



Étude des réseaux trophiques avant construction du parc éolien en mer de Dieppe Le Tréport

Rapport Final

Aurore Raoux, Nathan Chauvel, Mathilde Charbonnelle, Ferdinand Schlicklin,
Tatiana Gauche, Theo Dufresne, Sophie Le Bot, Pierre Weill, Mael Deloor,
Pascal Claquin, Pierre Balay, Alice Delegrange, Ludivine Martinez, Chloé
Malirat, Gauthier Poiriez, Gaël Guillou, Fabien Aubert, Emilie Pettex, Jean-
Philippe Pezy

UMR CNRS 6143 M2C
24 rue de Tilleuls, F-14000 Caen, France
jean-philippe.pezy@unicaen.fr
tel. 33 (0) 2 31 56 57 22 ; fax. 33 (0) 2 31 56 57 57

Caen, le 15 avril 2024



Remerciements

Nous remercions le *GIS Éolien en mer* d'avoir financé ces travaux de recherche. Nous remercions particulièrement Émilie Praca pour son aide dans la mise en place et le suivi du projet. Nous remercions également Nadège VILLETTE pour la mise en place du projet avec une gestion CNRS.

Nous remercions Yan Patry de *SETEC in vivo* pour la mise à disposition de la mégafaune benthique et des poissons démersaux échantillonnés lors de l'état initial. Nous remercions également IDRA BIO pour la mise à disposition des données benthiques de mars 2022.

Nous remercions la plate-forme *PLATIN* (Plateau d'Isotopie de Normandie) pour la réalisation des analyses élémentaires et isotopiques utilisées dans cette étude.

Enfin, nous souhaitons également remercier pour la partie échantillonnage en mer, Olivier Meslin le Bail, le capitaine du *Ville de Paris* et du *Celtic Warrior* et son équipage ainsi que le Christophe Routtier, capitaine du *SEPIA*.

Table des matières

1	CONTEXTE	5
2	DESCRIPTION DES COMMUNAUTÉS DES DIFFÉRENTS COMPARTIMENTS BIOLOGIQUES..	8
2.1	Compartiment phytoplanctonique	9
2.1.1	Protocole d'échantillonnage	9
2.1.2	Résultats	12
2.2	Compartiment méso-zooplanctonique	14
2.2.1	Protocole d'échantillonnage	14
2.2.1	Analyse des échantillons de zooplancton : compositions des communautés.....	15
2.2.1	Résultats	15
2.3	Compartiments benthiques, suprabenthiques et méiofaune	20
2.3.1	Protocole d'échantillonnage du compartiment benthique	20
2.3.2	Protocole d'échantillonnage du compartiment suprabenthique	22
2.3.3	Protocole d'échantillonnage de la méiofaune	22
2.3.4	Traitements des données	23
2.3.1	Résultats compartiment benthique	28
2.3.2	Résultats compartiment suprabenthique	42
2.3.3	Résultats méiofaune.....	42
3	CARACTÉRISATION DU RÉSEAU TROPHIQUE DU SITE D'IMPLANTATION DE DIEPPE LE TREPORT	43
3.1	Analyses isotopiques	43
3.2	Analyses statistiques	47
3.3	Phytoplancton	47
3.3.1	Rapport C/N.....	47
3.3.2	Rapport COP/Chl a	48
3.3.3	Les rapports isotopiques de la matière organique particulaire.....	49
3.4	Caractérisation du régime trophique du zooplancton.....	51
3.5	Caractérisation du régime trophique de la méiofaune.....	53
3.6	Caractérisation du régime trophique du suprabenthos	54
3.7	Caractérisation du régime trophique benthique	58
3.7.1	Résultats	61
3.8	Caractérisation du régime trophique des poissons	63
3.8.1	Résultats	64
3.9	Régime alimentaire des poissons démersaux	69
4	Conclusion.....	77
	Bibliographie	79

1 CONTEXTE

Dans le cadre des suivis réglementaires du projet de construction et d'exploitation du parc éolien de Dieppe-Le-Tréport (DLT), le Groupement d'Intérêt Scientifique (GIS) Éolien en Mer prévoit de réaliser une étude des réseaux trophiques et de leur évolution en relation avec l'implantation du parc éolien. Ces études permettront, d'une part, de compléter les suivis réalisés pour l'état de référence de l'étude d'impact environnemental, d'autre part, elles permettront la réalisation d'un état de référence des réseaux trophiques pour tous les compartiments biologiques dans la zone du parc et ses zones de contrôle.

L'UMR M2C (Université de Caen – CNRS) est en charge de la réalisation et la coordination de ces études complémentaires afin d'acquérir une image précise du réseau trophique de la zone d'étude et de zones témoins. Pour une bonne prise en compte des différents compartiments composant le réseau trophique de la zone d'étude, l'UMR M2C a mis en place un consortium composé de trois laboratoires et de deux prestataires (Tableau 1) :

- L'UMR CNRS M2C: Responsable du compartiment benthique, suprabenthique, méiofaune et de la caractérisation du régime trophique des poissons démersaux ; porteur du projet
- L'UMR CNRS BOREA (Caen) : Responsable du compartiment phytoplanctonique
- L'UMR CNRS LOG (Lille) : responsable du comportement zooplanctonique
- La Cellule de Suivi du Littoral Normand (Le Havre) : responsable du compartiment halieutique
- Cohabys (La Rochelle) : responsable des compartiments oiseaux et mammifères marins.

L'objectif de cette étude est de caractériser et de quantifier le fonctionnement du réseau trophique local avant la construction du parc. Cette étude se déroule en parallèle des suivis réglementaires réalisés pour l'état de référence du parc, et s'appuie au maximum sur les données acquises dans ce contexte. En outre, des analyses isotopiques du carbone et de l'azote ont également été réalisées sur l'ensemble des compartiments identifiés afin de documenter les niveaux et relations trophiques des différentes espèces présentes dans la zone d'étude.

Ce rapport présente donc, en détails, les protocoles d'échantillonnage et d'analyses pour la réalisation d'un état de référence des réseaux trophiques de la zone du parc et ses zones de contrôle en complément des suivis réglementaires sur les compartiments suivants : le compartiment phytoplanctonique, zooplanctonique, benthique, suprabenthique, halieutique mammifères marins et oiseaux. En outre, ce rapport présente également la synthèse des différentes données acquises sur le site d'étude ainsi que les résultats des analyses réalisées sur les différents compartiments biologiques. Cependant, il est important de noter que l'ensemble des résultats acquis sur la zone d'étude seront ensuite intégrés et discutés au cours du projet de thèse qui a été déposé dans la réponse à l'AO « Étude des réseaux trophiques avant construction du parc éolien en mer de Dieppe Le Tréport » et qui portera sur la modélisation des réseaux trophiques du site éolien de Dieppe-Le-Tréport.

Tableau 1. Coordonnées et rôle du porteur de projet, et de ses partenaires

	Nom de l'organisme	Nom et fonction du contact	Adresse postale, Téléphone, email	Rôle dans le projet
Porteur et Partenaire 1	UMR CNRS M2C	Jean-Philippe PEZY, Chargé de Recherche CNRS jean-philippe.pezy@unicaen.fr	Laboratoire Morphodynamique Continentale et Côtière UMR CNRS 6143 M2C 24 rue de Tilleuls, F-14000 Caen, France 06 23 80 68 21	Porteur du consortium Responsable du compartiment benthique, suprabenthique, méiofaune, caractérisation du régime trophique des poissons démersaux
Partenaire 2	UMR CNRS BOREA	Pascal CLAQUIN Professeur des Universités pascal.claquin@unicaen.fr	Biologie des Organismes & Ecosystèmes Aquatiques Esplanade de la Paix- 14032 - Caen Cedex 02.31.56.58.28	Responsable du compartiment phytoplanctonique
Partenaire 3	UMR CNRS LOG	Alice DELEGRANGE Maître de conférences alice.delegrange@univ-lille.fr	Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, 28 avenue Foch, 62930 Wimereux	Responsable du compartiment zooplanctonique
Prestataire 1	CSLN	Pierre BALAY	Cellule de Suivi du Littoral Normand, 53 rue de Prony, 76600 Le Havre pierre.balay@csln.fr	Responsable du compartiment halieutique
Prestataire 2	COHABYS	Ludivine MARTINEZ ludivine.martinez@univ-lr.fr	Institut du Littoral et de l'Environnement, 2 rue Olympe de Gouges, 17000 La Rochelle	Responsable du compartiment mammifères marins
		Emeline PETTEX		Responsable du compartiment oiseaux marins

2 DESCRIPTION DES COMMUNAUTÉS DES DIFFÉRENTS COMPARTIMENTS BIOLOGIQUES

L'objectif de cette étude est de caractériser et de quantifier la structure des différents compartiments biologiques au niveau du site d'implantation du futur parc éolien de Dieppe-Le-Tréport (DLT). L'approche réalisée dans cette étude repose sur la réalisation d'un état « zéro » (échantillonnages durant deux saisons pendant un an : hiver et fin d'été) selon une approche BACI (Before After Control Impact). Pour ce faire plusieurs campagnes océanographiques ont été réalisées par les UMR M2C (UMR 6143), BOREA (UMR 8067), le LOG (UMR 8187) et la CSLN afin d'échantillonner les compartiments suivants : le phytoplancton, le zooplancton, le benthos, le suprabenthos, la méiofaune et les poissons démersaux. Le Tableau 2 est un récapitulatif des différentes campagnes en mer et des compartiments biologiques échantillonnés et la Figure 1 présente la localisation des stations échantillonnées pour la réalisation de ces analyses isotopiques.

Tableau 2. Récapitulatif des différentes campagnes océanographiques

Saisons	Dates	Navires	Compartiments	Engins de prélèvements
Hiver	28-30 mars 2022	SEPIA II	Phytoplancton	Bouteille Niskin
			Zooplancton	Filet WP2
	30 avril 2022	Celtic Warrior	Méiofaune	Carottier Reineck
			Suprabenthos, Benthos	Traineau suprabenthique Benne Van Veen
Été	19- 22 septembre 2022	SEPIA II	Mégafaune	Chalut à perche
			Poissons démersaux	
			Phytoplancton	Bouteille Niskin
	22-23 septembre 2022	Fée des mers	Zooplancton	Filet WP2
Méiofaune			Carottier Reineck	
Suprabenthos, Benthos			Traineau suprabenthique Benne Van Veen	
Hiver	8-9 octobre 2022	Ville de Paris	Mégafaune	Chalut canadien
			Poissons démersaux	
	21-22 avril 2023	Fée des mers	Benthos	Benne Van Veen
			Mégafaune	Chalut canadien
			Poissons démersaux	

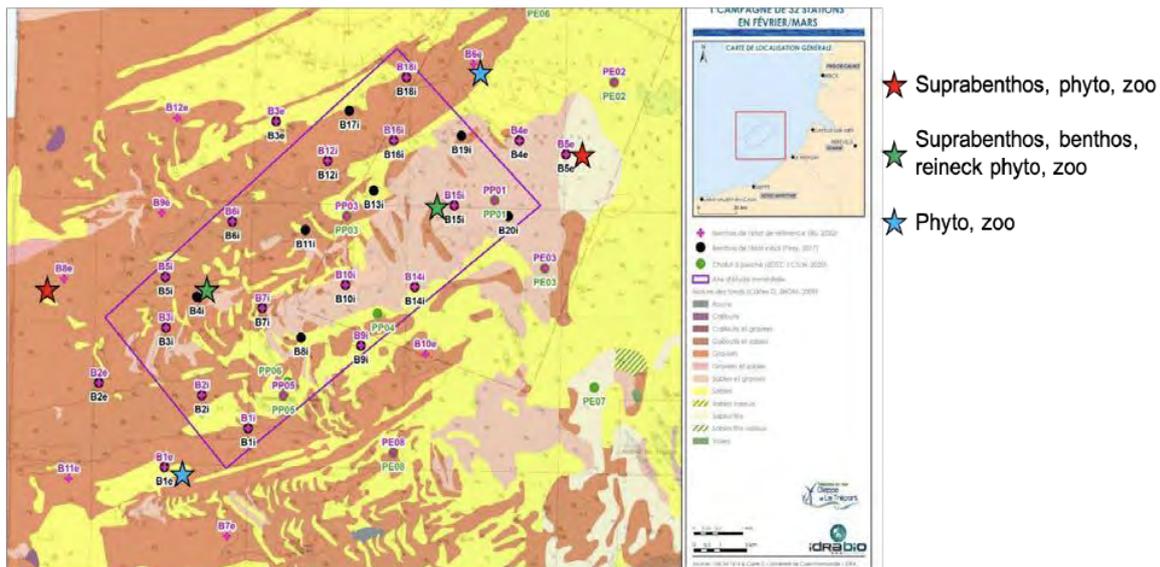


Figure 1. Localisation des stations d'échantillonnage

Il est important de noter que les données concernant les compartiments du suprabenthos et des mammifères marins sont présentés en Annexe. Le rapport d'analyse « Ichtyofaune et céphalopodes de la zone d'étude du parc éolien de Dieppe-Le Tréport » réalisé par la CSLN ainsi que le lien entre l'habitat et la morphologie sédimentaire et les communautés benthiques sont également présentés en annexe.

2.1 Compartiment phytoplanctonique

2.1.1 Protocole d'échantillonnage

Des prélèvements d'eau et des profils ont été réalisés lors des campagnes océanographiques du 29 mars et 19 septembre à bord du *SEPIA II* (navire de station du CNRS, Figure 1). Ces prélèvements et profils ont été réalisés au niveau de 6 stations : deux au Nord-Est de la zone (B5e et B6e), un dans le quart nord-est (B15i) à l'intérieur de la zone, un dans le quart intérieur sud-ouest (B4i), un à l'extérieur Sud de la zone (B1e) et un à l'extérieur Ouest (B8e).

À chaque station, un profil et un prélèvement d'eau ont été réalisés. Les prélèvements d'eau ont été effectués à une profondeur de deux mètres sous la surface à l'aide d'une bouteille Niskin, l'eau prélevée a ensuite été directement mise au noir en vue des différents

conditionnements et analyses qui ont été effectués directement dans la cabine du bateau (Figure 2).



Figure 2. Analyses réalisées directement dans la cabine du bateau

2.1.1.1 Paramètres abiotiques

Un profil de sonde sur chaque site a été réalisé. Le PAR (rayonnement actif pour la photosynthèse – 400-700 nm) a été mesuré à une fréquence de 0,5 hertz à l'aide d'un capteur plan Li-COR LI-192 connecté à un enregistreur de PAR RBR solo3. Les paramètres température, pH, conductimétrie, salinité, oxygène dissous et profondeur ont été enregistrés à l'aide d'une sonde multi paramètre YSI EXO1 à une fréquence de quatre hertz.

- *Il est important de noter que le 29 mars : PAR HS après le premier point(B1e)*
- *19 septembre : Pas de données YSI + premier point (B1e) effectué de nuit (pas de données PAR)*

2.1.1.2 Paramètres du phytoplancton

➤ LabSTAFF

Les paramètres photosynthétiques du phytoplancton ont été déterminés à l'aide d'un fluorimètre « Single Turn-Over » LabSTAF (Chelsea Technologies, UK). Le LabSTAF permet des mesures à différentes longueurs d'onde. Les échantillons ont été analysés après une période d'incubation de 5 minutes à l'obscurité pour permettre l'oxydation du pool de Quinone A (QA). Une phase de saturation à renouvellement unique (ST) est délivrée avec un flash saturant de 100 μs pour mesurer la fluorescence minimale et maximale comme décrite dans Boatman *et al.* (2019). Les échantillons ont été exposés à 12 intensités de PAR croissantes (0 - 1 500 $\mu\text{mol photon s}^{-1} \text{m}^{-2}$) avec des intervalles de 30 secondes pour obtenir une courbe de réponse à la-

lumière (RLC). L'efficacité quantique maximale du PSII (F_v/F_m) a été calculée en utilisant l'équation suivante de Genty *et al.* (1989) :

$$\frac{F_v}{F_m} = \frac{(F_m - F_0)}{F_m} \quad (9)$$

L'efficacité quantique effective de PSII ($\frac{F_{q'}}{F_{m'}}$) a été mesurée à chaque étape lumineuse comme (Genty *et al.* 1989) :

$$\frac{F_{q'}}{F_{m'}} = \frac{(F_{m'} - F')}{F_{m'}} \quad (10)$$

Où $F_{m'}$ est la fluorescence maximale à la lumière et F' la fluorescence à l'état stable à la lumière.

L'application au RLC de Webb *et al.* (1974) modifié par Boatman *et al.* (2019) à l'aide du logiciel RUNSTAF (Chelsea Technologies, UK) pour estimer α et E_k avec α , la pente initiale de la RLC, et E_k l'indice de saturation de la lumière :

$$\frac{F_{q'}}{F_{m'}} = (\alpha \times E_k \times \left[1 - e^{-\frac{E}{E_k}}\right] - \beta \times E_{k\beta} \times \left[1 - e^{-\frac{E-E_k}{E_{k\beta}}}\right]) \times E^{-1} \quad (11)$$

Le taux de transport d'électrons relatif (rETR, unité relative) a été calculé pour chaque irradiance (E) qui correspond au calcul suivant :

$$rETR(E) = \frac{F_{q'}}{F_{m'}} \times E \quad (12)$$

Le $rETR_{MAX}$ peut être calculé selon l'équation suivante :

$$rETR_{MAX} = \alpha_{webb} \times E_{k_{webb}} \quad (13)$$

Le $JVP_{II_{MAX}}$ (mmol électrons $m^{-3} h^{-1}$), est ensuite calculé selon l'équation n°14.

$$JVP_{II_{max}} = a_{LHII} \times rETR \times 3,6 \times 10^{-3} \quad (14)$$

avec a_{LHII} le coefficient d'absorption de PSII en m^{-1} (voir Boatman *et al.* (2019) pour plus de détails).

Les données de productivité maximale (ETR_{max}) et de production maximale ($JVP_{II_{max}}$) ont été transformées en carbone en appliquant une valeur de $\Phi_{e.c.}$ de 8 moles d'électrons par mole de carbone.

➤ Chlorophylle a

Le paramètre communément utilisé pour rendre compte de la biomasse phytoplanctonique du milieu est la concentration en chlorophylle *a* (Chl *a*). Ainsi, la biomasse du phytoplancton est estimée en Chl *a* par unité de volume. Un triplicat d'échantillon de 250 mL est filtré sur un filtre en fibre de verre (Whatman, GF/F, 47 mm, 0.7 μm) et immédiatement conservé à -20°C jusqu'à analyse dans les jours suivants. 10 mL d'acétone (90%) sont ajoutés pour extraire les pigments chlorophylliens et l'échantillon est ensuite incubé à 4°C pendant 12 heures. Après deux centrifugations de 5 min à 1700 g, la concentration de Chl *a* des extraits est mesurée grâce à un fluorimètre Trilogy (Turner Designs, Sunnyvale, USA) selon la méthode de Strickland et Parsons (1972) adapté dans le protocole de référence du SNO SOMLIT.

2.1.2 Résultats

2.1.2.1 Paramètres abiotiques

Pour les différents paramètres et sur chacun des points, on ne note pas de variations en fonction de la profondeur de mesure (Figure 3). La colonne d'eau est homogène. En mars 2022, la température était deux fois inférieure à celle mesurée en septembre 2022. Cette différence de température permet d'expliquer les variations temporelles de conductivité, oxygène dissous et pH. Concernant la salinité, de la même manière que pour la température, les différences sont dues à la période de prélèvement et donc aux saisons.

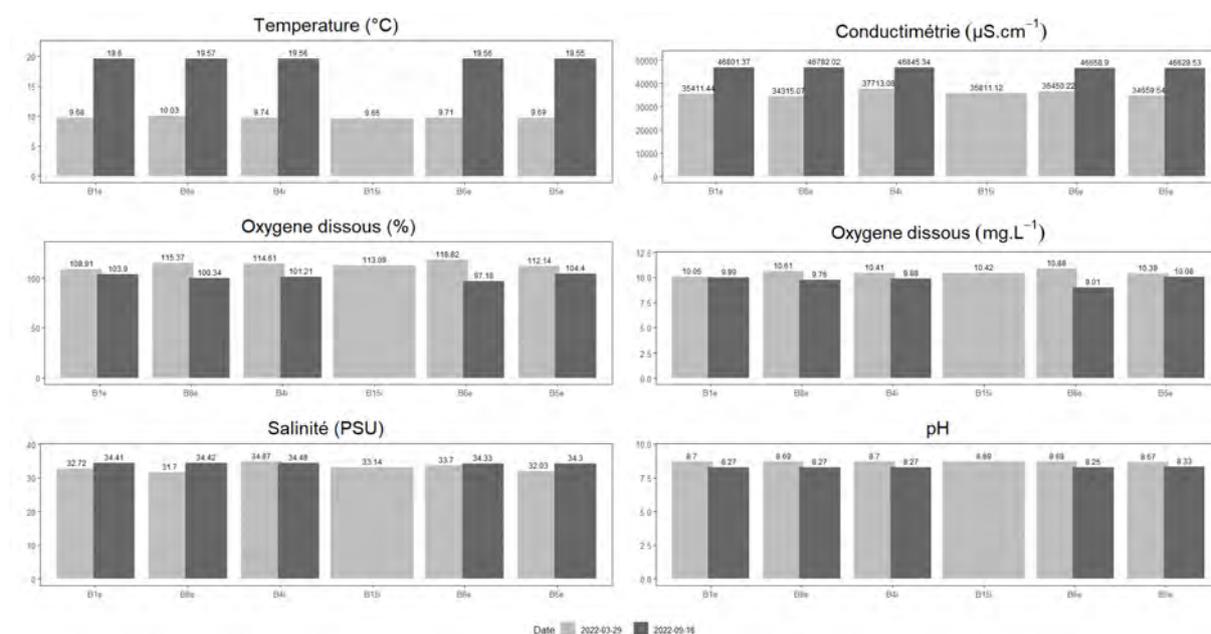


Figure 3. Comparaison des paramètres abiotiques au niveau des six stations entre les deux dates

2.1.2.2 Paramètres du phytoplancton

En mars 2022, la biomasse caractérisée par la concentration en Chl a , présente une forte hétérogénéité spatiale (Figure 4). Les stations B15i ; B6e et B8e montrent les biomasses les plus fortes autour de $9,5 \text{ mg.L}^{-1}$; les stations B4i et B5e présentent des concentrations trois fois plus faibles (3 mg.L^{-1}) et B1e est en dessous de 2 mg.L^{-1} ($1,8$; Figure 4). Cette hétérogénéité se retrouve au niveau de la productivité primaire maximale, mais ne suit pas la biomasse mesurée. Il y a donc un découplage entre la productivité maximale et les biomasses observées. Ainsi la station potentiellement la plus productive est B4i, puis B15i et B6e, deux fois moins productives, suivi de B5e et B8e, quatre fois moins productives que B4i et enfin B1e, huit fois moins productive. Cette hétérogénéité se retrouve logiquement sur la production primaire maximale par unité de volume, car elle a pour composante la biomasse et la productivité par unité de Chl a . Cette hétérogénéité de la productivité peut s'expliquer par les heures de mesure différentes. En effet ce paramètre est fortement influencé par la photoacclimatation des cellules phytoplanctoniques, alors que la dynamique de la biomasse va quant à elle être fortement influencée par la marée (Serre-Fredj *et al.*, 2021). La dynamique de la photoacclimatation est bien visible sur les données de l'Ek qui est un indicateur de l'intensité lumineuse saturante. On remarque que ce paramètre suit la dynamique journalière des prélèvements, la capacité des communautés à s'acclimater indique qu'elles ne sont pas limitées en sels nutritifs (Napoléon *et al.*, 2012). Un suivi à point fixe nous permettrait d'appréhender pleinement cette dynamique journalière de la photoacclimatation. Dans tous les cas, ces données nous permettent d'appréhender la variabilité des paramètres de production primaire et de biomasse dans la zone d'étude en mars.

En septembre 2022, la biomasse, la productivité et la production primaire sont significativement plus faibles qu'en mars. Les concentrations en biomasses sont très proches entre les stations, ce qui montre une grande homogénéité spatiale dans cette zone lors des prélèvements qui peut s'expliquer par le très faible coefficient de marée (25 en septembre contre 67 en mars). La baisse de biomasse et de production s'explique probablement par la limitation par les sels nutritifs en cette fin de période estivale (Napoléon et Claquin, 2012; Napoléon *et al.*, 2013; Serre-Fredj *et al.*, 2022). La dynamique journalière du Ek n'est également pas observable, ce qui traduit une incapacité des cellules à se photo acclimater

rapidement pour répondre à la dynamique lumineuse journalière. Ce manque de capacité d'acclimatation confirme une limitation en sels nutritifs.

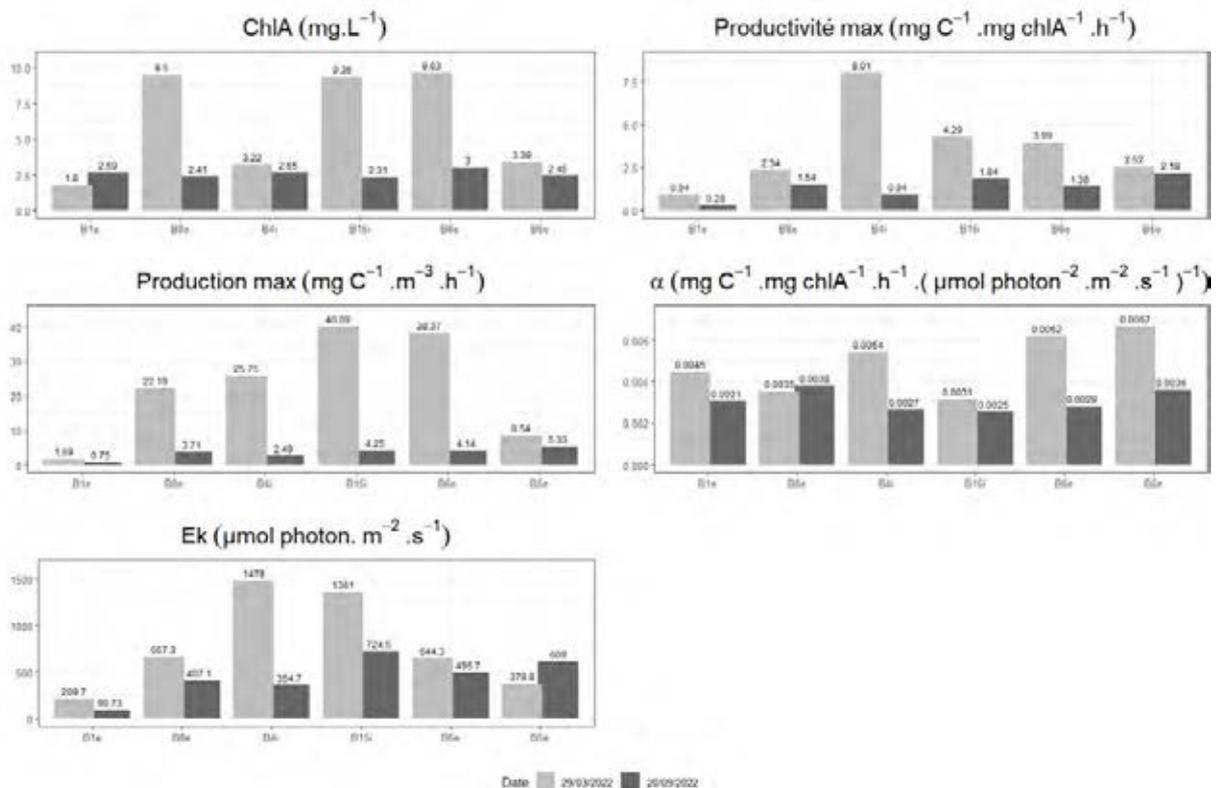


Figure 4. Comparaison des paramètres du phytoplancton au niveau des six stations entre les deux dates

2.2 Compartiment méso-zooplanctonique

2.2.1 Protocole d'échantillonnage

À chaque station (Figure 1), deux prélèvements de mésozooplancton ont été effectués à l'aide d'un filet à plancton de type WP2 (ouverture 0.25m², hauteur 261cm, cylindro-conique, vide de maille 200μm). Des traits verticaux ont été effectués depuis 3m au-dessus du fond jusqu'à la surface à la vitesse de 1m s⁻¹. Un volucompteur placé à l'entrée du filet a permis d'estimer le volume d'eau échantillonné à chaque prélèvement.

Après récolte, un échantillon par station a été concentré sur un tamis de 200 μm puis fixé dans une solution d'eau de mer formolée (concentration finale de formol >4%) dans l'attente de son analyse au laboratoire.

2.2.1 Analyse des échantillons de zooplancton : compositions des communautés

Au laboratoire, avant analyse, les échantillons formolés ont été rincés et divisés en deux fractions de tailles (d_1 : [200 μ m-1000 μ m] et d_2 : >1000 μ m). Lorsque cela était nécessaire, la fraction d_2 a été divisée à l'aide d'une boîte de motoda et entre 1/8 et 1/16 a été analysé pour chaque échantillon. D_1 n'a jamais eu besoin de fractionnement.

Ensuite, chaque sous-fraction a ensuite été numérisée à l'aide d'un zooscan (Gorsky et al 2010). Les images ainsi obtenues ont été traitées à l'aide du logiciel Image J avec l'extension Zooprocess afin d'énumérer et d'individualiser les particules de l'image brute, et de mesurer automatiquement un certain nombre (>50) paramètres morphométriques. Les données recueillies pour chaque particule de chaque image brute ont ensuite été transférées dans l'application web ecotaxa afin de les identifier au niveau taxonomique le plus précis possible. Enfin, l'abondance (Ab) de chaque taxon identifié a été calculée pour chaque fraction de taille de chaque échantillon :

$$Ab = \frac{N}{F} \times V$$

avec N = nombre d'individus énumérés dans Ecotaxa, F = la fraction (motoda) scannée et V = volume filtré par le filet.

2.2.1 Résultats

Globalement, l'abondance moyenne du mésozooplancton a été légèrement supérieure au printemps qu'en automne, quel que soit le faciès sédimentaire (4228 \pm 1030 et 3566 \pm 931 ind m^{-3} , respectivement, Figure 5). Cela correspond clairement à la dynamique saisonnière observée dans la zone Manche-Mer du Nord avec deux périodes de prolifération (printemps et automne) présentant un pic d'abondance plus important au printemps (Delegrange, unpubl.data, Bastian *et al.*, 2015; Eloire *et al.*, 2010).

Par ailleurs, la composition des communautés différait aussi entre le printemps et l'automne (Figure 5). En effet, en automne, les copépodes représentaient entre 88 et 90% de la communauté zooplanctonique contre entre 41 et 54% au printemps. En effet, dans les écosystèmes tempérés, les communautés zooplanctoniques sont généralement dominées par les copépodes (John *et al.*, 2001). La composition spécifique de la communauté de copépodes

était aussi fonction de la saison avec une communauté représentée principalement par les calanoïdes des genres *Centropages* et *Temora* au printemps et par les harpacticoïdes du genre *Euterpina*, les cyclopoïdes du genre *Corycaeus* et les calanoïdes du genre *Labidocera* en automne. Certains genres de copépodes calanoïdes (*e.g.*, *Paracalanus*, *Acartia*) étaient présents dans des abondances similaires aux deux saisons (Figure 5). Cette succession d'espèces de copépodes correspond à ce qui est généralement observé en Manche (Delegrange, unpubl.data; Bastian *et al.*, 2015; Eloire *et al.*, 2010). Une espèce non indigène de copépode (*i.e.*, *Pseudodiaptomus marinus*) a été identifiée dans les échantillons de printemps et d'automne, mais avec de faibles abondances (3 ± 4 et 1 ± 2 ind.m⁻³, respectivement). Cette espèce est détectée dans la zone d'étude depuis 2010 (Brylinski *et al.*, 2012)

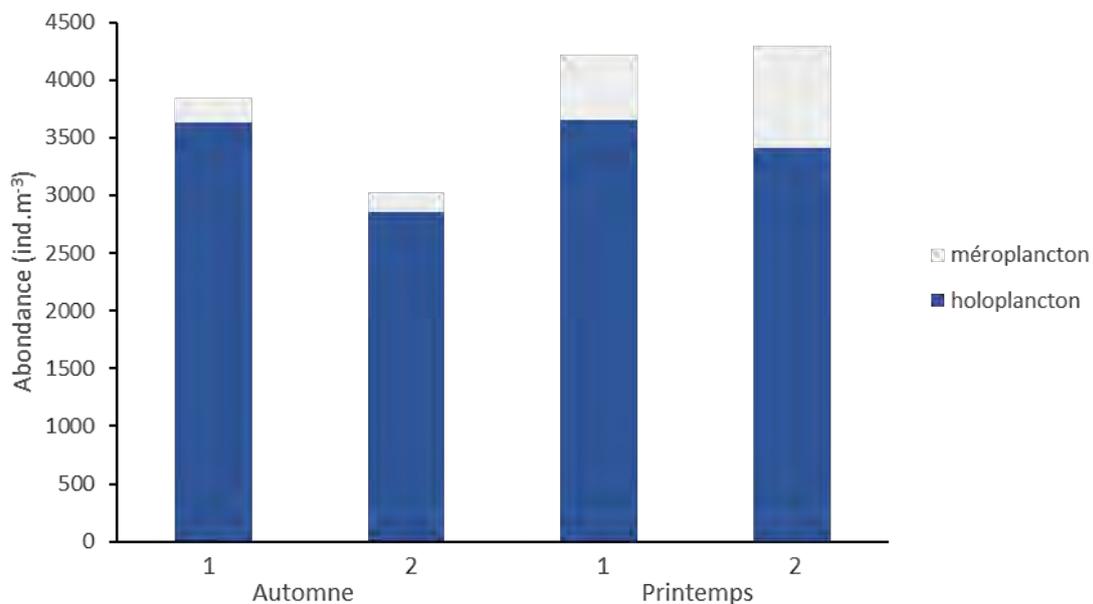


Figure 5 Abondance totale du mésozooplancton et abondance de méro- et holoplancton (en gris et bleu, respectivement). En abscisses, les chiffres 1 et 2 correspondent aux faciès sédimentaires présents sur les zones échantillonnées (sédiments grossiers et sables moyens, respectivement)

Au printemps, la communauté zooplanctonique était complétée par d'autres organismes holoplanctoniques (organismes qui passent la totalité de leur vie sous forme planctonique) tels que des appendiculaires (26 à 28%), mais aussi d'organismes méroplanctoniques (organismes qui ne passent pas toute leur vie sous forme planctonique) tels que des larves de cirripèdes (*i.e.*, nauplii et cypris, entre 9 et 15%), d'annélides (~2%) et de décapodes (*i.e.*, larves zoe et mégalopes, 1 à 3%). La communauté printanière était aussi marquée par la présence d'œufs et larves de poissons alors qu'ils étaient quasiment absents en automne (Figure 6).

D'ailleurs, la proportion de méroplancton était supérieure au printemps par rapport à l'automne (13 à 20% et 5%, respectivement, Figures 5 et 7).



Figure 6. : Exemples d'images obtenues au zooscan pour les taxons principaux identifiés lors des campagnes d'automne et de printemps. Copépodes : *Centropages hamatus* (A), *Labidocera wollatsoni* (B), *Temora longicornis* (C), *Euterpina acutifrons* (D), *Corycaeus anglicus* (E), *Paracalanus parvus* (F). Chaetognathe (G, H), larves zoé (I) et mégalope (J) de Brachyoure, larves nauplius (K) et cypris (L) de Cirripèdes, larve de gastéropode (M), larve d'annélide (N), œuf (O) et larve (P) de poisson.

En automne, si la communauté zooplanctonique était marquée par la très large dominance des copépodes, la présence d'autres taxa est à noter. Ainsi, les chaetognathes représentaient entre 1.5 et 2% de la communauté tout comme les larves de mollusques (bivalves et gastéropodes) alors qu'ils étaient absents au printemps (Figures 5, 7). La présence de chaetognathes pourrait s'expliquer par le fait que les copépodes constituent des proies préférentielles de ces derniers (Pearre, 1982).

Enfin certains groupes taxonomiques tels que les cnidaires et cténophores étaient présents dans des abondances similaires au printemps et en automne. Toutefois, il est possible qu'ils aient été mal conservés étant donné qu'ils sont des organismes fragiles. Leur abondance a probablement été sous-estimée lors de ces campagnes de prélèvements. En effet, dans un contexte de suivi du plancton gélatineux dans le port de Dunkerque (Bastian *et al.*, 2015), les deux périodes de prolifération du plancton gélatineux correspondent aux deux périodes concernées par cette étude (printemps et automne).

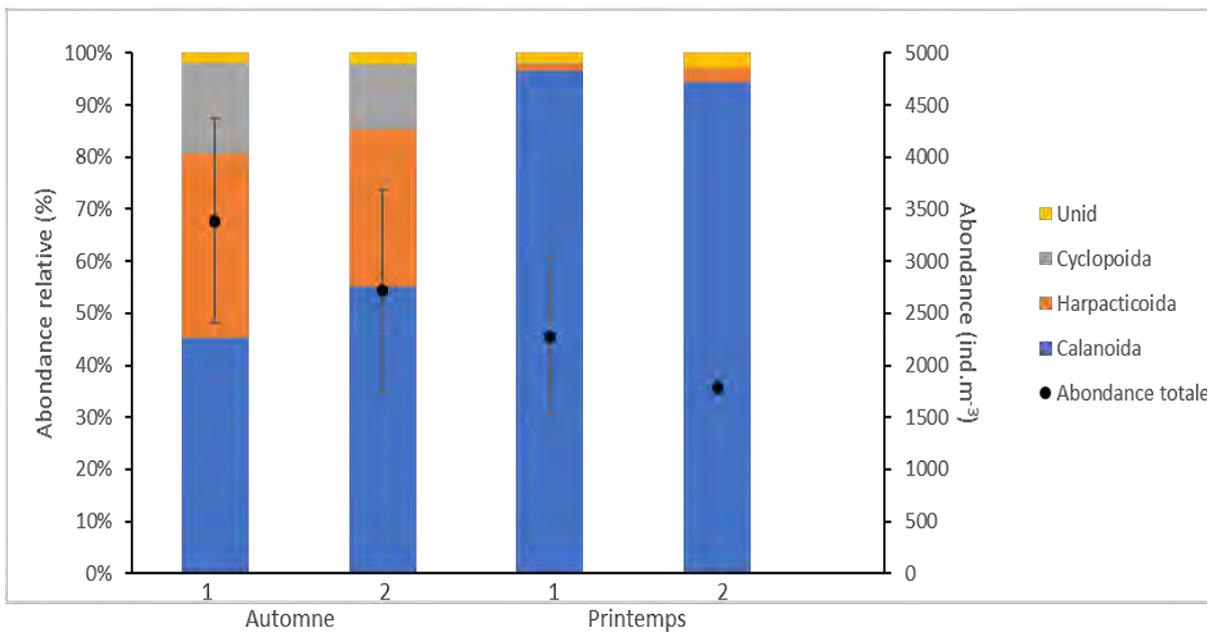
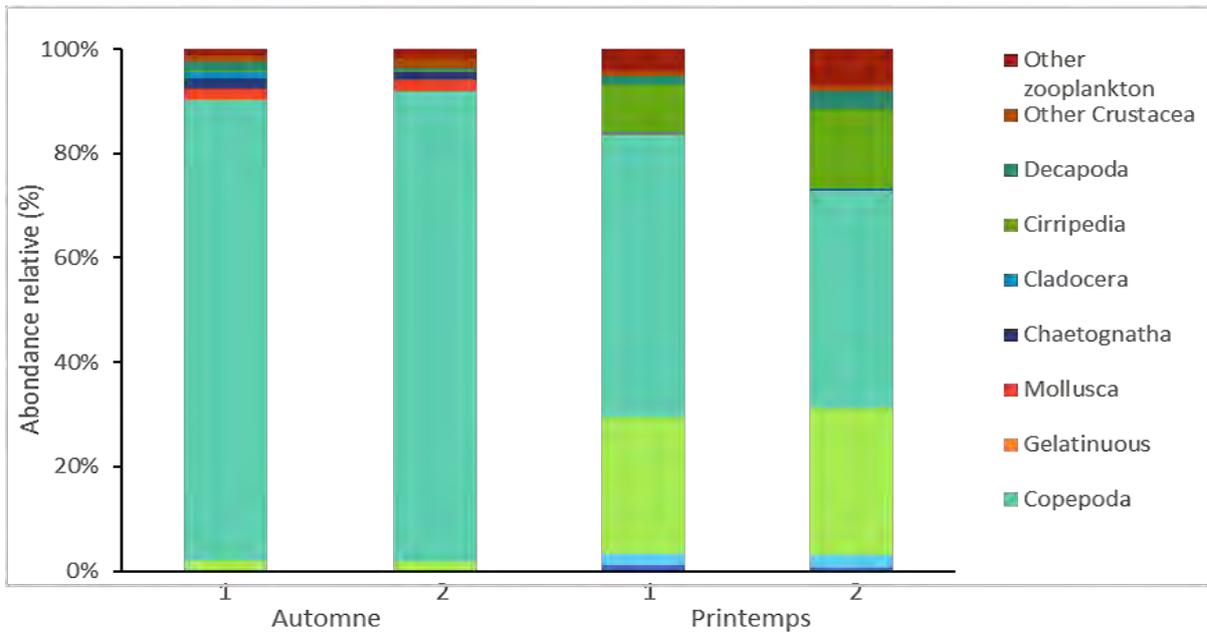


Figure 7. Composition des communautés zooplanctoniques (A) et zooplanctoniques (B). En abscisses, les chiffres 1 et 2 correspondent aux faciès sédimentaires présents sur les zones échantillonnées (sédiments grossiers et sables moyens, respectivement)

2.3 Compartiments benthiques, suprabenthiques et méiofaune

2.3.1 Protocole d'échantillonnage du compartiment benthique

Le compartiment benthique a été étudié à partir des acquisitions réglementaires réalisées par Idra Bio. Une première campagne océanographique a été réalisée par Idra Bio en février / mars 2022 durant laquelle 32 stations réparties sur les deux habitats sédimentaires ont été échantillonnées (16 stations à l'intérieur du parc et 16 stations à l'extérieur). Cependant, afin de prendre en compte les variations saisonnières, une deuxième campagne océanographique a été réalisée par le M2C à la fin de l'été 2022 (du 6 au 8 octobre) afin de compléter les suivis réalisés par IDRA bio et d'être en cohérence avec les études saisonnières réalisées sur les autres compartiments de l'écosystème. Pour chaque station benthique, un total de 5 prélèvements (réplicats) a été réalisé (Figure 8).

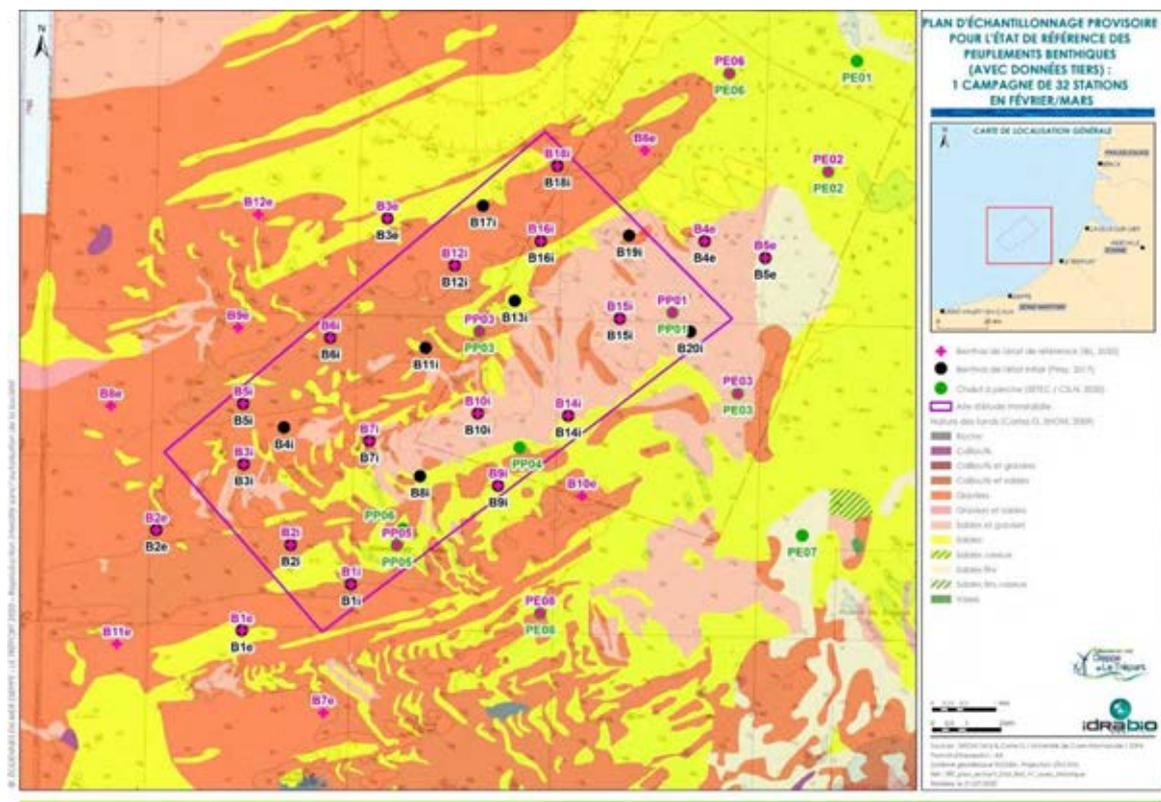


Figure 8. Carte des stations d'échantillonnage

Les prélèvements benthiques ont été réalisés à bord du *Ville de Paris* de STO Logistique. À chaque station d'échantillonnage, la profondeur a été relevée sur le sondeur du bateau. Les profondeurs ont ensuite été corrigées à partir des données de marées afin d'obtenir des profondeurs comparables sur l'ensemble de la durée de prélèvements. Le compartiment benthique a été échantillonné à la benne Van Veen (surface unitaire de 0,1 m²), cette benne

a été privilégiée pour sa rapidité de mise en œuvre, sa quasi-absence de dangerosité et son efficacité dans ce type de sédiment (Figure 9).

À chaque station, les échantillonnages ont été réalisés conformément au « protocole de suivi stationnel des macroinvertébrés benthiques de substrats meubles subtidaux et intertidaux dans le cadre de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) - Façades Manche et Atlantiques ». Les différents échantillons de macrofaune ont été traités séparément. Le tamisage à bord s'est fait sur un tamis à ouverture circulaire de 1 mm (conformément à la norme ISO 16665, seul type de tamis permettant de conserver véritablement l'ensemble de la macrofaune d'une taille supérieure à 1 mm, les tamis à maille circulaire de 1 mm ne retenant que les organismes d'une taille supérieure à 1,4 mm). La conservation des refus de tamis a été réalisée après fixation au formol neutre à 10% dans des bidons étanches allant de 3 à 15 L selon la quantité de refus de tamis (partie supérieure à 1 mm). Du rose Bengale a été ajouté aux échantillons, permettant une coloration du macrozoobenthos pour faciliter leur tri en laboratoire. La benne Van Veen (Figure 9) permet de faire un prélèvement unitaire de 0,1 m² et est considérée comme efficace si elle prélève au moins 5 L de sédiment. Lors de chaque prélèvement, une photographie numérique a été réalisée afin d'aider à rendre compte par la suite de la nature sédimentaire et des espèces remarquables de grande taille dans l'échantillon.



Figure 9. Prélèvement à la benne Van Veen et tamisage

2.3.2 Protocole d'échantillonnage du compartiment suprabenthique

Il est important de noter qu'il n'existe pas de suivi réglementaire concernant ce compartiment clé (Pezy, 2017). Il est donc nécessaire de compléter les données des suivis réglementaires en étudiant ce compartiment. Les prélèvements suprabenthiques ont été réalisés à l'aide d'un traineau suprabenthique permettant d'échantillonner la couche d'eau juste au-dessus du fond en un unique niveau : 0,10 – 0,40 m au-dessus du fond (filet de 500 μm , Figure 10) à l'extérieur et à l'intérieur du parc au niveau des deux habitats sédimentaires (sédiments grossiers et sables moyens) et au cours de deux saisons en hiver (février-mars) et à la fin de l'été (septembre-octobre). Dans chaque zone, cinq traits de 15 mins ont été effectués à contre-courant à une vitesse de 1,5 nœud de jour (2 traits) et de nuit (2 traits), puis un trait à l'aurore afin d'étudier les migrations nyctémérales (soit un total de cinq traits). Les individus ont ensuite été identifiés et l'abondance et la biomasse des différentes espèces calculée (voir traitement des données du compartiment benthique). En outre, une partie des échantillons récoltés était dédiée à l'étude du régime trophique du compartiment suprabenthique.



Figure 10. Traineau suprabenthique

2.3.3 Protocole d'échantillonnage de la méiofaune

Les prélèvements ont été effectués à l'aide d'un carottier Reineck (boîte de 160 cm^2) pour les deux habitats sédimentaires en hiver (février-mars) et à la fin été (septembre-octobre). Trois prélèvements par habitat sédimentaire et pour les saisons ont été réalisés, soit un total de 12 échantillons. Un sous-échantillonnage (trois sous-échantillons par carottier) a également été

réalisé manuellement avec un carottier cylindrique d'une surface de 10 cm² (surface recommandée pour l'étude de la méiofaune) et seuls les cinq premiers centimètres de sédiment ont été fixés au formol chaud à 4 % et tamisés sur un tamis de 40 µm de taille de maille. Ainsi, un total de 36 sous-échantillons ont été traités pour des estimations des abondances et biomasses des trois principaux groupes de méiobenthos : nématodes (les plus nombreux), copépodes harpacticoïdes, juvéniles de mollusques bivalves, juvéniles de crustacés, juvéniles de polychètes et autres.

Le poids sec des échantillons a été mesuré sur une microbalance (au 0,1 µg près) après passage à l'étuve à 60 °C pendant 48 heures. Le poids sec libre de cendres (PSLC) a été estimé par la relation PSLC = 80% du poids sec.

2.3.4 Traitements des données

2.3.4.1 Tri et détermination

Les échantillons de sédiments contenant la macrofaune ont tout d'abord été rincés afin d'éliminer le fixateur (formol) sous hotte aspirante (avec équipements de sécurité), les émanations de ce produit étant irritantes et nocives pour la santé. Les échantillons sont rincés au fur et à mesure de l'avancement des travaux, afin d'éviter toute dégradation des organismes. Ce rinçage s'effectue sur un tamis de 0,5 mm afin d'être sûr de conserver les individus d'une taille supérieure ou égale à 1 mm.

L'identification des organismes a été effectuée sous loupe binoculaire et microscope (pour les caractères morphologiques les plus petits) au laboratoire M2C. La détermination des individus a été effectuée jusqu'au niveau de l'espèce pour chaque échantillon lorsqu'une telle précision était possible. Ce travail se base sur différents ouvrages du Royaume-Uni (British Synopsis), les Faunes de France si nécessaires, mais surtout sur de nombreuses publications scientifiques récentes révisant les familles ou les genres. Le comptage du nombre d'individus par taxon a été réalisé pour chaque répliat, et les individus de chaque espèce ont été placés dans un pilulier.

La détermination de l'épifaune sessile a été réalisée jusqu'au niveau taxonomique le plus élevé possible. Les espèces arrachées au substratum ont également été prises en compte. Pour les espèces dénombrables, les individus (ou colonies dans les cas des *Alcyonium*) ont été dénombrés. Pour les espèces de l'épifaune sessile difficilement dénombrables, seule leur

présence a été notée. Les noms scientifiques attribués à chaque organisme ont été mis à jour en se basant sur le site web WoRMS (World Register of Marine Species, <https://www.marinespecies.org/>) à la date du 15 mars 2023.

2.3.4.2 Biomasses

Tous les individus d'une même espèce ont été regroupés dans un même pilulier, puis placés dans un creuset en porcelaine placé dans une étuve à 60°C pendant au minimum 96h afin de permettre une évaporation complète de l'alcool pour ainsi obtenir le poids sec (PS). Les échantillons ont ensuite été calcinés dans un four à 500°C durant 5h, au cours de laquelle la matière organique est consommée. Une nouvelle pesée a ainsi permis de déterminer le poids de cendres (PC). La différence entre le poids de cendres (PC) et le poids sec (PS) donne le poids sec libre de cendres (PSLC), correspondant à la matière organique donc à la "biomasse". Les pesées ont été effectuées à l'aide d'une balance de marque Mettler®, d'une précision au 0,0001 g près.

2.3.4.3 Traitement statistique

L'ensemble des données a été enregistré sur un fichier Excel. Les calculs ont été effectués sous Excel 2016 et les analyses ont été réalisées grâce au logiciel Primer v6 (Clark et Gorley, 2006) et logiciel R (R Core Team, 2022). Les abondances (N) et les biomasses (en PSLC) ont été exprimées par 1 m² dans le cas des prélèvements à la benne Van Veen.

- La richesse taxonomique

La richesse taxonomique (Rt) a été mesurée en additionnant le nombre de taxa recueillis au niveau de chaque sous-station, c'est-à-dire sur les cinq répliqués de 0,1 m² soit une surface totale de 0,5 m² pour chaque station.

- L'indice de Shannon Weaver

H', l'indice de diversité de Shannon-Weaver (1948), exprimé en bits, a été calculé à partir d'un logarithme de base 2 pour chaque station avec la formule suivante :

$$H' = - \sum \left(\frac{ni}{N} \right) \times \log_2 \left(\frac{ni}{N} \right)$$

- ni l'abondance du taxon i
- N l'abondance totale dans la station considérée

Les valeurs de H' sont interprétées selon le Tableau 3 d'après les limites fixées par Vincent *et al.* (2002) et utilisées dans le cadre de la DCE (Directive Cadre sur L'Eau) pour les zones côtières.

Tableau 3. Interprétation des valeurs de H' (d'après Vincent *et al.*, 2002)

Valeur de H'	Interprétation
[0 - 1[	Communauté très peu diversifiée
[1 - 2[	Communauté peu diversifiée
[2 - 3[	Communauté diversifiée
[3 - 4[	Communauté très diversifiée
[4 - +∞ [	Communauté extrêmement diversifiée

- L'indice de Pielou

L'indice d'équitabilité de Piélu (J', Piélu, 1966) complète l'indice de diversité de Shannon (H'). Il permet d'appréhender la structure quantitative d'une communauté en termes de dominance d'une ou de plusieurs espèces. Il correspond au rapport entre la diversité (H') observée au sein d'une station et la diversité maximale (H' max), atteinte lorsque les espèces ont des effectifs identiques (Frontier *et al.*, 2004). Sa valeur varie de 0 (dominance d'une des espèces) à 1 (équipartition des individus dans les espèces). Il a été calculé selon la formule suivante :

$$J' = \frac{H'}{H \max}$$

Les valeurs de J' seront interprétées selon le Tableau 4, d'après les limites proposées par Dauvin *et al.* (2017).

Tableau 4. Interprétation des valeurs de J' (d'après Dauvin *et al.*, 2017)

Valeur de J'	Interprétation
[0 - 0,2[	Communauté très peu diversifiée
[0,2 - 0,4[	Communauté peu diversifiée
[0,4 - 0,6[	Communauté diversifiée
[0,6 - 0,8[	Communauté très diversifiée
[0,8-1,0[	Communauté extrêmement diversifiée

- *Indice biotique : AMBI*

Le Coefficient Benthique (CB ou AMBI, Borja *et al.*, 2000) consiste à pondérer le pourcentage des espèces classées en cinq groupes écologiques (GI à GV) puis de calculer l'AMBI selon la formule suivante :

$$AMBI = 0 EG_I + 1,5 EG_{II} + 3 EG_{III} + 4,5 EG_{IV} + 6 EG_V$$

- EG_I = espèces très sensibles à l'enrichissement en Matière Organique
- EG_{II} = espèces indifférentes à l'enrichissement en Matière Organique
- EG_{III} = espèces tolérantes à un excès de Matière Organique
- EG_{IV} = espèces opportunistes de 2nd ordre
- EG_V = espèces opportunistes de 1er ordre

Cet indice permet de déterminer un état écologique et une classification selon un code couleur (Tableau 5). Selon la valeur de l'AMBI, l'état de la communauté est qualifié de non perturbé à azoïque, faisant aussi référence à un degré de stress propre au site d'étude (de non stressé à extrêmement stressé). L'avantage de cette méthode est de fournir une variable continue qui, grâce à une équivalence écologique, indique le statut écologique (de mauvais à très bon), défini pour répondre aux exigences de la DCE.

Tableau 5. Équivalence entre les valeurs de l'AMBI et les différents états écologiques définis par la Directive Cadre Eau (d'après Borja *et al.*, 2000, 2004)

Classification du site	Valeur de l'indice AMBI	État écologique (DCE)	Dominance des groupes écologiques
Non stressé	$0,0 < AMBI < 0,2$	Très bon	I - II
	$0,2 < AMBI < 1,2$		
Légèrement stressé	$1,2 < AMBI < 3,3$	Bon	III
Moyennement stressé	$3,3 < AMBI < 4,3$	Moyen	IV - V
	$4,3 < AMBI < 5,0$		
Fortement stressé	$5,0 < AMBI < 5,5$	Médiocre	V
	$5,5 < AMBI < 6$		
Extrêmement stressé	Azoïque	Mauvais	Azoïque

- *Indice BO2A*

Le BO2A (Benthic Opportunistic Annelida Amphipoda) est un indice mesurant la réponse des communautés face à une perturbation, notamment en lien avec une pollution par les hydrocarbures ou un enrichissement en matière organique (Dauvin & Ruellet, 2009 ; Dauvin *et al.*, 2016 ; Dauvin, 2018, Tableau 6). Cet indice prend en compte les fréquences relatives des polychètes opportunistes (appartenant aux groupes écologiques IV et V) et à celles des amphipodes (bio-indicateurs, très sensibles à la pollution).

$$BO2A = \log_{10}\left(\frac{f \text{ polychètes IV \& V}}{f \text{ amphipode}} + 1\right)$$

Tableau 6. Équivalence entre les valeurs du BO2A et les différents états écologiques (Dauvin *et al.*, 2016; 2018)

État écologique	Valeur du BO2A
Très bon	0,00 < BO2A ≤ 0,02
Bon	0,02 < BO2A ≤ 0,13
Moyen	0,13 < BO2A ≤ 0,20
Médiocre	0,20 < BO2A ≤ 0,26
Mauvais	BO2A > 0,26

- Analyses multivariées : Classification Ascendante Hiérarchique

La Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) est une méthode de partition des données (ou clustering), produisant des regroupements définis par la similarité des données qui les composent (Lebart *et al.*, 2006). Cette méthode procède par agglomération successive de deux objets entre eux, de deux classes entre elles ou d'une classe et d'un objet présentant une forte similarité (ou une faible distance, Benzécri, 1976), jusqu'à obtenir une hiérarchie de partition des objets. Différents calculs de distance pouvant être faits, le choix doit être judicieusement effectué en fonction du type de données employées.

Pour les données en présence-absence et l'analyse comparative des assemblages, c'est l'indice de similarité de Sorensen qui a été choisi. Cet indice de similarité accorde plus d'importance à la présence qu'à l'absence des espèces. Cet indice est calculé de la façon suivante :

$$S = \frac{2A}{(2A+B+C)}$$

- A, le nombre d'espèces présentes dans les deux prélèvements
- B, le nombre d'espèces présentes dans un seul des deux prélèvements
- C, le nombre d'espèces présentes uniquement dans l'autre prélèvement

Le facteur « 2 » devant le A permet d'assigner une plus grande importance à la double présence.

L'indice de similarité de Bray-Curtis a été employé pour les données d'abondance, après avoir été transformé en $\log(x+1)$ afin de minimiser l'importance des espèces abondantes avec un facteur 1000 (Clarke & Gorley, 2006). L'analyse des dendrogrammes a été complétée par une analyse SIMPER pour définir quelles espèces correspondent le plus aux différents assemblages (PRIMER V6).

2.3.1 Résultats compartiment benthique

2.3.1.1 Nature sédimentaire des fonds

En octobre 2022, la quantité de sédiments qui a pu être soumise à l'analyse granulométrique a été suffisante pour tous les prélèvements. A partir des analyses granulométriques, l'échantillon a été caractérisée par quatre fractions sédimentaires principales selon les classes granulométriques suivantes:

- Les galets/blocs : fraction supérieure à 4 cm
- Les graviers : fraction supérieure à 2 mm
- Les sables : fraction comprise entre 63 μm et 2 mm
- Les silts-argiles : fraction inférieure à 63 μm

Les résultats mettent en évidence deux fractions différentes au niveau de la zone d'étude : une fraction de sables dominantes (71,68 % en moyenne sur l'ensemble des 32 stations) et une fraction de graviers (28,22 %). La fraction appartenant aux silts-argiles est vraiment mineure avec seulement 0,1 %.

Les pourcentages d'appartenance à chaque classe granulométrique sont ensuite replacés au sein d'un diagramme de Folk, permettant une classification du sédiment selon sa composition granulométrique (Tableau 7). Suivant la classification de Folk, les données granulométriques

au niveau de la zone d'étude se classent dans deux catégories sédimentaires principales : les sédiments grossiers (les graviers ensablés (sG) et les sables graveleux (gS)) et les sables moyens (Tableau 7).

Tableau 7. Résultats granulométriques (%) de chaque station, regroupés selon quatre fractions sédimentaires principales. Type sédimentaire d'après le diagramme de Folk (1954).

Station	Galets	Graviers	Sables	Silts-Argiles	Type sédimentaire
B1e	-	71,59	28,31	0,10	Graviers ensablés
B2e	-	0,23	99,66	0,10	Sables moyen
B3e	-	54,80	45,17	0,03	Graviers ensablés
B4e	-	0,39	99,41	0,20	Sables moyen
B5e	-	0,07	99,91	0,02	Sables moyen
B6e	-	17,33	82,37	0,30	Sables graveleux
B7e	-	28,56	71,42	0,01	Sables graveleux
B8e	-	40,33	58,98	0,70	Graviers ensablés
B9e	-	39,41	60,58	< 0,01	Graviers ensablés
B10e	-	9,90	89,94	0,16	Sables graveleux
B11e	-	42,31	57,47	0,22	Graviers ensablés
B12e	-	50,09	49,90	0,01	Graviers ensablés
PPO1	-	1,20	98,80	-	Sables moyen
PPO3	-	35,75	64,25	< 0,01	Graviers ensablés
PPO5	-	13,49	86,51	-	Sables graveleux
PEO2	-	44,34	55,53	0,14	Graviers ensablés
PEO3	-	3,25	96,08	0,67	Sables légèrement graveleux
PEO6	-	21,88	78,11	< 0,01	Sables graveleux
PEO8	-	12,92	87,08	< 0,01	Sables graveleux
B1i	-	84,17	15,83	-	Graviers ensablés
B2i	-	71,26	28,74	-	Graviers ensablés
B3i	-	35,91	63,79	0,30	Graviers ensablés
B5i	-	37,29	62,71	-	Graviers ensablés
B6i	-	41,06	58,94	-	Graviers ensablés
B7i	-	28,27	71,72	< 0,01	Sables graveleux
B9i	-	13,65	86,35	-	Sables graveleux
B10i	-	0,06	99,93	< 0,01	Sables moyen
B12i	-	32,87	67,13	< 0,01	Graviers ensablés
B14i	-	0,62	99,08	0,30	Sables moyen
B15i	-	0,68	99,31	-	Sables moyen
B16i	-	47,87	52,13	-	Graviers ensablés
B18i	-	21,46	78,54	-	Sables graveleux

2.3.1.2 La matière organique

Les pourcentages de Matière Organique (MO) pour la zone d'étude sont présentés dans la Figure 11 et le Tableau 8 pour la campagne d'octobre 2022. Ce pourcentage de matière organique varie de 0,34 à 2,73 %.

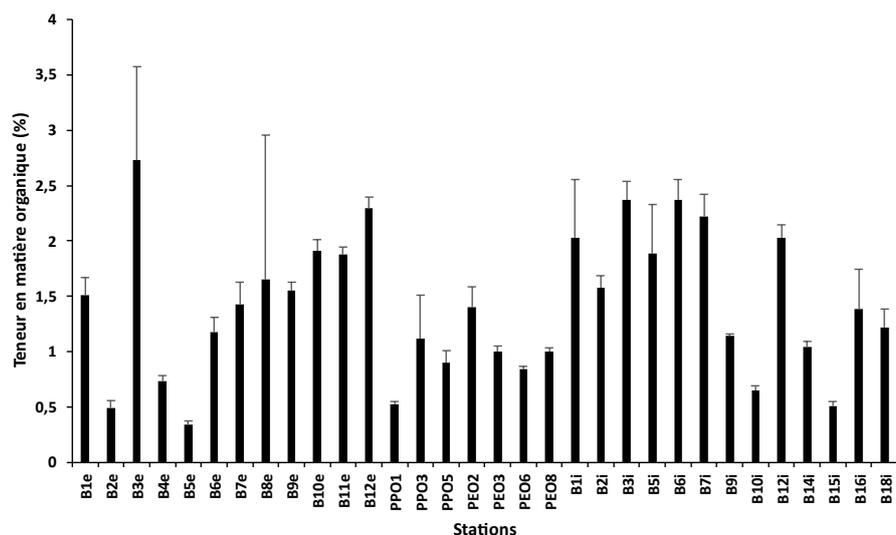


Figure 11. Teneur en matière organique (%) des 32 stations en octobre 2022.

Tableau 8. Teneur en matière organique (%) avec écart type des 32 stations en octobre 2022.

Station	MO ± écart type
B1e	1,51 ± 0,16
B2e	0,49 ± 0,07
B3e	2,73 ± 0,84
B4e	0,73 ± 0,05
B5e	0,34 ± 0,03
B6e	1,18 ± 0,13
B7e	1,43 ± 0,20
B8e	1,65 ± 1,30
B9e	1,55 ± 0,07
B10e	1,91 ± 0,10
B11e	1,88 ± 0,07
B12e	2,29 ± 0,10
PPO1	0,52 ± 0,03
PPO3	1,12 ± 0,39
PPO5	0,90 ± 0,10
PEO2	1,40 ± 0,18
PEO3	1,00 ± 0,05
PEO6	0,84 ± 0,02
PEO8	1,00 ± 0,03
B1i	2,02 ± 0,53
B2i	1,57 ± 0,11
B3i	2,37 ± 0,17
B5i	1,88 ± 0,44
B6i	2,37 ± 0,19
B7i	2,22 ± 0,20
B9i	1,14 ± 0,02
B10i	0,65 ± 0,04
B12i	2,03 ± 0,12
B14i	1,04 ± 0,05
B15i	0,51 ± 0,04
B16i	1,39 ± 0,36
B18i	1,22 ± 0,17

2.3.1.3 Richesse taxonomique

Au niveau de la zone d'étude 215 taxa ont été récoltés dont 207 taxa correspondent à de la macrofaune benthique dénombrable (endofaune et epifaune vagile) et 8 à de la macrofaune benthique indénombrable. La faune indénombrable, n'étant pas quantifiable, n'a pas été conservée dans la suite des analyses. La richesse taxonomique varie entre les 32 stations, allant de 25 taxa à la station PP01 à 94 taxa pour la station B1i (Figure 12).

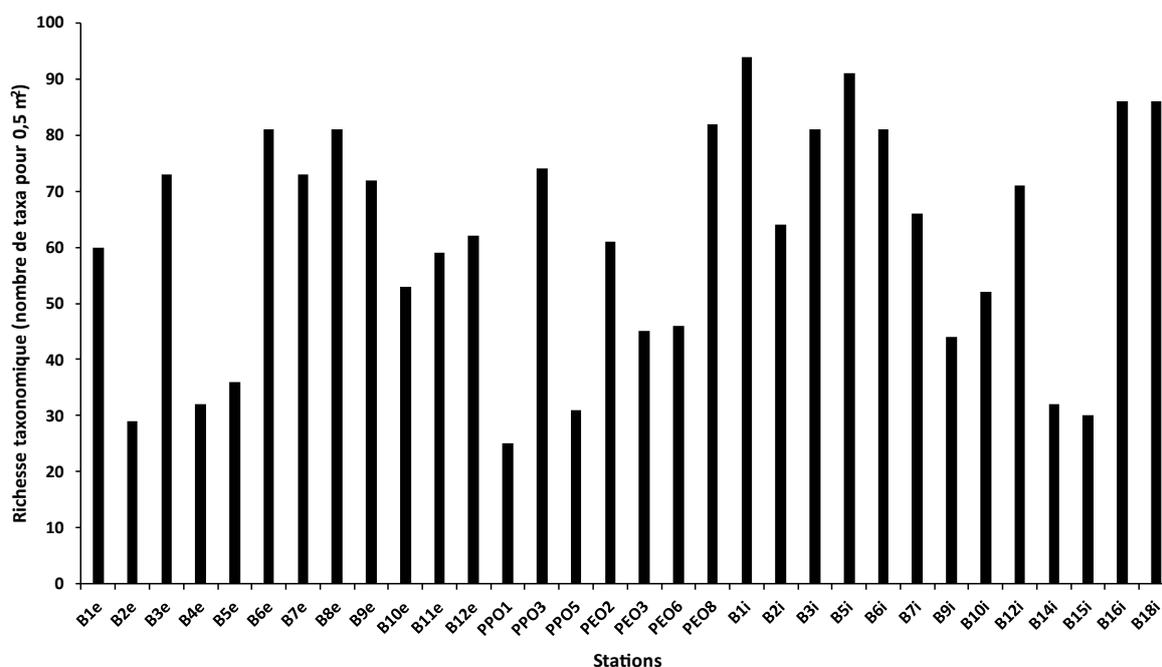


Figure 12. Richesse taxonomique totale des 32 stations en octobre 2022.

2.3.1.4 Diversité

L'ensemble des stations du site d'étude présentent des valeurs d'indices de Shannon correspondant à une communauté "diversifiée" à "extrêmement diversifiée" (Figure 13). L'indice de Shannon varie de 2,7 à la station B15i à 4,64 à la station B16i

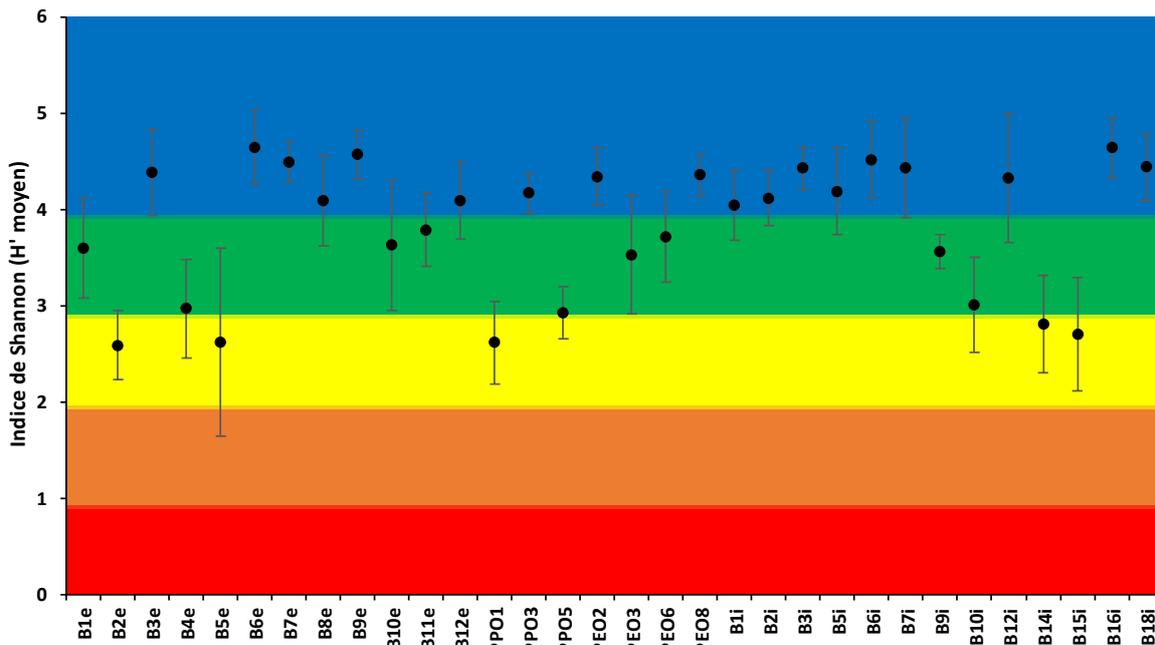


Figure 13. Indice de diversité de Shannon moyen avec écart type pour les 32 stations en octobre 2022.

L'indice de Piérou reste voisin de 0,8 entre les 32 stations, indiquant qu'il n'y a pas de dominance de certaines espèces entre les stations du site d'étude (Figure 14)

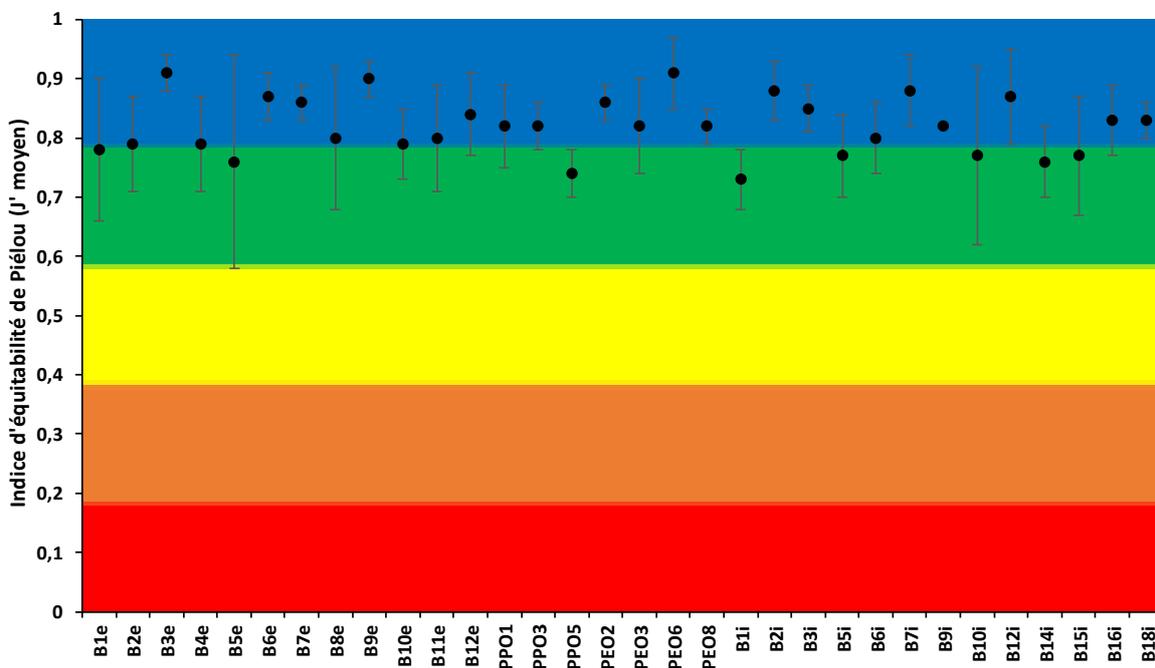


Figure 14. Indice d'équitabilité de Piérou moyen avec écart type pour les 32 stations en octobre 2022.

2.3.1.5 Abondances et biomasses

Abondances

Pour l'ensemble des 32 stations, un total de 25524 individus a été récolté sur une surface totale de 16 m² (soit 32 stations de 0,5 m²), soit 1595,25 individus.m⁻² en moyenne. Par station, les abondances moyennes varient de 116 individus pour 0,1 m⁻² (station B15i) à 512 individus pour 0,1 m⁻² (station B6i) (Figure 15)

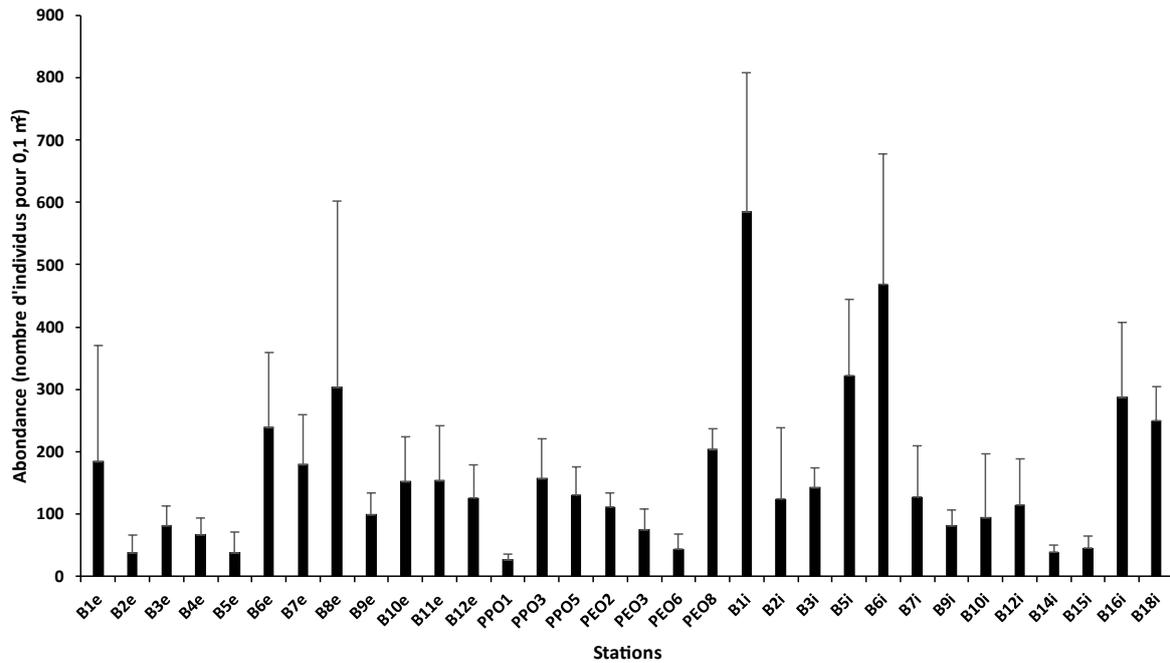


Figure 15. Abondances moyennes (nombre d'individus pour 0,1 m²) avec écart type des 32 stations pour octobre 2022.

