pezy (2017)



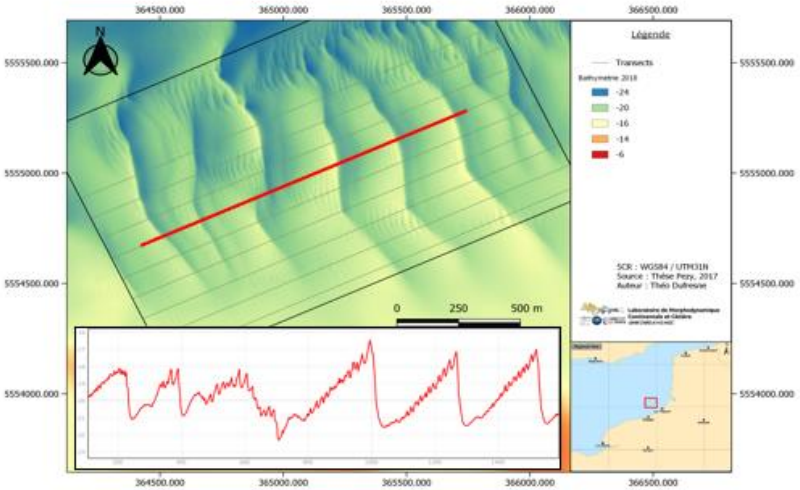
Annexe E : Carte de la moyenne des grains issue des données de la thèse de Pezy (2017)



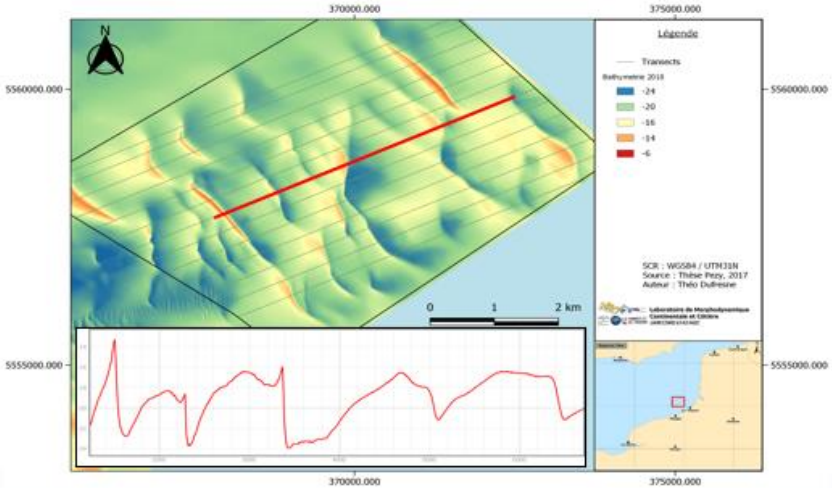
Annexe F : Morphologie par secteur avec profil d'élévation



