

Suivi en phase d'exploitation du parc éolien en mer de Saint-Nazaire

Suivi du bruit sous-marin
et des mammifères marins (MSU8)



Société d'Observation Multi-Modale de l'Environnement

20/08/2025





Rapport élaboré le 20/08/2025, à l'attention de :

Nathalie TERTRE
Cheffe de projet Environnement
Nathalie.Tertre@edf-re.fr

Suivi de rédaction :

Version	Date	Description	Réalisé par	Vérifié par
1	09/10/2023	Version initiale	Elie Retailleau (SOMME)	Delphine Mathias (SOMME)
2	09/02/2024	Mise à jour du rapport à la suite de la relecture de Nathalie Tertre	Elie Retailleau et Gaëtan Richard (SOMME)	Delphine Mathias (SOMME)
3	15/04/2024	Mise à jour à la suite du retour des experts du 1 ^{er} CTE	Elie Retailleau et Gaëtan Richard (SOMME)	Delphine Mathias (SOMME)
4	31/10/2024	Ajout analyse Hiver 2024	Gaëtan Richard (SOMME)	Elie Retailleau (SOMME)
5	12/02/2025	Mise à jour du rapport à la suite de la relecture de Nathalie Tertre, et ajout caractérisation bruit éolienne	Gaëtan Richard (SOMME)	Elie Retailleau (SOMME)
6	14/03/2025	Mise à jour du rapport à la suite de la relecture de Nathalie Tertre, et ajout cartes d'émergence acoustique	Gaëtan Richard (SOMME)	Delphine Mathias (SOMME)
7	24/04/2025	Mise à jour du rapport à la suite de la relecture de Nathalie Tertre	Gaëtan Richard (SOMME)	Delphine Mathias (SOMME)
8	20/08/2025	Mise à jour à la suite du retour des experts du 2 ^e CTE	Gaëtan Richard (SOMME)	Delphine Mathias (SOMME)

Contacts :

SOMME - Société d'Observation Multi-Modale de l'Environnement
Siège social : 5 rue de l'Europe, ZA Kénéah Nord, 56400 Plougoumelen, France
Antenne brestoise : 300 rue Pierre Rivoalon, Technopôle Brest-Iroise, 29200 Brest.

Delphine Mathias, Chargée d'études et cheffe de projet : mathias.somme@orange.fr
Sylvain Chauvaud, Gérant : s.chauvaud@tbm-environnement.com





Ce rapport présente les résultats du suivi acoustique du bruit ambiant et des mammifères marins réalisé dans le cadre du suivi en phase d'exploitation du parc éolien en mer de Saint-Nazaire (MSU8).

Ce document est la propriété de la société Parc du Banc de Guérande (PBG), société de projet exploitant le parc éolien en mer de Saint Nazaire pour le compte du consortium composé de EDF Renouvelables et de Maple Power (actionnaires à 50 %).

La méthode appliquée dans cette étude est le fruit de l'activité de recherche et développement menée par le bureau d'étude SOMME.

Toute diffusion de ce rapport doit se faire en accord avec SOMME et PBG.

Citation :

Richard G., Retailleau E., Mathias D. (2025). Suivi par acoustique passive du bruit ambiant et de la fréquentation des mammifères marins dans le cadre du suivi en phase d'exploitation du parc éolien en mer de Saint-Nazaire (période été 2023-hiver 2024). Bureau d'études SOMME, Brest, France.



Table des matières

Table des matières	V
Liste des figures	VII
Liste des tableaux	XI
Abréviations et définitions	XII
1 Introduction : présentation du contexte de l'étude	1
2 Notions théoriques en acoustique sous-marine	3
2.1 QU'EST-CE QU'UN SON ?	3
2.2 LES NIVEAUX SONORES	4
2.2.1 Grandeurs physiques.....	4
2.2.2 Les décibels.....	4
2.2.3 Métriques utilisées pour décrire un son	4
2.2.4 Niveaux à la source	5
2.3 COMMENT REPRESENTER UN SON.....	6
2.4 LA PROPAGATION ACOUSTIQUE.....	6
2.4.1 Les modèles simplifiés.....	7
2.4.2 Les modèles complexes	7
2.5 LE PAYSAGE SONORE	8
2.6 LES SUIVIS DES MAMMIFERES MARINS PAR ACOUSTIQUE PASSIVE	9
2.6.1 Production sonore des dauphins communs et grands dauphins	9
2.6.2 Production sonore des marsouins.....	12
3 Matériel et méthodes	14
3.1 ÉQUIPE INTERVENANTE	14
3.1.1 SOMME.....	14
3.1.2 Moyen nautique.....	14
3.2 STATION DE MESURE ACOUSTIQUE.....	14
3.2.1 Système d'acquisition acoustique large bande	14
3.2.2 Méthode de déploiement	16
3.3 LOCALISATION DES STATIONS ACOUSTIQUES ET PERIODES SUIVIES.....	17
3.4 TRAITEMENT ET ANALYSE DES DONNEES	19
3.4.1 Conversion des données	19
3.4.2 Caractérisation du bruit ambiant	19
3.4.3 Étude de la fréquentation en cétacés de l'aire d'étude	24
4 Résultats	30
4.1 DONNEES ACQUISES.....	30
4.2 DESCRIPTION GENERALE DU BRUIT AMBIANT	30
4.3 CONTRIBUTION DES ACTIVITES ANTHROPIQUES	38
4.3.1 Trafic maritime	38
4.3.2 Bruit généré par les éoliennes en fonctionnement	41
4.4 CONTRIBUTION DES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES	49
4.4.1 Influence du vent	49
4.4.2 Influence de la houle	52
4.5 CYCLE ACOUSTIQUE ET ACTIVITE BIOLOGIQUE	56
4.6 FREQUENTATION DE L' AIRE D' ETUDE PAR LES CETACES.....	61
4.6.1 Présence de delphinidés	61
4.6.2 Présence des marsouins	69
5 Interprétation des résultats et discussion	74



5.1	LES DIFFERENTS CONTRIBUTEURS AU PAYSAGE ACOUSTIQUE.....	74
5.1.1	<i>Le parc éolien</i>	74
5.1.2	<i>Le trafic maritime</i>	76
5.1.3	<i>Le vent</i>	76
5.1.4	<i>La houle</i>	77
5.1.5	<i>La faune benthique</i>	77
5.1.6	<i>Comparaison avec les suivis précédents</i>	79
5.1.7	<i>Bilan sur le paysage sonore du parc éolien en fonctionnement</i>	82
5.2	FREQUENTATION DE LA ZONE PAR LES CETACES.....	84
5.2.1	<i>Delphinidés</i>	84
5.2.2	<i>Marsouins</i>	86
5.2.3	<i>Limites du suivi acoustique des cétacés</i>	90
5.2.4	<i>Bilan sur la fréquentation de la zone par les mammifères marins</i>	91
6	Conclusion	92
7	Bibliographie	94
8	Annexes	99
8.1	CARACTERISATION DU BRUIT GENERE PAR UNE EOLIENNE EN FONCTIONNEMENT.....	99
8.1.1	<i>Contexte</i>	99
8.1.2	<i>Caractéristiques des éoliennes étudiées</i>	101
8.1.3	<i>Stations de mesures</i>	101
8.1.4	<i>Traitement et analyse des données</i>	102
8.1.5	<i>Résultats</i>	104
8.1.6	<i>Interprétation des résultats</i>	116
8.1.7	<i>Conclusion</i>	118
8.2	EMERGENCE ACOUSTIQUES DU PARC EOLIEN.....	118
8.2.1	<i>Description générale de la méthodologie</i>	118
8.2.2	<i>Cartographie des niveaux reçus et émergence acoustique du parc</i>	123
8.2.3	<i>Zones d'impacts potentiels par groupe de mammifères marins</i>	127
8.3	MAMMIFERES MARINS.....	134
8.3.1	<i>Détermination des évènements de présence acoustique</i>	134
8.3.2	<i>Résultats des fréquentations par les cétacés obtenus avec un cycle continu</i>	137
8.3.3	<i>Cartes de densités des delphinidés et marsouins</i>	149
8.4	PROTOCOLE DE SUIVI EN PHASE D'EXPLOITATION.....	152



Liste des figures

Figure 1. Chaîne de transmission acoustique d'une source vers un récepteur (Chauvaud, S., Chauvaud, L., & Jolivet, A., 2018; Bonnel, J., Chauvaud, S., Chauvaud, L., Mars, J., Mathias, D., & Frédéric, O., 2022).	3
Figure 2. Représentations graphiques pour décrire un signal acoustique. L'exemple ici représente deux tonales à 50 et 100 Hz.	6
Figure 3. Les différentes sources sonores constituant les paysages acoustiques.	8
Figure 4. Spectrogrammes de sifflements émis par des dauphins communs. Extrait de Soldevilla et al., 2008	10
Figure 5. Spectrogramme (a), oscillogramme (b) et spectre acoustique (c) de clics émis par un dauphin commun. Figure réalisée à partir de données fournies par Papale et al., 2015.	11
Figure 6. Spectrogramme (a), oscillogramme (b) et spectre acoustique (c) de clics émis par un marsouin commun. Figure réalisée à partir de données internes à SOMME.	12
Figure 7. Système d'acquisition acoustique large bande (enregistreur et hydrophone) positionné sur un mouillage de sub-surface et prêt à être déployé (Source : SOMME).	15
Figure 8. Schéma du mouillage utilisé.	16
Figure 9. Localisations des stations acoustiques.	17
Figure 10 : Différentes métriques utilisées pour évaluer les niveaux de bruit.	19
Figure 11. Capture d'écran de l'interface PAMGuard incluant les modules de détection de clics (flèches noires) et de sifflements (WMD ; courbes bleues).	25
Figure 12. Exemples des spectrogrammes de bonnes et fausses détections (de dauphin à gauche et marsouin à droite) classées par l'algorithme d'intelligence artificielle puis vérifiées par un acousticien SOMME.	26
Figure 13. Exemple d'un spectrogramme d'une minute sur la bande de fréquence 1 à 40 kHz, avec présence de buzzes de dauphins.	27
Figure 14. Schéma d'un diagramme en violon en comparaison avec un diagramme en boîte (boxplot).	29
Figure 15. Suivi temporel des niveaux de bruit ambiant SPL_{rms} par station en été 2023. Les points rouges correspondent aux passages de navire détectés.	31
Figure 16. Suivi temporel des niveaux de bruit ambiant SPL_{rms} par station en hiver 2024. Les points rouges correspondent aux passages de navire détectés.	32
Figure 17. Distribution statistique des niveaux sonores SPL_{rms} (dB re 1 μPa) et larges bandes (intégrés dans les gammes de fréquences 10-30 Hz, 10-250 Hz, 100-1000 Hz, 5600-7100 Hz et 20-40000 Hz ; dB re 1 μPa^2) enregistrés pour chaque station lors de la période estivale 2023.	33
Figure 18. Distribution statistique des niveaux sonores SPL_{rms} (dB re 1 μPa) et larges bandes (intégrés dans les gammes de fréquences 10-30 Hz, 10-250 Hz, 100-1000 Hz, 5600-7100 Hz et 20-40000 Hz ; dB re 1 μPa^2) enregistrés pour chaque station lors de la période hivernale 2024.	34
Figure 19. Spectres médians du bruit ambiant enregistrés au sein de chaque station l'été 2023.	35
Figure 20. Spectres médians du bruit ambiant enregistrés au sein de chaque station en hiver 2024.	36
Figure 21. Spectrogramme long terme calculé sur une période d'une semaine enregistrée par la station S1.	37
Figure 22. Spectrogramme d'un passage de navire enregistré par la station MB.	39
Figure 23. Spectrogramme montrant des signaux générés par une manœuvre de "boat landing" et un passage de navire, enregistré au niveau de la station S1.	39
Figure 24. Spectre acoustique du "boat landing" et du passage de navire visible sur la Figure 23. L'excès de signal généré par ces activités par rapport au bruit ambiant (Figure 23) est présenté en dessous de chaque spectre.	40
Figure 25. Excès de signal enregistré au niveau des stations situées dans ou à proximité directe du parc par rapport au bruit ambiant enregistré au niveau de la station témoin SW (située en dehors du parc).	41
Figure 26. Excès de signal enregistré au niveau des stations situées dans ou à proximité directe du parc par rapport au bruit ambiant enregistré au niveau de la station témoin SW (située en dehors du parc).	42
Figure 27. Relation entre la vitesse du vent, la vitesse de rotation des pales de l'éolienne F1 (rpm : rotation par minute) et le niveau de vibration moyen de son mât en été 2023 (ligne du haut) et en hiver 2024 (ligne du bas).	43
Figure 28. Relation entre les niveaux de bruit reçus dans la bande de fréquence 10-250 Hz et la vitesse de rotation (rpm) de l'éolienne la plus proche pour chaque station (r est la distance station – éolienne) l'été 2023. Les périodes avec une houle supérieure à 1.5m n'ont pas été prises en compte.	44
Figure 29. Relation entre les niveaux de bruit reçus dans la bande de fréquence 10-250 Hz et la vitesse de rotation (rpm) de l'éolienne la plus proche pour chaque station (r est la distance station – éolienne) en hiver 2024. Les périodes avec une houle supérieure à 1.5m n'ont pas été prises en compte.	45
Figure 30. Estimation des pertes de propagation via la régression linéaire entre les niveaux de bruit mesurés dans la bande 10-250 Hz et la distance (en logarithme) de l'éolienne la plus proche aux stations (avec une houle <1m, pour deux régimes de vitesses de rotations. Les points rouges représentent les stations utilisées pour l'estimation de la régression linéaire (S1, S2, S3, NW et SE) tandis que les points noirs représentent les stations plus éloignées du parc (SW et MB) utilisés dans l'estimation de l'intervalle de bruit ambiant, représenté par le bandeau gris. La droite noire représente le niveau moyen de bruit ambiant mesuré sur toutes les stations.	46



Figure 31. Régression linéaire entre la vitesse du vent (m/s) et les niveaux médians SPL_{rms} estimés sur les quatre stations : MB, NW, SW et SE lors du suivi estival (2023).	49
Figure 32. Régression linéaire entre la vitesse du vent (m/s) et les niveaux médians SPL_{rms} estimés sur les quatre stations : MB, NW, SW et SE lors du suivi hivernal (2024).	50
Figure 33. Spectres médians du bruit enregistré en été 2023 au sein des stations SW et MB en fonction des conditions de vents (échelle de Beaufort). La deuxième ligne de figures montre l'excès de signal généré par un vent fraîchissant de 1 à 6 Bfs.	50
Figure 34. Spectres médians du bruit enregistré en hiver 2024 au sein des stations SW et MB en fonction des conditions de vents (échelle de Beaufort). La deuxième ligne de figures montre l'excès de signal généré par un vent fraîchissant de 1 à 4 Bfs.	51
Figure 35. Régression linéaire entre la hauteur de la houle (m) et les niveaux médians SPL_{rms} estimés sur les quatre stations : MB, NW, SW et SE lors du suivi estival (2023).	52
Figure 36. Régression linéaire entre la vitesse du vent (m/s) et les niveaux médians SPL_{rms} estimés sur les quatre stations : MB, NW, SW et SE lors du suivi hivernal (2024).	53
Figure 37. Spectres médians du bruit enregistré au sein des stations l'été 2023, en fonction des conditions de houle.	54
Figure 38. Spectres médians du bruit enregistré au sein des stations en hiver 2024, en fonction des conditions de houle.	55
Figure 39. Périodogrammes de Lomb-Scargle calculés pour chaque station en été 2023, sur les séries temporelles des niveaux sonores reçus dans la bande de fréquence correspondant au tiers d'octave centrée autour de 6 kHz ($SPL_{5,6-7,1kHz}$). Les bandes vertes indiquent les périodes égales à des cycles de 6, 12 et 24h.	57
Figure 40. Périodogrammes de Lomb-Scargle calculés pour chaque station en hiver 2024, sur les séries temporelles des niveaux sonores reçus dans la bande de fréquence correspondant au tiers d'octave centrée autour de 6 kHz ($SPL_{5,6-7,1kHz}$). Les bandes vertes indiquent les périodes égales à des cycles de 6, 12 et 24h.	58
Figure 41. Niveaux de bruit enregistrés dans la bande de tiers d'octave centrée autour de 6 kHz en fonction des heures de la journée pour chaque station lors de la période estivale 2023.	59
Figure 42. Niveaux de bruit enregistrés dans la bande de tiers d'octave centrée autour de 6 kHz en fonction des heures de la journée pour chaque station lors de la période hivernale 2024.	60
Figure 43. Spectrogrammes de vocalises de delphinidés incluant des (a) sifflements enregistrés sur la station SE le 10 août 2023 (12h17) et (b) des clics d'écholocation (dont des « buzzes ») enregistrés sur la station du MB le 19 août 2023 (16h10). Les figures c et d représentent respectivement un oscillogramme (c) et un spectre de puissance (d) d'un buzz.	61
Figure 44. Occurrences des présences acoustiques de delphinidés en été sur les 4 stations représentées par le nombre d'heures positives par jour (diagrammes en barre) et de la répartition horaire de détection de sifflements et de buzzes (diagrammes en rosace, heures positives).	63
Figure 45. Occurrences des présences acoustiques de delphinidés en hiver sur les 4 stations représentées par le nombre d'heures positives par jour (diagrammes en barre) et de la répartition horaire de détection de sifflements et de buzzes (diagrammes en rosace, heures positives).	64
Figure 46. Comparaison du nombre d'évènements de présence acoustique des delphinidés par heures d'enregistrement entre les stations en été, pour les 3 différentes périodes journalières : Jour, Nuit et Aube - Crépuscule.	66
Figure 47. Densités de probabilité des pourcentages de minutes positives avec présence de buzzes (rouge) et avec présence de sifflements (bleu), représentées sous forme de diagrammes en violon par station. Ces diagrammes permettent de décrire la distribution des pourcentages de minutes positives par évènement de présence, ainsi une augmentation des courbes révèlent donc une augmentation de la probabilité d'observer ces valeurs.	68
Figure 48. Spectrogramme (a) d'un train de clics de marsouin enregistré sur la station du Mor Braz le 9 août 2023 (22h46). Les figures b et c présentent respectivement un oscillogramme (b) et un spectre (c) d'un clic.	69
Figure 49. Occurrence des clics de marsouins sur les deux stations révélant des présences en été (le graphique en barre représente le nombre d'heures positives par jour au cours du suivi et les diagrammes en rosace, la répartition horaire de ces heures positives).	71
Figure 50. Occurrence des clics de marsouins sur les deux stations révélant des présences en hiver (le graphique en barre représente le nombre d'heures positives par jour au cours du suivi et les diagrammes en rosace, la répartition horaire de ces heures positives).	71
Figure 51. Comparaison entre les stations du nombre d'évènements de présence acoustique des marsouins par heures d'enregistrement, pour les 3 différentes périodes journalières : Jour, Nuit et Aube - Crépuscule.	73
Figure 52. Cartographie des habitats benthiques référencés dans la zone d'étude réalisée lors de l'étude d'impact du projet.	78
Figure 53. Comparaison des spectres de bruit ambiant relevés en été et en hiver lors de l'état de référence et des phases de construction et d'exploitation.	81
Figure 54. Comparaison du bruit ambiant médian reçu au niveaux des stations NW, SW, SE et MB avec les audiogrammes des cétacés basse fréquence (LF), moyenne fréquence (MF) et haute fréquence (HF).	83
Figure 55. Comparaison des bandes de fréquences associées aux différentes sources sonores identifiées lors de ce suivi avec les gammes d'audition de divers groupes d'espèces marines (figure dérivée de Bonnel et al. 2022.	93
Figure 56. Schéma des mécanismes du bruit sous-marin généré par une éolienne offshore issu de Betke (2004).	100



Figure 57. Caractéristiques des éoliennes implantées sur le parc éolien en mer de St Nazaire.	101
Figure 58. Schéma et localisation de stations de mesures déployées autour de l'éolienne F01.	102
Figure 59. Spectrogramme du bruit généré par les éoliennes en fonctionnement, enregistré sur S1 en été 2023, lors de fortes conditions de vent.	104
Figure 60. Spectrogramme du bruit généré par les éoliennes en fonctionnement, enregistré sur S1 en été 2023 lors de conditions de vent variables.	104
Figure 61. Spectres médians du bruit reçus à 75 et 750m de l'éolienne F01 en fonction de la vitesse de rotation de ses pales lors des deux campagnes de mesures réalisées.	106
Figure 62. Niveaux sonores médians reçus (RL) dans la bande de fréquence 10-250Hz (SPL10-250Hz), enregistrés en été 2023 (A) et hiver 2024 (B) au niveau des stations S1 et S2, en fonction de la vitesse de rotation de l'éolienne F01. Les lignes pointillées indiquent les niveaux de bruit ambiant enregistrés lorsque l'éolienne F01 ne tourne pas.	108
Figure 63. Estimation des niveaux sources générés par l'éolienne F01 à partir des régressions linéaires (Figure 30) et des données acquises sur les stations S1, S2 et NW, en fonction de la vitesse de rotation des pales de l'éolienne F01. La courbe noir représente la moyenne des 3 estimations du niveau source pour F01.....	109
Figure 64. Excès de signal enregistré au-dessus du bruit ambiant (éolienne F01 à l'arrêt) au niveau de la station S1, située à 75m de l'éolienne F01 en fonction de la vitesse de rotation des pales en été 2023. L'excès de signal est estimé par rapport au bruit ambiant en prenant en compte deux catégories de conditions de mer : 1-3 Bfs (en vert), 4-6 Bfs (en gris). Les conditions de vent et de houle correspondantes sont présentées par des diagrammes à moustache.	111
Figure 65. Excès de signal enregistré au-dessus du bruit ambiant (éolienne F01 à l'arrêt) au niveau de la station S2, située à 750m de l'éolienne F01 en fonction de la vitesse de rotation des pales en été 2023. L'excès de signal est estimé par rapport au bruit ambiant en prenant en compte deux catégories de conditions de mer : 1-3 Bfs (en vert), 4-6 Bfs (en gris). Les conditions de vent et de houle correspondantes sont présentées par des diagrammes à moustache.	112
Figure 66. Excès de signal enregistré au-dessus du bruit ambiant (éolienne F01 à l'arrêt) au niveau de la station S1, située à 75m de l'éolienne F01 en fonction de la vitesse de rotation des pales en hiver 2024. L'excès de signal est estimé par rapport au bruit ambiant en prenant en compte deux catégories de conditions de mer : 1-3 Bfs (en vert), 4-6 Bfs (en gris). Les conditions de vent et de houle correspondantes sont présentées par des diagrammes à moustache.	113
Figure 67. Excès de signal enregistré au-dessus du bruit ambiant (éolienne F01 à l'arrêt) au niveau de la station S2, située à 750m de l'éolienne F01 en fonction de la vitesse de rotation des pales en hiver 2024. L'excès de signal est estimé par rapport au bruit ambiant en prenant en compte deux catégories de conditions de mer : 1-3 Bfs (en vert), 4-6 Bfs (en gris). Les conditions de vent et de houle correspondantes sont présentées par des diagrammes à moustache.	114
Figure 68. Excès de signal, enregistré au niveau de la station S1, au-dessus du bruit ambiant en fonction de la vitesse de rotation des pales de l'éolienne F01. Le bruit ambiant considéré pour calculer l'excès de signal, est le bruit enregistré au niveau de la station témoin SW sur la même période.	115
Figure 69 : Forme des fonctions de pondération pour les 6 groupes fonctionnels de mammifères marins présentes selon NMFS (2018) et Southall et al. (2019), avec la bande de fréquence de la signature acoustique du parc éolien en gris clair. Adapté de Bonnel et al., 2022.	120
Figure 70 : Zones de risque d'impact acoustique	122
Figure 71 : Détermination de l'audibilité d'un signal représenté par une tonale en rouge vis-à-vis de l'audiogramme d'une espèce cible en vert et de son rapport critique (CR) avec un certain niveau de bruit ambiant représenté par sa DSP en bleue. Adapté de Erbe et al., 2016.	122
Figure 72. Exemple de séquences de détections de sons de delphinidés au cours du temps et détermination de 3 événements de présence basé sur un intervalle inter-détection de 10 min (Figure 73).	134
Figure 73. Fréquence des intervalles (minutes) inter-détections de sifflements de dauphins sur le cycle en continue.	135
Figure 74. Fréquence des intervalles (minutes) inter-détections de sifflements de dauphins sur le cycle à 30 %.	136
Figure 75. Occurrences des présences acoustiques de dauphins sur les 4 stations en été (2023) représentées par le nombre d'heures positives par jour (diagrammes bars) et de la répartition horaire de détection de vocalises et de buzzes (diagrammes en rosace, heures positives), obtenues avec un cycle d'enregistrement continu.....	140
Figure 76. Occurrences des présences acoustiques de dauphins sur les 4 stations en hiver (2024) représentées par le nombre d'heures positives par jour (diagrammes bars) et de la répartition horaire de détection de vocalises et de buzzes (diagrammes en rosace, heures positives), obtenues avec un cycle d'enregistrement continu.....	141
Figure 77. Comparaison entre les stations du nombre d'événements de présence acoustique (obtenues avec un cycle continue) de delphinidés par heures d'enregistrement, pour les 3 différentes périodes journalières : Jour, Nuit et Aube - Crépuscule.	144
Figure 78. Densités de probabilité des pourcentages de minutes positives avec présence de buzzes (rouge) et avec présence de sifflements (bleu), représentées sous forme de diagrammes en violon par station, et obtenues avec un cycle d'enregistrement continu. Ces diagrammes permettent de décrire la distribution des pourcentages de minutes positives par événement de présence, ainsi une augmentation des courbes révèle donc une augmentation de la probabilité d'observer ces valeurs.	145
Figure 79. Occurrence des clics de marsouins obtenues l'été (2023) sur les deux stations révélant des présences (le graphique en barre représente le nombre d'heures positives par jour au cours du suivi et les diagrammes en rosace, la répartition horaire de ces heures positives).	146