Biomasses

Les biomasses moyennes varient de 2,6 g PSLC pour 0,1 m² (station B15i) à 16,6 g PSLC pour 0,1 m² (station B16i) (Figure 16).

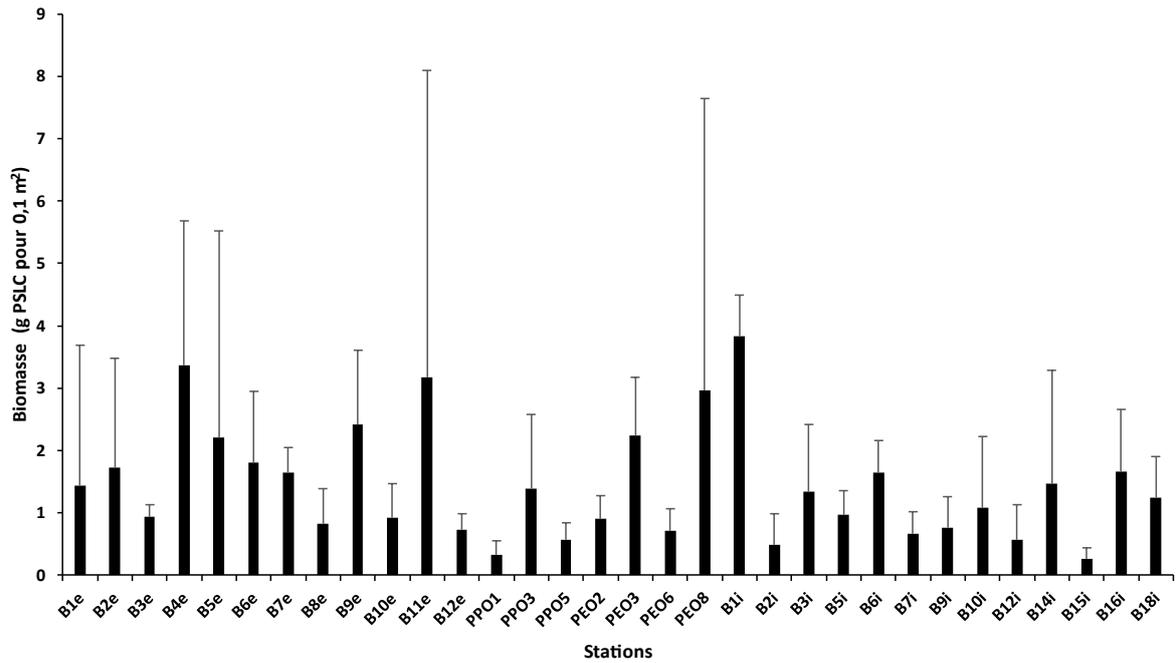


Figure 16. Biomasses moyennes (g PSLC pour 0,1 m²) avec écart type des 32 stations pour octobre 2022.

2.3.1.6 Indices

L'indice AMBI pour la zone d'étude assigne que l'ensemble des 32 stations est classé selon cet indice dans un « Bon » état écologique (Figure 17).

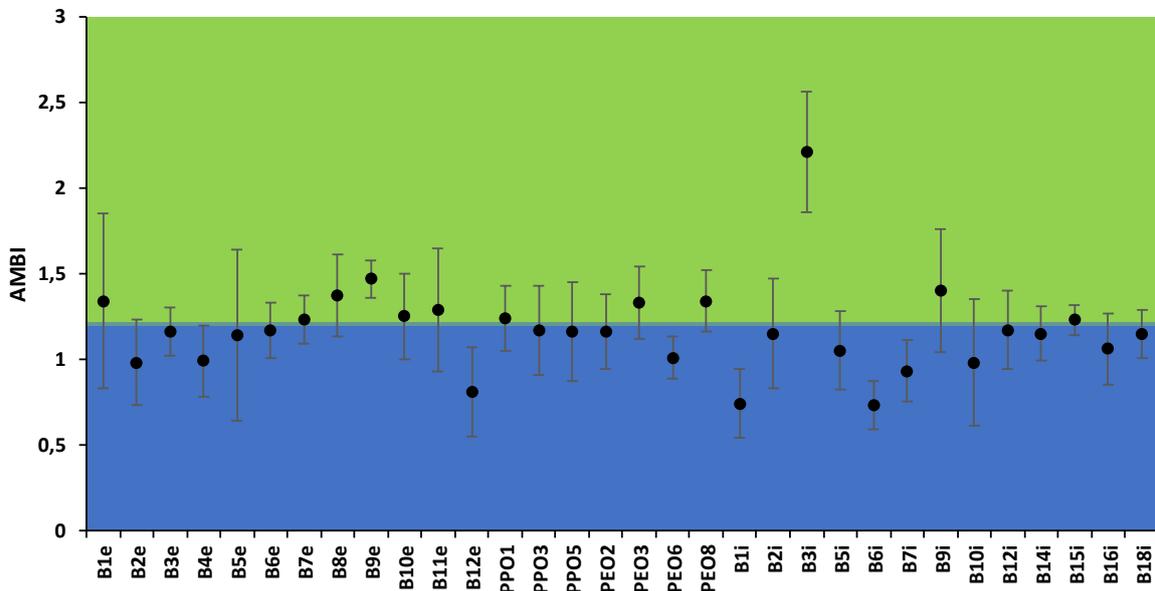


Figure 17. AMBI moyen avec écart type des 32 stations pour octobre 2022.

L'indice BO2A est faible sur l'ensemble des 32 stations du site d'étude, indiquant ainsi que les polychètes opportunistes sont largement minoritaires par rapport aux amphipodes au sein de cette zone de la Manche. Les valeurs de BO2A indiquent également un état écologique « bon » (Figure 18).

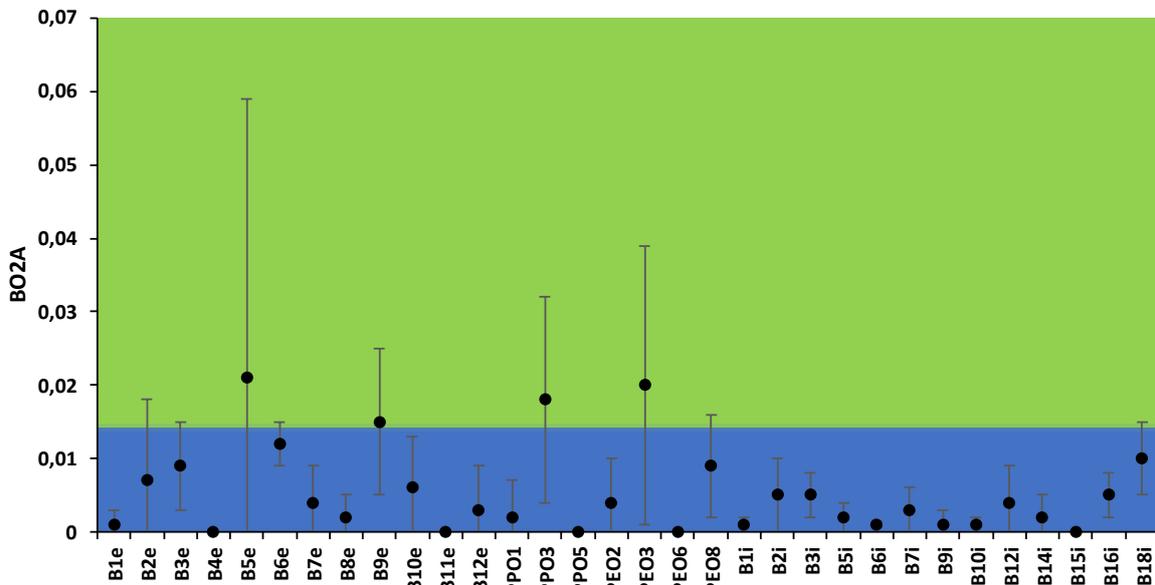


Figure 18. BO2A moyen avec écart type des 32 stations pour octobre 2022.

2.3.1.7 Assemblages faunistiques

L'analyse d'une matrice unique (correspondant à la somme des cinq réplicats des 32 stations) permet de distinguer deux assemblages différents en utilisant les données de présence/absence (Figure 19). L'assemblage **a** correspond aux stations caractérisées par les sables moyens et l'assemblage **b** aux stations caractérisées par les sédiments grossiers (sables graveleux et graviers ensablés) avec des espèces caractéristiques à ces deux différents habitats (Tableau 9).

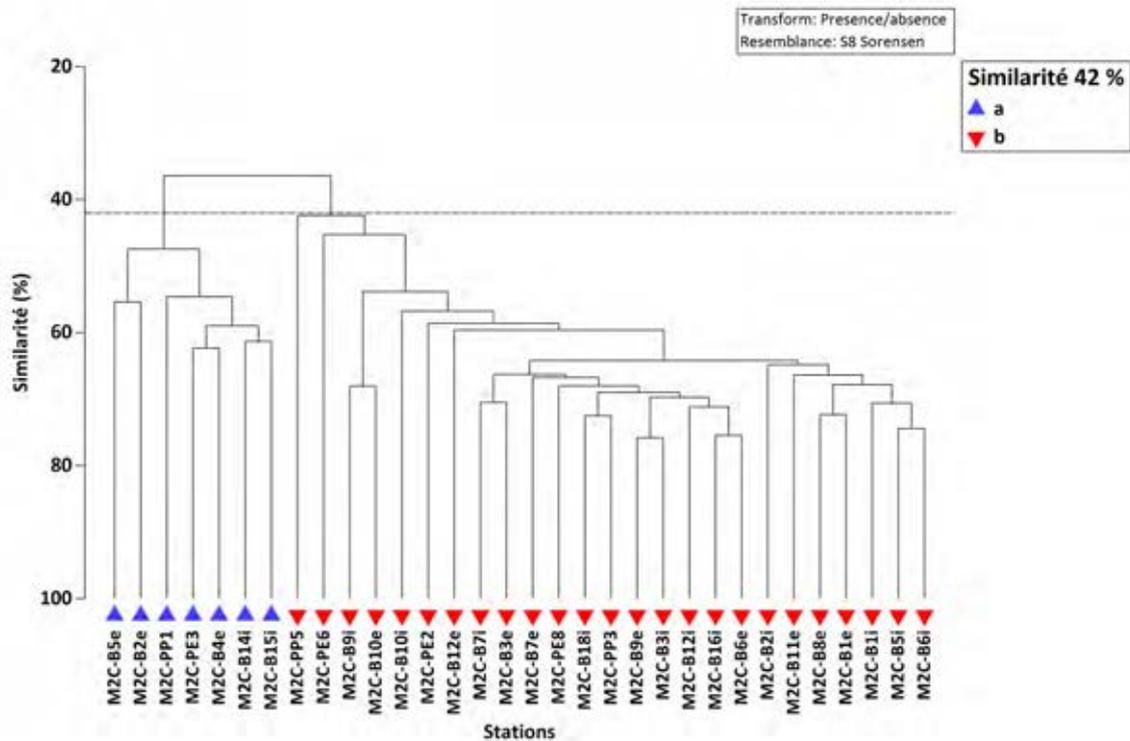


Figure 19. Dendrogramme correspondant à la matrice de similarité de Sorensen des 32 stations benthiques en présence/absence en octobre 2022.

Tableau 9. Analyse SIMPER sur la matrice de similarité de Sorensen des 32 stations benthiques en présence/absence en octobre 2022 pour une similarité de 42 %.

Assemblage a		Assemblage b	
Taxa	Cc (%)	Taxa	Cc (%)
<i>Echinocardium cordatum</i>	5,87	<i>Branchiostoma lanceolatum</i>	2,51
<i>Echinocyamus pusillus</i>	11,74	<i>Syllis variegata</i>	5,02
<i>Gastrosaccus spinifer</i>	17,62	<i>Eurydice pulchra</i>	7,35
<i>Nemertea</i>	23,49	<i>Echinocyamus pusillus</i>	9,63
<i>Nephtys hombergii</i>	29,36	<i>Syllis garciai</i>	11,92
<i>Ophiura albida</i>	35,23	<i>Aonides paucibranchiata</i>	14,19
<i>Thia scutellata</i>	41,11	<i>Glycera lapidum</i>	16,46
<i>Asbjornsenia pygmaea</i>	45,38	<i>Nemertea</i>	18,73
<i>Glycera lapidum</i>	49,56	<i>Ophiura albida</i>	20,97
<i>Echinocardium flavescens</i>	53,68	<i>Glycymeris glycymeris</i>	23,10

De la même façon que pour les données en présence/absence, deux assemblages différents sont observés avec les données d'abondance transformée en $\log(x+1)$. Ces deux assemblages correspondent aux mêmes assemblages mis en évidence avec les données transformées en présence-absence, c'est-à-dire, un assemblage correspond aux sables moyens et un assemblage correspond aux sédiments grossiers (Figure 20 ; Tableau 10). Ainsi, d'un point de vue quantitatif, les stations possèdent de grandes de fortes similitudes entre elles, traduisant une répartition des communautés benthiques en lien avec l'habitat sédimentaire.

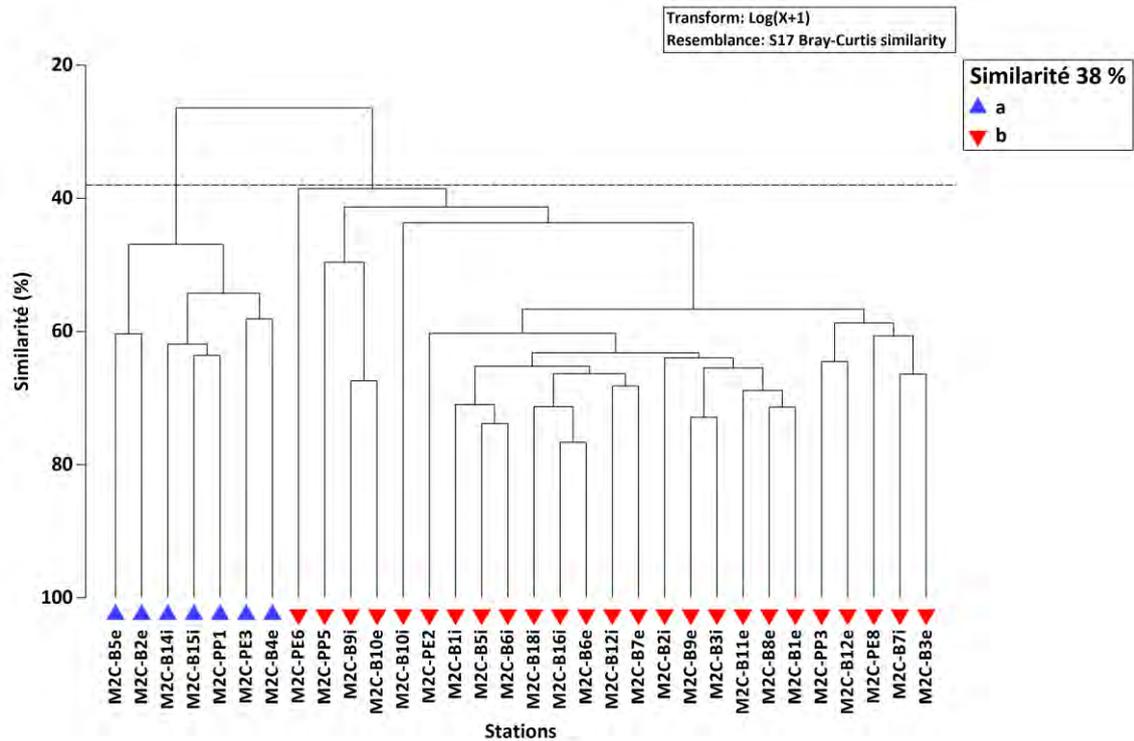


Figure 20. Dendrogramme correspondant à la matrice de similarité de Bray-Curtis des 32 stations benthiques après transformation en Log(X+1) en octobre 2022.

Tableau 10. Analyse SIMPER sur la matrice de similarité de Bray-Curtis des 32 stations benthiques après transformation en Log (X+1) en octobre 2022 pour une similarité de 38 %.

Assemblage a		Assemblage b	
Taxa	Cc (%)	Taxa	Cc (%)
<i>Nephtys hombergii</i>	14,95	<i>Syllis garciai</i>	4,27
<i>Gastrosaccus spinifer</i>	26,47	<i>Branchiostoma lanceolatum</i>	8,46
<i>Ophiura albida</i>	36,54	<i>Glycera lapidum</i>	12,58
<i>Echinocardium cordatum</i>	45,42	<i>Syllis variegata</i>	16,65
<i>Nemertea</i>	51,25	<i>Echinocyamus pusillus</i>	20,42
<i>Echinocyamus pusillus</i>	56,04	<i>Glycymeris glycymeris</i>	23,66
<i>Echinocardium flavescens</i>	60,66	<i>Polygordius lacteus</i>	26,89
<i>Thia scutellata</i>	64,85	<i>Acrocnida brachiata</i>	30,00
<i>Asbjornsenia pygmaea</i>	68,54	<i>Spirobranchus triqueter</i>	32,99
<i>Moerella donacina</i>	71,49	<i>Aonides paucibranchiata</i>	35,96

2.3.1.8 Comparaison avec les données de IDRA Bio

Lors de la prise en compte des prélèvements hivernaux réalisés en 2022 par IDRA dans une matrice unique (abondances transformées en $\text{Log}(x+1)$), cinq assemblages sont obtenus pour une similarité de 34% (Figure 21) :

- L'assemblage **a** : les stations des sédiments grossiers échantillonnées à la fin de l'été 2022.
- L'assemblage **b** : les stations des sédiments grossiers et la station PE03 des sables moyens échantillonnées en hiver
- L'assemblage **c** : six stations des sables moyens échantillonnées en hiver
- L'assemblage **d** : la station B5e des sables moyens échantillonnée en hiver
- L'assemblage **e** : les stations de sables moyens échantillonnées en fin d'été

Cette analyse met en évidence les différences de communautés benthiques entre les deux grands habitats sédimentaires, avec une communauté caractérisée par les sédiments grossiers (graviers ensablés et sables graveleux) et une seconde communauté correspond aux sables moyens comme déjà mis en évidence dans l'état initial réalisé par Jean-Philippe PEZY au cours de sa thèse en 2017. Un effet saisonnier est également mis en évidence avec les prélèvements réalisés entre les deux structures (M2C et IDRA) appartenant chacun à un assemblage. Cet effet saisonnier peut également correspondre à un effet dû à la différence des taxonomistes, en effet, la liste des taxa observées entre les deux structures est différente (Figure 21).

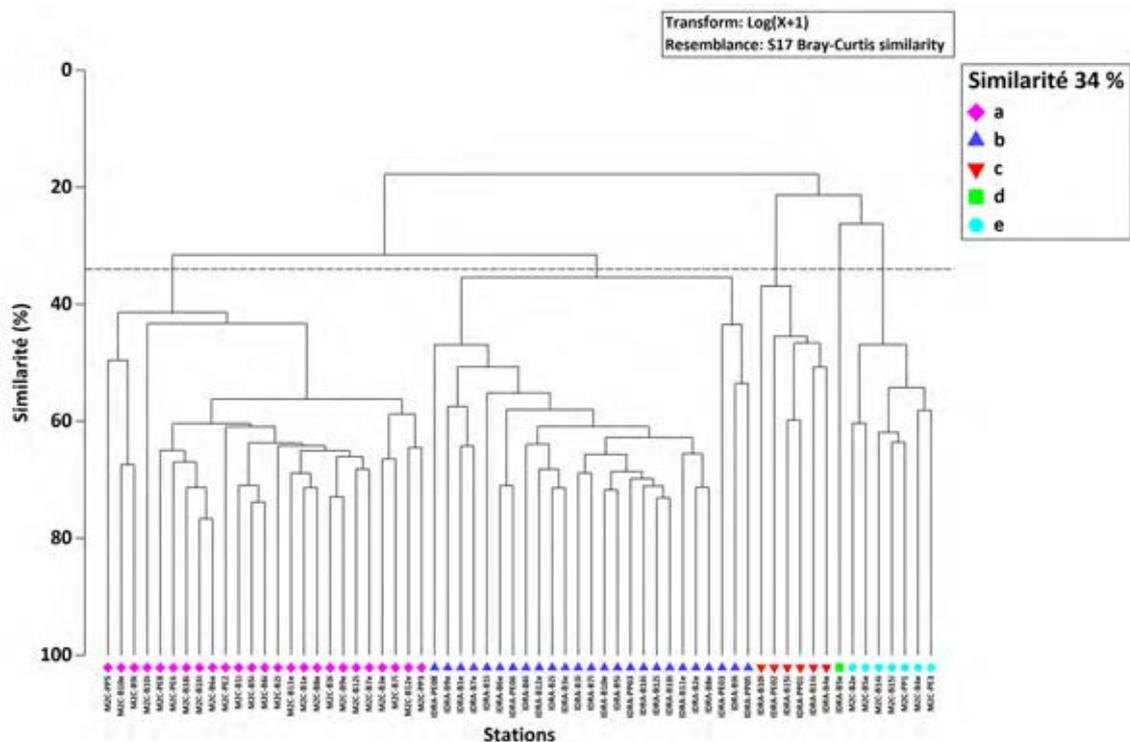


Figure 21. Dendrogramme correspondant à la matrice de similarité de Bray-Curtis des 32 stations benthiques échantillonnées en 2022 (hiver et fin d'été) après transformation en Log(X+1) en octobre 2022.

Lors de l'analyse des paramètres du benthos étudiés en 2022, il s'observe une diversité de 291 taxa en hiver alors que la diversité est de 207 à la fin de l'été. Pour les abondances, elles sont en moyenne de 139,51 individus pour 0,1 m² en hiver et de 159,52 individus pour 0,1 m² à la fin de l'été. Pour les biomasses, elles varient de 3,69 g PSLC pour 0,1 m² en hiver à 1,44 g PSLC 0,1 m² à la fin de l'été. Globalement, les indices écologiques sont similaires entre la situation hivernale et la situation à la fin de l'été, mettant en évidence une communauté benthique stable sur ce site d'étude (Tableau 11).

Tableau 11. Synthèse des caractéristiques et des indices écologiques du benthos échantillonné en 2022 en hiver (Idra) et à la fin de l'été (M2C).

Station	Type sédimentaire		Rt		Abondance		Biomasse		H'		J'		AMBI		B02A	
	M2C	IDRA	M2C	IDRA	M2C	IDRA	M2C	IDRA	M2C	IDRA	M2C	IDRA	M2C	IDRA	M2C	IDRA
B1e	sG	sG	60	87	185,2 ± 185,0	105,6 ± 52,0	1,4 ± 2,3	1,2 ± 1,3	3,60 ± 0,52	3,62 ± 0,99	0,78 ± 0,12	0,78 ± 0,05	1,34 ± 0,51	1,43 ± 0,15	<0,001 ± 0,002	0,010 ± 0,007
B2e	S	sG	29	112	38,4 ± 27,0	120,2 ± 17,9	1,7 ± 1,7	2,3 ± 2,8	2,59 ± 0,36	4,29 ± 0,36	0,79 ± 0,08	0,82 ± 0,06	0,98 ± 0,25	1,44 ± 0,14	0,007 ± 0,011	0,013 ± 0,007
B3e	sG	gS	73	74	81,8 ± 31,4	114,2 ± 40,7	0,9 ± 0,2	3,5 ± 2,8	4,39 ± 0,45	4,04 ± 0,55	0,91 ± 0,03	0,81 ± 0,07	1,16 ± 0,14	1,08 ± 0,40	0,009 ± 0,006	0,008 ± 0,008
B4e	S	S	32	36	67,6 ± 25,4	119,6 ± 64,6	3,4 ± 2,3	4,3 ± 2,4	2,97 ± 0,51	3,88 ± 0,51	0,79 ± 0,08	0,80 ± 0,08	0,99 ± 0,21	0,87 ± 0,28	0,000 ± 0,000	0,003 ± 0,003
B5e	S	S	36	56	38,4 ± 32,3	164,4 ± 105,9	2,2 ± 3,3	4,2 ± 2,4	2,62 ± 0,98	3,73 ± 0,24	0,76 ± 0,18	0,77 ± 0,07	1,14 ± 0,50	0,83 ± 0,21	0,021 ± 0,038	0,002 ± 0,002
B6e	sG	gS	81	66	239,4 ± 119,1	231,4 ± 134,3	1,8 ± 1,1	5,4 ± 1,9	4,65 ± 0,38	4,10 ± 0,28	0,87 ± 0,04	0,78 ± 0,05	1,17 ± 0,16	1,06 ± 0,20	0,012 ± 0,003	0,006 ± 0,006
B7e	gS	sG	73	113	180,2 ± 78,3	306,4 ± 140,9	1,6 ± 0,4	6,2 ± 1,3	4,49 ± 0,21	4,31 ± 0,29	0,86 ± 0,03	0,78 ± 0,06	1,23 ± 0,14	1,16 ± 0,08	0,004 ± 0,005	0,010 ± 0,005
B8e	sG	sG	81	91	304,0 ± 297,6	172,8 ± 181,6	0,8 ± 0,6	6,8 ± 3,3	4,09 ± 0,47	3,68 ± 0,97	0,80 ± 0,12	0,79 ± 0,06	1,37 ± 0,24	1,06 ± 0,13	0,002 ± 0,003	0,006 ± 0,006
B9e	sG	sG	72	100	99,2 ± 35,2	152,0 ± 191,4	2,4 ± 1,2	7,0 ± 3,4	4,57 ± 0,25	3,55 ± 0,90	0,90 ± 0,03	0,80 ± 0,06	1,47 ± 0,11	1,02 ± 0,10	0,015 ± 0,010	0,006 ± 0,006
B10e	gS	gS	53	97	153,0 ± 71,1	409,6 ± 116,3	0,9 ± 0,5	2,7 ± 2,1	3,63 ± 0,68	3,49 ± 0,36	0,79 ± 0,06	0,63 ± 0,06	1,25 ± 0,25	0,52 ± 0,11	0,006 ± 0,007	0,003 ± 0,002
B11e	sG	sG	59	85	154,6 ± 86,3	262,2 ± 216,2	3,2 ± 4,9	2,2 ± 2,4	3,79 ± 0,38	3,40 ± 0,34	0,80 ± 0,09	0,72 ± 0,15	1,29 ± 0,36	0,69 ± 0,32	0,000 ± 0,000	0,003 ± 0,002
B12e	sG	gS	62	67	126,2 ± 51,8	186,0 ± 216,0	0,7 ± 0,3	2,0 ± 2,4	4,09 ± 0,40	3,44 ± 0,31	0,84 ± 0,07	0,77 ± 0,14	0,81 ± 0,26	0,92 ± 0,45	0,003 ± 0,006	0,003 ± 0,005
PPO1	S	S	25	19	27,0 ± 7,7	22,0 ± 5,6	0,3 ± 0,2	2,8 ± 2,7	2,62 ± 0,43	2,51 ± 0,39	0,82 ± 0,07	0,84 ± 0,04	1,24 ± 0,19	0,79 ± 0,13	0,002 ± 0,005	0,000 ± 0,000
PPO3	sG	gS	74	66	157,6 ± 62,3	21,4 ± 4,9	1,4 ± 1,2	1,5 ± 0,5	4,17 ± 0,21	2,28 ± 0,24	0,82 ± 0,04	0,83 ± 0,05	1,17 ± 0,26	0,76 ± 0,12	0,018 ± 0,014	0,000 ± 0,000
PPO5	gS	gS	31	43	131,0 ± 44,0	57,6 ± 81,4	0,6 ± 0,3	2,1 ± 1,1	2,93 ± 0,27	2,75 ± 1,16	0,74 ± 0,04	0,83 ± 0,05	1,16 ± 0,29	0,87 ± 0,31	0,000 ± 0,000	0,006 ± 0,014
PEO2	sG	S	61	25	111,4 ± 22,6	31,2 ± 5,1	0,9 ± 0,4	6,8 ± 3,9	4,34 ± 0,30	3,12 ± 0,48	0,86 ± 0,03	0,84 ± 0,06	1,16 ± 0,22	0,90 ± 0,13	0,004 ± 0,006	0,002 ± 0,004
PEO3	(g)S	S	45	29	75,0 ± 32,8	29,4 ± 6,5	2,2 ± 0,9	4,6 ± 3,3	3,53 ± 0,62	3,07 ± 0,54	0,82 ± 0,08	0,85 ± 0,04	1,33 ± 0,21	0,86 ± 0,12	0,020 ± 0,019	0,002 ± 0,004
PEO6	gS	gS	46	60	44,2 ± 24,2	28,6 ± 6,8	0,7 ± 0,4	4,3 ± 3,6	3,72 ± 0,47	3,07 ± 0,54	0,91 ± 0,06	0,86 ± 0,04	1,01 ± 0,12	0,84 ± 0,12	0,000 ± 0,000	0,002 ± 0,004
PEO8	gS	gS	82	63	202,4 ± 32,9	23,2 ± 6,2	3,0 ± 4,7	2,8 ± 2,7	4,36 ± 0,22	2,80 ± 0,50	0,82 ± 0,03	0,87 ± 0,04	1,34 ± 0,18	0,76 ± 0,13	0,009 ± 0,007	0,000 ± 0,000
B1i	sG	sG	94	90	585,4 ± 222,8	127,2 ± 9,4	3,8 ± 0,7	1,5 ± 1,3	4,04 ± 0,36	4,09 ± 0,34	0,73 ± 0,05	0,79 ± 0,04	0,74 ± 0,20	1,47 ± 0,12	0,001 ± 0,001	0,014 ± 0,005
B2i	sG	sG	64	66	124,6 ± 113,9	104,4 ± 30,7	0,5 ± 0,5	3,4 ± 2,9	4,12 ± 0,29	4,08 ± 0,51	0,88 ± 0,05	0,82 ± 0,05	1,15 ± 0,32	1,31 ± 0,33	0,005 ± 0,005	0,009 ± 0,008
B3i	sG	sG	81	98	143,0 ± 30,6	102,0 ± 41,7	1,3 ± 1,1	3,8 ± 2,6	4,43 ± 0,22	3,96 ± 0,54	0,85 ± 0,04	0,81 ± 0,07	2,21 ± 0,35	1,01 ± 0,39	0,005 ± 0,003	0,007 ± 0,006
B5i	sG	sG	91	88	322,6 ± 121,8	235,2 ± 131,4	1,0 ± 0,4	4,1 ± 2,3	4,19 ± 0,45	3,94 ± 0,34	0,77 ± 0,07	0,75 ± 0,06	1,05 ± 0,23	0,92 ± 0,28	0,002 ± 0,002	0,005 ± 0,006
B6i	sG	sG	81	64	469,2 ± 209,0	311,0 ± 136,3	1,6 ± 0,5	5,8 ± 1,4	4,52 ± 0,40	4,16 ± 0,25	0,80 ± 0,06	0,76 ± 0,05	0,73 ± 0,24	1,08 ± 0,19	0,001 ± 0,000	0,007 ± 0,006
B7i	gS	sG	66	100	128,0 ± 81,7	249,2 ± 186,3	0,7 ± 0,4	7,2 ± 2,9	4,43 ± 0,52	4,07 ± 0,77	0,88 ± 0,06	0,79 ± 0,06	0,93 ± 0,18	1,14 ± 0,10	0,003 ± 0,003	0,010 ± 0,006
B9i	gS	gS	44	43	81,6 ± 24,0	63,0 ± 69,5	0,8 ± 0,5	6,7 ± 3,8	3,56 ± 0,18	3,43 ± 0,84	0,82 ± 0,00	0,84 ± 0,06	1,40 ± 0,36	0,95 ± 0,17	0,001 ± 0,002	0,004 ± 0,002
B10i	S	S	52	55	95,0 ± 102,2	305,2 ± 176,4	1,1 ± 1,1	2,3 ± 2,4	3,01 ± 0,49	3,43 ± 0,39	0,77 ± 0,15	0,68 ± 0,11	0,98 ± 0,37	0,60 ± 0,19	0,001 ± 0,001	0,003 ± 0,005
B12i	sG	sG	71	92	114,8 ± 73,4	132,6 ± 194,8	0,6 ± 0,6	1,9 ± 2,3	4,33 ± 0,67	3,62 ± 0,62	0,87 ± 0,08	0,82 ± 0,13	1,17 ± 0,23	1,06 ± 0,43	0,004 ± 0,005	0,004 ± 0,005
B14i	S	S	32	38	39,0 ± 10,2	39,8 ± 29,6	1,5 ± 1,8	1,9 ± 2,3	2,81 ± 0,51	3,37 ± 0,98	0,76 ± 0,06	0,85 ± 0,06	1,15 ± 0,16	1,23 ± 0,24	0,002 ± 0,003	0,003 ± 0,005
B15i	S	S	30	17	45,4 ± 18,8	59,6 ± 48,0	0,3 ± 0,2	2,6 ± 2,1	2,70 ± 0,59	3,48 ± 0,98	0,77 ± 0,10	0,83 ± 0,07	1,23 ± 0,09	1,35 ± 0,15	0,000 ± 0,000	0,005 ± 0,005
B16i	sG	sG	86	89	287,8 ± 119,7	80,6 ± 54,8	1,7 ± 1,0	2,2 ± 2,4	4,64 ± 0,31	3,60 ± 1,06	0,83 ± 0,06	0,82 ± 0,06	1,06 ± 0,21	1,41 ± 0,11	0,005 ± 0,003	0,009 ± 0,007
B18i	sG	gS	86	91	249,8 ± 55,3	96,6 ± 49,2	1,2 ± 0,7	2,1 ± 2,5	4,44 ± 0,35	3,68 ± 1,05	0,83 ± 0,03	0,80 ± 0,06	1,15 ± 0,14	1,43 ± 0,15	0,010 ± 0,005	0,008 ± 0,007

Au niveau des sédiments grossiers, en termes d'abondance, les groupes trophiques dominants sont les prédateurs, les dépositivores de surfaces et les suspensivores avec de légères différences entre les saisons (Tableau 12). Alors qu'au niveau des sables moyens, en termes d'abondance, il y a un certain équilibre entre les groupes trophiques, avec les prédateurs qui correspondent au groupe trophique le plus important. Au niveau

des biomasses, sur les sédiments grossiers, il y a une très dominance des suspensivores alors que pour les sables moyens, il y a une codominance des suspensivores et des déposivores de sub-surface (Tableau 12).

Tableau 12. Moyennes des abondances (nombre d'individus pour 0,5 m²) et des biomasses (g PSLC pour 0,5 m²) au niveau de chaque habitat (sédiments grossiers et sables moyens) par groupe trophique (Grazer : brouteurs ; Predators : prédateurs ; Suspensivors : filtreur ; Scavengers : nécrophages ; sDF :déposivores de surface ; ssDF : déposivores de sub-surface).

Groupe trophique	Sédiments grossiers				Sables moyens			
	Abondance		Biomasse		Abondance		Biomasse	
	Mars 2022	Octobre 2022	Mars 2022	Octobre 2022	Mars 2022	Octobre 2022	Mars 2022	Octobre 2022
Grazer (G)	0,45	2,72	< 0,01	< 0,01	-	-	-	-
Predator (P)	344,75	277,88	0,73	0,81	79,00	93,29	0,63	0,44
Suspensivor (S)	162,58	334,84	14,76	5,33	54,75	43,86	2,29	2,15
Scavenger (Scv)	4,46	18,12	0,23	0,60	5,62	15,43	0,40	0,48
sDF	353,25	290,08	0,37	0,27	38,37	46,71	0,16	0,04
ssDF	55,46	27,04	0,57	0,15	26,00	51,14	3,64	4,34

2.3.2 Résultats compartiment suprabenthique

Les résultats concernant le compartiment suprabenthique sont présentés en Annexe.

2.3.3 Résultats méiofaune

Pour l'estimation de la méiofaune, des carottages ont été réalisés au niveau des habitats sédimentaires aux deux saisons avec un carottier Reineck (station B4i pour les sédiments grossiers et B15i pour les sables moyens). Au niveau de chaque station, trois carottages ont été réalisés avec le carottier, puis dans chacune des carottes, trois prélèvements ont été réalisés avec un tube d'un diamètre de 3,6 cm. Le sédiment récupéré à partir de ce sous-carottage a été placé sur un tamis de 1 mm de maille, afin de récupérer sur un tamis de 38 µm de maille, la fraction sédimentaire correspondant à la méiofaune (entre 0,038 et 1 mm) qui a ensuite été formolée. Le restant du sédiment de la carotte a été conservé afin de réaliser des prélèvements pour l'isotopie de la méiofaune.

L'abondance des groupes constituant la méiofaune est plus importante au niveau des sédiments grossiers qu'au niveau des sables (Tableau 13). Selon les groupes, ce facteur va de 2 à 10, de manière générale, l'abondance totale est trois fois plus importante au niveau des sédiments grossiers par rapport aux sables moyens (Tableau 13). Concernant les biomasses, elles sont à peu près du même ordre de grandeur entre les deux habitats sédimentaires (Tableau 13).

Tableau 13 Abondance moyenne (nombre d'individus pour 1 m²) et biomasse moyenne (g PSLC par m²) pour les différents groupes constituant la méiofaune.

	Abondance				Biomasse			
	Sédiment grossiers		Sables moyens		Sédiment grossiers		Sables moyens	
	Mars	Sep.	Mars	Sep.	Mars	Sep.	Mars	Sep.
Nématodes	305391,8 ± 119701,5	434075,58 ± 117473,4	27395,8 ± 11804,9	52390,38 ± 10741,7	0,16 ± 0,06	0,23 ± 0,06	0,26 ± 0,11	0,49 ± 0,10
Polychètes	18882,3 ± 9819,0	40602,58 ± 12585,7	6003,1 ± 3468,9	14298,28 ± 4271,9	0,10 ± 0,04	0,20 ± 0,06	0,24 ± 0,13	0,56 ± 0,16
C. harpacticoïdes	59375,7 ± 21948,9	104344,08 ± 28301,6	52499,4 ± 19113,0	106417,88 ± 13798,4	0,28 ± 0,10	0,49 ± 0,13	0,25 ± 0,09	0,50 ± 0,06
Bivalves	8731,7 ± 7202,7	18773,28 ± 4590,3	5566,5 ± 1993,8	11460,48 ± 3591,5	0,35 ± 0,28	0,74 ± 0,18	0,18 ± 0,06	0,37 ± 0,11
Crustacés	1637,2 ± 1387,1	6876,28 ± 2067,3	3383,5 ± 2125,8	10805,58 ± 5513,8	0,23 ± 0,18	0,93 ± 0,28	0,23 ± 0,14	0,74 ± 0,37
Foraminifères	23357,3 ± 8872,0	23357,38 ± 8872,0	14189,0 ± 3999,5	14189,08 ± 3999,5	1,99 ± 0,75	1,99 ± 0,75	1,21 ± 0,34	1,21 ± 0,34
Ostracodes	545,7 ± 945,2	14079,98 ± 6391,6	109146,5 ± 189,0	3165,28 ± 2861,4	0,08 ± 0,13	1,90 ± 0,86	0,02 ± 0,02	0,43 ± 0,38
Total	417921,8 ± 169876,4	642108,78 ± 180281,8	109146,5 ± 42695,1	212726,48 ± 44778,2	3,13 ± 1,55	6,40 ± 2,31	2,35 ± 0,90	4,24 ± 1,53

3 CARACTÉRISATION DU RÉSEAU TROPHIQUE DU SITE D'IMPLANTATION DE DIEPPE LE TREPORT

Pour étudier le fonctionnement des écosystèmes marins et les nombreuses interactions existantes entre les organismes, l'étude des réseaux trophiques est un outil indispensable. En effet, les principales relations entre les individus d'un écosystème sont majoritairement d'ordre alimentaire, elles déterminent la survie et la capacité de reproduction des espèces (Chouvelon, 2011). L'écologie trophique s'intéresse aux comportements alimentaires des individus au sein de leur biotope. Connaître leurs sources et leurs préférences alimentaires permet de mieux apprécier l'organisation et les interactions trophiques (prédations, compétitions, commensalisme, etc.) entre les organismes de l'écosystème étudié.

3.1 Analyses isotopiques

Les ratios des isotopes stables du carbone et de l'azote ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ et $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) sont des outils très utilisés comme traceurs du régime alimentaire des espèces en milieu naturel, et peuvent être mis en œuvre pour calculer, de façon indépendante, le niveau trophique des espèces. Cette approche repose sur le fait qu'il existe une relation entre les signatures isotopiques des consommateurs et de leurs proies. En effet, lorsqu'un prédateur consomme sa proie, il y a un transfert d'énergie qui s'accompagne d'un fractionnement isotopique, de valeur variable selon l'isotope considéré (Raoux *et al.*, 2020). Les valeurs du carbone sont utilisées pour discerner les sources de matière organique et celles de l'azote pour déterminer la position de l'espèce dans le réseau trophique. Cette dernière est d'ailleurs régulièrement employée pour estimer le niveau trophique des espèces dans de nombreux écosystèmes. Cette approche sera donc utilisée afin de caractériser le régime trophique des espèces benthiques.

Ainsi, le prédateur présente une signature identique à sa proie plus le fractionnement isotopique : "You are what you eat... plus a few per mille" (De Niro et Epstein, 1978). Les valeurs isotopiques de l'azote montrent ainsi une augmentation prévisible du ratio isotopique comprise entre 0,5 et 5‰ à travers les niveaux trophiques (estimés par l'azote) et est comprise entre 0 et 1‰ pour les valeurs isotopiques du carbone (Post, 2002, Figure 22).

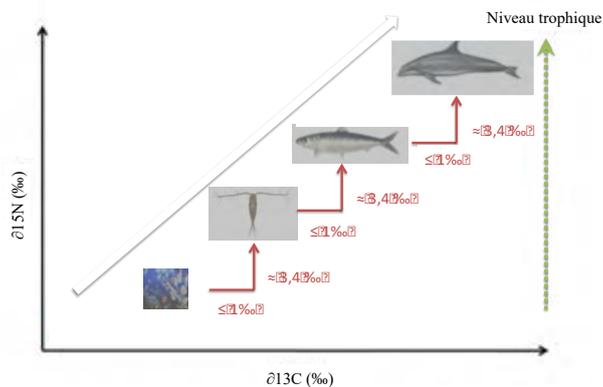


Figure 22. Schéma d'une chaîne trophique et du principe d'utilisation des isotopes stables du carbone et de l'azote en environnement marin. Le facteur d'enrichissement (en rouge) généralement estimé entre une source et son consommateur est indiqué pour chaque élément (Araignous 2018)

Ces analyses isotopiques ont ainsi été réalisées sur l'ensemble des compartiments biologiques, sur les deux habitats sédimentaires et pour les deux saisons hiver et été.

- *Hiver*

La première campagne d'échantillonnage des différents compartiments biologiques a été réalisée les 28 et 30 mars 2022 à bord du SEPIA II (navire de station CNRS). Durant cette campagne les compartiments biologiques suivants ont été échantillonnés : le phytoplancton, le zooplancton, la méiofaune, le compartiment benthique et suprabenthique. Des prélèvements d'eau ont également été réalisés. Il est important de noter que les campagnes d'échantillonnages des poissons par SETEC In Vivo n'ayant pas pu être réalisées en début d'année 2022, les poissons démersaux et la mégafaune ont été échantillonnés durant la nuit du 30 avril 2022 par le M2C à bord du Celtic Warrior ainsi que le 21-22 avril 2023 à Bord du Fée des mers par SETEC In vivo.

- *Été*

La seconde campagne d'échantillonnage des différents compartiments biologiques a eu lieu du 19 au 22 septembre 2022 à bord du SEPIA II. Durant cette campagne les compartiments biologiques suivants ont été échantillonnés : le phytoplancton, le zooplancton, la méiofaune, le compartiment benthique et suprabenthique. Des prélèvements d'eau ont également été

billes (Retsch® MM400) à une fréquence de 30 Hz. Pour certaines sources, pouvant être trop riches en carbone minéral (chez les ophiures par exemple), une étape de décarbonatation a été réalisée, après la lyophilisation et le broyage, en suivant le protocole de Blanchet-Aurigny *et al.* (2015). Enfin les échantillons ont ensuite été encapsulés dans des capsules en étain. Les signatures isotopiques ont été mesurées grâce à un analyseur élémentaire EuroVector® EA3000, couplé à un spectromètre de masse Elementar® IsoPrime (Polunin et Pinnegar, 2000) au laboratoire PLATIN (PLATEau d'Isotopie de Normandie, SRF ICORE).

La composition isotopique en azote et en carbone de tous les échantillons a été comparée à celle des standards de référence, et est calculée selon la formule suivante :

$$\delta(X \%) = (R \text{ échantillon} / R \text{ standard} - 1) \times 100$$

Où X = ¹³C ou ¹⁵N, R échantillon = ¹³C/¹²C ou ¹⁵N/¹⁴N dans l'échantillon, et, R standard = ¹³C/¹²C ou ¹⁵N/¹⁴N dans les standards de référence. Ces standards de référence sont des Bélemnites de Pee Dee (USA) pour le carbone, et le diazote (N₂) atmosphérique pour l'azote (Peterson et Fry, 1987).

Le niveau trophique (TL) de chaque espèce a ensuite été calculé à partir de la formule suivante (Minagawa & Wada, 1984) :

$$TL = \lambda + (\delta^{15}\text{N}_{\text{organisme}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{base}}) / \Delta N$$

Avec TL correspondant au niveau trophique de l'organisme étudié sur le site. Le $\delta^{15}\text{N}_{\text{organisme}}$ correspond à la signature isotopique mesurée de l'organisme et ΔN correspond à l'enrichissement moyen de ratio isotopique d'azote par niveau trophique : 3,4 ‰ (Minagawa et Wada, 1984). Le $\delta^{15}\text{N}_{\text{base}}$ est le $\delta^{15}\text{N}$ d'un consommateur primaire du réseau trophique et λ le niveau trophique de ce dernier. Dans cette étude, c'est le bivalve filtreur *Aequipecten opercularis* (pétoncle blanc) qui a été choisi du fait de son faible rythme de renouvellement des tissus permettant d'intégrer la variabilité en $\delta^{15}\text{N}$ de son régime alimentaire (Jennings et Warr, 2003), ainsi $\lambda = 2$.

En parallèle des analyses isotopiques ont également été réalisées sur des mammifères marins et des oiseaux marins de la zone d'étude. Pour les mammifères marins, les analyses isotopiques ont été réalisées sur des tissus (muscles) de mammifères échoués dans la zone d'étude. En ce qui concerne les oiseaux marins, des prélèvements de sang et de plumes ont été réalisés afin d'effectuer les analyses isotopiques. **Ces analyses ont fait l'objet d'un stage de M2 qui se trouve en ANNEXE de ce rapport**

3.2 Analyses statistiques

En ce qui concerne les analyses isotopiques, des tests t de Student et des ANOVA ont été réalisés afin de tester l'effet de l'habitat sédimentaire et de la saison sur les signatures isotopiques du carbone et de l'azote des différents compartiments biologiques. Les conditions d'applications de l'ANOVA (homoscédasticité des variances et normalité des résidus) ont été vérifiées avec des tests statistiques adaptés (test de Bartlett et Shapiro-Wilk respectivement). Les ANOVA significatives ont été suivies d'un test post-hoc (test DSH¹ de Tukey).

3.3 Phytoplancton

3.3.1 Rapport C/N

En mars 2022, les valeurs de Carbone Organique Particulaire (COP) et d'Azote Organique Particulaire (NOP) des différents stations suivent la dynamique des marées avec des valeurs oscillant respectivement de 5.67 à 27.15 $\mu\text{g.L}^{-1}$ et de 1.03 à 5.68 $\mu\text{g.L}^{-1}$ (Figure 24). Pour les valeurs de septembre ces différences entre stations ne sont pas présentes en raison du très faible coefficient de marée, les données sont homogènes avec des valeurs de COP situées entre 32.99 et 43.68 $\mu\text{g.L}^{-1}$ et des valeurs de NOP situées entre 5.29 et 6.68 $\mu\text{g.L}^{-1}$ (Figure 24).

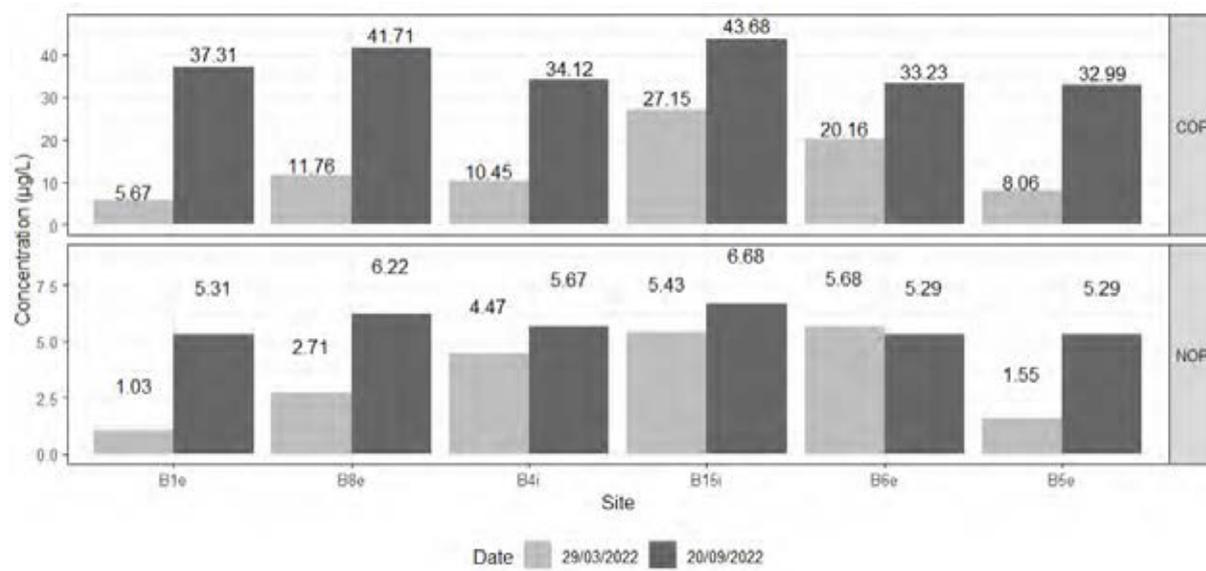


Figure 24. Rapport C/N au niveau des six stations pour les deux saisons

Dans les systèmes côtiers, le phytoplancton présente généralement un rapport C/N compris entre 6 et 10 mol.mol⁻¹ et est >12 chez les végétaux supérieurs (Savoye *et al.*, 2003).

¹ Différence Significative Honnête

Cependant, des valeurs élevées peuvent aussi correspondre à de la matière organique en état de dégradation, car l'azote organique particulaire (NOP) est plus rapidement reminéralisé que le COP (Lienart 2016 ; Thornton et McManus, 1994). Les hétérotrophes montrent un rapport C/N plus faible, souvent compris entre 3 et 6 mol.mol⁻¹ (Lienart, 2016). Ces rapports sont une première indication sur l'origine de la matière organique particulaire (MOP) présente dans nos échantillons. Les valeurs de C/N de mars nous indiquent que les organismes hétérotrophes semblent dominer la composition de la MOP, alors qu'en septembre la source dominante est issue de matériel phytoplanctonique (Figure 24). Nous pouvons supposer qu'en mars, l'échantillonnage a eu lieu en période post-efflorescence, avec un développement zooplanctonique significatif.

3.3.2 Rapport COP/Chl *a*

Le Carbone Organique Particulaire (COP) décrit l'ensemble de la MOP tandis que la chlorophylle *a* décrit les autotrophes (et les mixotrophes) non ou peu dégradés. Le rapport COP/Chl *a* nous renseigne ainsi sur la nature et l'état de la MOP, en d'autres termes, c'est un indicateur de la dominance du phytoplancton dans la MOP (la chlorophylle *a* se dégradant plus rapidement que le COP total). Ce rapport varie chez le phytoplancton de 40 (Montagnes *et al.*, 1994) à des valeurs inférieures à 140 (Thompson *et al.*, 1992) selon la structure des communautés considérées et des conditions environnementales. Ainsi, un rapport de COP/Chl *a* inférieur à 200 correspondrait à une MOP dominée par le phytoplancton (Cifuentes *et al.*, 1988 ; Lienart, 2016) alors qu'un rapport de de COP/Chl *a* supérieur à 200 correspondrait à une MOP dominée par des hétérotrophes ou indiquerait la présence de matériel dégradé (Berto *et al.*, 2013; Cifuentes *et al.*, 1988; Dubois *et al.*, 2012, 2014; Savoye *et al.*, 2003). »

Les valeurs de COP/Chl *a* issues des échantillonnages de mars sont très hétérogènes avec de très faibles valeurs indiquant la présence de MOP se déplaçant avec le courant de marée et des valeurs plus fortes caractéristiques de matières principalement détritiques et/ou dominées par les hétérotrophes pour les sites dont les échantillonnages ont été effectués autour de l'horaire de pleine mer (Figure 25). Pour les échantillons prélevés en septembre, les valeurs sont homogènes et caractéristiques d'une présence majoritaire de phytoplancton. Ces résultats sont pleinement en accord avec les valeurs de rapports C/N mesurés dans l'étude.

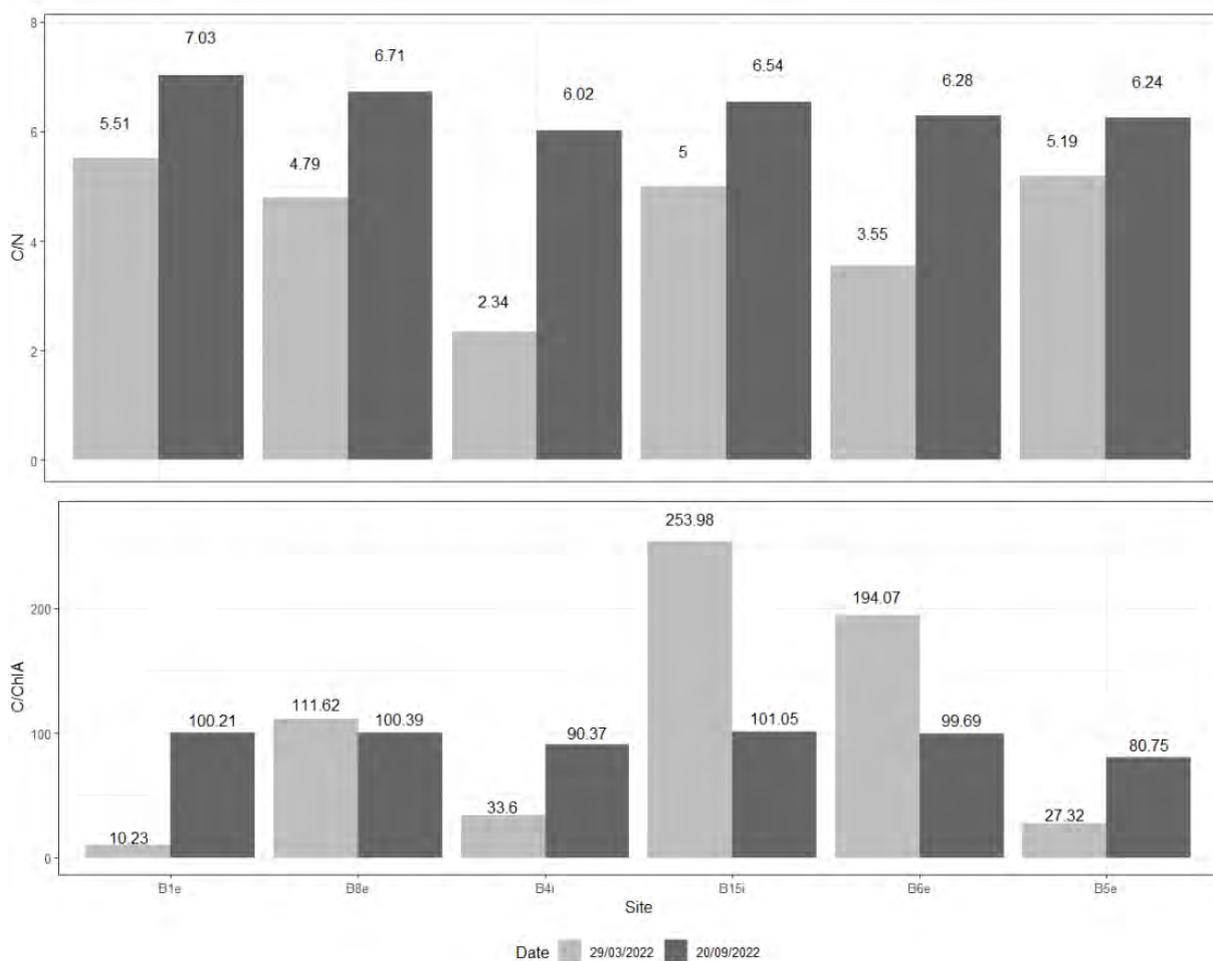


Figure 25 : Rapport COP/Chl a au niveau des six stations pour les deux saisons

3.3.3 Les rapports isotopiques de la matière organique particulaire

Comme mentionné précédemment, les valeurs des ratios des isotopes stables du carbone ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$), sont utilisées pour discerner les sources de matière organique. Le phytoplancton marin a généralement un $\delta^{13}\text{C}$ compris entre -24‰ et -18‰ . Les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$ couplées au rapport élémentaire du carbone et de l'azote nous permettent d'identifier plus précisément les signatures des sources contribuant à la MOP (Dubois *et al.*, 2012). Les valeurs de mars et septembre montrent que les sources de MOP sont principalement phytoplanctoniques (Figure 26, $\delta^{13}\text{C}_{\text{mars}} = -21.28 \pm 1.27\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}_{\text{mars}} = 5.4 \pm 3.11\text{‰}$ & $\delta^{13}\text{C}_{\text{sept}} = -24.44 \pm 0.65\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}_{\text{sept}} = 7.52 \pm 0.37\text{‰}$, Phytoplancton marin : $\delta^{13}\text{C} \approx -20$ et $\delta^{15}\text{N} \approx [4:6]$ (SOMLIT)), mais certains sites en mars montrant de faibles valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ pourraient souligner l'influence de MOP d'origine terrestre (Bănaru *et al.*, 2005 ; Dubois *et al.*, 2012).

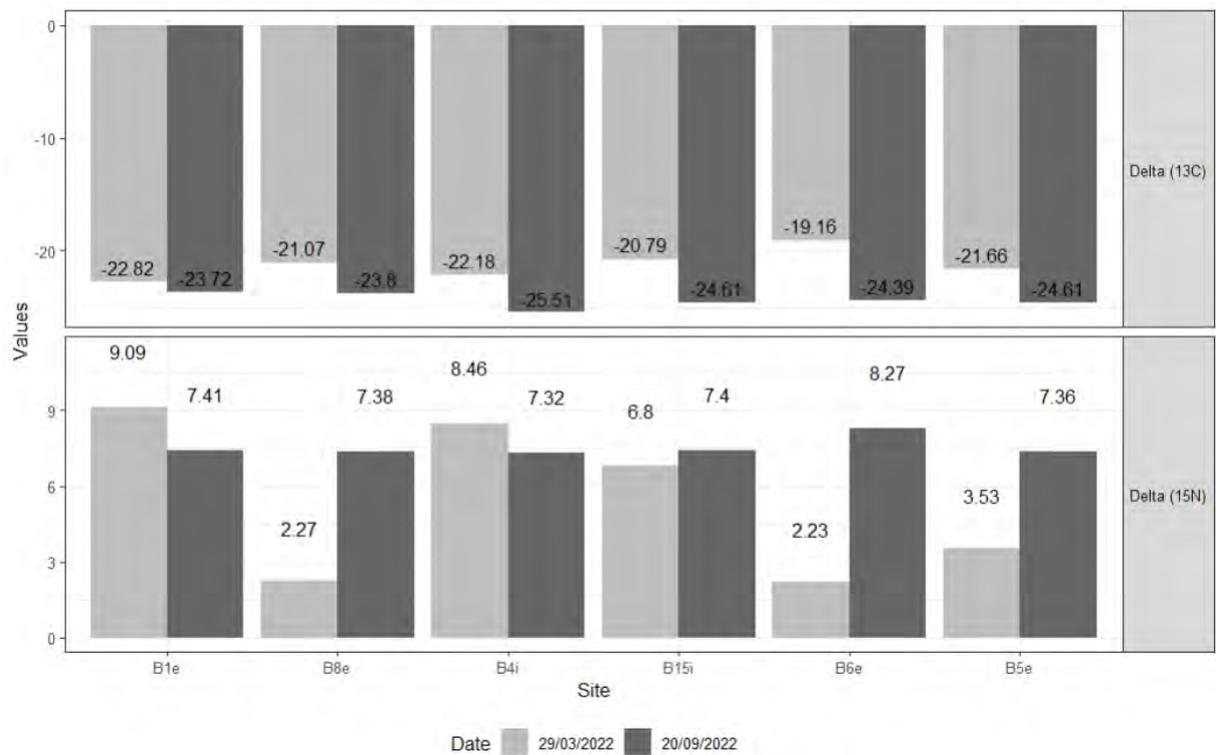


Figure 26. Rapports isotopiques de la matière organique particulaire au niveau des six stations pour les deux saisons

3.4 Caractérisation du régime trophique du zooplancton

Cinq taxa de copépodes ont été échantillonnés : *Acartia*, *Centropages*, *Paracalanus*, *Temora* et la larve Zoé Brachyours. Les individus de chaque taxa ont été poolés afin d'obtenir cinq réplicats par taxa

3.4.1.1 Effet de la saison

Au sein de chaque taxa, de légères variations des signatures isotopiques du carbone ($\delta^{13}\text{C}$) de l'azote ($\delta^{15}\text{N}$) et du niveau trophique (NT) sont observables entre les saisons (Tableau 14 ; Figure 27). À titre d'exemple, les valeurs moyennes du $\delta^{13}\text{C}$ d'*Acartia* sont comprises entre $-20,66 \pm 0,98$ ‰ en hiver et elles sont comprises entre $-19,87 \pm 0,89$ ‰ en été. Cependant, seuls les organismes du genre *Paracalanus* montrent une différence significative de leur signature carbone ($t = 0,03$, $p < 0,05$) avec des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ plus élevée en été qu'en hiver (Figure 27).

Tableau 14. Valeurs moyennes des signatures isotopiques du carbone ($\delta^{13}\text{C}$) et de l'azote ($\delta^{15}\text{N}$) et niveau trophique (NT) en fonction des saisons pour les cinq taxa de copépodes

Saison	Taxon	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$	TL
Hiver	<i>Acartia</i>	$-20,53 \pm 0,98$	$8,34 \pm 0,24$	$2,07 \pm 0,07$
Hiver	<i>Centropages</i>	$-19,55 \pm 0,63$	$8,75 \pm 0,58$	$2,19 \pm 0,17$
Hiver	<i>Paracalanus</i>	$-20,98 \pm 0,74$	$8,45 \pm 0,57$	$2,10 \pm 0,21$
Hiver	<i>Temora</i>	$-19,33 \pm 0,56$	$8,73 \pm 0,45$	$2,18 \pm 0,13$
Hiver	Zoés Brachyours	$-20,16 \pm 0,82$	$8,89 \pm 0,30$	$2,23 \pm 0,09$
Été	<i>Acartia</i>	$-19,87 \pm 0,89$	$8,93 \pm 0,64$	$2,24 \pm 0,19$
Été	<i>Centropages</i>	$-19,52 \pm 0,70$	$9,03 \pm 0,54$	$2,27 \pm 0,21$
Été	<i>Paracalanus</i>	$-19,40 \pm 1,05$	$8,67 \pm 0,36$	$2,17 \pm 0,11$
Été	<i>Temora</i>	$-20,10 \pm 0,92$	$9,19 \pm 0,91$	$2,32 \pm 0,27$
Été	Zoés Brachyours	$-20,41 \pm 1,46$	$8,85 \pm 0,72$	$2,22 \pm 0,21$

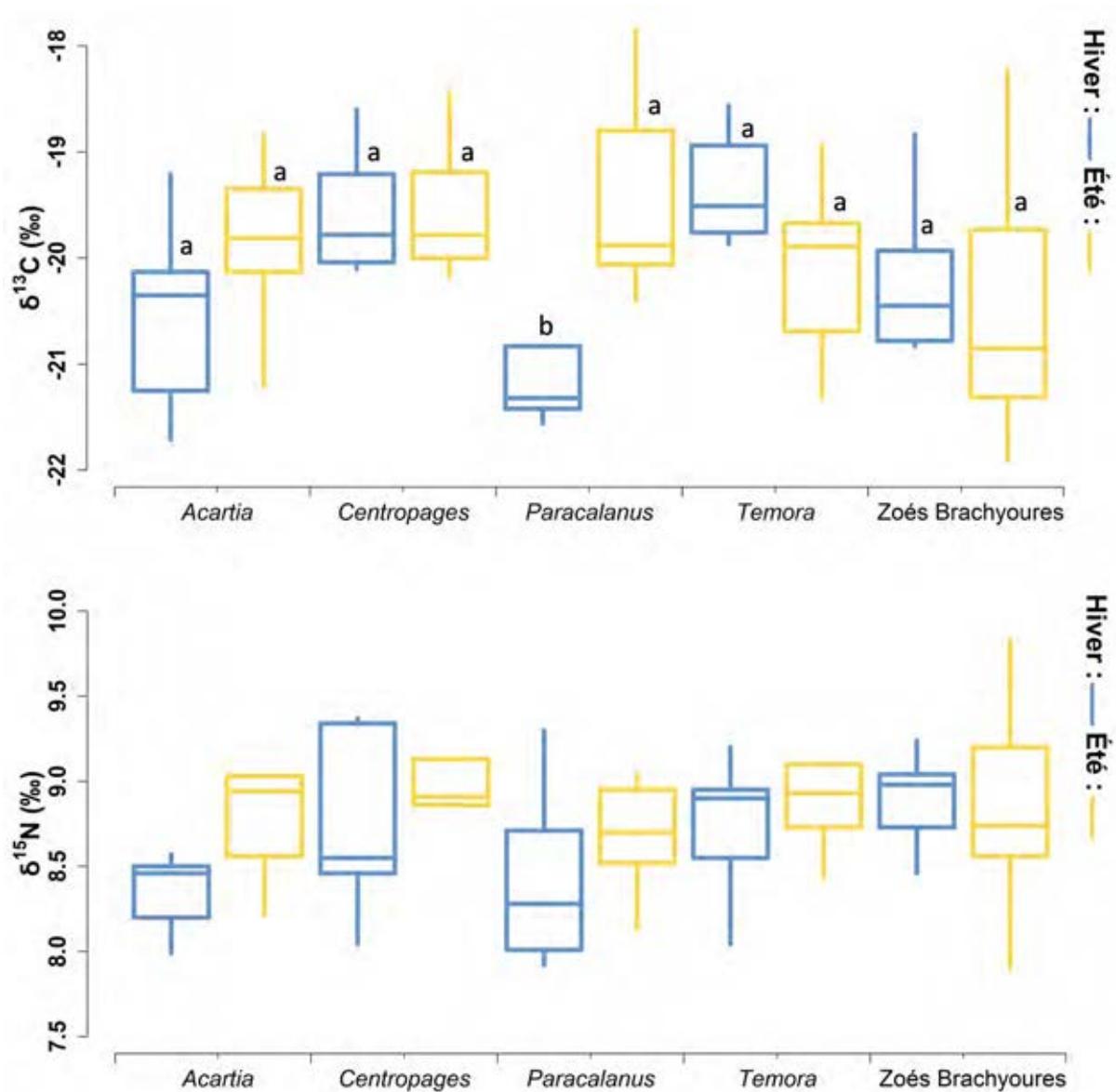


Figure 27 . Boîtes à moustache des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ et de $\delta^{15}\text{N}$ pour chaque taxa de copépode pour les deux saisons. La médiane des distributions est représentée par la ligne horizontale centrale. Les différences significatives (valeur $p < 0,05$) sont indiquées par les lettres a et b.

Bien que des variations saisonnières du $\delta^{15}\text{N}$ et du NT soient observées au sein de chaque taxa (Figure 27, Tableau 14) les résultats des analyses statistiques ont mis en évidence qu'il n'existait pas de différence significative du $\delta^{15}\text{N}$ et du NT chez ces cinq taxa de copépodes en fonction des saisons (tests t, $p > 0,05$, Figure 27).

3.5 Caractérisation du régime trophique de la méiofaune

Comme mentionné précédemment la méiofaune a été échantillonnée à l'aide d'un carottier Reineck au niveau des deux habitats sédimentaires en hiver et été. Les analyses isotopiques ont été réalisées au niveau des deux groupes majoritaires composant la méiofaune : les nématodes et les némertés. Pour chaque groupe, les individus ont été poolés afin d'obtenir cinq répliqués par groupe.

3.5.1.1 Effet de la saison et de l'habitat sédimentaire

Aucune différence significative du $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ et NT n'a été observée en fonction de la saison et de l'habitat sédimentaire (ANOVA à deux facteurs, $p > 0,05$). En revanche, les analyses statistiques ont mis en évidence une différence significative de $\delta^{13}\text{C}$ entre les Nématodes et Némertes ($F = 6,07$, $p < 0,05$), ces dernières présentant une signature $\delta^{13}\text{C}$ plus faible que celle des Nématodes (Tableau 15 et Figure 28).

Tableau 15. Valeurs moyennes des signatures isotopiques du carbone ($\delta^{13}\text{C}$) et de l'azote ($\delta^{15}\text{N}$) et niveau trophique (NT) en fonction des saisons et de l'habitat sédimentaire pour les deux groupes composant la méiofaune (Nématodes et Némertes)

Saison	Habitat	Espèce	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$	TL
Mars	Sédiments grossiers	Nématode	$-18,63 \pm 1,07$	$8,74 \pm 0,90$	$2,16 \pm 0,26$
	Sédiments grossiers	Némertes	$-19,35 \pm 0,98$	$9,14 \pm 0,52$	$2,28 \pm 0,15$
	Sables moyens	Nématode	$-19,27 \pm 0,85$	$9,20 \pm 0,56$	$2,30 \pm 0,16$
	Sables moyens	Némertes	$-19,39 \pm 0,71$	$9,06 \pm 0,61$	$2,25 \pm 0,18$
Septembre	Sédiments grossiers	Nématode	$-18,96 \pm 0,63$	$9,26 \pm 0,69$	$2,31 \pm 0,20$
	Sédiments grossiers	Némertes	$-19,98 \pm 1,13$	$9,07 \pm 0,46$	$2,26 \pm 0,14$
	Sables moyens	Nématode	$-19,11 \pm 0,58$	$8,57 \pm 0,84$	$2,11 \pm 0,25$
	Sables moyens	Némertes	$-20,01 \pm 0,94$	$9,01 \pm 0,67$	$2,24 \pm 0,20$

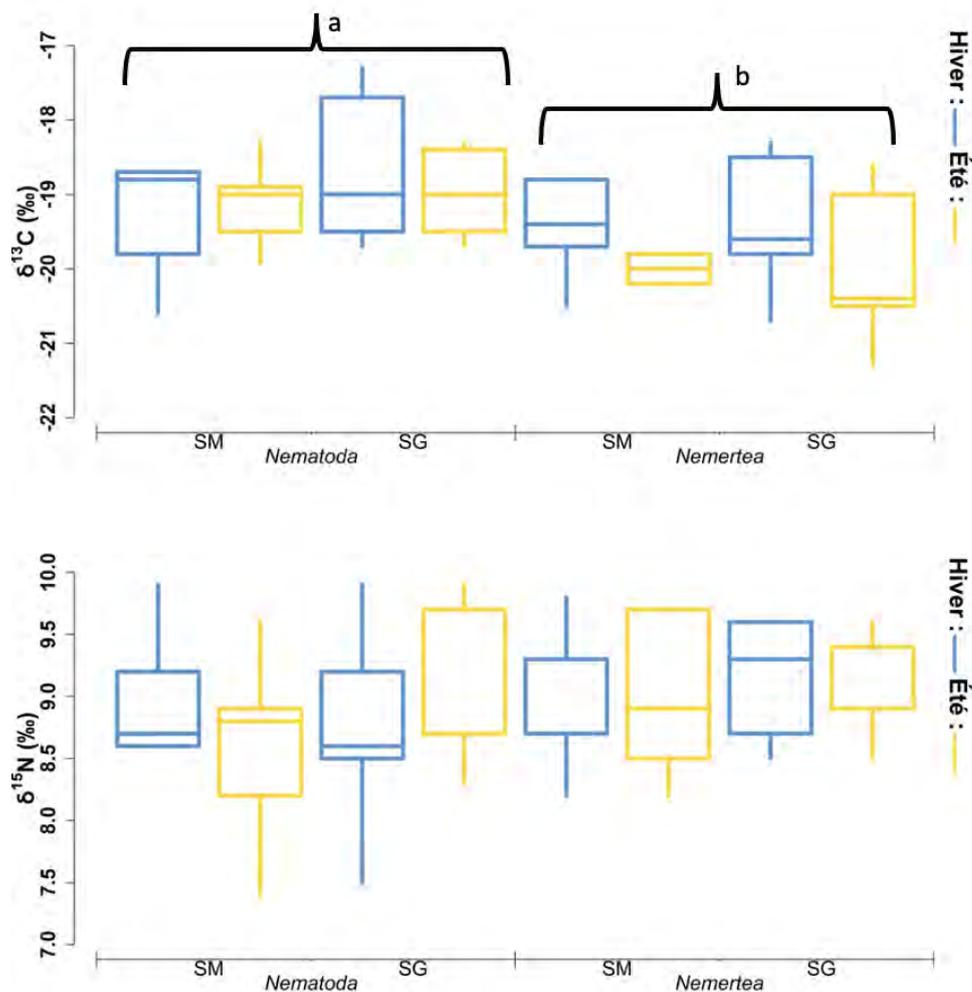


Figure 28. Boîtes à moustache des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$ pour les deux groupes de nématodes pour les deux saisons et au niveau des deux habitats sédimentaires. (SM : Sables Moyens, SG : Sédiments Grossiers). La médiane des distributions est représentée par la ligne horizontale centrale. Les différences significatives (valeur $p < 0,05$) sont indiquées par les lettres a et b.

3.6 Caractérisation du régime trophique du suprabenthos

Pour rappel, les prélèvements suprabenthiques ont été réalisés à l'aide d'un traineau suprabenthique permettant d'échantillonner la couche d'eau juste au-dessus du fond en un unique niveau : 0,10 – 0,40 m au-dessus du fond (filet de 500 μm) au niveau des deux habitats sédimentaires (grossiers et moyens) et au cours de deux saisons en hiver (28-30 mars) et à la fin de l'été (19-22 septembre).

Au niveau de chaque habitat sédimentaire et pour chaque saison, 5 espèces ont été échantillonnées. Pour chaque espèce, les individus ont été poolés afin d'obtenir 5 répliquats par espèce (Tableaux 16 et 17).

Tableau 16. Valeurs moyennes des signatures isotopiques du carbone ($\delta^{13}\text{C}$) et de l'azote ($\delta^{15}\text{N}$) et niveau trophique (NT) en fonction des saisons pour les cinq espèces de suprabenthos échantillonnées au niveau des sables moyens.

Saison	Espèces	GT	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$	TL
Mars	<i>Gastrosaccus spinifer</i>	sDF	-19,58 ± 0,66	8,93 ± 1,15	2,24 ± 0,34
	<i>Megaluropus agilis</i>	sDF	-19,21 ± 0,30	6,48 ± 0,78	1,52 ± 0,23
	<i>Pseudocuma simile</i>	sDF	-19,34 ± 0,21	6,75 ± 0,63	1,60 ± 0,18
	<i>Tryphosa nana</i>	Scv	-22,04 ± 0,26	6,71 ± 0,69	1,59 ± 0,20
	<i>Nototropis vedlomensis</i>	P	-19,84 ± 0,72	6,51 ± 0,88	1,53 ± 0,26
Septembre	<i>Gastrosaccus spinifer</i>	sDF	-20,20 ± 0,83	7,73 ± 0,62	1,89 ± 0,18
	<i>Megaluropus agilis</i>	sDF	-21,37 ± 0,89	5,96 ± 0,66	1,37 ± 0,19
	<i>Pseudocuma simile</i>	sDF	-19,20 ± 0,30	6,20 ± 1,20	1,44 ± 0,35
	<i>Apherusa bispinosa</i>	sDF	-20,97 ± 0,74	7,76 ± 0,55	1,90 ± 0,16
	<i>Philocheras sculptus</i>	sDF	-19,93 ± 0,18	6,17 ± 0,59	1,43 ± 0,17

Tableau 17. Valeurs moyennes des signatures isotopiques du carbone ($\delta^{13}\text{C}$) et de l'azote ($\delta^{15}\text{N}$) et du niveau trophique (NT) en fonction des saisons pour les cinq espèces de suprabenthos échantillonnées au niveau des sédiments grossiers.

Saison	Espèce	GT	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$	TL
Mars	<i>Megaluropus agilis</i>	sDF	-19,50 ± 1,20	6,41 ± 0,43	1,50 ± 0,13
	<i>Gastrosaccus spinifer</i>	sDF	-20,26 ± 0,16	8,53 ± 0,59	2,13 ± 0,17
	<i>Pseudocuma similis</i>	sDF	-19,44 ± 0,41	6,52 ± 0,47	1,54 ± 0,14
	<i>Tryphosa nana</i>	Scv	-20,54 ± 0,98	6,68 ± 0,52	1,58 ± 0,15
	<i>Nototropis vedlomensis</i>	P	-20,37 ± 1,39	6,58 ± 0,60	1,55 ± 0,18
Septembre	<i>Philocheras sculptus</i>	sDF	-19,34 ± 0,21	5,35 ± 0,85	1,19 ± 0,25
	<i>Gastrosaccus spinifer</i>	sDF	-19,50 ± 1,20	8,01 ± 0,69	1,97 ± 0,20
	<i>Megaluropus agilis</i>	sDF	-21,29 ± 0,75	6,28 ± 0,53	1,46 ± 0,16
	<i>Pseudocoma simile</i>	sDF	-20,01 ± 0,46	5,68 ± 0,46	1,29 ± 0,13
	<i>Apherusa bispinosa</i>	sDF	-19,72 ± 0,84	7,94 ± 0,40	1,95 ± 0,12

3.6.1.1 Effet de la saison

Sur les trois espèces présentes lors des deux saisons (*M. agilis*, *P. simile* et *G. spinifer*), un effet significatif de la saison sur le $\delta^{13}\text{C}$ a pu être observé chez *M. agilis*, ainsi que sur le $\delta^{15}\text{N}$ et le NT chez *G. spinifer* (ANOVA, $p < 0,05$), les valeurs de ces trois variables étant supérieures en hiver (Figure 29).

