



DREAL Normandie - MTE

Fécamp Grand Large

FICHE PROTOCOLE

Qualité de l'eau



SINAY

Table des matières

Table des matières	1
1. Méthodologie	3
1.1 Objectifs du suivi de la qualité de l'eau	3
1.2 Principes du suivi	3
1.2.1. Description du protocole.....	3
1.2.2. Plan d'échantillonnage	4
1.2.3. Moyens et Matériels	5
1.2.4. Déploiement opérationnel	10
1.3 Données collectées.....	12
2. Traitement et analyse des données	14
2.1 Traitements des échantillons.....	14
2.1.1. Matrice Eau	14
2.1.2. Matrice Eaux marines par <i>DGT</i>	14
2.1.3. Matrice Biote.....	15
2.2 Prétraitement des données brutes avant analyse.....	16
2.3 Techniques d'analyse statistique.....	16
2.4 Interprétation des résultats et visualisation.....	16

Index des illustrations

Figure 1 : plan d'échantillonnage du suivi de la qualité de l'eau dans la zone de Fécamp Grand Large. Les différents échantillonnages des stations ponctuelles (bouteille Niskin et sonde multi-paramètres) correspondent aux stations E_01 à E_12, illustrées par des points bleus ; les échantillonnages des stations permanentes (pochons de moules et dispositifs DGT) correspondent aux stations E_PERM_01 à E_PERM_05, illustrées par des points verts.	4
Figure 2 : navire VDC Lynx de la société NORMANDY OFFSHORE SERVICES.	5
Figure 3 : exemple d'un navire de la société TSM (ici, le TSM Kernor).	6
Figure 4 : schéma des lignes de mouillage pour le suivi de la qualité de l'eau par stations permanentes (DGT et pochons de moules).	7
Figure 5 : dispositif comprenant une bouteille de prélèvement de type Niskin d'une contenance de cinq litres et une sonde multi-paramètres WiMo.....	8
Figure 6 : structure d'un DGT (Source : Projet MONITOOL).	9
Figure 7 : exemples de cages dans lesquelles les pochons de moules sont conditionnées et immergées	9
Figure 8 : exemple de représentation graphique de l'évolution de la température (°C) par station en fonction de la profondeur au cours des campagnes d'échantillonnage réalisées à la sonde multi-paramètres WiMo de juillet 2022 à juin 2024 sur la zone d'étude des futurs parcs éoliens Centre Manche 1 et 2.....	18

Index des tableaux

Tableau 1 : caractéristiques physiques de la sonde multi-paramètres WiMo.....	8
Tableau 2 : caractéristiques techniques de la sonde multi-paramètres WiMo.....	9
Tableau 3 : paramètres mesurés, ainsi que les certifications et limites de quantification (par le laboratoire partenaire LABEO) associées pour le suivi de la qualité de l'eau (PF=Poids Frais ; MS=Matières sèche).	12

1. Méthodologie

1.1 Objectifs du suivi de la qualité de l'eau

L'objectif principal est de caractériser la qualité physico-chimique de la masse d'eau concernée et sa variabilité :

- **Décrire l'état initial de la matrice « Eau » :**
 - Suivre l'évolution des paramètres physico-chimiques de la colonne d'eau : température ; salinité ; oxygène dissous ; fluorescence, concentration en chlorophylle *a* et phéopigments ; turbidité, mesure optique (NTU) et Matières En Suspension (MES – fractions organiques et minérales) ;
 - Suivre l'évolution de la teneur de l'eau en nutriments : azote total, nitrite, nitrate, ammonium, phosphates et silicate.
- **Décrire l'état initial de la matrice « Biote » :**
 - Suivre l'évolution de la teneur en composés métalliques du biote : Aluminium, Cadmium, Chrome, Cuivre, Fer, Gallium, Indium, Lithium, Manganèse, Nickel, Plomb, Zinc ;
 - Suivre l'évolution de la teneur en composés organiques du biote : HAP (16 composés) ;
 - Des paramètres complémentaires (teneur en matière sèche, teneur en lipides totaux et autres paramètres biologiques peuvent être analysés.

Deux types de campagnes sont programmées pour répondre aux objectifs de l'état initial de la qualité de l'eau : des campagnes ponctuelles et des campagnes permanentes. Afin que la méthode *BAC* puisse être utilisée pour analyser les impacts potentiels du projet, ces campagnes ont lieu également sur des stations témoins définies au préalable.

1.2 Principes du suivi

1.2.1. Description du protocole

Dans le cadre de l'application du protocole de suivi de la qualité de l'eau par des stations ponctuelles (matrice Eau), les prescriptions de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE), notamment en suivant les préconisations du Guide Aquaref « Opérations d'échantillonnage en milieu marin » sont suivies.

Les campagnes de prélèvement suivent les recommandations du protocole REPHY (Réseau d'Observation et de Surveillance du Phytoplancton et des Phycotoxines), afin de permettre des comparaisons cohérentes lors du traitement et de l'interprétation des données.

Dans le cadre de l'application du protocole de suivi de la qualité de l'eau par des stations permanentes (matrice Biote), les prescriptions et protocoles établis par Amouroux et al., 2023 sont appliqués afin de garantir la qualité des données :

- Les pochons de moules sont déployés en suivant les recommandations du protocole d'Amouroux et al., 2023 et, permettant une évaluation fiable des contaminants dans les masses d'eau à travers la bioaccumulation ;

- Les dispositifs *DGT* (*Diffusive Gradients in Thin films*) sont déployés en suivant les recommandations du protocole d'Amouroux et al., 2023, assurant la précision des mesures de contaminants chimiques en milieu marin.

Les prescriptions des documents suivants sont également suivies :

- Manuel des méthodes d'Alain Aminot et de Roger Kérouel « Hydrologie des écosystèmes marins. Paramètres et analyses » (2004, Ifremer) ;
- Evaluation of a gradient sampling design for environmental impact assessment. Environmental Monitoring and Assessment (Ellis & Schneider, 1997) ;
- Sampling design and statistical methods for environmental biologists (Green, 1979).

1.2.2. Plan d'échantillonnage

Le plan d'échantillonnage des **stations ponctuelles** est présenté dans la **Figure 1**. Il est composé de **12 stations** : **six à l'intérieur de la zone rapprochée et six à l'extérieur**. Il s'agit des mêmes stations d'échantillonnage pour le suivi du phytoplancton, l'ichtyoplancton et le zooplancton.

Le plan d'échantillonnage des **stations permanentes** est aussi présenté dans la **Figure 1**. Il est composé de **cinq stations** : **trois à l'intérieur de la zone rapprochée et deux à l'extérieur**.

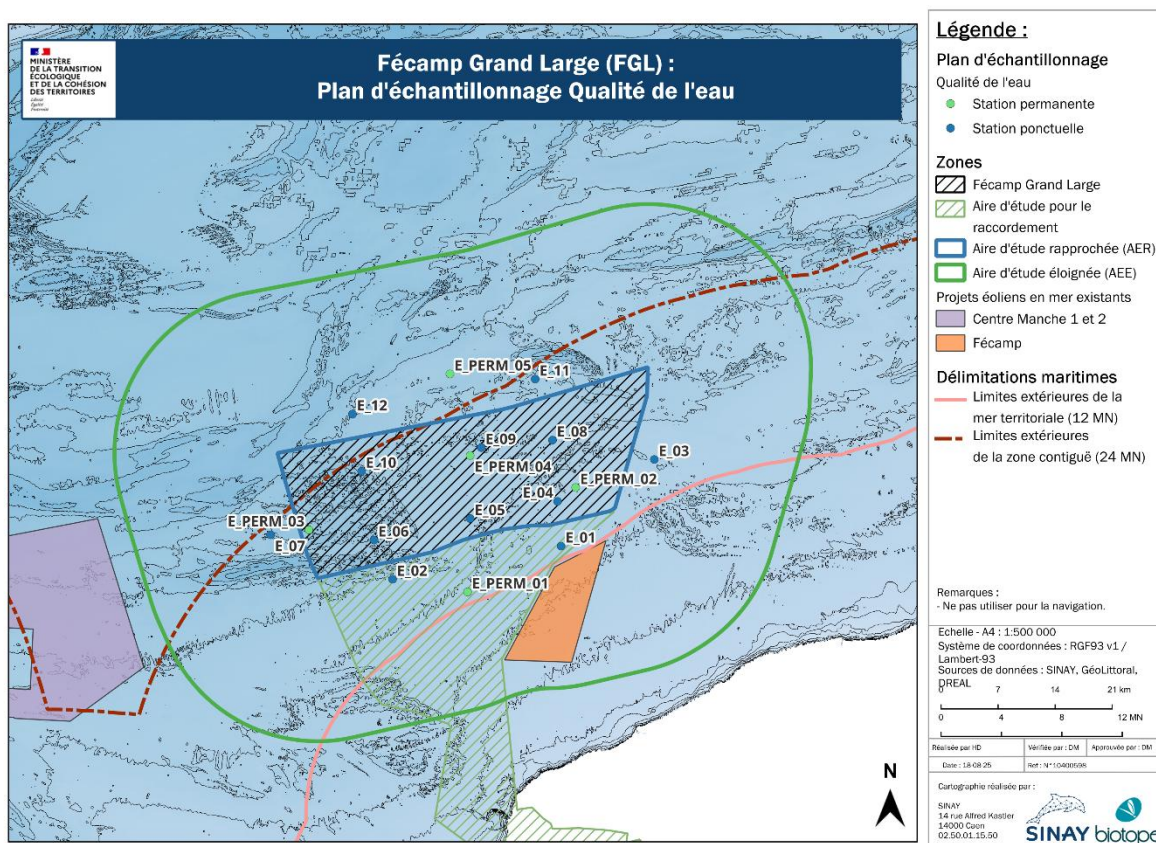


Figure 1 : plan d'échantillonnage du suivi de la qualité de l'eau dans la zone de Fécamp Grand Large. Les différents échantillonnages des stations ponctuelles (bouteille Niskin et sonde multi-paramètres) correspondent aux stations E_01 à E_12, illustrées par des points bleus ; les échantillonnages des stations permanentes (pochons de moules et dispositifs DGT) correspondent aux stations E_PERM_01 à E_PERM_05, illustrées par des points verts.

Le plan d'échantillonnage tient compte de la courantologie de la zone, des stratégies d'échantillonnage des autres compartiments et des enjeux écologiques connus dans la zone de Fécamp Grand Large.

Ces plans garantissent l'obtention de résultats statistiquement exploitables et extrapolables dans le cadre d'une analyse *BACI*.

Les échantillonnages des stations ponctuelles sont mensuels soit 12 campagnes par an. Elles débuteront en août 2025 et dureront une année. L'ensemble des prélèvements sont réalisés sur trois journées et sur la même marée. Si les conditions météorologiques ne le permettent pas, les prélèvements sont séparés sur deux marées différentes au cours du même mois.

Une unique campagne d'échantillonnage par pochons de moules est prévue. La durée d'immersion prévue des pochons de moules est de minimum trois mois. La période d'immersion des moules doit avoir lieu entre avril et juillet, comme recommandé selon les protocoles de référence. **Les échantillonneurs passifs (DGT) sont déployés à chaque trimestre (un par saison)** pendant une année soit quatre campagnes par an. La durée d'immersion prévue pour les dispositifs *DGT* est de 5 à 15 jours avec un objectif de 10 jours.

Les coefficients de marées de mortes-eaux sont privilégiés afin de permettre des interventions dans des conditions de marée similaires et comparables au cours deux années de suivi des communautés planctonique ; afin de ne pas augmenter la variabilité inhérente au déplacement des masses d'eau.

Les activités de pêche ont également été prises en compte pour fiabiliser les plans d'échantillonnages sur la zone.

1.2.3. Moyens et Matériels

1.2.3.1. Moyens nautiques

Le navire utilisé pour l'échantillonnage des stations ponctuelles est le VDC Lynx de la société NORMANDY OFFSHORE SERVICES (Figure 2).



Figure 2 : navire VDC Lynx de la société NORMANDY OFFSHORE SERVICES.

Ce navire offre une stabilité en mer et possède tous les équipements nécessaires pour les différentes opérations associées aux prélèvements d'eau. La configuration et la capacité du navire sont essentielles pour garantir la précision des prélèvements et la continuité des mesures en mer, quelles que soient les conditions de navigation.

Les conditions limites de mise en œuvre sont les suivantes dans le cadre du suivi de la qualité de l'eau par stations ponctuelles :

- Vent : inférieur ou égal à 4 Beaufort ;
- État de la mer : mer calme à peu agitée (état de mer à 3).

Les navires utilisés pour l'échantillonnage des stations permanentes appartiennent à la société TSM (Figure 3).



Figure 3 : exemple d'un navire de la société TSM (ici, le TSM Kermor).

Ces navires offrent une stabilité en mer et possèdent tous les équipements nécessaires pour les différentes opérations à la manipulation des lignes de mouillage. La configuration et la capacité des navires sont essentielles pour garantir la sécurité des manœuvres et la continuité des mesures en mer, quelles que soient les conditions de navigation.

Les conditions limites de mise en œuvre sont les suivantes dans le cadre du suivi de la qualité de l'eau par stations permanentes :

- Vent : inférieur ou égal à 4 Beaufort ;
- État de la mer : mer calme à peu agitée (état de mer à 3).

1.2.3.2. Moyens humains

L'échantillonnage des stations ponctuelles nécessite deux personnes, en plus de l'équipage du navire VDC Lynx.

L'échantillonnage des stations permanentes nécessite deux personnes, en plus de l'équipage des navires de la société TSM.

1.2.3.3. Lignes de mouillage

La ligne de mouillage hébergeant les instruments de mesure est illustrée sur la **Figure 4**.

La ligne présentée est également porteuse d'autres instruments « déportés » et sur la bouée de surface dans le cadre des mutualisations des moyens demandé par la commande publique.

La conception du système de mouillage est la suivante :

- **Ancrage** : des ancrages de type corps-mort bloc de béton sont utilisés. Ce type d'ancrage est efficace pour garantir la stabilité des équipements de mesures face aux courants marins et conditions météorologiques de la Manche. Il est également adapté aux fonds sédimentaires, avec un coefficient de frottement de 0,27 pour optimiser la tenue ;
- **Ligne de mouillage** : constituée de deux éléments, la ligne de mouillage proposée a été éprouvée pendant plusieurs années en Manche et bénéficie des améliorations et retours d'expérience :
 - Le premier élément partant du corps-mort est une chaîne de 22 mm sur une longueur de 60 m. La chaîne agit comme un amortisseur sur la traction de surface que la bouée

provoque. Le choix d'une chaîne de 22 mm correspond à un dimensionnement excessif assurant une solidité et tenue en place accrue ;

- Le second élément est une aussière synthétique huit torons d'une résistance de 15 tonnes et d'une longueur de 30 mètres. L'alsoère apporte souplesse au montage des instruments de collecte des données, ainsi qu'une maintenance opérationnelle facilitée. L'alsoère permet également un allègement des contraintes qu'une chaîne dans la colonne d'eau viendrait faire porter sur la bouée. Le mouillage dans son ensemble se trouve ainsi renforcé.
- **Flotteurs** : une bouée de surface est utilisée pour localiser le système de mouillage. La bouée proposée est de type « marque spéciale » de trois mètres de diamètre. Cette bouée est équipée d'un dispositif GPS permettant de suivre sa position en temps réel. Un feu de signalisation visible jusqu'à cinq milles nautiques est installé au sommet de la bouée.

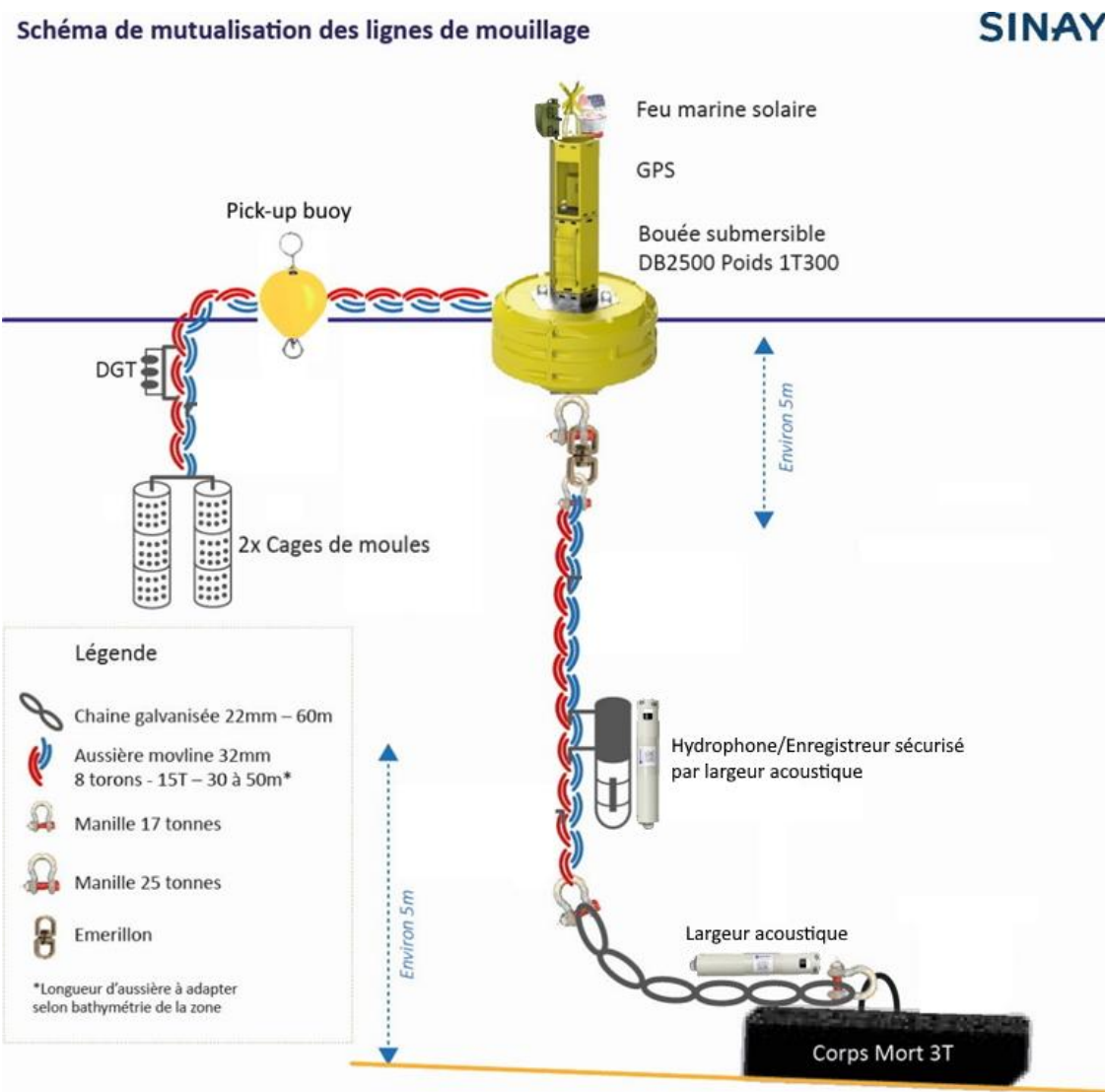


Figure 4 : schéma des lignes de mouillage pour le suivi de la qualité de l'eau par stations permanentes (DGT et pochons de moules).

L'ensemble du matériel des lignes de mouillage et d'échantillonnage sont disponibles en doublon et prêt à être mobilisé en cas d'avarie. La structure de la ligne de mouillage a été conçue afin de résister aux mauvaises conditions météorologiques de la Manche.

1.2.3.4. Matériel de mesure sur le terrain

1.2.3.4.1 Stations ponctuelles

Les stations ponctuelles sont échantillonnées au moyen d'une bouteille de prélèvement de type Niskin, associée à une sonde multi-paramètres (**Figure 5**). Ces systèmes d'acquisitions sont fixés sur un même dispositif. Cela assure la précision de la profondeur d'échantillonnage des prélèvements en fournissant un contexte environnemental détaillé permettant de mettre en relation les différents paramètres obtenus.

La bouteille Niskin permet de prélever des échantillons d'eau de mer à différentes profondeurs pour une analyse détaillée de la qualité de l'eau (salinité, oxygène, nutriments, etc.) à un temps et une profondeur donnée.

La sonde multi-paramètres permet de mesurer en continu les paramètres hydrologiques essentiels (salinité, température, turbidité, oxygène dissous, chlorophylle *a*) sur toute la colonne d'eau. Ce matériel permet d'obtenir un profil instantané des conditions hydrologiques.

Les sondes multi-paramètres sont vérifiées et calibrées annuellement par le constructeur. Pour les paramètres de pH, de température et de turbidité, des contrôles internes sont réalisés avant chaque campagne d'échantillonnage (avec une solution étalon pour le pH, la salinité et la turbidité et par inter-comparaison avec d'autres sondes pour le paramètre température ou les précédentes données acquises sur la zone d'étude). Un rapport de suivi métrologique et de conformité de la sonde est produit avant chaque campagne.

Sinay prévoit également des solutions de rechange pour tout équipement critique, permettant un remplacement rapide sur le terrain en cas de défaillance. Chaque campagne inclut un suivi rigoureux des besoins en pièces de rechange et des procédures de calibration régulières, garantissant ainsi la fiabilité des données collectées et minimisant les interruptions pendant les opérations de terrain.



Figure 5 : dispositif comprenant une bouteille de prélèvement de type Niskin d'une contenance de cinq litres et une sonde multi-paramètres WiMo.

La sonde multi-paramètres choisie pour le suivi de la qualité de l'eau est la Wimo Plus de NKE (**Tableau 1** et **Tableau 2**).

Tableau 1 : caractéristiques physiques de la sonde multi-paramètres WiMo.

Caractéristiques physiques	
Immersion en mer	Jusqu'à 250 mètres de profondeur.
Dimensions	Largeur : 610 mm Diamètre : 110 mm Poids sans lest : 3 KG

Tableau 2 : caractéristiques techniques de la sonde multi-paramètres WiMo.

Caractéristiques techniques			
Paramètre	Gamme	Précision	Résolution
Pression	0 à 25 bars	0,15%	0,001 bar
Température	-2 à +35°C	±0,002°C	0,001°C
Conductivité	0 à 100 mS/cm	25 µS ou 0,5% de la lecture	0,0001 mS/cm
Concentration en oxygène	0-23 mg/l (max, 0-44 mg/l)	± 0,1 mg/l	0,0025 mg/l
Saturation en oxygène	0-250% (max, 0-500%)	± 1% de la lecture	0,25%
Turbidité	0 à 4000 NTU	0,4 NTU ou 5% de la lecture	0,01 NTU

1.2.3.4.2 Stations permanentes

Les stations permanentes sont échantillonnées grâce à des capteurs passifs de type *DGT* (*Diffusive Gradients in Thin films*) (**Figure 6**) et des pochons de moules protégés dans des cages (**Figure 7**).

Un *DGT* (**Figure 6**) est un dispositif en plastique qui accumule les substances dissoutes dans l'eau, fournissant la concentration in situ intégrée pendant la durée du déploiement. Il se compose d'une base plastique et d'un bouchon circulaire avec une ouverture.

Une couche de résine, de gel diffusif et de membrane filtrante sont empilés sur une base, et un bouchon est placé sur l'ensemble. Les éléments échantillonnés passent par le filtre à membrane et le gel diffusif et sont accumulés dans la résine de manière contrôlée, par flux diffusif.



Figure 6 : structure d'un DGT (Source : Projet MONITOOL).



Figure 7 : exemples de cages dans lesquelles les pochons de moules sont conditionnés et immergés .

Les pochons de moules permettent de suivre l'impact des contaminants chimiques sur les organismes marins filtreurs. Ceux-ci absorbent les contaminants présents dans l'eau, agissant comme indicateurs de bioaccumulation. Les *DGT* permettent de capturer les contaminants en traces (composants métalliques, autres polluants) pour évaluer les concentrations de polluants disponibles pour l'absorption biologique.

1.2.4. Déploiement opérationnel

1.2.4.1. Stations ponctuelles

Pour chaque station ponctuelle, la bathymétrie est relevée par le sondeur du navire pour déterminer la profondeur optimale des prélèvements. Le dispositif (sonde multi-paramètres et bouteille Niskin couplées) est fixé à un lest de cinq kilos pour garantir une descente verticale.

Les prélèvements d'eau sont réalisés à trois profondeurs : sous la surface (un mètre sous la surface, à mi-profondeur et un mètre au-dessus du fond). A chaque profondeur, un prélèvement à la bouteille Niskin et un profil à la sonde multi-paramètre WiMo est réalisé.

La bouteille de prélèvement Niskin est descendue ouverte pour permettre à l'eau de circuler librement jusqu'à atteindre la profondeur cible. Elle est ensuite fermée à l'aide d'un messenger qui déclenche le mécanisme de fermeture. Une fois l'échantillon capturé, la bouteille est remontée à bord manuellement ou à l'aide d'un treuil électrique.

Des flacons, en général d'un volume de 1L (et au minimum de 250 mL), et de préférence à col large sont utilisés pour faciliter le remplissage sur le terrain. Les flacons sont fournis par le laboratoire d'analyses en fonction des paramètres. Ils permettent donc une meilleure conservation avant leur envoi. Ils peuvent être en polyéthylène (PE), polypropylène (PP), en chlorure de polyvinyle (PVC) ou en verre en fonction des paramètres à analyser.

Les échantillons sont conditionnés dans des contenants hermétiques appropriés, en fonction des analyses physico-chimiques prévues, puis soigneusement étiquetés. Ils sont placés dans une glacière maintenue à $5\pm 3^{\circ}\text{C}$ pour garantir leur conservation jusqu'à leur transfert au laboratoire partenaire pour les analyses. Les échantillons destinés aux analyses de la chlorophylle *a*, et des phéopigments seront filtrés et congelés afin de permettre une analyse plus tardive sans entraîner de biais (dans les 48 heures).

En parallèle, la sonde multi-paramètres WiMo mesure la température, la pression, la salinité, la concentration en oxygène dissous, la mesure optique (NTU) et la chlorophylle *a* (fluorescence) tous les mètres jusqu'à 1 m au-dessus du fond. Les coordonnées GPS de chaque point de prélèvement sont enregistrées à l'aide du GPS Mobile Mapper CE (précision 1m). La bouteille Niskin d'un volume de 5 litres, est suffisant pour réaliser chacun des échantillons par profondeur en une seule fois. Trois descentes et remontées seront donc nécessaire par station.

Au retour au port, les échantillons et les données sont transportés au laboratoire pour analyse. Une fiche de métadonnées est remplie sur place pour chaque station, comprenant les informations essentielles : identification de la station, coordonnées GPS, méthode de prélèvement, conditions environnementales et observations.

Cette fiche suit le modèle de l'Ifremer utilisé dans le cadre des protocoles de surveillance de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE). Les échantillons sont envoyés dans un délai de 48h au laboratoire partenaire en charge des analyses (LABEO).

1.2.4.2. Stations permanentes

La préparation des stations permanentes commence à terre avec l'assemblage des lignes de mouillage, incluant les cages et les pochons de moules ; et les dispositifs *DGT* afin d'assurer une installation efficace à l'échelle de chaque station.

Pour chaque station, trois résines Chelex 100 et trois résines Chelex TiO₂ sont préparées et assemblées sur un support. Un blanc terrain et un blanc laboratoire sont également préparés (un support de chaque contenant les 6 résines). Afin de prévenir la contamination des *DGT*, le contact direct avec ceux-ci doit être minimisé (port de gants non poudrés, de préférence non colorés). Les *DGT* sont conservés dans des conditions réfrigérées avant leur immersion (4°C), en évitant la congélation, car le rendement de la résine peut être affecté.

L'espèce utilisée pour le suivi du biote est la moule commune (*Mytilus edulis*). Le choix se porte sur cette espèce en raison de sa distribution géographique dans la Manche, ses facilités d'approvisionnement, sa robustesse, la bonne connaissance de cette espèce ainsi que sa période de maturité sexuelle. Pour garantir l'homogénéité des lots, une taille de 50 mm, correspondant à des jeunes adultes d'environ 18 mois, est respectée à plus ou moins cinq millimètres. Ces moules sont fournies par un mytiliculteur local.

Les moules sont conditionnées dans des cages afin de les protéger contre la prédation et les conditions météorologiques qui peuvent être violentes dans le secteur en période automnale et hivernale. Les cages dans lesquelles les moules sont conditionnées, sont de conception spécifique, réalisée par Sinay dans le cadre des suivis éoliens pour respecter les contraintes du milieu et atteindre les objectifs de l'étude. Chaque cage contient environ cinq kilos de moules soit deux pochons (2 x 2,5 kilos).

Une fois en mer, le navire se déplace vers chaque station géoréférencée, où les coordonnées GPS de chaque point de déploiement sont enregistrées pour une installation précise des dispositifs. Pour chaque station permanente, les techniciens positionnent deux pochons de moules par cage (deux cages de moules par station). Ces cages sont attachées solidement à la chaîne de mouillage à l'aide de manilles, et placées à quelques mètres de profondeur (cinq mètres sous la surface) pour réduire tout risque de contamination des dispositifs *DGT*, positionnés au-dessous. Lors de la mobilisation des *DGT*, le blanc terrain est exposés durant un laps de temps équivalent à celui où sont exposés les *DGT* immergés.

Le déploiement et la relève des lignes de mouillage est assuré par l'équipe du navire, utilisant une grue de levage, et suivant un schéma de positionnement prédéfini. Cette procédure est répétée pour chaque station permanente à laquelle sont fixées les cages de moules et les dispositifs *DGT*, garantissant une configuration cohérente sur toutes les stations.

Un prélèvement d'eau pour l'analyse du Carbone Organique Dissous (COD) est réalisé lors du déploiement des dispositifs *DGT*. De l'eau de mer est également prélevée au moment de la démobilisation des pochons de moules après trois mois. Cette eau sert à l'analyse des échantillons des pochons de moules au laboratoire pour analyse. Un profil de la colonne d'eau à la sonde multi-paramètre est réalisé lors de la mobilisation et la démobilisation des *DGT*.

À chaque station, une fiche de métadonnées est complétée sur place. Elle inclut des informations essentielles telles que l'identification de la station, les coordonnées GPS, la méthode de déploiement, les conditions environnementales et toute observation spécifique. Cette fiche suit le modèle établi par l'Ifremer en accord avec les protocoles de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE).

Lors du déploiement, un pochon de moules témoin (2,5 kg) et trois triplicata *DGT* (blanc laboratoire et blanc terrain) par type sont envoyés au laboratoire.

À la fin de la période d'immersion (trois mois pour les moules et 5 à 15 jours pour les *DGT*), les dispositifs sont récupérés. Les échantillons sont conditionnés dans des contenants hermétiques appropriés, en fonction des analyses physico-chimiques prévues, puis soigneusement étiquetés. Ils sont placés dans une glacière maintenue à 5±3°C pour garantir leur conservation jusqu'à leur transfert au laboratoire partenaire pour les analyses dans un délai de 48 heures.

Les moules sont lavées à l'eau de mer, dégrappées, triées en séparant les individus morts des individus vivants. Pour chaque pochon de moules, la mortalité de la poche est mesurée (faite après constitution du pochon pour celui analysé à T0, ou sur site à bord du bateau, à la sortie de l'eau des pochons pour les pochons analysés à T0+3 mois).

Les éluons et les éluas résultants sont analysés par un laboratoire accrédité par l'Ifremer (FILAB). Les échantillons d'eau de mer et les moules sont analysés par le laboratoire partenaire (LABEO).

1.3 Données collectées

Les analyses physico-chimiques sont réalisées par les laboratoires partenaires selon un protocole préalablement défini. Ces limites de quantification (LQ) des matrices « Eau » et « Biote » sont précisées dans le **Tableau 3**.

Tableau 3 : paramètres mesurés, ainsi que les certifications et limites de quantification (par le laboratoire partenaire LABEO) associées pour le suivi de la qualité de l'eau (PF=Poids Frais ; MS=Matières sèche).

Paramètres mesuré et limites de quantification (LQ)				
Instrument de mesure	Matrice	Catégorie	Paramètre mesuré	LQ
Sonde multi-paramètres	Eaux Marines	Hydrologie	Température	na
			Salinité	na
			Concentration en oxygène dissous	na
			Fluorescence (Chlorophyll a)	na
Sonde multi-paramètres	Eaux Marines	Transparence	Mesure optique (NTU)	na
Bouteille Niskin	Eaux Marines	Transparence	Matières en suspension (MES) (fractions organiques et minérales)	2.00 mg/l
Bouteille Niskin	Eaux Marines	Biologie	Concentration en chlorophylle a et phéopigments	1.00 µg/l
Bouteille Niskin	Eaux Marines	Nutriments	Carbone Organique Dissous	0.2 mg C/l
			Azote Kjeldahl	0.50 mg/l
			Nitrite	0.001 mg/l
			Nitrate	0.01 mg/l
			Orthophosphates	0,02 mg/l
			Ammonium	0.005 mg/l
			Phosphates	0.02 mg/l
Silicate	0.05 mg/l			
Pochons de moules	Biote	Composés métalliques	Aluminium	0.10 mg/kg PF
			Argent	0.025 mg/kg PF
			Cadmium	0.005 mg/kg PF
			Chrome	0.050 mg/kg PF
			Cuivre	0.025 mg/kg PF
			Fer	0.05 mg/kg PF
			Gallium	0.005 mg/kg PF
			Indium	0.005 mg/kg PF
			Lithium	0.050 mg/kg PF
			Manganèse	0.050 mg/kg PF
			Mercuré	0.010 mg/kg PF
			Nickel	0.050 mg/kg PF
			Plomb	0.010 mg/kg PF
			Zinc	0.25 mg/kg PF
Pochons de moules	Biote	HAP	Naphtalène	5 µg/kg MS
			Anthracène	1 µg/kg MS
			Fluoranthène	2 µg/kg MS
			Benzo(a)pyrène	3 µg/kg MS
			Benzo(b)fluoranthène	3 µg/kg MS
			Benzo(g,h,i)pérylène	5 µg/kg MS
			Benzo(k)fluoranthène	3 µg/kg MS
			Indeno(1,2,3-cd)pyrène	5 µg/kg MS
			Acenaphtylène	1 µg/kg MS
			Acenaphtène	1 µg/kg MS
			Fluorène	1 µg/kg MS
			Phénanthrène	1 µg/kg MS
			Benz[a]anthracène	2.5 µg/kg MS
			Chrysène	2.5 µg/kg MS
			Pyrène	2 µg/kg MS
			Dibenz[a, h]anthracène	5 µg/kg MS
Pochons de moules	Biote	Paramètres complémentaires	Teneur en matière sèche (%)	0,10 %
			Teneur en lipides totaux (%)	0,10 %
			Taille des échantillons	-
			Indice de condition des échantillons	-

Paramètres mesuré et limites de quantification (LQ)				
Instrument de mesure	Matrice	Catégorie	Paramètre mesuré	LQ
Échantillonneurs passifs (DGT)	Biote	Composés métalliques	Aluminium	0.26 µg/l
			Cadmium	0.003 µg/l
			Chrome	0.13 µg/l
			Cuivre	0.049 µg/l
			Fer	0.11 µg/l
			Indium	en cours
			Manganèse	0.11 µg/l
			Nickel	0.11 µg/l
			Plomb	0.031 µg/l
			Zinc	0.21 µg/l

2. Traitement et analyse des données

2.1 Traitements des échantillons

2.1.1. Matrice Eau

Le traitement des échantillons est réalisé par le laboratoire LABEO (accrédité COFRAC et de la Norme NF EN ISO 16 665) selon la méthode interne au laboratoire.

Les analyses réalisées, les méthodologies appliquées et les normes suivies par le laboratoire sont les suivantes :

- **Paramètres physico-chimiques (Hydrologie) :**
 - Température : mesurée à l'aide d'une sonde multi-paramètres ;
 - Salinité : mesurée par conductivité électrique ;
 - Oxygène dissous : mesuré par méthode électrochimique (capteur optique) ;
 - Fluorescence : analyse par fluorimétrie pour estimer la chlorophylle a.
- **Transparence et matières en suspension (MES) :**
 - Transparence (NTU) : déterminée par turbidimétrie ;
 - MES (NF en 872 (FISHER-11704083)) : méthode par filtration et pesée gravimétrique.
- **Biologie et carbone organique dissous (COD) :**
 - Chlorophylle a et indice de phéopigments (NF T 90-117) : analyse par spectrométrie d'absorption moléculaire ;
 - Carbone organique dissous : détection par combustion catalytique et analyse infrarouge.
- **Nutriments :**
 - Ammonium (méthode interne selon les recommandations Ifremer – Hydrologie des écosystèmes marins) ;
 - Azote Kjeldahl (NF EN 25663) ;
 - Nitrates (NF EN ISO 13395) ;
 - Nitrites (NF EN ISO 13395) ;
 - Phosphates (méthode interne) ;
 - Silicates (NF EN ISO 15923-1) ;
 - Les analysés sont réalisées par colorimétrie automatisée ou spectrophotométrie.

2.1.2. Matrice Eaux marines par DGT

Les éluions et les éluas résultants sont analysés par un laboratoire accrédité par l'Ifremer (FILAB). La limite de quantification visée est de l'ordre de 0,1 µg/L.

Les analyses réalisées sont les suivantes :

- **Composés métalliques :**

- Aluminium, Cadmium, Chrome, Cuivre, Fer, Manganèse, Nickel, Plomb, Zinc : *Diffusive Gradient in Thin-film* (DGT) pour la préconcentration, suivi d'une analyse par ICP-MS.

2.1.3. Matrice Biote

Les analyses sur la chair des moules sont réalisées par le laboratoire LABEO. Des analyses sont réalisées à deux moments : à T0 (état zéro de la contamination au début) sur un échantillon témoin pour voir la contamination initiale du lot mis en place ; et à T0+3 mois (à la fin des trois mois d'immersion) pour toutes les stations.

Le nombre de moules à envoyer pour analyse est préalablement validé avec le laboratoire en fonction des paramètres à réaliser. Pour les analyses menées à T0+3 mois, un échantillon moyen est constitué à partir des quatre pochons de moules relevés sur la station.

Les analyses réalisées, les méthodes appliquées et les normes suivies sont les suivantes :

- **Composés métalliques :**

- Aluminium (ET2M LSA-INS-0086) ;
- Argent (ET2M LSA-INS-0086) ;
- Cadmium (ANSES/LSAaliments/LSA-INS-0084) ;
- Chrome (ET2M LSA-INS-0086) ;
- Cuivre (ET2M LSA-INS-0086) ;
- Fer (ET2M LSA-INS-0086) ;
- Gallium ;
- Indium ;
- Lithium ;
- Manganèse (méthode interne) ;
- Mercure (ANSES/LSAaliments/LSA-INS-0084) ;
- Nickel (ET2M LSA-INS-0086) ;
- Plomb (ANSES/LSAaliments/LSA-INS-0084) ;
- Zinc (ET2M LSA-INS-0086) ;
- Les analyses sont effectuées par ICP-MS ou spectrométrie d'absorption atomique (SAA).

- **Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) par GC/MS-MS selon méthode MIOE-MO-0073 :**

- Naphtalène, anthracène, fluoranthène, benzo[a]pyrène, etc. : Extraction par Soxhlet suivie de l'analyse par GC-MS (Chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse).

- **Paramètres complémentaires :**

- Teneur en matière sèche (%), teneur en lipides totaux (%), taille des échantillons, indice de condition des échantillons : mesures par méthodes standardisées, souvent associées à des protocoles gravimétriques ou biochimiques.
- **Analyses biométriques :**
 - Taille de la coquille, poids humide de chair, poids sec de chair, poids sec de coquille, indice de condition.

2.2 Prétraitement des données brutes avant analyse

Le prétraitement des données est une étape essentielle pour garantir la qualité des analyses. **Ce processus inclut les étapes suivantes :**

- **Nettoyage des données :** les données brutes issues des différentes analyses en laboratoire sont inspectées et nettoyées par un script réalisé par Sinay, pour éliminer les erreurs et les valeurs aberrantes. En cas de doute, le laboratoire responsable des analyses est contacté ;
- **Formatage :** les données sont formatées pour être compatibles avec les logiciels d'analyse et les modèles statistiques utilisés dans le cadre des indicateurs demandés ;
- Les données sont ensuite organisées selon un format standardisé (chaque colonne correspond à une variable, chaque ligne correspond à une observation) pour faciliter les analyses ;
- **Agrégation des données par temporalité :** les données sont regroupées par mois ou par saison pour permettre une analyse des variations temporelles ;
- **Agrégation des données par localisation :** les données sont regroupées par zone géographique afin de permettre une analyse des variations spatiales.

Ce prétraitement assure la fiabilité et la cohérence des données, optimisant ainsi leur exploitation pour les analyses finales et les interprétations.

Les données issues des analyses *DGT* sont traitées selon les recommandations d'Amouroux et al., 2023.

2.3 Techniques d'analyse statistique

Les données collectées sont utilisées pour réaliser des analyses approfondies en lien avec la qualité de l'eau. Chaque variable physique est représentée sous forme de profils bathymétriques pour chaque mois de suivi. Chaque variable chimique est représentée sous forme de séries temporelles, identifiant les profondeurs auxquelles chaque prélèvement est effectué. Ces analyses incluent une évaluation des paramètres physico-chimiques et des contaminant présent dans l'eau. Elles sont réalisées à l'échelle de chaque station et de chaque échantillon.

Les valeurs de chaque variable sont aussi résumées pour obtenir des statistiques descriptives. La moyenne et l'écart type de chaque variable sont calculés sur toute la colonne d'eau, sur les cinq premiers mètres de profondeur, et sur les cinq derniers mètres, au plus proche du fond.

2.4 Interprétation des résultats et visualisation

Les résultats sont interprétés en tenant compte des connaissances existantes et des données disponibles pour la région, provenant de recensements antérieurs et de la littérature scientifique. Les

résultats seront également sujets à validation de la part des experts en biologie marine, ce qui permet d'éviter des résultats incohérents au niveau écologique.

Les résultats associés à la matrice « Eau » (transparence et matière en suspension ; chlorophylle a et phéopigments ; carbone organique dissous et nutriments) sont comparés **aux valeurs de seuil de qualité environnementale NQE** lorsque cela est possible :

- **Les seuils NQE-MA** : pour les substances dites "prioritaires" et "prioritaires dangereuses" de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) ; Norme de Qualité Environnementale en Moyenne Annuelle, applicable dans les eaux de surfaces côtières et de transition visant la protection de l'environnement et de la santé humaine ;
- **Les seuils NQE-CMA** : pour les substances dites "prioritaires" et "prioritaires dangereuses" de la DCE ; Norme de Qualité Environnementale en Concentration Maximale Admissible réglementaire, applicable dans les eaux de surface côtières et de transition visant la protection de l'environnement et de la santé humaine.

Pour les paramètres physico-chimiques mesurés à la sonde multi-paramètres (température, salinité, turbidité, fluorescence et oxygène dissous), les résultats sont comparés entre stations (analyse spatiale) et sur la colonne d'eau. Une analyse comparée dans le temps est également effectuée au niveau de chaque station (analyse temporelle).

Les résultats associés à la matrice « Biote » (composés métalliques, HAP et paramètres biologiques des moules) sont comparés aux seuils de qualité environnementaux définis pour **le Descripteur 8 de la DCSSM** :

- **L'Environmental Assessment Criteria (EAC)** représente la concentration en contaminant dans le sédiment et le biote en dessous de laquelle un effet chronique n'est pas attendu pour les espèces marines, notamment les plus sensibles (OSPAR, 2009). On considère que des concentrations en contaminants inférieures aux seuils EAC représentent un risque acceptable pour l'environnement ;
- **L'Effects Range Low (ERL)** développé par l'US EPA (United States Environmental Protection Agency), renseigne sur la qualité des sédiments et est utilisé pour protéger les organismes de potentiels effets délétères des contaminants (EPA, 2002). Les effets pour les organismes sont rarement préjudiciables lorsque les teneurs en contaminants sont inférieures à la valeur de l'ERL. Ce seuil représente une solution alternative lorsque les seuils EAC recommandés ne sont pas disponibles (OSPAR, 2009) ;
- **Le seuil sanitaire (EC)** est la teneur maximale admise dans les denrées alimentaires par la réglementation de la Communauté Européenne afin de protéger la santé publique (Commission Regulation no 1881/2006). Les seuils EC sont recommandés par OSPAR pour les métaux dans le biote en l'absence de seuils environnementaux (OSPAR, 2009) ;
- Pour certaines substances ou certains effets, un **Background Assessment Concentration (BAC)** est aussi disponible. Le BAC correspond à la concentration d'un contaminant proche ou égale au bruit de fond (substances naturelles) ou de zéro (substances artificielles) (OSPAR, 2009).

Les analyses chimiques obtenues à T0+3 mois sont comparées avec les résultats des analyses initiales (T0). Une comparaison est aussi faite entre les stations de la zone rapprochée et les stations de la zone éloignée.

Afin de fournir une base visuelle et quantitative de la qualité de l'eau de la zone d'étude, les résultats des différentes analyses sont représentés sous forme de tableaux, graphiques ou cartographies.

La **Figure 8** présente un exemple de représentation graphique de l'évolution de la température (°C).

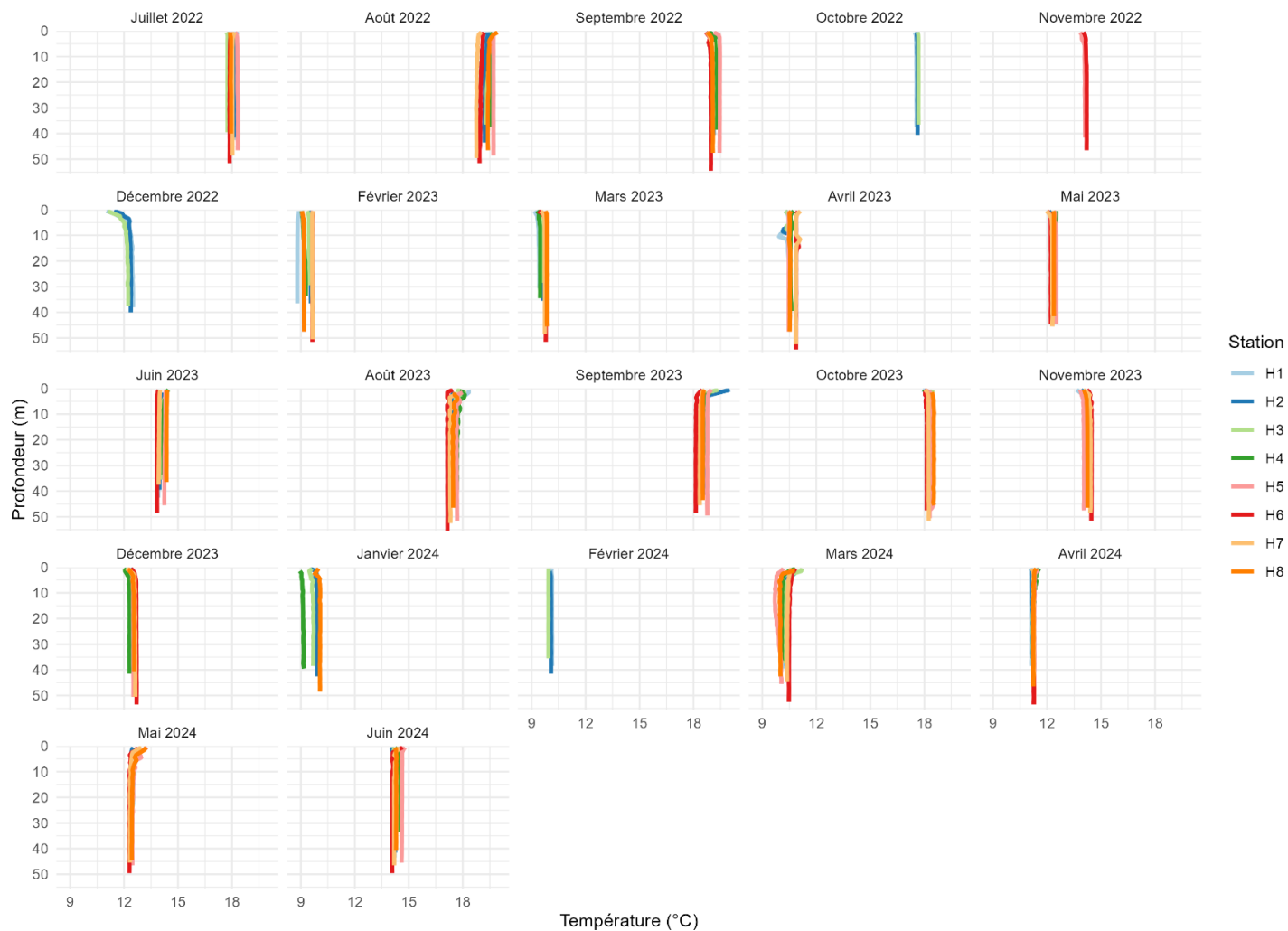


Figure 8 : exemple de représentation graphique de l'évolution de la température (°C) par station en fonction de la profondeur au cours des campagnes d'échantillonnage réalisées à la sonde multi-paramètres WiMo de juillet 2022 à juin 2024 sur la zone d'étude des futurs parcs éoliens Centre Manche 1 et 2.



