



SINAY

Parc éolien en mer des Hautes Falaises (EOHF) – Phase de construction

Suivi par acoustique passive du bruit ambiant et de la fréquentation des Mammifères marins – Mesures de suivi MSu3a et MSu3b

Rapport après trois années de suivi.



Suivi en phase de construction – Rapport final		
Version 5	Avril 2024	
Confidentiel Industrie Copyright SINAY® 2021		
Rédaction	Vérification	Approbation
<i>Cheffe de projet Environnement</i>	<i>Chargé d'affaires</i>	<i>Directeur des Opérations</i>
Sarah RENAUT Laura COURAUD	Alessio MAGLIO	Guillaume BLONDEAU



SINAY est certifié ISO 9001, ISO 14001 et ISO 45001 par LRQA pour sa plateforme d'intelligence artificielle afin d'accélérer la création d'applications digitales maritimes ainsi que les supports associés pour la collecte de données en mer, l'analyse et le *reporting* notamment dans les domaines :

- *Offshore* et câbles,
- Ports et travaux maritimes,
- Pêche et halieutique,
- Énergies Marines Renouvelables,
- *Oil & Gas* et *shipping*

1. RÉSUMÉ NON-TECHNIQUE

La société Eoliennes Offshore des Hautes-Falaises (EOHF) bénéficie depuis le 5 avril 2016 d'un arrêté autorisant, au titre de l'article L214-3 du code de l'environnement, l'aménagement et l'exploitation d'un parc éolien en mer au large de Fécamp. L'article 9 de cet arrêté décrit les suivis des effets du projet sur l'environnement. Ces suivis doivent être réalisés selon le **principe BACI (Before After Control Impact)**, avant et pendant les travaux d'installation du parc éolien, puis pendant la phase d'exploitation.

Selon cette approche, les résultats de cette phase sont comparés selon une échelle temporelle (phase avant construction, dit « état référent » vs phase de travaux, dit « état perturbé ») et spatiale (zone du parc, dite « zone impactée » vs zone hors parc, dite « zone témoin »). Pour ce faire, il est donc nécessaire de mettre à contribution les connaissances acquises lors de **l'état référent de 2019 à 2021**.

Le but principal de cette étude est d'évaluer l'incidence du **bruit anthropique généré par la construction du parc éolien sur les Mammifères marins selon deux axes : suivi du bruit ambiant sous-marin (MSu3a) et suivi de la fréquentation des Mammifères marins par acoustique passive (MSu3b)**. L'acquisition des données est réalisée au moyen d'équipements immergés en mer de mars 2022 à novembre 2022 et de juin à août 2023 selon le même protocole d'échantillonnage mis en place lors de l'état de référence.

Les **enregistreurs acoustiques et les hydrophones à larges bandes** permettent de mesurer l'ambiance sonore ; et les **C-PODs** les détections des Mammifères marins. Les périodes d'immersion des appareils acoustiques sont sélectionnées au regard des types de travaux réalisés. Au total, les campagnes de suivi ont permis de couvrir **trois saisons** (printemps, été et automne) avec une durée d'enregistrement d'environ trente jours pour chaque enregistreur au cours de chaque campagne, et huit mois pour chaque C-POD. Au cours des phases d'immersion, la période de travaux a pu être **couverte à 79 % par les enregistreurs acoustiques et à 58 % par les C-PODs**.

Le suivi MSu3a par acoustique passive a permis de suivre les **niveaux sonores générés par huit types de travaux pendant dix mois** au cours des années 2022 et 2023. Ce suivi met notamment en évidence que les niveaux sonores (SPL-RMS) mesurés pendant le forage des pieux de la sous-station électrique **sont inférieurs à ceux mesurés au cours de l'état de référence** (107 dB re 1µPa). Cependant, l'étude des niveaux sonores a révélé une augmentation de 10 dB re 1µPa (SPL-RMS) entre les périodes précédents et suivants les travaux (95dB re 1µPa) ; et la période durant laquelle les travaux de forage se sont déroulés. De plus, une modélisation a permis d'établir l'empreinte acoustique du forage et les risques pour les Mammifères marins, démontrant d'une **atténuation du niveau sonore dès les premiers mètres et une emprise géographique du bruit résiduel à l'échelle du parc éolien en mer**.

Par ailleurs, plusieurs ateliers de travaux ont été suivis de l'été 2022 à l'été 2023, dont certains ayant eu lieu simultanément (préparation des sols pour l'installation des fondations gravitaires, mise en place de la fondation jacket et du *topside* de la sous-station électrique, installation des fondations gravitaires, ballastage des fondations, mise en place des enrochements de protection des fondations gravitaires, installation des câbles inter-éoliennes et installation des premières éoliennes). La coactivité des ateliers et des navires de construction associés la zone du parc ne permettent **pas de mettre en évidence l'influence d'une ou plusieurs sources sonores sur les variations des niveaux sonores**. Cependant, l'étude des niveaux sonores moyens sur ces périodes (saison estivale 2022 et 2023) révèle

une augmentation de la valeur du niveau sonore (SPL-RMS) par rapport à celle de l'état de référence de + 5 à 7 dB re 1µPa en moyenne.

Pour l'ensemble des ateliers de travaux, les analyses fréquentielles réalisées sur l'ensemble des niveaux sonores confirment que l'énergie acoustique est concentrée dans des gammes de fréquences propres à celles des activités anthropiques (moyennes et basses fréquences) mais **sans jamais dépasser les seuils PTS ou TTS pour l'ensemble des familles de Mammifères marins.**

Le suivi MSu3b par acoustique passive des Mammifères marins révèle la présence du **Marsouin commun** (*Phocoena phocoena*) et des **Delphinidés** ((Dauphin commun (*Delphinus delphis*) et Grand Dauphin (*Tursiops truncatus*)) au cours de la phase de construction. Dans la zone du parc, le Marsouin commun est **l'espèce principalement recensée durant ce suivi**, notamment pendant l'année 2022. En 2023, où seule la saison estivale est suivie, la présence de Delphinidés est plus marquée que celle du Marsouin commun. Dans la zone témoin, échantillonnée uniquement en 2022, les détections révèlent la présence du Marsouin commun, mais d'aucun Delphinidé.

La fréquentation du site par les Mammifères marins est principalement **en hausse en comparaison avec celle de l'état de référence** (2019-2021). Les baisses de fréquentation sont réparties entre les différentes saisons et concernent les Delphinidés comme le Marsouin commun. La comparaison des données bioacoustiques entre l'état de référence et la phase de construction montre que **le Marsouin commun est principalement recensé au cours de la saison printanière et les Delphinidés au cours de la saison estivale.**

L'analyse des variables spatiales, temporelles et environnementales montre que **la variabilité saisonnière représente le principal facteur** influençant la fréquentation du **Marsouin commun** à l'échelle de la zone d'étude. La fréquentation des **Delphinidés**, elle, est principalement influencée par **la saisonnalité, les années et le secteur**. Les variables environnementales telles que la température de surface, la vitesse du courant et la concentration en phytoplancton exercent également une influence sur la fréquentation des Mammifères marins, mais dans une moindre mesure. **L'analyse du bruit ambiant généré par les travaux (variable anthropique) montre que ces derniers n'ont pas d'influence sur la fréquentation de la zone d'étude par le Marsouin commun et les Delphinidés.**

Les suivis MSu3a et MSu3b seront reconduits en phase d'exploitation du parc éolien en mer de Fécamp afin de poursuivre la compréhension du bruit ambiant et la fréquentation des Mammifères marins.

TABLE DES MATIERES

1.	Résumé non-technique	3
2.	Glossaire des termes techniques	7
3.	Introduction	10
3.1	Contexte général	10
3.2	Objectifs	10
4.	Contexte et enjeux	12
4.1	La problématique du bruit sous-marin	12
4.2	Revue des connaissances sur l'impact du bruit sur la faune marine	15
4.2.1	La faune marine et le bruit sous-marin	15
4.2.2	Seuils d'apparitions d'effets négatifs du bruit sous-marin sur les Mammifères marins	17
4.3	Caractéristiques environnementales et anthropiques du parc éolien en mer de Fécamp	19
4.3.1	Le bruit sous-marin dans la zone du parc	19
4.3.2	Les Mammifères marins dans la zone du parc	20
4.3.3	Enjeux de la phase de construction	20
5.	Matériel et méthodes du suivi acoustique en phase de construction	22
5.1	Protocole et plan d'échantillonnage	22
5.1.1	Plan d'échantillonnage	22
5.1.2	Calendrier d'échantillonnage et données collectées	24
5.2	Matériels déployés	25
5.2.1	Enregistreurs et hydrophones	26
5.2.2	C-PODs	27
5.3	Méthodologie d'interprétation des données	28
5.3.1	Approche adoptée	28
5.3.2	Analyse du bruit ambiant	29
5.3.3	Modélisation du bruit ambiant et des risques sur les Mammifères marins	30
5.3.4	Analyse de la fréquentation des Mammifères marins	31
6.	Mesures de suivi du bruit ambiant	32
6.1	Printemps 2022	32
6.1.1	Zone du parc	32
6.1.2	Zone témoin	35
6.1.3	Comparaison des données enregistrées avec l'état de référence	36
6.1.4	Modélisation de l'atelier de forage des pieux de la sous-station électrique	37
6.2	Été 2022	42
6.2.1	Zone du parc	42
6.2.2	Zone témoin	47
6.2.3	Comparaison des données enregistrées avec l'état de référence	50
6.3	Automne 2022	52
6.3.1	Zone du parc	52
6.3.2	Zone témoin	55
6.3.3	Comparaison des données enregistrées avec l'état de référence	56
6.4	Été 2023	57
6.4.1	Zone du parc	57

6.4.2	Zone témoin	59
6.4.3	Comparaison des données enregistrées avec l'état de référence	61
7.	Mesures de suivi de la fréquentation des Mammifères marins	62
7.1	Suivi de la fréquentation des Mammifères marins en phase de construction	62
7.1.1	Zone du parc	66
7.1.2	Zone témoin	67
7.2	Comparaison avec l'état de référence	68
7.2.1	Suivi de la fréquentation des Mammifères marins	68
7.2.2	Évolution de la fréquentation entre l'état de référence et la phase de construction	73
7.3	Influence des variables spatio-temporelles, environnementales et anthropiques sur les Mammifères marins	77
7.3.1	Analyse des variables spatiales, temporelles et environnementales	77
7.3.2	Analyse du bruit ambiant issu des sources anthropiques	78
8.	Limites et difficultés rencontrées	79
8.1	Systèmes de mesures	79
8.2	Traitement des données	79
8.3	Résolution de la mesure	79
8.4	Algorithme de détection automatique	80
9.	Conclusion du suivi acoustique en phase de construction	81
9.1	Suivi du bruit ambiant pendant la phase de construction	81
9.2	Suivi de la fréquentation des Mammifères marins	85
10.	Annexes	87
10.1	Contexte et enjeux	87
10.1.1	Contexte réglementaire	88
10.2	Matériel et méthodes du suivi acoustique en phase de construction	89
10.2.1	Protocole et plan d'échantillonnage	89
10.2.2	Lignes de mouillage porteuses des dispositifs acoustiques	90
10.2.3	Processus de qualité SINAY	91
10.3	Mesures de suivi du bruit ambiant	92
10.3.1	Printemps 2022	92
10.3.2	Été 2022	97
10.3.3	Automne 2022	105
10.3.4	Été 2023	109
10.4	Mesures de suivi de la fréquentation des Mammifères marins	113
10.4.1	Suivi de la fréquentation des Mammifères marins en phase de construction	113
10.4.2	Comparaison avec l'état de référence	113
10.4.3	Influence des variables spatiales, temporelles, environnementales et anthropiques sur les Mammifères marins	118
11.	Bibliographie	124

2. GLOSSAIRE DES TERMES TECHNIQUES

Abondance	L'abondance est le nombre d'individus d'une espèce ou d'un groupe d'espèce donnée par unité de surface . Elle peut être absolue ou relative.
Analyse par bande de 1/3 d'octave	Cette analyse permet d' identifier les fréquences où se concentre l'énergie sonore d'un signal acoustique ou d'un ensemble de signaux. Elle a plusieurs utilisations dont étudier le type de sources de bruit et donc les activités humaines à un endroit, comprendre la capacité d'un signal de se propager et le risque préliminaire que cela représente pour la faune marine.
Audiogramme	Courbe qui présente la capacité auditive d'un animal . Il s'agit de la plus petite valeur en dB re 1µPa qu'un animal peut entendre, en fonction de la fréquence.
Décibel (dB) re 1µPa	Mesure du niveau de pression acoustique , en échelle logarithmique, relative à une valeur de référence. En acoustique sous-marine, le niveau de référence de la pression sonore est 1 µPa (micro-Pascal), référence différente de l'acoustique aérienne (20 µPa) . Lorsque la puissance sonore double, la valeur en décibel augmente de 3 dB et inversement. Par exemple, l'addition de 2 sons de 60 dB chacun n'équivaut pas à 120 dB mais à 63 dB.
Delphinidés	Les Delphinidés (Delphinidae) forment une famille de Mammifères marins Odontocètes , comprenant entre autres les Dauphins, les Sténelles, les Globicéphales et les Orques. Le terme « Dauphin » définit de manière vulgarisée de nombreux cétacés à dents (odontocètes) de moins de cinq mètres généralement dotés d'un rostre long ou du terme.
Densité Spectrale de Puissance (DSP)	Cette représentation décrit comment la puissance du signal est distribuée selon les fréquences, avec une résolution de 1 Hz . C'est une représentation similaire à l'analyse par bande de fréquence en tiers d'octave, avec une résolution plus fine.
Détection acoustique	Une détection acoustique permet de révéler la présence d'une source sonore (d'origine biologique ou anthropique) en fonction des fréquences émises par cette source.
Durée du signal acoustique impulsif	La durée d'un signal impulsif (durée de l'impulsion) est déterminée par les deux instants (début et fin du signal) où les seuils de 5 % et 95 % de l'énergie totale du signal sonore sont atteints .
Empreinte acoustique	Zone étendue dans laquelle le bruit est perçu . Dans cette zone et pendant la durée du signal sonore, celui-ci est plus intense que le bruit ambiant.
Fréquentation	Présence d'individus d'une ou plusieurs espèces sur un site.
Hertz (Hz)	En acoustique, le Hertz représente le nombre de vibrations par seconde . Il s'agit de l'unité employée pour exprimer les fréquences.
M – Waiting Function (MWF)	Fonction de pondération des niveaux sonores reçus par un animal, utilisée pour obtenir les niveaux perçus. L'emploi de cette fonction permet de considérer les capacités auditives des animaux dans l'évaluation des impacts .

Niveau d'exposition sonore – L_E (Sound Exposure Level)	<p>Mesure acoustique qui fournit une indication de la quantité d'énergie acoustique contenue dans un événement sonore dans un intervalle de temps. Elle correspond à l'énergie totale du bruit, produite à partir d'un seul événement de bruit. En acoustique sous-marine elle est calculée en dB re 1 μPa²s.</p> <p>En termes mathématiques, le SEL est l'intégration de toute l'énergie acoustique contenue dans un événement en prenant en compte à la fois l'intensité et la durée du bruit rayonné</p>
L_E – 24 H	<p>Le L_E – 24 H a pour fonction de mesurer l'impact du bruit continu, sur un pas de temps de 24 heures consécutives.</p>
<p>SEL 24 h pondéré par les fonctions de transfert auditive (dB re. 1μPa²s)</p>	
Niveau de pression sonore – L_p (Sound Pressure Level)	<p>Mesure de la pression d'un son par rapport à une valeur de référence (1 micropascal), exprimée en décibels relatifs à 1 μPa .</p> $SPL = 20 \log_{10} \left(\frac{p}{p_{ref}} \right)$
<p>Où <i>P</i> est la pression sonore mesurée et <i>p_{ref}</i> est la pression sonore de référence.</p>	
Percentiles	<p>Les percentiles (allant de 1 à 100 où P1 est la valeur min, P100 la valeur max, et P50 la valeur médiane) sont des statistiques utiles pour comprendre la distribution des niveaux de bruit mesurés ou estimés sur une zone pendant une période.</p>
Pertes par propagation TL (Transmission Loss)	<p>Perte d'énergie d'une onde acoustique lors de sa propagation de la source vers le récepteur.</p>
Pression acoustique	<p>Ecart de pression par rapport à la pression de référence provoqué par une onde sonore. L'unité de pression sonore est le Pascal (Pa).</p>
PTS (Permanent Threshold Shift)	<p>Perte d'audition permanente. Un PTS se manifeste après exposition à un son dont l'intensité est 40 dB au-dessus de l'audiogramme de l'animal (Southall, et al., 2019). Le PTS est irréversible et l'audiogramme ne revient pas à son état initial après l'exposition.</p>
Puissance d'un signal en 1/3 d'octave	<p>Niveau en dB re 1μPa d'une bande de 1/3 d'octave. En termes mathématiques, il s'agit de l'intégrale de la densité spectrale de puissance du signal entre 2 fréquences, <i>f_{min}</i> et <i>f_{max}</i>, de la bande en 1/3 d'octave.</p>
Sons impulsifs	<p>Bruits transitoires se produisant pendant une très courte durée et présentant souvent des pics de pression acoustique élevée.</p>
Spectrogramme ou Représentation temps-fréquence	<p>Il permet de montrer la distribution de l'énergie d'un signal selon les fréquences, ainsi que son évolution dans le temps.</p>

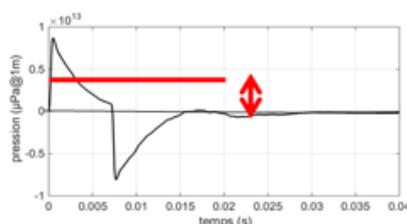
Niveau de bruit à la source – SL (Source Level)

Niveau mesuré à 1 m d'une source sonore (dB re 1 μ Pa 1m).

SPL-RMS (Root Mean Square)

Le niveau de pression sonore RMS, exprimée en dB re 1 μ Pa, est une façon de calculer la **valeur moyenne de la pression acoustique d'un signal** et est utile pour caractériser le bruit continu.

SPL rms (dB re. 1 μ Pa rms)



SPL zero-to-peak ($L_{p,0} - pk$) ou SPL-PIC

Mesure en dB de la pression acoustique maximale pendant un intervalle de temps donné, mesurée entre zéro et le pic maximum du signal. Cette mesure est généralement utile pour caractériser le bruit impulsif (explosions, battage de pieux, etc.).

TTS (Temporary Threshold Shift)

Perte d'audition temporaire. Un TTS se manifeste après exposition sonore à un son dont l'intensité est 6 dB au-dessus de l'audiogramme d'un animal (Southall, et al., 2019). Le TTS est réversible et l'audiogramme initial est retrouvé au bout de 15 minutes pour les Mammifères marins.

3. INTRODUCTION

3.1 Contexte général

Le parc éolien en mer de Fécamp est porté par la société **Eoliennes Offshore des Hautes Falaises (EOHF)**, détenue par les sociétés **EDF Renouvelables, Enbridge, CPPIB et Skyborn Renewables**. La société (ci-après le « Maître d'Ouvrage » ou « EOHF ») s'est vue, à la suite de l'appel d'offres de l'Etat N°2011/S 126-208873, attribuer le site au large de Fécamp pour le développement et l'exploitation d'un parc éolien en mer d'une puissance totale de 497 MW.

Le parc éolien en mer de Fécamp est situé dans la Seine-Maritime, entre 13 et 22 km au large de la côte française, au nord de la côte du pays de Caux. Le raccordement électrique du parc à la terre est sous la maîtrise d'ouvrage de **RTE (Réseau de Transport d'Électricité)**. Il est constitué de 71 éoliennes qui sont installées sur des fondations gravitaires et reliées entre elles par des câbles électriques sous-marins jusqu'à un poste électrique en mer.

La construction du parc, activités onshore et offshore, s'est déroulée entre 2020 et 2024. **La date prévisionnelle de mise en service est estimée au printemps 2024**. La phase d'exploitation du parc éolien en mer de Fécamp est prévue pour une durée de 20 à 25 ans. Une carte de localisation du parc éolien en mer de Fécamp et son raccordement électrique sous-marin est disponible en **Annexes - Figure 30**.

La société EOHF bénéficie depuis le 5 avril 2016 d'un arrêté autorisant, au titre de l'article L214-3 du code de l'environnement, l'aménagement et l'exploitation d'un parc éolien en mer au large de Fécamp. L'article 9 de cet arrêté décrit les suivis des effets du projet sur l'environnement. Ces suivis concernent plusieurs compartiments et doivent être réalisés selon **le principe BACI (Before After Control Impact) avant et pendant les travaux d'installation du parc éolien, puis pendant la phase d'exploitation**.

3.2 Objectifs

Le suivi en phase de construction du parc éolien en mer de Fécamp (2022-2023) s'inscrit dans une démarche BACI (*Before-After-Control-Impact*). Selon cette approche, les résultats de cette phase sont comparés à **l'état de référence, réalisé avant la construction du projet (2019-2021)**.

Le but principal du suivi acoustique en phase construction est de vérifier si le bruit anthropique généré par la construction du parc éolien a un impact sur les Mammifères marins. Les suivis **MSu3a (Suivi du bruit ambiant sous-marin)** et **MSu3b (Suivi des Mammifères marins par acoustique passive)** s'inscrivent dans ce cadre afin de :

- **Évaluer l'effet des travaux de construction sur le bruit ambiant sous-marin.** En d'autres termes, évaluer comment le bruit des travaux modifie l'ambiance sonore de la zone ;
- **Suivre la fréquentation de la zone par les Mammifères marins** pendant les travaux de construction du parc éolien en mer afin de détecter et d'évaluer d'éventuels impacts.

Pour ce faire, il est nécessaire dans un premier temps de décrire **les émissions sonores anthropiques associées aux différentes phases des travaux, puis de comprendre comment ces bruits se propagent de la zone d'activité vers les animaux récepteurs potentiellement impactés**.

Dans un second temps, ces résultats sont comparés à l'état de référence. En parallèle, **les données de suivi des Mammifères marins de la phase de construction sont comparées à l'état de référence.** Enfin, les changements de l'ambiance sonore et les données de fréquentation de Mammifères marins sont combinés **pour vérifier s'il y a eu un impact.**

Le présent document présente la méthodologie mise en œuvre ainsi que les résultats des suivis MSu3a et MSu3b pour les années de construction offshore du parc éolien en mer de Fécamp (2022 et 2023). Ce rapport présente les modalités de traitements et d'interprétation des résultats afin de :

- 1. Suivre les effets du projet sur le bruit ambiant sous-marin et les Mammifères marins en phase de construction ;**
- 2. Vérifier l'efficacité des mesures ERC et donc l'absence d'impact notable sur les Mammifères marins en phase de construction, et s'il y a lieu, de proposer et mettre en œuvre des mesures correctrices ;**
- 3. Contribuer à l'amélioration des connaissances globales.**

4. CONTEXTE ET ENJEUX

4.1 La problématique du bruit sous-marin

Le **bruit sous-marin, ou paysage acoustique**, est constitué d'un ensemble de sons produits dans un environnement. Ce chorus sonore est composé de trois familles de bruits (**Figure 1**) :

- Les **bruits naturels (Géophonie)** regroupant les bruits issus des mouvements sismiques, des conditions océaniques (déferlement des vagues, déplacements des sédiments marins, etc.) et météorologiques (précipitations, orages, etc.) ;
- Les **bruits biologiques (Biophonie)** regroupant les bruits issus de la faune marine (Mammifères marins, Poissons et autres invertébrés marins) ;
- Les **bruits anthropiques (Anthropophonie)** regroupant les bruits générés par les activités humaines (trafic maritime, travaux, etc.).

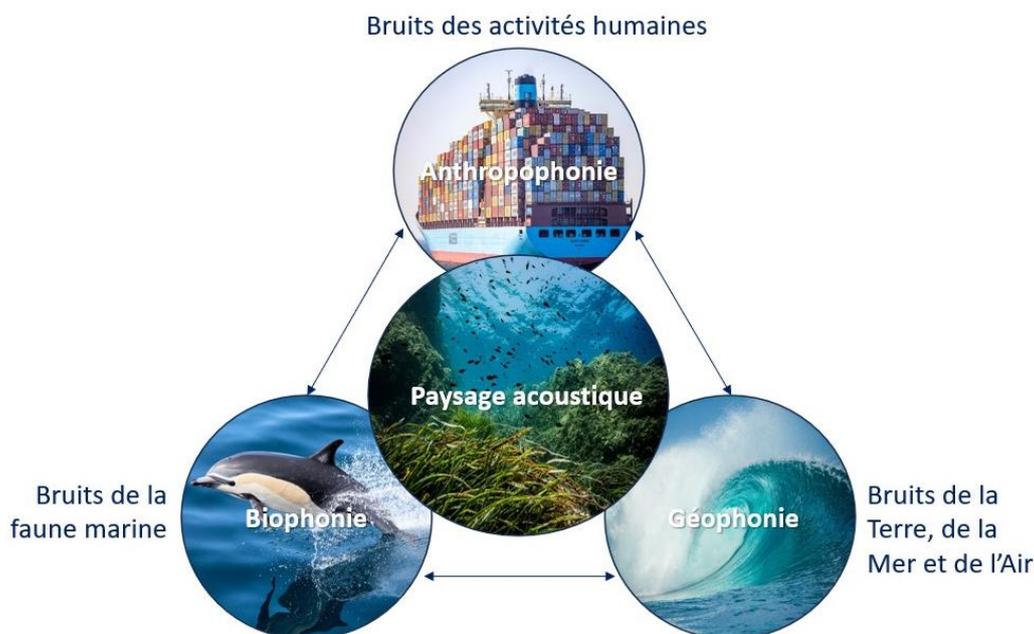


Figure 1 : composition du paysage acoustique sous-marin en fonction des origines des sons produits (©Sinay).

Le paysage acoustique varie en fonction du temps (conditions journalières et saisonnières), de l'espace (situation géographique) et des conditions climatiques. Le bruit sous-marin constitue donc une composante physique à évaluer afin d'apprécier la structure, le fonctionnement et l'état des écosystèmes. **Des modifications peuvent potentiellement affecter ces écosystèmes et entraîner des conséquences sur les organismes qui y vivent.**

La densité du milieu marin, environ 1000 fois plus élevée que celle de l'air, rend la propagation du son particulièrement favorable. L'ensemble des bruits d'origine naturelle, biologique ou anthropique interagissent les uns avec les autres pour former un contexte sonore complexe avec une prédominance très variable selon leur fréquence, les conditions environnementales, les activités humaines et le contexte local.

De nombreuses activités humaines en mer génèrent du bruit. Les bruits émis par ces activités possèdent une large gamme de niveaux sonores (**dB** re 1 μ Pa) selon le type d'activités considéré, mais également au sein d'un même type d'activités (**Figure 2**).

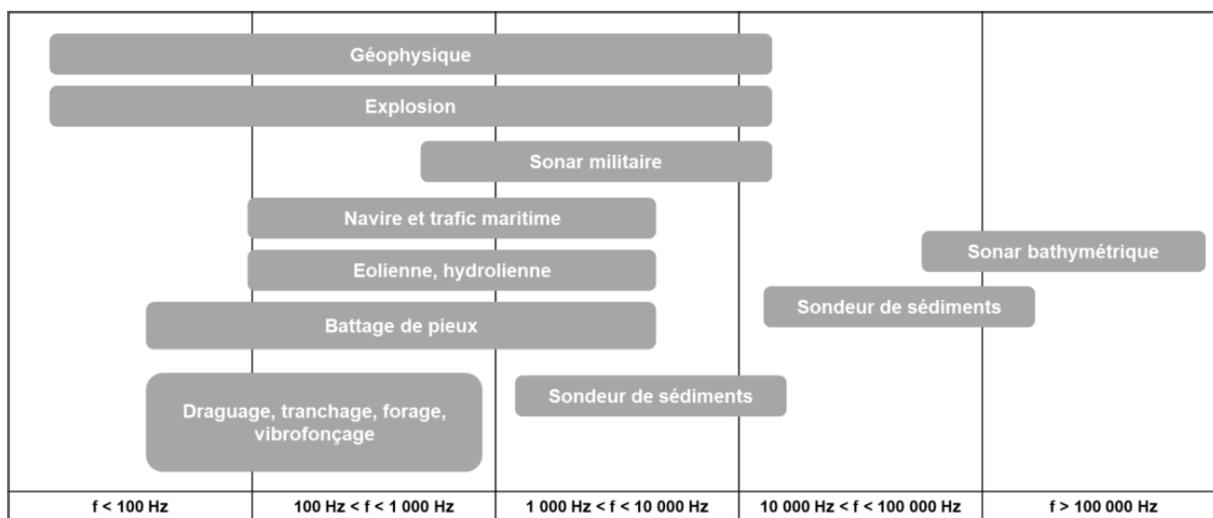


Figure 2 : fréquences émises par les activités humaines en mer (Gervaise, Lossent, & Gigou, 2022).

D'une manière générale, les activités humaines ayant le plus de potentiel d'impacter la faune marine sont celles **dans les fréquences basses ou moyennes**, entre 20 **Hz** et 5 000 **Hz** (**Figure 3**).

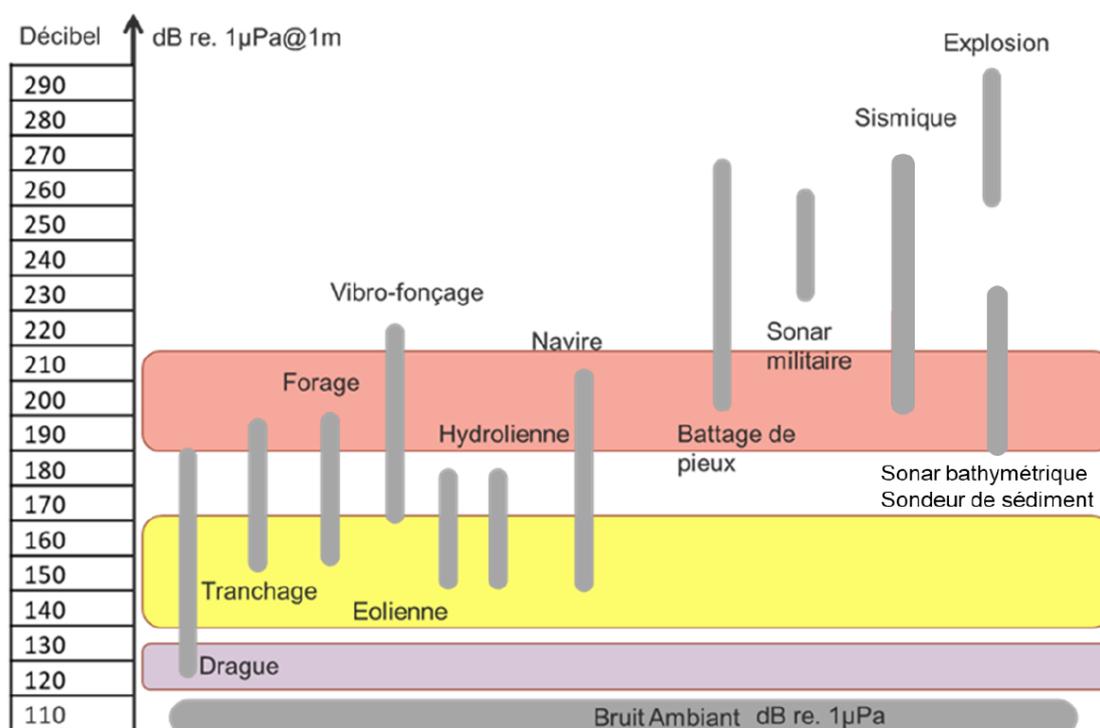


Figure 3 : niveaux sonores des bruits émis par les activités humaines en mer.

En gris, le niveau de bruit ambiant (110 dB) de référence (sans activité humaine), en violet le seuil de risque de masquage des communications entre les Mammifères marins, en jaune le seuil de risque de dérangement comportemental, en orange le seuil de risque de blessures/dégradation de l'audition (pour une source de bruit située à 1 m du récepteur) (Gervaise, Lossent, & Gigou, 2022).

Selon le cadre établi par la Directive-cadre stratégie pour le milieu marin (DCSMM, 2008/56/EC), deux grandes catégories de signaux acoustiques anthropiques induisant des perturbations sur les espèces marines sont considérées :

- **Les bruits impulsifs** : émissions de forte intensité sonore et de durée très courte (quelques millisecondes à quelques secondes (Dekeling, et al., 2014). Ces signaux peuvent être isolés (par exemple une opération de déminage) ou répétés (battages de pieux, tirs de canons à air lors de prospections sismiques...). Il s'agit de sources sonores capables d'engendrer des impacts physiologiques aigus dans les différents groupes de faune marine ;
- **Les bruits continus** : émissions continues, de niveaux généralement plus faibles, mais persistants voire permanents (Dekeling, et al., 2014). Le trafic maritime est généralement identifié comme la source de bruit continu contribuant le plus souvent par son omniprésence aux niveaux de bruit ambiant (Hildebrand, 2009).

La reconnaissance de la problématique du bruit sous-marin marin s'est renforcée au cours des 25 dernières années, principalement à cause des effets reconnus de l'emploi de sources sonores très intenses sur les Cétacés et autre faune marine (Poissons, Mollusques et Crustacés principalement). Ces sources sont utilisées lors de beaucoup d'activités comprenant, entre autres, le transport maritime, la recherche et l'exploitation d'hydrocarbures, les activités militaires et industrielles avec sonar (et autres sources sonores actives), les explosions sous-marines, les travaux de génie civil et militaire, **la construction et l'exploitation des parcs éoliens en mer, les travaux de construction offshore et côtiers**, etc. (Maglio, 2013). Le contexte réglementaire des impacts sonores issues des sources anthropiques sous-marines est détaillé dans les **Annexes – Section 10.1.1**

Contrairement à d'autres modifications physiques de l'habitat, les impacts anthropiques engendrés par ces activités sont à la fois très récents (en termes évolutifs) et relativement rapides par rapport aux temps d'adaptation des espèces. Ces sources sonores envahissent l'espace acoustique et physique des organismes marins et l'estimation des conséquences négatives sur l'équilibre naturel du milieu marin et sur la biodiversité marine à courts, moyens et longs-termes, est un exercice complexe. De nombreux travaux scientifiques démontrent l'existence d'effets des différentes sources sonores sous-marines précitées sur les différents groupes faunistiques sous-marins :

- Les **battages de pieux**, en particulier sur les Mammifères marins et les Poissons : (Hastings & Popper, 2005) ; (Brandt, Diederichs, & Nehls, 2009) ; (Tougaard & Miller, Underwater noise from three types of offshore wind turbines: Estimation of impact zones for harbor porpoises and harbor seals, 2009) ; (Bailey, et al., 2010) ; (Dähne, et al., 2013) ; (Stöber & Thomsen, 2021) ; (OSPAR, 2009) et (Tougaard, Wright, & Madsen, 2015) ;
- Les **explosions sous-marines**, pour tout groupe faunistique : (Chapman, 1985) ; (Ketten, 1995) ; (Schmidtke, Nützel, & Ludwig, 2009) ; (Koschinski, 2011) et (Von Benda-Beckmann, et al., 2015) ;
- Les **prospections sismiques**, en particulier sur les Cétacés et les Poissons, mais aussi sur les Tortues, les Mollusques et Crustacés : (Popper, et al., 2014) ; (Stone & Tasker, 2006) ; (Boyd, et al., 2008) ; (Castellote, Clark, & Lammers, Acoustic and behavioural changes by fin whales (Balaenoptera physalus) in response to shipping and airgun noise, 2012) ; (Aguilar de Soto, et al., 2013) ; (Southall, Rowles, Gulland, Baird, & Jepson, 2013) ; (Hawkins & Pembroke, 2014) ; (Castellote & Llorens, 2016) et (Nelms, Piniak, Weir, & Godley, 2016) ;

- Les **sonars militaires**, en particulier sur les Cétacés : (Frantzis R. , 1998) ; (Fernandez, et al., 2004) ; (Martin, Servidio, & Garcia S, 2004) ; (Filadelfo, et al., 2009) ; (Tyack, et al., 2011) ; (Aguilar de Soto, Canadas, Frantzis, & Notarbartolo di Sciara, 2013) ; (Aguilar de Soto, et al., 2013) ; (Deruiter, et al., 2013) et (Fernandez, Arbelo, & Martin, 2013).

4.2 Revue des connaissances sur l'impact du bruit sur la faune marine

4.2.1 La faune marine et le bruit sous-marin

L'environnement marin est caractérisé par **des conditions acoustiques spécifiques** (Wenz, 1962) auxquelles les espèces marines, les Cétacés en particulier, sont extrêmement bien adaptées. Pour les Mammifères marins, la communication et la perception acoustique ont acquis un rôle privilégié par rapport aux autres sens et aux autres groupes zoologiques. Ils vivent dans un milieu ayant une faible capacité de transmission de la lumière, mais à travers lequel **le son se propage très bien**, même sur de longues distances.

L'**audition** est donc utilisée par les animaux marins pour réaliser un ensemble de fonctions vitales comme se déplacer et s'orienter dans l'espace à différentes échelles, repérer les proies, les prédateurs et les dangers, échanger des informations avec d'autres individus, assurer la défense de territoire et la cohésion des groupes et les relations parents/petits. Les animaux marins émettent des ondes sonores, perceptibles ou non par l'oreille humaine. Celles-ci sont renvoyées lorsqu'elles se heurtent à un obstacle ou une proie puis sont enregistrées et visualisées par le cerveau de l'animal, lui fournissant ainsi une image en trois dimensions de son environnement.

C'est l'**audiogramme** qui permet de visualiser les gammes de fréquences entendues par l'animal. La taille de l'animal, plus exactement la taille de son organe récepteur sonore, joue également un rôle sur sa capacité à entendre les basses ou hautes fréquences. Ainsi, plus l'organe est grand, plus les sons basses fréquences sont capables de faire vibrer l'organe, donc d'être perçus. Par exemple, les Invertébrés et les Poissons font usage de corps calcaires (statolithes, otolithes) qui vibrent avec l'onde acoustique et la mise en mouvement de cette masse est plus efficace dans les basses fréquences ($f < 1\ 000\ \text{Hz}$) alors qu'elle est plus difficile voire impossible pour les hautes fréquences ($f > 5\ 000\ \text{Hz}$). Les capacités auditives des Cétacés dépendent aussi des groupes d'espèces auxquels ils appartiennent :

- **Les Mysticètes** (Baleines à fanons, e.g. Rorqual commun (*Balaenoptera physalus*)) sont adaptés à l'écoute des basses fréquences ($f < 1\ 000\ \text{Hz}$) ;
- **Les Odontocètes** (Baleines à dents, e.g. Grand Dauphin (*Truncatus truncatus*)) sont adaptés aux moyennes fréquences ($1\ 000\ \text{Hz} < f < 30\ 000\ \text{Hz}$) pour la réception des vocalises et des sifflements, ainsi qu'aux hautes fréquences ($f > 30\ 000\ \text{Hz}$) pour la réception des clics d'écholocation.

La communauté scientifique est capable de quantifier les capacités auditives des animaux en mesurant leurs audiogrammes (Nedwell, Edwards, Turnpenny, & Gordon, 2004). Cependant, les informations relatives aux capacités auditives des animaux marins sont peu nombreuses du fait, notamment, de la difficulté à les tester. Par conséquent, les valeurs citées sont à considérer avec précaution (**Figure 4**).

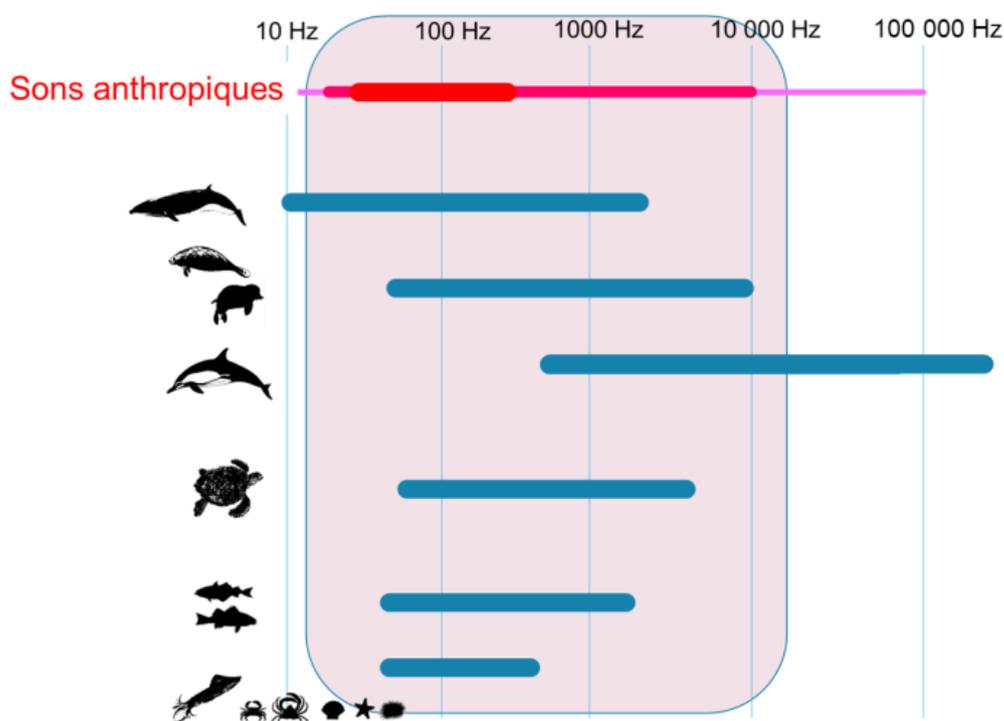


Figure 4 : bandes fréquentielles d'écoute privilégiées pour différents groupes d'animaux superposées aux fréquences des sons anthropiques (Gervaise, Lossent, & Gigou, 2022).

Les premiers échouages de Cétacés constatés à la suite d'exercices navals (Frantzis, Nikolaou, Bompar, & Cammedda, 2004) ont révélé des inquiétudes par la société civile quant aux potentiels effets négatifs des bruits sous-marins d'origine humaine sur la faune marine. Depuis plus de vingt ans, la communauté scientifique a démontré que **les bruits anthropiques peuvent avoir des effets sur les Mammifères marins** (Cétacés, Siréniens, et Phoques) (Southall, et al., 2019), les Poissons et les Tortues marines (Popper, Salmon, & Horch, 2001), les Invertébrés marins (Day, McCauley, Fitzgibbon, & Semmens, 2017) et (Day, McCauley, Fitzgibbon, Hartmann, & Semmens, 2019)) et le Zooplancton (McCauley, et al., 2017) et (Richardson, Richard, & Lenton, 2017)).

Ce que l'on appelle « **habitat acoustique** » est aujourd'hui altéré par les bruits anthropiques. Quand un tel habitat est dégradé, la communication acoustique l'est également, avec des dysfonctionnements conséquents dans le système social des individus et les autres fonctions vitales. Plus précisément, chaque espèce possède sa « **niche acoustique** » spécifique au sein d'un plus grand « habitat acoustique » (Agardy, et al., 2007) ; (Pavan, 2008) et (Tyack, 2008)). Des effets directs et indirects sur les individus et sur les populations des différents groupes faunistiques marins se manifestent en réponse à un habitat acoustique dégradé. Ces effets rapportés par la communauté scientifiques sont très variés (Popper, Salmon, & Horch, 2001; Southall, et al., 2019). Par exemple, en présence d'un bruit fort ou inconnu, les Poissons et les Invertébrés répondent de la même façon que si un prédateur est présent à proximité (Celi, et al., 2016). **Leur comportement et leur survie se trouvent ainsi altérés.** Les études ont mis en évidence un panel d'effets plus ou moins intenses sur la faune marine par les sons anthropiques, tels que :

- Le masquage du champ de vision ;
- Des troubles physiologiques et comportementaux ;
- Des changements de seuils temporaire et permanent selon le risque sonore ;

- Des traumatismes non létaux ;
- La mort.

Certains effets sont aigus et touchent quelques individus à court terme alors que d'autres effets sont chroniques et peuvent avoir des retentissements à l'échelle des populations. Plus précisément, une onde sonore est une onde mécanique qui, d'une part, exerce une force sur les surfaces insonifiées, et, d'autre part, met en mouvement les tissus insonifiés. Elle possède ainsi des capacités à endommager ou non les tissus constituant les organes auditifs des animaux. Selon l'intensité et la fréquence de l'insonification, les animaux peuvent être assourdis et perdre leur capacité à entendre des sons de faible amplitude. D'après (Popper, Salmon, & Horch, Acoustic detection and communication by decapod crustacean, 2001) (Southall, et al., 2019), deux cas principaux peuvent survenir :

- Si cette capacité est retrouvée après un certain laps de temps, il s'agit d'une **dégradation temporaire de l'audition (TTS : Temporary Threshold Shift)** ;
- Si les animaux ne recouvrent pas cette capacité, il s'agit d'une **dégradation permanente de l'audition (PTS : Permanent Threshold Shift)**.

4.2.2 Seuils d'apparitions d'effets négatifs du bruit sous-marin sur les Mammifères marins

L'ensemble des effets des sources sonores sur les Mammifères marins présentés précédemment ne s'appliquent pas obligatoirement car ils dépendent de différents paramètres. En effet, leur existence ou leur absence dépendent des caractéristiques des bruits émis (puissance, fréquence, forme, durée) et il existe un cadre méthodologique bien établi pour étudier au cas par cas l'existence d'effets en fonction des bruits émis, de l'animal récepteur (espèce, distance à la source, etc.) et du type d'effet.

Pour déterminer les rayons d'effets à l'intérieur de **l'empreinte acoustique**, les seuils doivent être adaptés à chaque activité. À l'heure actuelle, les seuils sont consignés dans deux guides de référence :

- Pour les Poissons et les Tortues marines : (Popper, et al., 2014) *Sound exposure guidelines for fishes and sea turtles* ;
- Pour les Cétacés : (Southall, et al., 2019) *Marine mammal noise exposure criteria: Updated scientific recommendations for residual hearing effects*.

Ces guides exposent des seuils pour les effets aigus et forts en termes de mortalité, de blessures et de dégradations temporaires et permanentes de l'audition.

Le **Tableau 1** synthétise les seuils des impacts acoustiques par sensibilité des espèces pour les bruits continus et impulsionnels. Le niveau d'impact sur les Mammifères marins est évalué en appliquant les niveaux de perception de ces espèces sur le niveau sonore reçu ainsi qu'en prenant en compte l'effet du temps d'exposition à ce niveau sonore ([L_E](#)).

Tableau 1 : seuils des impacts acoustiques par sensibilité des espèces pour les sons continus et impulsifs (Southall, et al., 2019).

Groupe	Sons continus		Sons impulsifs			
	Seuil TTS	Seuil PTS	Seuil TTS		Seuil PTS	
	SEL cum dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	SEL cum dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	SEL cum dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	SPL dB re. 1 μPa	SEL cum dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	SPL dB re. 1 μPa
Cétacés basses fréquences	179	199	168	213	183	219
Cétacés moyennes et hautes fréquences	178	198	170	224	185	230
Cétacés hautes et ultra-hautes fréquences	153	173	140	196	155	202
Siréniens	186	206	175	220	190	226
Phocidés (dans l'eau)	181	201	170	212	185	218
Autres carnivores dans l'eau	199	219	188	226	203	199

Il n'existe pas de consensus concernant les **dérangements comportementaux** car les animaux présentent **une grande variabilité de réponses à un même bruit** en fonction de l'espèce, du contexte, de leurs motivations et de leur adaptation au bruit. Toutefois, le **Tableau 2** présente une échelle provisoire proposée par les auteurs à partir d'une vaste synthèse de la bibliographie sur le sujet (Gervaise & Lossent, 2020).

Tableau 2 : synthèse bibliographique des seuils d'apparition d'effets négatifs utilisée par les auteurs comme critère d'évaluation du dérangement comportemental de la faune marine (Gervaise, Lossent, & Gigou, 2022).

Niveaux sonores	120 dB re. 1 μPa	140 dB re. 1 μPa	160 dB re. 1 μPa	166 dB re. 1 μPa	175 dB re. 1 μPa
Équivalent au bruit d'un navire de 20 m voguant à 18 nds entendu à	1700 mètres	114 mètres	10 mètres	5 mètres	1 mètre
Animaux	Poissons Cétacés	Poissons Cétacés	Poissons Cétacés	Tortues marines	Tortues marines
Effets	Dérangement faible Les animaux sont conscients du bruit	Dérangement moyen Les animaux réagissent au bruit	Dérangement fort Les animaux réagissent fortement au bruit	Dérangement moyen Les animaux réagissent au bruit	Dérangement fort Les animaux réagissent fortement au bruit

En considérant un seuil de dérangement comportemental égal à 140 dB re 1 μPa (dérangement moyen) quel que soit l'animal considéré, le **Tableau 3** présente les rayons de dérangements comportementaux

pour des installations posées (e.g. sous-station électrique, fondations, etc.) en phase de travaux d'un parc éolien en mer.

Les niveaux sonores générés par les travaux d'installation de parties non ancrées directement sur les fonds marins (e.g. installation des mâts des éoliennes, des pâles, etc.) sont liés aux niveaux sonores produits par des navires qui les réalisent. Ils sont par conséquent inférieurs aux niveaux sonores générés lors de l'installation des postes électriques en mer posés sur jacket, eux-mêmes inférieurs aux niveaux sonores générés par le battage de pieux de plus gros diamètre pour des éoliennes posées (e.g. fondations monopieux). Il existe différentes méthodes de réduction du bruit émis à la source (mesures de réduction), par exemple en entourant le chantier par un rideau de bulles ou en confinant les pieux à battre dans un cylindre atténuant la propagation du son. Ces techniques ont été validées grâce à de nombreux retours d'expériences en mer du Nord (Bellmann, et al., 2020) et peuvent apporter une réduction du bruit d'au moins 10 dB. Les niveaux sonores étant présentés dans une échelle logarithmique, **une réduction de quelques décibels diminue fortement l'empreinte acoustique.**

Tableau 3 : calcul simplifié des rayons des dérangements comportementaux produits par les travaux de mise en place des installations posées (sous-station électrique) (Gervaise, Lossent, & Gigou, 2022).

Rayon de dérangement des travaux de mise en place des installations posées (Seuil = 140 dB re. 1 μ Pa)								
	Vibrofonçage	Forage	Battage jacket \varnothing 50cm	Battage jacket \varnothing 50cm + Mesures de réduction	Battage jacket \varnothing 80cm	Battage jacket \varnothing 80cm + Mesures de réduction	Battage jacket \varnothing 100cm	Battage jacket \varnothing 50cm + Mesures de réduction
Niveau de sources dB re. 1 μ Pa@1m [20 Hz, 5 kHz]	190 dB	190 dB	197 dB	187 dB	199 dB	189 dB	202 dB	192 dB
Rayon de l'empreinte (m)	316 m	316 m	707 m	223 m	891 m	218 m	1 260 m	400 m

4.3 Caractéristiques environnementales et anthropiques du parc éolien en mer de Fécamp

4.3.1 Le bruit sous-marin dans la zone du parc

Lors de suivis antérieurs menés par SINAY, les niveaux de bruit enregistrés et/ou modélisés dans les différentes zones de la Manche démontrent que cette **région marine est un système fortement dominé par des bruits anthropiques**, en particulier causé par le **trafic maritime** avec la présence d'une voie de navigation majeure à l'échelle mondiale.

Dans cette zone, une variété de chantiers portuaires et offshore vient s'ajouter pour générer de la pollution sonore sous-marine, en continu ou par intermittence. Dans les années à venir, **la construction et l'exploitation de parcs éoliens offshore vont s'inscrire dans cette ambiance sonore anthropique.**

Dans la zone du parc éolien en mer de Fécamp, le bruit ambiant sous-marin est principalement anthropisé. Le nombre total de navires commerciaux a doublé entre 1965 et 2003 et les projections prévoient que le tonnage transporté par les grands navires de fret devrait encore doubler ou tripler d'ici à 2025 (Frisk, 2012). Ainsi, les bruits issus de la circulation maritime n'ont pas cessé d'évoluer durant les 20 dernières années (20 dB d'augmentation entre 1965 et 2003) (Andrew, Howe, Mercer, & Dzieciuch, 2002) et (McDonald, Wiggins, & Ross, 2008). **Le bruit ambiant en milieu sous-marin subit donc une augmentation générale en relation avec le développement du trafic maritime** dont, en particulier, celui du trafic marchand.

4.3.2 Les Mammifères marins dans la zone du parc

L'analyse des données bibliographiques existantes (échouages, observations opportunistes, recensements nationaux, suivis télémétriques) et les données acquises sur le terrain (suivis acoustiques et en temps réel de la mégafaune marine) dans la zone du parc éolien de Fécamp permettent de recenser trois espèces/groupes d'espèces principaux :

- Le **Marsouin commun** (*Phocoena phocoena*) est l'espèce majoritairement rencontrée en Manche-Est et sur la zone du parc de Fécamp, où il enregistre de fortes densités de présence comparativement au reste des littoraux français (Biotope, 2014). Si la zone de Fécamp n'est pas située dans les zones de densités maximales du Marsouin commun en Manche, elle n'en reste pas moins un secteur très fréquenté tout au long de l'année. Le Marsouin commun présente tout de même une saisonnalité bien marquée : sa présence est maximale de la fin de l'automne au début du printemps (densités maximales de janvier à avril (Martinez, et al., 2013) et (Biotope, 2014)). Ces résultats sont concordants avec les connaissances issues des campagnes SAMM indiquant une présence plus importante en Manche Est en hiver (Pettex, et al., 2014) ;
- Le **Grand Dauphin** (*Tursiops truncatus*) présente des effectifs faibles sur le secteur de Manche, l'espèce étant plutôt rencontrée en Manche-Ouest. Sur la zone du parc, les observations sont principalement faites au printemps et en été (Biotope, 2014) ;
- Les **Phoques gris** (*Halichoerus grypus*) et **veaux-marins** (*Phoca vitulina*) sont également présents sur la zone en raison de la proximité de deux des principales colonies françaises : la baie des Veys et la baie de Somme. La télémétrie démontre que les colonies de Phoques veaux-marins se déplacent peu et s'alimentent généralement à proximité des reposoirs. A l'inverse, les Phoques gris ont des déplacements plus vastes (entre Courseulles et Fécamp). La zone du parc ne semble toutefois pas être un site d'alimentation, mais juste un site de passage, avec des observations ponctuelles en hiver, à la fin du printemps et au milieu de l'été (Biotope, 2014).