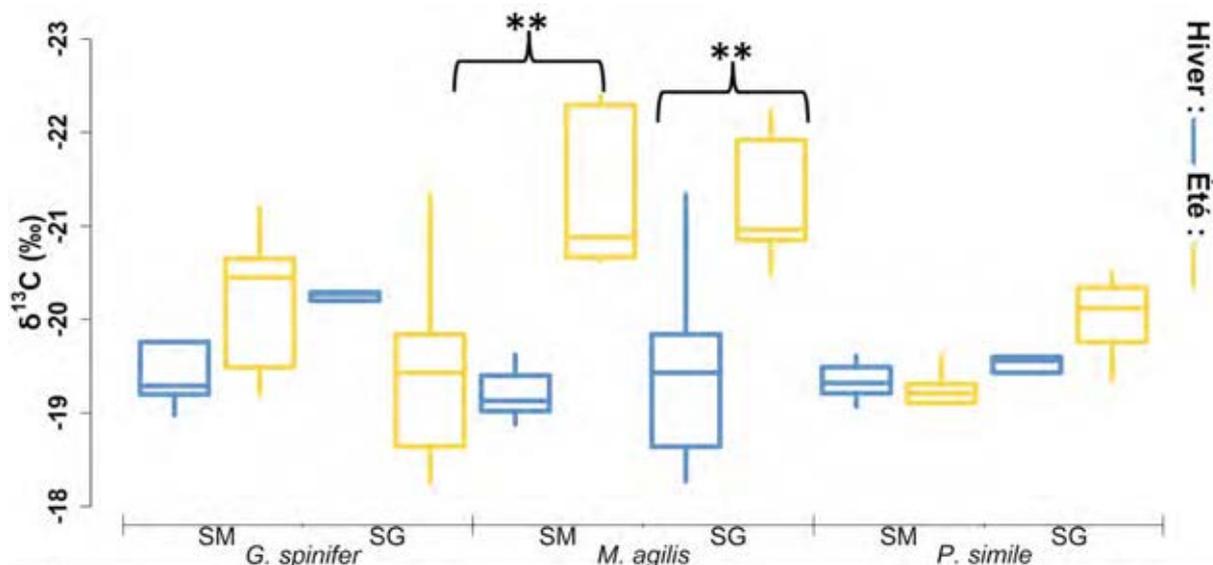


Figure 29. Boîtes à moustache des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ en fonction de l'habitat sédimentaire pour les trois espèces suprabenthiques communes aux deux saisons (SM : Sables Moyens, SG : Sédiments Grossiers) (* effet significatif, ** effet très significatif).

3.6.1.2 Effet de l'habitat sédimentaire

Les résultats ont mis en évidence des différences significatives du $\delta^{13}\text{C}$ en fonction de l'habitat sédimentaire pour *A. bispinosa*, *P. sculptus* et *T. nana*. En effet, ces trois espèces de suprabenthos présentent des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ significativement plus élevées au niveau des sédiments grossiers qu'au niveau des sables moyens (tests t, $p < 0,05$). Cependant, aucune différence significative du $\delta^{13}\text{C}$ n'a été mise en évidence pour *N. vedlomensis*. En revanche, aucune différence significative du $\delta^{15}\text{N}$ et NT n'a pu être mise en évidence selon l'habitat sédimentaire pour ces 4 espèces suprabenthiques (tests t, $p > 0,05$, Figure 30).

Subsidiairement, un effet croisé significatif de la saison et de l'habitat ($F = 4,8$, $p < 0,05$) a pu être mis en évidence pour le $\delta^{13}\text{C}$ chez *P. simile* (Figure 30).

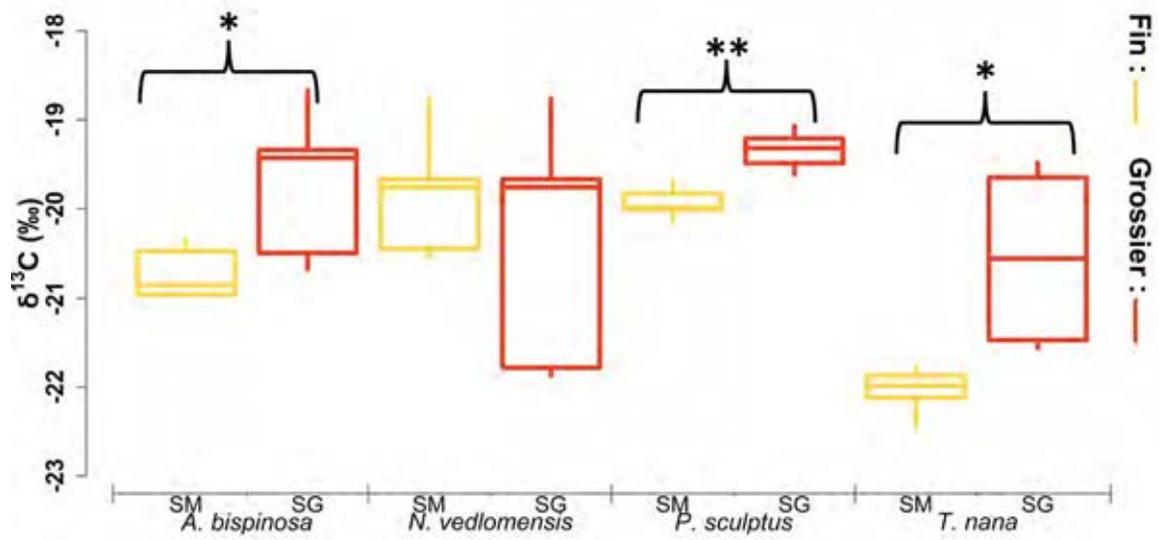


Figure 30. Boîtes à moustache des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ pour les quatre espèces du suprabenthos pour les deux habitats sédimentaires (* effet significatif, ** effet très significatif)

3.7 Caractérisation du régime trophique benthique

Comme mentionné, précédemment, les prélèvements benthiques ont été réalisés à l'aide d'une benne Van Veen au niveau des deux habitats sédimentaires (sédiments grossiers et sables moyens) et au cours de deux saisons en hiver (28-30 mars) et à la fin de l'été (19-22 septembre).

Un total de 630 organismes benthiques a été échantillonné au niveau des deux habitats sédimentaires et pour les deux saisons : 320 individus ont été échantillonnés au niveau des sédiments grossiers soit 160 par saison et 310 individus ont été échantillonnés au niveau des sables moyens, soit 155 par saison. Ces 630 organismes benthiques ont été regroupés en cinq groupes trophiques, correspondant aux groupes trophiques qui ont été définis dans la thèse de Pezy (2017) : Prédateurs, nécrophages, suspensivores, dépositores sélectifs de surface, dépositores sélectifs de sub-surface, et brouteurs. Les Tableaux 18 et 19 présentent les différentes espèces qui ont été prélevées lors des deux campagnes océanographiques.

Il est important de noter que les analyses isotopiques n'ont été effectuées que sur les cinq espèces qui dominent la biomasse dans les groupes trophiques suivants : invertébrés benthiques prédateurs, nécrophages, dépositores sélectifs de surface, dépositores sélectifs de sub-surface. Ainsi, au sein de chaque groupe trophique, cinq espèces ont été échantillonnées et au sein de chaque espèce, cinq individus ont été analysés au niveau des deux habitats sédimentaires et pour les deux saisons. En ce qui concerne, les invertébrés benthiques suspensivores, groupe trophique dominant la biomasse totale du benthos au niveau du site d'implantation du futur parc éolien de Dieppe Le Tréport (Pezy, 2017), dix espèces ont été échantillonnées au niveau de chaque habitat (cinq individus par espèce) pour réaliser les analyses isotopiques. Pour les brouteurs, groupe trophique peu diversifié, une seule espèce a été échantillonnée sur les sédiments grossiers pour les deux saisons. En effet, sur les sables fins aucune, espèce appartenant au groupe trophique des brouteurs n'a pu être échantillonnée (Tableau 19).

Tableau 18. Espèces benthiques échantillonnées au niveau des sédiments grossiers pour les deux saisons

Sédiments grossiers				
Mars			Septembre	
	Espèce	nb	Espèces	nb
Brouteur	<i>Gibbula magus</i>	5	<i>Gibbula magus</i>	5
	<i>Buccinum undatum</i>	5	<i>Buccinum undatum</i>	5
Necrophage	<i>Liocarcinus depurator</i>	5	<i>Liocarcinus depurator</i>	5
	<i>Macropodia</i> sp	5	<i>Macropodia</i> sp	5
	<i>Tritia reticulata</i>	5	<i>Tritia reticulata</i>	5
	<i>Pagurus bernhardus</i>	5	<i>Pagurus bernhardus</i>	5
	<i>Psammechinus miliaris</i>	5	<i>Psammechinus miliaris</i>	5
	<i>Antalis vulgaris</i>	5	<i>Asterias rubens</i>	5
Prédateur	<i>Asterias rubens</i>	5	<i>Glycera lapidum</i>	5
	<i>Lumbrineris latreilli</i>	5	<i>Nephtys caeca</i>	5
	<i>Nephtys caeca</i>	5	<i>Ophiura ophiura</i>	5
	<i>Ophiura ophiura</i>	5	<i>Syllis</i> sp	5
	<i>Abludomelita obtusata</i>	5	<i>Abludomelita obtusata</i>	5
SDF	<i>Echinocyamus pusillus</i>	5	<i>Echinocyamus pusillus</i>	5
	<i>Eurydice pulchra</i>	5	<i>Eurydice pulchra</i>	5
	<i>Galathea intermedia</i>	5	<i>Galathea intermedia</i>	5
	<i>Polygordius lacteus</i>	5	<i>Polygordius lacteus</i>	5
	<i>Caulleriella alata</i>	5	<i>Caulleriella alata</i>	5
ssDF	<i>Echinocardium cordatum</i>	5	<i>Echinocardium flavescens</i>	5
	<i>Echinocardium flavescens</i>	5	<i>Notomastus latericeus</i>	5
	<i>Notomastus latericeus</i>	5	<i>Nucula hanleyi</i>	5
	<i>Nucula hanleyi</i>	5	<i>Phascolion (Phascolion) strombus</i>	5
	<i>Aequipecten opercularis</i>	5	<i>Aequipecten opercularis</i>	5
Suspensivore	<i>Arcopagia crassa</i>	5	<i>Branchiostoma lanceolatum</i>	5
	<i>Branchiostoma lanceolatum</i>	5	<i>Crepidula fornicata</i>	5
	<i>Chlamys</i> sp	5	<i>Glycymeris glycymeris</i>	5
	<i>Crepidula fornicata</i>	5	<i>Laevicardium crassum</i>	5
	<i>Glycymeris glycymeris</i>	5	<i>Lutraria</i> sp	5
	<i>Laevicardium crassum</i>	5	<i>Ostrea edulis</i>	5
	<i>Ostrea edulis</i>	5	<i>Pecten maximus</i>	5
	<i>Pecten maximus</i>	5	<i>Pisidia longicornis</i>	5
	<i>Polititapes rhomboides</i>	5	<i>Polititapes rhomboides</i>	5

Tableau 19. Espèces benthiques échantillonnées au niveau des sables moyens pour les deux saisons

GT	Sables moyens			
	Mars		Septembre	
	Espèces	nb	Espèce	nb
Necrophage	<i>Buccinum undatum</i>	5	<i>Buccinum undatum</i>	5
	<i>Liocarcinus marmoreus</i>	5	<i>Liocarcinus marmoreus</i>	5
	<i>Tritia reticulata</i>	5	<i>Tritia reticulata</i>	5
	<i>Pagurus bernhardus</i>	5	<i>Pagurus bernhardus</i>	5
	<i>Psammechinus miliaris</i>	5	<i>Psammechinus miliaris</i>	5
	<i>Thia scutellata</i>	5	<i>Thia scutellata</i>	5
Prédateur	<i>Antalis vulgaris</i>	5	<i>Antalis vulgaris</i>	5
	<i>Asterias rubens</i>	5	<i>Asterias rubens</i>	5
	<i>Lumbrineris latreilli</i>	5	<i>Lumbrineris latreilli</i>	5
	<i>Nephtys cirrosa</i>	5	<i>Nephtys cirrosa</i>	5
	<i>Ophiura ophiura</i>	5	<i>Ophiura ophiura</i>	5
SDF	<i>Amphipholis squamata</i>	5	<i>Amphipholis squamata</i>	5
	<i>Aonides oxycephala</i>	5	<i>Aonides oxycephala</i>	5
	<i>Eurydice pulchra</i>	5	<i>Eurydice pulchra</i>	5
	<i>Polygordius lacteus</i>	5	<i>Polygordius lacteus</i>	5
	<i>Spiophanes bombyx</i>	5	<i>Spiophanes bombyx</i>	5
ssDF	<i>Caulleriella alata</i>	5	<i>Caulleriella alata</i>	5
	<i>Chaetozone gibber</i>	5	<i>Chaetozone gibber</i>	5
	<i>Echinocardium cordatum</i>	5	<i>Echinocardium cordatum</i>	5
	<i>Notomastus latericeus</i>	5	<i>Notomastus latericeus</i>	5
	<i>Scoloplos armiger</i>	5	<i>Scoloplos armiger</i>	5
Supensivore	<i>Branchiostoma lanceolatum</i>	5	<i>Branchiostoma lanceolatum</i>	5
	<i>Crepidula fornicata</i>	5	<i>Crepidula fornicata</i>	5
	<i>Glycymeris glycymeris</i>	5	<i>Glycymeris glycymeris</i>	5
	<i>Laevicardium crassum</i>	5	<i>Laevicardium crassum</i>	5
	<i>Lutraria</i> sp	5	<i>Lutraria</i> sp	5
	<i>Mytilus edulis</i>	5	<i>Mytilus edulis</i>	5
	<i>Pecten maximus</i>	5	<i>Pecten maximus</i>	5
	<i>Spisula solida</i>	5	<i>Spisula solida</i>	5
	<i>Polititapes rhomboides</i>	5	<i>Polititapes rhomboides</i>	5
	<i>Moerella donacina</i>	5	<i>Moerella donacina</i>	5

3.7.1 Résultats

3.7.1.1 Effet de la saison sur les signatures isotopiques du carbone, de l'azote et le niveau trophique

Au sein de chaque groupe trophique, des variations dans les signatures isotopiques du carbone ($\delta^{13}\text{C}$) de l'azote ($\delta^{15}\text{N}$) et du niveau trophique (NT) sont observables entre les saisons (Figure 31). Cependant, aucune différence significative de $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ et du NT n'ont été mise évidence pour le facteur saison pour les cinq groupes trophiques (PERMANOVA, $p > 0,05$).

3.7.1.2 Effet de l'habitat sédimentaire sur les signatures isotopiques du carbone, de l'azote et le niveau trophique

Au sein de chaque groupe trophique, des variations dans les signatures isotopiques du carbone ($\delta^{13}\text{C}$) de l'azote ($\delta^{15}\text{N}$) et du niveau trophique (NT) sont observées entre les habitats sédimentaires (Figure 31).

En ce qui concerne les signatures isotopiques du carbone ($\delta^{13}\text{C}$), les tests statistiques ont permis de montrer des effets croisés significatifs de la saison et l'habitat sédimentaire chez les invertébrés benthiques prédateurs (PERMANOVA, $p < 0,05$).

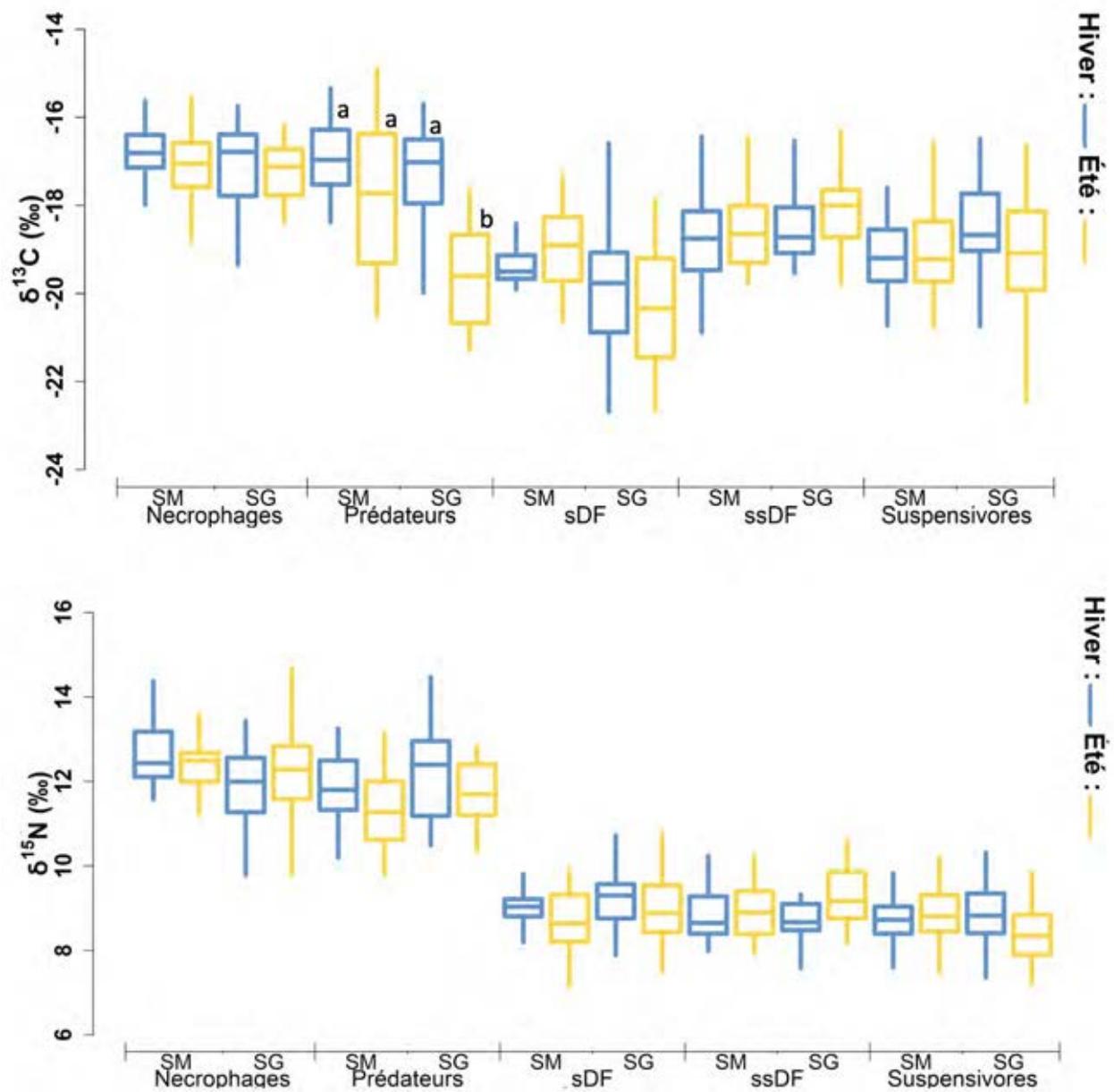


Figure 31. Boîtes à moustache des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$ pour les cinq groupes trophiques du benthos

3.8 Caractérisation du régime trophique des poissons

Un total de 290 individus a été analysés pour les deux saisons et sur les deux habitats sédimentaires (Tableaux 20 et 21). Au sein de chaque espèce, cinq individus ont été collectés puis préparés afin d'effectuer des analyses isotopiques sur leurs tissus.

Tableau 20. Espèces de poissons échantillonnées au niveau des sédiments grossiers pour les deux saisons

Sédiments grossiers			
Mars		Septembre	
Espèce	nb	Espèce	nb
<i>Arnoglossus laterna</i>	5	<i>Agonus cataphractus</i>	5
<i>Callionymus lyra</i>	5	<i>Arnoglossus laterna</i>	5
<i>Chelidonichthys lucerna</i>	5	<i>Callionymus lyra</i>	5
<i>Clupea harengus</i>	5	<i>Chelidonichthys lucerna</i>	5
<i>Echiichthys vipera</i>	5	<i>Echiichthys vipera</i>	5
<i>Eutrigla gurnardus</i>	5	<i>Hyperoplus lanceolatus</i>	5
<i>Hyperoplus lanceolatus</i>	5	<i>Limanda limanda</i>	5
<i>Limanda limanda</i>	5	<i>Mullus surmuletus</i>	5
<i>Merlangius merlangus</i>	5	<i>Pegusa lascaris</i>	5
<i>Mullus surmuletus</i>	5	<i>Pleuronectes platessa</i>	5
<i>Pleuronectes platessa</i>	5	<i>Scomber scombrus</i>	5
<i>Scomber scombrus</i>	5	<i>Solea solea</i>	5
<i>Solea solea</i>	5	<i>Trachinus draco</i>	5
<i>Trachinus draco</i>	5	<i>Trachurus trachurus</i>	5
<i>Trachurus trachurus</i>	5	<i>Trigloporus cuculus</i>	5
<i>Trisopterus luscus</i>	5	<i>Trisopterus luscus</i>	5

Tableau 21. Espèces de poissons échantillonnées au niveau des sables moyens pour les deux saisons

Sables moyens			
Mars		Septembre	
Espèce	nb	Espèce	nb
<i>Arnoglossus laterna</i>	5	<i>Arnoglossus laterna</i>	5
<i>Buglossidium luteum</i>	5	<i>Callionymus lyra</i>	5
<i>Callionymus lyra</i>	5	<i>Chelidonichthys cuculus</i>	5
<i>Echiichthys vipera</i>	5	<i>Echiichthys vipera</i>	5
<i>Eutrigla gurnardus</i>	5	<i>Limanda limanda</i>	5
<i>Hyperoplus lanceolatus</i>	5	<i>Mullus surmuletus</i>	5
<i>Limanda limanda</i>	5	<i>Pegusa lascaris</i>	5
<i>Merlangius merlangus</i>	5	<i>Pleuronectes platessa</i>	5
<i>Mullus surmuletus</i>	5	<i>Scomber scombrus</i>	5
<i>Pleuronectes platessa</i>	5	<i>Solea solea</i>	5
<i>Scomber scombrus</i>	5	<i>Trachinus draco</i>	5
<i>Trachinus draco</i>	5	<i>Trachurus trachurus</i>	5
<i>Trachurus trachurus</i>	5	<i>Trisopterus luscus</i>	5

3.8.1 Résultats

3.8.1.1 Effet de la saison sur les signatures isotopiques du carbone, de l'azote et le niveau trophique

Au sein de chaque espèce, des variations dans les signatures isotopiques du carbone ($\delta^{13}\text{C}$) de l'azote ($\delta^{15}\text{N}$) et du niveau trophique (NT) sont observées entre les saisons (Tableau 22 et 23 ; Figure 32).

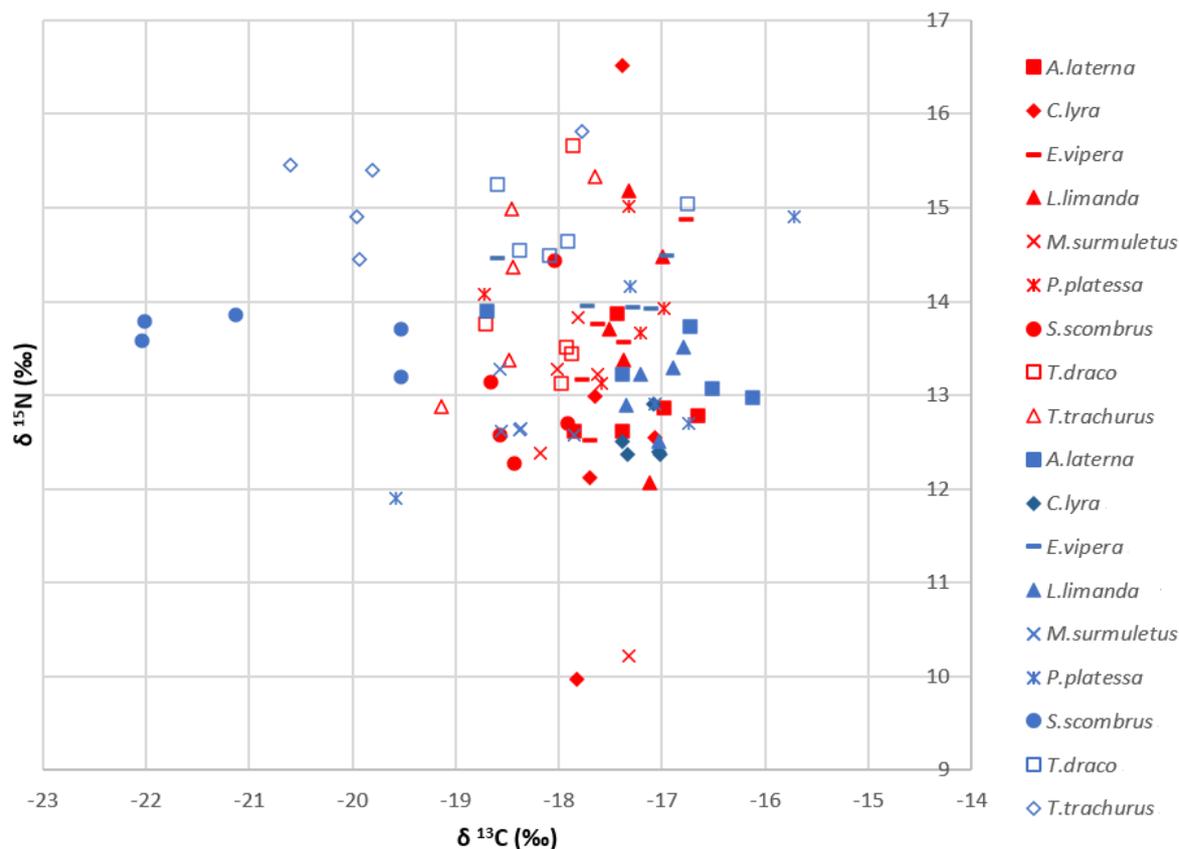


Figure 32. Variations dans les signatures isotopiques du carbone ($\delta^{13}\text{C}$) de l'azote ($\delta^{15}\text{N}$) en fonction des saisons (rouge : été ; bleu : hiver) pour les neuf espèces de poissons échantillonnées au niveau des sables moyens

Les résultats des analyses statistiques ont permis de mettre en évidence un effet de la saison sur les signatures isotopiques du carbone chez quatre espèces de poissons : la limande (*Limanda limanda*), le rouget barbet (*Mullus surmuletus*), le maquereau (*Scomber scombrus*) et le chinchard (*Trachurus trachurus*) (Figure 33). En effet, les résultats mettent en évidence des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ significativement plus élevées en été chez la limande ($F = 10,12, p < 0,01$) et des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ sont observées en hiver pour le rouget barbet, le maquereau et le chinchard (ANOVA, $p < 0,01$, Figure 33). En revanche, aucun effet de la saison n'a pu être observé sur le $\delta^{15}\text{N}$, ni sur le niveau trophique (ANOVA, $p > 0,05$, Figure 33).

Tableau 22. Valeurs moyennes des signatures isotopiques du carbone ($\delta^{13}\text{C}$), de l'azote ($\delta^{15}\text{N}$) et niveaux trophiques (NT) pour les espèces de poissons échantillonnées au niveau des sédiments grossiers pour les deux saisons.

	Espèces	Sédiments grossiers		
		$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$	NT
Été	<i>Arnoglossus laterna</i>	-18,50 ± 0,51	13,14 ± 0,27	3,25 ± 0,13
	<i>Callionymus lyra</i>	-18,46 ± 0,53	12,54 ± 0,39	3,08 ± 0,11
	<i>Chelidonichthys lucerna</i>	-18,43 ± 1,04	13,47 ± 0,91	3,35 ± 0,27
	<i>Echiichthys vipera</i>	-16,89 ± 0,39	12,58 ± 1,58	3,19 ± 0,46
	<i>Hyperoplus lanceolatus</i>	-18,48 ± 1,30	12,31 ± 0,35	3,01 ± 0,10
	<i>Limanda limanda</i>	-16,83 ± 0,43	12,84 ± 0,46	3,16 ± 0,14
	<i>Mullus surmuletus</i>	-19,11 ± 0,69	14,53 ± 0,95	3,66 ± 0,28
	<i>Pegusa lascaris</i>	-16,99 ± 0,34	13,15 ± 0,84	3,26 ± 0,25
	<i>Pleuronectes platessa</i>	-16,45 ± 0,54	13,18 ± 0,75	3,26 ± 0,22
	<i>Scomber scombrus</i>	-21,14 ± 1,22	13,87 ± 0,78	3,47 ± 0,23
	<i>Solea solea</i>	-17,01 ± 0,22	13,02 ± 0,45	3,22 ± 0,13
	<i>Trachinus draco</i>	-18,18 ± 0,31	14,10 ± 0,27	3,54 ± 0,1
	<i>Trachurus trachurus</i>	-19,88 ± 0,69	14,61 ± 0,80	3,69 ± 0,24
	<i>Trigloporus lastoviza</i>	-18,70 ± 0,36	12,68 ± 0,17	3,12 ± 0,10
	<i>Trisopterus luscus</i>	-18,45 ± 0,15	14,12 ± 0,10	3,54 ± 0,10
	<i>Agonus cataphractus</i>	-17,17 ± 0,70	15,39 ± 0,90	3,92 ± 0,26
Hiver	<i>Arnoglossus laterna</i>	-17,39 ± 0,98	13,22 ± 0,97	3,28 ± 0,28
	<i>Callionymus lyra</i>	-17,71 ± 0,57	11,53 ± 1,64	2,78 ± 0,48
	<i>Chelidonichthys lucerna</i>	-16,92 ± 0,12	14,90 ± 1,43	3,77 ± 0,42
	<i>Clupea harengus</i>	-18,88 ± 0,30	11,32 ± 1,39	2,72 ± 0,41
	<i>Echiichthys vipera</i>	-17,24 ± 0,4	12,87 ± 2,10	3,17 ± 0,62
	<i>Eutrigla gurnardus</i>	-17,04 ± 0,38	15,22 ± 1,87	3,87 ± 0,55
	<i>Hyperoplus lanceolatus</i>	-17,66 ± 0,75	13,99 ± 1,08	3,50 ± 0,32
	<i>Limanda limanda</i>	-17,07 ± 0,32	13,44 ± 1,29	3,34 ± 0,38
	<i>Merlangius merlangus</i>	-17,24 ± 0,4	15,40 ± 0,90	3,92 ± 0,26
	<i>Mullus surmuletus</i>	-18,14 ± 0,5	14,61 ± 0,47	3,68 ± 0,14
	<i>Pleuronectes platessa</i>	-16,56 ± 0,34	11,57 ± 2,88	2,79 ± 0,85
	<i>Scomber scombrus</i>	-18,62 ± 1,11	14,17 ± 1,31	3,56 ± 0,39
	<i>Solea solea</i>	-17,05 ± 0,60	13,32 ± 1,30	3,31 ± 0,38
	<i>Trachinus draco</i>	-18,09 ± 0,37	13,50 ± 1,05	3,36 ± 0,31
	<i>Trachurus trachurus</i>	-18,42 ± 0,21	14,25 ± 0,95	3,58 ± 0,28
	<i>Trisopterus luscus</i>	-17,31 ± 0,75	14,73 ± 0,62	3,72 ± 0,18

Tableau 23. Valeurs moyennes des signatures isotopiques du carbone ($\delta^{13}\text{C}$) et de l'azote ($\delta^{15}\text{N}$) et niveaux trophiques (NT) pour les espèces de poissons échantillonnées au niveau des sables moyens pour les deux saisons.

	Espèces	Sables moyens		
		$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$	NT
Été	<i>Arnoglossus laterna</i>	-17,09±1,01	13,38±0,41	3,32±0,12
	<i>Callionymus lyra</i>	-17,17±0,17	12,51±0,23	3,07±0,07
	<i>Chelidonichthys lucerna</i>	-17,44±0,39	13,40±0,34	3,33±0,30
	<i>Echiichthys vipera</i>	-17,54±0,66	14,16±0,29	3,55±0,29
	<i>Limanda limanda</i>	-17,06±0,23	13,08±0,39	3,24±0,11
	<i>Mullus surmuletus</i>	-18,35±0,29	12,75±0,29	3,14±0,09
	<i>Pegusa lascaris</i>	-17,17±0,45	13,60±0,78	3,39±0,23
	<i>Pleuronectes platessa</i>	-17,28±1,42	13,31±1,20	3,30±0,35
	<i>Scomber scombrus</i>	-20,85±1,26	13,62±0,26	3,39±0,16
	<i>Solea solea</i>	-16,72±0,40	13,36±0,34	3,32±0,10
	<i>Trachinus draco</i>	-17,95±0,72	14,80±0,33	3,74±0,10
	<i>Trachurus trachurus</i>	-19,61±1,08	15,20±0,53	3,86±0,16
	<i>Trisopterus luscus</i>	-18,46±0,70	14,03±0,43	3,51±0,13
	Hiver	<i>Arnoglossus laterna</i>	-17,26±0,46	12,95±0,53	3,20±0,16
<i>Buglossidium luteum</i>		-17,12±0,47	13,54±0,51	3,37±0,15
<i>Callionymus lyra</i>		-17,53±0,30	12,83±2,36	3,16±0,69
<i>Echiichthys vipera</i>		-17,45±0,41	13,58±0,87	3,38±0,26
<i>Eutrigla gurnardus</i>		-16,87±0,20	12,74±0,62	3,14±0,18
<i>Hyperoplus lanceolatus</i>		-17,62±0,54	12,24±1,73	2,99±0,51
<i>Limanda limanda</i>		-17,26±0,21	13,76±1,18	3,43±0,35
<i>Merlangius merlangus</i>		-17,07±0,54	16,11±0,63	4,13±0,19
<i>Mullus surmuletus</i>		-17,79±0,34	12,58±1,42	3,09±0,42
<i>Pleuronectes platessa</i>		-17,57±0,68	13,96±0,69	3,49±0,20
<i>Scomber scombrus</i>		-18,32±0,33	13,03±0,85	3,22±0,25
<i>Trachinus draco</i>		-18,07±0,36	13,90±1,01	3,48±0,30
<i>Trachurus trachurus</i>		-18,43±0,53	14,18±1,04	3,56±0,31

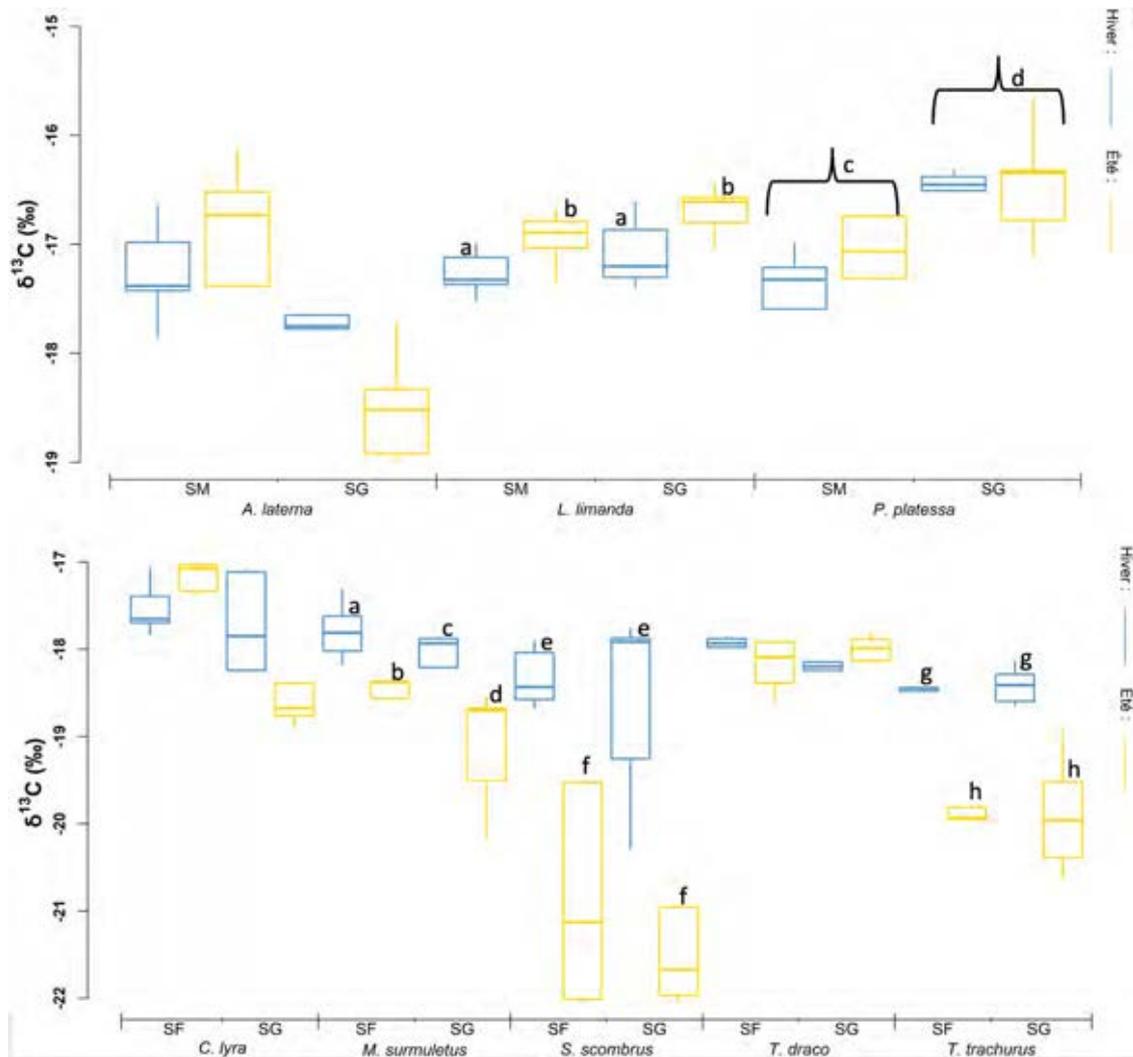


Figure 33. Boîtes à moustache des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ en fonction de l'habitat sédimentaire pour les huit espèces de poissons communes aux deux saisons et aux deux habitats

3.8.1.2 Effet de l'habitat sédimentaire sur les signatures isotopiques du carbone, de l'azote et le niveau trophique

Au sein de chaque espèce, des variations dans les signatures isotopiques du carbone ($\delta^{13}\text{C}$) de l'azote ($\delta^{15}\text{N}$) et du niveau trophique (NT) sont observées entre les deux habitats sédimentaires (Figure 34).

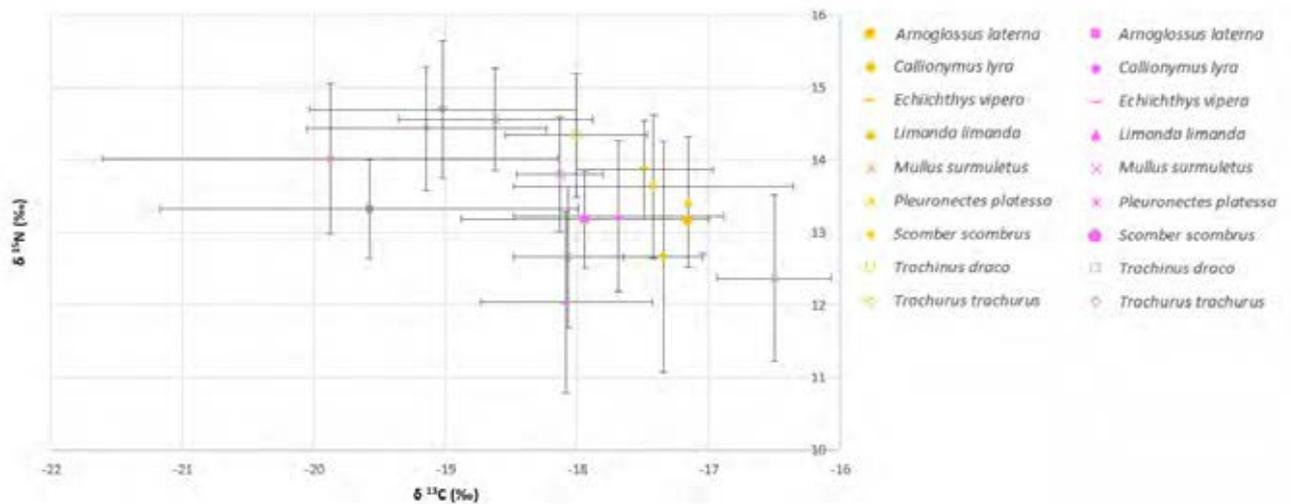


Figure 34. Signatures isotopiques du carbone ($\delta^{13}\text{C}$) et de l'azote ($\delta^{15}\text{N}$) des différentes espèces de poissons en fonction de l'habitat sédimentaire (jaune : sables moyens ; rose : sédiments grossiers).

En ce qui concerne les signatures isotopiques du carbone ($\delta^{13}\text{C}$), les tests statistiques ont permis de montrer des différences significatives du $\delta^{13}\text{C}$ en fonction de l'habitat sédimentaire chez la plie (*Pleuronectes platessa*) et le rouget barbet (*Mullus surmuletus*), avec des valeurs significativement plus élevées de $\delta^{13}\text{C}$ au niveau des sédiments grossiers chez la plie ($F = 6,0$, $p < 0,05$, Figure 33). *A contrario*, le rouget barbet (*M. surmuletus*) présente des valeurs significativement plus élevées de $\delta^{13}\text{C}$ ($F = 7,8$, $p < 0,05$, Figure 33) au niveau des sables moyens. En ce qui concerne les signatures isotopiques de l'azote, un effet habitat est observé pour le rouget barbet, avec des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ significativement plus élevées au niveau des sédiments grossiers ($F = 24,4$, $p < 0,001$, Figure 35) chez cette espèce.

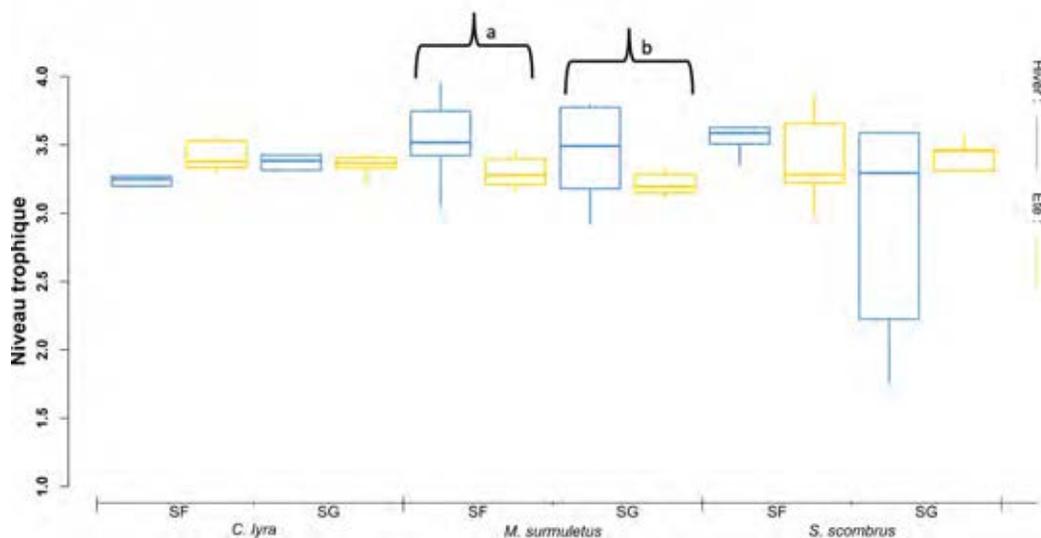


Figure 35. Boîtes à moustache des valeurs de NT en fonction de l'habitat sédimentaire pour *C. Lyra*, *M. surmuletus* et *S. scombrus*

3.9 Régime alimentaire des poissons démersaux

- Campagne chalut à perche (avril 2022)

Pour collecter des informations sur le régime alimentaire et les signatures isotopiques des poissons démersaux pendant l'hiver, et suite au report de la campagne initialement prévue par Setec de 6 mois, il a été décidé d'effectuer des pêches de nuit à une station située dans les sédiments grossiers et une autre station dans les sables moyens. Le Tableau 24 présente les espèces et le nombre d'individus échantillonnés au niveau des sédiments grossiers et des sables fins. Un total de 91 individus a été récolté au niveau des sédiments grossiers et 134 individus au niveau des sables moyens. La diversité des proies observée dans les contenus stomacaux des poissons démersaux au niveau des sédiments grossiers est plus importante (33 taxa) qu'au niveau des sables moyens (22 taxa) (Tableau 24). L'espèce *Agonus cataphractus* n'a pas été prise en compte pour les analyses isotopique car les individus étaient de trop petite taille (pas assez de muscle sans garantir la contamination des prélèvements avec des arrêtes).

Tableau 24. Nombre d'individus de poissons démersaux et céphalopodes échantillonnés dans la nuit du 30 avril 2022 (en gris, les individus ayant servi pour les analyses isotopiques).

Sédiments grossiers			Sables moyens		
Espèce de poissons	Nombre d'individus	Diversité proie	Espèce de poissons	Nombre d'individus	Diversité proie
<i>Agonus cataphractus</i>	8	13	<i>Agonus cataphractus</i>	8	5
<i>Arnoglossus laterna</i>	12	2	<i>Hyperoplus lanceolatus</i>	1	1
<i>Buglossidium luteum</i>	1	-	<i>Arnoglossus laterna</i>	40	6
<i>Callionymus lyra</i>	14	4	<i>Buglossidium luteum</i>	16	1
<i>Echiichtys vipera</i>	3	1	<i>Callionymus lyra</i>	7	1
<i>Limanda limanda</i>	10	3	<i>Echiichtys vipera</i>	26	5
<i>Microchirus variegatus</i>	1	2	<i>Limanda limanda</i>	13	4
<i>Mullus surmuletus</i>	1	-	<i>Merlangius merlangius</i>	9	3
<i>Pegusa lascaris</i>	2	1	<i>Mullus surmuletus</i>	1	-
<i>Pleuronectes platessa</i>	7	4	<i>Pegusa lascaris</i>	1	2
<i>Scylliorhinus canicula</i>	1	2	<i>Pleuronectes platessa</i>	6	3
<i>Sepia officinalis</i>	6	2	<i>Scylliorhinus canicula</i>	3	5
<i>Solea solea</i>	8	7	<i>Solea solea</i>	3	4
<i>Trisopterus luscus</i>	17	8			
Total	91	33	Total	134	22

Le Tableau 25 présente les résultats des contenus stomacaux des poissons.

En ce qui concerne les groupes trophiques, les résultats mettent en évidence que la majorité des poissons démersaux consomment principalement des invertébrés benthiques dépositores sélectifs de surface et que le lançon consomme 100% de grazer (copépodes). En ce qui concerne les compartiments biologiques, les résultats mettent en évidence que les poissons démersaux consomment majoritairement du suprabenthos. En outre, les résultats mettent en évidence que le merlan et la petite roussette sont piscivores.

Ce tableau sera utilisé comme matrice de diet dans les modèles de réseaux trophiques qui seront construits avec l'approche Ecoptah with Ecosim dans le projet de thèse qui a été déposé dans la réponse à l'AO « Étude des réseaux trophiques avant construction du parc éolien en mer de Dieppe Le Tréport ».

Tableau 25. Matrice de diet (régime alimentaire) des poissons démersaux selon le groupe trophique et le compartiment biologique

Habitat	Espèce de poisson	Groupe trophique							Compartiment			
		G	P	Poisson	S	Scv	sDF	ssDF	Benthos	Poisson	Suprabenthos	Zooplancton
Sables moyens	<i>Agonus cataphractus</i>	-	-	-	-	0,52	98,96	0,52	1,04	-	98,96	-
	<i>Hyperoplus lanceolatus</i>	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100
	<i>Arnoglossus laterna</i>	-	1,56	-	3,12	-	95,31	-	1,56	-	95,31	3,12
	<i>Buglossidium luteum</i>	-	-	-	-	-	100,00	-	-	-	100	-
	<i>Callionymus lyra</i>	-	100	-	-	-	-	-	100	-	-	-
	<i>Echiichtys vipera</i>	-	0,86	-	-	-	99,14	-	-	-	100	-
	<i>Limanda limanda</i>	-	57,14	-	35,71	-	7,14	-	92,86	-	7,14	-
	<i>Merlangius merlangius</i>	-	28,57	42,86	28,57	-	-	-	28,57	42,86	28,57	-
	<i>Mullus surmuletus</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Pegusa lascaris</i>	-	22,39	-	2,98	10,45	64,18	-	40,30	-	58,21	1,49
	<i>Pleuronectes platessa</i>	-	8,33	-	-	-	91,67	-	8,33	-	91,67	-
	<i>Scyliorhinus canicula</i>	-	-	13,33	-	40,00	46,67	-	53,33	13,33	33,33	-
	<i>Solea solea</i>	-	16,67	-	-	16,67	66,67	-	50,00	-	50,00	-
	Sédiments grossiers	<i>Agonus cataphractus</i>	-	15,29	-	2,35	44,71	37,65	-	62,35	-	37,65
<i>Arnoglossus laterna</i>		-	-	-	14,29	-	85,71	-	14,29	-	85,71	-
<i>Buglossidium luteum</i>		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Callionymus lyra</i>		-	40,00	-	20,00	-	40,00	-	60,00	-	40,00	-
<i>Echiichtys vipera</i>		-	-	-	-	-	100	-	-	-	100	-
<i>Limanda limanda</i>		-	-	-	100	-	-	-	100	-	-	-
<i>Microchirus variegatus</i>		-	-	16,67	-	-	83,33	-	-	16,67	83,33	-
<i>Mullus surmuletus</i>		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Pegusa lascaris</i>		-	-	-	-	-	100	-	100	-	-	-
<i>Pleuronectes platessa</i>		-	33,33	-	11,11	-	33,33	22,22	100	-	-	-
<i>Scyliorhinus canicula</i>		-	50,00	50,00	-	-	-	-	-	50,00	50,00	-
<i>Sepia officinalis</i>		-	-	-	85,37	-	14,63	-	100	-	-	-
<i>Solea solea</i>		-	9,68	-	3,23	-	87,10	-	70,97	-	29,0	-
<i>Trisopterus luscus</i>		-	13,64	4,54	68,18	13,64	-	-	95,45	4,54	-	-

- Campagne chalut canadien de SETEC

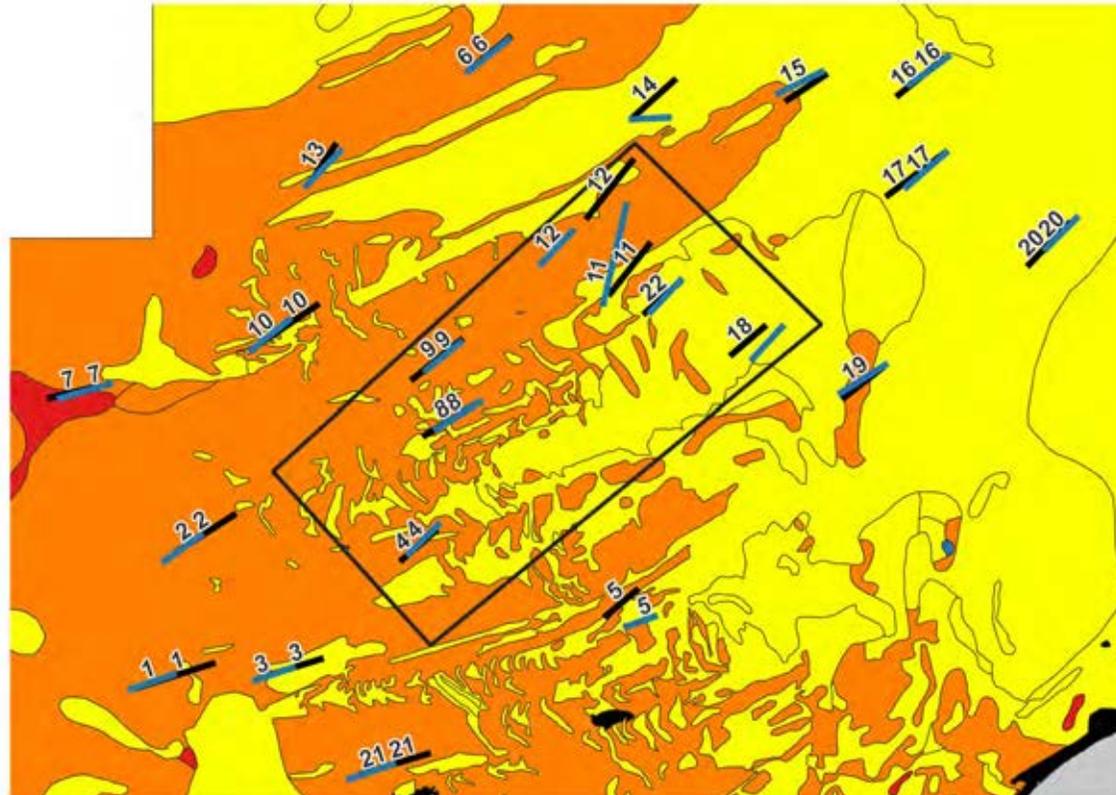


Figure 36. Localisation des 22 traits de chalut canadien en septembre 2022 (trait bleu) et avril 2023 (trait noir) sur la couverture sédimentaire (SHOM) (jaune : sables ; orange : graviers)

Selon la localisation des différents traits de pêche en lien avec les résultats granulométriques obtenus en 2024, il a été choisi de répartir les traits de chalutage dans les deux différents habitats selon l'ordre suivant (Figure 36) :

- Habitat des sédiments grossiers : 1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7 ; 8 ; 9 ; 10 ; 11 ; 12 ; 13 ; 14 ; 15 ; 19 ; 21

- Habitats des sables moyens : 16 ; 17 ; 18 ; 20 ; 22 ;

Le Tableau 26 présente les espèces et le nombre d'individus échantillonnés au niveau des sédiments grossiers et des sables moyens en septembre 2022 et avril 2023. Un total de 1438 individus a été récolté au niveau des sédiments grossiers et 604 individus au niveau des sables moyens. La diversité des proies observée dans les contenus stomacaux des poissons démersaux au niveau des sédiments grossiers est plus importante qu'au niveau des sables moyens (22 taxa).

Tableau 26. Nombre d'individus de poissons démersaux échantillonnés les 22 et 23 septembre 2022 et les 21 et 22 avril 2023 par SETEC In ivo (en gris, les individus ayant servi pour les analyses isotopiques).

Espèce de poissons	Sédiments grossiers				Espèce de poissons	Sables moyens			
	Nombre d'individus		Diversité proie			Nombre d'individus		Diversité proie	
	Sept. 2022	Avril 2023	Sept. 2022	Avril 2023		Sept. 2022	Avril 2023	Sept. 2022	Avril 2023
<i>Agonus cataphractus</i>	5	4	-	2	<i>Hyperoplus lanceolatus</i>	8	8		1
<i>Hyperoplus lanceolatus</i>	5	29	1	3	<i>Arnoglossus laterna</i>	8	7	2	3
<i>Arnoglossus laterna</i>	6	11	1	4	<i>Buglossidium luteum</i>		1		-
<i>Blennius ocellaris</i>		1		1	<i>Callionymus lyra</i>	58	12	12	2
<i>Callionymus lyra</i>	154	49	20	21	<i>Chelidonichthys cuculus</i>	16	8	4	7
<i>Chelidonichthys cuculus</i>	12	9	7	5	<i>Chelidonichthys lucerna</i>	1		4	
<i>Chelidonichthys lastoviza</i>		1		2	<i>Clupea harengus</i>	1	6	1	1
<i>Chelidonichthys lucerna</i>	56	11	7	6	<i>Dicentrarchus labrax</i>		1		2
<i>Clupea harengus</i>	1	48	1	2	<i>Echiichthys vipera</i>	16	100	3	14
<i>Echiichthys vipera</i>	5	112	2	7	<i>Eutrigla gurnadus</i>		5		2
<i>Eutrigla gurnadus</i>		40		13	<i>Limanda limanda</i>	5	75	3	10
<i>Limanda limanda</i>	5	164	-	22	<i>Merlangius merlangius</i>		31		10
<i>Merlangius merlangius</i>		84		28	<i>Mullus surmuletus</i>	14	17	8	6
<i>Microchirus variegatus</i>	1		-		<i>Pegusa lascaris</i>	5		0	
<i>Mullus surmuletus</i>	21	54	6	18	<i>Pleuronectes platessa</i>	42	23	11	14
<i>Pegusa lascaris</i>	17	2	5	1	<i>Raja clavata</i>		1		1
<i>Platichthys flesus</i>		1		1	<i>Raja undulata</i>		1		1
<i>Pleuronectes platessa</i>	77	111	10	25	<i>Scomber scombrus</i>	18	5	3	1
<i>Raja undulata</i>	1		2		<i>Solea solea</i>	5	1	-	-
<i>Scomber scombrus</i>	32	31	3	4	<i>Trachinus draco</i>	5	15	0	6
<i>Scyliorhinus canicula</i>	1	5	1	3	<i>Trachurus trachurus</i>	72	23	1	1
<i>Solea solea</i>	9	4	3	1	<i>Trisopterus luscus</i>	5		-	
<i>Spondyliosoma cantharus</i>	6	1	3	1					
<i>Trachinus draco</i>	9	23	4	9					
<i>Trachurus trachurus</i>	150	42	1	6					
<i>Trigloporus lastoviza</i>	3		1						
<i>Trisopterus luscus</i>	22		5						
<i>Zeus faber</i>	3		1						
Total	601	837	37	74	Total	264	340	33	37

Tableau 27 : Matrice de diet (régime alimentaire) des poissons démersaux selon le groupe trophique et le compartiment biologique

Habitat	Date	Espèce de poisson	Groupe trophique							Compartiment					
			G	P	Poisson	S	Scv	sDF	ssDF	Benthos	Poisson	Suprabenthos	Zooplacton		
Sables moyens	Avril 2023	<i>Hyperoplus lanceolatus</i>	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	
		<i>Arnoglossus laterna</i>	-	-	-	18,18	-	81,82	-	-	-	-	-	-	-
		<i>Buglossidium luteum</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		<i>Callionymus lyra</i>	-	-	-	20,83	-	79,17	-	-	-	-	-	-	-
		<i>Chelidonichthys lucerna</i>	-	1,03	-	2,06	-	95,88	1,03	-	-	-	89,69	-	-
		<i>Clupea harengus</i>	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100
		<i>Dicentrarchus labrax</i>	-	-	100	-	-	-	-	-	-	100	-	-	-
		<i>Echiichthys vipera</i>	-	-	0,63	5,02	-	94,04	0,31	-	-	7,84	0,63	91,54	-
		<i>Eutrigla gurnadus</i>	-	-	-	-	-	100	-	-	-	50,00	-	50,00	-
		<i>Limanda limanda</i>	-	0,54	-	33,24	0,54	65,54	0,13	-	-	39,46	-	60,54	-
		<i>Merlangius merlangus</i>	-	15,15	19,70	18,18	-	46,97	-	-	-	30,30	19,70	50,00	-
		<i>Mullus surmuletus</i>	-	0,57	-	-	-	99,43	-	-	-	-	-	100	-
		<i>Pleuronectes platessa</i>	-	15,38	-	7,69	5,13	56,41	15,38	-	-	64,10	-	35,90	-
		<i>Raja clavata</i>	-	-	-	-	-	100	-	-	-	100	-	-	-
		<i>Raja undulata</i>	-	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	-
		<i>Scomber scombrus</i>	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-	100	-	-
		<i>Solea solea</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		<i>Trachinus draco</i>	-	5,17	-	1,72	-	93,10	-	-	-	3,45	-	96,55	-
		<i>Trachurus trachurus</i>	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100
	Sep. 2022	<i>Arnoglossus laterna</i>	-	-	-	-	-	100	-	-	-	-	100	-	
		<i>Callionymus lyra</i>	-	-	-	42,35	28,23	25,88	3,53	-	76,47	-	23,53	-	
		<i>Chelidonichthys cuculus</i>	-	1,51	1,51	-	-	96,97	-	-	1,51	1,51	96,97	-	
		<i>Chelidonichthys lucerna</i>	-	-	1,89	0,94	-	97,17	-	-	0,94	1,89	97,17	-	
		<i>Clupea harengus</i>	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	
		<i>Echiichthys vipera</i>	-	-	11,11	-	-	88,89	-	-	-	11,11	88,89	-	
		<i>Limanda limanda</i>	-	66,67	-	-	33,33	-	-	-	100	-	-	-	
		<i>Mullus surmuletus</i>	-	0,80	-	0,80	1,60	96,80	-	-	2,40	-	97,60	-	
		<i>Pegusa lascaris</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		<i>Pleuronectes platessa</i>	-	3,90	-	85,71	-	6,49	3,90	-	94,80	-	5,19	-	
		<i>Scomber scombrus</i>	-	-	100	-	-	-	-	-	-	100	-	-	
		<i>Solea solea</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		<i>Trachinus draco</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		<i>Trachurus trachurus</i>	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	
<i>Trisopterus luscus</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Sédiments grossiers	Avril 2023	<i>Agonus cataphractus</i>	-	-	-	35,48	-	64,52	-	-	-	-	-	100	
		<i>Hyperoplus lanceolatus</i>	97,67	-	2,33	-	-	-	-	-	-	2,33	-	97,67	
		<i>Arnoglossus laterna</i>	-	-	-	11,11	-	88,89	-	-	33,33	0	66,67	-	
		<i>Blennius ocellaris</i>	-	-	-	-	100	-	-	-	100	-	-	-	
		<i>Callionymus lyra</i>	-	5,75	-	14,94	17,24	59,77	2,30	-	88,51	-	11,49	-	
		<i>Chelidonichthys cuculus</i>	-	21,74	-	17,39	8,70	52,17	-	-	73,91	-	26,09	-	
		<i>Chelidonichthys lastoviza</i>	-	-	-	70,00	-	30,00	-	-	100	-	-	-	
		<i>Chelidonichthys lucerna</i>	-	2,70	-	29,73	16,22	51,35	-	-	100	-	-	-	
		<i>Clupea harengus</i>	99,55	-	0,45	-	-	-	-	-	-	0,45	-	99,55	
		<i>Echiichthys vipera</i>	-	-	-	14,42	-	85,58	-	-	28,85	-	71,15	-	
		<i>Eutrigla gurnadus</i>	-	2,30	2,30	12,64	5,75	77,01	-	-	54,02	2,30	43,68	-	
		<i>Limanda limanda</i>	-	1,52	-	58,23	2,78	35,95	1,52	-	93,16	-	6,83	-	
		<i>Merlangius merlangus</i>	-	11,19	23,13	32,09	5,22	28,36	-	-	56,72	23,13	20,15	-	
		<i>Mullus surmuletus</i>	-	7,24	-	1,39	0,28	91,09	-	-	4,46	-	95,54	-	
		<i>Pegusa lascaris</i>	-	100	-	-	-	-	-	-	100	-	-	-	
		<i>Platichthys flesus</i>	-	-	-	100	-	-	-	-	100	-	-	-	
		<i>Pleuronectes platessa</i>	-	13,59	-	42,23	5,34	36,41	2,43	-	86,89	-	13,11	-	
		<i>Scomber scombrus</i>	79,58	-	20,42	-	-	-	-	-	-	20,42	-	79,58	
		<i>Scylliorhinus canicula</i>	-	-	-	8,00	92,00	-	-	-	100	-	-	-	

		<i>Solea vulgaris</i>	-	100	-	-	-	-	-	-	100	-	-	-
		<i>Spondyliosoma cantharus</i>	-	-	100	-	-	-	-	-	-	100	-	-
		<i>Trachinus draco</i>	-	3,57	21,43	17,86	7,14	50,00	-	-	67,85	21,43	10,71	-
		<i>Trachurus trachurus</i>	99,22	-	0,08	0,12	0,08	0,49	-	-	0,69	0,08	-	99,22
	Sep. 2022	<i>Agonus cataphractus</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		<i>Hyperoplus lanceolatus</i>	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100
		<i>Arnoglossus laterna</i>	-	-	-	-	-	100	-	-	-	-	100	-
		<i>Callionymus lyra</i>	-	1,48	-	63,55	4,43	30,05	0,49	-	94,83	-	5,17	-
		<i>Chelidonichthys cuculus</i>	-	-	4,52	10,32	5,16	80,00	-	-	25,16	4,52	70,32	-
		<i>Chelidonichthys lucerna</i>	-	1,82	20,00	10,91	10,91	56,36	-	-	34,54	20,00	45,45	-
		<i>Clupea harengus</i>	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100
		<i>Echiichthys vipera</i>	-	-	-	-	14,29	85,71	-	-	14,29	-	85,71	-
		<i>Limanda limanda</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		<i>Microchirus varieagatus</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		<i>Mullus surmuletus</i>	-	-	-	64,67	-	35,33	-	-	46,74	-	53,26	-
		<i>Pegusa lascaris</i>	-	-	-	88,30	-	4,25	7,45	-	98,94	-	1,06	-
		<i>Pleuronectes platessa</i>	-	0,56	-	92,65	0,56	5,65	0,56	-	93,78	-	6,21	-
		<i>Raja undulata</i>	-	-	-	16,67	-	83,33	-	-	16,67	-	83,33	-
		<i>Scomber scombrus</i>	95,77	-	1,65	2,57	-	-	-	-	-	1,65	-	98,34
		<i>Scyliorhinus canicula</i>	-	-	-	100	-	-	-	-	100	-	-	-
		<i>Solea solea</i>	-	4,50	-	43,48	-	52,17	-	-	100	-	-	-
		<i>Spondyliosoma cantharus</i>	-	-	-	100	-	-	-	-	100	-	-	-
		<i>Trachinus draco</i>	-	-	-	57,14	-	42,86	-	-	57,14	-	42,86	-
		<i>Trachurus trachurus</i>	100	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	100
		<i>Trigloporus lastoviza</i>	-	-	-	0	-	100	-	-	-	-	100	-
		<i>Trisopterus luscus</i>	-	33,82	-	0	1,47	64,71	-	-	13,23	-	86,76	-
		<i>Zeus faber</i>	-	-	100	0	-	-	-	-	-	100	-	-

Le Tableau 27 présente les résultats des contenus stomacaux des poissons.

En ce qui concerne les groupes trophiques, les résultats mettent en évidence que la majorité des poissons démersaux consomment principalement des invertébrés benthiques suspensivores et des déposivores sélectifs de surface et que le lançon consomme 100% de grazer (copépodes). En ce qui concerne les compartiments biologiques, les résultats mettent en évidence que les poissons démersaux consomment majoritairement du suprabenthos et des organismes benthiques.

Ce tableau sera utilisé comme matrice de diet dans les modèles de réseaux trophiques qui seront construits avec l'approche Ecoptah with Ecosim dans le projet de thèse qui a été déposé dans la réponse à l'AO « Étude des réseaux trophiques avant construction du parc éolien en mer de Dieppe Le Tréport ».

4 Conclusion

L'objectif de cette étude était de caractériser les réseaux trophiques du site d'implantation du futur parc éolien de Dieppe Le Tréport. Ce rapport présente donc, en détail, les protocoles d'échantillonnage et d'analyses pour la réalisation d'un état de référence des réseaux trophiques de la zone du parc et ses zones de contrôle ainsi que l'analyse des résultats issus de ces prélèvements.

Les données acquises dans ce projet seront utilisées dans le cadre d'une thèse CIFRE qui étudiera la structure et le fonctionnement de ce futur parc éolien par des outils de modélisation. En effet, les données des différents compartiments biologiques acquises entre 2022 et 2023 ainsi que les données acquises dans la thèse de JP Pezy (2017) permettront de construire différents modèles à l'aide de l'approche Ecopath with Ecosim (allant du modèle non spatialisé, non dynamique à des modèles spatialisés et dynamique). Le lien entre l'habitat sédimentaire et le compartiment benthique permettra d'inclure ces paramètres environnementaux dans la modélisation des réseaux trophiques

En outre, les données d'isotopies acquises dans ce projet permettront également la construction de modèles de réseaux trophique via la modélisation Analyse Inverse Linéaire en Monte Carlo Markov Chain (LIM MCMC) qui permettra d'estimer les incertitudes associées à chaque flux.

En amont de la construction des modèles écosystémiques, l'étudiant comparera les données benthiques acquises en 2022 par rapport aux données antérieures acquises sur le site d'étude (2008-2010 : In vivo ; 2014-2016 : thèse JP Pezy). En parallèle, les données acquises en 2022 sur le site seront comparées à d'autres données acquises récemment en Manche Est, afin d'identifier les espèces benthiques qui présenteraient une augmentation de leur aire de distribution vers l'est et qui sont à l'origine depuis quelques années à des premiers signalements en Manche est.

L'effet récif et réserve pourront être simulés grâce aux données qui seront acquises au niveau du mât de mesure de Fécamp (projet DRACCAR) afin de prédire l'effet qu'auront les éoliennes au niveau de ces deux habitats sédimentaires, notamment l'effet de la colonisation des structures par les communautés benthiques des substrats durs (biofouling).

Bibliographie

- Araignous E., Raoux A., Grangeré K., Dauvin J.C., Niquil N. (2018). Apports des analyses isotopiques des échantillons d'opportunité. Délivrable Lot 2 du projet TROPHIK (modélisation du rôle des éoliennes offshore dans la modification du fonctionnement des réseaux trophiques côtiers et dans le cumul d'impacts), 35p.
- Bănanu, Daniela, Mireille Harmelin-Vivien, Marian-Traian Gomoiu, et Teodora-Maria Onciu. 2007. « Influence of the Danube River inputs on C and N stable isotope ratios of the Romanian coastal waters and sediment (Black Sea) ». *Marine Pollution Bulletin* 54 (9): 1385-94. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.05.022>.
- Bastian, T., Delegrange, A., Antajan, E., Cornille, V., Cordier, R., Vincent, D., 2015. Suivi du plancton gélatineux dans le port de Dunkerque (est et ouest) et communautés zooplanctoniques associées - Année 2014. Université du Littoral Côte d'Opale.
- Beaugrand, G., Ibañez, F., Reid, P.C., 2000. Spatial, seasonal and long-term fluctuations of plankton in relation to hydroclimatic features in the English Channel, Celtic Sea and Bay of Biscay. *Marine Ecology Progress Series* 200, 93–102. <https://doi.org/10.3354/meps200093>
- Berto, D., F. Rampazzo, S. Noventa, F. Cacciatore, M. Gabellini, F. Bernardi Aubry, A. Girolimetto, et R. Boscolo Brusà. 2013. « Stable carbon and nitrogen isotope ratios as tools to evaluate the nature of particulate organic matter in the Venice lagoon ». *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 135 (décembre): 66-76. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.06.021>.
- Boatman, Tobias G., Richard J. Geider, et Kevin Oxborough. 2019. « Improving the Accuracy of Single Turnover Active Fluorometry (STAF) for the Estimation of Phytoplankton Primary Productivity (PhytoPP) ». *Frontiers in Marine Science* 6. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2019.00319>.
- Borjá, A., Franco, J., Perez, V. (2000). A marine biotic to the establish ecology quality of soft-bottom benthos within European estuarine coastal environments. *Mar. Poll. Bull.* 40: 1100-1114
- Brylinski, J.-M., Antajan, E., Raud, T., Vincent, D., 2012. First record of the Asian copepod *Pseudodiaptomus marinus* Sato, 1913 (Copepoda: Calanoida: Pseudodiaptomidae) in the southern bight of the North Sea along the coast of France. *Aquatic Invasions* 7, 577–584.
- Cifuentes, L. A., J. H. Sharp, et Marilyn L. Fogel. 1988. « Stable Carbon and Nitrogen Isotope Biogeochemistry in the Delaware Estuary ». *Limnology and Oceanography* 33 (5): 1102-15. <https://doi.org/10.4319/lo.1988.33.5.1102>.
- Dauvin, J.C., Ruellet, T., 2007, Polychaeta/Amphipoda ratio revisited. *Marine Pollution Bulletin* 55: 215-224.
- Dauvin, J.C., Andrade, H., De-La-Ossa-Carretero, J.A., Del Pilar Ruso, Y., Riera, R., 2016, Polychaete/Amphipod ratios: towards validate simple benthic indices. *Ecological Indicators* 63: 89-99.
- Dauvin, J.C., 2018, Twenty years of application of Polychaete/Amphipod ratios to assess diverse human pressures in estuarine and coastal marine environments: a review. *Ecological Indicators* 95: 437–445.
- Dubois, S., N. Savoye, A. Grémare, M. Plus, K. Charlier, A. Beltoise, et H. Blanchet. 2012. « Origin and composition of sediment organic matter in a coastal semi-enclosed ecosystem: An elemental and isotopic study at the ecosystem space scale ». *Journal of Marine Systems* 94 (juin): 64-73. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2011.10.009>.
- Dubois, Sophie, Hugues Blanchet, Aurélie Garcia, Marjorie Massé, Robert Galois, Antoine Grémare, Karine Charlier, Gaël Guillou, Pierre Richard, et Nicolas Savoye. 2014. « Trophic resource use by macrozoobenthic primary consumers within a semi-enclosed coastal ecosystem: Stable

- isotope and fatty acid assessment ». *Journal of Sea Research* 88 (avril): 87-99. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2014.01.004>.
- Eloire, D., Somerfield, P.J., Conway, D.V.P., Halsband-Lenk, C., Harris, R., Bonnet, D., 2010. Temporal variability and community composition of zooplankton at station L4 in the Western Channel: 20 years of sampling. *Journal of Plankton Research* 32, 657–679. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbq009>
- Folk, R.L. (1954) The distinction between grain size and mineral composition sedimentary rock nomenclature. *Journal of Geology*, 62: 344-359.
- Folk, R.L. (1966) A review of grain-size parameters. *Sedimentary*, 6: 73-93.
- Folk, R.L., Ward, W.C. (1957) Brazos river bar: a study of significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27: 3-26.
- Frontier, S., Pichot-Viale, D., Leprêtre, A., Davoult, D., Luzcak, C. 2004. Ecosystèmes- Structure, fonctionnement, évolution. Edition Dunod, Paris, 549 pp.
- Genty, Bernard, Jean-Marie Briantais, et Neil R. Baker. 1989. « The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence ». *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects* 990 (1): 87-92. [https://doi.org/10.1016/S0304-4165\(89\)80016-9](https://doi.org/10.1016/S0304-4165(89)80016-9).
- John, E.H., Batten, S.D., Harris, R.P., Hays, G.C., 2001. Comparison between zooplankton data collected by the Continuous Plankton Recorder survey in the English Channel and by WP-2 nets at station L4, Plymouth (UK). *Journal of Sea Research* 46, 223–232. [https://doi.org/10.1016/S1385-1101\(01\)00085-5](https://doi.org/10.1016/S1385-1101(01)00085-5)
- Liénart, Camilla, Nicolas Susperregui, Vanessa Rouaud, Joana Cavalheiro, Valérie David, Yolanda Del Amo, Robert Duran, et al. 2016. « Dynamics of particulate organic matter in a coastal system characterized by the occurrence of marine mucilage – A stable isotope study ». *Journal of Sea Research* 116 (octobre): 12-22. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2016.08.001>.
- Montagnes, David J. S., John A. Berges, Paul J. Harrison, et F. J. R. Taylor. 1994. « Estimating Carbon, Nitrogen, Protein, and Chlorophyll a from Volume in Marine Phytoplankton ». *Limnology and Oceanography* 39 (5): 1044-60. <https://doi.org/10.4319/lo.1994.39.5.1044>.
- Napoléon, Camille, Virginie Raimbault, et Pascal Claquin. 2013. « Influence of Nutrient Stress on the Relationships between PAM Measurements and Carbon Incorporation in Four Phytoplankton Species ». *PLOS ONE* 8 (6): e66423. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066423>.
- Napoléon, Camille, Virginie Raimbault, Liliane Fiant, Philippe Riou, Sébastien Lefebvre, Luis Lampert, et Pascal Claquin. 2012. « Spatiotemporal dynamics of physicochemical and photosynthetic parameters in the central English Channel ». *Journal of Sea Research* 69 (avril): 43-52. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2012.01.005>.
- Napoléon et Claquin. 2012. « Multi-Parametric Relationships between PAM Measurements and Carbon Incorporation, an In Situ Approach | PLOS ONE ». 2012. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0040284>.
- Pearre, A., S. Jr., 1982. Feeding by Chaetognatha: Aspects of Inter and Intra-Specific Predation. *Marine Ecology Progress Series* 7, 33–45
- Pielou, E.C. (1966) The measurement of diversity in different types of biological collections. *Journal of Theoretical Biology*, 13: 131-144.
- Pezy, J.P. (2017) Approche écosystémique d'un futur parc éolien en Manche orientale, exemple du site de Dieppe-Le Tréport (Ph.D. thesis), Université Caen Normandie, 374 p.
- R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>

- Raoux A., Pezy J.P., Ernande B., Niquil N., Dauvin J.C., Grangeré K. (2020). Isotopic analyses, a good tool to validate models in the context of Marine Renewable Energy development and cumulative impacts. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 237: 106690.
- Savoie, N., A. Aminot, P. Tréguer, M. Fontugne, N. Naulet, et R. Kérouel. 2003. « Dynamics of Particulate Organic Matter $\Delta^{15}\text{N}$ and $\Delta^{13}\text{C}$ during Spring Phytoplankton Blooms in a Macrotidal Ecosystem (Bay of Seine, France) ». *Marine Ecology Progress Series* 255 (juin): 27-41. <https://doi.org/10.3354/meps255027>.
- Shannon, C.E., Weaver, W. (1948) The mathematical theory of communication. *University of Illinois, Press, Urbana, IL*, 225 p.
- Serre-Fredj, Léon, Léo Chasselin, Oriane Jolly, Franck Jacqueline, et Pascal Claquin. 2022. « Colimitation assessment of phytoplankton growth using a resource use efficiency approach in the Bay of Seine (French-English Channel) ». *Journal of Environmental Management* 306 (mars): 114487. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114487>.
- Serre-Fredj, Léon, Franck Jacqueline, Maxime Navon, Guillaume Izabel, Léo Chasselin, Oriane Jolly, Michel Repecaud, et Pascal Claquin. 2021. « Coupling high frequency monitoring and bioassay experiments to investigate a harmful algal bloom in the Bay of Seine (French-English Channel) ». *Marine Pollution Bulletin* 168 (juillet): 112387. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112387>.
- Strickland, J. D. H., et T. R. Parsons. 1972. « A Practical Handbook of Seawater Analysis, 2nd Edition. » <https://doi.org/10.25607/OBP-1791>.
- Thompson, Peter A., Ming-xin Guo, et Paul J. Harrison. 1992. « Effects of Variation in Temperature. I. on the Biochemical Composition of Eight Species of Marine Phytoplankton1 ». *Journal of Phycology* 28 (4): 481-88. <https://doi.org/10.1111/j.0022-3646.1992.00481.x>.
- Thornton, S. F., et J. McManus. 1994. « Application of Organic Carbon and Nitrogen Stable Isotope and C/N Ratios as Source Indicators of Organic Matter Provenance in Estuarine Systems: Evidence from the Tay Estuary, Scotland ». *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 38 (3): 219-33. <https://doi.org/10.1006/ecss.1994.1015>.
- Vincent, C., Heinrich, H., Edwards, A., Nygaard, K., Haythornthwaite, J. (2002) Guidance on typology, classification and reference conditions for transitional and coastal waters. *Commission Européenne, CIS WG 2.4 (COAST)*, 119 p.
- Webb, Warren L., Michael Newton, et Duane Starr. 1974. « Carbon Dioxide Exchange of *Alnus Rubra* ». *Oecologia* 17 (4): 281-91. <https://doi.org/10.1007/BF00345747>.