DREAL Normandie - MTE
Fécamp Grand Large

FICHE PROTOCOLE

Bruit ambiant sous-marin et mammifères marins par
acoustique passive



Table des matières

Table des matières	1
1. Méthodologie	3
1.1 Objet de la fiche protocole	3
1.2 Rappel des objectifs de l'étude	3
1.3 Description du protocole	4
1.3.1. Principe général.....	4
1.3.2. Protocole spécifique pour la calibration des modèles de propagation acoustique	4
1.3.3. Plan d'échantillonnage	5
1.3.4. Moyens et Matériels	6
1.3.5. Déploiement opérationnel des moyens de collecte.....	10
1.4 Mesures de qualité et sécurité spécifique au compartiment	11
2. Traitement et analyse des données	14
2.1 Vérifications in situ de calibration pour maximiser la qualité des données.....	14
2.2 Prétraitement des données brutes avant analyse.....	14
2.3 Description du paysage sonore et détections bioacoustiques pour l'étude des mammifères marins	15
2.3.1. Détection et classification des sons	15
2.3.2. Calcul des indicateurs d'intensité sonore	17
2.4 Modèle de propagation acoustique	17
2.5 Traitements et modélisations statistiques pour déterminer la variabilité spatiale et temporelle du bruit et des mammifères marins	19
2.6 Analyse comportementale des odontocètes.....	21

Index des illustrations

Figure 1 : processus de calibration des modèles acoustiques pour une cartographie de bruit.	4
Figure 2 : plan d'échantillonnage du suivi du bruit ambiant sous-marin par acoustique passive dans la zone de Fécamp Grand Large (stations BA_01 à BA_10).	5
Figure 3 : exemple d'un navire de la société TSM (ici, le TSM Kermor).	6
Figure 4 : schéma des lignes de mouillage pour le suivi du bruit ambiant sous-marin et des mammifères marins par acoustique passive.	7
Figure 5 : enceinte sous-marine Lubell 916 cc (gauche) et valise de contrôle (droite).	8
Figure 6 : exemple de certificat de calibration des enregistreurs et hydrophones.	12
Figure 7 : exemples de représentation d'évènements sonores, d'en haut à gauche à en bas à droite : son naturel d'une tempête, passage d'un navire, sifflement d'un Delphinidé, clic de Marsouin commun.	15
Figure 8 : exemple de représentation graphique de l'évolution des niveaux de bruit (Lp, notés comme SPL-RMS dans le graphique) sur un site.	17

Figure 9 : exemple de graphique DSP avec comparaison avec le modèle de Wenz.(1962).....	17
Figure 10 : exemple de représentation cartographique du bruit large bande du trafic maritime : niveau médian de pression sonore en été montrant le rail de navigation dans le canal de la Manche (source : Sinay).....	19
Figure 11 : exemple de représentation graphique de la variation d'intensité d'écholocation par les delphinidés au cours d'une année de suivi (source : Sinay).....	19
Figure 12 : exemple de variables environnementales utilisés lors des modélisations GAM.	20
Figure 13 : exemple de sortie d'un modèle GAM mettant en évidence l'effet de plusieurs variables (> 0 effet positif, < 0 effet négatif) sur la présence de Marsouin commun.	21
Figure 14 : exemple d'analyse comportementale selon les saisons.	22

Index des tableaux

Tableau 1 : spécifications techniques des hydrophones et des enregistreurs utilisés pour le suivi du bruit ambiant sous-marin.	8
Tableau 2 : logiciel et outils d'analyse utilisés pour le suivi du bruit ambiant sous-marin.	10
Tableau 3 : configuration envisagée du modèle de propagation acoustique mis en place pour l'état initial sur la zone FGL.	18
Tableau 4 : liste non-exhaustive des sources de données environnementales pouvant être utilisées pour les modélisations	20

1. Méthodologie

Cette fiche regroupe les deux compartiments pouvant être suivis par la méthode d'acquisition de l'acoustique passive : le bruit sous-marin ambiant et les mammifères marins.

1.1 Objet de la fiche protocole

L'objet de ce document est la présentation des éléments constituant le protocole de collecte de données pour l'étude du bruit ambiant et des mammifères marins par acoustique passive :

- Le principe général ;
- Le plan d'échantillonnage ;
- Les activités spécifiques pour la calibration des modèles acoustiques ;
- Les moyens et les matériels ;
- Le déroulement envisagé pour le déploiement opérationnel.

D'autres éléments sont apportés en complément :

- Les mesures de qualité et de sécurité ;
- Le plan de maintenance des instruments ;
- Les procédures pour assurer la qualité des données ;
- Les traitements et les analyses prévues.

1.2 Rappel des objectifs de l'étude

Les objectifs du suivi du bruit ambiant sous-marin sont :

- **Décrire l'état initial pour le compartiment « bruit ambiant sous-marin » (état initial acoustique), au moyen d'indicateurs acoustiques et de cartographies permettant de :**
 - Décrire le paysage sonore de la zone ;
 - Mettre en évidence l'intensité sonore du bruit ambiant ;
 - Comprendre la distribution des niveaux de bruit sur l'aire d'étude ;
 - Comprendre la variabilité sonore d'origine naturelle et anthropique.
- **Caractériser la présence et l'utilisation de la zone par les mammifères marins au moyen d'indicateurs d'activité bioacoustique permettant de :**
 - Recenser les espèces présentes (biodiversité acoustique) ;
 - Étudier le type de présence (rare, occasionnelle, régulière) ;
 - Comprendre les facteurs de variabilité sur la présence et l'activité des mammifères marins ;
 - Décrire l'utilisation de la zone par les différentes espèces.

1.3 Description du protocole

1.3.1. Principe général

Le protocole mis en place consiste à déployer des capteurs acoustiques placés dans des zones stratégiques afin d'enregistrer l'ensemble des composant du bruit ambiant (anthropophonie, géophonie et biophonie) sur une période de deux ans

Pour cela, des hydrophones large bande (**HTI-99-UHF**) couplés à des enregistreurs de haute capacité (**ABYSSens© DORI-M**) sont utilisés. Montés sur des lignes de mouillage et localisés à cinq mètres du fond, ces instruments sont capables de capter une large gamme de fréquences, permettant de couvrir l'ensemble des sons d'intérêt pour l'étude.

Le protocole s'appuie sur des méthodologies standardisées pour assurer une caractérisation robuste du paysage sonore et une évaluation rigoureuse des impacts potentiels. Il prévoit la mise en œuvre des recommandations du MEEM (2017) et d'un plan d'échantillonnage adapté de type *BAG*, afin de décrire l'état initial du site Fécamp Grand Large et d'identifier les gradients existants.

L'analyse spectrale et temporelle permet de distinguer les contributions anthropophoniques, géophoniques et biophoniques, tandis que l'évaluation suit les principes établis pour le bruit sous-marin (Faulkner et al. 2018), incluant l'identification des espèces sensibles, des sources de bruit, l'utilisation de modèles validés et de critères d'exposition reconnus.

Les paramètres d'échantillonnage sont définis pour garantir la détection des signaux pertinents, avec une attention particulière portée à la qualité des données et à la calibration, selon les recommandations du NPL (Robinson, S. P., Lepper, P. A., & Hazelwood, 2014) et du programme européen JONAS (Dellong et al., n.d.). Enfin, il répond aux préconisations du guide DCSMM (Dekeling et al. 2014), en précisant l'implantation des stations et la profondeur des hydrophones pour l'obtention de données de bruit ambiant (Catégorie A) et la réduction de l'incertitude sur les émissions sonores modélisées (Catégorie B).

1.3.2. Protocole spécifique pour la calibration des modèles de propagation acoustique

Il s'agit de mesurer la transmission du son dans l'eau au travers d'émissions sonores contrôlées. Les signaux acoustiques utilisés sont générés par ordinateur avec une plage de fréquences connues et un niveau d'émission connu (dB re 1µPa m).

Pour ce faire, à chaque déploiement des stations de mesure, plusieurs transects sont réalisés à partir d'une station avec des arrêts à plusieurs distances pour émettre les signaux contrôlés avec enceinte sous-marine (type Lubell 916 cc). Cette étape est essentielle pour limiter les incertitudes et les écarts trop important avec la réalité terrain.

Au moyen de l'utilisation de signaux contrôlés, ce protocole permet également de s'assurer du bon fonctionnement des instruments de mesure (**Figure 1**).

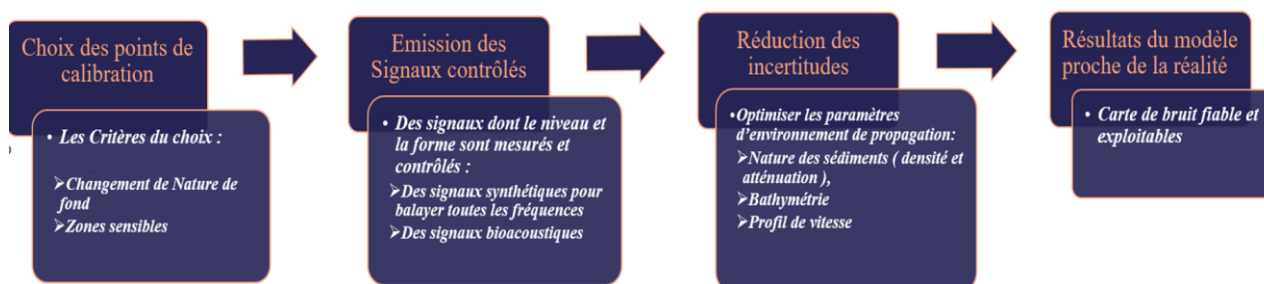


Figure 1 : processus de calibration des modèles acoustiques pour une cartographie de bruit.

1.3.3. Plan d'échantillonnage

10 stations de suivi, placées sur une ligne de mouillage, ont été sélectionnées afin de maximiser la couverture de la zone, pouvoir identifier les zones à haute et basse intensité sonore ainsi que les bruits dominants (d'origine anthropique, naturelle, biologique) et étudier la fréquentation et identifier les zones fonctionnelles des mammifères marins.

En ce qui concerne l'approche statistique (*BACI – Before After Control Impact* ou *BAG – Before After Gradient*), l'approche *BAG* est préférée car recommandée pour l'étude des mammifères marins (Thompson et al., 2010). De plus, cette approche permet de collecter une quantité largement suffisante de données acoustique pour l'étude du bruit ambiant.

La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présente le plan d'échantillonnage du suivi du bruit ambiant sous-marin et des mammifères marins par acoustique passive. Ce plan d'échantillonnage est composé de 10 stations porteuses des enregistreurs. Leur positionnement est réalisé en tenant compte du trafic maritime, et la couverture des aires d'étude rapprochée et élargie.

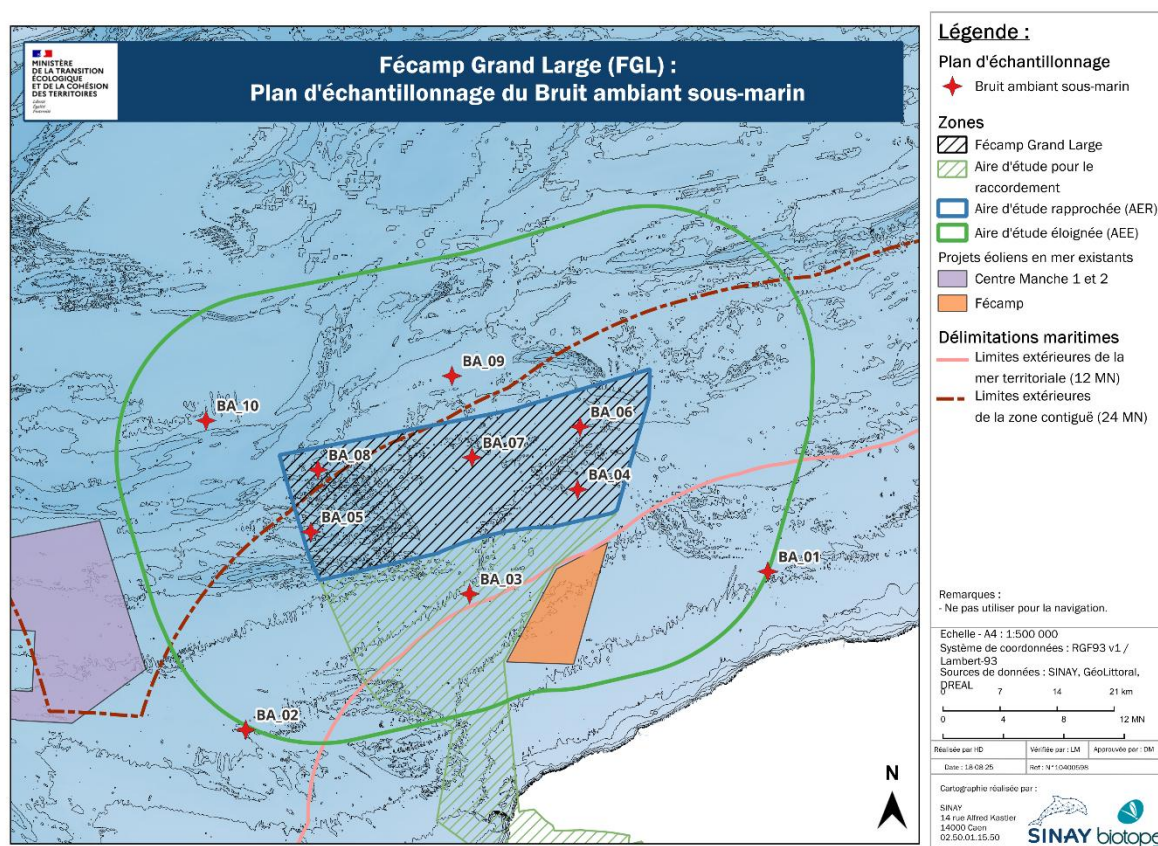


Figure 2 : plan d'échantillonnage du suivi du bruit ambiant sous-marin par acoustique passive dans la zone de Fécamp Grand Large (stations BA_01 à BA_10).

Le suivi du bruit ambiant sous-marin est réalisé en continu (duty cycle 100%) sur une année complète, celui des mammifères marins pendant deux ans avec une relève des données tous les deux mois. Il est prévu de débiter les campagnes en novembre 2025.

Cette acquisition continue permet de capturer les variations saisonnières et obtenir une distribution statistiquement valable concernant la distribution spatio-temporelle des niveaux de bruit ambiant, la présence et l'intensité de l'activité bioacoustique des mammifères marins.

Cette approche permet de comprendre également les différents types de comportements et activités des mammifères marins sur la zone et donc d'identifier les zones fonctionnelles.

1.3.4. Moyens et Matériels

1.3.4.1. Moyens requis pour la collecte de données

1.3.4.1.1 Moyens nautiques

Les navires utilisés pour l'échantillonnage des stations permanentes appartiennent à la société TSM (Figure 3).



Figure 3 : exemple d'un navire de la société TSM (ici, le TSM Kermor).

Ces navires offrent une stabilité en mer et possèdent tous les équipements nécessaires pour les différentes opérations de manipulation des lignes de mouillage. La configuration et la capacité des navires sont essentielles pour garantir la sécurité des manœuvres et la continuité des mesures en mer, quelles que soient les conditions de navigation.

Les conditions limites de mise en œuvre sont les suivantes dans le cadre du suivi du bruit ambiant et des mammifères marins par acoustique passive :

- Vent : inférieur ou égal à 4 Beaufort ;
- État de la mer : mer calme à peu agitée (état de mer à 3).

1.3.4.1.2 Moyens humains

L'échantillonnage des stations de suivi du bruit ambiant sous-marin par acoustique passive nécessite deux personnes, en plus de l'équipage des navires de la société TSM.

1.3.4.1.3 Mouillage des instruments de mesures

La ligne de mouillage hébergeant les instruments de mesure est illustrée sur la **Figure 4**.

La ligne présentée est également porteuse d'autres instruments « en déporté » et sur la bouée de surface dans le cadre des mutualisations des moyens, demandée par la commande publique.

La conception du système de mouillage est la suivante :

- **Ancrage** : des ancrages de type corps-mort bloc de béton sont utilisés. Ce type d'ancrage est efficace pour garantir la stabilité des équipements de mesure face aux courants marins et conditions météorologiques de la Manche Ouest. Il est également adapté aux fonds sédimentaires, avec un coefficient de frottement de 0,27 pour optimiser la tenue ;
- **Ligne de mouillage** : constituée de deux éléments, la ligne de mouillage proposée a été éprouvée pendant plusieurs années en Manche Ouest et bénéficie des améliorations et retours d'expérience :

- Le premier élément partant du corps-mort est une chaîne de diamètre de 22 mm sur une longueur de 60 m. La chaîne agit comme un amortisseur sur la traction de surface que la bouée provoque. Le choix d'une chaîne de diamètre 22 mm correspond à un dimensionnement excessif assurant une solidité et tenue en place accru ;
- Le second élément est une aussière synthétique avec huit torons d'une résistance de 15 tonnes et d'une longueur de 30 mètres. L'aussière apporte souplesse au montage des instruments de collecte des données, ainsi qu'une maintenance opérationnelle facilitée. L'aussière permet également un allègement des contraintes qu'une chaîne dans la colonne d'eau viendrait faire porter sur la bouée. Le mouillage dans son ensemble se trouve ainsi renforcé.
- **Flotteurs** : une bouée de surface est utilisée pour localiser le système de mouillage. La bouée proposée est de type « marque spéciale » de trois mètres de diamètre. Cette bouée est équipée d'un tracker GPS permettant de suivre sa position en temps réel. Un feu de signalisation visible jusqu'à cinq miles nautiques est installé au sommet de la bouée ;
- **Profondeur des hydrophones** : les hydrophones seront placés généralement près du fond (5 mètres).

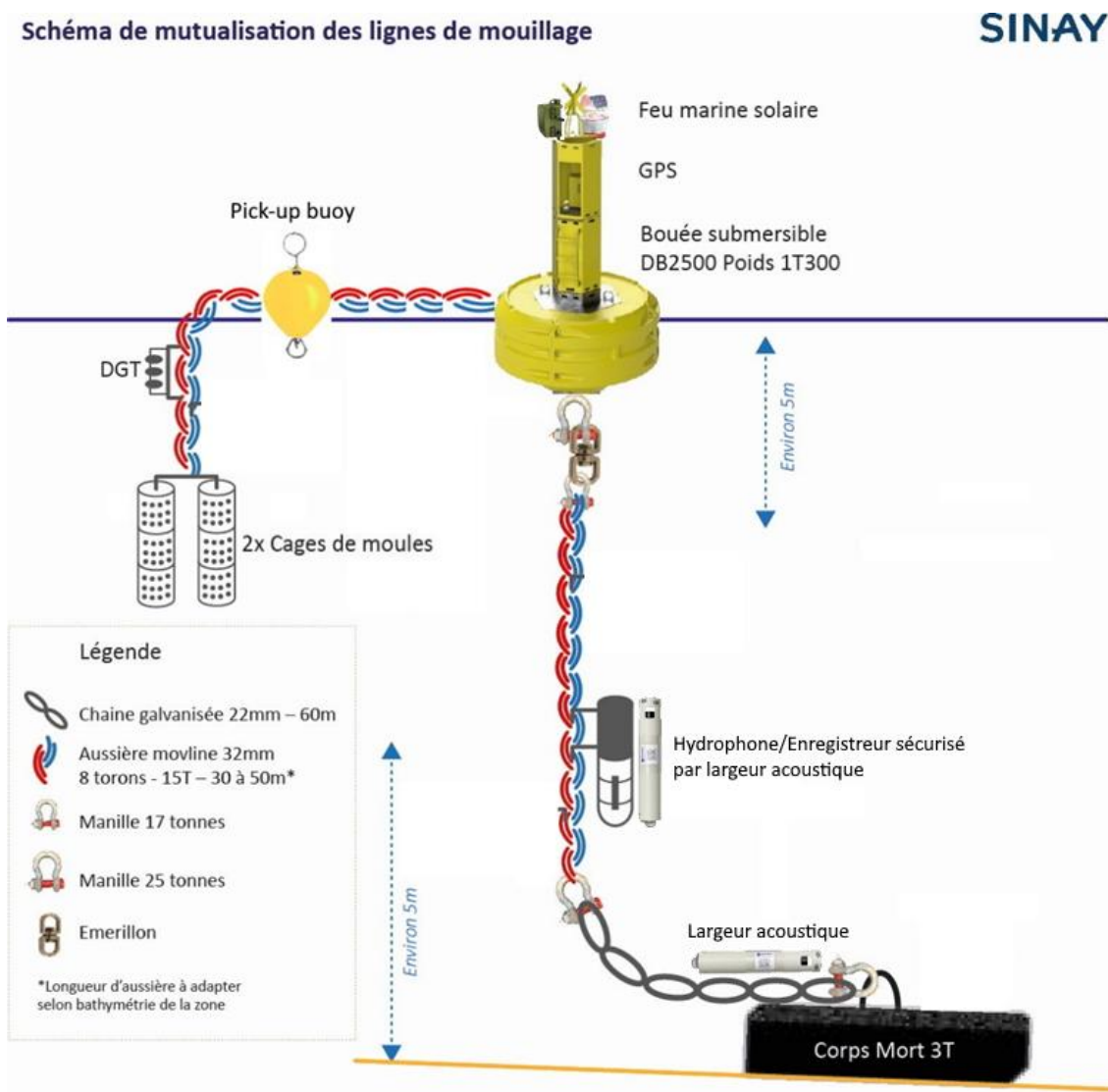


Figure 4 : schéma des lignes de mouillage pour le suivi du bruit ambiant sous-marin et des mammifères marins par acoustique passive.

La conception du système de mouillage tient également compte des risques liés aux engins de pêche professionnels, fréquents dans la Manche. Les matériaux utilisés (chaîne surdimensionnée, aussière à haute résistance, ancrage robuste) assurent une bonne tenue face aux tractions accidentelles.

La signalisation réglementaire, comprenant une bouée de surface de type "marque spéciale", un feu de signalisation nocturne et une balise GPS, permet une localisation facile des installations.

En complément, un AVURNAV (Avertissement aux Navigateurs) est systématiquement diffusé par les autorités maritimes (CROSS/DM) afin d'informer les usagers de la mer, en particulier les pêcheurs, de la présence des dispositifs sur zone pendant toute la durée du suivi.

Enfin, des précautions acoustiques sont intégrées dès la conception : la ligne de mouillage est conçue pour limiter les frottements parasites, et les algorithmes de traitement du signal incluent des filtres spécifiques permettant de distinguer le bruit mécanique des chaînes ou des mouvements de ligne des signaux d'intérêt (biologiques ou anthropiques).

1.3.4.1.4 Enceinte sous-marine pour émissions sonores contrôlées

Une calibration in situ est réalisée avec des émetteurs contrôlés Lubell 916 cc (**Figure 5**), dont les spécifications sont :

- Réponse en fréquence : 200Hz - 23kHz ;
- Niveau d'émission de sortie jusqu'à 180dB 1uPa m @ 1kHz ;
- Profondeur d'utilisation un à 18 mètres ;

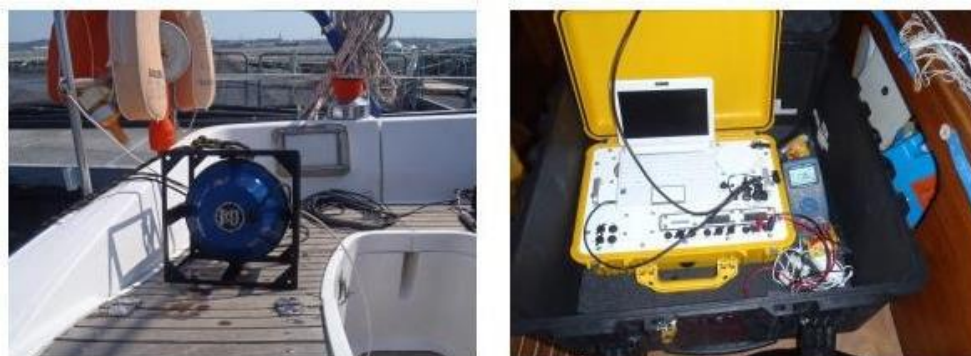


Figure 5 : enceinte sous-marine Lubell 916 cc (gauche) et valise de contrôle (droite).



1.3.4.2. Matériel de mesure sur le terrain

Des hydrophones large bande et des enregistreurs haute fréquence à grande capacité de stockage sont utilisés.

Les hydrophones du producteur américain High Tech Inc (HTI) sont utilisés. Le modèle choisi est le HTI-99-UHF, un instrument éprouvé avec les caractéristiques adaptées aux objectifs de l'étude (**Tableau 1**).

Tableau 1 : spécifications techniques des hydrophones et des enregistreurs utilisés pour le suivi du bruit ambiant sous-marin.

HTI-99-UHF (High Tech Inc.)	
Sensibilité	-180 dB re 1V/ μ Pa.
Gamme de fréquences	20 Hz à 250 kHz, permettant l'enregistrement de tous les sons d'intérêts pour l'étude

Utilisation	Enregistrement de l'ensemble des sons d'intérêt : bruits naturels, anthropiques et biologiques. En ce qui concerne les bruits biologiques, l'hydrophone est configuré pour enregistrer des signaux jusqu'à 180 kHz, permettant de capter l'ensemble des signaux d'intérêt d'origine anthropique, biologique, naturelle.	
DORI-M (ABYSsens)		
Capacité de stockage	Chaque DORI-M contient 10 cartes SD de 1 To, permettant des enregistrements de longue durée sans nécessiter de récupération fréquente.	
Durée de vie des batteries	La durée maximale est d'environ 60 jours en mode d'enregistrement continu.	
Caractéristiques	Compact, léger et robuste, le DORI-M est adapté aux longues missions de déploiement en mer et a été utilisé avec succès dans des études en Bretagne Sud (AO5).	
Nombre de cartes SD disponibles	Les cartes retirées des enregistreurs sont ensuite rapportées à terre pour le téléchargement des données, une étape qui nécessite du temps et ne peut pas être réalisée en mer	
Duty Cycle	100%	

1.3.4.2.1 Paramètres de configuration des enregistreurs et des hydrophones

Une fréquence d'échantillonnage de 360 kHz est choisie, ce qui correspond à pouvoir enregistrer des sons jusqu'à 180 kHz. Ces caractéristiques permettent de capturer les clics ultrasoniques des cétacés qui atteignent 180 kHz (clics de Marsouin commun).

Un « duty cycle » de 100% est configuré afin de préserver la capacité de stockage et la durée de la batterie sur 60 jours.

1.3.4.3. Logiciel et outils d'analyse

L'analyse de données acoustiques se fait en deux grandes étapes, chacune associée à plusieurs logiciels.

La première concerne le traitement des fichiers audio bruts via des outils dédiés au traitement de fichiers au format .wav. Les principaux logiciels utilisés pour le traitement des fichiers .wav sont Matlab, Python, RStudio (package SeaWave) ainsi que PAMGuard. Ces traitements peuvent aboutir au résultat final (par exemple des graphiques d'intensité sonore par bande de fréquence) ou bien à des matrices de résultats (valeurs en dB, liste de détections de mammifères marins, etc.) exploitées ensuite pour des traitements statistiques. Lors des étapes préliminaires (pré-traitements) le logiciel AUDACITY est également utilisé.

La deuxième étape est réalisée en particulier grâce au logiciel R. Les données d'entrée sont les matrices de résultats issues de la première étape. Les traitements statistiques sont réalisés avec plusieurs package et en particulier mgcv pour modélisations type GAM. De plus, une suite logicielle développée en interne est utilisée pour les modélisations de la propagation du bruit : Underwater Acoustic Module (Drira et al., 2018; Maglio et al., 2021, 2015). Celle-ci est basée sur l'algorithme RAM – Range-dependent Acoustic Modeling (Tappert, 2006)

Le logiciel **QGIS** est utilisé pour le formatage final des cartographies et pour le respect des normes SIG (métadonnées, systèmes de coordonnées, etc.). En parallèle, Sinay dispose d'un **système HPC de calcul haute performance** qui permet de paralléliser les algorithmes nécessitant beaucoup de ressources de calcul (en particulier le traitement de gros volumes de fichiers audio brutes et les modélisations acoustiques).

Le système HPC de Sinay permet de réduire les temps de calcul afin de répondre aux exigences du planning de l'étude. Les logiciels, outils et leur utilisation sont résumés dans le **Tableau 2**.

Tableau 2 : logiciel et outils d'analyse utilisés pour le suivi du bruit ambiant sous-marin.

Logiciel/Outil	Utilisation
Serveur Cloud Sinay HPC	Calcul haute performance pour la modélisations acoustique et le traitement parallélisé de gros volumes de données audio.
QGIS	Traitements cartographiques et respect des exigences SIG.
AUDACITY	Lecture de fichiers bruts audio (.wav) ; Etapas préliminaires d'analyse (vérification et écoute des données, validation des détections).
Python Matlab	Lecture et traitement de fichiers bruts audio (.wav) ; Production directe d'indicateurs de bruit ; Production de bases de résultats des détection et classification des signaux des Odontocètes, poissons et invertébrés marins.
PAMGuard	Lecture et traitement de fichiers bruts audio (.wav) ; Production de bases de résultats des détections et classifications des signaux des Rorquals et Phoques.
R	Lecture et traitement de matrices de résultats (format TXT, CSV ou similaire) ; Production des indicateurs écoacoustiques.
Sinay Underwater Acoustic Module	Suite logicielle dédiée à la modélisation acoustique ; Production de cartes de bruit sous-marin.

1.3.5. Déploiement opérationnel des moyens de collecte

La phase de déploiement des équipements en mer suit une organisation méthodique afin de maximiser l'efficacité de chaque sortie tout en minimisant les risques liés aux conditions maritimes.

Le choix des ports d'attache, la durée de transit vers le site d'étude, et le temps alloué pour chaque déploiement sont pris en compte pour optimiser les campagnes. Les activités déployables en une journée sont déterminées en fonction de la capacité du navire, de la durée d'installation de chaque station, et des conditions de la mer.

Chaque station d'enregistrement est déployée selon le protocole défini. Le temps de récupération et remise à l'eau pour chaque station est d'environ une heure, ajusté pour s'assurer de couvrir la zone d'étude dans les délais impartis. En cas de mutualisation avec d'autres compartiments (comme la qualité de l'eau et les prélèvements de plancton), le déploiement sera coordonné pour maximiser l'efficacité et minimiser les coûts opérationnels.

Lors des sorties en mer dédiées à la maintenance des instruments, les enregistreurs sont relevés pour effectuer le changement des batteries, retirer les 10 unités de cartes SD « pleines » et les remplacer avec 10 unités « vides ».

1.4 Mesures de qualité et sécurité spécifique au compartiment

Les instruments sont déployés dans la colonne d'eau sur des mouillages permettant une maintenance de matériel facilité tout en garantissant une acquisition de données sans biais ni parasite. Les interférences acoustiques liées au bruit de chaîne sont prises en compte dans les algorithmes de traitement afin de ne pas être identifiées comme des clics de mammifères marins.

Pour garantir la précision et la fiabilité des données acoustiques sous-marines, Sinay procède également à la calibration des instruments avant chaque déploiement, suivie de mesures de maintenance et de vérification en cours de campagne.

Ces pratiques assurent que les équipements répondent aux exigences réglementaires et techniques et que les données obtenues sont adéquates pour faciliter l'évaluation d'impact environnemental, qui représente l'étape successive du processus d'autorisation environnementale.

1.4.1.1. Étalonnage des hydrophones en laboratoire

Les hydrophones acoustiques utilisés par Sinay sont fournis avec leurs courbes d'étalonnage (**Figure 6**), établies en laboratoire par le fabricant, afin de déterminer avec précision leur sensibilité sur l'ensemble des fréquences d'intérêt. Cet étalonnage permet de garantir une acquisition fiable des données acoustiques.

Conformément aux recommandations des normes **IEC 60565:2006** et **ANSI S1.20-2012**, une incertitude inférieure à 1 dB est exigée pour la sensibilité des capteurs.

La courbe de réponse, mesurée avec les gains de l'enregistreur fixés à 0 dB puis à 12 dB, est présentée dans la **Figure 6**. Il est constaté que la réponse du système reste stable entre 5 Hz et 210 kHz. Une fréquence d'échantillonnage de 400 kHz sera appliquée, permettant ainsi une couverture utile jusqu'à 200 kHz.

Les données seront traitées telles que fournies par le fabricant, avec la possibilité d'appliquer un filtre passe-haut pour supprimer les fréquences inférieures à 25 Hz, généralement associées au bruit de fond.



Calibration certificate

N° 00002_002
Date 2023, 14th April

Recorder information	
Serial number	DORI_00002
Frequency version	HF
Temperature sensor	No

Hydrophone calibration (From HTT)	
Type of hydrophone	HTI-99-UHF
Serial Number	1232012
Sensitivity	-184,8 dB re 1V/μPa
Calibration report	1232/1/3

Recorder calibration : Gains and filters calibration

Method	Conclusion
TEST Chirp 10 Hz to 210 kHz of 800 mV pp (for 0 dB gain) or 200 mVpp (for 12 dB gain) with calibrated source.	Median values of gain Gain 0 dB -0.14 dB Gain 12 dB 11,92 dB
ACCURACY Input signal accuracy of 5 % leading to test accuracy of ± 0,45 dB	Cutoff frequencies (-3 dB) Filter 10 Hz 10 Hz Filter 370 Hz 368 Hz

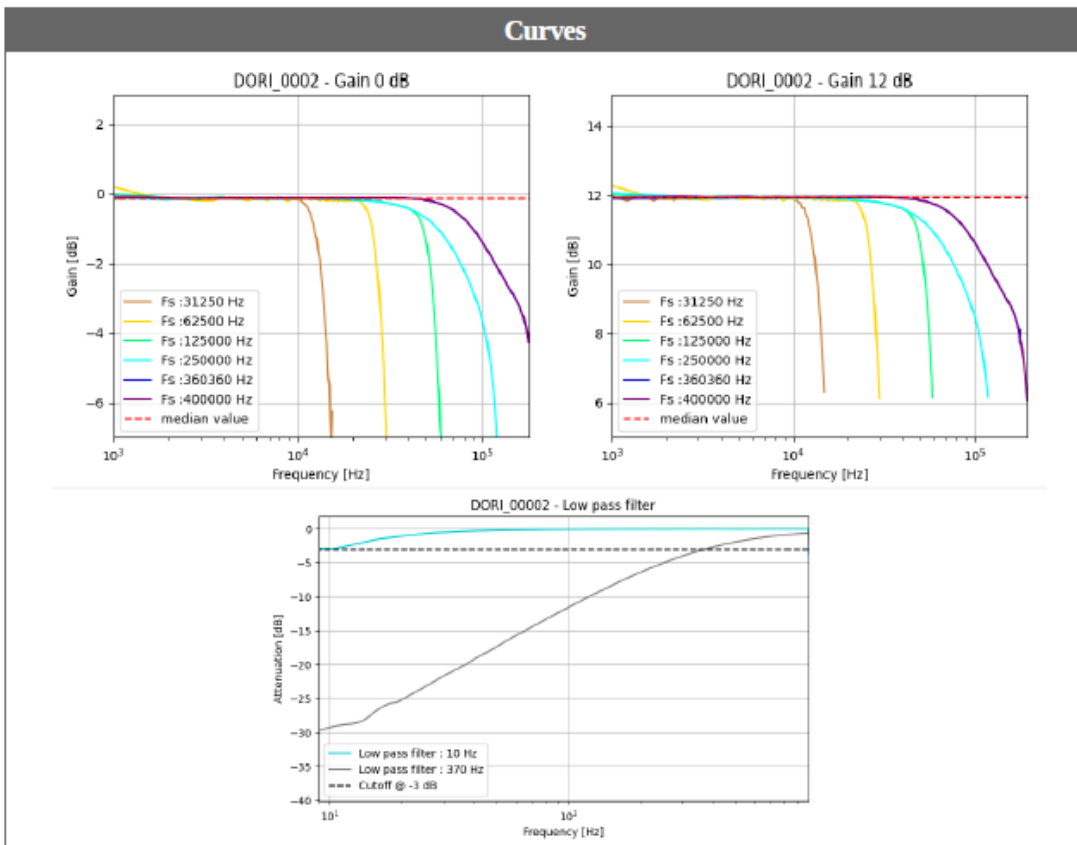


Figure 6 : exemple de certificat de calibration des enregistreurs et hydrophones.

1.4.1.2. Maintenance des instruments

Une maintenance régulière des équipements est prévue pour assurer leur bon fonctionnement durant toute la campagne de mesure.

Les systèmes de mouillage sont inspectés à chaque récupération pour vérifier l'absence d'usure ou de défaillance pouvant compromettre la stabilité des hydrophones. Cela inclut le contrôle de l'état des cordages, des ancres, et des flotteurs et le nettoyage ou le remplacement des composants usés.

Les enregistreurs sont récupérés périodiquement pour le changement de batteries et l'extraction des données. Ce processus est planifié en fonction de la capacité de stockage et de la durée de vie des batteries des équipements, afin d'éviter toute interruption dans la collecte des données.

1.4.1.3. Assurances qualité (QA) des données

Des contrôles qualité sont effectués avant, pendant et après les déploiements pour garantir la qualité des données acoustiques collectées :

- **Lecture audio des signaux captés** : en particulier pour les fréquences audibles, une écoute des signaux enregistrés permet d'identifier les bruits parasites ou interférences, et d'optimiser les ajustements d'enregistrement si nécessaire ;
- **Comparaison des données entre hydrophones** : lorsque plusieurs hydrophones sont déployés simultanément dans une même zone, les niveaux sonores mesurés sont comparés entre eux pour s'assurer de la cohérence et de la fiabilité des données collectées.

2. Traitement et analyse des données

2.1 Vérifications in situ de calibration pour maximiser la qualité des données

Des vérifications de calibration sur site sont effectuées après le déploiement pour confirmer la stabilité des instruments. Pour ce faire, **des émissions contrôlées avec enceinte sous-marine (Lubell) sont mis en place.**

Le Lubell est utilisé ici en tant que calibreur. Celui-ci génère un signal de pression acoustique connue dans une plage de fréquences connue. Cela permet de vérifier toute dérive éventuelle des niveaux de sensibilité. Cette procédure permet également la calibration des modèles de propagation acoustique.

2.2 Prétraitement des données brutes avant analyse

L'intégralité des données brutes collectées sont préparées en suivant ces étapes :

- La première étape consiste à **sélectionner quelques fichiers d'enregistrement (au début, au milieu et à la fin de la période) pour effectuer des tests.** Ces fichiers sont ensuite analysés à la fois automatiquement et manuellement, afin d'évaluer en profondeur la qualité des données. L'objectif est de vérifier que le signal est resté stable et de bonne qualité tout au long de l'enregistrement, sans présence de signaux parasites. C'est également à cette étape que le nettoyage des données est défini ;
- **Nettoyage des données** : contrôle de la configuration des enregistrements après téléchargement, contrôle de la saturation et du clipping, élimination des parties non exploitables ;
- **Filtrage des fréquences** : les bandes de fréquences pertinentes sont isolées pour faciliter la classification :
 - **Sons anthropiques et naturels** : basse à moyenne fréquence (10 Hz à 30 kHz) pour la plupart des sons anthropiques (ex. shipping) et naturels (vent, vagues), jusqu'à 30 kHz pour la recherche de navires de pêche, fréquences plus élevées pour certaines activités utilisant des instruments haute/très haute fréquence ;
 - **Sons biologiques** : moyennes à très hautes fréquences pour les clics (10 kHz à 180 kHz), moyennes fréquences pour les sifflements et autres sons pulsés typiques de plusieurs espèces de delphinidés (1 Hz - 24 kHz), basse fréquence pour les mysticètes (autour de 20 Hz pour les rorquals, jusqu'à 500 Hz pour le Petit rorqual). Basses à moyennes fréquences pour les poissons et invertébrés marins.
- **Segmentation des enregistrements** : les fichiers sont divisés en segments de 5 à 10 minutes, facilitant les analyses temporelles et spatiale ;
- **Réduction des bruits parasites** : filtres passe-bande et algorithmes de nettoyage pour éliminer les bruits non pertinents, comme les turbulences ;
- **Contrôle qualité des enregistrements** : un acousticien expérimenté passe en revue les fichiers audio pour vérifier la qualité des enregistrements. Cette étape inclut :
 - **Écoute active des enregistrements** : l'acousticien utilise des outils de visualisation et d'écoute pour détecter les anomalies ;

- **Filtrages et visualisations avancés** : utilisation de spectrogrammes, DSP et des tiers d'octave, pour examiner finement les signaux acoustiques et identifier d'éventuels bruits parasites ou interférences.

2.3 Description du paysage sonore et détections bioacoustiques pour l'étude des mammifères marins

La description du paysage sonore sous-marin est réalisée à partir de trois éléments :

- L'inventaire et la description des sons de différentes origines (anthropique, biologique, naturelle) ;
- La quantification de l'intensité sonore ;
- Le calcul d'indices écoacoustiques.

De plus, en ce qui concerne les mammifères marins, plusieurs paramètres d'activité bioacoustique sont mesurés pour évaluer la fréquentation, l'utilisation de la zone et le comportement.

2.3.1. Détection et classification des sons

La détection et la classification des sons pour la description des paysages acoustiques est réalisée par analyse des spectrogrammes (Merchant et al., 2015; Mooney et al., 2020).

Le spectrogramme est une représentation temporelle des niveaux sonores sur les différentes bandes de fréquence et permet de caractériser des événements discrets (par exemple les vocalisations de différents animaux, les passages de navires, la pluie ; **Figure 7**) ainsi que des événements plus longs, où plusieurs événements discrets (typiquement biologiques comme les signaux des poissons) se superposent formant un chœur.

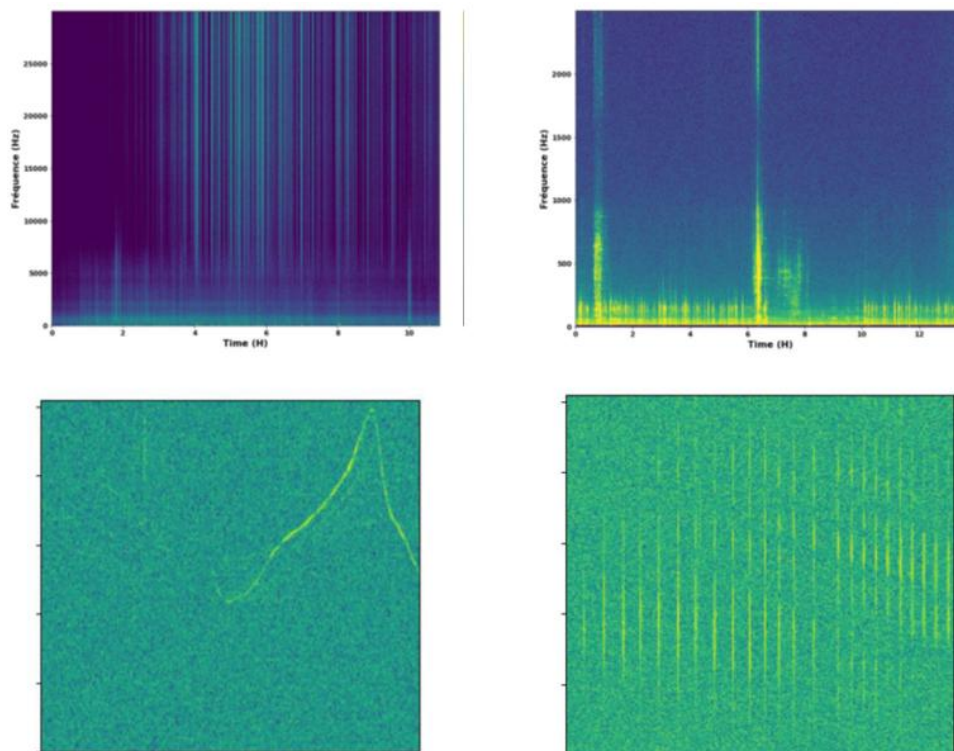


Figure 7 : exemples de représentation d'événements sonores, d'en haut à gauche à en bas à droite : son naturel d'une tempête, passage d'un navire, sifflement d'un Delphinidé, clic de Marsouin commun.

La détection des différents événements sonores anthropiques et naturels ainsi que de la plupart des sons biophoniques est réalisée par méthode semi-automatique à partir des caractéristiques spectrales connues des bruits recherchés, confirmée ensuite par inspection manuelle et écoute d'échantillons :

- Pour les **événements sonores anthropiques**, tels que les passages de grands navires, les périodes avec augmentation significative, rapide et ponctuelle de l'intensité sonore par rapport au bruit ambiant dans les basses fréquences (< 1 kHz) sont recherchées. Pour d'autres sources anthropiques comme les battages de pieux, la détection se focalise sur la recherche de signaux transitoires répétés à intervalles rapprochés et réguliers, avec intensité significativement supérieure au bruit ambiant, également dans les basses fréquences. La recherche de navires de pêche, de service, et autres types de bateaux peut s'étendre à des fréquences plus élevées (>10 kHz) ;
- Pour les **chorus biophoniques**, des augmentations significatives et de durée étendue par rapport au bruit ambiant dans les moyennes fréquences seront recherchées (par exemple une différence supérieure à 3 dB re 1µPa par rapport au bruit ambiant dans la bande 400 Hz à 4 kHz pendant plusieurs heures, en suivant les indications de Cato, (1978)) ;
- En ce qui concerne la détection et la classification des **signaux des poissons et invertébrés marins**, l'approche mise en œuvre consiste à repérer dans les spectrogrammes et analyser des échantillons représentatifs afin de confirmer la présence de signaux des différents groupes espèces. Le répertoire acoustique de ces espèces est en effet particulièrement diversifié, allant des sons pulsés produits par les coquilles Saint-Jacques, aux clics basse fréquence de certains poissons, en passant par les claquements large bande des crevettes ou encore les craquements mécaniques générés par les oursins lors de leurs déplacements. Ces signaux se situent le plus souvent dans les gammes de basses à moyennes fréquences.

Enfin, à l'égard des **signaux des mammifères marins**, une suite d'algorithmes automatisés, basés sur l'intelligence artificielle (IA) et développés en interne par Sinay, est utilisée pour la détection et la classification de plusieurs espèces : les clics de Marsouins (*Phocoena phocoena*), les clics et les sifflements des Delphinidés.