Peu d'informations existent sur le rôle fonctionnel de la zone d'étude et l'utilisation qui en est faite par les espèces citées précédemment (Martinez, et al., 2013). Le Globicéphale noir (*Globicephala melas*), le Dauphin commun (*Delphinus delphis*) et le Dauphin bleu-et-blanc (*Stenella coeruleoalba*) sont considérés comme des espèces occasionnelles (Biotope, 2014).

4.3.3 Enjeux de la phase de construction

Les enjeux de la construction du parc éolien en mer de Fécamp concernent principalement la phase d'installation des pieux de la sous-station électrique en mer (battage et forage). En effet, les

opérations d'installation des fondations gravitaires ne présentent pas de risque physiologique acoustique pour les Mammifères marins puisqu'il s'agit d'opérations de pose sur le sol marin sans opération sonore à risque associée. L'ancrage des pieux de la sous-station électrique, mettant en jeu du battage de pieux, est l'activité notable au regard du dépassement potentiel des seuils de **dommage physiologique temporaire (TTS – Temporary Threshold Shift) et permanent (PTS – Permanent Threshold Shift)** pour les Mammifères marins. **Pour rappel, ces seuils ne constituent pas une valeur réglementaire en France.**

Selon les études et les enregistrements *in situ* réalisés pour des projets de parcs éoliens en mer en Europe, les empreintes acoustiques des projets (niveau supérieur au niveau de bruit ambiant sous-marin) et les rayons de dérangements forts sont comme suit ((Cartensen, Henriksen, & Teilman, 2006) et (Benhemma Le Gall, Graham, Merchant, & Thompson, 2021)) :

- Entre 500 m et 31 km pour les bruits continus ;
- Entre 17 km et 50 km pour le bruit de battage.

Le **TTS** peut être atteint pour :

- Les **Pinnipèdes** dans un rayon maximum de 1,47 km autour de l'atelier ;
- Le **Marsouin commun**, dans un rayon maximum de 1,9 km autour de l'atelier ;
- Les **autres Mammifères marins**, dans un rayon maximum de 480 m autour de l'atelier.

Autrement dit, les Phoques ne peuvent pas s'approcher à une distance inférieure à 1,47 km et les Marsouins communs à moins de 1,9 km sans potentiellement subir des dommages physiologiques temporaires lors d'un atelier de battage de pieux.

Le **PTS** peut être atteint pour :

- Les **Pinnipèdes** dans un rayon maximum de 450 m autour de l'atelier de travaux ;
- Le **Marsouin commun**, dans un rayon maximum de 500 m autour de l'atelier de travaux.

Autrement dit, les Phoques ne peuvent pas s'approcher à une distance inférieure à 450 m et les Marsouins communs à moins de 500 m sans potentiellement subir des dommages physiologiques permanents lors d'un atelier de battage de pieux.

Grâce aux études menées dans d'autres pays européens, en particulier ceux où le développement de l'éolien en mer est plus avancé comme l'Allemagne et le Danemark, il est possible d'avoir des retours d'expérience sur les effets attendus de la construction d'un parc. Par exemple, lors des opérations de battage de pieux pour la construction du premier parc éolien en mer en Allemagne (2009), les Marsouins communs se sont éloignés du site de battage sur une distance de 20 à 40 km (Dähne, et al., 2013). Leur retour sur la zone peut varier de quelques semaines à quelques mois. Une fois les travaux d'installation terminés et le parc en fonctionnement, **un retour à la normale** est attendu sans ou avec très peu de modification de l'écosystème. **L'ensemble des suivis environnementaux a pour but de contrôler les évolutions du milieu et leur résilience.**

5. MATERIEL ET METHODES DU SUIVI ACOUSTIQUE EN PHASE DE CONSTRUCTION

5.1 Protocole et plan d'échantillonnage

Le suivi repose sur le principe BACI (*Before-After Control-Impact*) c'est-à-dire qu'il est réalisé sur la base de comparaisons temporelles (**phase avant construction, dit « état référent » vs phase travaux, dit « état perturbé »**) et spatiales (**zone du parc, dite « zone impactée » vs zone hors parc, dite « zone témoin »**). Pour ce faire, il est donc nécessaire de mettre à contribution les connaissances sur l'état référent acquises dans la période 2020-2021 et détaillées dans le rapport EOHF – État de référence – Rapport final (Sinay, 2021), ainsi qu'acquérir de nouvelles données pendant la phase travaux.

Le protocole d'acquisition de données concerne :

- **Suivi du bruit ambiant sous-marin (MSu3a)** : acquisition de données sur le bruit ambiant sous-marin pendant les phases de travaux avec des enregistreurs et hydrophones à larges bandes, caractérisation du milieu et calcul d'indicateurs :
 - **Hydrophone H1** « zone témoin » disposé au Sud-Ouest de la zone du suivi, à 6 milles nautiques (MN) du port du Havre-Antifer ;
 - **Hydrophone H2** « zone impactée » disposé au Sud de la zone du parc.
- **Suivi des Mammifères marins par acoustique passive (MSu3b)** : détection de présence des Mammifères marins par vocalise *via* l'implantation sur site de trois C-PODs :
 - **C-POD C1** disposé au centre du parc (« zone impactée ») ;
 - **C-POD C3** disposé au Sud du parc près du mât de mesures (« zone impactée ») ;
 - **C-POD C2** « zone témoin » disposé à l'Est du projet à 6 MN du port de Veulette-sur-Mer.

5.1.1 Plan d'échantillonnage

La **Figure 5** présente une vue d'ensemble de la localisation du matériel acoustique.

Les C-PODs C3 et C1, ainsi que l'hydrophone H2 sont situés à l'intérieur de la concession du parc. Le C-POD C3 et l'hydrophone H2 sont mutualisés sur un même et unique emplacement. Le C-POD C2 et l'hydrophone H1 sont situés à l'extérieur dans des zones témoins à 6 MN respectivement des ports du Havre-Antifer et du port de Veulettes-sur-Mer. Les coordonnées géographiques sont présentées dans le **Tableau 4**.

La position du matériel a été définie selon les contraintes de l'environnement, les études antérieures selon le principe BACI (étude d'impact et état de référence) et les activités de travaux afin que la pose, le suivi et la récupération soient facilités et se déroulent en sécurité. Par ailleurs, les choix adaptés de sensibilité du matériel déployé et d'acquisition en plusieurs points dans un milieu aux conditions relativement homogène permettent d'optimiser la distance de détection en minimisant la saturation des bruits parasites, et également de généraliser les résultats à l'ensemble de l'aire d'étude.

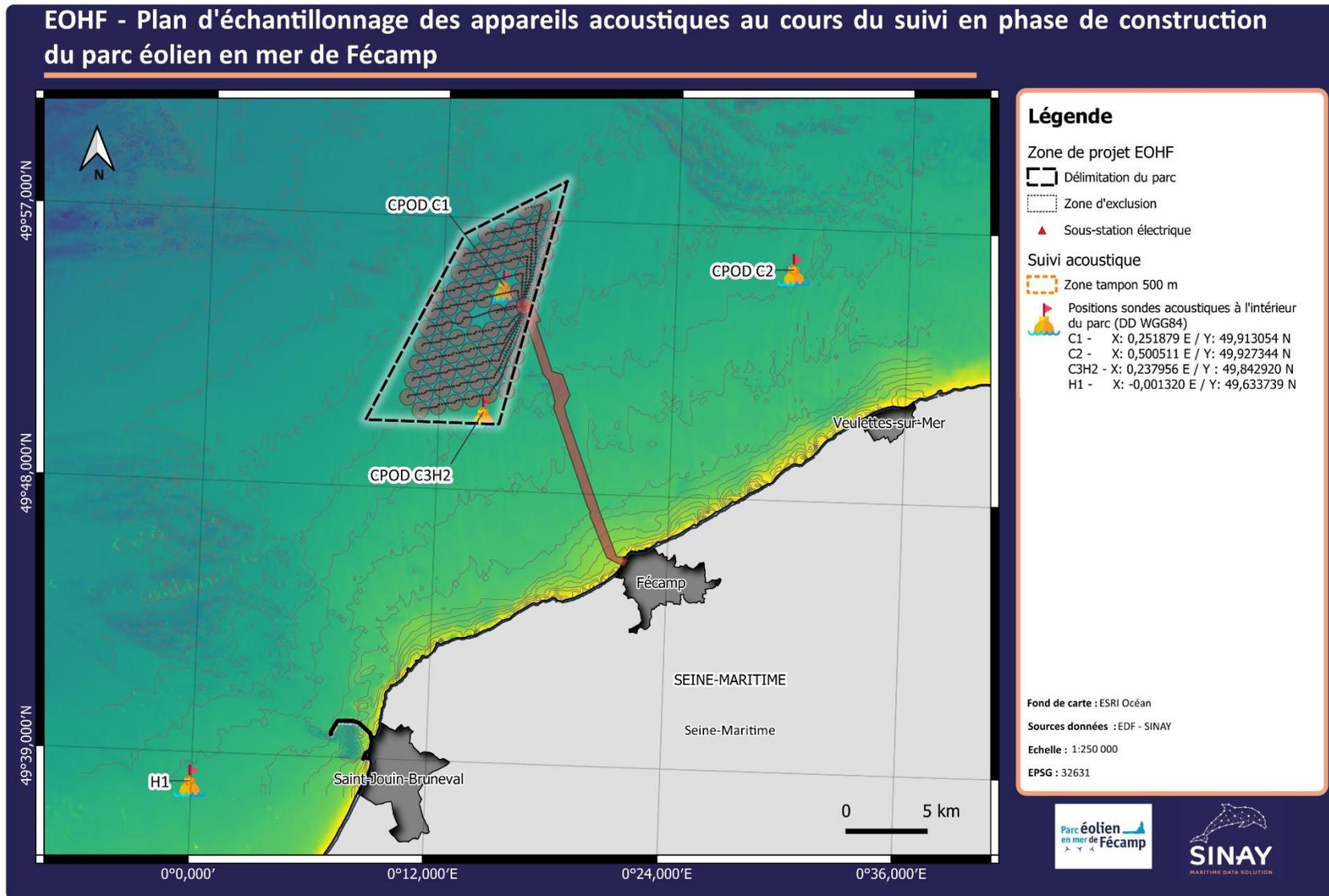


Figure 5 : positions géographiques des enregistreurs acoustiques à l'échelle de l'aire d'étude du parc éolien en mer de Fécamp.

Tableau 4 : coordonnées des points d’immersion des dispositifs acoustiques (WGS 84).

Points	Coordonnées (EPSG : 4326, WGS 84)			
H2 & C3	Coordonnées degrés minutes décimales			
	49°51,397’N	0°14,213’E	Relocalisation 49°50,5888’N	0°14,3029’E
H1	Coordonnées degrés minutes décimales			
	49°37,92’N	0°00,028’E		
C1	Coordonnées degrés minutes décimales			
	49°56,640’N	0°17,050’E	Relocalisation 49°54,8457’N	0°15,2104’E
C2	Coordonnées degrés minutes décimales			
	49°55,733’N	0°29,851’E		

5.1.2 Calendrier d’échantillonnage et données collectées

La période de suivi s’est échelonnée entre 2022 et 2023, années de construction offshore du parc éolien en mer de Fécamp. **Les périodes précises d’immersion des appareils acoustiques sont sélectionnées au regard des types de travaux réalisés.** Ce rapport présente les résultats de l’ensemble des campagnes de la phase de construction : quatre campagnes réalisées entre mars et novembre 2022 et une réalisée de juin à août 2023.

Au total, les campagnes de suivis de 2022 et 2023 ont permis de couvrir trois saisons (printemps, été et automne) avec une durée d’enregistrement à analyser d’environ 30 jours pour chaque enregistreur, au cours de chaque campagne, et 8 mois pour chaque C-POD. Le détail du planning opérationnel des travaux et des campagnes de suivi associées est disponible en **Annexes - Tableau 37**.

Le pourcentage des données acquises au cours des **campagnes de suivi du bruit ambiant (MSu3a)** en fonction des ateliers de travaux et des saisons est présenté dans le **Tableau 5**.

Tableau 5 : présentation de la couverture des données acquises en fonction des ateliers de travaux au cours des campagnes de suivi du bruit ambiant MSu3a de mars 2022 à novembre 2022 à de juin 2023 à août 2023.

Atelier de travaux	Saison	Pourcentage d’acquisition MSu3a sur la période de travaux
Forage des pieux de la sous-station électrique	Printemps 2022	95 %
Préparation des sols pour les fondations	Été 2022	70 %
Mise en place de la fondation et du topside de la sous-station électrique	Été 2022	86 %
Mise en place des fondations gravitaires (en 2 temps)	Été 2022	65 %
Ballastage	Été 2022	78 %
Mise en place des enrochements de protection	Automne 2022	63 %
Mise en place des câbles inter-éoliennes	Automne 2022	73 %
Installation des éoliennes	Été 2023	100 %

Le pourcentage des données acquises au cours de la **campagne de suivi des Mammifères marins (MSu3b)** en fonction des ateliers de travaux et des saisons est présenté dans le **Tableau 6**. Pour rappel, ce suivi s’est déroulé pendant huit mois consécutifs avec un changement des cartes mémoires au milieu de l’été 2022. Au cours de l’été 2023, seul le C-POD C3 a été mobilisé, ce dernier étant couplé avec l’enregistreur H2.

Les C-PODs ont subis plusieurs avaries au cours du suivi acoustique des Mammifères marins expliquant que certaines périodes de travaux n’ont pu être couvertes à 100 %.

Tableau 6 : présentation de la couverture des données acquises en fonction des ateliers de travaux au cours des campagnes de suivi des Mammifères marins MSu3b de mars 2022 à novembre 2022 à de juin 2023 à août 2023.

Atelier de travaux	Saison	Pourcentage d’acquisition MSu3b sur la période de travaux
Forage des pieux de la sous-station électrique	Printemps 2022	C1 : 82 %
Préparation des sols pour les fondations	Été 2022	C2 : 7 % C3 : 57 %
Mise en place de la fondation et du topside de la sous-station électrique	Été 2022	C1 : 97 % C2 : 96 % C3 : 70 %
Mise en place des fondations gravitaires (en 2 temps)	Été 2022	
Ballastage	Été 2022	
Mise en place des enrochements de protection	Automne 2022	
Mise en place des câbles inter-éoliennes	Automne 2022	
Installation des éoliennes	Été 2023	C3 : 36 %

5.2 Matériels déployés

Les caractéristiques et paramètres des enregistreurs et C-PODs sont présentés ci-dessous. Ces appareils, systèmes autonomes enregistrant numériquement les sons sous-marins, sont constitués principalement **d’un hydrophone et d’un enregistreur de données audio**, d’une carte électronique d’acquisition et d’un compartiment pour les piles. Les appareils acoustiques sont fixés sur des lignes de mouillage dont les caractéristiques sont détaillées en **Annexes - Figure 31**.

Les caractéristiques de la chaîne d’acquisition en font un système parfaitement adapté aux besoins du présent suivi acoustique en phase de construction :

- Une **autonomie de plusieurs mois** permettant un échantillonnage de données écologiquement significatives ;
- Un processus de **d’étalonnage et de calibration *in-situ*** avant l’immersion des appareils (détaillé en **Annexes – Section 10.2.3** ;
- Une **large bande fréquentielle d’écoute** pour les enregistreurs permettant la mesure simultanée des sons de Cétacés, plutôt dans les moyennes et hautes fréquences, et les sons anthropiques d’intérêt pour cette étude qui sont des sons basses fréquences ;
- Un **faible bruit** permettant de mesurer des signaux de petites amplitudes et donc d’optimiser les distances de détection ;

- Une **grande dynamique d'acquisition** (24 bits) permettant de mesurer des signaux de faibles amplitudes (signaux biologiques) en présence de signaux forts (passage de bateaux) ;
- Le taux d'acquisition une fois dans l'eau est de **100 %**.

5.2.1 Enregistreurs et hydrophones

5.2.1.1 Enregistreur Sylence EA-SDALP

Les **enregistreurs Sylence** ont pour objectif de collecter les données sonores captées par les hydrophones. Les caractéristiques de ces appareils sont résumées dans le **Tableau 7**.

Tableau 7 : caractéristiques des enregistreurs Sylence (RTsys).

Sylence EA-SDALP	
	
Stockage	4 Cartes SD - 4 TB
Format fichiers	Audio
Amplificateur (gain)	0 dB/15 dB
NB batteries Alcaline	15
Mode d'enregistrement	Continu / Echelonné
Fréquence d'échantillonnage	256 kHz
Format de l'enregistrement	24 Bits
Mode d'enregistrement	Continu
Plage de fréquence	[3 Hz à 128 kHz]
Amplificateur (gain)	0 dB
Autonomie d'enregistrement réelle / fréquence d'échantillonnage	40 jours
Diamètre	90 mm
Longueur	430 mm
Poids	4,5 kg (air) / 1,4 kg (eau)
Profondeur max	250 m
Position	H1 – H2

5.2.1.2 Hydrophones HTI-99 et Colmar GP1190

L'**hydrophone HTI-99-HF** (H1 – zone témoin) et le **Colmar GP1190** (H2 – zone du parc) sont conçus pour mesurer les fréquences respectivement **jusqu'à 150 kHz et 170 kHz**. Les rayons de détection sont de 300 à 600 mètres pour les clics et environ 800 mètres à 1,6 kilomètres pour les sifflements, suivant l'intensité d'émission et la direction des Mammifères marins. Les caractéristiques de ces appareils sont résumées dans le **Tableau 8** et le **Tableau 9** leurs avantages et leurs limites d'utilisation.

Dans la zone du parc, les niveaux de bruit causés par les travaux ou le passage des navires de service à proximité de l'enregistreur peuvent causer une variabilité sonore plus marquée par rapport à la zone témoin. Pour cela, un hydrophone avec une sensibilité plus faible que l'HTI-99-HF est utilisé, ici le Colmar GP1190, ce qui permet de réduire le risque de saturation de l'hydrophone et donc le risque de perte de données.

Par ailleurs, un amplificateur ajustable permettant de choisir le gain entre 0 et 15 dB. Plus la valeur de gain est élevée, plus la sensibilité de l'hydrophone aux sons augmente favorisant la probabilité d'enregistrer les sons plus faibles. Les instruments de mesures étant mouillés dans une zone relativement bruitée et en raison des capacités des hydrophones, les valeurs de gain des appareils sont réglées à 0 dB.

Tableau 8 : caractéristiques des hydrophones HTI-99 et Colmar GP1190.

Hydrophone HTI-99-HF		
	Acquisition	7 H à 150 kHz
	Sensibilité	-164 dB
	Saturation	165,93 dB
	Position	H1
Hydrophone Colmar GP1190		
	Acquisition	7 H à 170 kHz
	Sensibilité	-173 dB
	Saturation	174,93 dB
	Position	H2

Tableau 9 : avantages et limites d'utilisation des hydrophones.

Avantages	Limites
<ul style="list-style-type: none"> • Enregistrements bruts accessibles • Détection des fausses alertes • Analyse robuste • Ajustement du gain et de la sensibilité afin d'améliorer les détections ou éviter la saturation • Large rayon de détection • Détection simultanée du bruit et des Mammifères marins • Possibilités d'utilisation de différents algorithmes de détection 	<ul style="list-style-type: none"> • Période d'enregistrement limitée • Coût élevé

5.2.2 C-PODs

Les **C-PODs** sont conçus pour mesurer les fréquences de **20 à 160 kHz**. Ils détectent en continu les clics de Cétacés à l'intérieur d'un périmètre de détection d'un rayon de 300 à 650 mètres suivant l'intensité d'émission. Le **Tableau 10** présente les caractéristiques des C-PODs et le **Tableau 11** leurs avantages et leurs limites d'utilisation.

Tableau 10 : caractéristiques des C-PODs.

C-POD	
	
Stockage	1 Carte SD – 8 GB
Format fichiers	CP1
NB batteries Alcaline	10
Mode d'enregistrement	Continu / Echelonné
Plage de fréquence	20-160 kHz
Mode d'enregistrement	Continu
Diamètre	90 mm
Longueur	670 mm
Poids	2.1 kg sans batteries, 3.5 kg avec batteries
Profondeur max	100 m

Tableau 11 : avantages et limites d'utilisation des C-PODs.

Avantages	Limites
<ul style="list-style-type: none"> Analyse robuste Très nombreuses publications scientifiques prouvant sa validité Vaste communauté d'utilisateurs Les capteurs acoustiques sont optimisés spécifiquement pour la détection de cétacés L'installation est compacte et robuste, le déploiement aisé Grande capacité d'enregistrement et d'autonomie avec logistique réduite Flottabilité positive du C-POD facilitant sa mise en œuvre. 	<ul style="list-style-type: none"> Enregistrements bruts non accessibles Algorithme de détection non accessible par la communauté scientifique Détection uniquement des clics (sifflements et autres vocalises non détectés)

5.3 Méthodologie d'interprétation des données

5.3.1 Approche adoptée

La présente étude est basée sur une approche BACI (**Figure 6**). Cette approche, de l'acronyme anglais *Before-After-Control-Impact* (Green, 1979), est une approche statistique servant à définir la structure d'une étude environnementale et en particulier le plan d'échantillonnage. Cette approche consiste à comparer des paramètres (environnementaux, biologiques, écologiques) mesurés dans **deux situations géographiques et à deux moments différents** :

- Une **zone impactée** (proche des travaux, par exemple) ;
- Une **zone témoin** (non impactée, normalement loin des travaux) ;

- **Avant que les impacts** se vérifient (c'est à dire avant les travaux) ;
- **Après le début des activités** ayant un impact potentiel.

BACI est aujourd'hui une **approche standard** pour les processus de prise en compte des aspects environnementaux lors des développements industriels et est préconisée pour les mesures MSu3a et MSu3b du programme de suivi des travaux de construction du parc éolien en mer de Fécamp.

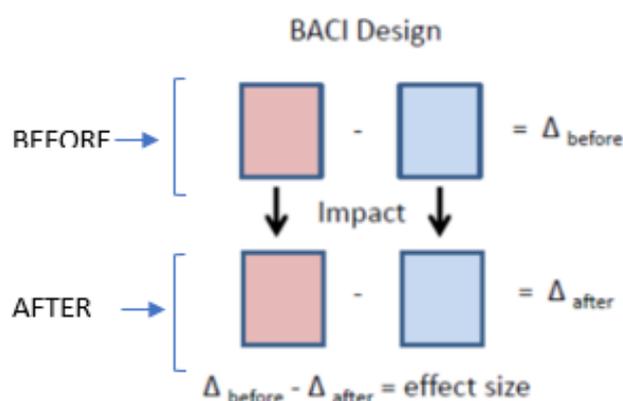


Figure 6 : schéma de l'approche BACI (Secor, 2017).

5.3.2 Analyse du bruit ambiant

L'analyse du bruit ambiant sous-marin est présentée dans cette étude par saison et par année suivi. L'analyse du bruit ambiant passe par la production de plusieurs indicateurs permettant de caractériser le milieu sonore lors **une analyse temporelle puis fréquentielle**.

5.3.2.1 Analyse temporelle

Deux indicateurs acoustiques sont calculés :

- Le **SPL zero-to-peak (Lp,0 – pk)** correspondant au niveau de pression acoustique maximal instantané, pertinent pour les sons impulsifs ;
- Le **SPL-RMS (Root Mean Square)** correspondant au niveau de pression acoustique moyen, par jour et sur la période d'acquisition, adapté pour décrire le bruit continu.

Des statistiques (moyenne, écart type, min-max, percentiles) sont produites pour permettre des comparaisons spatiales (zone témoin et impactée) et temporelles (état de référence et phase de construction). La représentation des niveaux sonores en percentiles permet de décomposer les niveaux de bruit calculés selon leur représentativité. En effet, trois percentiles sont produits afin de visualiser les niveaux sonores présent 90 % du temps, 50 % du temps et 10 % du temps.

Les représentations graphiques des niveaux de bruit (SPL-RMS sur toute la période d'acquisition) et les percentiles pour chaque saison sont annexés à cette étude.

5.3.2.2 Analyse fréquentielle

L'analyse fréquentielle des niveaux sonores au moyen de la Densité Spectrale de Puissance (DSP) permet de visualiser la répartition de l'énergie en fonction des fréquences et ainsi de pouvoir

discriminer l'implication de différentes sources sonores (naturelles ou anthropiques) sur la période analysée.

Afin de qualifier **la représentation fréquentielle du bruit enregistré**, cette dernière est représentée sur le **modèle de Wenz**. La projection des DSP sur le modèle de Wenz permet de visualiser des variations exprimables sur un référentiel d'indices. Ces indices permettant à la fois de représenter les variations dans les basses et hautes fréquences.

5.3.3 Modélisation du bruit ambiant et des risques sur les Mammifères marins

La méthode de simulation de la propagation des ondes sonores est basée sur l'équation parabolique (Collins, McDonald, Kuperman, & Siegman, 1994). Le modèle utilisé est le modèle RAM, considéré par (Farcas, Thompson, & Merchant, 2016) comme étant la meilleure solution pour étudier les bruits en basses fréquences (le bruit du trafic maritime, par exemple) sur le plateau continental.

A partir des variables environnementales d'entrée telles que la bathymétrie, les propriétés géo-acoustiques du substrat et le profil de vitesse du son dans l'eau, le modèle simule la propagation des ondes sonores à partir des données AIS (principale source anthropique) et des sources naturelles (le vent en particulier).

La modélisation employée dans cette étude produit **la cartographie** de trois éléments :

- Le **bruit ambiant (RMS)** ;
- L'**empreinte acoustique** des travaux ;
- La cartographie des **risques acoustiques pour les Mammifères marins**.

5.3.3.1 Modélisation du bruit ambiant

La modélisation du bruit ambiant (RMS) permet de cartographier l'emprise sonore des sources significatives du bruit associé. Ainsi, il est possible de visualiser l'atténuation des bruits produits à l'échelle du parc éolien.

5.3.3.2 Modélisation de l'empreinte acoustique

La modélisation permet également de cartographier **l'empreinte acoustique des travaux ciblés** par rapport à un état de référence. La représentation cartographique permet, là encore, d'apprécier l'atténuation et la répartition des niveaux de bruit supérieurs à ceux d'un milieu sans travaux.

5.3.3.3 La modélisation des risques acoustiques pour les Mammifères marins

Les risques acoustiques pour les Mammifères marins sont définis par **des seuils dit PTS et TTS** (Southall, et al., 2019) et décrit dans la partie **3.2.2 Seuils d'apparitions d'effets négatifs du bruit sous-marin sur les Mammifères marins**. La modélisation des risques acoustiques pour les Mammifères marins prend en compte **les sensibilités des audiogrammes** de chaque groupe d'espèces afin de représenter les seuils PTS et TTS de façon cartographique. Cette représentation permet de visualiser l'absence de dépassement de seuils ou au contraire leurs emprises géographiques.

5.3.4 Analyse de la fréquentation des Mammifères marins

Le suivi de la fréquentation est réalisé à partir des résultats des détections des clics et de sifflements générés par les Mammifères marins et enregistrés par les C-PODs. Ces détections sont traduites en indicateur **DPM (Detection Positive Minutes)** correspondant au nombre de minutes contenant des clics ou des sifflements sur un temps donné.

Les DPM sont utilisées comme **indicateur de présence d'une espèce sur la zone**. En revanche, il n'est pas recommandé comme indicateur indirect de l'abondance ((Anderson, 2001) et (Anderson, 2003)). Selon l'agrégation temporelle choisie, cet indicateur recense l'activité bioacoustique par minute, par jour, par mois ou tout autre type d'agrégation temporelle ((Teilmann, 2003) ; (Cartensen, Henriksen, & Teilmann, 2006) ; (Diederichs, et al., 2008) et (Benhemma Le Gall, Graham, Merchant, & Thompson, 2021)).

Dans ce rapport, l'**activité bioacoustique journalière** (DPM/jour) est choisie, avec une agrégation des mêmes plages horaires pour chaque jour d'enregistrement. La distinction entre les espèces ou groupes d'espèces est réalisée comme suit selon le type de détections :

- Les **clics** détectés sont attribués au **Marsouin commun** ;
- Les **sifflements** détectés sont attribués aux **Delphinidés**, l'identification à l'espèce étant plus difficile.

Dans un premier temps, les différentes données acquises sont présentées en fonction des saisons et des travaux suivis. Dans un second temps, les résultats sont comparés aux données de l'état de référence, selon l'approche BACI. Des analyses complémentaires au suivi BACI sont également proposées :

- Des **analyses statistiques type ANOVA** afin de tester la significativité statistique des différences observées dans l'approche BACI entre différents niveaux d'échantillonnage (périodes soit au cours du suivi de l'état de référence ou de la phase de construction, saisons, années et zone du parc ou zone témoin) ;
- Un modèle de type GAM (Generalized Additive Models) afin d'évaluer l'influence des variables anthropiques et naturelles sur les variations de la fréquentation du site par les Mammifères marins. Le choix des variables à tester est réalisé sur la base de connaissances existantes sur les variables ayant un pouvoir explicatif sur la distribution de Cétacés :
 - Quatre variables abiotiques : la température de surface (SST) et la vitesse du courant comme variables continues, la profondeur et la distance à la côte comme variables catégorielles (côte/large pour la profondeur, la distance associée à chaque station telle que mesurée par SIG depuis la côte pour la distance) ;
 - Une variable biologique : la biomasse de phytoplancton, utilisée comme proxy de la disponibilité de nourriture ;
 - Les données de température de surface, vitesse du courant et concentration du phytoplancton sont issues de la base de données Copernicus.

6. MESURES DE SUIVI DU BRUIT AMBIANT

Une analyse des niveaux sonores durant la phase de construction est réalisée à partir des données collectées aux points d'enregistrement H1 (zone témoin) et H2 (zone du parc). Ces analyses sont réalisées par saison (printemps 2022, été 2022, automne 2022 et été 2023) en fonction des ateliers de travaux réalisés.

Ces résultats sont comparés aux niveaux sonores observés durant l'état de référence réalisé de 2019 à 2021.

6.1 Printemps 2022

La saison du printemps 2022 regroupe deux ateliers de travaux :

- Le **battage des pieux de la sous-station électrique**, réalisé au cours de la journée du **7 mars 2022**. Cet atelier a été suivi par la mesure MSu14-MR2, suivi acoustique en temps réel, et fait l'objet d'un rapport à part entière dissocié de la mesure de suivi acoustique passif du bruit ambiant MSu3a ;
- Le **forage des pieux de la sous station électrique**, réalisé entre le **8 mars et le 15 avril 2022**. Cet atelier fait également l'objet d'une **modélisation de l'empreinte acoustique**. En effet, l'étude de la signature acoustique du forage ressort comme étant une source de bruit anthropique distinctive par ses fréquences et son intensité.

Au printemps 2022, la **période d'immersion** des appareils acoustiques aux points d'enregistrements H1 et H2 s'étend du **10 mars au 15 avril 2022**.

6.1.1 Zone du parc

6.1.1.1 Analyse temporelle

La **Figure 7** présente le niveau SPL-RMS moyen (en dB re 1 μ Pa) calculé par jour sur la période d'acquisition du 10 mars au 15 avril 2022 dans la zone du parc, au point d'enregistrement H2 lors du forage des pieux de la sous-station électrique. Le niveau SPL-RMS moyen par jour est représenté par la ligne bleue ; l'écart-type par jour par l'enveloppe bleue ; la moyenne sur la période par la ligne rouge ; et l'écart-type sur la période par les lignes en pointillées vert.

Les niveaux sonores SPL-RMS (dB re 1 μ Pa) et $L_{p,0} - pk$ (dB re 1 μ Pa) enregistrés du 11 mars au 15 avril 2022 au point d'enregistrement H2 sont présentés en **Annexes - Figure 32**. La distance du navire de construction (ici le Sea Installer) par rapport au point d'enregistrement H2 est également représentée.



Figure 7 : niveaux SPL-RMS (dB re 1µPa) moyen par jour et sur la période d’acquisition calculés dans la zone du parc au point d’enregistrement H2 au printemps 2022 lors du forage des pieux de la sous-station électrique. La période de travaux suivie est représentée par les lignes en violet.

Dans la zone du parc, au cours de la période de forage des pieux de la sous-station électrique au printemps 2022, les valeurs moyennes des mesures SPL-RMS quotidiennes sont comprises entre 95 et 110 dB re 1µPa. **La moyenne sur toute la période d’enregistrement est de 102 dB re 1µPa avec un écart-type d’environ 9 dB re 1µPa.**

Les valeurs des mesures SPL-RMS démontrent que les niveaux sonores ne sont pas distribués de manière homogène au cours la période d’enregistrement. En effet, les niveaux de bruit augmentent entre le 14 mars et le 7 avril 2022, période correspondant à l’atelier de forage des pieux de la sous-station électrique. Et en-dehors des phases de forage, le niveau sonore est autour de 95 dB re 1µPa (entre le 11 mars et le 14 mars 2022 et entre le 7 avril et le 12 avril 2022).

Le **Tableau 12** présente la distribution statistique de l’indicateur SPL-RMS calculé au point d’enregistrement H2 dans la zone du parc au printemps 2022, lors du forage des pieux de la sous-station électrique.

Tableau 12 : niveaux de bruits SPL-RMS (dB re 1µPa) dans la zone du parc au point d’enregistrement H2 au printemps 2022 lors du forage des pieux de la sous-station électrique.

Indicateur	Moyenne	Écart-type	Médiane
SPL-RMS	102,42 dB re 1µPa	8,83 dB re 1µPa	101,58 dB re 1µPa

L’analyse des niveaux sonores en percentiles permet de mettre en évidence que le niveau sonore (SL) à la source est de 185 dB re 1µPa pendant 50 % du temps avec un pic à 206 dB re 1µPa pendant 5 %

du temps à une période donnée (29 mars 2022). Les percentiles de ces niveaux sonores sont présentés en **Annexes - Figure 33**.

Les niveaux sonores moyens enregistrés au printemps 2022 restent relativement bas pour la zone du parc dans un contexte de construction, en accord avec la littérature (Gervaise, Lossent, & Gigou, 2022). Aucun risque acoustique n'est identifié pour les Mammifères marins ; les niveaux sonores maximales enregistrés ne dépassant pas les 150 dB re 1 μ Pa (SPL-RMS) (inférieurs aux seuils TTS et PTS) (OSPAR, 2009).

6.1.1.2 Analyse fréquentielle

La **Figure 8** présente la densité spectrale de puissance (DSP, en dB re 1 μ Pa²/Hz) calculée sur la période d'acquisition du 11 mars au 12 avril 2022 dans la zone du parc lors du forage des pieux de la sous-station électrique, au point d'enregistrement H2 dans le parc, en fonction des fréquences (10 Hz à 30 kHz). La courbe bleue correspond au niveau de la DSP avant ou après une phase de forage (i.e. entre le 11 mars et le 14 mars 2022 et entre le 7 avril et le 12 avril 2022). La courbe rouge correspond au niveau de la DSP pendant les phases de forage (i.e. entre le 14 mars et le 7 avril 2022). Par ailleurs, les courbes en pointillées correspondent aux indices de trafic maritime (1 à 7, du moins au plus intense) selon le modèle de Wenz (Wenz, 1962). Ces courbes permettent de comprendre comment se situe le bruit des travaux enregistré par rapport au bruit du trafic maritime. Ces indices de référence sont comparés aux niveaux sonores enregistrés pendant la période d'acquisition au printemps 2022.

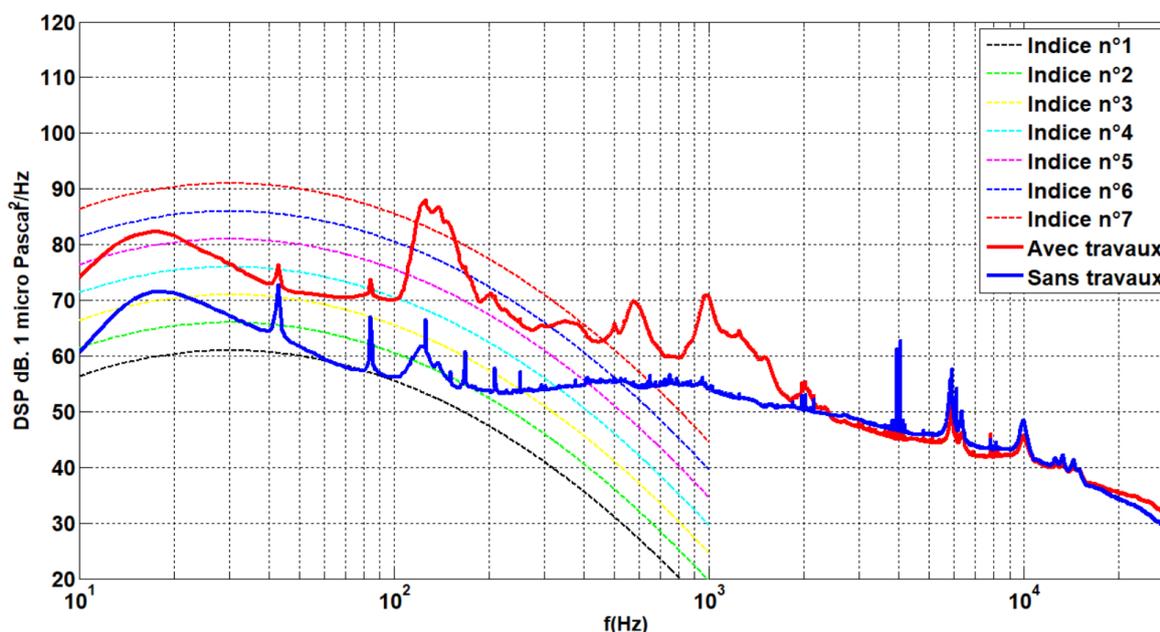


Figure 8 : distribution de la moyenne des niveaux DSP jusqu'à 30 kHz dans la zone du parc au point d'enregistrement H2 au printemps 2022 lors du forage des pieux de la sous-station électrique. Les niveaux sonores des phases travaux sont exprimés en rouge et les phases sans travaux en bleu. Les courbes en pointillées correspondent aux indices associés au trafic maritime (modèle de Wenz, 1962).

La **Figure 8** permet ainsi de constater que les niveaux sonores en dehors des phases de travaux sont assimilables à l'indice 2 du modèle de Wenz. **Pour rappel, lors de l'état de référence, le niveau sonore était situé entre les indices 5 et 6 à ce même point d'écoute dans le parc.** La diminution de cet indice s'explique probablement par le changement du trafic maritime dans la Manche en phase de construction du parc éolien en mer de Fécamp (en-dehors des navires associés aux travaux).

Pendant la phase de forage des pieux de la sous-station électrique, les niveaux sonores varient de l'indice 4 à 7, dépassant même l'indice 7 dans les bandes de fréquences de 100 à 200 Hz et de 600 à 1 kHz. Les travaux de type forage sont reconnus comme ayant une distribution fréquentielle allant de 10 Hz à 1 kHz (Suedel, McQueen, Wilkens, & Fields, 2019). Au-delà de 2 kHz, les niveaux sonores sont comparables avec ceux enregistrés en-dehors des périodes de travaux (indice 2) et les variations observées au-delà de 2 kHz sont principalement dues aux bruits naturels, en accord avec le modèle de Wenz (Wenz, 1962). Autrement dit, au cours de l'atelier de forage des pieux de la sous-station électrique, une augmentation des niveaux sonores est constatée principalement dans les basses fréquences (< 200 Hz) et dans les moyennes fréquences jusqu'à 2 kHz. La plus grande disparité, de l'ordre de 25 dB, se situe dans les fréquences de 100 à 200 Hz et peut être attribuée au bruit généré par cet atelier.

Les comparaisons de la densité spectrale de puissance (DSP) avec le modèle de Wenz confirment la domination du bruit d'origine anthropique sur l'ensemble des basses et moyennes de fréquences pendant l'atelier de forage au printemps 2022 dans la zone du parc.

6.1.2 Zone témoin

6.1.2.1 Analyse temporelle

La **Figure 9** présente le niveau SPL-RMS moyen (en dB re 1 μ Pa) calculé par jour sur la période d'acquisition du 17 mars au 14 avril 2022 dans la zone témoin lors du forage des pieux de la sous-station électrique, au point d'enregistrement H1, dit « zone témoin » en-dehors du parc. Le niveau SPL-RMS moyen par jour est représenté par la ligne bleue ; l'écart-type par jour par l'enveloppe bleue ; la moyenne sur la période par la ligne rouge ; et l'écart-type sur la période par les lignes en pointillés vert.

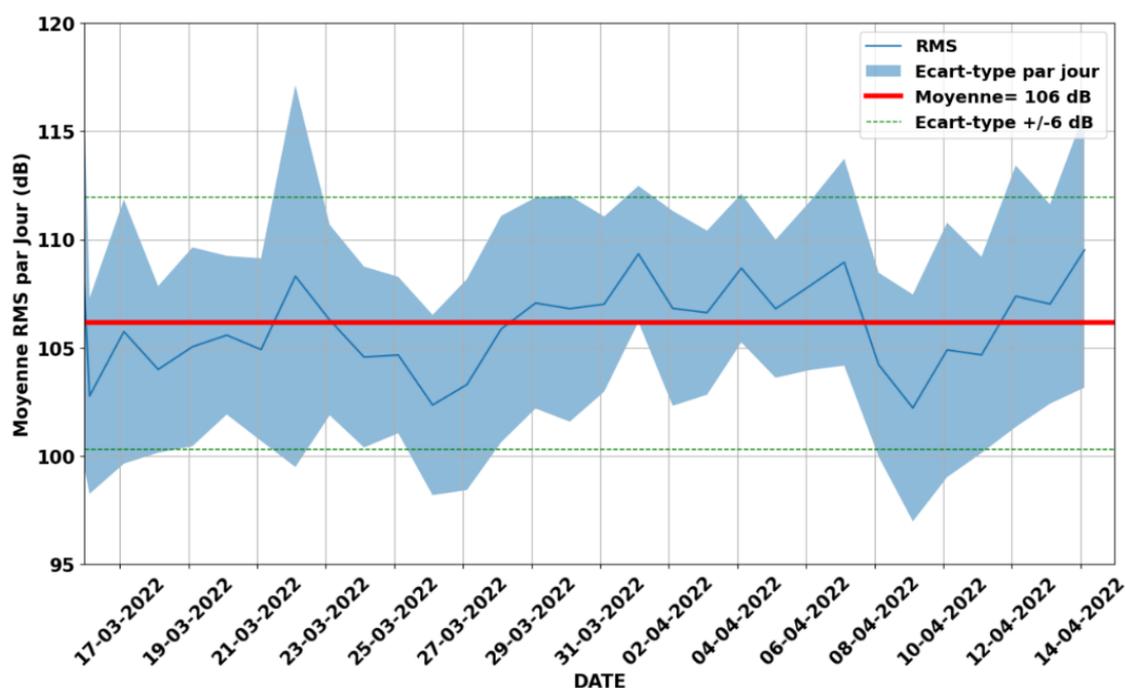


Figure 9 : niveaux SPL-RMS (dB re 1 μ Pa) moyen par jour et sur la période d'acquisition calculés dans la zone témoin au point d'enregistrement H1 au printemps 2022 lors du forage des pieux de la sous-station électrique.

Les niveaux sonores SPL-RMS (dB re 1 μ Pa) et $L_{p,0} - pk$ (dB re 1 μ Pa) enregistrés du 17 mars au 14 avril 2022 au point d'enregistrement H1 sont présentés en **Annexes - Figure 34**.

Dans la zone témoin, au cours de la période de forage des pieux de la sous-station électrique au printemps 2022, les valeurs moyennes des mesures SPL-RMS quotidiennes sont comprises entre 102 dB re 1 μ Pa et 110 dB re 1 μ Pa **avec une moyenne sur la période de 106 dB re 1 μ Pa et un écart-type d'environ 6 dB re 1 μ Pa**.

Le **Tableau 13** présente la distribution statistique de l'indicateur SPL-RMS calculé au point d'enregistrement H1 dans la zone témoin, au printemps 2022 lors du forage des pieux de la sous-station électrique.

Tableau 13 : niveaux de bruits SPL-RMS (dB re 1 μ Pa) dans la zone témoin au point d'enregistrement H1 au printemps 2022 lors du forage des pieux de la sous-station électrique.

Indicateur	Moyenne	Écart-type	Médiane
SPL-RMS	106,15 dB re 1 μ Pa	5,83 dB re 1 μ Pa	105,68 dB re 1 μ Pa

L'analyse des niveaux sonores en percentiles permet de mettre en évidence de faibles variations des niveaux sonores (12 dB entre le P10 et le P95), ces niveaux étant principalement dominés par des sources sonores associées au passage de navires à proximité du point d'enregistrement H1. Les percentiles de ces niveaux sonores sont présentés en **Annexes - Figure 35**.

Les niveaux SPL-RMS moyens sont supérieurs de 3,73 dB re 1 μ Pa dans la zone témoin que dans la zone du parc pendant les travaux de forage. Cette différence de 3,73 dB re 1 μ Pa témoigne de l'effet du trafic maritime dans la zone témoin. La zone du parc est régie par des restrictions à la navigation contrairement à la zone témoin. Les niveaux sonores dans cette zone sont davantage soumis à l'influence du trafic maritime que par les travaux de forage (dans les basses et moyennes fréquences).

6.1.3 Comparaison des données enregistrées avec l'état de référence

Le **Tableau 14** présente la comparaison, sur la saison du printemps 2022, des niveaux de bruit SPL-RMS (dB re 1 μ Pa) entre le suivi au cours de l'atelier de forage de la sous-station électrique et l'état de référence.

Tableau 14 : comparaison des niveaux de bruit SPL-RMS (dB re 1 μ Pa) entre le suivi acoustique réalisé lors de l'état de référence et de la phase travaux (forage) au cours du printemps 2022.

	Forage des pieux de la sous-station	
	Zone du parc	Zone témoin
SPL-RMS – État de référence	107 dB re 1 μ Pa	107 dB re 1 μ Pa
SPL-RMS – Phase de construction	102,42 dB re 1 μ Pa	106,15 dB re 1 μ Pa
Tendance	-	=

La comparaison des niveaux sonores entre le suivi acoustique réalisé lors de l'état de référence et de la phase travaux au cours du printemps 2022 démontre :

1. Une diminution de 4,58 dB re μPa des niveaux sonores moyens (SPL-RMS) entre l'état de référence et la phase construction dans la zone du parc.
2. Des niveaux sonores moyens (SPL-RMS) similaire entre l'état de référence et la phase de construction dans la zone témoin.

Les travaux de forage des pieux dans la sous-station électrique ne se sont pas démarqués dans la zone du parc et dans la zone témoin par rapport à l'ambiance sonore enregistrée lors de l'état de référence.

6.1.4 Modélisation de l'atelier de forage des pieux de la sous-station électrique

La modélisation de l'atelier de forage permet de cartographier :

- Les **niveaux sonores** (SPL-RMS) reçus en tout point de la zone d'étude (**Annexes - Figure 36**) ;
- L'**empreinte acoustique**, soit la différence entre les niveaux sonores du forage tels qu'estimés par le modèle et les niveaux typiques en-dehors des travaux ;
- L'**emprise géographique des risques acoustiques** (TTS et PTS) pour les Mammifères marins.

La modélisation intègre des données de niveaux sonores à la source issue de la bibliographie et cadré par une calibration passive associée aux données enregistrées *in situ* aux points d'enregistrement H1 et H2 au cours de l'atelier de forage au printemps 2022.

6.1.4.1 Empreinte acoustique

L'empreinte acoustique de l'atelier de forage des pieux de la sous-station électrique est modélisée par rapport au niveau de bruit ambiant enregistré avant le début du forage dans la zone du parc avec l'enregistreur H2 (niveau SPL-RMS = 95 dB re μPa , Cf **section 6.1.1**). **Cette valeur est utilisée comme référence pour le calcul de l'empreinte sur toute la zone.**

Cependant dans la zone témoin (H1), les niveaux de bruit ambiant typiques peuvent être plus élevés car plus proches des zones de trafic maritime (niveau SPL-RMS moyen en zone témoin = 106 dB re $1\mu\text{Pa}$, Cf **section 6.1.2**). Le choix de 95 dB re μPa comme référence pour le calcul de l'empreinte acoustique représente donc un choix prudent répondant au principe de précaution.

Les niveaux sonores décrivant l'empreinte acoustique des travaux de forage de la sous-station électrique sont présentés dans le **Tableau 15** en relation à la distance depuis la source.

Tableau 15 : empreinte acoustique du forage et rayon moyen de l'emprise géographique des niveaux sonores à partir de la source.

Niveaux sonores de l'empreinte acoustique lors de l'atelier de forage (différence par rapport à 95 dB re $1\mu\text{Pa}$)	Distance moyenne des niveaux sonores depuis la source
+ 45 dB re $1\mu\text{Pa}$	316 m

+ 30 dB re 1 μ Pa	1,8 km
+ 15 dB re 1 μ Pa	8,9 km

Ces valeurs s'atténuent progressivement avec l'éloignement de la source sonore. Autrement dit, les niveaux sonores des travaux de forage se concentrent dans les basses fréquences, et ces ondes sont fortement absorbées par le sédiment (dans un fond est inférieur à 40 mètres) en plus des atténuations géométriques. Ainsi, sur une distance de 100 m, le niveau sonore diminue de 36 dB ; l'atténuation physique se faisant rapidement.

Le même phénomène est présenté de façon plus détaillée et sous forme cartographique en **Figure 10**. Les différences les plus élevées (+ 60 dB re 1 μ Pa) sont localisées à proximité de la source.

L'emprise géographique de l'empreinte acoustique issue de l'atelier de forage de la sous-station électrique reste relativement limitée en valeur, à l'échelle du parc éolien de Fécamp et de son périmètre proche. L'énergie acoustique émise par les travaux de forage s'atténue fortement dès les premiers mètres.

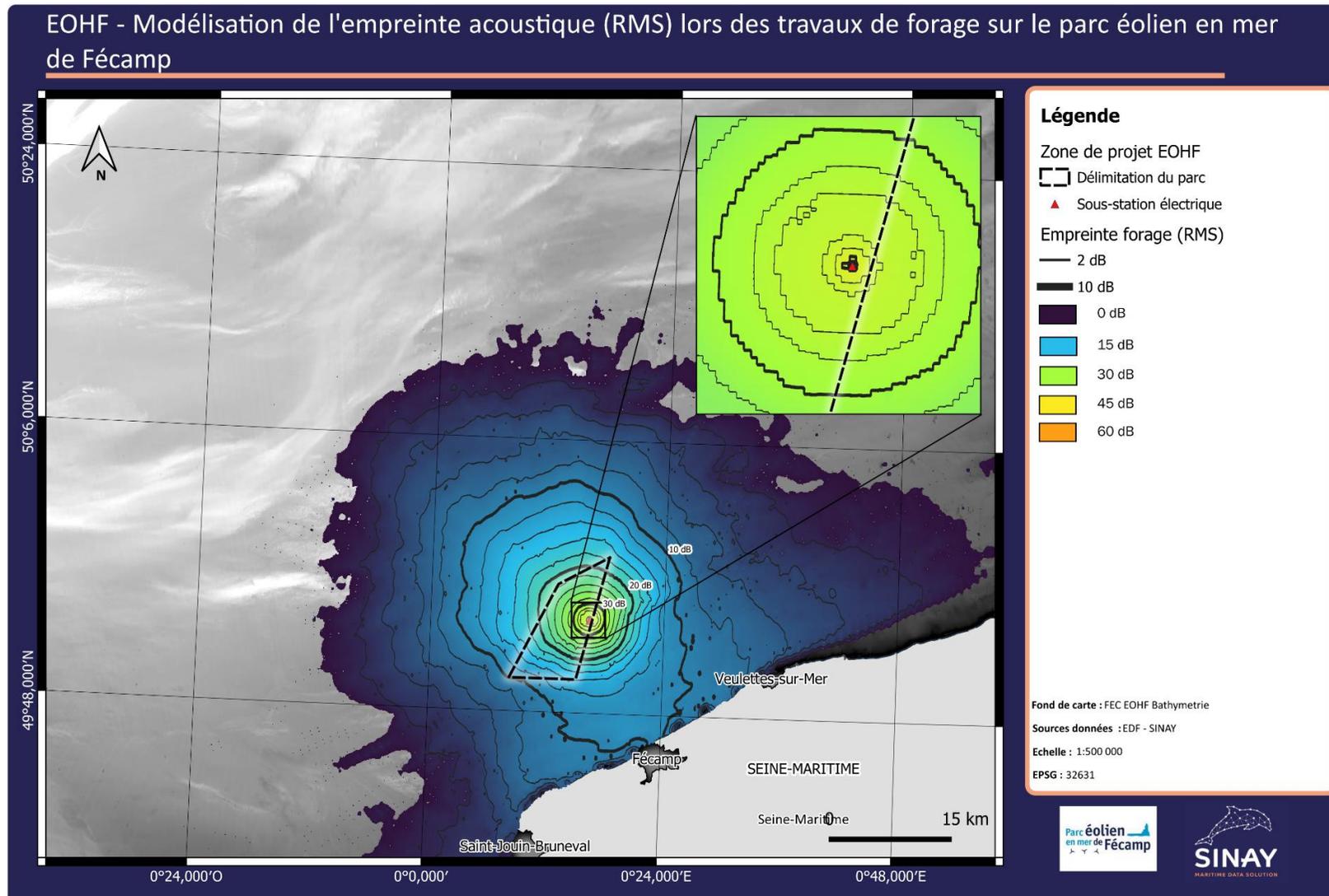


Figure 10 : cartographie de l'empreinte acoustique issue de l'atelier du forage de la sous-station électrique au printemps 2022 (SPL-RMS). Les niveaux sonores de référence correspondent aux périodes en dehors des phases de travaux (95 dB).

