



Mémoire de Master 2

Écologie trophique des mammifères et oiseaux marins en Manche Est avant implantation d'un parc éolien

Rédigé par Chloé Malirat

Université de Bordeaux

16 janvier au 16 juin 2023

Encadrée par : Ludivine Martinez, responsable de Cohabys



*« Assis comme un enfant sur le rivage,
regardons la mer avec son cœur, avec ses rêves, avec insouciance,
allons la renifler, sentir sa puissance et son infinie liberté,
l'écouter en paix et partager avec elle la magie de la vie qui est née de ses eaux. »*

Jean-Louis Étienne, extrait du livre *Inventer sa vie*

RÉSUMÉ

La Manche est un espace maritime fortement exposé aux pressions anthropiques, entre le trafic maritime, la pêche, l'extraction de granulats et, depuis quelques années, l'implantation progressive de parcs éoliens en mer. Cette étude se concentre sur l'analyse du réseau trophique de la Manche Est avant la mise en place du parc éolien de Dieppe-Le Tréport en 2024 afin d'établir un état de référence des relations alimentaires entre les espèces de mammifères et d'oiseaux marins dans cette zone. Comprendre le fonctionnement du réseau trophique est essentiel pour mettre en évidence les relations entre espèces (compétition, prédation) et les ressources qui soutiennent la mégafaune pour prédire ainsi qu'anticiper l'impact de perturbations. Pour ce faire, l'étude du régime alimentaire des espèces présentes dans la zone est nécessaire. L'utilisation des isotopes stables du carbone et de l'azote sont des outils précieux et répandus pour l'étude de l'écologie alimentaire des mammifères et des oiseaux marins. Les résultats apportent une perspective sur la manière dont les espèces se positionnent les unes par rapport aux autres et révèlent des relations possibles de compétition entre les espèces de la mégafaune marine dans la région, en se basant sur le recouvrement des ellipses isotopiques. Ainsi, la ressource en proies (qu'elles soient benthiques, démersales ou pélagiques) soutient une communauté de prédateurs diversifiée. Pour cette étude, des échantillons de muscles pour les mammifères marins et de sang pour les oiseaux marins ont été préparés et analysés. Ainsi, les valeurs obtenues de $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$ de chaque individu, 136 au total pour 17 espèces, offre les premières clés de compréhension de l'organisation trophique des compartiments de la mégafaune marine en Manche Est et permet la comparaison avec des valeurs isotopiques de proies potentielles trouvées dans la littérature. Ces connaissances serviront de base pour le suivi de l'écosystème avant et après l'installation du parc éolien.

Mots-clés : Écologie trophique, mammifères marins, oiseaux marins, isotopes stables, proies, Manche Est

SUMMARY

The English Channel is a maritime area highly exposed to anthropogenic pressures, including maritime traffic, fishing, aggregate extraction, and, more recently, the progressive establishment of wind farms. This study focuses on the analysis of the trophic network in the Eastern English Channel prior to the establishment of the Dieppe-Le Tréport offshore wind farm in 2024, aiming to establish a baseline of the feeding relationships between marine mammals and bird species in this area. Understanding the functioning of the trophic network is essential for elucidating species interactions (competition, predation) and the resources supporting the megafauna, in order to predict and anticipate the impact of disturbances. To accomplish this, studying the dietary habits of species present in the area is necessary. The use of stable isotopes of carbon and nitrogen is a valuable and widespread tool for studying the feeding ecology of marine mammals and seabirds. The results provide insights into how species position themselves relative to each other and reveal possible competitive relationships among marine megafauna species in the region, based on the overlap of isotopic ellipses. Thus, the prey resources (benthic, demersal, or pelagic) support a diverse predator community. For this study, muscle samples from marine mammals and blood samples from seabirds were collected and analyzed. Thus, the obtained $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values for each individual, a total of 136 individuals representing 17 species, provide the first key insights into the trophic organization of marine megafauna compartments in the Eastern English Channel and allow for comparison with isotopic values of potential prey found in the literature. This knowledge will serve as a baseline for monitoring the ecosystem before and after the installation of the wind farm.

Key words : Trophic ecology, marine mammals, seabirds, stable isotopes, prey, Eastern English channel

Répartition du temps de travail

Tâches	Périodes
Rédaction synthèse bibliographique des comportements et régime alimentaires des espèces de mammifères et d'oiseaux marins → 17 pages	Janvier / Février / Mars
Récupération des échantillons de muscle à Pélagis	26 et 27 janvier
Préparation des échantillons en laboratoire : <ul style="list-style-type: none">- 77 échantillons de plume- 30 échantillons de muscle- 29 échantillons de sang	7 Février au 6 Avril
Obtention des premiers résultats	7 mars
Obtention des derniers résultats	12 avril
Analyses statistiques	Mars / Avril
Écriture du rapport	Avril / Mai
Correction du rapport	Juin
Envoi du rapport	13 juin

Table des matières

I.	Introduction	1
II.	Matériels et Méthodes.....	4
a.	Le zone d'étude, le projet de Dieppe-Le Tréport et le projet Réseaux Trophiques	4
b.	L'importance des prédateurs marins supérieurs.....	5
c.	Les isotopes stables du carbone et de l'azote	7
d.	Choix des tissus à analyser	8
i.	Mammifères marins.....	8
ii.	Oiseaux marins.....	8
e.	Banque de données et échantillons disponibles	9
i.	Mammifères marins.....	9
ii.	Oiseaux marins.....	9
f.	Préparation des échantillons	10
i.	Muscle des mammifères marins.....	10
ii.	Sang des oiseaux marins	11
g.	Analyses isotopiques.....	11
h.	Analyses statistiques	12
III.	Résultats.....	13
a.	Mammifères marins	13
i.	Marsouin commun	13
ii.	Ellipses isotopiques et proies potentielles du marsouin commun et du phoque veau-marin	14
b.	Oiseaux marins	15
i.	Ellipses isotopiques	15
ii.	Ellipses isotopiques et proies potentielles.....	16
c.	Mises en lien des deux compartiments	17
IV.	Discussion	18
a.	Mammifères marins	18
b.	Oiseaux marins	20
c.	Limites	23
d.	Utilité des suivis et impacts de la construction d'un parc éolien	24
V.	Conclusion	24
	Bibliographie.....	26

Table des illustrations

Figure 1. Représentation générale d'un réseau trophique et des différentes communautés biologiques (Pershing & Stamieszkin, 2019).....	1
Figure 2. Zone du projet du parc éolien de Dieppe-Le Tréport et distribution géographique des individus échantillonnés pour l'étude.	4
Figure 3. Modifications de l'écologie (extrinsèque) et de la physiologie (intrinsèque) des espèces de niveaux trophiques supérieurs (UTL) suite à une altération de l'écosystème marin (Moore & Kuletz, 2019).	5
Figure 4. Schéma explicatif du principe d'utilisation des isotopes stables du carbone et de l'azote en milieu marin (Chouvelon, 2011).	7
Figure 5. Valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ et $\delta^{13}\text{C}$ des espèces de mammifères marins. Les valeurs correspondent à la moyenne \pm SD.	13
Figure 6. Moyennes et écart-types des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ pour les femelles et les mâles marsouin...	14
Figure 7. 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 $\Delta^{13}\text{C}$ et $\Delta^{15}\text{N}$	14
Figure 8. Valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ et $\delta^{13}\text{C}$ des espèces d'oiseaux marins. Les valeurs correspondent à la moyenne \pm SD.	15
Figure 9. Ellipses isotopiques des oiseaux marins.	16
Figure 10. 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 $\Delta^{15}\text{N}$	16
Figure 11. Représentation de la classification ascendante hiérarchique à liens moyens des espèces de mammifères et oiseaux marins.....	17
Figure 12. Valeurs isotopiques moyennes (\pm SD, en ‰) des espèces de mammifères marins, entre 2016 et 2022, et des espèces d'oiseaux marins, 2021.	17
Tableau 1. Résumé des informations propres aux espèces de mammifères marins échantillonnés.	9
Tableau 2. Résumé des informations propres aux espèces d'oiseaux marins échantillonnés.....	10

I. Introduction

Pour 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 (prédations, compétitions, commensalisme etc.) entre les organismes de l'écosystème étudié.

Ainsi, comprendre les liens trophiques qui unissent les différentes espèces permet de visualiser les relations et interactions qui existent entre elles. Depuis une quarantaine d'années, l'approche monospécifique traditionnelle s'est vue remplacée petit à petit par une approche holistique prenant en compte la complexité et le dynamisme des écosystèmes (Girardin et al., 2018). Ainsi, le terme de « chaîne trophique » a laissé sa place pour celui de « réseau trophique », dans la majorité des cas, donnant l'image d'un réseau interconnecté par les différents composants, les multiples interactions et liens entre les espèces (Gaspar C., 2022).

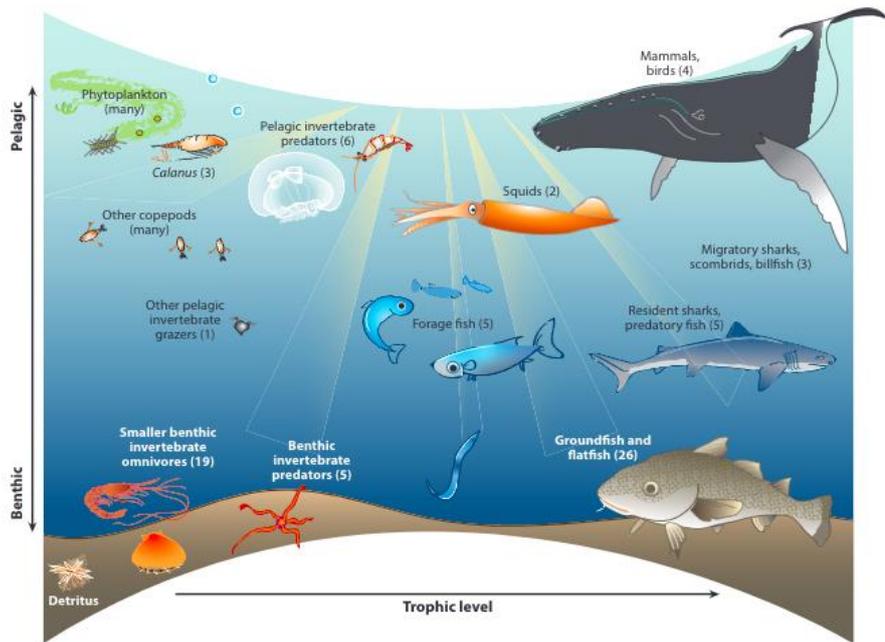


Figure 1. Représentation générale d'un réseau trophique et des différentes communautés biologiques (Pershing & Stamieszkin, 2019)

Les mammifères et oiseaux marins sont des éléments intéressants pour l'étude des réseaux trophiques. En effet, l'importance de ces compartiments tient dans le fait que ce sont des prédateurs supérieurs. Considérés comme des consommateurs secondaires dans les habitats marins et généralement carnivores, ils occupent les plus hauts niveaux trophiques comme le montre la Figure 1. 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.

De ce fait, l'équilibre dynamique qui régit les relations entre les compartiments d'un écosystème est fragile et peut facilement basculer (disparition ou apparition, renforcement ou diminution des interactions) face aux contraintes naturelles ou anthropiques du milieu. L'environnement marin est un écosystème riche rendant de nombreux services à l'homme

(approvisionnement, régulation, culturel etc.). Cependant, l'exploitation croissante de ce milieu pour les activités humaines (pêches, extractions de granulats, tourisimes, rejets industriels, implantation d'éoliennes off-shore etc.) impactent fortement ce dernier. Ainsi, les conséquences sont nombreuses : pollutions, réchauffement et acidification des eaux, eutrophisation, pertes de biodiversité, dégradations des habitats, entraînant une modification générale des habitats et des écosystèmes (Chouvelon, 2011).

La France avec ces 11 millions de km² de domaine maritime détient un fort potentiel pour l'implantation d'énergie marine renouvelable (Raoux et al., 2017). Dans l'objectif d'atteindre 40% de la production d'électricité et 33% de la consommation finale brute par les énergies renouvelables d'ici 2030 (Eguienta & Phan, 2022), cinq projets d'éolien en mer le long des côtes de la Manche ont été autorisés par le gouvernement à ce jour : St-Brieuc, Courseulles sur mer, Fécamp, Dieppe-Le Tréport et Dunkerque. Ces constructions en mer, au large des côtes de la Manche, lancent de nouveaux défis (techniques, sociaux, juridiques et environnementaux) pour une zone maritime déjà fortement soumise aux pressions anthropiques (J. P. Pezy et al., 2020 ; Raoux et al., 2017).