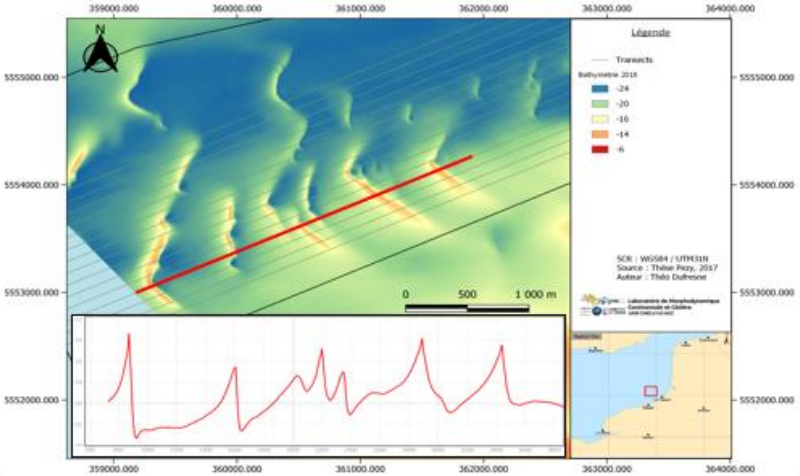
Secteur sud : Barkhanes en champs



Secteur centre : petites dunes en champs



Secteur est : Dunes 2D géantes



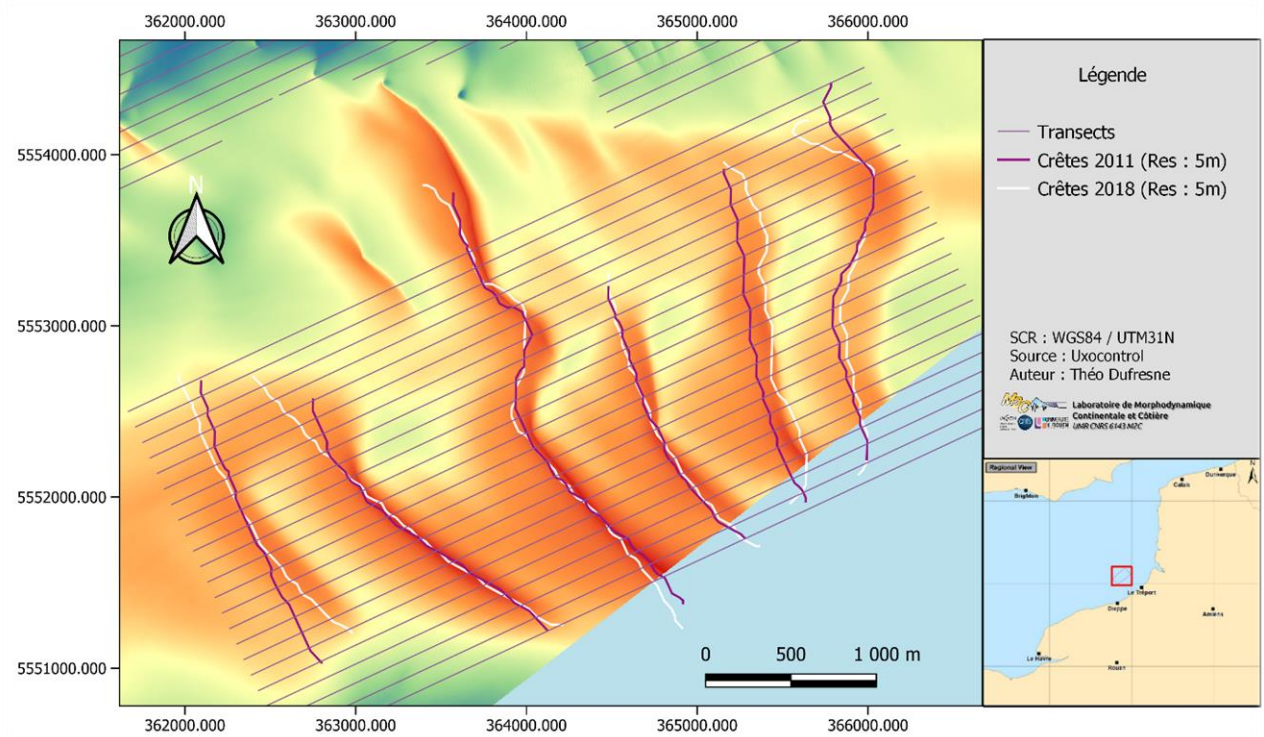
Secteur ouest : Barkhanes isolées

Annexe G : Moyenne des paramètres morphologiques et migrations par dune récupérés sur chaque dune (dans l'ordre : longueur d'onde, hauteur, facteur de forme, migration, longueur projetée du flanc raide, longueur projetée du flanc doux, sinuosité)