6.1.4.2 Risques pour les Mammifères marins

L'impact acoustique pour les Mammifères marins est exprimé en considérant une échelle de seuils d'apparition d'impact sur les individus associé à la perte d'audition permanente (PTS) ou temporaire (TTS) (Southall, et al., 2019). **Ces seuils concernent l'apparition de ces effets négatifs sur un individu exposé au bruit pendant 24 h (L_E – 24 H)**, impliquant une présence continue dans la zone d'intérêt pendant 24h. L'application des effets type PTS et TTS est considéré comme peu probable. En effet, si un individu est dérangé par un bruit persistant (jusqu'à 24h), il s'éloigne de la zone d'impact, évitant ainsi d'endommager ses capacités auditives. Des études menées en mer du Nord lors de travaux de construction de parcs éoliens offshore démontrent ce fait ((Dähne, et al., 2013) ; (Tougaard & Miller, 2009)). De plus, dans la Manche orientale, il n'y a pas de population résidente de Mammifères marins ayant un degré de fidélité spatiale très marqué (comme c'est le cas du Grand Dauphin dans le golf Normand Breton par exemple), représentant un facteur d'augmentation des risques.

Le **Tableau 16** présente les valeurs seuils des dommage PTS et TTS en fonction de la sensibilité des différentes espèces de Mammifères marins à un bruit continu.

Tableau 16 : seuils de perte temporaire d'audition (TTS) et seuils de perte permanente d'audition (PTS) définis par le (National Marine Fisheries Services).

Seuil	Type de son	Cétacés basses fréquences	Cétacés moyennes fréquences	Cétacés hautes fréquences	Pinnipèdes (Phocidés)
PTS	Non Impulsif	199 dB re.1μPa ² s	198 dB re.1μPa ² s	173 dB re.1μPa ² s	201 dB re.1μPa ² s
TTS	Non Impulsif	179 dB re.1μPa ² s	178 dB re.1μPa ² s	153 dB re.1μPa ² s	181 dB re.1μPa ² s

La **Figure 11** illustre la modélisation des risques acoustiques (TTS et PTS) associés au forage des pieux de la sous-station électrique pour quatre groupes d'espèces de Mammifères marins selon la sensibilité d'après leurs audiogrammes :

- Les Mammifères marins sensibles **aux basses fréquences** (les Mysticètes) ;
- Les Mammifères marins sensibles **aux moyennes fréquences** (ex. : les Delphinidés, groupe d'appartenance du Grand dauphin et du Dauphin commun) ;
- Les Mammifères marins sensibles **aux hautes fréquences** (ex. : les Phocoenidés, groupe d'appartenance du Marsouin commun, espèce la plus sensible sur le plan auditif dans la zone du parc éolien en mer de Fécamp) ;
- Les Pinnipèdes (ex. : les Phocidés, représentés dans la Manche par le Phoque gris et le Phoque veau marin).

La modélisation du bruit sous-marin généré par l'atelier de forage ne présente pas de dépassement de seuils PTS ou TTS pour les quatre groupes de Mammifères marins.

Pour rappel, ces seuils sont établis pour un Mammifère marin exposé au bruit durant au moins 24 h consécutives.

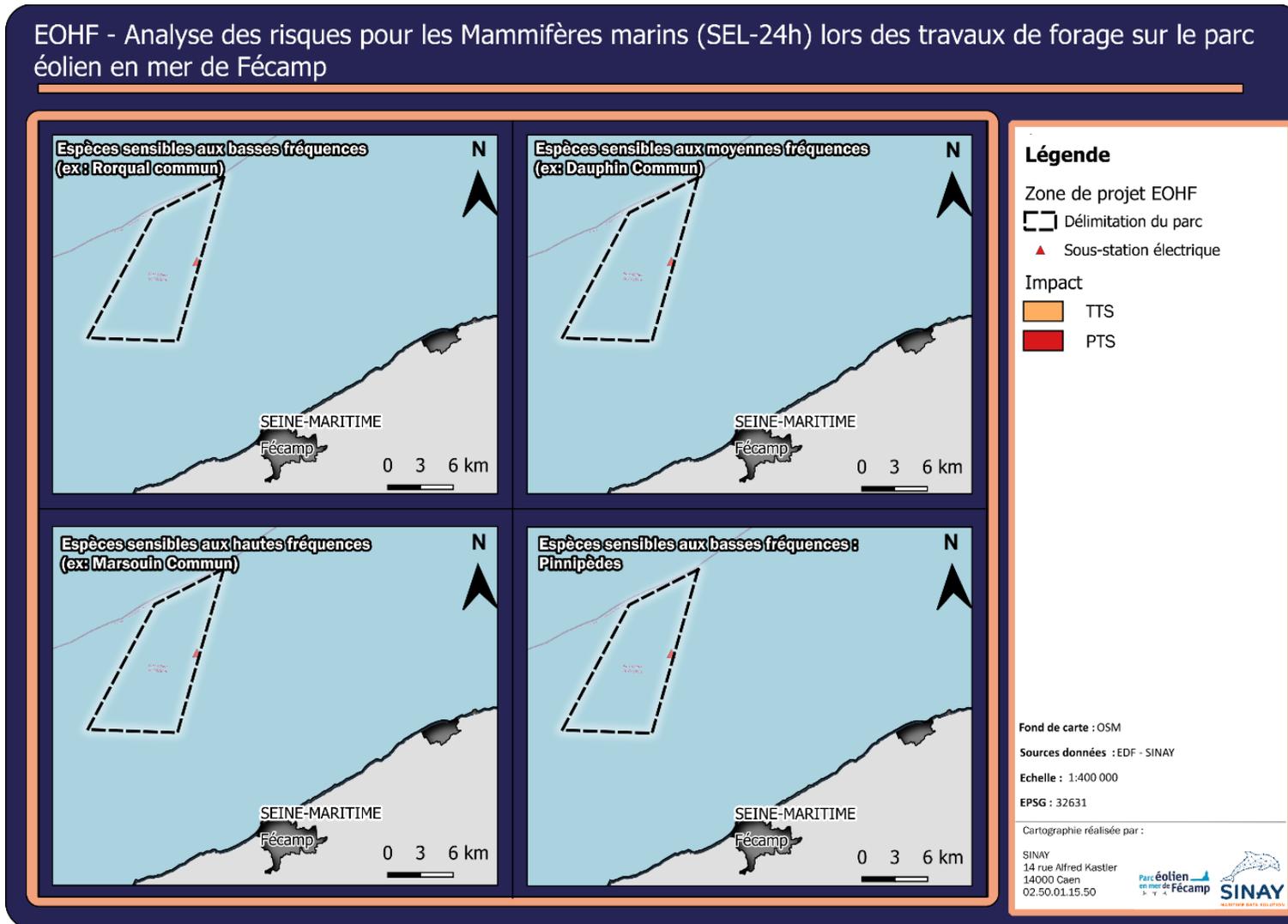


Figure 11 : cartographie des risques acoustiques pour les Mammifères marins ($L_E - 24 H$) associés à l'atelier de forage de la sous-station électrique au printemps 2022.

6.2 Été 2022

La saison de l'été 2022 regroupe quatre ateliers de travaux :

- La **préparation des sols pour la pose des fondations gravitaires**, réalisée du **4 juin au 20 juillet 2022** ;
- La **mise en place de la fondation et du topside de la sous station électrique**, réalisée du **31 juillet au 7 août 2022** ;
- L'**installation des fondations gravitaires**, réalisée en deux temps, entre le **31 juillet et le 18 septembre 2022** ;
- Le **ballastage des fondations**, réalisé du **26 août au 16 octobre 2022**.

A l'été 2022, les **périodes d'acquisition** des données acoustiques aux points d'enregistrements H1 et H2 s'étendent du **30 mai au 5 juillet 2022** et du **1^{er} août au 2 septembre 2022**.

6.2.1 Zone du parc

6.2.1.1 Analyse temporelle

➤ Préparation des sols pour la pose des fondations gravitaires

La **Figure 12** présente le niveau SPL-RMS moyen (en dB re 1 μ Pa) calculé par jour sur la période d'acquisition du 30 mai au 5 juillet 2022 dans la zone du parc, au point d'enregistrement H2 lors de la préparation des sols pour la pose des fondations gravitaires. Le niveau SPL-RMS moyen par jour est représenté par la ligne bleue ; l'écart-type par jour par l'enveloppe bleue ; la moyenne sur la période par la ligne rouge ; et l'écart-type sur la période par les lignes en pointillées vert.

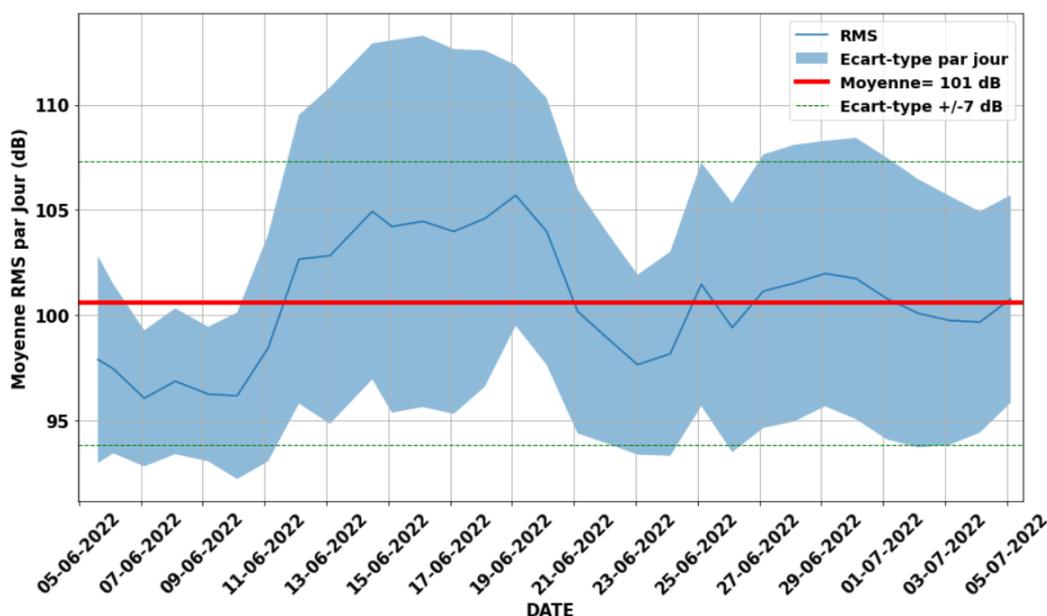


Figure 12 : niveaux SPL-RMS (dB re 1 μ Pa) moyen par jour et sur la période d'acquisition calculés dans la zone du parc au point d'enregistrement H2 à l'été 2022 lors de la préparation des sols pour les fondations gravitaires.

Les niveaux sonores SPL-RMS (dB re 1 μ Pa) et $L_{p,0} - pk$ (dB re 1 μ Pa) enregistrés du 30 mai au 5 juillet 2022 au point d'enregistrement H2 sont présentés en **Annexes - Figure 37**. La distance du navire de construction (ici le Rockpiper) par rapport au point d'enregistrement H2 est également représentée.

Dans la zone du parc à l'été 2022, au cours de la préparation des sols pour les fondations gravitaires, les valeurs moyennes des mesures SPL-RMS quotidiennes sont comprises entre 98 dB re 1 μ Pa et 105 dB re 1 μ Pa. **La moyenne sur toute la période d'enregistrement est de 101 dB re 1 μ Pa avec un écart-type d'environ 7 dB re 1 μ Pa.**

Les valeurs des mesures SPL-RMS démontrent que les niveaux sonores sont distribués de manière homogène au cours de la période d'enregistrement. Cependant, les niveaux de bruit augmentent entre le 12 juin et le 19 juin 2022 et entre le 24 juin et le 30 juin 2022. Les travaux de préparation des sols se sont déroulés durant toute la période d'immersion des appareils acoustiques. En revanche, la distance du navire de construction (ici, le Rockpiper) par rapport au point d'enregistrement H2 a fluctué de 2 à 14 km, selon les opérations de préparation des sols réparties dans le parc. Ainsi, l'analyse des logs opérationnels du navire permet d'associer l'augmentation des niveaux sonores avec le rapprochement du navire du point d'enregistrement H2.

Le **Tableau 17** présente la distribution statistique de l'indicateur SPL-RMS calculé au point d'enregistrement H2 dans la zone du parc à l'été 2022, lors de la préparation des sols pour les fondations gravitaires.

Tableau 17 : niveaux de bruits SPL-RMS (dB re 1 μ Pa) dans la zone du parc au point d'enregistrement H2 lors de la préparation des sols pour les fondations gravitaires.

Indicateur	Moyenne	Écart-type	Médiane
SPL-RMS	100,51 dB re 1 μ Pa	6,72 dB re 1 μ Pa	98,58 dB re 1 μ Pa

Par ailleurs, l'analyse des niveaux sonores en percentiles permet de mettre en évidence que le niveau sonore à la source (SL) est de 174 dB re 1 μ Pa pendant 50 % du temps avec un pic à 186 dB re 1 μ Pa pendant 5 % du temps entre le 12 juin et 19 juin 2022. Les percentiles de ces niveaux sonores sont présentés en **Annexes - Figure 38**.

Les niveaux sonores moyens enregistrés au cours de la phase de préparation des sols sont homogènes sur l'ensemble de la période suivi ; les fluctuations des niveaux sonores étant attribuables au trafic des navires de construction à proximité du point d'enregistrement H2 dans la zone du parc. Aucun risque acoustique n'est identifié pour les Mammifères marins ; les niveaux maximums enregistrés ne dépassant pas les 140 dB re 1 μ Pa (inférieurs aux seuils TTS et PTS).

- **Mise en place de la fondation et du topside de la sous-station électrique, des installations des fondations gravitaires et du ballastage**

La **Figure 13** présente le niveau SPL-RMS moyen (en dB) calculé par jour sur la période d'acquisition du 1^{er} août au 2 septembre 2022 dans la zone du parc, au point d'enregistrement H2 lors de la mise en place de la fondation et du topside de la sous-station électrique, de l'installation des fondations gravitaires et du ballastage des fondations. Le niveau SPL-RMS moyen par jour est représenté par la ligne bleue ; l'écart-type par jour par l'enveloppe bleue ; la moyenne sur la période par la ligne rouge ; et l'écart-type sur la période par les lignes en pointillées vert.

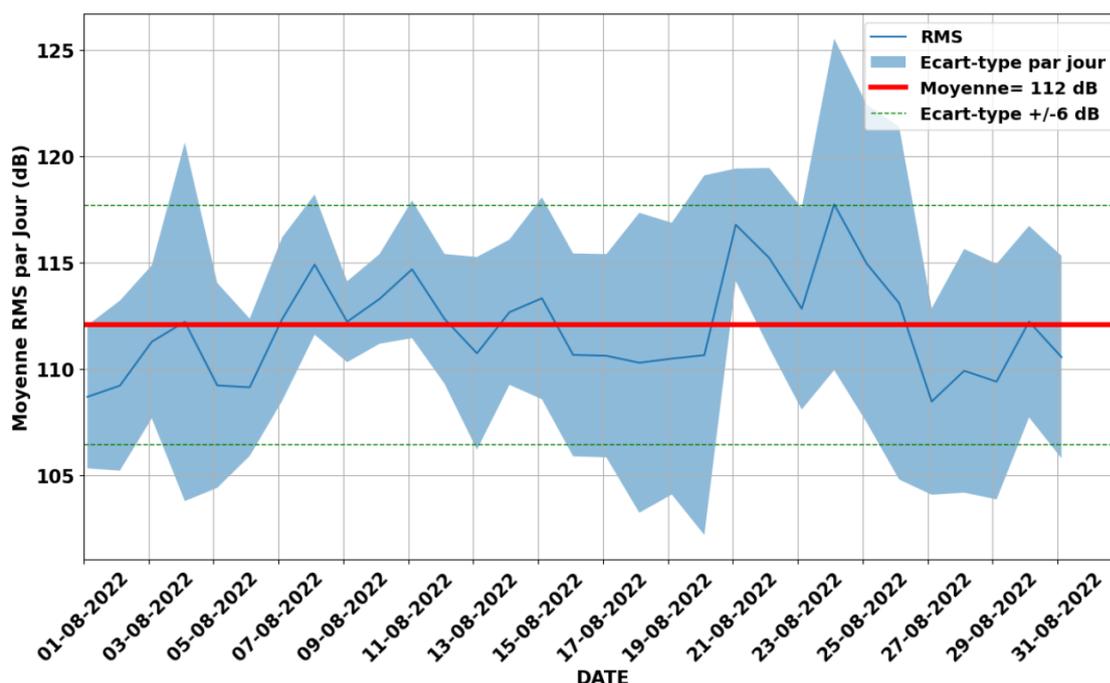


Figure 13 : niveaux SPL-RMS (dB re 1µPa) moyen par jour et sur la période d’acquisition calculés dans la zone du parc au point d’enregistrement H2 à l’été 2022 au cours de trois ateliers de travaux.

Les niveaux sonores SPL-RMS (dB re 1µPa) et $L_{p,0} - pk$ (dB re 1µPa) enregistrés du 1^{er} août au 2 septembre 2022 au point d’enregistrement H2 sont présentés en **Annexes - Figure 39**. La distance des différents navires de construction (quatre navires de construction en simultanément) par rapport au point d’enregistrement H2 est également représentée.

Dans la zone du parc au cours de cette seconde période de l’été 2022, les valeurs moyennes des mesures SPL-RMS quotidiennes sont comprises entre 109 dB re 1µPa et 118 dB re 1µPa. **La moyenne sur toute la période d’enregistrement est de 112 dB re 1µPa avec un écart-type d’environ 6 dB re 1µPa.**

Les valeurs des mesures SPL-RMS démontrent que les niveaux sonores sont distribués de manière homogène au cours de la période d’enregistrement. **La coactivité des navires de construction et des travaux associés dans la zone du parc ne permettent pas de mettre en évidence l’influence d’une ou plusieurs sources sonores sur les variations des niveaux de bruit à cette période de l’été 2022.**

Le **Tableau 18** présente la distribution statistique de l’indicateur SPL-RMS calculé au point d’enregistrement H2 dans la zone du parc à l’été 2022 au cours de plusieurs ateliers de travaux.

Tableau 18 : niveaux de bruits SPL-RMS (dB re 1µPa) dans la zone du parc au point d’enregistrement H2 à l’été 2022 au cours de trois ateliers de travaux.

Indicateur	Moyenne	Écart-type	Médiane
SPL-RMS	111,98 dB re 1µPa	5,6 dB re 1µPa	111,8 dB re 1µPa

Par ailleurs, l’analyse des niveaux sonores en percentiles permet de mettre en évidence que ces derniers ne dépassent pas 120 dB re 1µPa pendant 50 % du temps et 125 dB re 1µPa pendant 5 % du

temps lors des journées les plus bruyantes (25 et 26 août 2022). Au cours de cette période de travaux, la multiplicité des sources sonores (3 navires de construction en simultanément) rend la détermination des valeurs des niveaux sonores à la source plus difficile. Les percentiles de ces niveaux sonores sont présentés en **Annexes - Figure 40**.

Les niveaux sonores moyens enregistrés au cours de trois ateliers de travaux lors de la seconde période de suivi de l'été 2022 sont homogènes dans la zone du parc. Certains travaux ayant eu lieu simultanément, il n'est pas possible d'attribuer les niveaux sonores en fonction des différents ateliers. Aucun risque acoustique n'est identifié pour les Mammifères marins ; les niveaux maximum enregistrés ne dépassant pas les 150 dB re 1 μ Pa (inférieurs aux seuils TTS et PTS).

6.2.1.2 Analyse fréquentielle

➤ Préparation des sols pour la pose des fondations gravitaires

La **Figure 14** présente la densité spectrale de puissance (DSP, en dB re 1 μ Pa²/Hz) calculée sur la période d'acquisition du 30 mai au 5 juillet 2022 dans la zone du parc lors de la préparation des sols pour les fondations gravitaires, au point d'enregistrement H2 dans le parc, en fonction des fréquences (10 Hz à 30 kHz). La courbe bleue correspond au niveau de la DSP avant ou après une phase de travaux et la courbe rouge correspond au niveau de la DSP pendant les phases de travaux. Par ailleurs, les courbes en pointillées correspondent aux indices de trafic maritime (1 à 7, du moins au plus intense) selon le modèle de Wenz (Wenz, 1962). Ces courbes permettent de comprendre comment se situe le bruit des travaux enregistré par rapport au bruit du trafic maritime. Ces indices de référence sont comparés aux niveaux sonores enregistrés pendant la première période d'acquisition à l'été 2022.

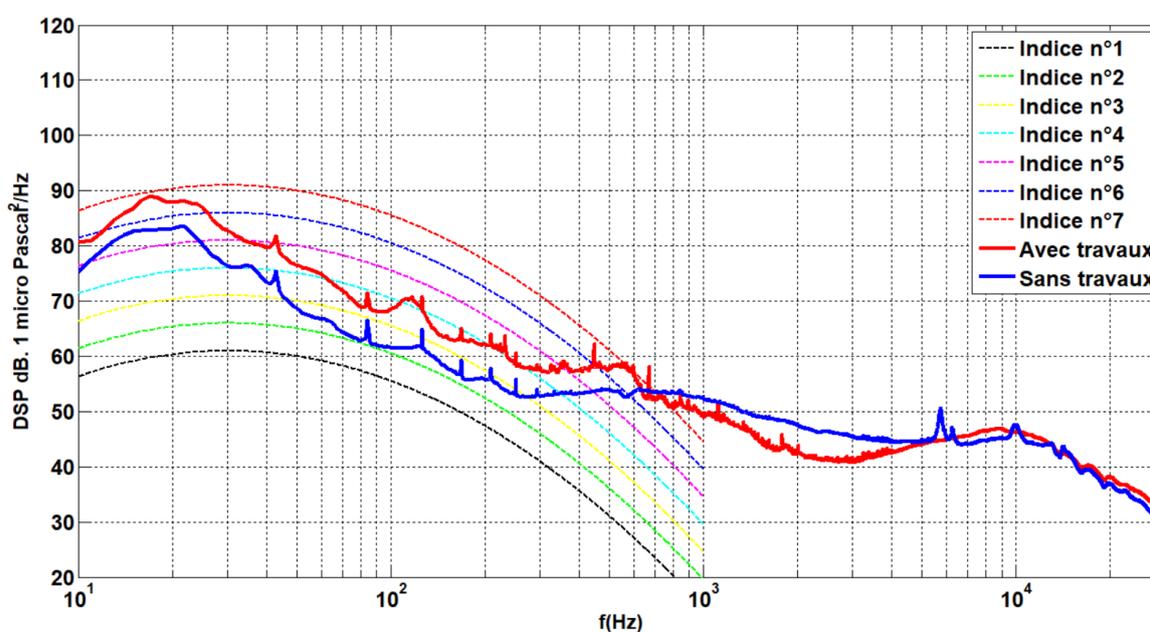


Figure 14 : distribution de la moyenne des niveaux DSP jusqu'à 30 kHz dans la zone du parc au point d'enregistrement H2 à l'été 2022 lors de la préparation des sols aux fondations gravitaires. Les niveaux sonores des phases travaux sont exprimés en rouge et les phases sans travaux en bleu. Les courbes en pointillées correspondent aux indices associés au trafic maritime (modèle de Wenz, 1962).

La **Figure 14** permet ainsi de constater que les niveaux sonores en dehors des phases de travaux sont assimilables à l'indice 2 du modèle de Wenz. **Pour rappel, lors de l'état de référence, le niveau sonore était situé entre les indices 5 et 6 à ce même point d'écoute dans le parc.** La diminution de cet indice s'explique probablement par le changement du trafic maritime dans la Manche en phase de construction du parc éolien en mer de Fécamp (en-dehors des navires associés aux travaux).

Pendant la phase de préparation des sols pour les fondations gravitaires, les niveaux sonores varient de l'indice 3 à 4 dans les bandes de fréquences de 60 à 300 Hz. Au-delà de 800 Hz, les niveaux sonores sont comparables avec ceux enregistrés en-dehors des périodes de travaux (indice 2) et les variations observées au-delà de 2 kHz sont principalement dues aux bruits naturels, en accord avec le modèle de Wenz (Wenz, 1962). Autrement dit, au cours de l'atelier de préparation des sols pour les fondations gravitaires, une augmentation des niveaux sonores est constatée principalement dans les basses fréquences (< 800 Hz). La plus grande disparité, de l'ordre de 13 dB, se situe dans les fréquences de 20 à 200 Hz et peut être attribuée au bruit généré par cet atelier.

Les comparaisons de la densité spectrale de puissance (DSP) des phases travaux avec le modèle de Wenz confirment la domination du bruit d'origine anthropique sur l'ensemble des basses fréquences pendant l'atelier de préparation des sols pour les fondations gravitaires dans la zone du parc à l'été 2022.

- ***Mise en place de la fondation et du topside de la sous-station électrique, installations des fondations gravitaires et ballastage***

La **Figure 15** présente la densité spectrale de puissance (DSP, en dB re 1 $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$) calculée sur la période d'acquisition du 1^{er} août au 2 septembre 2022 dans la zone du parc au cours des ateliers de travaux de la seconde période d'acquisition de l'été 2022, au point d'enregistrement H2 dans le parc, en fonction des fréquences (10 Hz à 30 kHz). La courbe bleue correspond au niveau de la DSP avant ou après une phase de travaux et la courbe rouge correspond au niveau de la DSP pendant les phases de travaux. Par ailleurs, les courbes en pointillées correspondent aux indices de trafic maritime (1 à 7, du moins au plus intense) selon le modèle de Wenz (Wenz, 1962). Ces courbes permettent de comprendre comment se situe le bruit des travaux enregistré par rapport au bruit du trafic maritime. Ces indices de référence sont comparés aux niveaux sonores enregistrés pendant la seconde période d'acquisition à l'été 2022.

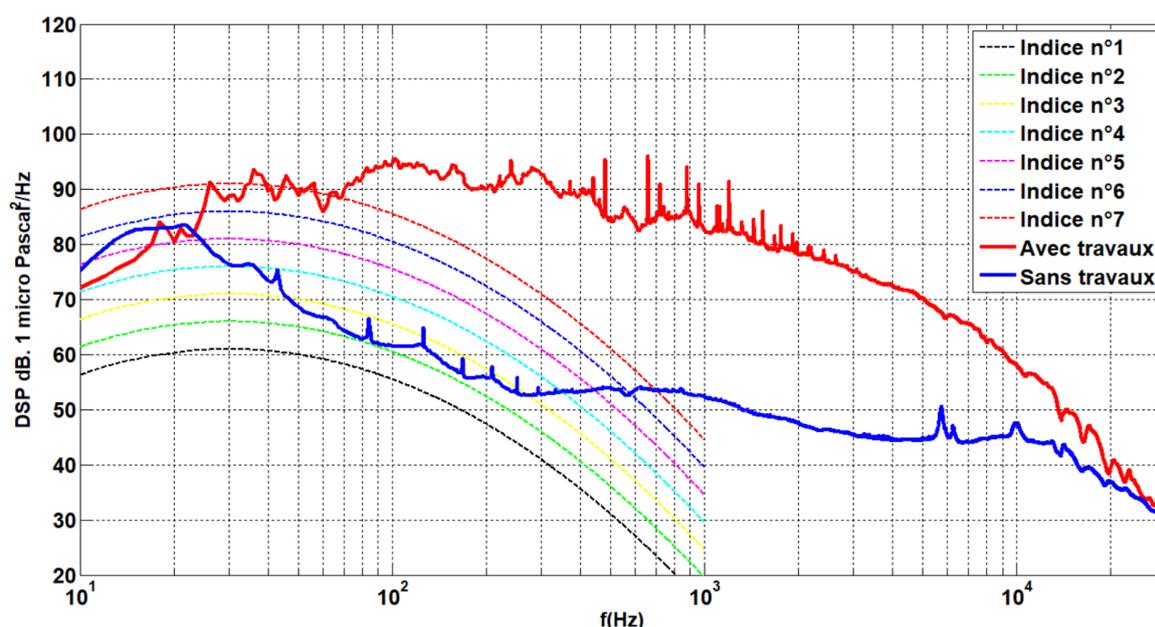


Figure 15 : distribution de la moyenne des niveaux DSP jusqu'à 30 kHz dans la zone du parc au point d'enregistrement H2 à l'été 2022 lors de trois ateliers de travaux. Les niveaux sonores des phases travaux sont exprimés en rouge et les phases sans travaux en bleu. Les courbes en pointillées correspondent aux indices associés au trafic maritime (modèle de Wenz, 1962).

La **Figure 15** permet ainsi de constater que les niveaux sonores en dehors des phases de travaux sont assimilables à l'indice 2 du modèle de Wenz dans les fréquences entre 60 Hz et 300 Hz. **Pour rappel, lors de l'état de référence, le niveau sonore était situé entre les indices 5 et 6 à ce même point d'écoute dans le parc.** La diminution de cet indice s'explique probablement par le changement du trafic maritime dans la Manche en phase de construction du parc éolien en mer de Fécamp (en-dehors des navires associés aux travaux).

Pendant la phase de travaux des différents ateliers de la seconde période d'acquisition de l'été 2022, les niveaux sonores dépassent l'indice 7 dans les bandes de fréquences supérieures à 60 Hz. Au-delà de 20 kHz, les niveaux sonores sont comparables avec ceux enregistrés en-dehors des périodes de travaux (indice 2) et les variations observées sont principalement dues aux bruits naturels, en accord avec le modèle de Wenz (Wenz, 1962). Autrement dit, au cours des différents ateliers de travaux, une augmentation des niveaux sonores est constatée principalement dans les moyennes et basses fréquences (< 20 kHz). La plus grande disparité, de l'ordre de 40 dB, se situe dans les fréquences de 200 à 300 Hz et peut être attribuée au bruit généré par cet atelier.

Les comparaisons de la densité spectrale de puissance (DSP) avec le modèle de Wenz confirment la domination du bruit d'origine anthropique sur l'ensemble des moyennes et basses fréquences pendant les différentes phases de travaux de la seconde période d'acquisition de l'été 2022 dans la zone du parc.

6.2.2 Zone témoin

6.2.2.1 Analyse temporelle

➤ Préparation des sols pour la pose des fondations gravitaires

La **Figure 16** présente le niveau SPL-RMS moyen (en dB re 1 μ Pa) calculé par jour sur la période d’acquisition du 30 mai au 5 juillet 2022 dans la zone témoin, au point d’enregistrement H1 lors de la préparation des sols pour les fondations gravitaires. Le niveau SPL-RMS moyen par jour est représenté par la ligne bleue ; l’écart-type par jour par l’enveloppe bleue ; la moyenne sur la période par la ligne rouge ; et l’écart-type sur la période par les lignes en pointillées vert.

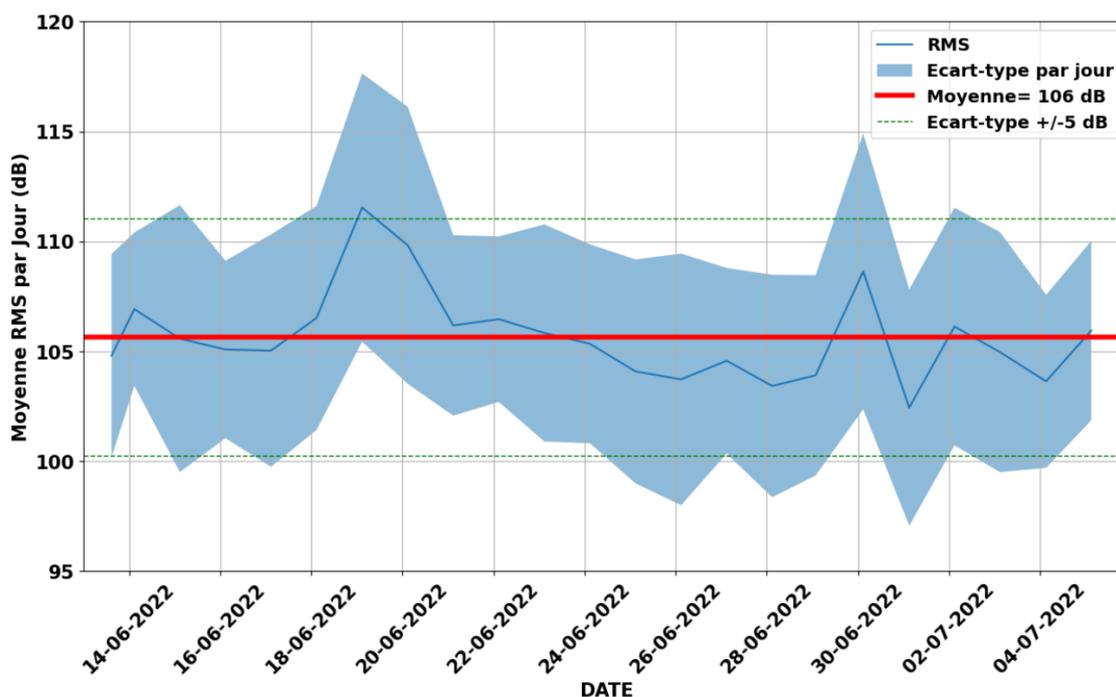


Figure 16 : niveaux SPL-RMS (dB re 1 μ Pa) moyen par jour et sur la période d’acquisition calculés dans la zone témoin au point d’enregistrement H1 à l’été 2022 au cours de la préparation des sols pour les fondations gravitaires.

Les niveaux sonores SPL-RMS (dB re 1 μ Pa) et $L_{p,0} - p_k$ (dB re 1 μ Pa) enregistrés du 30 mai au 5 juillet 2022 au point d’enregistrement H1 sont présentés en **Annexes - Figure 41**.

Dans la zone témoin, au cours de la préparation des sols aux fondations gravitaires à l’été 2022, les valeurs moyennes des mesures SPL-RMS quotidiennes sont comprises entre 102 dB re 1 μ Pa et 111 dB re 1 μ Pa. **La moyenne sur toute la période d’enregistrement est de 106 dB re 1 μ Pa avec un écart-type d’environ 5 dB re 1 μ Pa.**

Le **Tableau 19** présente la distribution statistique de l’indicateur SPL-RMS calculé au point d’enregistrement H1 dans la zone témoin à l’été 2022, lors de la préparation des sols pour les fondations gravitaires.

Tableau 19 : niveaux de bruits SPL-RMS (dB re 1 μ Pa) dans la zone témoin au point d’enregistrement H1 au cours de la préparation des sols pour les fondations gravitaires.

Indicateur	Moyenne	Écart-type	Médiane
SPL-RMS	105,63 dB re 1 μ Pa	5,40 dB re 1 μ Pa	104,95 dB re 1 μ Pa

Par ailleurs, l’analyse des niveaux sonores en percentiles permet de mettre en évidence des variations des niveaux sonores (15 dB entre le P10 et le P95), ces niveaux étant principalement dominés par des

sources sonores associées au passage des navires de construction à proximité du point d'enregistrement H1. Les percentiles de ces niveaux sonores sont présentés en **Annexes - Figure 42**.

Les niveaux SPL-RMS moyens sont supérieurs de 5,12 dB re 1 μ Pa dans la zone témoin que dans la zone du parc pendant les travaux de préparations des sols pour les fondations gravitaires. Cette différence de 5,12 dB re 1 μ Pa témoigne de l'effet du trafic maritime dans la zone témoin. La zone du parc est régie par des restrictions à la navigation contrairement à la zone témoin. Les niveaux sonores dans la zone témoin sont davantage soumis à l'influence du trafic maritime (dans les basses fréquences). Le bruit ambiant engendré par les travaux de préparations des sols ne semble pas avoir d'influence dans cette zone.

➤ **Mise en place de la fondation et du topside de la sous-station électrique, installations des fondations gravitaires et ballastage**

La **Figure 17** présente le niveau SPL-RMS moyen (en dB) calculé par jour sur la période d'acquisition du 1^{er} août au 2 septembre 2022 dans la zone témoin, au point d'enregistrement H1 lors de la mise en place de la fondation jacket et du topside de la sous-station électrique, de l'installation des fondations gravitaires et du ballastage des fondations. Le niveau SPL-RMS moyen par jour est représenté par la ligne bleue ; l'écart-type par jour par l'enveloppe bleue ; la moyenne sur la période par la ligne rouge ; et l'écart-type sur la période par les lignes en pointillées vert.

Les niveaux sonores SPL-RMS (dB re 1 μ Pa) et $L_{p,0} - pk$ (dB re 1 μ Pa) enregistrés du 1^{er} août au 2 septembre 2022 au point d'enregistrement H1 sont présentés en **Annexes - Figure 43**.

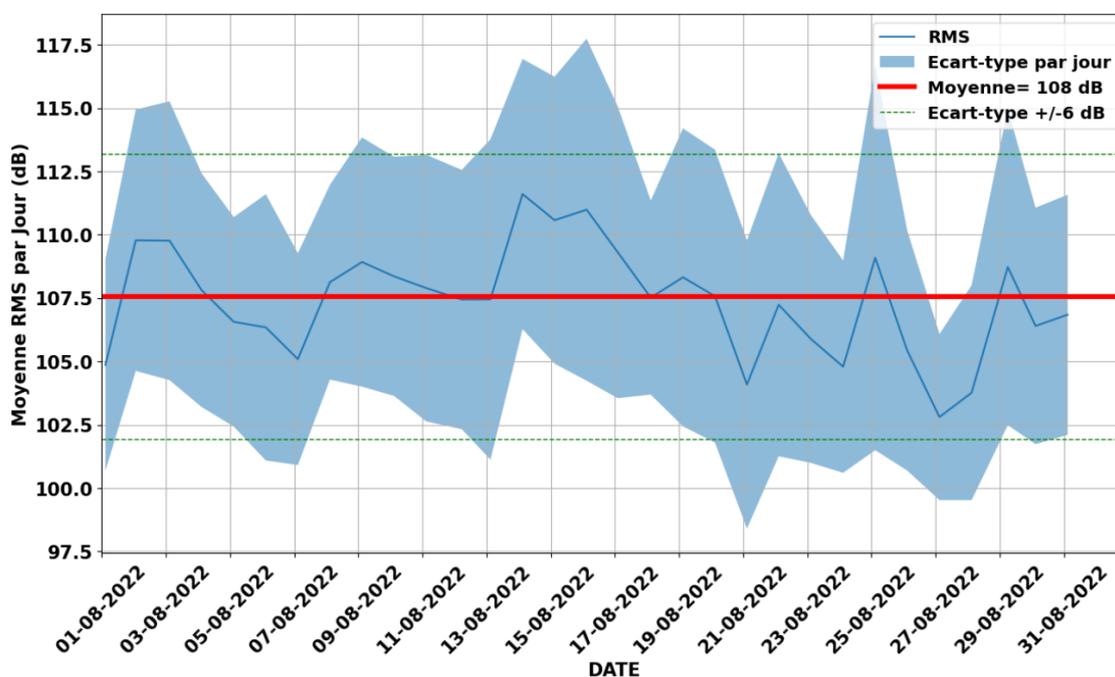


Figure 17 : niveaux SPL-RMS (dB re 1 μ Pa) moyen par jour et sur la période d'acquisition calculés dans la zone témoin au point d'enregistrement H1 à l'été 2022 au cours de trois ateliers de travaux.

Dans la zone témoin, au cours des trois ateliers de travaux réalisés lors de la seconde période d'acquisition de l'été 2022, les valeurs moyennes des mesures SPL-RMS quotidiennes sont comprises

entre 102,5 dB re 1µPa et 112 dB re 1µPa. **La moyenne sur toute la période d’enregistrement est de 108 dB re 1µPa avec un écart-type d’environ 6 dB re 1µPa.**

Le **Tableau 20** présente la distribution statistique de l’indicateur SPL-RMS calculé au point d’enregistrement H1 dans la zone témoin lors de la seconde période d’acquisition de l’été 2022.

Tableau 20 : niveaux de bruits SPL-RMS (dB re 1µPa) dans la zone témoin au point d’enregistrement H1 au cours de trois ateliers de travaux.

Indicateur	Moyenne	Écart-type	Médiane
SPL-RMS	107,50 dB re 1µPa	5,6 dB re 1µPa	106,40 dB re 1µPa

Par ailleurs, l’analyse des niveaux sonores en percentiles permet de mettre en évidence des variations des niveaux sonores (10 à 15 dB entre le P10 et le P95), ces niveaux étant principalement dominés par des sources sonores associées au passage de navires à proximité du point d’enregistrement H1. Les percentiles de ces niveaux sonores sont présentés en **Annexes - Figure 44**.

Les niveaux SPL-RMS moyens sont supérieurs de 4,48 dB re 1µPa dans la zone du parc que dans la zone témoin au cours des trois ateliers ayant eu lieu lors de la seconde période d’acquisition de l’été 2022. La présence de plusieurs navires dans la zone du parc explique cette différence par rapport à la zone témoin. Certains travaux ayant eu lieu simultanément, il n’est pas possible d’attribuer les niveaux sonores en fonction des différents ateliers.

6.2.3 Comparaison des données enregistrées avec l’état de référence

Le **Tableau 21** présente la comparaison, sur la saison de l’été 2022, des niveaux de bruit SPL-RMS entre le suivi des quatre ateliers de travaux (préparation des sols aux fondations gravitaires, mise en place de la fondation jacket et du topside de la sous-station électrique, de l’installation des fondations gravitaires et du ballastage des fondations) et l’état de référence.

Tableau 21 : comparaison des niveaux de bruit SPL-RMS (dB re 1µPa) entre le suivi acoustique réalisé lors de l’état de référence et les phases de travaux au cours de l’été 2022.

	Première période d’acquisition		Deuxième période d’acquisition	
	Préparation des sols pour les fondations gravitaires		Mise en place de la fondation jacket et du topside de la sous-station électrique, installation des fondations gravitaires et ballastage des fondations	
	Zone du parc	Zone témoin	Zone du parc	Zone témoin
SPL-RMS – État de référence	107 dB re 1µPa	107 dB re 1µPa	107 dB re 1µPa	107 dB re 1µPa
SPL-RMS – Phase de construction	100,51 dB re 1µPa	105,63 dB re 1µPa	111,98 dB re 1µPa	107,50 dB re 1µPa
Tendance	-	-	+	=

La comparaison des niveaux sonores entre le suivi acoustique réalisé lors de l'état de référence et les phases de travaux au cours de l'été 2022 démontre :

1. Dans la zone du parc, une diminution de 6,48 dB re 1 μ Pa des niveaux sonores moyens (SPL-RMS) entre l'état de référence et la phase de préparation des sols pour les fondations gravitaires.
2. Dans la zone du parc, une augmentation de 4,98 dB re 1 μ Pa des niveaux sonores moyens (SPL-RMS) entre l'état de référence et les phases des trois ateliers de travaux lors de la seconde période d'acquisition de l'été 2022 (installation fondation jacket et topside de la sous-station électrique ; installation des fondations ; ballastage).
3. Dans la zone témoin, une diminution de 1,37 dB re 1 μ Pa des niveaux sonores moyens (SPL-RMS) entre l'état de référence et la phase de préparation des sols aux fondations gravitaires.
4. Dans la zone témoin, des niveaux sonores moyens (SPL-RMS) similaires entre l'état de référence et les phases de plusieurs ateliers de travaux lors de la seconde période d'acquisition de l'été 2022.

Les travaux de préparation des sols pour l'installation des fondations gravitaires ne se sont pas démarqués dans la zone du parc et dans la zone témoin par rapport à l'ambiance sonore enregistrée lors de l'état de référence. La seconde période de travaux de l'été 2022 présente des niveaux sonores plus élevées entre la phase de travaux et l'état de référence dans la zone du parc. Dans la zone témoin, les niveaux sonores sont similaires entre la phase de travaux et l'état de référence. L'augmentation des niveaux sonores dans la zone du parc ne présente pas de risque acoustique pour les Mammifères marins au regard des seuils PTS et TTS.

6.3 Automne 2022

La saison de l'automne 2022 regroupe deux ateliers de travaux :

- La mise en place des enrochements de protection des fondations gravitaires, réalisé entre le 13 septembre au 12 décembre 2022 ;
- L'installation des câbles inter-éoliennes, réalisé entre le 4 octobre au 31 décembre 2022.

A l'automne 2022, la période d'immersion des appareils acoustiques aux points d'enregistrements H1 et H2 s'étend du 15 octobre au 27 novembre 2022.

6.3.1 Zone du parc

6.3.1.1 Analyse temporelle

La **Figure 18** présente le niveau SPL-RMS moyen (en dB re 1 μ Pa) calculé par jour sur la période d'acquisition du 15 octobre au 27 novembre 2022 dans la zone du parc, au point d'enregistrement H2 lors de la mise en place des enrochements de protection des fondations gravitaires et de l'installation des câbles inter-éoliennes. Le niveau SPL-RMS moyen par jour est représenté par la ligne bleue ; l'écart-type par jour par l'enveloppe bleue ; la moyenne sur la période par la ligne rouge ; et l'écart-type sur la période par les lignes en pointillés vert.

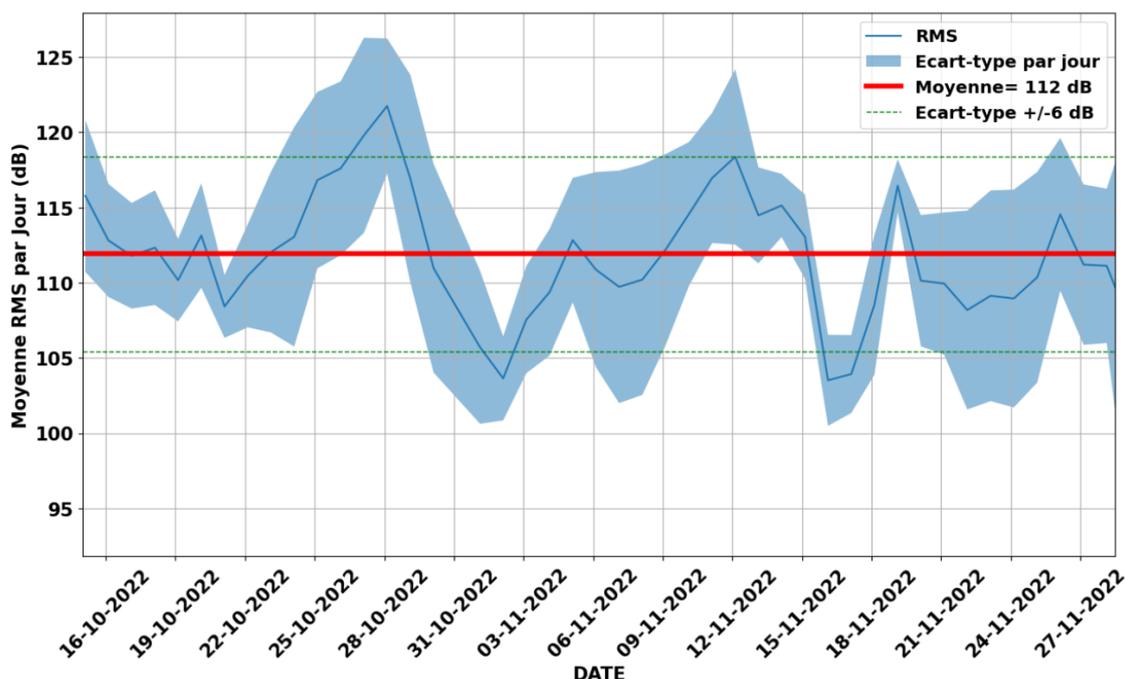


Figure 18 : niveaux SPL-RMS (dB re 1 μ Pa) moyen par jour et sur la période d'acquisition calculés dans la zone du parc au point d'enregistrement H2 à l'automne 2022 au cours de deux ateliers de travaux.

Les niveaux sonores SPL-RMS (dB re 1 μ Pa) et $L_{p,0} - pk$ (dB re 1 μ Pa) enregistrés du 15 octobre au 27 novembre 2022 au point d'enregistrement H2 sont présentés en **Annexes - Figure 45**. La distance des différents navires de construction (sept navires de construction en simultanément) par rapport au point d'enregistrement H2 est également représentée.

Dans la zone du parc, au cours des deux ateliers de travaux de l'automne 2022, les valeurs moyennes des mesures SPL-RMS quotidiennes sont comprises entre 102 dB re 1 μ Pa et 121 dB re 1 μ Pa. La

moyenne sur toute la période d’enregistrement est de 112 dB re 1 μ Pa avec un écart-type d’environ 6 dB re 1 μ Pa.

Les valeurs des mesures SPL-RMS démontrent que les niveaux sonores ne sont pas distribués de manière homogène au cours de la période d’enregistrement. Un bruit permanent est enregistré tout le long de la période d’acquisition. **La coactivité des navires de construction associés aux deux ateliers de travaux dans la zone du parc ne permettent pas de mettre en évidence l’influence d’une ou plusieurs sources sonores sur les variations des niveaux de bruit à cette période de l’automne 2022.**

Le **Tableau 22** présente la distribution statistique de l’indicateur SPL-RMS calculé au point d’enregistrement H2 dans la zone du parc à l’automne 2022, au cours des deux ateliers de travaux.

Tableau 22 : niveaux de bruits SPL-RMS (dB re 1 μ Pa) dans la zone du parc au point d’enregistrement H2 à l’automne 2022 au cours de deux ateliers de travaux.

Indicateur	Moyenne	Écart-type	Médiane
SPL-RMS	111,98 dB re 1 μ Pa	5,6 dB re 1 μ Pa	111,8 dB re 1 μ Pa

Par ailleurs, l’analyse des niveaux sonores en percentiles permet de mettre en évidence que ces derniers ne dépassent pas 120 dB re 1 μ Pa pendant 50 % du temps. Les valeurs des niveaux sonores ont dépassé les 125 dB re 1 μ Pa uniquement pendant 5 % du temps. Au cours de cette période de travaux, la multiplicité des sources sonores (sept navires de construction en simultané) rend la détermination des valeurs des niveaux sonores à la source plus difficile. Les percentiles de ces niveaux sonores sont présentés en **Annexes - Figure 46**.

Les niveaux sonores moyens enregistrés au cours des deux ateliers de travaux à l’automne 2022 ne sont pas homogènes sur l’ensemble de la période suivie ; les fluctuations des niveaux sonores étant attribuables au trafic des navires de construction à proximité du point d’enregistrement H2 dans la zone du parc. Aucun risque acoustique n’est identifié pour les Mammifères marins ; les niveaux maximum enregistrés ne dépassant pas les 150 dB re 1 μ Pa (inférieurs aux seuils TTS et PTS).

6.3.1.2 Analyse fréquentielle

La **Figure 19** présente la densité spectrale de puissance (DSP, en dB re 1 μ Pa²/Hz) calculée sur la période d’acquisition du 15 octobre au 27 novembre 2022 dans la zone du parc au cours de la mise en place des enrochements de protection des fondations gravitaires et de l’installation des câbles inter-éoliennes, au point d’enregistrement H2 dans le parc, en fonction des fréquences (10 Hz à 30 kHz). La courbe bleue correspond au niveau de la DSP avant ou après une phase de travaux et la courbe rouge correspond au niveau de la DSP pendant les phases de travaux. Par ailleurs, les courbes en pointillées correspondent aux indices de trafic maritime (1 à 7, du moins au plus intense) selon le modèle de Wenz (Wenz, 1962). Ces courbes permettent de comprendre comment se situe le bruit des travaux enregistré par rapport au bruit du trafic maritime. Ces indices de référence sont comparés aux niveaux sonores enregistrés pendant la période d’acquisition à l’automne 2022.

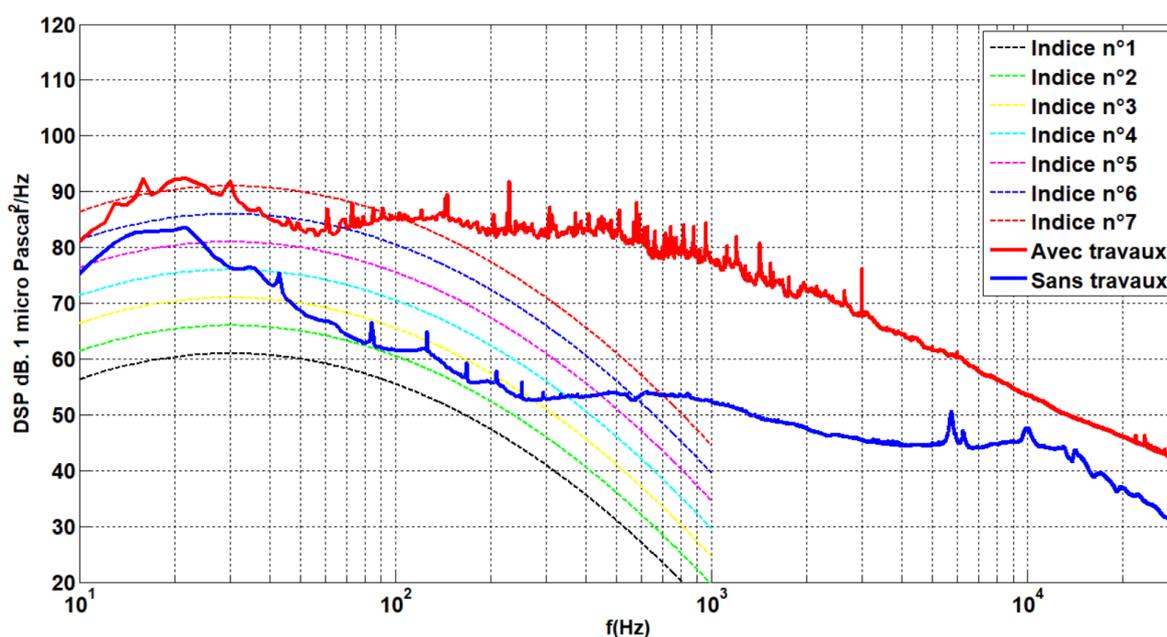


Figure 19 : distribution de la moyenne des niveaux DSP jusqu'à 30 kHz dans la zone du parc au point d'enregistrement H2 à l'automne 2022 au cours de deux ateliers de travaux. Les niveaux sonores des phases travaux sont exprimés en rouge et les phases sans travaux en bleu. Les courbes en pointillées correspondent aux indices associés au trafic maritime (modèle de Wenz, 1962).