Figure 80. Occurrence des clics de marsouins obtenues en hiver (2024) sur les quatre stations (le graphique en barre représente le nombre d'heures positives par jour au cours du suivi et les diagrammes en rosace, la répartition horaire de ces heures positives).....	146
Figure 81. Comparaison entre les stations du nombre d'évènements de présence acoustique (obtenues avec un cycle continue) des marsouins par heures d'enregistrement, pour les 3 différentes périodes journalières : Jour, Nuit et Aube - Crépuscule.	148
Figure 82. Densités des grands dauphins en hiver (à gauche) et en été (à droite). Cartes issues de l'analyse bibliographique environnementale du projet d'éoliennes flottantes au sud de la Bretagne, TBM Environnement, 2020.	149
Figure 83. Densités des petits delphinidés (dauphins communs et dauphins bleu et blanc) en hiver (à gauche) et en été (à droite). Cartes issues de l'analyse bibliographique environnementale du projet d'éoliennes flottantes au sud de la Bretagne, TBM Environnement, 2020.	150
Figure 84. Densités des marsouins communs en hiver (à gauche) et en été (à droite). Cartes issues de l'analyse bibliographique environnementale du projet d'éoliennes flottantes au sud de la Bretagne, TBM Environnement, 2020.	151



Liste des tableaux

Tableau 1. Récapitulatif des études et réunions menées sur les composantes environnementales bruit et mammifères marins depuis l'Etat Initial dans le cadre du projet de parc éolien du banc de Guérande (source : EDF-RE).....	2
Tableau 2. Résumé des différentes métriques utilisées pour décrire les niveaux sonores.....	5
Tableau 3. Caractéristiques des stations déployées dans le cadre de ce suivi (les lignes grisées correspondent aux stations additionnelles utilisées pour caractériser le bruit des éoliennes en fonctionnement).	18
Tableau 4. Fréquences centrales et bornes des bandes de tiers d'octaves utilisées dans cette étude.	20
Tableau 5. Paramètres utilisés pour les détecteurs de sifflement des delphinidés (WMD).....	25
Tableau 6. Paramètres utilisés pour les détecteurs de clics de marsouins (CD).	25
Tableau 7. Définition de la fréquentation par les mammifères marins (Chompret et al., 2019 ; 2022).....	28
Tableau 8. Résumé du nombre de détection de passages de navires par station.....	38
Tableau 9 : Distance d'émergence acoustique d'une éolienne en fonctionnement.....	47
Tableau 10. Résumé des détections de delphinidés (avec un cycle d'acquisition de 30 %, voir Annexe 8.3.2.1 pour les résultats avec un cycle continu).	65
Tableau 11. Résumé des détections de marsouins (avec un cycle d'acquisition de 30 %, voir Annexe 8.3.2.2 pour les résultats avec un cycle continu).....	72
Tableau 12. Comparaison des niveaux sonores (SPL _{20-40000Hz}) enregistrés au sein des stations NW, SE, SW et MB (les distances indiquées correspondent aux distances séparant les stations des éoliennes les plus proches) avec ceux relevés lors de l'état de référence et la phase de construction (ce tableau présente les niveaux de bruit médians ainsi que les premiers et troisièmes quartiles associés).....	80
Tableau 13. Synthèse et comparaison des fréquentations des stations par les mammifères marins observées en saison estivale durant l'état de référence (été 2019), la phase de construction (été 2021 et été 2022) et durant la phase d'exploitation (été 2023) du parc éolien en mer du banc de Guérande.	88
Tableau 14. Synthèse et comparaison des fréquentations des stations par les mammifères marins observées en saison hivernale durant l'état de référence (hiver 2020), la phase de construction (hiver 2022) et durant la phase d'exploitation (été 2023) du parc éolien en mer du banc de Guérande.	89
Tableau 15 : Seuils utilisés pour identifier les risques d'impact des travaux produisant des sons continus (ex : navire). Ils sont définis par NMFS (2018) et Southall et al. (2019) à l'exception (1) du seuil pour un changement comportemental issu de Southall et al. 2007 et (2) du seuil pour l'audibilité qui correspond au bruit ambiant défini par l'état initial acoustique du projet.	119
Tableau 16 : Emergence acoustique du parc éolien en fonctionnement.	124
Tableau 17. Résumé des émergences acoustiques (selon définition section 8.2.1) pour 100% des éoliennes en rotation....	128
Tableau 18. Résumé des détections de delphinidés (avec un cycle d'acquisition de continu).	142
Tableau 19. Résumé des détections de marsouins (avec un cycle d'acquisition de 100 %).	147



Abréviations et définitions

Abréviation	Définition
Clics NBHF	Clics "Narrow Band High Frequency", clics d'écholocation émis par les marsouins. Ces signaux sont caractérisés par une bande de fréquence haute et étroite (100 à 150 kHz).
CTV	« Crew Transfer Vessel », navires de transport de passagers dédiés aux opérations et à la maintenance d'un parc éolien en mer.
DSP	« Densité Spectrale de Puissance », répartition fréquentielle de la puissance d'un signal suivant les fréquences qui le composent (permet d'établir un spectre acoustique).
Octaves et Tiers d'octaves	Les bandes d'octave sont des bandes de l'échelle des fréquences spécifiques permettant une analyse simplifiée d'un bruit. Une octave peut être subdivisée en trois tiers d'octave.
PBG	Acronyme pour la société "Parc du Banc de Guérande" : société le parc éolien en mer de Saint Nazaire pour le compte du consortium composé de EDF Renouvelables et de Mapple Power
Percentile	Un percentile est l'une des 99 valeurs qui partitionnent une distribution de données en 100 segments égaux, de sorte que le $p^{ième}$ percentile correspond à la valeur dépassant p % des autres données.
RL	« Received Level » : niveau sonore reçu.
SE	« Signal Excess » : excès de signal généré par une source de bruit par rapport au bruit ambiant. Cette métrique décrit l'émergence acoustique d'une source sonore dans le bruit ambiant.
Sifflements	Signaux sonores de communication émis par les delphinidés.
SL (Niveau sonore source)	« Source Level » : niveau sonore reçu à 1 m d'une source de bruit. Les niveaux sources sont estimés à partir du bruit reçu à une certaine distance de la source et des pertes de propagation acoustique dans le milieu.
SOV	« Support Offshore Vessel », navire d'assistance aux travaux maritimes opérant en 24/7
SPL	« Sound Pressure Level » : niveau de pression acoustique.
TL	« Transmission Loss » : perte de transmission acoustique.



1 Introduction : présentation du contexte de l'étude

Le parc éolien en mer de Saint-Nazaire est entré en exploitation en novembre 2022, devenant le premier parc éolien offshore en fonctionnement sur le littoral métropolitain français. Son exploitation est portée par la société Parc du Banc de Guérande (PBG), pour le compte du consortium composé de EDF Renouvelables et de Maple Power. La société PBG bénéficie d'un arrêté autorisant l'aménagement et l'exploitation de ce parc éolien offshore, depuis le 17 mars 2016 et au titre de l'article L214-3 du code de l'environnement. L'article 2.5 de cet arrêté décrit les suivis environnementaux à réaliser pour évaluer les effets du projet sur l'environnement, dont le bruit sous-marin et les mammifères marins. Selon le principe Before-After-Control-Impact (BACI), ces suivis sont réalisés avant, pendant et après les travaux d'installation du projet éolien, c'est à dire pendant la phase d'exploitation du parc éolien pour cette troisième phase.

Cette étude acoustique s'inscrit dans le cadre du suivi (MSU8) en phase d'exploitation du parc éolien en mer de Saint Nazaire. Ce rapport vient compléter les informations acquises lors des précédentes études environnementales (Tableau 1), dont l'état initial de l'étude d'impact environnemental du projet (2014), l'état de référence (2019/2020) et les suivis en phase de construction (2021/2022).

Les objectifs de ce suivi sont :

- d'évaluer l'impact du bruit du parc éolien sur le bruit ambiant ;
- de suivre la fréquentation de la zone par les mammifères marins dans le contexte de l'existence d'un parc éolien en fonctionnement.



Tableau 1. Récapitulatif des études et réunions menées sur les composantes environnementales bruit et mammifères marins depuis l'Etat Initial dans le cadre du projet de parc éolien du banc de Guérande (source : EDF-RE).

Date	Jalon – Rapport
2014	Etude d'impact acoustique du parc éolien en mer de St Nazaire
2015	Etude d'Impact Environnementale, incluant :
	- Identification des impacts au regard des travaux prévus
	- Mesures de réduction d'impact en phase travaux
	- Proposition de mesures de suivi environnemental
Mars 2016	Arrêté préfectoral autorisant le projet de parc éolien en mer de Saint Nazaire, incluant la liste des mesures environnementales et de suivi à mettre en œuvre tout au long de la vie du projet
Aout 2019	Protocoles d'état de référence validé en CTE
Septembre 2020	Réunion scientifique et technique avec les membres du CTE pour présentation des résultats du suivi en Etat de Référence
Novembre 2020	CTE n°5 :
	- mesures de réduction de l'impact du bruit des travaux sur les mammifères marins (MR6 - 7) et mesure de surveillance (MSU7)
	- protocole de suivi du bruit et des mammifères marins (MSU8) en phase de construction
Septembre 2021	Réunion scientifique et technique avec les membres du CTE pour échanger sur la mise en œuvre des mesures de réduction et de suivi en phase de construction
Décembre 2022	Réception du rapport opérationnel d'exécution des mesures MR6 - MR7 et MSU7
Avril 2023	Réunion scientifique et technique avec les membres du CTE pour échanger sur le rapport de suivi en phase de construction
Juin 2023	CTE n°10 :
	- réception de l'étude MSU8 – suivi en phase de construction
	- réception du protocole de suivi MSU8 en phase d'exploitation (fiche Protocole en annexe)
Avril 2024	Réunion scientifique et technique avec les membres du CTE pour échanger sur le rapport de la première campagne de suivi en phase d'exploitation (campagne été 2023)
Septembre 2024	CTE n°11 : présentation du rapport de la première campagne de suivi en phase d'exploitation (campagne été 2023)
Date	Prochaines échéances
2 ^{ème} trimestre 2025 (date à confirmer)	Réunion scientifique et technique avec les membres du CTE pour échanger sur le rapport de la deuxième campagne de suivi en phase d'exploitation (campagne hiver 2024)

2 Notions théoriques en acoustique sous-marine

2.1 Qu'est-ce qu'un son ?

Les sons se définissent comme des phénomènes ondulatoires qui résultent de la vibration des molécules mises en mouvement par une perturbation mécanique. Lorsqu'un son est produit, il se caractérise par son niveau sonore à la source, noté ci-après SL (*Source Level*), sa durée, sa fréquence et sa directivité. Cette émission sonore se propage de la source vers le récepteur par compressions-dépressions successives des molécules d'eau sur les molécules voisines à une vitesse proche de 1500 m/s. Cette onde de compression se propage au travers du milieu physique constituée de la colonne d'eau, de la surface et du fond qui forment un canal de propagation souvent complexe. Cette propagation en milieu aqueux atténue le niveau sonore émis d'une certaine proportion appelée pertes de transmission (ou pertes de propagation, noté TL) qui dépend des propriétés océano-acoustiques du canal, des positions de la source et du récepteur et des fréquences émises. Ainsi, au niveau d'un récepteur, une onde sera caractérisée, après propagation de sa source d'émission par un niveau sonore reçu, noté ci-après RL (*Received Level*).

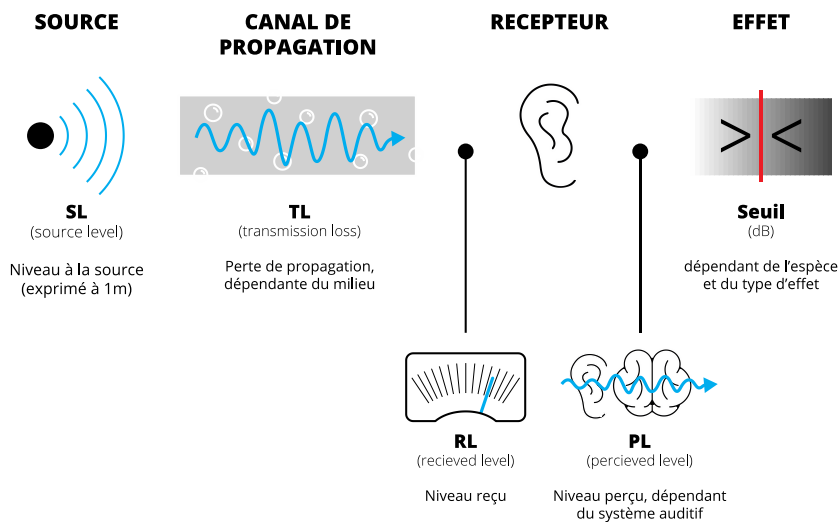


Figure 1. Chaîne de transmission acoustique d'une source vers un récepteur (Chauvaud, S., Chauvaud, L., & Jolivet, A., 2018; Bonnel, J., Chauvaud, S., Chauvaud, L., Mars, J., Mathias, D., & Frédéric, O., 2022).



2.2 Les niveaux sonores

2.2.1 Grandeurs physiques

Un récepteur acoustique placé à une certaine distance d'une source sonore reçoit un niveau sonore (RL, *Received Level*), que l'on peut décrire (ou mesurer) à l'aide de trois grandeurs physiques :

- La pression acoustique P qui se définit comme la force par unité de surface perpendiculaire à la direction de propagation.
- Le mouvement particulaire qui est le déplacement des particules causé par l'onde acoustique par rapport à leur position d'équilibre. La mesure du mouvement particulaire nécessite d'autres types de capteurs (accéléromètre triaxial, géophone...) qui sont encore en phase de développement et non disponibles sur le marché.
- L'intensité acoustique qui se définit comme le flux d'énergie acoustique à travers une unité de surface perpendiculaire à la direction de propagation. L'intensité acoustique est égale au produit de la pression par la vitesse particulaire.

La pression acoustique, généralement privilégiée dans les études d'acoustique sous-marine (Persohn *et al.*, 2020 : Guide du Ministère de la Transition Écologique et Solidaire), est utilisée dans cette étude. Cette grandeur physique est mesurable par des enregistreurs équipés d'hydrophones.

2.2.2 Les décibels

Les décibels constituent une échelle relative de quantification et de représentation de quantités pouvant posséder des ordres de grandeurs très différents, comme c'est le cas en acoustique sous-marine. L'échelle des décibels s'applique aux pressions acoustiques et aux intensités acoustiques.

2.2.3 Métriques utilisées pour décrire un son

Une onde sonore est décrite par trois données fondamentales : sa durée, son amplitude et sa fréquence :

- **Durée** : c'est l'intervalle de temps pendant lequel la pression acoustique existe. Si la perturbation de pression est brève (un battage de pieux, un clic de dauphins, etc.), on parle de « sons transitoires » ; si la perturbation est continue (bruit de navire, bruit de forage, bruit généré par le vent), on parle de « sons continus ».
- **Amplitude** : l'amplitude s'exprime en micropascal. L'amplitude instantanée est l'amplitude existant à l'instant t . L'amplitude efficace (ou *RMS - Root Mean Square*) correspond à la racine carrée de la moyenne du carré de l'amplitude d'un signal, sur un intervalle de temps donné (moyenne quadratique). L'amplitude peut également être la pression crête-crête (P_{c-c} ou P_{p-p}) qui est la pression prise entre le maximum et le minimum de la pression acoustique, et la pression crête (P_{O-c} ou P_{O-p}) correspondant à la pression absolue maximale observée. Les pressions crête-crête et crête sont adaptées pour des sources impulsionnelles (sons transitoires de très courtes durées) alors que la pression *RMS* est plus utilisée pour décrire des sources continues. Pour une onde sonore de durée T , on peut exprimer la dose de puissance sonore reçue durant T en sommant le carré de l'amplitude instantanée $p(t)$ sur cette durée. En exprimant cette somme en dB, on obtient le niveau d'exposition sonore, *SEL (Sound Exposure Level)*, sur T secondes exprimé en dB re. $1 \mu\text{Pa}^2\text{s}$.



- **Fréquence** : la fréquence est le nombre d'oscillations de l'amplitude instantanée par seconde. Plus la fréquence est faible (on parle de « basse fréquence »), plus le son est grave ; plus la fréquence est élevée (on parle de « haute fréquence »), plus le son est aigu. Une onde peut être constituée d'une seule composante en fréquence (onde monochromatique) ou de plusieurs composantes fréquentielles (somme de plusieurs sinus, impulsion, etc.). Le contenu en fréquence est accessible par changement de domaine de représentation de la pression acoustique instantanée mesurée sur une durée T suffisante. En pratique, on calcule la densité spectrale de puissance, qui représente la répartition de la puissance d'un signal suivant les fréquences, c'est le spectre acoustique exprimé en dB re. $1 \mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$. Des niveaux larges bandes (exprimés en dB re $1 \mu\text{Pa}^2$), quantifiant l'intensité totale contenue dans les bandes de fréquences, peuvent être calculés à partir de ces densités spectrales de puissance (intégrations des densités spectrales de puissance sur les bandes de fréquences considérées). Ces niveaux peuvent notamment être calculés par bandes d'octave ou de tiers d'octave.

Différentes métriques peuvent ainsi être calculées pour décrire un son en termes de niveaux sonores. **Ces métriques sont choisies en fonction du type de son étudié (continu ou impulsif).** Ces niveaux sonores sont classiquement exprimés sous l'abréviation « SPL » pour « Sound Pressure Level », suivi du type de métrique calculée (*e.g.* SPL_{rms} ou $\text{SPL}_{\text{p-p}}$) à l'exception du « Sound Exposure Level » exprimé « SEL » et calculé sur une durée définie.

Tableau 2. Résumé des différentes métriques utilisées pour décrire les niveaux sonores.

Métrique	Abréviation	Référence (unité)	Type de son
Niveau de pression acoustique efficace	SPL_{rms}	dB re. $1 \mu\text{Pa}$	Continu
Niveau d'exposition sonore	SEL	dB re. $1 \mu\text{Pa}^2\text{s}$	Impulsif
Niveau large bande	$\text{SPL}_{[\text{Freq1-Freq2}]}$	dB re. $1 \mu\text{Pa}^2$	Continu
Niveau de pression acoustique crête ou crête-crête	SPL_{p} ou $\text{SPL}_{\text{p-p}}$	dB re. $1 \mu\text{Pa}$	Impulsif

2.2.4 Niveaux à la source

Les niveaux à la source ou « niveaux d'émission » d'une source sonore, correspondent aux niveaux reçus (Received Level) à 1 m de la source. Ils peuvent être estimés pour les différentes métriques indicatrices du bruit (niveaux *RMS* ; niveaux larges bandes *etc.*). Les niveaux sources sont classiquement exprimés par l'abréviation « SL » pour « Source Level », suivi du type de métrique pour lequel il est estimé (*e.g.* SL_{rms}).

2.3 Comment représenter un son

Trois figures sont couramment utilisées pour représenter un signal sonore (Figure 2) :

- Les oscillogrammes, montrant l'évolution de l'amplitude du signal sonore dans le temps ;
- Les spectres acoustiques, permettant de visualiser la composition fréquentielle d'un son ;
- Les spectrogrammes, représentant la répartition énergétique du son en fonction du temps et des fréquences.

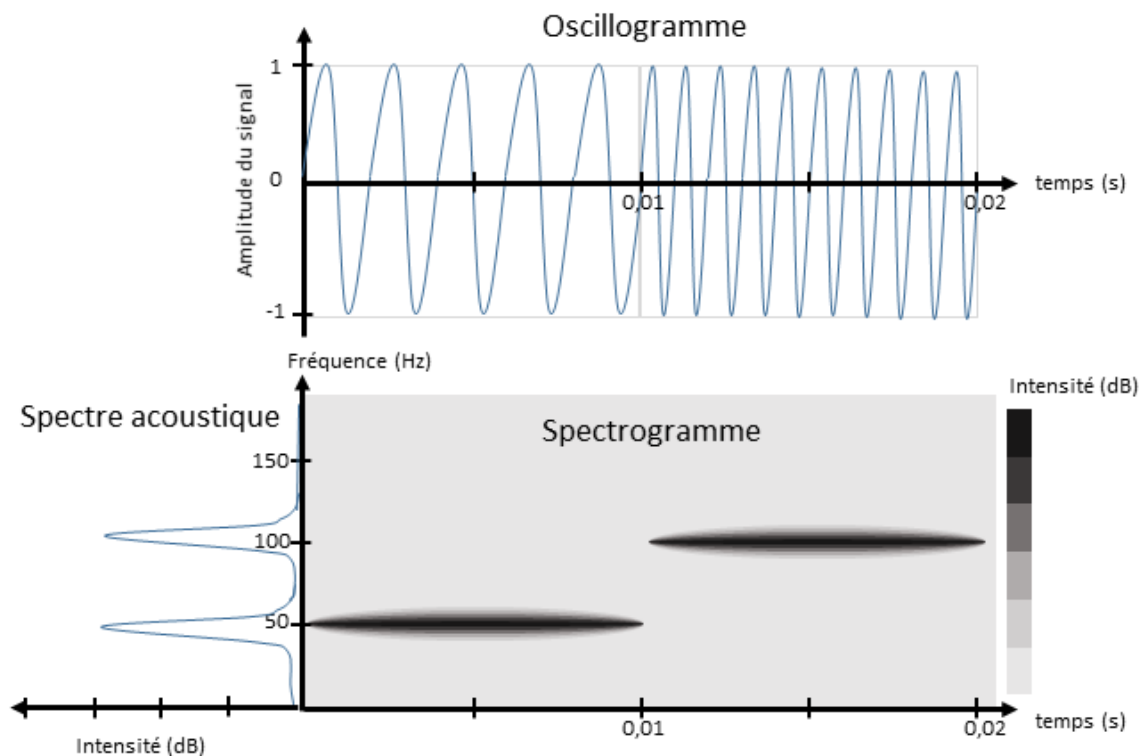


Figure 2. Représentations graphiques pour décrire un signal acoustique. L'exemple ici représente deux tonales à 50 et 100 Hz.