Pour compléter les analyses, ces algorithmes sont utilisés également pour la recherche de vocalisations d'espèces peu fréquentes ou rares dans les eaux de la Manche, comme le Rorqual commun (*Balaenoptera physalus*), le Rorqual bleu (*Balaenoptera musculus*), la baleine à bosse (*Megaptera novaeangliae*).

De plus, le logiciel PAMGuard¹ est utilisé avec les configurations indiquées en littérature scientifique pour la détection de Phoques gris et Phoques veau marin (Pozo Galván et al., 2024), mais aussi pour les rorquals (Miller et al., 2021), dans ce dernier cas en complément des algorithmes IA, si nécessaire.

Une détection est définie comme un segment audio de deux secondes (format .wav) contenant au moins une vocalisation d'un mammifère marin (clics, sifflements, signaux des Rorquals, grognements de Phoques). Pour chaque segment, les paramètres bioacoustiques suivants sont mesurés : le nombre de signaux, l'intervalle inter-clic moyen (uniquement pour ce type de vocalisation).

Ces paramètres sont à la base du calcul de plusieurs indicateurs de présence de mammifères marins (**Section 2.5**).

La performance des algorithmes utilisés est variable selon le type de source recherché et d'algorithme utilisé, atteignant + 92 % de précisions pour les algorithmes développés par Sinay.

La performance du logiciel PAMGuard est variable en fonctions de l'espèce et de la paramétrisation des algorithmes de détection et classification.

¹ https://www.pamguard.org/11_CoreModules.html#Localisers

2.3.2. Calcul des indicateurs d'intensité sonore

L'ensemble des indicateurs présentés ci-dessous est calculé sur les signaux en large bande, puis sur des bandes de fréquences spécifiques associées au bruit anthropique, ainsi que sur les bandes de tiers d'octave centrés à 63 Hz et 125 Hz, indiquées dans le cadre du Descripteur 11 de la DCSMM.

- **Niveau de pression sonore (L_p) (Figure 8)** : mesure de l'intensité moyenne du son (*root-mean-square*) calculée sur un segment de 1 s, exprimée en dB re 1 μ Pa, en large bande et par bande de fréquence ;
- **Densité spectrale de puissance (DSP) (Figure 9)** : La DSP mesure la répartition de l'énergie acoustique par unité de fréquence, est exprimée en dB re 1 μ Pa ; cet indicateur permet de caractériser les fréquences dominantes. Elle est obtenue par transformation de Fourier rapide (FFT) ;
- **Calcul des niveaux de crête ($L_{p,0-pk}$)** : Mesure des niveaux de crête, utilisée en particulier pour évaluer les sons impulsifs.

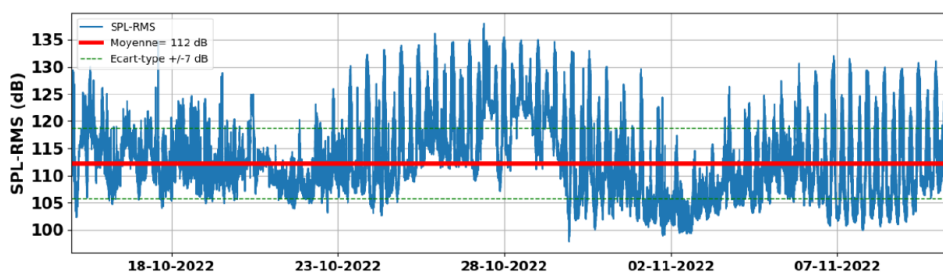


Figure 8 : exemple de représentation graphique de l'évolution des niveaux de bruit (L_p , notés comme SPL-RMS dans le graphique) sur un site.

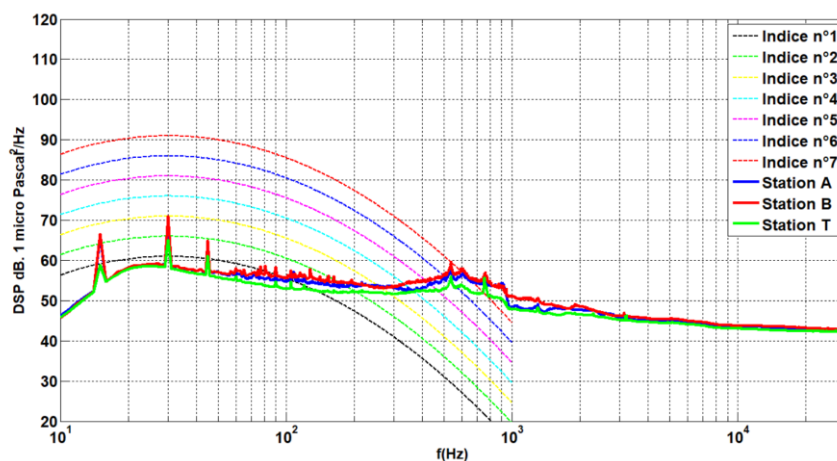


Figure 9 : exemple de graphique DSP avec comparaison avec le modèle de Wenz.(1962).

Les statistiques descriptives suivantes : moyenne, médiane, percentiles, variance, sont calculées et analysées comme mesure de l'environnement acoustique (Merchant et al., 2015).

Certains indicateurs, comme le niveau de pression sonore (L_p), seront comparés à des variables environnementales telles que la vitesse du vent, les cycles de marée et l'alternance jour/nuit.

2.4 Modèle de propagation acoustique

L'entreprise utilise sa suite logicielle dédiée à la modélisation 3D de la propagation sonore en milieu marin : Underwater Acoustics Module. Le modèle RAM (Range-dependent Acoustic Model) est intégré

à notre méthodologie pour simuler la propagation sonore en milieu marin. Basé sur l'équation parabolique (Collins, 1993; Tappert, 2005), il permet de prendre en compte les variations locales de profondeur, de température et de salinité, ainsi que la bathymétrie. Ce modèle est considéré le plus efficace par rapport au type d'environnement caractéristique de l'aire d'étude et des fréquences à modéliser (Farcas et al., 2016).

Pour l'étude de l'état initial acoustique, les principales sources sonores configurés dans le modèle sont les navires équipés d'AIS (*Automated Identification System*). En effet, le trafic maritime est considéré le principal contributeur au bruit ambiant au niveau global (Hildebrand, 2009; Hildebrand and Jesus, 2021). Le vent et d'autres sources de bruit continu (par exemple les éoliennes existante autour de la zone) pourront être également intégré dans le modèle. Le choix est fait après inspection des fichiers audio enregistrés pendant la période de collecte de données, afin d'en apprécier le degré de contribution.

Pour chaque source sonore, le modèle simule la propagation du son sur une série de section verticales (distance, profondeur) avec résolution angulaire de 1°, permettant d'obtenir une estimation en 3D des niveaux reçus sur chaque point de l'aire d'étude. Ensuite, l'énergie sonore reçue de chaque source est additionnée pour obtenir le bruit total sur chaque point.

La configuration envisagée pour la mise en place du modèle de propagation est résumée dans le **Tableau 3**.

Tableau 3 : configuration envisagée du modèle de propagation acoustique mis en place pour l'état initial sur la zone FGL.

Sources sonores	
Bruit des navires	Données AIS – source des données : Spire Maritime
Bruit du vent	Optionnel – source des données : données propre, données bibliographiques
Bruit des éoliennes en exploitation	Optionnel – source des données : données propre, données bibliographiques
Modèles de source	
Bruit des navires	Le modèle de source RANDI-3 (Breeding et al., 1996) est configuré par défaut
Bruit du vent	Optionnel – Spectre et niveaux d'émissions en fonction des données de terrain et/ou bibliographique
Bruit des éoliennes en exploitation	Optionnel – Spectre et niveaux d'émissions en fonction des données de terrain et/ou bibliographique
Paramètres de propagation	
Données environnementales	Température et Salinité, Source : données Copernicus, Résolution spatiale variable. Bathymétrie, source : EmodNet. Résolution spatiale : 100 par défaut, jusqu'à 10 m après interpolation
Données géo acoustiques	Données géologiques du SHOM. Coefficients géo acoustiques en fonction des données bibliographiques
Caractéristiques des outputs	Output en 3D Résolution horizontale dans la plage 10-100 m Résolution verticale : 2 m Résolution angulaire : 1° Format des outputs : geoTIFF

Les résultats des modélisations sont présentés sous-forme de cartographie des niveaux de bruit en cartes de chaleur. Plusieurs indicateurs sont représentés : la médiane (quantile 50, abrégé q50 ou P50 si on utilise la notation anglaise de « percentile ») pour la visualisation des niveaux sonores typiques ; q10 et/ou q20 et pour les niveaux sonores dominants ; q80 et/ou q90 pour identifier l'intensité des bruits les plus intenses enregistrés et la durée d'exposition à ces bruits.

Un exemple de résultat est fourni en **Figure 10** (P50) sur la zone de la Manche.

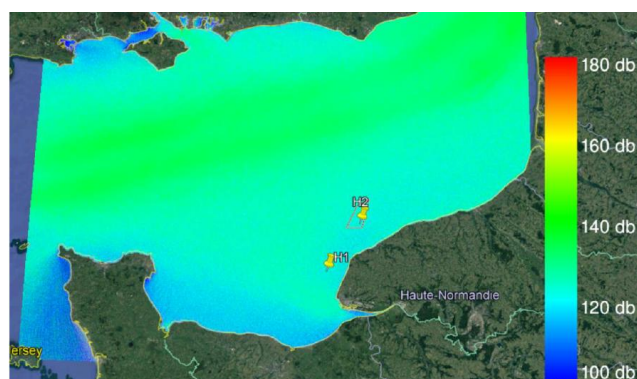


Figure 10 : exemple de représentation cartographique du bruit large bande du trafic maritime : niveau médian de pression sonore en été montrant le rail de navigation dans le canal de la Manche (source : Sinay).

2.5 Traitements et modélisations statistiques pour déterminer la variabilité spatiale et temporelle du bruit et des mammifères marins

Les traitements statistiques sont réalisés en utilisant les indicateurs de bruit et de présence de mammifères marins.

Les variations de bruit sont exprimées par les indicateurs définis à la **section 2.3.2**. En revanche, les indicateurs de fréquentation des mammifères marins sont exprimés par des quantités dérivées des paramètres bioacoustiques mesurés lors de chaque détection², tels que définie à la **section 2.3.1**, par exemple : le taux de détection (nombre de détection par unité de temps), le taux vocalisation (nombre de vocalisations par unité de temps), le nombre d'unité de temps contenant des vocalisations (DPH – *Detection Positive Hours*, DPM – *Detection Positive Minutes*) et similaires.

En phase d'analyse, ces quantités pourront être adaptées en fonction de l'échelle temporelle choisie. Un premier niveau d'analyse statistique concerne la représentation des indicateurs de présence sur la période d'étude.

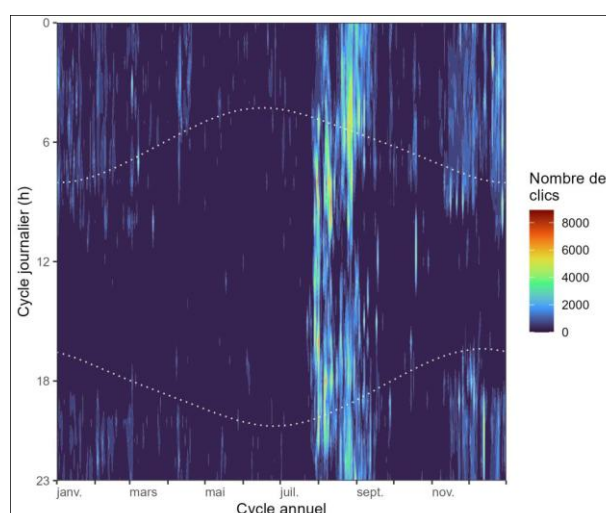


Figure 11 : exemple de représentation graphique de la variation d'intensité d'écholocation par les delphinidés au cours d'une année de suivi (source : Sinay)

² Pour rappel, une détection est définie comme un segment audio de 2 secondes (format .wav) contenant au moins une vocalisation d'un mammifère marin (clic, sifflement, signaux des rorquals, grognement de phoque). Pour chaque segment, les paramètres bioacoustiques suivants sont mesurés : le nombre de signaux, l'intervalle inter-clic moyen (uniquement pour ce type de vocalisation)

Les indicateurs de bruit et de fréquentations de mammifères marins sont utilisés comme variables indépendantes pour les traitements et modélisations statistiques suivants :

- **Modèles de Variabilité Temporelle** : analyse de la variance (ANOVA) et techniques de régression pour étudier les variations saisonnières et journalières ;
- **Modèles de Variabilité Spatiale** : régressions linéaires (LM, GLM) et Modèles Additifs Généralisés (GAM) pour :
 - Analyser la variabilité spatiale de l'activité bioacoustique des mammifères marins ;
 - Identifier les variables (naturelles, biologiques ; anthropiques) pouvant expliquer les variations de présence des mammifères marins ;
 - Tester l'influence de variables spécifiques, en particulier les variations de bruit sous-marin, sur la présence de mammifères marins.

Le logiciel *R* est utilisé pour l'ensemble de ces traitements. Pour les modélisations spatiales, il est nécessaire d'utiliser des données environnementales des sources suivantes (**Tableau 4** : liste non-exhaustive des sources de données environnementales pouvant être utilisées pour les modélisations) :

Tableau 4 : liste non-exhaustive des sources de données environnementales pouvant être utilisées pour les modélisations

Données	Source
Température, salinité, courants	Données Copernicus https://browser.dataspace.copernicus.eu
Sédimentologie	Données du SHOM https://data.shom.fr
Biomasse phytoplancton et zooplancton	Données EmodNet https://emodnet.ec.europa.eu
Biomasse et diversité ichtyologique	Données de terrain (ce projet)
Pollution	Données de terrain (stations mutualisées, ce projet)

Les **Figure 12** et **Figure 13** présentent un exemple de variables environnementales utilisées dans les modélisations statistiques et de résultats de modélisations montrant l'influence de chaque variable sur le paramètre étudié.

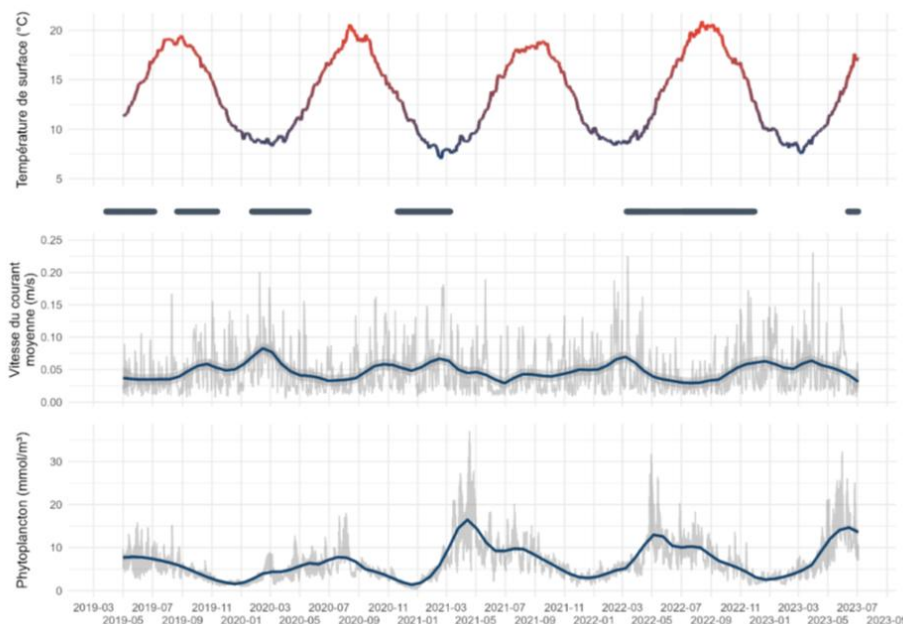


Figure 12 : exemple de variables environnementales utilisés lors des modélisations GAM.

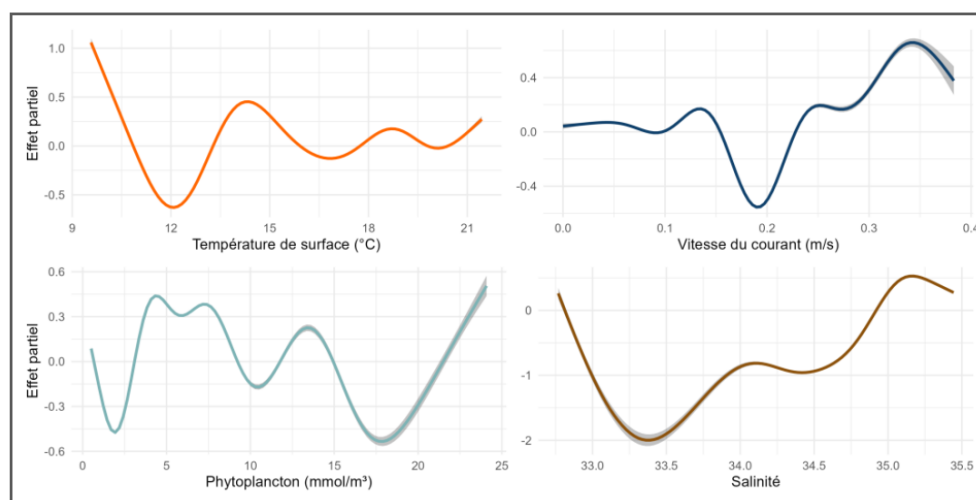


Figure 13 : exemple de sortie d'un modèle GAM mettant en évidence l'effet de plusieurs variables (> 0 effet positif, < 0 effet négatif) sur la présence de Marsouin commun.

2.6 Analyse comportementale des odontocètes

L'analyse comportementale se focalise sur les odontocètes grâce à des connaissances scientifiques suffisantes pour ce groupe d'espèces pour qui il est possible de déterminer la fonction des vocalisations, et donc estimer le comportement. Par exemple, il existe des signaux ayant fonction de communication sociale (sifflements, sons pulsés), chasse/exploration (clics d'écholocation), coordination de groupe (sons pulsés), appel (comme pour les « sifflements signature » chez le Grand Dauphin).

Un premier niveau d'analyse sera donc la réalisation de l'inventaire des différents types de signaux et la description de leur fonction pour ce groupe d'espèces.

Ensuite, quatre classes de comportements sont définies : comportement sociale, comportement de chasse, déplacement ou exploration, comportement mixte ou non identifié.

L'attribution d'une détection à une de ces classes est variable en fonction de l'espèce :

- **Pour les Delphinidés**, la présence de sifflements est considérée un indicateur de comportement social. De plus, des détections avec faible intervalle inter-clic (ICI < 10 ms) sont considérés comme comportement de chasse sur la base des connaissances actuelles (Nuutti et al., 2013; Tellechea, 2020). Des valeurs d'ICI supérieures peuvent être attribués à un comportement de socialisation. Des clics très espacés sont en revanche considérés comme un comportement de déplacement ou navigation ;
- **Le Marsouin commun** n'émet pas de sifflements, et donc l'attribution des détections à une classe de comportement repose principalement sur l'intervalle inter-clic. Les détections avec valeurs d'ICI inférieurs à 10 ms sont attribuées à un comportement de chasse (Nuutti et al., 2013). Des valeurs supérieures, à d'autres classes de comportement. Cependant, les connaissances scientifiques sur le rôle des clics comme indicateur d'autres classes de comportement pour le Marsouin restent faibles. Pour cela, le cadre d'attribution des autres classes de comportement pour des valeurs d'ICI supérieures à 10 ms sera défini après revue bibliographique ultérieure lors de la phase d'analyse.

Finalement, l'analyse des comportements répertoriés par période et par site est effectuée, permettant de décrire la répartition spatio-temporelle et donc l'identification des zones fonctionnelles sur l'aire d'étude (exemple en Figure 14 sur un site).

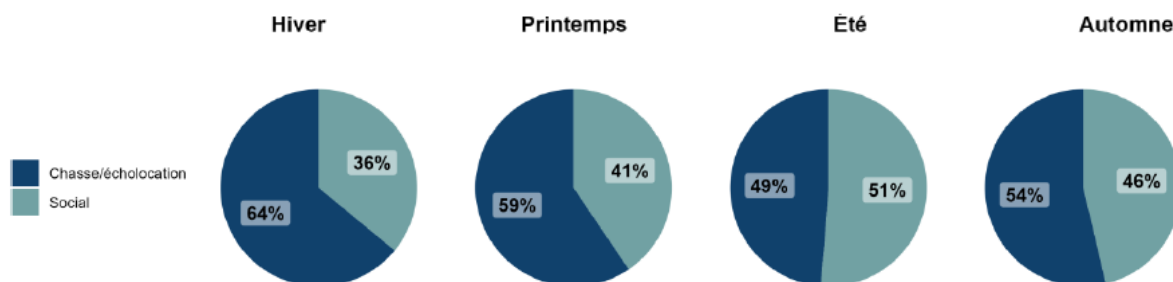


Figure 14 : exemple d'analyse comportementale selon les saisons.



DREAL Normandie - MTE
Fécamp Grand Large

FICHE PROTOCOLE

Communautés planctoniques



Table des matières

Table des matières	1
1. Méthodologie	3
1.1 Objectifs du suivi des communautés planctoniques	3
1.2 Principes du suivi	3
1.2.1. Description du protocole.....	3
1.2.2. Plan d'échantillonnage	4
1.2.3. Moyens et Matériels	5
1.2.4. Déploiement opérationnel	8
1.3 Données collectées.....	10
2. Traitement et analyses des données	11
2.1 Traitements des échantillons.....	11
2.1.1. Phytoplancton.....	11
2.1.2. Ichtyoplancton et zooplancton	12
2.1.3. Kystes phytoplanctoniques.....	14
2.2 Prétraitement des données brutes avant analyse.....	14
2.3 Techniques d'analyse statistique.....	15
2.4 Interprétation des résultats et visualisation.....	15

Index des illustrations

Figure 1 : plan d'échantillonnage du suivi des communautés planctoniques dans la zone de Fécamp Grand Large. Les différents échantillonnages (bouteille Niskin, filet Bongo à double collecteur et benne Van Veen) correspondent aux stations PZ_01 à PZ_12, illustrées par des points orange.	4
Figure 2 : navire VDC Lynx de la société NORMANDY OFFSHORE SERVICES.	5
Figure 3 : dispositif comprenant une bouteille de prélèvement de type Niskin téflonnée d'une contenance de cinq litres et une sonde WiMo multi-paramètres.	6
Figure 4 : filet Bongo à double collecteur servant au prélèvement de l'ichtyoplancton équipé d'un dépresseur et d'un volucompteur mécanique (Bionef®).	7
Figure 5 : filet WP2 servant au prélèvement du zooplancton équipé d'un dépresseur et d'un volucompteur mécanique (Bionef® / Ifremer®).	7
Figure 6 : benne Hamon.	8
Figure 7 : exemples de représentation d'analyses multivariées (nMDS) calculées par station et par saison pour l'ichtyoplancton et le zooplancton (figure du haut) et par station et par année en fonction du gradient côte-large pour le phytoplancton (figure du bas) sur la zone d'étude des futurs parcs éoliens Centre Manche 1 et 2.	16
Figure 8 : exemple de représentation graphique des abondances totales calculées par station et par famille d'espèces d'œufs de poissons identifiées au stade I au cours des campagnes d'échantillonnage réalisées au filet Bongo au printemps 2024 sur la zone d'étude des futurs parcs éoliens Centre Manche 1 et 2.	17

Figure 9 : exemple de représentation de l'indice de Shannon (H) calculé pour les œufs et larves de poissons par saison dans la zone intérieure (en orange) et dans la zone extérieure (en bleu) de la zone d'étude des futurs parcs éoliens Centre Manche 1 et 2. 18

Index des tableaux

Tableau 1 : caractéristiques physiques de la sonde multi-paramètres WiMo.	6
Tableau 2 : caractéristiques techniques de la sonde multi-paramètres WiMo.	6
Tableau 3 : caractéristiques techniques de la benne Hamon.	8
Tableau 4 : paramètres mesurés et échantillons collectés lors des campagnes de prélèvement des communautés planctoniques.	10

1. Méthodologie

1.1 Objectifs du suivi des communautés planctoniques

L'objectif principal du suivi est d'identifier la nature des communautés planctoniques présentes, leur variabilité, et leur sensibilité vis-à-vis du projet dans la zone de Fécamp Grand Large :

- Cartographier la distribution des peuplements planctoniques dans la zone de développement Fécamp Grand Large ;
- Décrire la composition spécifique, l'abondance et la présence d'espèces non indigènes ;
- Estimer la productivité primaire et les ressources disponibles pour le Zooplancton et l'Ichtyoplancton ;
- Identifier les espèces pouvant produire des toxines dans certains cas, et responsables des interdictions de pêche aux coquillages ;
- Décrire la structure et la caractérisation des peuplements planctoniques ;
- Évaluer l'état de conservation de chaque peuplement planctonique ;
- Définir la fonctionnalité frayère de la zone de Fécamp Grand Large.

Trois types d'échantillonnage sont programmés pour répondre aux objectifs de l'état initial du plancton : des prélèvements de phytoplancton, d'ichtyoplancton et zooplancton ; et de kystes phytoplanctoniques.

L'ichtyoplancton (œufs et larves de poissons) est également traité dans la fiche protocole du compartiment « Poissons et méga-invertébrés benthiques ».

Le protocole s'inscrit dans une analyse de type *BACI* (*Before-After-Control-Impact*), avec la définition au préalable de stations témoins.

1.2 Principes du suivi

1.2.1. Description du protocole

Dans le cadre de l'application du protocole de suivi des communautés planctoniques, les prescriptions des protocoles et documents de référence sont suivies :

- Evaluation of a gradient sampling design for environmental impact assessment. Environmental Monitoring and Assessment (Ellis & Schneider, 1997) ;
- Beyond *BACI* : the detection of environmental impacts on populations in the real, but variable, world (Underwood, 1992) ;
- Sampling design and statistical methods for environmental biologists (Green, 1979) ;
- Manuel des méthodes d'Alain Aminot et de Roger Kérouel « Hydrologie des écosystèmes marins. Paramètres et analyses » (2004, Ifremer) ;
- Spécifications techniques et méthodologiques appliquées au REPHY (Neaud-Masson, 2020) ;
- The use of polytungstate for the separation and concentration of living dinoflagellate cysts from marine sediments (Bolch, 1997).

1.2.2. Plan d'échantillonnage

Le plan d'échantillonnage des stations d'échantillonnage du phytoplancton, du zooplancton et des kystes phytoplanctoniques est présenté dans la **Figure 1**.

Il est composé de 12 stations : six à l'intérieur de la zone rapprochée et six à l'extérieur. Ce plan garantit l'obtention de résultats statistiquement exploitables et extrapolables dans le cadre d'une analyse *BACI* (Underwood, 1992).

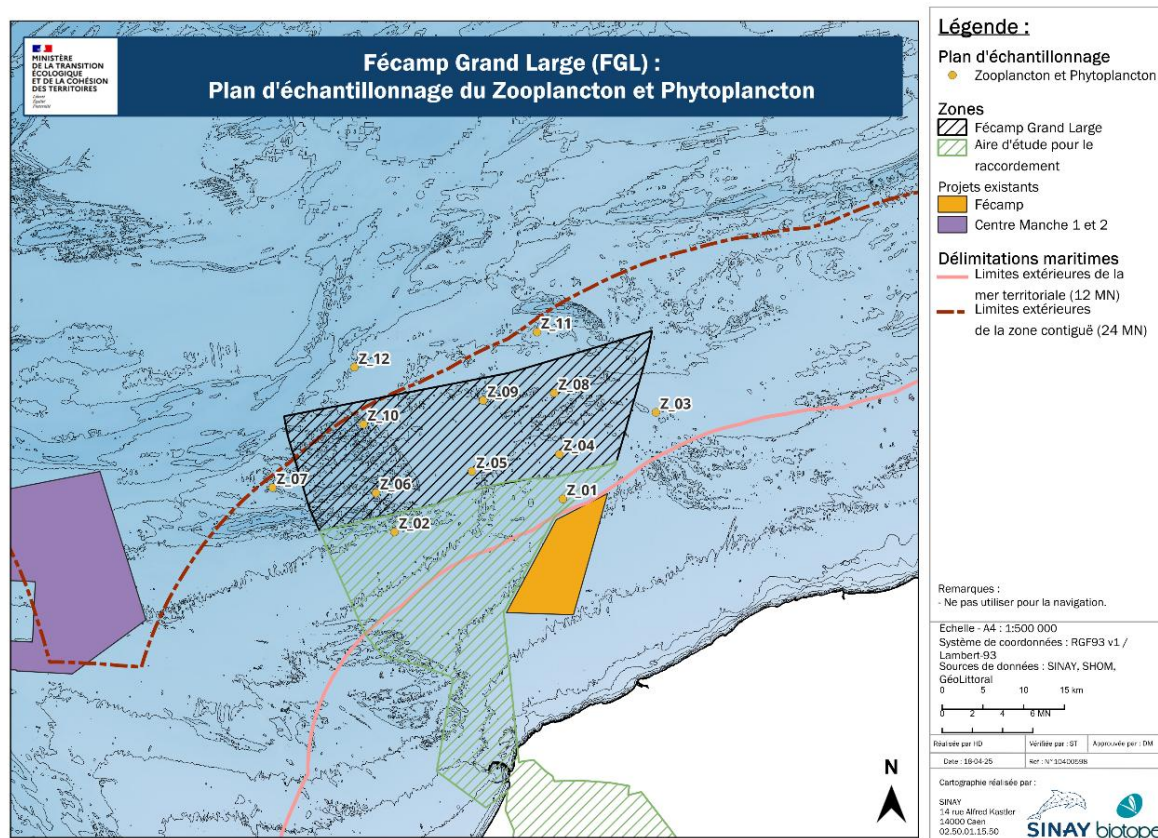


Figure 1 : plan d'échantillonnage du suivi des communautés planctoniques dans la zone de Fécamp Grand Large. Les différents échantillonnages (bouteille Niskin, filet Bongo à double collecteur et benne Van Veen) correspondent aux stations PZ_01 à PZ_12, illustrées par des points orange.

Les prélèvements de phytoplancton ; et l'ichtyoplancton et zooplancton sont mensuels soit 12 campagnes par an. Le suivi des communautés planctoniques débute en septembre 2025 et durera deux années.

Cette fréquence d'échantillonnage et sa durée permettent d'appréhender les variabilités saisonnières et interannuelles ; et de caractériser la dynamique et la production des populations phytoplanctoniques et ichtyo-zooplanctoniques. Les prélèvements de phytoplancton et de ichtyo-zooplancton sont effectués simultanément sur chaque station. Au cours de ces prélèvements, des mesures des paramètres physico-chimiques de l'eau sont également réalisés.

Les prélèvements de kystes phytoplanctoniques sont réalisés au cours d'une unique campagne prévu à l'automne 2026.

L'ensemble des prélèvements sont réalisés sur trois journées et sur la même marée. Si les conditions météorologiques ne le permettent pas, les prélèvements sont séparés sur deux marées différentes au cours du même mois.

Les coefficients de marées de mortes-eaux sont privilégiés afin de permettre des interventions dans des conditions de marée similaires et comparables au cours des deux années de suivi des

communautés planctoniques ; afin de ne pas augmenter la variabilité inhérente au déplacement des masses d'eau.

1.2.3. Moyens et Matériels

1.2.3.1. Moyens nautiques

Le navire utilisé pour l'échantillonnage des communautés planctoniques est le VDC Lynx de la société NORMANDY OFFSHORE SERVICES (Figure 2).



Figure 2 : navire VDC Lynx de la société NORMANDY OFFSHORE SERVICES.

Ce navire offre une stabilité en mer et possède tous les équipements nécessaires pour les différentes opérations associées aux prélèvements de plancton. La configuration et la capacité du navire sont essentielles pour garantir la précision des prélèvements et la continuité des mesures en mer, quelles que soient les conditions de navigation.

Les conditions limites de mise en œuvre sont les suivantes dans le cadre du suivi des communautés planctoniques :

- Vent : inférieur ou égal à 4 Beaufort ;
- État de la mer : mer calme à peu agitée (état de mer à 3).

1.2.3.2. Moyens humains

L'échantillonnage des communautés planctoniques (phytoplancton, zooplancton et kystes phytoplanctoniques) nécessite trois personnes, en plus de l'équipage du navire VDC Lynx.

1.2.3.3. Matériel de mesure sur le terrain

1.2.3.3.1 Phytoplancton

Le phytoplancton est échantillonné au moyen d'une bouteille de prélèvement de type Niskin téflonnée, associée à une sonde multi-paramètres afin de mesurer en continu les paramètres physico-chimiques à l'échelle de la colonne d'eau (Figure 3).



Figure 3 : dispositif comprenant une bouteille de prélèvement de type Niskin téflonnée d'une contenance de cinq litres et une sonde WiMo multi-paramètres.

Ce dispositif (association d'une sonde multi-paramètres et d'une bouteille de prélèvement sur un même système d'acquisition en simultané) assure la précision de ce système d'acquisition des prélèvements et garantit la qualité des échantillons en fournissant un contexte environnemental détaillé permettant de mettre en relation les différents paramètres obtenus.

La sonde multi-paramètres choisie pour le suivi des communautés planctoniques est la Wimo Plus de NKE (**Tableau 1** et **Tableau 2**).

Tableau 1 : caractéristiques physiques de la sonde multi-paramètres WiMo.

Caractéristiques physiques	
Immersion en mer	Jusqu'à 250 mètres de profondeur.
Dimensions	Largeur : 610 mm Diamètre : 110 mm Poids sans lest : 3 KG

Tableau 2 : caractéristiques techniques de la sonde multi-paramètres WiMo.

Caractéristiques techniques			
Paramètre	Gamme	Précision	Résolution
Pression	0 à 25 bars	0,15%	0,001 bar
Température	-2 à +35°C	±0,002°C	0,001°C
Conductivité	0 à 100 mS/cm	25 µS ou 0,5% de la lecture	0,0001 mS/cm
Concentration en oxygène	0-23 mg/L (max, 0-44 mg/L)	± 0,1 mg/l	0,0025 mg/L
Saturation en oxygène	0-250% (max, 0-500%)	± 1% de la lecture	0,25%
Turbidité	0 à 4000 NTU	0,4 NTU ou 5% de la lecture	0,01 NTU

1.2.3.3.2 Ichtyoplancton et zooplancton

L'ichtyoplancton est collecté à l'aide d'un filet Bongo à double collecteur, équipé de deux cadres circulaires, chacun portant un filet conique (Figure 4). Le zooplancton est collecté à l'aide d'un filet WP2, équipé d'un cadre circulaire portant un filet conique (Figure 5).

Ces filets, dont la taille des mailles est adaptée pour capturer efficacement les larves et œufs de poissons (500 μm) et le zooplancton (200 μm). Il se terminent par des collecteurs équipés de tamis souples de même maille, garantissant une capture sans endommager les spécimens.

Un volucompteur est placé à l'entrée de chaque filet pour mesurer précisément le volume d'eau filtré, ce qui permet de normaliser les données de densité de plancton en fonction du volume d'eau échantillonné. Un ordinateur de plongée est également fixé au système afin de valider la profondeur et la durée de la plongée de l'engin de prélèvement.



Figure 4 : filet Bongo à double collecteur servant au prélèvement de l'ichtyoplancton équipé d'un dépresseur et d'un volucompteur mécanique (Bionef®).



Figure 5 : filet WP2 servant au prélèvement du zooplancton équipé d'un dépresseur et d'un volucompteur mécanique (Bionef® / Ifremer®).

1.2.3.3.3 Kystes phytoplanctoniques

Les échantillons sont recueillis à l'aide d'une benne de prélèvement. La benne choisie pour le suivi des kystes phytoplanctoniques est la benne Hamon (**Figure 6** et **Tableau 3**).



Figure 6 : benne Hamon.

Elle est conçue pour échantillonner tous les types de sédiments. Il s'agit du même engin de prélèvement que celui utilisé pour étudier les peuplements et habitats benthiques ; et suivre la qualité des sédiments.

Elle prélève une surface de 0,25 m² et pénètre généralement d'une trentaine de centimètres dans les sédiments. Elle se compose de deux godets reliés par une charnière. Pendant la descente, les deux godets restent séparés. Quand elle touche le fond, le mécanisme de verrouillage se relâche, et les seaux se ferment permettant le prélèvement des échantillons.

Tableau 3 : caractéristiques techniques de la benne Hamon.

Caractéristiques techniques	
Surface	0,5 m ²
Poids à vide	400 Kg
Matériau	Inox

1.2.4. Déploiement opérationnel

1.2.4.1. Phytoplancton

Le phytoplancton est échantillonné à trois profondeurs : sous la surface (un mètre sous la surface, à mi-profondeur et un mètre au-dessus du fond). A chaque profondeur, un prélèvement à la bouteille Niskin de 5 L et un profil à la sonde multi-paramètres WiMo est réalisé. **Le volume d'eau de mer prélevé diffère en fonction des analyses :**

- **Un litre par profondeur** pour les analyses de la chlorophylle *a* et de phéopigments ;
- **500 mL en surface** pour la diversité et les abondance phytoplanctoniques.

Au moment du prélèvement, les conditions de conservation suivantes doivent être respectées :

- Le flacon étanche doit être rempli par l'échantillon à hauteur d'environ 80 % ;

- L'échantillon doit être correctement identifié afin de connaître au minimum le lieu, la date et l'heure du prélèvement. Des informations complémentaires peuvent être renseignées (profondeur, agent préleveur, paramètres physico-chimiques mesurés, etc.) ;
- Un conservateur des échantillons de phytoplancton, le Lugol acide (ou neutre), est ajouté immédiatement après le prélèvement afin d'éviter la perte des cellules phytoplanctoniques. Il est recommandé de l'ajouter goutte à goutte, en observant la coloration apparaitre progressivement. La couleur de l'échantillon doit virer au jaune paille ou couleur cognac. Pour un flacon d'1 litre, la quantité de Lugol à ajouter varie entre 1 et 10 mL en fonction de la densité algale ;
- Le flacon doit être refermé soigneusement. La fermeture doit être parfaitement étanche et hermétique (double fermeture, utilisation de film type « parafilm », etc.). Ce dernier est également opaque afin de ne pas altérer les concentrations de microalgues.

Des flacons, en général d'un volume de 1L (et au minimum de 250 mL), et de préférence à col large sont utilisés pour faciliter le remplissage sur le terrain. Les flacons peuvent resservir à condition d'être lavés précautionneusement après chaque campagne. Ils peuvent être en polyéthylène (PE), polypropylène (PP) ou en chlorure de polyvinyle (PVC).

A l'issue des prélèvements, les échantillons peuvent être de deux types :

- **Echantillons dit "frais" ou "vivants" ne** contenant pas de fixateur. Les échantillons sont conservés à l'obscurité à une température comprise entre 4 et 10 °C. Afin de limiter la dégradation du phytoplancton, les prélèvements d'eau de mer non fixés sont filtrés en mer le jour même. Pour chaque profondeur, les échantillons sont prélevés et filtrés au travers d'une colonne de filtration. Les échantillons de microalgues sont ainsi collectés sur un filtre ((type Whatman GF/F, porosité ~0,7 µm) et conservés au congélateur à bord (- 20°C). Cette filtration permet de réaliser les analyses de chlorophylle *a* et de phéopigments dans les 48 heures suivant les prélèvements ;
- **Echantillons fixés** au moment du prélèvement (au Lugol) : ils permettent un inventaire détaillé, sans contrainte de temps de la diversité et des abondances phytoplanctoniques. Les échantillons doivent être conservés à température ambiante à l'obscurité dans les quatre semaines après leur prélèvement. Passé ce délai, la température de stockage est comprise entre 1 et 5 °C afin de garantir la préservation de la qualité de l'échantillon pendant environ 12 mois.

L'ensemble des échantillons est transmis aux laboratoires partenaires (LABEO et POS3IDON) à la fin de chaque campagne dans un délai maximal de 24 heures.

1.2.4.2. Ichtyoplancton et zooplancton

L'ichtyoplancton et le zooplancton sont échantillonnés à l'échelle de toute la colonne d'eau. Le filet Bongo est descendu au fond avec un lest et remonté progressivement à travers la colonne d'eau à une vitesse comprise entre deux et trois nœuds face au courant dominant. Le filet WP2 est descendu au fond avec un lest et remonté progressivement à la verticale.

Les échantillons prélevés sont passés au tamis (maille de 500 µm pour les œufs et larves de poissons et 200 µm pour le zooplancton) après un rinçage de chaque filet par l'extérieur avec l'eau de mer afin de concentrer les échantillons dans les collecteurs sans perte de matériel.

Les échantillons de zooplancton et d'ichtyoplancton sont conservés dans une solution d'eau de mer à 4 % de formaldéhyde tamponnée avec du borate de sodium et du chlorure de strontium ou du tétraborate de sodium. Le formaldéhyde agit en se liant aux protéines tissulaires, stabilisant ainsi les structures cellulaires, empêchant les réactions ultérieures avec d'autres agents chimiques et limitant les biais d'identification en laboratoire.

Des flacons, en général d'un volume de 500 mL (et au minimum de 250 mL), et de préférence à col large sont utilisés pour faciliter le remplissage sur le terrain. Les flacons peuvent resservir à condition d'être lavés précautionneusement après chaque campagne. Ils peuvent être en polyéthylène (PE), polypropylène (PP) ou en chlorure de polyvinyle (PVC). Il est recommandé d'appliquer du parafilm autour du col et du filetage du flacon avant de le fermer à l'aide du bouchon, afin de limiter les risques de fuite. Les échantillons peuvent ensuite être conservés à température ambiante et à l'obscurité.

L'ensemble des échantillons est transmis au laboratoire partenaire (POS3IDON) à la fin de chaque campagne dans un délai maximal de deux semaines. Les échantillons biologiques ainsi fixés au formaldéhyde ne nécessitent pas de point de vigilance particulier et seront conservés à l'abri de la lumière, à température ambiante.

1.2.4.3. Kystes phytoplanctoniques

Lors des prélèvements de kystes phytoplanctoniques, la benne est descendue et se déclenche automatiquement dès qu'elle touche le fond. Une fois le prélèvement réalisé, la benne est remontée à bord. L'échantillon est manipulé avec précaution afin de maintenir sa structure autant que possible. La partie supérieure du prélèvement est ensuite raclée au moyen d'une spatule large.

Les échantillons sont ensuite conservés au frais (4°C) dans des flacons hermétiques entourés d'aluminium avec des bouchons entourés de parafilm jusqu'à leur analyse. L'ensemble des échantillons sont transmis au laboratoire à la fin de chaque campagne dans un délai maximal de 24 heures.

1.3 Données collectées

Les paramètres mesurés et les échantillons collectés lors des campagnes de prélèvement des communautés planctoniques sont renseignés dans le **Tableau 4**.

Tableau 4 : paramètres mesurés et échantillons collectés lors des campagnes de prélèvement des communautés planctoniques.

Paramètres mesurés et échantillons collectés		
Compartiment	Matériel de mesure / prélèvement	Paramètre mesuré / Échantillons collectés
Qualité de l'eau	Sonde multi-paramètres WiMo	Température Salinité Concentration en oxygène dissous Fluorescence (chlorophylle a) Mesure optique (NTU)
Phytoplancton	Bouteille Niskin	Échantillons d'eau de mer à trois profondeurs : subsurface, mi-profondeur et fond Chlorophylle a : Identification taxonomique et dénombrement du microphytoplancton Phéopigments
Ichtyoplancton et zooplancton	Filet Bongo Filet WP2	Ichtyoplancton (œufs et larves de poissons) et zooplancton : identification taxonomique et dénombrement
Kystes phytoplanctonique	Benne Hamon	Échantillons de sédiments (100 g)

2. Traitement et analyses des données

2.1 Traitements des échantillons

2.1.1. Phytoplancton

L'objectif des analyses du phytoplancton est de déterminer par échantillon la teneur en chlorophylle *a* (échantillons non fixés), le nombre de cellules totales ainsi que les différents taxons et les abondances associées (échantillons fixés), la teneur en phéopigments (échantillons non fixés).

La teneur en chlorophylle *a* et en phéopigments est déterminée pour chaque profondeur et sur toute la colonne d'eau. L'identification du microphytoplancton est réalisée jusqu'au plus bas niveau taxonomique possible. Cette identification et le dénombrement des cellules (nombre de cellules/L) est réalisé par station.

Les méthodes d'analyses sont basées sur :

- La spectrométrie d'absorption moléculaire afin de déterminer les concentrations en chlorophylle *a* et en phéopigments par échantillon. Ces analyses sont réalisées par le laboratoire partenaire LABEO (accrédité COFRAC et de la Norme NF EN ISO 16 665) ;
- La technique de microscopie optique issue des protocoles PHYTOBS et REPHY (Neaud-Masson, 2020). Cette méthode permet d'identifier et de dénombrer les différentes espèces phytoplanctoniques présentes par échantillon. Cette analyse est réalisée à la loupe binoculaire par des spécialistes en identification phytoplanctonique (Pauline Bazin de POS3IDON).

2.1.1.1. Analyse de la teneur en chlorophylle *a* et des phéopigments

Les analyses de la teneur en chlorophylle *a* et en phéopigments sont réalisées selon les normes françaises et européennes NF T90-117 : Qualité de l'eau - Dosage de la chlorophylle *a* et d'un indice phéopigments - Qualité de l'eau - Dosage de la chlorophylle *a* et d'un indice phéopigments - Méthode par spectrométrie d'absorption moléculaire).

Les filtres sont ensuite placés dans des tubes hermétiques contenant une quantité déterminée d'acétone à 90 %, généralement à raison de 5 à 10 mL par filtre. Cette étape permet la solubilisation des pigments chlorophylliens dans un solvant organique.

L'extraction est facilitée par un broyage mécanique (à l'aide d'un pilon ou d'un broyeur à billes) ou par ultrasonication, puis les échantillons sont laissés au repos au froid (4 °C) et dans l'obscurité pendant 12 à 24 heures afin de maximiser l'extraction tout en limitant la dégradation photochimique des pigments. Après cette incubation, les extraits sont centrifugés (environ 10 minutes à 3 000 tr/min) pour éliminer les particules en suspension.

Le surnageant clair contenant les pigments dissous est alors récupéré et analysé au spectrophotomètre en mesurant l'absorbance à des longueurs d'onde spécifiques (généralement autour de 665 nm, avant et après acidification). Cette procédure permet de distinguer la chlorophylle *a* des phéopigments selon leur comportement spectral. En effet, les pigments chlorophylliens et leurs produits de dégradation présentent chacun un spectre d'absorption caractéristique, ce qui permet leur quantification précise. L'acidification transforme la chlorophylle *a* en phéophytine *a*, induisant une baisse d'absorbance, dont la différence est exploitée dans la formule de Lorenzen pour calculer les concentrations respectives.

2.1.1.2. Détermination et dénombrement des espèces phytoplanctoniques

La première étape consiste à laisser les échantillons sédimenter dans une cuve. Un équilibre thermique doit pour cela être atteint entre les échantillons, le matériel de travail (chambre de sédimentation) et la pièce dans laquelle les analyses sont effectuées. L'étape d'homogénéisation est effectuée

manuellement par 30 roulements horizontaux et retournements verticaux doux du flacon. L'homogénéisation douce permet de limiter l'altération des cellules les plus fragiles et la formation de bulles d'air. Si des bulles se forment dans le flacon lors de cette étape, il est indispensable de laisser reposer l'échantillon jusqu'à leur complète disparition (quelques heures) puis de réitérer l'opération.

La sédimentation doit se dérouler sur une surface horizontale, à l'abri de la lumière directe, des vibrations, d'une source chaleur et à une température ambiante constante. À l'issue de l'étape d'homogénéisation, la chambre de sédimentation est directement remplie à partir du flacon d'échantillonnage, en évitant toute formation de bulles d'air. Le temps de sédimentation dépend du volume de la colonne et donc de la hauteur de la chambre.