Étude du compartiment suprabenthique de deux habitats sédimentaires du futur parc éolien de Dieppe-Le Tréport.

Tatiana Gauche

Master 2 Sciences du Vivant cursus IMAgHE (Integrative Master for Global Health and Ecology) parcours Biodiversité et Environnement (B&E)

Encadrement : Jean-Philippe Pezy et Aurore Raoux

UMR CNRS 6143 Morphodynamique Continentale et Côtière (M2C), 24 Rue des tilleuls, 14000, Caen



École Pratique
des Hautes Études



Résumé : La Manche est une importante zone socio-économique, soumise à de nombreuses pressions anthropiques historiques et nouvelles, notamment avec le développement des énergies marines renouvelables. Les forts courants de marée jouent un rôle majeur sur la répartition des espèces marines. Cet hydrodynamisme important structure les fonds marins, la circulation verticale de l'eau et également la distribution des espèces benthiques et suprabenthiques. Ainsi, ce travail a pour but d'étudier la distribution hivernale et estivale des communautés suprabenthiques dans deux habitats sédimentaires (sédiments grossiers et sables moyens) au niveau du futur parc éolien Dieppe-Le Tréport. Les résultats montrent d'une part que certaines espèces du suprabenthos ont des préférences sédimentaires et saisonnières. D'autre part, il existe un gradient croissant d'abondances et de biomasses entre le jour et la nuit relevant de migrations nyctémérales. Le compartiment suprabenthos joue un rôle dans le régime des poissons démersaux, notamment par une importante disponibilité des proies d'invertébrés marins.

Mots clés : Manche ; Energies Marines Renouvelables ; Suprabenthos ; Réseau trophique ; Relation proie-prédateur

Abstract : The Channel is an important socio-economic area, subject to many historical and new anthropogenic pressures, in particular with the development of marine renewable energies. Strong tidal currents play a major role in the distribution of marine species. This significant hydrodynamics structures the seabed, the vertical circulation of water and the distribution of benthic and suprabenthic species. Thus, this work aims to study the winter and summer distribution of suprabenthic communities in two sedimentary habitats (coarse sediments and medium sands) at the level of the future Dieppe-Le Tréport wind farm. The results show on the one hand that some suprabenthos species have sedimentary and seasonal preferences. On the other hand, there is an increasing gradient of abundance and biomass between day and night due to nycthemeral migrations. The suprabenthos compartment plays a role in the diet of demersal fish, through the significant availability of marine invertebrate prey.

Keywords : English Channel ; Marine Renewable Energies ; Superbenthos ; Food web ; Prey-predator relationship

INTRODUCTION

La Manche, mer épicontinentale à forte marée constitue la principale voie maritime entre l’Océan Atlantique et l’Europe. Ayant des enjeux socio-économiques majeurs, elle est considérée comme l’un des écosystèmes les plus anthropisés au monde (Halpern *et al.* 2008). De ce fait, elle est soumise à de nombreuses pressions anthropiques telles que le transport de marchandises, la pêche, l’exploitation de ses ressources et les activités énergétiques. Toutes ces activités anthropiques peuvent être susceptibles de modifier le milieu marin. Ainsi, dans le contexte actuel de changement climatique, il est nécessaire et vital de changer notre façon de consommer et de produire de l’énergie. C’est dans cet optique que la transition énergétique en Manche se développe via les Energies Marines Renouvelables (EMR) (Raoux 2017; Raoux *et al.* 2017; Pezy *et al.* 2018). En effet, depuis quelques années, le développement des EMR a connu un essor notable en Europe et particulièrement en France (Pezy 2017; Raoux 2017). Dans le cadre de cette transition, ces EMR devront s’insérer dans des écosystèmes déjà soumis à de nombreuses et croissantes perturbations, locales et globales (Raoux 2017). Par conséquent, implanter des infrastructures de grandes envergures dans des milieux aussi complexes que les écosystèmes marins littoraux est un enjeu considérable en termes juridique, technique, sociétal et environnemental pour les constructeurs (Raoux 2017). Ces dernières peuvent être à l’origine de changements dans la structure et le fonctionnement des écosystèmes (Carpenter *et al.* 2001). C’est pourquoi il est indispensable de mieux comprendre ces systèmes complexes afin d’une part, d’appréhender au mieux des changements d’états et d’autre part, de proposer par la suite des scénarios de prise de décision, visant à limiter les impacts de ces constructions. De ce fait, huit parcs éoliens marins sont en cours de développement et de construction dans la Manche.

A ce jour, huit parcs éoliens devraient être construit dont le futur parc éolien Dieppe-Le Tréport localisé respectivement à 17 et 15,5 km en mer entre les deux villes. La société Éoliennes en Mer Dieppe Le Tréport (EMDT) a obtenu en juin 2014 par arrêté préfectoral une autorisation de construire et d’exploiter le parc éolien en mer au titre de l’article L214-3 du Code de l’Environnement. L’article 17-3 de cet arrêté décrit les mesures de suivi à réaliser afin d’évaluer les effets du parc éolien sur l’environnement. Ces suivis concernent différents compartiments du milieu marin et doivent être réalisés selon le principe de BACI (Before After Control Impact) avant, pendant les travaux et après, durant la phase d’exploitation. Pour compléter ces suivis réglementaires, le Groupement d’Intérêts Scientifiques (GIS) Eolien en Mer prévoit de réaliser une étude concernant la caractérisation des réseaux trophiques au niveau du site d’implantation du futur parc éolien et de leurs évolutions en relation avec l’implantation de ce dernier. L’étude des différents compartiments permettra au préalable d’améliorer les suivis réalisés, pour l’état de référence de l’étude d’impact environnemental. Ensuite, elle contribuera à la

réalisation d'un état de référence des réseaux trophiques, pour tous les compartiments biologiques (du phytoplancton aux mammifères marins) sur deux grands habitats sédimentaires (les sédiments grossiers et les sables moyens). Ainsi, ce mémoire de stage s'inscrit dans le cadre de cette étude complémentaire sur les réseaux trophiques au niveau du site d'implantation du futur parc éolien de Dieppe-Le Tréport et se focalise plus particulièrement sur le suprabenthos.

Le suprabenthos ou hyperbenthos est d'après (Beyer 1958) un compartiment faunistique distinctif en lien avec la couche d'eau adjacente au fond. Ainsi, il se caractérise comme la faune de transition, entre le benthique et le pélagique (Beyer 1958; Brunel *et al.* 1978). Il est constitué d'organismes de petites tailles, dont une majeure partie de leur cycle de vie se déroule dans la couche d'eau directement adjacente aux sédiments (Beyer 1958; Brunel *et al.* 1978; Dauvin & Vallet 1997). Les principaux individus composant la communauté suprabenthique appartiennent alors aux pécaricides (amphipodes, mysidacés, cumacés, isopodes et tanaïdés), aux décapodes nageur et aux pycnogonides (Dauvin & Vallet 1997, 2006; Mouny 1998; Mouny *et al.* 2000; Dauvin & Pezy 2013; Pezy *et al.* 2017). Lié de façon intrinsèque au fond marin sédimentaire, le suprabenthos possède une capacité natatoire non négligeable lui octroyant la faculté de se mouvoir dans la colonne d'eau (Beyer 1958; Brunel *et al.* 1978; Dauvin & Vallet 1997). La littérature montre alors un consensus entre ces mouvements verticaux qui seraient associés à des variations nyctémérales et saisonnières (Brunel *et al.* 1978; Gibson & Barnes 1997; Dauvin *et al.* 2000; Dauvin & Vallet 2006). Plus particulièrement, c'est la décroissance de l'intensité lumineuse qui serait le facteur déterminant de l'activité natatoire des crustacés pécaricides mais également des rythmes endogènes (Macquart-Moulin 1973a, b; Hammond & Naylor 1977; Vallet *et al.* 1995; Dauvin *et al.* 2000). Par conséquent, le suprabenthos a un rôle écologique important dans le transfert actif de matière vivante entre le benthos et le pelagos (Beyer 1958; Gibson & Barnes 1997; Vallet & Dauvin 2001). De ce fait, il est défini selon plusieurs auteurs comme une source de nourriture majeure pour de nombreux poissons démersaux (poissons vivant dans la couche d'eau adjacente aux sédiments) favorisant les pécaricides et les décapodes dans leur régimes alimentaires (Pezy 2017). L'étude du suprabenthos permet alors de compléter celles d'autres compartiments biologiques tels que la macrofaune benthique.

Ainsi, la présente étude se consacre principalement à caractériser les communautés suprabenthiques au niveau du futur parc éolien de Dieppe-Le Tréport avant construction, localisé au niveau de deux habitats sédimentaires, afin de caractériser son rôle dans le réseau trophique de cette zone. Les problématiques ici sont multiples, (i) déterminer s'il existe une évolution saisonnière de la faune suprabenthique au niveau des deux habitats sédimentaires ; (ii) existe-t-il un lien entre les pécaricides collectés dans le suprabenthos et le benthos ? ; (iii) quel est le rôle du suprabenthos dans le régime trophique des poissons démersaux ?

MATERIELS ET METHODES

1- Description du site d'étude

Le futur parc éolien de Dieppe-Le Tréport se situe au niveau de la Manche orientale qui s'étend du cap d'Antifer à l'Ouest au détroit du Nord-Pas-de-Calais / Douvres à l'Est. Le bassin de la Manche orientale est dominé en grande partie par des sédiments sableux et gravelo-sableux. La zone du futur parc éolien apparaît localisée sur des sédiments grossiers (graviers ensablés et sables graveleux) et des sables moyens. Les courants de marées y paraissent relativement faibles, de 0,5 à 1 m.s⁻¹ mais avec un important brassage dans toute la colonne d'eau ne permettant pas à la thermocline de s'installer (Pezy 2017).

Le futur parc éolien s'étendra sur une surface totale de 83 km², et sera composé de 62 éoliennes pouvant atteindre une capacité unitaire de 8 MW et une puissance totale de 496 MW. Espacées entre elles de 1,1 à 1,3 km afin de laisser la navigation et la pêche possible, les éoliennes seront positionnées à 15,5 km du Tréport et à 17 km de Dieppe, sur une profondeur de fond marin variant entre 14 et 24 mètres. Elles seront soutenues par des fondations en treillis métalliques (jacket) à quatre pieux. Les pieux fixés dans le fond marin peuvent limiter l'emprise sur celui-ci et favoriser le développement de la faune et de la flore via la création d'habitats artificiels. Le parc devrait produire en moyenne 2000 GWh par an, soit la consommation électrique annuelle d'environ 850 000 personnes.

2- Protocole d'échantillonnage

Le compartiment suprabenthique a été échantillonné au cours de deux campagnes océanographiques : le 29 mars (hiver) et le 19 septembre (fin été) 2022 à bord du SEPIA II (navire CNRS de la station marine de Wimereux). Les prélèvements ont été réalisés à l'aide d'un traineau suprabenthique (Fig. 1) permettant d'échantillonner la couche d'eau juste au-dessus du fond en un unique niveau : 0,10 – 0,40 m au-dessus du fond (filet WP2 de 500 µm) au niveau de quatre stations (Fig. 2), équipé en son centre d'un compte-tour :

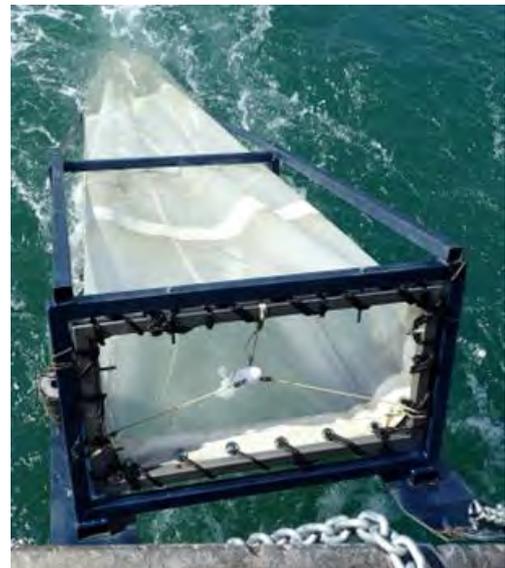


Figure 1 : Traineau suprabenthique

- Deux stations localisées au niveau des sédiments grossiers (la station B8E localisée à l'extérieur du parc et la station B4I localisée à l'intérieur du parc)
- Deux stations localisées au niveau des sables moyens (la station B5E localisée à l'extérieur du parc et la station B15I localisée à l'intérieur du parc)

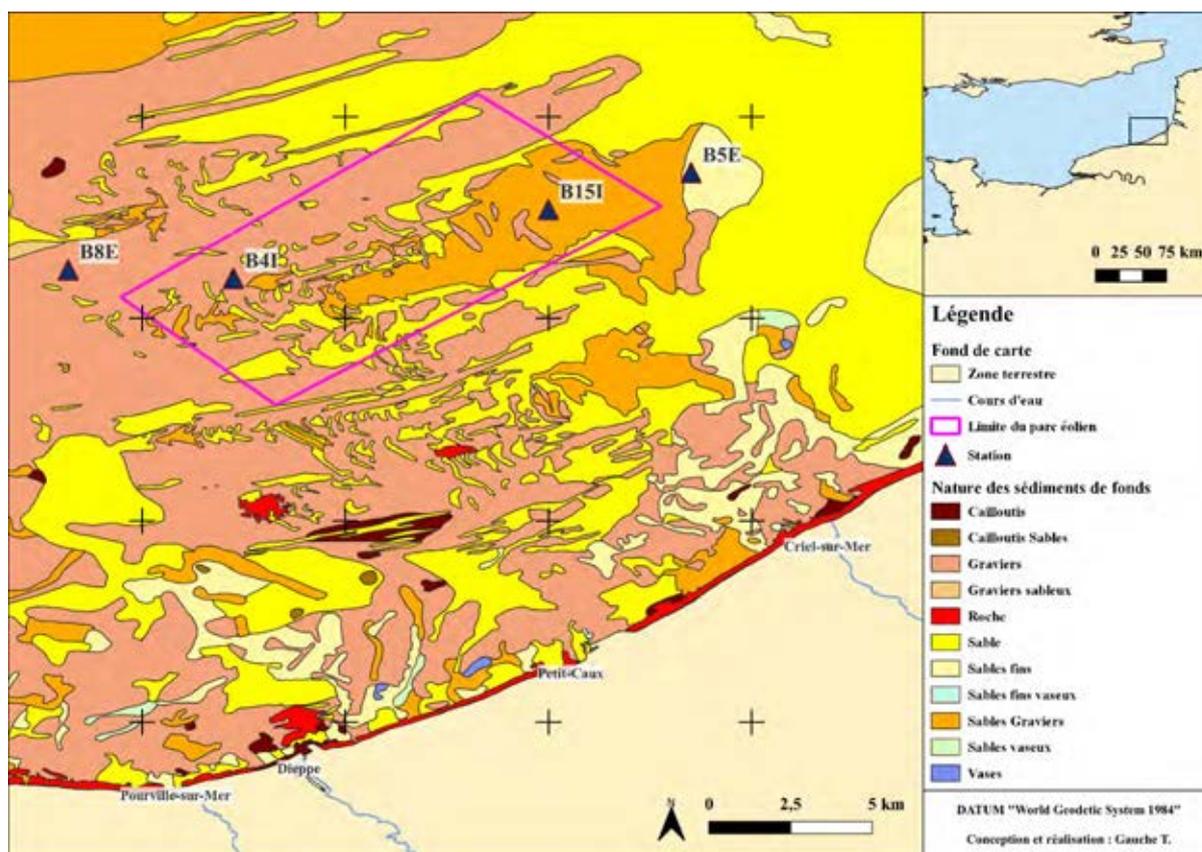


Figure 2 : Carte de la localisation des zones de prélèvements du suprabenthos, de la nature des sédiments de fonds provenant du Shom au niveau de la zone du futur parc éolien Dieppe-Le Tréport. Triangle = Station

Dans chaque zone, cinq traits de 15 min ont été effectués à contre-courant à une vitesse de 1,5 nœuds de jour (deux traits) et de nuit (deux traits) et un trait à l'aurore ou au crépuscule afin d'étudier les migrations nyctémérales (soit un total de cinq traits). Les échantillons ont été fixés avec de l'éthanol ou du formol pour un traitement ultérieur au laboratoire et les prélèvements de nuits ont été congelés pour réaliser des mesures isotopiques sur les organismes.

3- En laboratoire

Tri et identification

Les différents échantillons de suprabenthos ont été rincés sur un tamis de maille 200 μm afin de retirer l'agent fixateur (formol) puis ont été entièrement triés et déterminés sous loupe binoculaire. Chaque individu a été identifiés jusqu'à l'espèce si possible à partir de clés de détermination (Tattersall 1951; Naylor 1972; Jones 1976; Smaldon *et al.* 1978; Lincoln 1979; Hayward & Ryland 2017). Les noms scientifiques attribués à chaque organisme ont été mis à jour en se basant sur le site web WORMS (World Register of Marine Species) à la date du 27 avril 2023. L'abondance de chaque espèce identifiée de chaque prélèvement a été calculée suivant les volumes de prélèvement et chaque espèce de chaque zone (intérieure et extérieure du parc) est placée dans des piluliers différents pour effectuer les biomasses.

Abondances

L'abondance correspond au nombre d'individu identifié suivant un volume, ici les volumes des prélèvements lors des échantillonnages, afin de comparer les résultats d'abondances et de biomasses, les calculs sont rapportés pour 100 m³ d'eau filtrée d'après la formule ci-dessous.

$$Abondance = \frac{\text{Nombre d'individu}}{V} \times 100$$

V : Volume d'eau prélevé (m³)

Biomasses

Le Poids Sec Libre de Cendres (PSLC) est décrit comme l'indicateur le plus adéquat pour mesurer la biomasse (Dumont *et al.* 1975). Ainsi, la biomasse des organismes (pour 100 m³) décrite dans cette étude est relative aux différentes stations et dates de prélèvements. Les individus de chaque espèce ont été séchés à 60°C pendant 48h, refroidis à température ambiante dans un dessiccateur puis pesés avec une balance de précision Mettler® AE200 (détermination du poids sec - PS). Ensuite, les échantillons ont été calcinés à 500°C pendant 5h dans un four de laboratoire (Nabertherm® B180). Par la suite, les cendres résultantes ont été refroidies à 60°C dans le four éteint, puis dans un dessiccateur jusqu'à atteindre la température ambiante. La masse a de nouveau été mesurée (détermination du poids de cendre - PC), permettant alors de déterminer la biomasse avec la formule ci-dessous, calculée à partir du PSLC pour 100 m³ d'eau (Mouny *et al.* 2000; Pezy *et al.* 2017).

$$Biomasse = \frac{(PS - PC)}{V} \times 100$$

PS : Poids Sec (g) ; PC : Poids Cendres (g) ; V : Volume d'eau prélevé (m³)

4- Traitements des données

Richesse spécifique

La richesse spécifique est déterminée par le nombre d'espèces présentes dans un volume ou une surface donnée. De ce fait, la richesse spécifique dans cette étude correspond au nombre total d'espèces.

Indices de Shannon

L'indice de diversité de Shannon H' permet de combiner la richesse taxonomique et équitabilité, en plus de mesurer la difficulté à prédire l'identité du prochain individu. Sensible aux variations d'espèces rares il intègre la richesse spécifique et l'abondance relative des espèces. Son interprétation est représentée dans le **Tab. I**.

$$H' = - \sum_{i=1}^s p_i \cdot \log_2(p_i)$$

où n = nombre d'espèces et p_i = fréquence relative de l'espèce i dans la station

Tableau I : Interprétation des valeurs de H' (Vincent *et al.* 2002).

Valeur de H'	Interprétation de la communauté
[0 - 1[	Très peu diversifié
[1 - 2[	Peu diversifié
[2 - 3[	Diversifié
[3 - 4[	Très diversifié
[4 - +∞[	Extrêmement diversifié

Indice de Pielou

L'indice d'équitabilité de Pielou (J') (Pielou 1966) complète l'indice de diversité de Shannon (H'). Celui-ci permet d'appréhender la structure quantitative d'une communauté en termes de dominance d'une ou de plusieurs espèces. Il correspond au rapport entre la diversité (H') observée au sein d'une station et la diversité maximale (H' max), atteinte lorsque les espèces possèdent des effectifs identiques (Frontier *et al.* 2008). L'indice varie alors entre 0 (dominance d'une des espèces) et 1 (équpartition des individus dans les espèces) selon le Tab. II et se calcule selon la formule suivante :

$$J = \frac{H'}{H_{max}}$$

Tableau II : Interprétation des valeurs de J' (Dauvin *et al.* 2017).

Valeur de J'	Interprétation de la communauté
[0,00-0,20[	Très peu diversifié
[0,20-0,40[	Peu diversifié
[0,40-0,60[	Diversifié
[0,60-0,80[	Très diversifié
[0,80-1,00[	Extrêmement diversifié

5- Analyses statistiques

Analyses univariées

Plusieurs analyses ont été effectuées, tout d'abord, des données environnementales (salinité, température et taux d'oxygène) et granulométriques du milieu ont été étudiées et moyennées afin de déterminer s'il existait une corrélation ou non avec le suprabenthos. Des tests de Chi² ont été effectués sur les données environnementales pour caractériser leur significativité suivants les habitats sédimentaires et les saisonnalités.

Parmi les analyses univariées, les résultats d'abondances et de biomasse ne suivaient pas de loi normale (test de Shapiro), les tests ont donc été orientés vers des tests non paramétriques (test de Kruskal). Plusieurs facteurs (saisons, habitats sédimentaires et horaires de prélèvements) ont été testés afin de vérifier leurs effets au niveau de l'abondance et de la biomasse. Après avoir déterminé leur impact suivant les horaires de prélèvements du suprabenthos, les analyses suivantes se focalisent uniquement sur les prélèvements de nuit, d'après plusieurs auteurs, c'est pendant cette période que le suprabenthos

est le plus présent (Macquart-Moulin 1973a, b; Hammond & Naylor 1977; Vallet *et al.* 1995; Dauvin *et al.* 2000). Les indices de Shannon (H') et d'équitabilité de Pielou (J') de nuit ont été obtenus à partir des données d'abondances et de biomasses à l'aide de Primer-e. Ceux-ci ont été moyennés suivant les habitats sédimentaires et les saisons. La normalité a été reconnue pour les indices de diversité de Shannon (H') et d'équitabilité de Pielou (J'), des ANOVA ont été réalisées afin de tester l'effet des facteurs utilisés précédemment (saisons, habitats sédimentaires et horaires de prélèvements). Les analyses ont été réalisées à l'aide du logiciel Primer-e et du logiciel R pour les analyses univariées (Primer-E 2009; R Core Team 2020).

Analyses multivariées

A partir des abondances et des biomasses des espèces, il est possible de réaliser des assemblages faunistiques afin de déterminer s'il existe des différences de communauté d'espèces entre les stations et les saisons. Les analyses ont été effectuées suivant la similarité de Bray-Curtis en utilisant la fonction Simper soit le pourcentage de similarité et la contribution de chaque espèce, ainsi, différentes transformations sont utilisées :

- L'absence / présence se base uniquement sur les espèces dénombrables par station et par saison. Cette transformation se base sur l'indice de similarité de Sørensen, elle accorde plus d'importance à la présence qu'à l'absence des espèces caractéristiques d'une communauté suprabenthique.
- En $\log_{10}(x + 1)$ où x correspond aux abondances par espèce, par station et par saison (hiver et été). Cette transformation permet de distinguer les espèces participant le plus dans abondance du suprabenthique et donc aux potentielles proies contribuant le plus aux assemblages.
- En racine carré (\sqrt{x}) où correspond aux biomasses par espèce, par station et par saison. Cette transformation permet de caractériser les organismes contribuant le plus d'un point de vue trophique à la structure des assemblages benthiques.

RESULTATS

1- Paramètres environnementaux

Mesure physico-chimique de l'eau

Le **Tab. III** résume les moyennes des paramètres environnementaux (salinité, température et taux d'oxygène) à un mètre au-dessus du fond au niveau des zones d'études pendant l'été et l'hiver. L'ensemble des données environnementales semble être influencé par les changements de saisons entre l'hiver et l'été (T- χ^2 : p -value < 0,05). Parmi ces paramètres, dans les sédiments grossiers entre l'été et l'hiver, la salinité moyenne varie entre 34,3 à 35,1 (T- χ^2 : p -value < 0,05), la température de 17,6 l'été à 9,6 °C l'hiver (T- χ^2 : p -value < 0,05) et l'oxygène de 6,1 à 10,6 mg.L⁻¹ entre l'été et l'hiver (T- χ^2 : p -value < 0,05). Dans les sables moyens, l'été la salinité est de 34,6 et l'hiver de 34,4 (T- χ^2 : p -value < 0,05), la température oscille entre 17,6 l'été à 9,6 °C l'hiver (T- χ^2 : p -value < 0,05) et l'oxygène peut passer de 6,1 l'été à 10,4 mg.L⁻¹ pendant l'hiver (T- χ^2 : p -value < 0,05).

Tableau III : Moyennes des paramètres environnementaux (salinité, température et oxygène) à un mètre au-dessus du fond durant l'été et l'hiver.

Station	Sédiment	Saison	Profondeur (m)	Salinité (S.m ⁻¹)	Température (°C)	Oxygène (mg.L ⁻¹)
B15I	Sable moyen	Hiver	25,4	34,5	9,6	10,4
B5E	Sable moyen	Hiver	17,8	34,4	9,6	10,4
B8E	Sédiment grossier	Hiver	24,5	35,1	9,7	10,5
B4I	Sédiment grossier	Hiver	26,4	35,0	9,7	10,6
B15I	Sable moyen	Eté	25,5	34,6	17,6	6,2
B5E	Sable moyen	Eté	18,0	34,5	17,6	6,1
B8E	Sédiment grossier	Eté	24,8	34,3	17,6	6,1
B4I	Sédiment grossier	Eté	26,5	34,5	17,6	6,1

Granulométrie

La granulométrie de chacune des stations a été mesurée lors des prélèvements en mer, ainsi la **Fig. 3** représente le pourcentage cumulé du refus de tamis suivant le diamètre du tamis (mm) et des stations et le **Tab. IV** représente la correspondance entre le diamètre de chaque tamis (mm) et l'échelle granulométrique marine.

D'après la **Fig. 3**, et le **Tab. IV**, les stations B15I et B5E (bleu) ont une majeure partie de leur sédiment dans un diamètre compris entre 0,4 à 0,080 mm, se situant alors dans les sables moyens à fins. Les stations B8E et B4I (vert) représentent une grande partie de l'échelle granulométrique, c'est-à-dire qu'elles possèdent des sédiments allant des cailloux aux silts. Mais la majorité de ces sédiments se situe entre 3 et 0,5 mm soit des granules aux sédiments grossiers.

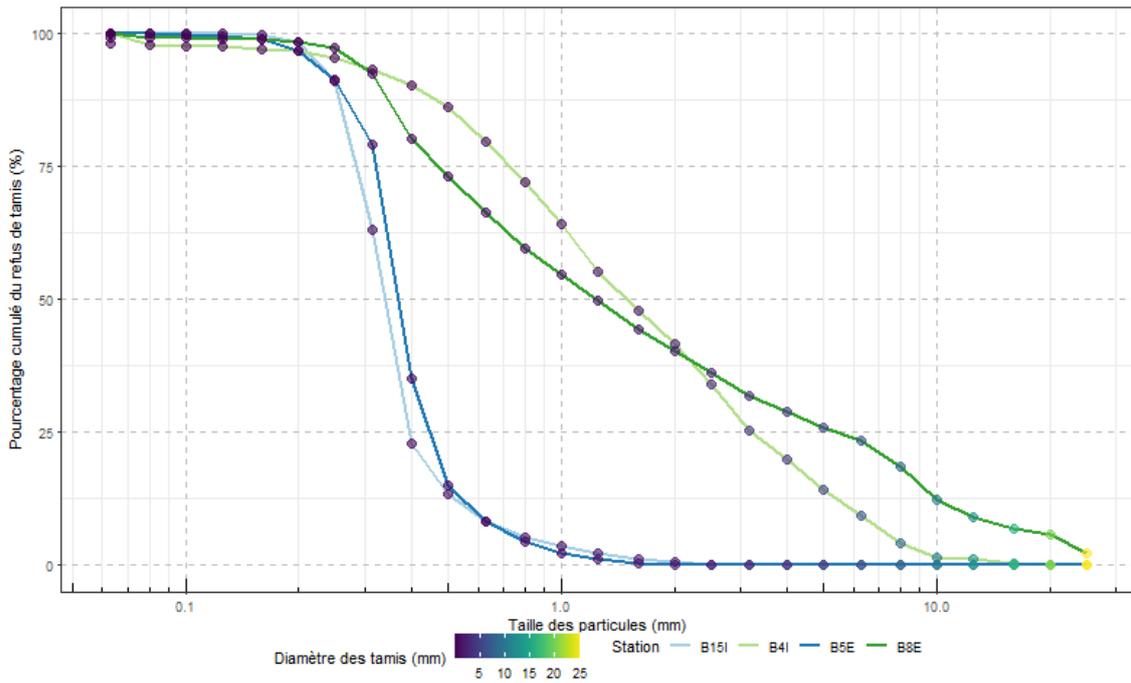


Figure 3 : Représentation graphique du pourcentage cumulé du refus de tamis suivant le diamètre du tamis (mm) (violet = silt ; jaune = cailloux) (échelle logarithmique) en fonction des stations (B15I ; B5E (bleu) ; B4I et B8E (vert)).

Tableau IV : Correspondance entre le diamètre de chaque tamis (mm) et l'échelle granulométrie marine.

Diamètre des tamis (mm)	Echelle granulométrique
25	Cailloux
20	
16	
12,5	
10	
8	
6,3	
5	Granules
4	
3,15	
2,5	Sable très grossier
2	
1,6	
1,25	
1	Sable grossier
0,8	
0,63	
0,5	
0,4	Sable moyen
0,315	
0,25	
0,2	
0,16	Sable fin
0,125	
0,1	
0,08	Sable très fin
0,063	
< 0,063	
< 0,063	Silt

2- Etude du suprabenthos

Richesse spécifique et abondance globale

Un total de 53 espèces a été observé en 2022 pour les deux campagnes, représentant un total de 48 948 individus. Les 53 espèces correspondent à 29 amphipodes, huit mysidacés, quatre cumacés, six décapodes, cinq isopodes et un leptostracé. Le **Tab. V** représente la richesse spécifique et les nombres d'individus totaux suivant les saisons et les habitats sédimentaires. La richesse spécifique ne semble pas varier suivant les saisons, les habitats sédimentaires et les répliques (*Anova : p-value > 0,05*).

Les abondances moyennes ont été rapportées pour 100 m³, ainsi, d'après le **Tab. V**, elles ne semblent pas varier annuellement suivant les habitats sédimentaires, entre les sédiments grossiers (134±367) et les sables moyens (388±1042 individus moyens pour 100 m³) (*T-Kruskal : p-value > 0,05*). Cependant, cette variation est significative suivant les saisons dans les deux habitats sédimentaires (*T-Kruskal : p-value < 0,05*). En outre, l'été, dans les sédiments grossiers, la moyenne est de 228±510 contre 40,5±64,5 individus moyens pour 100 m³ l'hiver. A l'inverse, dans les sables moyens, il y a 726±1425 individus pour 100 m³ l'hiver et 50,5±96,4 individus l'été. Entre les deux saisons, dans les sédiments grossiers, l'abondance varie d'un facteur 5 entre l'hiver et l'été tandis que dans les sables moyens, celui-ci est de 14 entre l'été et l'hiver (*T-Kruskal : p-value < 0,05*).

Tableau V : Richesse spécifique et abondance (moyenne et écart-type) pour 100 m³ total du suprabenthos dans les sédiments grossiers et les sables moyens durant l'hiver, l'été et l'année.

	Richesse spécifique		Abondance (moyenne et écart-type) pour 100 m ³	
	Sédiments grossiers	Sables moyens	Sédiments grossiers	Sables moyens
Eté	37	28	228 ± 510	50,5 ± 96,4
Hiver	28	31	40,5 ± 64,5	726 ± 1425
Année	46	41	134 ± 367	388 ± 1042

La **Fig. 4** résume les répartitions des grands ordres du suprabenthique suivant les saisons et le milieu sédimentaire. Les amphipodes sont largement dominants et représentent 61% (17 espèces) à 54% (20 espèces) du nombre total d'espèces entre l'hiver et l'été dans les sédiments grossiers. Dans les sables moyens, les amphipodes sont aussi le groupe dominant du suprabenthique, notamment l'hiver avec 65% (20 espèces) et 46% (13 espèces) l'été.

Au niveau des sables moyens, les mysidacés représentent le second groupe dominant durant l'été seulement avec 25% de la richesse spécifique totale, l'hiver, elle n'est que de 10% car les cumacés dominant de peu la richesse spécifique (13%). Les cumacés, les isopodes et les décapodes sont co-dominants durant l'été avec 11, 11 et 7% de la richesse spécifique des sables moyens.

Au niveau des sédiments grossiers les décapodes semblent co-dominer avec les mysidacés durant l'été avec respectivement 16 et 14%. Leur richesse spécifique diminue l'hiver (11 et 7%) pour laisser place à la co-dominance des cumacés et isopodes (10 et 11%).

La Fig. 5 représente et résume la fréquence du nombre d'individu des différents groupes suprabenthiques dans les sables moyens et les sédiments grossiers en été et en hiver. La majeure partie des individus identifiés correspondait à l'ordre des amphipodes, des cumacés et des mysidacés comme présenté sur la Fig. 5. Dans les sédiments grossiers, les amphipodes représentent 83% l'été contre 45% l'hiver car les cumacés ont un pourcentage de 38. Dans les sables moyens, amphipodes et cumacés sont nombreux et représentent respectivement 48 et 47% du nombre d'individu total pendant l'hiver, tandis que l'été, les mysidacés sont relativement présents (à 27%) et les amphipodes et cumacés sont présent à 53 et 19%.

En général, la taxocénose suprabenthique est donc principalement composée d'amphipodes en hiver et en été dans les deux milieux d'études, avec des sous-groupes qui co-dominent et varient et relevant d'une saisonnalité (*T-Kruskal* : *p-value* < 0,05).

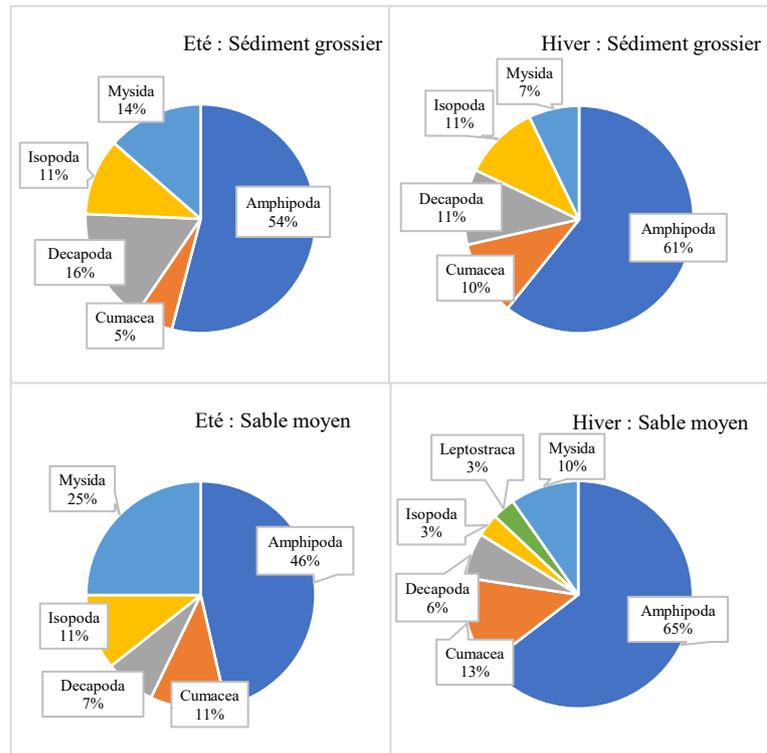


Figure 4 : Fréquence de la richesse spécifique des différents groupes suprabenthiques dans les sables moyens et les sédiments grossiers en été et en hiver.

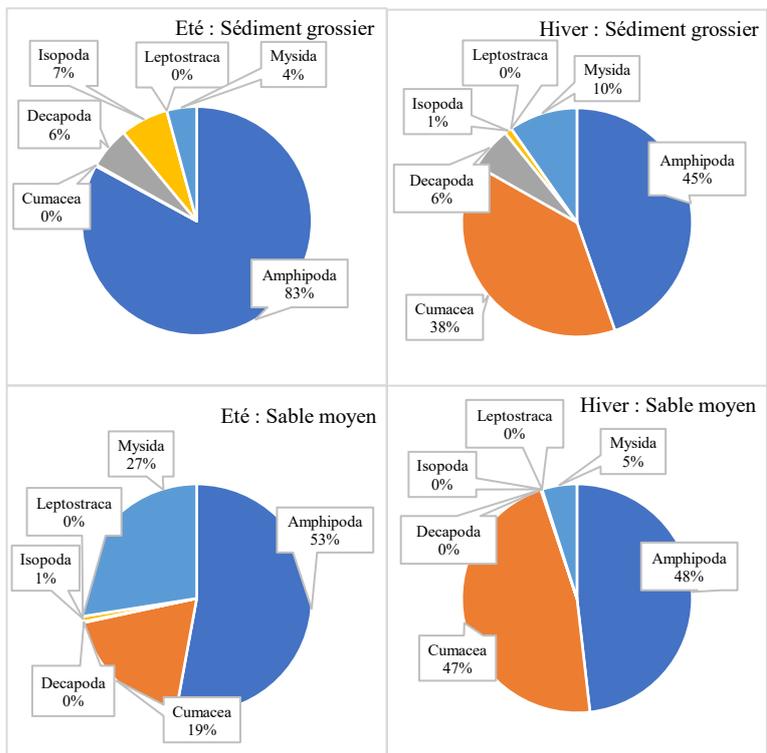


Figure 5 : Fréquence des abondances pour 100 m³ des différents ordres suprabenthiques dans les sables moyens et les sédiments grossiers en été et en hiver.

Abondances

Le **Tab. VI** représente les moyennes et les écarts-types des abondances pour 100 m³ suivant les horaires de prélèvement (jour/crépuscule/nuit) et des habitats sédimentaires (sédiments grossiers et sables moyens) pendant l'hiver et l'été. La **Fig. 6** représente les abondances du **Tab. VI** mais sous forme de boîte à moustaches suivant les paramètres précédents (horaires de prélèvement, habitats sédimentaires et saison). L'abondance croît de 13,10±10,60 le jour à 549±742 individus.100 m³ la nuit en été dans les sédiments grossiers par exemple (**Tab. VI**). De manière général, l'abondance est croissante des prélèvements de jour à ceux de nuit relevant bien des migrations nyctémérales (*T-Kruskal* : *p-value* < 0,05), cependant, le sédiment seul ne semble pas influencer l'abondance (*T-Kruskal* : *p-value* > 0,05) (**Tab. VI** et **Fig. 6**). Une forte abondance est présente au crépuscule en hiver dans les sables moyens (609±838 individus.100 m³), toutefois, les prélèvements pendant les crépuscules n'ont pas été pris en compte dans les analyses statistiques faute de répliques. Plus en détail, dans les sédiments grossiers, les abondances de nuit atteignent 549±742 l'été et 96,8±73,60 individus.100 m³ l'hiver. A l'inverse, dans les sables moyens, les abondances de nuit sont de 114±137 l'été et 1504±2086 individus.100 m³ l'hiver (**Tab. VI**). Les abondances varient alors fortement entre les saisons (hiver et été) d'un sédiment à un autre (*T-Kruskal* : *p-value* < 0,05) pouvant traduire une saisonnalité du suprabenthos.

Tableau VI : Moyennes et écarts-types des abondances pour 100 m³ suivant les horaires de prélèvements (jour/crépuscule/nuit) et des habitats sédimentaires (sédiment grossier et sable moyen) pendant l'hiver et l'été.

Horaires	Sédiment grossier		Sable moyen	
	Hiver	Été	Hiver	Été
Jour	1,42 ± 0,91	13,10 ± 10,60	6,91 ± 5,76	4,72 ± 1,94
Crépuscule	6,22 ± 6,72	12,70 ± 4,64	609 ± 838	15,10 ± 18,90
Nuit	96,8 ± 73,60	549 ± 742	1504 ± 2086	114 ± 137

Les abondances minimums des médianes se retrouvent dans les prélèvements de jour (±0,3 individus.100 m³) et de crépuscule (±0,25 individus.100 m³) hormis dans les sables moyens en hiver pendant le crépuscule (± 1,0 individus.100 m³) (**Fig. 6**). L'abondance du suprabenthos est majoritairement plus importante pendant la nuit dans les sables moyens (hiver) et les sédiments grossier (été) avec respectivement des médianes d'environ 2,5 et 2,8 individus.100 m³.

Plusieurs représentations en boîtes à moustaches présentent de fortes variations des moustaches, notamment la nuit. Ces prélèvements, ont des maximums d'abondances d'environ 200 (hiver) et 350 (été) individus.100 m³ dans les sédiments grossiers 300 (hiver) et 55 (été) individus.100 m³ les sables moyens. L'analyse de ces trois paramètres (sédiment ; saison ; jour/nuit) interagissant ensemble semblent avoir un impact significatif sur l'abondance (*T-Kruskal* : *p-value* < 0,05) de même s'ils sont testés deux à deux (sédiment/saison ; sédiment/jour et nuit ; saison/jour et nuit).

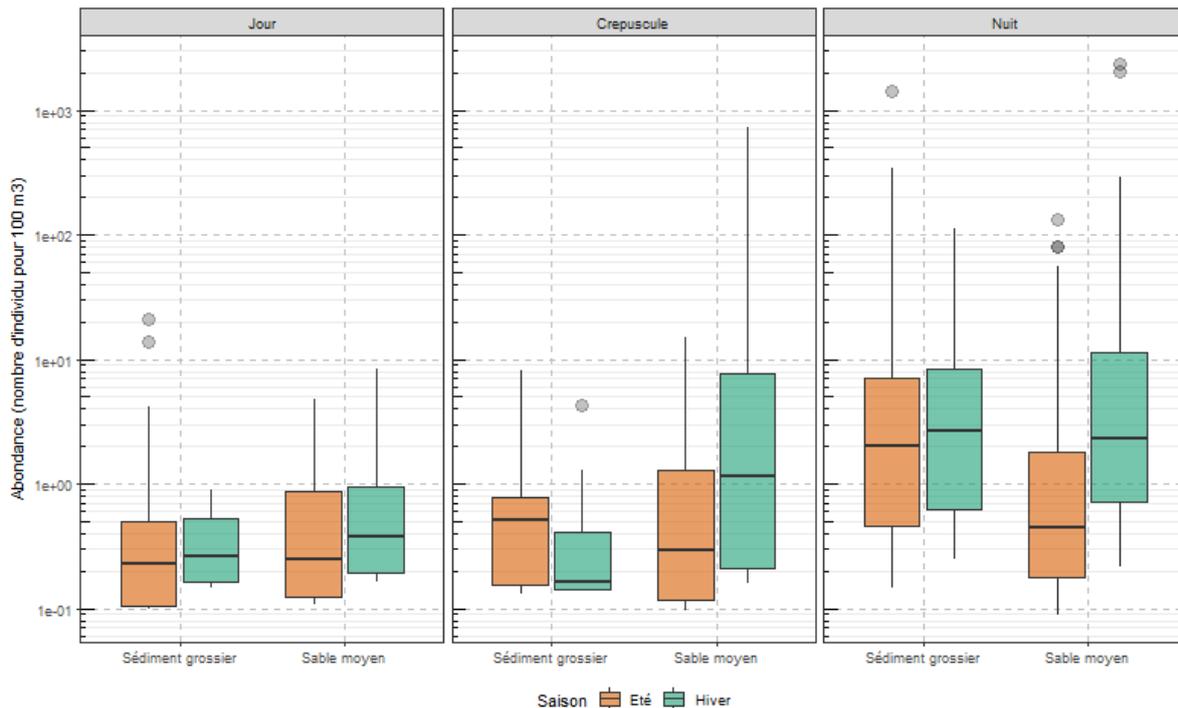


Figure 6 : Représentation en boîte à moustaches de la migration jour/crépuscule/nuite de l'abondance (nombre d'individu.100 m³) du suprabenthiques sur les sables moyens et les sédiments grossiers en hiver (vert) et en été (orange) (échelle logarithmique).

D'après les résultats précédents, les organismes suprabenthiques se retrouvent plus abondant dans les prélèvements de nuit, en effet, ils effectuent la majeure partie leur migration pendant cette période. Par conséquent, le **Tab. VII** résume les onze principales espèces suprabenthiques les plus abondantes la nuit dans les sédiments grossiers et les sables moyens pendant l'hiver et l'été. Ainsi, selon le **Tab. VII**, *Pseudocuma simile* (cumacé), *Megaluropus agilis* (amphipode), *Apherusa bispinosa* (amphipode) et *Gastrosaccus spinifer* (mysidacé) sont les espèces les plus abondantes suivant l'habitat sédimentaire et traduisent bien les résultats détaillés précédemment, notamment les abondances globales (**Tab. V**, **Fig. 4** et **Fig. 5**). Parmi ces espèces, *Pseudocuma simile* et *Megaluropus agilis* sont en moyenne très présents l'hiver et particulièrement dans les sables moyens ($751,85 \pm 1074,72$ et $667,55 \pm 904,62$ individus.100 m³) tandis que *Apherusa bispinosa* est présent l'été dans les sédiments grossiers ($443,44 \pm 655,40$ individus.100 m³). *Gastrosaccus spinifer* se retrouve principalement dans les sables moyens avec une plus forte abondance pendant l'hiver ($56,10 \pm 73,93$) que l'été ($30,70 \pm 35,87$ individus.100 m³).

Tableau VII : Récapitulatif des moyennes et écarts-types de l'abondance pour 100 m³ des onze principales espèces suprabenthiques présentes dans les sédiments grossiers et les sables moyens la nuit en hiver et en été (classé du plus abondant au moins abondant).

Espèces	Sédiment grossier		Sable moyen	
	Hiver	Été	Hiver	Été
<i>Pseudocuma simile</i>	37,96 ± 26,96	1,16 ± 1,35	751,85 ± 1074,72	18,53 ± 25,74
<i>Megaluropus agilis</i>	33,62 ± 53,28	1,42 ± 2,25	667,55 ± 904,62	55,24 ± 62,52
<i>Apherusa bispinosa</i>	0,22 ± 0,45	443,44 ± 655,40	0	0
<i>Gastrosaccus spinifer</i>	7,66 ± 5,43	2,31 ± 2,32	56,10 ± 73,93	30,70 ± 35,87
<i>Anchialina agilis</i>	1,36 ± 1,23	19,56 ± 16,82	6,10 ± 10,43	2,64 ± 3,95
<i>Eurydice pulchra</i>	0,60 ± 0,43	15,29 ± 16,68	0	0,37 ± 0,40
<i>Philocheras sculptus</i>	5,95 ± 5,57	14,82 ± 20,89	0	0
<i>Pandalina brevisrostris</i>	0	14,30 ± 19,30	0	0
<i>Gnathia sp</i>	0,15 ± 0,31	9,62 ± 6,10	0	0,08 ± 0,17
<i>Atylus vedlomensis</i>	6,12 ± 4,10	9,06 ± 9,43	0,54 ± 1,09	0,76 ± 0,76
<i>Atylus falcatus</i>	0	0	8,71 ± 12,65	0,36 ± 0,44

Les abondances relevées dans les résultats précédents (Tab. VI et Fig. 6) peuvent être sensiblement représentées par ces espèces, à savoir *Megaluropus agilis*, *Pseudocuma simile* et *Gastrosaccus spinifer* dans les sables moyens pendant l'hiver et *Apherusa bispinosa* l'été dans les sédiments grossiers. Celles-ci peuvent potentiellement impacter les indices de biodiversité du fait de leur forte abondance comparée à d'autres espèces.

Biomasses

Les biomasses moyennes avec leurs écarts-types suivant les horaires de prélèvement (jour/crépuscule/nuit) et des habitats sédimentaires (sédiments grossiers et sables moyens) pendant l'hiver et l'été sont représentées sur le Tab. VIII. Les biomasses semblent présenter les mêmes similitudes que les abondances suivant les habitats sédimentaires, les saisons et les horaires de prélèvements. Ainsi, elles varient significativement entre les saisons (hiver et été) (*T-Kruskal* : *p-value* < 0,05) avec des maximums atteints la nuit en été dans les sédiments grossiers (8,28±9,23 de biomasse pour 100 m³) et en hiver dans les sables moyens (4,17±5,88 de biomasse pour 100 m³). Comme pour l'abondance, l'habitat sédimentaire seul ne contribue pas dans la variation de biomasse (*T-Kruskal* : *p-value* > 0,05).

Tableau VIII : Moyennes et écarts-types des biomasses pour 100 m³ ou g PSLC.100 m³ suivant les horaires de prélèvements (jour/crépuscule/nuit) et des habitats sédimentaires (sédiment grossier et sable moyen) pendant l'hiver et l'été.

Horaires	Sédiment grossier		Sable moyen	
	Hiver	Été	Hiver	Été
Jour	0,00212 ± 0,00104	0,278 ± 0,207	0,0185 ± 0,0166	0,0250 ± 0,0224
Crépuscule	0,0128 ± 0,0159	0,279 ± 0,104	1,32 ± 1,80	0,0552 ± 0,0562
Nuit	0,229 ± 0,168	8,28 ± 9,23	4,17 ± 5,88	0,598 ± 0,697

Le Tab. IX présente et résume les biomasses de nuit pour 100 m³ des neuf principales espèces suprabenthiques dans les milieux d'études suivant les saisons. Les *Pseudocuma simile* (cumacé), les *Philocheras sculptus* (décapodes), les *Apherusa bispinosa* (amphipode), les *Pandalina brevisrostris* (décapode), les *Eurydice pulchra* (isopode), les *Processa edulis* (décapode) et les *Megaluropus agilis* (amphipode) sont les sept espèces ayant une biomasse pour 100 m³ supérieure à 0,5 parmi toutes les

espèces relevées. Selon le tableau, seuls *Pseudocuma simile* et *Megaluropus agilis* ont une biomasse élevée l'hiver dans les sables moyens ($3,34 \pm 4,78$ et $3,34 \pm 4,78$ g PSLC.100 m³). Les autres espèces (*Philocheras sculptus*, *Apherusa bispinosa*, *Pandalina brevisrostris*, *Eurydice pulchra* et *Processa edulis*) ont une biomasse majoritaire l'été dans les sédiments grossiers ayant respectivement ($1,93 \pm 2,72$, $1,81 \pm 2,68$, $1,65 \pm 2,23$, $1,35 \pm 1,47$ et $1,24 \pm 2,49$ g PSLC.100 m³).

Tableau IX : Récapitulatif des moyennes et écarts-types de la biomasse pour 100 m³ des neuf principales espèces suprabenthiques présentes dans les sables grossiers et les sables moyens la nuit en hiver et en été (classé dans l'ordre croissant annuel de la biomasse).

Espèces	Sédiment grossier		Sable moyen	
	Hiver	Eté	Hiver	Eté
<i>Pseudocuma simile</i>	0,16 ± 0,12	0	3,34 ± 4,78	0,05 ± 0,7
<i>Philocheras sculptus</i>	0	1,93 ± 2,72	0	0
<i>Apherusa bispinosa</i>	0	1,81 ± 2,68	0	0
<i>Pandalina brevisrostris</i>	0	1,65 ± 2,23	0	0
<i>Eurydice pulchra</i>	0	1,35 ± 1,47	0	0,03 ± 0,03
<i>Processa edulis</i>	0	1,24 ± 2,49	0	0
<i>Megaluropus agilis</i>	0,03 ± 0,04	0	0,61 ± 0,83	0,15 ± 0,17
<i>Gastrosaccus spinifer</i>	0,02 ± 0,01	0,02 ± 0,02	0,19 ± 0,25	0,35 ± 0,40
<i>Gnathia sp</i>	0	0,23 ± 0,15	0	0

Indice de biodiversité

A partir des **Tab. I** et **Tab. II**, il est possible d'interpréter les indices de biodiversité. Ainsi, le **Tab. X** présente les indices de Shannon (H') et d'équitabilité de Piélou (J') des prélèvements de nuit de l'abondance et de la biomasse pour 100 m³ suivant les habitats sédimentaires et les saisons. D'après les résultats de richesse spécifique, le suprabenthos ne semblait pas varier suivant les habitats sédimentaires, les saisons et les horaires de prélèvements. Mais d'après les abondances et les biomasses, le suprabenthos suit un rythme saisonnier et nyctéméral.

Globalement, les indices H' et J' démontrent une communauté peu diversifiée, sans que les changements sédimentaires et saisonniers n'affectent cette richesse taxonomique (*Anova* : *p-value* > 0,05). Cependant, dans le milieu, ces facteurs interagissent et il s'avère que la saisonnalité a un impact significatif sur les indices des biomasses des organismes suprabenthiques (*Anova* : *p-value* < 0,05). L'indice J' dans les sédiments grossiers en hiver indique une communauté très diversifiée dans les abondances tandis qu'elle est moyennement diversifiée l'été.

Les résultats précédents montraient de fortes abondances pour les espèces, *Pseudocuma simile*, *Megaluropus agilis* (sable moyen), *Apherusa bispinosa* (sédiment grossier) et de fortes biomasses pour *Pseudocuma simile*, *Megaluropus agilis* (sable moyen), *Philocheras sculptus*, *Apherusa bispinosa*, *Pandalina brevisrostris*, *Eurydice pulchra* et *Processa edulis* (sédiment grossier). Ces espèces peuvent traduire ces communautés peu diversifiées de l'indice de Shannon dans les abondances et les biomasses.

Tableau X : Valeurs moyennes des indices de Shannon (H') et de Pielou (J') des abondances et biomasses pour 100 m³ pendant la nuit dans les sédiments grossiers et les sables moyens (rouge : communauté très peu diversifiée ; orange : communauté peu diversifiée ; jaune : communauté diversifiée ; vert : communauté très diversifiée ; bleu : communauté extrêmement diversifiée).

Sédiment	Saison	Abondance.100m ³		Biomasse.100m ³	
		H'	J'	H'	J'
Sable moyen	Hiver	1,37 ± 0,06	0,37 ± 0,01	0,91 ± 0,21	0,25 ± 0,04
Sable moyen	Été	1,83 ± 0,33	0,53 ± 0,11	1,45 ± 0,24	0,42 ± 0,09
Sédiment grossier	Hiver	2,15 ± 0,48	0,65 ± 0,15	1,09 ± 0,29	0,33 ± 0,08
Sédiment grossier	Été	1,94 ± 0,68	0,47 ± 0,19	1,84 ± 0,61	0,44 ± 0,12

Assemblages faunistiques

La Fig. 7 représente le dendrogramme de la présence et l'absence du suprabenthique de nuit selon une similarité de Sørensen de 54%, d'après celle-ci, trois grands assemblages se distinguent. Parmi eux, deux correspondent à une différence de saisonnalité, l'été pour les stations B15I, B4I et B8E (sable moyen et sédiment grossier) (groupe A) et l'hiver pour les stations B15I et B5E (sable moyen) (groupe B). Le troisième ensemble comprend les stations B4I et B8E (sédiment grossier) durant l'hiver et la station B5E pendant l'été qui n'est pas sur le même embranchement que les deux autres stations (groupe C). Plusieurs espèces appartenant au groupe A ont le même pourcentage de contribution (6,62%) notamment six amphipodes (*Apherusa bispinosa*, *Apherusa cirrus*, *Atylus vedlomensis*, *Corophium acutum*, *Megaluropus agilis*) deux décapodes (*Philocheras trispinosus*, *Anchialina agilis*), deux isopodes (*Eurydice pulchra* et *Gnathia sp*) et un mysidacé (*Gastrosaccus spinifer*), *Phthisica marina* et *Amphilocheus neapolitanus* ont une contribution < 3%. Dans l'assemblage B, les espèces ont une contribution de 11,11%, parmi elles, se trouve *Megaluropus agilis* et *Pseudocuma simile*. Ces mêmes espèces se retrouvent aussi dans le groupe C avec notamment *Atylus vedlomensis*, *Eurydice pulchra* et *Anchialina agilis*, tous ayant une contribution de 14,41%.

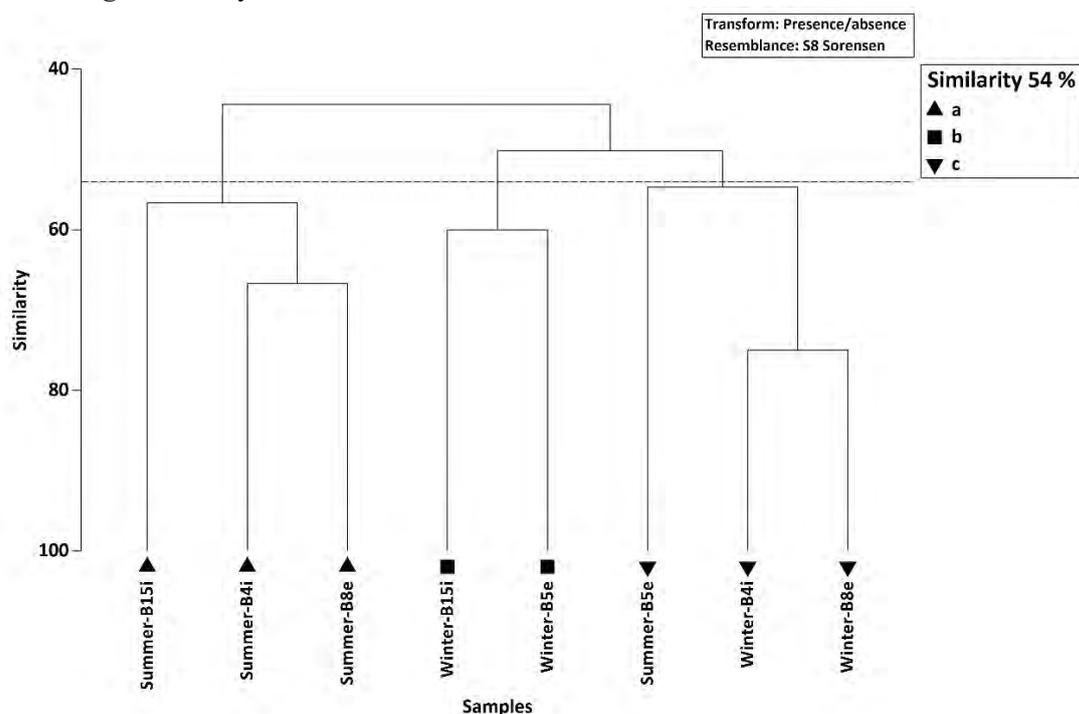


Figure 7 : Dendrogramme obtenu à partir de la matrice présence/absence du suprabenthique de nuit selon l'indice de similarité de Sørensen à 54% (a = assemblage triangle (1) ; b = assemblage carré ; c = assemblage triangle (2)).

La Fig. 8 représente le dendrogramme obtenu à partir de la matrice d'abondance du suprabenthique de nuit selon la similarité de Bray-Curtis. L'abondance du suprabenthique selon les stations et les saisons pour une similarité de 33% présente deux assemblages différents. D'une part les stations B4I et B8E (sédiment grossier) (assemblage A) durant l'été d'un côté et de l'autre les stations B5E, B15I (sable moyen) l'été et l'hiver, puis B4I et B8E l'hiver seulement (assemblage B). Au niveau de ces assemblages, les sédiments grossiers (B4I et B8E) durant l'été seulement se distinguent des autres stations et saisons, ainsi, les sédiments grossiers semblent correspondre à une même unité biocénotique et donc une même communauté. Les sables moyens quel que soit la saison, sont alors mélangés aux stations des sédiments grossiers. Durant l'hiver, les stations B4I et B8E sont parmi les sables moyens (B15I et B5E), il est possible que les communautés soient similaires pendant cette saison.

Plus en détail, l'analyse SIMPER de la Fig. 8 montre pour l'assemblage A une contribution à 21,38% d'*Apherusa bispinosa*, d'*Anchialina agilis* à 15,75%, de *Gnathia sp* à 13,98%, *Gammaropsis maculata*, *Philocheras sculptus* et *Eurydice pulchra* ont une contribution < 6%. Dans l'assemblage B, *Megaluropus agilis*, *Pseudocuma simile* et *Gastrosaccus spinifer* ont une contribution respective de 30,6, 24,84 et 24%. De plus, la différence entre ces deux groupes est de 75% d'après la dissimilarité obtenue entre les espèces de ceux-ci.

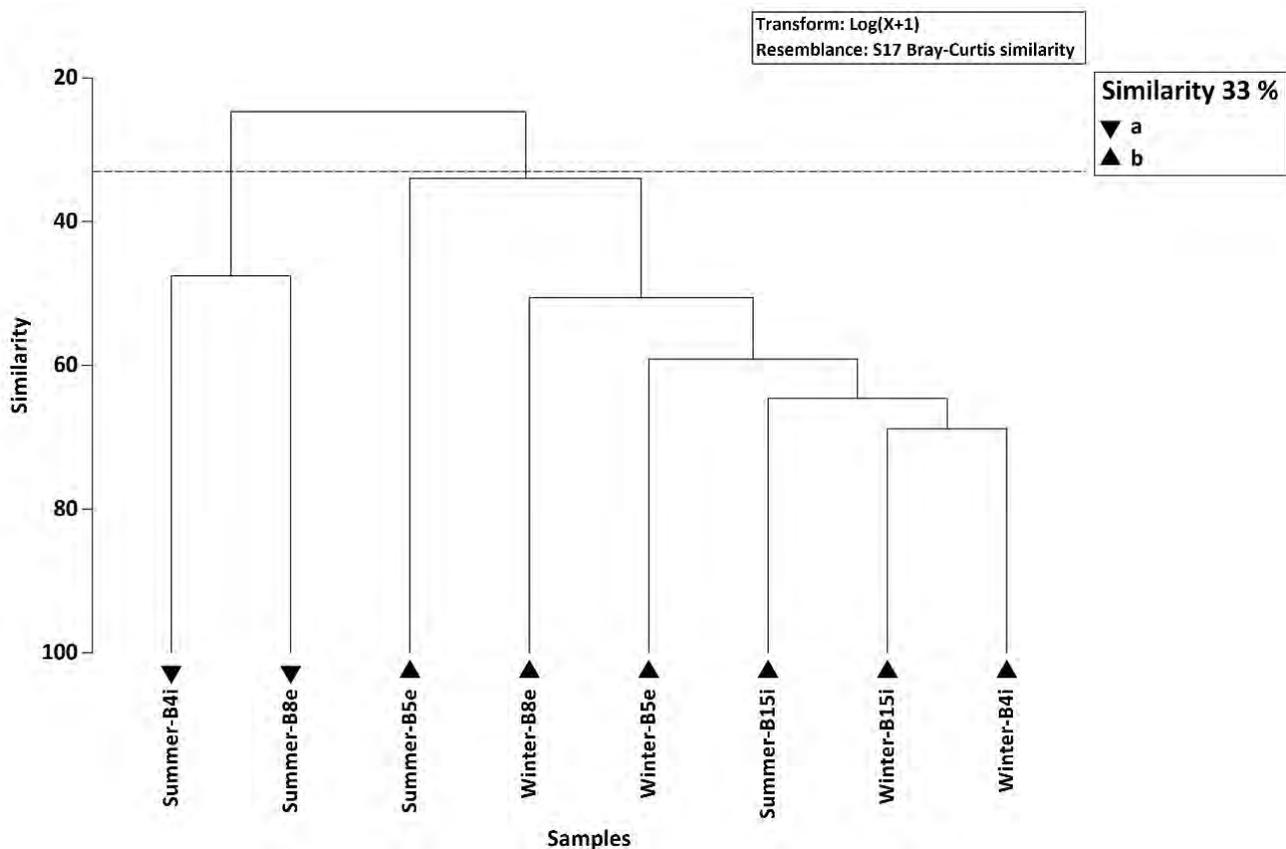


Figure 8 : Dendrogramme obtenu à partir de la matrice d'abondance du suprabenthique de nuit en transformation $\text{Log}_{10}(x + 1)$ de la matrice unique selon la similarité de Bray-Curtis à 33% (a = assemblage triangle (1) ; b = assemblage triangle (2)).

Le dendrogramme obtenu à partir de la matrice de la biomasse du suprabenthique de nuit (en transformation racine carré) selon la similarité de Bray-Curtis présente les mêmes assemblages que celui de l'abondance mais pour une similarité de 30%. Celui-ci n'est donc pas représenté ici mais l'analyse SIMPER reste intéressante. Elle donne les assemblages faunistiques de chacun des groupes, *Pseudocuma simile*, *Gastrosaccus spinifer* et *Megaluropus agilis* ont une contribution correspondant à 36,03, 31 et 25,48% dans le groupe B tandis que celles de *Philocheras sculptus*, *Gnathia sp.*, *Eurydice pulchra* et *Apherusa bispinosa* sont respectivement de 24, 20,37, 17,05 et 14,57% dans le groupe A. La dissimilarité entre les deux groupes est de 88,66%, de plus, les espèces présentes entre les deux dendrogrammes sont bien les mêmes mais avec des pourcentages de contribution différents, hormis *Anchialina agilis* et *Gammaropsis maculata* qui ne contribuent aucunement aux groupes.

DISCUSSION

L'étude établie ici se concentrait sur différentes analyses des communautés suprabenthiques (richesse spécifique, indices de diversité, abondance, biomasse, paramètres environnementaux, granulométrie) afin de répondre aux problématiques posées précédemment qui étaient (i) déterminer s'il existe une évolution saisonnière de la faune suprabenthique au niveau des deux habitats sédimentaires ; (ii) existe-t-il un lien entre les pécararides collectés dans le suprabenthos et le benthos ? ; (iii) quel est le rôle du suprabenthos dans le régime trophique des poissons démersaux ?

1- Evolution saisonnière de la faune suprabenthique au niveau des deux habitats sédimentaires

En Manche, les forts courants de marée jouent un rôle majeur sur la répartition des espèces marines. Cet hydrodynamisme important structure les fonds marins, la circulation verticale de l'eau et également la distribution des espèces benthiques (Dauvin *et al.* 2000). Ainsi, la distribution des communautés benthiques est directement liée aux habitats sédimentaires, eux-mêmes liés aux conditions environnementales comme les courants de marées (Clabaut & Davoult 1989; Snelgrove & Butman 1994; Dauvin 1997; Baffreau *et al.* 2017; Pezy 2017).

Habitats sédimentaires

Deux habitats sédimentaires différents sont localisés dans le futur parc éolien Dieppe-Le Tréport d'après les résultats granulométriques et la carte, à savoir les sédiments grossiers et les sables moyens. Il ne semble pas y avoir de différence significative pour les indices de Shannon (H') et d'équitabilité de Pielou (J') entre les stations à l'intérieur et à l'extérieur du parc pour un même habitat sédimentaire.

Communautés suprabenthiques

D'après la richesse spécifique et les abondances, la communauté suprabenthique est majoritairement représentée en nombre par les amphipodes et les cumacés dans les sédiments grossiers et les sables

moyens. Cependant, les amphipodes sont le groupe dominant largement la communauté suprabenthique en nombre d'espèces avec 29 espèces, alors que seulement quatre espèces de cumacés ont été observées. Plusieurs auteurs ont observé des résultats similaires, une communauté suprabenthique avec une forte dominance des amphipodes, des cumacés puis des mysidacés dans la Manche (Dauvin & Vallet 1997, 2006; Dauvin *et al.* 2000; Mouny *et al.* 2000; Dauvin & Pezy 2013; Pezy *et al.* 2017).

Préférence sédimentaire et saisonnière

L'abondance du suprabenthos est plus importante au niveau des sédiments grossiers durant l'été, et des sables moyens durant l'hiver. En outre, les indices de Shannon et d'équitabilité de Piélou pour la biomasse de nuit décrivent les deux saisons comme ayant chacune une dominance d'une ou plusieurs espèces. Cette préférence peut être expliquée par des différences de communautés suprabenthiques et notamment une espèce de décapode et une espèce de cumacé, respectivement *Philocheras sculptus* et *Pseudocuma simile*.

D'après les résultats d'abondances et d'assemblages faunistiques, *Pseudocuma simile* représente et contribue en grande partie à la description générale de sa communauté dans les sédiments grossiers durant l'hiver. Toutefois, *Philocheras sculptus* n'est pas l'espèce la plus abondante à l'inverse de *Apherusa bispinosa* qui est majoritairement abondante l'été dans les sables moyens. Ces résultats se retrouvent aussi dans les assemblages faunistiques de la biomasse. Les biomasses sont des approches complémentaires dans la description des communautés et surtout dans l'étude des réseaux trophiques (Pezy 2017).

Plusieurs hypothèses peuvent être émises afin d'expliquer cette disparité d'abondance des espèces (*Apherusa bispinosa* et *Pseudocuma simile*) suivant l'habitat sédimentaire. D'une part, ces espèces sont susceptibles d'avoir des régimes alimentaires ou des cycles de vie qui varient, d'autre part, celles-ci peuvent avoir des niches écologiques très différentes. (Dauvin & Vallet 1997) montre que l'amphipode *Apherusa bispinosa* est une espèce très abondante seulement pendant la période estivale et non l'hiver. Ces abondances et biomasses plus élevée de la faune suprabenthique pendant l'été dans les sédiments grossiers peuvent être liées à une augmentation de la production primaire (Vallet 1997; Vallet & Dauvin 1998). En effet, d'après la littérature, la croissance du phytoplancton est principalement liée à la proportion de luminosité et aux nutriments (Cloern 1987; Claquin *et al.* 2010; Hall Jr. *et al.* 2015). De surcroît, les résultats physico-chimiques montrent une nette différence de température et d'oxygène dissous entre l'hiver et l'été témoignant d'un possible développement de la production primaire. Il serait tout de même intéressant d'établir le lien entre le compartiment phytoplanctonique et zooplanctonique qui ont également été échantillonnés afin de déterminer si les tendances sont similaires aux autres compartiments biologiques. La composition du substrat joue un rôle dans la répartition des espèces, la

structure granulométrique de l'habitat peut constituer le facteur le plus important de la biodiversité et du développement des populations d'amphipodes. L'oxygène, les échanges d'eaux, la quantité et la qualité des ressources nutritionnelles ou encore le nombre d'abris varient en fonction du substrat comme dans les sables moyens (Marques & Bellan-Santini 1993).

Migration nyctémérale dans la colonne d'eau

Les cycles de vie des espèces composant la communauté suprabenthique, peuvent avoir différents modèles de migrations verticales d'après (Hesthagen 1973). Les cumacés, les amphipodes et les décapodes seraient présents la nuit dans la colonne d'eau et le jour dans le sédiment en effectuant des migrations nyctémérales. Les mysidacés occuperaient cette couche d'eau durant l'aube ou le crépuscule. En accord avec la littérature, le suprabenthos effectue des migrations verticales, conformément aux résultats, les organismes suprabenthiques sont plus présents pendant les prélèvements de nuit relevant bien d'une migration du suprabenthos du sédiment vers la colonne d'eau (Brunel *et al.* 1978; Gibson & Barnes 1997; Dauvin *et al.* 2000; Dauvin & Vallet 2006). De manière générale, la plupart des résultats sont en accord avec ce fait, l'abondance et la biomasse pendant les prélèvements de nuit sont bien supérieures aux résultats de jour ou de crépuscule (de $6,91 \pm 5,76$ le jour à 1504 ± 2086 individus.100 m³ la nuit en hiver dans les sables moyens). Les résultats de cette étude concordent avec le consensus scientifique, les changements d'intensité lumineuse semblent être le facteur déterminant des activités migratoires nyctémérales du suprabenthos (Hesthagen 1973; Kaartvedt 1985, 1989; Sainte-Marie & Brunel 1985; Chevrier *et al.* 1991; Macquart-Moulin & Maycas 1995; Mees & Jones 1997).

(Robertson & Howard 1978), supposent aussi que le suprabenthos migrerait afin de se nourrir et d'échapper à leurs potentiels prédateurs, plusieurs auteurs citent son paradigme notamment (Hesthagen 1973; Sibert 1981; Sorbe 1984; Jones 1986; Wildish *et al.* 1992). Cependant, (Chevrier *et al.* 1991) émet l'hypothèse que le passage à la maturité des individus et l'essaimage nuptial (reproduction) peut être aussi à l'origine de ces migrations nyctémérales. Selon (Dauvin *et al.* 2000), suivant les espèces, celles-ci peuvent être classées en fonction de leur activité natatoire, à savoir (i) les espèces plutôt bonnes nageuses communes, présentent à n'importe quel horaire de prélèvement (*Anchialina agilis*, *Apherusa ssp* et *Gastrosaccus ssp*, (ii) les espèces présentent uniquement la nuit (*Megaluropus agilis*, *Atylus vedlomensis* et *Pseudocuma ssp*) et (iii) les espèces rares présentent la nuit.

(Macquart-Moulin *et al.* 1987) distinguent eux aussi trois réactions vis-à-vis de la lumière : (1) les espèces migrant rapidement de la couche d'eau adjacente au fond vers le pélagos dès le crépuscule (éclairage < 1 lux) ; (2) les espèces présentant des densités planctoniques maximales avant l'établissement du seuil lumineux nocturne et (3) les espèces réagissant bien après l'établissement de ce

seuil lumineux nocturne. Ces migrations nyctémérales seraient à priori principalement contrôlées par des réactions phototaxiques (lié à l'orientation de la lumière), par réactions géotaxiques (lié en réponse à la gravité) ou par variation de la photocinèse (sans orientation particulière en présence d'une source lumineuse) (Vallet *et al.* 1995). Différencier les comportements de migrations par espèce peut être un axe de recherche supplémentaires afin de mieux connaître les spécificités de ces espèces et des communautés suprabenthiques.

2- Lien entre les pércarides collectés dans le suprabenthos et le benthos

Benthos et suprabenthos

Le benthos correspond aux organismes vivants au niveau du sédiment, celui-ci peut être séparé en plusieurs sous-groupes, d'un côté le phytobenthos et de l'autre le zoobenthos lui-même divisible en deux parties, le zoobenthos dénombrable (espèce dénombrable par une unité de surface) et non dénombrable (non quantifiables par unité de surface) (Vallet 1997; Cartes *et al.* 2002; Pezy 2017). Parmi le benthos dénombrable se trouve l'endofaune (qui vit dans le sédiment), l'épifaune (qui vit sur le sédiment) vagile (mobile), sessile (non mobile) et le suprabenthos. Le suprabenthos est alors défini par le traîneau suprabenthique et les espèces à activité nataoire s'y trouvant. Les principaux individus composant la communauté suprabenthique appartiennent aux pércarides (amphipodes, mysidacés, cumacés, isopodes et tanaïdacés), aux décapodes nageur et aux pycnogonides (Dauvin & Vallet 1997, 2006; Mouny 1998; Mouny *et al.* 2000; Dauvin & Pezy 2013; Pezy *et al.* 2017).

Abondances et biomasses des pércarides collectés dans le suprabenthos

(Pezy 2017) étudie l'ensemble des compartiments biologiques, du zooplancton aux poissons démersaux au niveau de la zone du futur parc éolien Dieppe-Le Tréport. Ainsi, dans sa collecte du suprabenthos, il échantillonne dans deux des mêmes stations (sédiments grossiers et sables moyens) le jour et la nuit à l'aide d'un traîneau Macer-GIROQ à quatre niveaux (Dauvin & Lorgeré 1989). La disposition des filets permet un échantillonnage précis et étagé de la colonne d'eau fractionnée en quatre niveaux. L'utilisation de ce type de traîneau permet ensuite de déterminer précisément les activités nataoires et les comportements migratoires (Brunel *et al.* 1978; Dauvin *et al.* 2000). Cette recherche utilise un traîneau à un niveau, car le temps en laboratoire (tri et identification) ne permettait pas d'utiliser ce type de traîneau à quatre niveaux. Ainsi, (Pezy 2017) observe 26 amphipodes, sept décapodes, sept cumacés, six mysidacés, deux isopodes et un leptostracé tandis que dans cette étude, 29 amphipodes, huit mysidacés, quatre cumacés, six décapodes, cinq isopodes et un leptostracé ont été identifiés. Ainsi, les pércarides collectés sont majoritairement composé d'amphipodes dans les deux habitats sédimentaires des deux études. Les amphipodes, les cumacés et les mysidacés varient suivant les saisons relevant d'une saisonnalité dans la présence des espèces, *Apherusa bispinosa* et *Pseudocuma simile* peuvent en être un exemple (Pezy 2017). Néanmoins, les deux études n'observent pas de changement de richesse

spécifique entre l'hiver et l'été dans le compartiment suprabenthique.