La **Figure 19** permet ainsi de constater que les niveaux sonores en dehors des phases de travaux sont assimilables à l'indice 2 du modèle de Wenz dans les fréquences supérieures à 60 Hz. **Pour rappel, lors de l'état de référence, le niveau sonore était situé entre les indices 5 et 6 à ce même point d'écoute dans le parc.** La diminution de cet indice s'explique probablement par le changement du trafic maritime dans la Manche en phase de construction du parc éolien en mer de Fécamp (en-dehors des navires associés aux travaux).

Pendant la phase de travaux de la période d'acquisition de l'automne 2022, les niveaux sonores dépassent l'indice 7 dans les bandes de fréquences supérieures à 60 Hz. Au-delà de 30 kHz, les niveaux sonores sont comparables avec ceux enregistrés en-dehors des périodes de travaux (indice 2) et les variations observées sont principalement dues aux bruits naturels, en accord avec le modèle de Wenz (Wenz, 1962). Autrement dit, au cours des différents ateliers de travaux, une augmentation des niveaux sonores est constatée principalement dans les moyennes et basses fréquences (< 10 kHz). La plus grande disparité, de l'ordre de 30 dB, se situe dans les fréquences de 200 à 300 Hz et peut être attribuée au bruit généré par les travaux de mise en place des enrochements de protection des fondations gravitaires et l'installation des câbles inter-éoliennes.

Les comparaisons de la densité spectrale de puissance (DSP) avec le modèle de Wenz confirment la domination du bruit d'origine anthropique sur l'ensemble des moyennes et basses fréquences pendant les deux ateliers de travaux à l'automne 2022 dans la zone du parc.

6.3.2 Zone témoin

6.3.2.1 Analyse temporelle

La **Figure 20** présente le niveau SPL-RMS moyen (en dB re 1 μ Pa) calculé par jour sur la période d’acquisition du 15 octobre au 8 novembre 2022 dans la zone témoin, au point d’enregistrement H1 lors de la mise en place des enrochements, protection et de l’installation des câbles inter-éoliennes. Le niveau SPL-RMS moyen par jour est représenté par la ligne bleue ; l’écart-type par jour par l’enveloppe bleue ; la moyenne sur la période par la ligne rouge ; et l’écart-type sur la période par les lignes en pointillées vert.

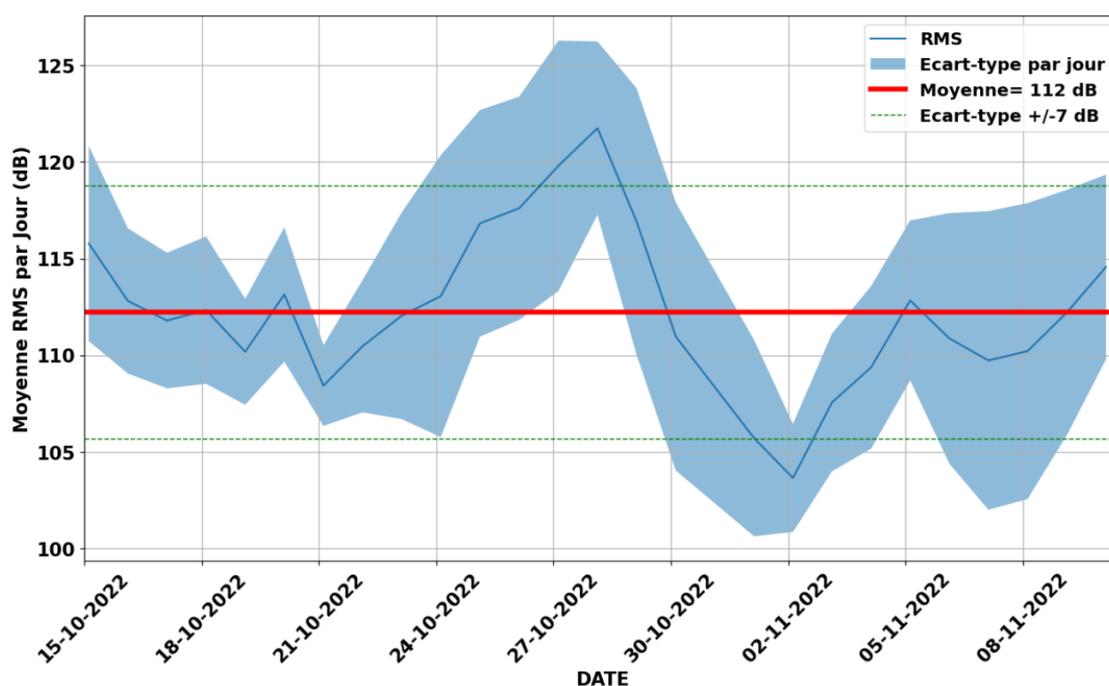


Figure 20 : niveaux SPL-RMS (dB re 1 μ Pa) moyen par jour et sur la période d’acquisition calculés dans la zone témoin au point d’enregistrement H1 à l’automne 2022 au cours de deux ateliers de travaux.

Les niveaux sonores SPL-RMS (dB re 1 μ Pa) et $L_{p,0} - pk$ (dB re 1 μ Pa) enregistrés du 15 octobre au 8 novembre 2022 au point d’enregistrement H1 sont présentés en **Annexes - Figure 47**.

Dans la zone témoin, à l’automne 2022, les valeurs moyennes des mesures SPL-RMS quotidiennes sont comprises entre 104 dB re 1 μ Pa et 122 dB re 1 μ Pa. **La moyenne sur toute la période d’enregistrement est de 112 dB re 1 μ Pa avec un écart-type d’environ 7 dB re 1 μ Pa.**

Le **Tableau 23** présente la distribution statistique de l’indicateur SPL-RMS calculé au point d’enregistrement H1 dans la zone témoin lors de l’automne 2022.

Tableau 23 : niveaux de bruits SPL-RMS (dB re 1 μ Pa) dans la zone témoin au point d’enregistrement H1 au cours de deux ateliers de travaux.

Indicateur	Moyenne	Écart-type	Médiane
SPL-RMS	111,98 dB re 1 μ Pa	4,01 dB re 1 μ Pa	97,27 dB re 1 μ Pa

Par ailleurs, l'analyse des niveaux sonores en percentiles permet de mettre en évidence des variations des niveaux sonores (4 à 20 dB entre le P10 et le P95) ; ces niveaux étant principalement dominés par des sources sonores associées au passage des navires à proximité du point d'enregistrement H1. Les percentiles de ces niveaux sonores sont présentés en **Annexes - Figure 48**.

Les niveaux SPL-RMS moyens sont supérieurs de 13,77 dB re 1 μ Pa dans la zone du parc par rapport à la zone témoin au cours des deux ateliers ayant eu lieu à l'automne 2022. La présence de plusieurs navires dans la zone du parc explique cette différence par rapport à la zone témoin. En effet, le trafic maritime associé aux activités de construction est plus accru à proximité du point d'enregistrement H2, dans la zone du parc, qu'au point d'enregistrement H1, dans la zone témoin. La zone témoin est sujette à la variabilité de ce trafic maritime à des distances plus importantes. Certains travaux ayant eu lieu simultanément, il n'est pas possible d'attribuer les niveaux sonores en fonction des différents ateliers.

6.3.3 Comparaison des données enregistrées avec l'état de référence

Le **Tableau 24** présente la comparaison, sur la saison de l'automne 2022, des niveaux de bruit SPL-RMS entre le suivi travaux, au cours des ateliers de mise en place des enrochements de protection des fondations gravitaires et de l'installation des câbles inter-éoliennes, et l'état de référence.

Tableau 24 : comparaison des niveaux de bruit SPL-RMS (dB re 1 μ Pa) entre le suivi acoustique réalisé au cours de l'état de référence et de la phase travaux (deux ateliers) au cours de l'automne 2022.

	Mise en place des enrochements, protection et installation des câbles inter-éoliennes	
	<i>Zone du parc</i>	<i>Zone témoin</i>
SPL-RMS – État de référence	107 dB re 1μPa	107 dB re 1μPa
SPL-RMS – Phase de construction	111,98 dB re 1μPa	98,21 dB re 1μPa
Tendance	+	-

La comparaison des niveaux sonores entre le suivi acoustique réalisé au cours de l'état de référence et de la phase travaux au cours de l'automne 2022 démontre :

1. Dans la zone du parc, une augmentation de 4,98 dB des niveaux sonores moyens (SPL-RMS) entre l'état de référence et la phase construction.
2. Dans la zone témoin, une diminution de 8,79 dB des niveaux sonores moyens (SPL-RMS) entre l'état de référence et la phase de construction.

Les travaux de mise en place des enrochements de protection des fondations gravitaires et de l'installation des câbles inter-éoliennes présentent des niveaux sonores plus élevés dans la zone du parc par rapport à l'état de référence. Dans la zone témoin, les niveaux sonores sont similaires entre la phase de travaux et l'état de référence. L'augmentation des niveaux sonores dans la zone du parc ne présente pas de risque acoustique les Mammifères marins au regard des seuils PTS et TTS.

6.4 Été 2023

La saison de l'été 2023 présente un type d'atelier de travaux, à savoir l'**installation des éoliennes**, activité réalisée à partir du **12 juin 2023**.

A l'été 2023, la **période d'immersion** des appareils acoustiques aux points d'enregistrements H1 et H2 s'étend du **12 juin au 5 août 2023**.

6.4.1 Zone du parc

6.4.1.1 Analyse temporelle

La **Figure 21** présente le niveau SPL-RMS moyen (en dB re $1\mu\text{Pa}$) calculé par jour sur la période d'acquisition du 12 juin au 5 août 2023 dans la zone du parc, au point d'enregistrement H2 lors de l'installation des premières éoliennes. Le niveau SPL-RMS moyen par jour est représenté par la ligne bleue ; l'écart-type par jour par l'enveloppe bleue ; la moyenne sur la période par la ligne rouge ; et l'écart-type sur la période par les lignes en pointillées vert.

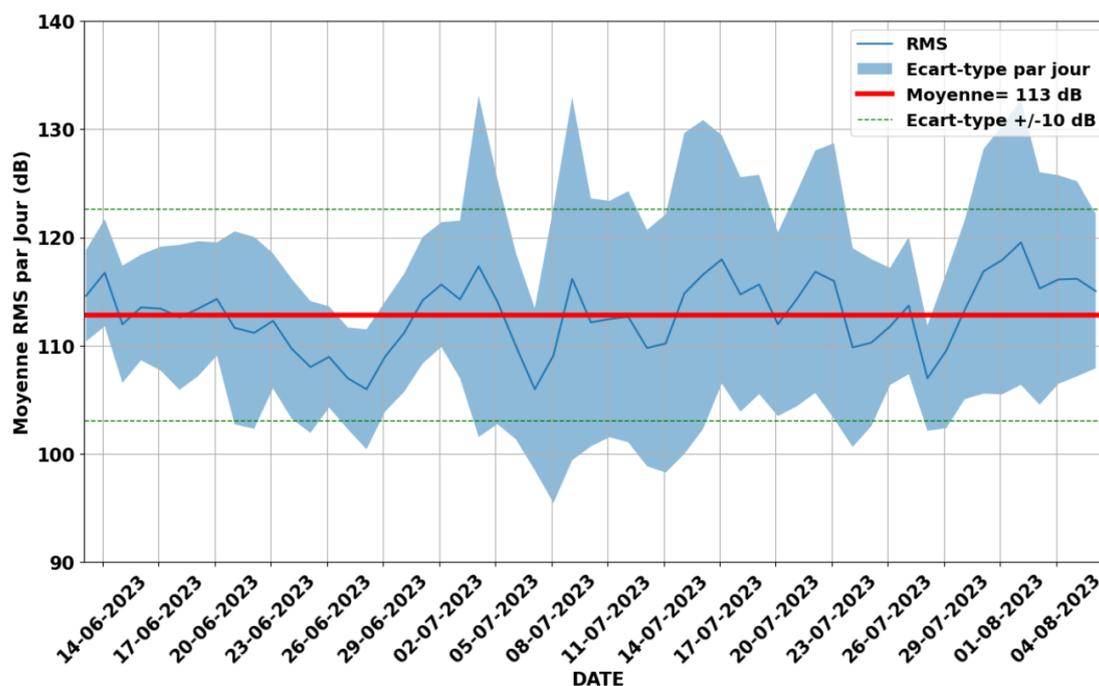


Figure 21 : niveaux SPL-RMS (dB re $1\mu\text{Pa}$) moyen par jour et sur la période d'acquisition calculés dans la zone du parc au point d'enregistrement H2 à l'été 2023 au cours de l'installation des premières éoliennes.

Les niveaux sonores SPL-RMS (dB re $1\mu\text{Pa}$) et $L_{p,0} - p_k$ (dB re $1\mu\text{Pa}$) enregistrés du 12 juin au 5 août 2023 au point d'enregistrement H2 sont présentés en **Annexes - Figure 49**. La distance des différents navires de construction (quatre navires de construction en simultanément) par rapport au point d'enregistrement H2 est également représentée.

Dans la zone du parc, au cours de l'installation des premières éoliennes à l'été 2023, les valeurs moyennes des mesures SPL-RMS quotidiennes sont comprises entre 105 dB re $1\mu\text{Pa}$ et 120 dB re $1\mu\text{Pa}$. **La moyenne sur toute la période d'enregistrement est de 113 dB re $1\mu\text{Pa}$ avec un écart-type d'environ 10 dB re $1\mu\text{Pa}$.**

Les valeurs des mesures SPL-RMS démontrent que les niveaux sonores sont distribués de manière homogène au cours de la période d'enregistrement. **La coactivité des navires de construction associés à l'installation des éoliennes dans la zone du parc ne permettent pas de mettre en évidence l'influence d'une ou plusieurs sources sonores sur les variations des niveaux de bruit à cette période de l'été 2023.**

Le **Tableau 25** présente la distribution statistique de l'indicateur SPL-RMS calculé au point d'enregistrement H2 dans la zone du parc à l'été 2023, au cours de l'installation des premières éoliennes.

Tableau 25 : niveaux de bruits SPL-RMS (dB re 1 μ Pa) dans la zone du parc au point d'enregistrement H2 au cours de l'installation des premières éoliennes.

Indicateur	Moyenne	Écart-type	Médiane
SPL-RMS	113 dB re 1 μ Pa	10 dB re 1 μ Pa	110,89 dB re 1 μ Pa

Par ailleurs, l'analyse des niveaux sonores en percentiles permet de mettre en évidence que ces derniers varient entre 110 et 118 dB re 1 μ Pa pendant 50 % du temps avec des pics à plus de 140 dB re 1 μ Pa sur certaines journées (4 juillet, 9 juillet, 23 juillet et 2 août 2023). Cependant, les valeurs des niveaux sonores ont dépassé les 120 dB re 1 μ Pa uniquement pendant 5 % du temps. Au cours de cette période de travaux, la multiplicité des sources sonores (4 navires de construction en simultanément) rend la détermination des valeurs des niveaux sonores à la source plus difficile. Les percentiles de ces niveaux sonores sont présentés en **Annexes - Figure 50**.

Les niveaux sonores moyens enregistrés au cours de l'installation des éoliennes sont homogènes sur l'ensemble de la période suivie ; les fluctuations des niveaux sonores étant attribuables au trafic des navires de construction à proximité du point d'enregistrement H2 dans la zone du parc. Aucun risque acoustique n'est identifié pour les Mammifères marins ; les niveaux maximum enregistrés ne dépassant pas les 160 dB re 1 μ Pa (inférieurs aux seuils TTS et PTS).

6.4.1.2 Analyse fréquentielle

La **Figure 22** présente la densité spectrale de puissance (DSP, en dB re 1 μ Pa²/Hz) calculée sur la période d'acquisition du 12 juin au 5 août 2023 dans la zone du parc au cours de l'installation des premières éoliennes, au point d'enregistrement H2 dans le parc, en fonction des fréquences (10 Hz à 30 kHz). La courbe bleue correspond au niveau de la DSP avant ou après une phase de travaux et la courbe rouge correspond au niveau de la DSP pendant les phases de travaux. Par ailleurs, les courbes en pointillées correspondent aux indices de trafic maritime (1 à 7, du moins au plus intense) selon le modèle de Wenz (Wenz, 1962). Ces courbes permettent de comprendre comment se situe le bruit des travaux enregistré par rapport au bruit du trafic maritime. Ces indices de référence sont comparés aux niveaux sonores enregistrés à l'été 2023.

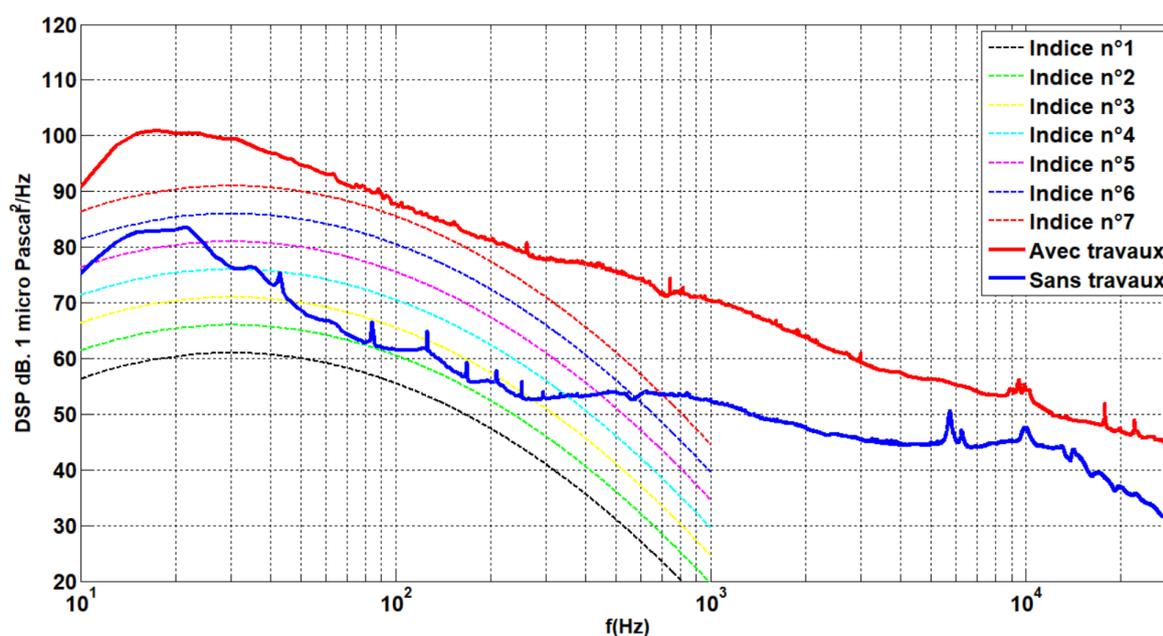


Figure 22 : distribution de la moyenne des niveaux DSP jusqu'à 30 kHz dans la zone du parc au point d'enregistrement H2 à l'été 2022 au cours de la préparation des sols aux fondations gravitaires. Les niveaux sonores des phases travaux sont exprimés en rouge et les phases sans travaux en bleu. Les courbes en pointillées correspondent aux indices associées au trafic maritime (modèle de Wenz, 1962).

La **Figure 22** permet ainsi de constater que les niveaux sonores en dehors des phases de travaux sont assimilables à l'indice 2 du modèle de Wenz. **Pour rappel, au cours de l'état de référence, le niveau sonore était situé entre les indices 5 et 6 à ce même point d'écoute dans le parc.** La diminution de cet indice s'explique probablement par le changement du trafic maritime dans la Manche en phase de construction du parc éolien en mer de Fécamp (en-dehors des navires associés aux travaux).

Pendant la phase de préparation des sols aux fondations gravitaires, les niveaux sonores dépassent l'indice 7 pour l'ensemble des fréquences étudiées. Autrement dit, au cours de l'atelier d'installation de premières éoliennes, une augmentation des niveaux sonores est constatée principalement dans les moyennes (< 20 kHz) et basses fréquences (< 1 kHz). La plus grande disparité, de l'ordre de 26 dB, se situe dans les fréquences de 50 à 300 Hz et peut être attribuée au bruit généré par cet atelier. Au-delà de 300 kHz, les variations observées sont principalement dues aux bruits naturels, en accord avec le modèle de Wenz (Wenz, 1962).

Les comparaisons de la densité spectrale de puissance (DSP) avec le modèle de Wenz confirment la domination du bruit d'origine anthropique sur l'ensemble des moyennes et basses fréquences pendant l'atelier d'installation des premières éoliennes à l'été 2023 dans la zone du parc.

6.4.2 Zone témoin

6.4.2.1 Analyse temporelle

La **Figure 23** présente le niveau SPL-RMS moyen (en dB re 1 μ Pa) calculé par jour sur la période d'acquisition du 12 juin au 5 août 2023 dans la zone témoin, au point d'enregistrement H1 au cours de l'installation des premières éoliennes. Le niveau SPL-RMS moyen par jour est représenté par la ligne

bleue ; l'écart-type par jour par l'enveloppe bleue ; la moyenne sur la période par la ligne rouge ; et l'écart-type sur la période par les lignes en pointillées vert.

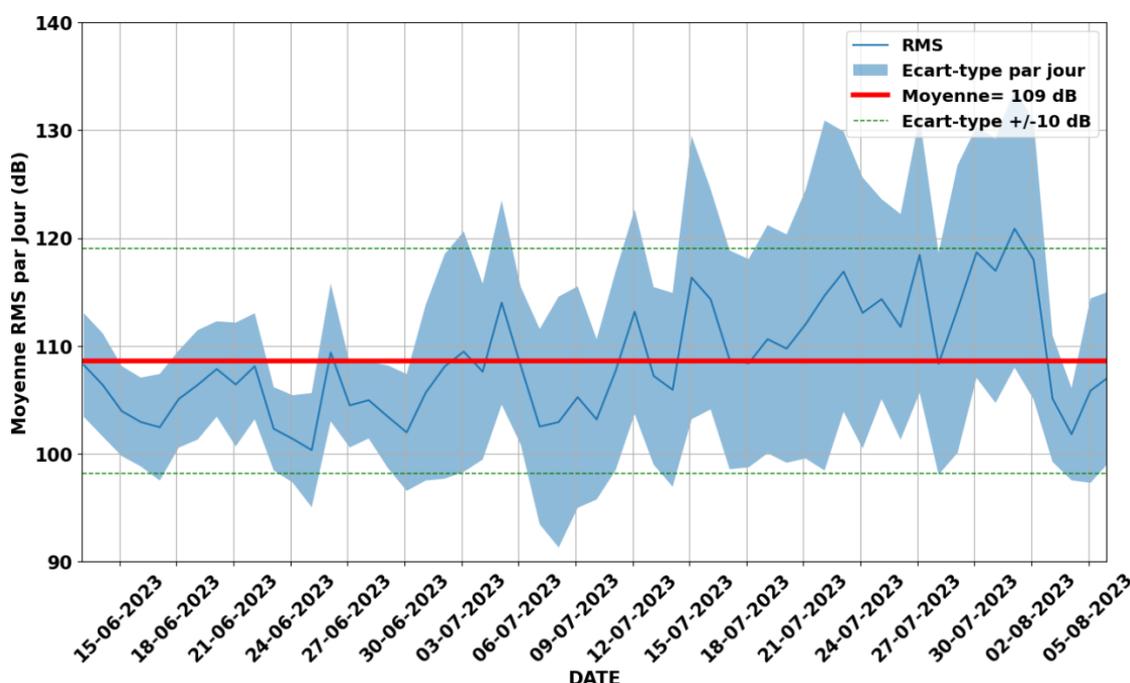


Figure 23 : niveaux SPL-RMS (dB re 1µPa) moyen par jour et sur la période d'acquisition calculés dans la zone témoin au point d'enregistrement H1 à l'été 2023 au cours de l'installation des premières éoliennes.

Les niveaux sonores SPL-RMS (dB re 1µPa) et $L_{p,0} - pk$ (dB re 1µPa) enregistrés du 12 juin au 5 août 2023 au point d'enregistrement H1 sont présentés en **Annexes - Figure 51**.

Dans la zone témoin, à l'été 2023, les valeurs moyennes des mesures SPL-RMS quotidiennes sont comprises entre 101 dB re 1µPa et 121 dB re 1µPa. **La moyenne sur toute la période d'enregistrement est de 109 dB re 1µPa avec un écart-type d'environ 10 dB re 1µPa.**

Le **Tableau 26** présente la distribution statistique de l'indicateur SPL-RMS calculé au point d'enregistrement H1 dans la zone témoin à l'été 2023, au cours de l'installation des premières éoliennes.

Tableau 26 : niveaux de bruits SPL-RMS (dB re 1µPa) dans la zone témoin au point d'enregistrement H1 au cours de l'installation des premières éoliennes.

Indicateur	Moyenne	Écart-type	Médiane
SPL-RMS	109 dB re 1µPa	10 dB re 1µPa	106 dB re 1µPa

Par ailleurs, l'analyse des niveaux sonores en percentiles permet de mettre en évidence des variations des niveaux sonores (4 à 30 dB entre le P10 et le P95), ces niveaux étant principalement dominés par des sources sonores associées au passage de navires à proximité du point d'enregistrement H1. Les percentiles de ces niveaux sonores sont présentés en **Annexes - Figure 52**.

Les niveaux SPL-RMS moyens sont supérieurs de 4 dB re 1 μ Pa dans la zone du parc par rapport à la zone témoin au cours de l'installation des premières éoliennes à l'été 2023. La présence de plusieurs navires dans la zone du parc explique cette différence par rapport à la zone témoin mais ne permet pas de discriminer la part des niveaux sonores en fonction des activités. En effet, le trafic maritime associé aux activités de construction est plus accru à proximité du point d'enregistrement H2, dans la zone du parc, qu'au point d'enregistrement H1, dans la zone témoin. La zone témoin est sujette à la variabilité de ce trafic maritime à des distances plus importantes.

6.4.3 Comparaison des données enregistrées avec l'état de référence

Le **Tableau 27** présente la comparaison, sur la saison de l'été 2023, des niveaux de bruit SPL-RMS entre le suivi travaux, au cours de l'atelier d'installation des premières éoliennes, et l'état de référence.

Tableau 27 : comparaison des niveaux de bruit SPL-RMS (dB re 1 μ Pa) entre le suivi acoustique réalisé au cours de l'état de référence et de la phase travaux (installation des éoliennes) au cours de l'été 2023.

	Installations des premières éoliennes	
	Zone du parc	Zone témoin
SPL-RMS – État de référence	107 dB re 1 μ Pa	107 dB re 1 μ Pa
SPL-RMS – Phase de construction	113 dB re 1 μ Pa	109 dB re 1 μ Pa
Tendance	+	+

La comparaison des niveaux sonores entre le suivi acoustique réalisé au cours de l'état de référence et de la phase travaux au cours de l'été 2023 démontre :

1. Dans la zone du parc, une augmentation de 6 dB des niveaux sonores moyens (SPL-RMS) entre l'état de référence et la phase construction.
2. Dans la zone témoin, une augmentation de 2 dB des niveaux sonores moyens (SPL-RMS) entre l'état de référence et la phase de construction.

Les travaux d'installation des premières éoliennes présentent des niveaux sonores plus élevés dans la zone du parc et dans la zone témoin. L'augmentation des niveaux sonores ne présente cependant pas de risque acoustique pour les Mammifères marins au regard des seuils PTS et TTS.

7. MESURES DE SUIVI DE LA FREQUENTATION DES MAMMIFERES MARINS

Une analyse de l'activité bioacoustique (DPM/jour des Mammifères marins (**Marsouin commun** (*P. phocoena*) et **Delphinidés**) durant la phase de construction est réalisée à partir des données collectées aux points d'enregistrement C2 (zone témoin) ; et C1 et C3 (zone du parc, respectivement situés au Nord et au Sud du parc ; **Figure 5**).

Ces analyses sont réalisées par saison (printemps 2022, été 2022, automne 2022 et été 2023). Ces résultats sont comparés aux niveaux sonores observés durant l'état de référence réalisé de 2019 à 2021. L'influence des variables environnementales et anthropiques sur la fréquentation des Mammifères marins est également analysée.

L'échantillonnage par acoustique passive de la fréquentation des Mammifères marins a été réalisé selon **trois période d'immersion des appareils acoustiques** :

- Du printemps 2022 au milieu de l'été 2022 ;
- Du milieu de l'été 2022 à la fin de l'automne 2022 ;
- Au milieu de l'été 2023.

Au cours de la première période d'acquisition de l'année 2022, le C-POD C2 a subi une avarie technique réduisant le nombre de données disponibles dans la zone témoin. Au cours de l'été 2023, seul le point d'enregistrement C3 était opérationnel. Les opérations de maintenance réalisées entre chaque période d'immersion ont permis d'assurer la sauvegarde des données collectées et de corriger les avaries des appareils acoustiques.

Pour rappel, le DPM étant **un indicateur de présence sur une zone**, il n'est pas recommandé de l'utiliser pour extrapoler l'abondance d'une ou plusieurs espèces (Anderson, 2001) ; (Anderson, 2003). En effet, il n'est pas possible de distinguer avec l'acoustique passive s'il s'agit de plusieurs individus en même temps ou d'un unique individu dans la zone à l'origine de plusieurs détections. En revanche, les DPM indiquent l'importance d'une zone pour une espèce donnée.

7.1 Suivi de la fréquentation des Mammifères marins en phase de construction

La **Figure 24** présente les DPM mensuels (sommés des DPM journaliers par mois) calculés pour le Marsouin commun sur la période d'acquisition de mars à novembre 2022 et de juin à juillet 2023, aux points d'enregistrement C1, C2 et C3.

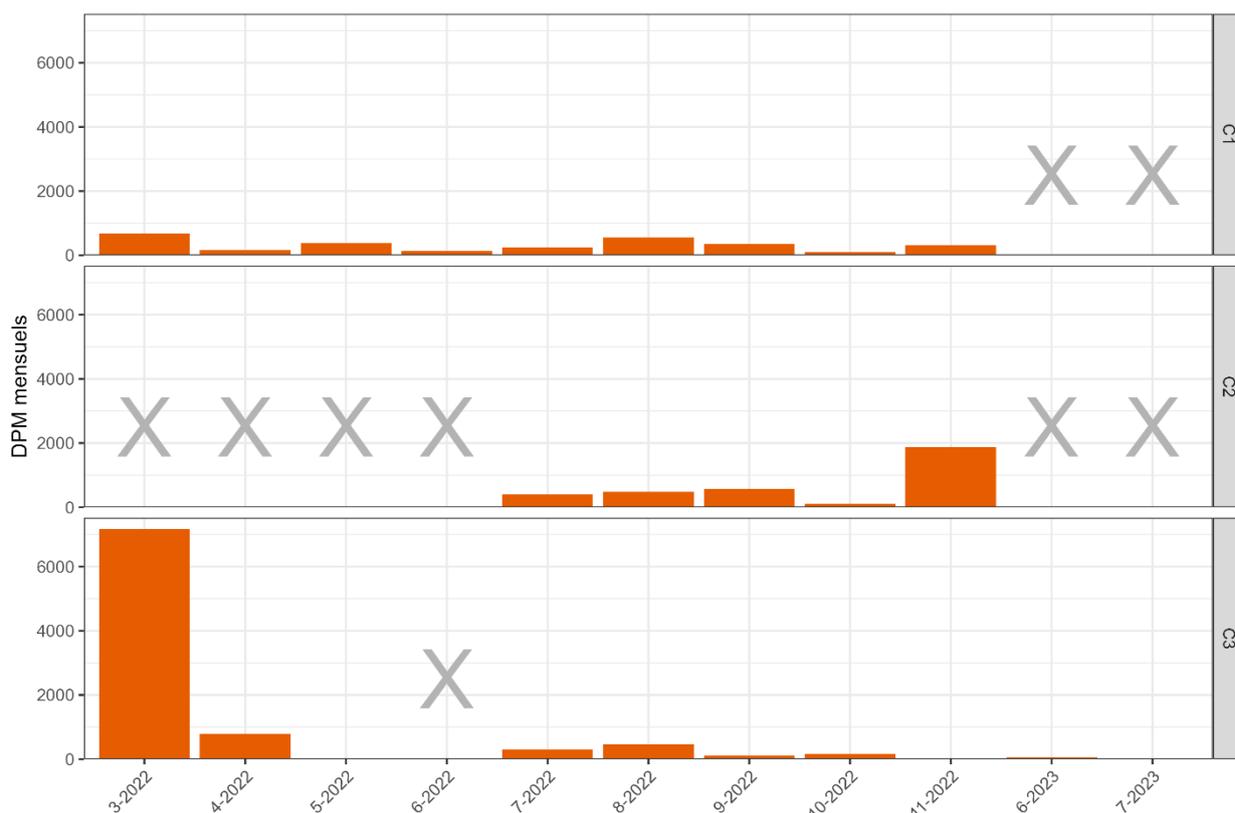


Figure 24 : évolution de l'activité mensuelle (somme des DPMs/jour) calculée pour le Marsouin commun aux points d'enregistrement C1, C2 et C3 au cours du suivi en phase de construction (2022-2023). Les croix représentent les mois où les C-PODs étaient immergés mais sans enregistrement de données.

Le Marsouin commun est identifié sur l'ensemble des points d'enregistrement au cours du suivi en phase de construction :

- Le point d'enregistrement **C3 (zone Sud du parc)** se démarque avec la plus forte activité bioacoustique pendant les travaux, totalisant 9 081 DPM. Le pic d'activité est observé en mars 2022, atteignant 7 165 DPM ;
- Le point d'enregistrement **C2 (zone témoin)** totalise 3 433 DPM. L'activité augmente progressivement de juillet à septembre 2022, puis diminue pour atteindre un minimum de 101 DPM en octobre 2022. Une seconde augmentation est constatée en novembre 2022 avec 1 882 DPM ;
- Le point d'enregistrement **C1 (zone Nord du parc)** enregistre l'activité la plus faible, avec 2 939 DPM. L'activité du Marsouin commun est régulière dans cette zone, avec des DPM mensuels variant entre 139 et 678.

La **Figure 25** présente les DPM mensuels (sommés des DPM journaliers par mois) calculés pour les Delphinidés sur la période d'acquisition de mars à novembre 2022 et de juin à août 2023, aux points d'enregistrement C1, C2 et C3.

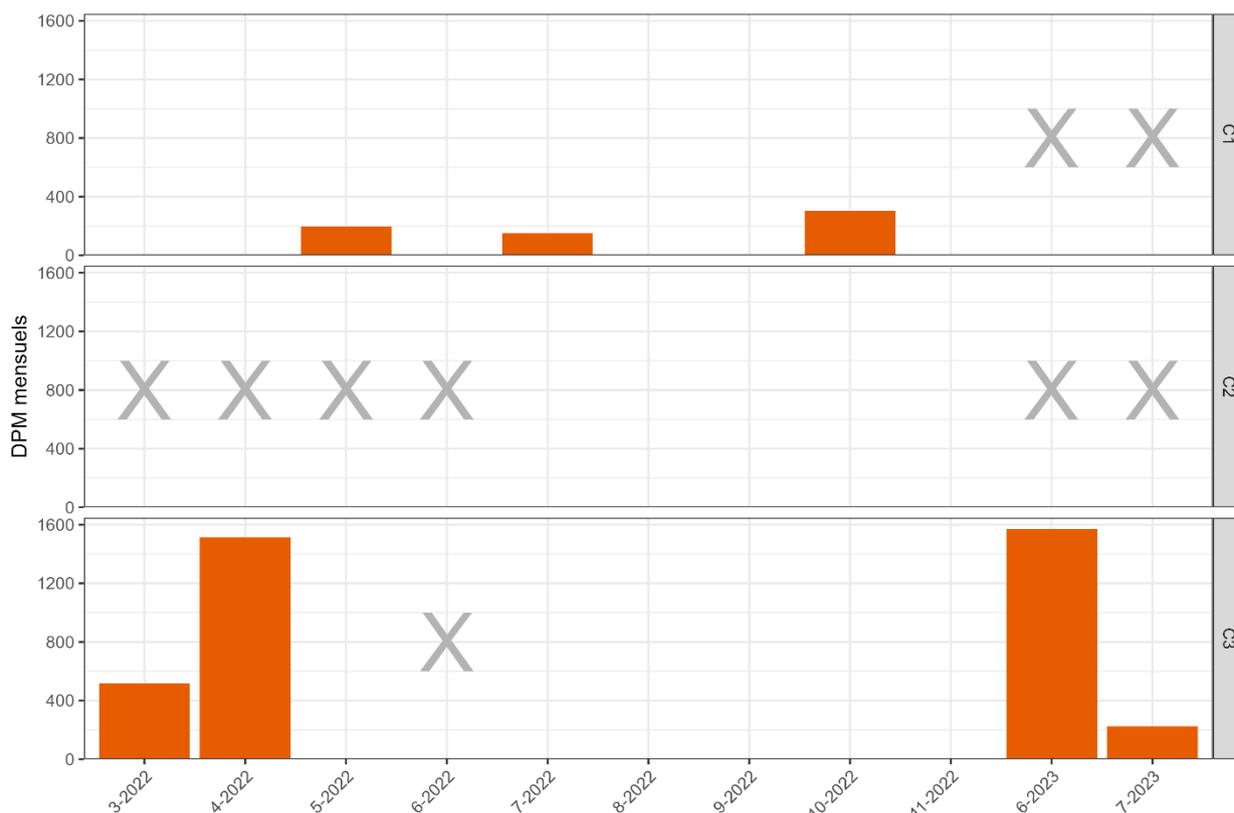


Figure 25 : évolution de l'activité mensuelle (somme des DPMs/jour) calculée pour les Delphinidés aux points d'enregistrement C1, C2 et C3 au cours du suivi en phase de construction (2022-2023). Les croix représentent les mois où les C-PODs étaient immergés mais sans enregistrement de données.

Les Delphinidés sont également identifiés au cours du suivi en phase de construction. En revanche, leur activité est plus occasionnelle que les Marsouins communs, et ce à tous les points d'enregistrements.

A noter qu'aucune activité associée aux Delphinidés n'a été détecté au point d'enregistrement C2 pendant toute la période d'échantillonnage du suivi en phase de construction notamment en raison d'un souci technique avec l'appareil acoustique (C-POD C2). Aux points d'enregistrement C1 et C3, il est constaté :

- Le point d'enregistrement **C3 (zone Sud du parc)** enregistre une activité occasionnelle variant entre 515 et 1 596 DPM par mois.
- Le point d'enregistrement **C1 (zone Nord du parc)** présente la plus forte activité bioacoustique avec 3 821 DPM. Cette activité occasionnelle est principalement concentrée sur les mois de mars à avril 2022 et juin à juillet 2023.

Le **Tableau 28** présente la somme des DPM journaliers (C1, C2 et C3) associés au Marsouin commun et aux Delphinidés au cours du suivi MSu3b de la phase de construction, en fonction des ateliers de travaux et des saisons.

Tableau 28 : sommes des détections (DPM) associées au Marsouin commun et aux Delphinidés au cours du suivi de la phase de construction en fonction des ateliers de travaux et des saisons.

Atelier de travaux	Saison Mois	Sommes des DPM journaliers		Total général (DPM)
		Delphinidés	Marsouin commun	
Forage des pieux de la sous-station électrique	Printemps 2022	2 225	9 193	11 418
	Mars 2022	515	7 843	8 358
	Avril 2022	1 514	964	2 478
	Mai 2022	196	386	582
<ul style="list-style-type: none"> Préparation des sols pour les fondations Mise en place de la fondation jacket et du topside de la sous-station électrique Mise en place des fondations gravitaires (en 2 temps) Ballastage 	Été 2022	151	2 204	2 355
	Juin 2022	0	139	139
	Juillet 2022	151	555	706
	Août 2022	0	1 510	1 510
<ul style="list-style-type: none"> Mise en place des enrochements de protection des fondations gravitaires Mise en place des câbles inter-éoliennes 	Automne 2022	302	3 987	4 289
	Septembre 2022	0	1 433	1 433
	Octobre 2022	302	360	662
	Novembre 2022	0	2 194	2 194
	2022	2 678	15 384	18 062
Installation des premières éoliennes	Été 2023	1 792	69	1 861
	Juin 2023	1 569	69	1 638
	Juillet 2023	223	0	223
	2023	1 792	69	1 861
	Total	4 470	15 453	19 923

Le **Marsouin commun** est l'espèce majoritairement recensée au cours du suivi en phase de construction. Son taux d'activité bioacoustique (DPM journaliers) est 4,46 fois supérieur à celui des Delphinidés. En effet, un total de 15 453 minutes positives (DPM) est recensé pour le Marsouin commun contre 4 470 minutes positives pour les Delphinidés. La tendance inverse est cependant observée à l'été 2023 avec une activité bioacoustique des Delphinidés (1 792 DPM) supérieure à celle du Marsouin commun (69 DPM).

Le Marsouin commun est régulièrement recensé dans la zone du projet au cours du suivi en phase de construction, avec une activité bioacoustique supérieure à celle des Delphinidés. Le Marsouin et les Delphinidés sont davantage recensés dans la zone Sud du parc (point d'enregistrement C3), notamment au printemps (mars 2022).

Le nombre de jours d'enregistrement par point d'enregistrement (C-PODs C1, C2 et C3) au cours du suivi de la phase de construction en fonction des ateliers de travaux et des saisons est présenté en

Annexes - Tableau 37. La somme totale des jours échantillonnés est également présentée par année et pour la durée totale du suivi.

7.1.1 Zone du parc

Le **Tableau 29** présente les moyennes saisonnières des DPM des Delphinidés et des Marsouins enregistrées pendant la phase des travaux dans la zone du parc (points d'enregistrement C1 et C3).

Tableau 29 : moyennes mensuelles des détections (DPM) associées au Marsouin commun et aux Delphinidés au cours du suivi de la phase de construction en fonction des ateliers de travaux et des saisons dans la zone du parc aux points d'enregistrement C1 et C3.

Atelier de travaux	Saison Mois	Moyennes mensuelles des DPM		Total général (DPM)
		Delphinidés	Marsouin commun	
Forage des pieux de la sous-station électrique	Printemps 2022	445	1 838,6	1 141,8
<ul style="list-style-type: none"> Préparation des sols pour les fondations Mise en place de la fondation et du topside de la sous-station électrique Mise en place des fondations gravitaires (en 2 temps) Ballastage 	Été 2022	30,2	344,8	187,5
<ul style="list-style-type: none"> Mise en place des enrochements de protection des fondations gravitaires Mise en place des câbles inter-éoliennes 	Automne 2022	60,4	206,8	133,6
	2022	178,53	796,73	487,63
Installation des premières éoliennes	Été 2023	896	34,5	465,25
	2023	896	34,5	465,25
	Total	262,94	707,06	485

Au cours de l'année 2022 dans la zone du parc, le Marsouin commun révèle une activité bioacoustique plus élevée que celles des Delphinidés sur l'ensemble des saisons échantillonnées, avec une moyenne maximale de 1 838,6 DPM/mois au printemps. Au cours de l'été 2023, la tendance inverse est observée avec une bioacoustique des Delphinidés (896 DPM/mois) supérieure à celle du Marsouin commun (34,5 DPM/mois).

Dans la zone du parc, le Marsouin commun est principalement enregistré au cours de la saison printanière et les Delphinidés au cours de la saison estivale. Ces observations sont conformes aux données bibliographiques et aux observations réalisées lors de l'état de référence (Biotope, 2014) et (Martinez, et al., 2013).

7.1.2 Zone témoin

Le **Tableau 30** présente les moyennes saisonnières des DPM des Delphinidés et des Marsouins enregistrées pendant la phase des travaux dans la zone témoin (point d'enregistrement C2). Au cours du printemps 2022, l'appareil acoustique C-POD C2 a subi des avaries techniques ne permettant pas l'exploitation des données. Aucun appareil acoustique n'a été déployé dans la zone témoin à l'été 2023.

Tableau 30 : moyennes mensuelles des détections (DPM) associées au Marsouin commun et aux Delphinidés au cours du suivi de la phase de construction en fonction des ateliers de travaux et des saisons dans la zone témoin au point d'enregistrement C2.

Atelier de travaux	Saison Mois	Moyennes mensuelles des DPM		Total général (DPM)
		Delphinidés	Marsouin commun	
Forage des pieux de la sous-station électrique	Printemps 2022	-	-	-
<ul style="list-style-type: none"> Préparation des sols pour les fondations Mise en place de la fondation et du topside de la sous-station électrique Mise en place des fondations gravitaires (en 2 temps) Ballastage 	Été 2022	0	480	160
<ul style="list-style-type: none"> Mise en place des enrochements de protection des fondations gravitaires Mise en place des câbles inter-éoliennes 	Automne 2022	0	738,25	421,86
	2022	0	686,6	343,3
Installation des premières éoliennes	Été 2023	-	-	-
	2023	-	-	-
	Total	0	686,6	343,3

Au cours de l'année 2022 dans la zone témoin, les détections ont uniquement révélé la présence du Marsouin commun. La saison automnale se distingue comme étant la saison avec la plus forte activité bioacoustique (738,25 DPM). Ces observations sont conformes aux données bibliographiques et aux observations réalisées lors de l'état de référence (Biotope, 2014) et (Martinez, et al., 2013).

7.2 Comparaison avec l'état de référence

Le suivi par acoustique passive réalisée du printemps 2022 à l'été 2023 permet d'établir **les tendances de fréquentation des Mammifères marins en fonction des saisons et des zones d'études** (zone du parc et zone témoin) et de les comparer aux résultats obtenus lors l'état de référence (2019-2021).

7.2.1 Suivi de la fréquentation des Mammifères marins

La **Figure 26** présente les DPM journaliers pour le Marsouin commun (en haut du graphique) et les Delphinidés (en bas du graphique) par mois sur la période d'acquisition d'avril 2019 à juillet 2023 sur l'ensemble de la zone d'étude. Les détections enregistrées au cours de l'état de référence sont représentées en bleu et celles de la phase de travaux en orange.

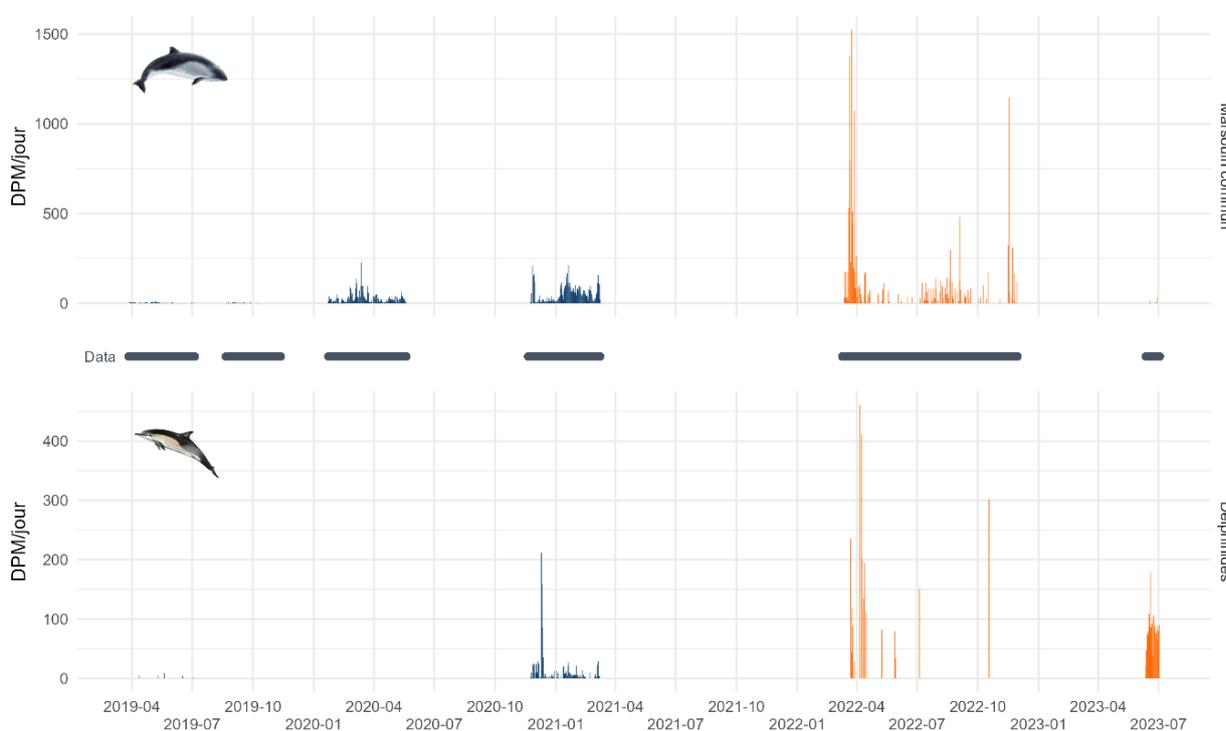


Figure 26 : évolution de l'activité journalière (DPM/jour) du Marsouin commun et des Delphinidés au cours du suivi à l'état de référence (2019-2021, en bleu) et en phase de construction (2022-2023, en orange) sur l'ensemble de la zone d'étude (zone témoin et zone du parc). La ligne data représente les périodes d'acquisition des données C-POD.

Les sommes des détections journalières des Delphinidés et du Marsouin commun enregistrées en fonction des saisons et des années au cours de l'état de référence (2019-2021) et en phase de construction (2022-2023) sur l'ensemble de la zone d'étude sont présentées en **Annexes - Tableau 38**.

- **Variabilité saisonnière**

Les détections des Mammifères marins démontrent une variabilité saisonnière tout au long des années entre l'état de référence et la phase de construction sur la zone d'étude :

- **Printemps** : l'activité bioacoustique est plus importante pour le Marsouin commun (219 DPM/jour à 9 193 DPM/jour) que pour les Delphinidés (19 DPM/jour à 2 225 DPM/jour) ;

- **Été** : l'activité bioacoustique des Delphinidés (5 DPM/jour à 1 792 DPM/jour) et du Marsouin commun (48 DPM/jour à 2 204 DPM/jour) est variable en fonction des années ;
- **Automne** : l'activité bioacoustique est plus importante pour le Marsouin commun (81 DPM/jours à 3 987 DPM/jour) que pour les Delphinidés (0 DPM/jour à 302 DPM/jour) ;
- **Hiver** : l'activité bioacoustique est plus importante pour le Marsouin commun (1 377 DPM/jour à 4 006 DPM/jour) que pour les Delphinidés (314 DPM/jour à 650 DPM/jour).

La fréquentation de la zone d'étude par le Marsouin commun est principalement concentrée sur les saisons hivernales et printanières. Les Delphinidés présentent une fréquentation plus faible que le Marsouin commun et leur présence est plus importante sur les saisons printanières et estivales. Cette fréquentation confirme les données bibliographiques issus de précédents suivis (Biotope, 2014).

• Variabilité annuelle

Les détections des Mammifères marins démontrent une variabilité annuelle tout au long de l'année entre l'état de référence et la phase de construction sur la zone d'étude :

- Le **Marsouin commun** est détecté en plus grand nombre au cours de l'année 2022 (phase de construction - 15 384 DPM /jour) puis ce sont les années d'état de référence, 2020 (4 784 DPM /jour) et 2021 (4 006 DPM/jour), qui présentent le plus grand nombre de détections acoustiques. La fréquentation du Marsouin commun est la plus faible au cours de l'année 2019 (état de référence) et 2023 (phase de construction) ;
- **Les Delphinidés** sont principalement détectés au cours de l'année 2022 (4 470 DPM /jour) et de l'année 2023 (1 792 DPM/jour) (phase de construction). Sa fréquentation est plus faible au cours de l'état de référence.

La fréquentation annuelle des Mammifères marins est plus importante au cours de la phase de construction que l'état de référence. Cependant, cette dernière n'est pas homogène d'une année à une autre au cours d'un même suivi. Le Marsouin commun est davantage détecté par rapport aux Delphinidés sur l'ensemble des suivis à l'exception de l'été 2023 au cours de la phase de construction.

• Variabilité journalière

Les Mammifères marins sont principalement détectés au lever et au coucher du soleil et au cours des saisons froides (novembre à mars) aux points d'enregistrement C1 (zone centre parc) et C2 (zone témoin). Au point d'enregistrement C3 (zone Sud parc), l'activité bioacoustique est continue tout au long de la journée en période printanière et estivale. Par ailleurs, annuellement, une activité plus importante est recensée au cours des mois de mars, juillet et août pour le Marsouin commun et au cours des mois de mars et juillet pour les Delphinidés.