Secteur	Dune	λ (m)	H (m)	f (m)	c (m/s)	Lr (m)	Ld (m)	Sinuosité
S	D1	626,78	2,74	0,44	3,10	202,52	344,83	1,07
	D2	858,02	6,47	0,51	2,28	370,00	510,42	1,09
	D3	798,19	5,98	0,52	1,08	208,83	619,77	1,07
	D5	658,59	4,28	0,43	2,93	154,07	421,65	1,06
	D6	674,64	4,37	0,54	2,92	185,04	543,99	1,12
E	D8	1673,81	6,68	0,40	2,09	136,57	1213,18	1,05
	D9	1541,83	5,04	0,41	1,17	220,68	1046,86	1,11
	D13	1726,26	5,55	0,55	1,87	121,33	1773,67	1,10
	D14	1742,31	4,55	0,41	1,74	253,13	1128,27	1,12
	D15	1577,14	5,79	0,56	2,72	227,38	1546,31	1,04
C	D19	263,12	2,43	0,48	2,97	62,82	179,03	1,07
	D20	230,85	1,81	0,41	3,34	63,42	126,96	1,04
	D21	282,20	2,61	0,43	3,65	81,65	161,21	1,06
	D22	308,43	3,18	0,50	2,02	85,25	220,98	1,10
	D23	287,90	3,16	0,55	2,58	67,42	246,24	1,07
	D24	250,19	2,61	0,47	2,52	61,99	174,10	1,08