2.4 La propagation acoustique

Les pertes de transmission (TL) quantifient l'atténuation des niveaux sonores lors de la propagation de l'émetteur vers le récepteur sur une distance « r » en mètres. Elles s'expriment en décibels et définissent la relation entre un niveau sonore reçu (RL) et son niveau d'émission à la source (SL):

$$RL(r) = SL @ 1m - TL(r)$$

Les pertes de transmission peuvent être approximées par des modèles simplifiés ou être calculées par des modèles complexes.



2.4.1 Les modèles simplifiés

La transmission d'une onde sonore d'un point source vers un récepteur subit deux processus d'atténuation : les pertes par divergences géométriques et l'amortissement par frottement visqueux. Pour la divergence géométrique, au fur et à mesure que l'onde s'éloigne de la source, l'énergie acoustique se répartit sur une surface de plus en plus grande entraînant une diminution de l'intensité acoustique avec la distance. Dans un environnement de propagation à symétrie sphérique (cas d'une source ponctuelle dans un milieu infini), l'énergie se répartit sur une surface de $4\pi r^2$ et l'intensité acoustique décroît donc en $1/r^2$ et la pression en $1/r$. Les pertes de propagation dites « sphériques » valent alors $TL_{sphérique} = 20 \times \log(r) [dB]$ (Jensen *et al.*, 2011). Lorsque la propagation est contrainte par la surface et le fond, le son se propage alors selon une symétrie cylindrique sur une surface de $2\pi rH$ (H étant la hauteur de la colonne d'eau). L'intensité acoustique décroît alors en $1/r$ et les pertes de propagation dites « cylindriques » valent alors $TL_{cylindrique} = 10 \times \log(r) [dB]$ (Jensen *et al.*, 2011).

Les pertes par amortissement viennent s'ajouter aux pertes géométriques et dépendent des propriétés physico-chimiques du milieu de propagation. Ces pertes résultent en partie du frottement visqueux qui convertit une partie de l'énergie acoustique en chaleur et de la diffusion (dispersion de l'énergie par les hétérogénéités rencontrées dans le milieu). Pour le cas particulier de l'environnement marin, s'ajoute la relaxation chimique de certaines molécules (le sulfate de magnésium et l'acide borique). L'atténuation de l'onde acoustique par amortissement suit une loi de décroissance exponentielle avec la distance et s'exprime sous la forme $TL = ar [dB]$, avec r en m et a en dB/m (Jensen *et al.*, 2011).

2.4.2 Les modèles complexes

Les pertes de transmissions sont très complexes et un calcul réaliste de celles-ci nécessite la prise en compte et la connaissance de la morphologie bathymétrique, des variations spatiales de la vitesse du son dans la colonne d'eau ainsi que des paramètres géo-acoustiques des différentes strates de sédiments dans le fond marin. On a généralement recours à des modèles numériques basés sur la résolution de l'équation d'onde pour répliquer le champ acoustique tel que produit par une source sonore. Les modèles les plus couramment utilisés par la communauté sont : modes normaux comme Kraken (Porter, 1992) et Orca (Westwood *et al.*, 1996), l'intégration du nombre d'onde Scooter, l'équation parabolique RAM (Collins, 1995) et le lancer de rayons Bellhop (Porter et Bucker, 1987 ; Porter et Liu, 1994). Le choix d'un modèle dépend essentiellement de la fréquence de l'onde acoustique, de la hauteur d'eau de l'environnement considéré et de la bathymétrie du fond marin. La précision des calculs dépend en général de la qualité et du degré de connaissances sur l'environnement étudié. Une phase de calibration du modèle de propagation est nécessaire, elle consiste à émettre dans l'environnement des sons connus et de les mesurer à une certaine distance. Une comparaison entre les résultats de la simulation et les mesures permet de régler les paramètres du modèle afin qu'il reproduise bien les mesures.

2.5 Le paysage sonore

L'ensemble des sons générés dans le milieu constituent le paysage acoustique sous-marin et contribuent au bruit ambiant. Ces sons proviennent de sources diverses, que l'on peut classer en trois catégories :

- **La biophonie** : ensemble des sons produits volontairement ou involontairement par les organismes marins pour entre autres, se repérer, communiquer ou s'alimenter (ex : vocalises et clics d'écholocation des cétacés, clics biologiques générés par l'activité de la faune benthique, sons émis par les poissons lors de la reproduction etc.) ;
- **La géophonie** : sons dus aux phénomènes physiques naturels (ex : vent, marée, pluie, tremblement de terre etc.) ;
- **L'anthropophonie** : bruit généré par les activités humaines (ex : bruit de navire, travaux de construction etc.).

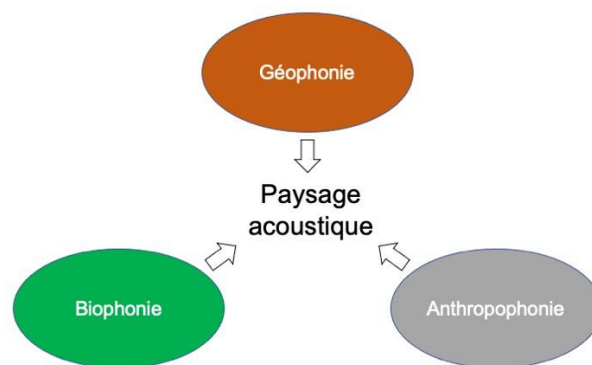


Figure 3. Les différentes sources sonores constituant les paysages acoustiques.

La description de ces paysages sonores sous-marins et de leurs différentes composantes permet d'acquérir des informations sur les écosystèmes étudiés de manière non intrusive, sur de longues périodes (de jour comme de nuit) et dans des zones difficilement accessibles (pour d'autres méthodes d'observation). La connaissance des paysages sonores est nécessaire comme base de référence pour déterminer les changements des niveaux de bruit résultant des activités humaines.



2.6 Les suivis des mammifères marins par acoustique passive

Cette section n'a pas pour objectif de décrire la production sonore de l'ensemble des mammifères marins, mais de fournir des informations de base, nécessaires à la compréhension de ce rapport. Ainsi seule la production sonore des principales espèces vocales potentiellement présentes sur l'aire d'étude est détaillée : les marsouins communs (*Phocoena phocoena* ; famille des Phocoenidés), les dauphins communs et les grands dauphins (*Delphinus delphis* et *Tursiops truncatus* ; famille des Delphinidés). Ces espèces font parties du sous-ordre des odontocètes, dont la particularité est de générer des clics d'écholocation (décrits ci-dessous). La plupart d'odontocètes produisent également d'autre type de signaux acoustiques, comme par exemple des sifflements (leur permettant notamment de communiquer). Il est toutefois important de noter que ces espèces peuvent rester silencieuses et donc seuls les individus émettant des signaux sonores sont détectés, ne permettant pas de suivre des individus passant dans le rayon de détection des stations acoustiques sans émettre de signaux. Il en est donc de même pour les espèces de mammifères marins n'émettant pas ou peu de signaux sonores mais susceptibles de fréquenter la zone (e.g. phoques gris et phoque veau-marin).

2.6.1 Production sonore des dauphins communs et grands dauphins

Ces delphinidés « sociaux » sont connus pour être acoustiquement très actifs, émettant à la fois des signaux sonores continus (sifflements ; Figure 4) et impulsifs (clics ; Figure 5) dans différents contextes (communication, écholocation ; Caldwell & Caldwell, 1968 ; Richardson *et al.*, 2013 ; Rankin *et al.*, 2017). Les signaux sonores émis par les dauphins communs et les grands dauphins ont des caractéristiques acoustiques similaires. Les sifflements émis par ces espèces sont caractérisés par des bandes de fréquences relativement étroites incluses dans l'intervalle 3 - 28 kHz, et des durées allant de 0,01 à 4 s. Ces signaux se propagent de manière omnidirectionnelle et ont une portée théorique de l'ordre de la dizaine de kilomètres (Janik 2000 ; Jensen *et al.*, 2012). Des variations géographiques ont été rapportées dans la structure des sifflements (différences de durée et fréquences ; Ansmann *et al.*, 2007 ; Henderson *et al.*, 2012 ; Papale *et al.*, 2014). Ces variations peuvent être induites par plusieurs facteurs incluant l'utilisation particulière d'une zone donnée par les dauphins (ex. sociabilisation, cohésion en chasse), ainsi que le bruit ambiant environnant (Ansmann *et al.*, 2007 ; Henderson *et al.*, 2012 ; Papale *et al.*, 2015).

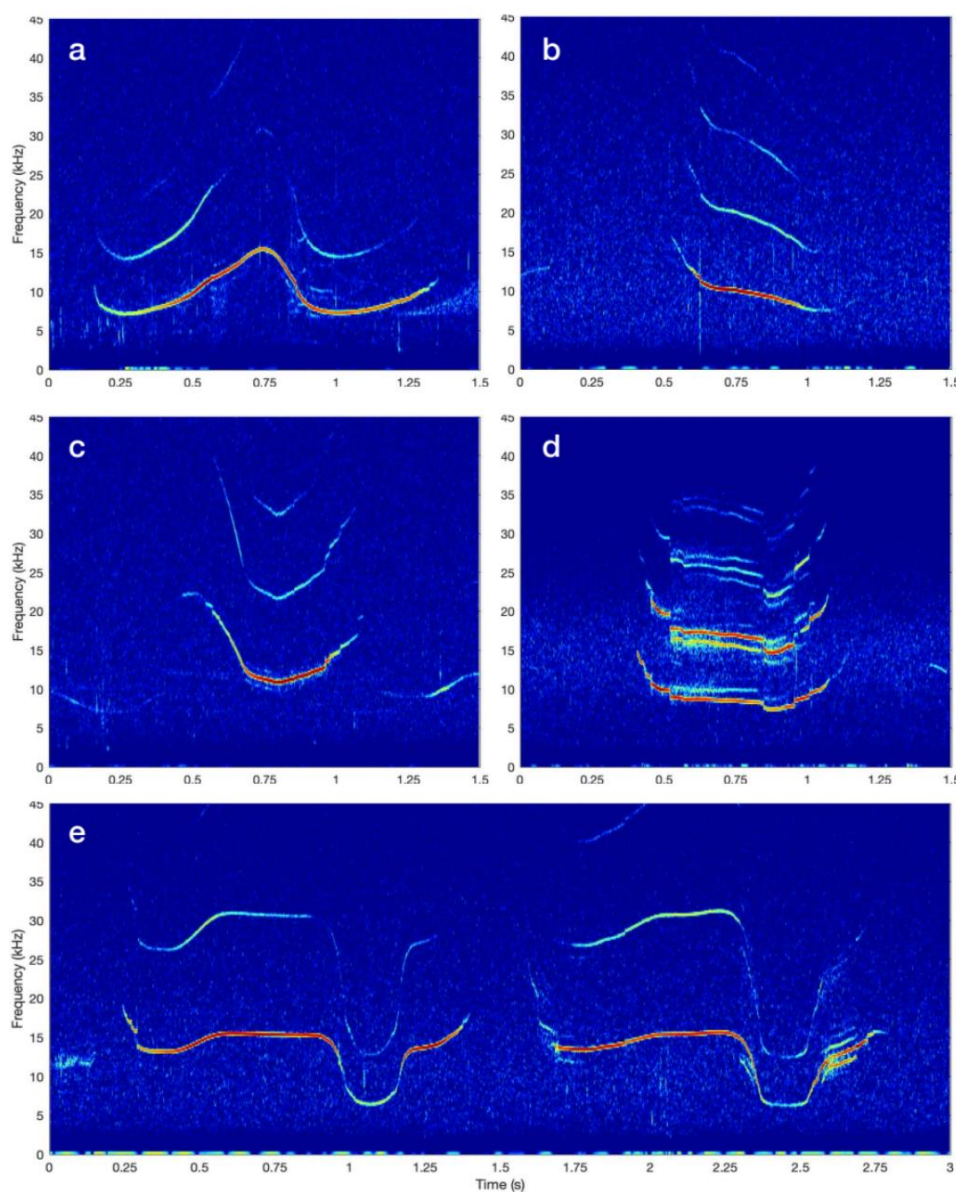


Figure 4. Spectrogrammes de sifflements émis par des dauphins communs. Extrait de Soldevilla *et al.*, 2008

Les delphinidés émettent des trains de clics pour l'écholocation (i.e. visualisation de l'environnement, détection et inspection d'objet par acoustique active ; Houser *et al.*, 1999 ; Au, 2004 ; Soldevilla *et al.*, 2008 ; Rankin *et al.*, 2017). Ces signaux sonores sont caractérisés par une courte durée, une forte directivité ainsi qu'un spectre large bande (Au, 2004 ; Au, 2012), et une portée théorique inférieure au sifflement, de l'ordre de quelques kilomètres (Frasier *et al.* 2016). La composition spectrale (fréquences principale et centrale) des clics ainsi que le taux de production (nombre de clic émis par série et l'intervalle inter-clic, ICI) sont variables en fonction de la tâche d'écholocation (ICI proportionnel à la distance dauphin-cible ; Houser *et al.*, 1999 ; Jensen *et al.*, 2009). Par exemple, lors d'évènement de chasse active, les individus augmentent le taux de production de clics (augmentant ainsi le nombre d'image perçu par écholocation) leur permettant de suivre avec précision leurs proies. Ainsi, lors de tentatives de captures l'accélération de la production de clic est telle que les ICI ne permettent plus de distinguer les clics entre eux, se traduisant par un son perçu comme un

« buzz » (Madsen 2004). Seuls quelques delphinidés (fausse orque *Pseudorca crassidens*, dauphin de Risso *Grampus griseus* et dauphin de Gill *Lagenorhynchus obliquidens*) produisent des clics d'écholocation dotés de caractéristiques spectrales distinctes permettant de les différencier au rang de l'espèce (Nakamura, 2003 ; Soldevilla *et al.*, 2008). La plupart d'entre eux, y compris le dauphin commun et le grand dauphin, émettent des clics ayant des spectres semblables (Au, 2004 ; Soldevilla *et al.*, 2008 ; Au, 2012 ; Rankin *et al.*, 2017). Les clics de dauphin commun et de grand dauphin sont caractérisés par une bande de fréquences allant de 0,2 à plus de 150 kHz et des durées comprises entre 50 et 250 μ s (Simmonds *et al.*, 2004 ; Soldevilla *et al.*, 2008 ; Robbins *et al.*, 2016).

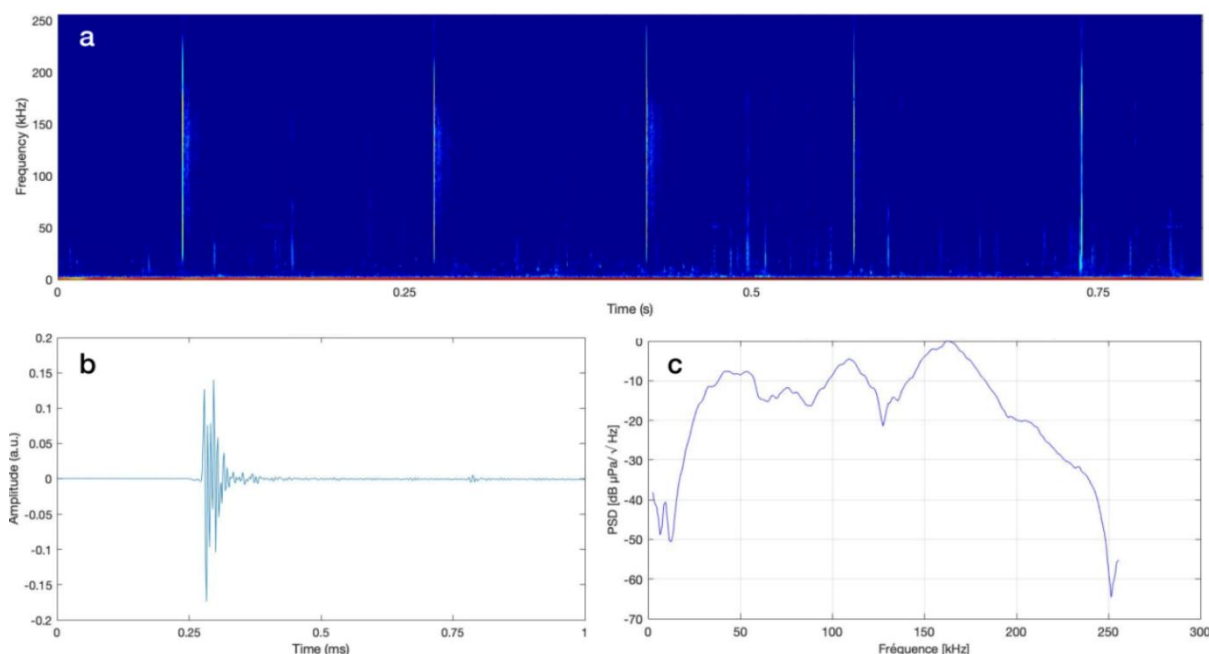


Figure 5. Spectrogramme (a), oscillogramme (b) et spectre acoustique (c) de clics émis par un dauphin commun. Figure réalisée à partir de données fournies par Papale *et al.*, 2015

La similarité des répertoire acoustique (sifflements et clics d'écholocation) des dauphins communs et des grands dauphins ne permet donc pas de distinguer avec certitude ces deux espèces entre elles sur les enregistrements acoustiques.

Le comportement du dauphin est considéré comme relativement cyclique, alternant principalement des périodes de déplacement et d'alimentation (Petrella *et al.*, 2012). Quatre états comportementaux ont été définis pour caractériser leurs activités (alimentation, repos, déplacement, activité sociale ; Stockin *et al.*, 2009; Henderson *et al.*, 2012). Des études mettant en œuvre des suivis visuels et acoustiques passifs (PAM) ont examiné les comportements associés aux émissions sonores en se basant sur la proportion de clics et de sifflements émis par les dauphins (Goold, 2000 ; Kim *et al.*, 2006 ; Ansmann *et al.*, 2007 ; Henderson *et al.*, 2012 ; Petrella *et al.*, 2012 ; Wiggins *et al.*, 2013). Des comportements différents ont été observés selon les régions. Une densité de sifflement beaucoup plus élevée (nombre de sifflement par seconde) a été enregistrée pendant les phases de recherche de nourriture diurnes, comparée aux phases de déplacement en Nouvelle-Zélande (13 fois plus élevée ; Petrella *et al.*, 2012). Une tendance similaire a été observée en mer Celtique, où l'émission de sifflement augmentait de manière significative lors d'épisodes nocturnes de

recherche de nourriture (Goold, 2000). Les auteurs suggèrent que l'intensification des émissions de signaux de communication pourraient être liée au niveau élevé de coordination requis entre les individus recherchant de la nourriture de façon coopérative (Goold, 2000 ; Petrella *et al.*, 2012). Inversement, des études menées en Californie montrent que les enregistrements sont principalement composés de sifflements lors de déplacements diurnes, (Kim *et al.*, 2006 ; Henderson *et al.*, 2012 ; Wiggins *et al.*, 2013) et deviennent moins fréquents durant la nuit alors que le nombre de clics émis augmente (Wiggins *et al.*, 2013). Les auteurs suggèrent que les sifflements seraient utilisés pour maintenir la cohésion du groupe ainsi qu'une direction commune, tandis que les clics serviraient à localiser leurs proies lors des chasses nocturnes (Kim *et al.*, 2006 ; Wiggins *et al.*, 2013). La production de signaux de communication varie donc en fonction des types d'activités d'interaction sociale ou requérant une coordination entre les individus. Les différences observées entre les populations reflètent probablement différentes écologies : c'est à dire stratégies de chasse différentes en fonction des proies ciblées, d'interaction en fonction des structures sociales ainsi que des environnements sonores différents.

2.6.2 Production sonore des marsouins

Le répertoire acoustique des marsouins communs est plus restreint que celui des dauphins. Il est composé d'un unique signal sonore (clic « Narrow-Band High Frequency » ; Figure 6), utilisé à la fois pour l'écholocalisation et la communication (Goodson & Sturtivant, 1996 ; Clausen *et al.*, 2011 ; Sørensen *et al.*, 2018).

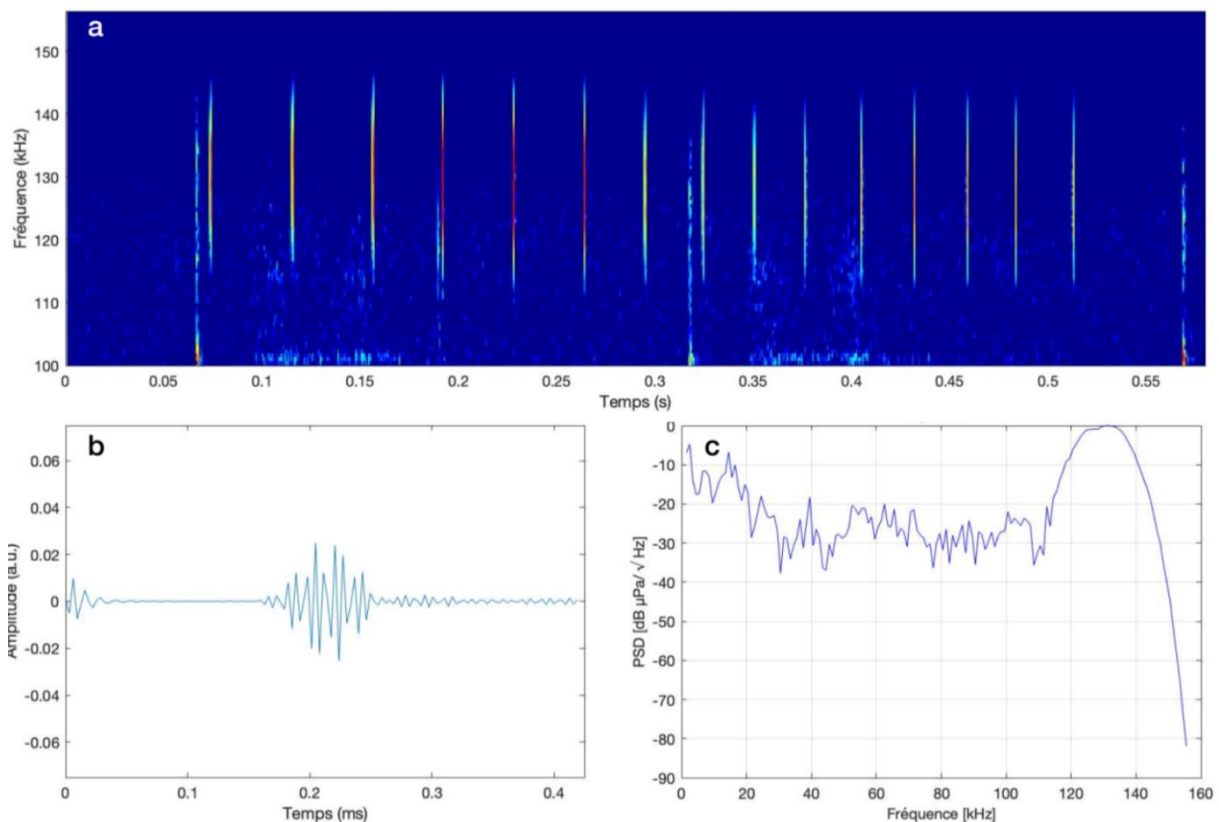


Figure 6. Spectrogramme (a), oscillogramme (b) et spectre acoustique (c) de clics émis par un marsouin commun. Figure réalisée à partir de données internes à SOMME.