La **Figure 27** présente la densité pour les Delphinidés (en haut du graphique) et pour le Marsouin commun (en bas du graphique) en fonction des points d'enregistrements (C1, C2 ou C3) et des cycles annuels et journaliers. L'échelle de couleurs représentant la densité est la même entre les deux espèces. La photopériode, soit la durée du jour considérée du point de vue de ses effets biologiques, à la latitude de Fécamp est superposée à chaque graphique.

Cette densité est obtenue par un calcul de densité des nœuds (KDE) (Di Salvo, Gadais, & Roche-Woillez, 2005) en utilisant la moyenne des DPM par jour et par heure comme poids. Cette méthode prend en compte la fréquence des détections afin d'établir une représentation de la densité des détections dans la zone d'étude.

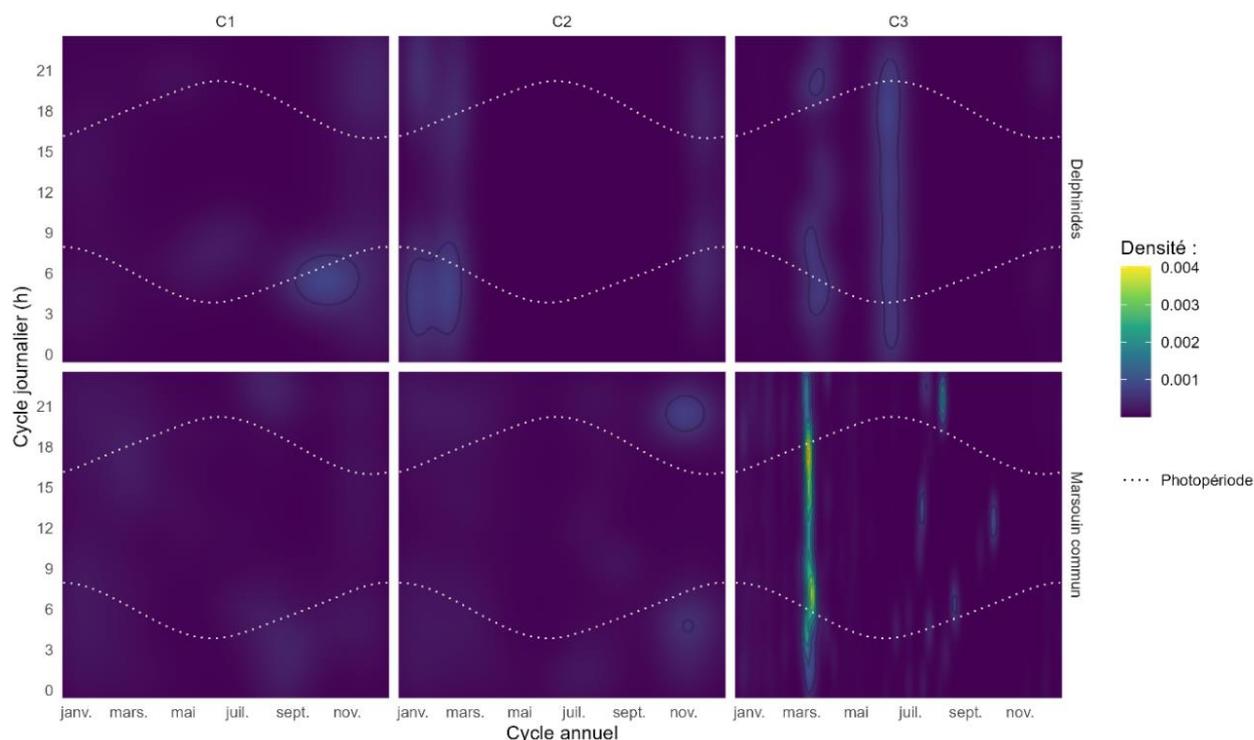


Figure 27 : patrons d'activité journaliers et annuels des Delphinidés (en haut) et des Marsouins (en bas) aux points d'enregistrements C1, C2 et C3 au cours du suivi à l'état de référence (2019-202) et en phase de construction (2022-2023).

Les Mammifères marins sont principalement recensés au lever et au coucher du soleil tout au long de l'année avec un étalement de leur activité bioacoustique sur 24 H au cours de la saison printanière. La fréquentation semble concentrée dans la zone Sud du parc (point d'enregistrement C3).

- **Variabilité spatiale**

La **Figure 28** présente les DPM mensuels pour le Marsouin commun par mois sur la période d'acquisition d'avril 2019 à juillet 2023 en fonction de la localisation, aux points d'enregistrements C1 (zone du parc au centre), C2 (zone témoin) et C3 (zone du parc au sud). Les détections enregistrées au cours de l'état de référence sont représentées en bleu et celles de la phase de travaux en orange.

Pour rappel, le C-POD C2 a subi une avarie technique réduisant le nombre de données disponibles dans la zone témoin au cours de la première période d'acquisition de l'année 2022. Au cours de l'été 2023, seul le point d'enregistrement C3 était opérationnel.

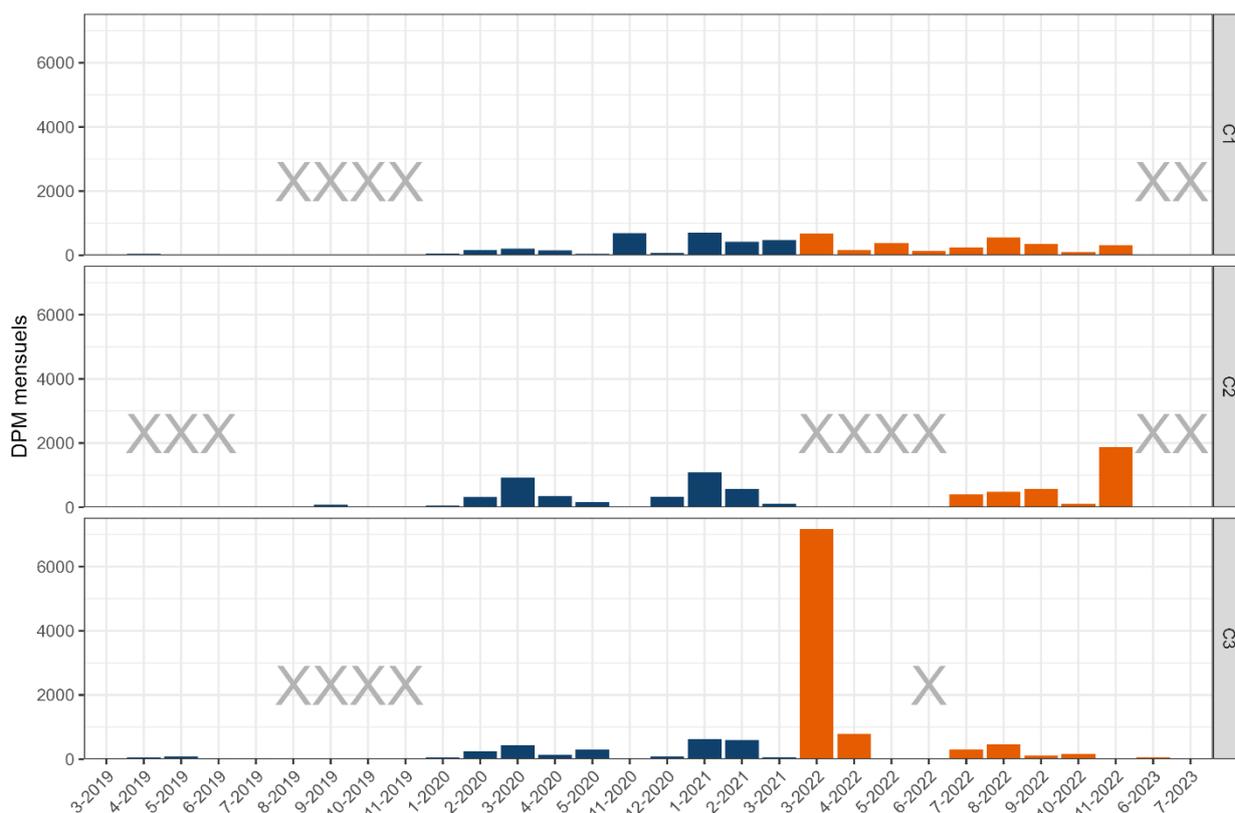


Figure 28 : évolution de l'activité mensuelle (DPM/mois) du Marsouin commun au cours du suivi à l'état de référence (2019-2021, en bleu) et en phase de construction (2022-2023, en orange) aux points d'enregistrement C1, C2 et C3. Les croix représentent les mois où les C-PODs étaient immergés mais sans enregistrement de données.

Les sommes des détections journalières du Marsouin commun enregistrées en fonction des saisons et des années au cours de l'état de référence (2019-2021) et en phase de construction (2022-2023) aux points d'enregistrement C1, C2 et C3 sont présentées en **Annexes -Tableau 39**.

Les détections de Marsouin commun sont principalement concentrées dans la zone Sud du parc entre l'état de référence et la phase de construction :

- **Point d'enregistrement C1 (zone centre du parc)** : l'activité bioacoustique est régulière sur l'ensemble des périodes suivies avec un total de 6 008 DPM. Le nombre de détections le plus élevé est constaté à l'hiver 2021 (1 133 DPM) et au printemps 2022 (1 232 DPM).
- **Point d'enregistrement C2 (zone témoin)** : l'activité bioacoustique est régulière sur l'ensemble des périodes suivies avec un total de 7 456 DPM. Des variations saisonnières et interannuelles sont constatées avec un nombre de détections le plus élevé au printemps 2020 (1 426 DPM), en hiver 2021 (1 663 DPM) et à l'automne 2022 (2 953 DPM).
- **Point d'enregistrement C3 (zone Sud du parc)** : l'activité bioacoustique est la plus forte sur l'ensemble des périodes suivies avec un total de 11 795 DPM. Le nombre de détections le plus élevé est constaté lors de la phase de construction totalisant 9 081 DPM, comparativement à 2 714 DPM lors de l'état de référence. L'activité bioacoustique est plus élevée à l'hiver 2021, (1 210 DPM) et au printemps 2022 (7 931 DPM).

La **Figure 29** présente les DPM mensuels pour les Delphinidés par mois sur la période d'acquisition d'avril 2019 à juillet 2023 en fonction de la localisation, aux points d'enregistrements C1 (zone du parc

au centre), C2 (zone témoin) et C3 (zone du parc au sud). Les détections enregistrées au cours de l'état de référence sont représentées en bleu et celles de la phase de travaux en orange.

Pour rappel, le C-POD C2 a subi une avarie technique réduisant le nombre de données disponibles dans la zone témoin au cours de la première période d'acquisition de l'année 2022. Au cours de l'été 2023, seul le point d'enregistrement C3 était opérationnel.

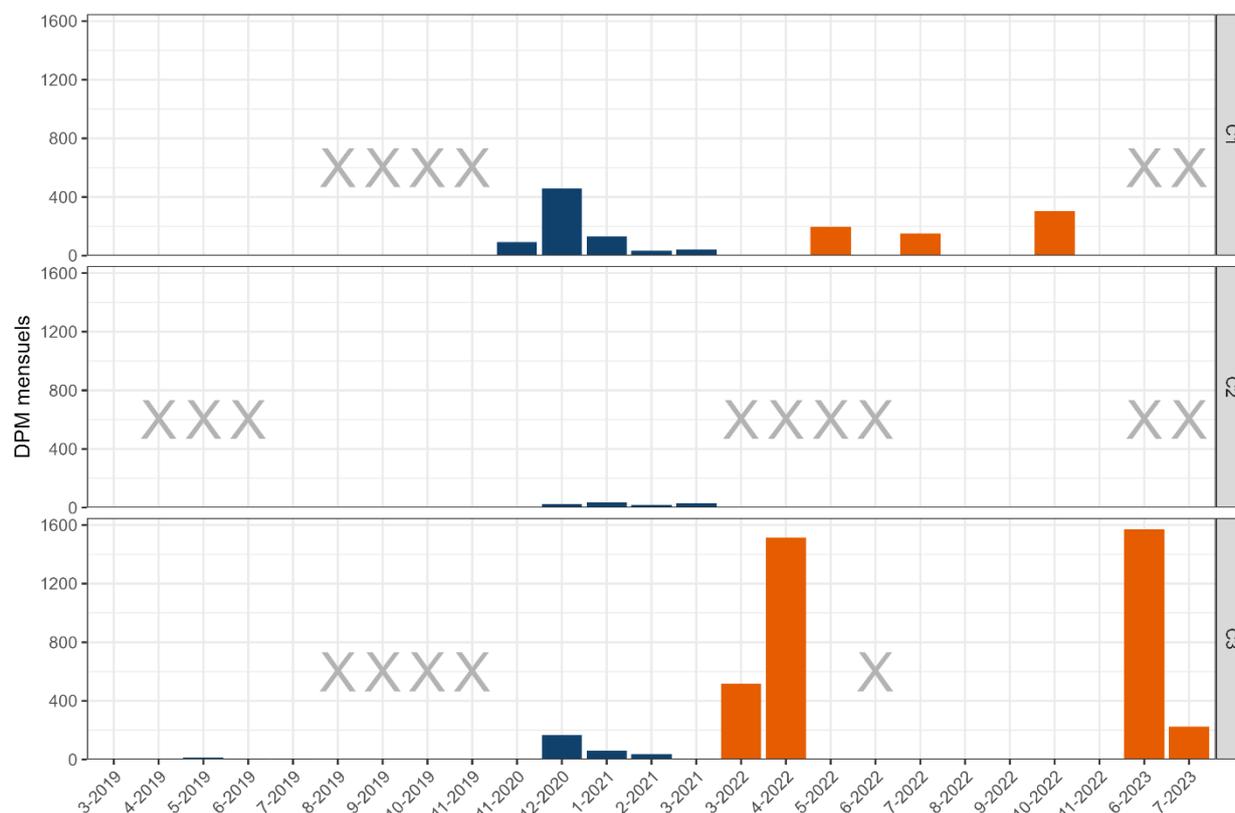


Figure 29 : évolution de l'activité mensuelle (DPM/mois) des Delphinidés au cours du suivi à l'état de référence (2019-2021, en bleu) et en phase de construction (2022-2023, en orange) aux points d'enregistrement C1, C2 et C3. Les croix représentent les mois où les C-PODs étaient immergés mais sans enregistrement de données.

Les sommes des détections journalières des Delphinidés enregistrées en fonction des saisons et des années au cours de l'état de référence (2019-2021) et en phase de construction (2022-2023) aux points d'enregistrement C1, C2 et C3 sont présentées en **Annexes - Tableau 40**.

Les détections des Delphinidés sont principalement concentrées dans la zone du parc entre l'état de référence et la phase de construction :

- **Point d'enregistrement C1 (zone Nord du parc)** : l'activité bioacoustique est modérée sur l'ensemble des périodes suivies avec un total de 1 410 DPM. Le nombre de détections le plus élevé est constaté à l'hiver 2020 (459 DPM) et à l'automne 2022 (302 DPM) ;
- **Point d'enregistrement C2 (zone témoin)** : l'activité bioacoustique est faible sur l'ensemble des périodes suivies avec un total de 109 DPM. Aucune activité bioacoustique n'a été détectée lors de la phase des travaux ;
- **Point d'enregistrement C3 (zone Sud du parc)** : l'activité bioacoustique est la plus forte sur l'ensemble des périodes suivies avec un total de 4 109 DPM. Le nombre de détections le plus

élevé est constaté lors de la phase de construction au printemps 2022 (2 029 DPM) et à l'été 2023 (1 792 DPM).

Concernant la variabilité spatiale, la zone Sud du parc (point d'enregistrement C3) est la zone la plus fréquentée par les Mammifères marins au cours du suivi de l'état de référence et en phase de construction. Le Marsouin commun fréquente principalement ce secteur en hiver et au printemps.

7.2.2 Évolution de la fréquentation entre l'état de référence et la phase de construction

Le **Tableau 32** synthétise les résultats obtenus par les appareils acoustiques (C-PODs) déployés aux différents points d'enregistrements (C1 et C3 pour la zone du parc ; et C2 pour la zone témoin) au cours de :

- **L'état de référence (2019-2021) :**
 - Le **printemps, l'été** et **l'automne** 2019 ;
 - Le **printemps** et **l'automne** 2020.
- **La phase de construction (2022-2023) :**
 - Le **printemps** 2022 (forage des pieux de la sous-station électrique) ;
 - L'**été** 2022 (préparation des sols pour l'installation des fondations gravitaires, mise en place de la fondation jacket et du topside de la sous station électrique, installation des fondations gravitaires et ballastage des fondations) ;
 - L'**automne** 2022 (mise en place des enrochements de protection des fondations gravitaires et installation des câbles inter-éoliennes) ;
 - L'**été** 2023 (installation des premières éoliennes).

La fréquentation saisonnière du site (fréquente, régulière, occasionnelle, rare ou absence) de chaque zone étudiée est déterminée en fonction des données acoustiques obtenues lors de l'état de référence et de la phase de construction. Les indicateurs de présence permettant de caractériser la fréquentation à chaque point d'enregistrement se basent sur les autres seuils définis par les autres parcs français (**Tableau 31**).

Tableau 31 : définition des seuils de fréquentation de la zone d'étude par les Mammifères marins.

Fréquentation	Caractéristiques	
	Périodes de détections	Taux de présence sur la période étudiée
Fréquente / Quotidienne	Une période de détections minimum tous les 1 à 4 jours	> 70 %
Régulière	Une période de détections minimum tous les 5 jours ou plus	50 à 70 %

Occasionnelle	Période de détections irrégulières	10 à 50 %
Rare	Un ou deux détections sur la période étudiée	< 10 %
Absence	Absence de détection	0 %

Les tendances évolutives de cette fréquentation (en hausse, similaire ou en baisse) sont établies en comparant les données acoustiques entre l'état de référence et la phase de construction.

A noter que la comparaison avec l'hiver 2020 et l'hiver 2021 (état de référence) n'est pas faisable, la saison hivernale n'ayant pas été échantillonnée au cours du suivi en phase de construction. Il en est de même pour la saison printanière en zone témoin, l'appareil acoustique C-POD C2 ayant subi des avaries techniques ne permettant pas l'exploitation des données, et pour la saison estivale 2023 où seul le C-POD C3 a été déployé.

La fréquentation des différentes espèces de Mammifères marins entre l'état de référence et la phase de construction au cours des quatre saisons suivies suit les tendances suivantes (**Tableau 32**) :

- Dans la première zone du parc (**au Sud du parc, point d'enregistrement C3**) : **au cours des quatre saisons suivies, la fréquentation des Mammifères marins (Delphinidés et Marsouin commun) du site est principalement occasionnelle et en hausse par rapport à l'état de référence.** A noter toutefois que, pour les Delphinidés, la fréquentation de l'été 2022 est similaire à l'état de référence et que celle de l'automne 2022 est en baisse par rapport à l'état de référence ; fréquentation définie comme rare ou occasionnelle à ces deux époques de l'année 2022 ;
- Dans la seconde zone du parc (**au centre du parc, point d'enregistrement C1**) : au cours des quatre saisons suivies, la fréquentation du site est régulière pour le Marsouin commun et occasionnelle pour les Delphinidés. Elle est en hausse par rapport à l'état de référence pour les Delphinidés. En revanche, la fréquentation est en baisse pour le Marsouin commun au printemps et à l'automne 2022, tendances opposées à ce qui est décrit par l'état de référence et la bibliographie (Biotope, 2014) ;
- Dans la zone témoin (**à l'Est du parc, point d'enregistrement C2**) : la fréquentation du Marsouin commun est régulière et en hausse par rapport à l'état de référence à l'été et à l'automne 2022. A l'inverse, la fréquentation des Delphinidés est similaire à l'été 2022 et en baisse à l'automne 2022 par rapport à l'état de référence. A noter que la fréquentation de cette zone par les Delphinidés est définie comme rare à l'automne 2022.

La fréquentation des Mammifères marins sur les différentes zones du parc ne semble pas être affectée par les travaux associés à la construction du parc éolien, une hausse de la fréquentation étant majoritairement observée par rapport à l'état de référence. Les baisses de fréquentation sont réparties entre les différentes saisons et concernent les Delphinidés comme le Marsouin commun.

Les différences significatives dans l'activité bioacoustique du Marsouin commun et des Delphinidés en fonction des saisons et de la localisation (zone du parc et zone témoin) sont évaluées grâce à des analyses statistiques (test de Kruskal-Wallis (Desquilbet, 2022)) détaillées en **Annexes – Section 10.4.2.2**. L'objectif est de déterminer quel facteur, entre les saisons et la zone du parc ou témoin,

influence la fréquentation des Mammifères marins entre l'état de référence et la phase de construction.

Les analyses statistiques réalisées ont montré que la fréquentation du Marsouin commun est influencée par la période d'échantillonnage (état de référence ou phase de construction) et la saisonnalité. Celle des Delphinidés est influencée par la période, la localisation (zone du parc ou zone témoin) et les années.

Tableau 32 : échelle de fréquentation des Delphinidés et du Marsouin commun aux points d’enregistrement C1, C2 et C3 au cours du suivi en phase de construction (2022-2023) en comparaison avec l’état de référence (2019-2021).

		Zone du parc C3 (Sud du parc)		Zone du parc C1 (centre du Parc)		Zone témoin C2 (Est du parc)	
		Delphinidés	Marsouin commun	Delphinidés	Marsouin commun	Delphinidés	Marsouin commun
Printemps 2022	Fréquentation du site	Régulière	Régulière	Occasionnelle	Régulière		
	Classification	<i>Delphinus delphis</i> <i>Tursiops truncatus</i>	<i>Phocoena phocoena</i>	<i>Delphinus delphis</i> <i>Tursiops truncatus</i>	<i>Phocoena phocoena</i>		
Été 2022	Fréquentation du site	Occasionnelle	Occasionnelle	Occasionnelle	Régulière	Occasionnelle	Régulière
	Classification	<i>Delphinus delphis</i> <i>Tursiops truncatus</i>	<i>Phocoena phocoena</i>	<i>Delphinus delphis</i> <i>Tursiops truncatus</i>	<i>Phocoena phocoena</i>	<i>Delphinus delphis</i> <i>Tursiops truncatus</i>	<i>Phocoena phocoena</i>
Automne 2022	Fréquentation du site	Rare	Régulière	Occasionnelle	Régulière	Rare	Régulière
	Classification	<i>Delphinus delphis</i> <i>Tursiops truncatus</i>	<i>Phocoena phocoena</i>	<i>Delphinus delphis</i> <i>Tursiops truncatus</i>	<i>Phocoena phocoena</i>	<i>Delphinus delphis</i> <i>Tursiops truncatus</i>	<i>Phocoena phocoena</i>
Été 2023	Fréquentation du site	Occasionnelle	Occasionnelle				
	Classification	<i>Delphinus delphis</i> <i>Tursiops truncatus</i>	<i>Phocoena phocoena</i>				
		Hausse de la fréquentation par rapport à l'état de référence		Fréquentation similaire par rapport à l'état de référence		Baisse de la fréquentation par rapport à l'état de référence	

7.3 Influence des variables spatio-temporelles, environnementales et anthropiques sur les Mammifères marins

La fréquentation et la distribution des Mammifères marins sur une zone donnée peuvent être soumises à l'**influence de variables temporelles** (variables saisonnières, annuelles et la période de suivi), **spatiales** (zone du parc ou zone témoin et distance à la côte) **environnementales** (température de surface, vitesse des courants de surface, concentration de phytoplancton dans l'eau) **et anthropiques** (travaux, trafic maritime, activités militaires, etc.).

7.3.1 Analyse des variables spatiales, temporelles et environnementales

L'analyse des **variables environnementales** est présentée en **Annexes – Section 10.4.3.1. L'activité bioacoustique du Marsouin commun est affectée significativement par la température de surface et la concentration en phytoplancton dans l'eau. L'activité bioacoustique des Delphinidés est affecté significativement par les quatre variables environnementales testées, avec un effet plus fort de la température de surface et la vitesse du courant.**

L'analyse des **variables spatiales et temporelles**, ou effets paramétriques, est présentée en **Annexes – Section 10.4.3.2. La localisation (distance à la côte et la zone, parc ou témoin) et la saisonnalité exercent une influence significative sur l'activité bioacoustique des Delphinidés.**

L'analyse des variables spatiales, temporelles et environnementales démontre que la température de surface et la concentration du phytoplancton exercent une influence significative sur l'activité bioacoustique du Marsouin commun et des Delphinidés.

La vitesse du courant, les coefficients de marée et la localisation (distance à la côte et la zone parc ou témoin) exercent également une influence significative sur l'activité bioacoustique des Delphinidés.

D'autres variables environnementales, telles que la disponibilité des proies, la pollution de l'eau, les interactions humaines et les conditions météorologiques peuvent influencer l'activité bioacoustique des Mammifères marins.

Plusieurs analyses ANOVA multifactorielles (Analyse de la Variance) (Moyon, El Mostafa, El Ghaziri, & Alexandre-Gouabau, 2015) sont réalisées afin de vérifier les éventuelles différences statistiques dans l'activité bioacoustique des Delphinidés et du Marsouin commun entre les niveaux d'échantillonnage (périodes soit au cours du suivi de l'état de référence ou de la phase de construction, saisons, années et zone du parc ou zone témoin).

Les p-values obtenues à l'issu de ces tests statistiques permettent d'évaluer si certains facteurs exercent une influence significative sur l'activité bioacoustique du Marsouin commun et des Delphinidés. Les résultats sont présentés en **Annexes – Tableau 48** (pour le Marsouin commun) et **Tableau 50** (pour les Delphinidés).

L'activité bioacoustique du Marsouin commun est principalement influencée par la période et les variations saisonnières.

L'activité bioacoustique des Delphinidés est principalement influencée par la période, la localisation et les variations annuelles.

7.3.2 Analyse du bruit ambiant issu des sources anthropiques

L'analyse du bruit ambiant issu des sources anthropiques, est présentée en **Annexes – Section 10.4.3.3.**

Le bruit ambiant occasionné par les travaux lors de la phase de construction n'a pas d'influence significative sur l'activité bioacoustique des Mammifères marins.

8. LIMITES ET DIFFICULTÉS RENCONTRÉES

La bioacoustique permet d'acquérir des enregistrements par acoustique passive des sons émis par les animaux et ce, quelle que soit l'heure du jour et de la nuit. Toutefois, l'environnement extrêmement fluctuant dans lequel s'inscrit les enregistrements par acoustique passive conduit à des limitations qu'il est nécessaire de prendre en compte lors de l'analyse et de l'interprétation des résultats.

8.1 Systèmes de mesures

Le principe du suivi du bruit ambiant sous-marin et de la fréquentation des Mammifères marins par acoustique passive repose sur une immersion des appareils acoustiques pendant plusieurs semaines ou plusieurs mois. L'échantillonnage en milieu marin avec les systèmes acoustiques sélectionnés pour cette étude (hydrophones, enregistreurs et C-PODs) ne permet pas un suivi en temps réel de l'acquisition des données, d'une mise en place d'alerte de dysfonctionnement des appareils et d'un accès rapide à ces derniers. En cas d'incident technique sur l'un des appareils acoustiques (saturation de la mémoire, problème de batterie, dégradation, etc...), ce dernier n'est connu que lors des sorties de contrôle et du déchargement des données *a posteriori*.

La mise en place de systèmes acoustiques proposant **un suivi en temps réel** des signes vitaux des appareils limiterait les pertes de données lors de longues périodes d'immersion. Des sorties de contrôle pourraient permettre **une vérification de l'état des appareils acoustiques et des données acquises** et un remplacement si des dégradations étaient constatées. Toutefois, de tels contrôles sont dépendants des disponibilités bateaux, des conditions météorologiques pour intervenir sur site et peuvent être chronophages et coûteux.

8.2 Traitement des données

L'acquisition de l'ambiance sonore par acoustique passive représente un volume de données conséquent, en particulier car la représentativité temporelle élevée est un des points forts de l'acoustique passive. Le déchargement et le traitement de ces données peuvent alors s'avérer **chronophages et coûteux**. Pour pallier ce problème, des algorithmes de détection automatique ainsi que des traitements post-détections sont utilisés et, si nécessaire, une validation humaine des échantillons est également mise en place. Les traitements appliqués à ces volumes de données nécessitent que **la puissance de calcul des serveurs en ligne soit suffisamment élevée** afin de minimiser le temps de déchargement et de traitements des données acquises. A noter que l'augmentation de la puissance des serveurs hébergés en ligne est dépendante du coût associé à ces derniers. Dans tous les cas, l'amélioration continue des algorithmes et l'effort de validation humaine permettent la validation robuste des résultats obtenus.

8.3 Résolution de la mesure

La mesure de suivi MSu3a (suivi du bruit ambiant sous-marin) met en place un seul point d'enregistrement par zone (H1 dans la zone témoin et H2 dans la zone du parc). L'acquisition de l'ambiance sonore lors de périodes où plusieurs travaux sont concomitants et plusieurs navires de construction présents au sein du parc (comme au cours de l'été et de l'automne 2022) par secteur est donc unique. Cependant, il apparaît impossible de dissocier de l'ambiance sonore, les composantes

propres de chaque source de bruit anthropique. Les analyses fréquentielles réalisées confirment que la répartition de l'énergie acoustique est bien concentrée dans des bandes de fréquences (moyennes et basses fréquences) associées aux bruits anthropiques, mais **sans pour autant pouvoir discriminer la part de chaque atelier de travaux et des navires associés. Les effets de cette limite restent sans conséquence pour les résultats de l'étude**, en raison des niveaux sonores atteints, en comparaison aux niveaux sonores de l'état de référence, mais également en **l'absence de dépassement de seuils critiques (TTS et PTS) pour les Mammifères marins.**

8.4 Algorithme de détection automatique

Les algorithmes de détections automatiques des sources sonores associés au bruit ambiant subissent des entraînements composés d'un large panel de différentes sources sonores issus des activités anthropiques dans le milieu maritime. **Ces entraînements minimisent les risques de fausses détections et renforcent la qualité des traitements appliqués.** Ces algorithmes de détections automatiques sont mis en place à partir des données brutes, directement accessibles depuis les enregistreurs.

A l'inverse des enregistreurs, la donnée brute enregistrée et traitée automatiquement par les C-PODs n'est pas accessible. Ces appareils classent les détections en différentes catégories (Delphinidés, Marsouin commun, sondeurs des navires et autres détections non identifiées). Cependant, le nombre de détections réalisées peut être surestimé et/ou les détections biologiques réalisées par l'algorithme s'apparentent en réalité à la détection de signaux anthropiques. En effet, la présence de bruit apparenté aux lignes de mouillage, tels que des chocs ou des grincements, peuvent entraîner une **confusion pour l'algorithme de détection entre les signaux biologiques et les signaux anthropiques.** De plus, la présence de signaux impulsifs anthropiques, tels que ceux émis par le sondeur d'un navire, peuvent donner lieu à de fausses détections, c'est-à-dire à la détection des signaux impulsifs émis par le sondeur dans la bande de fréquence d'émission des clics de Delphinidés et du Marsouin commun. La vérification humaine offre alors une alternative satisfaisante dans la grande majorité des cas pour confirmer l'origine des détections réalisées.

9. CONCLUSION DU SUIVI ACOUSTIQUE EN PHASE DE CONSTRUCTION

Le suivi en phase de construction du parc éolien en mer de Fécamp (2022-2023) s'inscrit dans une démarche BACI (*Before-After-Control-Impact*). **Selon cette approche, les résultats de cette phase sont comparés selon une échelle temporelle (phase avant construction, dit « état référent » vs. phase de travaux, dit « état perturbé ») et spatiale (zone du parc, dite « zone impactée » vs. zone hors parc, dite « zone témoin »).** Pour ce faire, il est donc nécessaire de mettre à contribution les connaissances sur l'état référent acquises sur la période de 2019 à 2021.

Le but principal de cette phase est de vérifier si le bruit anthropique généré par la construction du parc éolien a un impact sur les Mammifères marins. Les suivis MSu3a et MSu3b s'inscrivent dans ce cadre afin de :

- **Suivre le bruit ambiant sous-marin (MSu3a) :** acquisition de données sur le bruit ambiant sous-marin avec des enregistreurs et hydrophones à large bande afin d'évaluer l'effet des travaux de construction sur le bruit ambiant sous-marin ;
- **Suivre la fréquentation des Mammifères marins par acoustique passive (MSu3b) :** détection de la présence des Mammifères marins par vocalise *via* l'implantation sur site de trois C-PODs, afin de suivre leur fréquentation de la zone pendant les travaux de construction du parc éolien en mer et d'évaluer les éventuels impacts du bruit.

Les périodes précises d'immersion des appareils acoustiques ont couvert les différents types de travaux réalisés, avec quatre campagnes réalisées entre mars et novembre 2022 et une réalisée de juin à août 2023. **Au total, les campagnes de suivis de 2022 et 2023 ont permis de couvrir trois saisons (printemps, été et automne)** avec une durée d'enregistrement d'environ trente jours pour chaque enregistreur, au cours de chaque campagne, et huit mois pour chaque C-POD.

9.1 Suivi du bruit ambiant pendant la phase de construction

Le suivi par acoustique passive (MSu3a) a pour objectif de suivre les niveaux sonores générés par huit ateliers de travaux pendant dix mois au cours des années de construction en mer, 2022 et 2023.

➤ **Atelier de forage des pieux de la sous-station électrique (printemps 2022)**

Les analyses temporelles des niveaux sonores ont permis de définir **un niveau moyen de 102,42 dB re 1µPa (SPL-RMS)** durant l'atelier de forage des pieux de la sous-station électrique dans la zone du parc. Le niveau sonore moyen pendant les phases de forage est **inférieur (- 4,58 dB re 1µPa) (SPL-RMS) au niveau sonore moyen enregistré lors de l'état de référence (Tableau 33)**. En dehors des phases de forage, les niveaux sonores moyens sont de 95 dB re 1µPa (SPL-RMS).

Les analyses fréquentielles confirment la dominance du bruit anthropique sur l'ensemble des basses fréquences. **Les niveaux de bruit enregistrés pendant cet atelier ne présentent pas de dépassement de seuil PTS ou TTS pour les différentes espèces de Mammifères marins.**

Les analyses temporelles des niveaux sonores ont permis de définir **un niveau moyen de 106,15 dB re 1µPa (SPL-RMS)** durant l'atelier de forage des pieux de la sous-station électrique dans la zone témoin. Le niveau sonore moyen pendant les phases de forage est **similaire au niveau sonore moyen**

enregistré lors de l'état de référence (Tableau 33). Enfin, la modélisation de l'empreinte acoustique des travaux de forage révèle une emprise géographique limitée à l'échelle du parc éolien de Fécamp et de son périmètre proche. L'énergie acoustique émise par les travaux de forage s'atténue fortement dès les premiers mètres.

➤ *Atelier de préparation des sols aux fondations gravitaires (été 2022)*

Les analyses temporelles des niveaux sonores ont permis de définir un niveau moyen de **100,51 dB re 1µPa (SPL-RMS)** durant la période de l'atelier de préparation des sols pour les fondations gravitaires dans la zone du parc. **Le niveau sonore moyen est inférieur (- 6,48 dB re 1µPa) (SPL-RMS) au niveau sonore moyen enregistré lors de l'état de référence (Tableau 33)**. En dehors des phases de travaux de préparations des sols, les niveaux sonores moyens sont de 98 dB re 1µPa (SPL-RMS).

Les analyses fréquentielles confirment la dominance du bruit anthropique sur l'ensemble des basses fréquences. **Toutefois, les niveaux de bruit enregistrés pendant cet atelier ne présentent pas de dépassement de seuil PTS ou TTS pour les différentes espèces de Mammifères marins.**

Les analyses temporelles des niveaux sonores ont permis de définir un niveau moyen de **105,63 dB re 1µPa (SPL-RMS)** durant la période de l'atelier de préparation des sols pour les fondations gravitaires dans la zone témoin. **Le niveau sonore moyen est supérieur (+ 4,98 dB re 1µPa) (SPL-RMS) au niveau sonore moyen enregistré lors de l'état de référence (Tableau 33)**.

➤ *Ateliers de mise en place de la fondation jacket et du topside de la sous-station électrique, d'installation et ballastage des fondations gravitaires (été 2022) ; et mise en place des enrochements de protection des fondations et installation des câbles inter-éoliennes (automne 2022)*

Les analyses temporelles des niveaux sonores ont permis de définir un niveau moyen de **111,98 dB re 1µPa (SPL-RMS)** sur la période d'acquisition des ateliers de mise en place de la fondation jacket et du topside de la sous-station électrique, de l'installation des fondations gravitaires, de leur ballastage, de la mise en place des enrochements de protection des fondations et de l'installation des câbles inter-éoliennes dans la zone du parc. **Le niveau sonore moyen est supérieur (+ 4,98 dB re 1µPa) (SPL-RMS) au niveau sonore moyen enregistré lors de l'état de référence (Tableau 33)**. La coactivité des ateliers et des navires de construction associés la zone du parc ne permettent pas de mettre en évidence l'influence d'une ou plusieurs sources sonores sur les variations des niveaux sonores.

Les analyses fréquentielles confirment la dominance du bruit anthropique sur l'ensemble des moyennes et des basses fréquences. La plus grande augmentation du bruit, de l'ordre de 30 à 40 dB re 1µPa, est située dans les fréquences de 200 à 300 Hz et peut être attribuée au bruit généré par l'ensemble des ateliers de la seconde période d'acquisition de l'été 2022 et de l'automne 2022. **Les niveaux de bruit enregistrés pendant ces ateliers ne présentent pas de dépassement de seuil PTS ou TTS pour les différentes espèces de Mammifères marins.**

Les analyses temporelles des niveaux sonores ont permis de définir un niveau moyen variant de **98,21 dB re 1µPa (SPL-RMS) à 107,5 dB re 1µPa (SPL-RMS)** sur la période d'acquisition des ateliers de mise en place de la fondation jacket et du topside de la sous-station électrique, de l'installation des fondations gravitaires, de leur ballastage, de la mise en place des enrochements de protection des fondations et de l'installation des câbles inter-éoliennes dans la zone témoin. **Le niveau sonore moyen est similaire au niveau sonore moyen enregistré lors de l'état de référence (Tableau 33) lors de la seconde période d'acquisition de l'été 2022 et inférieur (- 8,79 dB re 1µPa) (SPL-RMS) lors de l'automne 2022.**

➤ **Atelier d'installation des premières éoliennes (été 2023)**

Les analyses temporelles des niveaux sonores ont permis de définir **un niveau moyen de 113 dB re 1µPa (SPL-RMS)** durant l'installation des premières éoliennes dans la zone du parc. **Le niveau sonore moyen est supérieur au niveau sonore moyen enregistré lors de l'état de référence (+ 6 dB re 1µPa) (Tableau 33)**. La coactivité des ateliers et des navires de construction associés la zone du parc ne permettent pas de mettre en évidence l'influence d'une ou plusieurs sources sonores sur les variations des niveaux sonores.

Les analyses fréquentielles confirment la dominance du bruit anthropique sur l'ensemble des moyennes et des basses fréquences. La plus grande augmentation du bruit, de l'ordre de 26 dB re 1µPa, est située dans les fréquences de 50 à 300 Hz et peut être attribuée au bruit généré par l'installation des éoliennes. **Toutefois, les niveaux de bruit enregistrés pendant l'atelier d'installation des premières éoliennes ne présentent pas de dépassement de seuil PTS ou TTS pour les différentes espèces de Mammifères marins.**

Les analyses temporelles des niveaux sonores ont permis de définir **un niveau moyen de 109 dB re 1µPa (SPL-RMS)** durant l'installation des premières éoliennes dans la zone témoin. **Le niveau sonore moyen est supérieur au niveau sonore moyen enregistré lors de l'état de référence (+ 2 dB re 1µPa) (SPL-RMS) (Tableau 33).**

Le suivi acoustique passif MSu3a met en évidence que les niveaux sonores moyens calculés pendant les ateliers de forage des pieux de la sous-station électrique et de préparation des sols aux fondations gravitaires sont inférieurs aux niveaux sonores calculés pendant l'état de référence dans la zone du parc. Les niveaux sonores moyens acquis de l'été 2022 à l'été 2023 pendant différents ateliers de travaux, dont certains en simultané selon les périodes révèlent une augmentation de 4,98 à 6 dB re 1µPa par rapport à l'état de référence dans la zone du parc. Dans la zone témoin, l'ambiance sonore est davantage soumise à l'énergie acoustique émise par le trafic maritime.

Les analyses fréquentielles confirment que, pour l'ensemble des données acquises, l'énergie acoustique est concentrée dans des gammes de fréquences propres à celles des activités anthropiques (basses et moyennes fréquences) mais sans jamais dépasser des seuils PTS ou TTS pour l'ensemble des familles de Mammifères marins.

Tableau 33 : synthèse des comparaisons des niveaux de bruit SPL-RMS (dB re 1µPa) entre le suivi acoustique réalisé lors de l'état de référence et le suivi en phase de construction.

	Forage des pieux de la sous-station <i>Printemps 2022</i>		Préparation des sols pour les fondations gravitaires <i>Eté 2022</i>		Mise en place de la fondation jacket et du topside de la sous-station électrique, installation des fondations gravitaires et ballastage <i>Eté 2022</i>		Mise en place des enrochements de protection des fondations et installation des câbles inter-éoliennes <i>Automne 2022</i>		Installations des premières éoliennes <i>Eté 2023</i>	
	<i>Zone du parc</i>	<i>Zone témoin</i>	<i>Zone du parc</i>	<i>Zone témoin</i>	<i>Zone du parc</i>	<i>Zone témoin</i>	<i>Zone du parc</i>	<i>Zone témoin</i>	<i>Zone du parc</i>	<i>Zone témoin</i>
SPL-RMS – État de référence	107 dB re 1µPa	107 dB re 1µPa	107 dB re 1µPa	107 dB re 1µPa	107 dB re 1µPa	107 dB re 1µPa	107 dB re 1µPa	107 dB re 1µPa	107 dB re 1µPa	107 dB re 1µPa
SPL-RMS – Phase de construction	102,42 dB re 1µPa	106,15 dB re 1µPa	100,51 dB re 1µPa	105,63 dB re 1µPa	111,98 dB re 1µPa	107,50 dB re 1µPa	111,98 dB re 1µPa	98,21 dB re 1µPa	113 dB re 1µPa	109 dB re 1µPa
Comparaison avec l'état de référence	-	=	-	-	+	=	+	-	+	+

9.2 Suivi de la fréquentation des Mammifères marins

Le suivi par acoustique passive (MSu3b) a pour objectif de **suivre la fréquentation du site par les Mammifères marins pendant la phase de construction du parc éolien** afin de détecter et d'évaluer d'éventuels impacts. Ce suivi est réalisé via l'analyse des détections bioacoustiques enregistrées à trois points d'enregistrements, au sein du parc et en zone témoin.

Les analyses permettent de révéler la présence du **Marsouin commun** (*Phocoena phocoena*) et des **Delphinidés** (Dauphin commun (*Delphinus delphis*) et **Grand Dauphin** (*Tursiops truncatus*)) sur l'ensemble des saisons étudiées au cours de la phase de construction. Dans la zone du parc, le **Marsouin commun est l'espèce principalement recensée** durant ce suivi, notamment sur l'année 2022 (printemps et automne 2022 en majorité). En 2023, où seule la saison estivale a été suivie, la présence de Delphinidés est plus marquée que celle du Marsouin commun. Dans la zone témoin, échantillonnée uniquement en 2022 avec les C-PODs, les détections révèlent la présence du Marsouin commun, mais d'aucun Delphinidé. Les détections saisonnières recensées au cours de la phase de construction sont analogues aux données issues de l'état de référence et de la bibliographie.

La fréquentation du site par les Mammifères marins au cours des quatre saisons suivies pendant la phase de construction (printemps 2022, été 2022, automne 2022 et été 2023) est généralement **occasionnelle (Tableau 34). Cette fréquentation est principalement en hausse en comparaison avec l'état de référence (2019-2021) sur l'ensemble du suivi en phase de construction.** Les baisses de fréquentation recensées concernant le Marsouin commun au printemps 2022 et à l'automne 2022 au centre du parc et les Delphinidés au Sud du parc au printemps 2022 et à l'automne 2022 au centre du parc. Les données bioacoustiques de l'état de référence et de la phase de construction montrent conjointement que le Marsouin commun est principalement recensé au cours de la saison printanière et les Delphinidés au cours de la saison estivale.

L'analyse des variables spatio-temporelles et environnementales démontre que **la variabilité saisonnière représente le principal facteur influençant la fréquentation du Marsouin commun sur la zone d'étude. La fréquentation des Delphinidés est quant à elle influencée par la variabilité saisonnière, annuelle et spatiale.** Les variables environnementales, présentées dans cette étude, exercent également une influence sur la fréquentation des Mammifères marins, mais dans une moindre mesure. **L'analyse des variables anthropiques, ici le bruit ambiant généré par les travaux, démontre que ce dernier n'a pas d'influence sur la fréquentation de la zone d'étude par le Marsouin commun et les Delphinidés.**

10. ANNEXES

10.1 Contexte et enjeux

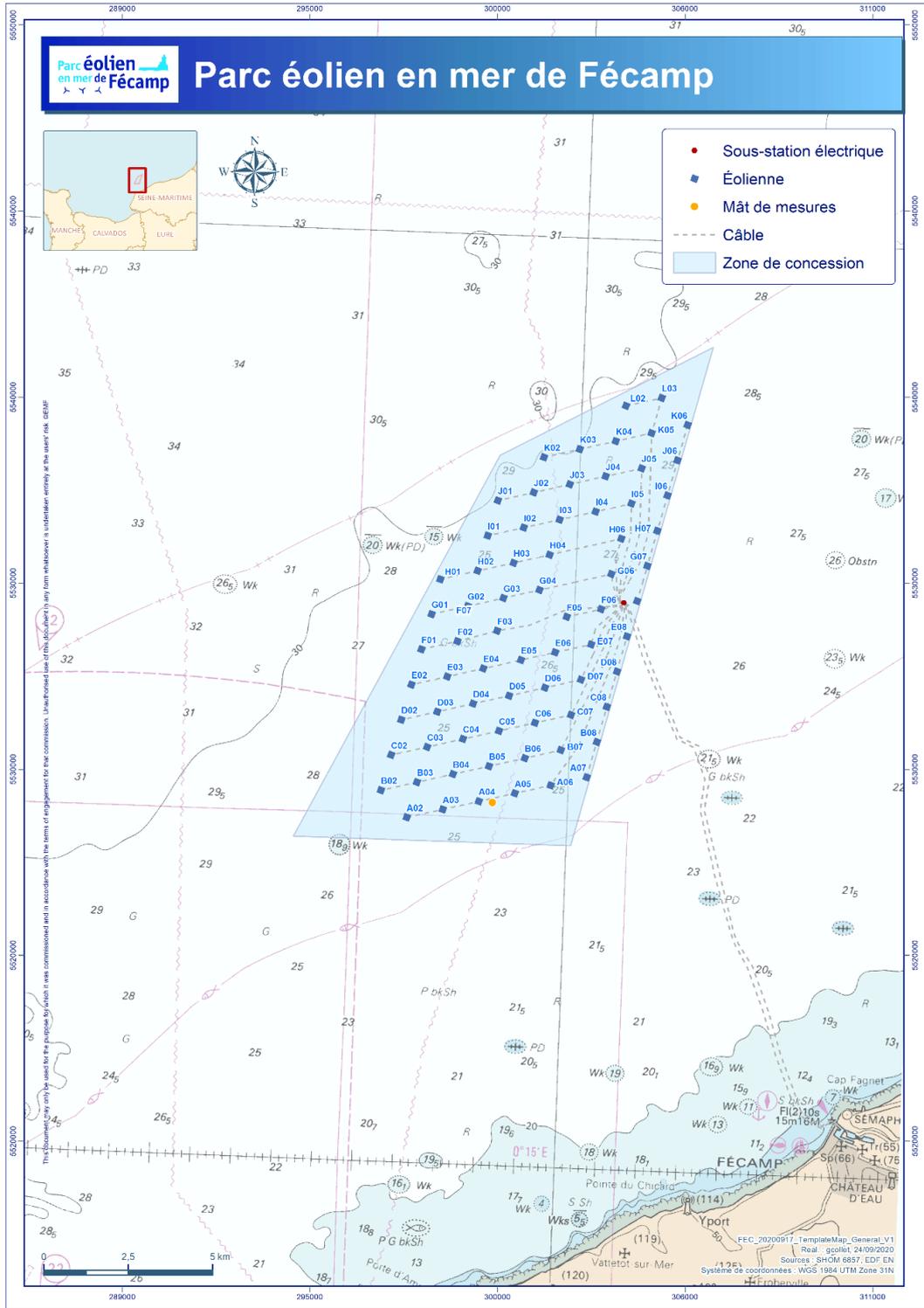


Figure 30 : carte de localisation du parc éolien en mer de Fécamp et son raccordement électrique sous-marin (Parc Eolien en Mer de Fécamp).

10.1.1 Contexte réglementaire

La prise de conscience de l'impact sonore anthropique sous-marin a entraîné une multiplication des études et publications sur le sujet. La Commission Européenne s'est saisie du sujet et a inscrit les bruits impulsifs et continus comme le 11^{ème} descripteur de la 'Marine Strategy Framework Directive'. A cet effet, il est attendu dans le futur la création de seuils pour harmoniser les pratiques. A noter que certains pays, comme l'Allemagne, ont déjà mis en œuvre une politique de recherche d'évaluation des risques au profit du gouvernement, permettant à ce dernier de structurer les lignes directrices de réduction d'une source sonore anthropique sur des états de fait.

Le contexte réglementaire français relatif à la gestion du bruit sous-marin et de son impact sur l'environnement représente l'expression des engagements de la France à l'échelle internationale en matière de gestion, de protection et de valorisation de l'environnement marin et de son patrimoine naturel. Toutefois, il est important de souligner que les textes réglementaires pertinents pour les suivis liés aux projets industriels sont ceux qui abordent ces projets individuellement. Dans ce cas, les suivis et les mesures de réduction des impacts portent uniquement sur le projet visé et n'ont pas vocation à s'inscrire dans un programme plus vaste relatif à une approche écosystémique.

Actuellement, des valeurs réglementaires concernant les niveaux sonores à ne pas dépasser pour les activités de battage de pieux (activité sonore sous-marine la plus impactante pour les mammifères marins dans le cadre de la construction de parcs éolien en mer) ont déjà été adoptées par quelques pays européens, dont la France ne fait pas partie (**Tableau 35**). Parmi ces pays, la norme allemande stipule que le niveau d'exposition sonore ne doit pas dépasser 160 dB réf. 1µPa_{2s} à 750 m de l'atelier et un niveau de pression sonore crête de 190 dB réf. 1µPa à 750 m. La distance de 750 m a été définie par modélisation et principe de précaution, permettant un contrôle des niveaux acoustiques bien à l'écart des sites d'implantation et une zone surveillée maximisante pour la réduction de l'impact. Les normes belges préconisent, quant à elles, de ne pas dépasser un niveau de pression sonore crête à crête de 185 dB réf. 1µPa. Le seuil d'exposition sonore médian est défini de manière à éviter les niveaux acoustiques qui pourraient entraîner une perte temporaire d'audition. Dans ces pays, si les émissions de bruits dues au battage dépassent ces limites, des mesures de réduction doivent être mises en place. D'autres pays, tels que le Royaume-Uni, ont décidé de ne pas fixer de seuils réglementaires et privilégient le déploiement obligatoire de mesures de réduction à la source, telles que l'utilisation de répulsifs et un suivi de la zone en temps réel.

Tableau 35 : résumé des instructions et des recommandations (Source : projet européen AQUO).