Apherusa bispinosa est une espèce d'amphipode très présente l'été dans les sédiments grossiers, tandis que *Pseudocuma simile* (cumacé) est abondant dans les sables moyens en hiver. (Pezy 2017) observe des résultats similaires, il remarque une absence d'*Apherusa bispinosa* dans la colonne d'eau l'hiver dans les deux habitats sédimentaires et que *Megaluropus agilis*, peut représenter jusqu'à 3 288 individus pour 100 m³ au niveau des sables moyens. Dans cette étude, cette espèce est la deuxième plus abondante après *Pseudocuma simile* dans les sables moyens durant l'hiver.

Les biomasses de l'étude de (Pezy 2017) n'ont relevé aucune différence entre le jour et la nuit. A l'inverse, les biomasses dans cette recherche étaient significativement croissantes du jour à la nuit avec des biomasses maximales pour *Philocheras sculptus* dans les sédiments grossiers et *Pseudocuma simile* dans les sables moyens. Néanmoins, il observe de grandes variabilités entre les habitats sédimentaires et les saisons, avec des maximales en hiver, ce qui est inversement observé dans cette recherche et d'autres études de la Manche, les maximales étaient l'été (Vallet 1997; Dauvin et al. 2000).

La migration verticale est bien représentée dans les deux études, les abondances varient significativement entre le jour et la nuit. Cependant, il remarque dans les graviers ensablés en hiver des pics d'abondances pendant les journées, témoignant d'une activité natatoire hivernale non dépendante de la lumière. D'après (Macquart-Moulin et al. 1987; Vallet et al. 1995; Dauvin et al. 2000; Pezy 2017), les coefficients d'activités natatoires permettent de différencier plusieurs groupes. *Apherusa bispinosa* et *Megaluropus agilis* nagent dans toute la colonne d'eau adjacente au fond marin sans préférence tandis que *Pseudocuma simile* préfère nager dans la couche d'eau adjacente au fond (Dauvin et al. 2000; Pezy 2017).

Dans l'ensemble, les analyses d'abondances, de biomasses et d'indices de diversités du suprabenthos sont similaires entre l'étude de (Pezy 2017) et celle-ci, cependant sa méthode l'échantillonnage est beaucoup plus précise mais demande plus de temps en laboratoire.

Abondances et biomasses des pércarides collectés dans le benthos

Le suprabenthos collecté dans le benthos dans l'étude de (Pezy 2017) est échantillonné au niveau de la zone du futur parc éolien Dieppe-Le Tréport dans 25 stations chacune ayant 5 répliques. Ces résultats montrent une diversité plus importante sur les sédiments grossiers qui décroît graduellement sur les sables moyens tout comme les résultats de cette étude pour le suprabenthos. Plus en détail, l'épifaune vagile est la plus diversifiée à l'année, puis vient le suprabenthos et l'épifaune sessile.

Les abondances observées en 2022, sont en majeure partie représentées par *Apherusa bispinosa* l'été dans les sédiments grossiers et *Pseudocuma simile* l'hiver sur les sables moyens. Les résultats de (Pezy 2017) décrivent de grande abondances d'*Apherusa bispinosa* l'été sur les sédiments grossiers et d'un

polychète l'hiver dans les sables moyens (*Nephtys cirrosa*). En général, les abondances étaient marquées par les amphipodes, décapodes et crustacés avec un facteur deux entre l'été et l'hiver mais l'abondance la plus élevée était représentée par l'endofaune puis par le suprabenthos et l'épifaune (Pezy 2017).

Les biomasses variaient grandement entre l'été et l'hiver, tout comme dans l'étude de (Pezy 2017), les biomasses étaient plus fortes en été. Les espèces dominantes de l'étude actuelle dans les milieux sédimentaires étaient respectivement *Philocheras sculptus* et *Pseudocuma simile* dans les sédiments grossiers et les sables moyens tandis que celles de (Pezy 2017) étaient composées principalement de mollusques bivalves et d'échinodermes. Comme expliqué précédemment, les biomasses ne sont pas forcément représentatives de l'abondance, celles-ci sont suivies par la biomasse individuelle de l'organisme. Ainsi, les biomasses de son étude sont majoritairement représentées par l'endofaune.

Dans l'ensemble, les analyses d'abondances, de biomasses et d'indices de diversités du benthos sont largement plus représentatives du milieu dans l'étude de (Pezy 2017) car elles regroupent de nombreux compartiments biologiques, là où cette recherche se focalise sur le suprabenthos.

D'autres prélèvements de benthos effectués de jour ont été réalisés et acquis en 2022. Une comparaison entre ces pécaricides collectés dans les prélèvements benthiques pourrait être faite avec ceux collectés avec le traineau afin d'identifier quelles sont les espèces réalisant des migrations. Ainsi, ce sujet pourrait être largement plus développé en utilisant d'autres études comparatives sur la même zone d'étude ou alors sur des substrats sédimentaires similaires en Manche.

3- Rôle du suprabenthos dans le régime trophique des poissons démersaux

Poissons démersaux

Les poissons démersaux correspondent aux poissons ayant un lien avec la couche d'eau adjacente au fond comme la raie bouclée (*Raja clavata*) ou encore la petite vive (*Echiichthys vipera*). Ils peuvent vivre dans les sédiments ou dans la couche d'eau directement adjacente aux sédiments (Sorbe 1981; Dauvin 1988; Vallet 1997; Powers *et al.* 2005; Wilhelmsson *et al.* 2006). De ce fait, il existe un lien direct ou non entre les poissons démersaux et l'étude du suprabenthique habitant dans un environnement relativement proche (Sorbe 1981; Dauvin 1988; Wilhelmsson *et al.* 2006). Le régime alimentaire de ces poissons évolue en fonction de l'âge et de la taille des proies, les poissons plus âgés consommeraient des proies de plus grandes tailles (Pezy 2017). Selon (Wilhelmsson *et al.* 2006), le développement des éoliennes marines favoriserait l'abondance des poissons démersaux notamment grâce à l'effet récif (colonisant des mâts d'éoliennes par le biofouling) et l'effet réserve (interdiction de pêche). L'augmentation des stocks des poissons démersaux peut modifier la structure du réseau trophique en particulier le benthos et suprabenthos via une augmentation de la prédation. Plus précisément, il existerait un lien proie-prédateur entre le suprabenthos et les poissons démersaux (Marques & Bellan-

Santini 1993; Wilhelmsson *et al.* 2006; Pezy 2017). D'après (Pezy 2017), 14,2% du suprabenthos migre du sédiment à la colonne d'eau et 0,0009% de ce suprabenthos disponible est consommé annuellement par les espèces démersales à un instant t.

Lien proie-prédateur entre le suprabenthos et les poissons démersaux

Les abondances de suprabenthos dans les sédiments grossiers et moyens peuvent constituer une importante source de nourriture pour les organismes marins, entre autres les poissons démersaux (Marques & Bellan-Santini 1993). En effet, les abondances les plus élevées détaillées précédemment à savoir, les *Megaluropus agilis* et les *Pseudocuma simile* l'hiver dans les sables moyens et les *Apherusa bispinosa* l'été dans les sédiments grossiers composent la majeure partie des abondances suprabenthiques étudiée dans le futur parc éolien Dieppe-Le Tréport. Chaque espèce de poisson démersal a sa technique de prédation et de chasse, de ce fait, suivant les espèces, les poissons peuvent avoir des régimes alimentaires différents. L'analyse des contenus stomacaux des poissons démersaux a permis de définir les coefficients de vacuité, c'est-à-dire le rapport entre le nombre d'estomacs vides (EV) et le nombre total d'estomacs examinés (EE) (Pezy 2017). Par exemple, la raie bouclée (*Raja clavata*) se nourrit préférentiellement d'organismes du suprabenthos, particulièrement d'amphipodes comme les *Megaluropus agilis* ou de mysidacés, les *Gastrosaccus spinifer* (Pezy 2017). Cette espèce peut potentiellement vivre dans les sables moyens étant donné que les proies qu'elle consomme se trouvent majoritairement dans ce type de substrat. A l'inverse, la raie peut en premier lieu préférer ce milieu sédimentaire pour des facilité d'enfouissement et se nourrir ensuite des organismes s'y trouvant abondamment tel que les *Megaluropus agilis*. (Pezy 2017) analyse le régime alimentaire de la petite vive (*Echiichthys vipera*), d'après celui-ci, la petite vive chasse à l'affut avec seulement la tête qui dépasse attendant les périodes de migrations nyctémérales. Se trouvant majoritairement dans les sédiments grossiers, elle se nourrit particulièrement d'*Apherusa bispinosa* qui constitue la plus grande partie de l'abondance suprabenthique de ce milieu.

Réseaux trophiques

Le réseau trophique étudié au niveau du futur parc éolien Dieppe-Le Tréport présente certaines particularités, notamment la distinction des compartiments trophiques benthiques consommé ou non par les poissons démersaux (Pezy 2017). Les organismes benthiques et suprabenthiques ne sont pas forcément consommés directement par ces poissons démersaux mais jouent tout de même un rôle écologique important dans le transfert actif de la matière vivante entre le benthos et le pélagos et particulièrement dans les premiers niveaux trophiques (Beyer 1958; Gibson & Barnes 1997; Vallet & Dauvin 2001; Pezy 2017).

En effet, les biomasses sont les plus élevées durant les migrations dans la colonne d'eau (nuit) dans les sables moyens (été) et les sédiments grossiers (hiver). (Pezy 2017) explique que la biomasse consommée par les poissons démersaux n'est pas forcément représentative de la biomasse du suprabenthos environnant. Seulement une petite partie du suprabenthos migrerait dans la colonne d'eau et un sous-ensemble de cette communauté serait ingérée par les poissons démersaux. Ainsi, le suprabenthos serait le deuxième compartiment consommé par ces poissons après le mérosuprabenthos (Pezy 2017). Mais en comparant les différents compartiments des proies, le suprabenthos reste tout de même celui qui subit le plus de pression de prédation d'après (Pezy 2017).

CONCLUSION

L'ensemble des résultats montre bien une évolution saisonnière des organismes suprabenthiques au niveau des deux habitats sédimentaires. Plus particulièrement, les espèces diffèrent à travers la communauté suivant le substrat sédimentaire et suivant les saisons. Enfin, une fois les communautés établies dans leur niche écologique, celles-ci effectuent là encore, une évolution nyctémérale. Toutes les évolutions détaillées ici, sont d'une part spatiale (habitat sédimentaire), et d'autre part, temporelles à deux niveaux (saisons, horaires).

Ensuite, le compartiment suprabenthos joue bien un rôle dans le régime trophique des poissons démersaux, notamment dans le lien proie-prédateur. De plus, des échantillons suprabenthiques ont été préparés afin d'effectuer des mesures isotopiques, celles-ci permettront d'identifier plus en détail le rôle du suprabenthos dans le réseau trophique. D'autre part, plusieurs perspectives sont possibles afin d'appréhender au mieux ce réseau trophique complexe, la modélisation des niveaux trophiques à l'aide d'Ecopath par exemple serait un point de départ dans la compréhension de cet écosystème complexe. Enfin, agrandir l'échelle trophique en couplant plusieurs compartiments plus grands permettrait d'avoir une perspective plus globale des transferts de la matière vivante dans l'écosystème.

REFERENCES

- Baffreau, A., Pezy, J.-P., Dancie, C., Chouquet, B., Hacquebart, P., Poisson, E., *et al.* (2017). Mapping benthic communities: An indispensable tool for the preservation and management of the eco-socio-system in the Bay of Seine. *Regional Studies in Marine Science*, 9, 162–173.
- Beyer, F. (1958). *A new, bottom-living Trachymedusa from the Oslofjord.*
- Brunel, P., Besner, M., Messier, D., Poirier, L., Granger, D. & Weinstein, M. (1978). Le traîneau suprabenthique MACER-GIROQ : appareil amélioré pour l'échantillonnage quantitatif étagé de la petite faune nageuse au voisinage du fond The MACER-GIROQ Suprabenthic Sled: An Improved Device for Quantitative Two-level Sampling of the Small Swimming Fauna near the Bottom. *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie*, 63, 815–829.
- Carpenter, S., Walker, B., Anderies, J.M. & Abel, N. (2001). From Metaphor to Measurement: Resilience of What to What? *Ecosystems*, 4, 765–781.
- Cartes, J.E., Brey, T., Sorbe, J.C. & Maynou, F. (2002). Comparing production-biomass ratios of benthos and suprabenthos in macrofaunal marine crustaceans. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 59, 1616–1625.
- Chevrier, A., Brunel, P. & Wildish, D.J. (1991). Structure of a suprabenthic shelf sub-community of gammaridean Amphipoda in the Bay of Fundy compared with similar sub-communities in the Gulf of St. Lawrence. In: *VIIIth International Colloquium on Amphipoda: Proceedings of the VIIIth International Colloquium on Amphipoda held in Walpole, Maine, USA, 14–16 September 1990*, Developments in Hydrobiology (ed. Watling, L.). Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 81–104.
- Clabaut, P. & Davoult, D. (1989). Interaction between benthic macrofaunas and associated sediments of a high-energy subtidal zone. Example of Baie de Wissant, eastern English Channel. *Comptes Rendus - Academie des Sciences, Serie II*, 308, 1349–1356.
- Claquin, P., Ní Longphuirt, S., Foullaron, P., Huonnic, P., Ragueneau, O., Klein, C., *et al.* (2010). Effects of simulated benthic fluxes on phytoplankton dynamic and photosynthetic parameters in a mesocosm experiment (Bay of Brest, France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 86, 93–101.
- Cloern, J.E. (1987). Turbidity as a control on phytoplankton biomass and productivity in estuaries. *Continental Shelf Research, Dynamics of Turbid Coastal Environments*, 7, 1367–1381.
- Dauvin, J. & Lorgeré, J. (1989). Modifications du traîneau Macer-GIROQ pour l'amélioration de l'échantillonnage quantitatif étagé de la faune suprabenthique. *Journal de recherche océanographique*, 14, 65–67.
- Dauvin, J.-C. (1988). Rôle du macrobenthos dans l'alimentation des Poissons démersaux vivant sur les fonds de sédiments fins de la Manche occidentale. *Cahiers de Biologie Marine*, 29, 445–467.
- Dauvin, J.-C. (1997). Les biocénoses marines et littorales françaises des côtes Atlantique, Manche et Mer du Nord: Synthèse, menaces et perspectives. *Collection Patrimoines naturels: Série Patrimoine écologique.*
- Dauvin, J.C., Bakalem, A., Baffreau, A. & Grimes, S. (2017). Benthic ecological status of Algerian harbours. *Marine Pollution Bulletin*, 125, 378–388.
- Dauvin, J.-C. & Pezy, J.-P. (2013). Long-term changes of the Seine estuary suprabenthos (1996–2012). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 448, 93–103.
- Dauvin, J.-C. & Vallet, C. (1997). Apports d'échantillonnages suprabenthiques à la faunistique de la Manche et à la biogéographie du plateau continental nord-ouest européen. Crustacés et Picnogonides. *Cahiers de Biologie Marine*, 38, 251–266.

- Dauvin, J.-C. & Vallet, C. (2006). The Near-bottom Layer as an Ecological Boundary in Marine Ecosystems: Diversity, Taxonomic Composition and Community Definitions. *Hydrobiologia*, 555, 49–58.
- Dauvin, J.-C., Vallet, C., Mouny, P. & Zouhiri, S. (2000). Main characteristics of the boundary layer macrofauna in the English Channel. *Hydrobiologia*, 426, 139–156.
- Dumont, H.J., Van de Velde, I. & Dumont, S. (1975). The dry weight estimate of biomass in a selection of Cladocera, Copepoda and Rotifera from the plankton, periphyton and benthos of continental waters. *Oecologia*, 19, 75–97.
- Frontier, S., Pichod-Viale, D., Leprêtre, A., Davoult, D. & Luczak, C. (2008). *Écosystèmes - 4e éd.: Structure, Fonctionnement, Évolution*. Dunod.
- Gibson, R.N. & Barnes, M. (1997). *Oceanography And Marine Biology: Volume 35*. CRC Press.
- Hall Jr., R.O., Yackulic, C.B., Kennedy, T.A., Yard, M.D., Rosi-Marshall, E.J., Voichick, N., *et al.* (2015). Turbidity, light, temperature, and hydropeaking control primary productivity in the Colorado River, Grand Canyon. *Limnology and Oceanography*, 60, 512–526.
- Halpern, B.S., Walbridge, S., Selkoe, K.A., Kappel, C.V., Micheli, F., D'Agrosa, C., *et al.* (2008). A Global Map of Human Impact on Marine Ecosystems. *Science*, 319, 948–952.
- Hammond, R.D. & Naylor, E. (1977). Effects of dusk and dawn on locomotor activity rhythms in the norway lobster *Nephrops norvegicus*. *Mar. Biol.*, 39, 253–260.
- Hayward, P.J. & Ryland, J.S. (2017). *Handbook of the Marine Fauna of North-West Europe*. Oxford University Press.
- Hesthagen, I.H. (1973). Diurnal and seasonal variations in the near-bottom fauna -the hyperbenthos- in one of the deeper channels of the Kieler Bucht (Western Baltic). *Kieler Meeresforschungen*, 29, 116–140.
- Jones, A. (1986). Spatial and temporal variations in a community of nekto-benthic invertebrates from Moreton Bay, Queensland. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 23, 131–146.
- Jones, N.S. (1976). *British Cumaceans, Arthropoda: Crustacea*. Published for the Linnean Society of London by Academic Press.
- Kaartvedt, S. (1985). Diel changes in small-scale vertical distribution of hyperbenthic mysids. *Sarsia*, 70, 287–295.
- Kaartvedt, S. (1989). Nocturnal swimming of gammaridean amphipod and cumacean Crustacea in Masfjorden, Norway. *Sarsia*, 74, 187–193.
- Lincoln, R.J. (1979). *British marine amphipoda: Gammaridea*. British Museum (Natural History).
- Macquart-Moulin, C. (1973a). L'activité natatoire rythmique chez les pécararides benthoplanctoniques. Déterminisme endogène des rythmes nyctéméraux. *Tethys*, 5, 209–231.
- Macquart-Moulin, C. (1973b). Le comportement d'essaim chez les Mysidacés. Influence de l'intensité lumineuse sur la formation, le maintien et la dissociation des essaims de *Leptomysis lingvura*. *Rapp. P.-v. Réun. Commn int. Explor. scient. Mer Méditer.*, 21, 499–501.
- Macquart-Moulin, C., Bourdillon, A., Cubizolles, F., Passelaigue, F. & Rasoanarivo, R. (1987). Un cas type de migration verticale 'retard' chez l'amphipode *Ampelisca typica*. *Journal of Plankton Research*, 9, 785–809.
- Macquart-Moulin, C. & Maycas, E.R. (1995). Inshore and offshore diel migrations in European benthopelagic mysids, genera *Gastrosaccus*, *Anchialina* and *Haplostylus* (Crustacea, Mysidacea). *Journal of Plankton Research*, 17, 531–555.

- Marques, J.C. & Bellan-Santini, D. (1993). Biodiversity in the ecosystem of the Portuguese continental shelf: distributional ecology and the role of benthic amphipods. *Marine Biology*, 115, 555–564.
- Mees, J. & Jones, M.B. (1997). The hyperbenthos. *Oceanography and marine biology*, 35, 212.
- Mouny, P. (1998). Structure spatio-temporelle du zooplancton et du suprabenthos de l'estuaire de la Seine. Dynamique et rôle des principales espèces dans la chaîne trophique pélagique. *Muséum d'Histoire Naturelle, Paris VI*.
- Mouny, P., Dauvin, J.-C. & Zouhiri, S. (2000). Benthic Boundary Layer fauna from the Seine Estuary (eastern English Channel, France): spatial distribution and seasonal changes. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 80, 959–968.
- Naylor, E. (1972). British Marine Isopods. Synopses of the British Fauna No. 3. *Linnean Soc. Lond.*
- Pezy, J.-P. (2017). Approche écosystémique d'un futur parc éolien en Manche orientale : exemple du site de Dieppe-Le Tréport. phdthesis. Normandie Université.
- Pezy, J.-P., Raoux, A., Marmin, S., Balay, P. & Dauvin, J.-C. (2018). What are the most suitable indices to detect the structural and functional changes of benthic community after a local and short-term disturbance? *Ecological Indicators*, 91, 232–240.
- Pezy, J.-P., Raoux, A., Marmin, S., Balay, P., Niquil, N. & Dauvin, J.-C. (2017). Before-After analysis of the trophic network of an experimental dumping site in the eastern part of the Bay of Seine (English Channel). *Marine Pollution Bulletin*, 118, 101–111.
- Pielou, E.C. (1966). The measurement of diversity in different types of biological collections. *Journal of Theoretical Biology*, 13, 131–144.
- Powers, S.P., Peterson, C.H., Christian, R.R., Sullivan, E., Powers, M.J., Bishop, M.J., *et al.* (2005). Effects of eutrophication on bottom habitat and prey resources of demersal fishes. *Marine Ecology Progress Series*, 302, 233–243.
- Primer-E. (2009). Plymouth routines in multivariate ecological research.
- R Core Team. (2020). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Raoux, A. (2017). Approche écosystémique des énergies marines renouvelables : étude des effets sur le réseau trophique de la construction du parc éolien au large de Courseulles-sur-Mer et du cumul d'impacts. phdthesis. Normandie Université.
- Raoux, A., Tecchio, S., Pezy, J.-P., Lassalle, G., Degraer, S., Wilhelmsson, D., *et al.* (2017). Benthic and fish aggregation inside an offshore wind farm: Which effects on the trophic web functioning? *Ecological Indicators*, 72, 33–46.
- Robertson, A.I. & Howard, R.K. (1978). Diel trophic interactions between vertically-migrating zooplankton and their fish predators in an eelgrass community. *Mar. Biol.*, 48, 207–213.
- Sainte-Marie, B. & Brunel, P. (1985). Suprabenthic gradients of swimming activity by cold-water gammaridean amphipod Crustacea over a muddy shelf in the Gulf of Saint Lawrence. *Marine Ecology Progress Series*, 23, 57–69.
- Sibert, J.R. (1981). Intertidal hyperbenthic populations in the Nanaimo estuary. *Mar. Biol.*, 64, 259–265.
- Smaldon, G., London, L.S. of & Association, E. and B.-W.S. (1978). *British coastal shrimps and prawns; keys and notes for the identification of the species*. London (UK) Academic Press.
- Snelgrove, P. & Butman, C.A. (1994). Animal Sediment Relationships Revisited – Cause Versus Effect. *Oceanography and marine biology*, 32.

- Sorbe, J.C. (1981). Rôle du benthos dans le régime alimentaire des poissons démersaux du secteur Sud Gascogne. *Kieler Meeresforschungen - Sonderheft*, 5, 479–489.
- Sorbe, J.-C. (1984). *Contribution à la connaissance des peuplements suprabenthiques néritiques sud-Gascogne*. Éditeur inconnu.
- Tattersall, W.M. (1951). *The British Mysidacea: By WM Tattersall and Olive S. Tattersall*. Quaritch [in Komm.].
- Vallet, C. (1997). Le compartiment suprabenthique des fonds circalittoraux de la manche : composition faunistique et quantitative, et rôle des transferts benthos/pelagos. Thèse de doctorat. Paris 6.
- Vallet, C. & Dauvin, J.-C. (1998). Composition and Diversity of the Benthic Boundary Layer Macrofauna from the English Channel. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 78, 387–409.
- Vallet, C. & Dauvin, J.-C. (2001). Biomass changes and benthic-pelagic transfers throughout the Benthic Boundary Layer in the English Channel. *Journal of Plankton Research*, 23, 903–922.
- Vallet, C., Zouhiri, S., Dauvin, J.-C. & Wang, Z. (1995). Variations nyctémérales de l'abondance de la faune démersale en Manche. *J. Rech. Océanogr*, 20, 94–102.
- Vincent, C., Heinrich, H., Edwards, A., Nygaard, K. & Haythornthwaite, J. (2002). Guidance on typology, reference conditions and classification systems for transitional and coastal waters. *CIS working group*, 2, 119.
- Wildish, D.J., Wilson, A.J. & Frost, B. (1992). Benthic Boundary Layer Macrofauna of Browns Bank, Northwest Atlantic, as Potential Prey of Juvenile Benthic Fish. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 49, 91–98.
- Wilhelmsson, D., Malm, T. & Öhman, M.C. (2006). The influence of offshore windpower on demersal fish. *ICES Journal of Marine Science*, 63, 775–784.

ANNEXE

Annexe 1 : Tableau résumant les tests statistiques effectués sur les données abiotiques (physico-chimique) et biotiques (suprabenthos).

Variable quantitative	Donnée utilisée	Variable qualitative	Test statistique	p-value	Interprétation
Température Salinité Oxygène	Toutes	Saison * sédiment	T- χ^2	2,2e ⁻¹⁶	Différence significative
Richesse spécifique	Jour et nuit	Station * saison * réplias	ANOVA	> 0,05	Pas de différence significative
Abondance	Jour et nuit	Saison	T-Kruskal	0,0041	Différence significative
		Sédiment		0,429	Pas de différence significative
		Horaire (jour et nuit)		1,11e ⁻¹³	
		Saison * sédiment * horaire		8,96e ⁻¹⁵	Différence significative
		Saison * sédiment		3,311e ⁻⁵	
		Saison * horaire		8,027e ⁻¹⁴	
		Sédiment * horaire		2,2e ⁻¹⁶	
Biomasse	Jour et nuit	Saison	T-Kruskal	0,0012	Différence significative
		Sédiment		0,43	Pas de différence significative
		Horaire (jour et nuit)		2,954e ⁻¹²	
		Saison * sédiment * horaire		9,164e ⁻¹⁴	Différence significative
		Saison * sédiment		1,648e ⁻⁵	
		Saison * horaire		6,191e ⁻¹³	
		Sédiment * horaire		6,201e ⁻¹¹	
Abondance : H'	Nuit	Saison	ANOVA	> 1	Pas de différence significative
		Sédiment		< 0,1	
		Saison * sédiment		> 1	
Abondance : J'	Nuit	Saison	ANOVA	> 1	Pas de différence significative
		Sédiment		> 1	
		Saison * sédiment		< 0,05		Différence significative
Biomasse : H'	Nuit	Saison	ANOVA	< 0,01	Différence significative
		Sédiment		> 1	Pas de différence significative
		Saison * sédiment		> 1	
Biomasse : J'	Nuit	Saison	ANOVA	< 0,01	Différence significative
		Sédiment		> 1	Pas de différence significative
		Saison * sédiment		> 1	

Ichtyofaune et céphalopodes de la zone **d'étude du parc éolien de Dieppe-Le Tréport**

Campagnes de pêche de 2015 à 2023

RAPPORT D'ANALYSES À DESTINATION DE UMR CNRS 6143 M2C

Ichtyofaune et céphalopodes de la zone **d'étude du parc éolien de Dieppe-Le Tréport**

Campagnes de pêche de 2015 à 2023

Version du 13/02/2024

Par
Pierre BALAY – pierre.balay@csln.fr

Pour
UMR CNRS 6143 M2C

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION.....	4
2. RAPPELS METHODOLOGIQUES.....	4
2.1 Moyens matériels et traitement des captures.....	4
2.2 Plan d'échantillonnage.....	4
2.3 Expression des résultats.....	6
3. RESULTATS.....	7
4. CONCLUSIONS.....	16



1. Introduction

Les données sur le peuplement de poissons et céphalopodes sur et autour de zone du parc éolien en mer de Dieppe-Le Tréport ont été acquises à travers des campagnes de pêche réalisées depuis 2015.

Plusieurs engins sont utilisés dans le cadre de ce suivi réglementaire. Seules les données issues du chalut canadien, qui capture le plus large spectre d'espèces de l'ichtyofaune et céphalopodes, sont utilisées dans ce rapport. L'analyse des captures de trois années d'échantillonnage à travers les six campagnes qui ont conduit à 130 traits de chalut permet de mesurer la variabilité de ce peuplement côtier vis-à-vis des saisons, des années, de l'aire d'étude ou des évolutions dans le protocole.

2. Rappels méthodologiques

La méthodologie est ici rappelée dans les grandes lignes. Pour plus de détails, se reporter sur les rapports fournis dans le suivi réglementaire.

2.1 MOYENS MATERIELS ET TRAITEMENT DES CAPTURES

Les prélèvements sont réalisés au chalut canadien (chalut de fond à panneaux) avec une maille terminale de 20mm étirée sur une durée d'environ 20 minutes contre le courant en conditions diurnes. Le traitement des captures est celui classiquement réalisé sur ce type de suivi, à savoir le tri par espèce, le comptage, le pesage et la biométrie.

2.2 PLAN D'ÉCHANTILLONNAGE

L'état initial est basé sur quatre campagnes saisonnières sur le plan temporel et 22 stations sur le plan spatial (Figure 1). La zone d'étude est prospectée avec deux types d'art trainant ciblant les poissons/céphalopodes, le chalut canadien avec 11 traits sur la partie nord-ouest et le chalut à perche avec 11 traits sur la partie sud-est.

Le retour d'expérience des campagnes de l'état initial a conduit à modifier le plan d'échantillonnage pour l'état de référence 2022-23 en ciblant les deux principales saisons hiver/été et en prospectant toute la zone d'étude au chalut canadien plus « pêchant » que celui à perche. En résultent les 22 traits de chalut exposés sur la carte ci-après (Figure 2).

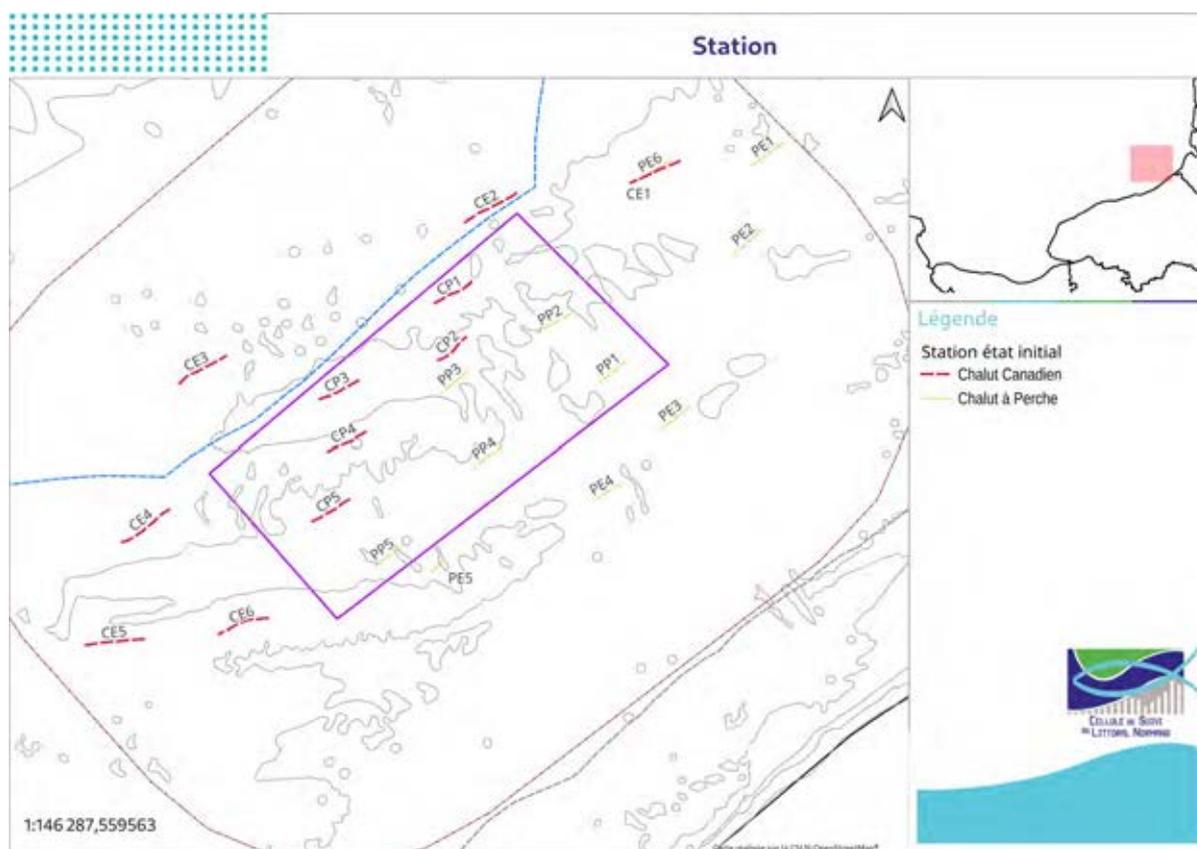


Figure 1 : cartographie des traits réalisés au chalut canadien et chalut à perche entre 2015 et 2017 sur la zone d'étude du parc éolien en mer de Dieppe-Le Tréport.

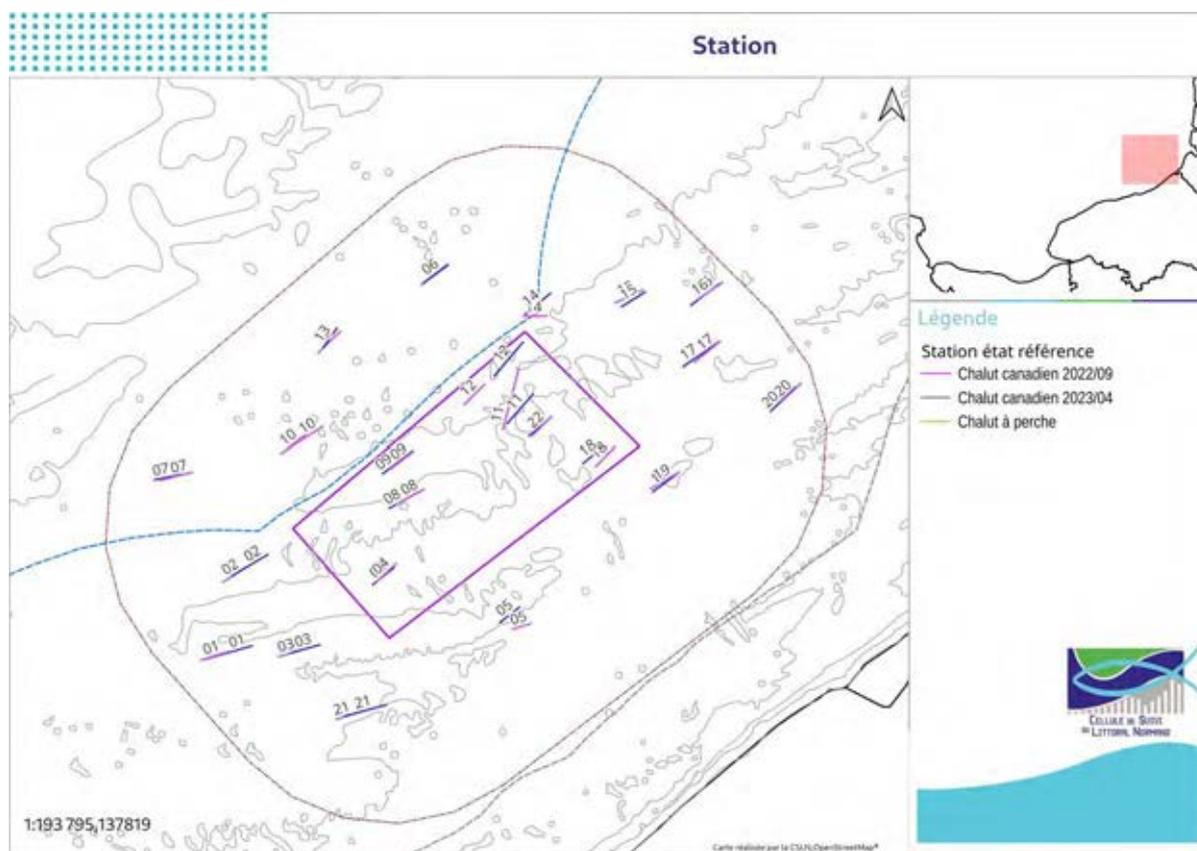


Figure 2 : cartographie des traits réalisés au chalut canadien en 2022-23 sur la zone d'étude du parc éolien en mer de Dieppe-Le Tréport.

Le calendrier ci-après indique les périodes d'échantillonnage réalisées au chalut canadien entre 2015 et 2023.

Tableau 1 : Représentation des périodes d'échantillonnage au chalut canadien entre 2015 et 2023.

	Mois d'échantillonnage											
	07	08	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06
Année 1 2015-16		■		■				■		■		■
Année 2 2016-17		■		■				■		■		■
Année 3 2022-23		■		■				■		■		■

■ Été (mois 08, 09, 10)
■ Aut. (mois 10)
■ Hiver (mois 02, 03, 04)
■ Printemps (mois 05, 06)

2.3 EXPRESSION DES RESULTATS

Les effectifs et biomasse sont standardisés en Captures Par Unité d'Effort (CPUE) par rapport à la distance des panneaux parcourue sur le fond.

Le traitement des données issues des captures est réalisé à travers plusieurs paramètres faunistiques :

- Richesse spécifique : nombre de taxons recensés.
- Fréquence d'occurrence : fréquence de captures d'une espèce pour un nombre de traits donné
- Abondance relative : donne la fréquence de chaque espèce par rapport à un total de CPUE.

Les CAH (Classifications Ascendantes Hiérarchiques) servent à former des groupes au sein des échantillons tels que des groupes de stations ayant des similarités dans leurs compositions spécifiques et le nombre de captures. Cette technique produit des schémas d'arborescence (aussi appelés dendrogrammes) qui relient les données selon leur niveau de ressemblance. L'indice de Bray-Curtis est utilisé pour mesurer la similarité entre les stations. Cet indice n'est pas affecté par les doubles-absences mais peut donner plus de poids aux espèces capturées dans de fortes abondances. Les calculs sont donc réalisés sur la matrice espèces x stations/dates des CPUE transformées en $\ln(x+1)$ afin de réduire l'influence de ces espèces dominantes. Les stations sont regroupées ensuite selon la technique du lien moyen.

La MDS non métrique (Multidimensional Scaling) est réalisée à partir d'une matrice de proximité de Bray-Curtis produite avec la CAH. C'est une représentation en 2D où 2 échantillons similaires, en termes d'assemblages d'espèces, seront proches alors que 2 échantillons peu similaires seront distants.

Pour savoir si la représentation est de bonne qualité ou non, une valeur de stress de Kruskal est donnée : <0,1 : la représentation est excellente ; 0,1- 0,25 : l'ordination est bonne ; 0,25-0,50 : la représentation en deux dimensions est correcte mais les points éloignés ou en périphérie sont à interpréter avec précaution ; > 0,5 : la représentation en deux dimensions est arbitraire.

La méthode IndVal (Dufrière et Legendre, 1997) est utilisée pour indiquer les espèces caractérisant les différents assemblages de stations établis par la CAH en utilisant la méthode des valeurs indicatrices (logiciel IndVal, Dufrière et Legendre, 1997). La valeur indicatrice de chaque espèce est calculée au sein de chaque assemblage grâce à la formule : $\text{IndVal} = A_{ij} \times B_{ij}$

- A_{ij} = Densité moyenne de l'espèce i sur les stations de l'assemblage j / Somme des densités moyennes de l'espèce i sur tous les assemblages.
- B_{ij} = Nombre de stations de l'assemblage j où l'espèce i est présente / Nombre total de stations de l'assemblage j .

Ainsi, une espèce i est indicatrice d'un assemblage j quand sa valeur indicatrice est la plus élevée de celles des espèces de l'assemblage ($\text{IndVal}_{\text{espèce } j} = \max[\text{IndVal}_{i,j}]$). La significativité de cet indice est testée par combinaisons aléatoires des sites au sein des groupes ($p < 0,05$; $n = 999$). Plus la valeur indicatrice d'une espèce se rapproche de 1, plus elle est « caractéristique » du groupe de stations.

PERMANOVA (Permutational multivariate analysis of variance) est une analyse multivariée non-paramétrique qui sert à tester l'effet des variables sur la composition du peuplement. L'analyse test ici trois variable : l'année, la saison et la situation du prélèvement c'est-à-dire à l'intérieur ou en dehors du parc. Les résultats indiquent si l'effet est significatif ou non ($\text{Pr}(> F) < 0,05$), la force de cet effet (R^2) et s'il y a des interactions entre les variables.

3. RESULTATS

Le tableau-après présente toutes les espèces de poissons/céphalopodes capturées avec les 130 traits au chalut canadien réalisés entre août 2015 et avril 2023 (Tableau 2).

Au total, 60 taxons ont été identifiés avec une moyenne de 35 ± 3 espèces par campagne. Les deux dernières campagnes ont permis d'ajouter une nouvelle espèce à cette liste, la raie pastenague. C'est une espèce peu présente en Manche par rapport aux autres raies comme la raie bouclée ou la raie brunette.

Tableau 2 : Liste des espèces de poissons et céphalopodes capturées au chalut canadien depuis 2015 sur la zone d'étude du parc éolien de Dieppe-Le Tréport.

Nom FR	Nom Latin	Campagnes									
		08/15	10/15	04/16	06/16	08/16	10/16	02/17	05/17	09/22	04/23
Anchois	<i>Engraulis encrasicolus</i>	X					X				X
Arnoglosse	<i>Arnoglossus laterna</i>	X		X	X		X	X	X	X	X
Bar	<i>Dicentrarchus labrax</i>		X		X				X		X
Barbue	<i>Scophthalmus rhombus</i>	X	X	X		X	X	X	X		
Blennie papillon	<i>Blennius ocellaris</i>	X	X	X	X	X	X	X	X		X
Callionyme lyre	<i>Callionymus lyra</i>	X	X	X	X	X	X		X	X	X
Casseron	<i>Alloteuthis sp.</i>										X
Casseron	<i>Alloteuthis subulata</i>				X	X	X	X	X		
Chinchard	<i>Trachurus trachurus</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Congre	<i>Conger conger</i>										X
Dorade grise	<i>Spondyliosoma cantharus</i>	X	X		X	X	X		X	X	X
Emissolle tachetée	<i>Mustelus asterias</i>				X		X		X		
Encornet	<i>Loligo vulgaris</i>	X	X	X		X	X	X		X	X
Encornet veiné	<i>Loligo forbesi</i>		X								
Flet	<i>Platichthys flesus</i>	X		X	X	X		X		X	X
Glulette rougeoleuse	<i>Diplecogaster bimaculata</i>					X		X			
Gobie buhotte	<i>Pomatoschistus minutus</i>					X	X				
Gobie sp.	<i>Gobiidae</i>										X
Grande vive	<i>Trachinus draco</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Gronchin camard	<i>Chelidonichthys lastoviza</i>									X	X
Gronchin camard	<i>Chelidonichthys lastoviza</i>	X	X	X	X	X	X	X	X		
Gronchin gris	<i>Eutrigla gurnardus</i>		X	X							X
Gronchin perlon	<i>Chelidonichthys lucernus</i>	X	X	X	X	X	X	X	X		
Gronchin perlon	<i>Chelidonichthys lucerna</i>									X	X
Gronchin rouge	<i>Chelidonichthys cuculus</i>	X	X	X	X	X	X		X	X	X
Hareng	<i>Clupea harengus</i>	X		X				X	X		
Hippocampe	<i>Hippocampus hippocampus</i>	X	X			X	X			X	X
Lançon aiguille	<i>Gymnammodytes semisquamatus</i>			X	X	X	X	X	X		
Lançon commun	<i>Hyperoplus lanceolatus</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Lançon équille	<i>Ammodytes tobianus</i>	X	X	X		X	X	X	X		
Lançon sp.	<i>Ammodytidae</i>										X
Limande	<i>Limanda limanda</i>		X	X	X	X	X	X	X	X	X
Limande sole	<i>Microstomus kitt</i>									X	
Maquereau	<i>Scomber scombrus</i>	X		X	X	X	X	X	X	X	X
Merlan	<i>Merlangius merlangus</i>		X	X	X		X	X	X		X
Morue	<i>Gadus morhua</i>		X								
Motelle à cinq barbillons	<i>Ciliata mustela</i>			X							
Mulet doré	<i>Liza aurata</i>	X			X						
Pageot rose	<i>Pagellus bogaraveo</i>	X	X								
Petit tacaud	<i>Trisopterus minutus</i>	X				X				X	X
Petite roussette	<i>Scyliorhinus canicula</i>	X			X		X	X	X	X	X
Petite sole jaune	<i>Buglossidium luteum</i>			X	X	X	X		X	X	
Petite vive	<i>Echichthys vipera</i>	X	X	X	X	X	X		X	X	X
Plie	<i>Pleuronectes platessa</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Raie bouclée	<i>Raja clavata</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Raie brunette	<i>Raja undulata</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Raie douce	<i>Raja montagui</i>		X								
Raie lisse	<i>Raja brachyura</i>		X								
Raie pastenague	<i>Dasyatis pastinaca</i>									X	
Rouget barbet	<i>Mullus surmuletus</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Saint Pierre	<i>Zeus faber</i>	X	X	X	X	X	X		X	X	
Sardine	<i>Sardina pilchardus</i>			X	X	X	X	X	X	X	X
Seiche	<i>Sepia officinalis</i>	X	X	X	X	X	X		X	X	X
Sépiole grandes oreilles	<i>Sepioida atlantica</i>	X				X	X		X		
Sole	<i>Solea solea</i>		X	X	X	X	X		X	X	X
Sole perdrix	<i>Microchirus variegatus</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Sole-pole	<i>Pegusa lascaris</i>	X	X	X	X	X	X		X	X	X
Souris de mer	<i>Agonus cataphractus</i>	X		X	X	X	X	X	X		X
Sprat	<i>Sprattus sprattus</i>			X				X			X
Syngnathe aiguille	<i>Syngnathus acus</i>						X			X	
Tacaud	<i>Trisopterus luscus</i>				X			X			X
Turbot	<i>Scophthalmus maximus</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Richesse spécifique		34	33	35	35	36	39	29	36	32	37

Le tableau ci-après présente les fréquences de captures des principales espèces (Focc>10%) sur les 130 traits de chalut canadien réalisés entre août 2015 et avril 2023. La figure ci-après illustre les 37 espèces de poissons/céphalopodes qui caractérisent la zone d'étude via les captures du chalut canadien. La décomposition de cet indicateur par campagne traduit les fluctuations temporelles saisonnières et/ou interannuelles qui peuvent être importantes chez ce peuplement de poissons/céphalopodes principalement composé d'espèces migratrices à l'échelle de l'aire d'étude.

Ces 130 traits réalisés permettent de classer trois espèces comme constantes (> 75 %) sur la zone d'étude, la plie ; le callionyme et le chinchard, auxquelles s'ajoutent sept espèces dites communes (> 50 %), le grondin perlon, le rouget-barbet, le maquereau, la grande vive, la seiche et l'encornet.

Tableau 3 : Fréquences d'occurrences calculées pour les principales espèces (Focc>10% sur les 130 traits) provenant des captures au chalut canadien lors des campagnes de pêche sur la zone d'étude du parc éolien en mer de Dieppe-Le Tréport entre 2015 et 2023. En octobre 2015, seulement 9 traits ont pu être réalisés.

Fréquence Occurrence	Total	08/15	10/15	04/16	06/16	08/16	10/16	02/17	05/17	09/22	04/23
Plie	88%	64%	78%	100%	82%	91%	73%	100%	100%	86%	100%
Callionyme lyre	84%	100%	100%	73%	100%	100%	82%	0%	82%	100%	86%
Chinchard	78%	91%	78%	9%	100%	100%	100%	9%	91%	86%	91%
Grondin perlon	72%	91%	78%	91%	73%	82%	100%	9%	73%	73%	64%
Rouget barbet	71%	100%	56%	36%	18%	91%	100%	36%	100%	59%	95%
Maquereau	68%	55%	0%	82%	82%	82%	64%	100%	91%	41%	82%
Grande vive	66%	91%	78%	64%	100%	73%	91%	27%	82%	41%	55%
Seiche	65%	100%	100%	18%	100%	100%	100%	0%	36%	100%	14%
Encornet	58%	73%	89%	91%	0%	45%	100%	27%	0%	86%	50%
Limande	54%	0%	11%	100%	82%	18%	18%	100%	100%	5%	100%
Petite vive	48%	45%	56%	91%	82%	18%	18%	0%	73%	23%	77%
Merlan	48%	0%	11%	100%	45%	0%	18%	100%	91%	0%	100%
Sardine	47%	0%	0%	36%	82%	55%	36%	64%	100%	14%	77%
Raie bouclée	45%	27%	67%	64%	73%	9%	45%	64%	55%	50%	18%
Grondin rouge	45%	82%	33%	9%	100%	55%	55%	0%	45%	55%	23%
Raie brunette	44%	73%	67%	27%	64%	55%	82%	9%	55%	36%	14%
Lançon commun	33%	45%	22%	73%	9%	9%	9%	36%	45%	9%	64%
Sole	32%	0%	22%	36%	45%	27%	64%	0%	18%	55%	27%
Souris de mer	29%	18%	0%	36%	36%	27%	9%	55%	91%	0%	36%
Grondin camard	28%	64%	33%	9%	55%	36%	55%	9%	45%	14%	5%
Arnoglosse	27%	9%	0%	27%	45%	0%	9%	27%	55%	36%	36%
Petite roussette	25%	27%	0%	0%	36%	0%	36%	9%	73%	5%	55%
Blennie papillon	25%	55%	22%	27%	36%	27%	27%	9%	45%	0%	23%
Dorade grise	24%	45%	11%	0%	27%	45%	9%	0%	73%	32%	5%
Saint Pierre	23%	18%	44%	9%	27%	36%	55%	0%	64%	14%	0%
Hareng	21%	36%	0%	91%	0%	0%	0%	100%	18%	0%	0%
Hippocampe	21%	18%	44%	0%	0%	9%	27%	0%	0%	68%	9%
Sole perdrix	19%	9%	44%	18%	64%	27%	36%	9%	18%	5%	0%
Sole-pole	19%	18%	11%	9%	64%	18%	18%	0%	18%	27%	9%
Flet	18%	9%	0%	45%	9%	9%	0%	91%	0%	5%	18%
Sprat	16%	0%	0%	27%	0%	0%	0%	91%	0%	0%	36%
Casseron	16%	0%	0%	0%	27%	9%	9%	18%	82%	0%	23%
Lançon équille	14%	27%	33%	73%	0%	9%	9%	9%	9%	0%	0%
Grondin gris	13%	0%	11%	9%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	68%
Bar	12%	0%	11%	0%	18%	0%	0%	0%	18%	0%	50%
Turbot	11%	27%	22%	9%	18%	18%	9%	9%	9%	5%	0%
Lançon aiguille	10%	0%	0%	27%	9%	18%	18%	9%	36%	0%	0%
Nombre de traits	130	11	9	11	11	11	11	11	11	22	22

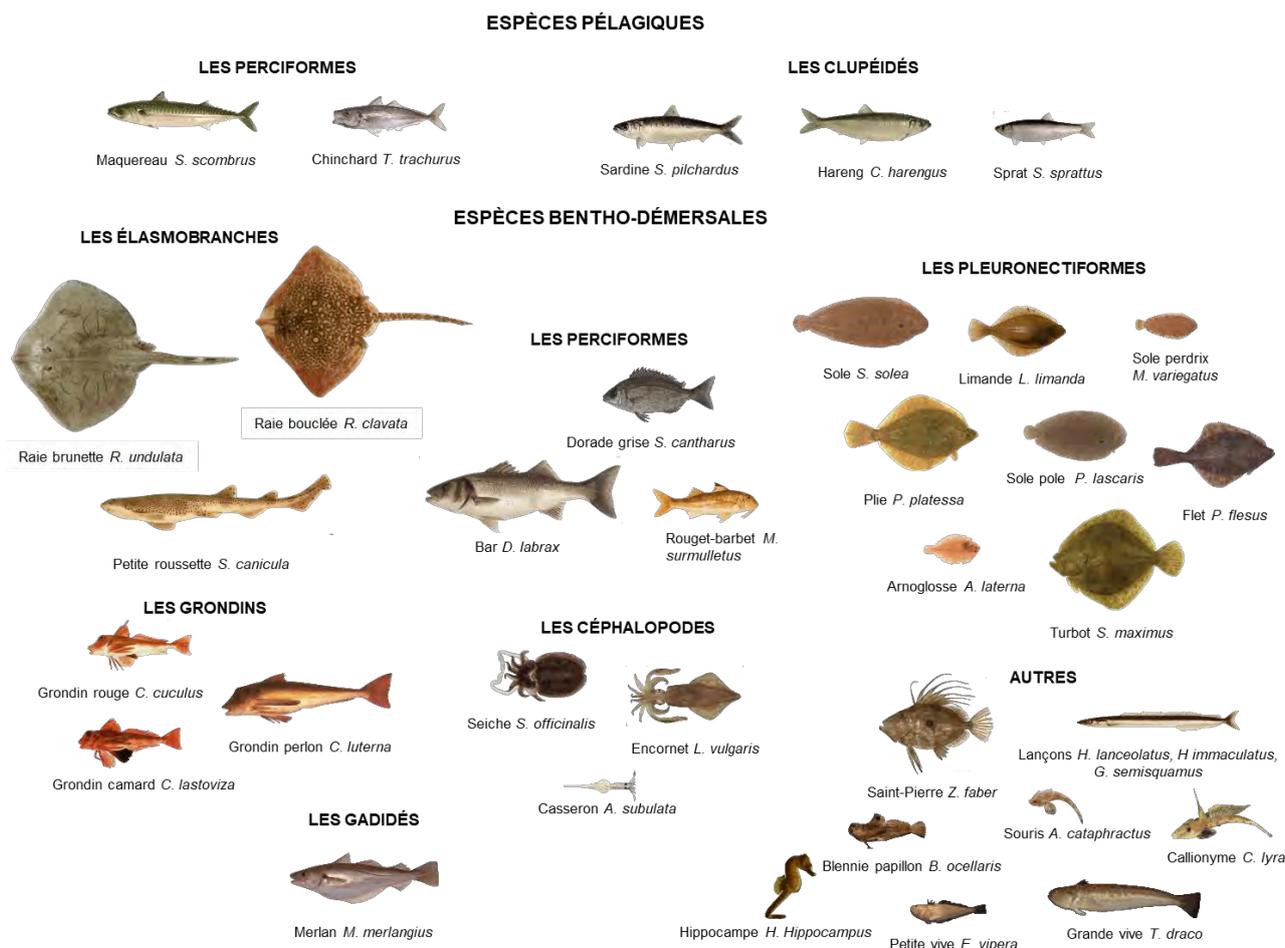


Figure 3 : Synthèse des principales espèces rencontrées dans les captures des campagnes chalut canadien entre 2015 et 2023 (Fréquence d'occurrence > 10 % sur les 130 traits réalisés). Dessins vectorisés à partir de photos de l'Ifremer.

Le tableau ci-après illustre la composition des captures en termes de nombre ou de biomasse. La capture des espèces pélagiques comporte un caractère aléatoire du fait de leurs déplacements très rapides et un comportement grégaire (bancs) pouvant compter un nombre très important d'individus. Au total, les captures restent cependant équilibrées entre les deux compartiments pélagique et benthodémersal, c'est-à-dire ayant un lien avec le fond de la colonne d'eau au cours de leur vie. A l'échelle de la campagne, cet équilibre est moins respecté car surtout lié à la présence ou non de ces pélagiques sur la zone d'étude au moment de la campagne.

De façon globale, avec les 130 traits réalisés, les hareng, chinchard, merlan et limande représentent plus des deux tiers des captures en nombre. Hormis la limande et en y ajoutant le maquereau, les même espèces dominent la biomasse avec le maquereau.

Tableau 4 : Abondances relatives calculées pour les deux compartiments de la colonne d'eau et les principales espèces (Effectif ou biomasse cumulés >95% sur les 130 traits) provenant des captures au chalut canadien lors des campagnes de pêche sur la zone d'étude du parc éolien en mer de Dieppe-Le Tréport entre 2015 et 2023.

Abondances numériques relatives	Total	08/15	10/15	04/16	06/16	08/16	10/16	02/17	05/17	09/22	04/23
Pélagiques	48%	47%	7%	39%	63%	75%	36%	70%	37%	61%	19%
Bentho-démersales	52%	53%	93%	61%	37%	25%	64%	30%	63%	39%	81%
Hareng	21%	0%	0%	36%	0%	0%	0%	63%	0%	0%	0%
Chincharde	19%	32%	7%	0%	58%	66%	29%	0%	22%	54%	6%
Merlan	17%	0%	0%	35%	1%	0%	2%	19%	38%	0%	23%
Limande	12%	0%	0%	15%	2%	0%	1%	8%	7%	0%	39%
Maquereau	5%	5%	0%	2%	1%	8%	6%	5%	13%	6%	3%
Seiche	4%	9%	7%	0%	1%	7%	41%	0%	0%	9%	0%
Callionyme lyre	4%	9%	1%	0%	2%	3%	1%	0%	1%	15%	3%
Plie	3%	0%	1%	6%	5%	1%	2%	2%	1%	2%	6%
Langon équille	2%	1%	69%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Encornet	2%	1%	2%	0%	0%	0%	7%	0%	0%	10%	0%
Rouget barbet	2%	22%	0%	0%	0%	2%	3%	0%	6%	0%	3%
Sprat	2%	0%	0%	1%	0%	0%	0%	3%	0%	0%	5%
Sardine	1%	0%	0%	0%	4%	1%	0%	0%	2%	0%	6%
Petite vive	1%	0%	3%	2%	6%	0%	0%	0%	1%	0%	4%

Abondances pondérales relatives	Total général	08/15	10/15	04/16	06/16	08/16	10/16	02/17	05/17	09/22	04/23
Pélagiques	49%	33%	7%	34%	47%	63%	27%	68%	40%	63%	26%
Bentho-démersales	51%	67%	93%	66%	53%	37%	73%	32%	60%	37%	74%
Hareng	31%	0%	0%	31%	0%	0%	0%	63%	0%	0%	0%
Merlan	20%	0%	1%	41%	2%	0%	3%	23%	25%	0%	33%
Chincharde	11%	19%	7%	0%	43%	48%	16%	0%	23%	33%	13%
Maquereau	6%	10%	0%	3%	2%	15%	11%	4%	15%	30%	5%
Seiche	6%	25%	12%	0%	2%	16%	33%	0%	1%	8%	0%
Limande	6%	0%	1%	13%	2%	0%	1%	6%	7%	0%	26%
Raie bouclée	4%	1%	24%	1%	10%	0%	6%	0%	14%	1%	0%
Plie	4%	1%	6%	8%	6%	2%	5%	2%	1%	3%	6%
Raie brunette	2%	4%	11%	0%	4%	4%	5%	0%	2%	1%	0%
Rouget barbet	2%	18%	0%	0%	0%	1%	1%	0%	3%	0%	1%
Grande vive	1%	2%	3%	0%	8%	1%	1%	0%	0%	0%	1%
Grondin perlon	1%	1%	4%	1%	1%	1%	4%	0%	0%	1%	1%
Encornet	1%	2%	5%	0%	0%	0%	8%	0%	0%	4%	1%
Grondin rouge	1%	2%	2%	0%	4%	4%	1%	0%	0%	0%	0%
Langon équille	1%	0%	18%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Les tableaux ci-après présentent les résultats des PERMANOVA réalisées sur toutes les données ou sur une sélection (Tableau 5). Il en ressort une forte influence significative de la saison sur le cortège d'espèces capturées quel que soit le jeu de données considéré. L'année exerce aussi une influence significative mais dans une moindre mesure. L'interaction entre ces deux variables temporelles est elle aussi significative. Ceci peut s'expliquer par les variations naturelles observées sur l'image du peuplement d'une année à l'autre et les écarts chronologiques éventuels entre les campagnes d'une même saison. D'un point de vue spatial, a été pris en compte comme variable la situation des stations, dans ou hors de la zone du parc. Une influence de cette variable significative est détectée lors de l'analyse de tout le jeu de données. Le seuil de significativité n'est en revanche plus atteint lorsque les saisons et les stations sont identiques pour les trois années ou encore lorsque l'analyse est réalisée sur les trois années séparément. Ceci peut s'expliquer par l'ajout de nouvelles stations en 2022 qui introduit un biais interannuel au niveau spatial.

Tableau 5 : Résultats des PERMANOVA réalisées sur A : toutes les données disponibles ; B : Les 22 stations historiques réalisées depuis 2015 prospectées en hiver et en été ; C : les données de l'année 1 ; D : les données de l'année 2 ; E : les données de l'année 3. En rouge les p-values inférieures au seuil de significativité de 0,05.

A						
	Df	SumsOfSqs	MeanSqs	F.Model	R2	Pr(>F)
Annees	2,000	2,011	1,006	11,931	0,076	0,001
Saison	3,000	11,760	3,920	46,506	0,443	0,001
Int.Ext	1,000	0,245	0,245	2,907	0,009	0,023
Annees:Saison	4,000	2,428	0,607	7,200	0,091	0,001
Annees:Int.Ext	2,000	0,158	0,079	0,936	0,006	0,453
Saison:Int.Ext	3,000	0,331	0,110	1,309	0,012	0,177
Residuals	114,000	9,609	0,084		0,362	
Total	129,000	26,542			1,000	

B						
	Df	SumsOfSqs	MeanSqs	F.Model	R2	Pr(>F)
Annees	2,000	1,250	0,625	8,648	0,089	0,001
Saison	1,000	7,278	7,278	100,673	0,520	0,001
Int.Ext	1,000	0,147	0,147	2,035	0,011	0,104
Annees:Saison	2,000	1,097	0,549	7,590	0,078	0,001
Annees:Int.Ext	2,000	0,145	0,072	1,001	0,010	0,399
Saison:Int.Ext	1,000	0,040	0,040	0,549	0,003	0,691
Residuals	56,000	4,049	0,072		0,289	
Total	65,000	14,006			1,000	

C						
	Df	SumsOfSqs	MeanSqs	F.Model	R2	Pr(>F)
Saison	3,000	4,761	1,587	17,147	0,560	0,001
Int.Ext	1,000	0,198	0,198	2,138	0,023	0,058
Saison:Int.Ext	3,000	0,402	0,134	1,446	0,047	0,144
Residuals	34,000	3,147	0,093		0,370	
Total	41,000	8,508			1,000	

D						
	Df	SumsOfSqs	MeanSqs	F.Model	R2	Pr(>F)
Saison	3,000	5,748	1,916	29,042	0,677	0,001
Int.Ext	1,000	0,122	0,122	1,847	0,014	0,116
Saison:Int.Ext	3,000	0,251	0,084	1,270	0,030	0,239
Residuals	36,000	2,375	0,066		0,280	
Total	43,000	8,496			1,000	

E						
	Df	SumsOfSqs	MeanSqs	F.Model	R2	Pr(>F)
Saison	1,000	3,686	3,686	39,872	0,490	0,001
Int.Ext	1,000	0,075	0,075	0,811	0,010	0,477
Saison:Int.Ext	1,000	0,067	0,067	0,723	0,009	0,583
Residuals	40,000	3,698	0,092		0,491	
Total	43,000	7,526			1,000	

Les figures ci-après illustrent le traitement des données via une classification hiérarchique ascendante des traits (CAH) et la représentation en 2D de la matrice de dissimilarité qui en résulte à travers une nMDS. La recherche d'espèces indicatrices grâce à la méthode IndVal permet de fournir des explications sur la ou les espèces responsables du regroupement ou non de certains des traits. La Figure 4 présente cette analyse pour chaque année d'échantillonnage tandis que la Figure 5 présente celle réalisée par semestre toutes années confondues.

L'analyse par année d'échantillonnage (Figure 4) permet d'isoler jusqu'à 8 à 10 classes avec un niveau de dissimilarité autour de 42 %. Lors de l'échantillonnage sur quatre saisons, la saison froide est isolée dès le premier niveau de séparation avec une dissimilarité de 77 %, que ce soit la première ou la seconde année. Lors de ces deux années, c'est le printemps qui est ensuite isolé à un niveau de dissimilarité d'environ 60 %.

L'été et l'automne sont les saisons avec une composition des captures plus proche traduite par des points plus imbriqués entre eux. Le passage à un échantillonnage biannuel isole les saisons froide et chaude à un niveau de dissimilarité de 71 % cohérent avec les résultats des précédentes années. La méthode IndVal permet de mettre en évidence les principales espèces dont la présence est typiquement mieux marquée sur une période de l'année. Ainsi, le flet, hareng, limande, merlan, plie et sprat ressortent sur au moins deux des saisons froides échantillonnées entre 2015 et 2023. A l'inverse, le chinchard, la seiche, les raies (bouclées et brunettes), le grondin rouge, l'encornet sont mieux représentés pendant le reste de l'année.

Les différences observées entre la dernière année d'échantillonnage et les précédentes pourraient avoir comme explication i) le chalutage de stations sur la partie est de la zone d'étude qui n'étaient pas prospectées lors des précédentes campagnes de chalut canadien et ii) une campagne hivernal tardive fin avril avec un assemblage de transition entre les saisons froide et chaude.

La Figure 5 illustre d'ailleurs la même analyse conduite sur les campagnes réalisées au premier, puis au second semestre. Concernant l'analyse des campagnes réalisées au cours du premier semestre, le mois de juin 2016 est écarté au premier niveau de séparation avec une dissimilarité de 67 %. L'analyse sépare ensuite les campagnes les plus distantes d'un point de vue temporel avec un groupe fin mai 2017 & fin avril 2023 et un groupe début d'avril 2016 & mi-février 2017. Cela illustre bien la transition de l'assemblage d'espèces avec le réchauffement saisonnier de février à juin. Le mois de juin est d'ailleurs plus proche des campagnes du second semestre en termes de composition spécifique. L'analyse met en évidence les espèces vraiment caractéristiques de l'hiver telles que le hareng et le flet qui sont moins bien représentés passé mi-avril. L'analyse conduite sur le second semestre présente en revanche un peuplement plus homogène. Le stress de Kruskal calculé lors de la nMDS de 0,258 indique d'ailleurs une représentation 2D à prendre avec précaution.

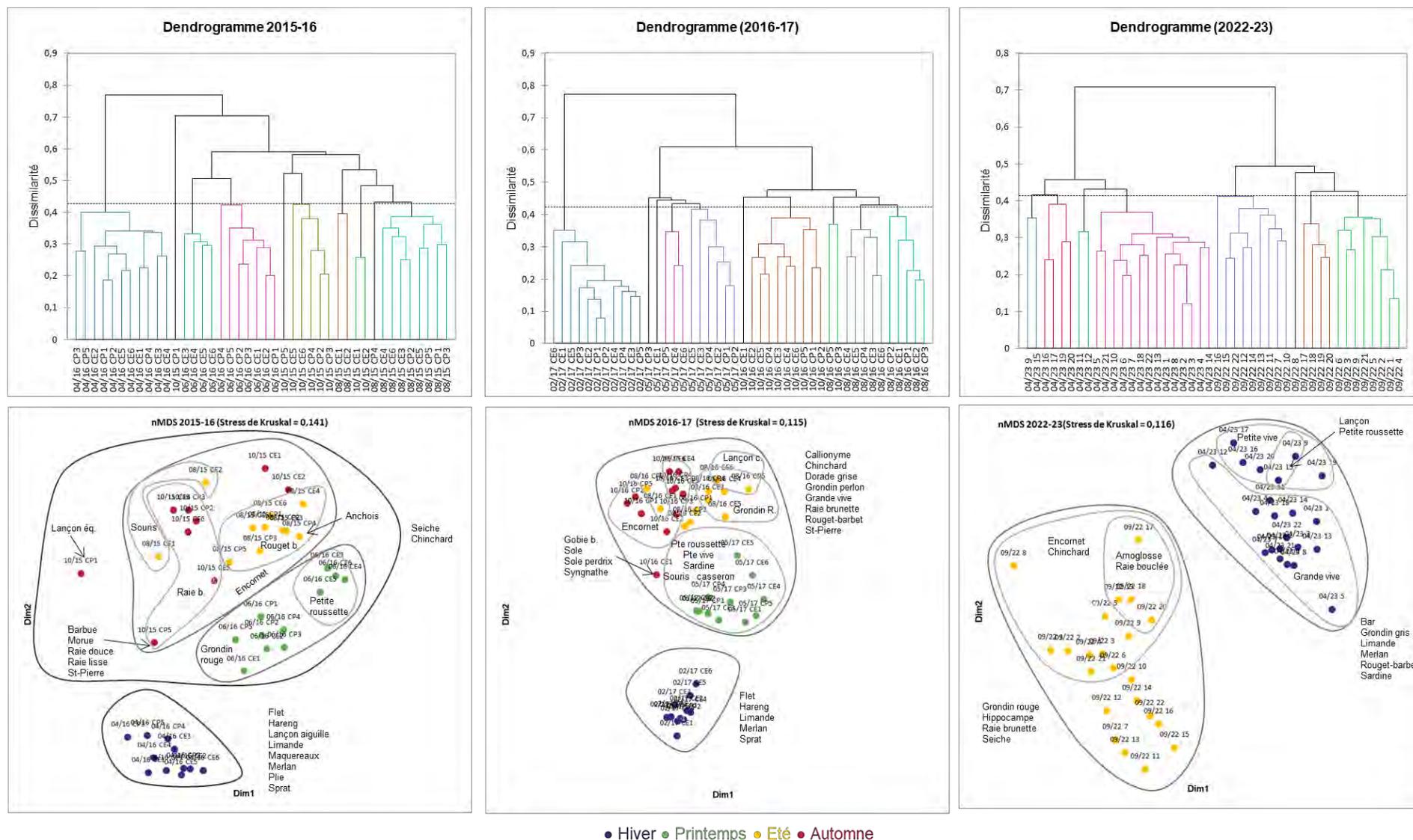


Figure 4 : (en haut) dendrogramme résultant de la classification des captures de poissons et céphalopodes réalisées au chalut canadien pour les trois années d'échantillonnage (CAH, lien moyen et l'indice de Bray-Curtis). (En bas) nMDS réalisée sur la matrice de proximité de Bray-Curtis et espèces indicatrices (méthode IndVal).

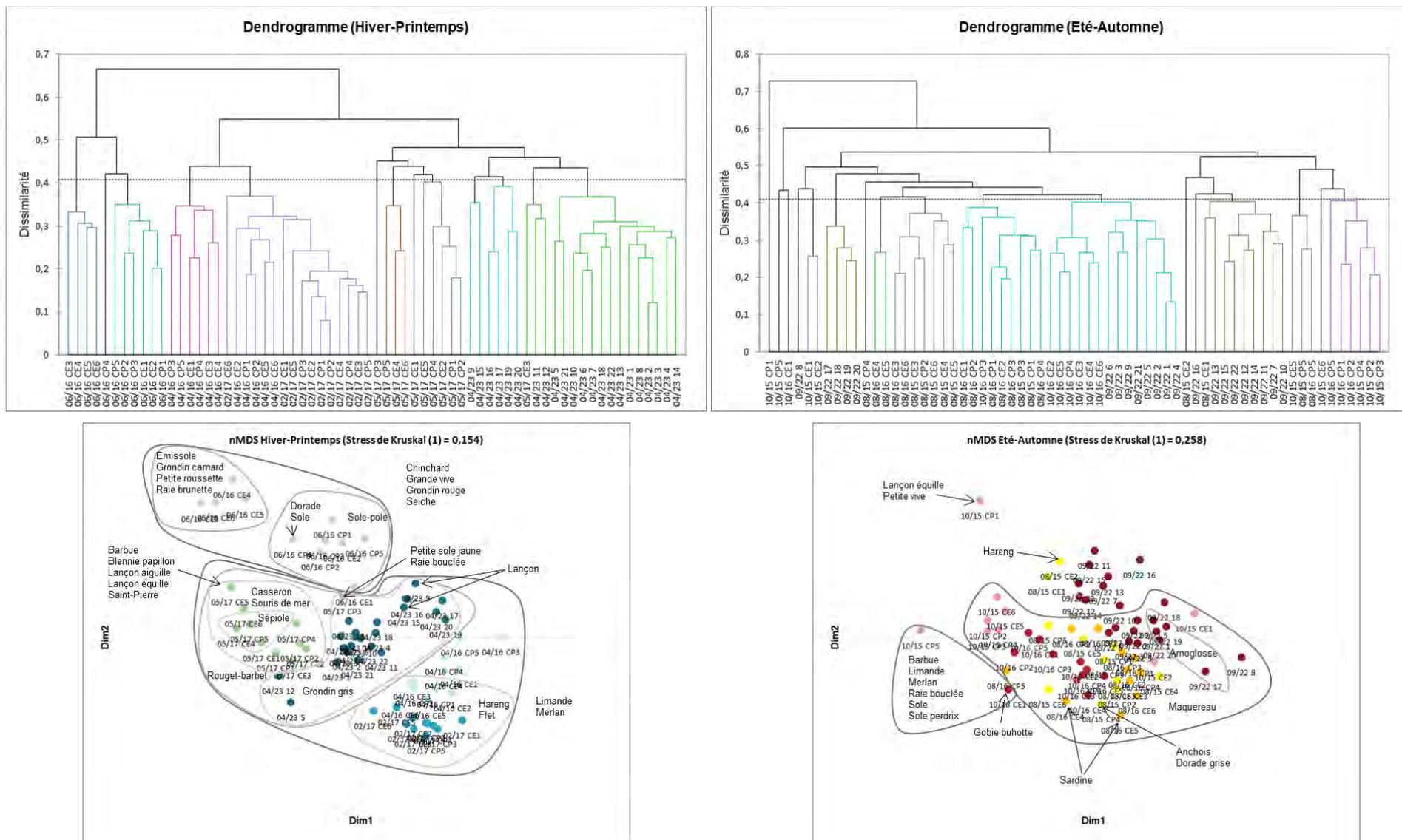


Figure 5 : (en haut) dendrogramme résultant de la classification des captures de poissons et céphalopodes réalisées au chalut canadien pour les deux semestres d'échantillonnage (CAH, lien moyen et l'indice de Bray-Curtis). (En bas) nMDS réalisée sur la matrice de proximité de Bray-Curtis et espèces indicatrices (méthode IndVal).

4. Conclusions

L'analyse des captures issues du chalut canadien sur trois années d'échantillonnage correspondant à six campagnes et 130 traits réalisés entre 2015 et 2023 a permis de dresser une liste de 60 espèces de poissons et céphalopodes présents sur la zone d'étude du parc éolien en mer de Dieppe-Le Tréport. Ce sont toutes des espèces très communes en Manche orientale. Les lançons y sont particulièrement bien représentés avec la forte concentration de zones de ridens sur l'aire d'étude, habitat privilégié de ces espèces.

L'analyse permet surtout d'illustrer l'évolution du cortège d'espèces entre la saison froide et le reste de l'année. Les variations interannuelles sont davantage liées au mois d'échantillonnage, en particulier sur la saison froide, avec un peuplement de transition observé le printemps arrivant. Au niveau spatial, les différences sont globalement moins importantes que sur le plan saisonnier et l'analyse révèle plutôt des observations particulières à l'échelle d'une station ou d'un petit groupe de stations. Ces observations ne sont d'ailleurs pas vraiment redondantes sur les différentes années d'échantillonnage.





CELLULE DE SUIVI
DU LITTORAL NORMAND

CSLN

Association Loi 1901
53 rue de Prony
76600 LE HAVRE
Tél. : 02 35 21 71 70
E-mail : csln@csln.fr



Projet Réseaux Trophiques : Compartiments oiseaux et mammifères marins

Chloé Malirat, Gauthier Poiriez, Gaël Guillou, Fabien Aubert & Ludivine Martinez

COHABYS
ADERA - LA ROCHELLE UNIVERSITE
Institut du Littoral et de l'Environnement
2 rue Olympe de Gouges, 17000 La Rochelle
Tel: 05 56 15 11 57
Web: <http://cohabys.fr>

Table des matières

1	Contexte	3
2	Introduction.....	4
3	Etat des connaissances.....	5
3.1.	Les mammifères marins en Manche Est.....	5
3.2.	Les oiseaux marins en Manche Est.....	7
4	Analyses isotopiques de la mégafaune marine.....	9
4.1.	Matériel et méthodes.....	9
4.1.1.	Zone d'étude.....	9
4.1.2	Analyses isotopiques	10
4.1.3	Echantillons biologiques.....	13
4.1.4	Analyses statistiques	14
5	Principaux résultats.....	15
5.1.	Mammifères marins	15
5.1.1.	Résultats généraux	15
5.1.2.	Ellipses isotopiques et proies potentielles du marsouin commun et du phoque veau- marin	16
5.2.	Oiseaux marins	17
5.2.1.	Résultats généraux	17
5.2.2.	Ellipses isotopiques	18
5.3.	Croisement des compartiments	20
6	Discussion, limites et perspectives.....	21
6.1.	Mammifères marins	21
6.2.	Oiseaux marins	23
6.3.	Limites et perspectives.....	25
7	Conclusion	26
8	Bibliographie.....	27
9	Annexes	32
9.1.	Annexe 1 : Régimes alimentaires des principales espèces de la zone	32
9.2.	Annexe 2 : synthèse des résultats d'analyses isotopiques pour les mammifères et les oiseaux marins.....	35
9.3.	Annexe 3 : comparaison des compositions isotopiques du sang et des plumes de goélands dans le cadre des prélèvements effectués sur les colonies de Calais, baie de Seine et Boulogne ...	37

2 Introduction

Pour tenter de comprendre le fonctionnement des écosystèmes marins et les nombreuses interactions existantes entre les organismes, l'étude des réseaux trophiques est un outil indispensable. En effet, les principales relations entre les individus d'un écosystème sont majoritairement d'ordre alimentaire, elles déterminent la survie et la capacité de reproduction des espèces (Chouvelon, 2011). L'écologie trophique s'intéresse aux comportements alimentaires des individus au sein de leur biotope. Connaître leurs sources et leurs préférences alimentaires permet de mieux apprécier l'organisation et les interactions trophiques (prédateurs, compétitions, commensalisme etc.) entre les organismes de l'écosystème étudié.