Les clics NBHF du marsouin commun peuvent être émis de façon isolée ou en série (Teilmann *et al.*, 2002). Ces signaux comportent une forte composante haute fréquence (HF) comprise entre 110 et 160 kHz et ont des durées allant de 60 à 300 μ s. Les clics émis par des marsouins adultes présentent des fréquences principales comprises entre 125 et 140 kHz (Møhl & Andersen, 1973 ; Goodson & Sturtivant, 1996 ; Hatakeyama & Soeda 1990 ; Au *et al.*, 1999). Des fréquences principales plus élevées (autour de 145 kHz) ont été relevées pour des juvéniles, suggérant une relation entre les fréquences émises et la taille du corps (Goodson & Sturtivant, 1996). Fortement directifs, les clics sont émis avec une largeur de faisceau étroite, d'environ 16 ° dans les plans vertical et horizontal (Goodson & Sturtivant, 1996 ; Au *et al.*, 1999 ; Teilmann *et al.*, 2002 ; Villadsgaard *et al.*, 2007 ; Hansen *et al.*, 2008). Le taux de répétition des signaux d'écholocalisation reflète l'échelle de temps à laquelle un animal recueille des informations sur son environnement (Linnenschmidt *et al.*, 2013). En plus d'être utilisés pour l'écholocalisation, des patterns spécifiques de séries de clics NBHF ont été corrélés avec des interactions sociales (e.g. contact mère-petit, choix du partenaire, comportement agonistique), indiquant l'utilisation de ce même signal pour la communication (Clausen *et al.*, 2011 ; Sørensen *et al.*, 2018). Cependant, la directivité et la forte absorption des hautes fréquences génèrent un espace actif très limité (Clausen *et al.*, 2011), ne permettant une détection que dans un rayon de 100 à 200 mètres d'un enregistreur acoustique (Tougaard *et al.* 2006).

3 Matériel et méthodes

Les protocoles décrits dans cette section ont été établis afin de conserver une cohérence avec les suivis réalisés pendant l'état de référence et en phase de construction (cf. fiche Protocole en annexe). Les connaissances acquises lors de ce suivi serviront à l'évaluation des impacts induits par l'implantation du parc éolien du banc de Guérande (principe BACI - Before After Control Impact).

3.1 Équipe intervenante

3.1.1 SOMME

Le suivi acoustique a été opéré par les ingénieurs acousticiens de la société SOMME.

SOMME assure la mise en place du dispositif de suivi acoustique, l'analyse des données et l'interprétation des résultats.

3.1.2 Moyen nautique

L'ensemble des opérations en mer relatives à ce suivi acoustique (déploiement et récupération des stations de mesure) a été réalisé avec le navire océanographique Miniplon (MMSI : 228024600) de la société Atlantique Scaphandre basée aux Sables d'Olonne en Vendée (85).



Figure 6. Navire Miniplon utilisé pour les missions en mer.

3.2 Station de mesure acoustique

3.2.1 Système d'acquisition acoustique large bande

Les systèmes d'acquisition acoustique utilisés, incluant un enregistreur acoustique associé à un hydrophone large bande, permettent d'enregistrer en continu l'ensemble des composantes du paysage acoustique :

- **Anthropophonie** : bruit de travaux, navires et autres sons générés par l'homme ;
- **Géophonie** : pluie, vent, mouvement du sédiment et autres bruits provenant de source naturelle non-vivante ;
- **Biophonie** : tous les sons générés par la faune marine (mammifères marins, faune benthique, poissons).

3.2.1.1 Caractéristiques de la chaîne d'acquisition de données acoustiques large bande

La chaîne d'acquisition (Figure 7) est composée :

- D'un **enregistreur autonome** de données acoustiques brutes (instrument) : « Sylence-LP » (RTSYS).
- D'un **hydrophone** large bande omnidirectionnel (capteur de mesure) : « HTI-99-HF » ($S_H : -168 \text{ dB re } 1 \text{ V } \mu\text{Pa}^{-1}$).

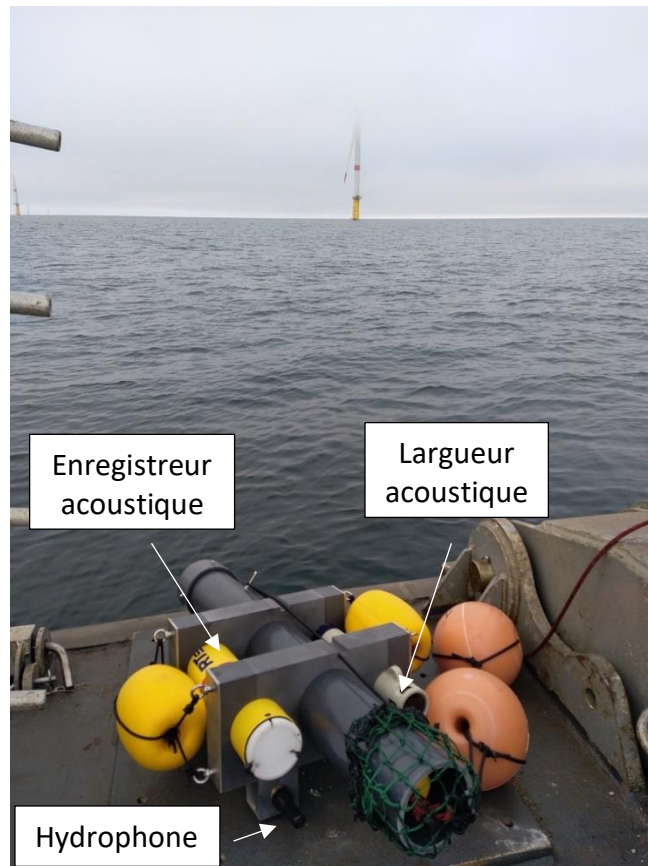


Figure 7. Système d'acquisition acoustique large bande (enregistreur et hydrophone) positionné sur un mouillage de sub-surface et prêt à être déployé (Source : SOMME).

Cette chaîne d'acquisition a des caractéristiques similaires à celles utilisées lors de suivis précédents (état de référence, phase de construction). Les données brutes acquises sont calibrées en prenant en compte le gain d'acquisition de l'enregistreur (0,78 dB) et la sensibilité des hydrophones ($S_H : -168 \text{ dB re } 1 \text{ V } \mu\text{Pa}^{-1}$).

3.2.1.2 Paramètres d'enregistrements

Les paramètres de programmation des enregistrements sont :

- Cycle d'acquisition (« duty cycle ») : continu. Toutefois, pour faciliter la comparaison des résultats du suivi des mammifères marins (détections) avec ceux des études antérieures, les données seront sous-échantillonnées avec un cycle de 3 min toutes les 10 min.
- Fréquence d'échantillonnage : 512 kHz, permettant de pouvoir suivre l'ensemble des signaux d'intérêt sur le même enregistrement, incluant le bruit généré par les

éoliennes, le trafic maritime et les signaux des cétacés (dont les clics hautes fréquences émis par les marsouins).

3.2.2 Méthode de déploiement

Les systèmes d'acquisition acoustique sont déployés sur des flotteurs de sub-surface (Figure 7). Ce mouillage a été conçu de manière à être le plus silencieux possible. Son déploiement et sa récupération sont réalisés à l'aide d'un largueur acoustique (modèle « RT 6-1000 », Sonardyne) associé à un support spécifiquement développé pour accueillir notre système d'acquisition acoustique (Figure 8). Conformément aux recommandations du BSH (*Offshore wind farms: Measuring instruction for underwater sound monitoring* ; Betke, 2006; Betke et al., 2004) et afin d'assurer la qualité des données en s'éloignant des bruits parasites provenant de la surface (vent, houle, pluie) et du fond (mouvement du sédiment), l'hydrophone est situé à 3m au-dessus du sol (Figure 8).

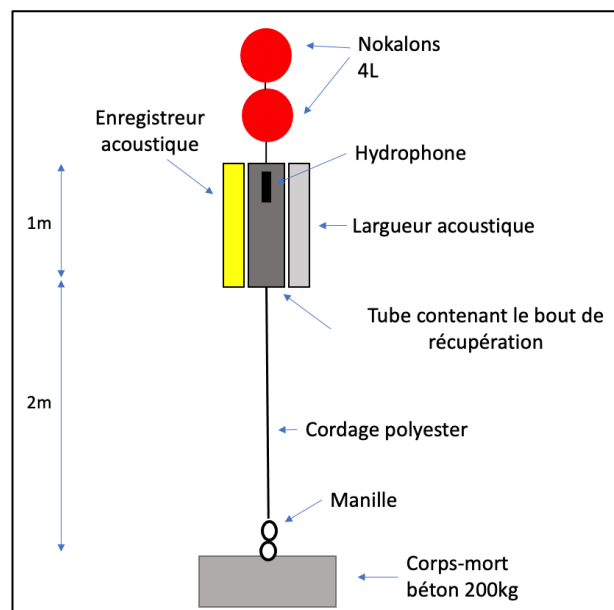


Figure 8. Schéma du mouillage utilisé.

3.3 Localisation des stations acoustiques et périodes suivies

Quatre stations de mesures acoustiques, ont été déployées dans le cadre de ce suivi (Figure 9, Tableau 3). Les positions suivies lors de l'état de référence et de la phase de construction ont été conservées :

- Station SE, située au sud-est du parc, à 198m de l'éolienne la plus proche ;
- Station NW, située au nord-ouest du parc, à 565m de l'éolienne la plus proche ;
- Station SW, située au sud-ouest du parc, à 2640m de l'éolienne la plus proche ;
- Station MB, située au sud d'Hoëdic (Mor Braz), à plus de 18km du parc, station suivie depuis la phase de construction compte tenu de l'intérêt de la zone du Mor Braz pour les mammifères marins.

Trois stations additionnelles (S1, S2, S3 ; Tableau 3) ont été déployées au sein du parc éolien, pour étudier spécifiquement le bruit généré par les éoliennes en fonctionnement (étude complémentaire au suivi MSU8). Les données de ces stations ont été utilisées pour compléter l'analyse du bruit ambiant réalisée dans le cadre de ce suivi.

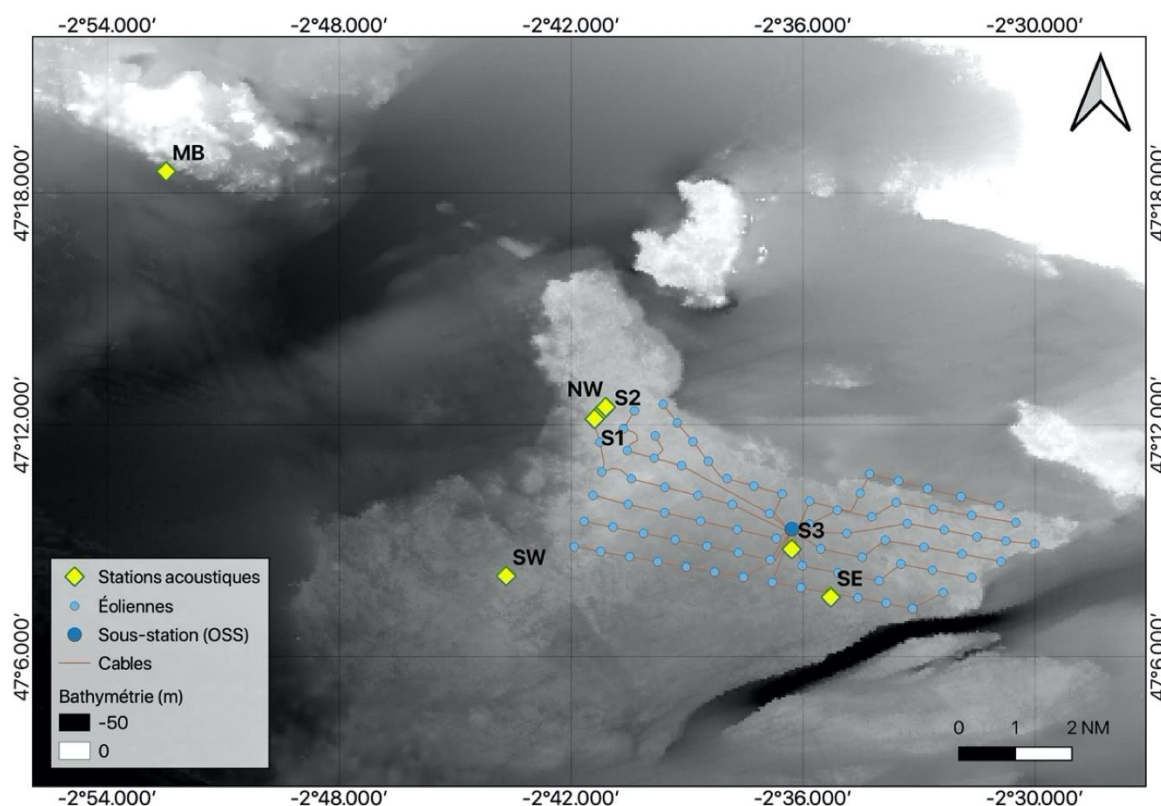


Figure 9. Localisations des stations acoustiques.

Le tableau suivant présente les principales caractéristiques des différentes stations ainsi que les périodes suivies.



Tableau 3. Caractéristiques des stations déployées dans le cadre de ce suivi
 (les lignes grisées correspondent aux stations additionnelles utilisées pour caractériser le bruit des éoliennes en fonctionnement).

Station	Secteur	Latitude (WGS 84)	Longitude (WGS 84)	Profondeur (m)	Distance à l'éolienne la plus proche (m)	Dates déploiement	Dates récupération	Période d'enregistrement exploitable	Instruments de mesure	Commentaire
NW	Nord-ouest du parc éolien	47°12.3721'N	2°41.1932' W	14	565	Eté - 09/08/2023 Hiver - 31/01/2024	Eté - 12/09/2023 Hiver - 19/03/2024	Eté - 09/08/2023 au 12/09/2023 Hiver - 31/01/2024 au 16/03/2024	Enregistreur large bande et hydrophone	-
SW	Sud-ouest du parc éolien	47°08.0868'N	2°43.6992' W	25	2640	Eté - 09/08/2023 Hiver - 31/01/2024	Eté - 12/09/2023 Hiver - 19/03/2024	Eté - 09/08/2023 au 12/09/2023 Hiver - 31/01/2024 au 16/03/2024	Enregistreur large bande et hydrophone	-
SE	Sud-est du parc éolien	47°07.5413'N	2°35.2897' W	22	198	Eté - 09/08/2023 Hiver - 31/01/2024	Eté - 12/09/2023 Hiver - 19/03/2024	Eté - 09/08/2023 au 30/08/2023 Hiver - 31/01/2024 au 16/03/2024	Enregistreur large bande et hydrophone	Mémoire interne pleine sur le suivi estival : arrêt de l'enregistrement le 30/08
MB	Mor Braz	47°18.5580'N	2°52.4935' W	30	18350	Eté - 09/08/2023 Hiver - 31/01/2024	Eté - 12/09/2023 Hiver - 19/03/2024	Eté - 09/08/2023 au 12/09/2023 Hiver - 31/01/2024 au 16/03/2024	Enregistreur large bande et hydrophone	-
S1	Nord-ouest du parc éolien	47°12.1476'N	2°41.3950' W	14	75	Eté - 09/08/2023 Hiver - 31/01/2024	Eté - 12/09/2023 Hiver - 19/03/2024	Eté - 09/08/2023 au 12/09/2023 Hiver - 31/01/2024 au 19/03/2024	Enregistreur large bande et hydrophone	-
S2	Nord-ouest du parc éolien	47°12.4539'N	2°41.1070' W	14	750	Eté - 09/08/2023 Hiver - 31/01/2024	Eté - 12/09/2023 Hiver - 19/03/2024	Eté - 09/08/2023 au 12/09/2023 Hiver - 31/01/2024 au 05/03/2024	Enregistreur large bande et hydrophone	Mémoire interne pleine sur le suivi hivernal: arrêt de l'enregistrement le 05/03
S3	Centre du parc éolien	47°08.7776'N	2°36.2918' W	20	725	Eté - 09/08/2023 Hiver - 31/01/2024	Eté - 12/09/2023 Hiver - 19/03/2024	Eté - 09/08/2023 au 12/09/2023 Hiver - 31/01/2024 au 05/03/2024	Enregistreur large bande et hydrophone	Mémoire interne pleine sur le suivi hivernal: arrêt de l'enregistrement le 05/03

3.4 Traitement et analyse des données

3.4.1 Conversion des données

Les données brutes acquises par les enregistreurs acoustiques large bande et les hydrophones (en V) sont converties en données acoustiques (en μPa) en prenant en compte le gain d'acquisition de l'enregistreur (0,78 dB) et la sensibilité des hydrophones (S_H : -168 dB re $1 \text{ V } \mu\text{Pa}^{-1}$).

3.4.2 Caractérisation du bruit ambiant

3.4.2.1 Estimation des niveaux de bruit ambiant

Chaque fichier audio enregistré (.wav) est divisé en segments d'une minute, traités individuellement de manière à définir :

- Le temps « t » associé au segment, correspondant au temps central du segment traité.
- Le niveau SPL_{rms} (niveau «Root Mean Square», dB re $1 \mu\text{Pa}$), quantifiant le niveau de pression acoustique efficace reçu (racine carrée de la moyenne des carrés du signal ; Figure 10). Cette métrique est la plus fréquemment utilisée dans la littérature pour caractériser les sources de bruits continus.
- Les niveaux de pression larges bandes¹ (dB re $1 \mu\text{Pa}^2$), noté $\text{SPL}_{[\text{fmin-fmax}]}$ quantifiant l'intensité totale contenue dans les bandes de fréquences d'intérêts [fmin - fmax] (cf Figure 10) :
 - [20-40000] Hz, bande de fréquence spécifique utilisé lors de l'état de référence ;
 - Tiers d'octaves, dont les bandes de chaque tiers d'octave ($f_{1/3\text{octave}}$) sont délimitée par les fréquences minimale (f_{min}) et maximale (f_{max}) définies par : $f_{\text{min}} = f_{1/3\text{octave}} / (\sqrt{2})$ et $f_{\text{max}} = f_{1/3\text{octave}} * (\sqrt{2})$ (Tableau 4).

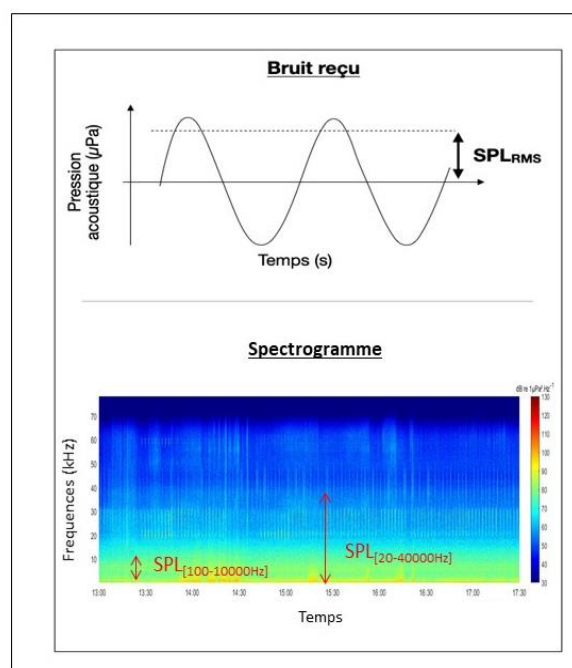


Figure 10 : Différentes métriques utilisées pour évaluer les niveaux de bruit.

¹ Les niveaux larges bandes sont des intégrations des densités spectrales de puissance sur les bandes de fréquences considérées



Tableau 4. Fréquences centrales et bornes des bandes de tiers d'octaves utilisées dans cette étude.

Fréquence minimale (f_{\min} ; Hz)	Fréquence centrale ($f_{1/3\text{octave}}$; Hz)	Fréquence maximale (f_{\max} ; Hz)
11.05	12.40	13.92
13.92	15.62	17.54
17.54	19.68	22.09
22.09	24.80	27.84
27.84	31.25	35.07
35.07	39.37	44.19
44.19	49.60	55.67
55.67	62.49	70.14
70.14	78.74	88.38
88.38	99.20	111.35
111.35	124.98	140.29
140.29	157.47	176.75
176.75	198.4	222.7
222.7	249.97	280.58
280.58	314.94	353.51
353.51	396.8	445.39
445.39	499.94	561.16
561.16	629.88	707.02
707.02	793.6	890.79
890.79	999.87	1122.32
1122.32	1259.76	1414.03
1414.03	1587.2	1781.57
1781.57	1999.75	2244.64
2244.64	2519.52	2828.07
2828.07	3174.4	3563.14
3563.14	3999.49	4489.28
4489.28	5039.05	5656.14
5656.14	6348.8	7126.29
7126.29	7998.99	8978.56
8978.56	10078.09	11312.28
11312.28	12697.6	14252.57
14252.57	15997.97	17957.12
17957.12	20156.18	22624.55
22624.55	25395.2	28505.15
28505.15	31995.95	35914.24
35914.24	40312.37	45249.1
45249.1	50790.4	57010.3
57010.3	63991.89	71828.47
71828.47	80624.73	90498.2
90498.2	101580.8	114020.59
114020.59	127983.79	143656.95
143656.95	161249.47	180996.41
180996.41	203161.6	228041.19
228041.19	255967.58	287313.89



3.4.2.2 Caractérisation des paysages sonores

Les séries temporelles de niveaux sonores (SPL_{rms}) précédemment calculés, sont présentées par station. Ces représentations permettent d'observer l'évolution de ces niveaux sonores au cours du temps. Les distributions statistiques des niveaux sonores associés à chaque station sont également présentées sous forme de boîtes à moustaches (boxplot).

Des spectres acoustiques (caractérisation de l'intensité par fréquence) sont établis pour chaque minute d'enregistrement à partir des niveaux tiers d'octaves précédemment calculés. Les spectres médians ainsi que les spectres aux 5e, 25e, 75e et 95e percentiles sont ensuite établis afin d'analyser et comparer le contenu fréquentiel des paysages sonores enregistrés au sein de chaque station. Des bandes de fréquences d'intérêt peuvent ainsi être identifiées.

Les niveaux sonores efficaces et intégrés sur des bandes de fréquences d'intérêt sont mis en relation avec différents paramètres environnementaux (vitesse du vent et hauteur de la houle, vitesse de rotation des pales des éoliennes, vibration du mat) afin de caractériser la contribution des conditions environnementales et des activités humaines au bruit ambiant. Concernant la contribution des bruits des éoliennes en fonctionnement un détail est présenté en Annexe 8.1, et l'estimation de l'émergence acoustique est décrite dans la section suivante (3.4.2.3)

Des analyses spécifiques sont également appliquées incluant :

- *La détection automatique des passages de navires.*

Un filtre médian est appliqué sur les séries temporelles de niveaux sonores (SPL_{rms}) afin d'apercevoir les variations long terme du bruit ambiant. La fenêtre du filtre médian a été fixée à 24h, en accord avec les ordres de grandeurs temporelles des variations environnementales (ex : coup de vent, marée). Les navires passant à proximité des stations de mesures acoustiques, génèrent des sons de durées relativement courtes (de l'ordre de la dizaine de minutes) et de forte intensité, se traduisant par une augmentation de l'écart à cette médiane. Nous pouvons ainsi les détecter automatiquement en conservant les valeurs extrêmes de la distribution statistique des écarts à la médiane (sur-dispersion des valeurs sur la distribution). Ces valeurs peuvent cependant être associées à d'autres événements acoustiques de forte intensité. Ainsi seuls les événements détectés ayant une durée minimale de deux minutes sont conservés. Chaque passage de navire détecté est systématiquement vérifié en établissant un spectrogramme à fine résolution.