La seconde étape correspond à l'identification et au dénombrement des cellules au microscope optique. Un premier balayage à faible objectif permet également d'évaluer la densité en phytoplancton de l'échantillon pour confirmer ou infirmer le choix du volume sédimenté. La stratégie de dénombrement à adopter pour l'analyse d'une chambre de sédimentation est fonction de la densité de l'échantillon, des saisons, des taxons présents.

L'identification au microscope optique repose sur l'observation et la détermination de critères morphologiques, soit par comparaison avec les documents de référence soit à l'aide de clés d'identification. L'existence des espèces caractéristiques de la région échantillonnée, les variations morphologiques au sein d'une même espèce et les données environnementales liées à l'échantillon analysé facilitent l'analyse et les identifications. Une observation préliminaire du matériel vivant à l'issue de l'échantillonnage, si elle est possible, s'avère être une aide précieuse pour les comptages ultérieurs.

Le comptage au microscope optique consiste à enregistrer les taxons observés et le nombre d'unités d'algues (cellules) de chaque taxon dans une zone de surface connue de la chambre de sédimentation ou dans la chambre entière

2.1.2. Ichtyoplancton et zooplancton

Les échantillons de zooplancton et d'ichtyoplancton sont analysés afin de réaliser une identification taxonomique et un dénombrement spécifique par station. Cette analyse est réalisée à la loupe binoculaire par des spécialistes en identification zooplanctonique (Sacha Albert de POS3IDON).

L'analyse taxonomique à la loupe binoculaire est la méthode de référence en écologie marine pour l'identification des organismes zooplanctoniques. Grâce à l'observation directe et tridimensionnelle des spécimens, cette méthode permet d'exploiter l'ensemble des caractères morphologiques essentiels à la détermination taxonomique fine. En particulier, **la loupe binoculaire autorise la reconnaissance** :

- Des traits morphologiques subtils tels que la segmentation, la forme et la structure des appendices, la disposition des soies ou épines ;
- Des caractères microscopiques (notamment à fort grossissement) qui sont souvent indispensables pour différencier espèces proches ou cryptiques ;
- Des stades de développement (larves, juvéniles, adultes) qui peuvent présenter des morphologies très variables.

L'expertise de l'opérateur est ici primordiale : le taxonomiste responsable de l'identification est formé et expérimenté peut parvenir à une identification jusqu'au niveau spécifique dans certains cas.

L'analyse manuelle à la loupe binoculaire excelle dans la détection des organismes rares, transparents, ou morphologiquement discrets. Grâce à la capacité d'ajustement de la lumière, du grossissement, et à la manipulation directe de l'échantillon, le taxonomiste peut :

- Détecter et isoler des organismes présents à de très faibles densités ;

- Observer des spécimens endommagés ou partiellement dégradés ;
- Reconnaître des organismes présentant un faible contraste avec le fond ou la matrice ;
- Analyser des taxons peu représentés ou difficiles à identifier, notamment dans les groupes micro-zooplanctoniques (rotifères, foraminifères, larves planctoniques).

Cette capacité est cruciale dans les études de biodiversité fine, l'évaluation de communautés sensibles à la pollution, ou la détection d'espèces bioindicatrices rares.

2.1.2.1. Ichtyoplancton

À l'issue d'un rinçage à l'eau douce sur un tamis de 500 µm, effectué sous hotte à extraction, un premier tri taxonomique est réalisé afin de dissocier l'ichtyoplancton des autres composantes du zooplancton. Cette étape s'effectue sous stéréomicroscope (Leica MZ125 ou Leica M205C, avec éclairages transmis et réfléchi), en diluant progressivement l'échantillon dans de l'eau douce puis en le transférant par fractions successives dans des chambres de comptage de type Bogorov.

L'ichtyoplancton est isolé à l'aide d'une pince à dissection fine et pointue pour les larves et d'une pince capsulaire Arruga, particulièrement adaptée à la manipulation des œufs, dont les structures sont très fragiles. Les individus prélevés sont ensuite déposés dans une coupelle en verre en vue de leur identification.

Une fois isolés du reste du zooplancton, les œufs et larves ichtyoplanctoniques sont triés en fonction de leurs morphotypes, puis photographiés à l'aide de caméras couleur (Optika C-B5 et Flexacam C3) couplées aux stéréomicroscopes Leica MZ125 et Leica M205C. L'acquisition des images est réalisée via le logiciel PROVIEW, qui permet une visualisation en temps réel. La discrimination des œufs selon leur morphotype repose principalement sur les critères morphologiques décrits par (Ahlstrom & Moser, 1980), (Matarese & Sandknop, 1984), (Marinaro, 1991) et (Crec'hriou et al., 2015) notamment :

- La forme générale et le diamètre de l'œuf ;
- Le nombre et le diamètre des globules huileux ;
- L'aspect du vitellus, ainsi que l'espace périvitellin, défini comme la distance entre le chorion et le vitellus ;
- Toutefois, l'identification spécifique des œufs demeure souvent limitée, en raison de la similarité des caractéristiques morphologiques entre plusieurs espèces.

Les stades de développement des œufs, de I à V, sont définis selon les descriptions (Simpson, 1959) et (Thompson, 1981), en s'appuyant sur les illustrations de (Apstein, 1909). Concernant les larves, l'identification taxonomique s'appuie principalement sur des critères morphologiques et pigmentaires, conformément aux descriptions de (Rodriguez et al., 2017).

D'autres guides de référence sont mobilisés, qu'ils soient généralistes ou spécifiques à la Méditerranée ou à l'Atlantique, à certains ordres ou familles (Fahay, 1983; Oz et al., 2022; Richards, 2006; Rodriguez, 2023; Rodriguez et al., 2016).

Les principaux critères utilisés incluent : la morphologie générale du corps larvaire, les motifs de pigmentation, le nombre de myomères, le nombre, la forme et la disposition des nageoires, la présence de structures épineuses au niveau des opercules, la forme de l'œil, ainsi que la forme de la mâchoire et la présence éventuelle de dents caractéristiques.

2.1.2.2. Zooplancton

La méthode d'analyse du zooplancton employée repose sur les travaux de Wu & Culver, 1992 et Conroy et al., 2005 ; et correspond à la méthode dite des « 100 individus ». Cette approche consiste à dénombrer au moins 100 individus appartenant à un groupe taxonomique cible (généralement les

Calanoïdes, en raison de leur forte dominance dans le zooplancton), à partir de sous-échantillons (aliquotes) prélevés dans un volume connu.

Après un rinçage à l'eau douce effectué sur un tamis de 200 µm sous hotte à extraction, l'échantillon initial est homogénéisé, puis dilué dans un volume déterminé avant d'être fractionné à l'aide d'une boîte de Motoda. Des aliquotes aléatoires de 5 mL sont ensuite prélevées et analysées individuellement dans une coupelle en verre. Ce tri se réalise sous stéréomicroscope (Leica MZ125, Leica M205C avec éclairages transmis et réfléchi). Tous les organismes observés sont identifiés jusqu'au niveau taxonomique le plus précis possible. Si plus de 100 individus du groupe taxonomique ciblé sont recensés dans la première aliquote, le comptage est interrompu. Dans le cas contraire, des aliquotes supplémentaires sont successivement analysées jusqu'à atteindre le seuil minimal de 100 individus pour le groupe concerné.

Les organismes zooplanctoniques sont triés selon leurs morphotypes, puis photographiés à l'aide d'une caméra couleur (Optika C-B5 et Flexacam C3 Camera) connectée aux stéréomicroscopes (Leica MZ125, Leica M205C) et au logiciel PROVIEW, qui permet une visualisation en temps réel des images. La discrimination des organismes selon leur morphotype repose principalement sur les critères morphologiques notamment décrits par Johnson, 2018 et Richardson et al., 2019 ; ainsi que de sites internet tel que l'Observatoire Océanologique de Banyuls-sur-Mer.

2.1.3. Kystes phytoplanctoniques

La détermination de la concentration en kystes phytoplanctoniques dans le sédiment est réalisée selon la méthode des gradients de densité basée sur le protocole de (Bolch, 1987).

Les sédiments prélevés en mer sont d'abord pesés, soumis à une ultrasonication pendant cinq minutes, filtrés avec un tamis de 125 et 20 microns puis centrifugés pendant 10 minutes avec une solution de polytungstate de sodium (SPT) à 1,4 g/mL.

Trois phases de densités différentes se forment une fois la centrifugation réalisée. L'interface entre le fond du flacon, où se trouvent les sédiments, et le haut du flacon, où se situe la solution SPT, est extrait. C'est dans cet échantillon, d'environ 15 mL, que se trouvent les kystes et grâce auquel l'identification et le dénombrement est réalisé au microscope. Un minimum de 100 à 300 kystes est attendu. La concentration en kystes est exprimée en nombre de kystes / g de sédiments humides.

Un focus sur les *Alexandrium*, les *Protoceratium*, les *Lingulodinium*, les *Gonyaulax* et les *Gymnodium* microreticulés est réalisé afin d'évaluer au mieux la présence d'espèces toxiques dans les sédiments.

2.2 Prétraitement des données brutes avant analyse

Le prétraitement des données est une étape essentielle pour garantir la qualité des analyses. **Ce processus inclut les étapes suivantes :**

- **Contrôle qualité** : les données brutes issues des différentes analyses en laboratoire sont inspectées et nettoyées pour éliminer les erreurs et les valeurs aberrantes. En cas de doute, le laboratoire responsable des analyses est contacté ;
- **Formatage** : les données sont formatées pour être compatibles avec les logiciels d'analyse et les modèles statistiques utilisés dans le cadre des indicateurs demandés. Les données sont ensuite organisées selon un format standardisé (chaque colonne correspond à une variable, chaque ligne correspond à une observation) pour faciliter les analyses ;
- **Agrégation des données par temporalité** : les données sont regroupées par mois ou par saison pour permettre une analyse des variations temporelles ;
- **Agrégation des données par localisation** : les données sont regroupées par station et par zone géographique afin de permettre une analyse des variations spatiales.

Ce prétraitement assure la fiabilité et la cohérence des données, optimisant ainsi leur exploitation pour les analyses finales et les interprétations.

2.3 Techniques d'analyse statistique

L'ensemble des données collectées est utilisé pour réaliser des analyses approfondies des indicateurs biologiques spécifiques aux communautés planctoniques. Ces analyses couvrent les principaux groupes planctoniques associé au Phytoplancton, au Zooplancton et à l'Ichtyoplancton. Elles sont réalisées à l'échelle de chaque station et de chaque échantillon.

Les principaux indicateurs calculés seront : l'abondance totale et spécifique, la biomasse totale, l'alpha-diversité (Shannon et Pielou) et la composition de la communauté (matrice espèces X échantillons).

Les données sont traitées à l'aide de techniques statistiques pour évaluer les indicateurs écologiques définis dans les objectifs de l'étude et pour établir un état initial des communautés planctoniques. Les différences de moyennes des indicateurs d'abondance et diversité sont testés avec tests non-paramétriques (Kruskal-Wallis avec Mann-Whitney à postériori), suivant les facteurs temporels (mois, année) et spatiales (zone, gradients). Les différences de compositions de chaque communauté (phytoplancton, holozooplancton, merozooplancton) sont évaluées à l'aide de techniques multivariées : ordinations sans et avec contraintes, et tests permutationnels tels que ANOSIM ou ADONIS/PERMANOVA.

La lecture, le pré-traitement, les analyses statistiques et la visualisation des résultats sont réalisés avec le langage R.

2.4 Interprétation des résultats et visualisation

Les résultats obtenus sont discutés à la lumière de l'écologie connue des communautés étudiées et remis en contexte à travers des retours d'expérience disponibles. Les résultats sont interprétés en tenant compte des connaissances existantes et des données disponibles pour la région, provenant de recensements antérieurs et de la littérature scientifique. Les résultats sont également sujets à validation de la part des experts en biologie marine, ce qui permet d'éviter des résultats incohérents au niveau écologique.

Les résultats des différentes analyses sont représentés sous forme de tableaux, graphiques ou cartographies afin de fournir une base visuelle et quantitative pour évaluer les dynamiques planctoniques dans la zone d'étude.

Les **Figure 7** à **Figure 9** présentent des exemples de visualisation des résultats pour le phytoplancton et le zooplancton :

- **Figure 7** : exemple de représentation d'analyses multivariée (nMDS) pour le phytoplancton et le zooplancton ;
- **Figure 8** : exemples de représentation graphique des abondances totales d'œufs de poissons identifiées au stade I (ichtyoplancton) ;
- **Figure 9** : exemple de représentation de l'indice de Shannon (H) calculé pour l'ichtyoplancton.

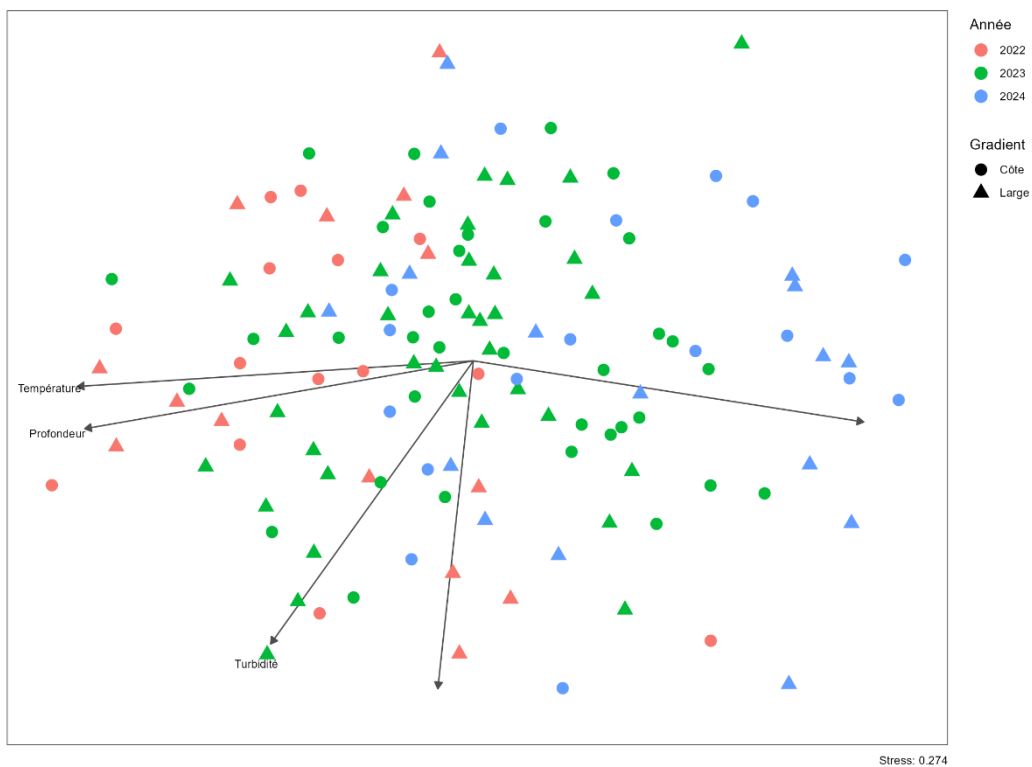
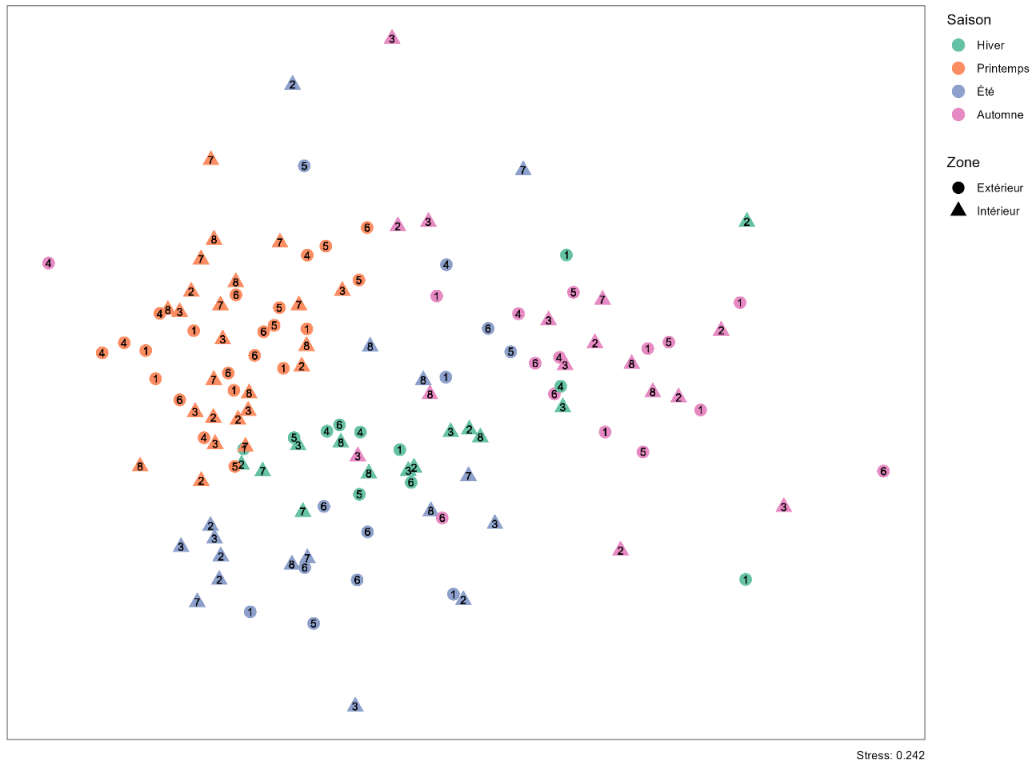


Figure 7 : exemples de représentation d'analyses multivariée (nMDS) calculées par station et par saison pour l'ichtyoplancton et le zooplancton (figure du haut) et par station et par année en fonction du gradient côte-large pour le phytoplancton (figure du bas) sur la zone d'étude des futurs parcs éoliens Centre Manche 1 et 2.

Abondance d'oeufs par famille - Printemps 2024

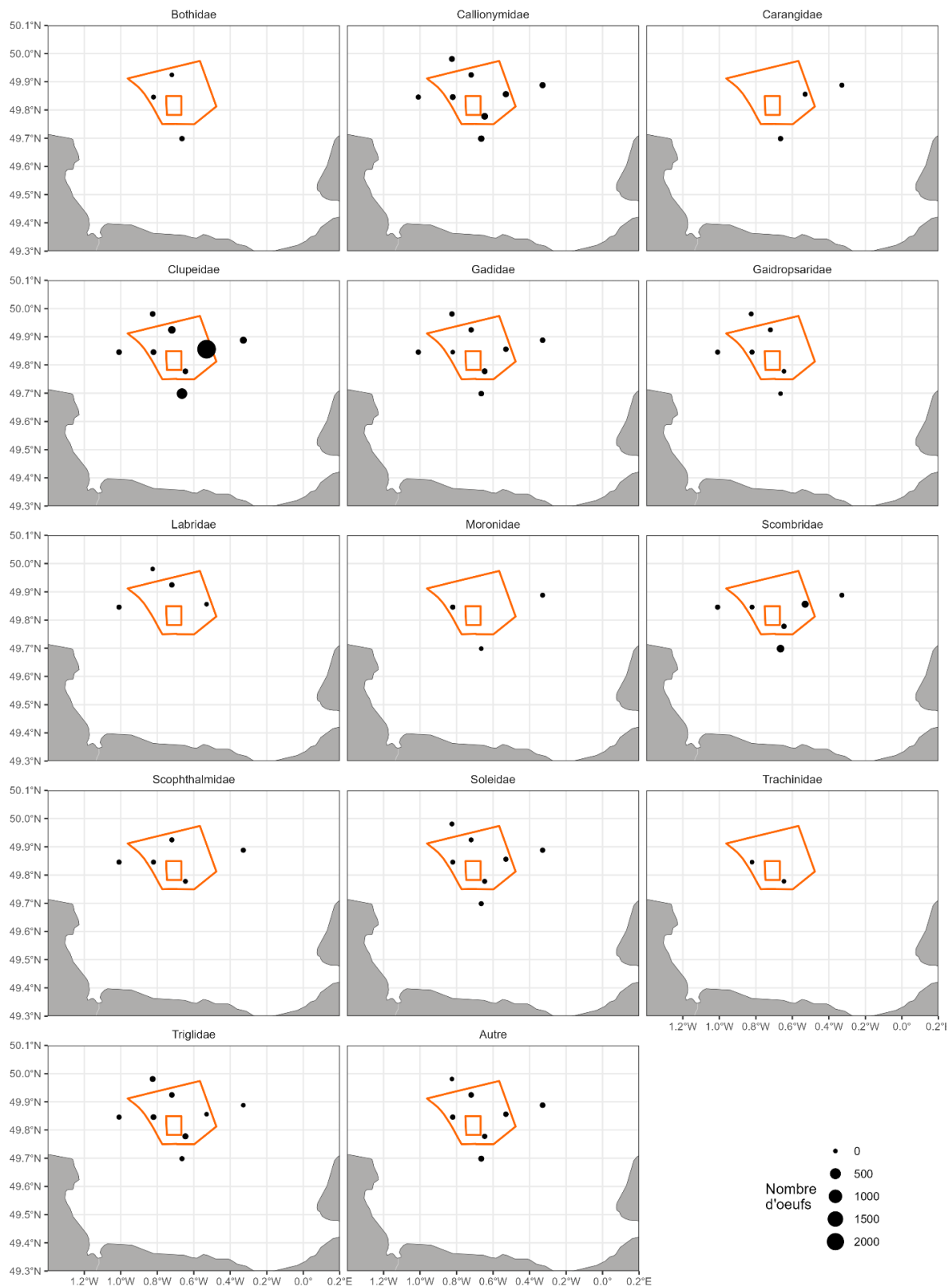


Figure 8 : exemple de représentation graphique des abondances totales calculées par station et par famille d'espèces d'œufs de poissons identifiées au stade I au cours des campagnes d'échantillonnage réalisées au filet Bongo au printemps 2024 sur la zone d'étude des futurs parcs éoliens Centre Manche 1 et 2.

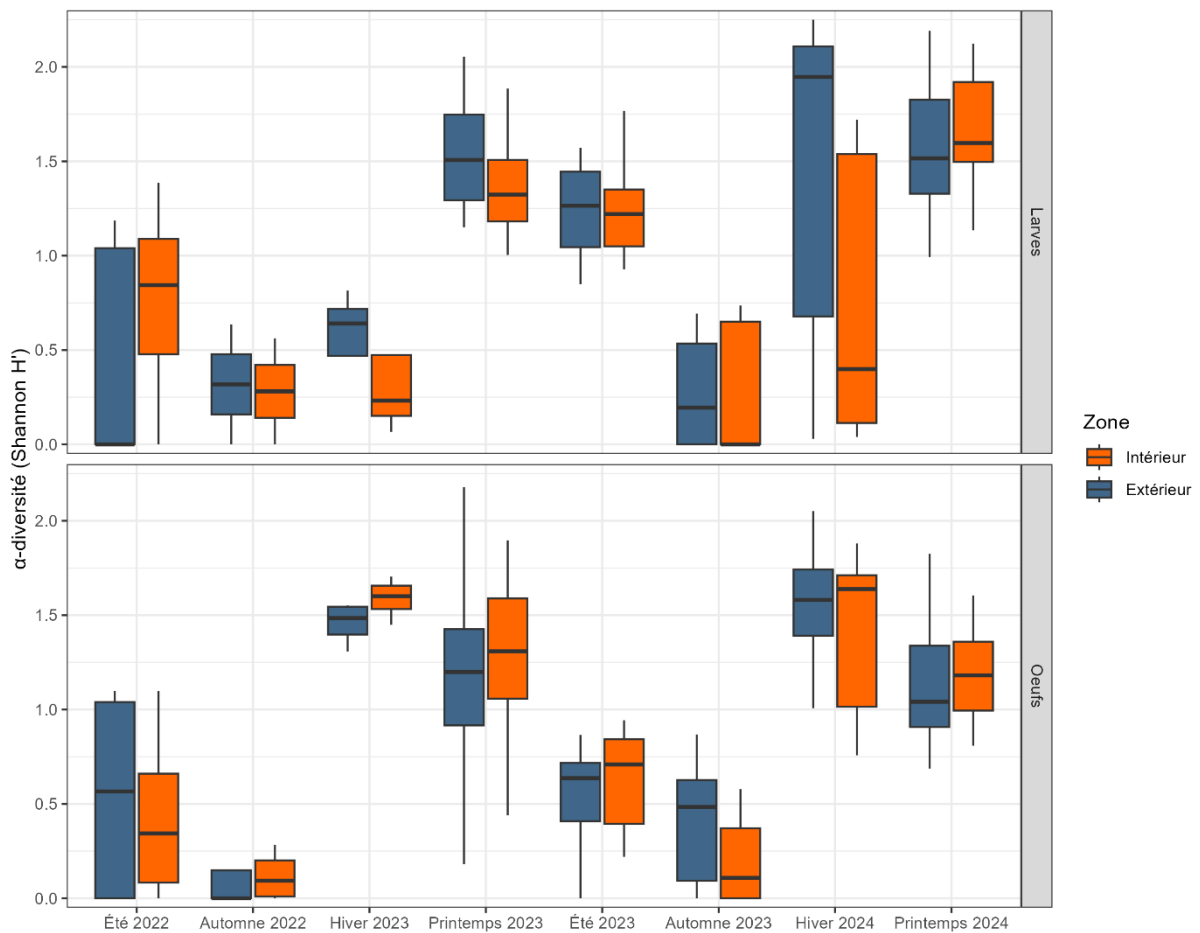


Figure 9 : exemple de représentation de l'indice de Shannon (H) calculé pour les œufs et larves de poissons par saison dans la zone intérieure (en orange) et dans la zone extérieure (en bleu) de la zone d'étude des futurs parcs éoliens Centre Manche 1 et 2.

Les données brutes (phytoplancton, zooplancton et ichtyoplancton) sont archivées dans un format Excel standardisé qui sera aussi rendu disponible sur la plateforme « Dépopio » à la fin du projet.



DREAL Normandie - MTE

Fécamp Grand Large

FICHE PROTOCOLE

Chiroptères en mer

Table des matières

Table des matières	2
1. Méthodologie	3
1.1 Objectifs du suivi des chiroptères en mer.....	3
1.2 Principes des suivis	3
1.2.1. Description des protocoles	3
1.2.2. Plan d'échantillonnage	4
1.2.3. Moyens et Matériels	5
1.3 Données collectées.....	8
2. Analyse des données	9

Index des illustrations

Figure 1 : plan d'échantillonnage du suivi des chiroptères en mer dans la zone de Fécamp Grand Large. Les positions des bouées mutualisées sont représentées par de points bleus (C_03, C_04, C_05 et C_09).	4
Figure 2 : spécifications générales de la bouée MOBILIS JET 2500Q STA équipée d'un mât abritant le détecteur à ultrasons.	5
Figure 3 : exemple d'un navire de la société TSM (ici, le TSM Kermor).	6
Figure 4 : illustration du positionnement du dispositif de collecte (à gauche) et illustration du microphone chiroptère (à droite).	6
Figure 5 : dispositif SM4BAT de Wildlife Acoustics.	6
Figure 6 : exemple de tableau de suivi de l'activité d'un dispositif équipée d'un « logger » (Source : Biotope).	7

Index des tableaux

Tableau 1 : paramètres d'enregistrement du SM4BAT.	7
Tableau 2 : informations collectées au cours du suivi des chiroptères en mer (certaines sont spécifiques aux expertises depuis un navire) et lors de la phase d'identification.	8

1. Méthodologie

1.1 Objectifs du suivi des chiroptères en mer

Les chiroptères (chauves-souris) constituent un groupe biologique assez bien connu en milieu terrestre, à l'exception notable des phénomènes migratoires, et largement étudié dans le cadre de projets d'aménagement, notamment de parcs éoliens terrestres. Les connaissances sur les activités de chauves-souris en mer sont beaucoup plus sommaires et se résument souvent soit à des hypothèses, soit à des contacts ponctuels.

Pour autant, il est avéré que plusieurs espèces de chiroptères survolent le milieu marin, *a minima* à l'occasion de transits migratoires. Les connaissances sur le déplacement des chauves-souris en milieu marin sont à ce jour lacunaires, notamment en ce qui concerne leur phénologie migratoire (trajets, périodes, conditions météorologiques).

La réalisation d'études en mer sur les chiroptères est assez récente, notamment grâce à la construction d'infrastructures en mer (éoliennes per exemple) permettant d'installer des dispositifs acoustiques. Par ailleurs, les études s'intensifient depuis plusieurs années grâce à des avancées technologiques (bouées flottantes multi-instrumentées en mer) ou l'utilisation de navires de transport de passagers comme support d'écoute des chiroptères en mer.

Les objectifs principaux de cette étude sont :

- **De définir l'état initial des chiroptères** dans la zone d'étude de Fécamp Grand Large, le long de la côte et sur les îles, en amont de la construction du parc éolien, pour établir une référence écologique solide.
- **D'identifier l'activité chiroptérologique** au large et dans la zone côtière.
- **De comprendre les mouvements migratoires.**

1.2 Principes des suivis

1.2.1. Description des protocoles

Pour les chiroptères, les difficultés à mettre en place des acquisitions de données en mer ainsi que la faible distance de détection de ces animaux (moins de 50 m pour de nombreuses espèces, jusqu'à 100 à 150 m pour certaines espèces migratrices) sont des contraintes importantes. Dans ce sens, la notion même de suivi avant / après est délicate à appréhender. Les méthodes d'expertises proposées ici se basent sur des acquisitions de données au niveau de la zone de projet et ses abords, qui peuvent par la suite être répliquées selon une approche de type *BACI*.

- **Acquisition des données en mer depuis des bouées MOBILIS**

Un détecteur automatique SM4BAT de *Wildlife Acoustics* à fonctionnement automatisé est installé sur quatre des 10 bouées mises en place dans le cadre du suivi du bruit ambiant sous-marin et de la qualité de l'eau (stations permanentes par bouées MOBILIS).

- **Acquisition des données en mer depuis un bateau**

Un détecteur automatique SM4BAT de *Wildlife Acoustics* à fonctionnement automatisé sera installé sur les bateaux mobilisés pour la réalisation des campagnes environnementales au sein de la zone d'étude. Les détecteurs seront placés sur le pont supérieur du bateau, au-dessus de la cabine où sont installés les différents éléments permettant la navigation.

1.2.2. Plan d'échantillonnage

Le plan d'échantillonnage est composé de quatre stations sur des bouées MOBILIS mutualisées avec les compartiments suivant la qualité de l'eau par des stations permanentes ; et le bruit ambiant sous-marin et les mammifères marins par acoustique passive (**Figure 1**).

Ces plans garantissent l'obtention de résultats statistiquement exploitables et extrapolables dans le cadre d'une analyse *BACI*.

Les bouées MOBILIS et les lignes de mouillage associés seront mutualisées pendant une à deux années. **Ces bouées resteront en place en permanence, permettant d'envisager une acquisition de données en continu sur une longue durée.**

Par ailleurs, il est également prévu d'équiper un ou plusieurs navires utilisés de façon prolongée pour des missions d'expertises en mer. Ces navires restent parfois plusieurs heures d'affilée de nuit dans le cadre des échantillonnages d'autres compartiments. Aussi, il s'agira d'acquisitions de données prolongées suivant des emplacements et des durées variables au sein de la zone d'étude de Fécamp Grand Large.

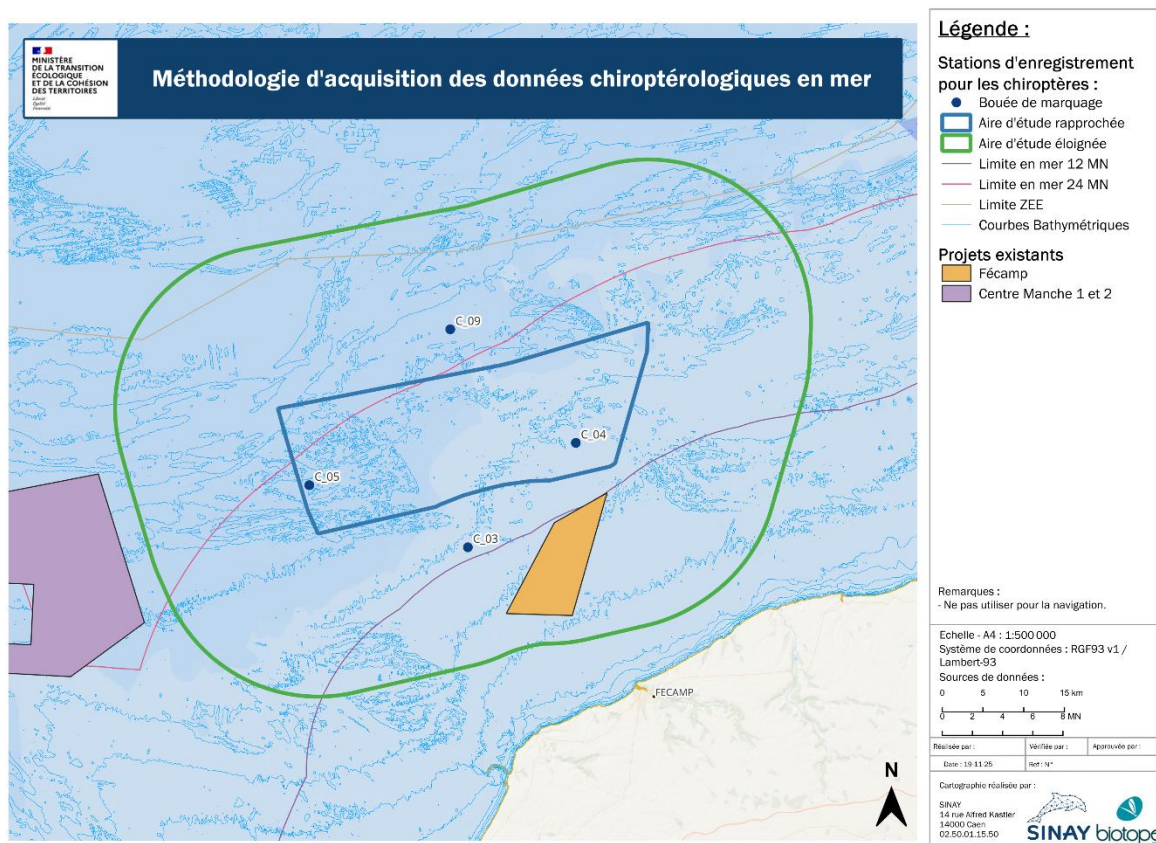


Figure 1 : plan d'échantillonnage du suivi des chiroptères en mer dans la zone de Fécamp Grand Large. Les positions des bouées mutualisées sont représentées par de points bleus (C_03, C_04, C_05 et C_09).

Les expertises des chiroptères sont classiquement réalisées en continu de fin-février / début mars à mi-novembre. En mer, les périodes de mars à mai et de mi-août à début novembre sont les plus importantes pour détecter des mouvements de spécimens en migration. La fin du printemps et la période estivale concernent principalement des spécimens résidents. Il est possible de prolonger ces expertises lors de toute la période hivernale.

Il est préconisé de réaliser le suivi dès le printemps 2026 jusqu'à novembre 2026 puis de nouveau en 2027.

1.2.3. Moyens et Matériels

1.2.3.1. Équipements requis pour la collecte de données

1.2.3.1.1 Bouées MOBILIS

Les détecteurs à ultrasons sont installés sur des bouées de type Mobilis DB 2000 (diamètre 1,9 mètre) (**Figure 2**). Le détecteur de chiroptères est installé dans un compartiment de protection marinisé et autonome en énergie (panneau solaire). Des microphones résistants et protégés seront installés (SMM-U2). Un *logger* accessible par Sigfox permettra la vérification du statut de fonctionnement des systèmes installés sur bouées.

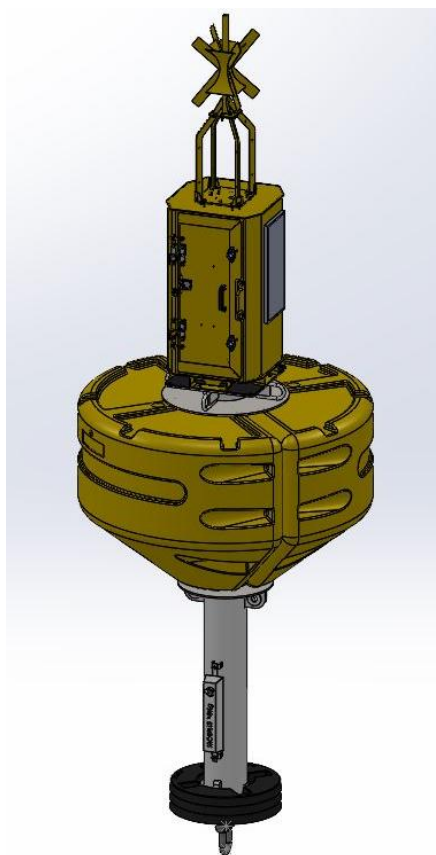


Figure 2 : spécifications générales de la bouée MOBILIS JET 2500Q STA équipée d'un mât abritant le détecteur à ultrasons.

Le déploiement des dispositifs à ultrasons et des bouées MOBILIS est assuré par des systèmes de mouillage conçus pour garantir une stabilité suffisante pour les équipements en profondeur, résister aux courants marins et protéger les instruments contre les mouvements excessifs pouvant affecter la qualité des enregistrements.

À ce stade, il est prévu de déployer des stations mutualisées avec le compartiment « Bruit ambiant sous-marin et acquisition des données par acoustique passive » et « Qualité de l'eau – Suivi permanent ».

1.2.3.1.2 Moyens nautiques

Une collecte de données chiroptérologiques en mer est envisagée via l'utilisation du navire qui réalisera les campagnes sédiment. Le navire utilisé sera un des navires de la compagnie TSM, de type remorqueur d'environ 30 m de long (**Figure 3**). Les détecteurs seront placés sur le pont supérieur (à environ 10 m de hauteur), au-dessus de la cabine où sont installés les différents éléments permettant la navigation (**Figure 4**).



Figure 3 : exemple d'un navire de la société TSM (ici, le TSM Kermor).

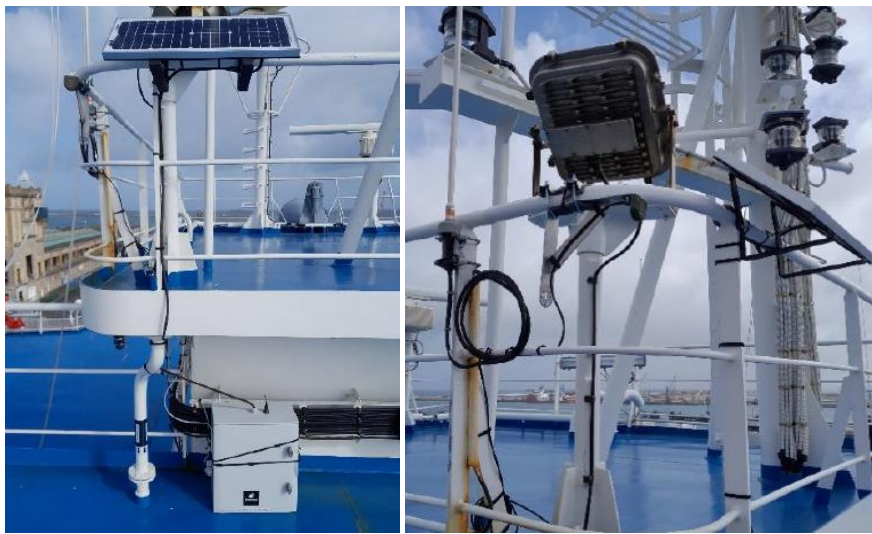


Figure 4 : illustration du positionnement du dispositif de collecte (à gauche) et illustration du microphone chiroptère (à droite).

1.2.3.2. Matériel de mesures sur le terrain

Le dispositif SM4BAT (**Figure 5**) enregistre de manière automatique les émissions ultrasonores sur une large gamme de fréquences et fournit ainsi des fichiers sur des stations fixes d'échantillonnage. Il sera programmé pour enregistrer en continu de deux heures avant le coucher du soleil jusqu'à cinq heures après le lever du soleil.



Figure 5 : dispositif SM4BAT de Wildlife Acoustics.

Les paramètres d'enregistrement du SM4BAT sont présentés dans le **Tableau 1**.

Tableau 1 : paramètres d'enregistrement du SM4BAT.

Paramètres d'enregistrement	
Fréquence d'échantillonnage	192 KHz
Fréquence minimale*	8 KHz
Durée minimale de déclenchement	1,5 ms
Niveau de déclenchement	12 dB
Déclenchement avant le coucher du soleil	90 min
Arrêt après lever du soleil	240 min
Compression	W4V-4

(*permet de n'enregistrer que les signaux de fréquence plus élevée que celle spécifiée, en dessous de 8 Hz le bruit ambiant génère trop de parasites)

Un microphone SMM-U2 sera utilisé pour l'enregistrement. Ce dernier est très résistant (microphone conçu en usine pour des expositions prolongées en conditions extérieures).

Pour l'échantillonnage depuis le navire, un tracker GPS associé au dispositif d'écoute sera installé sur un des bords du coffret, afin de récupérer les positions des données. Ce tracker sera autonome en énergie via le système de panneau solaire intégré.

Enfin, un *logger* accessible par Sigfox (**Figure 6**) permettra la vérification du statut de fonctionnement des systèmes installés sur bouées.

Le stockage des données s'effectue sur deux cartes micro SD de 256 Go pour chaque enregistreur. Les données sont consignées au sein d'un système de stockage interne.

Les dispositifs d'enregistrement intégreront un module d'état de fonctionnement et de niveau de charge des cartes mémoires accessible à grande distance y compris en milieu marin. Il s'agit d'un *datalogger* permettant de transmettre par radio (réseau basse fréquence SIGFOX) le statut de fonctionnement du dispositif. Il s'agira de s'assurer, sans besoin d'intervenir sur les bouées ou sur le bateau, que les dispositifs d'enregistrement sont fonctionnels. En cas de dysfonctionnement, une intervention sera alors planifiée.



Figure 6 : exemple de tableau de suivi de l'activité d'un dispositif équipée d'un « logger » (Source : Biotope).

1.3 Données collectées

Les informations collectées au cours du suivi des chiroptères en mer est synthétisé dans le **Tableau 2**.

Tableau 2 : informations collectées au cours du suivi des chiroptères en mer (certaines sont spécifiques aux expertises depuis un navire) et lors de la phase d'identification.

Information	Description
Point GPS	Coordonnées GPS du point d'observation en degrés décimaux – WGS 84
Transect	N° du transect bateau parcouru
Direction du bateau	Nord / Sud / Est / Ouest
Sens	Vers la côte ou vers le large
Date	JJ/MM/AAAA
Espèce	Le nom latin de l'espèce identifiée ou le code du taxon
Nombre	Le nombre d'individus observés
Observateur	Le nom de la personne identifiant la donnée
Comportement	Le comportement de la chauve-souris (transit actif, attraction, etc.)
Conditions météorologiques	Vitesse, direction et force du vent, visibilité, houle, hauteur des vagues, etc.

2. Analyse des données

Les données de suivi sont pré-analysées de manière automatique par le système Sonochiro développé par Biotope.

Le programme SonoChiro® inclut :

- Un algorithme de détection et de délimitation des signaux détectés ;
- Une mesure automatique, sur chaque cri, de 41 paramètres discriminants (répartition temps/fréquence/amplitude, caractérisation du rythme et ratios signal/bruit) ;
- Une classification des cris basée sur les mesures d'un large panel de sons de référence ;
- Une identification à la séquence de cris, incluant l'espèce la plus probable et un indice de confiance de cette identification. Dans le cas où certaines espèces présentes sont peu différenciables entre elles, les séquences sont alors identifiées au groupe d'espèce également assorties d'un indice de confiance ;
- Un algorithme détectant la présence simultanée de deux groupes de cris attribuables à deux espèces aisément différenciables, permettant dans ce cas de proposer une identification supplémentaire de l'espèce passant en arrière-plan.

Ainsi, les enregistrements sont analysés par ordinateur grâce à la suite de logiciel « SonoChiro® », permettant un tri et une pré-identification des contacts réalisés sur la base d'1 contact = 5 secondes de séquence d'une espèce.

Les identifications sont ensuite soumises à un test de validation utilisant les paramètres et sonagrammes de sortie de Sonochiro, puis contrôlées avec le logiciel *Batsound Pro* (Pettersson Elektronik) et validées selon la méthode d'identification acoustique de Michel BARATAUD par un spécialiste confirmé.

Cette démarche et cet équipement permettent une identification au niveau de l'espèce, avec le même processus de certification et validation des données que pour les écoutes au sol (max. 10 % d'animaux non identifiés, répertoriés comme Chiroptère *sp.*).

A l'issue de l'identification acoustique, nous fournirons une liste d'espèces présentes avec un niveau d'activité associé. L'activité sera analysée pour toutes les espèces enregistrées.



DREAL Normandie - MTE
Fécamp Grand Large

FICHE PROTOCOLE

Suivi de la mégafaune marine – Expertises aériennes
digitales

Table des matières

Table des matières	1
1. Méthodologie	3
1.1 Objectifs des suivis aériens digitaux de la mégafaune marine.....	3
1.2 Principes du suivi.....	3
1.2.1. Description du protocole.....	3
1.2.2. Plan d'échantillonnage.....	5
1.2.3. Moyens et Matériels.....	6
2. Analyse des enregistrements (vidéo)	7
2.1 Première étape d'analyse des images : review (localisation des objets).....	7
2.2 Seconde étape d'analyse des images : identification des objets.....	7
2.3 Données collectées.....	9
3. Traitement et analyse des données	12
3.1 Compilation des données collectées et préparation aux traitements ultérieurs.....	12
3.2 Analyse et traitement des données.....	13
3.2.1. Généralités sur les analyses.....	13
3.2.2. Traitement des données.....	13
3.3 Interprétation des résultats et visualisation.....	19

Index des illustrations

Figure 1 : représentation schématique des distances et aires couvertes lors des survols aériens digitaux (Source : BioConsult SH).	4
Figure 2 : localisation des transects dans le cadre des suivis aériens digitaux de la mégafaune marine sur la zone de Fécamp Grand Large.....	5
Figure 3 : aéronef I-VICC Partenavia P68B.....	6
Figure 4 : système caméras HiDef GEN 2.5 dans son coffre de protection et câbles de connexion vers le serveur (à gauche) et aperçu de ce système sous un avion (à droite) (Source : HiDef aerial surveying).	6
Figure 5 : Fou de Bassan (à gauche) ; et Mouette tridactyle et Labbe parasite (à droite) (Source : BioConsult SH / HiDef).	8
Figure 6 : Phoque gris (à gauche) et Requin pèlerin (à droite) (Source : BioConsult SH / HiDef).	8
Figure 7 : description schématique du processus d'estimation de densité à partir des données issues des suivis aériens digitaux.....	14
Figure 8 : exemple d'une phénologie réalisée en utilisant des bootstraps sur la méthode de strip-transect pour une espèce donnée, ici le Guillemot de Troil.....	15
Figure 9 : cartes de prédiction de densité pour une espèce lors de deux périodes sur la base d'une approche DSM.....	17

Figure 10 : densités mensuelles prédites pour les alcidés dans le sud de la mer du Nord entre janvier 2017 et mai 2018 (haut) et abondances mensuelles estimées (nombre d'individus ; bas) d'après les données de la campagne LEDKOA (Virgili et al., 2018). 18

Figure 11 : exemple de comparaison du nombre d'observations effectuées à l'intérieur vs à l'extérieur de la zone d'implantation des éoliennes (notée zone d'étude sur le graphique). 19

Index des tableaux

Tableau 1 : données d'observation récoltées lors des suivis aériens digitaux de la mégafaune marine. 9

Tableau 2 : données d'effort récoltées lors des suivis aériens digitaux de la mégafaune marine. 10

Tableau 3 : structure des tables de données avant traitements statistiques (une colonne correspond à une table de la base de données). 12

1. Méthodologie

Cette fiche aborde la méthodologie de suivi de la mégafaune par les suivis aériens. Pour la mégafaune et notamment les cétacés, le suivi global regroupe plusieurs méthodes distinctes : les suivis aériens décrits sur cette fiche, les suivis nautiques repris dans la fiche 7, le suivi spécifique de l'avifaune repris dans la fiche 8 et les suivis par acoustique passive des mammifères marins détaillé dans la fiche 3.