Les mammifères et oiseaux marins sont des éléments clés pour l'étude des réseaux trophiques. En effet, l'importance de ces compartiments réside dans leur rôle de prédateurs supérieurs. Considérés comme des consommateurs secondaires dans les habitats marins et généralement carnivores, ils occupent les plus hauts niveaux trophiques. Ils intègrent les signaux de leurs écosystèmes sur des longues échelles de temps et d'espace. De plus, ces prédateurs supérieurs peuvent induire un effet cascade dans les réseaux trophiques en venant influencer la structure des communautés par leur prédation et impacter la durabilité des pêcheries (Spitz et al., 2015). À l'inverse, leur écologie peut également être affectée par des changements venant des niveaux trophiques inférieurs. Il est donc nécessaire d'étudier et de comprendre les liens entre les espèces afin de mieux appréhender les processus qui entrent en jeu et de suivre l'état de santé de l'écosystème.

Afin d'adopter une approche écosystémique il est indispensable de récolter des données sur le régime alimentaire de chaque compartiment biologique. Concernant les oiseaux et mammifères marins, plusieurs facteurs compliquent l'obtention de données concernant leur écologie sur le terrain comme leur grande mobilité, leur large distribution et leur faible densité (Spitz et al., 2018). Ainsi, de par la difficulté d'observation directe des comportements de prédation, d'autres méthodes sont utilisées pour obtenir ces données, comme l'observation des contenus stomacaux ou des fèces des individus, qui sont des techniques utilisées depuis longtemps en écologie marine (Chouvelon, 2011). Cependant, ces techniques ont leurs limites (nourriture ingérée mais non assimilée, précision de l'observateur, limite à la reconnaissance de petites espèces, etc.). D'autres méthodes complémentaires permettent d'obtenir ces informations de manières plus indirectes par le biais de marqueurs biochimiques présents dans les tissus des proies. C'est le cas de l'analyse des isotopes stables du carbone et de l'azote, de lipides (acides gras), ou encore de contaminants (métaux, polluants organiques).

Dans le cadre du projet éolien de Dieppe Le Tréport, prévoyant l'implantation de 62 éoliennes à l'horizon 2024-2025, les suivis environnementaux menés font état de forts enjeux écologiques dans la zone d'étude. Toutefois, la compréhension des mécanismes d'impacts des pressions anthropiques sur la faune marine est aujourd'hui encore parcellaire, reposant essentiellement sur les impacts directs et à court terme. Face à ce constat, le développement d'outils permettant la prise en compte des effets indirect *via* une approche écosystémique se met en place, mais repose la plupart du temps sur des données bibliographiques (Pézy, 2018).

Pour répondre à ces attentes, le projet Réseau Trophiques a été lancé en 2020, pour initier un état de référence des réseaux trophiques dans la zone de parc. Des travaux de bibliographie ont ainsi été effectués afin de faire le point sur les connaissances existantes concernant les espèces de mammifères et d'oiseaux marins présentes et leurs régimes alimentaires. Des analyses isotopiques du carbone et de l'azote ont ensuite été menées sur des échantillons de muscles de mammifères marins et de sang d'oiseaux afin d'apporter des éléments complémentaires à notre compréhension de leur écologie alimentaire.

Cette démarche constitue une réelle avancée dans le cadre d'une approche écosystémique, avec l'acquisition de données *in situ* dédiées, au lieu des données bibliographiques généralement utilisées. Si l'obtention d'échantillons biologiques pour conduire ces analyses sur les prédateurs supérieurs en nombre et quantité suffisants pose un vrai défi, les travaux menés dans le cadre du projet apportent un éclairage nouveau dans la compréhension du fonctionnement des réseaux trophiques en Manche Est.

3 Etat des connaissances

Le descriptif des espèces effectué dans ce chapitre n'a pas pour vocation d'être exhaustif : de très nombreuses autres espèces sont observées régulièrement ou ponctuellement en Manche Est. Il traite uniquement des espèces pour lesquelles des échantillons biologiques ont pu être récupérés pour la suite du travail mené (analyse isotopique).

3.1. Les mammifères marins en Manche Est

Les espèces de mammifères marins les plus rencontrées et observées en Manche orientale sont le marsouin commun (*Phocoena phocoena*), le phoque veau marin (*Phoca vitulina*) et le phoque gris (*Halichoerus grypus*) (Laran et al., 2017 ; Lambert et al., 2017 ; Vincent et al., 2017 ; McClellan et al., 2014). Le marsouin commun est le mammifère marin le plus abondant en Manche, avec environ 26 000 individus. Les plus forts effectifs s'observent en hiver, bien qu'il soit présent toute l'année (Laran et al., 2017). L'une des plus importantes colonies de phoque veau-marin en France se trouve en Baie de Somme, à environ 40km de la zone du projet. Concernant le phoque gris, l'espèce est largement présente en Manche, et notamment en baie de Somme. Les effectifs sont croissants depuis plusieurs années (Vincent et al., 2017 ; Planque, 2021). En moindre proportion, le grand dauphin (*Tursiops truncatus*), le dauphin commun (*Delphinus delphis*) ainsi que d'autres delphinidés comme le lagénorhynque à bec blanc (*Lagenorhynchus albirostris*) et balénoptéridés sont occasionnellement présents dans la zone (Laran et al., 2017 ; McClellan et al., 2014).

Marsouin commun

Mammifère marin le plus abondant en Manche, les plus forts effectifs s'observent en hiver, notamment au niveau de détroit du Pas-de-Calais et de la côte d'Albâtre. En été l'espèce s'étend plutôt en Manche ouest et dans le golfe normand-breton (Laran et al., 2017 ; Lambert et al., 2017). Les habitats préférentiels du marsouin varient en fonction de saisons : ils semblent privilégier les eaux peu profondes en hiver, des zones de courants de marées moyens et une eau relativement fraîche en été (13-15°C), conditions favorisant des agrégations de proies. L'importance des courants de marée pour le marsouin commun semble être un paramètre récurrent, que cela soit au gré des saisons ou des régions (Lambert et al. 2017). Les zones d'agrégation de bancs de sable et les zones côtières accueillent effectivement des densités importantes (Pettex et al., 2014). Les individus sont présents dans la zone de Dieppe Le Tréport tout le long de l'année avec une période plus favorable de février à avril ainsi qu'en automne. Ils sont présents au large en été et plus côtier au printemps, ce qui laisse penser à une période de migration saisonnière liée à la recherche de nourriture (EMDT, 2018).

Le régime alimentaire du marsouin peut varier (type, taille de la proie, proies côtières ou pélagiques...) en fonction de la saison, de son cycle de vie et celui de ces proies. L'espèce se nourrit sur une gamme

assez large de poissons pélagiques, démersaux et benthiques. Le régime alimentaire du marsouin est très diversifié, avec plus d'une trentaine d'espèces identifiées dans certaines études (Jansen et al., 2012). Les espèces prédatées les plus récurrentes sont le hareng, la morue, le merlan, le sprat, le gobie et les poissons plats comme la sole (voir détail en annexe 1) (Das et al., 2003 ; Rejinders, 1992 ; Lambert 2020 ; Santos & Pierce, 2003 ; Jansen et al., 2012).

Phoque veau-marin

Les côtes françaises de la Manche représentent la limite sud de l'aire de répartition des phoques veau-marin et des phoques gris. Ainsi, une des plus importantes colonies de phoque veau-marin en France et en Manche se trouve en Baie de Somme, à environ 40km de la zone du projet. En effet, l'espèce a recolonisé la zone depuis les années 1990 en établissant une colonie reproductrice (Planque et al., 2021). À terre, les plus forts effectifs sont observés en août, lorsque les individus se trouvent entre la période de reproduction et de mue (de juin à septembre). En mer, les observations se font plus importantes en mars-avril, lorsque les individus augmentent leurs activités de recherche alimentaire en dehors de la période de reproduction et de mue (Planque, 2021). En termes de stratégie de chasse, le phoque veau-marin reste plutôt proche des côtes pour sa recherche alimentaire : en moyenne 20km du littoral, n'excédant pas les 100km (Vincent et al., 2017). Il affectionne particulièrement les milieux estuariens sableux pour ses activités, là où se trouvent ses proies préférentielles. Ainsi, les zones de chasses sont localisées au niveau du panache de la Baie de Somme et des estuaires adjacents, aire géographique connue pour être une zone de nurserie d'espèces de poissons plats (sole et plie)(Riou et al., 2001). Les soléidés sont les proies dominantes pour les phoques en Baie de Somme (77%) suivi par les pleuronectidés (plie, flet) et le dragonnet lyre (Spitz et al., 2015) (détails en annexe 1).

Phoque gris

En Manche, les phoques gris ne se reproduisent pas ou très peu dans cette zone malgré des effectifs croissants depuis plusieurs années. Cela s'expliquerait par des déplacements d'individus de la mer du Nord vers la Manche Est et ces derniers utiliseraient les côtes françaises comme sites de reposoirs (Vincent et al., 2017 ; Planque, 2021). En effet, en comparaison au phoque veau-marin, le phoque gris se déplace beaucoup plus au large et sur de longues distances. Les suivis télémétriques montrent une grande mobilité de l'espèce, pouvant se déplacer de 100 à 300 km de la côte, malgré une importante variabilité inter-individuelle (Huon et al., 2015 ; Vincent et al., 2017). Ainsi, les individus en Baie de Somme et Baie d'Authie proviennent vraisemblablement des colonies du Royaume-Uni, d'Irlande ou de la mer de Wadden. Pour les activités de chasse, une forte exploitation du littoral est observée, allant de la Baie de Somme à la Baie de Canche, et au sud jusqu'à la Baie de Seine. Durant leur période de reproduction (Octobre-Décembre) et leur période de mue (Janvier-Mars) les individus passent plus de temps sur la terre ferme (zone intertidale)(McConnell et al., 1999).

Le régime alimentaire des phoques gris varie avec la saison (Hammond et al., 1994; Prime & Hammond, 1990). Au printemps/été les petits et grands poissons plats benthiques et les poissons démersaux sont majoritaires dans le régime alimentaire de l'espèce. En automne/hiver, les grands poissons plats benthiques font toujours partie de leur alimentation, mais le groupe des poissons pélagiques prend également une place importante (Planque et al., 2021). Parmi les espèces prédatées, les plus récurrentes sont le lançon et les poissons plats benthiques (sole, plie, flet, limande). D'autres espèces de gadidés et de clupéidés sont retrouvés dans son régime alimentaire (Das et al., 2003 ; Planque et al., 2021 ; Hammond et al., 1994 ; De Pierrepont et al., 2005) (voir annexe 1 pour détail).

Un chevauchement important des niches trophiques entre phoque veau-marin et phoque gris a été constaté, dû à leur forte consommation respective de poissons plats et de lançons. Une compétition interspécifique pour la ressource est ainsi observée entre les deux espèces. Le phoque gris semblerait

prendre l'avantage sur le phoque veau-marin, élargissant la gamme des proies de ce dernier pour compenser cette compétition (Planque et al., 2021).

3.2. Les oiseaux marins en Manche Est

En Manche Est, les espèces nicheuses et présentes à l'année sur les falaises normandes sont principalement le fulmar boréal (*Fulmarus glacialis*), le goéland argenté (*Larus argentatus*), le grand cormoran (*Phalacrocorax carbo*) (EMDT, 2018). Ces colonies d'oiseaux nicheurs se concentrent autour de trois secteurs au niveau de la Manche Est : Saint-Jouin-de-Bruneval/Fécamp (toutes les espèces), Saint-Valéry-en-Caux/Veules-les-Roses (pour les goélands), Dieppe/Le Tréport (pour le grand cormoran, le fulmar boréal et le goéland argenté). De façon plus cyclique, d'autres espèces nichent et hivernent en France et utilisent la zone pour se reproduire, s'alimenter, migrer entre deux régions et éviter des conditions climatiques difficiles. En effet, la Manche constitue un endroit de passage migratoire important (printemps/automne) pour de nombreux oiseaux chaque année avec des densités observées plus fortes en hiver qu'en période estivale (Pettex et al., 2017). Lors de recensements aériens opérés entre 2007 et 2015, la diversité spécifique s'est élevée à 91 espèces identifiées (comprenant les oiseaux pélagiques, côtiers, littoraux, terrestres), ce qui fait de la Manche une zone d'intérêt écologique majeur (EMDT, 2018).

Goéland marin *Larus marinus*

Les effectifs de goélands marins sont en augmentation depuis la fin des années 1990 le long des côtes Atlantique et de la Manche. Les plus fortes concentrations en Manche sont observées durant l'hiver (Cadiou, 2014 ; Pettex et al., 2017). Au niveau de la zone de Dieppe-Le Tréport l'espèce niche mais de façon ponctuelle.

La distance de recherche de nourriture moyenne s'étend à environ 17km des colonies, avec un maximum de 70km (Woodward et al., 2019).. C'est une espèce plus prédatrice que le goéland brun et argenté, ce qui se traduit par un niveau trophique plus haut que ces dernières (Binkowski et al., 2021). Cela peut s'expliquer par le fait que, outre les proies d'origine marine, *L. marinus* se nourrit également d'autres oiseaux (poussins, œufs), de petits mammifères et de déchets humains (Harris et al., 1965).

Le goéland brun *Larus fuscus*

Le goéland brun est abondamment présent le long des côtes de la Manche, avec une forte augmentation des couples nicheurs dans le Nord et le Pas-de-Calais depuis la fin des années 1990 contrairement au déclin enregistré en Bretagne (Cadiou, 2014). L'espèce est plutôt observée entre avril et septembre dans la zone de Dieppe Le Tréport (De Rock et al., 2021). A l'instar du goéland marin, l'espèce niche au niveau de Dieppe-Le Tréport de façon ponctuelle (EMDT, 2018). Concernant la recherche alimentaire, les individus s'aventurent à environ 45km de la colonie en moyenne, jusqu'à 130km maximum (Woodward et al., 2019)

Leur régime alimentaire est diversifié, basé à la fois sur des ressources marines et terrestres (Harris et al., 1965 ; Kubetzki & Garthe, 2003).

Goéland argenté *Larus argentatus*

Le goéland argenté est l'espèce nicheuse la plus commune le long des côtes rocheuses de Normandie. En 2021, dans le secteur de Dieppe-Le Tréport, 904 couples ont été dénombrés contre 3 755 couples

en 1998 : les effectifs sont en diminution constante depuis la fin des années 90 sur le littoral conchois (Debout et Gallien, 2021). C'est l'espèce qui semble être la plus plastique dans ses préférences alimentaires, mais aussi la moins compétitrice, passant de ressources marines à terrestres voir anthropiques (Binkowski et al., 2021). Son régime alimentaire varie fortement d'un site à l'autre. Enfin, sa distance de recherche alimentaire s'étend à 15km en moyenne autour de la colonie, et jusqu'à 60km au maximum (Woodward et al., 2019).

Fulmar boréal Fulmarus borealis

Cette espèce d'oiseaux pélagique niche depuis 1974 le long des falaises de Seine-Maritime et de Picardie. Il est présent été comme hiver, avec des effectifs plus importants en période hivernale et en milieu d'été mais il montre une distribution assez similaire quelle que soit la saison (Ricart et al., 2014 ; Pettex et al., 2017). Son périmètre de recherche alimentaire s'étend à 130km en moyenne de sa colonie, pouvant aller jusqu'à 540km (Woodward et al., 2019) et son activité de prédation se passe majoritairement en journée (Garthe & Furness, 2001). Ainsi, le fulmar boréal chasse en surface mais peut également effectuer des plongées peu profondes de quelques mètres. L'espèce a également tendance à se nourrir sur les bateaux de pêche en Mer du Nord et dans l'Atlantique Nord-Est (Camphuysen & Garthe, 1997).

Fou de Bassan Morus bassanus

En France, la seule colonie de reproduction de l'espèce se situe sur l'île Rouzic dans l'archipel des Sept-Îles (Côtes d'Armor). En Manche, la distribution varie de façon saisonnière, avec des effectifs plus forts en hiver, se concentrant à l'Est vers les côtes de Seine-Maritime et du détroit du Pas-de-Calais. En été, les individus ont un comportement plus pélagique et fréquentent la partie ouest de la Manche, vers le nord de la Bretagne et du Cotentin ainsi que les côtes anglaises (Pettex et al., 2017). Ces déplacements et observations sont liés à la période de reproduction qui commence en avril-mai et se termine en août-septembre (MEEDDAT & MNHN, 2008). Si l'espèce est pélagique, elle est néanmoins également observée de près des côtes, notamment en hiver (Pettex et al., 2017). Grand plongeur, sa physiologie lui permet également de grands déplacements, ce qui explique les distances parcourues pour sa recherche alimentaire, allant de 120km en moyenne à 315km au maximum (Woodward et al., 2019). L'espèce s'alimente d'une gamme variée de poissons : maquereau, gadidés (lieu, morue, merlan...), lançon, hareng, sprat ou encore orphie (Le Bot et al., 2019 ; Hamer et al., 2007) (voir annexe 1 pour détail).

Mouette tridactyle Rissa tridactyla

L'espèce se distribue de façon homogène dans la zone d'étude, avec une préférence pour les espaces côtiers. En termes de distribution les plus fortes abondances sont observées vers le détroit du Pas-de-Calais et le long de la côte d'Albâtre (Ricart et al., 2014). Trois colonies principales sont observées le long des côtes de Manche Est : Saint-Pierre-du-Mont, Fécamp (Cap Fagnet) et Boulogne-sur-Mer. En ce qui concerne la période de présence, l'espèce montre une abondance particulièrement forte en hiver (Pettex et al., 2017). La mouette tridactyle est une espèce prédatrice de surface ou de subsurface. Les lançons sont les proies les plus consommées (Lewis et al., 2001). Au mois de mars-avril, les mouettes tridactyles se nourrissent de crustacé planctonique, majoritairement *Thysanoessa inermis*. En mai, lorsque les larves de crustacés se métamorphosent, les lançons arrivent à la surface et un changement du régime alimentaire est observé chez les mouettes. De façon générale, l'espèce se nourrit sur une large variété de poissons, crustacés planctoniques, polychètes ou encore de déchets de pêche (Harris et al., 1997 ; Lewis et al., 2001) (voir détails en annexe 1).

Alcidés

Les alcidés regroupent pour les côtes de la Manche les guillemots de Troïl (*Uria aalge*), les pingouins Torda (*Alca torda*) et les macareux moines (*Fratercula arctica*). Ces espèces sont observés de façon importante en Manche (surtout de la Normandie aux Hauts-de-France). La distribution est plutôt océanique et suit une saisonnalité assez marquée chez ces espèces, avec de plus forts effectifs en hiver, principalement entre octobre et avril (Pettex et al., 2017). Les effectifs sont quasi nuls en été. Le comportement de chasse des alcidés est sensiblement le même : il s'agit d'espèces plongeurs, utilisant uniquement des ressources marines (MNHN, 2012). Malgré quelques variations entre les espèces, principalement au niveau de la taille des proies, le régime alimentaire est relativement similaire : capelan, hareng, sprat, lançon et occasionnellement des crustacés et annélides (MNHN, 2012).

En conclusion

Les côtes de Manche Est abritent une diversité de prédateurs supérieurs avec des préférences écologiques variables. La distribution des espèces reflète des préférences écologiques majoritairement liées aux besoins alimentaires. Les différents groupes de mammifères et d'oiseaux marins ne ciblent pas des catégories de proies identiques, focalisant leur recherche alimentaire selon un compromis entre la qualité énergétique de la ressource et de l'effort nécessaire pour l'obtenir. Leur distribution doit donc s'adapter à ces contraintes spécifiques, aux variations saisonnières des masses d'eau et à la distribution des proies. La distribution des proies est souvent utilisée comme un proxy de celle des prédateurs, alors que les interactions à fine échelle proies-prédateurs restent peu étudiées chez les prédateurs supérieurs (MacArthur & Pianka, 1966; Fauchald & Erikstad, 2002 ; Halpern et al., 2006 ; Lambert et al., 2019). La connaissance des régimes alimentaires des principales espèces présentes est inégale, mais laisse entrevoir des chevauchements possibles. L'étude des réseaux trophiques est donc un élément de compréhension important du fonctionnement de l'écosystème local.

4 Analyses isotopiques de la mégafaune marine

4.1. Matériel et méthodes

4.1.1. Zone d'étude

La Manche est un écosystème productif, dynamique et diversifié notamment grâce aux apports continentaux des estuaires et des baies longeant la côte, aux forts courants de marée et à l'hétérogénéité des habitats disponibles (Féral, 2012). Dans cette région marine, les cycles saisonniers ont un fort impact sur les phénomènes physiques et biologiques en régulant la production primaire et la disponibilité en nourriture : cela joue un rôle dans l'abondance, la composition et la distribution de l'ensemble des organismes marins (McClellan et al., 2014). De par sa productivité, la zone côtière normande est soumise à de nombreuses pressions anthropiques (pêche mais également extraction de granulats marins, trafic maritime, nautismes, pollutions, implantation d'éolienne offshore etc.)(Foucher et al., 2021).

Le projet éolien en mer de Dieppe Le Tréport prévoit l'implantation de 62 éoliennes en mer à l'horizon 2025 sur une surface de 83 km² située respectivement à 17km et 15,5km de Dieppe et du Tréport (Figure 2). Pour les espèces hautement mobiles que sont les mammifères et les oiseaux marins, la

définition d'une zone d'étude écologiquement pertinente mais néanmoins cohérente vis-à-vis de l'emprise possible du projet est souvent ardue. Pour le présent projet, des échantillons de tissus biologiques d'oiseaux et de mammifères marins ont ainsi été collectés à l'échelle des côtes françaises de Manche Est.



Figure 2: Zone du projet du parc éolien de Dieppe-Le Tréport et distribution géographique des individus échantillonnés pour l'étude

4.1.2 Analyses isotopiques

Les isotopes stables sont différentes formes d'un même élément naturel, ils diffèrent par leurs masses atomiques et leurs nombres de neutrons. Généralement, il existe un isotope dit lourd (exemple : ^{13}C) et un autre dit léger (exemple : ^{12}C). À partir de cette composition, il est possible de calculer les ratios isotopiques du carbone et de l'azote suivants dans chaque tissu : $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ et $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ donnant respectivement les rapports isotopiques $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$.

Les signatures isotopiques dépendent des proies consommées par les prédateurs mais aussi des producteurs primaires de l'écosystème concerné. En effet, les sources de matière organique ainsi que le cycle biochimique sélectionné pour réaliser leur photosynthèse va influencer le reste des rapports isotopiques du réseau trophique étudié (Chouvelon, 2011). Par ailleurs, un phénomène appelé « enrichissement isotopique » se produit le long de la chaîne trophique. Ainsi, la concentration en isotopes lourds augmente dans les tissus du consommateur par rapport à ceux de la proie au fur et à mesure que l'on progresse dans les niveaux trophiques. Cette augmentation peut être calculée à l'aide du facteur d'enrichissement trophique noté $\Delta^{15}\text{N}$ et $\Delta^{13}\text{C}$. Pour le carbone, $\Delta^{13}\text{C}$ varie de 0 à 1‰ et pour l'azote, $\Delta^{15}\text{N}$ varie de 2 à 4 ‰ (Chouvelon et al., 2012 ; Mahfouz, 2014), en fonction du tissu analysé (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). En réalité ces facteurs d'enrichissement peuvent varier considérablement selon l'espèce étudiée (Ceia et al., 2021). Finalement, les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ des consommateurs vont être représentatifs de leur zone d'alimentation et/ou habitat, car elles dépendent de la signature des producteurs primaires de la zone concernée, tandis que les valeurs de

$\delta^{15}\text{N}$ sont plutôt utilisées comme indicateurs de la position trophique des individus dans le réseau trophique (Chouvelon, 2011).

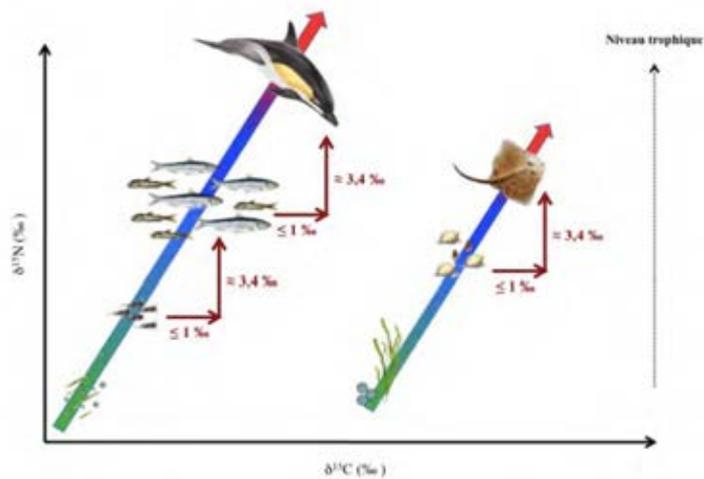


Figure 3: Schéma explicatif du principe d'utilisation des isotopes stables du carbone et de l'azote en milieu marin (Chouvelon, 2011).

Tissus

Le choix du tissu à analyser est important car cela peut influencer les informations obtenues lors des résultats. Effectivement, au sein d'un même animal les différents tissus peuvent ne pas avoir les mêmes signatures isotopiques. Il existe des différences métaboliques et de fractionnement isotopique entre les tissus qui ne permettent pas leur comparaison : des temps de renouvellement (e.g. *turnover*) plus ou moins rapides, des compositions isotopiques différentes (e.g. *isotopic routing*) (Chouvelon, 2011; Tieszen et al., 1983). Les tissus dont le métabolisme est élevé ont un *turnover* plutôt rapide (plasma, pancréas, foie...) tandis que les tissus à métabolisme plus lent (muscle, os) donnent une idée du régime alimentaire sur le moyen à long terme. D'autres tissus, souvent kératinisés et inertes, peuvent renseigner sur le régime alimentaire tout au long de la période de croissance (plumes, poils, vibrisses...) (Carter et al., 2019).

Dans le cadre du projet, l'objectif est d'étudier le régime alimentaire des animaux dans la zone d'étude. Le choix du tissu doit donc permettre d'accéder à des informations récentes sur l'alimentation des espèces. Ainsi, les tissus utilisés dans le cadre de cette étude sont le sang pour les oiseaux marins et le muscle pour les mammifères marins.

Le sang et les plumes sont les tissus les plus utilisés pour l'étude isotopique de l'écologie des oiseaux car ils sont facilement accessibles et peuvent être récupérés sur des individus vivants. Le sang est un tissu métaboliquement actif avec un temps de renouvellement rapide, ce qui permet d'obtenir des informations sur une période de temps de quelques jours à quelques semaines précédant l'échantillonnage (Lourenço et al., 2015).

Le muscle est le tissu de référence dans les études s'intéressant à la structure et au fonctionnement des réseaux trophiques, dans le cas d'organismes déjà morts, car les différences en termes de propriétés biochimiques et physiologiques sont minimisées, permettant la comparaison entre individus et entre espèces. Pour les mammifères marins, pour lesquels les analyses reposent souvent sur des individus échoués, le muscle est un tissu fréquemment utilisé. Le muscle donne une idée du

régime alimentaire sur le moyen terme, allant de quelques semaines à quelques mois précédant l'échantillonnage (Hobson, 1999 ; Jansen et al., 2012).

Préparation des échantillons

Les morceaux de muscles ont été conservés à -20°C jusqu'à ce que débutent les préparations pour l'analyse isotopique. Les échantillons ont d'abord été déshydratés pendant 48h à l'aide du lyophilisateur Christ Alpha 1-4 LD_{plus}. Une fois secs, les échantillons sont broyés un à un manuellement dans un mortier en porcelaine, le matériel est rincé à l'eau puis désinfecté à l'éthanol entre chaque broyage. La poudre obtenue pour chaque morceau est remise dans son sachet plastique puis placé dans un dessiccateur sous vide jusqu'à la délipidation pour ne pas que les échantillons se réhydratent.

Une première délipidation est effectuée. A l'aide d'une balance de précision (Mettler Toledo), entre 80 et 100mg d'échantillons broyés sont placés dans des tubes de verre de 10 ml à bouchon à vis avec joint Téflon R. Dans chaque tube est ajouté 4 ml de cyclohexane avec un distributeur automatique, le cyclohexane va permettre l'extraction des lipides de l'échantillon. Les tubes sont bouchés soigneusement, passés au vortex puis placés 1 minute dans un bain à ultrasons pour homogénéiser le tout. Les trente tubes sont mis 1h sur un agitateur rotatif puis passés une nouvelle fois au vortex avant d'être centrifugés 10 minutes à 2500 t/min à 10°C. Après centrifugation, le surnageant, situé dans la partie supérieure du tube de verre, est évacué avec précaution dans un flacon poubelle, le culot est laissé dans le fond du tube. L'opération est répétée une seconde fois. Le surnageant est évacué puis le culot est rincé avec 2ml de cyclohexane. Chaque tube est passé au vortex puis mis 10 minutes à la centrifugeuse. Le surnageant est évacué puis les tubes sont placés dans un bain à sec à 45°C pendant 1h30 puis à température ambiante toute une nuit pour sécher les culots. Une fois sec, les culots sont récupérés délicatement à l'aide d'une spatule en inox pour être placés dans des tubes de 2 ml à bouchon à joint torique.

Pour ce qui est du sang, les tubes Eppendorf de 1,5 mL contenant le sang des individus sont lyophilisés pendant 24 à 48h puis broyés à l'aide d'une spatule jusqu'à obtenir une fine poudre

Les échantillons sont alors mis en capsule. Entre 0,3 et 0,5 mg d'échantillon sont placés dans une capsule en étain ? Le pesée est effectuée à l'aide de la microbalance Sartorius ME5, dotée d'une précision de $\pm 1 \mu\text{g}$ soit. Les capsules sont ensuite prêtes à être analysées par un spectromètre de masse isotopique (IRMS) Delta V Plus couplé à l'analyseur élémentaire Flash IRMS EA Isolink CN.

Les valeurs isotopiques des échantillons sont exprimées en valeurs relatives par rapport à des valeurs de standards universels. Ainsi, les références utilisées sont le Vienna Pee Dee Belemnite pour le $\delta^{13}\text{C}$ et l'azote atmosphérique pour le $\delta^{15}\text{N}$. Les résultats sont exprimés en pour mille avec le signe usuel suivant ‰, ce qui équivaut à un pour cent divisé par mille, et sont calculés selon la formule :

$$\delta X = [(R_{\text{échantillon}} / R_{\text{standard}}) - 1] \times 1000$$

Avec $X = {}^{13}\text{C}$ ou ${}^{15}\text{N}$, $R_{\text{échantillon}} = {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}$ ou ${}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N}$ de l'échantillon, et $R_{\text{standard}} = {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}$ ou ${}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N}$ des standards de référence.

Sur la base de mesures répliquées de USGS-61, USGS-63 et de USGS-42 utilisés comme standards en interne au laboratoire, la précision analytique isotopique est respectivement $< 0.10 \text{ ‰}$ pour $\delta^{13}\text{C}$, $< 0.08 \text{ ‰}$ pour $\delta^{15}\text{N}$

4.1.3 Echantillons biologiques

Mammifères marins

Les échouages de mammifères marins en France font l'objet d'un suivi scientifique mené par le Réseau National Échouage (RNE), coordonné par l'Observatoire PELAGIS (La Rochelle Université/CNRS). Dans le cadre du projet, une demande d'échantillons de muscles des mammifères marins retrouvés échoués entre 2016 et 2022 sur les côtes du département de Seine-Maritime (76) a été déposée auprès du RNE. Ainsi, 30 fragments de muscles d'individus ont été analysés.

Le tableau 1 résume les informations disponibles pour les 30 échantillons. Le marsouin commun est bien l'espèce la plus présente (n=20), suivi du phoque veau-marin (n=6) et en moindre proportion le phoque gris (n=2), le dauphin commun (n=1) et le dauphin bleu et blanc (n=1).

Tableau 1: Résumé des informations propres aux espèces de mammifères marins échantillonnés.

Espèce	Mois	Sexe	n
<i>Delphinus delphis</i>	Mai	Mâle	1
<i>Halichoerus grypus</i>	Février	Femelle	1
<i>Halichoerus grypus</i>	Janvier	Femelle	1
<i>Stenella coeruleoalba</i>	/	Mâle	1
<i>Phoca vitulina</i>	Août	Mâle	1
<i>Phoca vitulina</i>	Juillet	Femelle	1
<i>Phoca vitulina</i>	Juillet	Mâle	1
<i>Phoca vitulina</i>	Juin	Femelle	1
<i>Phoca vitulina</i>	Octobre	Femelle	1
<i>Phoca vitulina</i>	Septembre	Mâle	1
<i>Phocoena phocoena</i>	Août	Femelle	1
<i>Phocoena phocoena</i>	Août	Mâle	3
<i>Phocoena phocoena</i>	Avril	Mâle	1
<i>Phocoena phocoena</i>	Janvier	Femelle	4
<i>Phocoena phocoena</i>	Janvier	Mâle	3
<i>Phocoena phocoena</i>	Juin	Femelle	1
<i>Phocoena phocoena</i>	Mars	Femelle	3
<i>Phocoena phocoena</i>	Mars	Mâle	1
<i>Phocoena phocoena</i>	Novembre	Mâle	2
<i>Phocoena phocoena</i>	Septembre	Femelle	1

Oiseaux marins

Les données concernant les oiseaux marins ont été acquises *via* deux sources différentes :

- Une première partie des données isotopiques provient d'échantillons sanguins récoltés sur des juvéniles de goélands (bruns, marins et argentés) au mois de juin 2021 au sein de trois colonies (Baie de Seine, Boulogne et Calais) et analysés dans le cadre des suivis DCSMM Contaminants Oiseaux Marins.
- Pour les données 2023, le dispositif de suivi des contaminations par hydrocarbures opérés dans le cadre d'OSPAR sur certaines espèces (alcidés et fulmars) sous l'égide du Groupement d'Intérêt Scientifique Oiseaux Marins (GISOM) a été élargi à toutes les espèces d'oiseaux marins au sein de la zone d'étude, spécifiquement pour ce projet. Les cadavres d'oiseaux retrouvés le long des côtes de Normandie et Haut-de-France ont ainsi été collectés entre janvier et avril 2023 par le Groupement Ornithologique du Nord (GON), et une session de dissection afin de récolter des échantillons de sang a été organisée au sein du CHENE en avril 2023. Un total de 29 individus appartenant à 9 espèces ont été échantillonnés par ce biais.

En 2022, l'épisode de grippe aviaire a empêché le recueil de données sur le terrain.

Au total 106 échantillons sanguins sont disponibles pour les analyses. Cela représente 106 individus et 12 espèces d'oiseaux marins, pour 2021 et 2023. Les résultats disponibles concernent les espèces suivantes : le goélands marin *Larus marinus*, brun *Larus fuscus* et argenté *Larus argentatus*, la mouette tridactyle *Rissa tridactyla*, le guillemot de Troïl *Uria aalge*, le fulmar boréal *Fulmarus glacialis*, le grèbe huppé *Podiceps cristatus*, le fou de Bassan *Morus bassanus*, le pingouin torda *Alca torda*, la mouette rieuse *Chroicocephalus ridibundus*, le plongeon catmarin *Gavia stellata*, la mouette mélanocéphale *Ichthyaetus melanocephalus*. Les informations relatives aux individus sont présentées dans le Tableau 2.

Tableau 2. Résumé des informations propres aux espèces d'oiseaux marins échantillonnés.

Espèce	Année	Site	n
<i>Larus argentatus</i>	2021	Baie de Seine	15
<i>Larus argentatus</i>	2021	Boulogne	15
<i>Larus argentatus</i>	2021	Calais	10
<i>Larus fuscus</i>	2021	Boulogne	11
<i>Larus fuscus</i>	2021	Calais	11
<i>Larus marinus</i>	2021	Baie de Seine	15
<i>Alca torda</i>	2023	Chausey	1
<i>Chroicocephalus ridibundus</i>	2023	Ravenoville	1
<i>Fulmar glacialis</i>	2023	Criel sur Mer	1
<i>Fulmar glacialis</i>	2023	Fontenay sur Mer	1
<i>Fulmar glacialis</i>	2023	Saint Marcouf	1
<i>Gavia stellata</i>	2023	Gonneville sur Mer	1
<i>Ichthyaetus melanocephalus</i>	2023	Aumeville Lestre	1
<i>Morus bassanus</i>	2023	Urville Nacqueville	1
<i>Morus bassanus</i>	2023	Veules les Roses	1
<i>Morus bassanus</i>	2023	/	1
<i>Podiceps cristatus</i>	2023	Ouistreham	1
<i>Podiceps cristatus</i>	2023	Ravenoville	1
<i>Podiceps cristatus</i>	2023	NA	1
<i>Rissa tridactyla</i>	2023	Antifer	1
<i>Rissa tridactyla</i>	2023	Colleville Montgomery	1
<i>Rissa tridactyla</i>	2023	Graye sur Mer	1
<i>Rissa tridactyla</i>	2023	Le Tréport	1
<i>Rissa tridactyla</i>	2023	Pennedepie	1
<i>Rissa tridactyla</i>	2023	Saint Marcouf	1
<i>Rissa tridactyla</i>	2023	Villers sur mer	1
<i>Uria aalge</i>	2023	Chausey	1
<i>Uria aalge</i>	2023	Criel sur Mer	1
<i>Uria aalge</i>	2023	Fécamp	1
<i>Uria aalge</i>	2023	Ouistreham	1
<i>Uria aalge</i>	2023	Quineville	1
<i>Uria aalge</i>	2023	Saint Jouin Bruneval	2
<i>Uria aalge</i>	2023	Saint-Valery-en-Caux	1
<i>Uria aalge</i>	2023	/	1

4.1.4 Analyses statistiques

Tous les tests statistiques ont été effectués sur le logiciel R (Version 4.2.2) avec un seuil de rejet de 5%. L'ensemble des représentations est effectué avec le package « ggplot2 ».

Pour les oiseaux marins et les mammifères, les valeurs isotopiques de carbone et d'azote ont été comparées entre espèces, par compartiment, par des tests de comparaison de moyennes, tels que des Anovas ou tests de Kruskal-Wallis. Des tests post-hoc de Dunn et de Bonferroni ont été mis en place lors de résultats significatifs afin de connaître les espèces différentes en termes de valeurs isotopiques.

Pour les mammifères marins, la taille des échantillons étant assez réduit, les analyses statistiques ont été menées sur une seule espèce, la plus commune en Manche Est, le marsouin commun (n=20). Les rapports $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$ des individus ont été comparés en fonction du sexe, de la taille des individus et de la période d'échouage afin d'étudier la variabilité intraspécifique. Pour étudier l'effet du sexe des individus et la période d'échouage, qui sont des variables qualitatives, des tests de comparaison de moyenne ont été effectués sur les rapports isotopiques. Des Anovas ou Tests de Student ont été employés pour ces comparaisons ; lorsque les conditions d'application de ces tests n'étaient pas respectées des Tests U de Wilcoxon-Mann-Whitney et Kruskal-Wallis ont été utilisés. Pour étudier l'effet de la taille sur les valeurs isotopiques c'est une régression linéaire qui a été menée.

Pour comparer les ellipses isotopiques de oiseaux marins, seules les espèces avec un nombre suffisant d'individus ont été sélectionnées, soit $n \geq 7$. Pour étudier les ellipses des mammifères marins, seul le

marsouin commun et le phoque veau-marin avaient un nombre suffisant d'individus. La représentation sous forme d'ellipses prend l'intervalle de confiance de 40% pour la construction de ces dernières (Jackson et al., 2011).

Un regroupement des valeurs isotopiques des mammifères et oiseaux marins a été réalisé pour les comparer au sein du réseau trophique. Les espèces d'oiseaux ayant une trop grande divergence dans leurs valeurs isotopiques sont écartées de la suite des analyses par une classification ascendante hiérarchique. Cela permet de comparer uniquement les espèces utilisant des ressources à majeure partie marine. La classification se base sur une distance euclidienne, avec une représentation à lien moyen, retenue après la méthode des matrices cophénétiques. Un test de Kruskal-Wallis et test de Dunn a permis de comparer les valeurs isotopiques entre espèces.

Les ellipses isotopiques des oiseaux et mammifères marins ont été mises en lien avec des valeurs isotopiques des proies potentielles des espèces. Les valeurs isotopiques des proies proviennent des trois sources bibliographiques suivantes : Kopp et al., 2015 ; Mahfouz, 2014 ; Cresson et al., 2023. Ce sont des valeurs isotopiques d'espèces provenant de la Manche Est et du sud de la Mer du Nord. Les ellipses isotopiques des mammifères et oiseaux marins ont été représentées séparément car les facteurs d'enrichissement (ΔX) sont différents entre le sang et le muscle (Hobson et al., 1996 ; Tieszen et al., 1983).

5 Principaux résultats

5.1. Mammifères marins

5.1.1. Résultats généraux

Le gradient pélagique-côtier est caractérisé par les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ et indique les zones préférentielles d'alimentation des espèces (Figure 4). Statistiquement il n'y a pas de différence significative entre les cinq espèces de mammifères marins pour les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ (Anova, $p=0.28$). Toutefois, visuellement les valeurs en $\delta^{13}\text{C}$ des phoques gris ($n=2$) et veau marin ($n=5$) sont proches, et supérieures de celles des trois autres espèces. Elles sont plutôt dirigées vers des ressources côtières sur le gradient. La plage de variation des valeurs en $\delta^{13}\text{C}$ du phoque veau marin est assez étendue, avec l'écart-type le plus élevé des cinq espèces, suivi par le phoque gris.

La position trophique des espèces entre elles est donnée par les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$. Visuellement, les deux espèces de phoques se retrouvent également au-dessus des trois autres espèces dans le réseau trophique. Statistiquement seul le marsouin commun et le phoque veau-marin ont des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ différentes (Kruskal-Wallis chi-squared = 11.453, $df = 4$, $p\text{-value} = 0.02$).

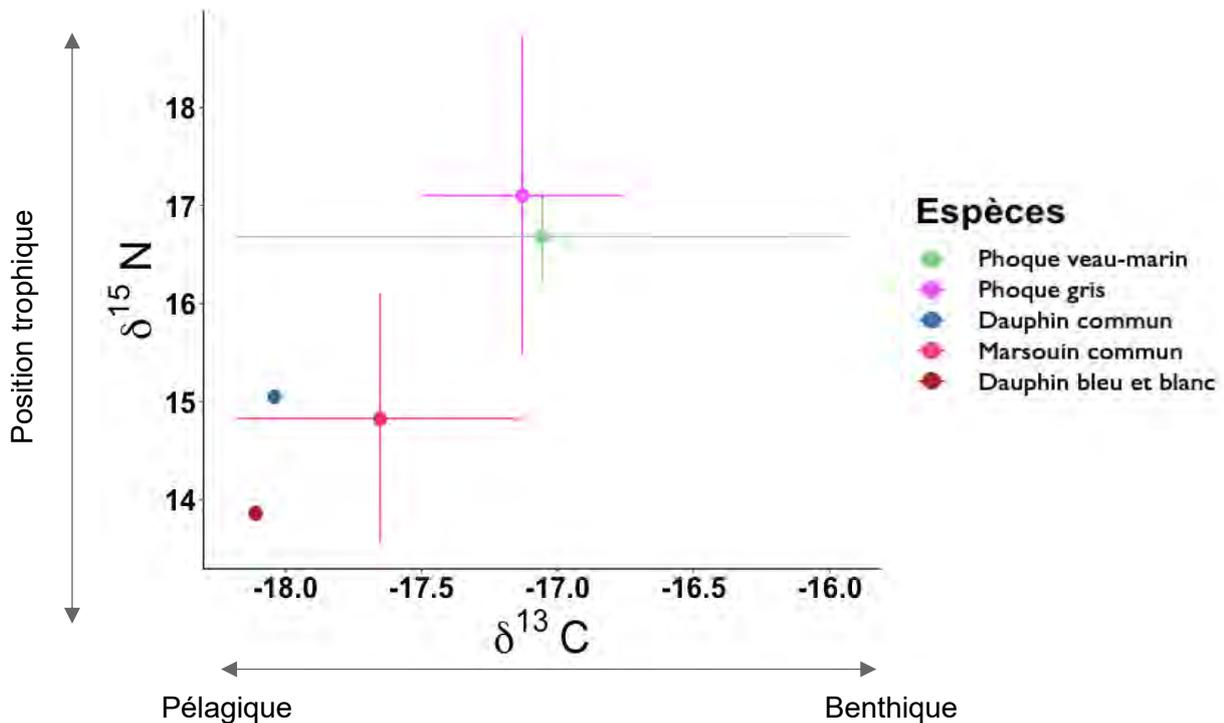


Figure 4: Valeurs de $\delta^{15}N$ et $\delta^{13}C$ des espèces de mammifères marins. Les valeurs correspondent à la moyenne \pm SD.

5.1.2. Ellipses isotopiques et proies potentielles du marsouin commun et du phoque veau-marin

Les ellipses isotopiques du marsouin commun et du phoque veau-marin ont été superposées à des données bibliographiques de proies préférentielles potentielles identifiées à partir du travail bibliographique réalisé en 3.1. Les proies sont classées selon leur distribution dans la colonne d'eau : benthique, démersale, pélagique. L'ellipse isotopique du phoque veau marin se trouve au niveau des espèces de proies benthiques tandis que le marsouin, avec ces valeurs plus faibles en $\delta^{15}N$ se retrouve plutôt dans le domaine des espèces pélagiques malgré le peu d'espèces entrant dans son ellipse isotopique, mis à part la sardine (*Sardina pilchardus*) et le maquereau (*Scomber scombrus*). Les proies démersales se retrouvent au-dessus des espèces de mammifères marins, avec des valeurs isotopiques supérieures pour le carbone et l'azote (Figure 5).

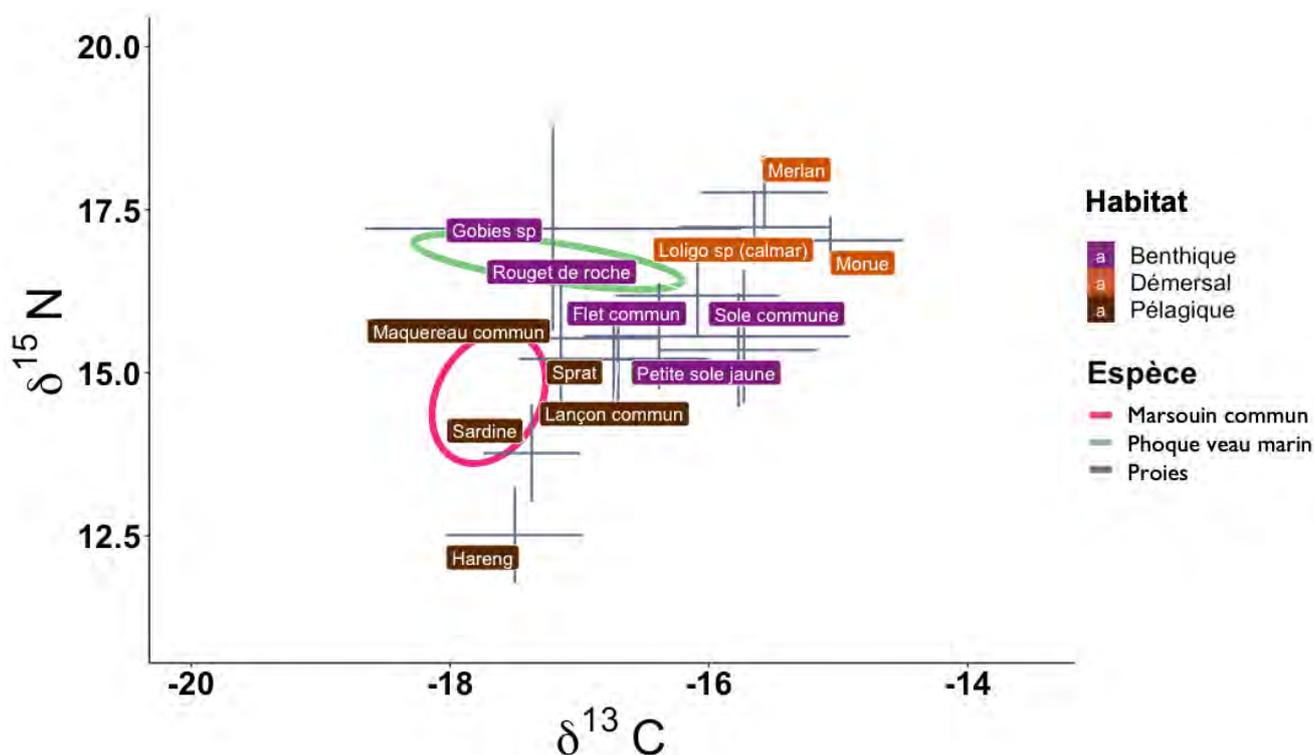


Figure 5 : Ellipses isotopiques des mammifères marins superposées avec les valeurs isotopiques de proies préférentielles issues de la littérature (Cresson et al., 2023 ; Kopp et al., 2015), ajusté par les facteurs d'enrichissement $\Delta^{13}C$ et $\Delta^{15}N$.

5.2. Oiseaux marins

5.2.1. Résultats généraux

L'origine des ressources alimentaires des douze espèces d'oiseaux marins échantillonnées suit le gradient terrestre – marin, représenté par le gradient de $\delta^{13}C$. La mouette rieuse est l'espèce utilisant les ressources les plus terrestres avec les valeurs de $\delta^{13}C$ les plus faibles (-24,68‰ pour $\delta^{13}C$ et 10‰ pour $\delta^{15}N$). Ensuite, le goéland argenté, le goéland brun et la mouette mélanocéphale ont des valeurs en $\delta^{13}C$ intermédiaires situées entre -23 et -19‰. Enfin à droite, une cohorte d'espèces (goéland marin, fulmar boréal, mouette tridactyle, guillemot de Troïl, grèbe huppé, pingouin torda, plongeon catmarin et fou de Bassan) se distingue par des valeurs plus hautes en $\delta^{13}C$ (de -20,2 à -17,5‰) et en $\delta^{15}N$ (13,3 à 17,4‰) (Annexe 5), traduisant des ressources à dominante marine et des niveaux trophiques supérieurs à la mouette rieuse, au goéland argenté, brun et à la mouette mélanocéphale (Figure 6).

Statistiquement, il existe des différences significatives de $\delta^{13}C$ entre le goéland argenté et un ensemble d'espèces à dominance pélagique, regroupant le goéland marin, le fou de Bassan, la mouette tridactyle et le guillemot de Troïl. Une différence significative est également observée entre le goéland brun et le guillemot de Troïl (Kruskal-Wallis chi-squared = 68.9, df = 11, p-value <0,05).

Des différences de valeurs de $\delta^{15}N$ sont également significatives entre le goéland argenté et le grèbe huppé, la mouette rieuse, le guillemot de Troïl et le goéland marin ainsi qu'entre le goéland brun et le guillemot de Troïl (Kruskal-Wallis chi-squared = 68.9, df = 11, p-value <0,05).

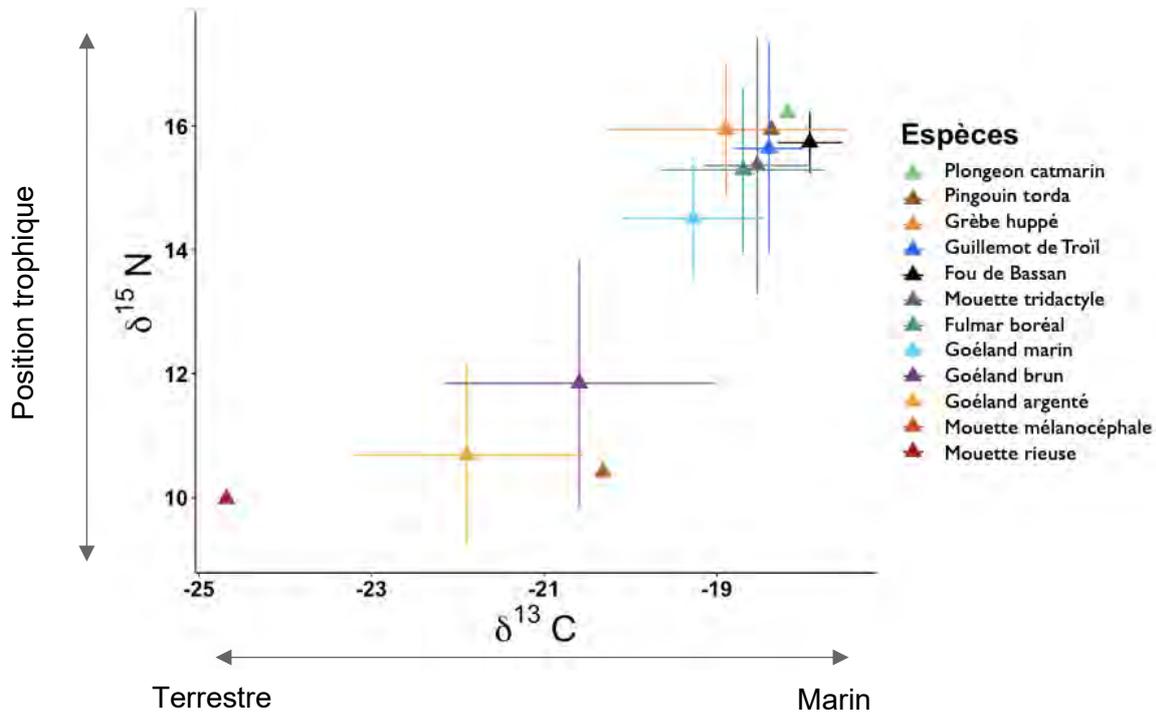


Figure 6: Valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ et $\delta^{13}\text{C}$ des espèces d'oiseaux marins. Les valeurs correspondent à la moyenne \pm SD.

5.2.2. Ellipses isotopiques

Les ellipses isotopiques donnent une idée de la variabilité des valeurs entre les espèces et des recouvrements possibles. Cela renseigne sur le degré de variabilité intra et inter spécifique en indiquant, par exemple, le niveau de spécialisation ou d'opportunisme de l'espèce : plus une espèce a une ellipse large, et plus on peut s'attendre à une variabilité interindividuelle importante et/ou un faible taux de spécialisation.

Le goéland brun (n=22) est l'espèce avec l'ellipse la plus étirée, que ce soit sur le plan vertical ou horizontal. Pour le goéland argenté (n=40), les ellipses ont été représentées par site (Calais, Boulogne et Baie de Seine) car il existe des différences isotopiques au sein même de l'espèce en fonction du site étudié (Kruskal-Wallis, $p < 0.05$) : les ellipses isotopiques des goélands argentés de Calais et de la Baie de Seine n'ont pas de différences de $\delta^{13}\text{C}$ mais ceux de la Baie de Seine ont des valeurs plus hautes en $\delta^{15}\text{N}$. Les individus de Boulogne se distinguent des deux autres sites avec des valeurs plus hautes pour les deux isotopes et leur ellipse isotopique recouvre la moitié de celle du goéland brun. Les ellipses isotopiques du goéland marin (n=15), la mouette tridactyle (n=7) et le guillemot de Troïl (n=8) se recouvrent en grande partie, voir totalement pour la mouette et le guillemot (Figure 7).

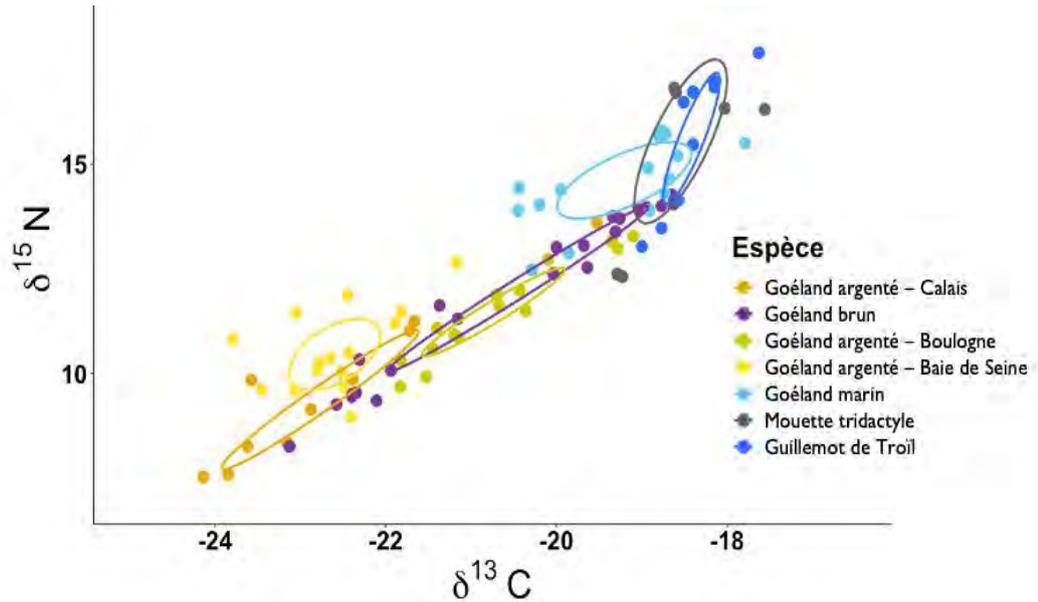


Figure 7 : Ellipses isotopiques des oiseaux marins.

A l'instar des mammifères marins, les ellipses isotopiques des oiseaux marins ont été superposées à des données bibliographiques de composition de proies préférentielles potentielles, basée sur le travail bibliographique réalisé en 3.2.

Le maquereau, le lançon et le sprat croisent ainsi les ellipses isotopiques du guillemot de Troïl et de la mouette tridactyle : leurs valeurs isotopiques sont les plus hautes en carbone et azote. La sardine, avec des valeurs isotopiques plus basses, croise les ellipses de la mouette tridactyle et du guillemot également mais se rapproche fortement de celle du goéland marin. Finalement l'espèce qui recoupe toutes les ellipses isotopiques, sauf celles du goéland argenté, est une espèce de polychète (*Nereis* sp.). Aucune proie ne recoupe les ellipses du goéland argenté si on se base sur les données bibliographiques disponibles (Figure 8).

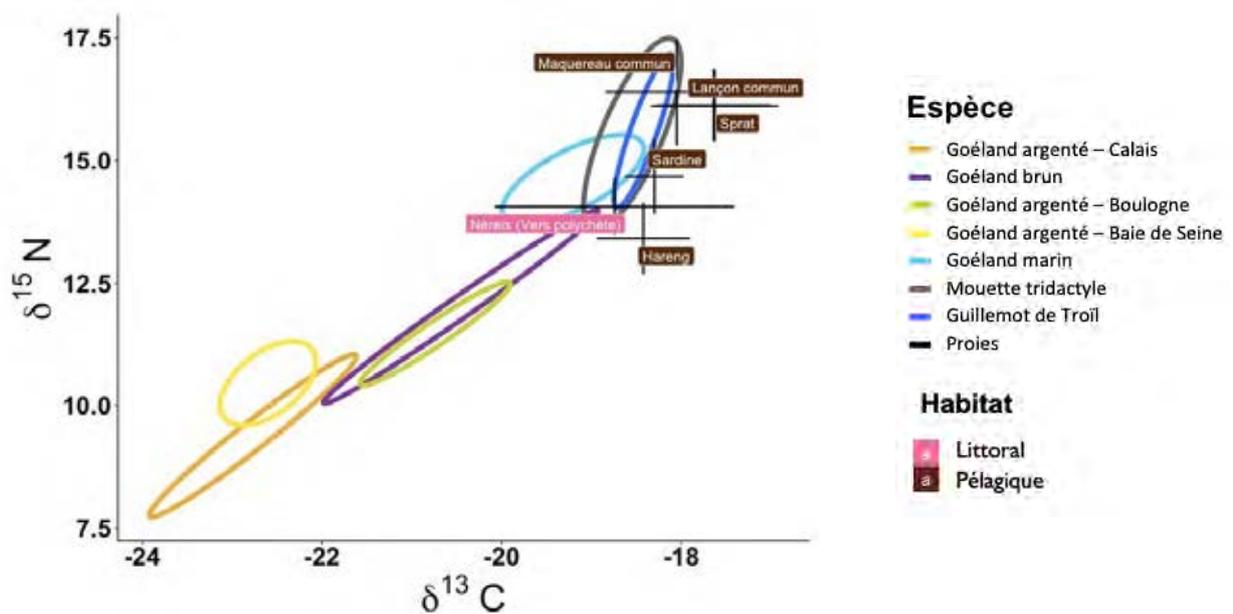


Figure 8 : Ellipses isotopiques des oiseaux marins superposées avec les valeurs isotopiques de proies préférentielles issues de la littérature (Cresson et al., 2023 ; Kopp et al., 2015), ajusté par les facteurs d'enrichissement $\Delta^{13}\text{C}$ et $\Delta^{15}\text{N}$.

5.3. Croisement des compartiments

La classification ascendante hiérarchique (Figure 9) permet de regrouper les espèces selon les similitudes entre leurs rapports isotopiques. Ainsi, trois groupes se distinguent : (i) la mouette rieuse, en vert, basée sur des ressources à dominante terrestre ; (ii) le goéland argenté, le goéland brun et la mouette mélanocéphale, se nourrissant sur des ressources à la fois terrestres et marines, en jaune ; et (iii) les oiseaux se nourrissant sur des ressources à dominance marine, en bleu, soit les huit autres espèces d'oiseaux (goéland marin, fulmar boréal, mouette tridactyle, guillemot de Troil, grèbe huppé, pingouin torda, plongeon catmarin, fou de Bassan), regroupées avec les cinq espèces de mammifères marin (marsouin, phoque veau marin, phoque gris, dauphin commun et dauphin bleu et blanc).

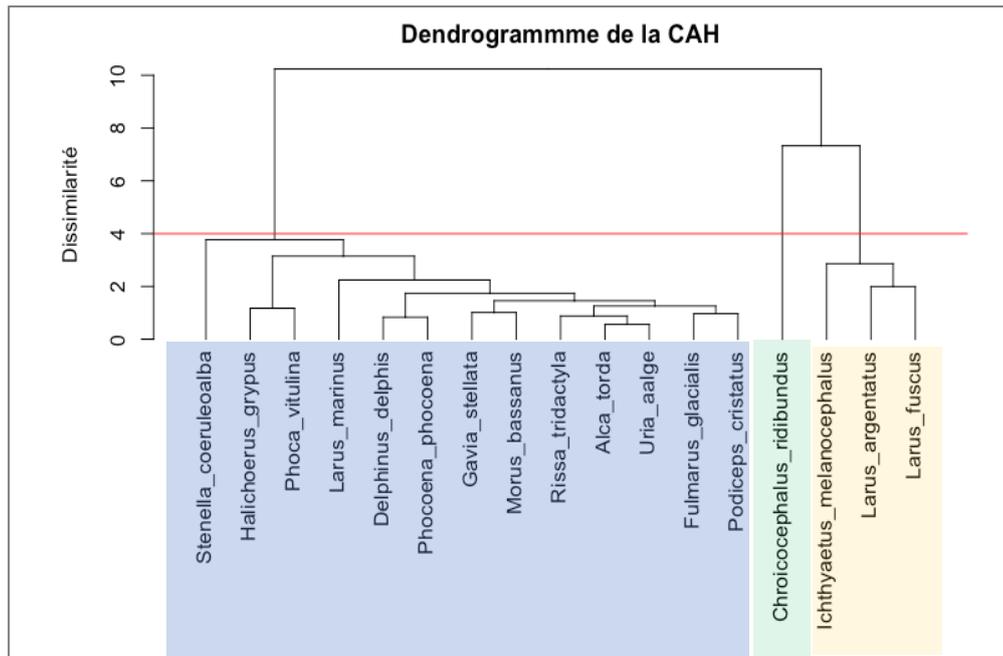


Figure 9: Représentation de la classification ascendante hiérarchique à liens moyens des espèces de mammifères et oiseaux marins.

La Figure 10 est obtenue en agréant les valeurs isotopiques des huit espèces d'oiseaux utilisant des ressources à majeure partie marine et des mammifères marins. Les deux gradients sur l'axe des abscisses sont assignés respectivement aux mammifères marins (Pélagique-Côtier) et aux oiseaux marins (Terrestre-Marin). Les signatures isotopiques de toutes les espèces se recoupent sur une plage de valeurs assez restreintes (13.29 à 18.73 pour le $\delta^{15}\text{N}$ et -20.27 à -15,92 pour le $\delta^{13}\text{C}$). Les signatures isotopiques ne sont pas significativement différentes, mis à part entre (i) le goéland marin et le phoque veau-marin, pour les rapports carbone et azote ; (ii) le goéland marin et le marsouin pour le carbone ; (iii) le phoque veau-marin et le marsouin pour l'azote (Kruskall-Wallis, chi-squared = 42.3, df = 12, $p < 0.05$).

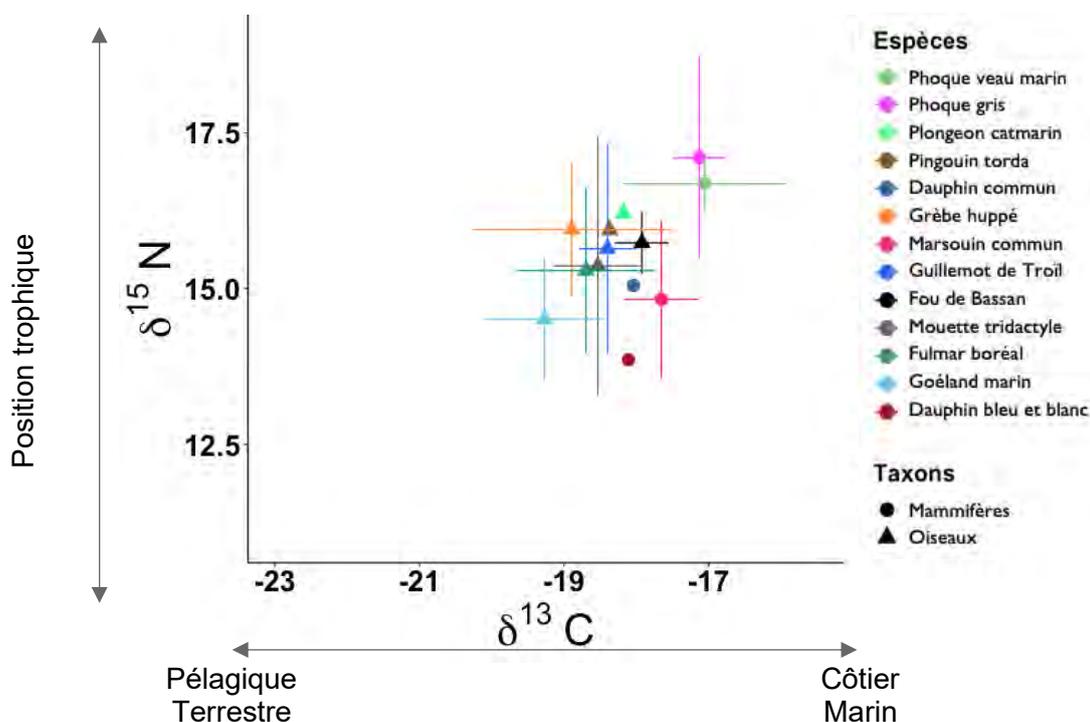


Figure 10 : Valeurs isotopiques moyennes (\pm SD, en ‰) des espèces de mammifères marins, entre 2016 et 2022, et des espèces d'oiseaux marins, 2021.

6 Discussion, limites et perspectives

6.1. Mammifères marins

Les résultats obtenus donnent un premier aperçu de la position des espèces les plus abondantes de la zone : le marsouin commun, le phoque veau marin et le phoque gris.

La répartition des mammifères marins le long du gradient pélagique-côtier est cohérente avec les connaissances écologiques des espèces en termes d'alimentation : les deux espèces de phoques se distribuent sur de hautes valeurs en $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$, même si l'échantillonnage réduit pour ces deux espèces limite la puissance des résultats. Le marsouin présente quant à lui des valeurs plus basses que les deux espèces de phoques, davantage axé vers le pélagique. L'environnement côtier possède naturellement des valeurs isotopiques plus enrichies en carbone et azote, signe d'une différence dans les sources primaires de matière organique, ce qui va enrichir les valeurs isotopiques des espèces côtières et benthiques (Das et al., 2003 ; France, 1995 ; Newsome et al., 2007). Les régimes alimentaires et/ou les zones de chasse des trois espèces montreraient donc des différences.

L'une des plus importantes colonies de phoque veau-marin en France se trouve en baie de Somme, à environ 40km de la zone du projet. Le phoque veau-marin reste proche des côtes pour ses activités de chasse : en moyenne 20km du littoral, n'excédant pas les 100km (Vincent et al., 2017). Il affectionne particulièrement les milieux estuariens sableux, là où se trouvent ses proies préférentielles. Les zones de chasses sont localisées au niveau du panache de la baie de Somme et des estuaires adjacents, qui se trouvent être des zones de nurserie d'espèces de poissons plats comme la sole et la plie (Riou et al., 2001). Cette espèce se nourrirait essentiellement de ressources benthiques, ce qui est confirmé par nos résultats.

Le phoque veau marin présente un écart-type important pour les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$. Plusieurs facteurs peuvent venir expliquer ce résultat, et notamment la nécessité pour l'espèce d'élargir sa gamme de

proies préférentielles pour compenser la compétition avec le phoque gris (Planque et al., 2021). L'état de santé des individus est également un facteur à prendre en compte : trois animaux sur cinq ont été retrouvés vivants puis morts. Des animaux pathologiques ou passés par un centre de soin peuvent vraisemblablement présenter des résultats discordants et non représentatifs de l'écologie alimentaire de l'espèce. Un des individus échantillonnés a d'ailleurs été écarté de l'étude, ses résultats isotopiques indiquant clairement un nourrissage non naturel. Le faible nombre d'individus (n=5) est par ailleurs la principale limite à l'interprétation des résultats.

Concernant le phoque gris, seuls deux individus ont fait l'objet d'analyses isotopiques dans le cadre de l'étude. Ce très faible nombre d'échantillons révèle une haute position trophique de l'espèce, ce qui est cohérent avec les connaissances existantes mais surtout un important écart-type ce qui montre une grande variabilité entre les deux individus. Le phoque gris se déplace beaucoup plus au large et sur de longues distances que le phoque veau-marin : les suivis télémétriques montrent une grande mobilité de l'espèce, pouvant se déplacer de 100 à 300 km de la côte, malgré une importante variabilité inter-individuelle (Vincent et al., 2017). En effet, ce dernier présenterait un plus haut degré de spécialisation individuelle des stratégies de chasse (Tucker et al., 2008 ; Austin et al., 2004), principalement dû à l'absence de toute transmission par les parents et donc d'un apprentissage individuel (Planque, 2021).

Le régime alimentaire des phoques gris varierait également avec la saison (Hammond et al., 1994 ; Prime & Hammond, 1990) : au printemps/été les petits et grands poissons plats benthiques et les poissons démersaux sont majoritaires dans le régime alimentaire de l'espèce, tandis qu'en automne/hiver le groupe des poissons pélagiques prend une place importante (Planque et al., 2021). A l'instar des phoque veau-marin, l'état de santé des individus échantillonnés est également à prendre en compte : l'individu avec la valeur de $\delta^{15}\text{N}$ la plus haute (18,25‰) a été retrouvé mort frais, avec pour cause de mortalité probable une pathologie, ce qui peut influencer sur les valeurs isotopiques en jouant un rôle dans l'accumulation de l'isotope lourd dans l'organisme (Gannes et al., 1998 ; Gaspar et al., 2022).

Pour ce qui est du marsouin commun, les vingt individus échantillonnés permettent d'avoir un meilleur recul sur leur position trophique, plus basse que celle des phoques, et leurs ressources alimentaires, basées à la fois sur le domaine pélagique et benthique. Les résultats isotopiques sont cohérents avec les connaissances écologiques pour cette espèce, avec des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ moins élevées que les phoques (qui se nourrissent de proies benthiques) mais plus élevées que celles des deux dauphins, qui sont des espèces pélagiques. Les études existantes révèlent une gamme de proies relativement importante pour le marsouin commun que cela soit en termes d'espèce ou de taille mais aussi en fonction de leur cycle de vie, du sexe ou de la saison (Santos & Pierce, 2003). Malgré une présence permanente de l'espèce en Manche Est, l'effet de la saisonnalité n'a pas pu être mis en avant ici, sûrement dû au faible échantillonnage, mais il est intéressant de prendre en compte ce paramètre qui influence la disponibilité en proies et donc le régime alimentaire. En effet, en plus de la qualité énergétique de la proie, c'est aussi son abondance et sa disponibilité qui vont compter dans la sélection par le marsouin : si la théorie de recherche optimale de nourriture (« *optimal foraging theory* ») voudrait que les prédateurs à fort métabolisme privilégient des proies de valeurs énergétiques élevées, ce type de proies est rarement observé dans le régime alimentaire des marsouins qui ont tendance à manger une quantité considérable de proies maigres à relativement faible rendement énergétique (Lambert, 2020).

Pour ce qui est des deux dauphins (commun et bleu et blanc) leur présence en Manche Est reste rare, d'autant plus pour le dauphin bleu et blanc. Le dauphin commun est surtout présent dans le golfe de Gascogne, le long du talus continental, et dans la partie ouest de la Manche, autour du Cotentin et de la baie du Mont-Saint-Michel (Kiszka et al., 2004 ; Laran et al., 2017 ; McClellan et al., 2014). Les valeurs

isotopiques obtenues pour ces individus dans le cadre de ce travail proviennent de mâles adultes et servent à titre indicatif mais ne sont pas représentatives de la position trophique et des ressources alimentaires des deux espèces dans la zone d'étude.

En résumé, nos résultats indiquent des différences dans les ratios isotopiques des phoques et du marsouin commun, qui suggèreraient des préférences alimentaires distinctes et/ou des différences dans les zones d'alimentation. Mais le faible nombre d'échantillons disponibles, en particulier pour les phoques, ne permet toutefois pas d'analyses statistiques robustes, notamment au regard des nombreux biais d'échantillonnage possibles.

6.2. Oiseaux marins

Concernant les oiseaux marins, le gradient terrestre-marin est utilisé pour expliquer les variations des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$. Les valeurs de ^{13}C sont légèrement plus basses en milieu terrestre, cela résulte de différences dans les sources de carbone disponibles et entraîne des différences de concentration de la ligne isotopique de base entre les milieux (Bicknell et al., 2020). Ainsi, les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ permettent de distinguer les espèces selon leur degré d'utilisation des ressources marines.

Nos résultats suggèrent l'existence de 3 groupes distincts au sein de la communauté d'oiseaux marins dans la zone d'étude :

- 1) La mouette rieuse, avec les valeurs les plus basses en $\delta^{13}\text{C}$, base son régime alimentaire sur des ressources terrestres principalement (insectes, vers, végétaux, déchets anthropiques) (Spanneut, 2008).
- 2) Le goéland argenté, le goéland brun et la mouette mélanocéphale forment un second groupe qui utilise des ressources à la fois terrestres (insectes, poussins d'autres espèces, vers terrestres, végétaux...) et marines (poissons, mollusques, vers marins...) (MEEDDAT & MNHN, 2008)
- 3) Le dernier groupe quant à lui utilise majoritairement des ressources marines : le goéland marin et le fulmar boréal s'alimentent sur des ressources diversifiées (poissons, crustacés, céphalopodes, cadavres de mammifères marins...) ; la mouette tridactyle, le guillemot de Troïl, le pingouin torda, le plongeon catmarin et le fou de bassan sont majoritairement des prédateurs de poissons pélagiques (lançon, sprat, hareng, maquereau...) (MEEDDAT & MNHN, 2008) ; nos résultats incluent également le grèbe huppé dans le groupe des espèces marines bien que cette espèce soit plutôt présente à proximité des eaux dormantes comme les étangs, les lacs ou les marais.

Les trois espèces sympatriques de goélands nichant dans la zone d'étude (argenté, brun et marin) sont généralistes et charognardes dans leur recherche de nourriture. Les colonies échantillonnées dans ce projet sont urbaines et situées dans des friches industrielles, ce qui explique les variations importantes pouvant être observées.

Le goéland argenté est l'espèce nicheuse la plus commune le long des côtes rocheuses de Normandie mais aussi celle qui semble être la plus plastique dans ses préférences alimentaires. Il s'agit aussi de l'espèce la moins spécialisée, passant de ressources marines à terrestres voir anthropiques (Binkowski et al., 2021), ce qui est cohérent avec nos résultats qui montrent les valeurs en $\delta^{15}\text{N}$ les plus faibles des 3 espèces considérées. La variabilité intersites observée dans nos résultats entre les colonies de Boulogne, Calais et Baie de Seine traduit également cet opportunisme alimentaire.

Le goéland brun a une position trophique intermédiaire, située entre le goéland argenté et marin. Cependant, une dispersion plus étendue de ses valeurs isotopiques est observée. Au sein même des colonies, des degrés de spécialisation plus forts semblent se dessiner entre les individus, créant deux groupes : un plus terrestre et l'autre plus marin, suggérant des variabilités intraspécifiques importantes.

Enfin, le goéland marin est l'espèce la plus prédatrice des trois, ce qui se traduit par une position trophique (valeurs en $\delta^{15}\text{N}$) plus haute, mais également une ellipse isotopique plus resserrée que celles des deux autres espèces.

La succession de ces trois espèces en termes de gradient carbone-azote est en accord avec ce qui reporté dans la littérature (Binkowski et al., 2021).