	D25	256,48	2,78	0,52	2,26	65,15	197,06	1,05
W	D28	889,57	6,57	0,39	2,63	167,37	686,57	1,25
	D29	1052,64	4,55	0,55	2,10	180,44	781,15	1,10
	D32	899,87	4,35	0,49	3,59	202,53	790,57	1,12
	D34	734,24	3,57	0,60	3,52	179,46	729,79	1,20
	D35	682,29	5,65	0,52	1,02	207,01	494,54	1,21
	D36	511,11	2,16	0,71	3,83	318,19	378,01	1,01
	D37	768,82	4,26	0,44	1,06	248,87	430,74	1,21
	D38	542,25	1,55	0,23	3,51	71,28	179,88	1,13
	D39	552,00	1,72	0,26	2,47	110,13	174,00	1,21
	D40	859,73	2,91	0,48	2,47	335,69	473,06	1,11
	D41	612,74	1,78	0,47	4,84	141,19	404,55	1,09
	D42	809,79	3,25	0,38	1,82	181,65	404,57	1,18
	D46	573,03	3,50	0,53	2,52	165,97	427,82	1,14
	D47	624,50	3,65	0,29	3,00	122,65	240,11	1,13

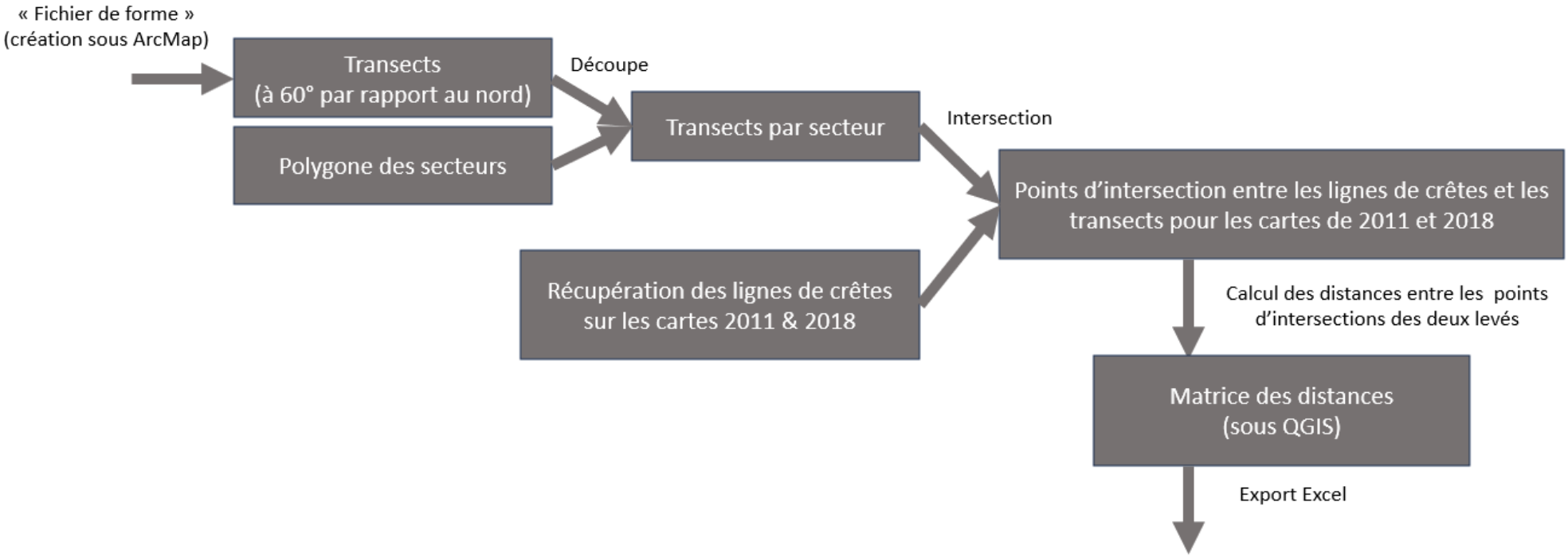
Annexe H : Méthodologie d'extraction des lignes de crêtes sous le logiciel Paramdunes