- *La recherche de périodicité dans les séries temporelles de niveaux sonores, pouvant refléter des phénomènes cycliques tels que des activités biologiques et la marée.*

Une analyse de Lomb-Scargle est appliquée sur les séries temporelles de niveaux sonores SPL_{rms} et/ou large bande dans des fréquences d'intérêts précédemment identifiées. La méthode Lomb-Scargle permet de détecter des périodicités dans des signaux qui ne sont pas nécessairement sinusoïdaux. Cette approche est également robuste aux valeurs aberrantes, ce qui signifie qu'il peut fournir des estimations de fréquence robustes même en présence de données aberrantes ou de bruit. Ces caractéristiques sont particulièrement pertinentes pour identifier des phénomènes cycliques, potentiellement associés à des sources biologiques et pouvant avoir des formes d'onde complexes au sein des séries temporelles de niveaux sonores.



3.4.2.3 Estimation de l'émergence acoustique d'une éolienne.

L'émergence acoustique du bruit d'une éolienne est définie par le niveau reçu au-dessus d'un niveau de référence² et estimé dans une bande de fréquence d'intérêt (définie par la caractérisation fréquentielle des bruits d'une éolienne décrite précédemment dans la section 3.4.2.2 et cf. Annexe 8.1). L'émergence peut alors se traduire par la distance maximale à laquelle les bruits de la source peuvent être perçus. Pour déterminer cette émergence acoustique, une régression linéaire ($y=ax+b$) est alors estimée entre les niveaux sonores mesurés ($SPL_{fmin-fmax}$) sur chaque station et le logarithme de la distance (R) à l'éolienne la plus proche de la station, soit :

$$SPL_{fmin-fmax} = a \cdot \log(R) + b ;$$

La relation au logarithme de la distance constitue alors la perte de propagation entre la source et le récepteur (cf. section 2.4.1), donnant :

$$TL = \alpha \cdot \log(R) ;$$

avec α , valeur positive du coefficient de propagation et d'absorption, et donc l'inverse de la pente a estimée par la régression linéaire. Ainsi, cette régression traduit l'équation du SONAR :

$$SPL_{fmin-fmax} = SL_{fmin-fmax} - TL ;$$

avec $SL_{fmin-fmax}$ le niveau source obtenu via l'ordonnée à l'origine (b) de la régression linéaire. On obtient alors la régression :

$$SPL_{fmin-fmax} = SL_{fmin-fmax} - \alpha \cdot \log(R).$$

Les niveaux $SPL_{fmin-fmax}$ utilisés sont moyennés par station, en gardant les périodes où les éoliennes sont en fonctionnement.

Différentes régressions linéaires sont alors estimées en considérant deux régimes de vitesse de rotation influençant les niveaux sonores (cf. résultats de la section 4.3.2 et Annexe 8.1) :

- niveau $SPL_{fmin-fmax}$ lorsque l'éolienne la plus proche tourne entre 3 et 7 rpm ;
- niveau $SPL_{fmin-fmax}$ lorsque l'éolienne la plus proche tourne entre 7 et 12 rpm.

Les données acquises en été et hiver ont été regroupées. Seules les périodes avec une houle faible (<1m) ont été considérées pour éviter de biaiser la régression avec cette composante géophonique (cf. section 4.4.2).

La régression linéaire a été estimée en utilisant les stations situées dans le parc et à proximité directe (*c-à-d.* se trouvant toutes à moins d'1 km d'une éolienne), soient S1, S2, S3, NW et SE. Les stations SE et MB (étant à plusieurs kilomètres des éoliennes et donc potentiellement hors de l'émergence acoustique du parc éolien) n'ont pas été considérées pour le calcul de la régression linéaire afin d'éviter de biaiser l'estimation de la pente. En effet, théoriquement, la régression entre les niveaux $SPL_{fmin-fmax}$ et le logarithme de la distance à l'éolienne décroît jusqu'à atteindre un plateau dont la valeur correspond au niveau du bruit ambiant. Ainsi, inclure les données acquises sur ces stations éloignées dans la régression « aplatiserait » la pente de la fonction affine, entraînant alors une sous-estimation de la pente a (et donc des pertes de propagation), ce qui surestimerait l'émergence acoustique du parc.

² Le niveau de référence peut être le bruit ambiant ou un seuil auditif d'une espèce cible.



La régression est alors comparée au niveau de bruit ambiant estimé par le niveau $SPL_{fmin-fmax}$ moyen entre toutes les stations lorsque l'éolienne la plus proche ne tourne pas et avec une houle calme (<1 m), pour éviter un biais dû à la géophonie et donc mettre en évidence la composante acoustique due à l'éolienne en fonctionnement. Dans ce rapport le niveau moyen de bruit ambiant estimé en section 4.3.2 est de :

$$SPL_{10-250Hz}=88 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa}^2$$

Une autre comparaison de la régression au bruit ambiant est réalisée en considérant les 25^e et 75^e percentiles des niveaux $SPL_{fmin-fmax}$ mesurés sur les deux stations les plus éloignées du parc (SE et MB), toutes conditions environnementales confondues (et en absence de rotation de pâles sur l'éolienne la plus proche de SE). Cet intervalle permet de décrire une variation de bruit ambiant en prenant en compte la géophonie (composante pouvant masquer le bruit des éoliennes) et est estimé en section 4.3.2 entre :

$$SPL_{10-250Hz}=84 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa}^2 \text{ (25}^{\text{e}} \text{ percentile, condition basale)}$$
$$SPL_{10-250Hz}=97 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa}^2 \text{ (75}^{\text{e}} \text{ percentile, condition plus agitée)}$$

Le modèle de perte de propagation décrit ci-dessus est finalement appliqué à toutes les éoliennes du parc afin de cartographier **l'émergence acoustique du parc**. Deux approches sont alors considérées :

- des cartes d'émergence acoustique estimé en terme de niveau reçu ainsi que sa différence au bruit ambiant ;
- des cartes de zones d'impacts potentiels des mammifères marins en estimant les niveaux perçus par des groupes d'espèces.

Ces analyses sont présentées dans l'annexe 8.2.



3.4.3 Étude de la fréquentation en cétacés de l'aire d'étude

Dans l'optique de comparer la fréquentation en cétacés de l'aire d'étude en phase d'exploitation du parc avec la fréquentation lors l'état de référence, l'étude se focalise ici sur les quatre stations d'intérêts : MB, NW, SE et SW ;

3.4.3.1 Espèces cibles

Les études précédemment réalisées dans le cadre du projet ont permis d'identifier deux groupes de mammifères marins potentiellement présents au sein de l'aire d'étude :

- Des cétacés moyennes fréquences comprenant :
 - o Des dauphins communs et grands dauphins fréquentant régulièrement l'aire d'étude ;
 - o Des globicéphalinés (globicéphale noir et dauphin de Risso) rarement observés dans l'aire d'étude.
- Des cétacés hautes fréquences, les marsouins communs, susceptibles de fréquenter de façon occasionnelle l'aire d'étude.

Les dauphins communs, les grands dauphins et les globicéphalinés sont des espèces appartenant au groupe des delphinidés, produisant des clics d'écholocation large bande et des sifflements dans la bande de fréquence [5-20] kHz, pouvant être détectés jusqu'à une dizaine de kilomètres des enregistreurs acoustiques. Ces espèces émettent des signaux avec des caractéristiques acoustiques proches (durée, fréquence) et ne peuvent être différenciées par acoustique à ce jour. Dans cette étude, ces espèces seront donc regroupées sous le taxon « Delphinidés ».

Les marsouins produisent des clics haute fréquence à bande étroite, avec un maximum d'énergie autour de 130 kHz (clics HFNB), pouvant être détectés entre 100 et 200 m des enregistreurs acoustiques. Ces signaux sont stéréotypés et ainsi facilement identifiables.

Les répertoires acoustiques de ces espèces cibles sont décrits en section 2.6.

3.4.3.2 Détection automatique des signaux

La détection des signaux de cétacés est automatisée *via* le logiciel d'analyse bioacoustique PAMGuard (Passive Acoustic Monitoring | PAM Open Source Software - PAMGuard³).

Deux fonctionnalités (modules) de ce logiciel sont utilisées simultanément :

- Le « Whistle and Moan Detector » (WMD) pour détecter les signaux à modulation de fréquence (sifflements de delphinidés ; Figure 11)
- Le « Click Detector » (CD) pour détecter les sons impulsifs (clics d'écholocation). Ce dernier est paramétré pour détecter les clics de marsouins. Afin d'éviter les fausses détections associées à d'autres bruits impulsifs, ce détecteur est couplé avec un module de détection de train de clics.

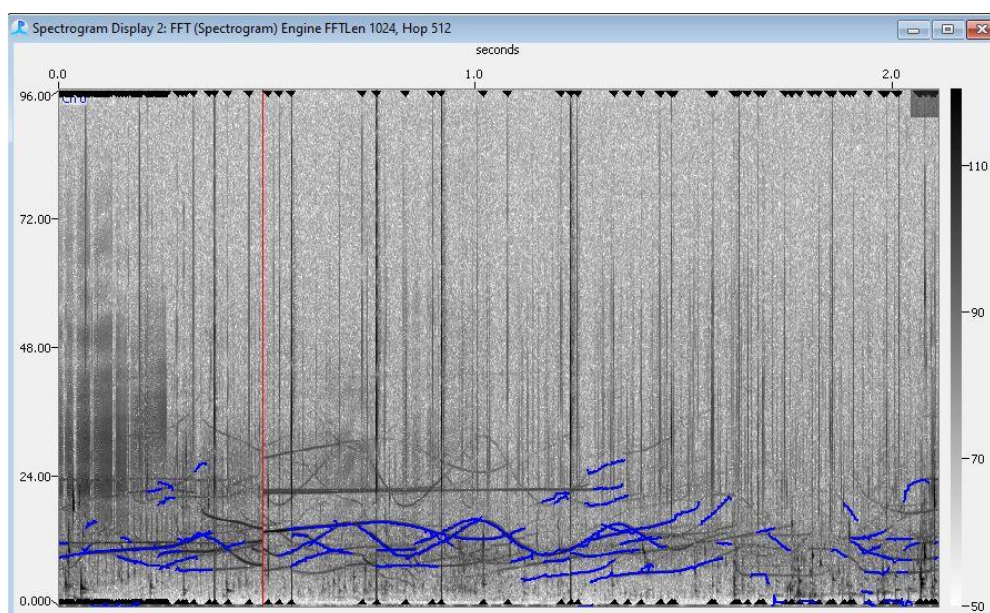


Figure 11. Capture d'écran de l'interface PAMGuard incluant les modules de détection de clics (flèches noires) et de sifflements (WMD ; courbes bleues).

Les détecteurs utilisés sont paramétrés en fonction des caractéristiques des signaux des groupes d'espèces cibles (delphinidés et marsouins, cf. Partie 3.4.3.1) issues de la littérature scientifique (Tableau 5 ; Tableau 6).

Tableau 5. Paramètres utilisés pour les détecteurs de sifflement des delphinidés (WMD).

Bande de fréquences de recherche des signaux	3-28 kHz
Durée min	30 ms (15360 points)

Tableau 6. Paramètres utilisés pour les détecteurs de clics de marsouins (CD).

Bande de fréquences de recherche des signaux	100-150 kHz
Intervalle Inter-Clics min	20 ms (10240 points)
Durée max	0,3 ms (154 points)

³ <https://www.pamguard.org>

Cette méthodologie de détection est cohérente avec les suivis réalisés lors de l'état de référence et la phase de construction.

Vérification et traitement des détections

Un spectrogramme haute résolution est réalisé pour chaque détection. Ces spectrogrammes sont ensuite classés sous les catégories « bonnes » ou « fausses détections » par un algorithme de classification d'image basé sur de l'intelligence artificielle (Figure 12). Les bonnes détections de l'algorithme sont ensuite vérifiées par un acousticien de l'équipe SOMME. Ce procédé assure qu'aucune fausse détection n'est incluse dans les résultats.

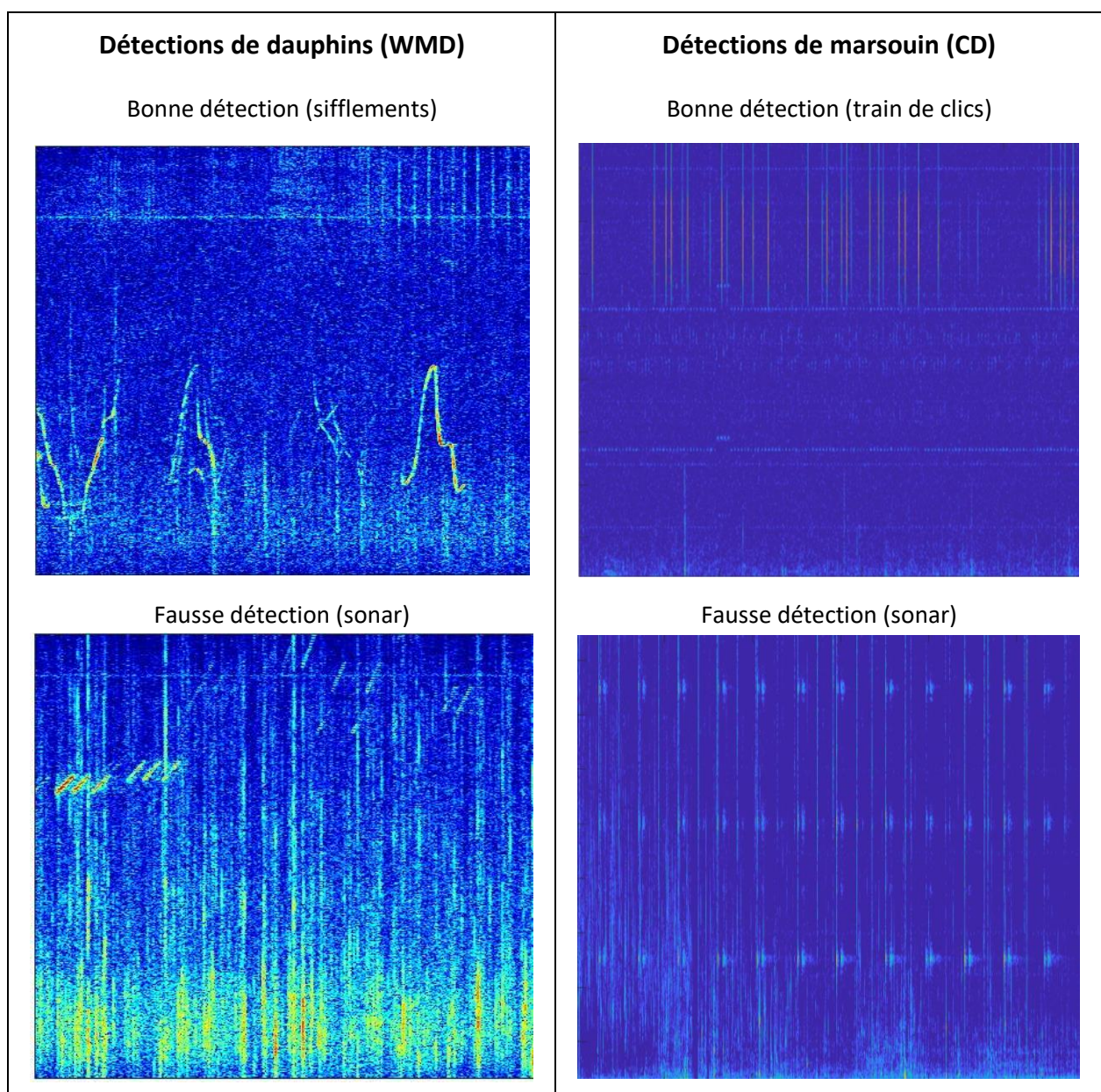


Figure 12. Exemples des spectrogrammes de bonnes et fausses détections (de dauphin à gauche et marsouin à droite) classées par l'algorithme d'intelligence artificielle puis vérifiées par un acousticien SOMME.

3.4.3.3 Détermination des évènements de présence

Les détections automatiques constituent des séquences qui peuvent être regroupées en « évènement de présence ». Les évènements de présence sont déterminés en analysant le temps inter-détections (Richard et al. 2017). En effet, l'absence de sons sur des intervalles relativement courts ne signifie pas systématiquement une véritable absence de l'espèce cible mais elle peut être due au fait que les individus ne vocalisaient pas. Une valeur seuil de temps inter-détections de 13 minutes (en absence de son sur un cycle d'acquisition de 30 %) a été déterminée automatiquement par la méthode décrite en Annexe 8.3.1. Autrement dit, cela revient à déterminer que des sifflements observés sur 2 fichiers audio de 3 min (enregistrés toutes les 10 min) consécutifs appartiennent au même évènement, et inversement l'absence de sifflements sur un fichier audio permet de déterminer un nouvel évènement de présence.

À partir de ces évènements de présence ainsi définis, des spectrogrammes d'une minute sont réalisés sur la bande de fréquence 1-40 kHz, afin de caractériser la production de clics d'écholocation associée et notamment la présence de « buzzes » (Figure 13), décrits comme une accélération des taux de clics (Madsen 2004).

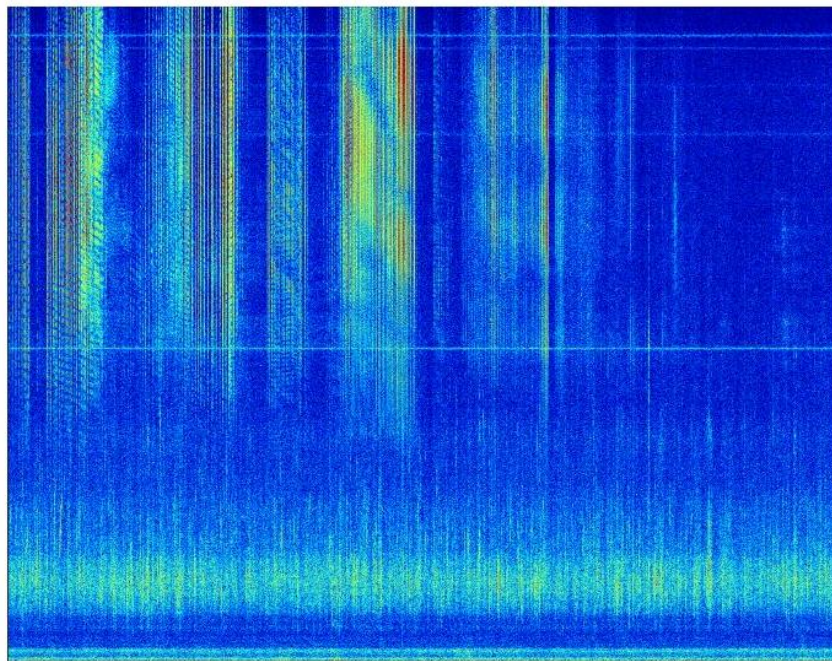


Figure 13. Exemple d'un spectrogramme d'une minute sur la bande de fréquence 1 à 40 kHz, avec présence de buzzes de dauphins.

3.4.3.4 Analyse des données de présence

Pour assurer l'inter-comparabilité des résultats de ce suivi avec les études précédentes (dont notamment l'état de référence), les temps des détections de marsouin et de dauphins ont été rééchantillonnés avec un cycle d'acquisition de 30 % (soit 3 min /10min). Les temps de détections sont ensuite convertis en *temps positifs*, c'est-à-dire nombre d'unité temporelle comprenant une présence (détection ou évènement de présence défini 3.4.3.3 et 8.3.1), ainsi que le pourcentage (défini comme le ratio entre le nombre d'unité de *temps positifs*/ le



nombre d'unité de temps total du déploiement), et ce à différentes échelles temporelles :

- Minutes positives (nombres de minutes comprenant au moins une détection ou évènement de présence) ;
- Heures positives (nombres d'heures comprenant au moins une détection ou évènement de présence) ;
- Jours positifs (nombres de jours comprenant au moins une détection ou évènement de présence).

Ces métriques sont estimées par station, et par groupe d'espèces.

3.4.3.4.1 Fréquentation journalière

Des diagrammes en barre, montrant le nombre d'heures positives par jour, sont réalisés pour illustrer l'occurrence des présences acoustiques enregistrées sur la totalité du suivi au sein de chaque station. La fréquentation de la zone par les marsouins et les delphinidés est ensuite catégorisée via 6 niveaux de présence, définis lors de l'état de référence (Chompret *et al.*, 2019) et du suivi en phase de construction (Chompret *et al.*, 2023) :

*Tableau 7. Définition de la fréquentation par les mammifères marins (Chompret *et al.*, 2019 ; 2023).*

Fréquentation	Caractéristiques	
	Périodes de détections	Taux de présence sur la période d'étude (en % de jours positifs)
Quotidienne	Une période de détections tous les jours (en tolérant quelques absences ponctuelles possibles)	>90 %
Fréquente	Une période de détections minimum tous les 2 à 4 jours	70 à 90 %
Régulière	Une période de détections minimum tous les 5 jours ou plus	50 à 70 %
Occasionnelle	Périodes de détections irrégulières dans le temps	10 à 50 %
Exceptionnelle	Une ou deux périodes de détections sur la période d'étude	<10 %
Absente	Aucune détection sur la période d'étude	0 %

3.4.3.4.2 Fréquentation horaire

Des diagrammes en rosace sont également générés pour décrire de manière relative les heures de la journée durant lesquelles ces vocalises sont enregistrées.

3.4.3.4.3 Description des évènements acoustiques

Enfin, chaque évènement de présence de delphinidés est caractérisé en termes de durée (moyenne \pm écart type, et durée maximale), et de type de vocalises émises (pourcentage de minutes positives avec une production de « buzzes » et pourcentage de minutes positives avec production de sifflements). Les distributions statistiques de ces métriques sont présentées par station, sous forme de diagrammes en violon (Figure 14). Cette représentation illustre la densité de probabilité des pourcentages de minutes positives avec présence de vocalises, permettant ainsi de visualiser la distribution des données. Ce diagramme permet donc de décrire la dispersion des valeurs et de révéler notamment plusieurs modes sur la forme de la distribution (ce qu'un diagramme en boîte, aussi appelé *boxplot*, ne permet pas toujours de révéler, cf Figure 14).

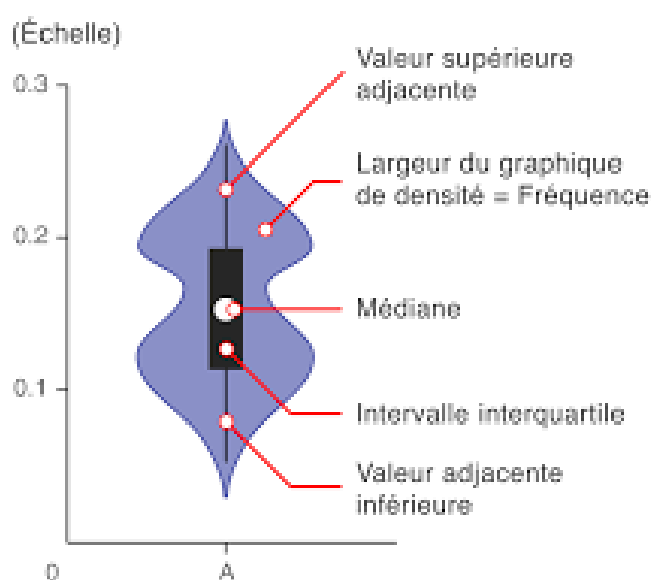


Figure 14. Schéma⁴ d'un diagramme en violon en comparaison avec un diagramme en boîte (*boxplot*).

Pour chaque évènement est informé à quel moment de la journée la présence a eu lieu parmi les trois périodes suivantes :

- Jour : défini à partir du lever du soleil jusqu'au coucher du soleil, soit à partir de 0° vis-à-vis de l'horizon ;
- Aube ou Crépuscule nautique : définit lorsque le soleil est situé entre 0° et 12° sous l'horizon ;
- Nuit : définit lorsque le soleil se trouve en dessous de 12° sous l'horizon.