Si les ellipses isotopiques n'ont pas pu être réalisées pour toutes les espèces en raison du nombre limité d'échantillons, elles suggèrent néanmoins un certain nombre d'interactions au sein de la communauté des oiseaux marins. Ainsi, le recouvrement de celles de la mouette tridactyle et du guillemot de Troïl pourraient indiquer une utilisation des ressources de la zone relativement similaire, et une possible compétition alimentaire. Les lançons sont des proies largement consommées par les deux espèces, comme le suggère la Figure 8. La disponibilité en nourriture et surtout l'abondance des lançons joue d'ailleurs un rôle déterminant dans le succès reproducteur de la mouette tridactyle (Lewis et al., 2001). De façon générale, la mouette tridactyle se nourrit sur une large variété de poissons, crustacés planctoniques, polychètes ou encore de déchets de pêche (Harris et al., 1997), ce qui est bien reflété par l'ellipse isotopique assez large obtenue dans cette étude. Le guillemot de Troïl se nourrit principalement de petits poissons tels que le lançon, le sprat ou le hareng, et chasse surtout en plongeant au-delà des 20 mètres de profondeur. Cette compétition entre les deux espèces a déjà été observée en mer de Barents, en particulier en période de reproduction (Durant et al., 2012).

L'ellipse du goéland marin recouvre une partie de celles du guillemot et de la mouette tridactyle. Cette espèce est toutefois plus opportuniste dans sa façon de s'alimenter, pouvant se nourrir sur une large gamme de proies (poissons, mollusques, crustacés mais aussi poussins d'autres espèces et rejets de pêche) (Harris, 1965), ce qui atténue probablement les possibles effets de compétition avec les deux autres espèces.

D'une façon générale, l'un des facteurs influençant le plus les préférences et stratégies alimentaires des oiseaux marins est la distance à la colonie, en particulier en période de reproduction. La plupart des oiseaux marins sont des « *central place forager* » : ils optimisent leurs stratégies de recherche alimentaire par un compromis entre distance de recherche de proies et apports énergétiques de la chasse. Ces contraintes peuvent induire une séparation physique de leurs sources de nourritures préférentielles demandant une certaine flexibilité alimentaire des parents si l'abondance des proies fluctuent autour de la colonie (Burke & Montevecchi, 2009). C'est pourquoi les oiseaux marins et la taille des colonies sont plus à même d'être limités par l'abondance des proies lors de la période de reproduction plutôt qu'en période d'hivernage en raison de la compétition locale pour la nourriture (Furness et al., 2006; Votier et al., 2007).

La zone d'étude abrite à la fois des espèces nicheuses, des espèces migratrices et hivernantes. Un partage des ressources semble se dessiner de fait de par les préférences écologiques et stratégies adoptées par les différentes espèces avec trois cortèges identifiés, depuis l'utilisation de ressources à dominance terrestre et opportunistes jusqu'à l'utilisation de ressources plus spécialisées et exclusivement marines. Bien que le plus limité d'un point de vue échantillonnage, c'est dans le cortège d'espèces pélagiques que les interactions sont présumées les plus nombreuses, y compris avec d'autres compartiments biologiques comme les mammifères marins.

6.3. Limites et perspectives

La taille des échantillons disponibles est la limite la plus importante à notre étude, restreignant les analyses statistiques possibles mais également leur interprétation. La plupart des espèces étudiées montrent en effet de fortes variations interindividuelles dans leurs comportements, ce qui est à considérer dans l'interprétation des résultats obtenus.

La comparaison des valeurs isotopiques entre des tissus différents est à considérer avec des précautions car différents paramètres sont propres à chaque tissu (temps d'intégration, la composition isotopique, le fractionnement isotopique...) (Ceia et al., 2021). A titre exploratoire, une relation linéaire a pu être mise en évidence entre les signatures isotopiques du sang et des plumes de goélands dans le cadre de la présente étude (Annexe 3) , à l'instar des travaux menés par Cherel et al., (2014) pour d'autres espèces. Cela suggère qu'un facteur de correction peut être appliqué, pour comparer les résultats des 2 tissus, ce qui élargit les possibilités d'échantillonnages ultérieurs. Toutefois cette relation est espèce-dépendante, et ne peut donc être utilisées que pour les espèces (voire colonies) ayant fait l'objet d'un double échantillonnage (sang et plume).

Il convient d'être d'autant plus prudent lorsque l'on compare des tissus différents entre taxons différents : ainsi la Figure 10 a été réalisée pour donner un ordre d'idée des positions trophiques relatives des principales espèces de mégafaune marines de la zone d'étude, des interactions alimentaires possibles et d'observer une succession logique le long des gradients des ressources. Cependant, le reste des analyses a été fait par compartiment pour éviter des erreurs d'interprétations, les fenêtres temporelles entre le sang et le muscle étant variables, tout comme les temps d'intégration et facteurs d'enrichissement au sein des organismes.

Deux grandes sources d'échantillons ont été utilisées dans ce travail : des prélèvements sur des individus vivants (poussins de goélands) et sur des individus morts (oiseaux et mammifères marins échoués). L'échantillonnage de poussins vivants dans trois colonies de goélands (baie de Seine, Calais, Boulogne) offre bien sûr les informations les plus précises, à la fois temporellement et spatialement, par rapport à l'examen de cadavres échoués. L'étude d'individus morts offre des informations plus limitées et peut être sujette à des biais tels que l'origine de la mort (pathologie, passage en centre de soin...), la décomposition et le transport des cadavres par les courants marins, ce qui rend les données moins robustes pour une évaluation des régimes alimentaires dans la zone d'étude. Toutefois ces informations sont souvent les seules disponibles pour un certain nombre d'espèces (cétacés et oiseaux ne nichant pas dans la zone d'étude notamment). L'utilisation de tissu reflétant le régime alimentaire à court ou moyen terme, la recherche d'information sur l'historique de l'animal (passage en centre de soin ou non) et la prise en compte de l'état de décomposition sont des moyens de pallier ce biais. La multiplication du nombre d'échantillons est également encouragée pour améliorer la robustesse des résultats. L'augmentation du nombre d'échantillon pourrait également permettre d'étudier un éventuel effet saisonnier dans la composition isotopique qu'il n'est pas possible d'observer ici mais qui est très probable (Götmark, 1984 ; Hamer et al., 2007).

L'impact des pêcheries sur le régime alimentaire de certains oiseaux marins n'est pas négligeable. Ces dernières peuvent, d'un côté, réduire l'abondance des stocks des poissons prédatés par les oiseaux, et de l'autre, rendre accessibles d'autres types de proies (poissons démersaux ou benthiques) par le biais des rejets de pêche (Furness et al., 2006), ce qui peut modifier la signature isotopique des espèces échantillonnées. Par ailleurs, l'utilisation de valeurs isotopiques de proies provenant de la littérature limite l'interprétation du régime alimentaire puisqu'un certain nombre d'espèces ne sont pas renseignées. Afin d'approfondir l'étude, il est ainsi recommandé d'obtenir des valeurs *in situ* pour les proies potentielles. La ligne de base des ressources (pélagique, côtière, terrestre ou marine) influence

également les valeurs isotopiques de toute la chaîne trophique, révélant ainsi des différences dans les sources primaires de nourriture pour les deux compartiments et toutes les espèces. Un échantillonnage *in situ* des différentes sources de production primaire permettrait donc de contextualiser les résultats obtenus.

7 Conclusion

Cette étude représente la première analyse sur le terrain des signatures isotopiques de la mégafaune marine autour du parc éolien de Dieppe-Le Tréport. Bien que certaines limites aient été identifiées, ces résultats contribuent à établir une référence pour comprendre le fonctionnement du réseau trophique local avant l'installation des éoliennes. Ces recherches seront reproduites après la construction du parc.

Les traceurs isotopiques seuls ne permettent généralement pas de décrypter finement l'écologie alimentaire de la mégafaune marine, et des hauts niveaux trophiques en particulier. Ces espèces, souvent très mobiles, parfois omnivores, se retrouvent avec des valeurs isotopiques issues d'un mélange complexe de sources de variations, provenant notamment des niveaux trophiques inférieurs (Chouvelon, 2011). Toutefois, l'étude des isotopes stables dans le cadre de ce projet permet de fournir une première description qualitative des interactions trophiques entre les individus échantillonnés (Cisse Gning, 2008).

Malgré ces sources de variations, les outils isotopiques sont d'une grande aide pour l'étude des compartiments biologiques difficiles d'accès et offrent des informations précieuses. L'étude de l'écologie trophique des espèces de mégafaune marine de la zone d'étude a permis de mettre en évidence des différences de comportements et de stratégies concernant le type de ressources préférées par les espèces. Chez les mammifères marins, les phoques dépendent fortement des habitats benthiques et côtiers et les marsouins tirent profit de ressources diversifiées à tendance plus pélagiques. Les oiseaux marins quant à eux montrent une grande variété de comportements avec une utilisation de la ressource assez hétérogène : si certaines espèces sont relativement spécialisées, d'autres apparaissent largement opportunistes, mélangeant à la fois ressources terrestres et marines. Trois cortèges semblent ainsi se dessiner, depuis une alimentation terrestre jusqu'à une alimentation uniquement marine. L'étude a également permis d'avoir un premier aperçu de l'organisation d'une partie du réseau trophique de la zone, en montrant la position des espèces les unes par rapport aux autres et en mettant en évidence de probables relations de compétition entre les espèces de mégafaune marine du secteur, en particulier pour les espèces d'oiseaux et de mammifères marins s'alimentant sur des ressources pélagiques (mouette tridactyle, guillemot de Troïl, goéland marin et marsouin commun).

Les informations recueillies suggèrent que la zone dispose d'une ressource en proies (qu'elles soient benthiques, démersales ou pélagiques) soutenant une communauté de prédateurs diversifiée, avec des relations complexes. Il est donc crucial de suivre de près les éventuelles modifications causées par l'installation du parc éolien afin de mieux comprendre ces mécanismes et d'en évaluer les impacts.

8 Bibliographie

- Austin, D., Bowen, W. D., McMillan Austin, J. I., Austin, D., & McMillan, J. I. (2004). Intraspecific variation in movement patterns: modeling individual behaviour in a large marine predator. *Oikos*, 105, 15–30. <http://www.absc.usgs.gov/glba/gis->
- Bicknell, A. W. J., Walker, B. W., Black, T., Newton, J., Pemberton, J. M., Luxmoore, R., Inger, R., & Votier, S. C. (2020). Stable isotopes reveal the importance of seabirds and marine foods in the diet of St Kilda field mice. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62672-x>
- Binkowski, L. J., Fort, J., Brault-Favrou, M., Gallien, F., Le Guillou, G., Chastel, O., & Bustamante, P. (2021). Foraging ecology drives mercury contamination in chick gulls from the English Channel. *Chemosphere*, 267. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128622>
- BirdFacts. (2023). Great Crested Grebe. <https://www.bto.org/understanding-birds/birdfacts/great-crested-grebe>
- Burke, C. M., & Montevecchi, W. A. (2009). The foraging decisions of a central place foraging seabird in response to fluctuations in local prey conditions. *Journal of Zoology*, 278(4), 354–361. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.2009.00584.x>
- Cadiou, B., & Coordinateurs. (2014). Cinquième recensement national des oiseaux marins nicheurs en France métropolitaine : bilan final 2009-2012.
- Carpentier, A., Martin, C., & Vaz, S. (2009). Atlas des habitats des ressources marines de la Manche orientale, rapport final (CHARM phase II).
- Carter, W. A., Bauchinger, U., & McWilliams, S. R. (2019). The importance of isotopic turnover for understanding key aspects of animal ecology and nutrition. *Diversity*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/D11050084>
- Caut, S., Laran, S., Garcia-Hartmann, E., & Das, K. (2011). Stable isotopes of captive cetaceans (killer whales and bottlenose dolphins). *Journal of Experimental Biology*, 214(4), 538–545. <https://doi.org/10.1242/jeb.045104>
- Ceia, F. R., Cherel, Y., Seco, J., Barbosa, A., Chipev, N., & Xavier, J. C. (2021). Variability in tissue-specific trophic discrimination factors ($\Delta^{13}\text{C}$ and $\Delta^{15}\text{N}$) between Antarctic krill *Euphausia superba* and free-ranging *Pygoscelis* penguins. *Polar Biology*, 44(8), 1541–1551. <https://doi.org/10.1007/s00300-021-02889-2>
- Cherel, Y., Jaquemet, S., Maglio, A., & Jaeger, A. (2014). Differences in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values between feathers and blood of seabird chicks: Implications for non-invasive isotopic investigations. *Marine Biology*, 161(1), 229–237. <https://doi.org/10.1007/s00227-013-2314-5>
- Chouvelon, T. (2011). Structure et fonctionnement des réseaux trophiques par l'utilisation de traceurs écologiques (isotopes stables, métaux) en environnement marin ouvert : le cas du Golfe de Gascogne. École Doctorale Sciences pour l'Environnement Gay Lussac.
- Chouvelon, T., Spitz, J., Caurant, F., Mèndez-Fernandez, P., Chappuis, A., Laugier, F., Le Goff, E., & Bustamante, P. (2012). Revisiting the use of $\delta^{15}\text{N}$ in meso-scale studies of marine food webs by considering spatio-temporal variations in stable isotopic signatures - The case of an open ecosystem:

- The Bay of Biscay (North-East Atlantic). *Progress in Oceanography*, 101(1), 92–105. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2012.01.004>
- Cisse Gning, N. (2008). *Ecologie trophique des juvéniles de quatre espèces de poissons dans l'estuaire inverse du Sine-Saloum (Sénégal) : influence des conditions de salinité contrastées*. Université Montpellier II.
- Cresson, P., Travers-Trolet, M., Rouquette Manuel, Denamiel, M., & Auber, A. (2023). Individual isotopic ratio and trophic levels of fish species in the Eastern English Channel (2015-2016). <https://doi.org/10.17882/55585>
- Das, K., Beans, C., Holsbeek, L., Mauger, G., Berrow, S. D., Rogan, E., & Bouquegneau, J. M. (2003). Marine mammals from northeast atlantic: Relationship between their trophic status as determined by $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$ measurements and their trace metal concentrations. *Marine Environmental Research*, 56(3), 349–365. [https://doi.org/10.1016/S0141-1136\(02\)00308-2](https://doi.org/10.1016/S0141-1136(02)00308-2)
- Debout, G., & Gallien, F. (2021). Le goéland argenté nicheur sur les falaises cachoises - Saison 2021. <https://www.gis-eolienmer.fr/ressources/rapports/>
- Durant, J. M., Krasnov, Y. V., Nikolaeva, N. G., & Stenseth, N. C. (2012). Within and between species competition in a seabird community: Statistical exploration and modeling of time-series data. *Oecologia*, 169(3), 685–694. <https://doi.org/10.1007/s00442-011-2226-3>
- Eguienta, J., & Phan, C. (2022). Chiffres clés des énergies renouvelables. www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr
- EMDT. (2018). *Étude d'impact : Parc éolien en mer de Dieppe-Le Tréport, sa base d'exploitation et de maintenance et son raccordement au réseau public de transport d'électricité - Document 3 : Étude d'impact du parc sur l'environnement valant document d'incidences au titre de la Police de l'eau et des milieux aquatiques*. https://webissimo.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/etude_impact_parc_eolien_vf-r_cle08b9e1.pdf
- EMDT. (2023). *Éolien en mer Dieppe Le Tréport*. <https://dieppe-le-treport.eoliennes-mer.fr/le-projet/le-projet-en-bref/>
- Éoliennes en mer Dieppe-Le Tréport. (2023). *GIS Éolien en mer - Présentation*. <https://www.gis-eolienmer.fr/presentation/les-objectifs/>
- Féral, J.-P. (2012). *Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM) - Définition du Bon Etat Ecologique (BEE)*. https://dcsmm.milieufrance.fr/content/download/4755/file/Rapport_final_D4.pdf
- Fisher Scientific. (2006). *Manuel d'instructions Lyophilisateur ALPHA 1-4 LDplus / ALPHA 2-4 LDplus*. https://assets.fishersci.com/TFS-Assets/CCG/EU/Christ-Martin/manuals/CHR019_FR%20LYOPHILISATEUR%20ALPHA%201%202-4%20LD.pdf
- Foucher, E., Orvain, F., Robin, J.-P., Auber, A., Berthelin, C., Houssin, M., & Kellner, K. (2021). *GIEC NORMAND - Thème : Pêche et Aquaculture*. https://drive.google.com/file/d/1z5YlicnBScqkkZSl6dRdEG_LyfBjQ4ZN/view
- France, R. L. (1995). Carbon-13 enrichment in benthic compared to planktonic algae: foodweb implications. *Marine Ecology Progress Series*, 124, 307–312.
- Fry, B. (2006). *Stable Isotope Ecology* (Springer, Ed.).

- Furness, R. W., Crane, J. E., Bearhop, S., Garthe, S., Käckelä, A., Käckelä, R., Kelly, A., Kubetzki, U., Votier, S. C., & Waldron, S. (2006). Techniques to link individual migration patterns of seabirds with diet specialization, condition and breeding performance. *Ardea*, 94(3), 631–638.
- Gannes, L. Z., Martínez Del Rio, C., & Koch, P. (1998). Natural Abundance Variations in Stable Isotopes and their Potential Uses in Animal Physiological Ecology. *Biochem. Physiol*, 119(3), 725–737.
- Gaspar, C., Giménez, J., Andonegi, E., Astarloa, A., Chouvelon, T., Franco, J., Goñi, N., Corrales, X., Spitz, J., Bustamante, P., & Louzao, M. (2022). Trophic ecology of northern gannets *Morus bassanus* highlights the extent of isotopic niche overlap with other apex predators within the Bay of Biscay. *Marine Biology*, 169(8). <https://doi.org/10.1007/s00227-022-04079-y>
- Girardin, R., Fulton, E. A., Lehuta, S., Rolland, M., Thébaud, O., Travers-Trolet, M., Vermard, Y., & Marchal, P. (2018). Identification of the main processes underlying ecosystem functioning in the Eastern English Channel, with a focus on flatfish species, as revealed through the application of the Atlantis end-to-end model. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 201, 208–222. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.10.016>
- Götmark, F. (1984). Food and foraging in five European *Larus* gulls in the breeding season: a comparative review. *Ornis Fennica*, 61(1), 9–18. <https://doi.org/https://doi.org/10.2307/3676301>
- Gouverneur, P., & Jouet, F. (2012). *Les éoliennes en mer : Questions-Réponses* (Le Cherche Midi, Ed.).
- Hamer, K. C., Humphreys, E. M., Garthe, J. H., Peters, G., Grémillet, D., Philipps, R. A., Harris, M. P., & Wanless, S. (2007). Annual variation in diets, feeding locations and foraging behaviour of gannets in the North Sea: flexibility, consistency and constraint. *Marine Ecology Progress Series*, 338, 295–305. <https://doi.org/10.3354/meps338295>
- Hammond, P. S., Hall, A. J., & Prime, J. H. (1994). The Diet of Grey Seals in the Inner and Outer Hebrides. *Journal of Applied Ecology*, 31(4), 737–746. <https://doi.org/10.2307/2404164>
- Harris, M. P. (1965). The food of some *Larus* gulls. *Ibis*, 107, 43–53.
- Harris, M. P., Wanless Harris, S., & Wanless, S. (1997). Breeding success, diet, and brood neglect in the kittiwake (*Rissa tridactyla*) over an 11-year period. In *ICES Journal of Marine Science* (Vol. 54).
- Hobson, K. A., & Clark, R. G. (1992). Assessing avian diets using stable isotopes I: Turnover of ¹³C in Tissues. *The Condor*, 94(1), 181–188. <https://doi.org/https://doi.org/10.2307/1368807>
- Hobson, K. A., Piatt, J. F., Pitocchelli, J., Piatt, J. F., & Pitocchellij, J. (1994). Using Stable Isotopes to Determine Seabird Trophic Relationships. In *Source: Journal of Animal Ecology* (Vol. 63, Issue 4). <https://doi.org/https://doi.org/10.2307/5256>
- Hobson, K. A., Schell, D. M., Renouf, D., & Noseworthy, E. (1996). Stable carbon and nitrogen isotopic fractionation between diet and tissues of captive seals: implications for dietary reconstructions involving marine mammals.
- Jackson, A. L., Inger, R., Parnell, A. C., & Bearhop, S. (2011). Comparing isotopic niche widths among and within communities: SIBER - Stable Isotope Bayesian Ellipses in R. *Journal of Animal Ecology*, 80(3), 595–602. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2011.01806.x>
- Jansen, O. E., Aarts, G. M., Das, K., Lepoint, G., Michel, L., & Reijnders, P. J. H. (2012). Feeding ecology of harbour porpoises: Stable isotope analysis of carbon and nitrogen in muscle and bone. *Marine Biology Research*, 8(9), 829–841. <https://doi.org/10.1080/17451000.2012.692164>

- Kiszka, J., Hassani, S., & Pezeril, S. (2004). Distribution and status of small cetaceans along the French Channel coasts: Using opportunistic records for a preliminary assessment. *Lutra*, 47.
- Kopp, D., Lefebvre, S., Cachera, M., Villanueva, M. C., & Ernande, B. (2015). Reorganization of a marine trophic network along an inshore–offshore gradient due to stronger pelagic–benthic coupling in coastal areas. *Progress in Oceanography*, 130, 157–171. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.11.001>
- Lambert, E. (2020). The feeding ecology of the harbour porpoise *Phocoena phocoena* L. in a changing environment [Master’s degree in Marine and Lacustrine Science and Management].
- Lewis, S., Wanless, S., Wright, P. J., Harris, M. P., Bull, J., & Elston, D. A. (2001). Diet and breeding performance of black-legged kittiwakes *Rissa tridactyla* at a North Sea colony. *Marine Ecology Progress Series*, 221, 277–284.
- Lourenço, P. M., Granadeiro, J. P., Guilherme, J. L., & Catry, T. (2015). Turnover rates of stable isotopes in avian blood and toenails: Implications for dietary and migration studies. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 472, 89–96. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2015.07.006>
- Mahfouz, C. (2014). An assessment of the chemical contamination and the diet changes of the harbour porpoise (*Phocoena phocoena*) stranded along the southern North Sea [Université du Littoral Côte d’Opale]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01128126>
- Persohn, C., Helloco, L., Baudinière, E., & Martinez, L. (2020). Préconisations pour limiter les impacts des émissions acoustiques en mer d’origine anthropique sur la faune marine. Ministère de la transition écologique et solidaire.
- McClellan, C. M., Brereton, T., Dell’Amico, F., Johns, D. G., Cucknell, A. C., Patrick, S. C., Penrose, R., Ridoux, V., Solandt, J. L., Stephan, E., Votier, S. C., Williams, R., & Godley, B. J. (2014). Understanding the distribution of marine megafauna in the English Channel region: Identifying key habitats for conservation within the busiest seaway on earth. *PLoS ONE*, 9(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0089720>
- MEEDDAT, & MNHN. (2008). Cahiers d’habitats Natura 2000. Connaissance et gestion des habitats et des espèces d’intérêt communautaire. Cahiers Oiseaux.
- Newsome, S. D., Martinez del Rio, C., Bearhop, S., & Phillips, D. L. (2007). A niche for isotopic ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(8), 429–436.
- Pettex, E., Lambert, C., Laran, S., Amandine, R., Virgili, A., Falchetto, H., Matthieu, A., Monestiez, P., Olivier, V., Dorémus, G., Aurélie, B., Toison, V., & Ridoux, V. (2014). Suivi Aérien de la Mégafaune Marine en France métropolitaine - Rapport final. <https://doi.org/10.13140/2.1.2698.5287>
- Pettex, E., Laran, S., Authier, M., Blanck, A., Dorémus, G., Falchetto, H., Lambert, C., Monestiez, P., Stéfan, E., van Canneyt, O., & Ridoux, V. (2017). Using large scale surveys to investigate seasonal variations in seabird distribution and abundance. Part II: The Bay of Biscay and the English Channel. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 141, 86–101. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2016.11.012>
- Pezy, J. P., Raoux, A., & Dauvin, J. C. (2020). The environmental impact from an offshore windfarm: Challenge and evaluation methodology based on an ecosystem approach. *Ecological Indicators*, 114. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106302>

- Planque, Y. (2021). Écologie tropique de deux espèces sympatriques de phoques en périphérie de leur aire de répartition. CEBC / La Rochelle Université / CNRS.
- Planque, Y., Spitz, J., Authier, M., Vincent, C., Caurant, F., & Caurant Trophic, F. (2021). Trophic niche overlap between sympatric harbour seals (*Phoca vitulina*) and grey seals (*Halichoerus grypus*) at the southern limit of their European range (Eastern English Channel). *Ecology and Evolution*, 11(15), 10004–10025. <https://doi.org/10.1002/ece3.7739i>
- Prime, J. H., & Hammond, P. S. (1990). The Diet of Grey Seals from the South-Western North Sea Assessed from Analyses of Hard Parts Found in Faeces. *Journal of Applied Ecology*, 27(2), 435–447. <https://doi.org/10.2307/2404292>
- Raoux, A., Tecchio, S., Pezy, J. P., Lassalle, G., Degraer, S., Wilhelmsson, D., Cachera, M., Ernande, B., Le Guen, C., Haraldsson, M., Grangeré, K., Le Loc'h, F., Dauvin, J. C., & Niquil, N. (2017). Benthic and fish aggregation inside an offshore wind farm: Which effects on the trophic web functioning? *Ecological Indicators*, 72, 33–46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.07.037>
- Riou, P., Le Pape, O., & Rogers, S. I. (2001). Relative contributions of different sole and plaice nurseries to the adult population in the Eastern Channel: application of a combined method using generalized linear models and a geographic information system. *Aquatic Living Resources*, 14(2), 125–135. [https://doi.org/10.1016/S0990-7440\(01\)01110-X](https://doi.org/10.1016/S0990-7440(01)01110-X)
- Santos, M. B., & Pierce, G. J. (2003). The diet of harbour porpoise (*Phocoena phocoena*) in the Northeast Atlantic. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 41, 355–390.
- Spanneut, L. (2008). Mouette riieuse - Fiche descriptive. INPN. https://inpn.mnhn.fr/espece/cd_nom/530157/tab/fiche
- Spitz, J., Dupuis, L., Becquet, V., Dubief, B., & Trites, A. W. (2015). Diet of the harbour seal *Phoca vitulina*: Implication for the flatfish nursery in the Bay of Somme (English Channel, France). *Aquatic Living Resources*, 28(1), 11–19. <https://doi.org/10.1051/alr/2015001>
- Spitz, J., Peltier, H., & Authier, M. (2018). Évaluation du descripteur 1 « Biodiversité - Mammifères marins » en France Métropolitaine. Rapport scientifique pour l'évaluation 2018 au titre de la DCSMM. <http://www.observatoire-pelagis.cnrs.fr>
- Thomas, S. M., & Crowther, T. W. (2015). Predicting rates of isotopic turnover across the animal kingdom: A synthesis of existing data. *Journal of Animal Ecology*, 84(3), 861–870. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12326>
- Tieszen, L. L., Boutton, T. W., Tesdahl, K. G., & Slade, N. A. (1983). Fractionation and turnover of stable carbon isotopes in animal tissues: Implications for $\delta^{13}\text{C}$ analysis of diet. *Oecologia*, 57(1), 32–37. <https://doi.org/10.1007/BF00379558>
- Toperoff, A. K. (2002). Examination of diet of harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) from central California using stomach content and stable isotope analysis from multiple tissues. Faculty of Moss Landing Marine Laboratories and San Jose State University.
- Tucker, S., Bowen, W. D., & Iverson, S. J. (2008). Convergence of diet estimates derived from fatty acids and stable isotopes within individual grey seals. *Marine Ecology Progress Series*, 354, 267–276. <https://doi.org/10.3354/meps07263>
- Vincent, C., Huon, M., Caurant, F., Dabin, W., Deniau, A., Dixneuf, S., Dupuis, L., Elder, J. F., Fremau, M. H., Hassani, S., Hemon, A., Karpouzopoulos, J., Lefeuvre, C., McConnell, B. J., Moss, S. E. W., Provost, P.,

Spitz, J., Turpin, Y., & Ridoux, V. (2017). Grey and harbour seals in France: Distribution at sea, connectivity and trends in abundance at haulout sites. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 141, 294–305. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2017.04.004>

Votier, S. C., Bearhop, S., Crane, J. E., Manuel Arcos, J., & Furness, R. W. (2007). Seabird predation by great skuas *Stercorarius skua* - Intra-specific competition for food? *Journal of Avian Biology*, 38(2), 234–246. <https://doi.org/10.1111/j.0908-8857.2007.03893.x>

Woodward, I., Thaxter, C. B., Owen, E., & Cook, A. S. C. P. (2019). Desk-based revision of seabird foraging ranges used for HRA screening.

9 Annexes

9.1. Annexe 1 : Régimes alimentaires des principales espèces de la zone

Tableau 1. Proies préférentielles du Marsouin commun *Phocoena phocoena*. J: Marsouin juvénile.

Référence	Lieu & Méthode d'identification	Proies préférentielles
Das et al., 2003	Mer du Nord Bibliographie	Sole, Limande Morue Gobie (J) Hareng
Reijnders, 1992	Mer du Nord Bibliographie	Hareng, sprat Maquereau Morue Poissons plats (sole, limande, plie, turbot...)
Lambert, 2020	Côte Belges Contenus stomachaux	Merlan, Morue Sprat, hareng Lançon Gobies (J) Calmar
Santos et Pierce, 2003	Atlantique Nord Est Contenus stomachaux Bibliographie	Merlan, Morue Hareng, Sprat Maquereau, Lançon Sole Anguille, Crevette (J), Seiche
Jansen et al., 2012	Côtes Allemandes Isotopie Bibliographie	Gobies Hareng Morue, Merlan Poissons plats Crevettes (J)

Tableau 2. Proies préférentielles du Phoque veau marin *Phoca vitulina*.

Référence	Lieu & Méthode d'identification	Proies préférentielles
Das et al., 2003	Mer du Nord Isotopie Bibliographie	Clupéidés (Hareng, Sprat, Anchois, Sardine) Lançon, Merlan, Sole
Spitz et al., 2015	Baie de Somme Fèces	Sole commune, Sole pole, Petite sole jaune, Sole-perdix commune Plie, Flet, Dragonnet lyre Gobies, Lançon, Grande vive
Planque et al., 2021	Manche Orientale Fèces	Petits et grands poissons plats benthiques (Plie, Flet, Sole commune, Sole perdix, Sole jaune, Sole pole, Targie naine, Turbot) Gadidés (Merlan, Tacaud), Lançon Mulet Gobiidés Dragonnet lyre, Grande vive

Tableau 3. Proies préférentielles du Phoque gris *Halichoerus grypus*.

Référence	Lieu et Méthode d'identification	Proies préférentielles
Das et al., 2003	Mer du Nord Isotopie Bibliographie	Lançon (70%)
Planque et al., 2021	Manche orientale Fèces	Petits et grands poissons plats benthiques (Plie, Flet, Sole commune, Sole perdix, Sole jaune, Sole pole, Targie naine, Turbot) Gadidés (Merlan, Tacaud), Lançon Mulet Clupéidés (Hareng, Sardine, Sprat), Orphie, Chinchard, Calmar
Hammond et al., 1994	Hébrides (UK) Fèces	Lançon, congre Gadidés (Merlan, Lingue, Morue, Lieu, Vieille) Poissons plats
Prime et Hammond, 1990	Mer du Nord (Donna Nook, UK)	Lançon, Morue, Sole commune (56%) Plie, Limande, Flet (21%) Merlan, Dragonnet lyre, Bullrout (15%) Hareng, Capelan, Chaboisseau (1%)
De Pierrepont et al., 2005	Cotentin (Normandie)	Merlan bleu

Contenus stomacaux Céphalopodes : Seiche, Calmar
Moule commune

Tableau 4. Proies préférentielles du Grand dauphin *Tursiops truncatus*.

Référence	Lieux et Méthode d'identification	Proies préférentielles
Hernandez-Milian et al., 2015	Côtes ouest Irlandaise Contenus stomacaux	Gadidés (54%) : Merlan, Merlan bleu, Lieu jaune, Lieu noir et Églefin, Merlu, <i>Trisopterus</i> spp. Congre, Roussette Chinchard, Maquereau Poissons plats (plie, sole) Calmars pélagiques Pieuvre commune
De Pierrepont et al., 2005	Cotentin (Normandie) Contenus stomacaux	Gadidés (<i>Trisopterus</i> spp., Merlan bleu, Chinchard) Calmar : <i>Loligo</i> spp.
Santos et al., 2001	Écosse Contenus stomacaux	Gadidés (Merlan, Lieu noir, Églefin, <i>Trisopterus</i> Spp, Morue) Gobiidés (Lançon, Chabot de mer, Bull-rout) Sprat, Hareng Poissons plats (plie, limande) Céphalopodes

Tableau 5. Proies préférentielles du Dauphin commun *Delphinus delphis*.

Référence	Lieux et Méthode d'identification	Proies préférentielles
De Pierrepont et al., 2005	Cotentin (Normandie) Contenus stomacaux	Gadidés (Tacaud, Merlan) Gobiidés Chinchard, Maquereau Céphalopodes (Sépiole de l'Atlantique, Pieuvre blanche)
Reid et al., 2003	Atlantique Nord est Bibliographie Contenus stomacaux	Maquereau, Sprat, Sardine, Anchois Chinchard, Merlu, Merlan, <i>Trisopterus</i> spp Céphalopodes

Tableau 6. Proies préférentielles du Goéland marin *Larus marinus*.

Référence	Lieux et Méthode d'identification	Proies préférentielles
-----------	-----------------------------------	------------------------

Harris, 1965	Pays de Galles Contenus stomachaux Pelotes de réjection Observations directes	Oiseaux (Puffin des Anglais), Lapin Poussin, Œufs Invertébrés marins, Mollusques, Crustacés Reste de poissons + Os (déchets humains ou ordures) Matières végétales
--------------	--	--

Tableau 10. Régime alimentaire du Fou de Bassan *Morus bassanus*.

Référence	Lieux et Méthode d'identification	Régime alimentaire
Le Bot et al., 2019	Manche Bibliographie	Orphie, Maquereau, Grondin Gadidés (Lieu, Morue, Merlan, Tacaud)
Hamer et al., 2007	Mer du Nord Pelotes de rejection	Lançon, Maquereau, Harreng, Sprat Gadidés

Tableau 11. Régime alimentaire de la mouette tridactyle *Rissa tridactyla*.

Référence	Lieux et Méthode d'identification	Régime alimentaire
Lewis et al., 2001	Mer du Nord Régurgitations	Lançon Crustacé planctonique (<i>Thysanoessa inermia</i>) Clupéidés (Sprat) Gadidés
Harris et al., 1997	Côte Est britannique Régurgitations	Lançon Clupéidés (Hareng, Sprat) Crustacé planctonique (Euphausiacés, <i>Thysanoessa inermis</i>) Polychètes Déchets de pêche (abats, poissons de grande taille ou démersaux, crustacés (Langoustine))

9.2. Annexe 2 : synthèse des résultats d'analyses isotopiques pour les mammifères et les oiseaux marins

Tableau 3 : Espèces, nombre d'individus échantillonnés, valeurs moyennes \pm l'écart-type (SD) de chaque rapport isotopique

Espèces	n	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$
Marsouin commun <i>P.phocoena</i>	20	-17.653 \pm 0.525	14.829 \pm 1.274
Phoque veau marin <i>P.vitulina</i>	6	-17.056 \pm 1.217	16.682 \pm 1.707

Phoque gris <i>H.grypus</i>	2	-17.130 ± 0.368	17.100 ± 1.626
Dauphin commun <i>D.delphis</i>	1	-18.040	15.050
Dauphin bleu et blanc <i>S.coeruleoalba</i>	1	-18.110	13.860

Tableau 4: Espèces, nombre d'individus échantillonnés, valeurs moyennes ± l'écart-type (SD) de chaque rapport isotopique.

Espèces	n	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$
Plongeon catmarin <i>Gavia stellata</i>	1	-18.180	16.210
Pingouin torda <i>Alca torda</i>	1	-18.370	15.940
Grèbe huppé <i>Podiceps cristatus</i>	3	-18.893 ± 0.797	15.947 ± 1.072
Guillemot de Troïl <i>Uria aalge</i>	9	-18.400 ± 0.400	15.639 ± 1.692
Fou de Bassan <i>Morus bassanus</i>	3	-17.923 ± 0.376	15.733 ± 0.500
Mouette tridactyle <i>Rissa tridactyla</i>	7	-18.533 ± 0.618	15.363 ± 2.074
Fulmar boréal <i>Fulmarus glacialis</i>	3	-18.700 ± 0.951	15.290 ± 1.336
Goéland marin <i>Larus marinus</i>	15	-19.272 ± 0.837	14.509 ± 0.998
Goéland brun <i>Larus fuscus</i>	22	-20.593 ± 1.565	11.847 ± 2.013
Goéland argenté <i>Larus argentatus</i>	40	-21.893 ± 1.336	10.686 ± 1.490
Mouette mélanocéphale <i>Ichthyaetus melanocephalus</i>	1	-20.320	10.410
Mouette rieuse <i>Chroicocephalus ridibundus</i>	1	-24.680	9.980

9.3. Annexe 3 : comparaison des compositions isotopiques du sang et des plumes de goélands dans le cadre des prélèvements effectués sur les colonies de Calais, baie de Seine et Boulogne

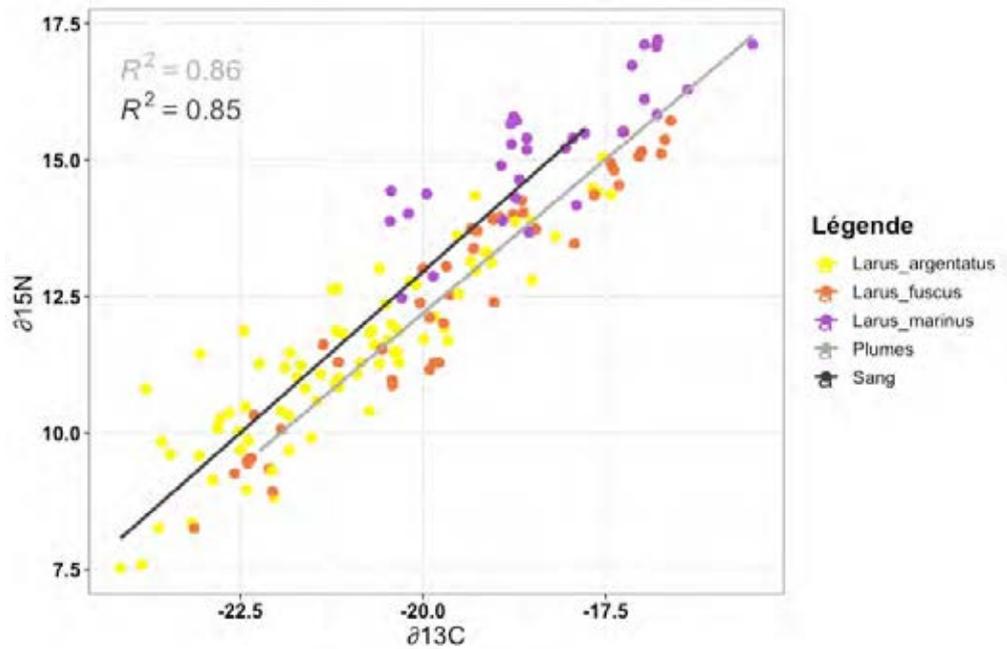


Figure 11: Comparaison des valeurs isotopiques (en ‰) de deux tissus, les plumes et le sang, chez trois espèces de goéland. Goéland argenté *Larus argentatus*, Goéland brun *Larus fuscus*, Goéland marin *Larus marinus*.



**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



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, situé sur la plateforme mégatidale de la Manche orientale, est couvert de corps sédimentaires composés de bancs sableux eux-mêmes modélisés de grandes dunes à crêtes linéaires à sinueuses. Le site peut être divisé en 4 secteurs de morphologies dunaires contrastées. Les données bathymétriques acquises 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 $1,89 \pm 1,27$ à $2,66 \pm 1,38$ 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 courantstidaux, 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 k_s 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 k_s (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

Nycthémerale : 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 XX^{ème} 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 apparaître 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 supérieures 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.

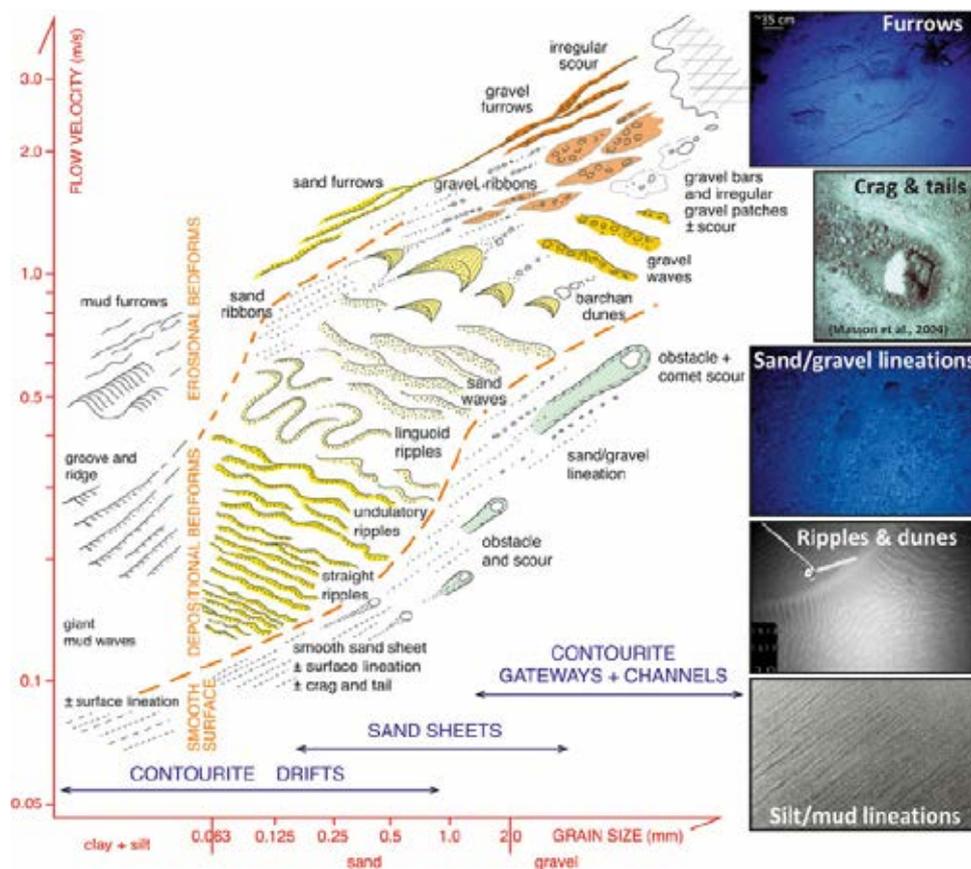


Figure 1 : Domaine de stabilité des corps sédimentaires dans les environnements marins profonds en fonction des vitesses des courants et de la granulométrie (D'après Stow et al, 2009)

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).

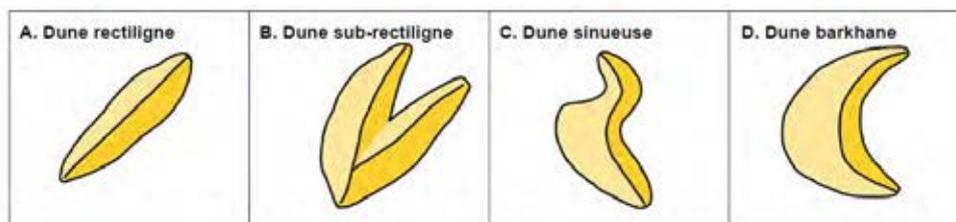


Figure 2 : Classification des dunes selon la sinuosité de leur crête (d'après Berné et al. (1989) et Ferret (2011) in Bary (2020)

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 (L_d) et raides (L_r). 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 m^2) 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 (L_c) (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).

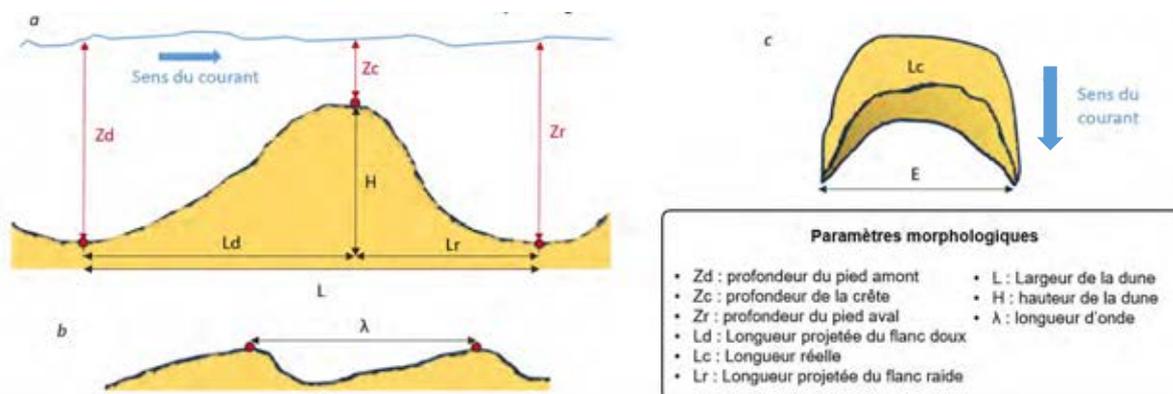


Figure 3 : Paramètres morphologiques d'une dune (a : profil d'élévation à l'échelle de la dune ; b : profil d'élévation à l'échelle du champ de dune ; c : dune barkhane en vue plane horizontale) (D'après Ferret, 2011)

La polarité est une donnée qualitative permettant de connaître 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 apparaître 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, Ernstsens 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 connaître 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 <i>Modiolus modiolus</i> , 80% de la composition sédimentaire
Gravelle à <i>Branchiostoma lanceolatum</i> (A5.135)	Zone de transition entre sables moyens et cailloutis, 50% de la composition sédimentaire, faciès à Céphalocordé <i>Amphioxus lanceolatus</i> et l'oursin <i>Spatangus purpureus</i>
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 <i>Ophelia borealis</i> (A5.251)	Essentiellement dans les bancs sableux à sables fins et moyens sans pélites, communauté oligospécifique, faciès à polychète <i>Ophelia borealis</i> et l'oursin <i>Echinocardium cordatum</i> .
Sables fins envasés à <i>Abra alba</i> (A5.244)	Courants faibles des zones côtières, faciès à <i>Abra alba</i> , polychète <i>Pectinaria (Lagis) koreni</i> et échinoderme <i>Ophiura ophiura</i> .

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.

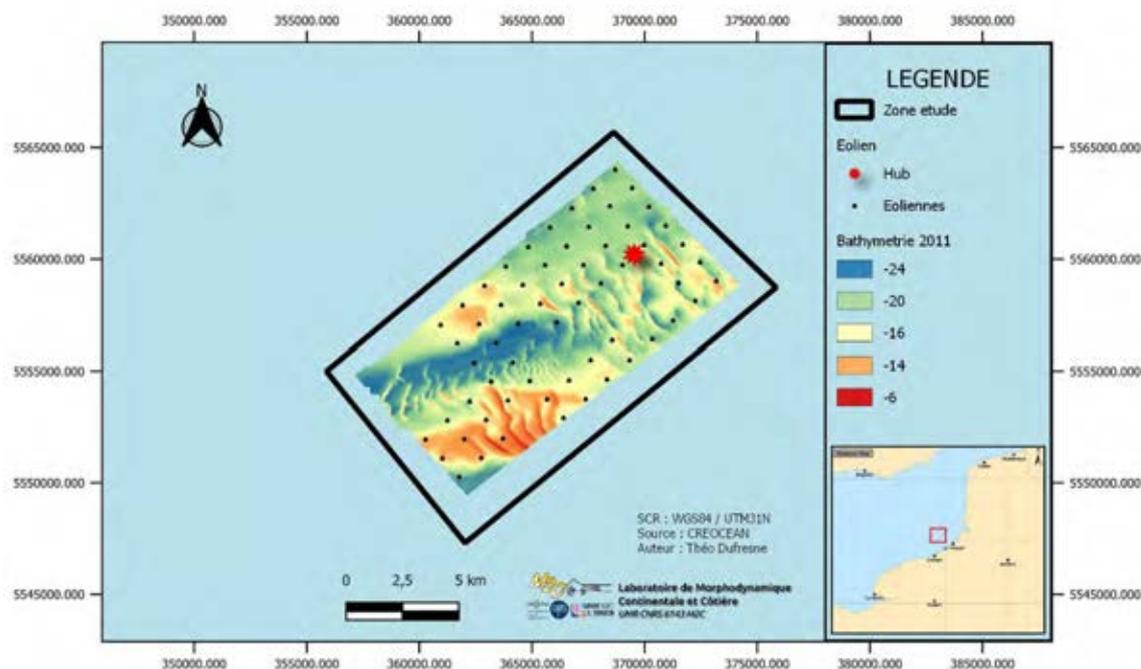


Figure 4 : Carte d'implantation du parc éolien de Dieppe/Le Tréport sur la bathymétrie de 2011

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 (Lebec 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).

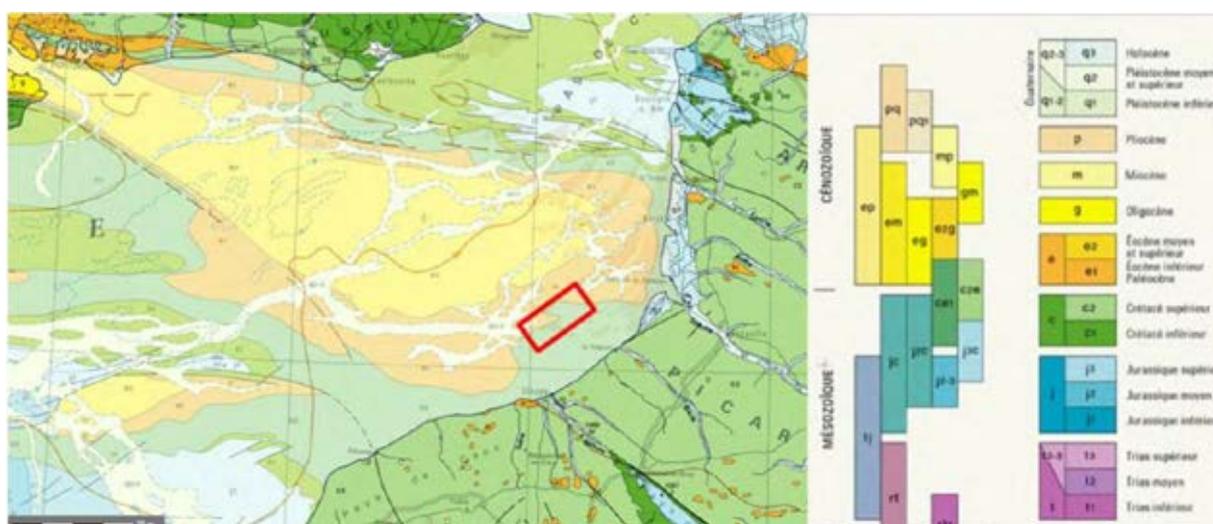


Figure 5 : Carte géologique de la Manche (modifiée d'après le BRGM, 2009 in Lebec et al., 2017)

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.

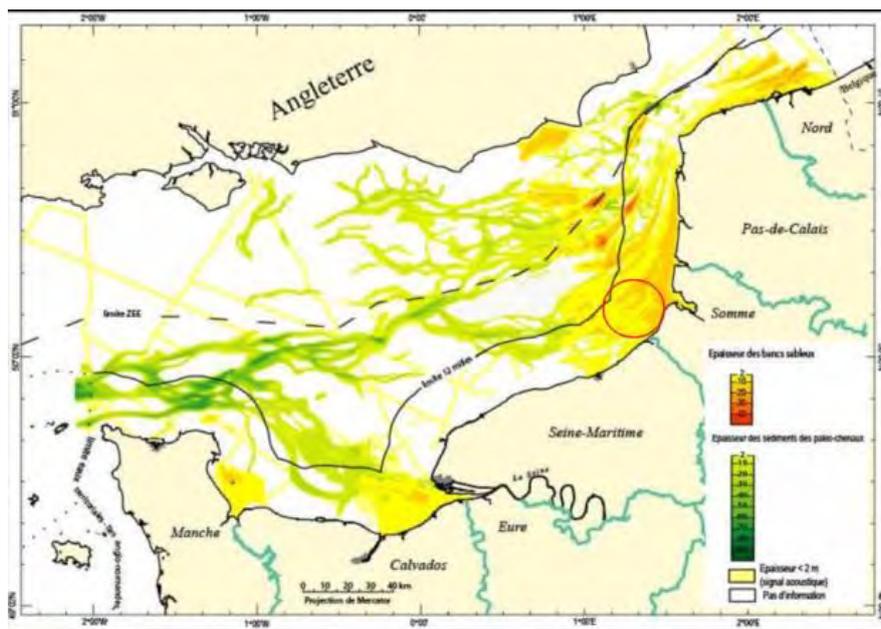


Figure 6 : Paléovallées et bancs sableux en Manche et Mer du nord (rond rouge : site d'étude) (D'après Auffret et al, 1980)

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 m³. Grenard-Grand et al. (2021) estime l'évolution du volume de sédiment mobilisable dans le prisme sédimentaire normand-picard à environ 4 milliards ($\pm 18,8$) de m³.an⁻¹. Depuis le XIX^{ème} 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 a 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 (Hurrell, 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, événements 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.

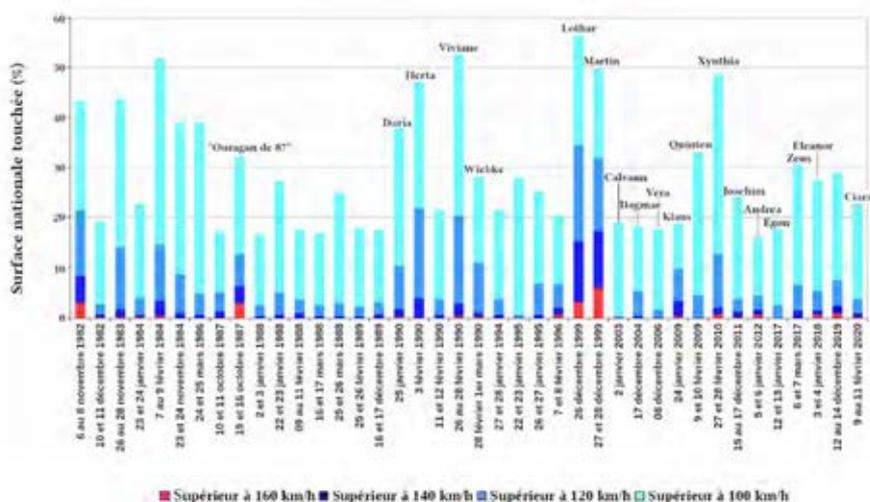


Figure 7 : Graphique des 40 tempêtes majeures en France depuis 1980 à 2020 selon le % du territoire national touché par des rafales supérieures à 100km/h (Météo France, 2020)

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 m³.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).

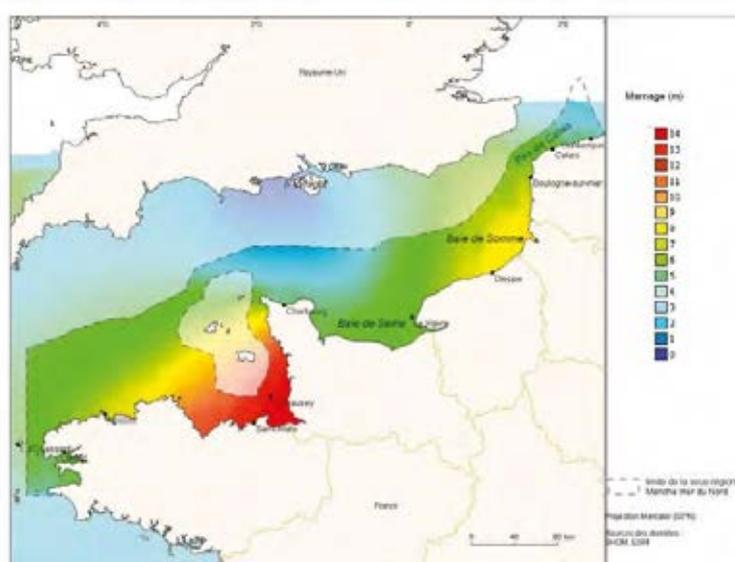


Figure 8 : Marnage en Manche (d'après les modèles de marée CSTFRANCE du SHOM, ESRI, 2010 in Lazure, 2012)

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 $2\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$.

D'après les données de 2012 du SHOM, les courants de marée restent généralement faibles, de 0.5 à $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Les vitesses maximales de courants dans la Manche peuvent cependant atteindre les $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 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.

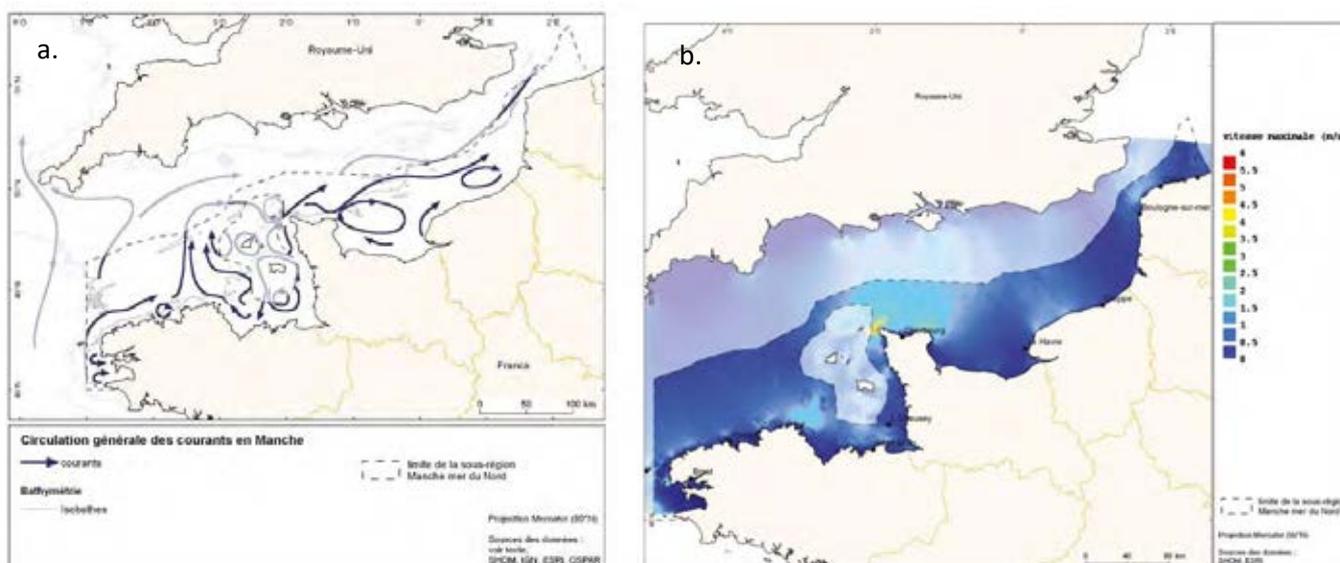


Figure 9 : Courants en Manche. a. Courants résiduels en Manche ; b. Vitesses maximales des courants de marée en vive-eau moyenne (source : SHOM, IGN, ESRI, OSPAR ; <https://archimer.ifremer.fr/doc/00327/43821/43395.pdf>).

II.2.2.2. Les vents et la houle

Le vent est le deuxième phénomène physique le plus important en Manche après les courantstidaux. 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.

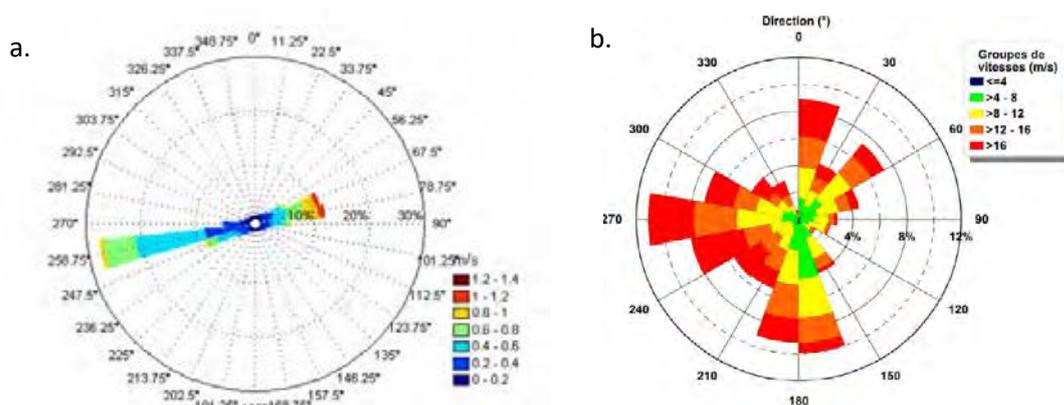


Figure 10 : a. Rose des vents de 1970 à 2017 mesurés au Sémaphore de Dieppe (IHCANTABRIA, 2018) b. Fréquence des rafales de vent à 10 m de hauteur (mesures quotidiennes), en fonction de leur provenance et de leur intensité (Données Météo-France) (Ferret, 2011)

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).

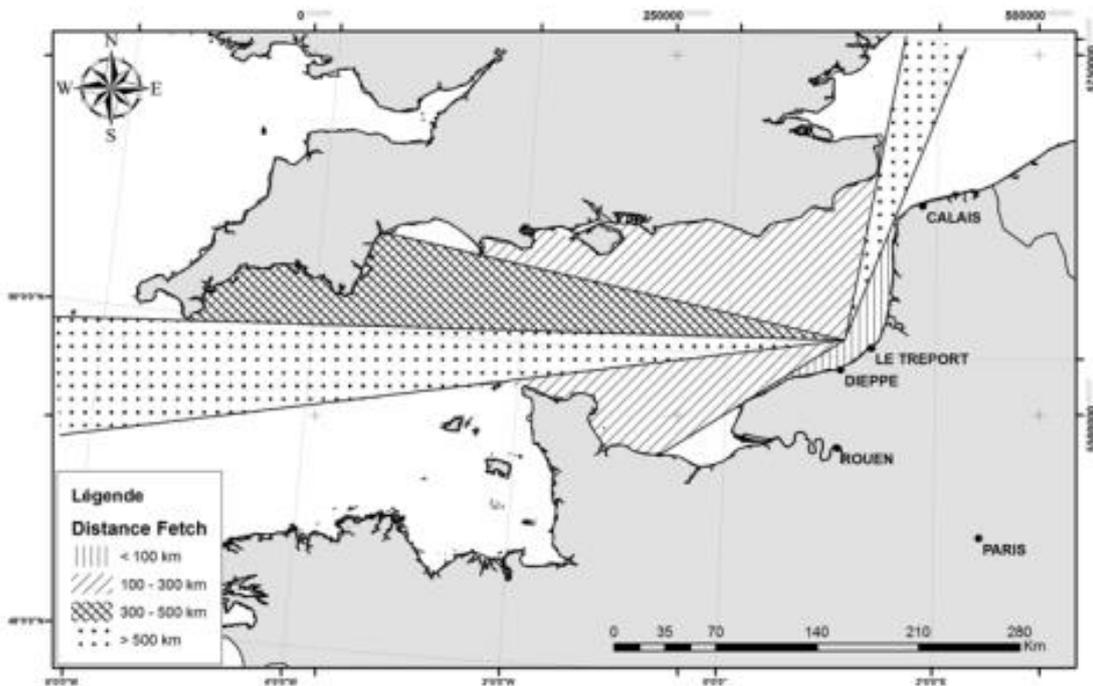


Figure 11 : Fetch présent en Manche allant jusqu'au site d'étude (Ferret, 2011)

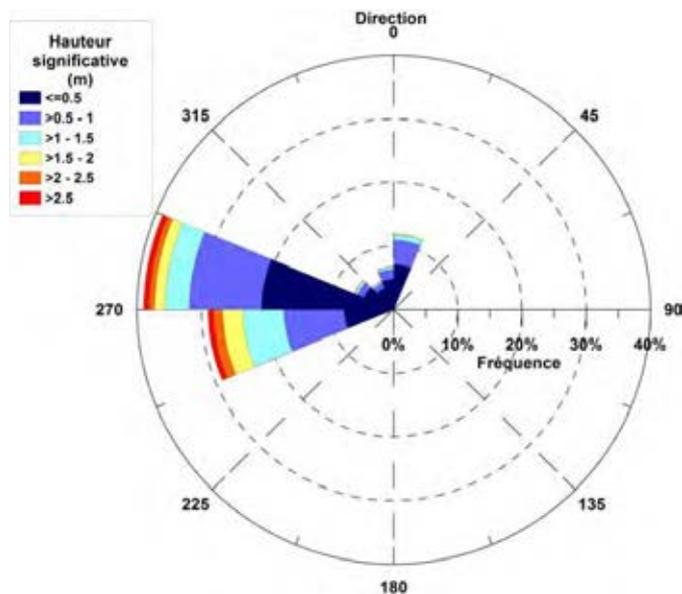


Figure 12: Caractéristiques de la houle au large de Dieppe sur la période de 1979 à 2002 (données ANEMOC, point Coast-3506) (Ferret, 2011)

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 entraînant 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.

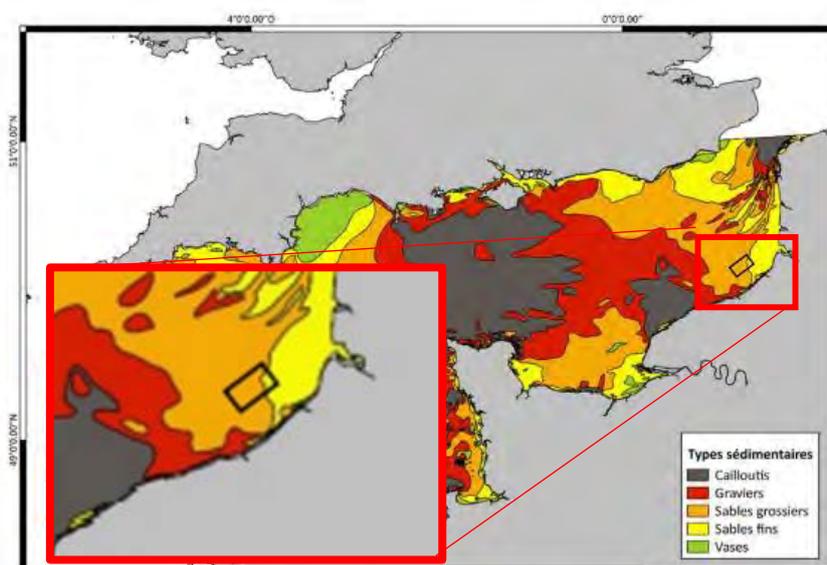


Figure 113 : Carte de la couverture sédimentaire en Manche orientale avec zoom sur la bordure ouest du prisme sédimentaire normand-picard (modifié d'après Vaslet et al., 1979)

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 bien 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 cisailant 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.

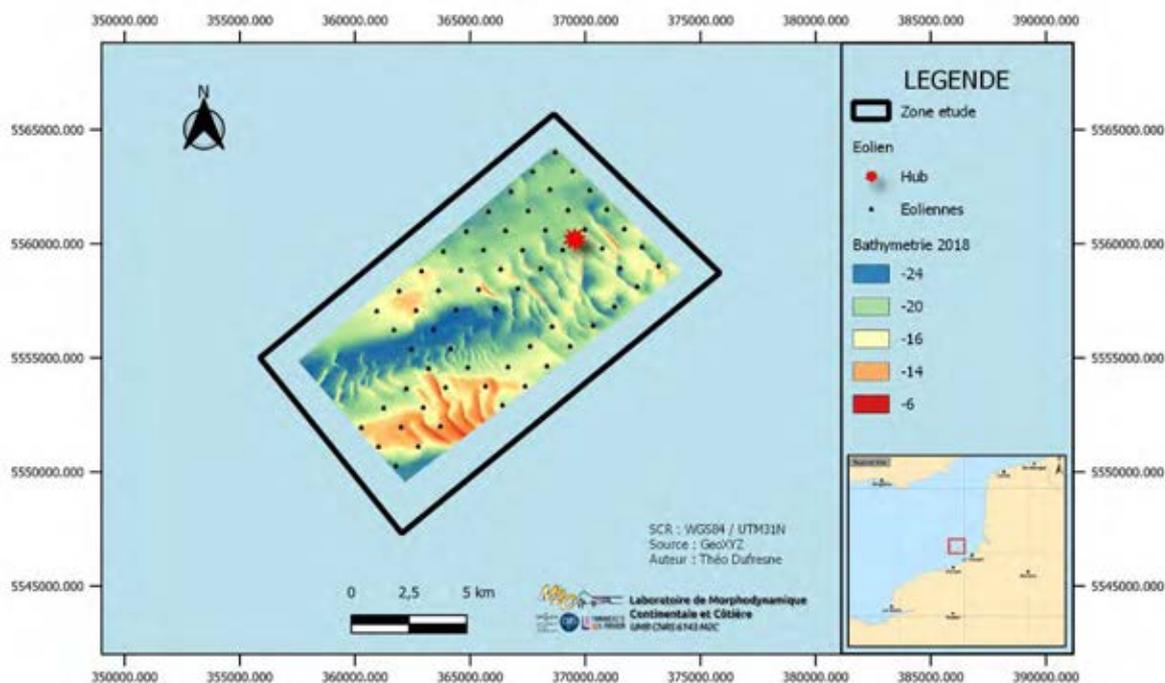


Figure 124 : Carte bathymétrique du site d'étude (issu des campagnes de GEOXYZ de 2018)

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 événements 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 125,6m³.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 *Politapes 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 récupérés 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 complété 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.

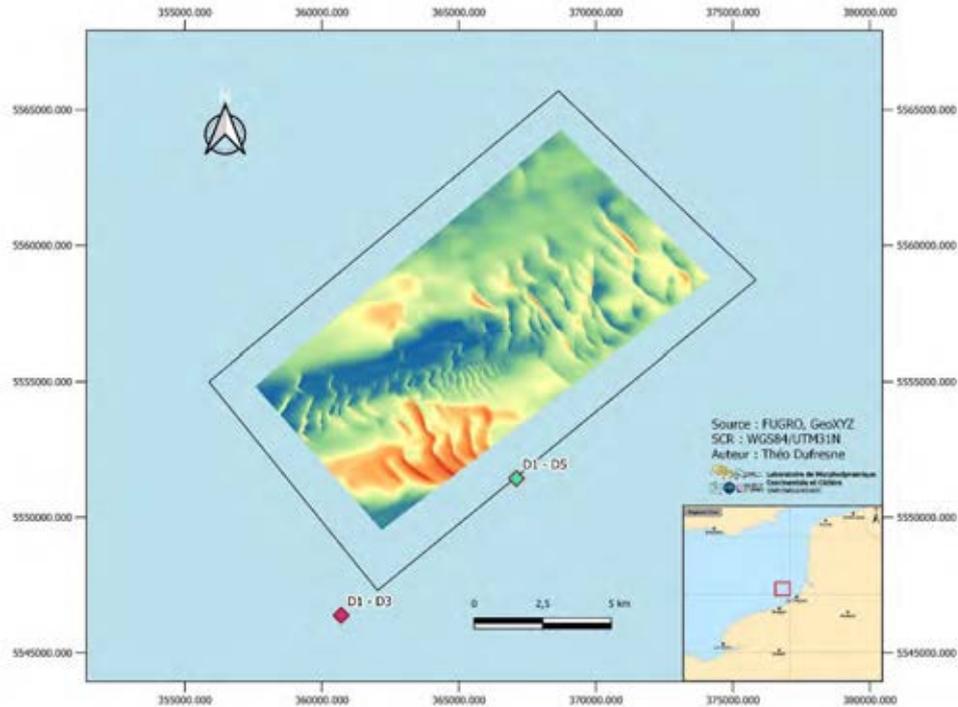


Figure 135 : Carte d'implantation des courantomètres par rapport aux données bathymétriques de 2018

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 ($D_{50}=3\text{mm}$) aux sables fins ($D_{50}=0,2\text{mm}$) en passant par des sables grossiers à moyens (D_{50} 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).

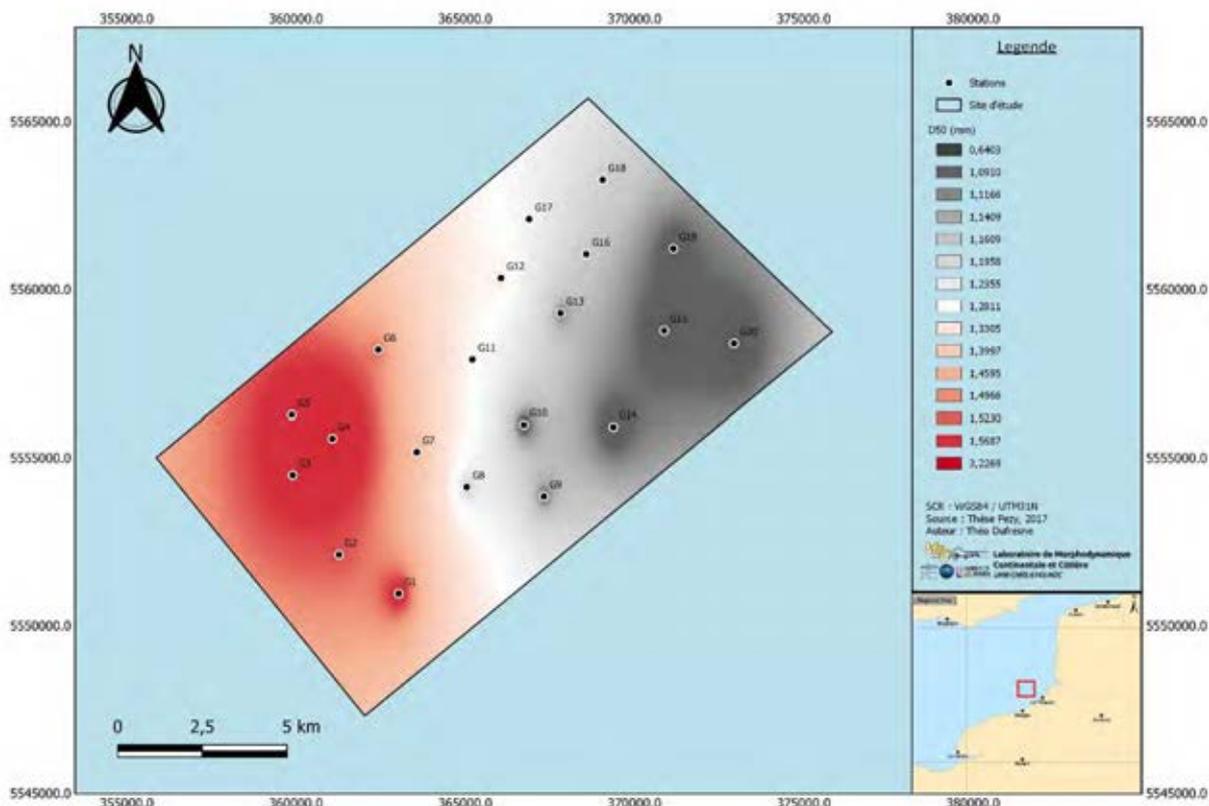


Figure 16 : Carte du D50 calculé selon une zonation spatiale des valeurs de chaque station (issue des données de la thèse de Pezy (2017))

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.

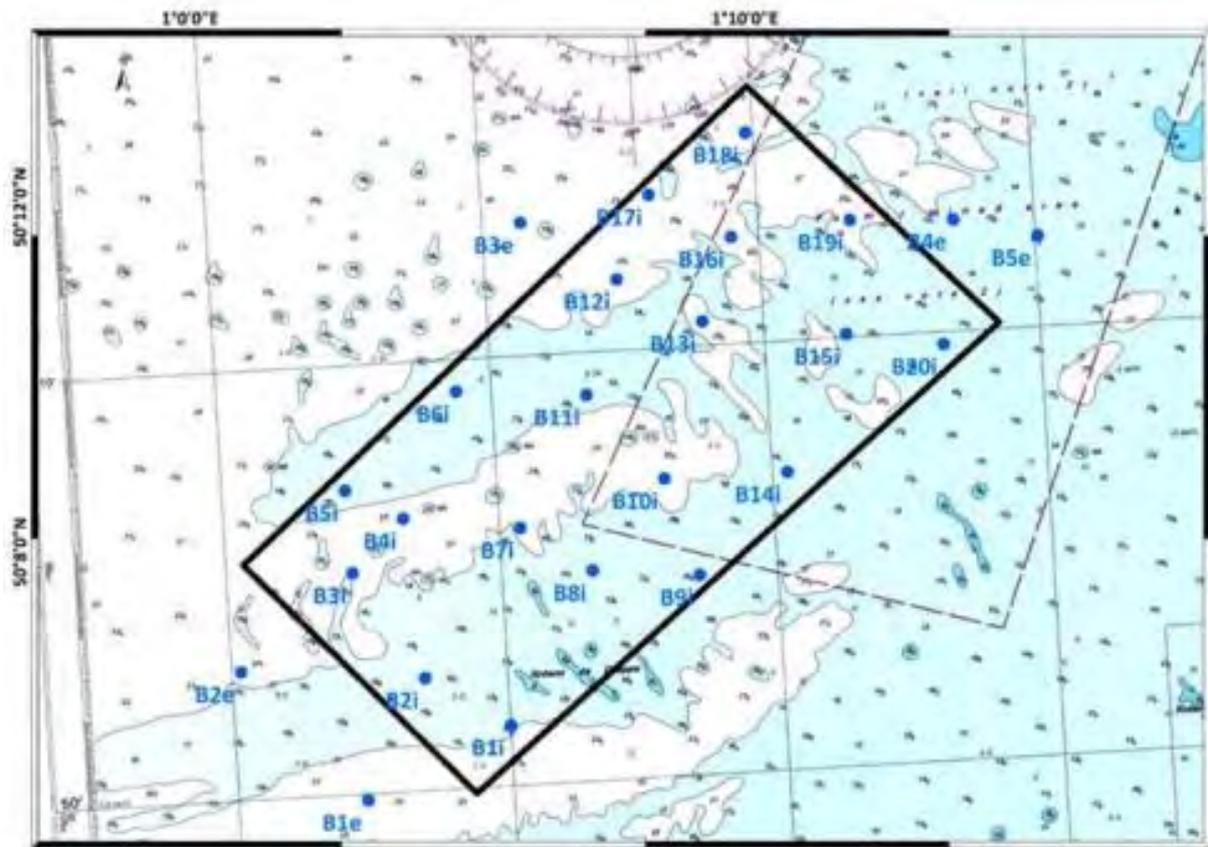


Figure 17 : Carte des stations de prélèvements bio-sédimentaires (Pezy 2017)

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).