La modélisation des lignes de crête sous Paramdunes se fait automatiquement. Néanmoins la résolution engendrée par l'ajout d'une très grande zone influence la forme de la ligne de crête. Pour cette étude, la résolution du secteur sud est de 43.5m ce qui ne permet pas d'obtenir la valeur exacte de migration entre les deux levés. De plus, la plupart des dunes n'étaient pas détectées et devaient être tracées, augmentant la marge d'erreur des résultats. Les lignes de crêtes ont donc été retranscrites sur QGIS afin de calculer les distances entre elles. Malheureusement, la résolution forcée par Paramdunes en raison de la taille du secteur étudiée a eu comme finalité une mauvaise représentation des lignes de crêtes (testé dans le secteur sud).



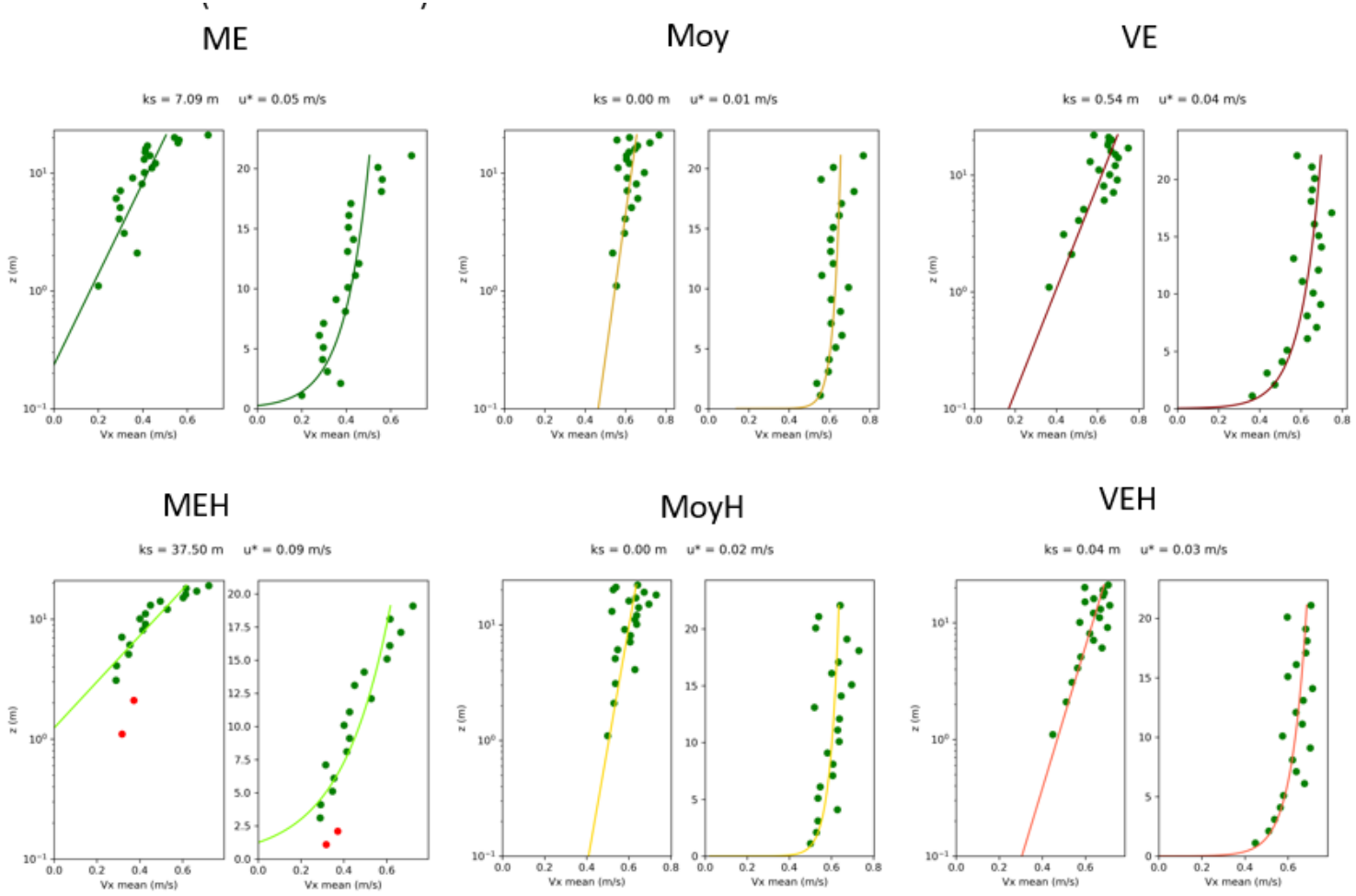
Carte des lignes de crête des cartes bathymétriques de 2011 et 2018, ressorties par le logiciel Paramdunes retranscrites sur QGIS