Finalement, le nombre d'évènements de présence est estimé en pondérant par le nombre heures d'enregistrement obtenues pour chacune des 3 périodes (nombre d'heures de jour, de nuit et d'aube / crépuscule) au cours du déploiement.

⁴ Figure issue de « *The Data Visualisation Catalogue* »
https://datavizcatalogue.com/FR/methodes/diagramme_en_violon.html



4 Résultats

4.1 Données acquises

Un total de 82 jours de données acoustiques a été obtenu lors des 2 périodes d'enregistrement.

- Lors de l'été 2023, 35 jours de données ont été obtenues sur 6 des 7 stations, et 23 jours de données pour SE (à la suite d'un problème de mémoire interne de l'enregistreur acoustique, Tableau 3).
- Lors de l'hiver 2024, les stations acoustiques ont enregistré pendant 45 jours (pour toutes les stations).

Cet ensemble de données permet de répondre aux différents objectifs du suivi incluant la description du bruit ambiant, la caractérisation du bruit généré par les éoliennes en fonctionnement et le suivi de la fréquence de la zone par les mammifères marins.

4.2 Description générale du bruit ambiant

Les Figure 15 et Figure 16 présentent les séries temporelles des niveaux de bruit ambiant (SPL_{rms}) enregistrés pour chaque station, respectivement en été 2023 et en hiver 2024. Les Figure 17 et Figure 18 montrent la distribution statistique de ces niveaux sonores lors des deux périodes d'enregistrement. Les niveaux de bruit ambiant reçus varient selon les stations (Figure 15, Figure 16, Figure 17 et Figure 18) :

- Les stations S1, S2, NW, situées au nord-ouest du parc éolien, présentent les niveaux sonores SPL_{rms} médians les plus importants, compris entre 111,6 et 112,8 dB re 1 μ Pa en été (2023) et entre 111,2 et 117,3 dB re 1 μ Pa en hiver (2024).
- Les niveaux rms médians les plus bas sont enregistrés pour les stations SW (entre 103,8 et 106,9 dB re 1 μ Pa pour l'été 2023 et l'hiver 2024) et MB (entre 102,9 et 105,2 dB re 1 μ Pa pour l'été 2023 et l'hiver 2024).

Le nombre d'évènements ponctuels de forte intensité, détectés comme des passages de navires durant l'ensemble de la période suivie (points rouges sur la Figure 15 et Figure 16), est également variable selon les stations, avec un maximum dans le Mor Braz, au sud d'Hoedic (MB) pour les deux périodes suivies (cf. section 4.3.1).

Des cycles journaliers, plus ou moins marqués, sont également observés dans les séries temporelles de niveaux sonores de certaines stations (Figure 15 et Figure 16). Notamment sur le suivi estival (Figure 15) où on distingue notamment un pattern journalier sur S2, NW, et SW. La station MB montre également un pattern cyclique sur les périodes allant du 15 au 23 septembre et du 29 septembre au 6 octobre 2023. Pendant le suivi hivernal, ces patterns sont moins discernables sur les séries temporelles, notamment du fait des plus fortes conditions météocéaniques qui contribuent au bruit ambiant (et Figure 16).

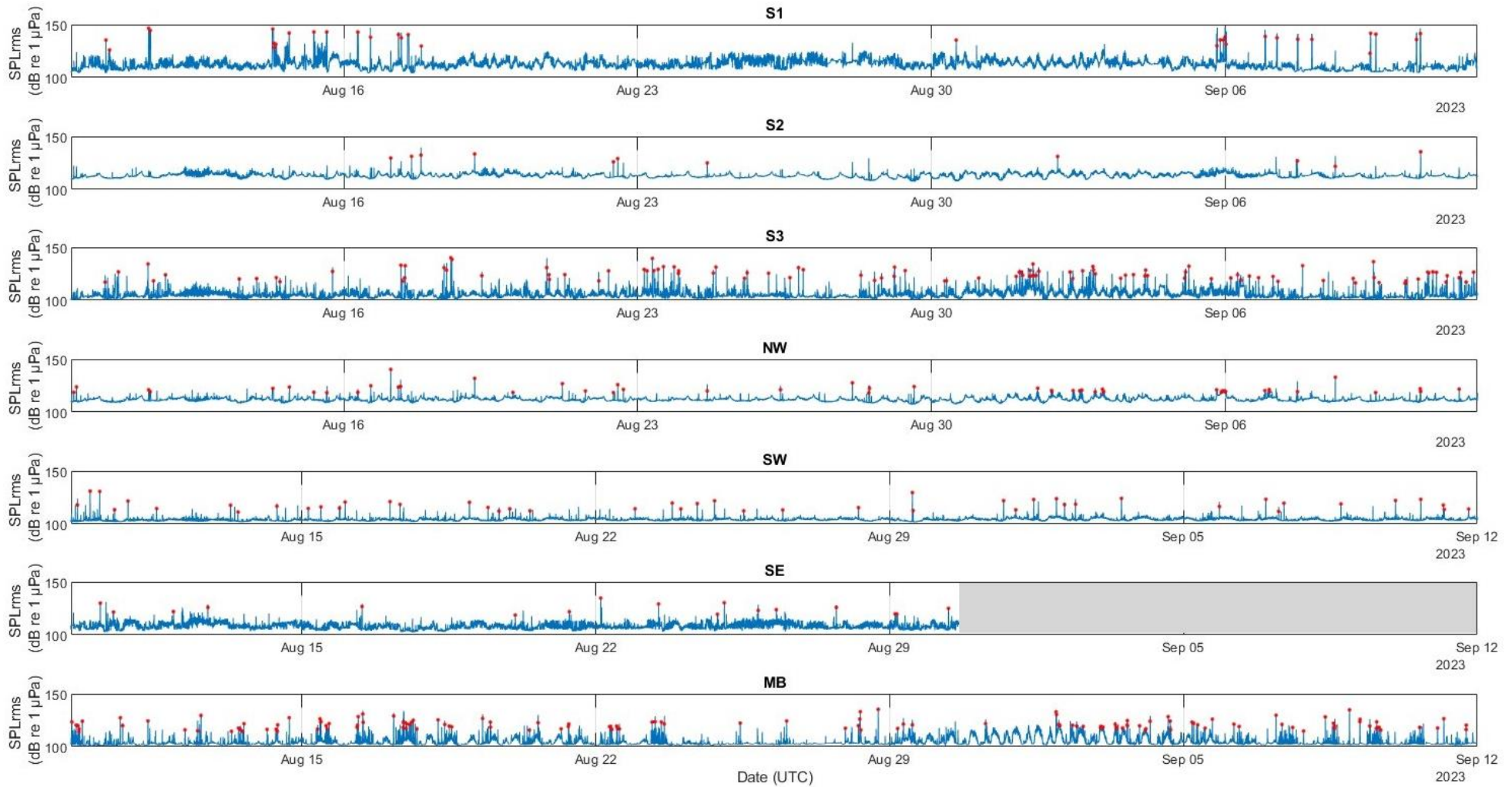


Figure 15. Suivi temporel des niveaux de bruit ambiant SPL_{rms} par station en été 2023. Les points rouges correspondent aux passages de navire détectés.

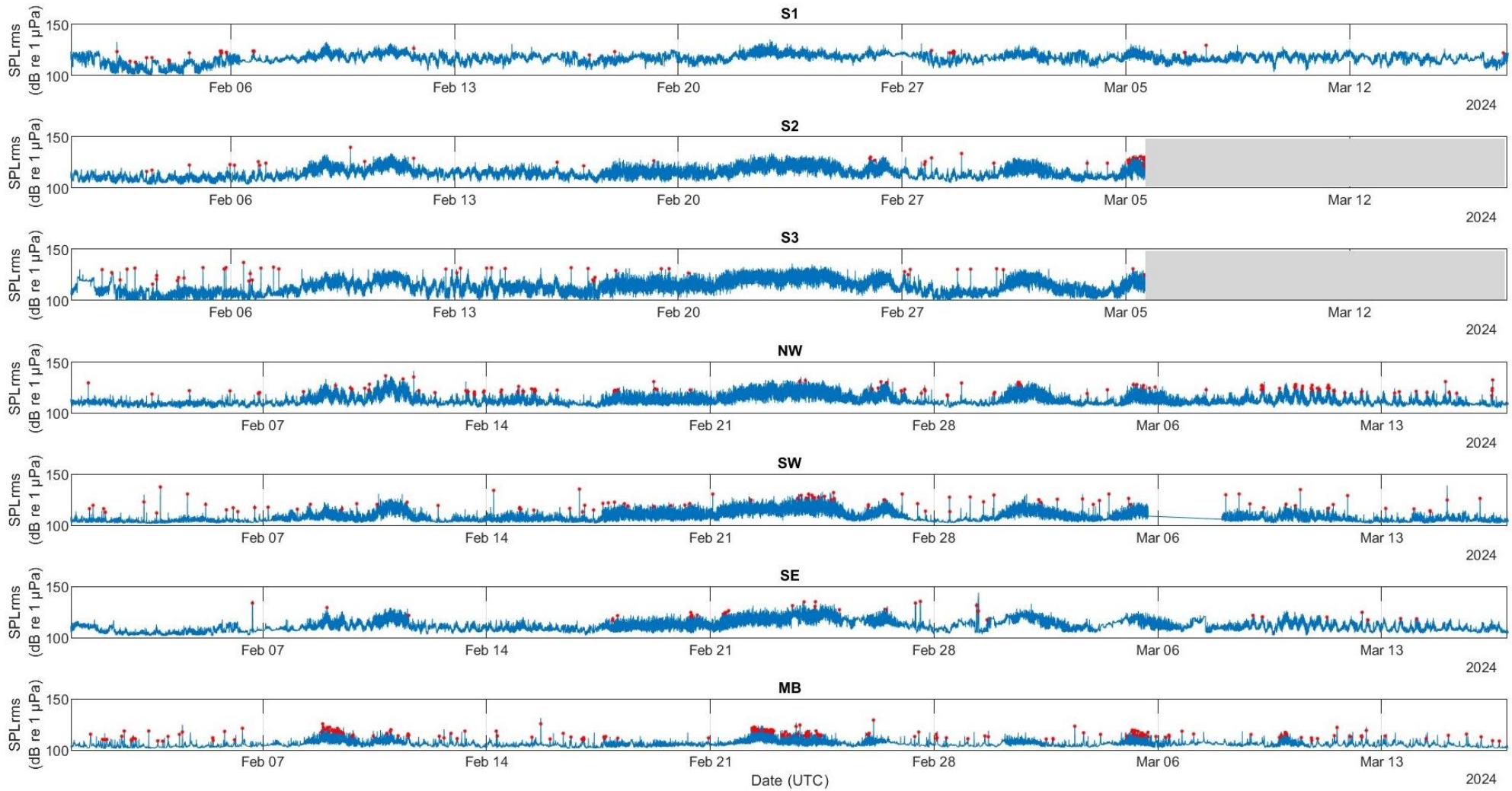


Figure 16. Suivi temporel des niveaux de bruit ambiant SPL_{rms} par station en hiver 2024. Les points rouges correspondent aux passages de navire détectés.

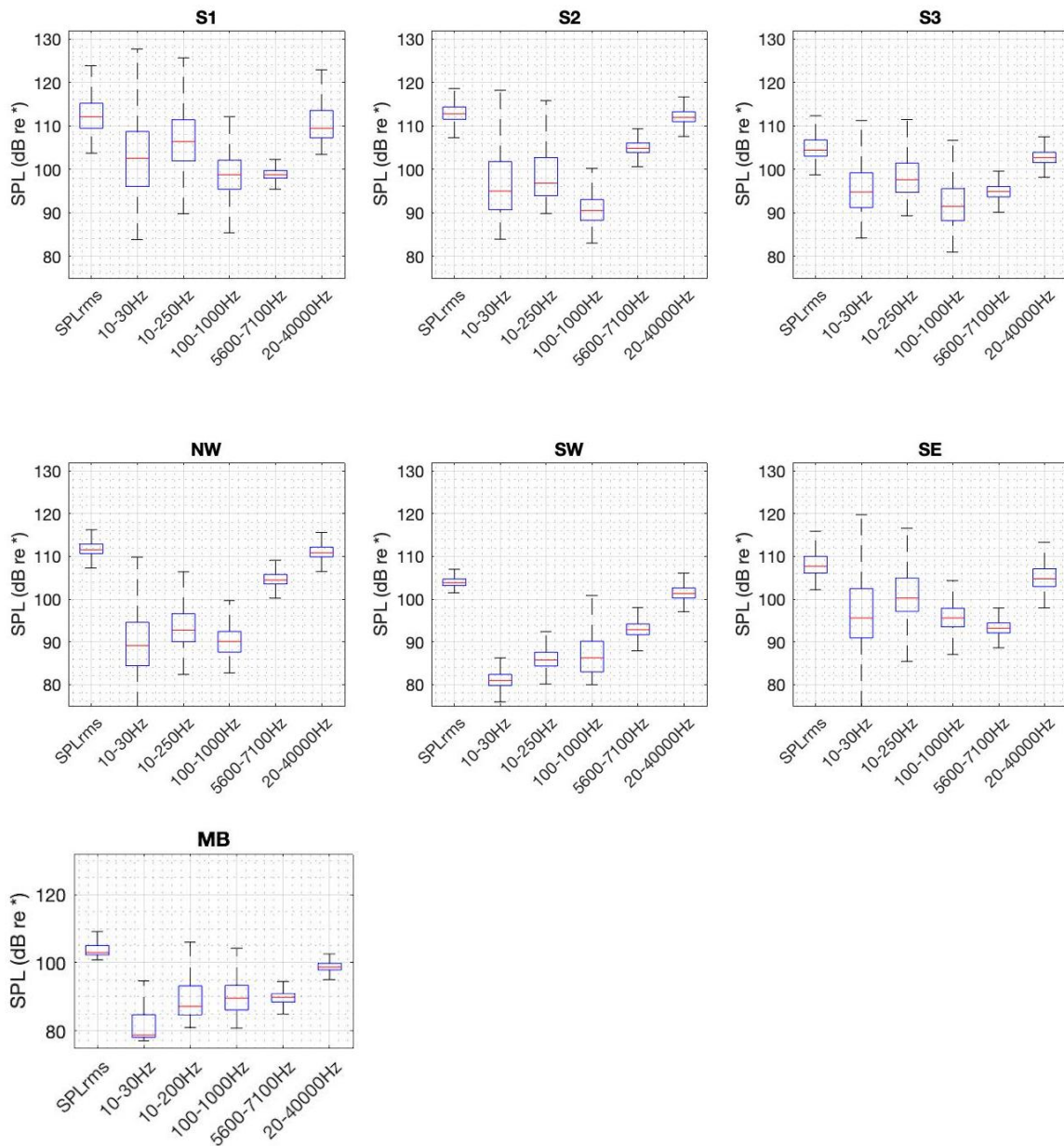


Figure 17. Distribution statistique des niveaux sonores SPL_{rms} (dB re $1 \mu Pa$) et larges bandes (intégrés dans les gammes de fréquences 10-30 Hz, 10-250 Hz, 100-1000 Hz, 5600-7100 Hz et 20-40000 Hz ; dB re $1 \mu Pa^2$) enregistrés pour chaque station lors de la période estivale 2023.

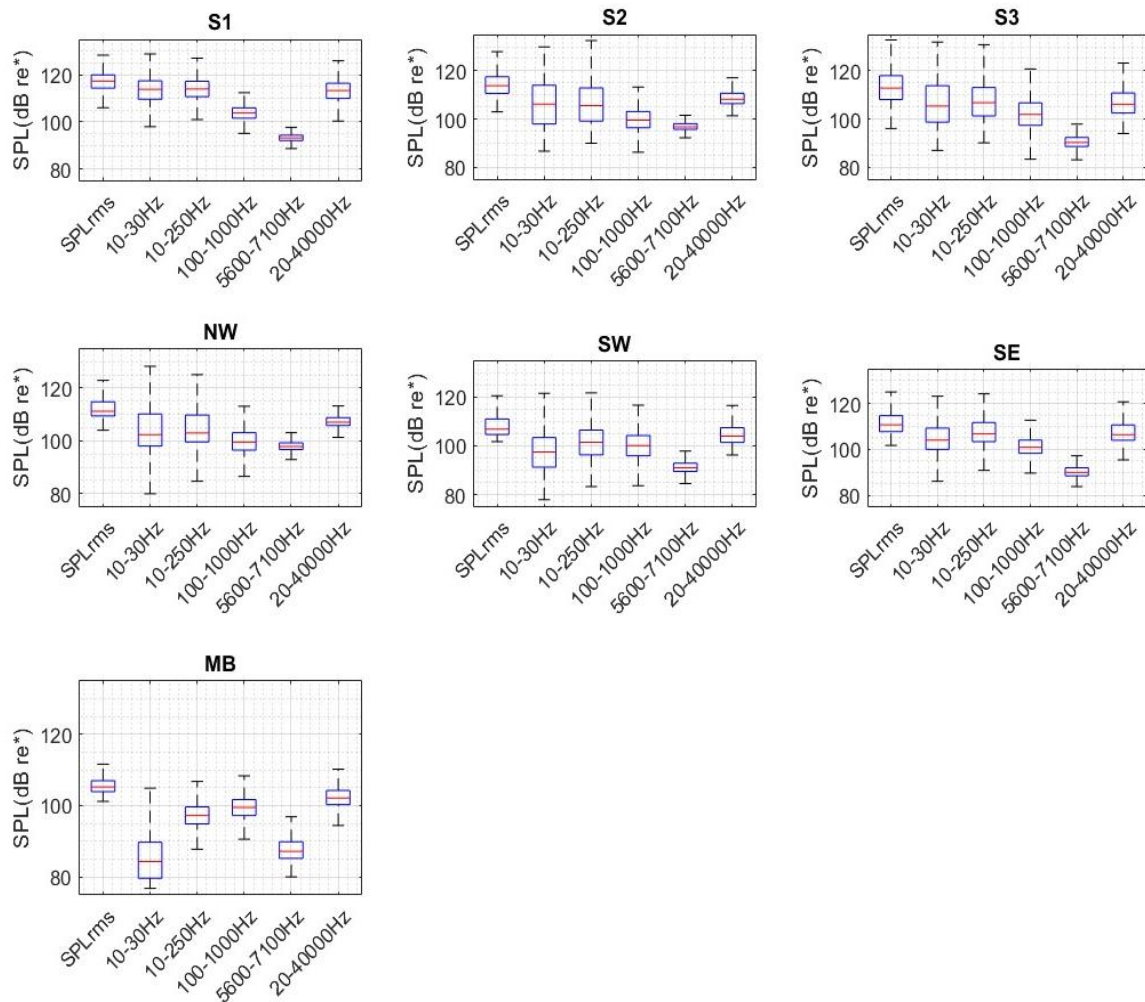


Figure 18. Distribution statistique des niveaux sonores SPL_{rms} (dB re 1 μPa) et larges bandes (intégrés dans les gammes de fréquences 10-30 Hz, 10-250 Hz, 100-1000 Hz, 5600-7100 Hz et 20-40000 Hz ; dB re 1 μPa^2) enregistrés pour chaque station lors de la période hivernale 2024.

Le contenu fréquentiel du bruit ambiant enregistré varie selon les stations (Figure 19 et Figure 20).

- Les stations situées au sein du parc ou à proximité immédiate (S1, S2, S3, NW, SE) présentent une importante composante basse fréquence comprise entre 10 et 250 Hz (Figure 17, Figure 18, Figure 19 et Figure 20). Cette composante est visible sur le spectre médian de la station SW située un peu plus à l'écart du parc (à 2640 m de l'éolienne la plus proche) en hiver (Figure 20) mais ne l'est pas en été (Figure 19). Cette composante est également absente des spectres médians mesurés au Mor Braz (MB) située en dehors du parc (à plus de 18 km, proche de l'île d'Hoëdic).
- Deux autres pics d'énergie sont remarquables à 200 et 800 Hz pour l'ensemble des stations (Figure 19 et Figure 20).
- Bien que moins marquée pour MB, l'ensemble des stations présente également une forte composante fréquentielle centrée autour de 6 kHz (Figure 17, Figure 18, Figure 19 et Figure 20).

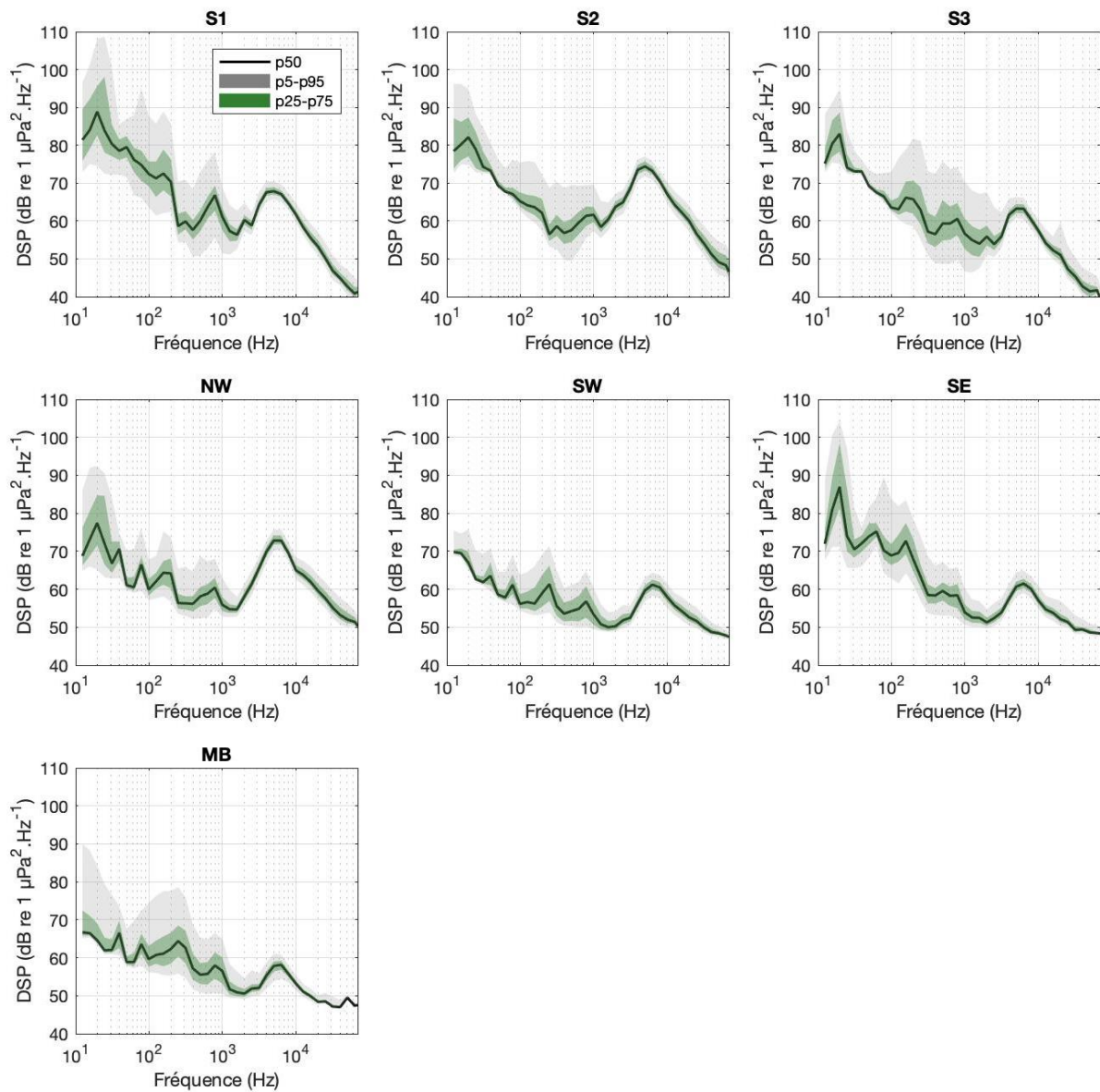


Figure 19. Spectres médians du bruit ambiant enregistrés au sein de chaque station l'été 2023.