Dans le cadre de l'implantation du parc éolien en mer de Dieppe-Le Tréport en Manche orientale, dont les travaux en mer débiteront en 2024, des études environnementales sont tenues d'être mises en place pour veiller au suivi de l'écosystème et de l'impact de l'implantation des éoliennes. En conséquence, un projet de modélisation du réseau trophique par une approche holistique a été initié. Jusqu'à présent, les études adoptant une approche écosystémique, e.g. qui étudie l'ensemble des compartiments composant l'écosystème, reposent essentiellement sur des données bibliographiques. La particularité de ce projet tient donc dans l'utilisation de données collectées *in situ*. Ainsi, ce rapport vise à établir l'état de référence du compartiment des mammifères et des oiseaux marins, afin d'étudier l'état actuel du réseau trophique et de rendre compte des éventuels changements engendrés par le projet lors des prochains suivis environnementaux.

Afin d'adopter une approche écosystémique il est indispensable de récolter des données sur le régime alimentaire de chaque compartiment biologique. Concernant les 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 des organismes marins en général, d'autres méthodes sont possibles pour obtenir ces données, comme l'observation des contenus stomachaux 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.). Ainsi, d'autres méthodes 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 ce rapport, afin d'étudier l'écologie trophique des organismes, c'est l'analyse des isotopes stables du carbone et de l'azote au sein de différents tissus qui est va être traitée, en cohérence avec l'approche choisie pour l'ensemble des autres compartiments biologiques considérés dans le projet d'étude global. Les tissus des organismes vivants reflètent leurs régimes alimentaires en intégrant, selon différentes périodes de temps en fonction du tissu considéré, des composants de leurs proies. Grâce à cette intégration dans le temps de différents composants, il est possible d'utiliser certaines molécules tels que les isotopes stables du carbone et de l'azote pour retracer les sources de nourriture de nos organismes. Ainsi, la signature isotopique des tissus du consommateur reflète la signature isotopique des sources de nourritures qu'il consomme, sur la base du postulat : « je suis ce que je mange », proportionnellement à leurs contributions dans le régime alimentaire de ce dernier. Cette méthode d'analyse par isotopie offre l'avantage de donner une idée de ce qui a été assimilé par l'organisme et pas seulement ce qui a été ingéré, en comparaison avec les analyses de contenus

stomachaux (Hobson et al., 1994). En effet, l'étude des comportements alimentaires par des observations directes, des dissections ou des restes de proies au niveau des colonies d'oiseaux par exemple, offre une vision à court-terme du régime alimentaire, et parfois biaisée avec les temps d'ingestion différents selon les proies (Hobson et al., 1994). Ces différentes possibilités sont à voir comme des approches complémentaires les unes par rapport aux autres. Finalement, l'utilisation de traceurs isotopiques naturels pour l'étude des relations trophiques, de la structure et du fonctionnement de l'écosystème est un outil utilisé depuis plusieurs années (Chouvelon, 2011) et qui se révèle intéressant pour l'observation de changements liés aux activités anthropiques.

L'objectif principal du travail va être de comprendre l'organisation trophique des espèces de la mégafaune marine dans la Manche Est, en amont de l'implantation du parc éolien de Dieppe-Le Tréport. Pour répondre à cet objectif le travail est divisé en plusieurs axes et sous-objectifs qui sont les suivants :

- 1) Déterminer les espèces de mammifères et oiseaux marins les plus présentes dans la Manche Est à partir de références bibliographiques
- 2) Analyser les tissus (muscles et sang) en laboratoire afin d'obtenir les valeurs isotopiques en $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$ de certaines espèces de mammifères et d'oiseaux marins
- 3) Représenter les ellipses isotopiques des espèces pour rendre compte de leur taille et leur possible recouvrement entre elles
- 4) Confronter les valeurs isotopiques des prédateurs avec des valeurs isotopiques de proies potentielles de la zone, issues de la littérature, et discuter du potentiel régime alimentaire des individus

Pour répondre à cet objectif principal, les valeurs des rapports isotopiques obtenues en laboratoire à partir de tissus (muscles et sang) ont permis de rendre compte de la place des espèces les unes en fonction des autres en termes de position trophique ($\delta^{15}\text{N}$) mais également de remonter à l'origine de leurs sources alimentaires ($\delta^{13}\text{C}$). Les ellipses isotopiques de certaines espèces ont pu être représentées afin de visualiser la variabilité des valeurs isotopiques et des possibles recouvrements entre elles. Enfin, ces résultats ont pu être confrontés à des valeurs isotopiques de proies préférentielles, issues de la littérature, pour donner une idée des espèces prédatées par les mammifères et oiseaux marins de la zone.

II. Matériels et Méthodes

a. Le zone d'étude, le projet de Dieppe-Le Tréport et le projet Réseaux Trophiques

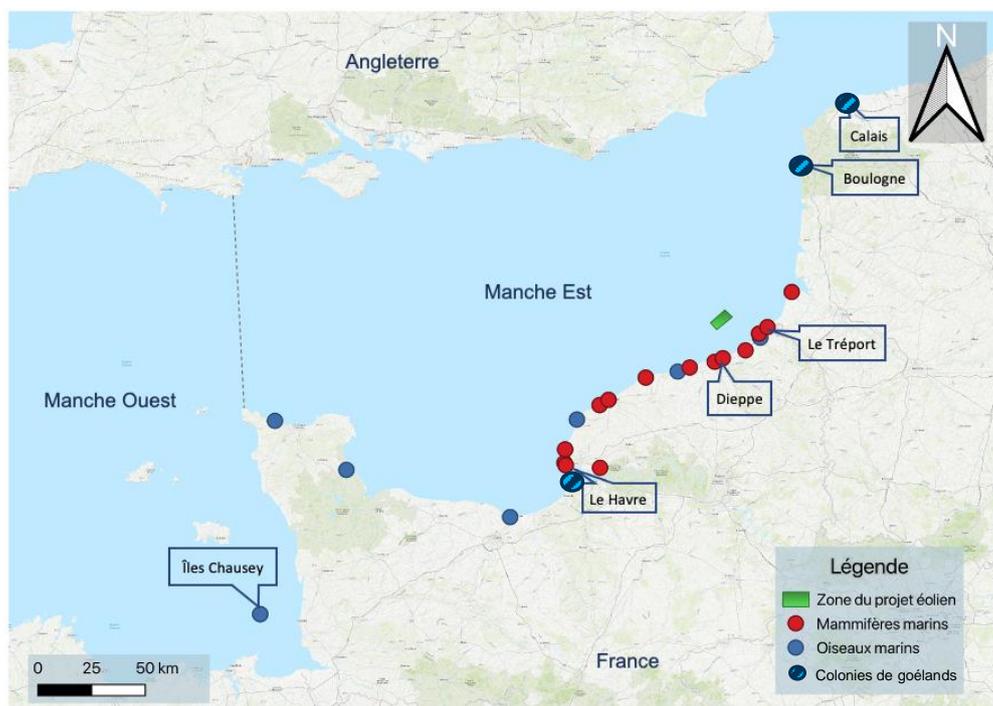


Figure 2. Zone du projet du parc éolien de Dieppe-Le Tréport et distribution géographique des individus échantillonnés pour l'étude.

Les caractéristiques géomorphologiques, climatiques et hydrologiques font de la Manche un écosystème particulier. En effet, la Manche est une mer épicontinentale peu profonde traversée par un fort courant de marée et des vents d'ouest en est poussant les masses océaniques vers la Mer du Nord (Carpentier et al., 2009). La Manche se divise en deux parties, la Manche Ouest, qui se distingue par des eaux tempérées et un bassin plus profond (≤ 100 m), et la Manche Est, avec des eaux froides-tempérées de moins en moins profondes (≤ 30 m) à l'approche du détroit de Pas de Calais (McClellan et al., 2014). C'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 (extraction de granulats marins, trafic maritime, activités halieutiques, nautismes, pollutions, implantation d'éolienne off-shore etc.) (Foucher et al., 2021). La pêche joue une part importante dans la modification des communautés de poissons et impacte le fonctionnement du réseau trophique de la Manche (Andrialovanirina, 2021). Elle est soutenue par une forte diversité d'espèces commerciales grâce à la présence d'habitats hétérogènes. Ainsi, l'ajout de pressions anthropiques dans cet écosystème déjà fortement altéré nécessite la mise en place de suivis environnementaux et des mesures de gestions adaptées.

En juin 2014, la société Éoliennes en Mer Dieppe-Le Tréport remporte l'appel d'offre de 2013 lancé par l'État pour la construction du parc éolien dans cette zone (Figure 2). À ce jour, le projet représente 62 éoliennes sur une surface de 83km², se situant respectivement à 17 km et 15,5 km de

Dieppe et du Tréport (Annexe 1). La production annuelle est estimée à 2000 GWh par an ce qui représente la consommation annuelle de 850 000 personnes (soit environ 2/3 de la population de Seine-Maritime). La mise en service du parc est à prévoir pour 2025 (EMDT, 2023). Pour le suivi environnemental du projet, un groupement d'intérêt scientifique (GIS) s'assure de la mise en place et de l'efficacité des suivis et des mesures d'Évitements, de Réduction et de Compensation (ERC) mais également de la diffusion des informations au grand public. Le GIS Éolien en mer est un réseau de recherche collaborative qui réunit universités, établissements publics, associations environnementales et entreprises privées (Éoliennes en mer Dieppe-Le Tréport, 2023). En juillet 2022 a débuté la réalisation de l'état de référence environnemental de la zone de Dieppe-Le Tréport. Cela vient compléter l'état initial réalisé entre 2014 et 2017, élément clé de l'évaluation environnementale. Cet état de référence désigne l'état « zéro » de la zone dans le but d'analyser les effets de la construction sur le milieu abiotique (qualité de l'eau, de l'air) et biotique (faune et flore). Avec l'installation de parcs éoliens en mer des modifications des écosystèmes et des changements de biodiversité locale sont attendues. En effet, différentes phases telles que l'exploration de la zone, la construction du parc, les opérations de maintenance, et le démantèlement peuvent impacter l'écosystème marin (Raoux et al., 2017). Divers effets sont déjà renseignés : i) colonisation des fondations des éoliennes par divers organismes marins, ce qui représente une source de nourriture supplémentaire pour les organismes prédateurs et les communautés benthiques de substrats mous environnantes (Pezy et al., 2020), ii) bruits et champs électromagnétiques générés par les parcs éoliens à même de perturber de nombreux organismes marins (invertébrés, poissons, mammifères marins) (Persohn et al., 2020).

Face au constat des impacts possibles et du manque de connaissances des effets indirects *via* les réseaux trophiques, le GIS éolien en Mer a donc initié une étude dédiée aux Réseaux Trophiques locaux pour réaliser un état de référence des relations et des flux trophiques avant l'implantation du parc. Des échantillonnages et analyses isotopiques vont ainsi être réalisés sur l'ensemble des compartiments biologiques dans la zone du futur parc. Le présent travail est un des axes de ce vaste projet, et va permettre de dresser un état initial de la zone en étudiant l'écologie trophique de la mégafaune marine afin de comparer avec celui qui sera réalisé après la mise en place des éoliennes et d'observer un possible effet sur le réseau trophique.

b. L'importance des prédateurs marins supérieurs

Les prédateurs supérieurs tels que les mammifères et oiseaux marins sont des éléments clés du suivi de l'état de l'écosystème et des modifications de ce dernier. Ces compartiments biologiques exercent une force de prédation sur les niveaux trophiques inférieurs qui peuvent à leur tour bousculer également l'écologie de ces prédateurs. Ainsi, si un changement de l'intensité de la prédation par les mammifères et les oiseaux marins a lieu, c'est tout le réseau trophique qui est impacté, c'est le phénomène de régulation top-down dans ce cas. À l'inverse, si des modifications des niveaux trophiques inférieurs (telles que l'abondance, la distribution ou encore la taille des espèces) s'opèrent sous l'influence de forçages

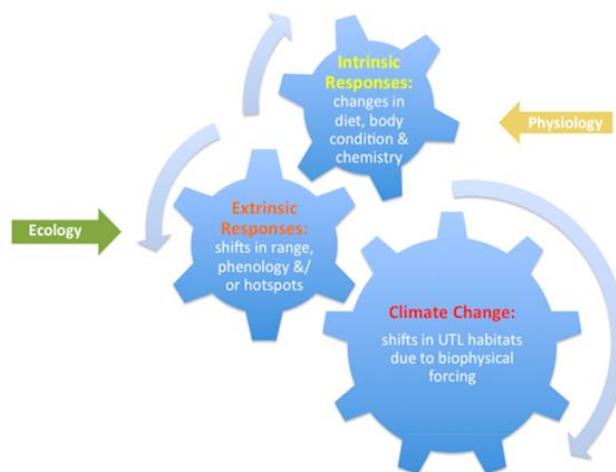


Figure 3. Modifications de l'écologie (extrinsèque) et de la physiologie (intrinsèque) des espèces de niveaux trophiques supérieurs (UTL) suite à une altération de l'écosystème marin (Moore & Kuletz, 2019).

environnementaux naturels ou anthropiques, alors l'écologie des prédateurs supérieurs sera affectée, c'est un processus de contrôle par le bas dit bottom-up (Girardin et al., 2018). Les modifications engendrées peuvent affecter les individus à différentes échelles, dans leur physiologie et leur écologie (Figure 3). 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.