Annexe I : Méthodologie d'extraction manuelle des distances entre les lignes de crête des levés de 2011 et de 2018 pour calcul des migrations

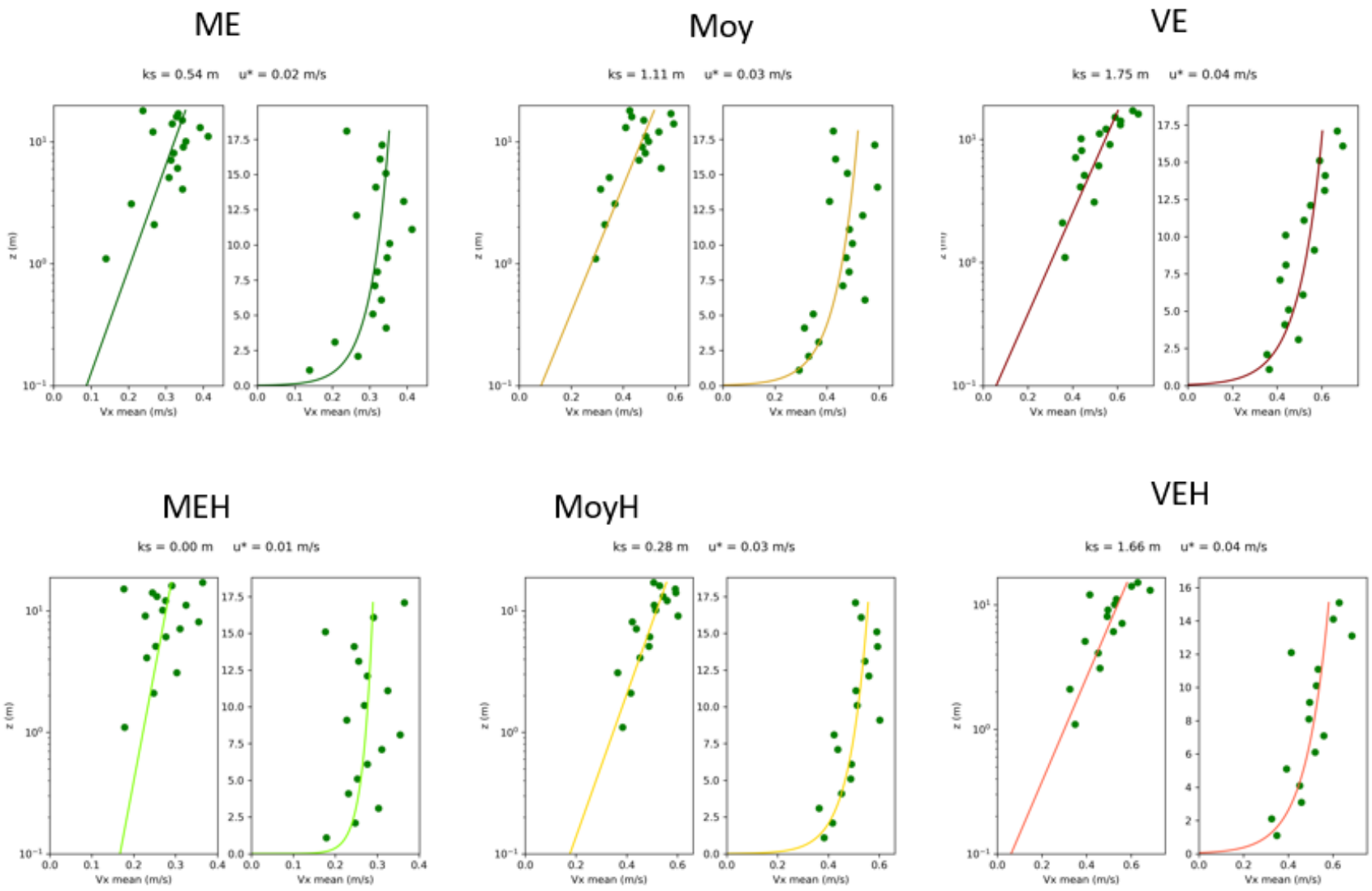


Annexe J : Régression linéaire des vitesses de courant selon la hauteur sur la colonne d'eau sur différentes conditions de marée à un instants t (*A : pour la pointe de flot, B : pour la pointe de jusant, C : date de récupération des conditions hydrodynamiques) (ME : mortes-Eaux, MEH : mortes-eaux avec houle, Moy : moyennes-eaux, MoyH : moyennes-eaux avec houle, VE : vives-eaux, VEH : vives-eaux avec houle)*