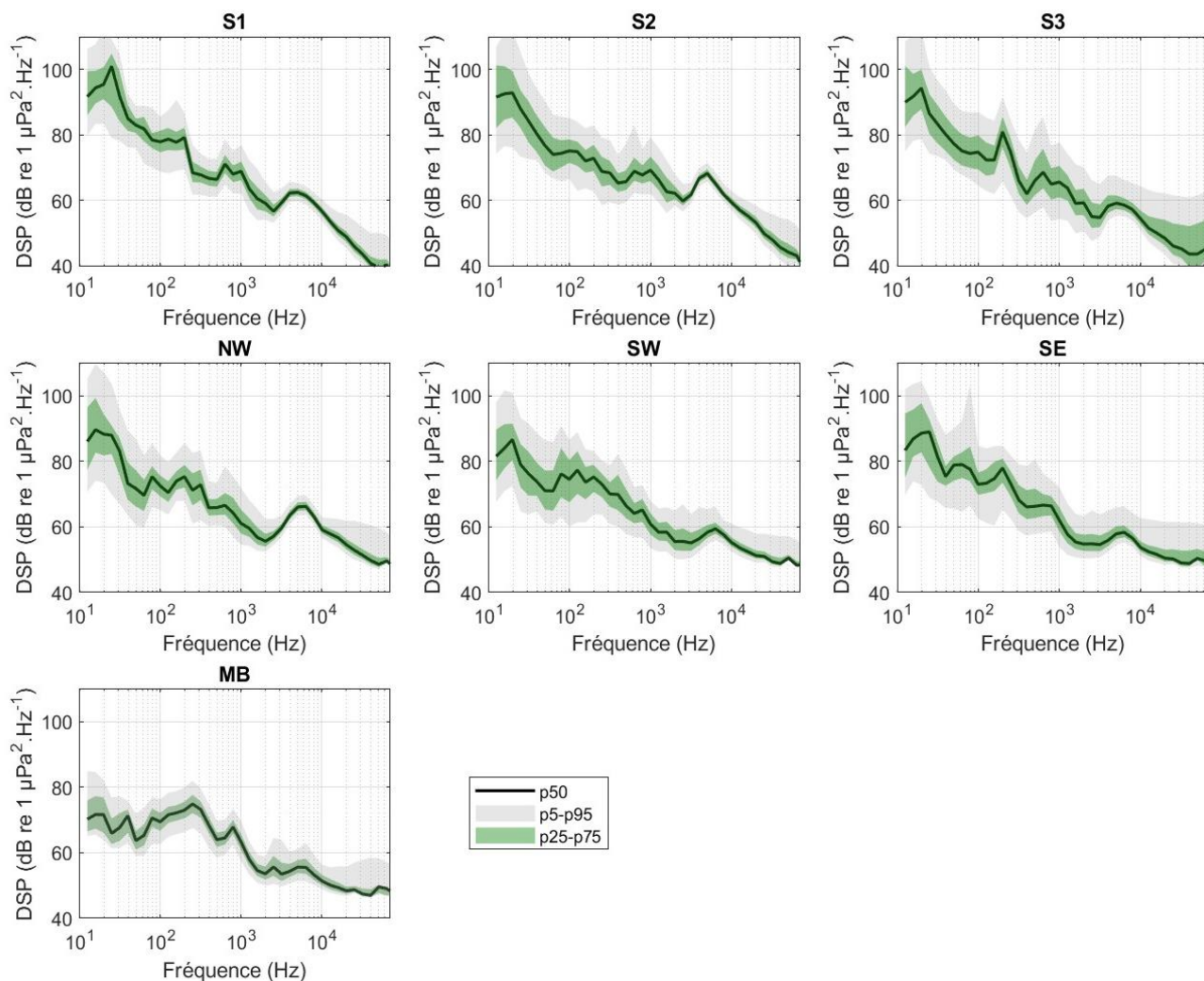


Figure 20. Spectres médians du bruit ambiant enregistrés au sein de chaque station en hiver 2024.

La réalisation de spectrogrammes long-terme permet de décrire avec une vision globale le paysage sonore en montrant comment ces composantes fréquentielles évoluent au cours du temps. La Figure 21 illustre un spectrogramme réalisé sur une période d'une semaine de données (du 17/08/2023 au 23/08/2023) enregistrées par la station S1. On y retrouve les différentes composantes du bruit ambiant aperçues précédemment sur les spectres acoustiques médians. Chacune de ces composantes est décrite dans les sections suivantes.

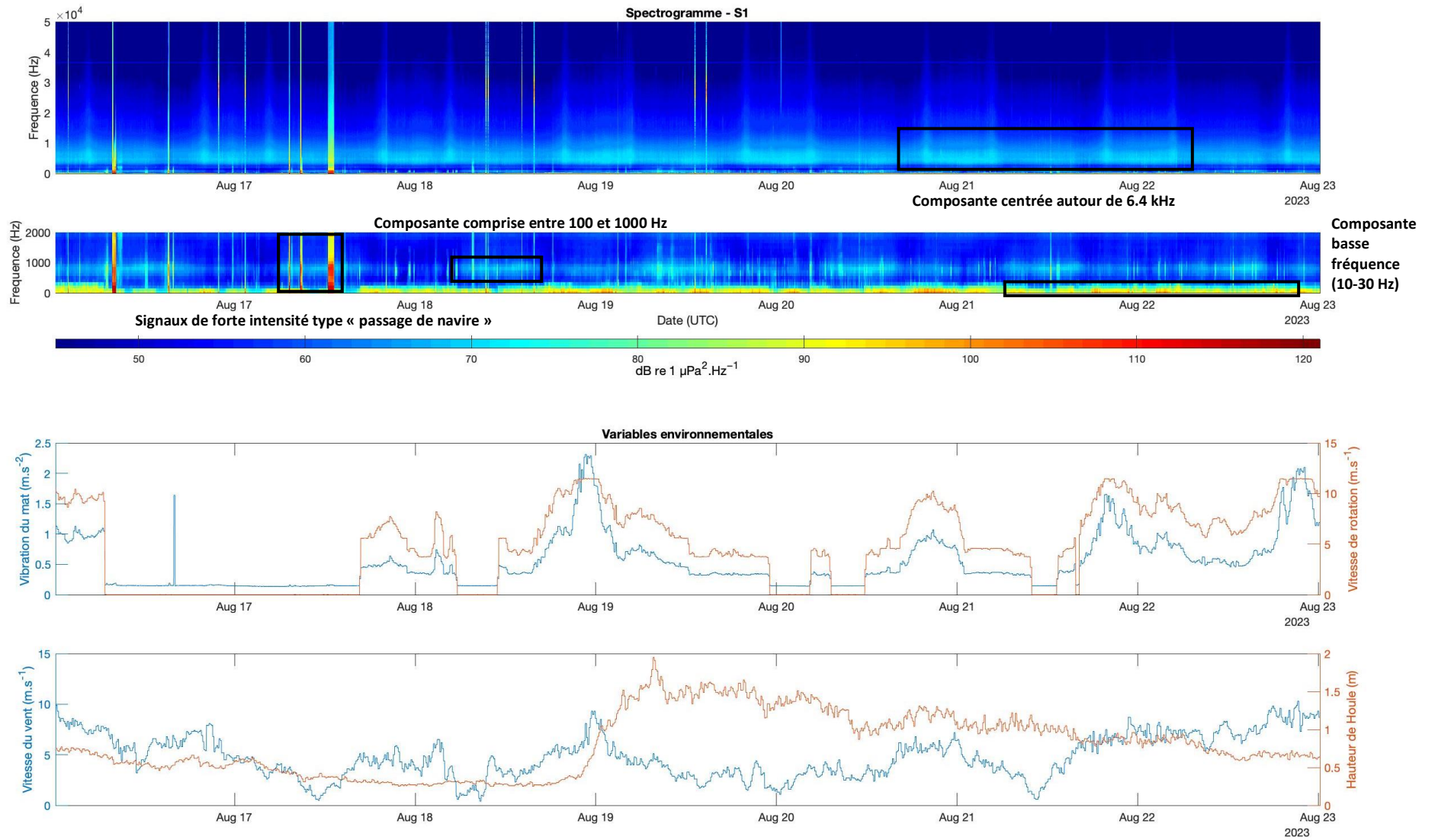


Figure 21. Spectrogramme long terme calculé sur une période d'une semaine enregistrée par la station S1.



4.3 Contribution des activités anthropiques

4.3.1 Trafic maritime

Le spectrogramme long-terme illustré précédemment, met en évidence un cycle journalier dans la gamme de fréquence correspondante aux bruits générés par les passages de navires (entre 100 et 1000 Hz), avec des niveaux de bruit plus élevés le jour que la nuit (Figure 21).

Des passages de navires à proximité des stations acoustiques ont été détectés lors de ce suivi. Le tableau suivant résume le nombre de détections par station. On remarque une plus forte présence de navires à proximité des stations MB (dans le Mor Braz). On note également de nombreuses détections sur la station S3 (au centre du parc éolien) lors de la période estivale (2023) ainsi que sur les stations plus à l'ouest du parc (SW et NW) lors de la période hivernale (2024).

Tableau 8. Résumé du nombre de détection de passages de navires par station.

Station	Nombre de passages de navire détectés	
	Du 09/08/2023 au 12/09/2023	Du 31/01/2024 au 19/03/2024
S1	28	31
S2	11	29
S3	105	39
NW	41	66
SW	42	97
SE	14	33
MB	129	185

Ces passages de navire génèrent des bruits continus, d'une durée de l'ordre de la dizaine de minutes (Figure 22 ; Figure 23). Les fréquences reçues dépendent de la distance de l'enregistreur au navire, cependant on observe généralement une forte augmentation d'intensité acoustique dans la bande de fréquence 100 – 2000 Hz avec un maximum entre 200 et 1000 Hz (Figure 22 ; Figure 23, Figure 24). On observe également différentes raies d'énergie à certaines fréquences spécifiques (entre 50 et 200 Hz, Figure 24). Ces événements acoustiques sont souvent associés à des sons impulsifs générés par les systèmes sonar des navires (Figure 22).

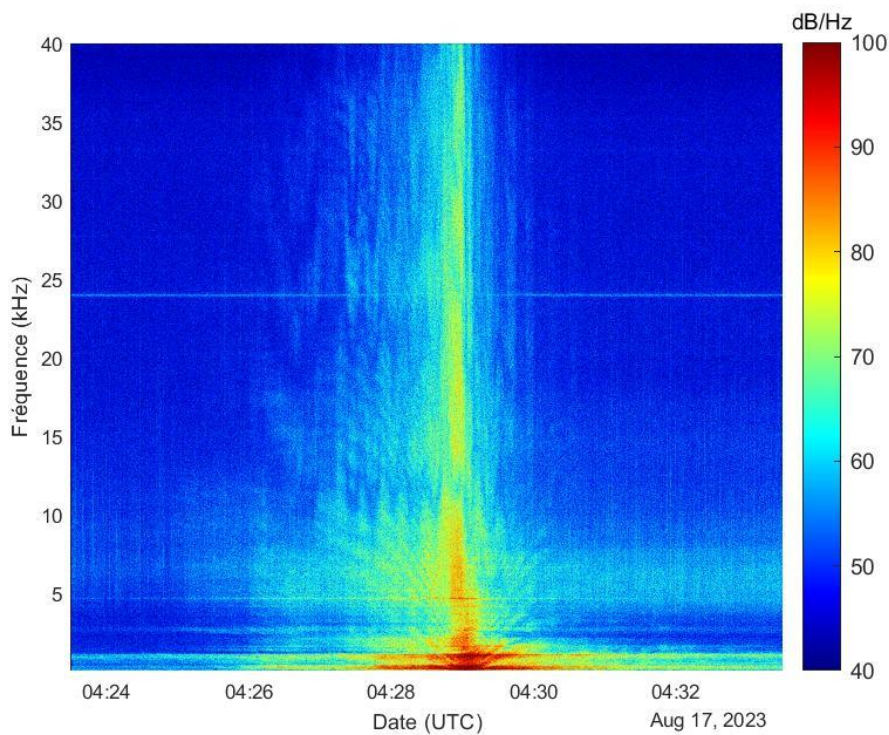


Figure 22. Spectrogramme d'un passage de navire enregistré par la station MB.

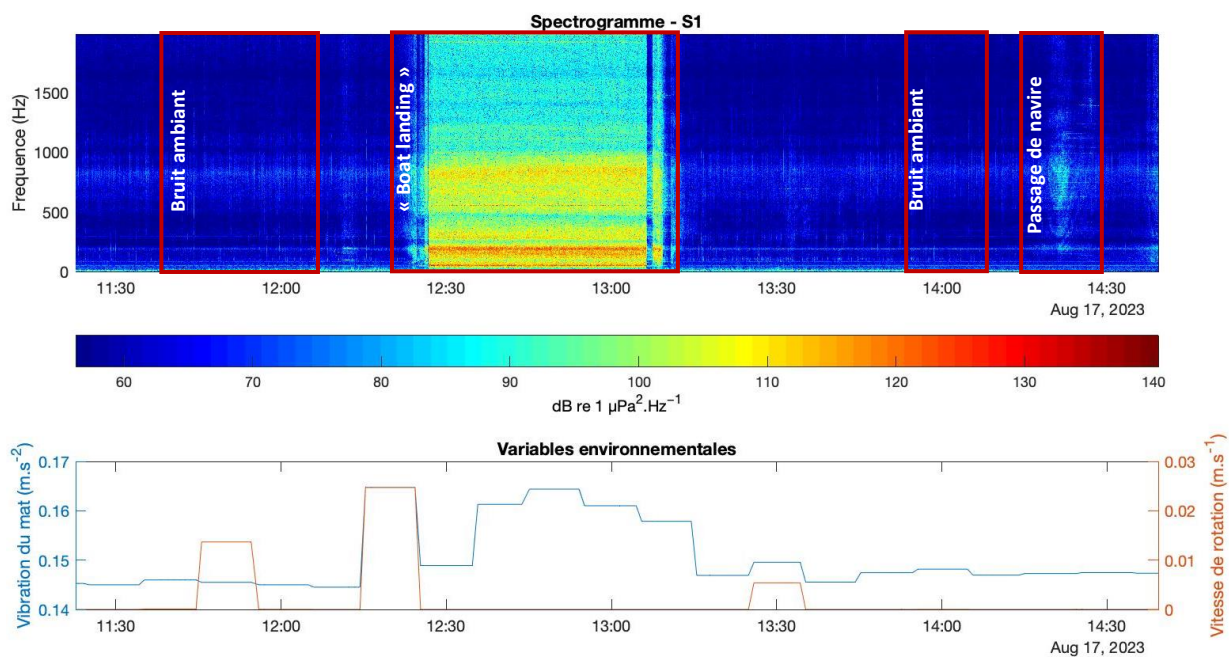


Figure 23. Spectrogramme montrant des signaux générés par une manœuvre de "boat landing" et un passage de navire, enregistré au niveau de la station S1.

Des bruits de navires spécifiques ont été observés sur les stations situées au sein du parc, notamment sur la station S1 (Figure 23). Le spectre acoustique de ces événements présente des similitudes avec ceux des passages de navire (Figure 22 ; Figure 24). Cependant, ces bruits de navire sont caractérisés par des durées et intensités plus importantes (Figure 23). Ces caractéristiques correspondent aux manœuvres de « boat landing » des navires « CTV »⁵, c'est-à-dire l'approche de la fondation et la poussée du bateau contre la structure pour permettre le transfert de personnel de maintenance sur les éoliennes. Sur cet exemple de « boat landing », le niveau SPL_{RMS} est de 140 dB re.1μPa à 75m soit un niveau source estimé autour de 168 dB re.1μPa@1m.

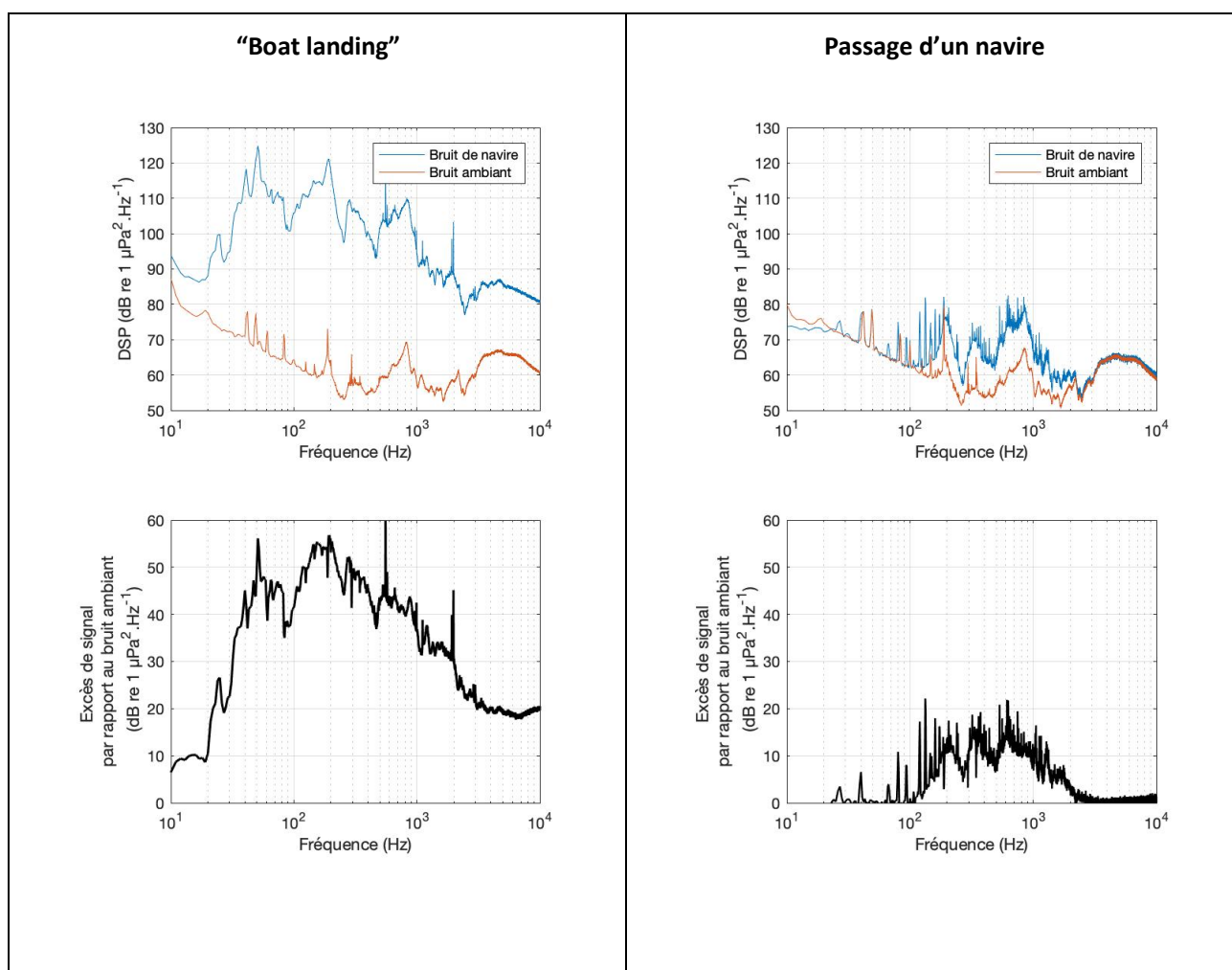


Figure 24. Spectre acoustique du "boat landing" à 75 m et du passage d'un navire (distance non connue) visible sur la Figure 23. L'excès de signal généré par ces activités par rapport au bruit ambiant estimé dans des conditions calmes et en absence d'activité humaine (Figure 23) est présenté en dessous de chaque spectre.

⁵ Les signatures acoustiques observées sur la Figure 23 correspondent bien à des activités de CTV sur place (communication EDF-RE)

4.3.2 Bruit généré par les éoliennes en fonctionnement

Les Figure 25 et Figure 26 montrent les différences entre les spectres acoustiques du bruit enregistrés au niveau des stations situées dans le parc par rapport au bruit enregistré au niveau de la station SW, considérée comme référence, étant en limite de l'émergence acoustique du parc éolien (cf. analyse sur l'émergence acoustique ci-après, Figure 30). Ces figures caractérisent la signature acoustique des éoliennes par rapport au bruit ambiant. Ainsi **la signature acoustique du parc peut générer du bruit dans la gamme de fréquence 10-250Hz avec un maximum d'intensité centré autour de 20Hz** (Figure 25 et Figure 26). Le bruit reçu dans cette bande de fréquence semble corrélé avec la distance séparant la station d'écoute de l'éolienne la plus proche. En effet, les niveaux de bruit reçus dans la bande de fréquence 10-250 Hz ($SPL_{10-250Hz}$) sont plus élevés pour les stations situées dans et à proximité directe du parc avec un maximum pour la station S1 située à 75 m de l'éolienne F01 (entre 106 et 114 dB re $1 \mu Pa^2$; Figure 17 et Figure 18, cf. Annexe 8.1.5). Les variations observées au sein de chaque station (mises en évidence par l'écart entre le spectre estimé via le percentile 25 des niveaux enregistrés et celui estimé via le percentile 75, Figure 25 et Figure 26) sont probablement générées par les différents modes de fonctionnement des éoliennes durant le suivi (vitesse de rotation).

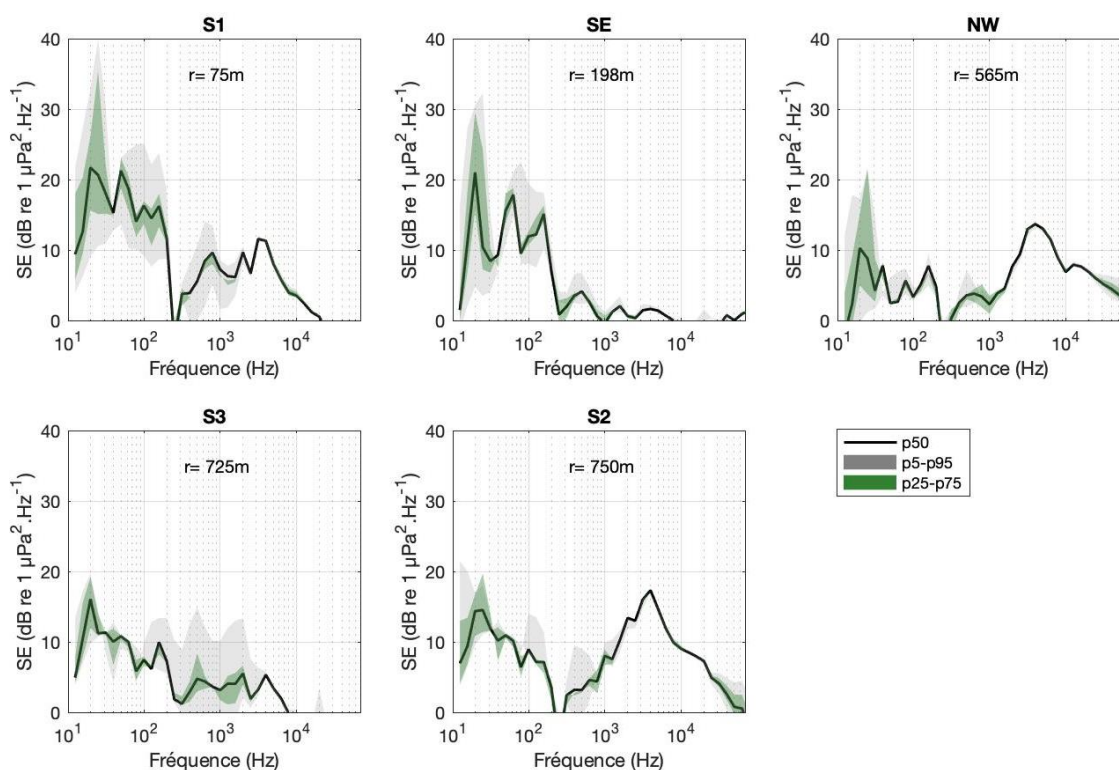


Figure 25. Excès de signal enregistré au niveau des stations situées dans ou à proximité directe du parc par rapport au bruit ambiant enregistré au niveau de la station témoin SW (située en dehors du parc).