Les espèces de mammifères marins les plus rencontrées et observées en Manche orientale lors des campagnes aériennes SAMM et des échouages sont les suivantes : le marsouin commun *Phocoena phocoena*, le phoque veau marin *Phoca vitulina*, le phoque gris *Halichoerus grypus*, ces trois espèces représentent environ 90% des observations (Pettex et al., 2014). Le marsouin commun est le 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 son golfe normand-breton (Pettex et al., 2014). L'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. Pour ce qui est du phoque gris, les individus de la Manche, surtout présents en baie de Somme, ne se reproduisent pas ou très peu dans cette zone malgré des effectifs croissants depuis plusieurs années (Planque, 2021). 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). En moindre proportion, le grand dauphin *Tursiops truncatus* et le dauphin commun *Delphinus delphis* ainsi que d'autres delphinidés et balénoptéridés sont présents dans la zone.

La grande majorité des espèces d'oiseaux est inféodée au milieu terrestre, mais environ 300 espèces entretiennent un lien plus ou moins étroit avec le milieu marin. Ce cortège d'espèces utilise le milieu marin selon trois modes d'usage globalement : pour le nourrissage, la mue et durant la migration (Gouverneur & Jouet, 2012). La France métropolitaine accueille 28 espèces à reproduction régulière selon les derniers recensements (Cadiou, 2014). 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). De cette façon, l'étude du comportement alimentaire des oiseaux marins n'est pas seulement importante pour améliorer la compréhension de l'écologie animale mais aussi pour améliorer les outils de gestion et de conservation des écosystèmes, ces derniers étant de plus en plus soumis aux pressions anthropiques.

Le rôle de prédateurs supérieurs de la mégafaune marine au sein des écosystèmes et leurs traits d'histoire de vie (longue espérance de vie et faible fécondité) leur confère le rôle d'espèces sentinelles par le fait qu'elles viennent refléter l'état écologique des écosystèmes dans lesquels elles évoluent (Spitz et al., 2018). De plus, mammifères et oiseaux marins sont fortement dépendant des dynamiques de leurs proies, l'étude de leurs régimes alimentaires est un bon indicateur pour suivre les changements de leurs écosystèmes (Hobson et al., 1994).

c. Les isotopes stables du carbone et de l'azote

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). Les isotopes légers de l'élément réagissent plus rapidement que la forme lourde lors des réactions cinétiques, la forme légère est donc utilisée préférentiellement par les organismes et la forme lourde s'accumule dans les tissus biologiques, ce processus est connu sous le nom de fractionnement isotopique (Fry, 2006)(Annexe 2). Ainsi, chaque tissu biologique acquiert une composition isotopique qui lui est propre (Chouvelon, 2011). 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 (Figure 4). 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).

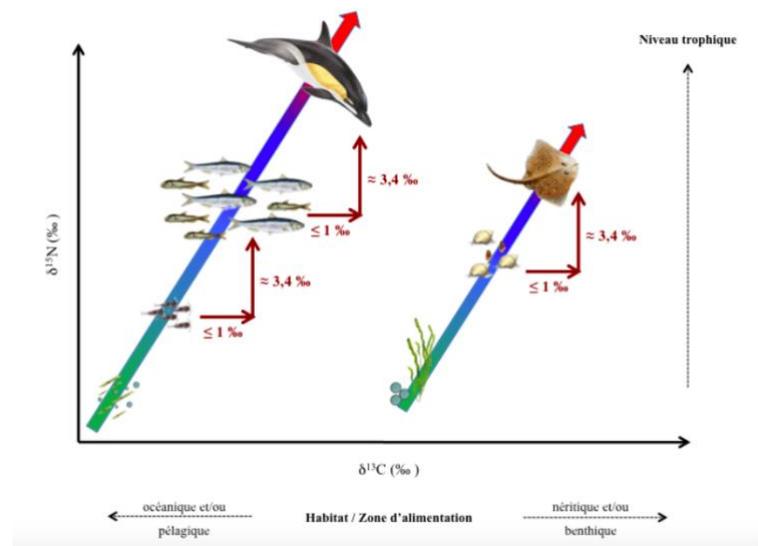


Figure 4. Schéma explicatif du principe d'utilisation des isotopes stables du carbone et de l'azote en milieu marin (Chouvelon, 2011).

De cette façon, les facteurs de variations des signatures isotopiques des consommateurs peuvent être classés en deux catégories : la première liée au métabolisme des organismes et la seconde liée à la nourriture assimilée. La première catégorie englobe le métabolisme et la physiologie de l'individu de façon générale en prenant en compte la phylogénie, le sexe, le cycle reproducteur, les processus ontogéniques qui peuvent être des sources de variations chez des individus consommant la même ressource alimentaire. La seconde catégorie de facteurs est liée directement à la nourriture, elle prend en compte le type et la qualité des ressources (animales, végétales, taux de protéines etc.) et aussi le niveau trophique des proies comme sources de variations des signatures isotopiques (Chouvelon, 2011). Ainsi, l'utilisation et l'interprétation de résultats isotopiques doit prendre en compte toutes les sources de variations des processus métaboliques et d'incorporation des isotopes au sein des organismes (Carter et al., 2019).

d. Choix des tissus à analyser

Le choix du tissu 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). Le temps d'intégration ne sera évidemment pas le même en fonction des espèces étudiées, la taille de l'animal et la température corporelle jouent un rôle dans le temps de renouvellement des tissus (Thomas & Crowther, 2015). 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, donne une idée du régime sur toute la période de croissance (plumes, cheveux) (Carter et al., 2019). Ces différences de turnover vont influencer la signature isotopique du tissu et l'interprétation des résultats par la suite (Tieszen et al., 1983). Dans le cadre du projet, la condition importante est d'étudier un tissu dont le temps de renouvellement permet d'avoir une information du régime alimentaire sur le court à moyen terme afin d'avoir une idée de l'alimentation dans la zone du projet.

i. Mammifères marins

Le muscle donne une idée du régime alimentaire sur le moyen à long terme en fonction de l'espèce considérée, allant de quelques semaines à quelques mois précédant l'échantillonnage (Jansen et al., 2012). Les signatures isotopiques du tissu sont le reflet de l'alimentation de l'organisme lors de ses périodes de croissance, plus forte lors du passage de juvénile à adulte mais qui a lieu tout au long de sa vie. Enfin, 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. C'est un tissu qui reflète bien la source de nourriture, avec une différence d'environ 1‰ pour le $\delta^{13}\text{C}$ entre la source d'alimentation et le tissu. Ce fractionnement est important à connaître pour remonter aux différentes ressources alimentaires (Tieszen et al., 1983).

La détermination du facteur d'enrichissement trophique pour certaines espèces de mammifères marins a déjà été réalisée pour le muscle (Hobson et al., 1996 ; Caut et al., 2011). Pour ce rapport les valeurs d'enrichissement choisies pour la représentation des valeurs isotopiques de proies sont de 1‰ pour le $\Delta^{13}\text{C}$ et 1,7 ‰ pour le $\Delta^{15}\text{N}$ en prenant comme référence les travaux de Toporoff, 2002.

ii. Oiseaux marins

Le sang et les plumes sont les tissus les plus utilisés pour l'étude isotopique de l'écologie des oiseaux, ils sont facilement accessibles et ils 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). Les plumes sont des tissus chitinisés qui intègrent le régime alimentaire sur une période beaucoup plus longue que le sang. Dans le cadre de notre étude nous nous intéressons au régime à court et moyen terme des individus pour avoir le plus de chance d'avoir un aperçu de l'alimentation des individus aux alentours de leur colonie ou du site d'échouage. Ainsi, c'est le sang qui est le tissu retenu pour les études isotopiques des différentes espèces d'oiseaux marins sur ce projet.

La détermination du facteur d'enrichissement trophique pour certaines espèces d'oiseaux marins a déjà été réalisée pour le sang (Ceia et al., 2021 ; Hobson & Clark, 1992). Pour ce rapport, les valeurs d'enrichissement choisies pour la représentation des valeurs isotopiques de proies sont 0,23‰ pour le $\Delta^{13}\text{C}$ et 2,61‰ pour le $\Delta^{15}\text{N}$ en prenant comme référence les travaux de (Ceia et al., 2021).

e. Banque de données et échantillons disponibles

i. 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 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

ii. Oiseaux marins

La provenance des données concernant les oiseaux marins est de deux origines. Une première partie des données isotopiques de 2021 provient d'échantillons sanguins récoltés sur des juvéniles au mois de juin au sein de trois colonies et déjà analysés dans le cadre des suivis DCSMM Contaminants Oiseaux Marins. Pour les données 2022 et 2023, un partenariat avec l'association de défense de l'environnement le CHENE située à Allouville-Bellefosse a été mis en place dans le cadre du projet, en marge des suivis réalisés pour OSPAR sous l'égide du Groupement d'Intérêt Scientifique Oiseaux Marins (GISOM). Les cadavres d'oiseaux retrouvés le long des côtes de Normandie et Haut-de-France ont ainsi été collectés afin de récolter des échantillons de sang. En 2022, l'épisode de grippe aviaire a empêché le recueil de données mais des individus ont pu être récoltés sur les premiers mois de 2023. Cela a permis l'apport de données complémentaires à ce travail, au total 29 individus appartenant à 9 espèces ont été échantillonnés par ce biais.

Concernant les goélands de 2021, le sang provient de poussins vivants, les valeurs isotopiques reflèteront les apports alimentaires des parents. Pour les autres espèces, ce sont des individus retrouvés morts échoués le long des côtes.

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 goéland 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 *Ichthyiaetus 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>Ichthyiaetus 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

f. Préparation des échantillons¹

i. Muscle des mammifères marins

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}. Le processus de lyophilisation utilise le phénomène physique de sublimation pour sécher les fragments de muscles. Ainsi, l'eau contenue dans ces derniers passe de l'état solide à gazeux sans passer par l'état liquide (Fisher Scientific, 2006). Une fois secs, les 30 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.

La première délipidation peut être lancée. Cette étape est recommandée pour éviter un effet des lipides sur la signature en ¹³C car ces derniers sont particulièrement appauvris en ¹³C (Cherel et al., 2014). Ainsi, à 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

¹ 136 échantillons ont été préparés et analysés en laboratoire pendant ce stage

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 autre fois, cela correspond à la seconde délipidation. Après la deuxième centrifugation le surnageant est bien clair et transparent ce qui montre que les échantillons sont dépourvus de lipides.

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 (sans passer par l'agitateur rotatif). 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 (désinfectée à l'éthanol entre chaque échantillon) pour être placés dans des tubes de 2 ml à bouchon à joint torique.

ii. Sang des oiseaux marins

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.

g. Analyses isotopiques

Après obtention d'une poudre bien sèche et délipidée (pour le muscle simplement), les échantillons peuvent être mis en capsule. Il faut peser entre 0,3 et 0,5 mg d'échantillon à l'aide de la microbalance Sartorius ME5 et placer cette poudre dans une capsule en étain. La microbalance a une précision de $\pm 1 \mu\text{g}$ soit 0,001 mg. 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}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 était respectivement $< 0.10 \text{ ‰}$ pour $\delta^{13}\text{C}$, $< 0.08 \text{ ‰}$ pour $\delta^{15}\text{N}$

h. 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 effectuée 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-Withney 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).