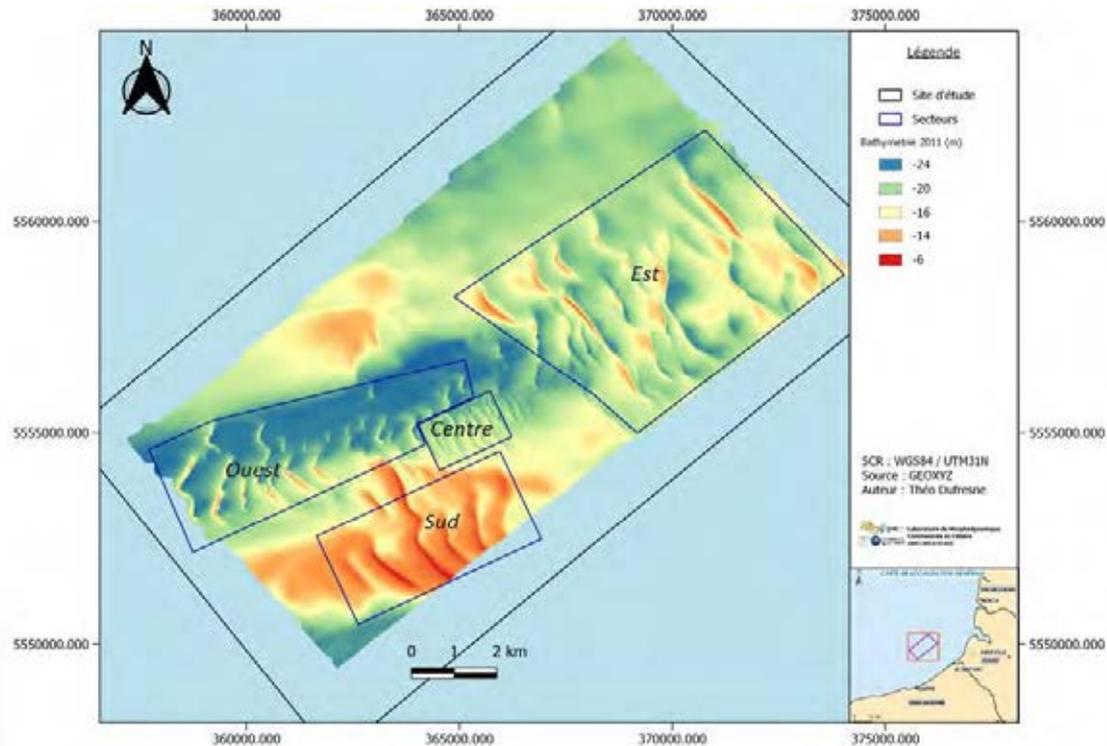


Figure 1814 : Secteurs analysés pour la récupération des paramètres physiques, représentés ici sur la bathymétrie de 2018

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 présentes 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 forçants 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.

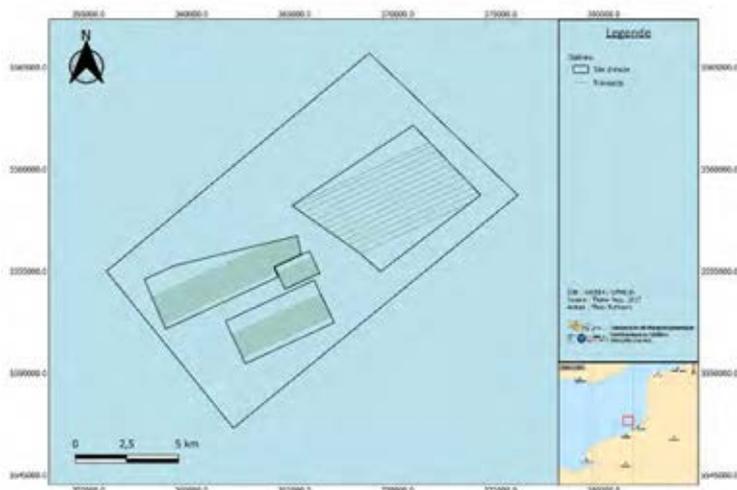


Figure 159 : Carte des transects par secteur générés sous QGIS

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.

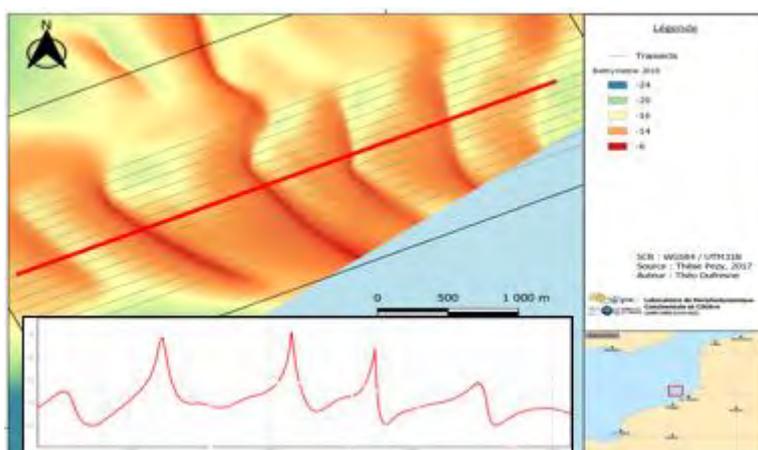


Figure 20 : Profil d'élévation du transect n°34 situé sur le secteur sud (bathymétrie de 2018)

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.

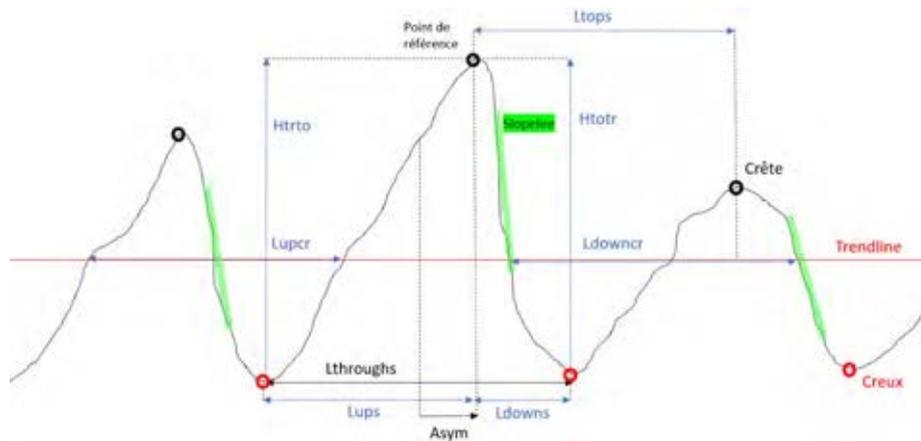


Figure 21 : Paramètres calculés par l'outil BTT (Asym : asymétrie de la dune, Htrto : hauteur du creux du flanc doux par rapport à la crête, Htoir : hauteur du creux du flanc raide par rapport à la crête, Ldowncr : largeur projetée entre deux pentes descendantes (sur la trendline), Lupcr : largeur projetée 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 contournant 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).

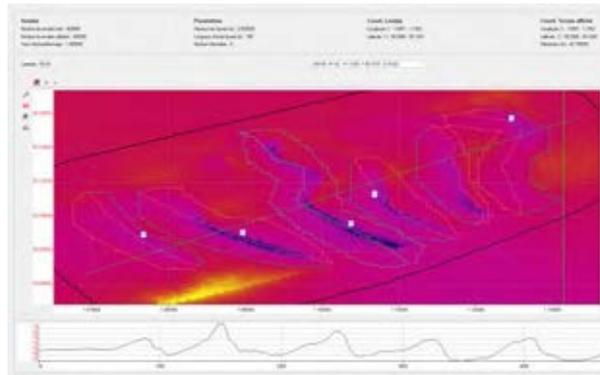


Figure 22 : Interface du logiciel Paramdunes représentant les dunes contourées automatiquement (point blanc : sommet de la dune)

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).

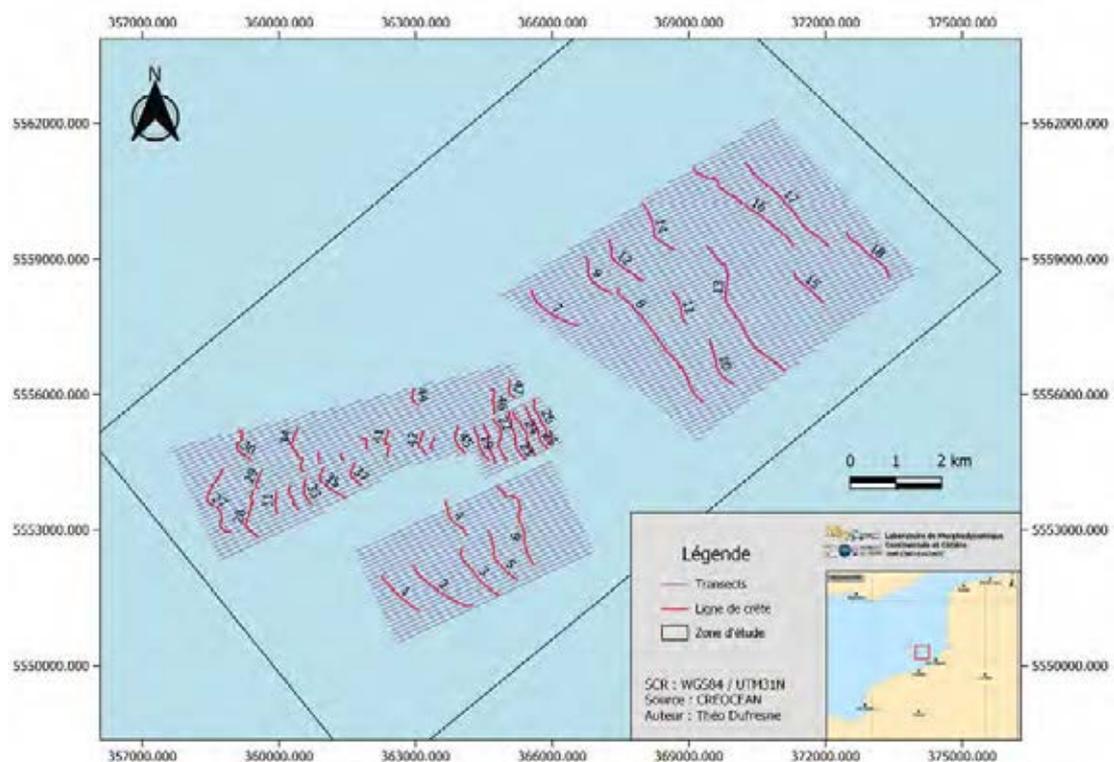


Figure 23 : Carte des lignes de crêtes et des transects par secteur

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" (Hoekstra et al., 2004)

$$Q_b = c \times H \times \left(\frac{L \times H}{2} \right) / (\lambda \times H) \times (1 - \Phi)$$

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

Où $V = (H * L) / 2$ Où $f = V / (H * \lambda)$

Avec :

- Q_b : 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 m^2)
- 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 (D_{50}) qui doit être situé entre 200 et $2000\mu m$, 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)

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

Avec :

- Q_b : quantité de sédiment charrié (en $m^3.m.s^{-1}$)
- ρ_s : 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 :

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

Avec :

- s : densité relative du sédiment (1,95)
- ν : 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 : $z_0 = k_s / 30$ (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/m³)
- 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 (k_s) 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 k_s 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 k_s 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 k_s sur l'ensemble de la chronique, différentes formules empiriques d'estimation du k_s 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 k_s 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 k_s 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)	7,17E-04	1,10E-01	5,91E-03	5,91E-03	[-1] à -4
$K_s = 1.1 \cdot Hr(1 - e^{-25Hr/Lo})$ (Van Rijn, 1984)	3,87E-03	9,76E-02	1,82E-01	5,72E-02	-1 à -3
$K_s = D50$ (Nikuradse in Van Rijn)	5,87E-08	6,57E-05	1,37E-04	3,37E-05	-4 à -8
$K_s = D50^3$ (Nikuradse in Van Rijn)	5,29E-07	1,10E-04	2,24E-04	5,82E-05	-4 à -7
$K_s = 8 Hr^2/Lo$ (Nielsen, 1992)	1,09E-04	3,38E-03	6,40E-03	1,95E-03	-3 à -4
$K_s = 27,7 Hr^2/Lo$ (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-sinusoidales, 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	Hc _d	H		V
Manuelle (Référence)	0,36	-7,40	-14,61	-14,15	188,3 7	525,2 2	0,3 6	713,5 9	578,4 0	886,4 4	732,4 2	7,2 1	6,7 5	7,0 9	2529,1 7	0,49
BTT	0,46	-7,40	-14,61	-14,15	190,0 9	384,9 4	0,4 9	575,0 3	575,0 3	888,6 9	731,8 6	6,9 8	6,1 0	6,6 9	1923,1 0	0,39
Paramdunes	0,14	-6,95	-14,52	-14,08	280,1 4	371,2 3	0,7 5	650,3 9	547,7 5	497,8 7	522,8 1	7,1 3	7,0 2	9,6 3	3131,6 3	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 est :

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

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 a 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.

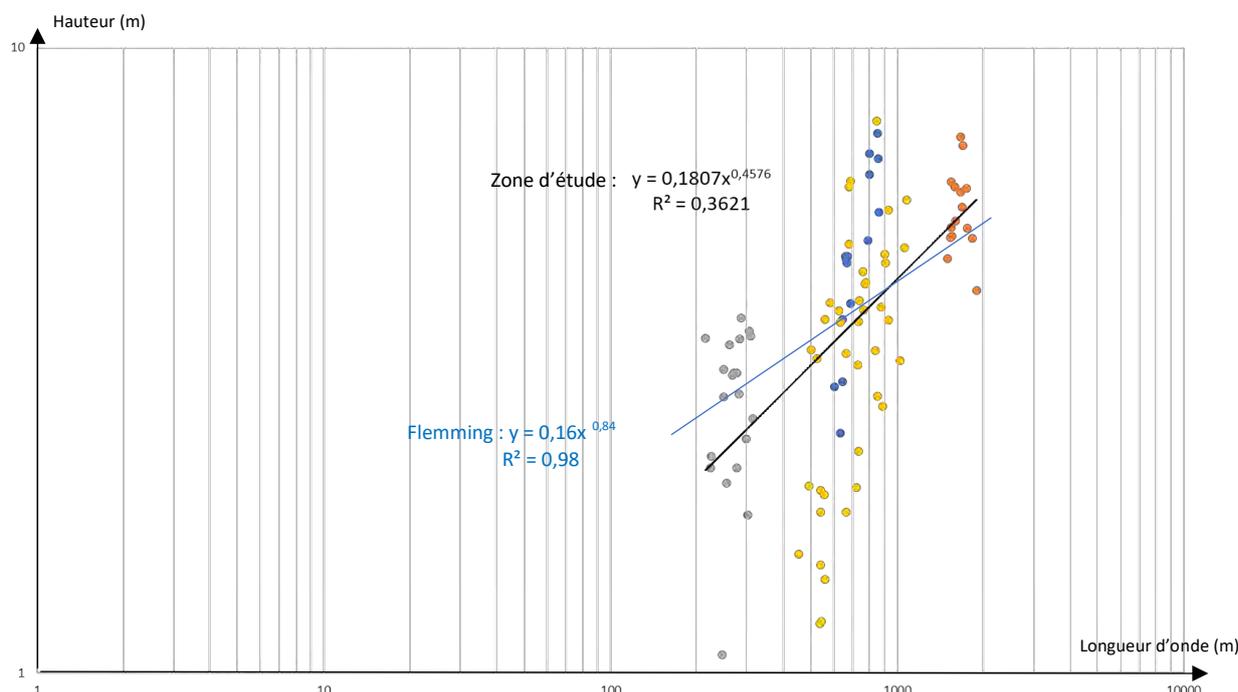


Figure 24 : Relation entre la hauteur des dunes et leur longueur d'onde pour l'ensemble des secteurs étudiés comparée à la relation de Flemming (1988) (sud : bleu, ouest : jaune, est : orange, centre : gris)

- 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 complètement 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 événements) (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 (m ²)	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 paraît la plus optimale pour l'étude (partie III.3.3.2.4.), soit $k_s = 8 H^2/\lambda$ (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 $7 \cdot 10^{-4}$

* Les valeurs de flux instantanés et cumulés sur un cycle semi-diurne sont donnés en t/m/an dans un souci 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 Hr ² /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 augmentent 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 courants 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 souci 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 montrer 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.

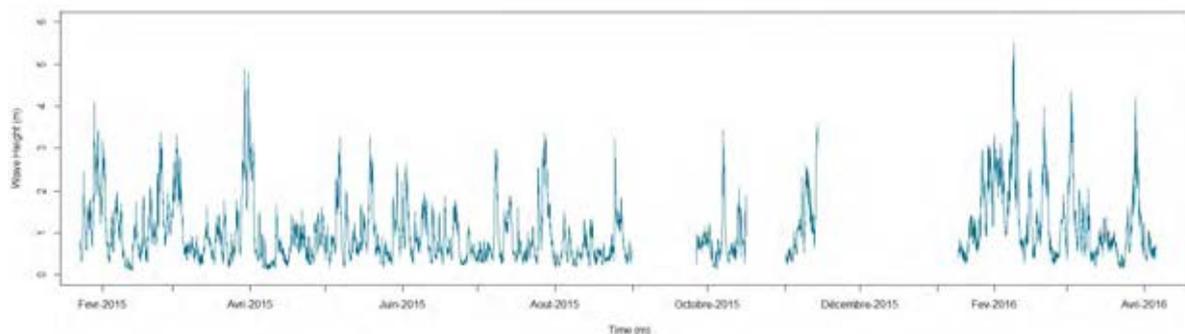


Figure 25 : Hauteur de vagues enregistrées entre fin janvier 2015 et mi-août 2016 (issu de l'AWAC D1-D5)

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 m³.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 ; k_s = 8 H²/λ) utilisée pour les calculs de flux instantanés donne des résultats élevés (une moyenne de 800 m³.m.an⁻¹ contre 29 m³.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
Sud	31,64	83,84	27,98 à 131,08 m3/m/an soit 74,14 à 347,36 t/m/an
Est	47,47	125,81	
Centre	46,53	123,31	
Ouest	41,39	109,70	
			Flux moyen
			1,58 à 108,17 t/m/an

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 $3,72 \pm 0,99$ et $9,77 \pm 4,90$ 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'approcher 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 $m^3.m.an^{-1}$. 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 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 au package « factoshiny » (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.

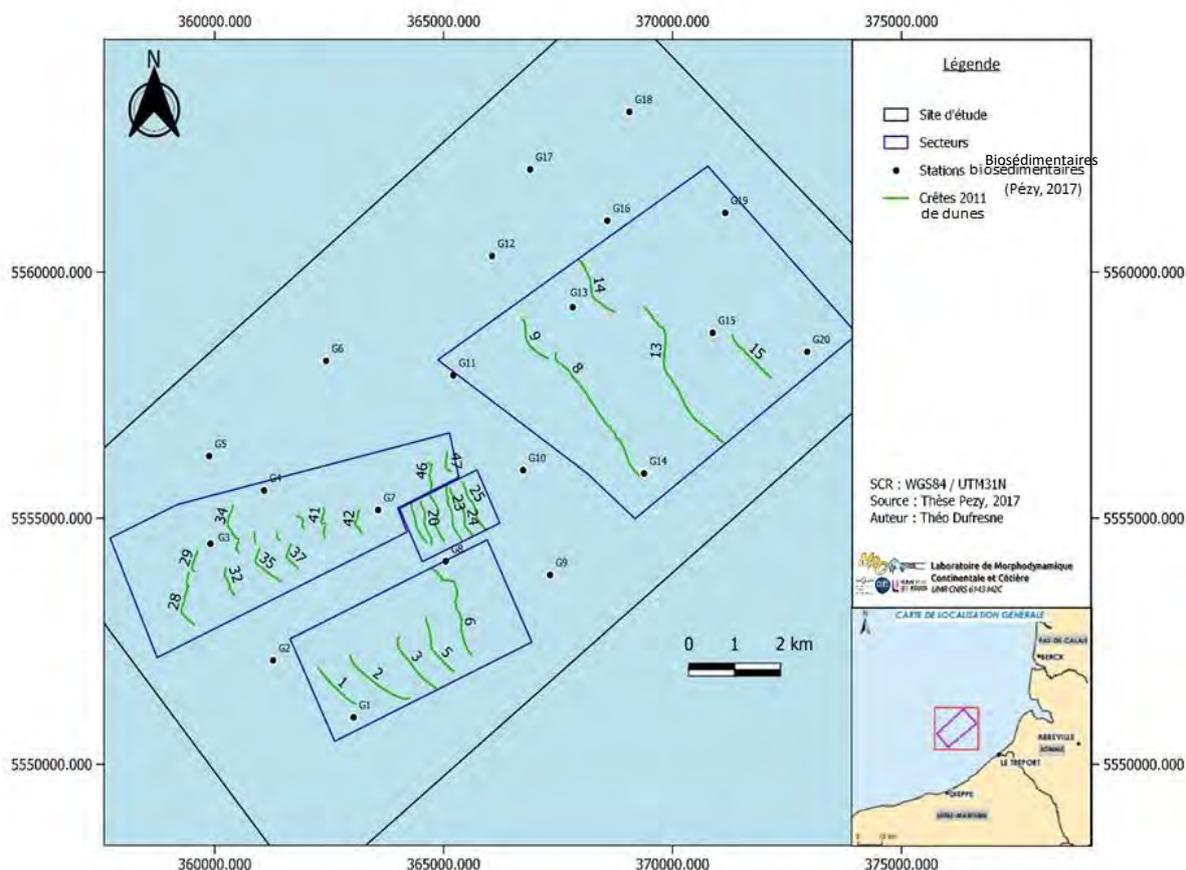


Figure 26 : Carte des stations biosédimentaires (Pezy, 2017) et des lignes de crêtes de 2011 dans le secteur d'étude. Les numéros des stations bio-sédimentaires utilisés dans l'analyse et sur les figures suivantes sont différents de ceux indiqués sur cette figure.

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.

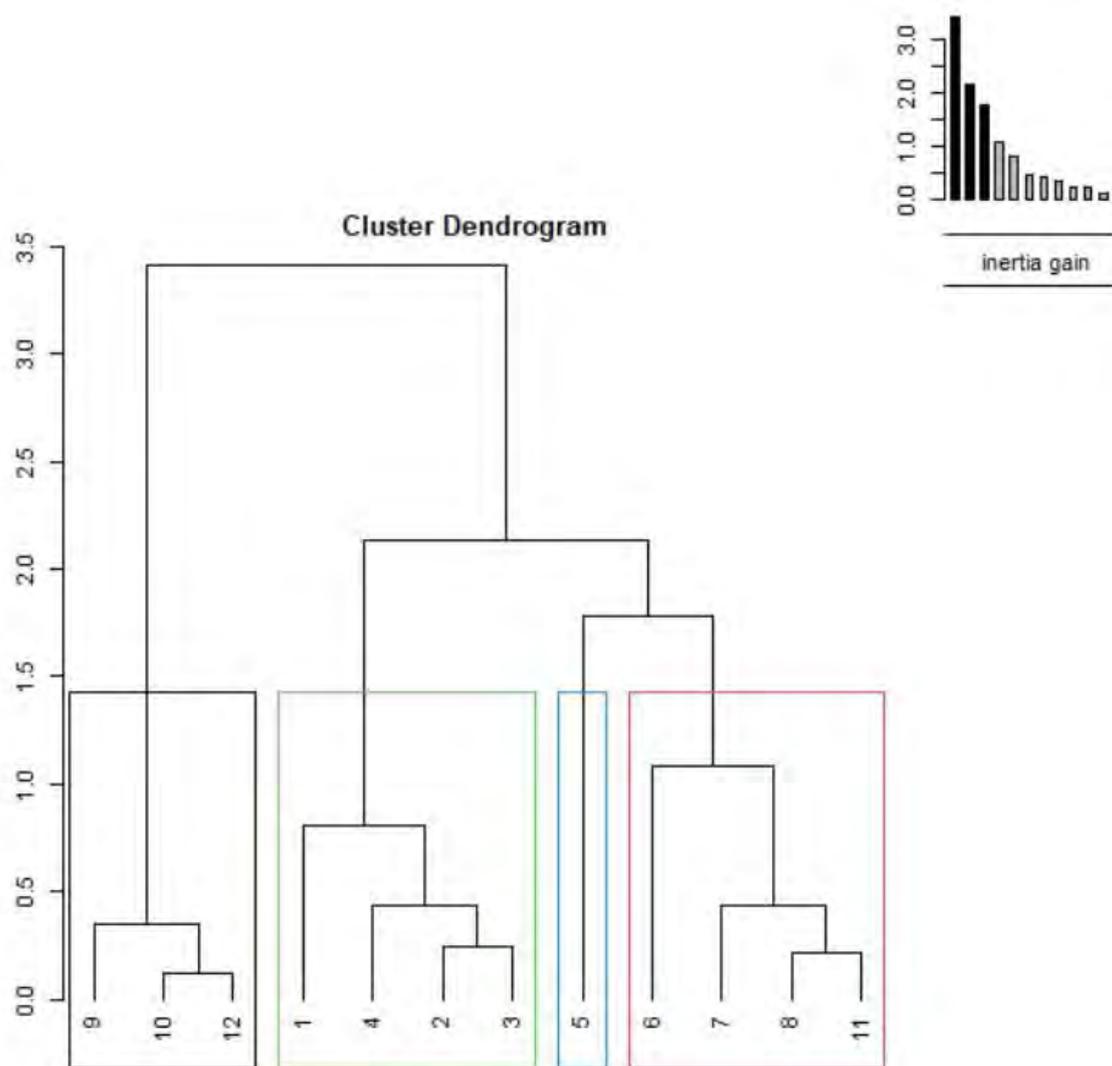


Figure 27 : Arbre hiérarchique des individus (dunes) de la zone d'étude selon la similarité de leurs variables (les nombres correspondent aux 12 dunes numérotées selon leur succession dans le fichier d'analyse)

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.

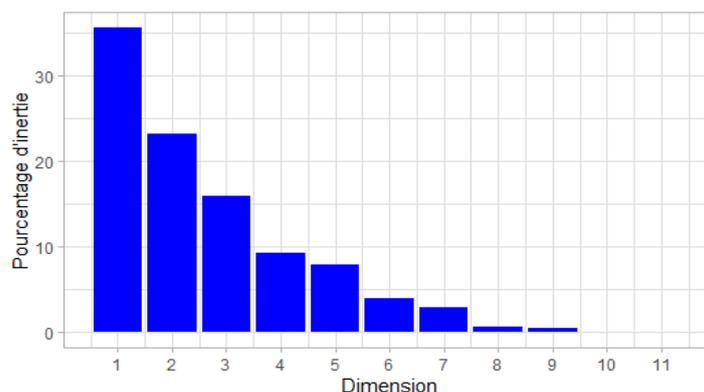


Figure 28 : Décomposition de l'inertie totale sur l'ensemble des variables et individus

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-corrélée avec leur surface transversale ;
- Les flux 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).

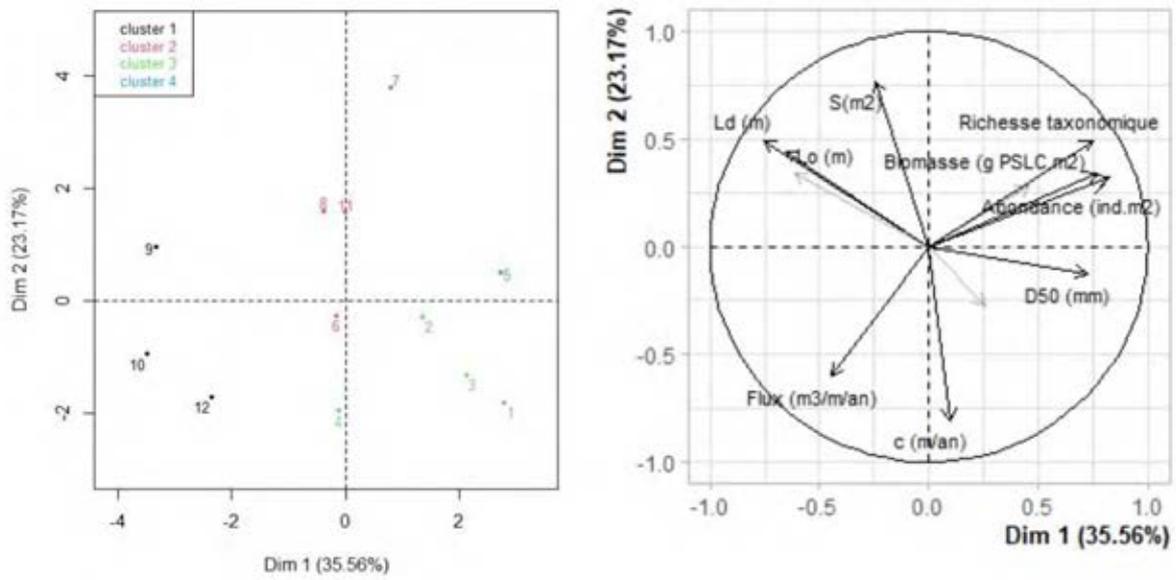


Figure 29 : Projection des individus (gauche) et des variables (droite) dans le plan factoriel F1-F2 obtenu par l'ACP. Clusters 1 à 4 : classes 1 à 4.

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 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 futures campagnes « 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 croître sa biomasse (Pezy, 2017). Par exemple, l'amande de mer (*Glycymeris glycymeris*) et la palourde rose (*Politapes 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 morphodynamique 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 ces 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 acquises 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 $3,72 \pm 0,99$ et $8,79 \pm 4,43$ 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 ; Lebrech 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 structures, 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. *Noröis*, 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. Thèse 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. Thèse 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., Larroude 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'Ecologie (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'étude 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)

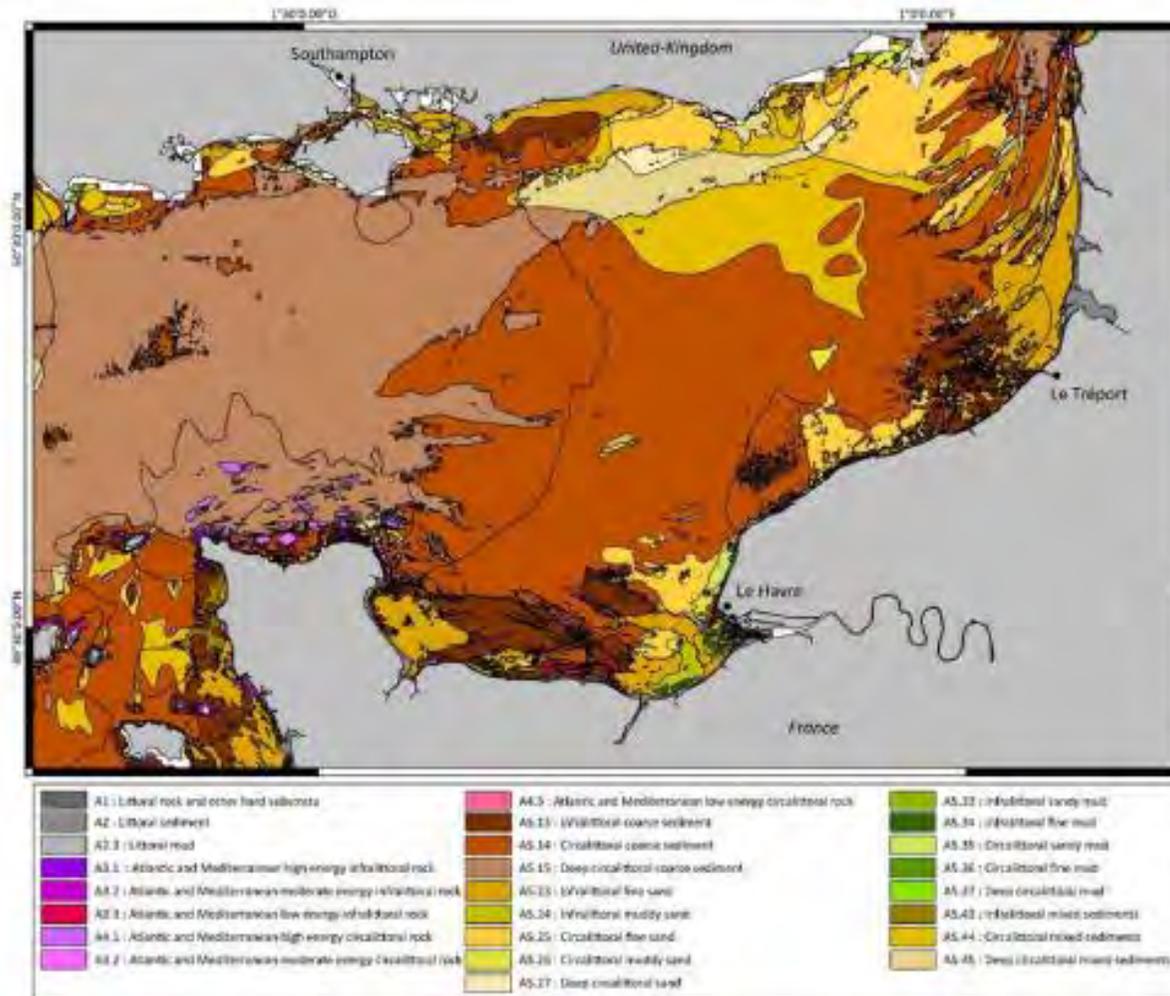
Annexe H : Méthodologie d'extraction des lignes de crêtes sous le logiciel Paramdunes

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)

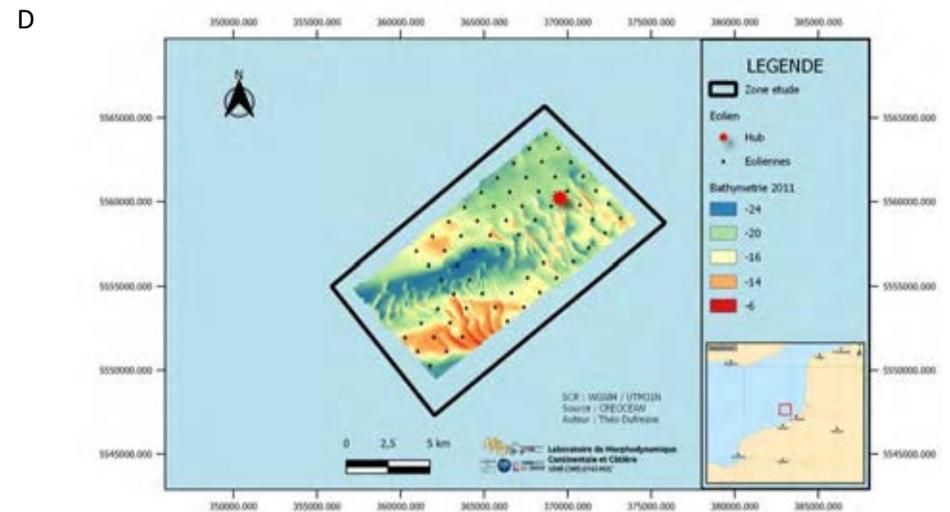
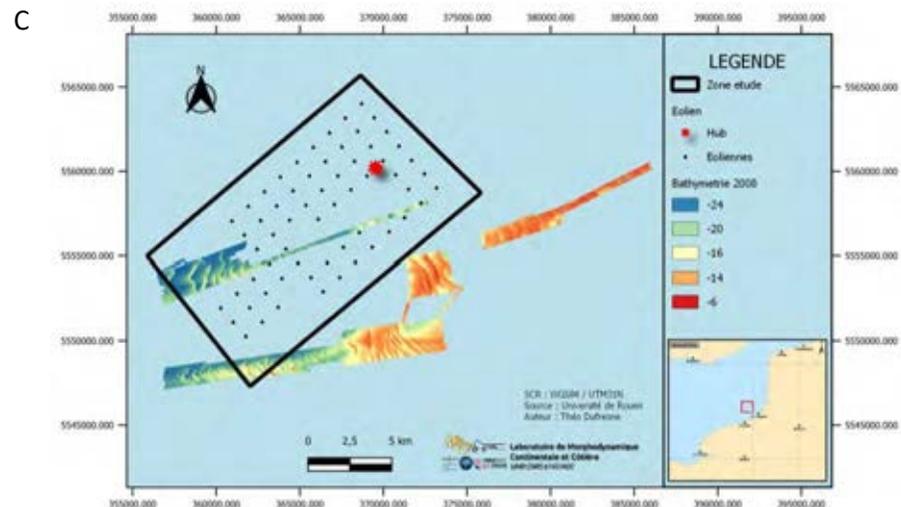
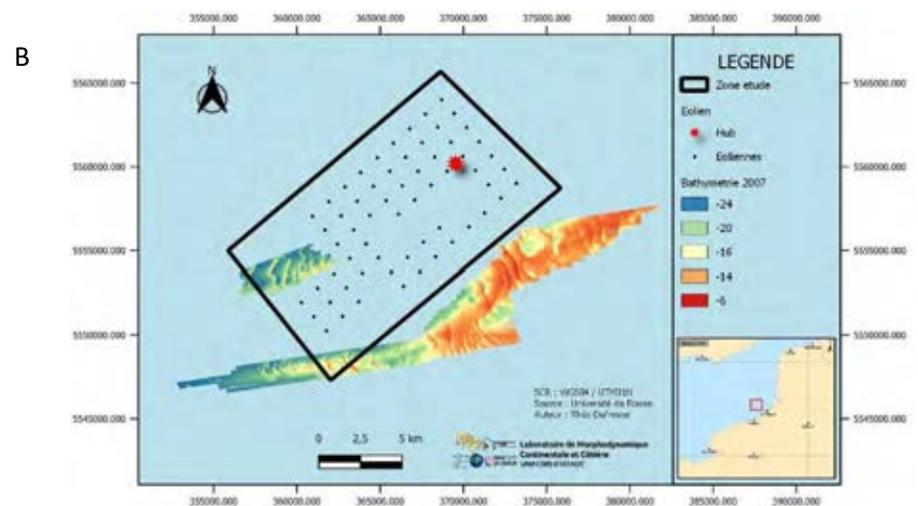
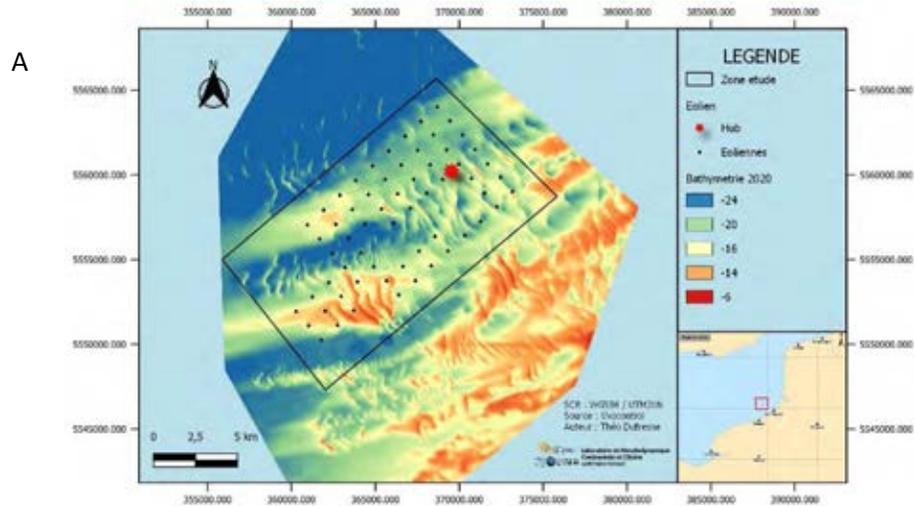


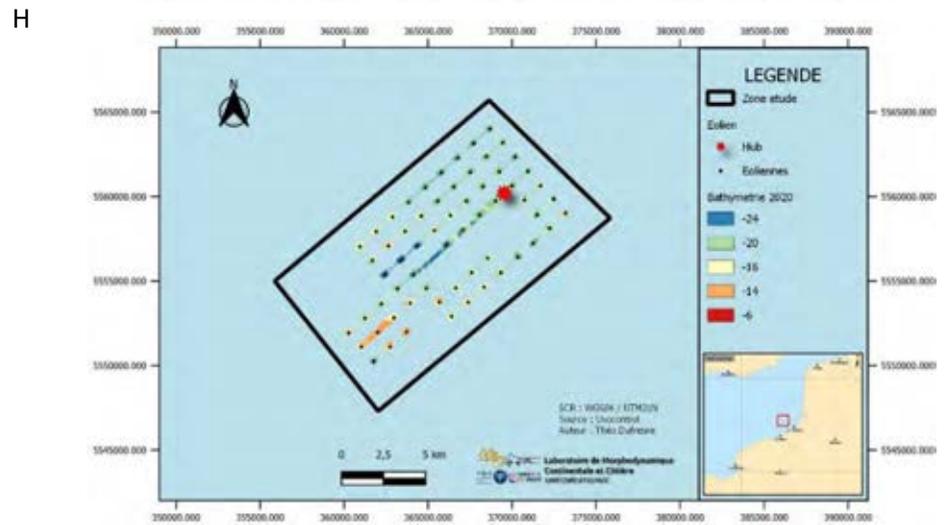
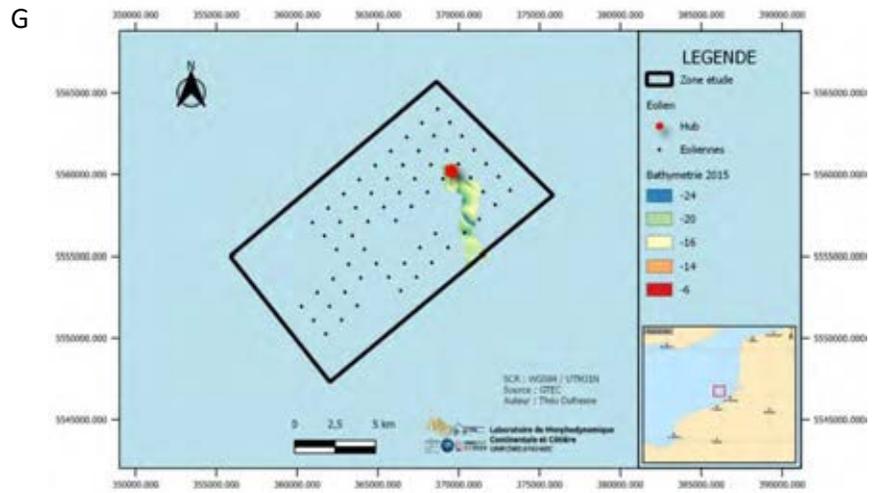
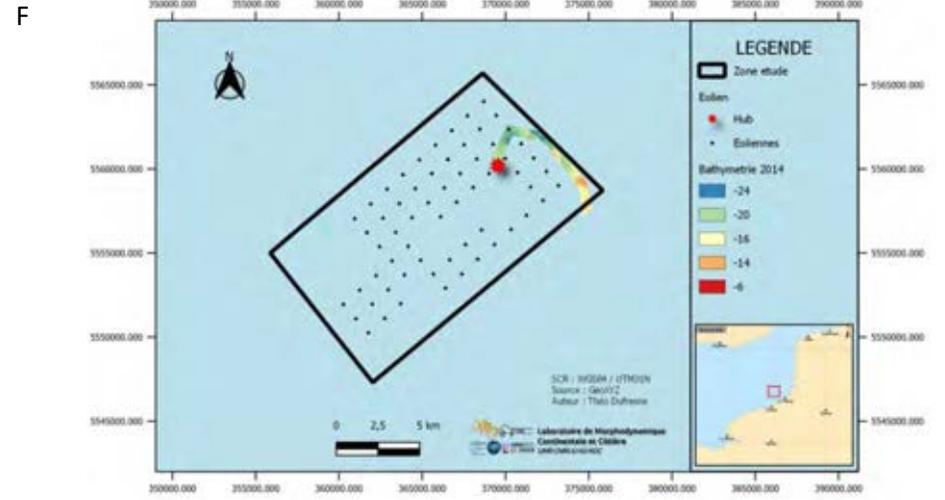
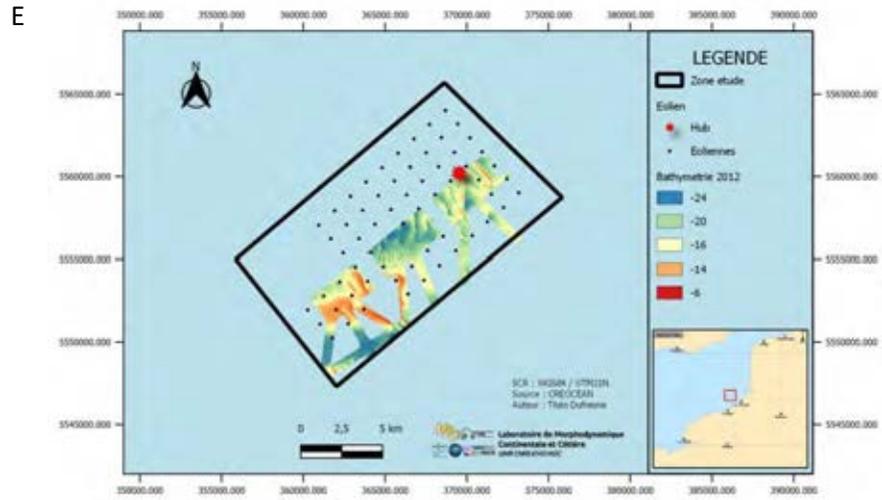
Annexe B : Classification de Larssonner (1982)

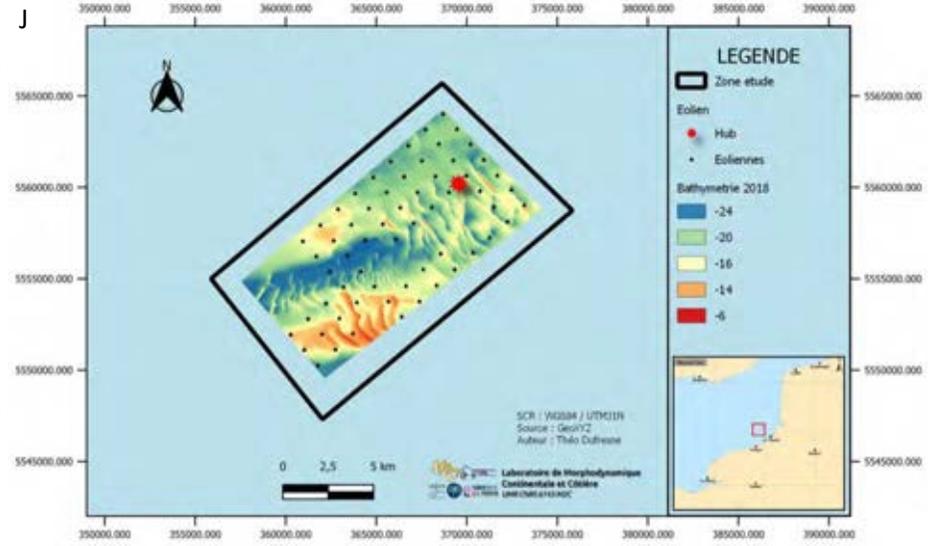
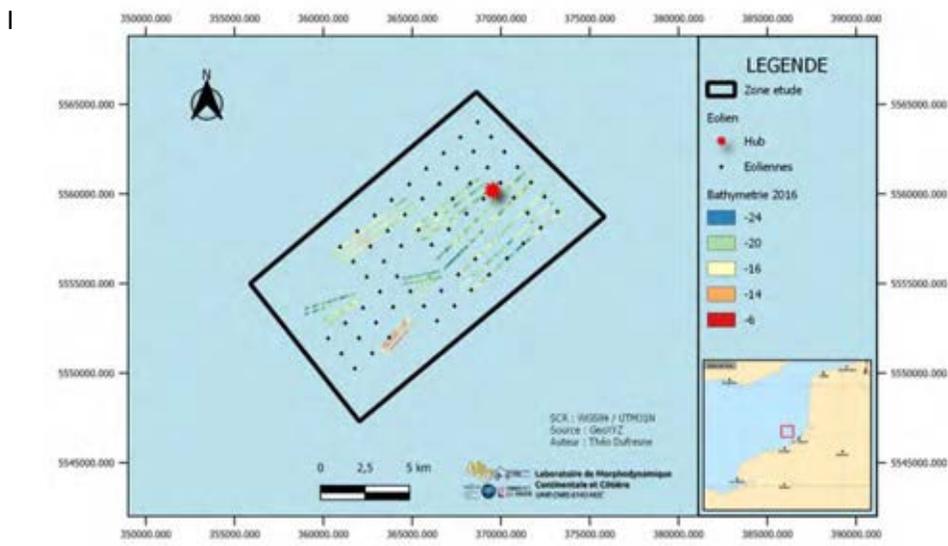
SUBDIVISIONS PRINCIPALES	CAILLOUTIS OU COQUINITES $L < 5\% - GAL + COQ \geq 50\%$		GRAVIERS $L < 5\% - GAL + COQ < 50\%$ $Md \geq 2mm$		SABLES $L < 5\% - S + L \geq 50\% - Md < 2mm$					SÉDIMENTS VASEUX $L \geq 5\%$		
	CAILLOUTIS LITHOCLASTIQUES		GRAVIERS LITHOCLASTIQUES		SABLES LITHOCLASTIQUES					SÉDIMENTS VASEUX		
SÉDIMENTS LITHOCLASTIQUES calcaire < 30%	$GAL + COQ \geq 70\%$	$GAL + COQ < 70\%$	$GAL + COQ \geq 15\%$	$GAL + COQ < 15\%$	$15\% < Sup. \# 2mm < 50\%$		$Sup. \# 2mm < 15\%$ FRACTION DOMINANTE			$L < 25\%$	$25\% \leq L < 75\%$	$L \geq 75\%$
	CL1 _a C.lith.	CL1 _b C. litho-graveleux (sable-graveleux)	GL1 _a Gr. litho-calcaireux (coquillier)	GL1 _b Gr. lith.	$GAL + COQ > GR$ S.litho.cal. coquillier	$GR > GAL + COQ$ S.litho. graveleux	$Sup. \# 0,5mm$ S.litho. grossier	$de 0,2 \# 0,5mm$ S.litho. fin	$de 0,05 \# 0,2mm$ Sablem. litho.	Séd. (sable) litho-vaseux (litho-argileux) Ⓞ	Vase (litho-arg.) sableuse (grav. ou cal.) Ⓞ	Vase (litho-argileux) Ⓞ
SÉDIMENTS LITHO-BIOCLASTIQUES 30% ≤ calcaire < 50%	$GAL + COQ \geq 70\%$	$GAL + COQ < 70\%$	$GAL + COQ \geq 15\%$	$GAL + COQ < 15\%$	$15\% < Sup. \# 2mm < 50\%$		$Sup. \# 2mm < 15\%$ FRACTION DOMINANTE			$L < 25\%$	$25\% \leq L < 75\%$	$L \geq 75\%$
	CL2 _a C.litho-bio coquillier	CL2 _b C.litho-bio graveleux (sable-grav.)	GL2 _a Gr. litho-bio coquillier ou calcaireux	GL2 _b [*] Gr. litho-bio.	$GAL + COQ > GR$ S.litho-bio calcaireux ou coquillier	$GR > GAL + COQ$ S.litho-bio graveleux	$Sup. \# 0,5mm$ S.litho-bio grossier	$de 0,2 \# 0,5mm$ S.litho-bio fin	$de 0,05 \# 0,2mm$ Sablem. litho-bio.	Séd. (sable) litho-bio. vaseux (litho-argileux) Ⓞ	Marne sableuse Ⓞ (grav. ou cal.) ou coq.	Marne Ⓞ
SÉDIMENTS BIO-LITHOCLASTIQUES 50% ≤ calcaire < 70%	$COQ + GAL \geq 70\%$	$COQ + GAL < 70\%$	$COQ + GAL \geq 15\%$	$COQ + GAL < 15\%$	$15\% < Sup. \# 2mm < 50\%$		$Sup. \# 2mm < 15\%$ FRACTION DOMINANTE			$L < 25\%$	$25\% \leq L < 75\%$	$L \geq 75\%$
	CBI _a Coq.lith.	CBI _b Coq.litho-grav. (sable-grav.)	GBI _a Gr. bio.litho.coquillier (caillouteux)	GBI _b [*] Gr. litho-bio.	$COQ + GAL > GR$ S.bio.litho. calcaireux	$GR > COQ + GAL$ S.bio. litho-graveleux	$Sup. \# 0,5mm$ S.bio. litho. grossier	$de 0,2 \# 0,5mm$ S.bio. fin	$de 0,05 \# 0,2mm$ Sablem. bio-litho.	Séd. (sable) bio-litho. vaseux (litho-argileux) Ⓞ	Marne calcaire sableuse (arg. ou cal. ou coq.)	Marne calcaire
SÉDIMENTS BIOCLASTIQUES calcaire ≥ 70%	COQUINITES		GRAVIERS BIOCLASTIQUES		SABLES BIOCLASTIQUES					SÉDIMENTS CALCAIRES VASEUX		
	$COQ + GAL \geq 70\%$	$COQ + GAL < 70\%$	$COQ + GAL \geq 15\%$	$COQ + GAL < 15\%$	$15\% < Sup. \# 2mm < 50\%$		$Sup. \# 2mm < 15\%$ FRACTION DOMINANTE			$L < 25\%$	$25\% \leq L < 75\%$	$L \geq 75\%$
CB2 _a Coquinite	CB2 _b Coq. gravet. (sable-grav.)	GB2 _a Gr. bio.coquillier	GB2 _b [*] Gr. bio.	$COQ > GR$ S.bio-gravet. coquillier	$GR > COQ$ S.bio. graveleux	$Sup. \# 0,5mm$ S.bio. grossier	$de 0,2 \# 0,5mm$ S.bio. fin	$de 0,05 \# 0,2mm$ Sablem. bio.	Séd. (sable) bio-vaseux (litho-argileux) Ⓞ	Boue calcaire sableuse (grav. ou coq.)	Boue calcaire	

GAL = Galets, COQ ≥ 20mm = Coquilles, GR = Gravier, S = Sables, L = Lutites.
 Ⓞ Sédiments litho-argileux, argilo-silteux ou argileux.
^{*} Sédiments pouvant en outre être qualifiés de zoogènes (z) ou de phycogènes (p)

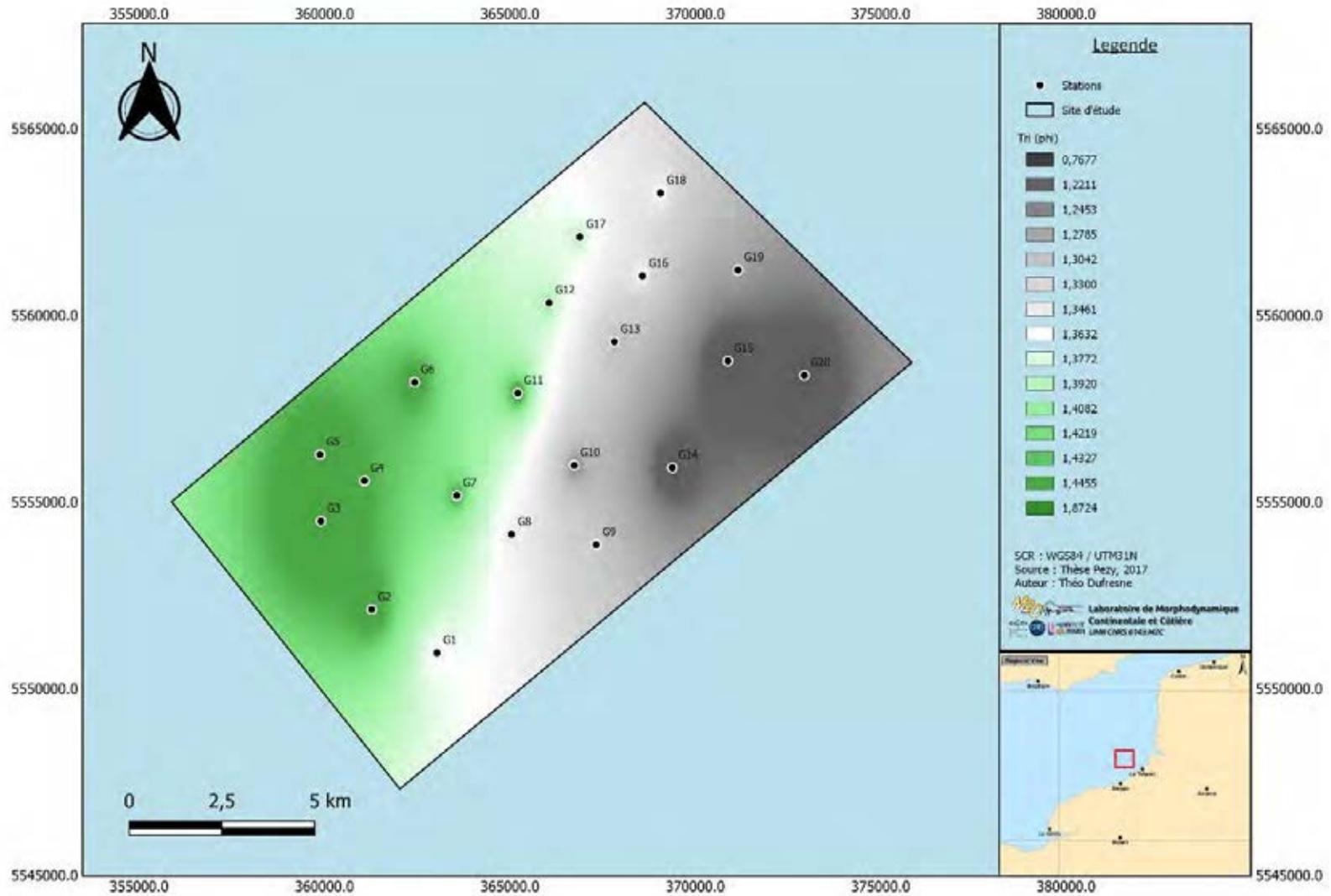
Annexe C : Cartes bathymétriques acquises pour l'étude (A : 1993, B : 2007, C : 2008, D : 2011, E : 2012, F : 2014, G : 2015, H : 2016, I : 2018, J : 2020)



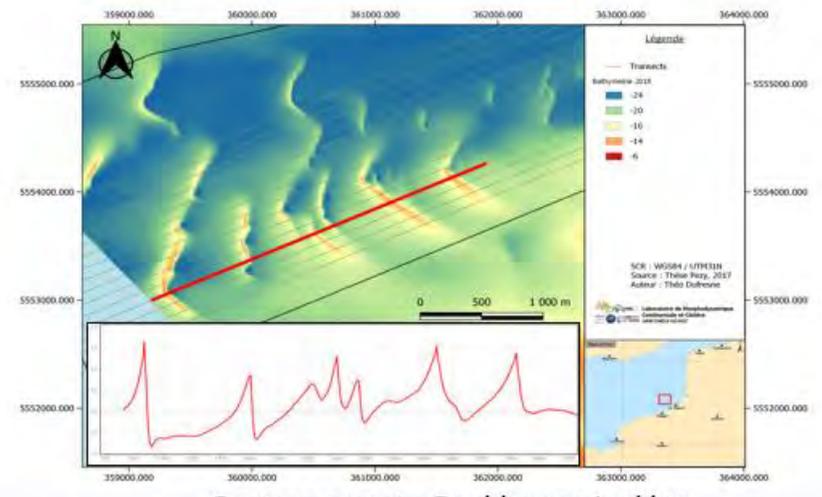
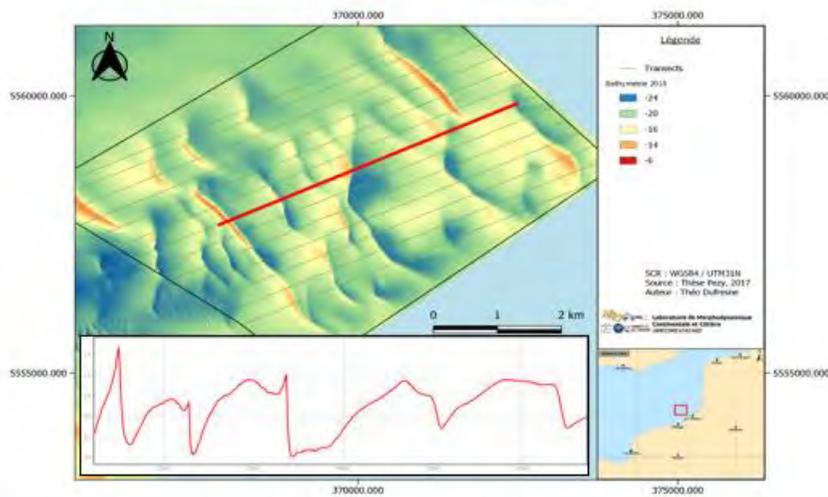
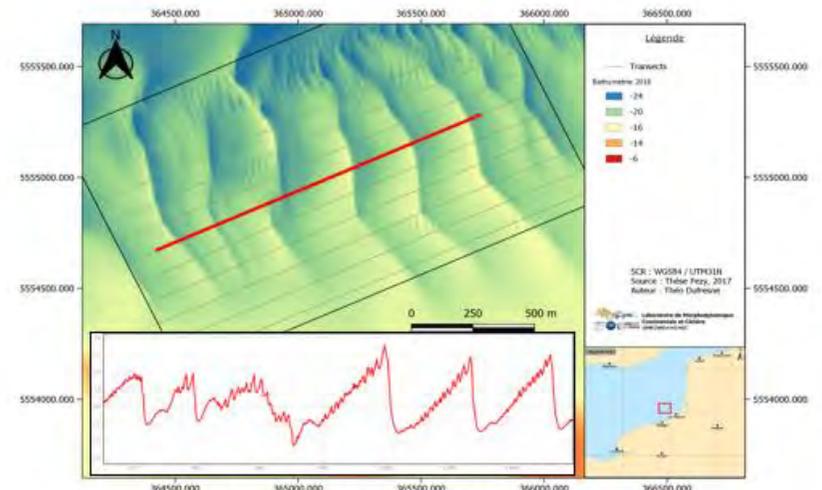
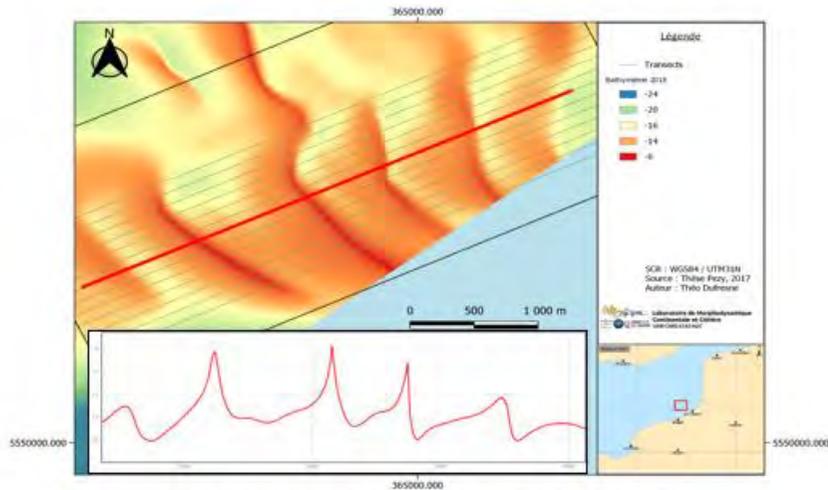




Annexe D : Carte du tri des grains issue des données de la thèse de Pezy (2017)



Annexe F : Morphologie par secteur avec profil d'élévation

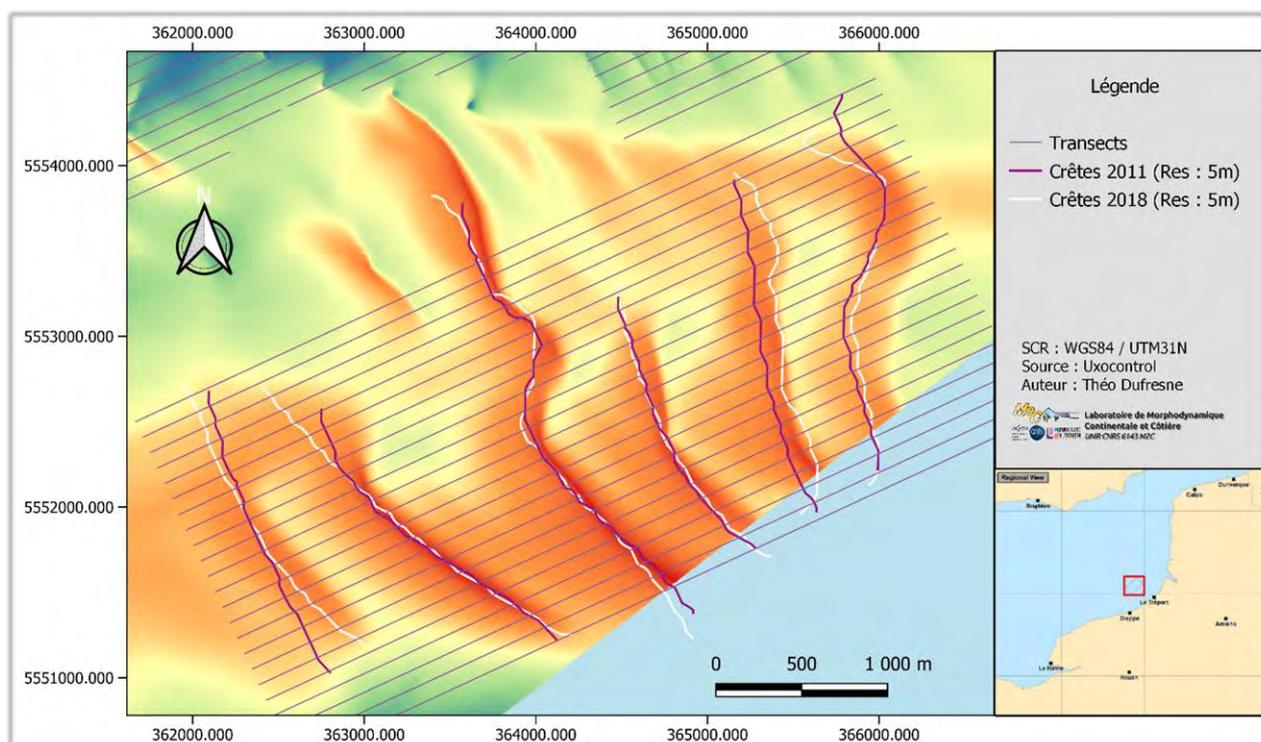


Annexe G : Moyenne des paramètres morphologiques et migrations par dune récupérés sur chaque dune (dans l'ordre : longueur d'onde, hauteur, facteur de forme, migration, longueur projetée du flanc raide, longueur projetée du flanc doux, sinuosité)

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	

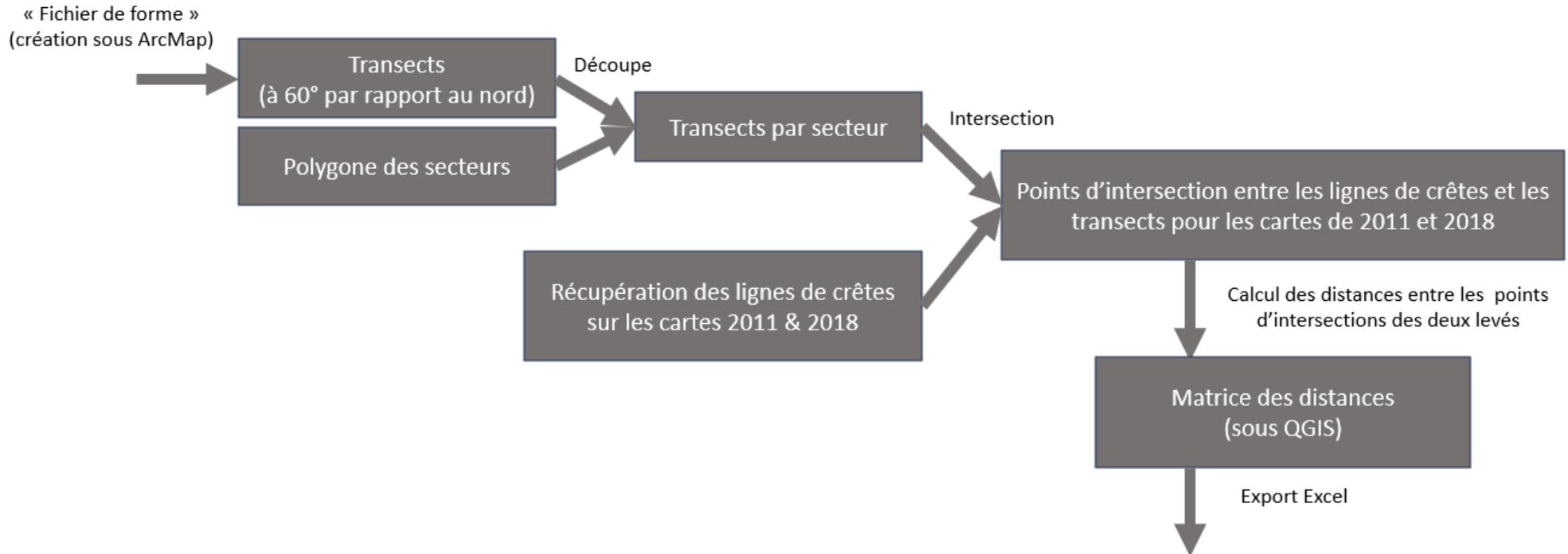
Annexe H : Méthodologie d'extraction des lignes de crêtes sous le logiciel Paramdunes

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).



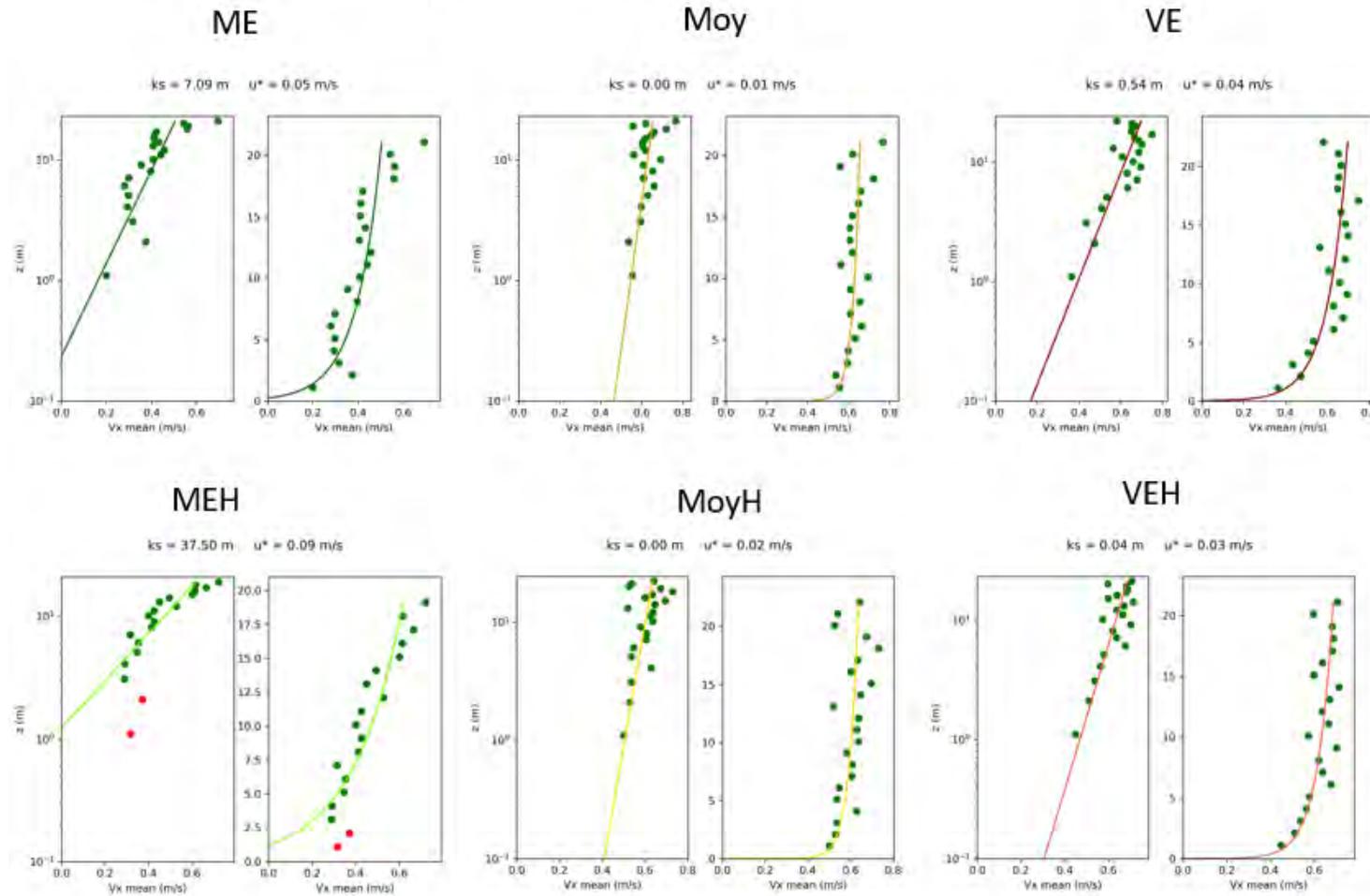
Carte des lignes de crête des cartes bathymétriques de 2011 et 2018, ressorties par le logiciel Paramdunes retranscrites sur QGIS

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

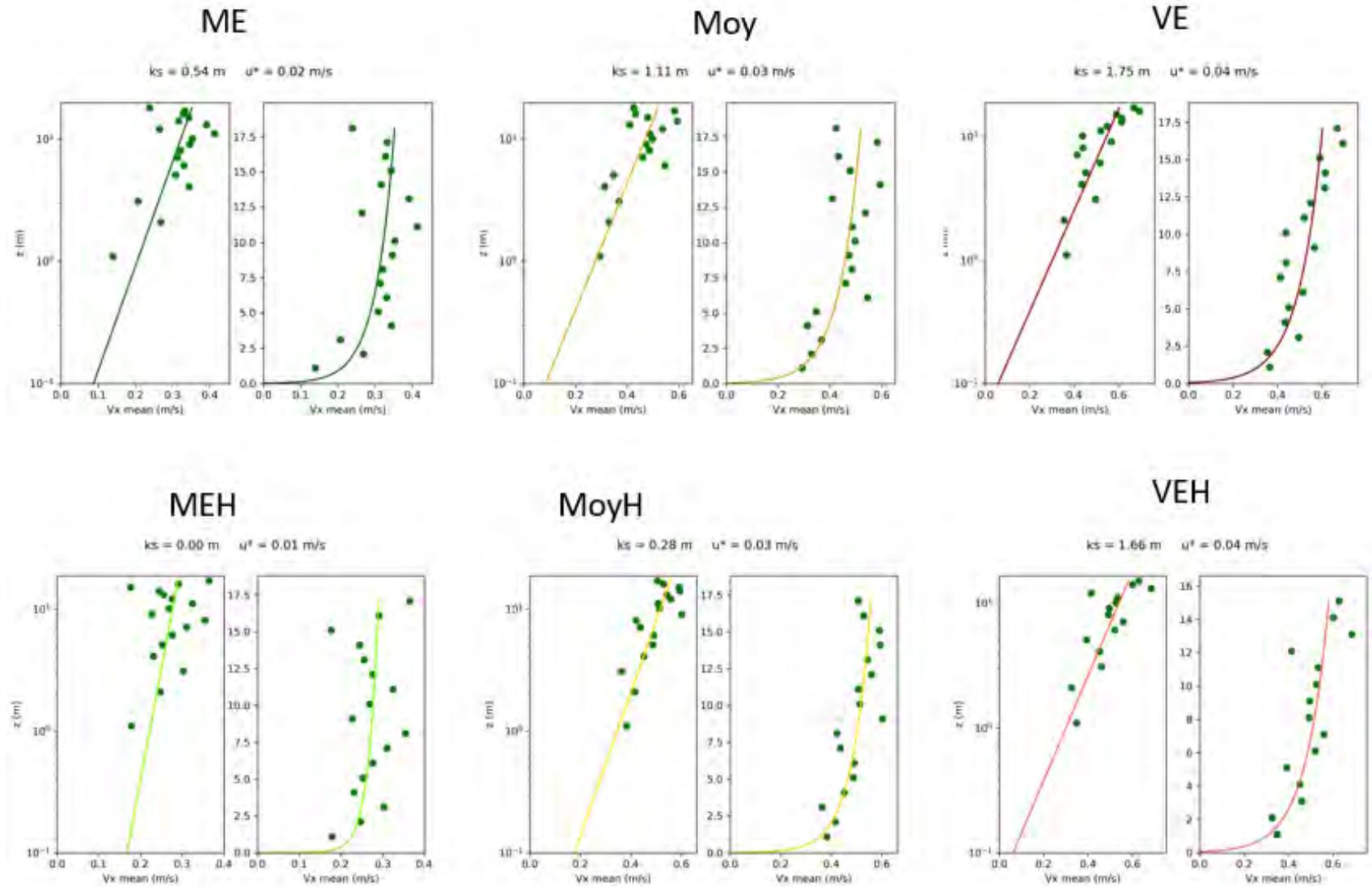


Annexe J : Régression linéaire des vitesses de courant selon la hauteur sur la colonne d'eau sur différentes conditions de marée à un instants t (A : pour la pointe de flot, B : pour la pointe de jusant, C : date de récupération des conditions hydrodynamiques) (ME : mortes-Eaux, MEH : mortes-eaux avec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

A



B



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)