Country	Measures required & Permit conditions							
	Exclusion Zone	Acoustic deterrent devices	Seasonal and area restriction	Soft-start	Noise restriction	Mitigation	Marine Mammal Observer	Passive Acoustic Monitoring
Belgium	-	✓	✓	✓	SPL 185dB dB re 1µPa @750m	If necessary	✓	-
Denmark	-	✓	-	✓	Depending on site SEL 190 dB re 1µPa ² s@750m for piling with a duration > 1 h	Yes. Low noise foundations	-	-
France	✓	✓	-	✓	Yes. Level depending on project	If necessary	Depending on project	
Germany	-	✓	✓	✓	SEL 160 dB re 1µPa ² s@750m SPL 190 dB re 1µPa @750m	✓	✓	✓
Netherlands	-	✓	✓	✓	Jan-Aug SEL 159 dB re 1µPa ² @750m Sep-Dec SEL 172 dB re 1µPa ² @750m	✓	-	-
Sweden					Depending on site and species	Depending on site		
United Kingdom	✓	✓	✓	✓	-	If necessary	✓	✓

10.2.2 Lignes de mouillage porteuses des dispositifs acoustiques

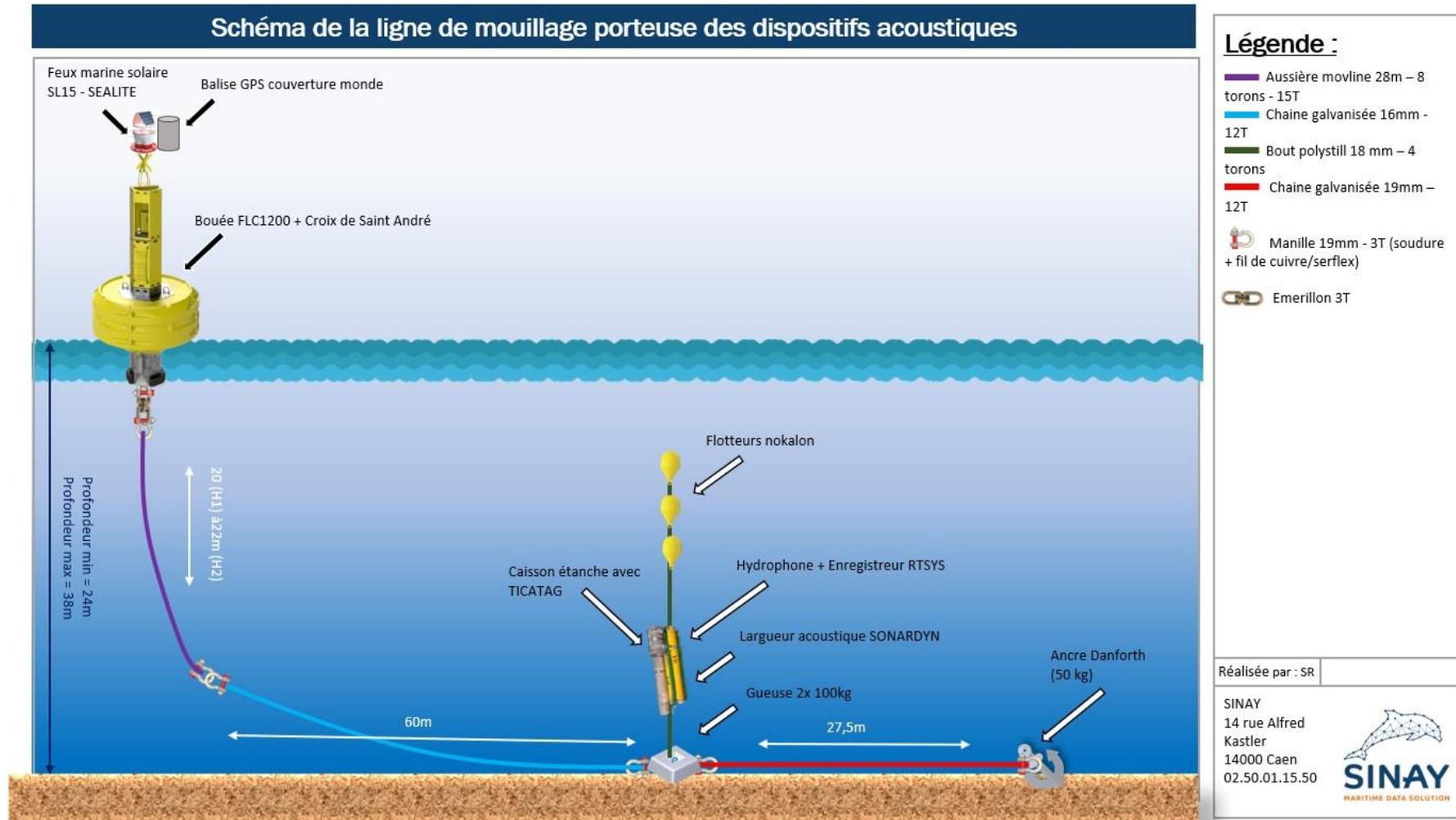


Figure 31 : schéma d'une ligne de mouillage porteuse des appareils acoustiques au cours des suivis acoustiques MSu3a et MSu3b sur le parc éolien de Fécamp.

Les appareils acoustiques immergés (hydrophones, enregistreurs et C-PODs) sont positionnés à 3 m du fond, maintenus en place par un lest de 200 kg équipé d'une ancre de 50 kg. Une ligne de mouillage composée de plusieurs sections d'aussières et de chaînes de différents diamètres relie ce lest à la surface. Une bouée type marque spéciale équipée d'une croix de Saint André et d'un feu intermittent permet de visualiser les appareils et d'en faciliter les opérations de récupération des données. Ce montage présente un grand nombre de protections et gaines afin de minimiser les bruits de chaînes identifiables par les C-PODs comme des clics de Mammifères marins. Le détail des différents éléments constituant la ligne de mouillage est représenté sur la **Figure 31**.

Le choix de ce mode d'implantation des instruments de mesures est justifié par le régime hydrodynamique et sédimentaire de la zone.

10.2.3 Processus de qualité SINAY

Dans le cadre des processus qualité de SINAY, les enregistreurs et les hydrophones sont systématiquement testés et contrôlés avant leur déploiement. Les points de contrôle sont la charge des piles, la mémoire et l'état des cartes SSD, l'étanchéité, la configuration et la qualité des enregistrements.

Les procédures internes de contrôle sont doubles :

- **Étalonnage des hydrophones**

L'étalonnage est nécessaire pour assurer un enregistrement omnidirectionnel et tester la sensibilité de l'hydrophone sur la bande de fréquence indiquée dans la datasheet. Les hydrophones sont envoyés chez le fournisseur afin de produire un rapport de l'état de l'hydrophone et de le recalibrer si nécessaire. Cette étape est réalisée après un an d'utilisation, ou dans le cas où des valeurs aberrantes sont identifiées durant la phase de préparation des campagnes. Lors de la phase de préparation, la chaîne d'acquisition est testée en réalisant des enregistrements en interne avant de finaliser la configuration pour la campagne prévue.

- **Calibration in situ**

La calibration in situ est réalisée avec des émetteurs contrôlés (Lubell 916, pingons, etc..) lors de la mobilisation en mer. Des signaux sont émis à des niveaux contrôlés (niveaux et bandes de fréquences connus) et les mesures sont validées lors de la récupération des enregistreurs après chaque campagne. Cette calibration active permet également de tester la capacité du système (enregistreur avec l'hydrophone) à détecter les signaux des Mammifères marins. Des signaux de sifflement et des clics de Delphinidés sont émis à des distances différentes afin de calibrer les appareils et d'estimer le rayon de détection des Mammifères marins.

10.3 Mesures de suivi du bruit ambiant

10.3.1 Printemps 2022

10.3.1.1 Zone du parc

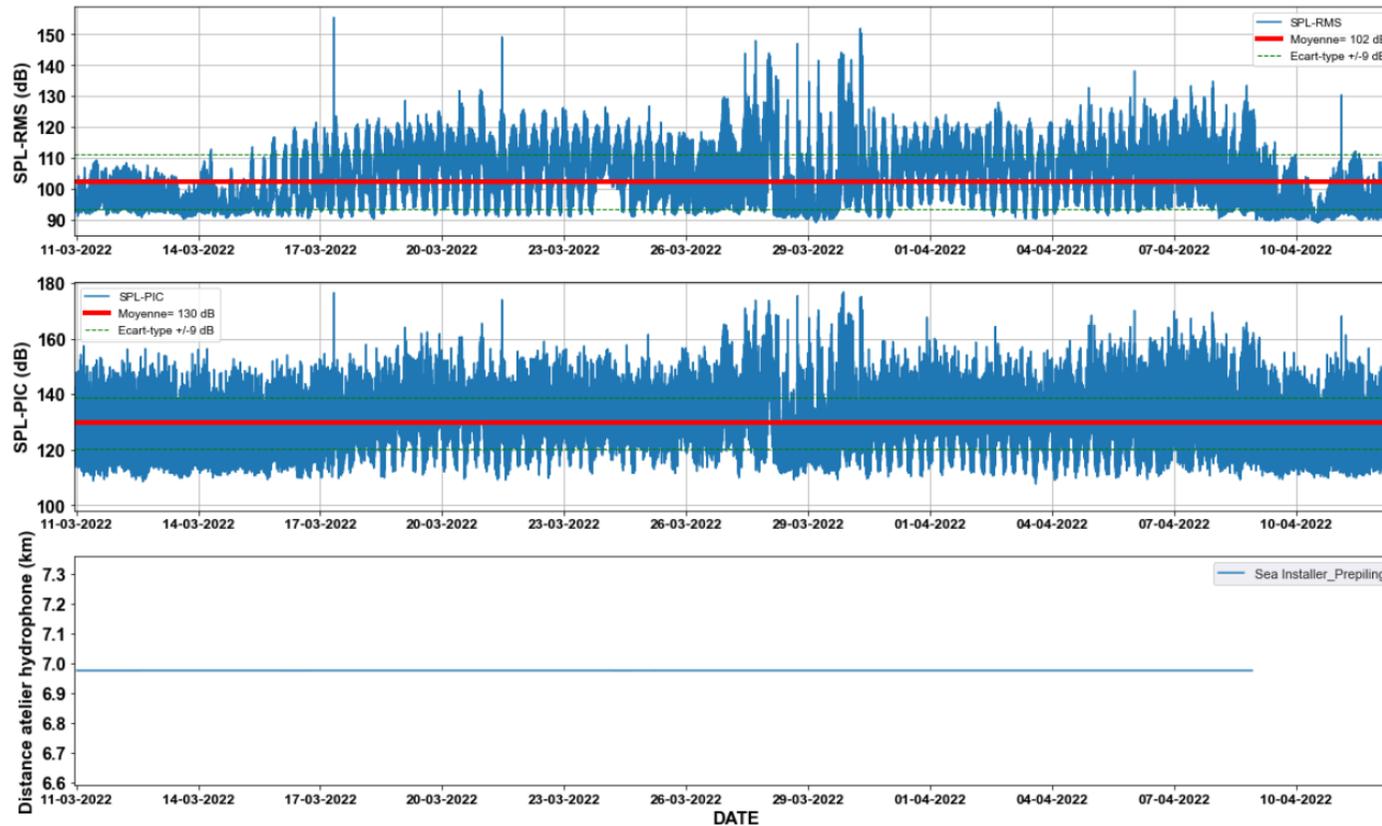


Figure 32 : niveaux SPL-RMS et SPL- PIC (zero to peak) (dB re 1 μ Pa) sur la période d’acquisition calculés dans la zone du parc au point d’enregistrement H2 au printemps 2022 lors du forage des pieux de la sous-station électrique. La distance de navire « Sea Installer » par rapport au point d’enregistrement H2 est également représentée. Cette distance est fixe par rapport au point d’enregistrement H2, le navire de forage n’ayant pas bougé durant les opérations.

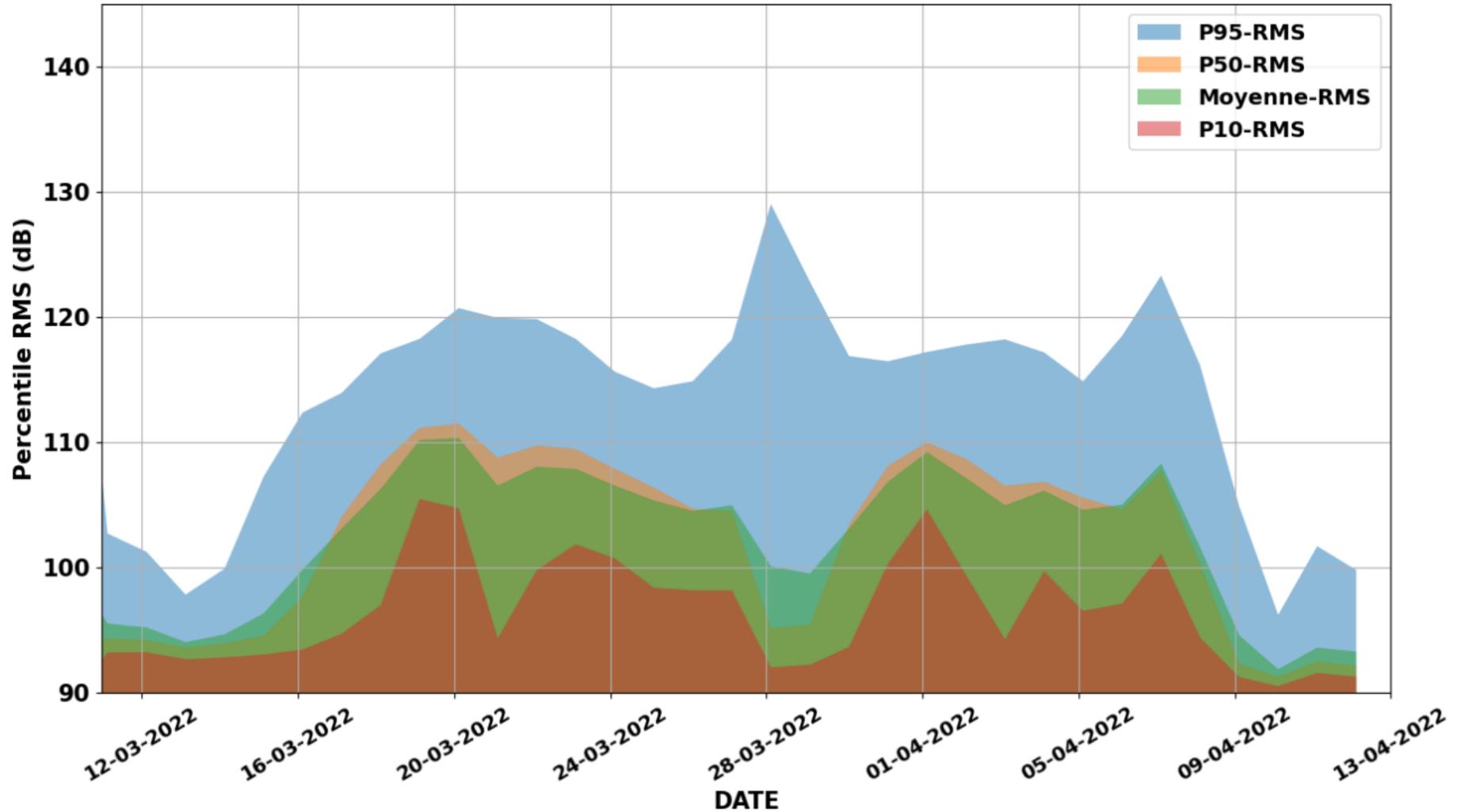


Figure 33 : niveaux SPL-RMS (dB re 1 μ Pa) en percentiles sur la période d'acquisition calculés dans la zone du parc au point d'enregistrement H2 au printemps 2022 lors du forage des pieux de la sous-station électrique.

10.3.1.2 Zone témoin

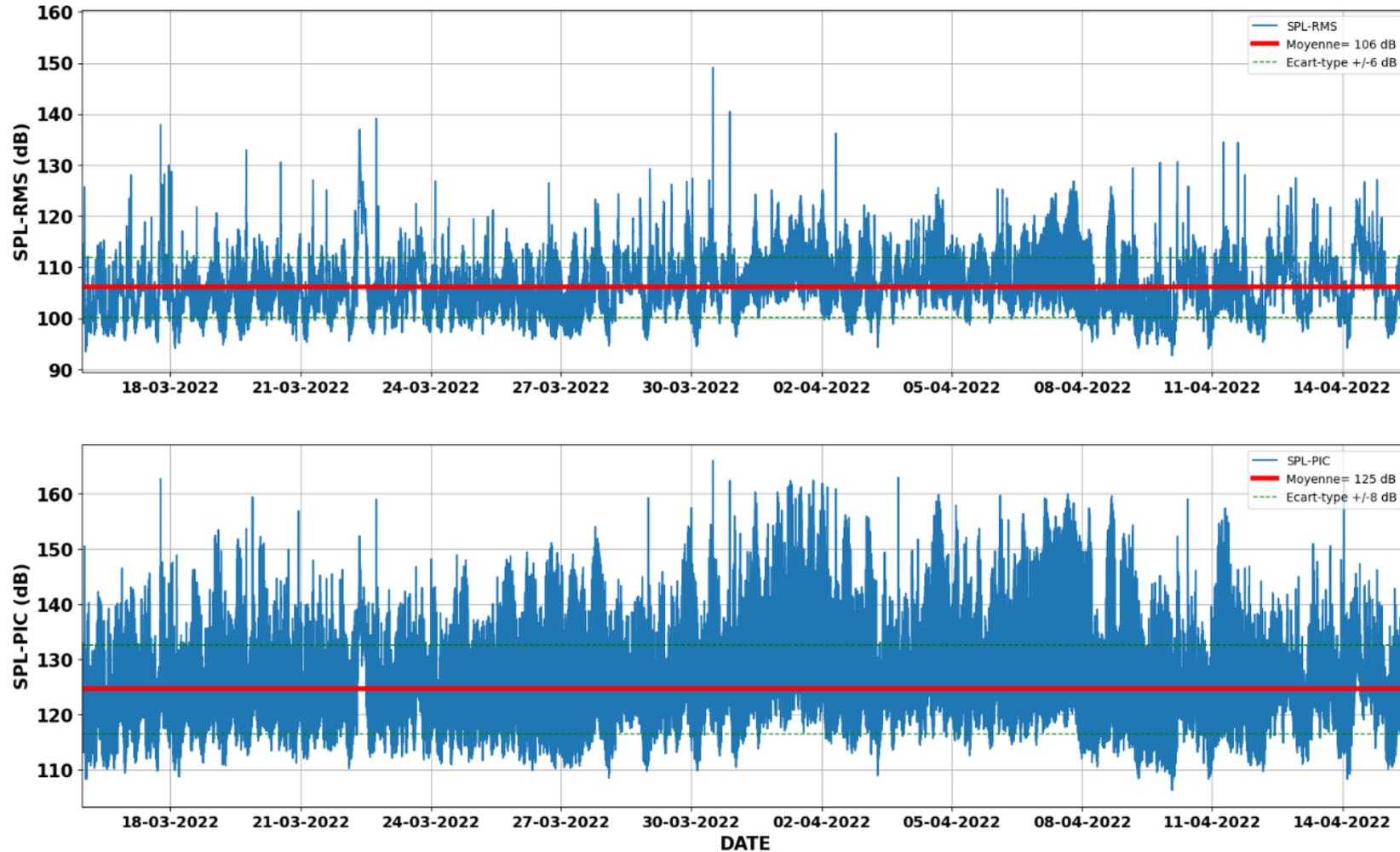


Figure 34 : niveaux SPL-RMS et SPL-PIC (zero-to-peak) (dB re 1 μ Pa) sur la période d'acquisition calculés dans la zone témoin au point d'enregistrement H1 au printemps 2022 lors du forage des pieux de la sous-station électrique.

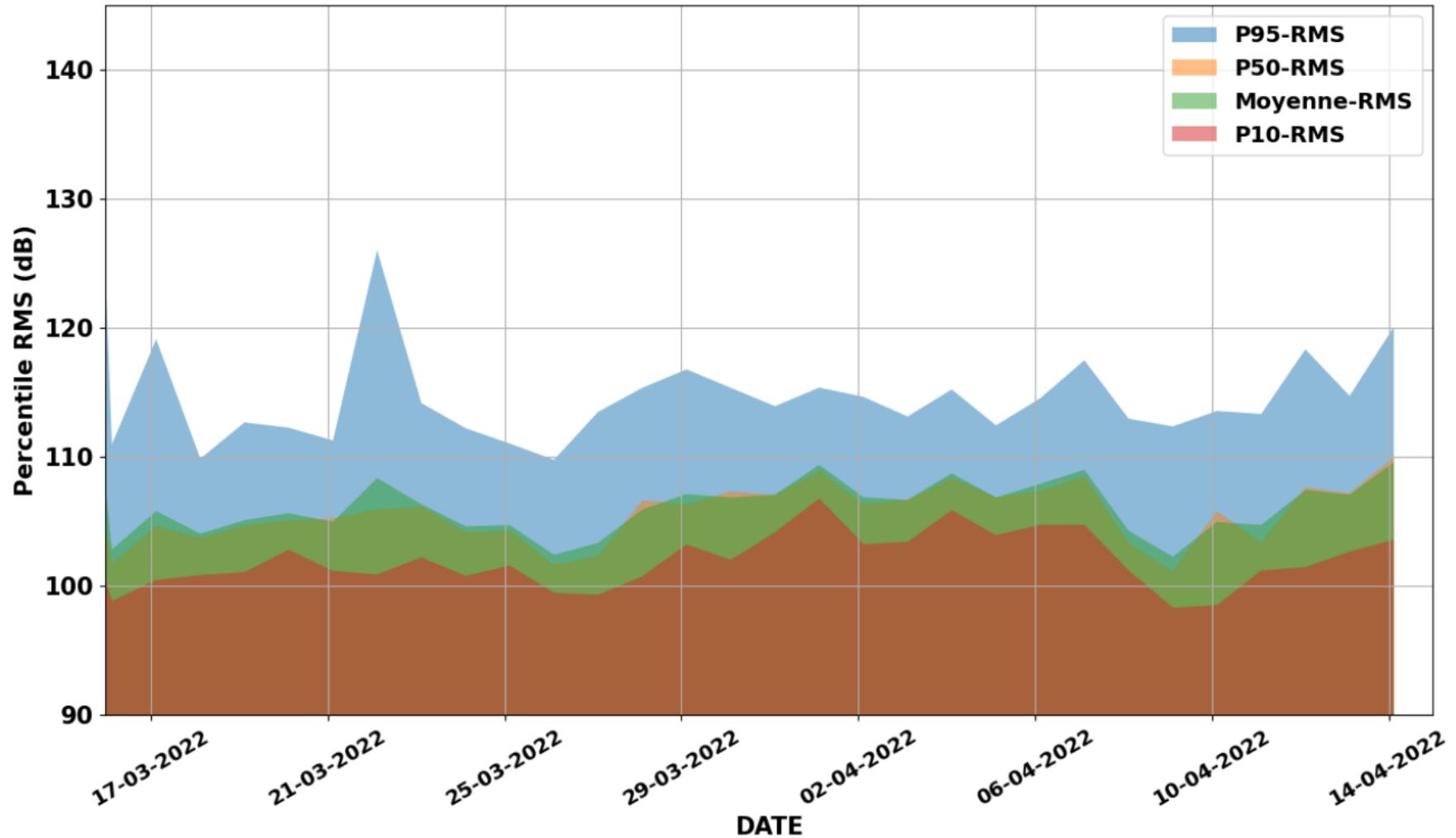


Figure 35 : niveaux SPL-RMS (dB re 1μPa) en percentiles sur la période d’acquisition calculés dans la zone témoin au point d’enregistrement H1 au printemps 2022 lors du forage des pieux de la sous-station électrique.

10.3.1.3 Modélisation de l'atelier de forage des pieux de la sous-station électrique

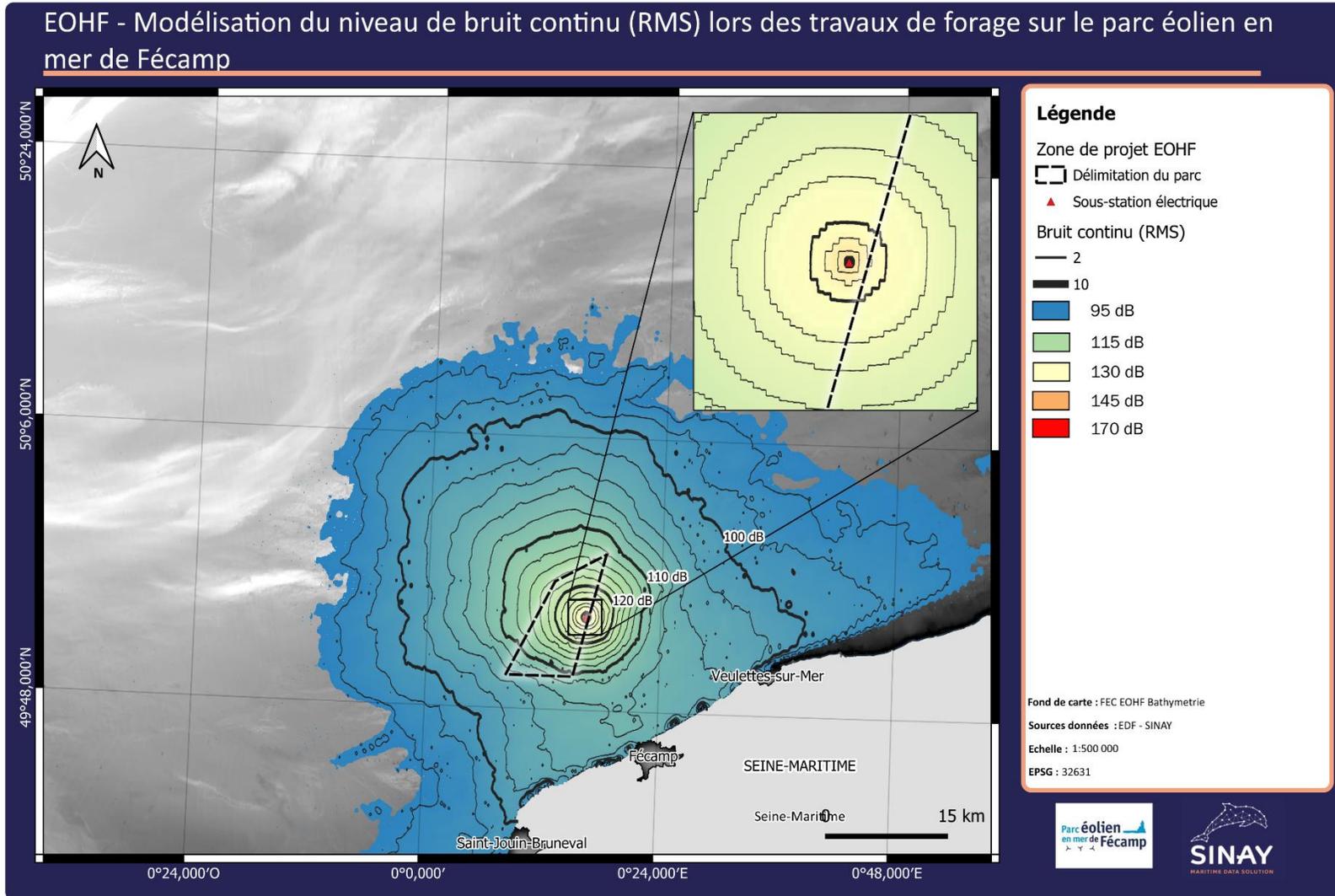


Figure 36 : cartographie des niveaux sonores issus de l'atelier du forage de la sous-station électrique au printemps 2022 (SPL-RMS).

10.3.2 Été 2022

10.3.2.1 Zone du parc

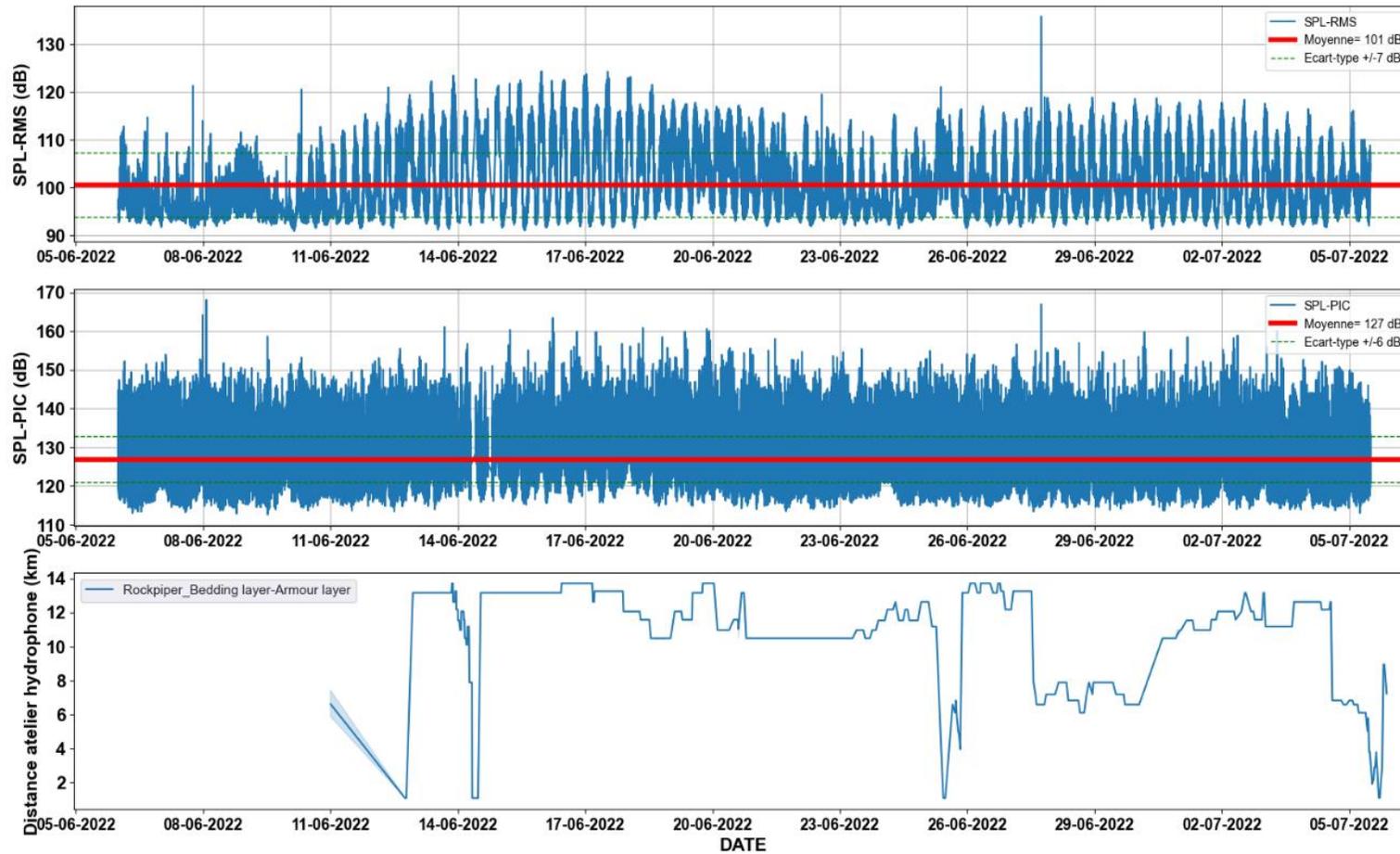


Figure 37 : niveaux SPL-RMS et SPL-PIC (zero-to-peak) (dB re 1 μ Pa) sur la période d’acquisition calculés dans la zone du parc au point d’enregistrement H2 à l’été 2022 lors de la préparation des sols pour les fondations gravitaires. La distance de navire « Rockpiper » par rapport au point d’enregistrement H2 est également représentée.

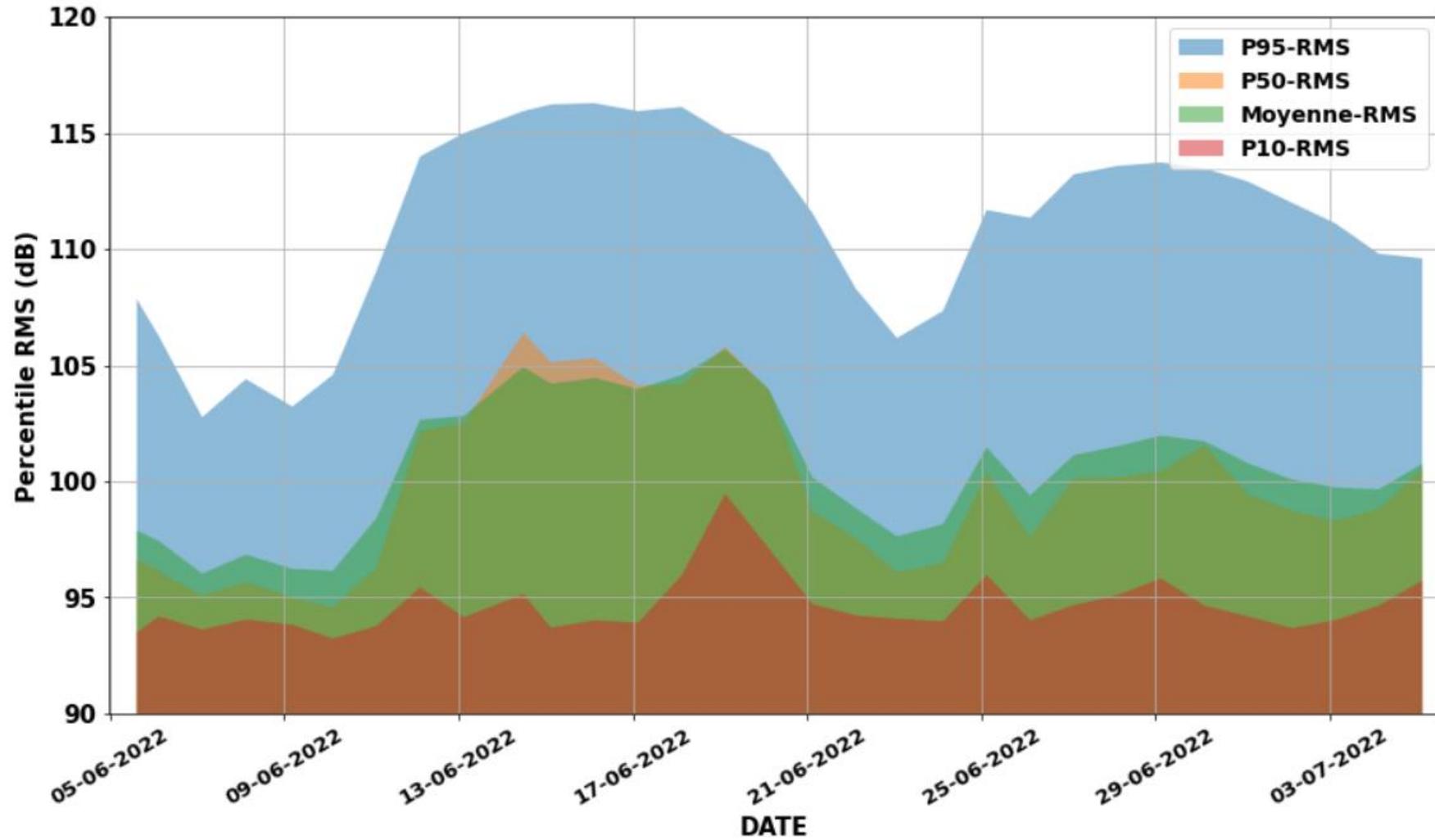


Figure 38 : niveaux SPL-RMS (dB re 1µPa) en percentiles sur la période d'acquisition calculés dans la zone du parc au point d'enregistrement H2 à l'été 2022 lors de la préparation des sols pour les fondations gravitaires.



Figure 39 : niveaux SPL-RMS et SPL-PIC (zero-to-peak) (dB re 1 μ Pa) sur la période d'acquisition calculés dans la zone du parc au point d'enregistrement H2 à l'été 2022 au cours de trois ateliers de travaux. La distance des différents navires de construction par rapport au point d'enregistrement H2 est également représentée. Cette distance au point d'enregistrement varie avec les mouvements des navires par rapport aux opérations à mener.

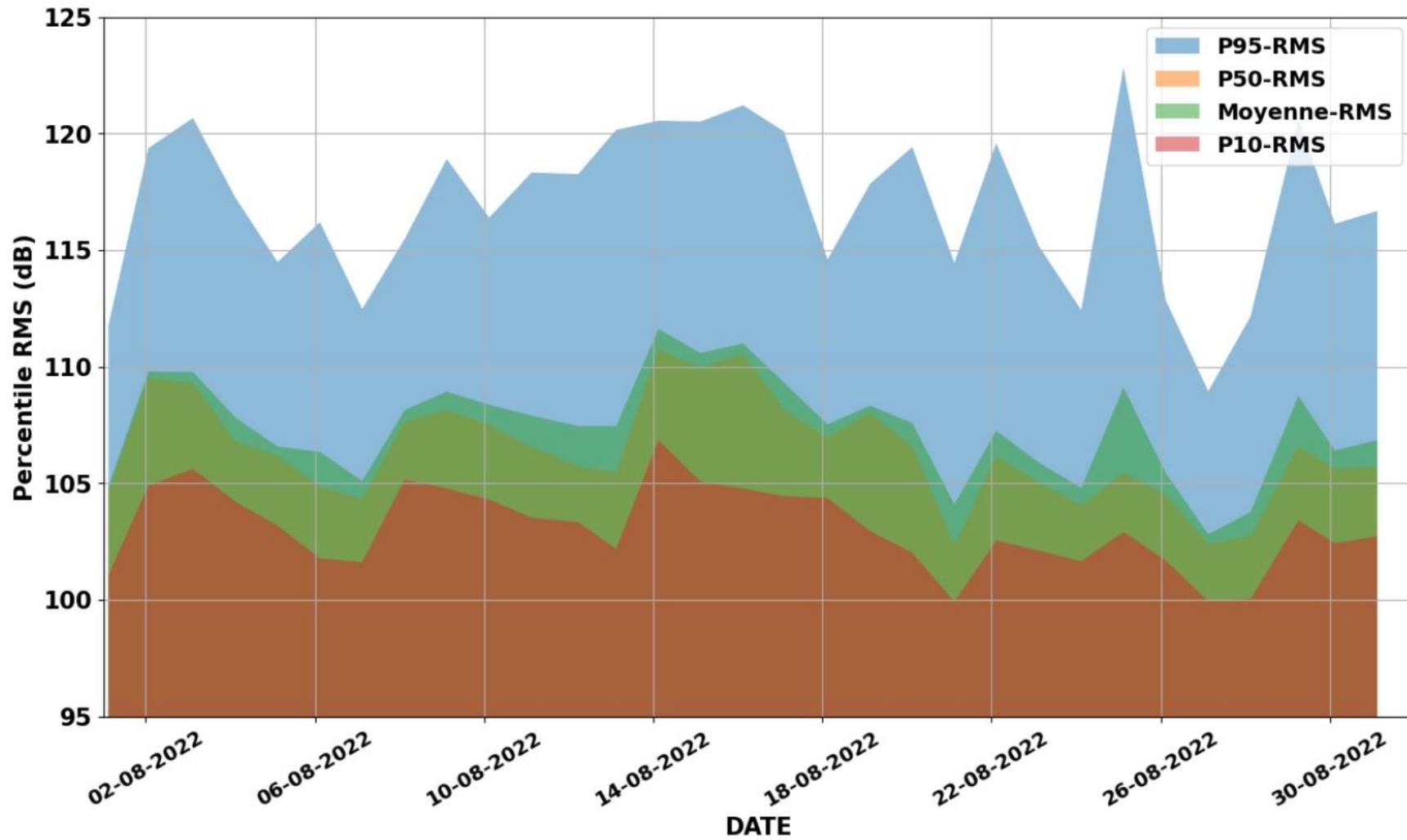


Figure 40 : niveaux SPL-RMS (dB re 1 μ Pa) en percentiles sur la période d'acquisition calculés dans la zone du parc au point d'enregistrement H2 à l'été 2022 au cours de trois ateliers de travaux.

10.3.2.2 Zone témoin

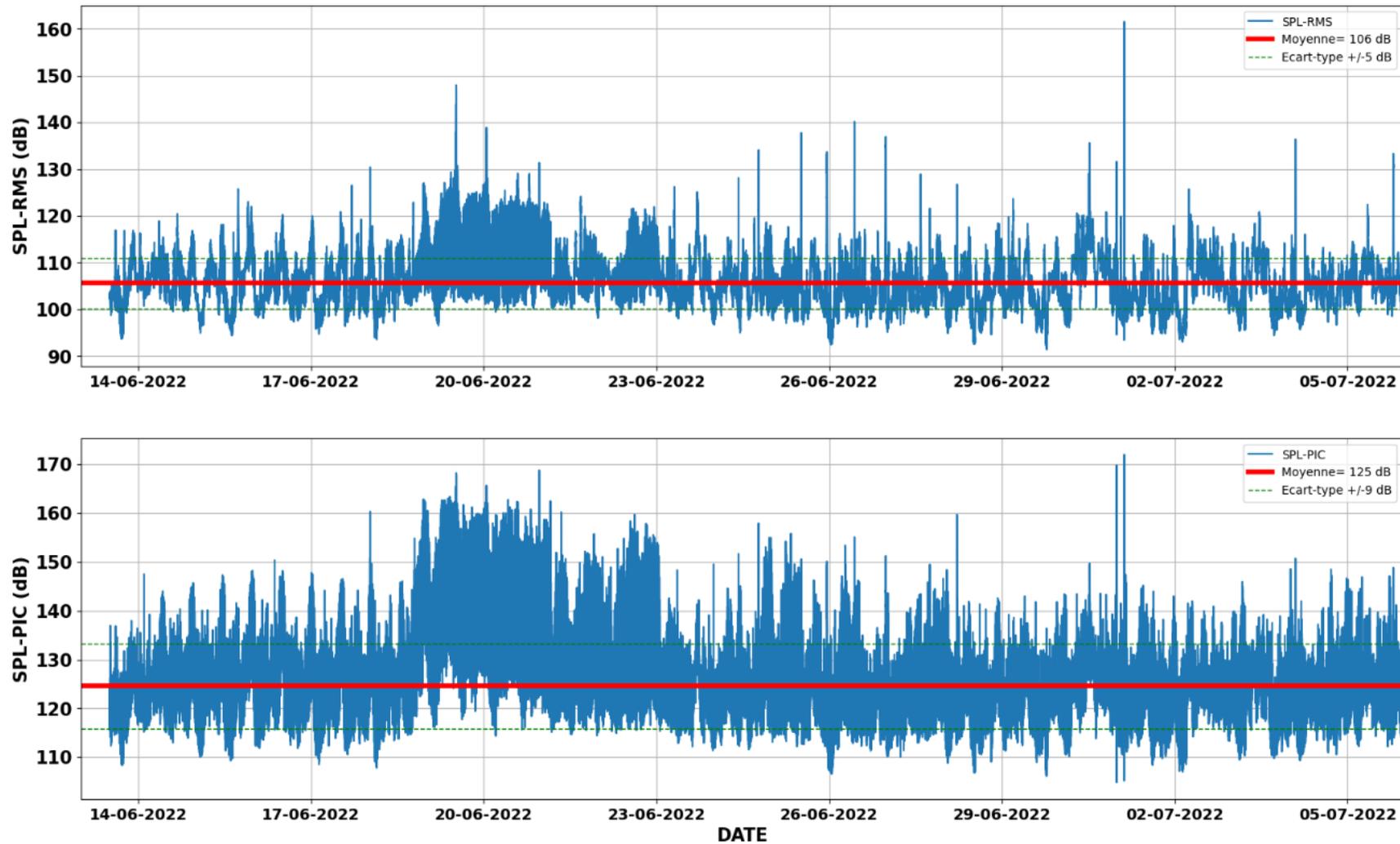


Figure 41 : niveaux SPL-RMS et SPL-PIC (zero-to-peak) (dB re 1 μ Pa) sur la période d'acquisition calculés dans la zone témoin au point d'enregistrement H1 à l'été 2022 lors de la préparation des sols pour les fondations gravitaires.

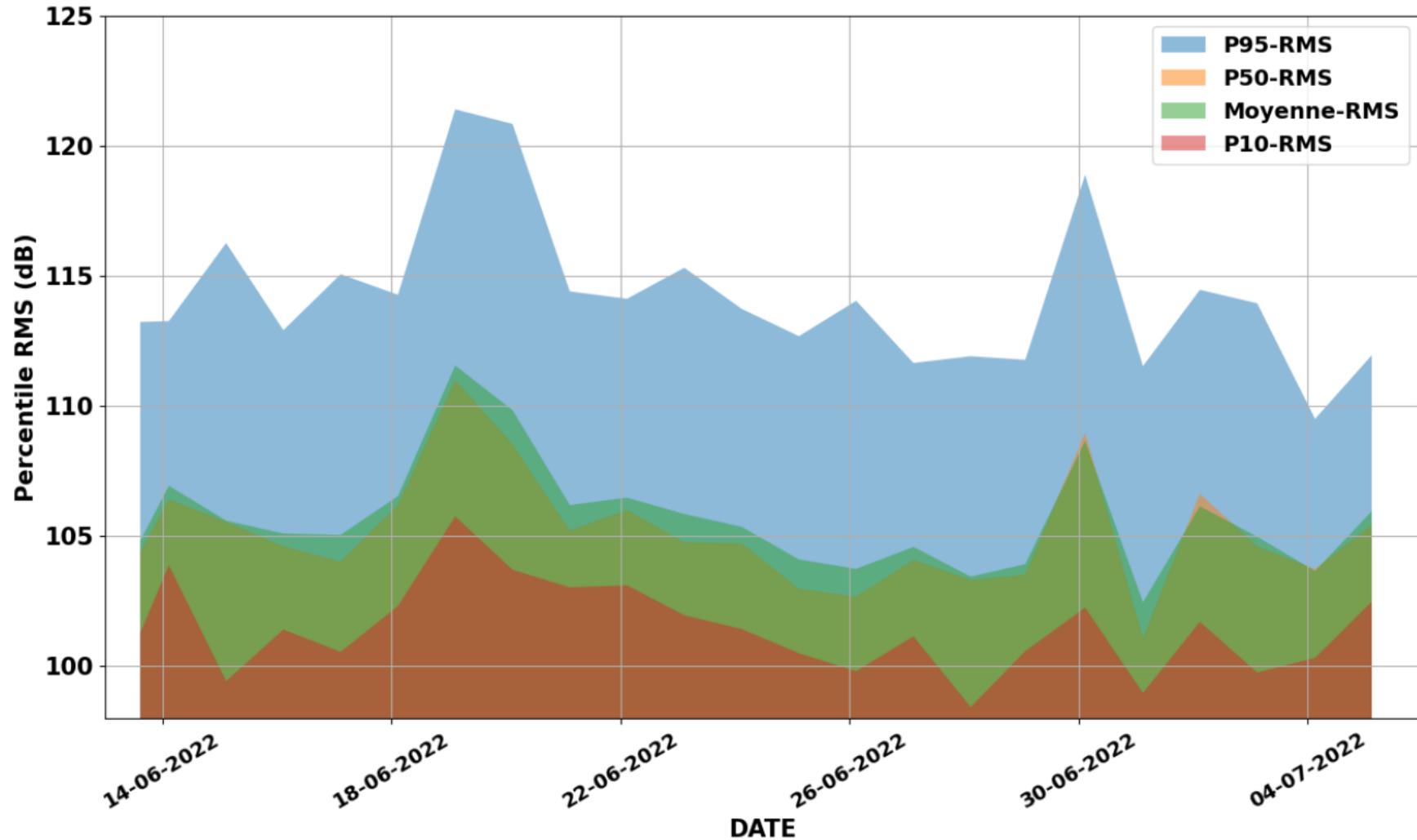


Figure 42 : niveaux SPL-RMS (dB re 1 μ Pa) en percentiles sur la période d’acquisition calculés dans la zone témoin au point d’enregistrement H1 à l’été 2022 lors de la préparation des sols pour les fondations gravitaires.

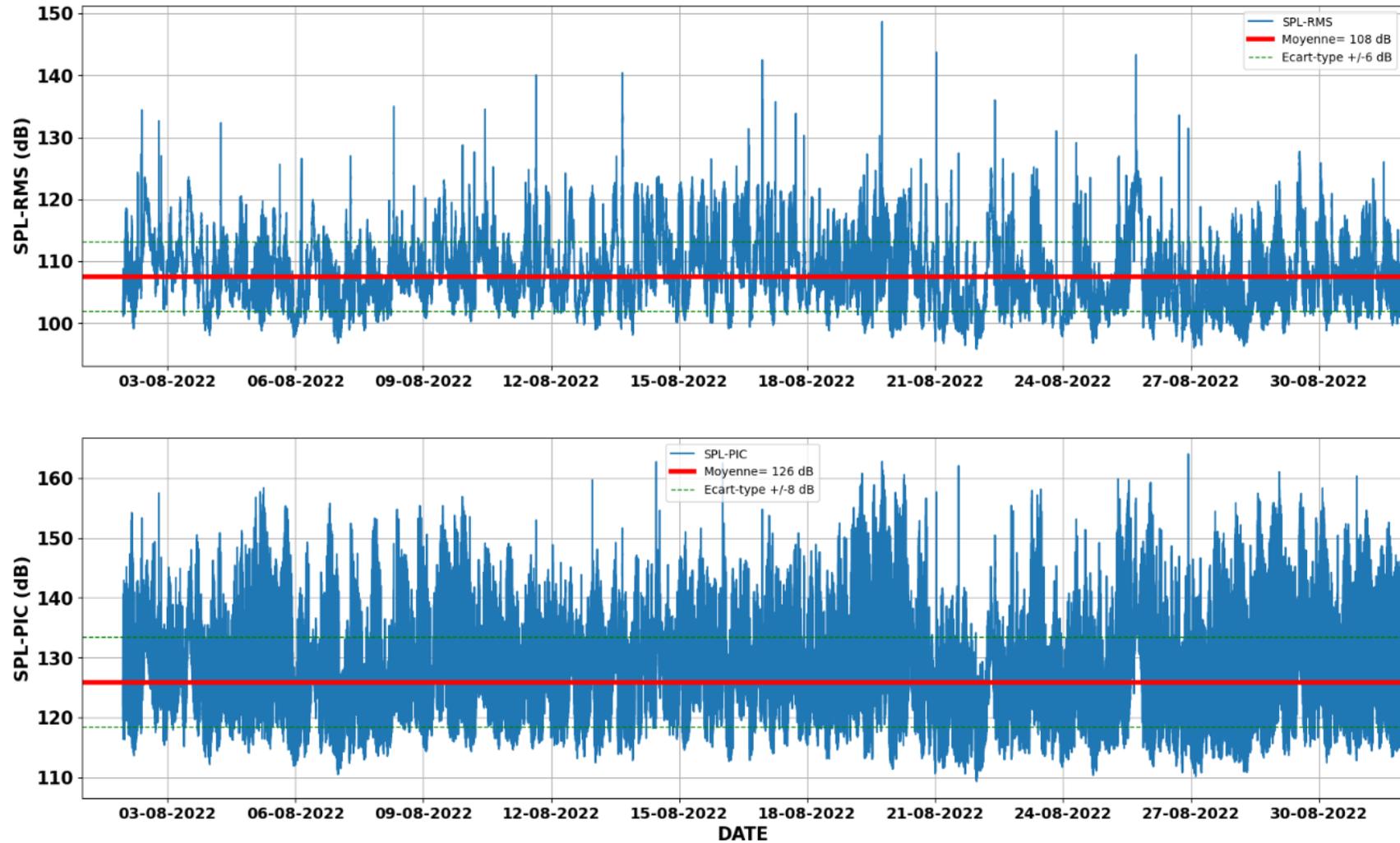


Figure 43 : niveaux SPL-RMS et SPL-PIC (zero-to-peak) (dB re 1 μ Pa) sur la période d'acquisition calculés dans la zone témoin au point d'enregistrement H1 à l'été 2022 au cours de trois ateliers de travaux.

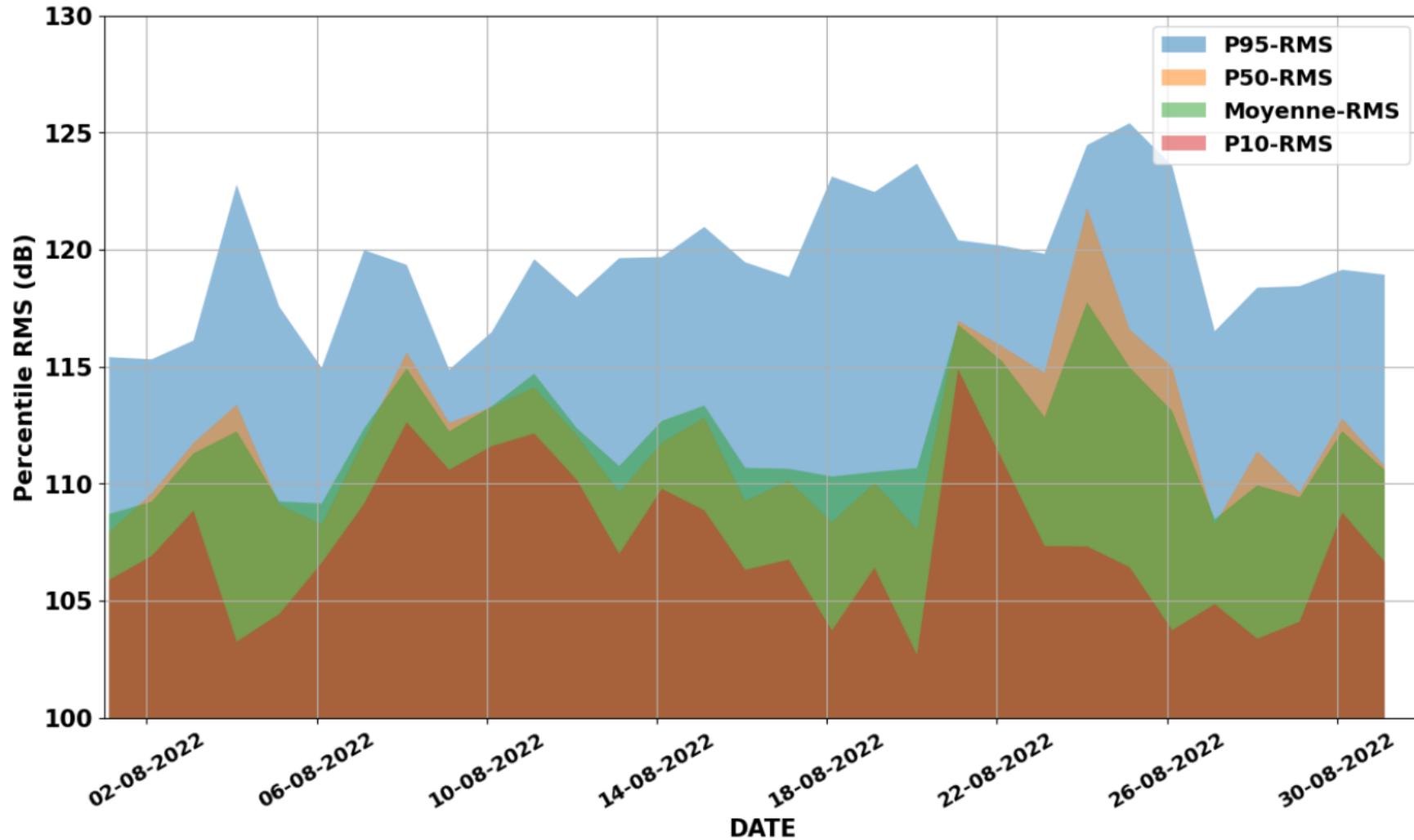


Figure 44 : niveaux SPL-RMS (dB re 1µPa) en percentiles sur la période d'acquisition calculés dans la zone témoin au point d'enregistrement H1 à l'été 2022 au cours de trois ateliers de travaux.