1.1 Objectifs des suivis aériens digitaux de la mégafaune marine

Les principaux objectifs du suivi de la mégafaune marine sont de :

- **Caractériser la fréquentation du site par la mégafaune marine :**
 - Identifier les espèces présentes ;
 - Estimer la densité des principales espèces présentes dans la zone ;
Estimer la variabilité saisonnière et interannuelle des espèces.
- **Identifier les rôles fonctionnels de la zone d'étude pour la mégafaune marine :**
 - Analyser les comportements et activités des différentes espèces observées ;
 - Identifier les corridors migratoires pour les espèces migratrices ;
 - Caractériser l'utilisation des habitats identifiés dans la zone de Fécamp Grand Large.

Des campagnes d'observation visuelle par bateau et d'observation digitale par avion sont programmées pour répondre aux objectifs de l'état initial de la mégafaune marine.

Une approche *BAG (Before-After-Gradient)* est mise en place afin d'étudier de façon ample et détaillée l'état initial et fournir une base solide pour les phases suivantes du projet de développement de parc éolien dans la zone.

1.2 Principes du suivi

1.2.1. Description du protocole

Les suivis aériens digitaux de la mégafaune marine suivent des recommandations précises issues de projets de référence comme *l'Offshore Wind Farm Surveillance of Marine Megafauna (OFWSOMM)* et les travaux de (Camphuysen, Tony (A.D), Mardik (M.F), & Petersen, 2004).

Les protocoles utilisés lors des campagnes SAMM (en France, depuis 2011) et SCANS (Europe, depuis 1995), bien que réalisés avec observateurs embarqués, apportent des informations solides quant à la conception des plans d'échantillonnage en cohérence avec les ouvrages de Buckland et collègues (1993, 2001).

En ce qui concerne l'acquisition numérique, les protocoles OFWSOMM recommandent l'usage de caméras haute résolution montées sur des aéronefs stabilisés pour capturer des images d'une précision suffisante pour identifier les espèces et estimer leur densité.

Le suivi est réalisé dans un avion volant à environ **500 m d'altitude** à une **vitesse de vol importante (220 km/h)**. De part et d'autre de l'axe du transect, quatre bandes d'environ 125 m de largeur chacune seront suivies avec un espacement de 20 m entre chaque bande (**Figure 1**). **Ce sont ainsi environ 544 m de largeur qui sont suivis (272 m de chaque côté du transect).**

L'acquisition des données est réalisée grâce à quatre caméras vidéo ultra haute résolution (29 Mpix). Les images possèdent une résolution d'au moins deux centimètres à hauteur de l'eau. Lors du survol, un double enregistrement des données est réalisé directement dans l'avion sur des disques durs externes.

La position de l'avion est enregistrée en temps réel à l'aide d'un Garmin GPSMap 296 associé à plusieurs GPS, offrant une précision d'environ un mètre en latitude et longitude. Les positions sont enregistrées par intervalles d'une seconde, permettant ainsi un positionnement extrêmement précis des oiseaux et des mammifères marins localisés ultérieurement dans les enregistrements.

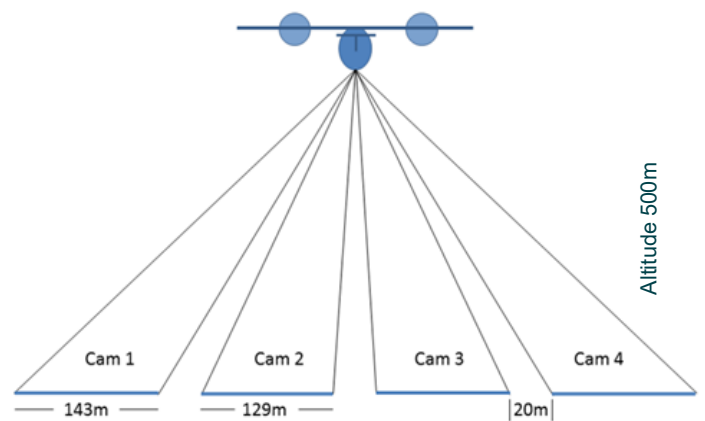


Figure 1 : représentation schématique des distances et aires couvertes lors des survols aériens digitaux (Source : BioConsult SH).

Le système HiDef GEN 2.5 permet d'adapter, au cours de la session d'expertise, l'orientation des caméras à chaque transect et en fonction de l'ensoleillement. Ces ajustements, réalisés en temps réel par un opérateur présent au sein de l'avion, permet de limiter drastiquement les phénomènes d'éblouissement sur les enregistrements (meilleure qualité des images et analyses, pas de perte de données).

La préparation des survols implique une veille météo quotidienne menée par Biotope, ainsi que par les opérateurs aériens (avec appui éventuel d'*HiDef aerial surveying*), sur la base des données météorologiques les plus fiables.

L'ensemble des vérifications nécessaires à la réalisation des survols est effectué, notamment avec l'analyse des NOTAM (*Notice to Airmen*), l'appel auprès de l'aviation civile et le contrôle de l'absence d'activité militaire ou d'autres activités limitant les opérations aériennes sur site.

Les conditions limites de mise en œuvre de la technique sont les suivants dans le cadre des suivis aériens digitaux :

- Nuages au-dessus de l'altitude de vol (500 m) ;
- Pas de précipitation et absence de brouillard ;
- Vent : inférieur ou égal à 3 Beaufort ;
- État de la mer : mer calme à peu agitée (état de mer 3) ;
- Créneau : pas avant 1h30 après le lever du jour et pas après 1h30 avant le coucher du soleil, avec une vigilance particulière lors des expertises en milieu de journée (phénomènes d'éblouissement).

Notes : les conditions de mise en œuvre des suivis aériens digitaux haute altitude peuvent être plus défavorables que ceux des suivis visuels par bateau et avion. Cependant, les conditions de mises en œuvre optimales sont respectées.

1.2.2. Plan d'échantillonnage

Le plan d'échantillonnage est présenté dans la **Figure 2**. **Le plan d'échantillonnage proposé assure une couverture minimale de 10 % pour la zone éloignée.** Ce plan garanti l'obtention de résultats statistiquement exploitables et extrapolables dans le cadre d'une analyse BAG. Ils ont été élaborés sous le logiciel R avec le package Distance, développé par l'Université de Saint Andrews (Écosse). Il s'agit également des plans d'échantillonnage classiquement mis en œuvre pour les expertises aériennes digitales haute altitude avec la technologie HiDef sur les parcs éoliens en mer et aires marines protégées en France.

Pour les campagnes aériennes digitales, une zone tampon de 20 km de rayon autour de la zone de développement Fécamp Grand Large a été définie ; l'aire d'étude ainsi obtenue couvre environ 4 148 km².

Les transects cumulent une longueur de 853 km (949 km avec les inter-transects). **La largeur de collecte de données est de 540 m environ. Les 17 transects proposés sont espacés de 5 km, ce qui permet de couvrir plus de 10 % de la surface totale de la zone éloignée** (environ 11 %). Les transects sont orientés de façon perpendiculaire au trait de côte et à la bathymétrie, permettant de maximiser la détection de phénomène de gradients en fonction de la distance à la côte ou de la profondeur des fonds marins. De plus, dans un souci d'homogénéité des expertises à une plus large échelle spatiale, le design des transects a été pensé dans la continuité des transects parcourus sur le parc éolien en mer de Fécamp.

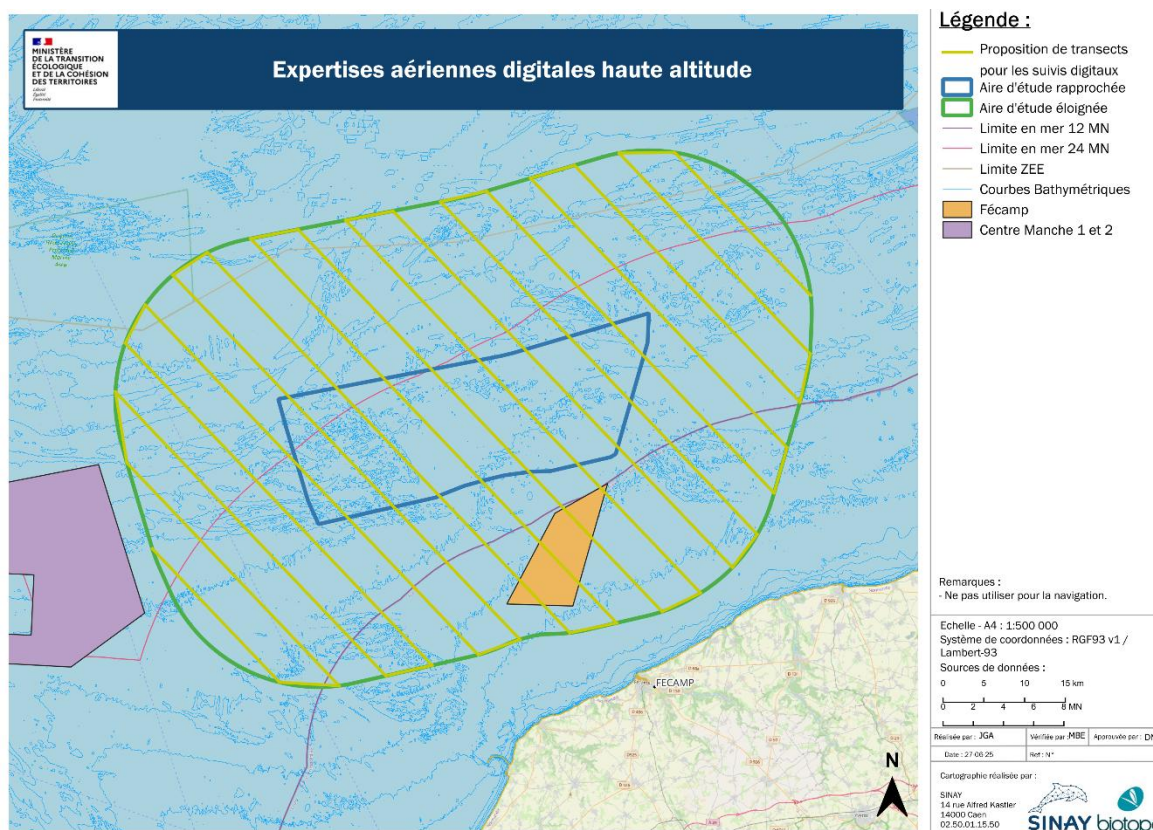


Figure 2 : localisation des transects dans le cadre des suivis aériens digitaux de la mégafaune marine sur la zone de Fécamp Grand Large.

Les campagnes aériennes digitales sont mensuelles soit 12 campagnes par an. Elles débuteront en juillet 2025 et dureront deux années. Il est prévu que les campagnes aériennes durent une journée. Cette fréquence d'échantillonnage et sa durée permettent d'appréhender les variabilités saisonnières et interannuelle.

1.2.3. Moyens et Matériels

1.2.3.1. Moyens aériens

Les avions (Figure 3) utilisés pour les campagnes aériennes digitales sont des aéronefs bimoteurs et équipés d'une trappe dédiée à l'accueil du système d'acquisition digitale doté d'un système caméra HiDef GEN 2.5 permettant l'enregistrement de vidéos haute définition à une vitesse élevée (220km/h). Ils ont une autonomie suffisante pour couvrir environ 900 km de transects en une seule journée, permettant une collecte continue des données. Chaque avion est équipé d'un système de positionnement GPS permettant d'acquérir la position de l'avion toutes les secondes au minimum.



Figure 3 : aéronef I-VICC Partenavia P68B.

1.2.3.2. Moyens humains

L'équipe embarquée est composée d'un pilote et d'un technicien en charge du système d'acquisition digitale.

1.2.3.3. Matériel de mesure sur le terrain

L'avion est équipé d'un GPS de positionnement satellitaire, d'un système de quatre caméras vidéo à haute résolution. Les caméras sont montées sur un support offrant une résolution d'au minimum deux centimètres sur l'ensemble de la fauchée, un coffre équipé d'un serveur haute performance, de disque SSD, de GPS et d'un système d'enregistrement AIS ; et d'un ordinateur associé au coffre afin de piloter le système de caméras (Figure 4).



Figure 4 : système caméras HiDef GEN 2.5 dans son coffre de protection et câbles de connexion vers le serveur (à gauche) et aperçu de ce système sous un avion (à droite) (Source : HiDef aerial surveying).

2. Analyse des enregistrements (vidéo)

Les enregistrements collectés font l'objet de deux étapes d'analyse, menées en partenariat entre Biotope et BioConsult SH :

- **La première étape de « Review »** correspond au repérage des objets et à la localisation des objets sur les enregistrements vidéo, en utilisant un logiciel spécialement conçu et un contrôle par une équipe dédiée ;
- **La seconde étape d'identification des objets** correspond à la détermination de l'espèce, des informations sur les comportements (en vol, posés) et à la prise de mesures.

2.1 Première étape d'analyse des images : review (localisation des objets)

Une fois les données rapatriées au bureau, les données vidéo brutes sont converties dans un format permettant une analyse plus poussée sur les postes informatiques dédiés à l'analyse des images. Les **images du survol sont analysées en partie via un logiciel de traitement basé sur l'intelligence artificielle** et développé par BioConsult SH pour le traitement des données issues des expertises aériennes digitales vidéo du système HiDef.

Ce logiciel, exploité de façon régulière depuis 2022, fait suite à un long processus de développement et de validation. En effet, le logiciel de « review » automatisé n'a été systématisé qu'une fois sa capacité à égaler l'analyse humaine pleinement validée (nombreux tests effectués par BioConsult SH et HiDef *aerial surveying*).

Bien qu'il en soit capable pour de nombreuses espèces, ce logiciel n'a pas vocation, pour le moment, à identifier des objets mais simplement de pointer les images nécessitant une analyse plus approfondie, ces informations spatiales fournissant un enregistrement précis de la position d'un individu (ou d'un objet).

Cette étape consiste à créer un point sur l'objet dans le logiciel d'analyse des images, permettant ainsi d'obtenir un ensemble de données attributaires (localisation en latitude, longitude, type d'objet : bateau, déchet, oiseau, mammifère marin, etc.).

Conformément à ses procédures habituelles d'assurance qualité, **un échantillon de 20% des enregistrements fait l'objet d'une seconde analyse de review par un opérateur (contrôle humain)**. Aucune information sur la première analyse n'est communiquée à cet opérateur. Les résultats des deux analyses sur cet échantillon de 20 % des enregistrements sont ensuite comparés. Une marge d'erreur maximale de 10% est autorisée dans le cadre de la politique d'assurance qualité d'HiDef *aerial surveying*. En cas de non-respect de cette marge d'erreur maximale de 10%, les analyses sont reprises par un opérateur.

Les objets ne sont marqués que s'ils traversent une ligne de référence (nommée « ligne rouge »). Cette ligne rouge matérialise sur la séquence d'enregistrement vidéo la largeur réelle de 125 m de chaque caméra. En excluant les objets qui ne traversent pas cette ligne, les biais d'abondance éventuels, dus à des mouvements d'oiseaux, sont ainsi évités.

2.2 Seconde étape d'analyse des images : identification des objets

La **seconde étape consiste en l'identification des objets** préalablement repérés au cours de la 1^{ère} étape : détermination de l'espèce, informations sur les comportements (en vol, posés), prise de mesures. Cette **étape est réalisée par des experts en mégafaune marine expérimentés**. Elle sera **menée conjointement par Biotope et BioConsult** (à hauteur de 75% par Biotope et 25% par

BioConsult SH).

Les images pointées comme nécessitant une analyse plus poussée sont transmises à des experts naturalistes, formés à l'analyse d'images vidéo haute définition d'oiseaux, de mammifères marins et d'autres vertébrés et disposant de plusieurs années d'expérience. Les images peuvent être analysées à l'aide d'un logiciel pour améliorer leur aspect (luminosité, contraste, etc.) et faciliter l'identification de l'objet.

Dans le cadre de la présente mission, les experts naturalistes identifieront si possible les individus à l'espèce et enregistreront toute autre information disponible (comportement, direction du vol ou de la nage, sexe, âge, etc.) (**Figure 5** et **Figure 6**).

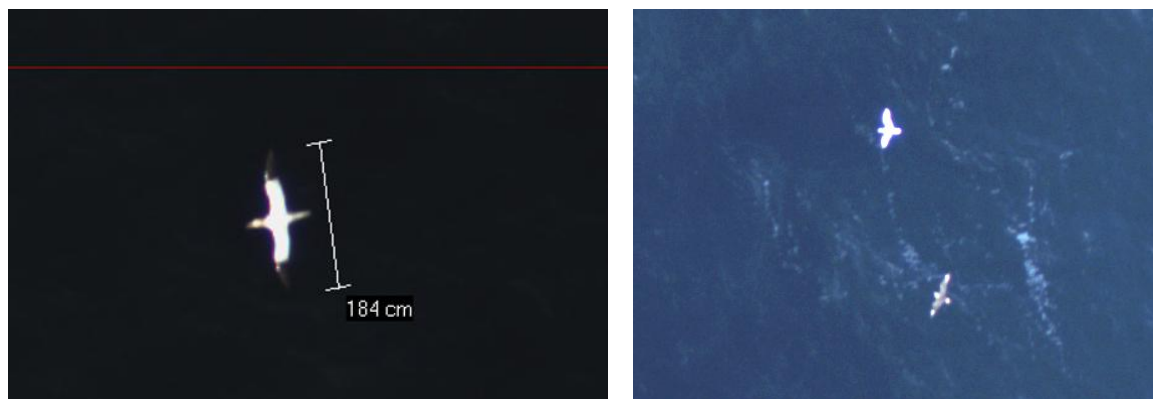


Figure 5 : Fou de Bassan (à gauche) ; et Mouette tridactyle et Labbe parasite (à droite) (Source : BioConsult SH / HiDef).

Pour tous les mammifères marins et autres pélagiques identifiés, leur comportement est également noté, qu'il ait lieu à la surface ou en subsurface, ainsi que la direction de déplacement entre la première et la dernière image dans laquelle ils apparaissent.

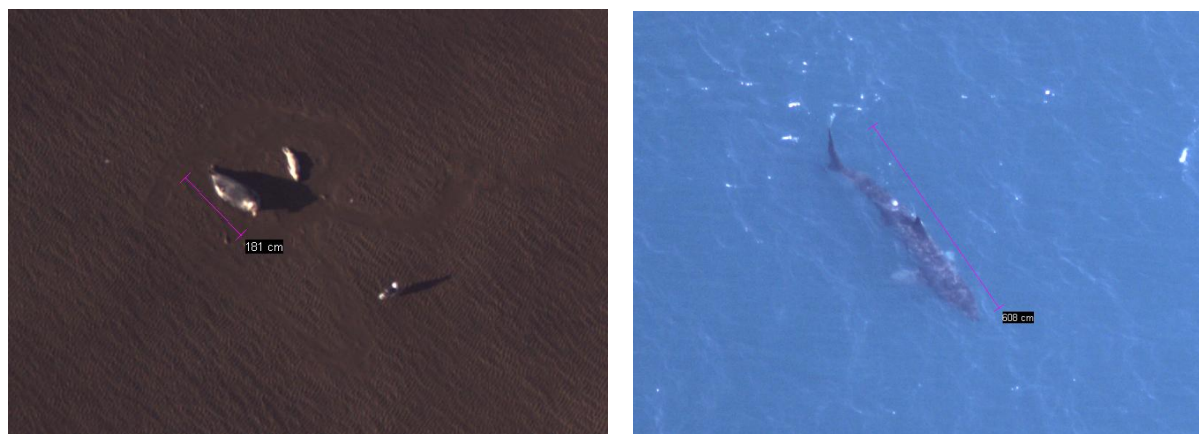


Figure 6 : Phoque gris (à gauche) et Requin pélerin (à droite) (Source : BioConsult SH / HiDef).

Un échantillon de 20% d'images sélectionnées au hasard est identifié indépendamment par un groupe séparé d'experts, avec pour seuil d'acceptabilité qu'il n'y ait pas plus de 10% de désaccord avec la première identification d'oiseaux et de mammifères marins. Les résultats de ces comparaisons sont ensuite analysés et toute anomalie est examinée par un autre groupe d'experts ornithologues.

En cas de divergences significatives (c'est-à-dire plus de 10% de désaccord pour l'ensemble de l'audit), les images sont ensuite réexaminées par un troisième ornithologue qui joue le rôle d'arbitre dans le processus pour décider de l'identification retenue. Bien que nous utilisions des outils d'aide à l'identification des objets, nous n'automatisons pas l'identification des espèces.

Toutes les données sont géoréférencées et compilées dans une base de données unique. Les fichiers

de données géoréférencés (SIG) pour les observations et le survol sont fournis sous format ArcGIS shapefile, suivant les spécifications du maître d'ouvrage.

Les techniques utilisant la vidéo numérique offrent des taux de détection plus élevés que les techniques par photo numérique. En effet, il est plus facile d'identifier des objets lorsqu'il existe plusieurs images du même objet, qui apparaissent statiques dans l'environnement visuel des vagues.

Pour la mégafoaune marine, la présence de plusieurs prises de vues augmente également la probabilité que ces animaux apparaissent plus près de la surface ou brisent la surface au cours de l'une de ces prises de vue ; tandis que sur les images fixes, il existe au maximum une seule image dans laquelle l'animal peut être présent (même si une image est prise toutes les 2 à 3 secondes). Cela implique que certains individus peuvent ne pas être vus parce qu'ils ne sont pas à la surface (ou à cause de l'état de mer, des reflets du soleil, etc.).

L'utilisation de la vidéo numérique permet de disposer jusqu'à 8 images distinctes de chaque objet identifié, maximisant ainsi les chances d'aboutir à leur identification.

2.3 Données collectées

Les informations collectées concernent la mégafoaune marine (mammifères marins, oiseaux, requins, grands poissons pélagiques et tortues marines), mais également les objets liés aux activités humaines (bateaux, bouées, casiers, etc.). Les informations suivantes sont notées dans le **Tableau 1** et le **Tableau 2**.

Tableau 1 : données d'observation récoltées lors des suivis aériens digitaux de la mégafoaune marine.

Informations	Description
Coordonnées géographiques de l'objet (Lat/Lon en WGS84)	Donnée complétée de manière automatisée
Transect ID	Identifiant unique du transect (donnée complétée de manière automatisée)
Survey ID	Identifiant de la campagne
Flight ID	Identifiant du vol
Plane	Identifiant de l'avion utilisé
Date	Donnée complétée de manière automatisée (au format AAAA-MM-JJ)
Heure	Donnée complétée de manière automatisée
Altitude	Altitude en m
Vitesse	Vitesse en m/s
Numéro de la caméra	Donnée complétée de manière automatisée
Nb images	Nombre total d'images réalisées sur le transect
Catégorie de l'objet	Oiseaux, mammifères marins, poissons, bateau de pêche, autre bateau, déchet flottant, etc.
Famille	Exemple : plongeurs, grands laridés, grands alcidés, cétacés, phocidés, etc.
Certitude de la détermination de la famille	Possible, probable ou certain
Espèce	Le nom anglais de l'espèce ou du taxon identifié

Informations	Description
Certitude de la détermination de l'espèce	Possible, probable ou certain
Comportement	Le comportement de l'oiseau (en vol et quand quelle direction, posé, sur un reposoir) ou du mammifère marin (quel comportement ?)
Alimentation	L'activité de pêche de l'oiseau : en recherche alimentaire ou non
Age	L'âge de l'individu observé si possible : juvénile, immature, adulte ou inconnu
Sexe	Le sexe de l'individu : mâle, femelle, inconnu
Comportements alimentaires	Description détaillée du comportement observé (s'alimentant de restes de pêche, plongeant, cleptoparasitisme, etc.)
Note	Remarques complémentaires

Tableau 2 : données d'effort récoltées lors des suivis aériens digitaux de la mégafoaune marine.

Information	Description			
	Note	Description	Aspect de la mer	Vent (vitesse en nœuds et direction)
Etat de la mer	0	Calme	Mer lisse comme un miroir	>1
	1	Très légère brise	Quelques rides ressemblant à des écailles de poissons, mais sans aucune écume	1 à 3
	2	Légère brise	Petites vaguelettes ne déferlant pas, toujours d'apparence lisses	4 à 6
	3	Petite brise	Grandes vaguelettes. Les crêtes commencent à déferler. Ecume d'aspect vitreux. Parfois quelques moutons épars	7 à 10
	4	Jolie brise	Petites vagues devenant plus longues, moutons assez fréquents	11 à 15
	5	Bonne brise	Vagues modérées longues, moutons et éventuellement embruns	16 à 21
	Turbidité/transparence	1 - eau claire : pas de turbidité 2 - eau moyennement claire : vision sous la surface de l'eau restreinte		

Information	Description
	3 - eau turbide : impossible de voir sous la surface
Intensité d'éblouissement	0 - aucun éblouissement ou très léger (n'affectant pas la qualité de l'image) 1 - léger : couvre moins de 25% de l'image 2 - moyen : couvre moins de 50% de l'image 3 - fort : couvre plus de 50% de l'image
Clarté de l'air	0 - Inconnu 1 - Faible 2 - Moyenne 3 - Forte
Présence de glace	Exprimé en pourcentage de couverture en glace sur la photo de 0 à 10 : 0 – 0/10 1 – 1/10 2 – 2/10 Etc.
Qualité de l'image	Ok / Not ok

A l'issue de chaque session d'expertise par avion, une note succincte de réalisation est rédigée et transmise sous 15 jours après chaque mission. Elle fournit les informations sur la date, les horaires d'expertise (par transect), les conditions météorologiques, l'état de la mer et tout élément notable. Le volume de données compilées est indiqué et la complétude des enregistrements est confirmée.

3. Traitement et analyse des données

3.1 Compilation des données collectées et préparation aux traitements ultérieurs

La donnée brute issue de l'analyse de nos experts ornithologues est renseignée dans une base de données qui détaille à la fois les données d'effort de collecte de données et les résultats d'identification. Elle est constituée de trois tables :

- Les informations concernant la campagne mise en œuvre ;
- Les informations relatives aux images analysées ;
- Les informations résultant du travail d'identification des espèces.

Chaque champ de la table est renseigné avec la plus grande précision possible. Le **Tableau 3** explicite la structure des tables brutes, décrites précédemment, avant traitements statistiques.

Tableau 3 : structure des tables de données avant traitements statistiques (une colonne correspond à une table de la base de données).

Informations concernant la campagne	Informations concernant les images issues de l'enregistrement vidéo	Informations concernant les objets identifiés
Numéro du vol	Identifiant unique de l'image	Identifiant unique de l'image
Type d'avion	Numéro de la caméra	Latitude de l'objet
Système utilisé	Numéro du transect	Longitude de l'objet
Date	Date	Structure abiotique (bateau, bouée etc.)
Altitude	Heure-Minute-Seconde	Observation abiotique (pollution, etc.)
Largeur de bande	Latitude de l'image	Observation espèce animale
Vitesse	Longitude de l'image	Nom anglais
Heure de début	Altitude de l'avion	Comportement
Latitude de départ	Superficie de l'empreinte de l'image	Activité
Longitude de départ	Eblouissement	Appartenance à un groupe
Heure de fin	Etat de la mer	Famille de groupe
Latitude de fin	Turbidité	Association
Longitude de fin	Clarté de l'air	Direction de vol
Référence géographique	Qualité de l'air	Submersion
Nombre d'images relevées		Classe d'âge
		Sexe
		Longueur
		Tranche de hauteur de vol
		Note

Une table descriptive des données précises de vol pourra également être produite. Elle permet de suivre la progression de l'avion au cours des transects et renseigne ce que l'opérateur caméra note lors d'un survol, notamment les variations de conditions météorologiques ou les réglages adaptifs résultant d'un changement de luminosité.

3.2 Analyse et traitement des données

3.2.1. Généralités sur les analyses

L'ensemble des données collectées est utilisé pour réaliser des analyses approfondies d'indicateurs biologiques.

Ces analyses couvrent une variété de groupes fauniques, notamment les oiseaux marins, les mammifères marins, les grands poissons pélagiques, et les tortues marines. Les pollutions et les activités anthropiques seront également étudiées.

Les données seront analysées à l'aide de techniques statistiques pour évaluer les indicateurs écologiques définis dans les objectifs de l'étude afin de réaliser l'état initial des populations.

- **Estimation de l'abondance relative** : Indice Kilométrique d'Abondance (IKA), soit le nombre d'individus par kilomètre de transect parcouru ;
- **Estimation des densités** : estimation via *strip-transect* (en nombre d'individus par km²) ;
- **Répartition spatiale des observations brutes** : représentation de toutes les observations par un point situé à la position où l'observation a eu lieu. La taille des points est fonction du nombre d'individus observés ;
- **Répartition spatiale en densité par maille** : les densités (en nombre d'individus par km²) sont moyennées par unité d'espace, discrétisé en pixel. La taille du pixel dépend de la distance inter-transects ;
- **Modèles d'habitats** : si les données le permettent, modèle de type « Modèle additif généralisé » (GAM) afin d'estimer des relations statistiques non-linéaires entre la variable à expliquer (effectifs et distributions d'une espèce) et les variables écologiques explicatives ;
- **Analyse comportementale** : pourcentages des individus posés sur l'eau vs en vol, description des oiseaux à proximité de bateaux de pêche, attraction ou répulsion par les bateaux, etc.

Tous les résultats des analyses sont présentés avec une perspective temporelle, mettant en évidence les variations saisonnières et interannuelles à l'aide de graphiques et de cartographies.

3.2.2. Traitement des données

Les données collectées font l'objet d'une synthèse par espèce ou par groupe d'espèces des observations sur les séquences analysées. Dans le cas où les identifications ne sont pas possibles pour une proportion significative de spécimens, les analyses sont réalisées à l'échelle du groupe d'espèces. Afin de simplifier l'interprétation des analyses, des regroupements d'espèces pertinents peuvent être intégrés.

La technique d'estimation se base sur la longueur totale des transects parcourus (c'est-à-dire l'effort réel), plutôt que sur le nombre de transects, pour limiter les biais et fournir de meilleures estimations. Ceci est particulièrement intéressant dans le cas où les transects sont de longueur très inégale.

L'exploitation des données conduit à des résultats de trois types :

- Description de la phénologie de l'abondance des différentes espèces ou groupes d'espèces ;
- Description de la répartition spatiale des différentes espèces ou groupes d'espèces ;
- Description des comportements observés.

3.2.2.1. Description de la phénologie (distribution temporelle)

La distribution temporelle est mesurée en estimant la densité d'individus dans la zone d'étude par mois ou saison. La densité correspond au nombre d'individus observés sur une surface donnée et cette surface est dépendante de l'effort de prospection (nombre de kilomètres parcourus et nombre d'observateurs).

En multipliant la densité par la surface de la zone d'étude, il est alors possible d'obtenir une estimation de l'abondance des espèces.

- **Estimation par strip transect**

Avec les données issues des suivis aériens digitaux, c'est la méthode du *strip-transect*¹ qui est utilisée pour estimer la densité et l'abondance (**Figure 7**). C'est une méthode d'estimation de densité qui considère que les observateurs ont la même probabilité de détecter un animal jusqu'à une distance définie. Cette probabilité étant de 1. Ainsi, tout animal présent dans le champ de vision des caméras de l'avion (272 m) de part et d'autre de la ligne de transect est intégré dans les estimations de densités.

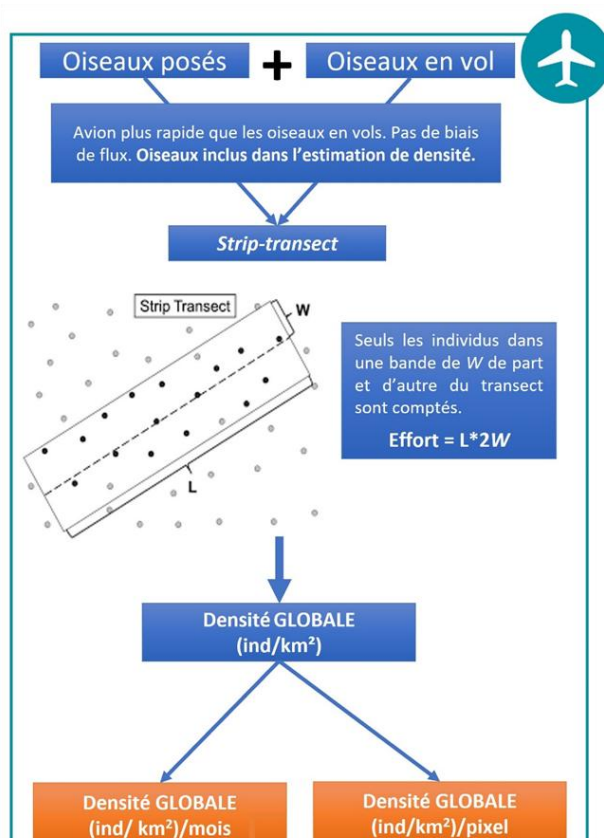


Figure 7 : description schématique du processus d'estimation de densité à partir des données issues des suivis aériens digitaux.

¹ La méthode du *strip-transect* s'appuie sur l'hypothèse d'une probabilité de détection parfaite dans une bande de part et d'autre de la ligne de transect.

La densité absolue peut être obtenue très simplement à partir des IKA, une fois la portée efficace de détection connue (Exemple : si la portée efficace de détection est de 272 m = 0,272 km et que les deux bords du transect sont prospectés, un IKA de 1 individu/km correspond à $1 / (2 * 0,272) = 1,84$ individus/km²).

- **Estimation par bootstrap**

Pour les espèces avec plus de 20 observations, les densités sont évaluées à l'aide d'un processus de *bootstrap* qui permet de tenir compte des incertitudes d'échantillonnage. Sur les graphiques de phénologie représentant une espèce et une méthodologie d'analyse, la valeur moyenne issue de ces *bootstraps*, ainsi que l'intervalle de confiance issu des *bootstraps* sont représentés (Figure 8).

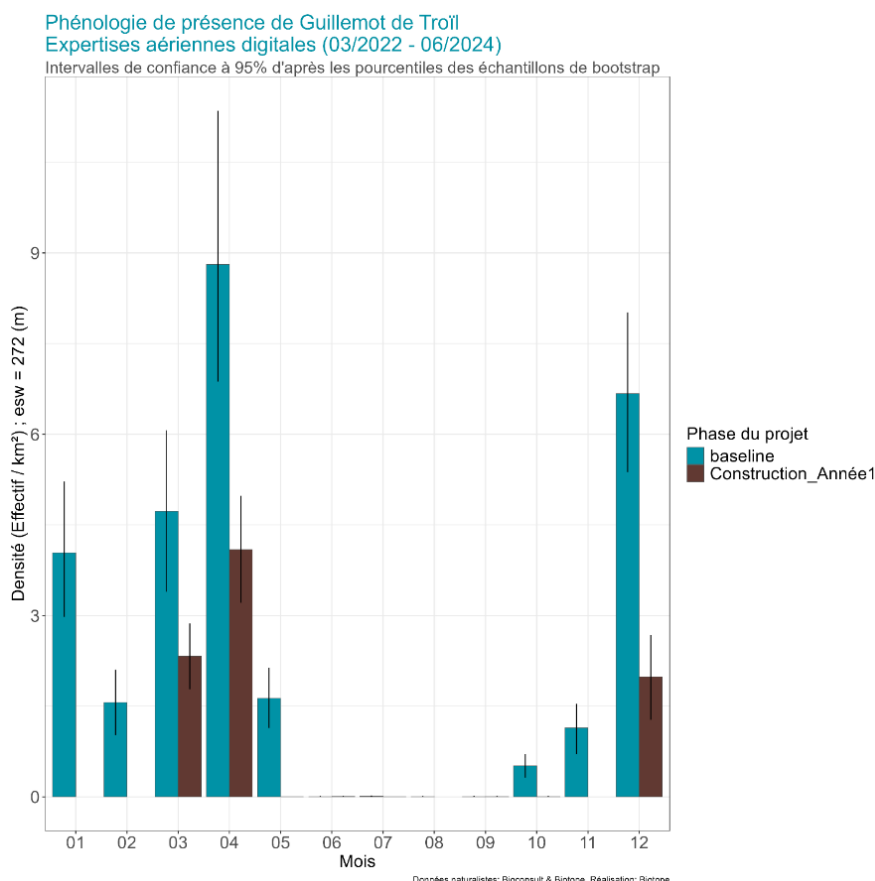


Figure 8 : exemple d'une phénologie réalisée en utilisant des bootstraps sur la méthode de strip-transect pour une espèce donnée, ici le Guillemot de Troïl.

3.2.2.2. Répartition spatiale des observations

Une figure est produite pour les espèces les plus fréquentes ou par groupe d'espèces. La répartition spatiale sera présentée pour chaque espèce ou groupe d'espèce sur des cartes de deux types :

- Une carte des observations brutes (par saison) ;
- Et une carte de densité par maille (par saison).

Une méthode d'analyse des données par des modèles d'habitats préférentiels en lien avec les paramètres environnementaux de la zone est également proposée pour les espèces où suffisamment de données seront récoltées.

Une figure est produite afin de comparer des effectifs à l'intérieur par rapport à l'extérieur de l'aire d'étude rapprochée.

3.2.2.2.1 Cartes des observations brutes

Ces cartes représentent toutes les observations par un point situé à la position où l'observation a eu lieu. La taille des points est fonction du nombre d'individus observés. Pour éviter que quelques rares observations d'un grand nombre d'individus rendent illisible la plus grande majorité des données, une taille maximale de point a été retenue pour certaines cartes où les effectifs sont particulièrement variables.

Cette taille correspond au 95ème percentile du nombre d'individus par observation (notée X), c'est à dire que pour 95% des observations, le nombre d'individus observés est inférieur à cette taille (si X = 40 individus, pour 95% des observations, le nombre d'individus observé est inférieur à 40 individus et donc pour 5% des observations, le nombre d'individus observés est supérieur ou égal à 40). Les 5% d'observations restantes sont représentées par des points de la même taille, étiquetées sur la légende sous le nom « X+ ».

3.2.2.2.2 Cartes de densité par maille

Des cartes de densité par maille seront réalisées pour les données issues des campagnes nautiques et aériennes digitales.

Pour chaque espèce ou groupe d'espèces, les densités (en nombre d'individus par km²) sont moyennées par saison et unité d'espace. Dans ces figures, l'espace est discrétisé en pixel de 10 km² pour les campagnes aériennes digitales. La taille du pixel dépend principalement de la distance inter-transects est contrainte par la volonté de ne pas avoir de pixel sans effort.

Dans ces conditions, aucune interpolation spatiale n'est réalisée pour déterminer la densité moyenne au sein d'un pixel. Par souci de lisibilité, les transects n'ont pas été représentés mais le trait de côte apparaît sur chaque grille.

Pour le calcul de la densité, l'hypothèse est qu'il y a une détection parfaite des animaux sur la largeur de bande de part et d'autre de la ligne de transect. La largeur de bande efficace ainsi que la longueur de transect au sein de chaque pixel et pour chaque jour où un suivi est réalisé nous permet de calculer l'effort surfacique qui est la surface échantillonnée à l'échelle du pixel et du suivi.

La densité est ensuite calculée à l'échelle du pixel et du suivi en divisant le nombre d'individus de chaque espèce ou groupe d'espèces observés par l'effort surfacique correspondant. Puis la densité est moyennée par saison. De plus, il est important de noter que l'échelle de densité est logarithmique et différente pour chaque figure afin de visualiser au mieux les variations de densité dans l'espace (les pixels) et le temps (les saisons).

3.2.2.2.3 Modèle de densités de surface pour les espèces avec des effectifs élevés (modèle d'habitats)

Conformément à la demande du CCTP, nous proposons une méthode d'analyse des données par des modèles d'habitats préférentiels en lien avec les paramètres environnementaux de la zone, afin de spatialiser et de déterminer des variables écologiques explicatives et de préciser les effectifs et les distributions des espèces et groupes d'espèces d'oiseaux marins et de mammifères marins.

Les expertises aériennes ont l'avantage de pouvoir couvrir de larges zones dans un fenêtre temporelle relativement étroite et permettent de produire une photographie de la distribution des oiseaux. Dans leur format brut, les occurrences relevées sont donc des données de présence/absence sur les transects parcourus mais ne renseignent pas sur la densité des animaux en dehors des transects.

Il faut avoir recours à des méthodes d'interpolation ou des méthodes prédictives pour estimer la probabilité de présence des espèces sur les zones non échantillonnées.

La modélisation de la distribution peut être envisagée selon deux méthodes de modélisation d'habitats, avec des degrés d'exigence de données variables :

- **Modélisation d'habitats préférentiels** (Modèle additif généralisé, GAMs) : modélisation qui utilise à la fois les données de présence et d'absence, les données d'effort (qualitatives et quantitatives), et des covariables environnementales pour prédire la distribution des habitats préférentiels où les espèces sont observées.
- **Modélisation des habitats favorables** (MinxEnt, MaxEnt) : modélisation qui produit une carte de distribution potentielle de l'espèce en s'appuyant sur les données de présence/absence ou présence uniquement et des covariables environnementales fournies au modèle.

Si les données le permettent, d'un type de modèle particulier, appelé « *density surface model* » (DSM) est utilisé. Un DSM est un modèle qui permet de modéliser la distribution spatiale de l'abondance. Dans le cas présent, il s'agirait d'un modèle de type GAM utilisé afin d'estimer des relations statistiques non-linéaires entre la variable à expliquer et les variables explicatives (**Figure 9**).

Ces modèles sont adaptés pour décrire les processus naturels parfois complexes du milieu marin (Miller et al., 2013). Les variables environnementales peuvent être statiques (bathymétrie, distance à la côte, distance aux colonies, etc.) ou dynamiques (température de l'eau, production primaire, distribution des proies, etc.).

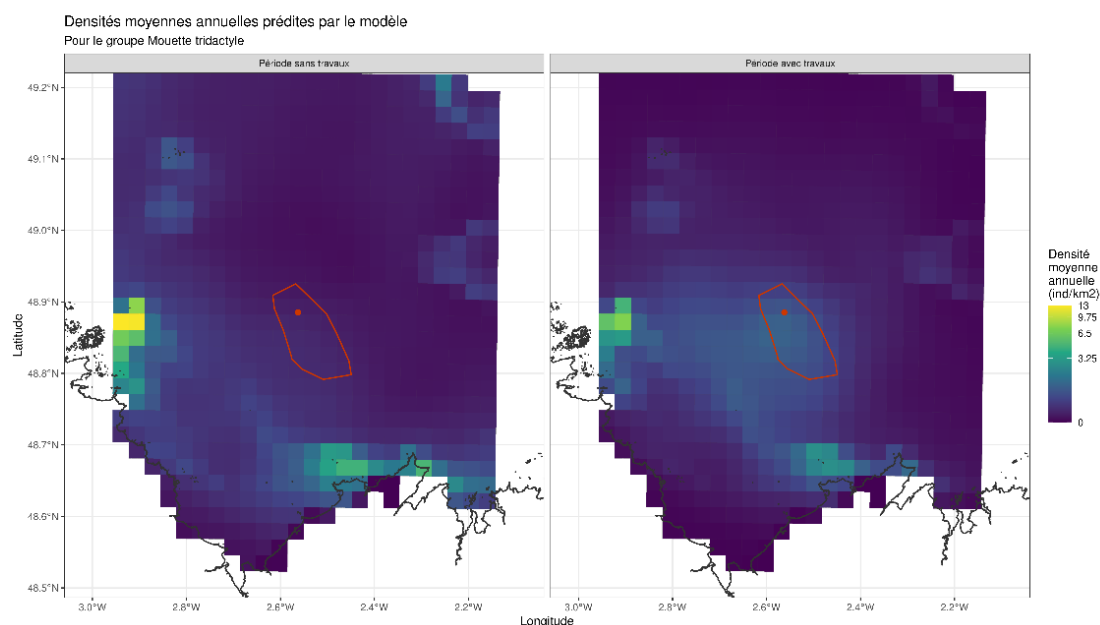


Figure 9 : cartes de prédiction de densité pour une espèce lors de deux périodes sur la base d'une approche DSM.

Un inconvénient de ce type de modèle est leur relative complexité qui requiert une quantité de données importante. Cette approche ne peut donc être robustement utilisée que pour les espèces les plus observées. Une procédure de sélection de modèles utilisant l'AIC (*Akaike Information Criterion*) est effectuée afin de déterminer quel est le modèle le plus parcimonieux (c'est à dire celui présentant le meilleur compromis entre la quantité et l'intérêt des paramètres estimés et des covariables étudiées).

Les covariables environnementales généralement testées et proposées sont la bathymétrie (moyenne et gradient bathymétriques, contrainte environnementale liée à la distance à la côte), la température de surface (moyenne et gradient de température, indicateur de l'agrégation de proies) et la concentration moyenne en chlorophylle *a* (indicateur de l'abondance en proies).

Des modèles d'habitats ont été développées notamment dans le cadre des études de levée des risques du projet éolien en mer de Dunkerque (Virgili et al., 2018) (**Figure 10**).

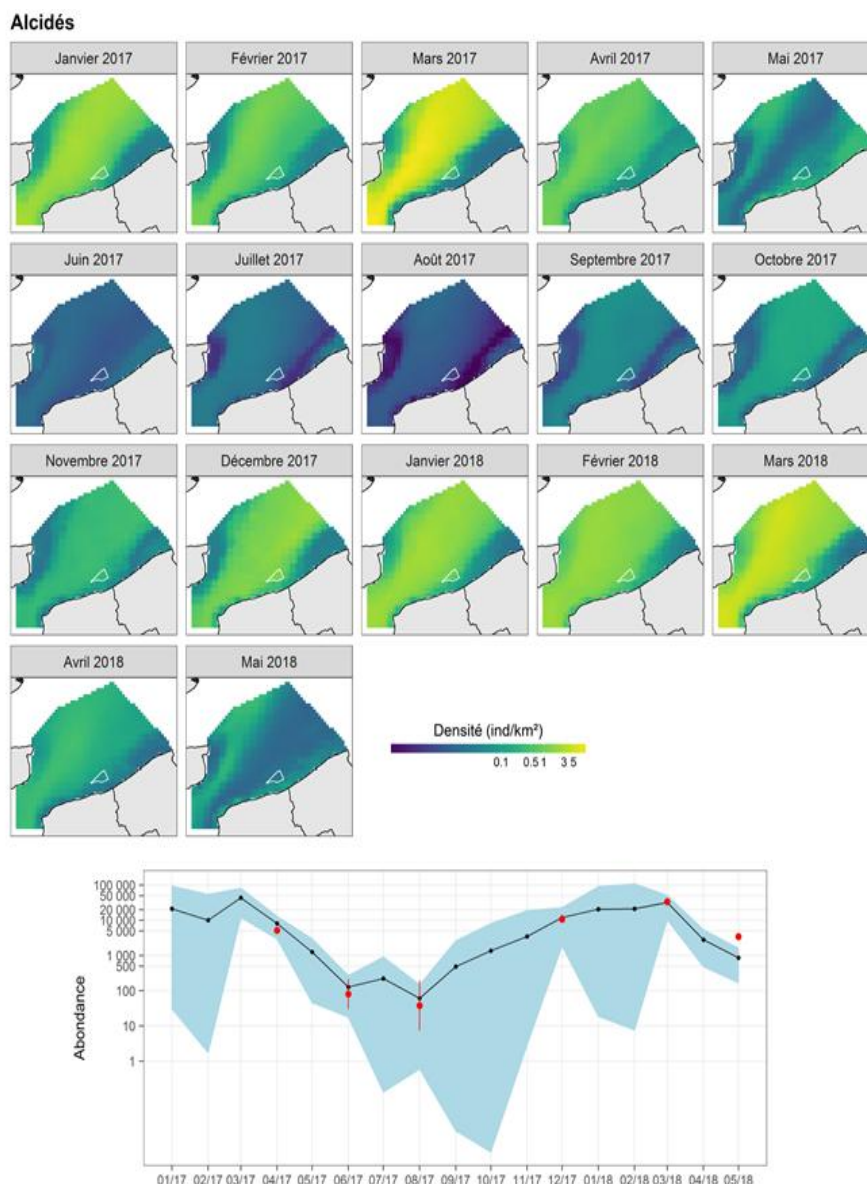


Figure 10 : densités mensuelles prédites pour les alcidés dans le sud de la mer du Nord entre janvier 2017 et mai 2018 (haut) et abondances mensuelles estimées (nombre d'individus ; bas) d'après les données de la campagne LEDKOA (Virgili et al., 2018).