III. Résultats

a. Mammifères marins

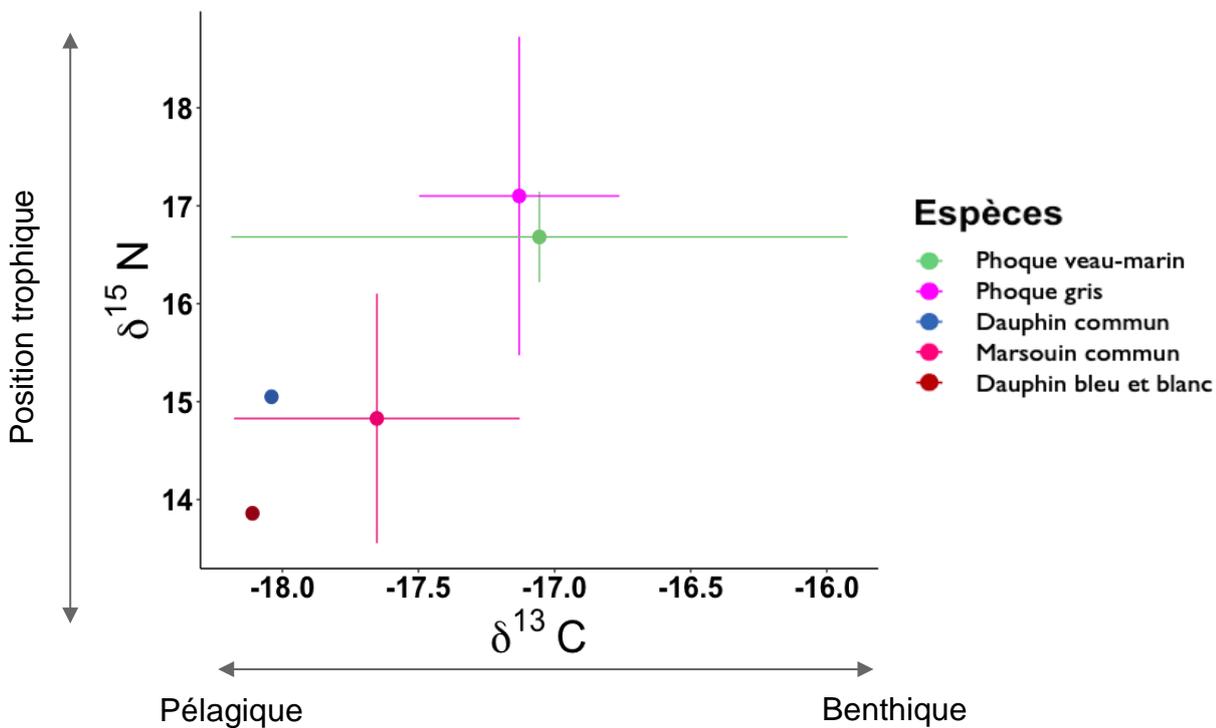


Figure 5. Valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ et $\delta^{13}\text{C}$ des espèces de mammifères marins. Les valeurs correspondent à la moyenne \pm SD.

Le gradient pélagique-côtier est caractérisé par les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ et indique les zones préférentielles d'alimentation des espèces (Figure 5). Les valeurs en $\delta^{13}\text{C}$ des phoques gris ($n=2$) et veau marin ($n=5$) sont visuellement proches et supérieures de celles des trois autres espèces et sont plutôt dirigées vers des ressources côtières sur le gradient. Statistiquement il n'y a pas de différence entre les cinq espèces pour les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ (Anova, $p=0.28$). 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 (Annexe 3). De même pour le phoque gris et ces valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ qui sont très différents (15.95‰ et 18.25‰).

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 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, $df = 4$, $p\text{-value} = 0.02$).

i. Marsouin commun

Pour ce qui est des marsouins communs, dont le nombre d'individus échantillonné permet certaines analyses statistiques, une différence significative est observée entre les moyennes de $\delta^{15}\text{N}$ des femelles et des mâles ($W = 9$, $p\text{-value} = 0.006$). Ainsi, les femelles ont un rapport $\delta^{15}\text{N}$ plus élevé que les mâles comme le montre la Figure 6. Pour l'effet de la taille des individus sur les valeurs isotopiques, des régressions linéaires ont été réalisées. Seule une relation négative entre le $\delta^{15}\text{N}$ et la taille des individus est ressortie significative (<0.05) (Annexe 4). Cependant le coefficient de détermination R^2 étant faible ($R^2=0.32$) le pouvoir de prédiction du modèle n'est pas assez robuste pour utiliser cette relation.

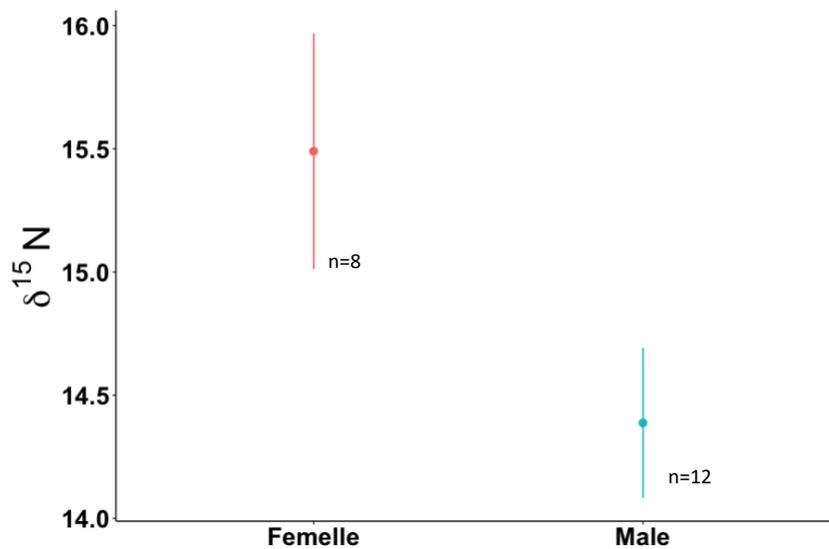


Figure 6. Moyennes et écart-types des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ pour les femelles et les mâles marsouin.

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

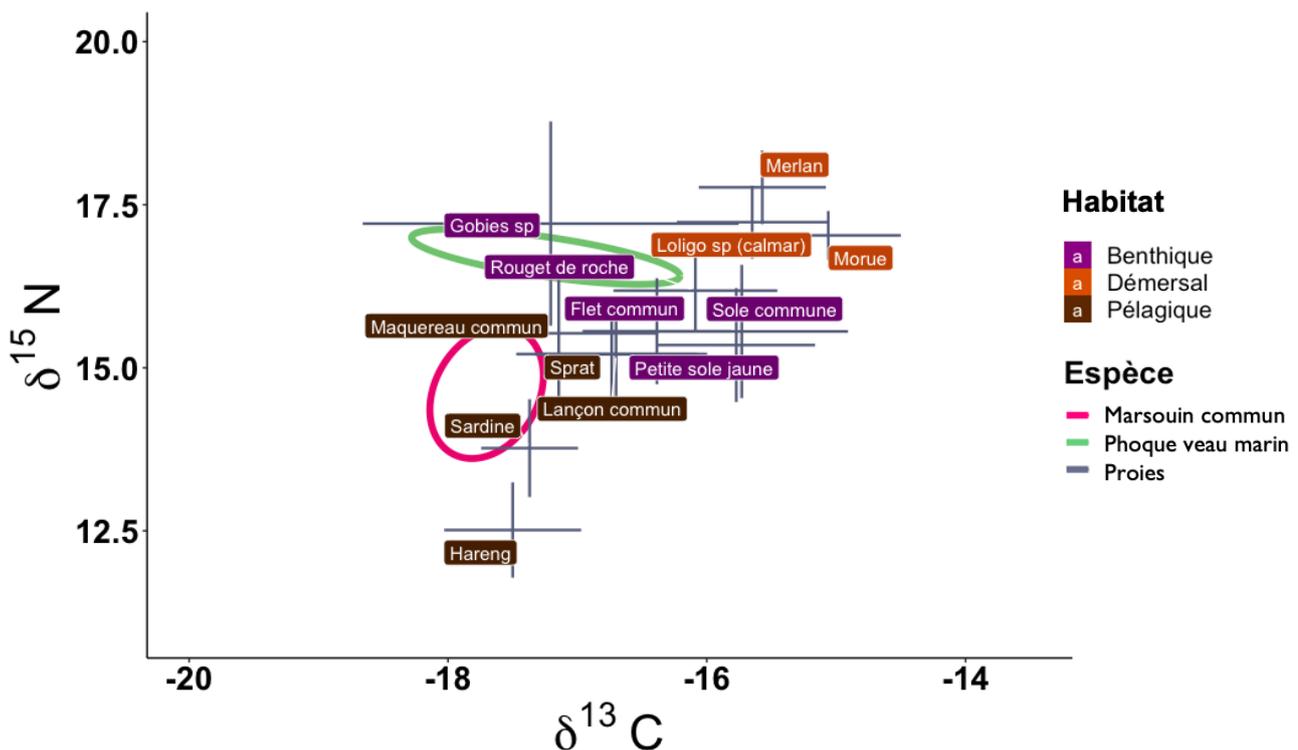


Figure 7. Ellipses isotopiques des mammifères marins superposées avec les valeurs isotopiques de proies préférentielles issues de la littérature (Cresson et al., 2023 ; Kopp et al., 2015), ajusté par les facteurs d'enrichissement $\Delta^{13}\text{C}$ et $\Delta^{15}\text{N}$.

Sur la figure 7, les proies sont classées selon leur distribution dans la colonne d'eau, en partant du fond jusqu'à la surface : benthique, démersal, 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 $\delta^{15}\text{N}$ 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.

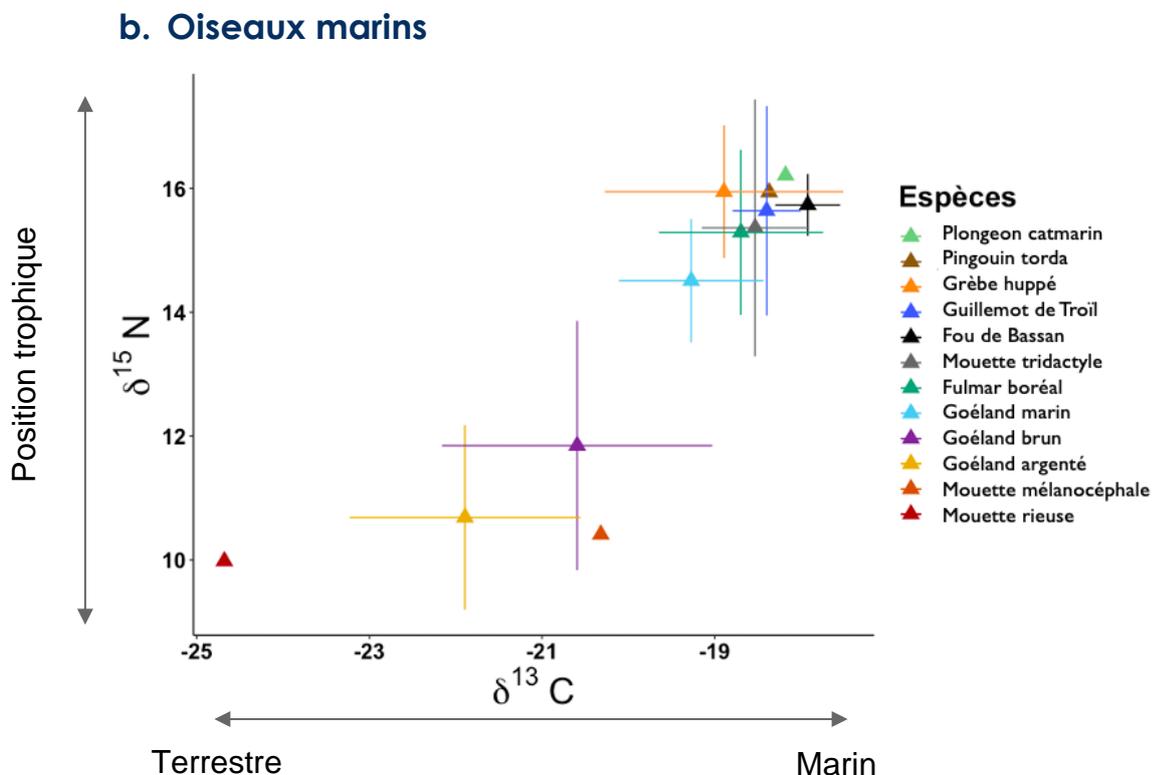


Figure 8. Valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ et $\delta^{13}\text{C}$ des espèces d'oiseaux marins. Les valeurs correspondent à la moyenne \pm SD.