10.3.3 Automne 2022

10.3.3.1 Zone du parc

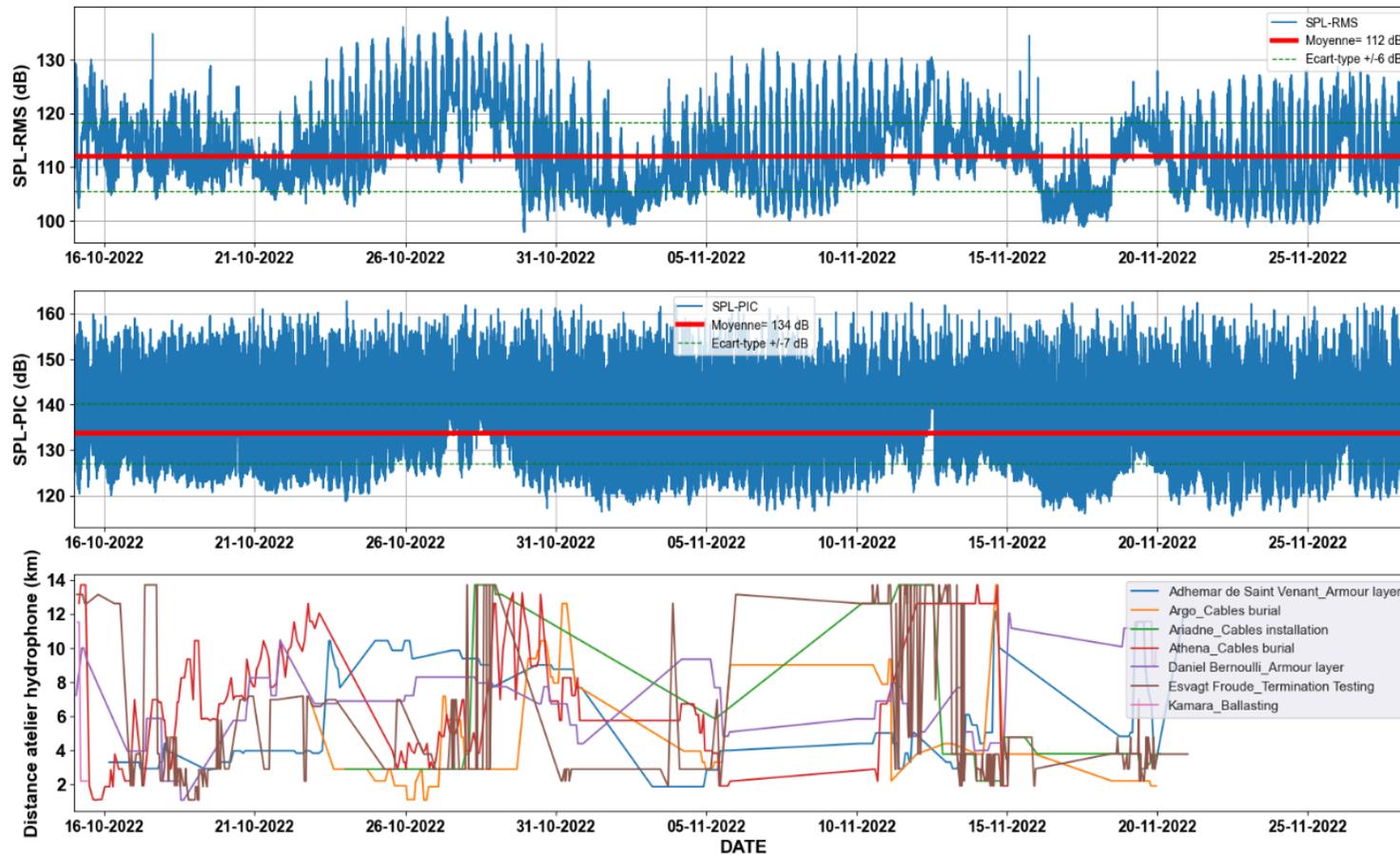


Figure 45 : niveaux SPL-RMS et SPL-PIC (zero-to-peak) (dB re 1µPa) sur la période d’acquisition calculés dans la zone du parc au point d’enregistrement H2 à l’automne 2022 au cours de deux ateliers de travaux. La distance des différents navires de construction par rapport au point d’enregistrement H2 est également représentée. Cette distance au point d’enregistrement varie avec les mouvements des navires par rapport aux opérations à mener.

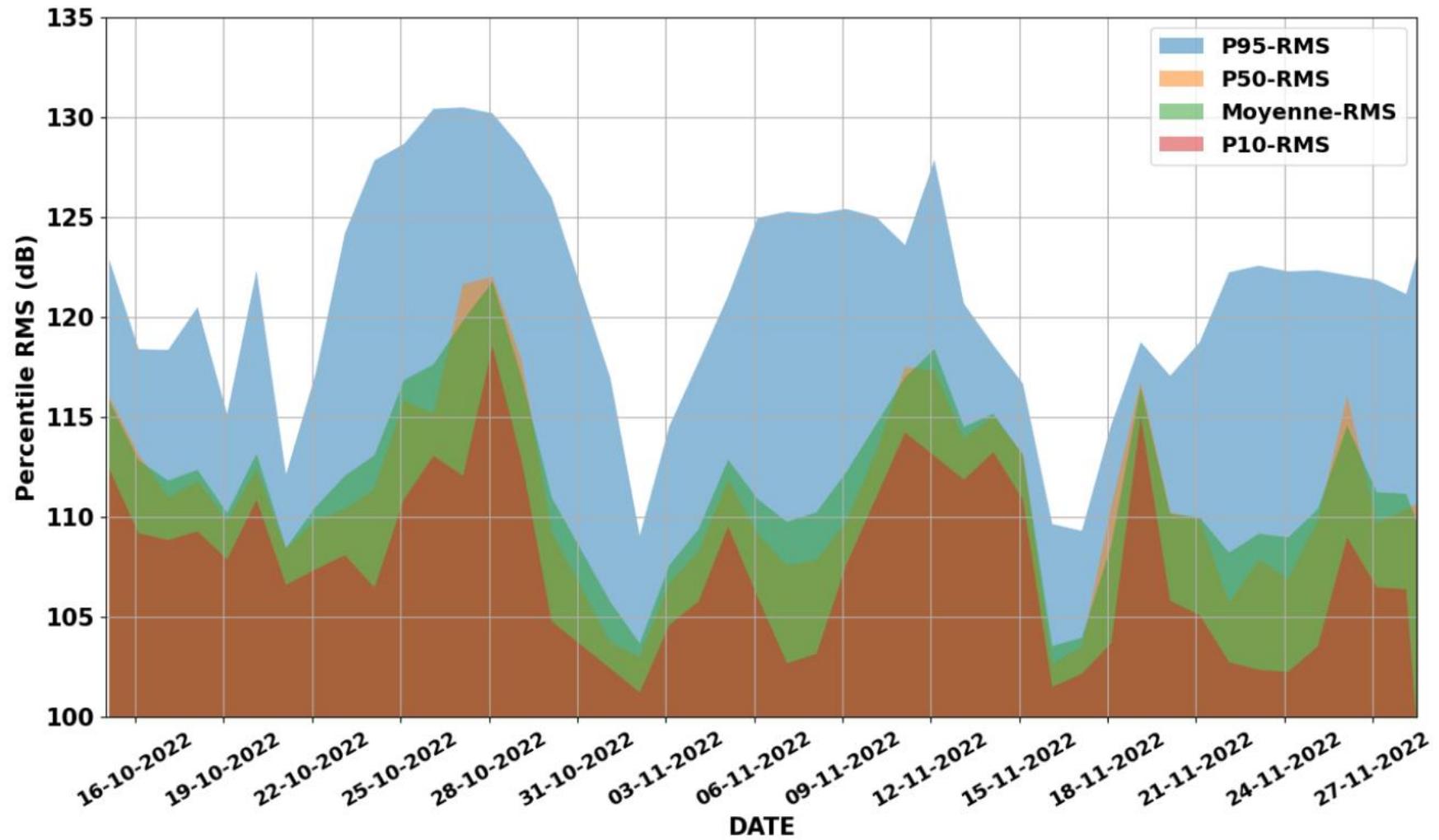


Figure 46 : niveaux SPL-RMS (dB re 1 μ Pa) en percentiles sur la période d'acquisition calculés dans la zone du parc au point d'enregistrement H2 à l'automne 2022 au cours de deux ateliers de travaux.

10.3.3.2 Zone témoin

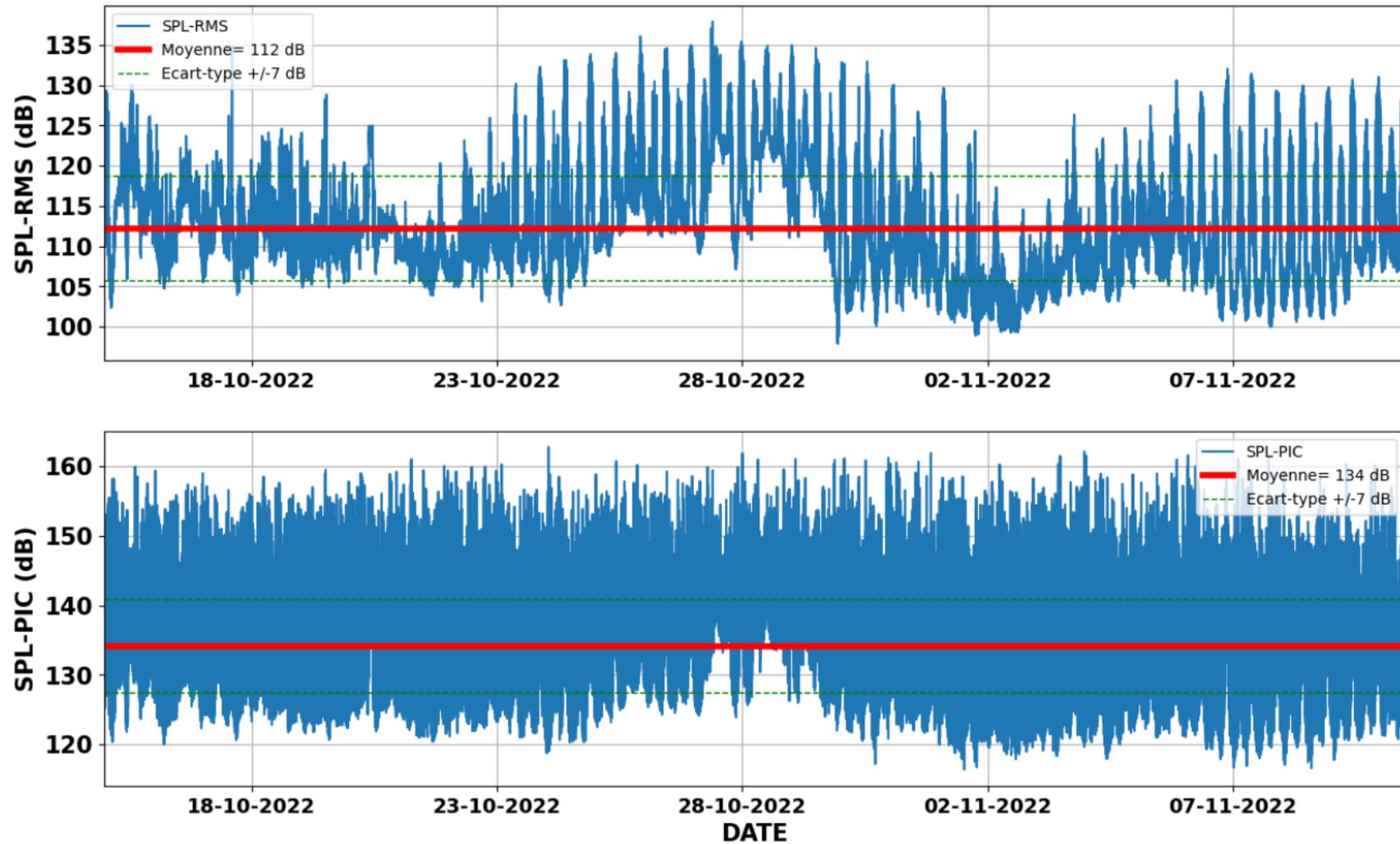


Figure 47 : niveaux SPL-RMS et SPL-PIC (zero-to-peak) (dB re 1 μ Pa) sur la période d’acquisition calculés dans la zone témoin au point d’enregistrement H1 à l’automne 2022 au cours de deux ateliers de travaux.

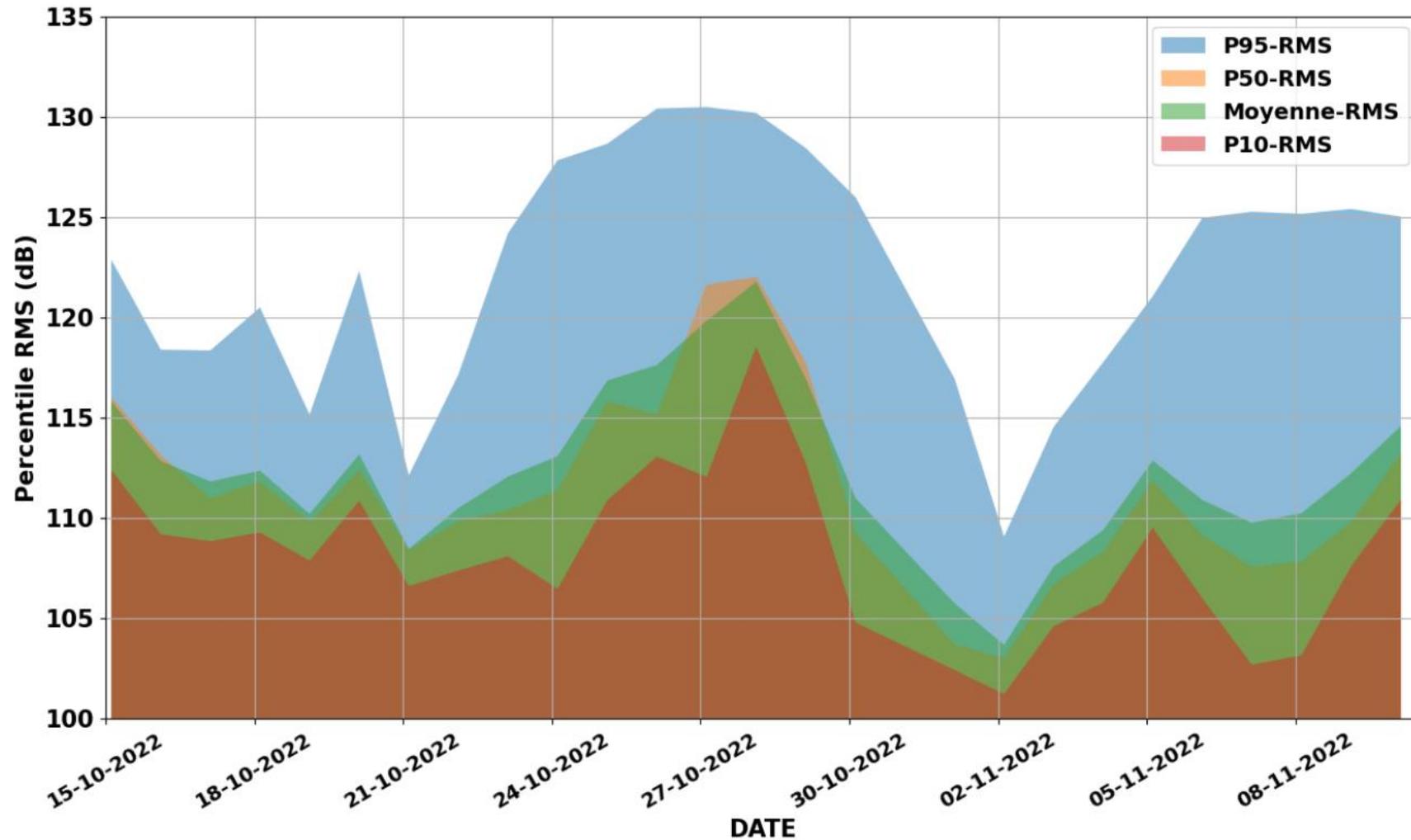


Figure 48 : niveaux SPL-RMS (dB re 1 μ Pa) en percentiles sur la période d'acquisition calculés dans la zone témoin au point d'enregistrement H1 à l'automne 2022 au cours de deux ateliers de travaux.

10.3.4 Été 2023

10.3.4.1 Zone du parc

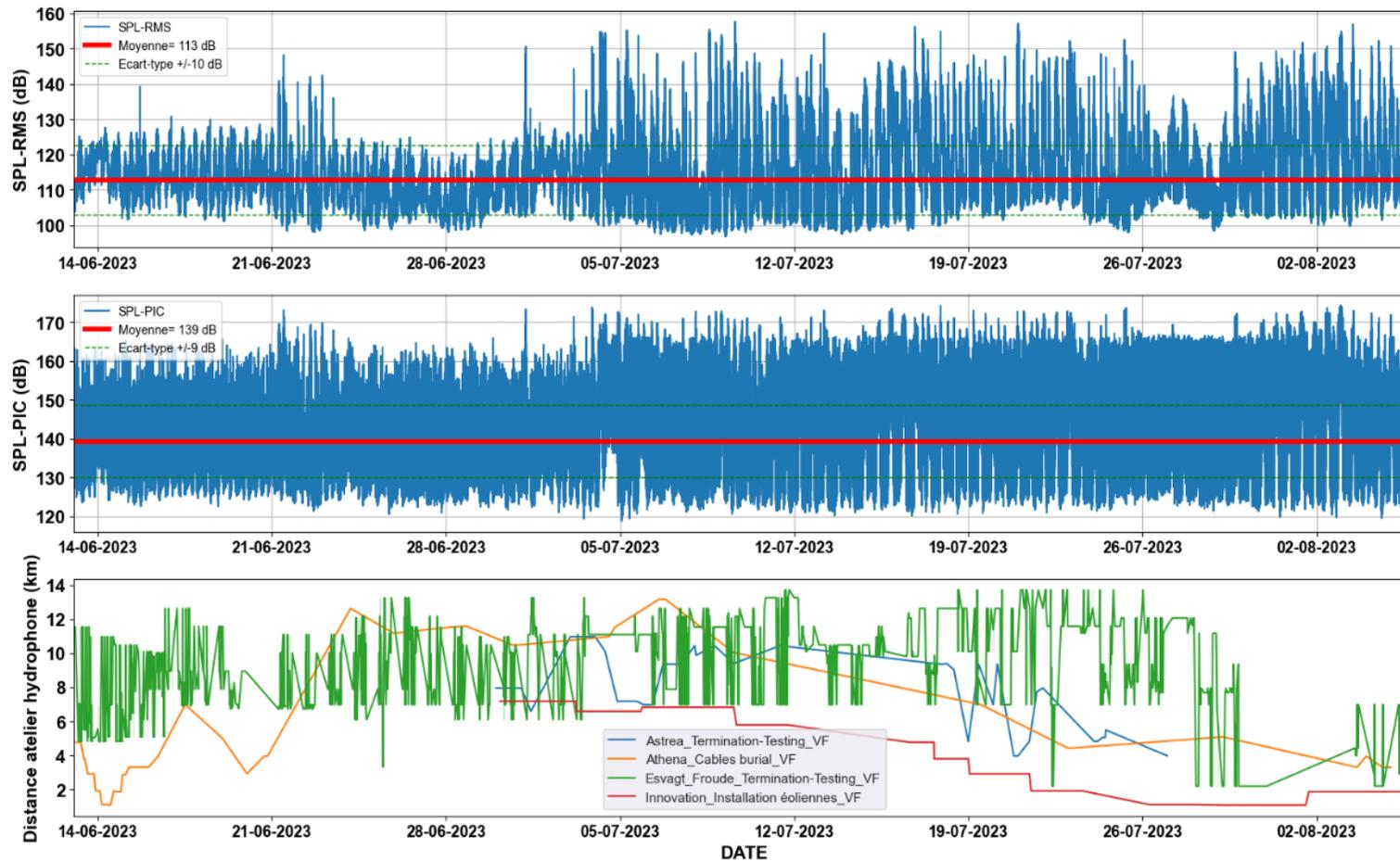


Figure 49 : niveaux SPL-RMS et SPL-PIC (zero-to-pick) (dB re 1 μ Pa) sur la période d’acquisition calculés dans la zone du parc au point d’enregistrement H2 à l’été 2023 au cours de l’installation des premières éoliennes. La distance des différents navires de construction par rapport au point d’enregistrement H2 est également représentée. Cette distance au point d’enregistrement varie avec les mouvements des navires par rapport aux opérations à mener.

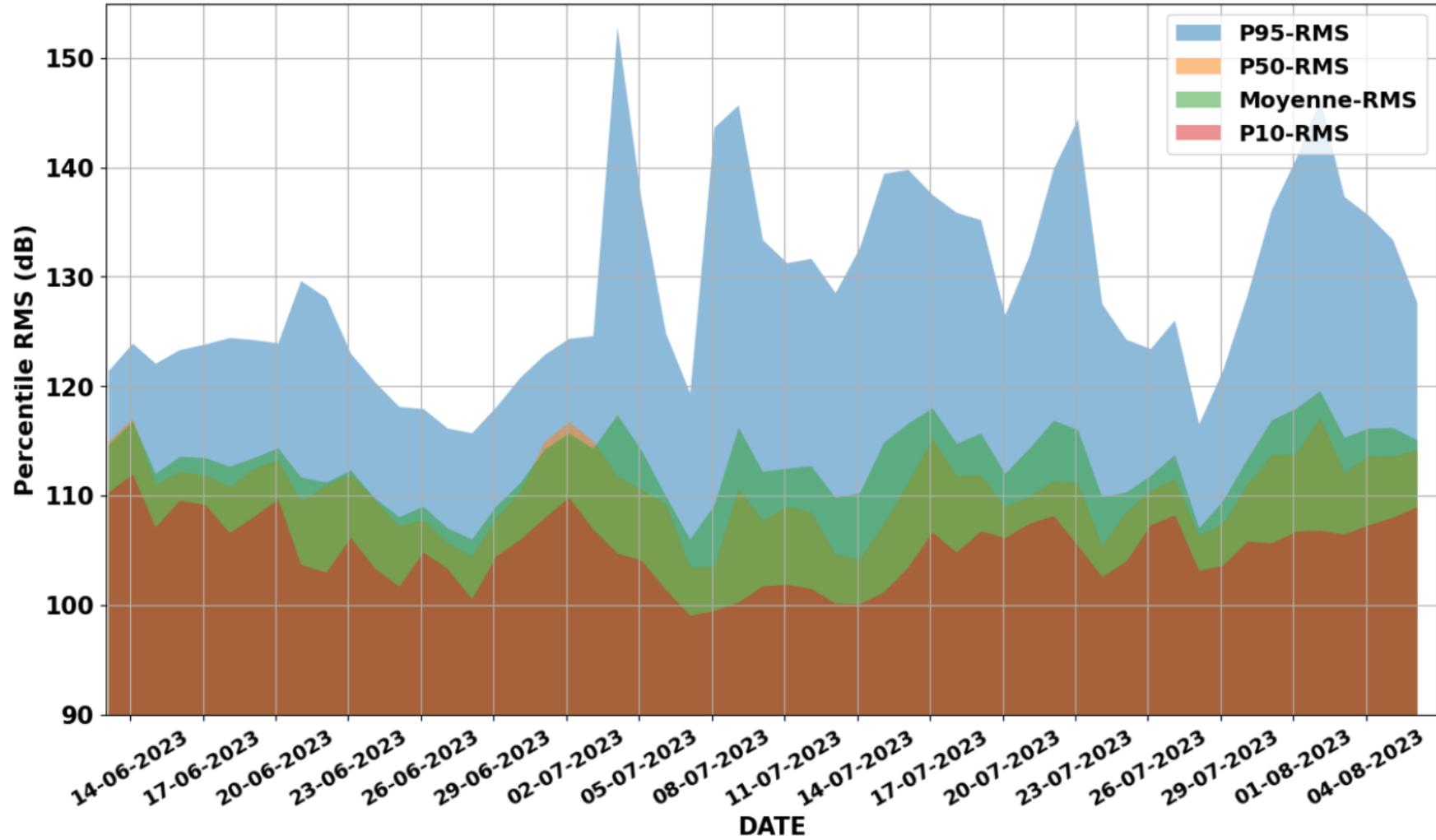


Figure 50 : niveaux SPL-RMS (dB re 1 μ Pa) en percentiles sur la période d'acquisition calculés dans la zone du parc au point d'enregistrement H2 à l'été 2023 au cours de l'installation des premières éoliennes.

10.3.4.2 Zone témoin

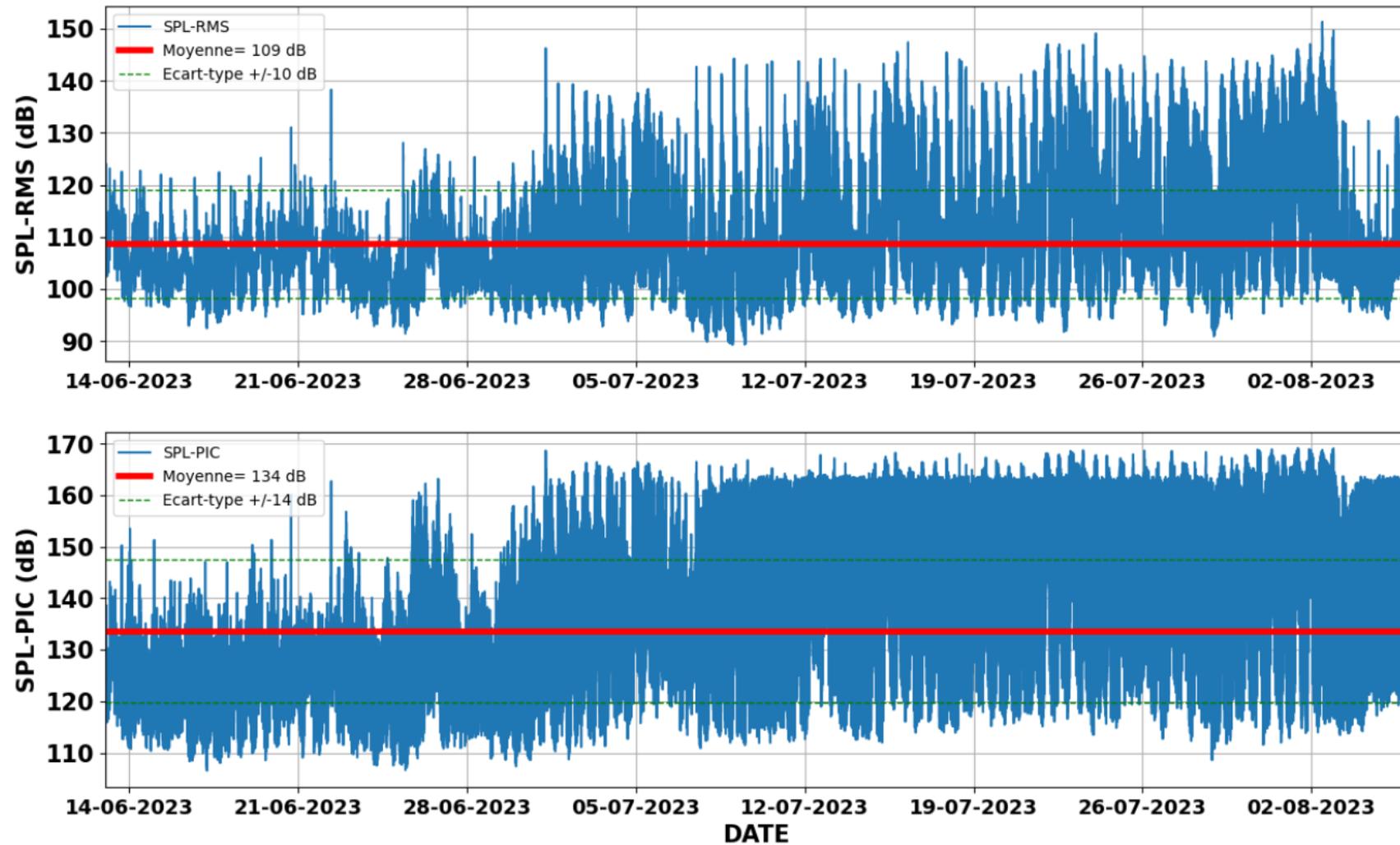


Figure 51 : niveaux SPL-RMS et SPL-PIC (zero-to-pick) (dB re 1 μ Pa) sur la période d'acquisition calculés dans la zone témoin au point d'enregistrement H1 à l'été 2023 au cours de l'installation des premières éoliennes.

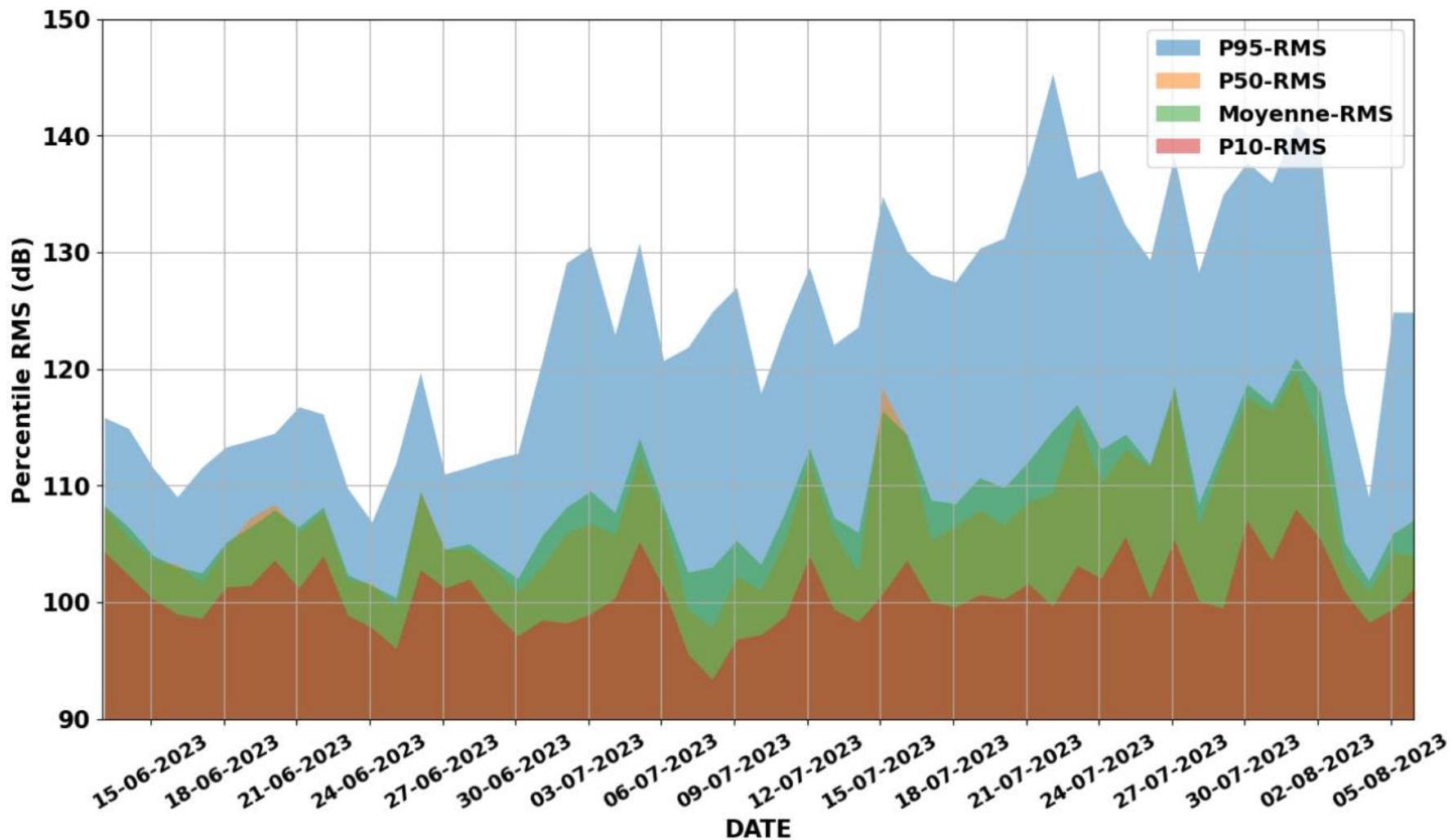


Figure 52 : niveaux SPL-RMS (dB re 1µPa) en percentiles sur la période d'acquisition calculés dans la zone témoin au point d'enregistrement H1 à l'été 2023 au cours de l'installation des premières éoliennes.

10.4 Mesures de suivi de la fréquentation des Mammifères marins

10.4.1 Suivi de la fréquentation des Mammifères marins en phase de construction

Tableau 37 : présentation du nombre de jours d'enregistrement acquis en fonction des ateliers de travaux au cours des campagnes de suivi des Mammifères marins MSu3b de mars 2022 à novembre 2022 à de juin 2023 à août 2023.

Atelier de travaux	Saison Mois	Nombre de jours d'enregistrement par point d'enregistrement			Somme des jours échantillonnés
		C1	C2	C3	
Forage des pieux de la sous-station électrique	Printemps 2022	83	-	48	131
Préparation des sols pour les fondations	Été 2022	92	59	59	210
Mise en place de la fondation jacket et du topside de la sous-station électrique					
Mise en place des fondations gravitaires (en 2 temps)					
Ballastage	Automne 2022	91	90	50	231
Mise en place des enrochements de protection					
Mise en place des câbles inter-éoliennes					
Total 2022		266	149	157	572
Installation des éoliennes	Été 2023	-	-	50	50
	Total 2023	-	-	50	50
	Totaux (2022 + 2023)	266	149	207	622

10.4.2 Comparaison avec l'état de référence

10.4.2.1 Suivi de la fréquentation des Mammifères marins

Le **Tableau 38** présente la somme des détections journalières des Delphinidés et du Marsouin commun enregistrées en fonction des saisons et des années au cours de l'état de référence (2019-2021) et en phase de construction (2022-2023) sur l'ensemble de la zone d'étude.

Tableau 38 : sommes des détections journalières (DPM/jours) associées au Marsouin commun et aux Delphinidés au cours du suivi de l'état de référence et en phase de construction en fonction des saisons et des années sur l'ensemble de la zone d'étude (zone du parc et zone témoin).

Période Année Saison	Sommes des DPM journaliers		Total général (DPM)	Total jours échantillonnés
	Delphinidés	Marsouin commun		
TOTAL Etat de référence	1 158	9 806	10 964	925
2019	24	348	372	277
Printemps	19	219	238	130
Été	5	48	53	74

<i>Automne</i>	0	81	81	73
2020	745	4 784	5 529	471
<i>Hiver</i>	650	1 377	2 027	205
<i>Printemps</i>	0	2 693	2 693	239
<i>Automne</i>	95	714	809	27
2021	314	4 006	4 320	177
<i>Hiver</i>	314	4 006	4 320	177
TOTAL Phase de construction	4 470	15 453	19 923	594
2022	2 678	15 384	18 062	572
<i>Printemps</i>	2 225	9 193	11 418	131
<i>Été</i>	151	2 204	2 355	210
<i>Automne</i>	302	3 987	4 289	231
2023	1 792	69	1 861	22
<i>Été</i>	1 792	69	1 861	22
TOTAL état de référence + phase construction	5 553	24 591	30 144	1 519

- **Variabilité spatiale**

Le **Tableau 39** présente la somme des détections mensuelles du Marsouin commun enregistrées en fonction des saisons et des années au cours de l'état de référence (2019-2021) et en phase de construction (2022-2023) aux points d'enregistrement C1, C2 et C3.

Tableau 39 : sommes des détections mensuelles (DPM/mois) associées au Marsouin commun au cours du suivi de l'état de référence et en phase de construction en fonction des saisons et des années) aux points d'enregistrement C1, C2 et C3.

Phase Année Saison	Somme des DPM mensuels par point d'enregistrement			Total général (DPM)
	C1	C2	C3	
TOTAL Etat de référence	3 069	4 023	2 714	9 806
2019	71	100	177	348
<i>Printemps</i>	69	-	150	219
<i>Été</i>	2	19	27	48
<i>Automne</i>	-	81	-	81
2020	1 387	2 140	1 257	4 784
<i>Printemps</i>	396	1 426	871	2 693
<i>Automne</i>	687	20	7	714
<i>Hiver</i>	304	694	379	1 377
2021	1 611	1 783	1 280	4 676
<i>Printemps</i>	478	120	70	668
<i>Hiver</i>	1 133	1 663	1 210	4 006
TOTAL Phase de construction	2 939	3 433	9 081	15 453
2022	2 939	3 433	9 012	15 384

<i>Printemps</i>	1 232	-	7 931	9 193
<i>Été</i>	947	480	777	2 204
<i>Automne</i>	760	2 953	274	3 987
2023	-	-	69	69
<i>Été</i>	-	-	69	69
TOTAL état de référence + construction	6 008	7 456	11 795	25 259

Le **Tableau 40** présente la somme des détections mensuelles des Delphinidés enregistrées en fonction des saisons et des années au cours de l'état de référence (2019-2021) et en phase de construction (2022-2023) aux points d'enregistrement C1, C2 et C3.

Tableau 40 : sommes des détections mensuelles (DPM/mois) associées aux Delphinidés au cours du suivi de l'état de référence et en phase de construction en fonction des saisons et des années) aux points d'enregistrement C1, C2 et C3.

Phase Année Saison	Somme des DPM mensuels par point d'enregistrement			Total général (DPM)
	C1	C2	C3	
TOTAL Etat de référence	761	109	288	1158
2019	5	0	19	24
<i>Printemps</i>	5	-	14	19
<i>Été</i>	0	0	5	5
<i>Automne</i>	-	0	-	0
2020	551	27	167	745
<i>Automne</i>	92	3	0	95
<i>Hiver</i>	459	24	167	650
2021	163	53	98	314
<i>Hiver</i>	163	53	98	314
TOTAL Phase travaux	649	0	3 821	4 470
2022	649	0	2 029	2 678
<i>Printemps</i>	196	-	2 029	2 225
<i>Été</i>	151	0	0	151
<i>Automne</i>	302	0	0	302
2023	-	-	1 792	1 792
<i>Été</i>	-	-	1792	1792
TOTAL Etat de référence + Phase travaux	1 410	109	4 109	5 628

10.4.2.2 Évolution de la fréquentation entre l'état de référence et la phase de construction

Le **Tableau 41** présente la moyenne des DPM journaliers et l'écart-type associé pour le Marsouin commun et les Delphinidés par saison sur la période d'acquisition de 2019 à 2023 en fonction de la localisation (zone du parc et zone témoin).

Tableau 41 : moyennes et écarts-types des détections journalières (DPM/jours) des Delphinidés et du Marsouin commun au cours du suivi à l'état de référence (2019-2021) et en phase de construction (2022-2023) en fonction des saisons.

Phases	Saison	DPM journaliers	
		Delphinidés	Marsouin commun
Etat de référence	Printemps 2019	0,15 ± 1	1,68 ± 2,49
	Été 2019	0,07 ± 0,48	0,65 ± 1,33
	Automne 2019	0 ± 0	1,11 ± 1,97
	Automne 2020	3,52 ± 7,82	26,44 ± 57,13
	Hiver 2020	6,99 ± 28,44	6,72 ± 9,9
	Hiver 2021	1,77 ± 3,66	22,63 ± 20,63
	Printemps 2021	3 ± 5,21	26,72 ± 31
Phase des travaux	Printemps 2022	16,98 ± 64,85	70,18 ± 215,89
	Été 2022	0,72 ± 10,42	12,39 ± 31,84
	Automne 2022	1,31 ± 19,87	15,54 ± 84,94
	Été 2023	81,45 ± 30,59	3,14 ± 8,29

Les moyennes des détections saisonnières associées au Marsouin commun varient entre 0,65 DPM/jour et 70,18 DPM/jour. Les saisons associées à l'automne 2020, au printemps 2022 et à l'automne 2022 présentent les moyennes les plus élevés. Les moyennes des détections saisonnières associées aux Delphinidés varient entre 0,07 DPM/jour et 16,98 DPM/jour. L'été 2023 se démarque avec la moyenne saisonnière la plus élevée, atteignant 81,45 DPM/jour.

Afin de déterminer si des différences significatives existent dans l'activité bioacoustique du Marsouin commun en fonction des saisons et des années, un test de Kruskal-Wallis (Desquilbet, 2022) est utilisé ($\chi^2 = 508,8$; ddl = 11 ; p-value < $2,2 \cdot 10^{-16}$). Les valeurs p des comparaisons par paire, réalisées avec des tests de Mann-Whitney-Wilcoxon (Smida, Cucala, & Durif, 2022) avec correction de Holm, sont présentées dans le **Tableau 42** pour la zone du parc et dans le **Tableau 43** pour la zone témoin. Les cases orange illustrent les valeurs significatives des comparaisons par paire (< 0,05).

Tableau 42 : différences significatives des moyennes des détections journalières (DPM/jours) du Marsouin commun par saison au cours du suivi à l'état de référence (2019-2021) et en phase de construction (2022-2023) en fonction des saisons dans la zone du parc.

Saison		Printemps 2019	Été 2019	Printemps 2020	Automne 2020	Hiver 2020	Hiver 2021	Printemps 2021	Printemps 2022	Été 2022	Automne 2022
Etat de référence	Été 2019	0,001									
	Printemps 2020	0,001	0,001								
	Automne 2020	1	0,066	1							
	Hiver 2020	0,001	0,001	0,374	1						
	Hiver 2021	0,001	0,001	0,001	0,098	0,001					
	Printemps 2021	0,001	0,001	0,001	0,309	0,001	1				
Phase des travaux	Printemps 2022	1	0,003	1	1	1	0,001	0,158			
	Été 2022	0,004	1	0,001	0,17	0,001	0,001	0,001	0,002		
	Automne 2022	0,001	1	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,611	
	Été 2023	1	1	0,004	1	0,032	0,001	0,001	1	1	0,374

Tableau 43 : différences significatives des moyennes des détections journalières (DPM/jours) du Marsouin commun par saison au cours du suivi à l'état de référence (2019-2021) et en phase de construction (2022-2023) en fonction des saisons dans la zone témoin.

Saison		Été 2019	Automne 2019	Printemps 2020	Automne 2020	Hiver 2020	Hiver 2021	Printemps 2021	Été 2022
Etat de référence	Automne 2019	0,276							
	Printemps 2020	0,001	0,001						
	Automne 2020	1	0,944	0,024					
	Hiver 2020	0,002	0,001	0,94	0,047				
	Hiver 2021	0,001	0,001	0,003	0,002	0,001			
	Printemps 2021	0,085	0,001	1	0,276	1	0,751		
Phase travaux	Été 2022	0,94	1	0,001	1	0,002	0,001	0,583	
	Automne 2022	0,002	0,422	0,001	0,181	0,001	0,001	0,001	0,521

Afin de déterminer si des différences significatives existent dans l'activité bioacoustique des Delphinidés en fonction des saisons et des années, un test de Kruskal-Wallis est utilisé ($\chi^2 = 425,89$; ddl =10 ; p-value < 2,2. 10⁻¹⁶). Les valeurs p des comparaisons par paire, réalisées avec des tests de Mann-Whitney-Wilcoxon avec correction de Holm, sont présentées dans le **Tableau 44** pour la zone du parc et dans le **Tableau 45** pour la zone témoin. Les cases orange illustrent les valeurs significatives des comparaisons par paire (< 0,05).

Tableau 44 : différences significatives des moyennes des détections journalières (DPM/jours) des Delphinidés par saison au cours du suivi à l'état de référence (2019-2021) et en phase de construction (2022-2023) en fonction des saisons dans la zone du parc.

Saison		Printemps 2019	Été 2019	Automne 2020	Hiver 2020	Hiver 2021	Printemps 2021	Printemps 2022	Été 2022	Automne 2022
Etat de référence	Été 2019	1								
	Automne 2020	0,001	0,004							
	Hiver 2020	0,001	0,001	1						
	Hiver 2021	0,001	0,001	1	1					
	Printemps 2021	0,001	0,001	1	1	1				
Phase des travaux	Printemps 2022	0,073	0,833	0,525	0,001	0,001	0,011			
	Été 2022	1	1	0,001	0,001	0,001	0,001	0,004		
	Automne 2022	1	1	0,001	0,001	0,001	0,001	0,006	1	
	Été 2023	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001

Tableau 45 : différences significatives des moyennes des détections journalières (DPM/jours) des Delphinidés par saison au cours du suivi à l'état de référence (2019-2021) et en phase de construction (2022-2023) en fonction des saisons dans la zone témoin.

Saison		Été 2019	Automne 2019	Automne 2020	Hiver 2020	Hiver 2021	Printemps 2021	Été 2022
Etat de référence	Automne 2019							
	Automne 2020	1	0,026					
	Hiver 2020	0,633	0,002	1				
	Hiver 2021	0,328	0,001	1	1			
	Printemps 2021	0,013	0,001	0,19	0,025	0,025		
Phase travaux	Été 2022			0,061	0,007	0,001	0,001	
	Automne 2022			0,012	0,001	0,001	0,001	

L'ensemble de tests démontrent que des différences significatives existent dans les détections du Marsouin commun et des Delphinidés entre plusieurs paires de saisons dans la zone du parc et la zone témoin. Pour rappel, Les cases orange illustrent les valeurs significatives des comparaisons par paire ($< 0,05$).

Le Marsouin commun et les Delphinidés présentent des variations saisonnières et interannuelles significatives dans leur fréquentation de la zone du parc ainsi que dans la zone témoin au cours du suivi à l'état de référence et la phase de construction.

10.4.3 Influence des variables spatiales, temporelles, environnementales et anthropiques sur les Mammifères marins

10.4.3.1 Analyses des variables environnementales

La **Figure 53** présente les principales variables environnementales pouvant exercer une influence sur la fréquentation des Mammifères marins sur la zone d'étude. Ces variables sont issues de la base de données Copernicus et représentées de mars 2019 à juillet 2023 :

- La **température de surface** (T°C) ;
- La **vitesse des courants de surface** (m/s), calculée à partir des composantes nord-sud et est-ouest (v et u) ;
- La **concentration de phytoplancton dans l'eau**, exprimée en millimoles de carbone par mètres cubiques d'eau marine (mmol/m³) et obtenue en moyennant les valeurs de toute la colonne d'eau ;

La période de mesures de ces trois variables environnementales est mise en parallèle avec les périodes d'acquisition des données bioacoustiques (C-POD).

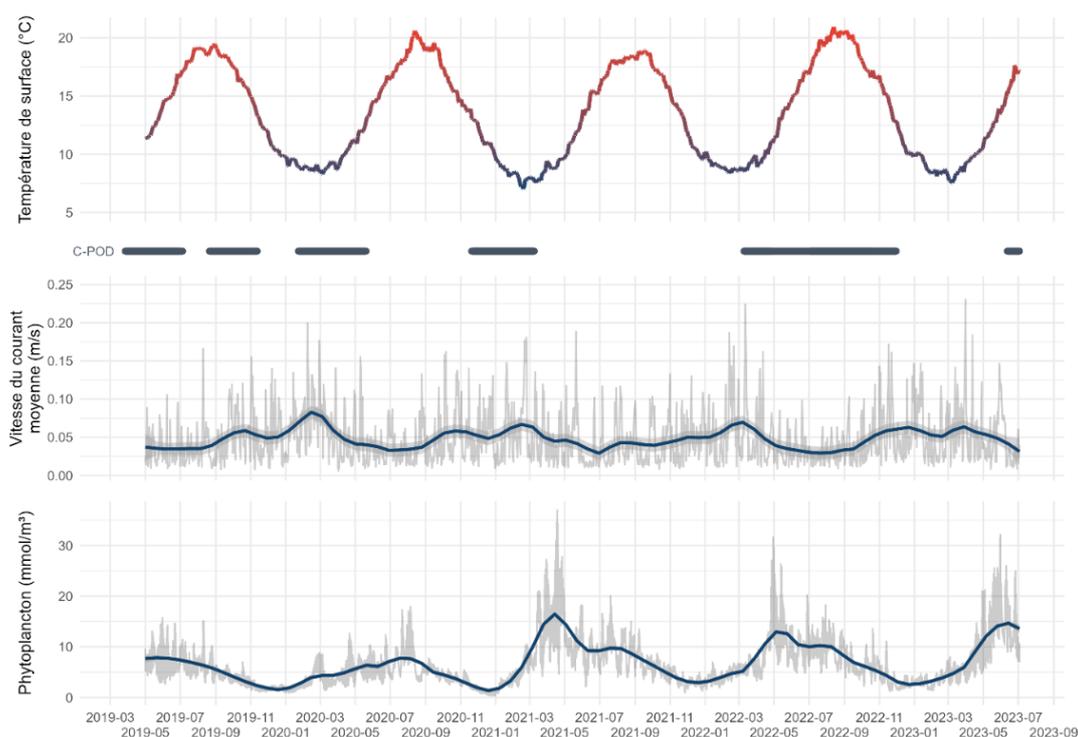


Figure 53 : variables environnementales (température de surface ($T^{\circ}\text{C}$), vitesse du courant (m/s) et quantité de phytoplancton (mmol/m^3) mesurées dans la zone d'étude entre mars 2019 et juillet 2023 (base de données (Copernicus). La ligne C-POD représente les périodes d'acquisition des données C-POD.

- La température de surface évolue de façon cyclique au cours des saisons entre mars 2019 et juillet 2023. Aucune valeur anormale n'est constatée sur toute la période de mesure. Elle varie entre 7°C et $20,9^{\circ}\text{C}$ au cours d'une année.
- Les vitesses du courant enregistrées sur la zone d'étude varient en fonction des points d'échantillonnage. Les vitesses de courant moyennes, après lissage sur toute la zone, sont comprises entre $0,5\text{ cm/s}$ et $24,8\text{ cm/s}$.
- La concentration en phytoplancton varie en fonction des cycles saisonniers : les valeurs les plus élevées sont observées au printemps. La concentration augmente d'avril à juin ($17\text{ mmol}/\text{m}^3$ en avril 2021, $12,9\text{ mmol}/\text{m}^3$ en mai 2022 et $14,6\text{ mmol}/\text{m}^3$ en juin 2023) et diminue au retour des saisons automnales et hivernales. Ces pics de concentration en phytoplancton correspondent aux blooms observés à ces époques de l'année.

L'influence des variables spatio-temporelles (effets paramétriques des saisons, de la distance entre la côte et le large et de la zone du parc ou témoin) et environnementales sur la fréquentation des Mammifères marins est analysée grâce à un modèle additif généralisé (GAM) (Amousson, Belahcene, Maudet, Mousseau, & Ouerdane, 2022), ajusté sur le jeu de données présenté précédemment, et en prenant en considération les variables suivantes :

$$DPM \sim \text{Saison} + \text{Distance de la côte} + \text{Zone} + s(\text{Température}) + s(\text{Courant}) + s(\text{Phytoplancton}) + s(\text{Marée})$$

La **Figure 54** et le **Tableau 46** présentent les effets partiels du modèle additif généralisé (GAM) sur l'activité bioacoustique du Marsouin commun.

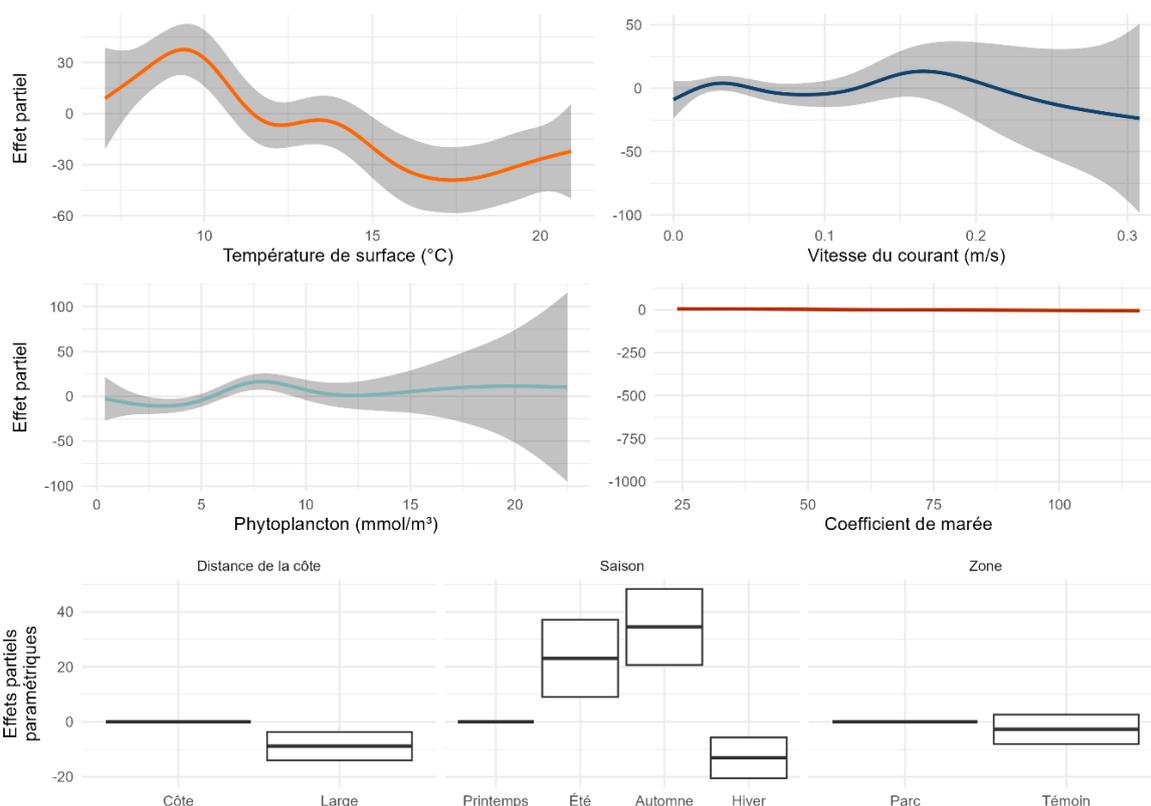


Figure 54 : effets partiels du modèle additif généralisé (GAM) sur l'activité bioacoustique du Marsouin commun.