3.2.2.2.4 Comparaison des effectifs à l'intérieur par rapport à l'extérieur

Afin de fournir un aperçu synthétique et comparatif de l'abondance des différentes espèces à l'intérieur et à l'extérieur de la zone d'implantation des futures éoliennes, un histogramme des effectifs pour les observations et pour les individus peut être réalisé (**Figure 11**).

De plus, les effectifs attendus compte-tenu de la répartition de l'effort de prospection et en supposant que la distribution des observations est parfaitement aléatoire et uniforme dans l'espace est calculé. Les effectifs attendus sont représentés par un point noir (effectif moyen) et une estimation de l'incertitude associée à ces effectifs est fournie par les barres d'erreur (intervalles de confiance à 95%) sur le diagramme des observations.

Cette référence est à comparer avec la barre bleue des effectifs à l'intérieur de la zone d'implantation pour évaluer l'éventuelle sur-représentation ou sous-représentation des différentes espèces au sein de ce périmètre par rapport au reste de la zone d'étude.

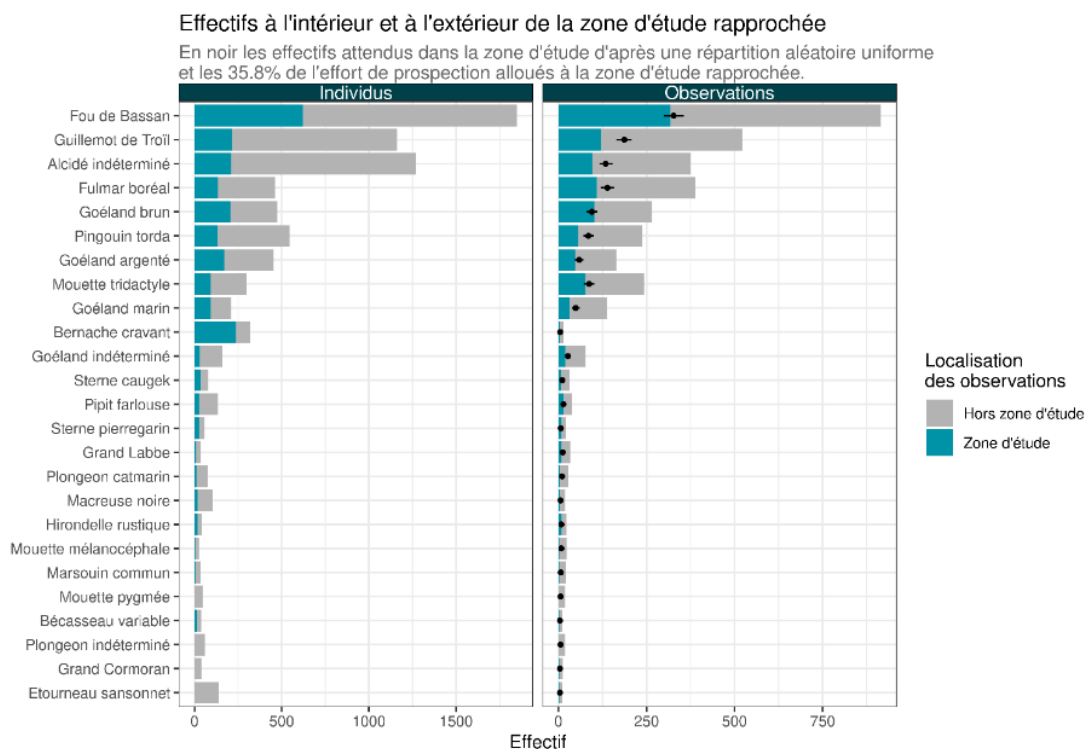


Figure 11 : exemple de comparaison du nombre d'observations effectuées à l'intérieur vs à l'extérieur de la zone d'implantation des éoliennes (notée zone d'étude sur le graphique).

3.2.2.3. Analyse des comportements de l'avifaune

La description des comportements repose sur l'analyse du comportement des individus (en vol ou posé). Sur la base des informations collectées en mer, les pourcentages des individus posés sur l'eau vs en vol sont comparés par espèce.

3.3 Interprétation des résultats et visualisation

Les résultats obtenus sont discutés à la lumière de l'écologie connue des espèces étudiées (fréquentation, migration, comportement...) et remis en contexte à travers des retours d'expérience disponibles.

Les résultats sont interprétés et discutés au regard des connaissances existantes et disponibles à l'échelle de la zone, issues des recensements précédents mais également de la littérature scientifique. Les résultats sont sujets à validation de la part des experts en mégafaune marine, ce qui permettra d'éviter des résultats incohérents au niveau écologique.



DREAL Normandie - MTE

Fécamp Grand Large

FICHE PROTOCOLE

Suivi de la mégafaune marine – Expertises nautiques



Table des matières

Table des matières	1
1. Méthodologie	3
1.1 Objectifs des suivis nautiques de la mégafaune marine	3
1.2 Principes du suivi	3
1.2.1. Description du protocole.....	3
1.2.2. Plan d'échantillonnage	3
1.2.3. Moyens et Matériels	4
1.2.4. Déploiement opérationnel	5
1.3 Données collectées.....	7
2. Traitements et analyses des données	10
2.1 Analyse et traitement des données	10
2.1.1. Généralités sur les analyses	10
2.1.2. Traitement des données	10
2.2 Interprétation des résultats et visualisation.....	18

Index des illustrations

Figure 1 : localisation des transects dans le cadre des suivis nautiques (en rouge) de la mégafaune marine sur la zone de Fécamp Grand Large.....	4
Figure 2 : navire VDC Lynx de la société NORMANDY OFFSHORE SERVICES.	5
Figure 3 : positionnement de l'équipe d'observation sur le navire (à gauche) et opérateur en cours de d'observation (à droite).....	6
Figure 4 : histogramme de la densité d'individus ou d'observation du fou de Bassan (posés et en vol).	12
Figure 5 : exemple d'histogrammes présentant la phénologie d'une espèce en utilisant l'IKA comme indice d'abondance.....	13
Figure 6 : exemple de séries temporelles de phénologie pour le groupe d'espèces des plongeurs (les espèces sont considérées de façon distincte). L'IKA est présenté ici avec son intervalle de confiance à 95%.	14
Figure 7 : cartes de prédiction de densité pour une espèce lors de deux périodes sur la base d'une approche DSM.....	16
Figure 8 : densités mensuelles prédites pour les alcidés dans le sud de la mer du Nord entre janvier 2017 et mai 2018 (haut) et abondances mensuelles estimées (nombre d'individus ; bas) d'après les données de la campagne LEDKOA (Virgili et al., 2018).	16
Figure 9 : exemple de comparaison du nombre d'observations effectuées à l'intérieur vs à l'extérieur de la zone d'implantation des éoliennes (notée zone d'étude sur le graphique).	17
Figure 10 : exemple d'histogramme des altitudes de vol pour la mouette mélanocéphale.	18

Index des tableaux

Tableau 1 : données d'observation récoltées lors des suivis nautiques de la mégafaune marine. 7

Tableau 2 : données d'effort récoltées lors des suivis nautiques de la mégafaune marine. 8

1. Méthodologie

Cette fiche aborde la méthodologie de suivi de la mégafaune par les suivis nautiques. Pour la mégafaune et notamment les cétacés, le suivi global regroupe plusieurs méthodes distinctes : les suivis nautiques décrits sur cette fiche, les suivis aériens repris dans la fiche 6, le suivi spécifique de l'avifaune repris dans la fiche 8 et les suivis par acoustique passive des mammifères marins détaillé dans la fiche 3.

1.1 Objectifs des suivis nautiques de la mégafaune marine

Les principaux objectifs du suivi de la mégafaune marine sont de :

- **Caractériser la fréquentation du site par la mégafaune marine :**
 - Identifier les espèces présentes ;
 - Estimer la densité des principales espèces présentes dans la zone ;
 - Estimer la variabilité saisonnière et interannuelle des espèces.
- **Identifier les rôles fonctionnels de la zone d'étude pour la mégafaune marine :**
 - Analyser les comportements et activités des différentes espèces observées ;
 - Identifier les corridors migratoires pour les espèces migratrices ;
 - Caractériser l'utilisation des habitats identifiés dans la zone de Fécamp Grand Large.

Une approche *BAG (Before-After-Gradient)* est mise en place afin d'étudier de façon ample et détaillée l'état initial et fournir une base solide pour les phases suivantes du projet de développement de parc éolien. Le suivi de la mégafaune marine impliquant à la fois les suivis nautiques (zone rapprochée), les suivis aériens digitaux (zone éloignée) et la télémétrie (zone éloignée), l'approche *BAG* est justifiée.

1.2 Principes du suivi

1.2.1. Description du protocole

Parmi les références scientifiques les plus reconnues, les méthodes décrites par (Camphuysen, Tony (A.D), Mardik (M.F), & Petersen, 2004) ainsi que par Buckland et co-auteurs (1993, 2001) dans leur ouvrage sur les observations en mer de mégafaune, fournissent un cadre précis pour la collecte de données. Les protocoles Pelagis (Protocole d'observation de la mégafaune marine depuis les campagnes halieutiques (MEGASCOPE, 2021)) servent également de référence pour les campagnes nautiques.

En complément, des protocoles nationaux et internationaux, tels que ceux de l'*ESAS (European Seabirds at Sea)* ou *COWRIE (Collaborative Offshore Wind Research into the Environnement)* fournissent des standards de collecte de données en mer qui garantissent la comparabilité et la rigueur scientifique des observations.

1.2.2. Plan d'échantillonnage

Le plan d'échantillonnage est présenté dans la **Figure 1**. Il assure une couverture minimale de 20 % de la zone rapprochée. Ce plan garantit l'obtention de résultats statistiquement exploitables et extrapolables dans le cadre d'une analyse *BAG*. Ils ont été élaborés sous le logiciel R avec le package Distance, développé par l'Université de Saint Andrews (Écosse). **Le plan d'échantillonnage prévoit 15 transects basés sur une bande d'observation de 600 mètres.**

Les campagnes nautiques sont mensuelles, 12 campagnes par an sont prévues. Elles débuteront en juillet 2025 et dureront deux années. Il est prévu que les campagnes nautiques durent deux journées . Une troisième journée pourra s'avérer nécessaire en fonction de la saison et des conditions météorologiques. Cette fréquence d'échantillonnage et sa durée permettent d'appréhender les variabilités saisonnières et interannuelle.

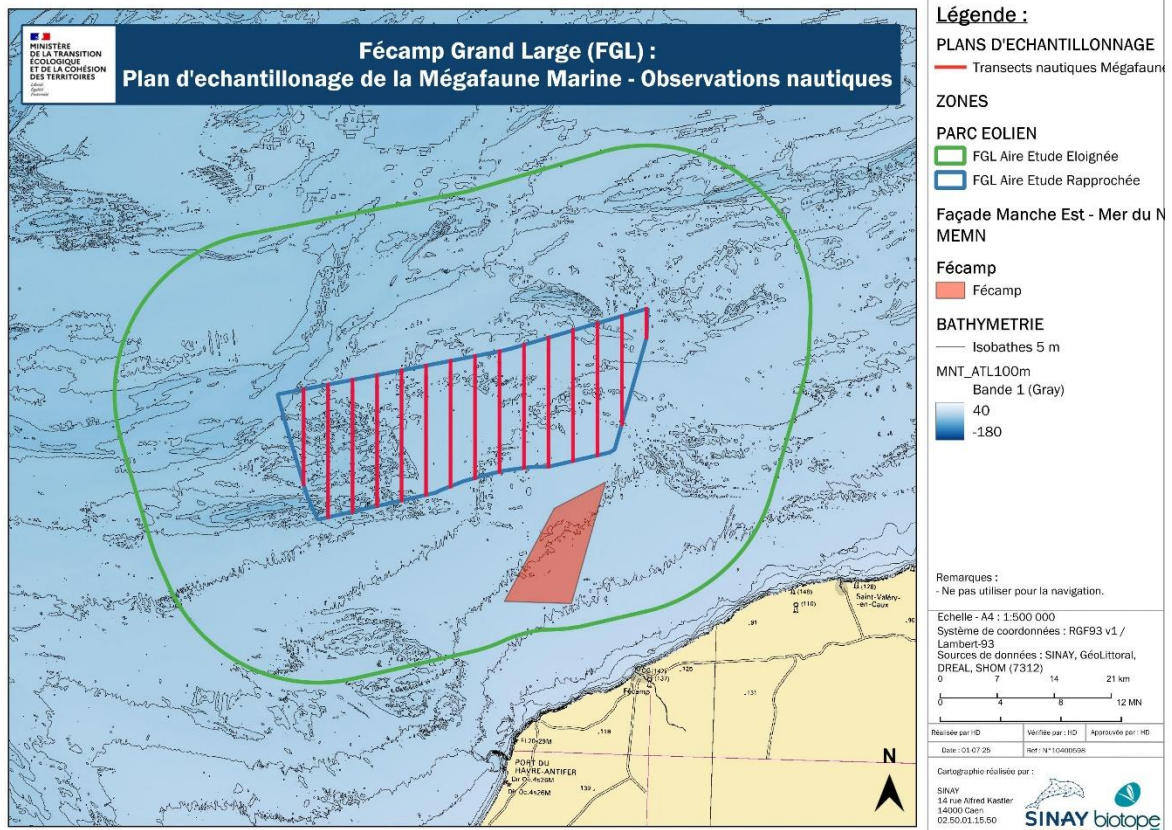


Figure 1 : localisation des transects dans le cadre des suivis nautiques (en rouge) de la mégafaune marine sur la zone de Fécamp Grand Large.

L'orientation des transects nautiques est définie de manière à couvrir la surface la plus étendue de l'aire d'étude rapprochée (a minima 20 %).

1.2.3. Moyens et Matériels

1.2.3.1. Moyens nautiques

Le navire utilisé pour le suivi nautique de la mégafaune marine est le VDC Lynx de la société **NORMANDY OFFSHORE SERVICES (Figure 2)**.

Le navire offre une stabilité et espace suffisant pour les observateurs et les équipements. Il est doté d'une plateforme d'observation surélevée, avec une hauteur de vue d'au moins cinq mètres au-dessus du niveau de la mer, optimisant ainsi la visibilité pour l'observation de la mégafaune marine selon les recommandations des protocoles de référence.

En navigation, sa vitesse est entre comprise entre cinq et 20 nœuds afin de permettre une collecte homogène des données. Le navire est également équipé de GPS pour assurer la précision des trajets.



Figure 2 : navire VDC Lynx de la société NORMANDY OFFSHORE SERVICES.

1.2.3.2. Moyens humains

L'équipe embarquée est formée de deux observateurs et un navigateur en plus de l'équipage du navire VDC Lynx. Les observateurs et le navigateur possèdent les compétences nécessaires à l'identification des différentes espèces marines et au respect du protocole de suivi de la mégafaune marine.

1.2.3.3. Matériel de mesure sur le terrain

Les ressources matérielles utilisées dans le cadre des campagnes nautiques sont les suivantes :

- Des jumelles (avec un zoom de x10 à x14 et une ouverture de x42 à x50) sont utilisées pour l'observation et l'identification des différentes espèces ;
- Des télémètres (sticks de mesure) sont utilisées pour évaluer la distance des individus posés ou au ras de l'eau ;
- Des GPS à main Garmin alimentent en temps réel le logiciel d'acquisition des données ;
- Des talkies-walkies pour la communication avec le navigateur ;
- De dictaphones afin d'assurer une sauvegarde supplémentaire des observations (en plus du système d'enregistrement audio assuré par le logiciel de saisie des données) ;
- Un ordinateur de terrain équipé du logiciel SAMMOA.

1.2.4. Déploiement opérationnel

Les campagnes nautiques sont réalisées selon des transects prédéfinis à une vitesse comprise entre huit et 15 nœuds (10 nœuds recherchés), permettant une couverture homogène de la zone rapprochée. L'équipe embarquée lors des campagnes est formée de deux observateurs et un navigateur.

Les opérateurs occupent le poste d'observation en même temps et se partagent le champ de vision en deux secteurs de 90° (**Figure 3**). Le navigateur assure la saisie des données au moyen de l'ordinateur de bord et suit le déroulement des transects avec le logiciel de dédié.

Les observateurs et le navigateur sont amenés à interchanger leur place et leur rôle au cours de la mission afin de minimiser les biais d'échantillonnage (fatigue visuelle et tâches répétées de saisie).



Figure 3 : positionnement de l'équipe d'observation sur le navire (à gauche) et opérateur en cours de d'observation (à droite).

L'opérateur applique le protocole de transect de ligne (*line transect*) avec une mesure de la distance (*distance sampling*) pour l'ensemble des observations (les oiseaux posés et en vol, les mammifères marins et les autres observations de la mégafoaune marine). Pour les oiseaux en vol, le protocole du « Snapshot », ou comptage instantané, est mise en application à intervalles réguliers en complément. Les activités anthropiques et les déchets sont également dénombrés.

La bande d'observation prévue pour les suivis nautiques de la mégafoaune marine est comprise entre 0 et 300 mètres de distance perpendiculaire à l'axe du bateau en navigation. La bande totale est donc de 600 mètres, distance recommandée par les protocoles de référence

La mesure de la distance des oiseaux en vol est réalisée à l'œil nu. Pour les individus et objets posés sur ou au ras de l'eau, la mesure est réalisée à l'aide d'outils plus performants (sticks de mesure). L'estimation de la hauteur de vol des oiseaux est également réalisée à l'œil nu à l'aide d'intervalles prédéfinis.

Après les campagnes, les données enregistrées sont réécoutées, contrôlées et complétées si nécessaire au moyen de l'enregistrement audio annexé au logiciel de saisie (SAMMOA). L'ensemble des observations sont ensuite archivées dans une base de données dédiée au projet et mise en forme pour les futures analyses.

Les conditions limites de mise en œuvre de la technique sont les suivantes dans le cadre des suivis nautiques :

- Pas de précipitation et absence de brouillard ;
- Vent : inférieur ou égal à 3 Beaufort ;
- État de la mer : mer calme à peu agitée (état de mer 3) ;
- Créneau : pas avant 1h30 après le lever du jour et pas après 1h30 avant le coucher du soleil, avec une vigilance particulière lors des expertises en milieu de journée (phénomènes d'éblouissement).

L'objectif est de réaliser les deux à trois journées de suivi nautique de manière consécutive. Le découpage des transects est réalisé en fonction des conditions météorologiques observées lors de la première journée afin de réaliser un maximum de transects.

Les journées suivantes, le suivi est repris à l'endroit où il s'est précédemment arrêté. Si les conditions météorologiques ne le permettent pas, les suivis sont séparés sur des périodes différentes au cours du même mois.

1.3 Données collectées

Les informations collectées concernent la mégafoaune marine (mammifères marins, oiseaux, requins, grands poissons pélagiques et tortues marins), mais également les objets liés aux activités humaines (bateaux, bouées, casiers, etc.). Les informations suivantes sont notées dans le **Tableau 1** et le **Tableau 2**.

Tableau 1 : données d'observation récoltées lors des suivis nautiques de la mégafoaune marine.

Informations	Description
Région	Zone d'étude (ex : NEA = Atlantique Nord-Est)
Campagne	Nom de la campagne ou projet
Sous-région	Sous-région (ATL, MAN, MED)
Cycle	Cycle de la campagne
Session	Numéro de campagne
Navire	Nom du navire
Plateforme	Type de plateforme d'observation (intérieur, extérieur, etc...)
Hauteur de la plateforme	Hauteur de la plateforme
Strate	Catégorie de la strate (N= néritique, O= océanique, P= pente)
Point GPS du bateau	Coordonnées GPS du bateau au moment de l'observation en degrés décimaux – WGS 84 (complétée de manière automatisée sur le formulaire)
Point GPS de l'observation	Coordonnées GPS projetées du point d'observation en degrés décimaux – WGS 84 (complétée de manière automatisée sur le formulaire)
Transect	Numéro de transect (complétée de manière automatisée sur le formulaire)
Sens	Vers la côte ou vers le large (complétée de manière automatisée sur le formulaire)
Date	JJ/MM/AAAA (complétée de manière automatisée sur le formulaire)
Heure de l'observation	HH :MM :SS (complétée de manière automatisée sur le formulaire)
Effort pour chaque transect	Début et fin de l'effort (observation active des experts) en HH :MM :SS
Observateur	Le nom de l'observateur
Bord suivi par l'observateur	Bâbord ou tribord
Vitesse du bateau	En nœuds. Donnée complétée de manière automatisée sur le formulaire
Cap du bateau	En degrés. Donnée complétée de manière automatisée sur le formulaire
Espèce	Le nom commun de l'espèce identifiée
Code espèce	Le nom de l'espèce sera rajouté dans la base de données a posteriori grâce au code SAMMOA
Famille	La famille associée au code espèce sera rajoutée dans la base de données a posteriori grâce au code SAMMOA
Groupe taxonomique	Le groupe taxonomique associé au code espèce sera rajouté dans la base de données a posteriori grâce au code SAMMOA

Informations	Description
Nom latin	Le nom latin associé au code espèce listé en annexe 2 sera rajouté dans la base de données a posteriori grâce au code SAMMOA
Nombre	Le nombre d'individus observés
Type de dénombrement	Type de dénombrement pour les groupes > 20 individus : Exact ou estimation
Détection	Détection à l'aide d'un outil (jumelles).
Angle d'observation	L'estimation de l'angle d'observation en degré
Distance	L'estimation de la distance de l'individu en mètres
Gisement	L'estimation du gisement en degré
Reposoir	Utilisation d'un reposoir : bouée, balise, fondations d'éoliennes, mât de mesure, macrodéchet, flotteur de pêche
Alimentation	L'activité de pêche de l'oiseau : en recherche alimentaire ou non
Chasse	L'individu est associé à une chasse (ex : thons)
Bateau	L'individu est associé à un bateau (de pêche par exemple)
Réaction au bateau	La réaction de l'oiseau au bateau d'observation : neutre, attraction, répulsion, fuite ou suit le bateau
Age	L'âge de l'individu observé si possible : juvénile, immature, adulte ou le code d'âge recommandé par le CRBPO (centre de recherche par le baguage des populations d'oiseaux)
Plumage	Le stade du plumage si possible : nuptial ou inter-nuptial
Hauteur de vol	La hauteur de vol moyenne estimée de l'individu en mètre
Direction de déplacement	L'axe de vol de l'individu exprimé en degrés (complétée de manière automatisée sur le formulaire)
Snapshot	Individu observé pendant un snapshot ou non

Tableau 2 : données d'effort récoltées lors des suivis nautiques de la mégafoaune marine.

Information	Description			
	Note	Description	Aspect de la mer	Vent (vitesse en nœuds et direction)
Etat de la mer (Beaufort)	0	Calme	Mer lisse comme un miroir	>1
	1	Très légère brise	Quelques rides ressemblant à des écailles de poissons, mais sans aucune écume	1 à 3
	2	Légère brise	Petites vaguelettes ne déferlant pas, toujours d'apparence lisses	4 à 6
	3	Petite brise	Grandes vaguelettes. Les crêtes commencent à déferler. Ecume	7 à 10

Information	Description			
			d'aspect vitreux. Parfois quelques moutons épars	
	4	Jolie brise	Petites vagues devenant plus longues, moutons assez fréquents	11 à 15
	5	Bonne brise	Vagues modérées longues, moutons et éventuellement embruns	16 à 21
Hauteur de houle	En mètres			
Direction de la houle	En degrés			
Hauteur de vague	En mètres			
Visibilité	En classes de distance : < 50 m, 50-300m, 300-1000m, 1000-3000m, > 3000 m			
Couverture nuageuse	De 0 à 8 (échelle des octas)			
Précipitations	Absente ; Très faible ; Faible ; Modérée ; Forte			
Intensité d'éblouissement	0 - aucun éblouissement 1 – léger : réverbération peu gênante 2 – moyen : réverbération pouvant gêner partiellement la détection 3 – fort : réverbération marquée très handicapante			
Zone d'éblouissement	Exprimée en degrés			
Commentaires	Informations complémentaires si besoin			
Synthèse des conditions d'observation	Synthèse des conditions d'observation (Excellentes (E) : conditions optimales Good (G) : paramètres bons pour la détection Moyennes (M) : moyen mais suffisant Pauvres (P) : la détection devient difficile)			

À l'issue de chaque session d'expertise par bateau, un rapport de mission est rédigé et transmis sous sept jours. Il fournit les informations sur le personnel mobilisé, la date, les horaires d'expertise (par transect), les conditions météorologiques, l'état de la mer et tout élément notable. Ce rapport est également illustré par des photographies prises au cours de la mission.

2. Traitements et analyses des données

2.1 Analyse et traitement des données

2.1.1. Généralités sur les analyses

L'ensemble des données collectées est utilisé pour réaliser des analyses approfondies d'indicateurs biologiques. Ces analyses couvriront une variété de groupes fauniques, notamment les oiseaux marins, les mammifères marins, les grands poissons pélagiques, et les tortues marines. Les pollutions et les activités anthropiques seront également étudiées.

Les données sont analysées à l'aide de techniques statistiques pour évaluer les indicateurs écologiques définis dans les objectifs de l'étude afin de réaliser l'état initial des populations.

- **Estimation de l'abondance relative** : Indice Kilométrique d'Abondance (IKA), soit le nombre d'individus par kilomètre de transect parcouru ;
- **Estimation des densités** : estimation via le *distance sampling* (en nombre d'individus par km²) ;
- **Répartition spatiale des observations brutes** : représentation de toutes les observations par un point situé à la position où l'observation a eu lieu. La taille des points est fonction du nombre d'individus observés ;
- **Répartition spatiale en densité par maille** : les densités (en nombre d'individus par km²) sont moyennées par unité d'espace, discrétisé en pixel. La taille du pixel dépend de la distance inter-transects ;
- **Modèles d'habitats** : si les données le permettent, modèle de type « Modèle additif généralisé » (GAM) afin d'estimer des relations statistiques non-linéaires entre la variable à expliquer (effectifs et distributions d'une espèce) et les variables écologiques explicatives ;
- **Représentation des hauteurs de vol** : effectif cumulé total d'oiseaux observés pour chaque classe de hauteur de vol et chaque espèce ;
- **Analyse comportementale** : pourcentages des individus posés sur l'eau vs en vol, description des oiseaux à proximité de bateaux de pêche, attraction ou répulsion par les bateaux, etc.

Tous les résultats des analyses seront présentés avec une perspective temporelle, mettant en évidence les variations saisonnières et interannuelles à l'aide de graphiques et de cartographies.

2.1.2. Traitement des données

Les données collectées font l'objet d'une synthèse par espèce ou par groupe d'espèces des observations sur les séquences analysées. Dans le cas où les identifications ne sont pas possibles pour une proportion significative de spécimens, les analyses sont réalisées à l'échelle du groupe d'espèces. Afin de simplifier l'interprétation des analyses, des regroupements d'espèces pertinents peuvent être intégrés. En fonction du jeu de données disponible, une estimation de la densité de chaque espèce est réalisée avec la méthode du *strip-transect*. L'estimation de la densité peut, dans certains cas, également être estimée avec la méthode du *distance sampling*. Ces estimations sont dérivées d'une analyse par transect, se basant sur de nombreuses itérations (« *bootstrap* »).

La technique d'estimation se base sur la longueur totale des transects parcourus, plutôt que sur le nombre de transects, pour limiter les biais et fournir de meilleures estimations. Ceci est particulièrement intéressant dans le cas où les transects sont de longueur très inégale.

L'exploitation des données conduit à des résultats de trois types :

- Description de la phénologie de l'abondance des différentes espèces ou groupes d'espèces ;
- Description de la répartition spatiale des différentes espèces ou groupes d'espèces ;
- Description des comportements observés.

2.1.2.1. Description de la phénologie

Différentes techniques peuvent être utilisées pour décrire la phénologie des espèces. Ces techniques sont présentées ci-dessous et sont utilisées (toutes ou en partie) en fonction des jeux de données disponibles.

2.1.2.1.1 Densité absolue des oiseaux posés

- **Estimation par strip transect**

Cette méthode consiste simplement à considérer la probabilité de détection comme parfaite dans une bande de part et d'autre de la ligne de transect. La largeur de bande retenue pour le bateau est par exemple de 300 m. La densité d'oiseaux posés représente alors le nombre d'observations d'oiseaux posés ou le nombre d'oiseaux posés dans la bande, divisé par la surface de cette bande.

L'intérêt de cette densité absolue est qu'elle peut être aisément convertie en une estimation des effectifs dans la zone d'étude (abondance) en la multipliant par la surface de cette zone (et en faisant l'hypothèse que les transects sont dessinés de façon à couvrir de façon homogène et représentative la zone d'étude).

La densité absolue peut être obtenue très simplement à partir des IKA, une fois la portée efficace de détection connue (Exemple : si la portée efficace de détection est de 300 m = 0,3 km et que les deux bords du transect sont prospectés, un IKA de 1 individu/km correspond à $1 / (2 * 0,3) = 1,7$ individus/km²).

- **Estimation par distance sampling**

Le *distance sampling* est à la fois un protocole de terrain et une méthodologie d'analyse statistique des données. Sur le terrain, cette méthode repose sur l'hypothèse que, si l'on suit un transect linéaire et qu'il est surveillé attentivement, 100% des individus présents sur la ligne du transect sont détectés à leur position initiale (avant de fuir ou d'être attirés par l'observateur).

D'autre part, il est supposé que la position des oiseaux est indépendante de celle des transects si bien que les animaux devraient être uniformément répartis selon la distance aux transects. La diminution du nombre d'observations avec la distance par rapport à la ligne de transect permet alors d'estimer la probabilité de détection.

L'analyse consiste à estimer la « fonction de détection » qui décrit la probabilité de détection d'un groupe en fonction de la distance de ce groupe au transect. Par définition, celle-ci vaut 1 à la distance 0 (détection parfaite sur la ligne de transect) puis elle décroît plus ou moins rapidement avec la distance en vertu de paramètres (état de la mer, par exemple) que l'on estime statistiquement.

Il est possible de modéliser l'effet de différentes variables sur la détection en introduisant des paramètres supplémentaires (état de la mer par exemple).

Cette fonction de détection permet de définir la largeur efficace de transect (*Efficient Strip Width*, ESW) qui correspond à la distance au transect à l'intérieur de laquelle on peut considérer que la probabilité

de détection est de 100% Cette métrique est utilisée pour calculer l'effort surfacique et ainsi estimer la densité et l'abondance dans la zone d'échantillonnage.

La fonction de détection est toujours une simplification de la réalité. Différents types de fonction de détection sont testées afin d'identifier et de sélectionner par l'usage d'outils statistiques tels que l'AIC (*Akaike Information Criterion*, meilleur compromis entre le nombre de paramètres et qualité d'ajustement) celle qui représente au mieux les données collectées lors des suivis. Cette estimation n'est possible que pour des individus avec un nombre élevé d'observations.

- **Densité absolue des oiseaux en vol**

Une procédure *Snapshot* est mise en place en bateau afin d'estimer la densité d'oiseau en vol. Cette procédure permet de corriger le biais introduit par le mouvement des oiseaux en vol lorsqu'on estime leur densité à partir de données d'observations classiques.

Basiquement, les oiseaux en vol ne font que "passer" dans la zone de prospection alors qu'ils sont considérés comme "statique" et sont donc cumulés lors du calcul de la densité en l'absence de *snapshot* ce qui entraîne une forte surestimation de cette densité.

Au cours d'une procédure *Snapshot*, l'ensemble des oiseaux en vol à un instant t (le plus instantané possible) est noté dans un rayon défini autour de l'observateur (300 m autour de l'observateur dans toutes les directions) et à pas de temps régulier (tous les 1000 m). Ce qui permet d'avoir une image "statique" des oiseaux en vol et de supprimer l'effet de cumul des flux évoqué plus haut.

- **Densité absolue des oiseaux posés et en vol**

Les calculs de densité des oiseaux posés (*Strip-transect* ou *Distance sampling*) et des oiseaux en vol (*Snapshot*) permettent d'aboutir à une densité d'oiseaux totaux (**Figure 4**).

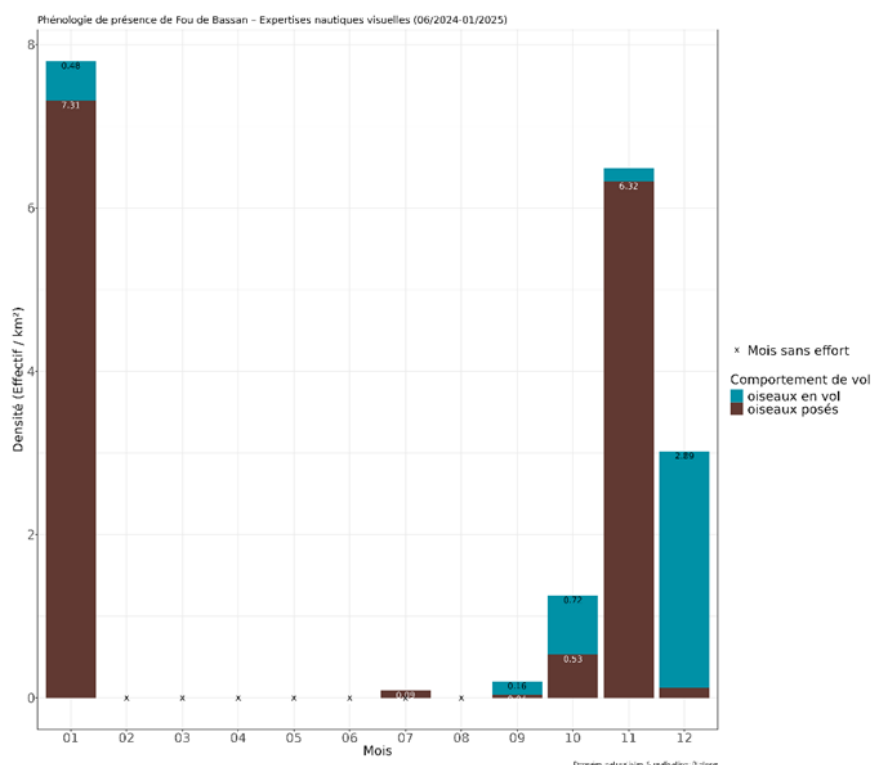


Figure 4 : histogramme de la densité d'individus ou d'observation du fou de Bassan (posés et en vol).

- **Abondance relative via l'indice kilométrique d'abondance des oiseaux en vol**

Afin de pouvoir comparer l'abondance des espèces d'un mois à l'autre, les effectifs bruts peuvent être corrigés par l'effort de prospection linéaire. Cette méthode de calcul n'est utilisée que pour les oiseaux en vol observés en dehors du protocole *Snapshot*.

L'indice d'abondance obtenu est noté IKA pour indice kilométrique d'abondance et s'exprime en nombre d'individus observé (en vol) par kilomètre de transect parcouru (**Figure 5**).

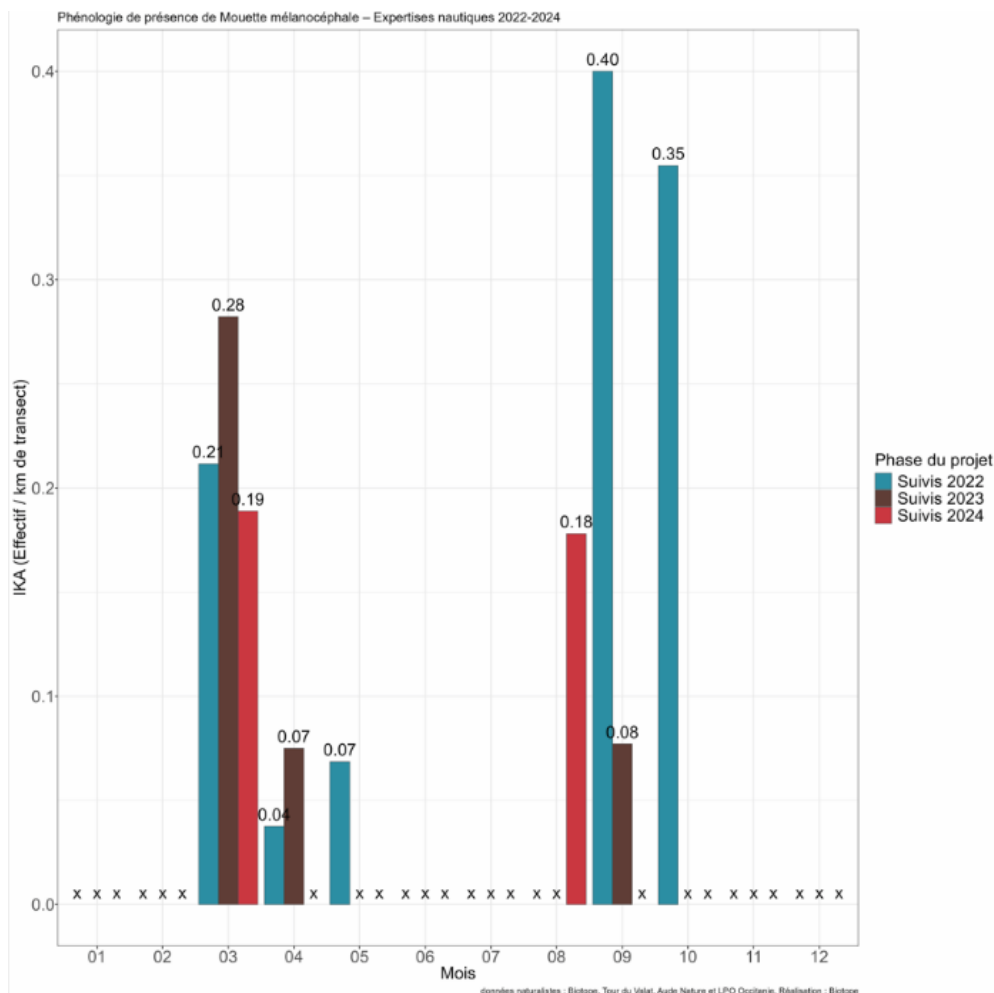


Figure 5 : exemple d'histogrammes présentant la phénologie d'une espèce en utilisant l'IKA comme indice d'abondance.

Afin d'obtenir une estimation de l'incertitude associée à l'IKA ou à la densité des suivis nautiques et aériens, des intervalles de confiance à 95 % sont calculés par la méthode des pourcentiles de *bootstrap*. Cet intervalle de confiance à 95 % signifie que si le suivi et les analyses devaient être répétés de nombreuses fois alors les estimations seraient comprises dans cet intervalle 95 % du temps.

La **Figure 6** présente les diagrammes d'IKA obtenus avec les intervalles de confiance à 95 % associés pour les espèces de plongeurs.

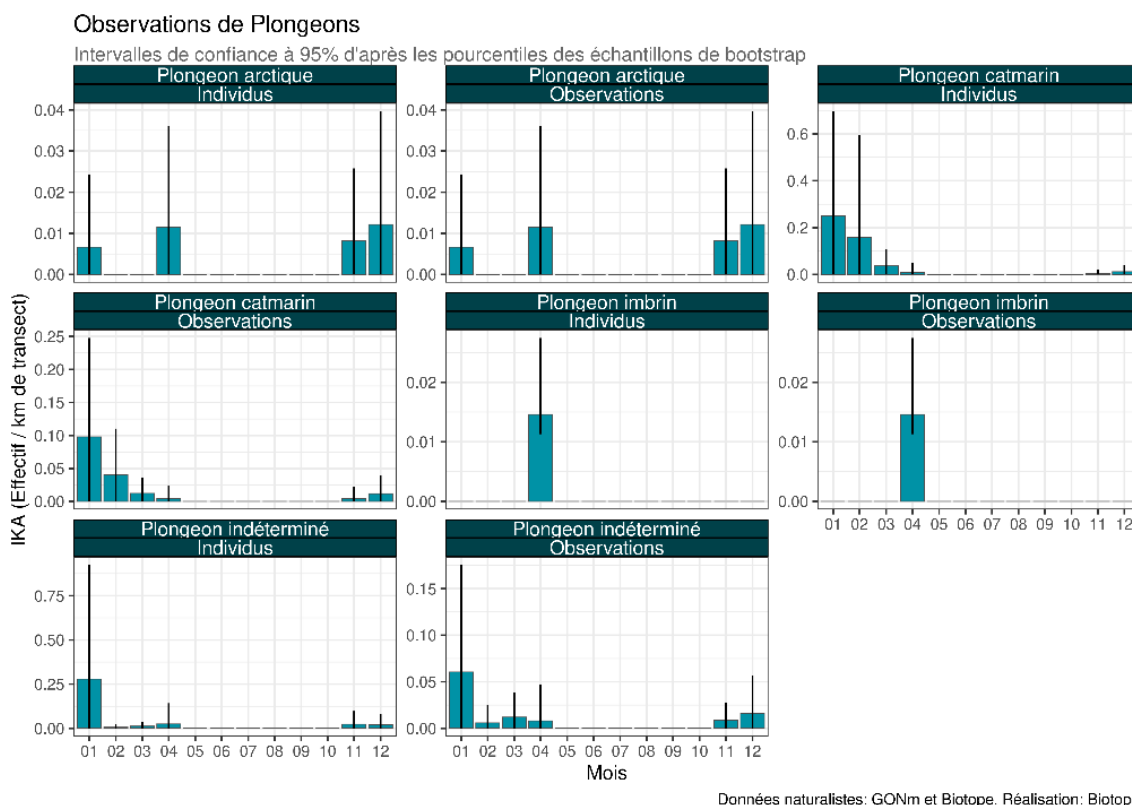


Figure 6 : exemple de séries temporelles de phénologie pour le groupe d'espèces des plongeurs (les espèces sont considérées de façon distincte). L'IKA est présenté ici avec son intervalle de confiance à 95%.

2.1.2.2. Répartition spatiale des observations

Une figure est produite pour les espèces les plus fréquentes ou par groupe d'espèces. La répartition spatiale est présentée pour chaque espèce ou groupe d'espèce sur des cartes de deux types :

- Une carte des observations brutes (par saison) ;
- Et une carte de densité par maille (par saison).

Une méthode d'analyse des données par des modèles d'habitats préférentiels en lien avec les paramètres environnementaux de la zone est également proposée pour les espèces où suffisamment de données seront récoltées. Une figure est produite afin de comparer des effectifs à l'intérieur par rapport à l'extérieur de l'aire d'étude rapprochée.

2.1.2.2.1 Cartes des observations brutes

Ces cartes représentent toutes les observations par un point situé à la position où l'observation a eu lieu. La taille des points est fonction du nombre d'individus observés. Pour éviter que quelques rares observations d'un grand nombre d'individus rendent illisible la plus grande majorité des données, une taille maximale de point a été retenue pour certaines cartes où les effectifs sont particulièrement variables.

Cette taille correspond au 95ème percentile du nombre d'individus par observation (notée X), c'est à dire que pour 95% des observations, le nombre d'individus observés est inférieur à cette taille (si X = 40 individus, pour 95% des observations, le nombre d'individus observé est inférieur à 40 individus et donc pour 5% des observations, le nombre d'individus observés est supérieur ou égal à 40). Les 5% d'observations restantes sont représentées par des points de la même taille, étiquetées sur la légende sous le nom « X+ ».

2.1.2.2.2 Cartes de densité par maille

Des cartes de densité par maille seront réalisées pour les données issues des campagnes nautiques et aériennes digitales. Pour chaque espèce ou groupe d'espèces, les densités (en nombre d'individus par km²) sont moyennées par saison et unité d'espace.

Dans ces figures, l'espace est discrétisé en pixel de 6 km² pour les campagnes nautiques. La taille du pixel dépend principalement de la distance inter-transects est contrainte par la volonté de ne pas avoir de pixel sans effort.

Dans ces conditions, aucune interpolation spatiale n'est réalisée pour déterminer la densité moyenne au sein d'un pixel. Par souci de lisibilité, les transects n'ont pas été représentés mais le trait de côte apparaît sur chaque grille.

Pour le calcul de la densité, l'hypothèse est qu'il y a une détection parfaite des animaux sur la largeur de bande de part et d'autre de la ligne de transect. La largeur de bande efficace ainsi que la longueur de transect au sein de chaque pixel et pour chaque jour où un suivi est réalisé nous permet de calculer l'effort surfacique qui est la surface échantillonnée à l'échelle du pixel et du suivi.

La densité est ensuite calculée à l'échelle du pixel et du suivi en divisant le nombre d'individus de chaque espèce ou groupe d'espèces observés par l'effort surfacique correspondant. Puis la densité est moyennée par saison. De plus, il est important de noter que l'échelle de densité est logarithmique et différente pour chaque figure afin de visualiser au mieux les variations de densité dans l'espace (les pixels) et le temps (les saisons).

2.1.2.2.3 Modèle de densités de surface pour les espèces avec des effectifs élevés (modèle d'habitats)

Conformément à la demande du CCTP, nous proposons une méthode d'analyse des données par des modèles d'habitats préférentiels en lien avec les paramètres environnementaux de la zone, afin de spatialiser et de déterminer des variables écologiques explicatives et de préciser les effectifs et les distributions des espèces et groupes d'espèces d'oiseaux marins et de mammifères marins.

Les expertises aériennes ont l'avantage de pouvoir couvrir de larges zones dans un fenêtre temporelle relativement étroite et permettent de produire une photographie de la distribution des oiseaux. Dans leur format brut, les occurrences relevées sont donc des données de présence/absence sur les transects parcourus mais ne renseignent pas sur la densité des animaux en dehors des transects.

Il faut avoir recours à des méthodes d'interpolation ou des méthodes prédictives pour estimer la probabilité de présence des espèces sur les zones non échantillonnées. La modélisation de la distribution peut être envisagée selon deux méthodes de modélisation d'habitats, avec des degrés d'exigence de données variables :

- **Modélisation d'habitats préférentiels** (Modèle additif généralisé, GAMs) : modélisation qui utilise à la fois les données de présence et d'absence, les données d'effort (qualitatives et quantitatives), et des covariables environnementales pour prédire la distribution des habitats préférentiels où les espèces sont observées.
- **Modélisation des habitats favorables** (MinxEnt, MaxEnt) : modélisation qui produit une carte de distribution potentielle de l'espèce en s'appuyant sur les données de présence/absence ou présence uniquement et des covariables environnementales fournies au modèle.

Si les données le permettent, nous testerons l'utilisation d'un type de modèle particulier, appelé « *density surface model* » (DSM). Un DSM est un modèle qui permet de modéliser la distribution spatiale de l'abondance.