Sur la figure 8, l'origine des ressources alimentaires des douze espèces échantillonnées suit le gradient terrestre - marin. En partant de gauche à droite, la mouette rieuse est l'espèce utilisant les ressources les plus terrestres avec les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ les plus faibles (-24,68‰ pour $\delta^{13}\text{C}$ et 10‰ pour $\delta^{15}\text{N}$). Ensuite, le goéland argenté, le goéland brun et la mouette mélanocéphale ont des valeurs en $\delta^{13}\text{C}$ intermédiaires situées entre -23 et -19‰. Enfin à droite, une cohorte d'espèces (goéland marin, fulmar boréal, mouette tridactyle, guillemot de Troil, grèbe huppé, pingouin torda, plongeon catmarin, fou de Bassan) se distingue par des valeurs plus hautes en $\delta^{13}\text{C}$ (de -20,2 à -17,5‰) et en $\delta^{15}\text{N}$ (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. Il existe des différences significatives de $\delta^{13}\text{C}$ entre le goéland argenté et un ensemble d'espèces regroupant le goéland marin, le fou de Bassan, la mouette tridactyle et le guillemot de Troil ainsi qu'entre le goéland brun et le guillemot de Troil (Kruskal-Wallis chi-squared = 68.9, df = 11, p-value <0,05). Des différences de valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ sont également détectées entre le goéland argenté et le grèbe huppé, la mouette rieuse, le guillemot de Troil et le goéland marin ainsi qu'entre le goéland brun et le guillemot de Troil (Kruskal-Wallis chi-squared = 68.9, df = 11, p-value <0,05).

i. Ellipses isotopiques

Les ellipses isotopiques de la figure 9 donnent une idée de la variabilité des valeurs entre les espèces et des recouvrements possibles entre elles. Le goéland brun (n=22) est l'espèce avec l'ellipse la plus étirée, que ce soit sur le plan vertical et horizontal. Les ellipses isotopiques du goéland argenté (n=40) 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) (Annexe 7). 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 (n=22). Le goéland marin (n=15), la mouette tridactyle (n=7) et le guillemot de Troïl (n=8) se retrouvent avec des ellipses isotopiques qui se recouvrent en grande partie, voir totalement pour la mouette et le guillemot. Cela va suggérer des interactions entre les espèces et renseigne sur le degré de variabilité intra et inter spécifique en indiquant, par exemple, le niveau de spécialisation ou d'opportunisme de l'espèce.

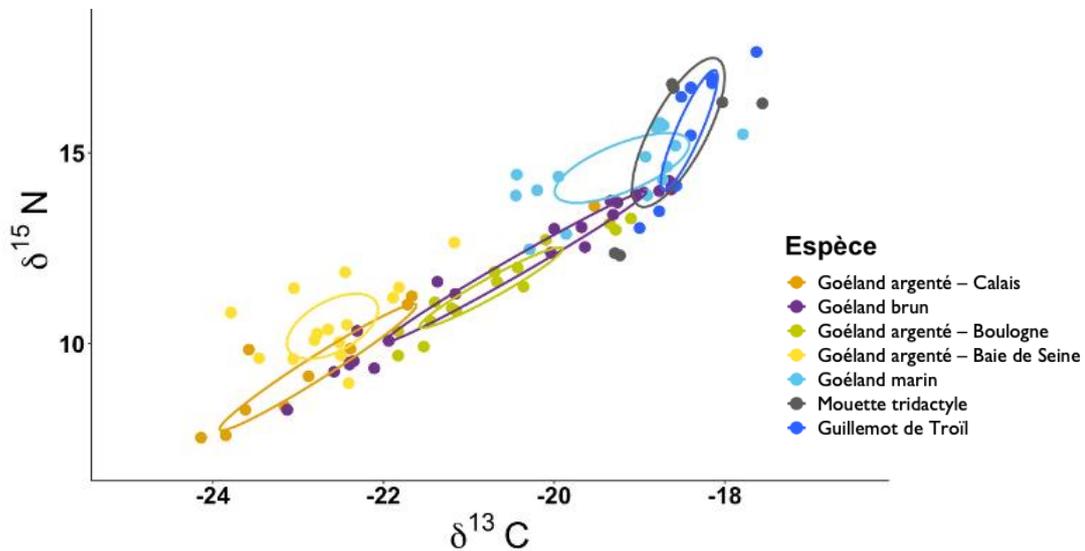


Figure 9. Ellipses isotopiques des oiseaux marins.

ii. Ellipses isotopiques et proies potentielles

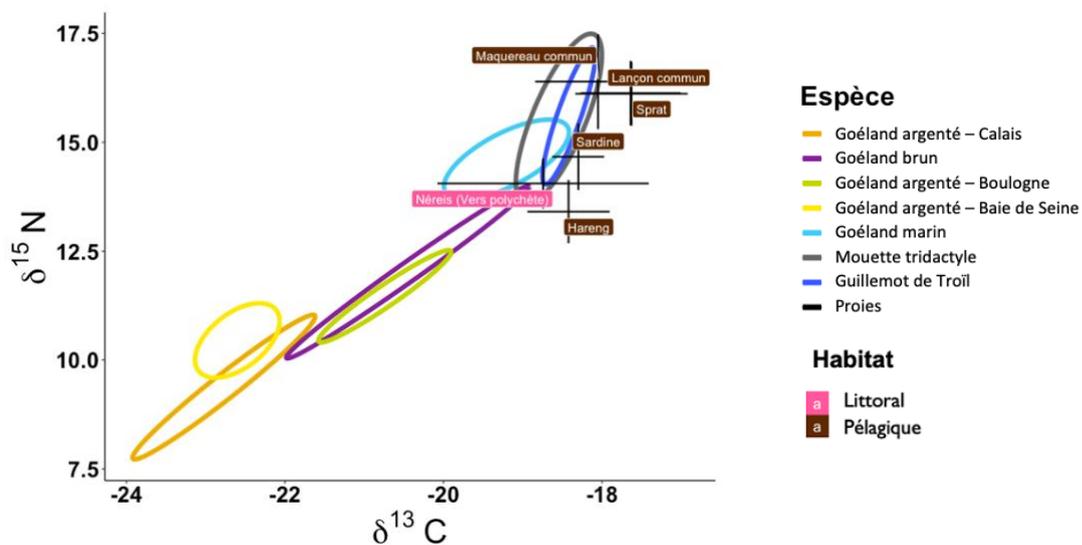


Figure 10. Ellipses isotopiques des oiseaux marins superposées avec les valeurs isotopiques de proies préférentielles issues de la littérature (Cresson et al., 2023 ; Kopp et al., 2015), ajusté par les facteurs d'enrichissement $\Delta^{13}\text{C}$ et $\Delta^{15}\text{N}$.

Les espèces prédatées par les oiseaux et qui reviennent le plus régulièrement sont majoritairement les espèces pélagiques renseignées sur la figure 10.

Le maquereau, le lançon et le sprat croisent 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.

c. Mises en lien des deux compartiments

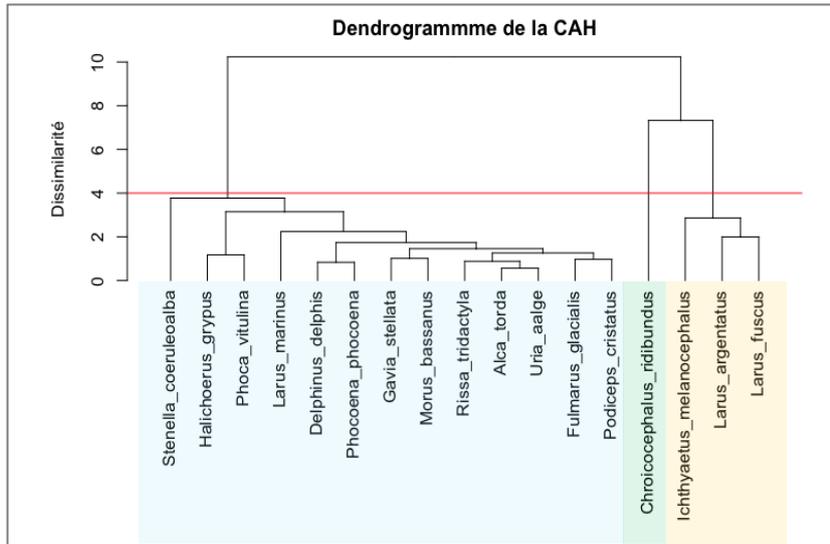


Figure 11. Représentation de la classification ascendante hiérarchique à liens moyens des espèces de mammifères et oiseaux marins.

La classification ascendante hiérarchique (figure 11) permet de séparer les oiseaux selon leurs rapports isotopiques et leur degré de similitude avec ceux des mammifères marins. Ainsi, trois groupes se distinguent : la mouette rieuse, en vert, puis le goéland argenté, le goéland brun et la mouette mélanocéphale se nourrissant sur des ressources à la fois terrestres et marines, en jaune, et enfin les oiseaux se nourrissant sur des ressources à dominance marine, en bleu, sont les huit autres espèces d'oiseaux (goéland marin, fulmar boréal, mouette tridactyle, guillemot de Troil, grèbe huppé, pingouin torda, plongeon catmarin, fou de Bassan), qui sont regroupées avec les cinq espèces de mammifères marin (marsouin, phoque veau marin, phoque gris, dauphin commun et dauphin bleu et blanc).

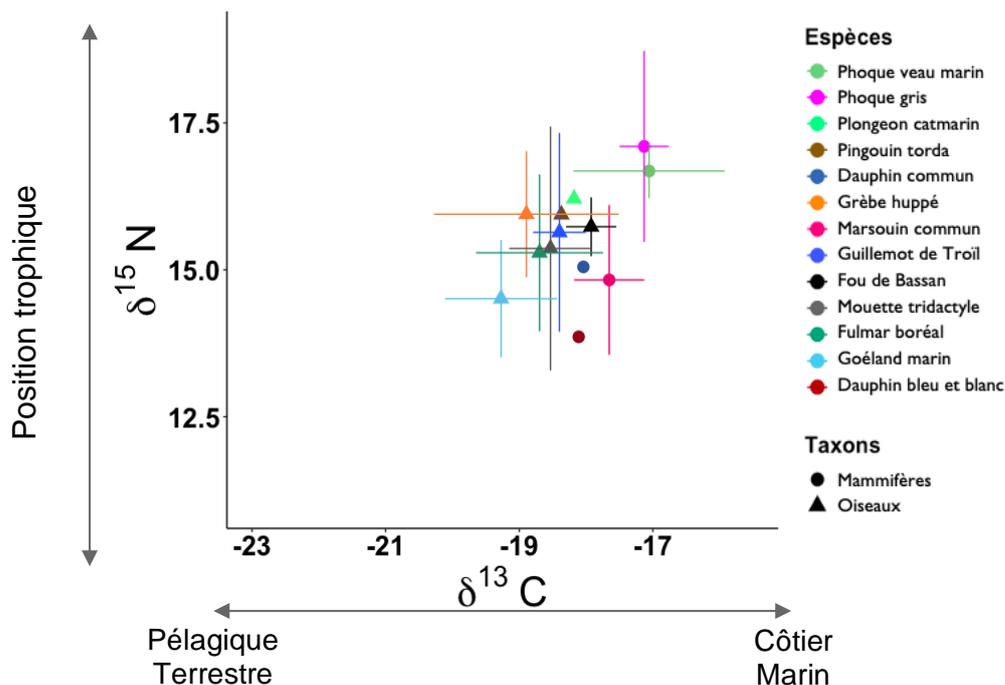


Figure 12. Valeurs isotopiques moyennes (\pm SD, en ‰) des espèces de mammifères marins, entre 2016 et 2022, et des espèces d'oiseaux marins, 2021.

Seules les huit espèces d'oiseaux utilisant des ressources à majeure partie marine sont représentées sur la figure 12 avec les 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 le goéland marin et le phoque veau-marin, pour les rapports carbone et azote, entre le goéland marin et le marsouin pour le carbone et entre le phoque veau-marin et le marsouin pour l'azote (Kruskall-Wallis, chi-squared = 42.3, df = 12, $p < 0.05$).

IV. Discussion

Une estimation robuste du régime alimentaire des individus et des espèces est possible dans le cas où ces derniers sont exposés à des ressources alimentaires stables dans le temps. Dans la réalité, les animaux sont rarement exposés à une alimentation constante et connaissent des variations de leurs régimes alimentaires dues à différents phénomènes (changements saisonniers, variations en fonction de l'ontogénie des individus, perturbations de l'écosystème) (Thomas & Crowther, 2015). Avec ce travail, il est possible de visualiser les interactions interspèces et d'estimer sur quels types de ressources les espèces vont venir s'alimenter de façon générale.

a. Mammifères marins

Tout d'abord, pour mieux appréhender la distribution et l'interprétation des valeurs isotopiques il est important de savoir que les habitats côtiers et benthiques sont enrichis en ^{13}C par rapport aux habitats hauturiers (Das et al., 2003 ; France, 1995 ; Newsome et al., 2007). Cette variation des rapports résulte de différents facteurs (Chouvelon, 2011) :

- 1) L'enrichissement naturel des producteurs primaires de type micro et macro algues côtières en ^{13}C et/ou ^{15}N , par rapport au phytoplancton, et qui se transmet au reste du réseau trophique. Cet enrichissement peut être dû à une fixation différente des isotopes en fonction des autotrophes concernés mais aussi par un enrichissement azoté d'origine anthropique distribué dans le milieu benthique et côtier par les fleuves et les panaches fluviaux, qui sont d'importants vecteurs de matières organiques enrichies en ^{15}N notamment.
- 2) Les eaux usées transportées par ces fleuves sont également le siège d'une activité microbienne importante apportant des eaux enrichies en azote.
- 3) Certains organismes benthiques, ayant un comportement nécrophage, peuvent entraîner des valeurs plus élevées de $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$ chez les organismes qui dépendent des réseaux trophiques benthiques.