Tableau 46 : degrés de significativité des variables environnementales lissés sur l'activité bioacoustique du Marsouin commun.

P-value : (*** : $0 < p < 0,001$; ** : $0,001 < p < 0,01$; * : $0,01 < p < 0,05$; . : $0,05 < p < 1$).

	Degré de liberté réel	Degré de liberté réf.	Statistique du test	P-value	Significativité
S (Température)	7,009	8,089	5,108	$3,27.10^{-6}$	***
S (Courant)	4,871	5,916	0,923	0,47485	
S(Phytoplancton)	5,111	6,293	2,849	0,00774	**
S (Coeff. Marée)	1,000	1,000	1,549	0,21354	

Le modèle GAM explique 5,95 % de la variance des données. Les variables environnementales affectant significativement l'activité bioacoustique du Marsouin commun sont la température de surface ($0 < p < 0,001$) et la concentration en phytoplancton dans l'eau ($0,001 < p < 0,01$). La vitesse du courant et les coefficients de marée ne sont pas significatifs.

L'analyse des variables spatiales et temporelles, ou effets paramétriques, est présentée en **Annexe - Tableau 49**. Les effets paramétriques exercent une influence significative sur l'activité bioacoustique du Marsouin commun par la saisonnalité.

La **Figure 55** et le **Tableau 47** présentent les effets partiels du modèle additif généralisé (GAM) sur l'activité bioacoustique des Delphinidés.

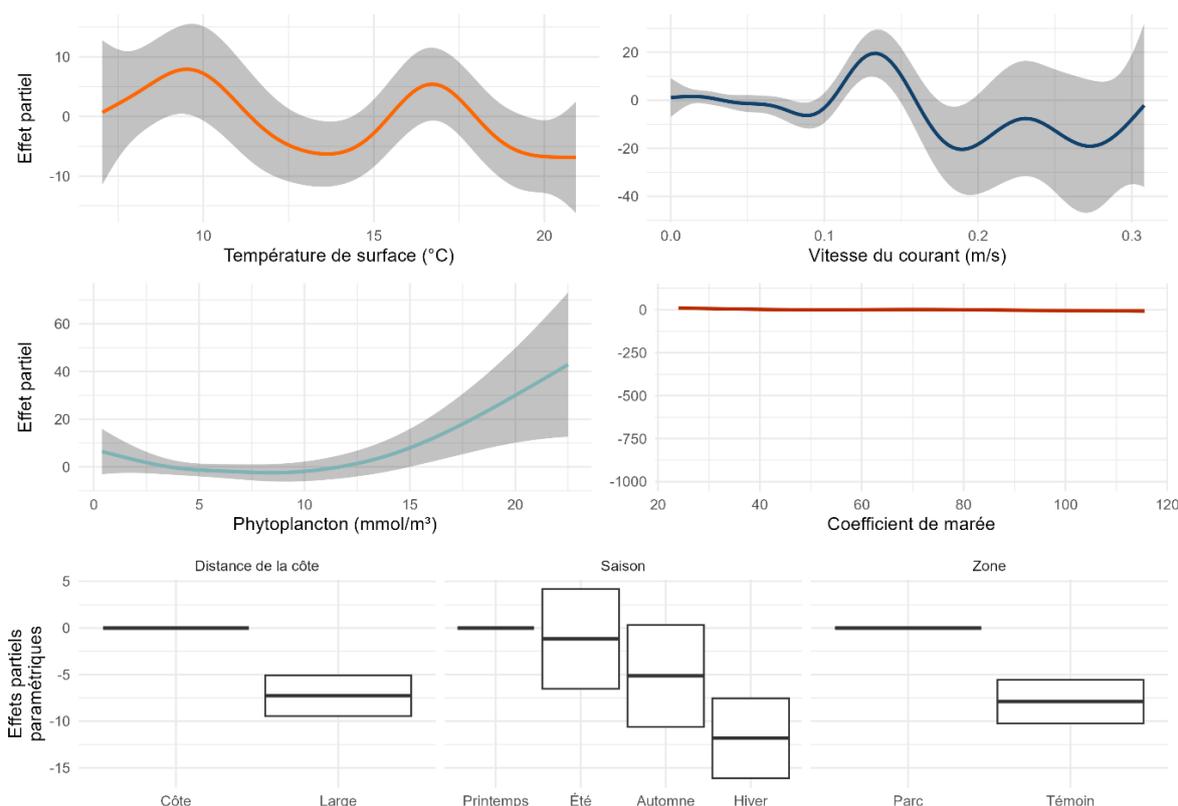


Figure 55 : effets partiels du modèle additif généralisé (GAM) sur l'activité bioacoustique des Delphinidés.

Tableau 47 : degrés de significativité des variables environnementales lissés sur l'activité bioacoustique des Delphinidés.

P-value : (*** : $0 < p < 0,001$; ** : $0,001 < p < 0,01$; * : $0,01 < p < 0,05$; . : $0,05 < p < 1$).

	Degré de liberté effectif	Degré de liberté réf.	Statistique du test	p-value	Significativité
S (Température)	6,377	7,546	4,012	0,000179	***
S (Courant)	8,264	8,821	3,071	0,003662	**
S (Phytoplancton)	3,287	4,217	3,008	0,016125	*
S (Coeff. Marée)	3,582	4,493	2,707	0,026349	*

Le modèle GAM explique 11 % de la variance des données. Les quatre variables environnementales testées affectent significativement l'activité bioacoustique des Delphinidés, avec un effet plus fort de la température de surface ($0 < p < 0,001$) et la vitesse du courant ($0,001 < p < 0,01$).

10.4.3.2 Analyses des variables spatiales et temporelles

Plusieurs analyses ANOVA multifactorielles (Analyse de la Variance) (Moyon, El Mostafa, El Ghaziri, & Alexandre-Gouabau, 2015) sont réalisées afin de vérifier les éventuelles différences statistiques dans l'activité bioacoustique du Marsouin commun (**Tableau 50**) et des Delphinidés (**Tableau 48**) entre les niveaux d'échantillonnage (périodes soit au cours du suivi de l'état de référence ou de la phase de construction, saisons, années et zones).

Tableau 48 : résultats de l'analyse ANOVA multifactorielle pour le Marsouin commun. Les astérisques indiquent le niveau de significativité du facteur par rapport à la probabilité critique. Plus p est petit, plus la significativité est grande (*** : $p < 0,001$; ** : $p < 0,01$; * : $p < 0,05$).

	Ddl	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	p-value	Significativité
Période	1	90 007,20	90 007,20	16,48	0,00	***
Zone	1	528,47	528,47	0,10	0,76	
Saison	3	207 940,73	69 313,58	12,69	0,00	***
Année	1	6 102,76	6 102,76	1,12	0,029	*
Résiduels	1 537	8 397 008,33	5 463,25			

Tableau 49 : coefficients paramétriques analysés pour le Marsouin commun. P-value : (*** : $0 < p < 0,001$; ** : $0,001 < p < 0,01$; * : $0,01 < p < 0,05$; . : $0,05 < p < 1$).

	Estimate	Erreur Std	T- value	P-value	Significativité
(Intercept)	12,013	7,778	1,544	0,1227	
Saison Été	23,084	14,080	1,640	0,1013	
Saison Automne	34,482	13,786	,501	0,0125	*
Saison Hiver	-13,093	7,385	-1,773	0,0765	.
Distance « côte-large »	-8,852	5,79	1,709	0,0876	.
« Zone témoin – zone du parc »	-2,689	5,335	-0,504	0,6143	

Les variables associées à la période et à la saison ont tous des valeurs p très faibles ($p < 0,05$), indiquant une influence significative importante sur l'activité acoustique du Marsouin commun. La zone a une valeur de p élevée ($p > 0,05$) suggérant qu'elle n'a pas d'influence significative sur la variable dépendante. La zone est n'est pas identifiée comme étant significative.

Tableau 50 : résultats de l'analyse ANOVA multifactorielle pour les Delphinidés. Les astérisques indiquent le niveau de significativité du facteur par rapport à la probabilité critique. Plus p est petit, plus la significativité est grande (*** : $p < 0,001$; ** : $p < 0,01$; * : $p < 0,05$).

	Ddl	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	p-value	Significativité
Période	1	9 326,35	9 326,35	12,48	0,00	***
Zone	1	7 885,51	7 885,51	10,55	0,00	***
Saison	3	7 696,97	2 565,66	3,43	0,02	*
Année	1	10 908,79	10 908,79	14,59	0,00	***
Résiduels	1 186	886 548,18	747,51			

Tableau 51 : coefficients des effets paramétriques analysés pour les Delphinidés. P-value : (*** : $0 < p < 0,001$; ** : $0,001 < p < 0,01$; * : $0,01 < p < 0,05$; . : $0,05 < p < 1$).

	Estimate	Erreur Std	T- value	P-value	Significativité
(Intercept)	14,825	3,994	3,712	0,000216	***
Saison Été	-1,171	5,348	-0,219	0,826662	
Saison Automne	-5,129	5,467	-0,938	0,348334	
Saison Hiver	-11,824	4,282	-2,761	0,005851	**

Distance « côte-large »	-7,262	2,196	-3,307	0,000972	***
« Zone témoin – zone du parc »	-7,894	2,339	-3,375	0,000763	***

Les variables associées à la période, la zone et l'année ont tous des valeurs p très faibles ($p < 0,001$), indiquant une influence significative importante sur l'activité acoustique des Delphinidés. La zone est identifiée comme facteur significatif, s'expliquant par les différences significatives observées entre la côte et le large et aussi entre la zone du parc et la zone témoin.

10.4.3.3 Analyses du bruit ambiant issu des sources anthropiques

La **Figure 56** illustre la distribution globale des niveaux sonores moyens (SPL-RMS) enregistrés au cours de l'état de référence et la phase de construction dans la zone du parc au point d'enregistrement H2. Les niveaux sonores moyens (SPL-RMS) en phase travaux sont inférieurs à ceux enregistrés au cours de l'état de référence, avec comme médianes respectives 101,9 dB re 1 μ Pa et 124,8 dB re 1 μ Pa.

Pour chaque période échantillonnée, la distribution des données est asymétriquement positive démontrant que les niveaux sonores les plus fréquemment enregistrés sont situés au-dessus des valeurs des médianes.

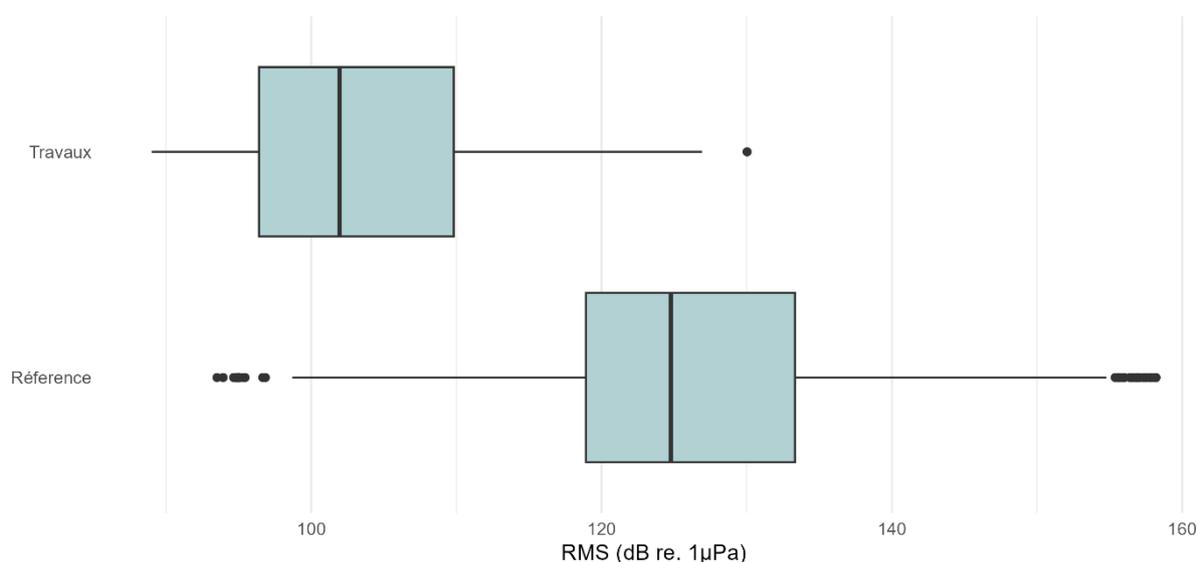


Figure 56 : évolution des niveaux SPL-RMS (dB re 1 μ Pa) entre l'état de référence et la phase de construction dans la zone du parc au point d'enregistrement H2.

Un modèle de régression linéaire (Crambes, 2006), selon la formule $DPM \sim RMS$, ne montre **aucun pouvoir explicatif des niveaux sonores des travaux du parc sur l'activité bioacoustique des Mammifères marins** ($R^2 = 0,0018$, $p = 0,004$). Ce qui signifie que les niveaux sonores émis (lors de l'état de référence et la phase de construction) n'ont pas d'influence significative sur l'activité bioacoustique des Mammifères marins. Par ailleurs, les niveaux sonores entre les deux périodes (avant et pendant travaux), mesurés par l'indicateur SPL-RMS, sont significativement différents, avec des niveaux sonores inférieurs pendant la période des travaux (test Mann-Whitney, $W = 2640716$, $p < 10^{-16}$).

11. BIBLIOGRAPHIE

- Agardy, T., Aguilar de Soto, N., Canadas, A., Engel, M., Frantzis, a., Hatch, L., . . . Wright, A. (2007). A Global Scientific Workshop on Spatio-Temporal Management of Noise.
- Aguilar de Soto, N., Canadas, A., Frantzis, A., & Notarbartolo di Sciara, G. (2013). A voluntary moratorium to naval sonar : From the Canary Islands success to the Mediterranean. *Effects of Noise on Aquatic Life*.
- Aguilar de Soto, N., Delorme, N., Atkins, J., Howard , S., Williams, J., & Johnson , M. (2013). Anthropogenic noise causes body malformations and delays development in marine larvae. *Scientific reports*, 3, 2831.
- Amousson, M., Belahcene, K., Maudet, N., Mousseau, V., & Ouerdane, W. (2022). *Des explications par étapes pour le modèle additif*. 16èmes Journées d’Intelligence Artificielle Fondamentale (JIAF 2022),.
- Anderson, D. (2001). The need to get the basics right in wildlife studies. *Wildlife Society Bulletin*, 29, 1294-1297.
- Anderson, D. (2003). Response to Engeman : Index Values Rarely Constitute Reliable Information. *Wildlife Society Bulletin (1973-2006)*, 31(1), 288-291.
- Andrew, R., Howe, B., Mercer, J., & Dzieciuch, M. (2002). Ocean ambient sound : Comparing the 1960s with the 1990s for a receiver off the California coast. *Acoustics Research Letters Online*, 3(2), 65-70.
- Bailey, H., Senior, B., Simmons, D., Rusin, J., Gordon P, & Thompson, P. (2010). Assessing underwater noise levels during pile-driving at an offshore windfarm and its potential effects on marine mammals.
- Bellmann, M., May, A., Wendt , T., Gerlach, S., Remmers, P., & Brinkmann, J. (2020). *Underwater noise during percussive pile driving: Influencing factors on pile-driving noise and technical possibilities to comply with noise mitigation values*. ERa Report: Experience Report on Piling-Driving Noise with and without Technical Noise Mitigation Measures.
- Benhemma Le Gall, A., Graham, I., Merchant, N., & Thompson, P. (2021). Broad-Scale Responses of Harbor Porpoises to Pile-Driving and Vessel Activities During Offshore Windfarm Construction. *Frontiers in Marine Science*, 8, 735.
- Biotope. (2014). *Eoliennes Offshore des Hautes Falaises - Suivi de l’avifaune et de la mégafaune marine*.
- Boyd, I., Brownell, R., Cato, D., Clark, C., Costa, D., Evans, P., . . . Zimmer, W. (2008). The effects of anthropogenic sound on marine mammals: A draft research strategy. *European Science Foundation Marine Board Position Paper 13*, 24.
- Brandt, M., Diederichs, A., & Nehls, G. (2009). Harbour porpoise responses to pile driving at the Horns Rev II offshore wind farm in the Danish North Sea. *BioConsult SH, Husum, Germany. Report to DONG Energy*.

- Cartensen, J., Henriksen, O., & Teilman, J. (2006). Impacts of offshore wind farm construction on harbour porpoises : Acoustic monitoring of echolocation activity using porpoise detectors (T-PODs). *Marine Ecology-progress Series - MAR ECOL-PROGR SER*, 321, 295-308.
- Castellote , M., & Llorens, C. (2016). Review of the Effects of Offshore Seismic Surveys in Cetaceans : Are Mass Strandings a Possibility? . *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 875, 133-143.
- Castellote, M., Clark, C., & Lammers, M. (2012). Acoustic and behavioural changes by fin whales (*Balaenoptera physalus*) in response to shipping and airgun noise. *Biological Conservation*, 147(1), 115-122.
- Celi, Filiciotto, Maricchiolo, Genovese, Quinci, Maccarrone, . . . Buicino. (2016). Vessel noise pollution as a human threat to fish: assessment of the stress response in gilthead sea bream (*Sparus aurata*, Linnaeus 1758). *Fish Physiol Biochem*, 631-641.
- Chapman, D. (1985). Numerical Treatment of Cross-Shelf Open Boundaries in a Barotropic Coastal Ocean Model. *Journal of Physical Oceanography*.
- Collins, M., McDonald, B., Kuperman, W., & Siegman, W. (1994). Jovian acoustics and comet Shoemaker-Levy. *J. Acoust. Soc. Am.*, 97(4), 2147-2158.
- Copernicus. (n.d.). Retrieved from <https://www.copernicus.eu/fr/acces-aux-donnees>
- Crambes, C. (2006). *Modèles de régression linéaire pour variables explicatives fonctionnelles*. Mathématiques [math]. Université Paul Sabatier - Toulouse III.
- Dähne, M., Gilles, A., Lucke, K., Peschko, V., Adler, S., & Krüger, K. (2013). Effects of pile-driving on harbour porpoises (*Phocoena phocoena*) at the first offshore wind farm in Germany. *Environmental Research Letters*, Volume 8, Number 2.
- Day, R., McCauley, R., Fitzgibbon, Q., & Semmens, J. (2017). Exposure to seismic air gun signals causes physiological harm and alters behavior in the scallop *Pecten fumatus*. *The State University of New Jersey, New Brunswick, NJ*.
- Day, R., McCauley, R., Fitzgibbon, Q., Hartmann, K., & Semmens, J. (2019). Seismic air guns damage rock lobster mechanosensory organs and impair righting reflex. *The Royal Society Publishing Volume 286 Issue 1907*.
- Dekeling, R., Tasket, M., Van Der Graaf, S., Ainslie, M., Andersson, M., André, M., . . . Young, J. (2014). Monitoring Guidance for Underwater Noise in European Seas- Part II: Monitoring Guidance Specifications. *Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2014, ISBN 978-92-79-36339-9*.
- Deruiter, S., Southall, B., Calambokidis, J., Zimmer, W., Sadykova, D., Falcone, E., . . . Tyack, P. (2013). First direct measurements of behavioural responses by Cuvier's beaked whales to mid-frequency active sonar. *Biology letters*, 9(4), 20130223.
- Desquilbet, L. (2022). *Introduction aux tests statistiques multiples*.
- Di Salvo, M., Gadais, M., & Roche-Woillez, G. (2005). *L'estimation de la densité par la méthode du noyau: méthode et outils*. Note méthodologique et technique. [Rapport de recherche] Centre

- d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (CERTU). hal-02150564.
- Diederichs, A., Nehls, G., Dähne, M., Adler, S., Koschinski, S., & VerfuB, U. (2008). Methodologies for measuring and assessing potential changes in marine mammal behaviour, abundance or distribution arising from the construction, operation and decommissioning of offshore windfarms. *Commissioned by COWRIE Ltd. In Methods (Numéro May)*.
- Farcas, A., Thompson, P., & Merchant, N. (2016). Underwater noise modelling for environmental impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 57, 114-122.
- Fernandez, A., Arbelo, M., & Martin, V. (2013). Whales : No mass strandings since sonar ban. *Nature*, 497(7449), 317.
- Fernandez, A., Arbelo, M., Deaville, R., Patterson, I., Castro, P., Baker, J., . . . Jepson, D. (2004). Whales, sonar and decompression sickness (reply). *Nature*, 576 (April), 575-576.
- Filadelfo, R., Mintz, J., Michlovich, E., D'Amico, A., Tyack, P., & Ketten, D. (2009). Correlating Military Sonar Use with Beaked Whale Mass Strandings : What Do the Historical Data Show? *Aquatic Mammals*, 35(4), 435-444.
- Frantzis, A., Nikolaou, O., Bompar, J., & Cammedda, A. (2004). Humpback Whale (*Megaptera novaeangliae*) Occurrence in the Mediterranean Sea. *Journal of Cetacean Research and Management*, 6, 25-28.
- Frantzis, R. (1998). Does acoustic testing strand whales? *Nature*, 392(6671), 29.
- Frisk, G. (2012). Noiseconomics : The relationship between ambient noise levels in the sea and global economic trends. *Scientific Reports*, 2(1), 437.
- Gervaise, C., & Lossent, J. (2020). Étude des effets acoustiques des levés géophysiques et UXO du projet de raccordement électrique des éoliennes en mer de Saint-Brieuc sur la ressource halieutique. *Rapport RTE*, 51.
- Gervaise, C., Lossent, J., & Gigou, A. (2022). *Synthèse de la connaissance scientifique sur les effets sonores des éoliennes flottantes sur la faune marine Décembre 2021*.
- Green, R. (1979). *Sampling design and statistical methods for environmental biologists*. John Wiley and sons, New-York, NY.
- Hastings, M., & Popper, A. (2005). *Effects of Sound on Fish*.
- Hawkins, A., & Pembroke, A. (2014). Information gaps in understanding the effects of noise on fishes and invertebrates. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*.
- Hildebrand, J. (2009). Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean. *Marine Ecology Progress Series* 395:5-20.
- Ketten, D. (1995). Estimates of blast injury and acoustic trauma zones for marine mammals from underwater explosions. *Sensory Systems of Aquatic Mammals*, 391-407.

- Koschinski, S. (2011). Underwater Noise Pollution From Munitions Clearance and Disposal, Possible Effects on Marine Vertebrates, and Its Mitigation. *Marine Technology Society Journal*, 45(6), 80-88.
- Maglio, A. (2013). *Anthropogenic Noise and Marine Mammals. Review of the effort in addressing the impact of anthropogenic underwater noise in the ACCOBAMS and ASCOBANS areas*. Retrieved from ACCOBAMS: [http://accobams.org/images/stories/Activities/Noise/review of the effort in addressing underwater noise impact.pdf](http://accobams.org/images/stories/Activities/Noise/review_of_the_effort_in_addressing_underwater_noise_impact.pdf)
- Martin, V., Servidio, A., & Garcia S. (2004). Mass strandings of beaked whales in the Canary Islands. *Proceedings of the workshop on active sonar and cetaceans. European Cetacean Society newsletter No 42.*, 33-36.
- Martinez, L., Falchetto, H., Pettex, E., Vincent, C., Peltier, H., & Ridoux, V. (2013). Etude des mammifères marins dans le cadre du parc éolien en mer de Saint Nazaire : Analyse des données existantes, synthèse bibliographique et préconisations de suivi.
- McCauley, R., Day, R., Swalding, K., Fitzgibbon, Q., Watson, R., & Jayson, M. (2017). Widely used marine seismic survey air gun operations negatively impact zooplankton. *Nature Ecology & Evolution volume 1, Article number: 0195*.
- McDonald, M., Wiggins, S., & Ross, D. (2008). A 50 Year comparison of ambient ocean noise near San Clemente Island : A bathymetrically complex coastal region off Southern California. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 124, 1985-1992.
- Moyon, T., El Mostafa, Q., El Ghaziri, A., & Alexandre-Gouabau, M. (2015). *Analysis of multivariate data depending on several factors: ANOVA-PLS*. XVIème Congrès Chimiométrie, Université de Genève (Unige). CHE. Groupe Français de Chimiométrie (GFC).
- National Marine Fisheries Services, N. (n.d.). *National Marine Fisheries Services*. Retrieved from National Marine Fisheries Services: <https://www.fisheries.noaa.gov/>
- Nedwell, Edwards, Turnpenny, & Gordon. (2004). Fish and Marine Mammal Audiograms : A summary of available information. *Subacoustech Report Ref : 534R0214*, 281.
- Nelms, S., Piniak, W., Weir, C., & Godley, B. (2016). Seismic surveys and marine turtles : An underestimated global threat? *Biological Conservation*, 193, 49-65.
- OSPAR. (2009). Overview of the impacts of anthropogenic underwater sound in the marine environment. .
- Parc Eolien en Mer de Fécamp, E. (n.d.). *Parc Eolien en Mer de Fécamp*. Retrieved from Parc Eolien en Mer de Fécamp: <https://parc-eolien-en-mer-de-fecamp.fr/>
- Pavan, G. (2008). The shipping noise issue, a challenge for the survival and welfare of marine life? In A. Abdulla & O. Linden (Éds.), *Maritime traffic effects on biodiversity in the Mediterranean Sea : Review of impacts, priority area and mitigation measures (Vol. 1)*. IUCN Centre for Mediterranean Cooperation., 10-21.
- Pettex, E., Charlotte, L., Laran, S., Ricart, A., Virgili, A., Falchetto, H., . . . Ridoux, V. (2014). *Suivi Aérien de la Mégafaune Marine en France métropolitaine - Rapport final*.

- Popper, A., Hawkin, A., Fay, R., Mann, D., Bartol, S., Carlson, T., . . . Tavalga, W. (2014). Effects of exposure to seismic airgun use on hearing of three fish species. *Sound Exposure Guidelines for Fishes and Sea Turtles : A Technical Report prepared by ANSI-Accredited Standards Committee S3/SC1 and registered with ANSI*, 33-51.
- Popper, Hawkins, Fay, Mann, Bartol, Coombs, . . . Tavalga. (2014). Sound exposure guidelines for fishes and sea turtles.
- Popper, Salmon, & Horch. (2001). Acoustic detection and communication by decapod crustacean. *Physiol*, 83-89.
- Richardson , A., Richard, J., & Lenton, A. (2017). Potential impacts on zooplankton of seismic surveys. *CSIRO Oceans and Atmosphere*.
- Schmidtke, E., Nützel, B., & Ludwig, S. (2009). Risk mitigation for sea mammals—The use of air bubbles against shock waves Small charges in the Baltic. *NAG/DAGA*, 269-270.
- Secor, D. (2017). Priorities and challenges of monitoring designs – ecological impacts. *Atlantic Offshore Renewable Energy Development and Fisheries Workshop*.
- Smida, Z., Cucala, A., & Durif, G. (2022). A Wilcoxon-Mann-Whitney spatial scan statistic for functional data. *Computational Statistics and Data Analysis* 167, pp.107378. 10.1016/j.csda.2021.107378. hal-03412009 .
- Socheleau, F.-X. (2019). Traitement du signal pour l’acoustique sous-marine : des communications numériques à la surveillance passive. *Traitement du signal et de l’image [eess.SP]*.
- Southall, B., Rowles, T., Gulland, F., Baird, R., & Jepson, P. (2013). Final report of the Independent Scientific Review Panel investigating potential contributing factors to the 2008 mass stranding of melon-headed whales (*Peponocephala electra*) in Antsohihy, Madagascar. 1-75.
- Southall, Finneran, Reichmuth, Nachtigall, Ketten, Bowles, . . . Tyack. (2019). Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Updated Scientific Recommendations for Residual Hearing Effects, Aquatic Mammals. 125-232.
- Stöber, U., & Thomsen, F. (2021). How could operational underwater sound from future offshore wind turbines impact marine life? *The Journal of the Acoustical Society of America* 149(3):1791-1795.
- Stone, C., & Tasker, M. (2006). The effects of seismic airguns on cetaceans in UK waters. *Journal of Cetacean Research and Management*, 8(3), 255-263.
- Suedel, B., McQueen, A., Wilkens, J., & Fields, M. (2019). *Evaluating effects of dredging-induced underwater sound on aquatic species: a literature review*.
- Teilmann, J. (2003). Influence of sea state on density estimates of harbour porpoises (*Phocoena phocoena*). *Journal of Cetacean Research and Management*, 5, 85-92.
- Tougaard, J., & Miller, L. (2009). Underwater noise from three types of offshore wind turbines: Estimation of impact zones for harbor porpoises and harbor seals. *The Journal of the Acoustical Society of America* 125(6):3766-73.

- Tougaard, J., Wright, A., & Madsen, P. (2015). Cetacean noise criteria revisited in the light of proposed exposure limits for harbour porpoises. *Marine Pollution Bulletin - Volume 90, Issues 1–2*, 196-208.
- Tyack, P. (2008). Implications for Marine Mammals of Large-Scale Changes in the Marine Acoustic Environment. *Journal of Mammalogy*, 89(3), 549-558.
- Tyack, P., Zimmer, W., Moretti, D., Southall, B., Claridge, D., Durban, J., . . . Boyd, I. (2011). Beaked whales respond to simulated and actual navy sonar. *PloS one*, 6(3), e17009.
- Von Benda-Beckmann, A., Aarts, G., Sertlek, H., Lucke, K., Verboom, W., Kastelein, R., . . . Ainslie, A. (2015). Assessing the impact of underwater clearance of unexploded ordnance on harbour porpoises (*Phocoena phocoena*) in the Southern North Sea. *Aquatic Mammals*, 41(4), 503-523.
- Wenz. (1962). Acoustic ambient noise in the ocean: Spectra and sources. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 34(12).

INDEX DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : composition du paysage acoustique sous-marin en fonction des origines des sons produits (©Sinay).....	12
Figure 2 : fréquences émises par les activités humaines en mer (Gervaise, Lossent, & Gigou, 2022). 13	13
Figure 3 : niveaux sonores des bruits émis par les activités humaines en mer.	13
Figure 4 : bandes fréquentielles d’écoute privilégiées pour différents groupes d’animaux superposées aux fréquences des sons anthropiques (Gervaise, Lossent, & Gigou, 2022).	16
Figure 5 : positions géographiques des enregistreurs acoustiques à l’échelle de l’aire d’étude du parc éolien en mer de Fécamp.....	23
Figure 6 : schéma de l’approche BACI (Secor, 2017).....	29
Figure 7 : niveaux SPL-RMS (dB re 1µPa) moyen par jour et sur la période d’acquisition calculés dans la zone du parc au point d’enregistrement H2 au printemps 2022 lors du forage des pieux de la sous-station électrique. La période de travaux suivie est représentée par les lignes en violet.....	33
Figure 8 : distribution de la moyenne des niveaux DSP jusqu’à 30 kHz dans la zone du parc au point d’enregistrement H2 au printemps 2022 lors du forage des pieux de la sous-station électrique. Les niveaux sonores des phases travaux sont exprimés en rouge et les phases sans travaux en bleu. Les courbes en pointillées correspondent aux indices associés au trafic maritime (modèle de Wenz, 1962).	34
Figure 9 : niveaux SPL-RMS (dB re 1µPa) moyen par jour et sur la période d’acquisition calculés dans la zone témoin au point d’enregistrement H1 au printemps 2022 lors du forage des pieux de la sous-station électrique.	35
Figure 10 : cartographie de l’empreinte acoustique issue de l’atelier du forage de la sous-station électrique au printemps 2022 (SPL-RMS). Les niveaux sonores de référence correspondent aux périodes en dehors des phases de travaux (95 dB).	39
Figure 11 : cartographie des risques acoustiques pour les Mammifères marins ($L_E - 24$ H) associés à l’atelier du forage de la sous-station électrique au printemps 2022.....	41
Figure 12 : niveaux SPL-RMS (dB re 1µPa) moyen par jour et sur la période d’acquisition calculés dans la zone du parc au point d’enregistrement H2 à l’été 2022 lors de la préparation des sols pour les fondations gravitaires.....	42
Figure 13 : niveaux SPL-RMS (dB re 1µPa) moyen par jour et sur la période d’acquisition calculés dans la zone du parc au point d’enregistrement H2 à l’été 2022 au cours de trois ateliers de travaux.	44
Figure 14 : distribution de la moyenne des niveaux DSP jusqu’à 30 kHz dans la zone du parc au point d’enregistrement H2 à l’été 2022 lors de la préparation des sols aux fondations gravitaires. Les niveaux sonores des phases travaux sont exprimés en rouge et les phases sans travaux en bleu. Les courbes en pointillées correspondent aux indices associés au trafic maritime (modèle de Wenz, 1962).....	45
Figure 15 : distribution de la moyenne des niveaux DSP jusqu’à 30 kHz dans la zone du parc au point d’enregistrement H2 à l’été 2022 lors de trois ateliers de travaux. Les niveaux sonores des phases travaux sont exprimés en rouge et les phases sans travaux en bleu. Les courbes en pointillées correspondent aux indices associés au trafic maritime (modèle de Wenz, 1962).	47
Figure 16 : niveaux SPL-RMS (dB re 1µPa) moyen par jour et sur la période d’acquisition calculés dans la zone témoin au point d’enregistrement H1 à l’été 2022 au cours de la préparation des sols pour les fondations gravitaires.....	48
Figure 17 : niveaux SPL-RMS niveaux SPL-RMS (dB re 1µPa) moyen par jour et sur la période d’acquisition calculés dans la zone témoin au point d’enregistrement H1 à l’été 2022 au cours de trois ateliers de travaux.....	49
Figure 18 : niveaux SPL-RMS (dB re 1µPa) moyen par jour et sur la période d’acquisition calculés dans la zone du parc au point d’enregistrement H2 à l’automne 2022 au cours de deux ateliers de travaux.	52

Figure 19 : distribution de la moyenne des niveaux DSP jusqu'à 30 kHz dans la zone du parc au point d'enregistrement H2 à l'automne 2022 au cours de deux ateliers de travaux. Les niveaux sonores des phases travaux sont exprimés en rouge et les phases sans travaux en bleu. Les courbes en pointillées correspondent aux indices associés au trafic maritime (modèle de Wenz, 1962).	54
Figure 20 : niveaux SPL-RMS (dB re 1µPa) moyen par jour et sur la période d'acquisition calculés dans la zone témoin au point d'enregistrement H1 à l'automne 2022 au cours de deux ateliers de travaux.	55
Figure 21 : niveaux SPL-RMS (dB re 1µPa) moyen par jour et sur la période d'acquisition calculés dans la zone du parc au point d'enregistrement H2 à l'été 2023 au cours de l'installation des premières éoliennes.	57
Figure 22 : distribution de la moyenne des niveaux DSP jusqu'à 30 kHz dans la zone du parc au point d'enregistrement H2 à l'été 2022 au cours de la préparation des sols aux fondations gravitaires. Les niveaux sonores des phases travaux sont exprimés en rouge et les phases sans travaux en bleu. Les courbes en pointillées correspondent aux indices associées au trafic maritime (modèle de Wenz, 1962).	59
Figure 23 : niveaux SPL-RMS (dB re 1µPa) moyen par jour et sur la période d'acquisition calculés dans la zone témoin au point d'enregistrement H1 à l'été 2023 au cours de l'installation des premières éoliennes.	60
Figure 24 : évolution de l'activité mensuelle (somme des DPMs/jour) calculée pour le Marsouin commun aux points d'enregistrement C1, C2 et C3 au cours du suivi en phase de construction (2022-2023). Les croix représentent les mois où les C-PODs étaient immergés mais sans enregistrement de données.	63
Figure 25 : évolution de l'activité mensuelle (somme des DPMs/jour) calculée pour les Delphinidés aux points d'enregistrement C1, C2 et C3 au cours du suivi en phase de construction (2022-2023). Les croix représentent les mois où les C-PODs étaient immergés mais sans enregistrement de données.	64
Figure 26 : évolution de l'activité journalière (DPM/jour) du Marsouin commun et des Delphinidés au cours du suivi à l'état de référence (2019-2021, en bleu) et en phase de construction (2022-2023, en orange) sur l'ensemble de la zone d'étude (zone témoin et zone du parc). La ligne data représente les périodes d'acquisition des données C-POD.	68
Figure 27 : patrons d'activité journaliers et annuels des Delphinidés (en haut) et des Marsouins (en bas) aux points d'enregistrements C1, C2 et C3 au cours du suivi à l'état de référence (2019-202) et en phase de construction (2022-2023).	70
Figure 28 : évolution de l'activité mensuelle (DPM/mois) du Marsouin commun au cours du suivi à l'état de référence (2019-2021, en bleu) et en phase de construction (2022-2023, en orange) aux points d'enregistrement C1, C2 et C3. Les croix représentent les mois où les C-PODs étaient immergés mais sans enregistrement de données.	71
Figure 29 : évolution de l'activité mensuelle (DPM/mois) des Delphinidés au cours du suivi à l'état de référence (2019-2021, en bleu) et en phase de construction (2022-2023, en orange) aux points d'enregistrement C1, C2 et C3. Les croix représentent les mois où les C-PODs étaient immergés mais sans enregistrement de données.	72
Figure 30 : carte de localisation du parc éolien en mer de Fécamp et son raccordement électrique sous-marin (Parc Eolien en Mer de Fécamp).	87
Figure 31 : schéma d'une ligne de mouillage porteuse des appareils acoustiques au cours des suivis acoustiques MSu3a et MSu3b sur le parc éolien de Fécamp.	90
Figure 32 : niveaux SPL-RMS et SPL- PIC (zero to peak) (dB re 1µPa) sur la période d'acquisition calculés dans la zone du parc au point d'enregistrement H2 au printemps 2022 lors du forage des pieux de la sous-station électrique. La distance de navire « Sea Installer » par rapport au point d'enregistrement H2 est également représentée. Cette distance est fixe par rapport au point d'enregistrement H2, le navire de forage n'ayant pas bougé durant les opérations.	92

Figure 33 : niveaux SPL-RMS (dB re 1μPa) en percentiles sur la période d’acquisition calculés dans la zone du parc au point d’enregistrement H2 au printemps 2022 lors du forage des pieux de la sous-station électrique.	93
Figure 34 : niveaux SPL-RMS et SPL-PIC (zero-to-peak) (dB re 1μPa) sur la période d’acquisition calculés dans la zone témoin au point d’enregistrement H1 au printemps 2022 lors du forage des pieux de la sous-station électrique.	94
Figure 35 : niveaux SPL-RMS (dB re 1μPa) en percentiles sur la période d’acquisition calculés dans la zone témoin au point d’enregistrement H1 au printemps 2022 lors du forage des pieux de la sous-station électrique.	95
Figure 36 : cartographie des niveaux sonores issus de l’atelier du forage de la sous-station électrique au printemps 2022 (SPL-RMS).	96
Figure 37 : niveaux SPL-RMS et SPL-PIC (zero-to-peak) (dB re 1μPa) sur la période d’acquisition calculés dans la zone du parc au point d’enregistrement H2 à l’été 2022 lors de la préparation des sols pour les fondations gravitaires. La distance de navire «Rockpiper » par rapport au point d’enregistrement H2 est également représentée.	97
Figure 38 : niveaux SPL-RMS (dB re 1μPa) en percentiles sur la période d’acquisition calculés dans la zone du parc au point d’enregistrement H2 à l’été 2022 lors de la préparation des sols pour les fondations gravitaires.	98
Figure 39 : niveaux SPL-RMS et SPL-PIC (zero-to-peak) (dB re 1μPa) sur la période d’acquisition calculés dans la zone du parc au point d’enregistrement H2 à l’été 2022 au cours de trois ateliers de travaux. La distance des différents navires de construction par rapport au point d’enregistrement H2 est également représentée. Cette distance au point d’enregistrement varie avec les mouvements des navires par rapport aux opérations à mener.	99
Figure 40 : niveaux SPL-RMS (dB re 1μPa) en percentiles sur la période d’acquisition calculés dans la zone du parc au point d’enregistrement H2 à l’été 2022 au cours de trois ateliers de travaux.	100
Figure 41 : niveaux SPL-RMS et SPL-PIC (zero-to-peak) (dB re 1μPa) sur la période d’acquisition calculés dans la zone témoin au point d’enregistrement H1 à l’été 2022 lors de la préparation des sols pour les fondations gravitaires.	101
Figure 42 : niveaux SPL-RMS (dB re 1μPa) en percentiles sur la période d’acquisition calculés dans la zone témoin au point d’enregistrement H1 à l’été 2022 lors de la préparation des sols pour les fondations gravitaires.	102
Figure 43 : niveaux SPL-RMS et SPL-PIC (zero-to-peak) (dB re 1μPa) sur la période d’acquisition calculés dans la zone témoin au point d’enregistrement H1 à l’été 2022 au cours de trois ateliers de travaux.	103
Figure 44 : niveaux SPL-RMS (dB re 1μPa) en percentiles sur la période d’acquisition calculés dans la zone témoin au point d’enregistrement H1 à l’été 2022 au cours de trois ateliers de travaux.	104
Figure 45 : niveaux SPL-RMS et SPL-PIC (zero-to-peak) (dB re 1μPa) sur la période d’acquisition calculés dans la zone du parc au point d’enregistrement H2 à l’automne 2022 au cours de deux ateliers de travaux. La distance des différents navires de construction par rapport au point d’enregistrement H2 est également représentée. Cette distance au point d’enregistrement varie avec les mouvements des navires par rapport aux opérations à mener.	105
Figure 46 : niveaux SPL-RMS (dB re 1μPa) en percentiles sur la période d’acquisition calculés dans la zone du parc au point d’enregistrement H2 à l’automne 2022 au cours de deux ateliers de travaux.	106
Figure 47 : niveaux SPL-RMS et SPL-PIC (zero-to-peak) (dB re 1μPa) sur la période d’acquisition calculés dans la zone témoin au point d’enregistrement H1 à l’automne 2022 au cours de deux ateliers de travaux.	107
Figure 48 : niveaux SPL-RMS (dB re 1μPa) en percentiles sur la période d’acquisition calculés dans la zone témoin au point d’enregistrement H1 à l’automne 2022 au cours de deux ateliers de travaux.	108

Figure 49 : niveaux SPL-RMS et SPL-PIC (zero-to-pick) (dB re 1 μ Pa) sur la période d’acquisition calculés dans la zone du parc au point d’enregistrement H2 à l’été 2023 au cours de l’installation des premières éoliennes. La distance des différents navires de construction par rapport au point d’enregistrement H2 est également représentée. Cette distance au point d’enregistrement varie avec les mouvements des navires par rapport aux opérations à mener. 109

Figure 50 : niveaux SPL-RMS (dB re 1 μ Pa) en percentiles sur la période d’acquisition calculés dans la zone du parc au point d’enregistrement H2 à l’été 2023 au cours de l’installation des premières éoliennes. 110

Figure 51 : niveaux SPL-RMS et SPL-PIC (zero-to-pick) (dB re 1 μ Pa) sur la période d’acquisition calculés dans la zone témoin au point d’enregistrement H1 à l’été 2023 au cours de l’installation des premières éoliennes. 111

Figure 52 : niveaux SPL-RMS (dB re 1 μ Pa) en percentiles sur la période d’acquisition calculés dans la zone témoin au point d’enregistrement H1 à l’été 2023 au cours de l’installation des premières éoliennes. 112

Figure 53 : variables environnementales (température de surface (T°C), vitesse du courant (m/s) et quantité de phytoplancton (mmol/m³) mesurées dans la zone d’étude entre mars 2019 et juillet 2023 (base de données (Copernicus). La ligne C-POD représente les périodes d’acquisition des données C-POD..... 119

Figure 54 : effets partiels du modèle additif généralisé (GAM) sur l’activité bioacoustique du Marsouin commun..... 120

Figure 55 : effets partiels du modèle additif généralisé (GAM) sur l’activité bioacoustique des Delphinidés..... 121

Figure 56 : évolution des niveaux SPL-RMS (dB re 1 μ Pa) entre l’état de référence et la phase de construction dans la zone du parc au point d’enregistrement H2..... 123

INDEX DES TABLEAUX

Tableau 1 : seuils des impacts acoustiques par sensibilité des espèces pour les sons continus et impulsions (Southall, et al., 2019).	18
Tableau 2 : synthèse bibliographique des seuils d'apparition d'effets négatifs utilisée par les auteurs comme critère d'évaluation du dérangement comportemental de la faune marine (Gervaise, Lossent, & Gigou, 2022).	18
Tableau 3 : calcul simplifié des rayons des dérangements comportementaux produits par les travaux de mise en place des installations posées (sous-station électrique) (Gervaise, Lossent, & Gigou, 2022).	19
Tableau 4 : coordonnées des points d'immersion des dispositifs acoustiques (WGS 84).	24
Tableau 5 : présentation de la couverture des données acquises en fonction des ateliers de travaux au cours des campagnes de suivi du bruit ambiant MSu3a de mars 2022 à novembre 2022 à de juin 2023 à août 2023.	24
Tableau 6 : présentation de la couverture des données acquises en fonction des ateliers de travaux au cours des campagnes de suivi des Mammifères marins MSu3b de mars 2022 à novembre 2022 à de juin 2023 à août 2023.	25
Tableau 7 : caractéristiques des enregistreurs Sylence (RTsys).	26
Tableau 8 : caractéristiques des hydrophones HTI-99 et Colmar GP1190.	27
Tableau 9 : avantages et limites d'utilisation des hydrophones.	27
Tableau 10 : caractéristiques des C-PODs.	28
Tableau 11 : avantages et limites d'utilisation des C-PODs.	28
Tableau 12 : niveaux de bruits SPL-RMS (dB re 1µPa) dans la zone du parc au point d'enregistrement H2 au printemps 2022 lors du forage des pieux de la sous-station électrique.	33
Tableau 13 : niveaux de bruits SPL-RMS (dB re 1µPa) dans la zone témoin au point d'enregistrement H1 au printemps 2022 lors du forage des pieux de la sous-station électrique.	36
Tableau 14 : comparaison des niveaux de bruit SPL-RMS (dB re 1µPa) entre le suivi acoustique réalisé lors de l'état de référence et de la phase travaux (forage) au cours du printemps 2022.	36
Tableau 15 : empreinte acoustique du forage et rayon moyen de l'emprise géographique des niveaux sonores à partir de la source.	37
Tableau 16 : seuils de perte temporaire d'audition (TTS) et seuils de perte permanente d'audition (PTS) définis par le (National Marine Fisheries Services).	40
Tableau 17 : niveaux de bruits SPL-RMS (dB re 1µPa) dans la zone du parc au point d'enregistrement H2 lors de la préparation des sols pour les fondations gravitaires.	43
Tableau 18 : niveaux de bruits SPL-RMS (dB re 1µPa) dans la zone du parc au point d'enregistrement H2 à l'été 2022 au cours de trois ateliers de travaux.	44
Tableau 19 : niveaux de bruits SPL-RMS (dB re 1µPa) dans la zone témoin au point d'enregistrement H1 au cours de la préparation des sols pour les fondations gravitaires.	48
Tableau 20 : niveaux de bruits SPL-RMS (dB re 1µPa) dans la zone témoin au point d'enregistrement H1 au cours de trois ateliers de travaux.	50
Tableau 21 : comparaison des niveaux de bruit SPL-RMS (dB re 1µPa) entre le suivi acoustique réalisé lors de l'état de référence et les phases de travaux au cours de l'été 2022.	50
Tableau 22 : niveaux de bruits SPL-RMS (dB re 1µPa) dans la zone du parc au point d'enregistrement H2 à l'automne 2022 au cours de deux ateliers de travaux.	53
Tableau 23 : niveaux de bruits SPL-RMS (dB re 1µPa) dans la zone témoin au point d'enregistrement H1 au cours de deux ateliers de travaux.	55
Tableau 24 : comparaison des niveaux de bruit SPL-RMS (dB re 1µPa) entre le suivi acoustique réalisé au cours de l'état de référence et de la phase travaux (deux ateliers) au cours de l'automne 2022.	56

Tableau 25 : niveaux de bruits SPL-RMS (dB re 1μPa) dans la zone du parc au point d'enregistrement H2 au cours de l'installation des premières éoliennes.	58
Tableau 26 : niveaux de bruits SPL-RMS (dB re 1μPa) dans la zone témoin au point d'enregistrement H1 au cours de l'installation des premières éoliennes.	60
Tableau 27 : comparaison des niveaux de bruit SPL-RMS (dB re 1μPa) entre le suivi acoustique réalisé au cours de l'état de référence et de la phase travaux (installation des éoliennes) au cours de l'été 2023.....	61
Tableau 28 : sommes des détections (DPM) associées au Marsouin commun et aux Delphinidés au cours du suivi de la phase de construction en fonction des ateliers de travaux et des saisons.	65
Tableau 29 : moyennes mensuelles des détections (DPM) associées au Marsouin commun et aux Delphinidés au cours du suivi de la phase de construction en fonction des ateliers de travaux et des saisons dans la zone du parc aux points d'enregistrement C1 et C3.	66
Tableau 30 : moyennes mensuelles des détections (DPM) associées au Marsouin commun et aux Delphinidés au cours du suivi de la phase de construction en fonction des ateliers de travaux et des saisons dans la zone témoin au point d'enregistrement C2.	67
Tableau 31 : définition des seuils de fréquentation de la zone d'étude par les Mammifères marins..	73
Tableau 32 : échelle de fréquentation des Delphinidés et du Marsouin commun aux points d'enregistrement C1, C2 et C3 au cours du suivi en phase de construction (2022-2023) en comparaison avec l'état de référence (2019-2021).	76
Tableau 33 : synthèse des comparaisons des niveaux de bruit SPL-RMS (dB re 1μPa) entre le suivi acoustique réalisé lors de l'état de référence et le suivi en phase de construction.....	84
Tableau 34 : échelle de fréquentation des Delphinidés et du Marsouin commun aux points d'enregistrement C1, C2 et C3 au cours du suivi en phase de construction (2022-2023) en comparaison avec l'état de référence (2019-2021).	86
Tableau 35 : résumé des instructions et des recommandations (Source : projet européen AQUO). ..	88
Tableau 37 : calendrier des travaux et des périodes d'acquisition acoustique associées (MSu3 de mars 2022 à décembre 2022 et de juin 2023 à août 2023).	89
Tableau 37 : présentation du nombre de jours d'enregistrement acquis en fonction des ateliers de travaux au cours des campagnes de suivi des Mammifères marins MSu3b de mars 2022 à novembre 2022 à de juin 2023 à août 2023.	113
Tableau 38 : sommes des détections journalières (DPM/jours) associées au Marsouin commun et aux Delphinidés au cours du suivi de l'état de référence et en phase de construction en fonction des saisons et des années sur l'ensemble de la zone d'étude (zone du parc et zone témoin).....	113
Tableau 39 : sommes des détections mensuelles (DPM/mois) associées au Marsouin commun au cours du suivi de l'état de référence et en phase de construction en fonction des saisons et des années) aux points d'enregistrement C1, C2 et C3.	114
Tableau 40 : sommes des détections mensuelles (DPM/mois) associées aux Delphinidés au cours du suivi de l'état de référence et en phase de construction en fonction des saisons et des années) aux points d'enregistrement C1, C2 et C3.	115
Tableau 41 : moyennes et écarts-types des détections journalières (DPM/jours) des Delphinidés et du Marsouin commun au cours du suivi à l'état de référence (2019-2021) et en phase de construction (2022-2023) en fonction des saisons.	116
Tableau 42 : différences significatives des moyennes des détections journalières (DPM/jours) du Marsouin commun par saison au cours du suivi à l'état de référence (2019-2021) et en phase de construction (2022-2023) en fonction des saisons dans la zone du parc.	116
Tableau 43 : différences significatives des moyennes des détections journalières (DPM/jours) du Marsouin commun par saison au cours du suivi à l'état de référence (2019-2021) et en phase de construction (2022-2023) en fonction des saisons dans la zone témoin.....	117

Tableau 44 : différences significatives des moyennes des détections journalières (DPM/jours) des Delphinidés par saison au cours du suivi à l'état de référence (2019-2021) et en phase de construction (2022-2023) en fonction des saisons dans la zone du parc.	117
Tableau 45 : différences significatives des moyennes des détections journalières (DPM/jours) des Delphinidés par saison au cours du suivi à l'état de référence (2019-2021) et en phase de construction (2022-2023) en fonction des saisons dans la zone témoin.	118
Tableau 46 : degrés de significativité des variables environnementales lissés sur l'activité bioacoustique du Marsouin commun.	120
Tableau 47 : degrés de significativité des variables environnementales lissés sur l'activité bioacoustique des Delphinidés.	121
Tableau 48 : résultats de l'analyse ANOVA multifactorielle pour le Marsouin commun. Les astérisques indiquent le niveau de significativité du facteur par rapport à la probabilité critique.	122
Tableau 49 : coefficients paramétriques analysés pour le Marsouin commun.	122
Tableau 50 : résultats de l'analyse ANOVA multifactorielle pour les Delphinidés. Les astérisques indiquent le niveau de significativité du facteur par rapport à la probabilité critique.	122
Tableau 51 : coefficients des effets paramétriques analysés pour les Delphinidés.	122