Dans le cas présent, il s'agirait d'un modèle de type GAM utilisé afin d'estimer des relations statistiques non-linéaires entre la variable à expliquer et les variables explicatives (**Figure 7**). Ces modèles sont adaptés pour décrire les processus naturels parfois complexes du milieu marin (Miller et al., 2013). Les variables environnementales peuvent être statiques (bathymétrie, distance à la côte, distance aux colonies, etc.) ou dynamiques (température de l'eau, production primaire, distribution des proies, etc.).

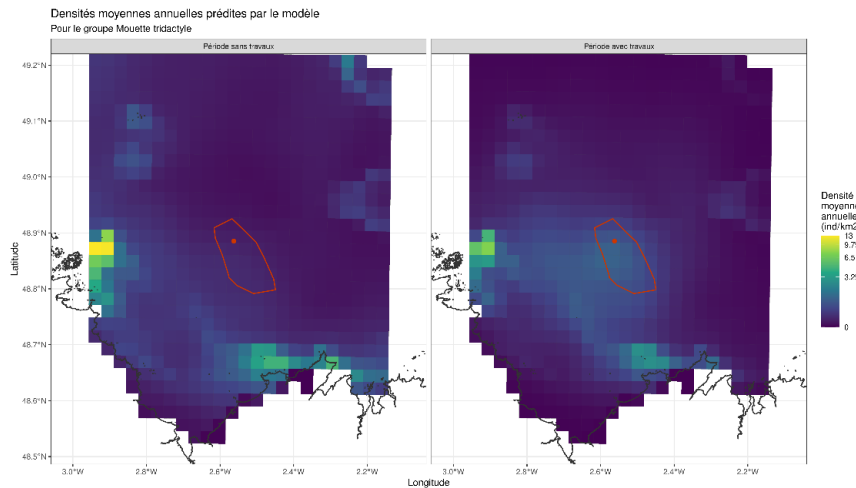


Figure 7 : cartes de prédiction de densité pour une espèce lors de deux périodes sur la base d'une approche DSM.

Des modèles d'habitats ont été développées notamment dans le cadre des études de levée des risques du projet éolien en mer de Dunkerque (Virgili et al., 2018) (**Figure 8**).

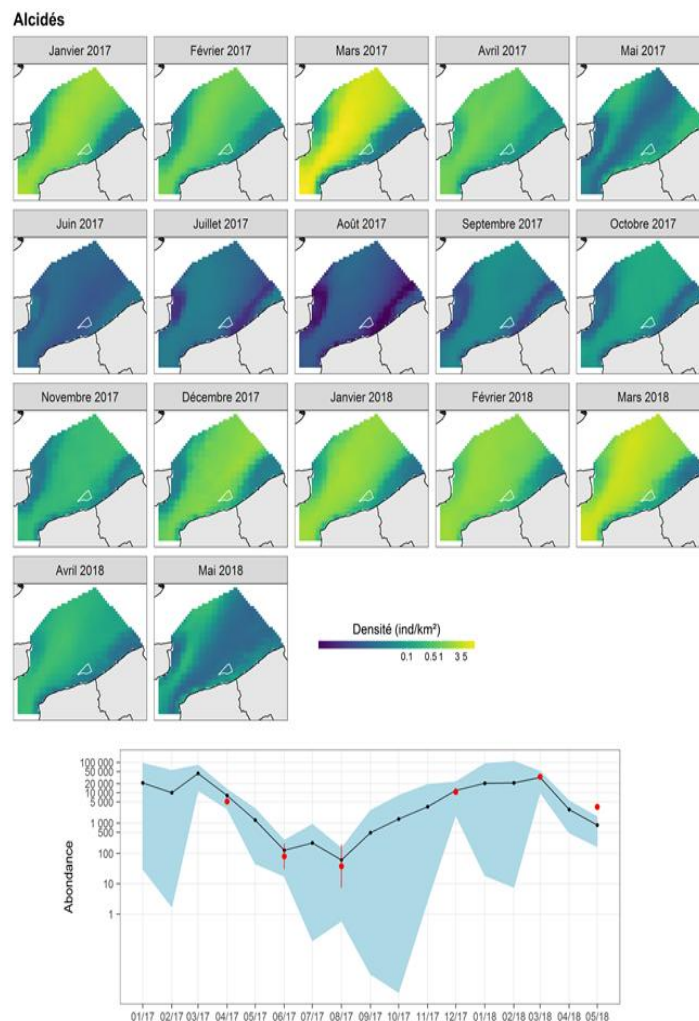


Figure 8 : densités mensuelles prédites pour les alcidés dans le sud de la mer du Nord entre janvier 2017 et mai 2018 (haut) et abondances mensuelles estimées (nombre d'individus ; bas) d'après les données de la campagne LEDKOA (Virgili et al., 2018).

Un inconvénient de ce type de modèle est leur relative complexité qui requiert une quantité de données importante. Cette approche ne peut donc être robustement utilisée que pour les espèces les plus observées. Une procédure de sélection de modèles utilisant l'AIC (*Akaike Information Criterion*) est effectuée afin de déterminer quel est le modèle le plus parcimonieux (c'est à dire celui présentant le meilleur compromis entre la quantité et l'intérêt des paramètres estimés et des covariables étudiées).

Les covariables environnementales généralement testées et proposées sont la bathymétrie (moyenne et gradient bathymétriques, contrainte environnementale liée à la distance à la côte), la température de surface (moyenne et gradient de température, indicateur de l'agrégation de proies) et la concentration moyenne en chlorophylle a (indicateur de l'abondance en proies).

2.1.2.2.4 Comparaison des effectifs à l'intérieur par rapport à l'extérieur

Afin de fournir un aperçu synthétique et comparatif de l'abondance des différentes espèces à l'intérieur et à l'extérieur de la zone d'implantation des futures éoliennes, un histogramme des effectifs pour les observations et pour les individus peut être réalisé (exemple pour les expertises nautiques ci-dessous).

De plus, les effectifs attendus compte-tenu de la répartition de l'effort de prospection et en supposant que la distribution des observations est parfaitement aléatoire et uniforme dans l'espace est calculé.

Les effectifs attendus sont représentés par un point noir (effectif moyen) et une estimation de l'incertitude associée à ces effectifs est fournie par les barres d'erreur (intervalles de confiance à 95%) sur le diagramme des observations.

Cette référence est à comparer avec la barre bleue des effectifs à l'intérieur de la zone d'implantation pour évaluer l'éventuelle sur-représentation ou sous-représentation des différentes espèces au sein de ce périmètre par rapport au reste de la zone d'étude.

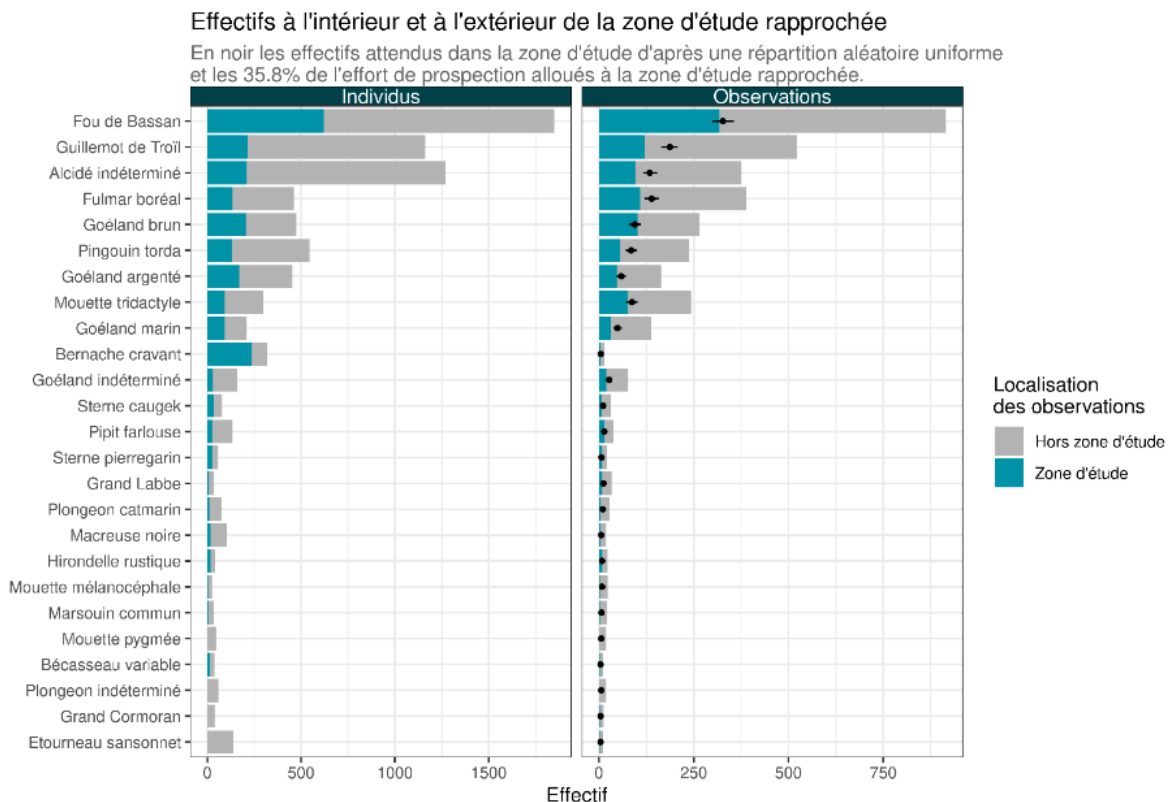


Figure 9 : exemple de comparaison du nombre d'observations effectuées à l'intérieur vs à l'extérieur de la zone d'implantation des éoliennes (notée zone d'étude sur le graphique).

2.1.2.3. Analyse des comportements de l'avifaune

La description des comportements repose sur l'analyse du comportement (en vol, posé, attraction ou répulsion aux bateaux) et des altitudes de vol.

2.1.2.3.1 Comportements en mer

Sur la base des informations collectées en mer, les pourcentages des individus posés sur l'eau vs en vol sont comparés par espèce.

La description des comportements observés en mer est effectuée, à savoir si les oiseaux sont présents à proximité d'un bateau en pêche, si les oiseaux sont attirés ou fuient à l'approche du bateau de l'étude, si les oiseaux sont posés sur une structure anthropique (i.e. fondation d'éolienne, bouée, etc.), etc.

2.1.2.3.2 Histogramme des hauteurs de vol issues des expertises nautiques

Lors des transects nautiques, la hauteur de vol pour chaque oiseau en vol observé est estimée par dire d'expert. Les histogrammes de hauteurs de vol sont présentés pour chaque groupe d'espèces. Les histogrammes fournissent l'effectif cumulé total d'oiseaux observés pour chaque classe de hauteur de vol et chaque espèce.

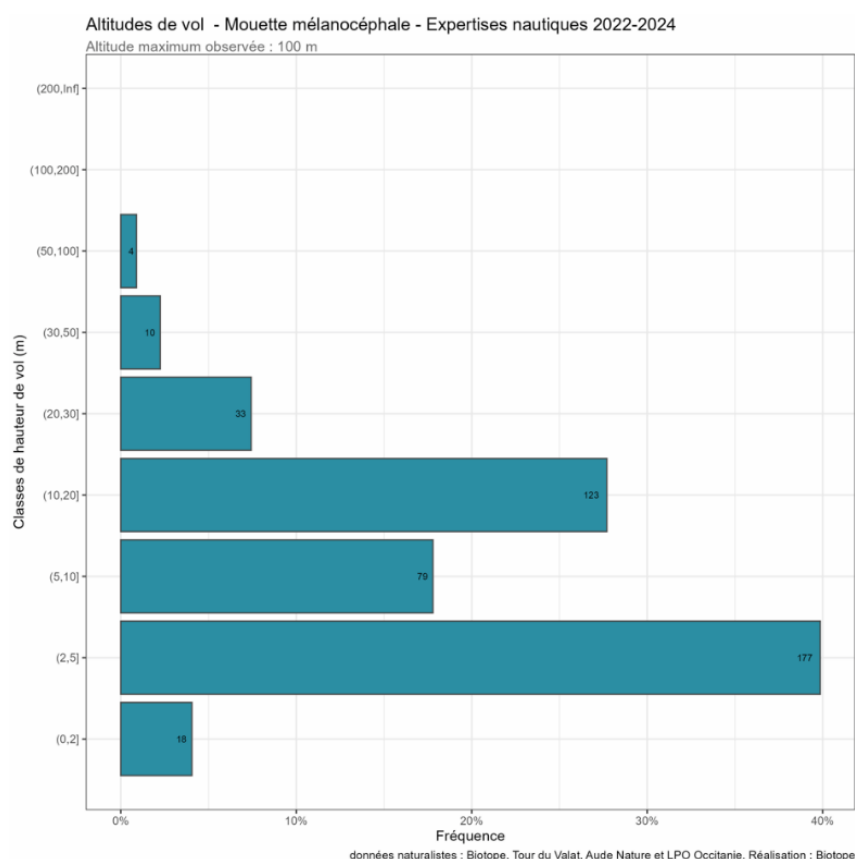


Figure 10 : exemple d'historgramme des altitudes de vol pour la mouette mélanocéphale.

2.2 Interprétation des résultats et visualisation

Les résultats obtenus sont discutés à la lumière de l'écologie connue des espèces étudiées (fréquentation, migration, comportement...) et remis en contexte à travers des retours d'expérience disponibles.

Les résultats sont interprétés et discutés au regard des connaissances existantes et disponibles à l'échelle de la zone, issues des recensements précédents mais également de la littérature scientifique. Les résultats sont sujets à validation de la part des experts en mégafoaune marine, ce qui permet d'éviter des résultats incohérents au niveau écologique.



DREAL Normandie - MTE

Fécamp Grand Large

FICHE PROTOCOLE

Télémétrie Oiseaux marins

Table des matières

FICHE PROTOCOLE	1
TELEMETRIE OISEAUX MARINS	Erreur ! Signet non défini.
Table des matières	2
1. Principe de la télémétrie sur les oiseaux marins	3
1.1 Objectifs de la télémétrie sur les oiseaux marins.....	3
1.2 Principes du suivi	3
1.2.1. Description du protocole.....	3
1.2.2. Protocole mis en œuvre	5
1.2.3. Données collectées	6
1.3 Analyse des données.....	7
1.3.1. Analyse globale de la répartition spatiale en mer	7
1.3.2. Analyse de la répartition spatiale des différents comportements en mer	7

1. Principe de la télémétrie sur les oiseaux marins

1.1 Objectifs de la télémétrie sur les oiseaux marins

Les suivis télémétriques consistent à équiper un oiseau d'une balise électronique qui permet d'effectuer un suivi individuel de cet oiseau pendant ses déplacements, et sans avoir nécessairement besoin de le capturer à nouveau. En France, la pose s'effectue par des spécialistes agréés par le Centre de Recherches sur la Biologie des Populations d'Oiseaux (CRBPO) dans le cadre d'un programme spécifique sur une espèce ou une problématique plus globale.

Dans le cadre de ce projet, l'espèce envisagée pour un déploiement de balises est le **Fulmar boréal**, espèce circumpolaire des régions boréales, c'est l'oiseau marin le plus répandu et le plus abondant de l'Atlantique Nord. Il niche principalement en Islande et en Grande-Bretagne, où se concentrent 95% de ses effectifs. En France, l'espèce se reproduit sur les côtes bretonnes et en Normandie. La population nicheuse compte moins de 1 000 couples et l'espèce est considérée comme *En Danger* dans la liste rouge des oiseaux nicheurs d'Europe et comme Vulnérable dans celle de l'Union européenne (UICN).

En Normandie, le Fulmar boréal niche sur les falaises de la côte d'Albâtre (400 couples répartis sur l'ensemble du littoral) et sur les falaises du Bessin (300 couples sur sa partie occidentale). La population normande représente alors 70 % de l'effectif national. Les fulmars boréaux sont principalement des prédateurs de surface, mais ils peuvent également effectuer des plongées peu profondes. L'espèce est un charognard courant près des navires de pêche.

Un total de 10 oiseaux nicheurs seront équipés (falaises de Fécamp et Yport). Les déplacements et la répartition en mer des fulmars nicheurs en France n'ont été que peu étudiés jusqu'à présent (projet MIGRATLANE : équipement de 5 individus entre 2023 et 2024).

Les adultes reproducteurs seront être équipés pendant le début de la phase d'élevage des poussins (entre début et mi-juillet). C'est en effet la meilleure période pour les capturer et cela permet ainsi de couvrir la totalité de la période d'élevage des jeunes. Les fulmars boréaux sont des espèces protégées. A ce titre, leur capture à des fins d'équipement de GPS doit faire l'objet d'une autorisation par le CRBPO dans le cadre d'un programme personnel de recherche porté par un chercheur et non une structure. Un programme personnel porte sur au moins 4 ans, mais doit faire l'objet d'une validation annuelle. Cette **demande devra être déposée au CRBPO au moins 4 mois avant le début de la campagne de télémétrie** afin d'obtenir les autorisations dans les temps pour pouvoir effectuer les déploiements pendant la saison de reproduction, à l'été 2026. Il est également nécessaire de prévoir un délai de 2 mois minimum entre la commande du matériel de télémétrie (GPS/GSM) et le déploiement des balises.

1.2 Principes du suivi

1.2.1. Description du protocole

1.2.1.1. Matériel utilisé pour l'acquisition des données

Afin de caractériser les zones d'alimentation (comportement de recherche alimentaire) et les zones d'intérêt (stationnement, transit) du Fulmar boréal, un suivi par télémétrie sera mis en œuvre. En effet, cet oiseau pélagique se nourrit en mer jusqu'à plusieurs dizaines de kilomètres des sites de nidification ($134,6 \pm 90,1$ km en moyenne d'après Woodward et al., 2019¹) et les suivis visuels ne sont pas suffisants

¹ Woodward, I., Thaxter, C.B., Owen, E., 2019. Desk-based revision of seabird foraging ranges used for HRA screening 139.

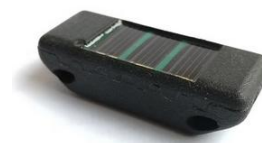
pour évaluer finement leur utilisation de l'espace (notamment les zones d'alimentation et les axes de déplacement). Les suivis GPS et la modélisation des zones d'alimentation représentent, à ce jour, la seule méthode permettant de documenter l'occupation spatiale des oiseaux marins en milieu pélagique.

Les appareils classiquement utilisés dans le cas d'oiseaux nicheurs sont des GPS miniaturisés à panneaux solaires, dont les données enregistrées sont téléchargeables à distance. Des modèles GPS-GSM (transmission automatique des données par le réseau GSM) ont été retenus. Ils ont l'avantage de transmettre des données pendant plusieurs années en fonction de la fiabilité du matériel.

Les oiseaux seront équipés avec des GPS-GSM Ornitela à panneaux solaires (modèle OrniTrack10, <https://www.ornitela.com/10g-transmitter>). Ce modèle de GPS-GSM permet de respecter les contraintes liées à l'équipement d'un oiseau marin utilisant des longues phases de plané et un vol dynamique pour ses déplacements (forte sensibilité des individus à toute modification de leur profil aérodynamique). Les principales caractéristiques techniques des GPS-GSM OrniTrack10 sont détaillées ci-dessous :

OrniTrack15	
Boîtier	Design sac à dos, aérodynamique, solide et étanche (coloris gris), dimensions : 47 mm × 18 mm × 12 mm
Poids	10 g

- Pas d'antenne externe ;
- Récepteur GPS : module haute sensibilité à 99 canaux ;
- Émetteur – récepteur GSM : hexabande (module 3G) ;
- Batterie interne en Lithium-Polymère avec protection contre les sous-charge et les surcharges ;
- Intervalles d'enregistrement GPS : de 1 secondes à 48 heures (cet intervalle sera adapté en fonction de la période de reproduction) ;
- Stockage des données : Mémoire flash de 4 Mo capable de stocker près de 2 000 000 d'enregistrements (modèle 3G) ;
- Téléchargement des données via le réseau GSM/GPRS/3G ;
- Intervalle de connexion au réseau : de 10 minutes à 192 heures ;
- Enregistrement des données lorsque les réseaux ne sont pas disponibles ;
- Collecte des données à hautes fréquences (jusqu'à 50 Hz) avec l'accélérométrie, la magnétométrie, la température, l'intensité lumineuse ;
- Température de fonctionnement comprise entre -20°C et +70°C ;
- Contrôle des paramètres à distance ;
- L'enregistrement des données principales comprend : date et heure UTC, position GPS, altitude GPS, vitesse, direction, tension de la batterie, courant de charge de la batterie, accélération instantanée (3 axes), intensité de la lumière ambiante, température, intensité du champ magnétique (3 axes).



Pour le suivi du comportement de recherche alimentaire et afin de caractériser des zones d'intérêts au cours de la période de reproduction et de nourrissage des jeunes (juillet – août), ainsi que pendant la période de dispersion hivernale (septembre – janvier), les GPS seront programmés pour transmettre, si

possible, une donnée de localisation toutes les 10 minutes pendant la journée ou *a minima* 1 donnée de localisation par heure.

La fréquence d'enregistrement sera ajustée en fonction des conditions météorologiques pour optimiser le niveau de la batterie et obtenir le maximum de données en période de reproduction. Il est possible de modifier en temps réel et à distance les paramètres des balises et de ce fait d'avoir une fréquence d'enregistrement optimale en fonction des conditions observées.

1.2.2. Protocole mis en œuvre

1.2.2.1. Capture des oiseaux sur le site de reproduction

Les fulmars nichant sur falaises côtières, souvent abruptes, les moyens mis en œuvre devront être adaptés au contexte local. A cet effet, le CEREMA a été mandaté par la DREAL Normandie pour identifier les secteurs de falaises permettant l'intervention des cordistes. Ce diagnostic a été établi par une reconnaissance géologique de terrain réalisé depuis le pied falaise sur l'ensemble du linéaire. Cette reconnaissance visuelle directe depuis le pied de falaise a été précédée par l'acquisition de photos et de films par drone. Un modèle 3D texturé de la falaise a été généré par méthode photogrammétrique à partir des photographies acquises par le drone.

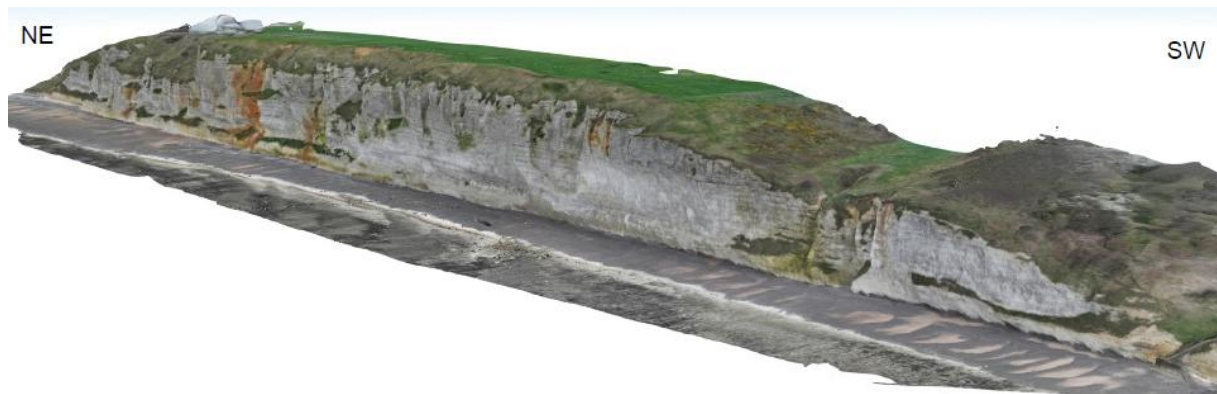


Figure 1. Modèle 3D de la falaise généré par photogrammétrie à partir de photographies acquises par drone.

L'analyse de la stabilité, zone par zone, a porté essentiellement sur l'observation de la géologie et de la morphologie de la falaise, et l'identification des instabilités. A partir des observations géologiques faites, le front de falaise a été caractérisé en zonages de risques vis à vis d'une intervention humaine en cordes le long des parois.

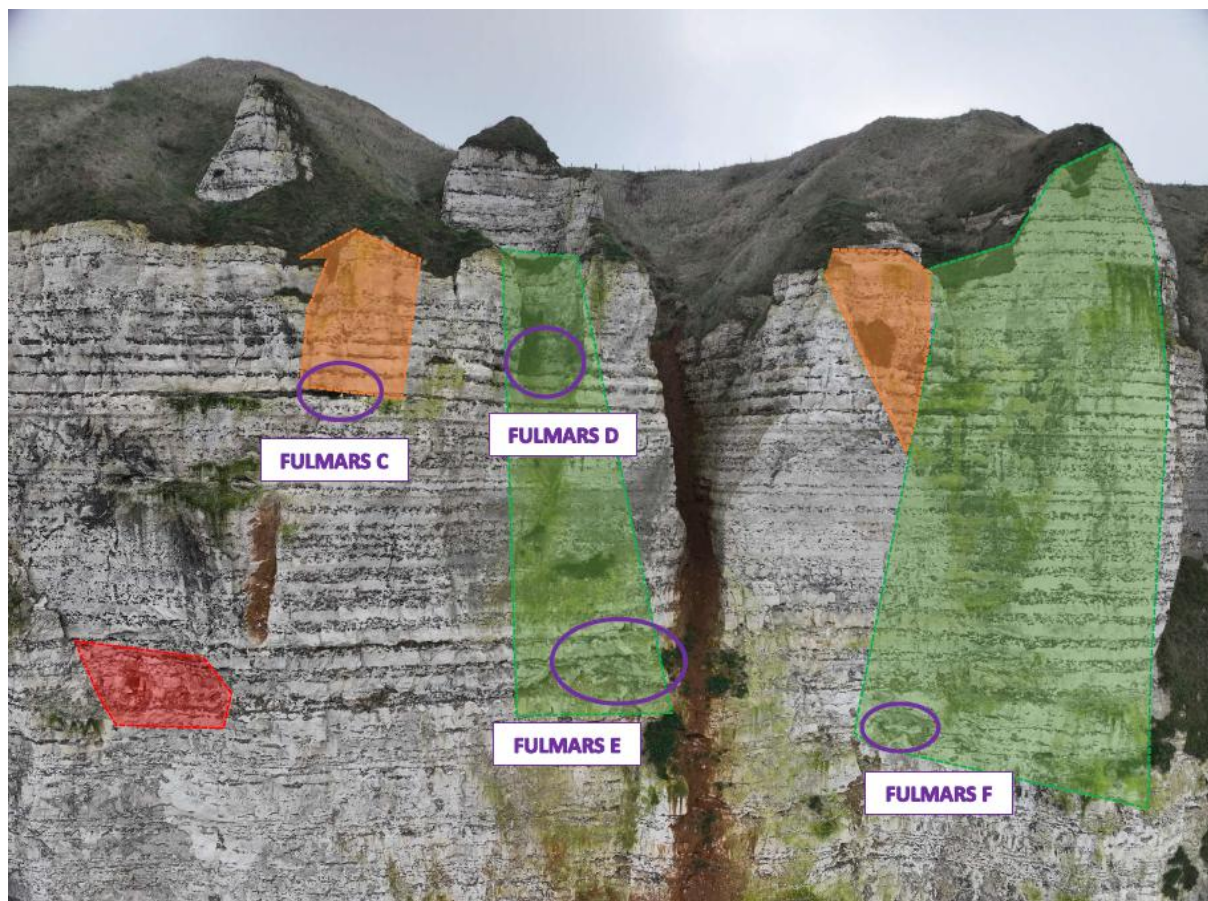


Figure 1. Exemple de cartographie des zones compatibles (en vert) avec des interventions sur corde, des zones pouvant présenter certains risques (orange) où l'intervention sur cordes sera laissée à l'appréciation des opérateurs et des zones très instables à risque élevé (en rouge) à proscrire.

L'accès aux nids se fera par le haut de la falaise, les individus seront capturés à l'aide d'un piège à nœud autour de la patte actionné à proximité du nid (usage d'équipements appropriés pour atteindre les nids - descente/ascension sur corde fixe).

Une fois capturés, les oiseaux seront maintenus dans des pochons opaques, l'obscurité permettant aux oiseaux de se calmer. Une attention particulière est portée sur l'état de santé de l'oiseau. En cas de signe de faiblesse, l'opération est interrompue et des soins adaptés sont portés à l'animal.

1.2.2.2. Pose des balises sur les oiseaux

Les balises GPS seront déployées sur des oiseaux reproducteurs (objectif de 10 individus) ayant la masse minimale prévue pour que le poids de la balise n'excède pas 2 % de la masse totale de l'oiseau.

Lors de la manipulation des oiseaux, les oiseaux sont maintenus dans des sacs en coton opaques. Un capuchon est ensuite utilisé pour le déploiement des balises GPS car la manipulation peut durer plusieurs dizaines de minutes au total (10 min maximum par oiseau).

Les balises seront fixées temporairement sur les plumes dorsales (au milieu du dos afin d'être au plus près du centre de gravité, dans l'axe longitudinal du corps) à l'aide d'un ruban adhésif étanche ©Tesa. Elles se détacheront à la mue des individus.

1.2.3. Données collectées

Les balises GPS seront programmées pour enregistrer la position géographique des individus et

envoyer ces positions à une plateforme de téléchargement via le réseau GSM. Grâce aux panneaux solaires et au téléchargement régulier des données, les balises devraient permettre l'acquisition de données pendant au moins une année, permettant *a minima* de connaître la distribution spatiale des oiseaux reproducteurs pendant la période de reproduction mais également au cours de la dispersion postnuptiale.

Tableau 1. Paramètres collectés.

Informations
Latitude / Longitude
Altitude
Vitesse
Direction
Date / Heure UTC
Heure UTC
Accélération (3 axes)
Température
Batterie (tension, courant de charge)

1.3 Analyse des données

Dans un souci de cohérence à l'échelle des différentes façades maritimes et des différents projets déjà en cours, l'implication du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) concernant l'analyse semble essentielle. Les éléments fournis ci-dessous sont donnés à titre indicatif, les méthodes d'analyse proposées pour identifier l'espace utilisé par les oiseaux sont susceptibles d'évoluer au vu de l'avancée de la recherche dans le domaine.

1.3.1. Analyse globale de la répartition spatiale en mer

L'espace utilisé par les oiseaux peut être caractérisé en déterminant la distribution d'utilisation (UD), c'est-à-dire les distributions de densités de points GPS. Par exemple une densité de 95 % délimite la zone comprenant 95 % des localisations GPS enregistrées. Les UD seront calculées par la méthode du « *biased random bridges* » (Benhamou, 2011²) qui permet de tenir compte de l'autocorrélation spatio-temporelle intrinsèque aux séries longitudinales de données GPS enregistrées à très faible pas de temps (5 min dans notre étude). Des UD populationnelles mensuelles et annuelles seront calculées afin de visualiser la dynamique de l'utilisation de l'espace. Sera utilisé à cet effet le package *adehabitatHR* (Calenge, 2006³) pour le logiciel libre R (R Core Team 2024).

1.3.2. Analyse de la répartition spatiale des différents comportements en mer

Les trois principales phases comportementales seront aussi distinguées lors des trajets en mer des oiseaux, c'est-à-dire le repos, la recherche de proies/nourrissage et le transit. L'identification des trois phases comportementales peut se faire à partir de modèles de Markov cachés (HMM) qui permettent

² <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0014592>

³ <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.03.017>

la segmentation de séries temporelles basées sur la vitesse de l'oiseau et l'angle de rotation entre les points GPS (cf. Morales et al., 2004⁴). Lorsqu'un oiseau marin est en recherche de proies, sa vitesse est variable et sa trajectoire est très sinueuse. Au contraire, pendant les phases de transit, la trajectoire est très rectiligne et la vitesse de déplacement est élevée. En phase de repos, période pendant laquelle l'oiseau est posé sur l'eau et se laisse dériver avec le courant, la trajectoire est également rectiligne mais la vitesse de déplacement est faible ou nulle. Le package momentuHMM (McClintock & Michelot, 2018⁵) pour le logiciel libre R (R Core Team 2024) sera utilisé.

Les distributions d'utilisation (UD) pourront être recalculées uniquement à partir des localisations GPS associées à chaque phase comportementale : repos, recherche de proies/nourrissage et transit.

Les suivis des Fulmars boréaux par balise GPS permettront ainsi :

- De collecter des données GPS relatives à leurs déplacements en mer. Ces données, une fois pré-filtrées et validées, seront mises à disposition, au plus tard 6 mois après leur récupération, sur une base de données en ligne : <http://www.movebank.org/> ;
- De fournir des cartographies précises de leurs déplacements, de leurs zones d'alimentation et de repos, et des couloirs de transits avant et après installation des éoliennes. La production de ces cartes sera réalisée au format ArcGIS – ESRI (.shp et/ou .gdb, mxd) – Système de coordonnées WGS84 ;
- D'identifier les déterminants écologiques de l'utilisation de l'habitat des oiseaux.

⁴ <https://doi.org/10.1890/03-0269>

⁵ <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12995>



DREAL Normandie - MTE

Fécamp Grand Large

FICHE PROTOCOLE

Poissons et autres méga-invertébrés benthiques

Table des matières

Table des matières	1
1. Méthodologie	3
1.1 Objectifs de l'étude des poissons et méga-invertébrés benthiques.....	3
1.2 Principe de l'étude.....	3
1.2.1. Description du protocole	3
1.2.2. Plan d'échantillonnage.....	3
1.2.3. Moyens et Matériels.....	5
1.2.4. Déploiement opérationnel	8
2. Traitement et analyse des données	11
2.1 Traitements des échantillons	11
2.1.1. Ichtyoplancton (œufs et larves).....	11
2.1.2. Espèces benthodémersales (adultes et juvéniles)	12
2.2 Prétraitement des données brutes.....	12
2.3 Indicateurs utilisés.....	12
2.4 Analyses statistiques.....	13
2.5 Interprétation des résultats et visualisation	14

Index des illustrations

Figure 1 : plan d'échantillonnage de l'étude de l'ichtyoplancton dans la zone de Fécamp Grand Large. Les échantillonnages correspondent aux station Z_01 à Z_12, illustrées par des points orange.....	4
Figure 2 : plan d'échantillonnage de l'étude des juvéniles et adultes de poissons et méga-invertébrés benthiques dans la zone de Fécamp Grand Large. Les échantillonnages correspondent aux station Pe_01 à Pe_40, illustrées par des traits blancs.	4
Figure 3 : navire VDC Lynx de la société NORMANDY OFFSHORE SERVICES.	5
Figure 4 : chalutier Gros Loulou (source : MarineTraffic).	6
Figure 5 : chalutier Daniel Auguste II (source : MarineTraffic).	6
Figure 6 : filet Bongo à double collecteur servant au prélèvement de l'ichtyoplancton équipé d'un dépresseur et d'un volucompteur mécanique (Bionef®).	7
Figure 7 : chalut canadien utilisé pour l'étude des espèces benthodémersales.	7
Figure 8 : plan du chalut du Gros Loulou. Chalut 4 faces adapté du chalut "canadien".	8
Figure 9 : mesures des captures (bar européen à gauche et maquereau commun à droite) à l'aide d'un ichtyomètre.....	9
Figure 10 : exemple de représentation graphique des CPUE d'abondance (N/km ²) calculées par station en fonction de la localisation vis-à-vis des futurs parcs éoliens (intérieur / extérieur).....	15
Figure 11 : exemple de représentation graphique de la richesse spécifique recensée par saison dans la zone intérieure (en orange) et dans la zone extérieure (en bleu) au cours des huit campagnes réalisées au chalut canadien de l'été 2022 au printemps 2024.	15

Figure 12 : exemple de représentation graphique d'une analyse multivariée (nmDS) calculée par station en fonction de la localisation dans la zone d'étude au cours des huit campagnes réalisées au chalut canadien de l'été 2022 au printemps 2024..... 16

1. Méthodologie

1.1 Objectifs de l'étude des poissons et méga-invertébrés benthiques

L'objectif principal de l'étude d'état initial est d'identifier la nature des communautés démersales, définie comme les poissons et invertébrés associés au fond marin ou y interagissant régulièrement, et capturables avec un chalut de fond.

Il s'agit d'étudier la composition de ces communautés, leur utilisation des habitats, leur variabilité dans l'espace, et leurs variations saisonnières dans la zone de développement Fécamp Grand Large. Il s'agit aussi de caractériser la structure des peuplements, la fonctionnalité de la zone et l'état de conservation des espèces recensées.

Deux types d'échantillonnage sont programmés pour répondre aux objectifs de l'état initial : des prélèvements d'ichtyoplancton (œufs et larves de poissons) pour la fonction frayère et des prélèvements de poissons et méga-invertébrés benthiques (juvéniles et adultes).

L'ichtyoplancton (œufs et larves de poissons) est également traité dans la fiche protocole du compartiment « Communautés planctoniques ».

1.2 Principe de l'étude

1.2.1. Description du protocole

Le protocole s'inscrit dans une analyse de type *BACI* (*Before-After-Control-Impact*). L'analyse *BACI* est une méthode d'évaluation des impacts environnementaux qui compare les conditions écologiques avant et après une intervention, en intégrant des sites témoins non affectés par cette intervention. Cette approche permet de mesurer les changements dans la composition, l'abondance, la biomasse et la distribution des espèces dus à la présence d'infrastructures maritimes telles que les parcs éoliens.

En incluant des sites témoins, l'analyse *BACI* distingue les effets spécifiques de l'intervention des variations naturelles ou d'autres facteurs environnementaux. Cette méthodologie est particulièrement efficace pour détecter des impacts directs et indirects sur les peuplements, en fournissant une évaluation robuste des conséquences écologiques des projets maritimes

Aussi, les stations sont positionnées le long de différents gradients : côte-large et est-ouest, tout en veillant que leur positionnement soit aussi bien dans la zone de développement éolien qu'à l'extérieur.

1.2.2. Plan d'échantillonnage

Le plan d'échantillonnage de l'ichtyoplancton (œufs et larves de poissons) est présenté dans la **Figure 1**.

Il est composé de 12 stations : six à l'intérieur de la zone rapprochée et six à l'extérieur. Ce plan garantit l'obtention de résultats statistiquement exploitables et extrapolables dans le cadre d'une analyse *BACI*.

Les prélèvements d'ichtyoplancton sont mensuels soit 12 campagnes par an. Elles débuteront en juillet 2025 et dureront deux années. Cette fréquence d'échantillonnage et sa durée permettent d'appréhender les variabilités saisonnières et interannuelles.

Les coefficients de marées de mortes-eaux sont privilégiés afin de permettre des interventions tout au de suivi dans des conditions de marée similaires et comparables.

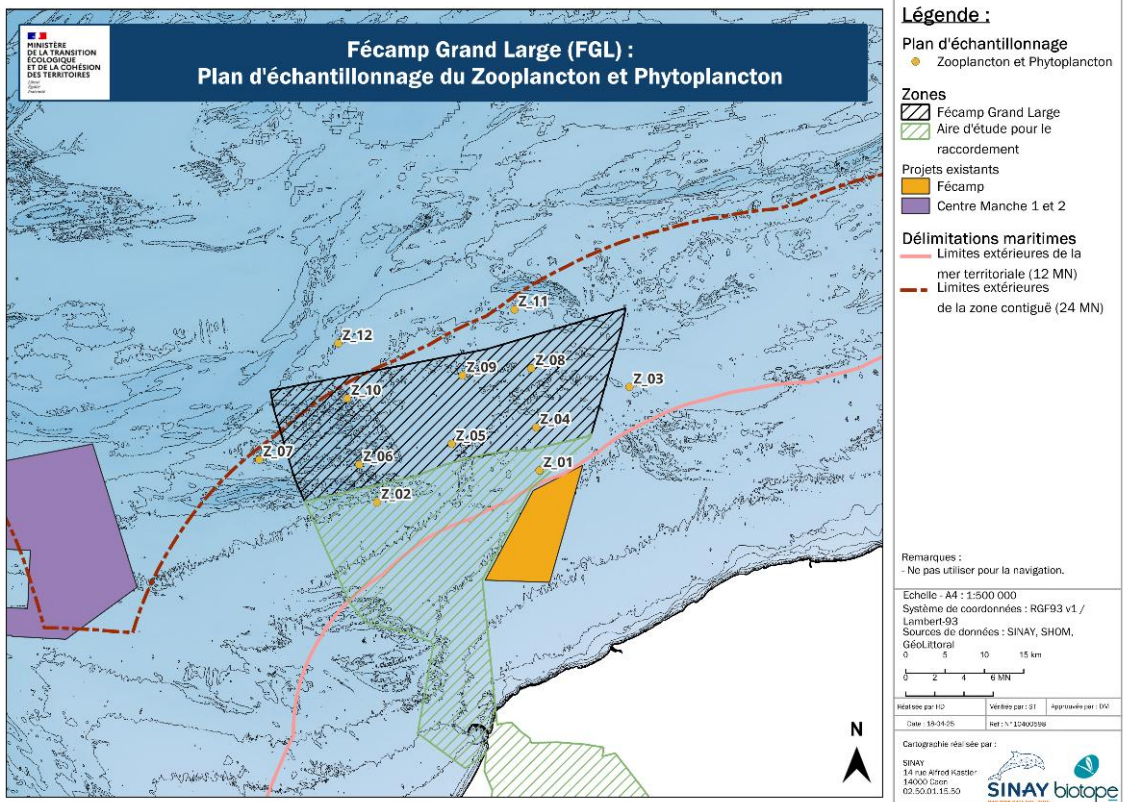


Figure 1 : plan d'échantillonnage de l'étude de l'ichtyoplancton dans la zone de Fécamp Grand Large. Les échantillonnages correspondent aux station Z_01 à Z_12, illustrées par des points orange.

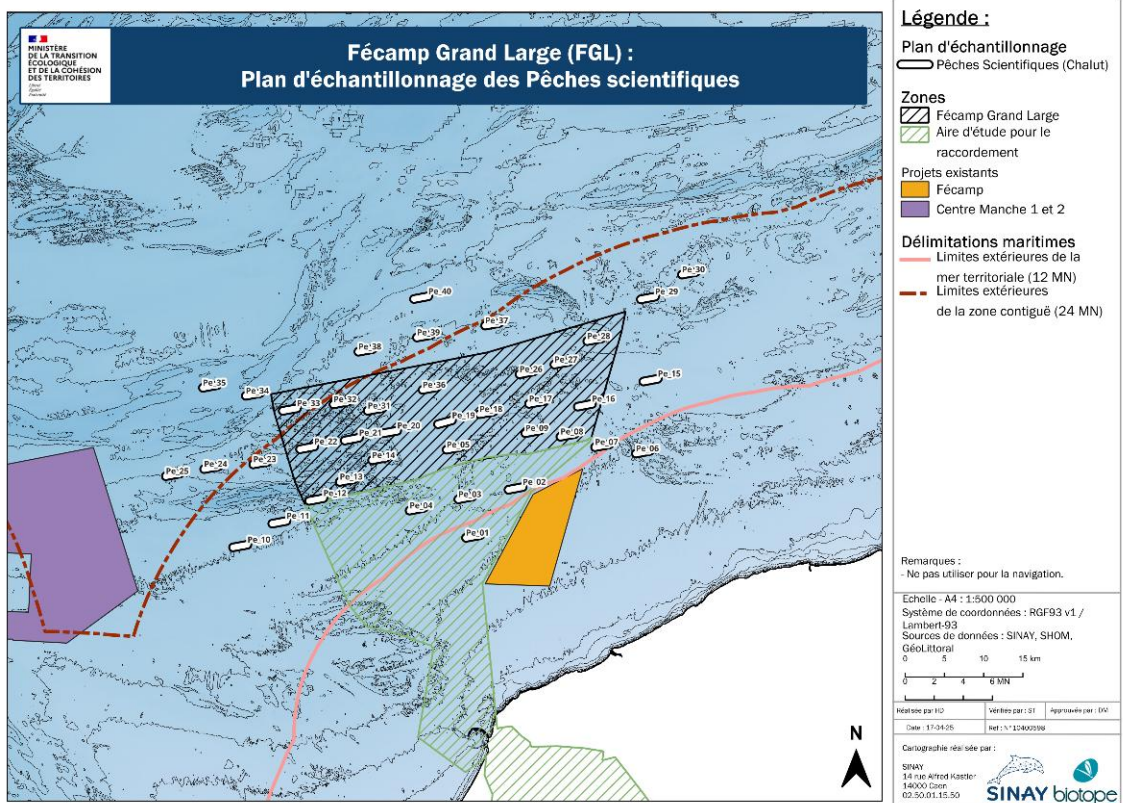


Figure 2 : plan d'échantillonnage de l'étude des juvéniles et adultes de poissons et méga-invertébrés benthiques dans la zone de Fécamp Grand Large. Les échantillonnages correspondent aux station Pe_01 à Pe_40, illustrées par des traits blancs.

Le plan d'échantillonnage des juvéniles et adultes de poissons et méga-invertébrés benthiques est présenté dans la **Figure 2. Il est composé de 40 stations.** Elles sont réparties uniformément dans la zone d'étude, en tenant compte des caractéristiques physiques des fonds meubles, des communautés identifiées, de la bathymétrie, des obstacles éventuels (câbles sous-marins, épaves, obstructions), de la présence de zones d'extraction de granulats marins ainsi que de la localisation des stations des autres compartiments dont les résultats pourront être corrélés à ceux du présent compartiment.

Les campagnes d'échantillonnage des espèces bento-démersales ont lieu une fois par saison (quatre campagnes par an) pendant deux ans afin de saisir les variations saisonnières dans la composition des communautés. Cette fréquence d'échantillonnage est adaptée pour décrire les changements saisonniers dans les assemblages et les comportements spécifiques des espèces présentes.

Les campagnes de prélèvement au chalut de fond ayant lieu de jour ; le nombre de stations envisagé impose des campagnes de plusieurs jours, avec ou sans retour au port pour la nuit. **Les coefficients de marées de mortes-eaux sont privilégiés afin de permettre des interventions dans des conditions de marée comparables.**

1.2.3. Moyens et Matériels

1.2.3.1. Moyens nautiques

Le navire utilisé pour les prélèvements d'ichtyoplancton est le VDC Lynx de la société Normandy Offshore Service (Figure 3).



Figure 3 : navire VDC Lynx de la société NORMANDY OFFSHORE SERVICES.

Ce navire offre une stabilité en mer et possède tous les équipements nécessaires pour les différentes opérations associées aux prélèvements de plancton. La configuration et la capacité du navire sont essentielles pour garantir la précision des prélèvements et la continuité des mesures en mer, quelles que soient les conditions de navigation.

Les conditions limites de mise en œuvre sont les suivantes dans le cadre du suivi de l'ichtyoplancton :

- Vent : inférieur ou égal à 4 Beaufort ;
- État de la mer : mer calme à peu agitée (état de mer à 3).

Pour les prélèvements des juvéniles et adultes de poissons et méga-invertébrés benthiques, les prélèvements se feront à bord du navire Gros Loulou (Figure 4), chalutier de 15,88 m basé à Trouville.



Figure 4 : chalutier Gros Loulou (source : MarineTraffic).

En cas d'avarie sur le bateau, le Daniel-Auguste II, chalutier basé à Dieppe, peut être affrété en remplacement. Ce navire de 15,95 m utilise un engin de dimensions proches de celles du chalut du Gros Loulou (Figure 5).



Figure 5 : chalutier Daniel Auguste II (source : MarineTraffic).

Les conditions limites de mise en œuvre sont les suivantes dans le cadre du suivi des juvéniles et adultes de poissons et méga-invertébrés benthiques :

- Vent : inférieur ou égal à 5 Beaufort ;
- État de la mer : mer calme à agitée (état de mer à 4).

1.2.3.2. Moyens humains

L'échantillonnage de l'ichtyoplancton nécessite trois personnes, en plus de l'équipage du navire VDC Lynx.