Les résultats obtenus donnent un premier aperçu de la position des espèces les plus représentatives de la zone : le marsouin commun, le phoque veau marin et le phoque gris. Ainsi, la répartition des mammifères marins le long du gradient pélagique-côtier respecte bien les connaissances écologiques des espèces en termes d'alimentation (Figure 5), avec les deux espèces de phoques se distribuant sur des plus 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. L'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. 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 pour ses activités de chasse, 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). Cette espèce se nourrit donc davantage de ressources benthiques, ce qui est suggéré par nos résultats. Cependant, l'écart-type du phoque veau marin est le plus fort pour les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$, cela peut s'expliquer par une combinaison de différents facteurs. Le phoque veau-marin est en déclin sur la zone tandis que le nombre de phoque gris est stable voire en augmentation. Des deux espèces, le phoque veau-marin serait l'espèce la plus vulnérable, de par sa morphologie plus petite et plus légère, face aux contraintes environnementales (ressources alimentaires limitées, maladies) et face à la compétition. Ainsi, le phoque gris, en raison de sa forte consommation de poissons plats également, 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). La diversification des proies entraînerait donc probablement une hétérogénéité des valeurs en $\delta^{13}\text{C}$ pour le phoque veau marin. L'autre facteur à prendre en compte est l'état des individus lors de leur mort. Pour les phoques veau-marin, trois animaux sur cinq ont été retrouvés vivants puis morts. Cela veut dire que les individus ont été observés vivants une première fois et sont morts par la suite. Lors d'un signalement de phoque en difficulté, les individus peuvent être amenés en centre de soin et nourris par l'être humain, ce qui a un impact sur les valeurs isotopiques. Même si les informations concernant le passage potentiel dans un centre de soin n'étaient pas disponibles ici, un des individus échantillonnés a été retiré des analyses car ses valeurs isotopiques étaient beaucoup plus hautes que les cinq autres, faisant penser à un nourrissage non naturel et faussant potentiellement les résultats.

Concernant le phoque gris, surtout présent en Baie de Somme, ce dernier 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). Certaines études avancent le fait que le régime 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, tandis qu'en automne/hiver les grands poissons plats benthiques font toujours partie de leur régime mais le groupe des poissons pélagiques prend une place importante (Planque et al., 2021). Les deux phoques gris de nos échantillons ont été retrouvés en janvier et en février, leur position trophique est la plus haute mais avec un grand écart-type ce qui montre une importante variabilité entre les deux individus. 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 est à prendre en compte pour expliquer les valeurs isotopiques. En effet, le stress induit par la maladie, par exemple, peut jouer un rôle dans l'accumulation de l'isotope lourd dans l'organisme faisant augmenter les rapports isotopiques. Cela a été reporté par différentes études, certaines espèces soumises à des stress (maladie, manque de nourriture) voient leurs rapports isotopiques, notamment de $\delta^{15}\text{N}$, augmentés car le corps excrète des déchets enrichis en ^{14}N pour leur survie (Gannes et al., 1998 ; Gaspar et al., 2022). Une dernière source de variabilité chez le phoque gris est que ce dernier présente un plus haut degré de spécialisation individuelle des stratégies de chasse. Cela a été détecté dans le régime alimentaire (Tucker et al., 2008), par les analyses en isotopes stables du carbone et de l'azote et par la variabilité des zones de chasse (Austin et al., 2004). Cette spécialisation individuelle semblerait naître de l'absence de toute transmission de stratégies de chasse par les parents et donc d'un apprentissage individuel (Planque, 2021).

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, qui se basent à la fois sur le domaine océanique et benthique. Les individus sont présents tout le long de l'année en Manche Est, avec une période plus favorable de février à avril ainsi qu'en automne. Au printemps, les individus s'approchent d'autant plus de la zone de Dieppe-Le Tréport, cela laisse penser à une période de migration saisonnière liée à la recherche de nourriture. En été, ils semblent se rendre plus au large contrairement à l'hiver où ils restent côtiers (EMDT, 2018). Malgré de nombreuses études, il n'est pas possible d'affirmer si le marsouin commun est un mangeur plutôt sélectif ou opportuniste (Lambert, 2020). Cette espèce est connue pour se nourrir sur une gamme assez large de poissons pélagiques, démersaux et benthiques, qui sont des proies de différents niveaux

trophiques comme le reflète ses valeurs en $\delta^{15}\text{N}$ assez étendues (Figure 5). Ainsi, le régime alimentaire du marsouin peut varier (type, taille de la proie, côte, large) de façon saisonnière, avec son cycle de vie et celui de ses proies. 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 le régime alimentaire. Les résultats isotopiques sont cohérents avec ces connaissances écologiques, 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. 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. En effet, la théorie optimale de recherche de nourriture (« *optimal foraging theory* ») voudrait que les individus prédatent des proies de valeurs énergétiques élevées pour équilibrer leur forte dépense énergétique. Cependant, 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).

L'effet du sexe des individus sur les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ a déjà pu être observé à plusieurs reprises chez le marsouin commun (Jansen et al., 2012 ; Santos & Pierce, 2003) et cette ségrégation sexuelle est observable ici également (Figure 6). Les femelles montrent généralement des valeurs plus élevées en $\delta^{15}\text{N}$ comparées à celles des mâles, cela pourrait s'expliquer par : i) une taille moyenne supérieure à celle des mâles (même si ce n'est pas le cas ici, annexe 6) qui impacterait leurs besoins énergétiques plus élevés, ii) une occupation différente des habitats par rapport aux mâles, et iii) la présence de leurs petits, qui affecte certainement leur manière de chasser. La ségrégation des individus de l'espèce par groupe en fonction du sexe est proposée pour expliquer ces différences. Les femelles accompagnées de leurs petits auraient tendance à rester dans des eaux peu profondes et pourraient être restreintes dans leur recherche de nourriture par cette association avec leurs petits. De plus, il est possible que ces différences de valeurs entre mâles et femelles puissent être un mécanisme de réduction de la compétition pour les ressources (Santos & Pierce, 2003).

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 ; Pettex 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, les différences entre les phoques et le marsouin commun peuvent être attribuées à leurs régimes alimentaires distincts, ce qui peut être expliqué par deux facteurs : i) le phoque veau marin, en raison de sa taille supérieure, consomme des proies de niveau trophique supérieur par rapport au marsouin, ce qui entraîne des besoins énergétiques plus élevés, et ii) il peut y avoir des différences dans les zones d'alimentation. L'environnement côtier possède naturellement des valeurs isotopiques plus enrichies, signe d'une différence dans les sources primaires de nourriture, ce qui va enrichir les valeurs isotopiques des espèces côtières prédatées par les phoques.

b. Oiseaux marins

Concernant les oiseaux marins, le gradient terrestre-marin est utilisé pour expliquer les variations des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$. Effectivement les oiseaux marins tirent profit de la mer pour leur alimentation mais peuvent également se nourrir de ressources terrestres. 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 isotopiques entre les deux milieux dès le premier niveau trophique, comme pour les mammifères marins. Les plantes terrestres utilisent la photosynthèse pour fixer le carbone atmosphérique (CO_2) qui est principalement composé de ^{12}C . Ces plantes à la base du réseau trophique vont donc être enrichies en ^{12}C par rapport aux organismes

synthétiques du milieu marin, qui utilisent le dioxyde de carbone dissous dans l'eau de mer (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.

Si l'on s'intéresse à leurs comportements alimentaires, les oiseaux marins sont connus comme étant des « central place forager ». Cette théorie écologique dite de stratégie optimale de recherche de la nourriture décrit le comportement des espèces à chasser à une certaine distance de la colonie, notamment en période de reproduction pour optimiser leurs dépenses en énergie. Ainsi, durant la période de reproduction, les oiseaux doivent prendre en comptes les exigences que représentent le retour à un site fixe sur la terre ferme, leur approvisionnement et celle de leurs progénitures. 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).

Ce qui ressort des figures 8 et 11 est la distinction de trois groupes d'espèces avec trois utilisations différentes de l'habitat :

- 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) et évite les côtes rocheuses et trop exposées (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 terrestres, poussins d'oiseaux, vers terrestre, végétaux) et marines (poissons, mollusques, vers marins, etc) (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, 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, etc) (MEEDDAT & MNHN, 2008) ; le grèbe huppé fait également partie du groupe des espèces marines bien que cette espèce soit plutôt présente à proximité des eaux dormantes comme les étangs, les lacs ou les marais. Cependant, en hiver ce dernier peut migrer de façon locale au niveau des zones côtières (BirdFacts, 2023).

Concernant les goélands, les côtes de la Manche orientale accueillent trois espèces reproductrices à l'année : le goéland argenté, le goéland brun et le goéland marin (EMDT, 2018). Ces trois espèces sympatriques sont généralistes et charognardes dans leur recherche de nourriture. De plus, il est important de noter que les colonies échantillonnées dans ce projet sont urbaines et situées dans des friches industrielles. De plus, les colonies sont des colonies mixtes, c'est-à-dire que les trois espèces fréquentent la même zone en même temps et cohabitent. C'est pour cette raison qu'il est intéressant de connaître l'espèce la plus compétitrice des trois, e.g. le goéland marin, pour comprendre la succession des positions trophiques.

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 3755 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 et son rayon de recherche de nourriture est d'en moyenne 15km autour de la colonie (Woodward et al., 2019). Cette variabilité intersite (Boulogne, Calais, Baie de Seine) traduisant son opportunisme

est bien mise en valeur chez le goéland argenté (Figure 9). Sa faible compétition avec les autres espèces peut expliquer sa position trophique, qui est la plus basse des trois espèces de goéland avec les valeurs en $\delta^{15}\text{N}$ les plus faibles (Figure 8).

Le goéland brun a une position trophique intermédiaire, située entre le goéland argenté et marin. Cependant, une dispersion plus hétérogène et étendue de ses valeurs isotopiques est observée. Une ségrégation des valeurs isotopiques (Annexe 7) semble indiquer des degrés de spécialisation plus forts chez les individus de goéland brun, créant deux groupes : un plus terrestre et l'autre plus marin. Le goéland brun est présent tout 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). Au niveau de Dieppe-Le Tréport l'espèce niche mais de façon ponctuelle (EMDT, 2018) et son rayon de prospection alimentaire est de 45km en moyenne (Woodward et al., 2019).

Enfin, le goéland marin est l'espèce la plus prédatrice des trois, ce qui se traduit par une position trophique plus haute comme le montre la figure 8. Le goéland marin reste en moyenne à 17 km de la colonie (Woodward et al., 2019) lors de ses recherches alimentaires. La succession de ces trois espèces est en accord avec ce qui reporté dans la littérature (Binkowski et al., 2021).

D'abord réalisées avec les espèces dont la taille d'échantillonnage était supérieure ou égale à 3 individus, les ellipses isotopiques ne collaient pas avec la réalité de l'écologie trophique de certaines espèces. Ce fut par exemple le cas pour le fou de Bassan, cette espèce qui possède un régime alimentaire très opportuniste et diversifié s'est retrouvé avec une ellipse isotopique bien trop restreinte lors de la modélisation (Annexe 8 et Annexe 9). Le faible effort d'échantillonnage (trois individus pour le fou de Bassan) explique ces erreurs d'estimation des ellipses. Ainsi, pour la modélisation des ellipses isotopiques il est important d'avoir une taille d'échantillonnage la plus exhaustive possible ainsi qu'une connaissance antérieure de l'écologie des espèces afin de coller au plus près à la réalité et de ne pas faire d'interprétation aberrante. La figure 9 ne prend en compte que les espèces avec un nombre d'individus supérieur ou égale à 7. Même si ce nombre reste encore faible il permet de limiter l'erreur et de pouvoir observer les ellipses de plusieurs espèces de la zone.

Ainsi, le recouvrement des ellipses isotopiques de la mouette tridactyle et du guillemot de Troïl pourrait indiquer une utilisation similaire des ressources de la zone. Les lançons sont les proies les plus consommées par les mouettes tridactyles. La disponibilité en nourriture et surtout l'abondance des lançons joue un rôle déterminant dans le succès reproducteur de l'espèce (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), cela est reflété par son ellipse isotopique assez large (figure 9). Concernant les guillemots de Troïl, en Manche, les hivernants de l'espèce proviennent principalement des colonies de Mer du Nord. Le guillemot de Troïl chasse surtout au-delà des 20 mètres de profondeur et se nourrit principalement de petits poissons tels que le lançon, le sprat ou le hareng. L'ellipse du goéland marin recouvre une partie de celle du guillemot et de la mouette tridactyle. Cette espèce est très opportuniste dans sa façon de s'alimenter, pouvant se nourrir de petits mammifères, de poussins d'autres espèces (notamment de goéland argenté et goéland brun mais également de puffin), d'invertébrés marins, mollusques, de crustacés mais aussi de déchets de poissons (Harris, 1965). Ainsi, le recouvrement des ellipses donne une indication sur les interactions possibles entre les espèces au sein du réseau trophique, à savoir de la compétition ou de la prédation (cas du goéland marin sur les poussins d'autres oiseaux). La mouette tridactyle et le guillemot de Troïl, avec leur fort recouvrement de ellipses et, malgré une communauté de proies diversifiée, entrent certainement en compétition pour la ressource. Cette compétition entre les deux espèces a déjà été observée en mer de Barents (Durant et al., 2012). Le goéland marin semble montrer de la compétition avec ces espèces également. Effectivement, les stratégies de chasse se passant essentiellement à la surface pour les trois espèces, il y a très probablement de la compétition entre

elles. L'intensité de la compétition dépendra de la disponibilité des proies et de l'efficacité des espèces à utiliser efficacement les ressources.

c. Limites

Il est compliqué de faire une estimation robuste du régime alimentaire des espèces et les résultats sont soumis à plusieurs limites dont certaines ont pu être soulevées précédemment.