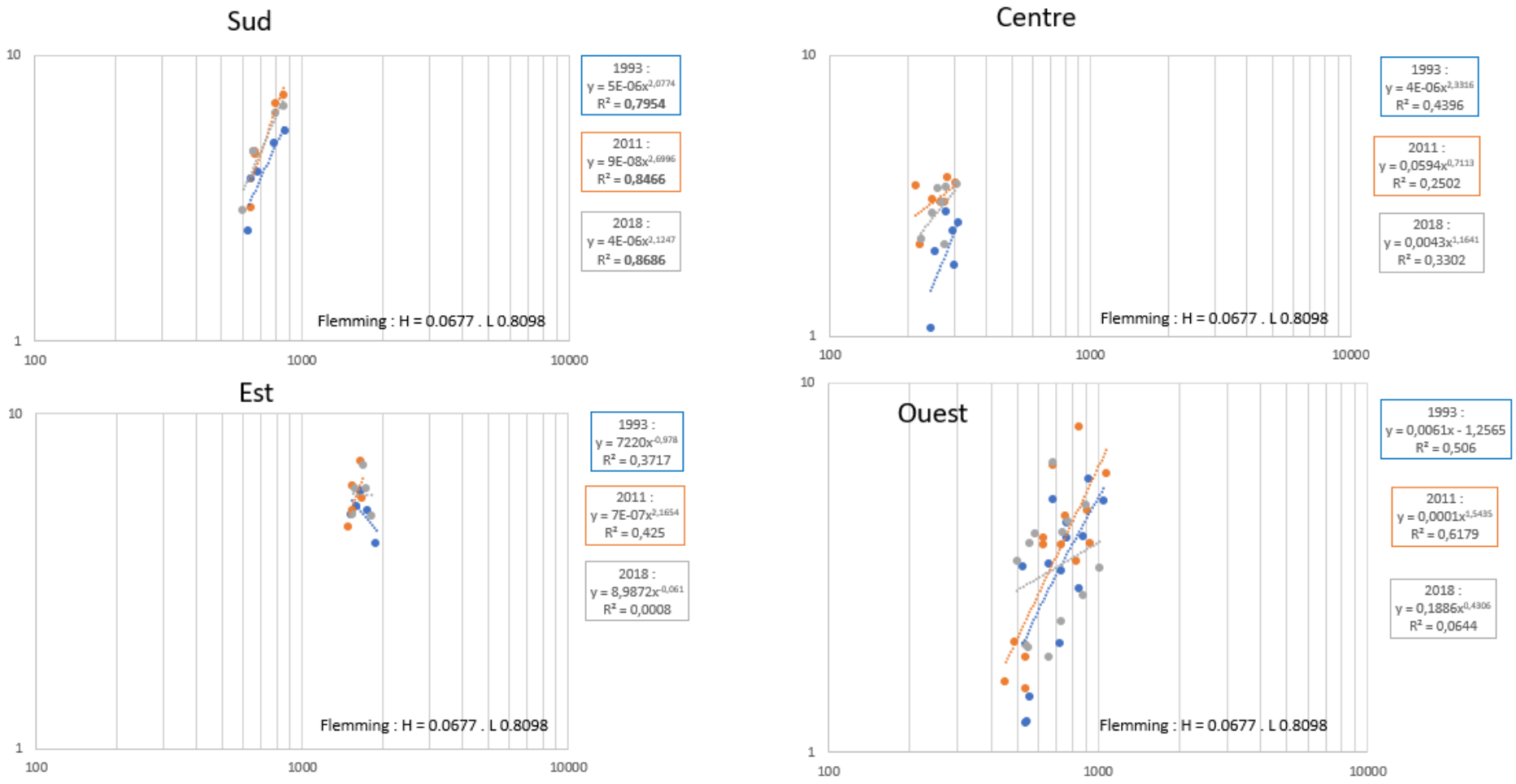
A



B


ME
ks = 0.54 m u* = 0.02 m/s
Moy
ks = 1.11 m u* = 0.03 m/s
VE
ks = 1.75 m u* = 0.04 m/s
MEH
ks = 0.00 m u* = 0.01 m/s
MoyH
ks = 0.28 m u* = 0.03 m/s
VEH
ks = 1.66 m u* = 0.04 m/s
z (m)
Vx mean (m/s)

C

Abréviation	Cycle	Cycle de marée	Coefficient de Marée	Date	Hs (m)
ME	Mortes Eaux	Pointe Flot	45	28/06/2015 17h40	0.36
		Pointe Jusant		29/06/2015 0h0	0.54
MEH	Mortes Eaux avec houle	Pointe Flot		28/03/2015 2h30	0.55
		Pointe Jusant		28/03/2015 9h20	1.01
Moy	Moyennes-Eaux	Pointe Flot	75	20/07/2015 23h50	0.56
		Pointe Jusant		21/07/2015 6h20	0.81
MoyH	Moyennes-Eaux avec houle	Pointe Flot		27/08/2015 19h10	1.4
		Pointe Jusant		28/08/2015 2h10	0.95
VE	Vives-Eaux	Pointe Flot	95	05/08/2015 12h50	0.48
		Pointe Jusant		05/08/2015 19h20	0.42
VEH	Vives-Eaux avec houle	Pointe Flot		16/05/2015 16h20	1.3
		Pointe Jusant		17/05/2015 3h20	0.86

Annexe K : Relation Hauteur/Longueur sur les quatre secteurs étudiés et selon les trois années des levés étudiés (1993, 2011, 2018)