Le tri, l'identification, le dénombrement et la mesure des poissons et méga-invertébrés sont réalisés par deux techniciens scientifiques expérimentés et familiers des communautés de l'aire d'étude. Au besoin, l'équipage du navire participe au tri. S'il est enfin constaté que deux techniciens ne suffisent pas à la bonne réalisation du tri et des mesures, que la place à bord est suffisante, il sera envisagé la présence d'un technicien supplémentaire.

1.2.3.3. Matériel de mesure sur le terrain

1.2.3.3.1 Ichtyoplancton (œufs et larves)

L'ichtyoplancton est collecté à l'aide d'un filet Bongo à double collecteur, équipé de deux cadres circulaires, chacun portant un filet conique (Figure 6).



Figure 6 : filet Bongo à double collecteur servant au prélèvement de l'ichtyoplancton équipé d'un dépresseur et d'un volucompteur mécanique (Bionef®).

Ces filets, dont la taille des mailles est adaptée pour capturer efficacement les larves et œufs de poissons (500 μm). Il se terminent par des collecteurs équipés de tamis souples de même maille, garantissant une capture sans endommager les spécimens.

Un volucompteur est placé à l'entrée de chaque filet pour mesurer précisément le volume d'eau filtré, ce qui permet de normaliser les données de densité de plancton en fonction du volume d'eau échantillonné. Un ordinateur de plongée est également fixé au système afin de valider la profondeur et la durée de la plongée de l'engin de prélèvement.

1.2.3.3.2 Espèces benthodémersales (juvéniles et adultes)

Les espèces benthiques et démersales (poissons, mollusques et crustacés) sont prélevées à l'aide d'un chalut de fond à grande ouverture verticale adapté du chalut « canadien », équipé d'une chaussette terminale de maille plus fine (10 mm de côté ou 20 mm étirée) afin de cibler les individus adultes et juvéniles (**Figure 8** et **Figure 7**).



Figure 7 : chalut canadien utilisé pour l'étude des espèces benthodémersales.

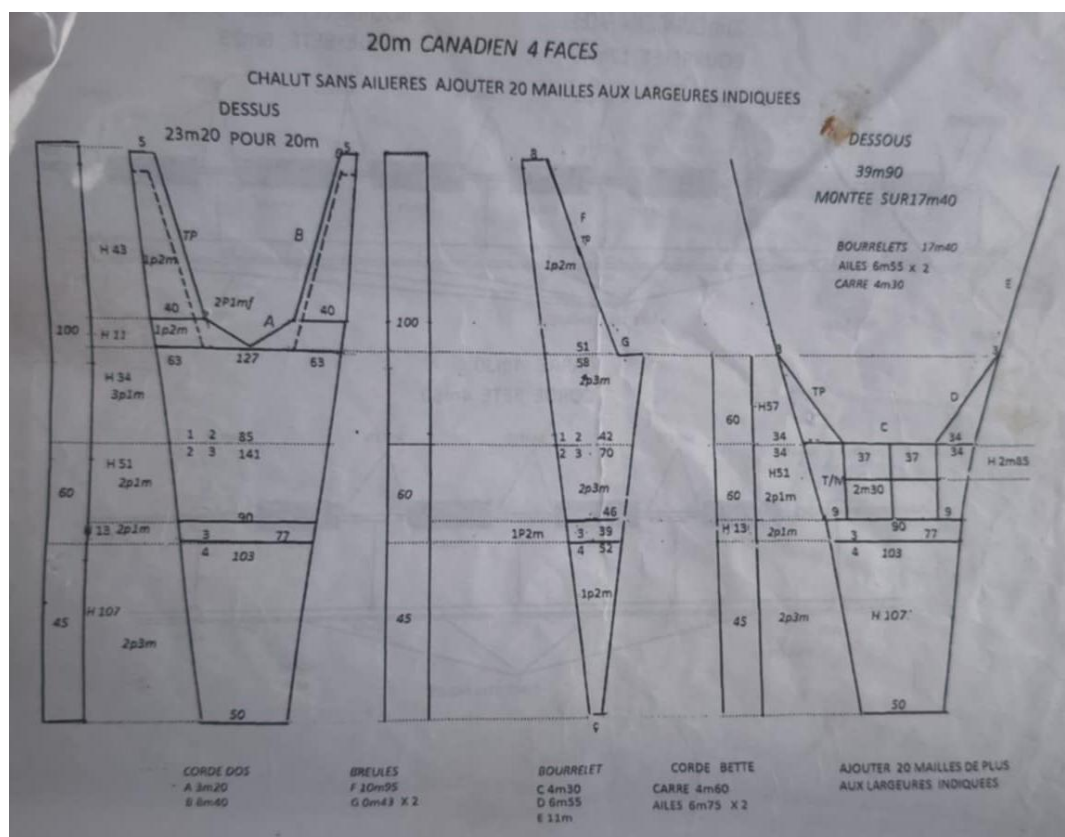


Figure 8 : plan du chalut du Gros Loulou. Chalut 4 faces adapté du chalut "canadien".

Ces engins de pêche professionnelle sont directement fournis par le pêcheur professionnel. Les caractéristiques techniques de chacun de ces engins dépendent donc des navires et des pêcheurs partenaires.

Sinay s'assure que la méthode de pêche pratiquée par le pêcheur associé est homogène sur toute la zone d'étude et que le couple navire/engin ne change pas au cours de l'étude. En cas d'indisponibilité, un autre navire peut être affrété. Dans la mesure du possible, le second navire et son engin ont des caractéristiques identiques ou similaires.

1.2.4. Déploiement opérationnel

1.2.4.1. Ichtyoplancton (œufs et larves)

L'ichtyoplancton est échantillonné à l'échelle de toute la colonne d'eau. Le filet Bongo est descendu au fond avec un lest et remonté progressivement à travers la colonne d'eau à une vitesse comprise entre deux et trois nœuds face au courant dominant.

Les échantillons prélevés sont passés au tamis de 500 µm après un rinçage de chaque filet par l'extérieur avec l'eau de mer afin de concentrer les échantillons dans les collecteurs sans perte de matériel.

Les échantillons sont conservés dans une solution d'eau de mer à 4 % de formaldéhyde tamponnée avec du borate de sodium et du chlorure de strontium ou du tétraborate de sodium. Le formaldéhyde agit en se liant aux protéines tissulaires, stabilisant ainsi les structures cellulaires, empêchant les réactions ultérieures avec d'autres agents chimiques et limitant les biais d'identification en laboratoire.

Des flacons, en général d'un volume de 500 mL (et au minimum de 250 mL), et de préférence à col large sont utilisés pour faciliter le remplissage sur le terrain. Les flacons peuvent resservir à condition d'être lavés précautionneusement après chaque campagne. Ils peuvent être en polyéthylène (PE), polypropylène (PP) ou en chlorure de polyvinyle (PVC). Il est recommandé d'appliquer du parafilm autour

du col et du filetage du flacon avant de le fermer à l'aide du bouchon, afin de limiter les risques de fuite. Les échantillons peuvent ensuite être conservés à température ambiante et à l'obscurité.

L'ensemble des échantillons est transmis au laboratoire partenaire (POS3IDON) à la fin de chaque campagne dans un délai maximal de deux semaines. Les échantillons biologiques ainsi fixés au formaldéhyde ne nécessitent pas de point de vigilance particulier et seront conservés à l'abri de la lumière, à température ambiante.

1.2.4.2. Espèces benthodémersales (juvéniles et adultes)

La vitesse de traîne du chalut canadien est comprise entre trois et quatre nœuds et la durée d'un trait est fixée à 20 minutes, soit une distance chalutée d'environ un mille nautique ; le trait est effectué en sens inverse du courant dominant. Le trait démarre lorsque les funes sont freinées et s'arrête lorsque démarre leur enroulage. Le trait est valide si aucun événement impactant n'entrave la tenue de celui-ci : croche, avarie, déviation de trajectoire (liste non-exhaustive).

Les métadonnées associées à chaque campagne et à chaque trait sont soigneusement consignées.

- Les conditions météo-océaniques et de marée ;
- Les heures et positions GPS de filage, de virage ;
- La trace est enregistrée sur un traceur GPS ;
- Le personnel intervenant (scientifiques et équipage) ;
- Tout événement notable lors des opérations.

À l'issue de chaque trait, si celui-ci est considéré comme valide, la capture est déversée sur le pont ou une table de tri. Le tri est effectué par espèce pour l'ensemble de la capture. La détermination des espèces est réalisée de façon systématique à l'aide des guides de référence (Garren, 2020; Iglésias, 2020; Quéro, 2003). L'identification est validée sur le terrain par les personnes présentes ; des photographies détaillées permettent de confirmer l'identification *a posteriori* par des tiers, membres de l'équipe de spécialistes Sinay.

Après le tri, le poids total de chaque espèce est mesuré à l'aide d'une balance (EXA 31-SP, capacité 30 kg, précision 10 g) ou d'un dynamomètre à ressort (plusieurs capacités à disposition : 2, 5, 10 et 25 kg). Les mesures biométriques sont réalisées avec un ichtyomètre gradué (poissons et céphalopodes) ou d'un pied à coulisse électronique (crustacés et coquillages) selon les préconisations du guide de la mensuration élaboré par l'Ifremer (Badts, 2024) (**Figure 9**).



Figure 9 : mesures des captures (bar européen à gauche et maquereau commun à droite) à l'aide d'un ichtyomètre.

Certaines espèces doivent être séparées par sexe (chondrichthyens et crustacés).

Tous les individus de chaque espèce sont mesurés dans la limite de 30 individus ; au-delà, un sous-échantillon de 30 individus est constitué. Lorsqu'un sous-échantillon est fait, le poids total et nombre total de l'espèce (ou catégorie d'une espèce, cf. ci-dessous) sont systématiquement enregistrés.

Si pour une même espèce la répartition en taille des individus semble visuellement plurimodale, afin d'avoir une représentativité des possibles cohortes, un tri en catégories de taille est effectué à bord et la mesure considère chaque catégorie séparément.

Les individus n'ayant pu être identifiés sont conservés en glace et ramenés en laboratoire dans des glacières pour une identification ultérieure.

Ces opérations d'identification, de tri, de mesures sont réalisées par des techniciens scientifiques qualifiés et expérimentés. De formation scientifique universitaires, les techniciens sont tous formés aux protocoles d'observation halieutiques. Ils ont également suivi la formation d'identification des poissons du Dr. Iglesias à la station marine du MNHN à Concarneau.

2. Traitement et analyse des données

2.1 Traitements des échantillons

2.1.1. Ichtyoplancton (œufs et larves)

Les échantillons d'ichtyoplancton sont analysés afin de réaliser une identification taxonomique et un dénombrement spécifique par station. Cette analyse est réalisée à la loupe binoculaire par des spécialistes en identification zooplanctonique (Sacha Albert de POS3IDON).

L'analyse taxonomique à la loupe binoculaire est la méthode de référence en écologie marine pour l'identification des organismes zooplanctoniques. Grâce à l'observation directe et tridimensionnelle des spécimens, cette méthode permet d'exploiter l'ensemble des caractères morphologiques essentiels à la détermination taxonomique fine. En particulier, la loupe binoculaire autorise la reconnaissance :

- Des traits morphologiques subtils tels que la segmentation, la forme et la structure des appendices, la disposition des soies ou épines ;
- Des caractères microscopiques (notamment à fort grossissement) qui sont souvent indispensables pour différencier espèces proches ou cryptiques ;
- Des stades de développement (larves, juvéniles, adultes) qui peuvent présenter des morphologies très variables.

L'expertise de l'opérateur est ici primordiale : le taxonomiste responsable de l'identification est formé et expérimenté peut parvenir à une identification jusqu'au niveau spécifique dans certains cas.

L'analyse manuelle à la loupe binoculaire excelle dans la détection des organismes rares, transparents, ou morphologiquement discrets. Grâce à la capacité d'ajustement de la lumière, du grossissement, et à la manipulation directe de l'échantillon, le taxonomiste peut :

- Détecter et isoler des organismes présents à de très faibles densités ;
- Observer des spécimens endommagés ou partiellement dégradés ;
- Reconnaître des organismes présentant un faible contraste avec le fond ou la matrice ;
- Analyser des taxons peu représentés ou difficiles à identifier, notamment dans les groupes micro-zooplanctoniques (rotifères, foraminifères, larves planctoniques).

Cette capacité est cruciale dans les études de biodiversité fine, l'évaluation de communautés sensibles à la pollution, ou la détection d'espèces bioindicatrices rares.

À l'issue d'un rinçage à l'eau douce sur un tamis de 500 µm, effectué sous hotte à extraction, un premier tri taxonomique est réalisé afin de dissocier l'ichtyoplancton des autres composantes du zooplancton. Cette étape s'effectue sous stéréomicroscope (Leica MZ125 ou Leica M205C, avec éclairages transmis et réfléchi), en diluant progressivement l'échantillon dans de l'eau douce puis en le transférant par fractions successives dans des chambres de comptage de type Bogorov.

L'ichtyoplancton est isolé à l'aide d'une pince à dissection fine et pointue pour les larves et d'une pince capsulaire Arruga, particulièrement adaptée à la manipulation des œufs, dont les structures sont très fragiles. Les individus prélevés sont ensuite déposés dans une coupelle en verre en vue de leur identification.

Une fois isolés du reste du zooplancton, les œufs et larves ichtyoplanctoniques sont triés en fonction de leurs morphotypes, puis photographiés à l'aide de caméras couleur (Optika C-B5 et Flexacam C3) couplées aux stéréomicroscopes Leica MZ125 et Leica M205C. L'acquisition des images est réalisée via le logiciel PROVIEW, qui permet une visualisation en temps réel. La discrimination des œufs selon leur

morphotype repose principalement sur les critères morphologiques décrits par (Ahlistorm & Moser, 1980; Crec'hriou et al., 2015; Marinaro, 1991; Matarese & Sandknop, 1984) notamment :

- La forme générale et le diamètre de l'œuf, ;
- Le nombre et le diamètre des globules huileux.
- L'aspect du vitellus, ainsi que l'espace périvitellin, défini comme la distance entre le chorion et le vitellus.

L'identification spécifique des œufs demeure souvent limitée, en raison de la similarité des caractéristiques morphologiques entre plusieurs espèces.

Les stades de développement des œufs, de I à V, sont définis selon les descriptions (Simpson, 1959) et (Thompson, 1981), en s'appuyant sur les illustrations de (Apstein, 1909). Concernant les larves, l'identification taxonomique s'appuie principalement sur des critères morphologiques et pigmentaires, conformément aux descriptions de (Rodríguez et al., 2017). D'autres guides de référence sont mobilisés, qu'ils soient généralistes ou spécifiques à la Méditerranée ou à l'Atlantique, à certains ordres ou familles (Fahay, 1983; Oz et al., 2022; Richards, 2005; Rodriguez, 2023; Rodríguez et al., 2016).

Les principaux critères utilisés incluent : la morphologie générale du corps larvaire, les motifs de pigmentation, le nombre de myomères, le nombre, la forme et la disposition des nageoires, la présence de structures épineuses au niveau des opercules, la forme de l'œil, ainsi que la forme de la mâchoire et la présence éventuelle de dents caractéristiques.

2.1.2. Espèces benthodémersales (adultes et juvéniles)

Les individus n'ayant pas pu être identifiés à bord sont décongelés, puis identifiés à l'aide d'une loupe binoculaire et de guides de référence naturalistes.

2.2 Prétraitement des données brutes

Les données brutes acquises lors des campagnes de terrain sont compilées dans une base de données relationnelle dans laquelle un tableau comprend des lignes correspondant à des observations et des colonnes correspondant à des variables, suivant les normes modernes de traitement des données.

Les métadonnées correspondant aux paramètres de chaque opération de prélèvement (exemple : position géographique, profondeur mesurée, heure, vitesse de chalutage) sont stockées dans un second tableau. La jointure entre ces deux tableaux est réalisée à l'aide d'un identifiant unique attribué à chaque échantillon.

Ce prétraitement est appliqué aux données des campagnes de prélèvements d'ichtyoplancton ; et des juvéniles et adultes de poissons et méga-invertébrés benthiques.

2.3 Indicateurs utilisés

Les indicateurs suivants sont déterminés :

- **Richesse spécifique (S) :**

C'est la mesure de la diversité la plus simple, fondée sur le nombre total d'espèces observées pour un échantillon donné. Elle permet également de distinguer des hétérogénéités spatiales et des variations temporelles

- **Diversité spécifique (H) à Indice de Shannon (H') :**

L'indice de Shannon permet de donner un poids aux différentes espèces en fonction de leur abondance ou leur biomasse. Ainsi il reflète plus justement la diversité d'un échantillon que la richesse spécifique simple. Cet indice est la base de calcul de l'équitabilité.

Indice de Shannon calculé sur la base des effectifs :

$$H'_N = - \sum_{i=1}^S \frac{n_i}{N} \times \log_2 \frac{n_i}{N}$$

- **Équitabilité spécifique (J) :**

L'indice d'équitabilité de Piélou dérive de l'indice de diversité et renseigne sur la distribution du nombre d'individus (ou de la biomasse) par espèce ; il est le rapport entre la diversité spécifique et la diversité maximale théorique.

$$J = \frac{H'}{H_{max}} \quad \text{avec } H_{max} = \log_2 S$$

La valeur de J varie entre 0 et 1, tendant vers 0 quand la quasi-totalité des effectifs est concentrée sur une espèce ; elle est de 1 lorsque toutes les espèces ont la même abondance. L'indice de l'équitabilité détermine soit le rapprochement soit l'éloignement entre H' et Hmax. Cet aspect est indicateur de la diversité, en raison du rapprochement ou de l'éloignement d'indice de diversité de la valeur 1.

- **Fréquence d'occurrence :**

Ce descripteur permet d'identifier le nombre de fois qu'une espèce est identifiée dans l'échantillon. E_i correspond au nombre de fois qu'une espèce a été observée dans un nombre N de prélèvements. FO est la fréquence des observations de l'espèce E dans un nombre N de prélèvements. Si une espèce est observée à toutes les stations, FO = 1 (ou 100%).

$$FO = 100 \times \frac{E_i}{N}$$

- **Captures par unité d'effort (CPUE) :**

Les effectifs et biomasses brutes ne permettent pas, tels quels, de comparer les stations entre elles. En effet, l'effort d'échantillonnage n'est pas le même selon les campagnes, missions, voire les stations. Il est donc nécessaire de pondérer les données brutes avec les moyens mis en œuvre pour les obtenir. Les CPUE sont calculées pour chaque espèce et station à partir des effectifs et biomasses.

Le calcul des CPUE est différent en fonction de la technique de collecte utilisée. Les CPUE suivantes ont été retenues pour cette étude : **N / km²** et **kg / km²**.

2.4 Analyses statistiques

Les tests statistiques réalisés sont classiquement appliqués dans ce type d'études (Ifremer, 2011; Legendre & Legendre, 2012). Les tests ou les représentations graphiques pouvant évoluer selon les données récoltées, les résultats obtenus ou la problématique à aborder.

Les moyennes d'abondance, biomasse, et diversité entre zones et entre missions sont comparées au moyen de tests non-paramétriques de Kruskal-Wallis, et comparaisons par paires avec tests de Mann-Whitney avec correction post-hoc de Bonferroni.

Les variables sont comparées en considérant les facteurs zone (contrôle et impact) et période (année, saison). Aucun équivalent non-paramétrique multifactoriel n'étant disponible, un premier test ANOVA à deux facteurs (*two-way ANOVA* dans le texte) est réalisé pour chaque variable. Les comparaisons par paires *a posteriori* sont réalisées avec tests de Tukey. Ces tests sont également utilisés dans le cadre de l'étude monospécifique (par espèce).

Pour chaque type de campagne, une analyse multivariée sous la forme d'un positionnement multi-dimensionnel non-métrique (*nMDS*) est réalisée. Cette analyse a pour objectif de synthétiser au mieux la variance totale de la matrice de distance (Bray-Curtis). Sa représentation est un graphique qui montre la

position des « individus » (ici, chaque échantillon) dans un plan composé de deux axes. Une série de variables environnementales, obtenues des échantillonnages de la qualité de l'eau, est ajustée à l'ordination par *nMDS*. L'approche employée est une série de *GAM* (un pour chaque variable, prise en compte séparément), et vise à obtenir la meilleure corrélation entre les vecteurs environnementales et les projections des points (stations) dans l'espace bi-dimensionnel.

2.5 Interprétation des résultats et visualisation

Les résultats obtenus sont discutés à la lumière de l'écologie connue des communautés étudiées et remis en contexte à travers des retours d'expérience disponibles. Les résultats sont interprétés en tenant compte des connaissances existantes et des données disponibles pour la région, provenant de recensements antérieurs et de la littérature scientifique. Les résultats sont également soumis à validation de la part des experts en biologie marine, ce qui permet d'éviter des résultats incohérents au niveau écologique.

En particulier, les méthodes sélectionnées permettent des comparaisons avec les données relatives aux autres projets de parc éolien en Manche et issues des grands programmes de développement des connaissances tels que CHARM II.

Un lien sera également recherché entre les résultats observés sur l'ichtyoplancton (œufs et larves par espèces) et les individus à maturité sexuelle échantillonnés au chalut.

Les résultats des différentes analyses sont représentés sous forme de tableaux, graphiques ou cartographies afin de fournir une base visuelle et quantitative pour évaluer les dynamiques des communautés dans la zone d'étude.

Les **Figure 10** à **Figure 12** présentent des exemples de visualisation des résultats pour les poissons et méga-invertébrés benthiques :

- **Figure 10** : exemple de représentation graphique des CPUE d'abondance (N/km^2) pour les poissons et méga-invertébrés benthiques ;
- **Figure 11** : exemple de représentation graphique de la richesse spécifique pour les poissons et méga-invertébrés benthiques ;
- **Figure 12** : exemple de représentation d'analyses multivariée (*nMDS*) pour les poissons et méga-invertébrés benthiques.

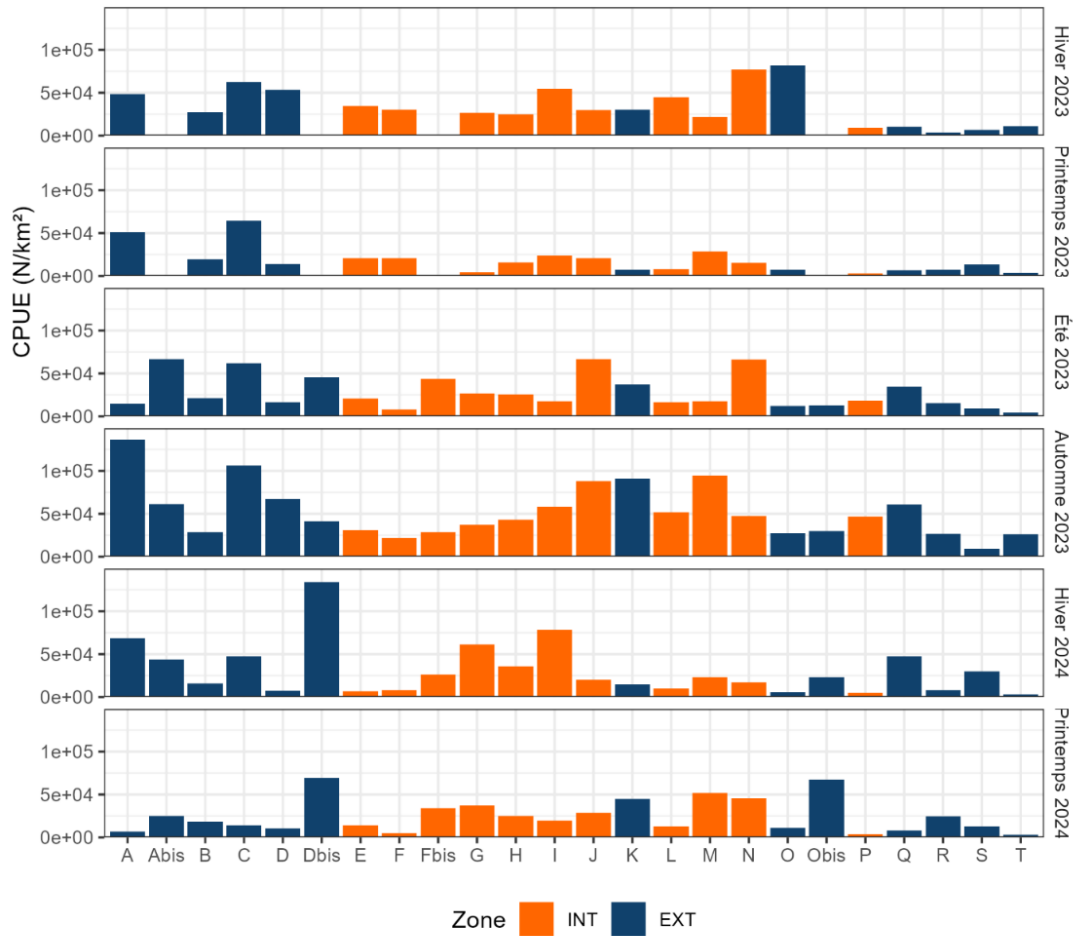


Figure 10 : exemple de représentation graphique des CPUE d'abondance (N/km²) calculées par station en fonction de la localisation vis-à-vis des futurs parcs éoliens (intérieur / extérieur).

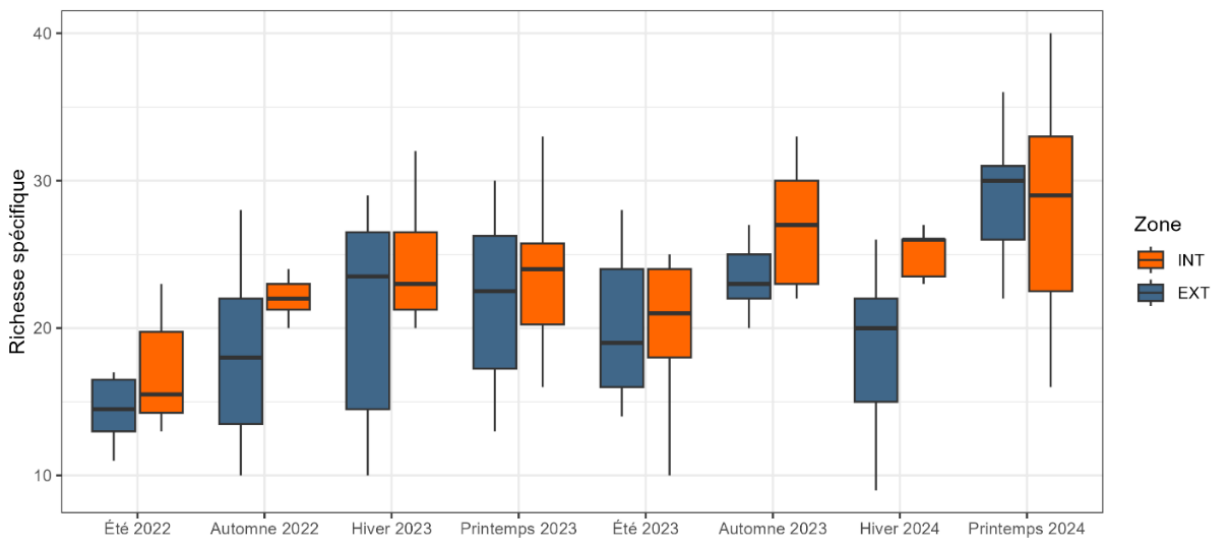


Figure 11 : exemple de représentation graphique de la richesse spécifique recensée par saison dans la zone intérieure (en orange) et dans la zone extérieure (en bleu) au cours des campagnes réalisées au chalut canadien de l'été 2022 au printemps 2024.

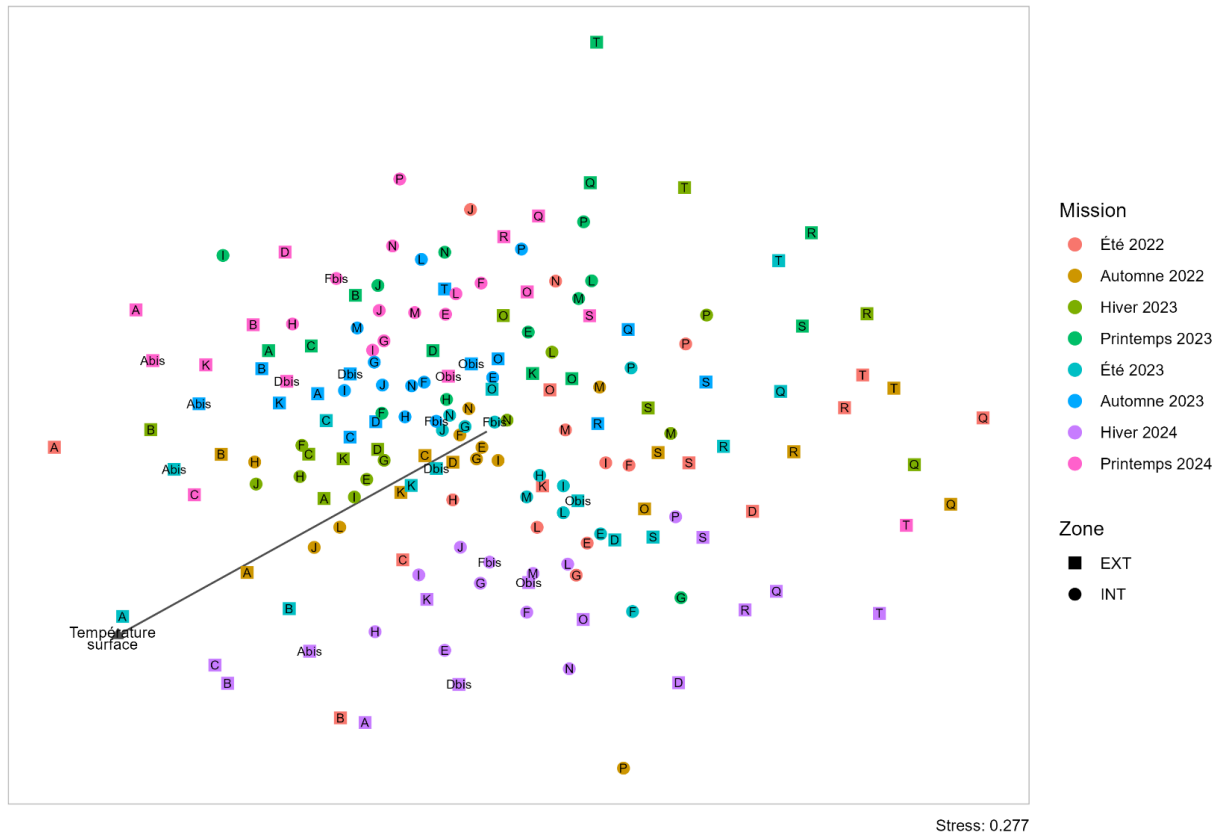


Figure 12 : exemple de représentation graphique d'une analyse multivariée (nmms) calculée par station en fonction de la localisation dans la zone d'étude au cours des huit campagnes réalisées au chalut canadien de l'été 2022 au printemps 2024.



DREAL Normandie - MTE

Fécamp Grand Large

FICHE PROTOCOLE

Bruit ambiant aérien

Table des matières

FICHE PROTOCOLE	1
Bruit ambiant aérien	1
Table des matières	2
1. Méthodologie	3
1.1 Objectifs du suivi de bruit ambiant aérien	3
1.2 Principes du suivi	3
1.2.1. Description du protocole	3
1.2.2. Plan d'échantillonnage	4
1.2.3. Moyens et Matériels	5
1.3 Données collectées	6
2. Traitement et analyse des données	7
2.1 Prétraitement des données brutes	7
2.2 Techniques d'analyses	7
2.3 Interprétation des résultats et visualisation	7

Index des illustrations

Figure 1 : exemple de sonomètre et station météorologique déployés pour l'étude du bruit ambiant aérien dans le cadre du parc éolien Centre-Manche. Déploiement en toiture terrasse de la capitainerie du port d'Antifer – Saint-Jouin Bruneval (76).....	6
---	---

1. Méthodologie

1.1 Objectifs du suivi de bruit ambiant aérien

La caractérisation de l'état initial du bruit ambiant aérien permet de saisir les niveaux sonores avant l'implantation des infrastructures et de poser les bases pour définir les mesures de réduction qui s'imposeront, notamment pendant les phases de construction. Le bruit aérien, bien que relativement limité dans un environnement offshore, constitue un enjeu important pour les zones côtières habitées, où des travaux intenses peuvent temporairement augmenter le niveau sonore perçu.

Les enjeux de ce compartiment se déclinent autour des points suivants :

- **Protection de la tranquillité publique dans les zones côtières habitées** : les travaux de construction peuvent causer des nuisances pour les riverains. Les réglementations nationales, comme le décret n° 2006-1099 du 31 août 2006, et les arrêtés municipaux sur les "bruits de voisinage", sont conçus pour limiter les nuisances liées aux chantiers. Leur application vise à réduire les risques de perturbations sonores qui pourraient affecter la qualité de vie des populations résidentes à proximité.
- **Ecosystèmes littoraux sensibles** : outre l'impact sur les résidents, le bruit aérien pourrait, selon sa portée, influencer certains habitats sensibles, notamment sur les littoraux et les zones de nidification d'oiseaux. Bien que ces impacts soient généralement moins prononcés pour le bruit aérien que pour le bruit sous-marin, l'analyse des variations saisonnières et diurnes du bruit permet d'anticiper d'éventuelles perturbations pour la faune terrestre et aviaire.

L'objectif principal est de mesurer le bruit ambiant aérien (jour et nuit) au niveau des stations proches d'habitation.

En établissant une référence détaillée des niveaux de bruit ambiant, cette étude sert de base solide pour préparer les phases d'évaluation des impacts potentiels et pour définir des mesures de réduction et des programmes de suivi. Pour cela, l'objectif est :

- **Caractériser l'état initial du bruit ambiant aérien** dans les zones côtières proches du projet de parc éolien, afin d'établir une référence des niveaux sonores dans diverses conditions (jour/nuit, saison) en fonction des directions de vent dominantes. En particulier :
 - Établir une référence des niveaux sonores dans les zones côtières proches du projet de parc éolien.
 - Réaliser des mesures sur différentes conditions temporelles (jour/nuit, saisons).
 - Corréler les données sonores avec les variations de conditions météorologiques (vent, humidité).
 - Identifier les zones résidentielles et écologiquement sensibles.

1.2 Principes du suivi

1.2.1. Description du protocole

La méthodologie générale pour l'acquisition du bruit ambiant aérien repose sur des mesures normées (NF S 31-010 et NF EN 61672-1) réalisées à l'aide de sonomètres de Classe 1 configurés pour enregistrer en bandes d'octaves (63 Hz à 8 000 Hz). La disposition des stations de mesure sur un plan BACI (Green, 1979), avec des points de mesure prévus dans des zones considérées comme potentiellement impactées et des site témoin.

Les stations sont implantées dans des emplacements stratégiquement définis pour garantir une représentativité optimale des conditions acoustiques locales. Elles sont équipées de microphones

associés à des dispositifs météorologiques, assurant une collecte continue. Cette collecte est maintenue par des systèmes autonomes alimentés par panneaux solaires et batteries de secours. Avant analyse, les données sont prétraitées pour éliminer les anomalies météorologiques et les bruits parasites, garantissant des enregistrements fiables et représentatifs des conditions acoustiques locales.

1.2.1.1. Etapes

Les principales étapes de ce protocole incluent :

- **Une sélection et une préparation des points de mesure** : les emplacements sont choisis en fonction de leur proximité aux zones habitées et sensibles, et en tenant compte de l'exposition au bruit des secteurs résidentiels. Une réunion préliminaire avec la maîtrise d'ouvrage valide ces points, afin de garantir une couverture complète des zones d'intérêt.
- **Une installation des équipements de mesure** : des sonomètres de Classe 1 sont placés sur les points de mesure identifiés. Ils enregistrent les niveaux sonores de manière continue, en bandes de tiers d'octaves et en niveau global (LAeq, T). Les enregistrements sont effectués de jour comme de nuit pour observer les variations temporelles.
- **Une suivi des paramètres météorologiques** : la propagation du son étant influencée par le vent, la température et l'humidité, des stations météorologiques sont installées sur chaque site de mesure pour collecter ces données en continu. Ces relevés sont cruciaux pour corrélérer les niveaux sonores enregistrés avec les conditions météorologiques, permettant ainsi une analyse plus précise des variations observées.

En complément, une écoute active est réalisée durant les phases d'installation et de maintenance, permettant de contextualiser les données enregistrées et d'identifier les sources sonores dominantes.

1.2.1.2. Adaptations des protocoles en fonction des Retex et spécificités locales

Des adaptations sont intégrées aux protocoles de mesure, sur la base des retours d'expérience (Retex) des études antérieures en milieu offshore, notamment Centre-Manche où le cabinet ORFÉA a réalisé l'état initial du bruit ambiant aérien. En cohérence avec l'étude sur le parc Centre-Manche, le type d'adaptation envisagées est le suivant.

- **Corrélation des niveaux sonores avec le vent** : inspirée des pratiques des parcs éoliens terrestres, cette adaptation vise à placer les sonomètres pour analyser les niveaux sonores en fonction de la direction et de la vitesse du vent. La méthode consiste à diviser les données selon les catégories de vent (dominant, secondaire) et à appliquer des filtres pour éviter les données faussées par des conditions extrêmes de vent ou de pluie.
- **Périodes saisonnières et de jour/nuit** : les variations saisonnières, comme les migrations d'espèces ou les périodes touristiques, influencent le niveau de bruit de fond et nécessitent des mesures régulières et adaptées selon ces périodes. La fréquence d'échantillonnage est bisannuelle (été/hiver) pour intégrer les spécificités saisonnières et les différences jour/nuit.
- **Zones à forte sensibilité sonore** : pour les emplacements situés dans des zones particulièrement sensibles (habitats d'oiseaux nicheurs ou zones résidentielles denses par exemple), des campagnes de mesure supplémentaires sont planifiées. Cela permet de garantir une précision accrue pour les secteurs à forts enjeux.

1.2.2. Plan d'échantillonnage

Le plan d'échantillonnage est conçu pour couvrir les périodes représentatives de l'année, en prenant en compte la variabilité temporelle et spatiale des niveaux sonores. Il se structure ainsi :

- **Périodes de mesure** : la campagne de mesure de 6 mois est prévue en période hivernale et végétatif (printemps, été). La période envisagée se situe entre septembre et mars. Des relevés sont réalisés en continu sur les périodes jour/nuit, pour capter les variations de l'activité sonore.
- **Échantillonnage spatial** : les points de mesure sont répartis en fonction des spécificités locales : ils couvrent les zones d'habitation côtière, les sites écologiquement sensibles (dans un environnement éloigné des perturbations anthropiques, comme les habitats d'oiseaux nicheurs), et un site en élévation (ex. phare ou capitainerie) pour minimiser les interférences locales et obtenir une perspective dégagée des niveaux sonores. Chaque site de mesure est équipé pour enregistrer les données acoustiques et météorologiques, garantissant une vue d'ensemble complète et continue.

Il est envisagé 3 stations de mesures couvrant l'ensemble du littoral pouvant être affecté par le positionnement du parc de Fécamp Grand Large/ Soit entre le Cap de la Hève et la pointe de Sotteville. Leurs localisations précises seront déterminées après avoir trouvé les emplacements répondant aux critères de l'étude et obtenus les autorisations de pose des stations.

- **Fréquence et durée des campagnes** : une campagne de 6 mois comprenant la période hivernale et végétatif, couvrant les cycles jour/nuit pour refléter les variations temporelles.

1.2.3. Moyens et Matériels

1.2.3.1. Moyens humains

Les sonomètres et stations météorologiques sont déployés aux points de mesure par deux personnes. Les stations sont fixées sur des supports stables et ajustées pour éviter toute interférence sonore non représentative de l'environnement (vibrations de surface, zones de forte réverbération sonore, etc.).

Les appareils sont alimentés de manière autonome grâce à des batteries et des panneaux solaires, assurant une collecte de données continue, même en zones sans alimentation électrique. Un système de batteries de secours garantit que les appareils restent opérationnels en cas de conditions météorologiques défavorables.

Lors de l'installation et des visites périodiques, les acousticiens effectuent une écoute active sur chaque site pour identifier les principales sources sonores en temps réel et confirmer la représentativité des données collectées. Ces visites permettent également de vérifier l'état des appareils, de récupérer les données stockées et de remplacer les batteries si nécessaire.

1.2.3.2. Matériel de mesure sur le terrain

1.2.3.2.1 Sonomètres

Les sonomètres de Classe 1 (**Figure 1**) sont utilisés pour enregistrer les niveaux sonores ambiants de jour et de nuit. Les sonomètres de Classe 1 répondent aux exigences de la norme NF EN 61672-1, garantissant ainsi une exactitude maximale dans les relevés. Ces appareils sont capables de capturer des mesures en bande de fréquence d'octave ou de tiers d'octave (de 63 à 8 000 Hz), permettant une analyse détaillée de la signature acoustique des sources de bruit environnantes.

Des microphones spécialisés sont montés sur des trépieds pour garantir leur stabilité et sont équipés de protections anti-vent et anti-intempéries. Ils capturent des données en temps réel, fournissant une lecture précise des niveaux sonores. Les sonomètres sont configurés pour des mesures en continu, offrant un enregistrement détaillé des variations sonores diurnes et nocturnes.

1.2.3.2.2 Station météorologiques

Étant donné que les paramètres météorologiques influencent fortement la propagation du bruit, des stations météorologiques (**Figure 1**) sont déployées aux côtés des sonomètres. Ces stations mesurent en continu la vitesse et la direction du vent, l'humidité, et la température, permettant de contextualiser les données acoustiques et d'ajuster les analyses pour isoler les variations liées aux conditions climatiques.

Des anémomètres (**Figure 1**) sont installés en complément des sonomètres. Ils mesurent la vitesse et la direction du vent en chaque point de mesure. Ces appareils assurent une prise de données météorologiques locales, en complément des données recueillies par les stations Météo-France. La corrélation entre les données acoustiques et météorologiques est ainsi facilitée.



Figure 1 : exemple de sonomètre et station météorologique déployés pour l'étude du bruit ambiant aérien dans le cadre du parc éolien Centre-Manche. Déploiement en toiture terrasse de la capitainerie du port d'Antifer – Saint-Jouin Bruneval (76).

1.3 Données collectées

Les données collectées par les sonomètres seront le niveau de pression et de niveau équivalent selon la pondération A en global et en bande d'octave avec une durée d'intégration de 1 seconde.

La station météorologique permet de relever la vitesse et la direction du vent au niveau d'un point de mesure acoustique.

2. Traitement et analyse des données

2.1 Prétraitement des données brutes

Le prétraitement des données brutes est une étape essentielle pour assurer la qualité et la fiabilité des enregistrements sonores collectés sur le terrain. Avant de procéder aux analyses statistiques, les données brutes sont systématiquement contrôlées et filtrées pour éliminer toute anomalie.

Les conditions météorologiques (vent, précipitations, humidité) peuvent influencer les mesures acoustiques, en particulier lorsque la vitesse du vent dépasse 5 m/s, ce qui peut engendrer des interférences sur les microphones. Les données collectées dans de telles conditions sont exclues ou ajustées pour éviter les biais.

Des écoutes actives et une revue des enregistrements permettent d'identifier et de filtrer les sources de bruit non représentatives de l'environnement habituel (par exemple, passage d'un avion ou travaux temporaires). Ces données sont soit exclues, soit isolées pour éviter qu'elles n'influencent les résultats finaux.

Les enregistrements sont analysés pour vérifier leur continuité et leur cohérence temporelle. Les périodes de mesure sont comparées au plan d'échantillonnage pour s'assurer qu'elles couvrent bien les plages horaires et les périodes saisonnières définies dans le protocole.

Ces étapes de prétraitement garantissent que les données utilisées pour l'analyse sont fiables et représentatives de l'état sonore initial.

2.2 Techniques d'analyses

Les données de bruits récoltées seront traitées par l'intermédiaire de trois logiciels :

- CadnaA et modules intégrés : logiciel pour calculer, présenter, évaluer et prédire l'exposition acoustique.
- R ou Python : pour les traitements statistiques.
- Logiciels d'analyse spectrale pour les spectrogrammes et la distribution de l'énergie par bande de fréquence.

Les données sont traitées à l'aide de techniques statistiques pour évaluer les indicateurs de bruit ambiant aérien définis dans les objectifs de l'étude.

Ces techniques d'analyse statistique permettent une compréhension fine et détaillée des données, facilitant l'identification des sources de bruit et des variations dans l'environnement sonore.

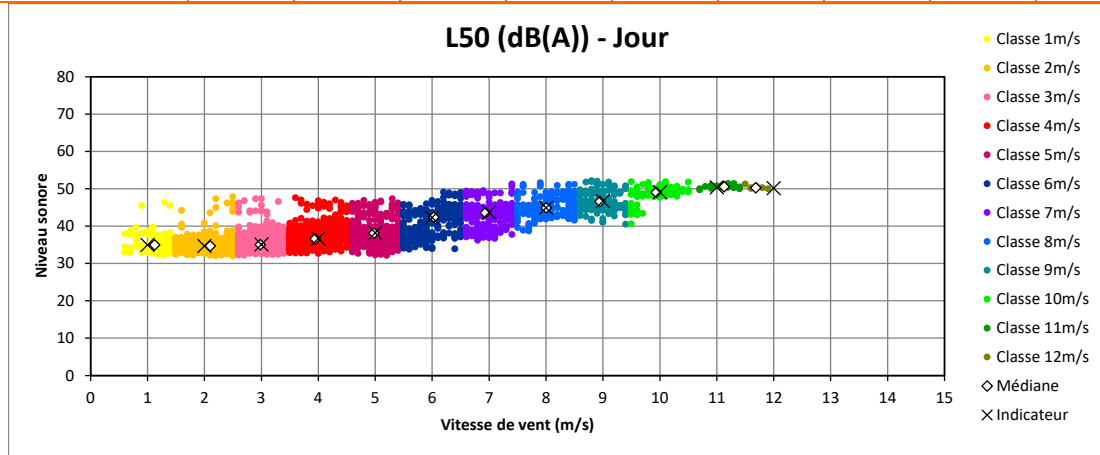
2.3 Interprétation des résultats et visualisation

Les résultats des différentes analyses sont représentés sous forme de tableaux, graphiques ou cartographies afin de fournir une base visuelle et quantitative pour le bruit ambiant dans la zone d'étude.

L'ensemble de ces analyses et visualisations offre une base solide pour établir l'état initial acoustique et fournit des informations essentielles pour anticiper les impacts potentiels du chantier de construction du parc éolien en mer. Les conclusions tirées serviront de référence pour la surveillance future et la mise en place de mesures de réduction des nuisances sonores en cas de dépassement des seuils.

Les tableaux et graphes ci-dessous sont des exemples de résultats du niveau sonore (période de jour et de nuit) sur la période estivale pour le sémaphore de Port-en-Bessin – Port-en-Bessin (14) lors de l'état initial de l'environnement des parc éoliens AO4 et AO8.

Période Jour – Secteur centré Nord-Est (45°)										
Classe de vitesse de vent standardisée 10 m	3 m/s	4 m/s	5 m/s	6 m/s	7 m/s	8 m/s	9 m/s	10 m/s	11 m/s	12 m/s
Niveau sonore résiduel (en dB(A))	35,0	36,5	38,0	42,5	43,5	45,0	46,5	49,0	50,5	50,0
Nombre d'échantillons	574	468	275	263	260	156	137	80	20	6



Période Nuit – Secteur centré Nord-Est (45°)										
Classe de vitesse de vent standardisée 10 m	3 m/s	4 m/s	5 m/s	6 m/s	7 m/s	8 m/s	9 m/s	10 m/s	11 m/s	12 m/s
Niveau sonore résiduel (en dB(A))	35,5	38,5	44,0	45,5	46,5	47,0	45,0	-	-	-
Nombre d'échantillons	122	127	95	189	87	65	13	0	0	0