Les échantillons disponibles pour cette étude sont de petites tailles, notamment pour les mammifères marins ce qui limite les analyses statistiques plus poussées mais également les interprétations possibles, qui sont à prendre avec précaution. La comparaison des valeurs isotopiques entre des tissus différents (muscle et sang) est, elle aussi, peu recommandée car différents paramètres sont propres à chaque tissu comme : le temps d'intégration, la composition isotopique, le fractionnement isotopique (Ceia et al., 2021). Un exemple de différences de valeurs isotopiques au sein d'un même individu en fonction du type de tissu a été observé chez les trois espèces de goéland dans le cadre de cette étude (Annexe 10). Une relation entre les deux tissus (sang et plume) est bien visible, avec un enrichissement en $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$ dans les plumes. Cela est intéressant car il serait possible de passer d'un tissu à l'autre en mettant en place une relation linéaire et de s'affranchir de la contrainte du type de tissu disponible chez les oiseaux marins. Cherel et al. (2014) ont étudié cette relation et mis en place un calcul pour certaines espèces d'oiseaux venant d'Antarctique et de l'océan Indien. Ici, le travail n'a pas été mené car les échantillons de plumes disponibles n'apportaient pas d'informations supplémentaires mais la relation linéaire est cohérente avec celle observée dans la littérature. En ce qui concerne les différences entre les tissus (sang et muscle), il convient de noter que les fenêtres temporelles varient également entre les deux compartiments, le renouvellement sanguin étant plus rapide que celui du muscle, cela ne permet pas le même recul temporel en termes d'alimentation. Finalement, la figure 12 offre un aperçu de toutes les espèces des deux compartiments afin de donner un ordre d'idée de leurs positions trophiques relatives entre elles, les interactions alimentaires possibles et d'observer une succession logique le long des gradients des ressources. Cependant, le reste des analyses se fait par compartiment pour éviter des erreurs d'interprétations.

L'échantillonnage de poussins vivants dans trois colonies de goélands (baie de Seine, Calais, Boulogne) offre des informations plus précises, à la fois temporellement et spatialement, par rapport à l'examen de cadavres échoués. L'étude d'individus morts offre des informations limitées et peut être sujette à des biais tels que la décomposition et le transport des cadavres par les courants marins, ce qui rend les données moins fiables pour une évaluation précise des populations et de la santé des oiseaux. Il y a probablement un effet saisonnier qu'il n'est pas possible d'observer ici mais qui est un facteur à prendre en compte. En effet, le sang des poussins a été récolté en juin tandis que les cadavres de 2023 recouvrent les mois de janvier à mars. La saison a un effet sur le régime alimentaire de nombreuses espèces et donc sur les valeurs isotopiques (Götmark, 1984 ; Hamer et al., 2007).

Un autre biais possible de l'utilisation de prélèvements provenant de poussins est celui de l'effet de l'âge et de la croissance sur le facteur d'enrichissement isotopique entre l'alimentation et le tissu. Ce facteur est sensible à ces deux paramètres qui induisent une source de variabilité pour les valeurs de $\Delta^{13}\text{C}$ notamment, entre les adultes et les poussins, comme cela a pu être reporté pour plusieurs espèces (Ceia et al., 2021). Finalement, il est important de savoir que les facteurs d'enrichissement trophique ne sont pas constants entre et au sein des espèces et qu'il existe des sources de variabilités comme l'âge, l'espèce et le type de tissu qui impactent ces valeurs. Cela va jouer dans l'estimation des ellipses isotopiques et dans l'évaluation du régime alimentaire des espèces. Une stratégie optimale serait de déterminer les facteurs d'enrichissement pour chaque espèce et chaque tissu mais pour les organismes marins de hauts niveaux trophiques comme les mammifères et les oiseaux, peu d'expérimentations permettent d'avoir des résultats aussi détaillés.

L'impact des pêcheries sur le régime alimentaire de certains oiseaux marins n'est pas négligeable également. 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.

Enfin, l'utilisation de valeurs isotopiques de proies provenant de la littérature limite l'interprétation du régime alimentaire. Ainsi, afin d'approfondir l'étude, il serait intéressant d'obtenir des valeurs *in situ* pour la suite du projet. De plus, il est important de retenir que la ligne de base des ressources (pélagique, côtière, terrestre ou marine) influence les valeurs isotopiques, 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.

d. Utilité des suivis et impacts de la construction d'un parc éolien

La construction d'un parc éolien peut avoir des implications écologiques importantes, notamment pour les mammifères marins et les oiseaux marins qui peuvent être affectés par les éoliennes. Par exemple, les bruits sous-marins peuvent avoir des effets à long et court terme sur les cétacés (tels que perte auditive ou l'évitement d'une zone) (Persohn et al., 2020) ce qui affecte leurs capacités à chasser et à communiquer. Les oiseaux, quant à eux, peuvent détourner leurs trajectoires de migration ou de déplacements locaux en raison de la présence des éoliennes, il peut y avoir de la perturbation lumineuse, sonore ou des risques de collision lors du fonctionnement des engins (EMDT, 2018).

Dans ce contexte, l'utilisation de traceurs isotopiques et l'analyse des réseaux trophiques peuvent fournir des informations précieuses sur les interactions écologiques et les effets potentiels des parcs éoliens sur ces espèces *via* les impacts sur les réseaux trophiques. Le suivi de l'évolution de l'écosystème est important pour montrer des changements d'interactions entre les espèces, d'alimentation et d'utilisation des ressources du milieu ou de modifications de l'habitat. Cette étude met en lumière la nécessité de la réalisation d'une étude de l'écologie trophique des mammifères et oiseaux marins post-construction pour permettre une évaluation efficace de l'impact de parcs éoliens marins.

V. 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.

Ainsi, à eux seuls, les traceurs isotopiques ne permettent pas de décrypter finement l'écologie alimentaire de la mégafaune marine, et des hauts niveaux trophiques en particulier. Ces espèces, souvent mobiles, voire très mobiles, et également omnivores, se retrouvent avec des valeurs isotopiques issues d'un mélange complexe de sources de variations, provenant notamment des niveaux trophiques inférieurs (Chouvelon, 2011). Pour avoir une vision du régime alimentaire de l'animal il serait intéressant d'analyser différents types de tissus ayant des turnovers différents afin de comparer et d'observer des changements d'habitudes alimentaires à travers le temps (Tieszen et al., 1983). Ainsi, l'étude des isotopes stables, dans le cadre de cette étude, permet de fournir une

description qualitative des interactions trophiques entre les individus d'une même espèce ou d'espèces différentes (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 la mégafaune marine 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 très diversifiées. 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. 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.

Les informations recueillies suggèrent que la zone dispose d'une ressource en proies (qu'elles soient benthiques, démersales ou pélagiques) qui soutient 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.

Bibliographie

- Andrialovanirina, N. (2021). Diagnostic de l'état de la pêcherie de Manche Orientale en intégrant la perception des pêcheurs. <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03562540>
- 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 $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ 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 cauchoises - 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.milieuamrfrance.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/1z5YIicnBScqkkZSl6dRdEG_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., Käkälä, A., Käkälä, 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., & Pitocchelli, 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>

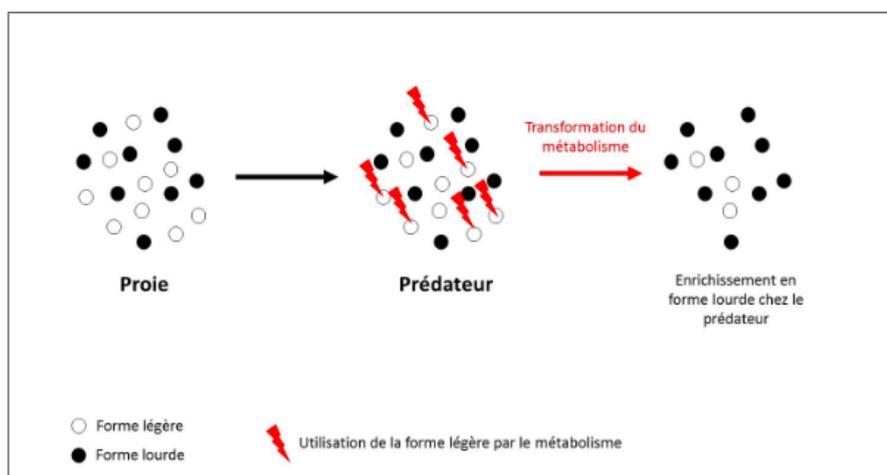
- Pezy, J. P., Raoux, A., & Dauvin, J. C. (2020). The environmental impact from an offshore windfarm: Challenge and evaluation methodology based on an ecosystem approach. *Ecological Indicators*, 114. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106302>
- Planque, Y. (2021). Écologie tropique de deux espèces 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 rieuse - 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.

Annexes



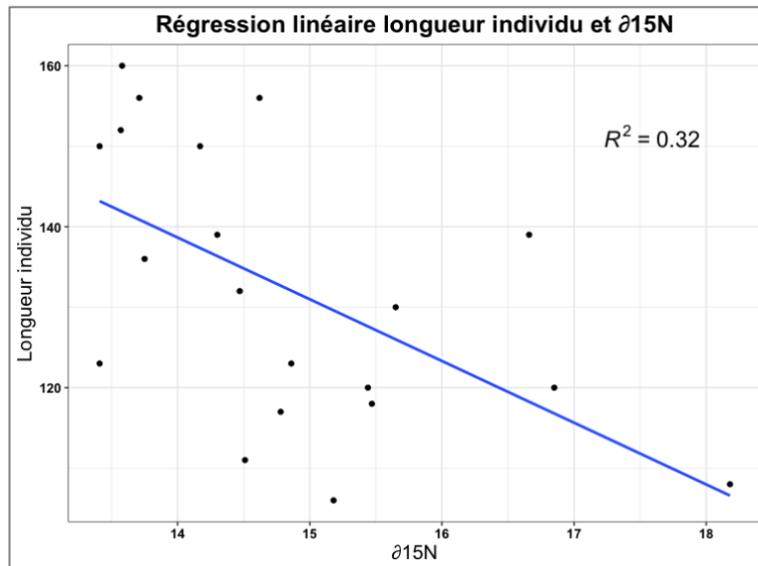
Annexe 1. Plan du parc éolien de Dieppe-Le Tréport.



Annexe 2. Principe de l'enrichissement isotopique dans les tissus des prédateurs (Pezy J.-P., 2018)

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

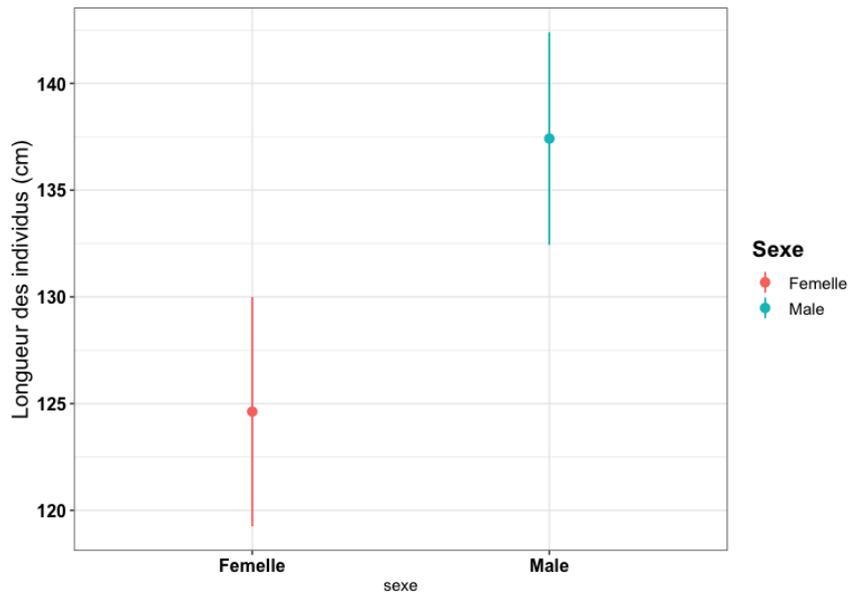
Espèces	n	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$
Marsouin commun <i>P.phocoena</i>	20	-17.653 \pm 0.525	14.829 \pm 1.274
Phoque veau marin <i>P.vitulina</i>	6	-17.056 \pm 1.217	16.682 \pm 1.707
Phoque gris <i>H.grypus</i>	2	-17.130 \pm 0.368	17.100 \pm 1.626
Dauphin commun <i>D.delphis</i>	1	-18.040	15.050
Dauphin bleu et blanc <i>S.coeruleoalba</i>	1	-18.110	13.860



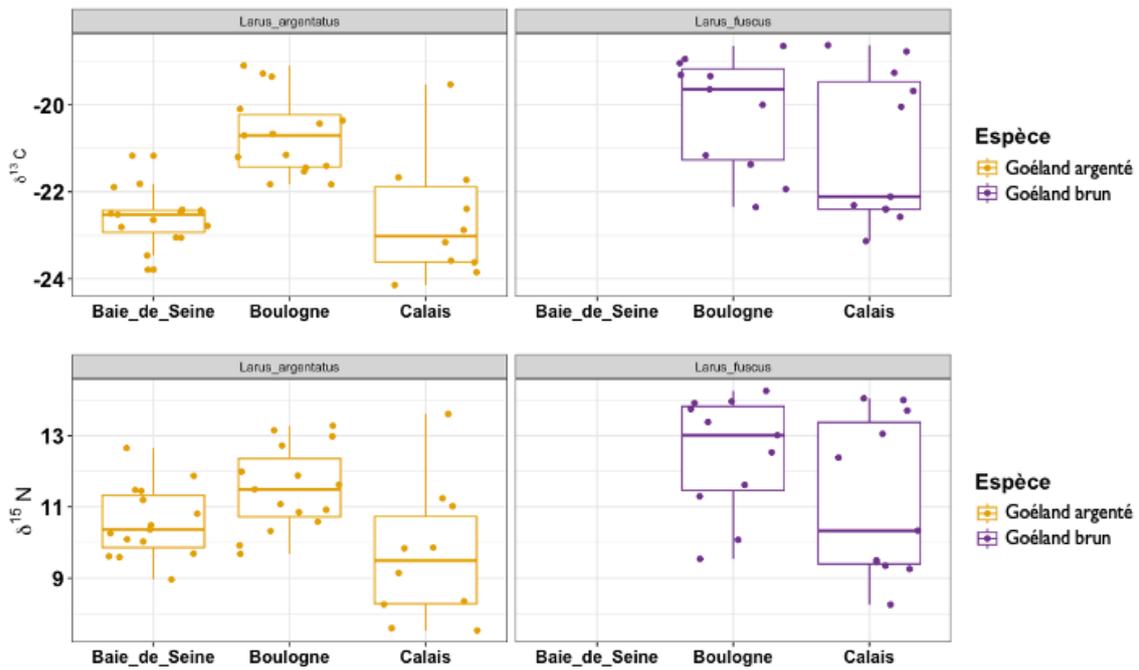
Annexe 4. Régression linéaire entre la longueur des marsouins et leur rapport isotopique de $\delta^{15}\text{N}$ (n=20).

Annexe 5. Espèces, nombre d'individus échantillonnés, valeurs moyennes \pm l'écart-type (SD) de chaque rapport isotopique.

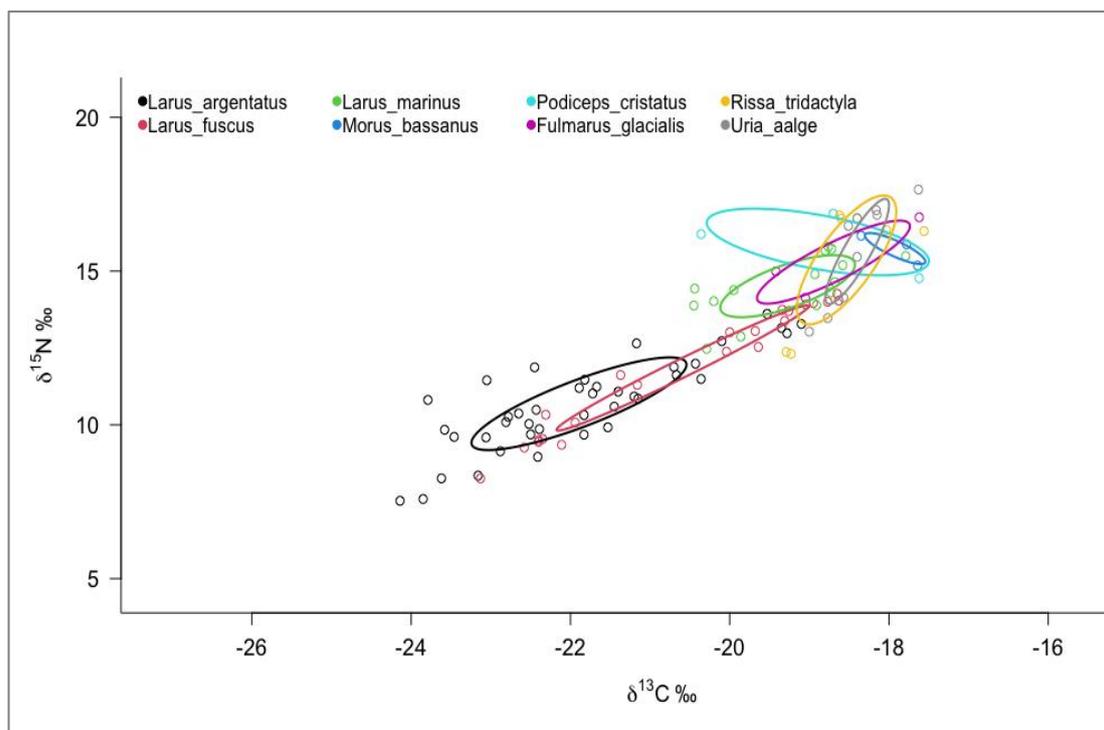
Espèces	n	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$
Plongeon catmarin <i>Gavia stellata</i>	1	-18.180	16.210
Pingouin torda <i>Alca torda</i>	1	-18.370	15.940
Grèbe huppé <i>Podiceps cristatus</i>	3	-18.893 \pm 0.797	15.947 \pm 1.072
Guillemot de Troïl <i>Uria aalge</i>	9	-18.400 \pm 0.400	15.639 \pm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



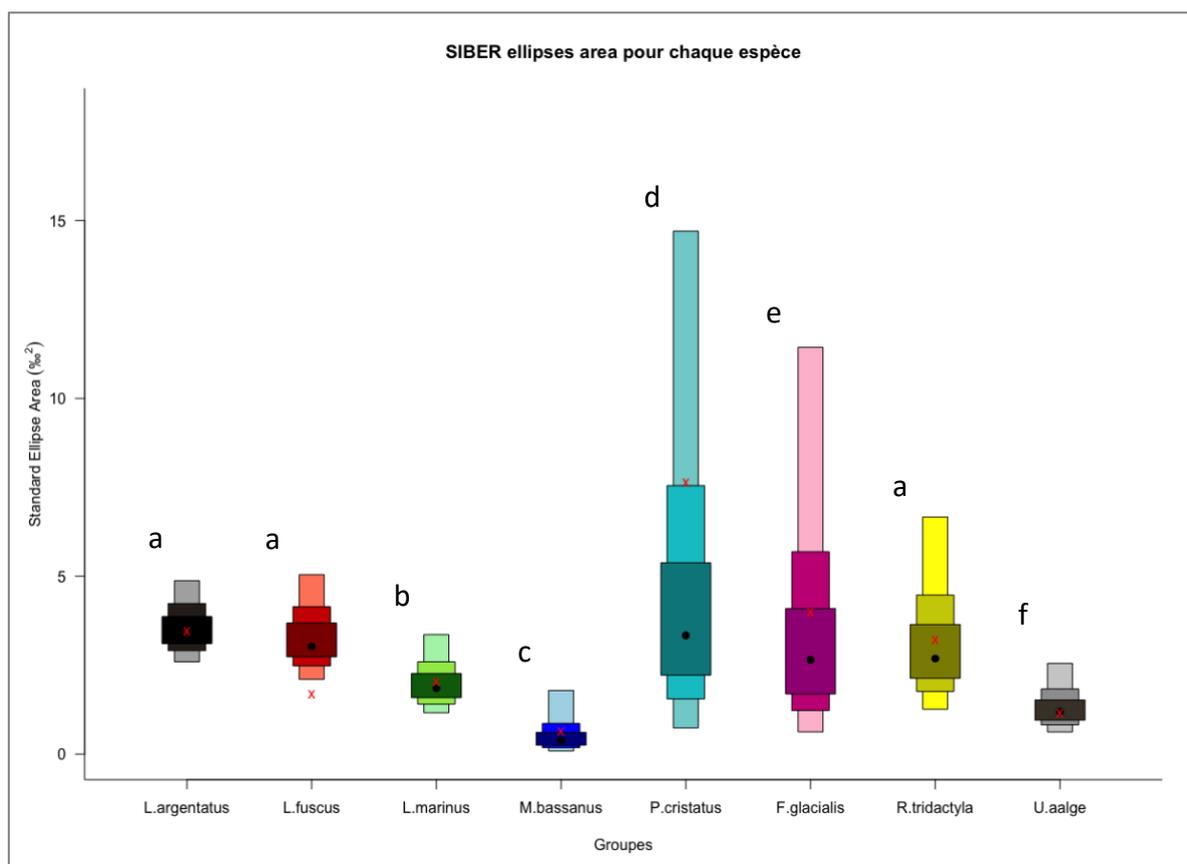
Annexe 6. Comparaison des longueurs moyennes des marsouins commun entre les mâles et les femelles.



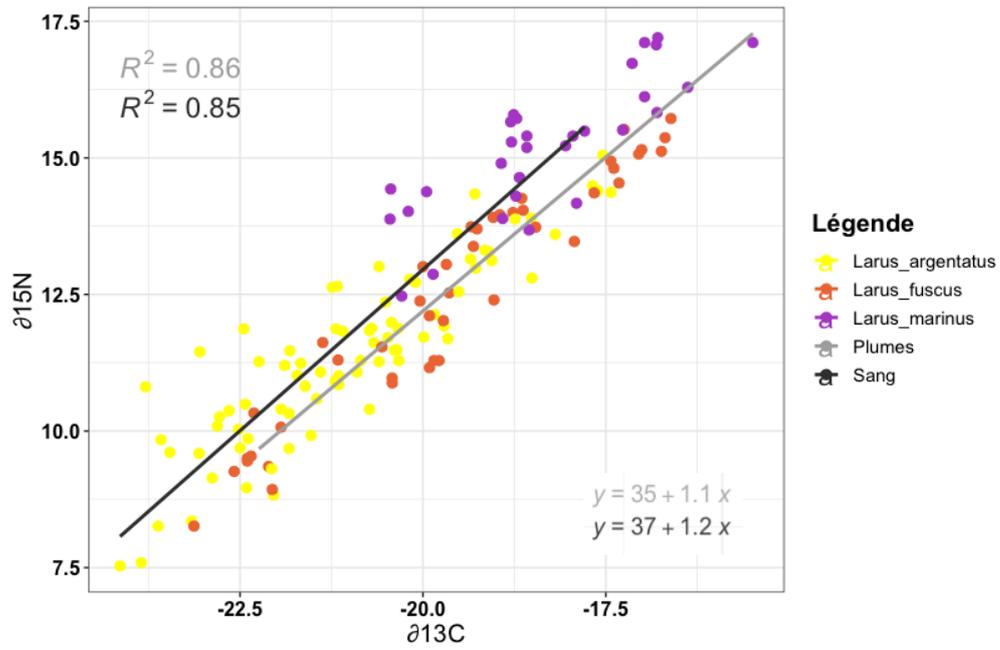
Annexe 7. Comparaison intraspécifique et intersites des valeurs isotopiques chez le goéland argenté et le goéland brun.



Annexe 8. Modélisation des ellipses isotopiques de chaque espèce par des ellipses dans le cadre d'un modèle bayésien



Annexe 9. Aire des ellipses isotopiques des oiseaux marins évaluées par modélisation Bayésienne à partir des valeurs isotopiques de $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$ mesurées dans le sang en 2021 et 2023. Les boîtes sont les intervalles de crédibilité (CI) à 95%, 75% et 50%. Les croix rouges sont les moyennes des valeurs prédites (SEAc).



Annexe 10. 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*.