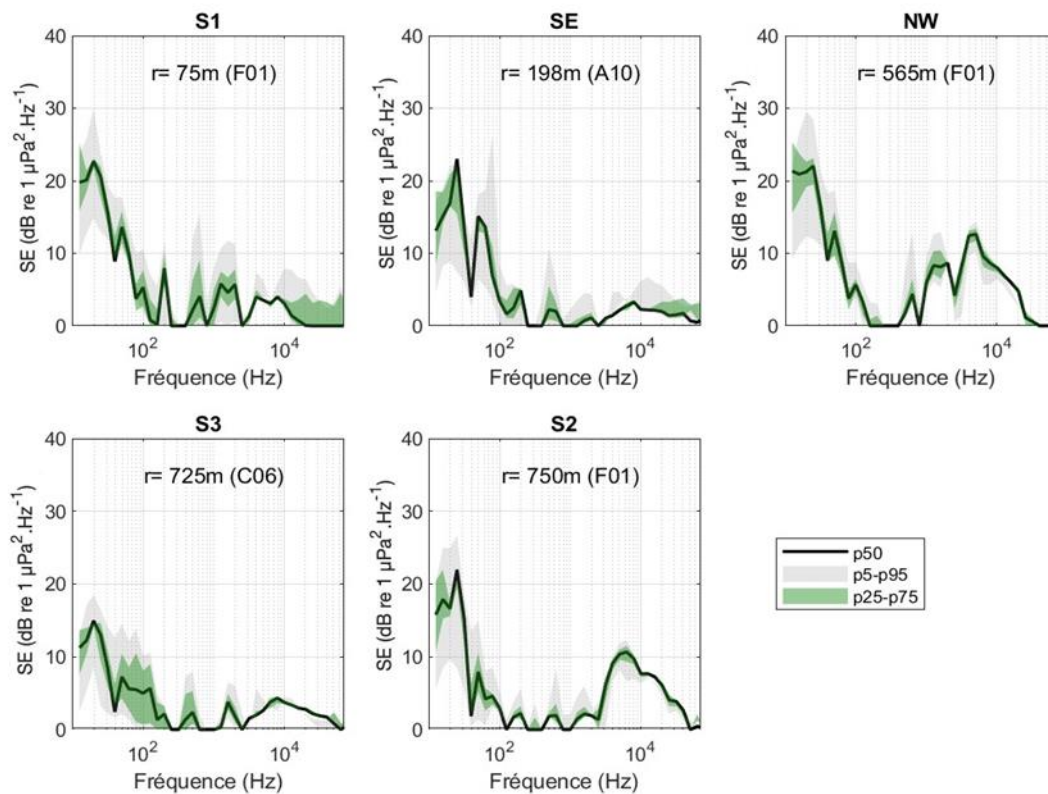


Figure 26. Excès de signal enregistré au niveau des stations situées dans ou à proximité directe du parc par rapport au bruit ambiant enregistré au niveau de la station témoin SW (située en dehors du parc).

Théoriquement, le bruit généré par les éoliennes en fonctionnement est induit par la vibration de leur mât, engendrée par la rotation des pales. La Figure 27 montre la relation entre le vent, la vitesse de rotation des pales de l'éolienne F01 et le niveau de vibration moyen de son mât ou de la nacelle. Les données de vibration proviennent d'accéléromètres fixés directement sur l'éolienne (F01). Les niveaux de vibration du mât et de la nacelle enregistrés sont corrélés positivement à la vitesse du vent et à la vitesse de rotation des pales (Figure 27). La vitesse de rotation plafonne à 11,5 rpm, correspondant à la vitesse plateau (maximale) des éoliennes du parc éolien en mer de Saint Nazaire (modèle Haliade 150). Une fois cette vitesse de rotation atteinte, les niveaux de vibrations du mât et de la nacelle continuent d'augmenter avec la vitesse du vent jusqu'à des maximums enregistrés entre 2,9 à 3,2 $m.s^{-2}$ ⁽⁶⁾. On observe également que lorsque l'éolienne est à l'arrêt, les niveaux de vibrations du mât et de la nacelle peuvent varier entre 0,12 à 0,18 $m.s^{-2}$.

⁶ Les vibrations mesurées via un accéléromètre sont rapportées en accélérations ($m.s^{-2}$).

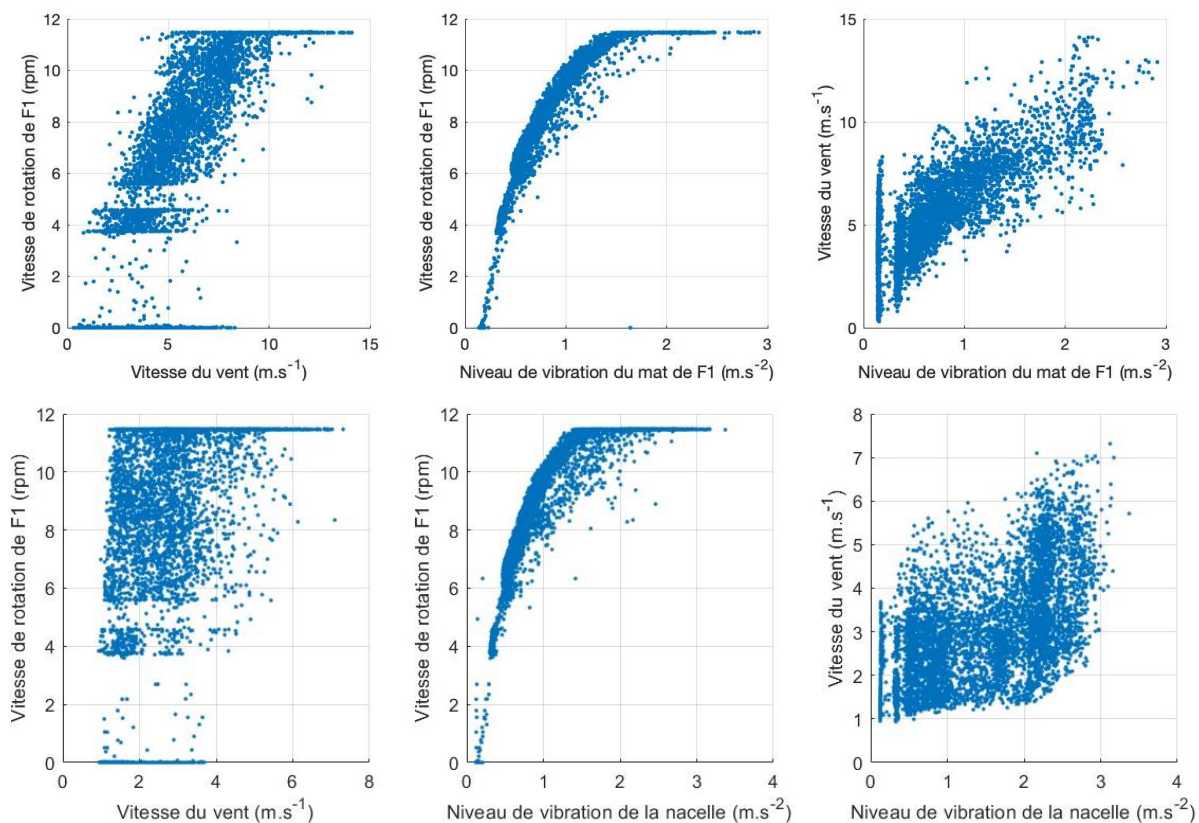


Figure 27. Relation entre la vitesse du vent, la vitesse de rotation des pales de l'éolienne F1 (rpm : rotation par minute) et le niveau de vibration moyen de son mât en été 2023 (ligne du haut) et en hiver 2024 (ligne du bas).

Les niveaux acoustiques large bande $SPL_{10-250Hz}$ enregistrés au niveau de chaque station ont été comparés à la vitesse de rotation des pales de l'éolienne la plus proche pour les deux périodes de suivis (Figure 28 et Figure 29). Des relations positives entre ces deux variables sont visibles pour les stations S1, SE, NW, S2 et S3 (Figure 28, Figure 29 et Figure 62). Ces relations sont plus marquées pour les stations les plus proches des éoliennes, c'est à dire S1 (à 75m de l'éolienne F01), SE (à 198 m de l'éolienne A10) et NW (à 565 m de l'éolienne F01). Bien que globalement positives, ces relations ne sont ni linéaires ni monotones. La forme de la relation comporte des courbures et un maximum compris entre 8 et 10 rpm selon les stations. En se focalisant sur S1, on observe également des niveaux sonores plus importants lors du démarrage de l'éolienne F01 (autour de 3,8 rpm, cf. Figure 28, Figure 29 et Figure 62). Sur cette station se trouvant la plus proche d'une éolienne (75 m) les niveaux sonores ($SPL_{10-250Hz}$) enregistrés par la station S1 varient entre 105 et 115 dB re $1 \mu Pa^2$.

Les niveaux $SPL_{10-250Hz}$ enregistrés par les stations SW et MB, situées à l'extérieur du parc (respectivement à 2,6 et 18,3 km de l'éolienne la plus proche), ne montrent pas de relation avec la vitesse de rotation des pales des éoliennes. Ces deux stations sont ainsi considérées comme témoins pour étudier les autres contributeurs au paysage acoustique (vent, houle, sections 4.4).

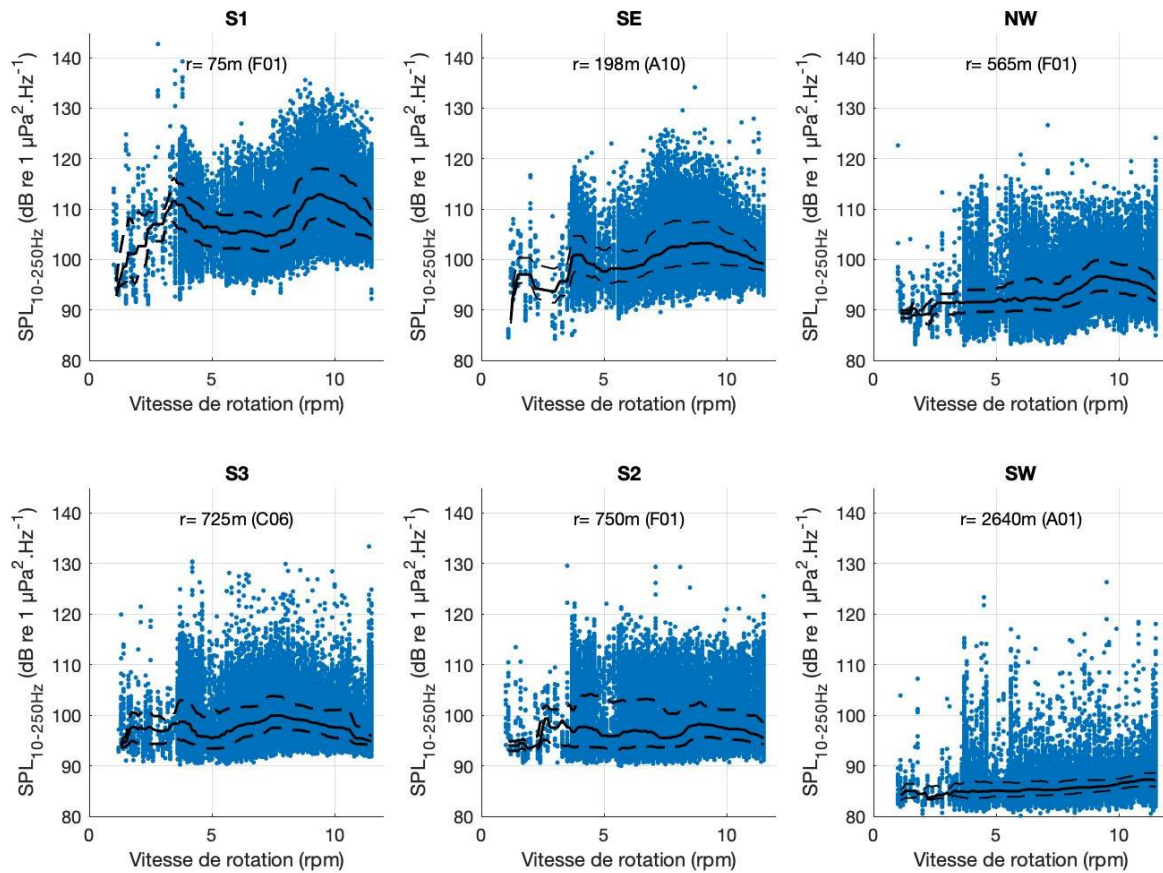


Figure 28. Relation entre les niveaux de bruit reçus dans la bande de fréquence 10-250 Hz et la vitesse de rotation (rpm) de l'éolienne la plus proche pour chaque station (r est la distance station – éolienne) l'été 2023. Les périodes avec une houle supérieure à 1.5m n'ont pas été prises en compte.

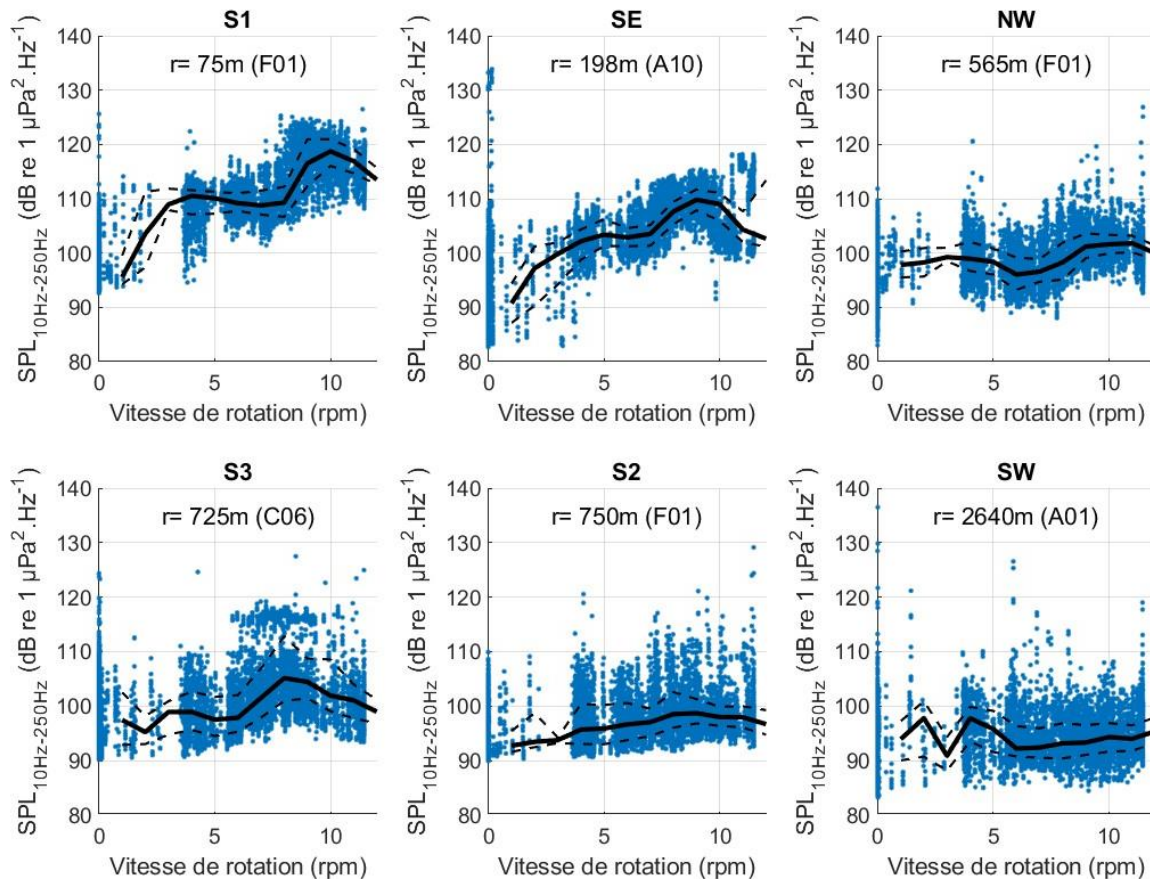


Figure 29. Relation entre les niveaux de bruit reçus dans la bande de fréquence 10-250 Hz et la vitesse de rotation (rpm) de l'éolienne la plus proche pour chaque station (r est la distance station – éolienne) en hiver 2024. Les périodes avec une houle supérieure à 1.5m n'ont pas été prises en compte.

La Figure 30 montre les régressions linéaires entre les niveaux de bruit mesurés dans la bande 10-250 Hz ($SPL_{10-250Hz}$) et la distance (en logarithme) de l'éolienne la plus proche à chaque station, pour deux régimes de vitesse de rotation de pâles (entre 3 et 6 rpm et au-delà de 8 rpm), correspondant aux vitesses de rotation pour lesquelles des augmentations du niveau $SPL_{10-250Hz}$ sont observées. Figure 28 et Figure 29).

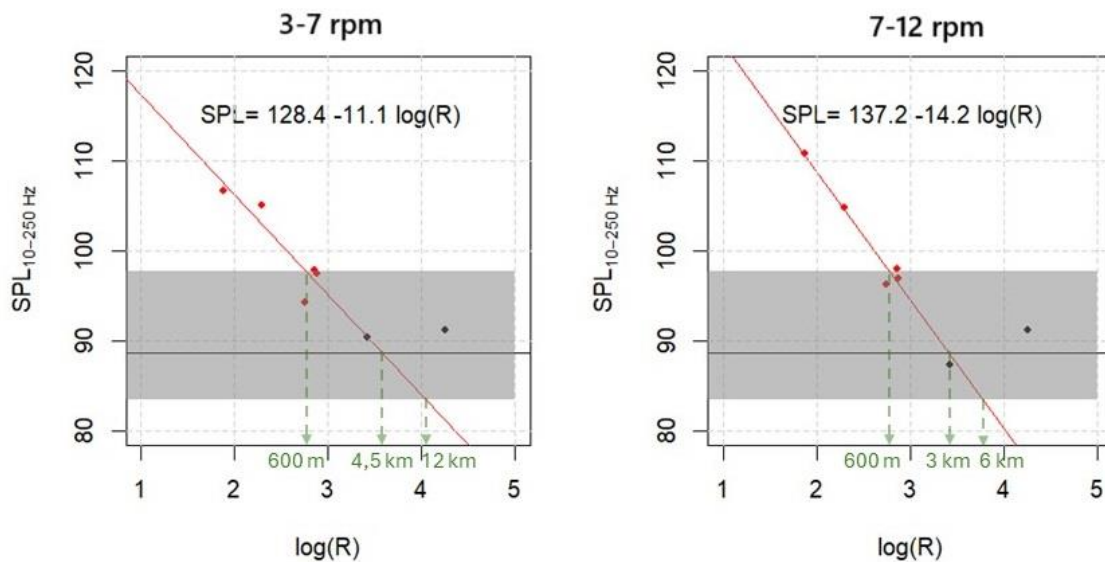


Figure 30. Estimation des pertes de propagation via la régression linéaire entre les niveaux de bruit mesurés dans la bande 10-250 Hz et la distance (en logarithme) de l'éolienne la plus proche aux stations (avec une houle <1m, pour deux régimes de vitesses de rotations). Les points rouges représentent les stations utilisées pour l'estimation de la régression linéaire (S1, S2, S3, NW et SE) tandis que les points noirs représentent les stations plus éloignées du parc (SW et MB)⁷ utilisés dans l'estimation de l'intervalle de bruit ambiant, représenté par le bandeau gris. La droite noire représente le niveau moyen de bruit ambiant mesuré sur toutes les stations.

Les régressions linéaires traduisent les équations du sonar (RL= SL-TL) pour les deux régimes de vitesse des pâles. On observe ainsi deux estimations de niveaux sources pour les deux régimes de fonctionnement des éoliennes :

- $SL_{10-250Hz} = 128,4 \text{ dB re } 1 \mu Pa^2 @1m$ à une vitesse de rotation 3 à 7 rpm.
- $SL_{10-250Hz} = 137,2 \text{ dB re } 1 \mu Pa^2 @1m$ à une vitesse de rotation 7 à 12 rpm.

Les niveaux source prédits par les régressions linéaires sont plus élevés pour les vitesses de rotation plus rapides que pour les vitesses plus lente (cohérent avec les observations des stations les plus proches de la Figure 28 et la Figure 29). Toutefois l'intensité diminue plus rapidement avec la distance : les pertes de propagations du bruit généré lorsque la vitesse de rotation des pales est élevée sont plus fortes ($TL=14,2 \cdot \log(R)$) que celles du bruit émis par des vitesses de rotation plus faibles ($TL=11,1 \cdot \log(R)$).

⁷ Ces stations sont considérées comme des stations de référence dans cette étude, ainsi sous l'hypothèse que ces stations puissent être hors de l'empreinte sonore du parc, les considérer pour estimer la régression linéaire entre les niveaux mesurés et la distance à l'éolienne la plus proche biaiserait l'estimation de la pente en sous-estimant les pertes de propagation et donc entraînerait une surestimation de l'émergence acoustique du parc.



Il est intéressant de noter sur la Figure 30 que les niveaux mesurés sur la station SW (à 2,6 km du parc), sont cohérents avec les régressions linéaires, alors que ces niveaux n'ont pas été utilisés pour estimer ces équations. Les niveaux mesurés sur SW peuvent donc être expliqués par cette relation à la distance au parc, suggérant que dans certaines conditions (houle < 1m), SW est encore dans l'émergence acoustique du parc.

L'émergence acoustique d'une éolienne en fonctionnement peut alors être déterminée par les intersections des régressions linéaires avec les niveaux de bruit ambiant. En effet ces intersections donnent les distances pour lesquelles on peut considérer que la régression n'explique plus le bruit mesuré par la distance de l'éolienne la plus proche, puisque le niveau $SPL_{10-250Hz}$ passe en dessous du niveau de bruit ambiant. Ainsi, en considérant un niveau ambiant moyen pour des conditions de houle inférieure à 1 m (cf. section 3.4.2.3) dans la bande de fréquence 10-250Hz estimé à 88 dB re $1 \mu Pa^2$ **l'émergence acoustique estimée du parc serait comprise entre 2 et 4,5 km** en fonction de la vitesse de rotation (les rotations moins rapides propageant plus loin que les plus rapides, cf. Tableau 9). Ce résultat confirme l'observation précédente concernant SW, cette station étant à la limite de l'émergence acoustique moyenne du parc. L'estimation de l'émergence acoustique d'une éolienne en fonctionnement est toutefois variable en fonction des conditions environnementales et donc du bruit ambiant. Ainsi on peut estimer des variations de l'émergence acoustique entre **600 m pour un environnement bruyant** (niveau ambiant $SPL_{10-250Hz} = 97$ dB re $1 \mu Pa^2$) correspondant notamment à des conditions de mer agitée, indépendamment de la vitesse de rotation, cf. Tableau 9) à des **distances maximales de 6 voire 12 km dans des conditions de mer très calmes** (avec un niveau de bruit ambiant basal : $SPL_{10-250Hz} = 84$ dB re $1 \mu Pa^2$, cf. Tableau 9) et en fonction de la vitesse de rotation.

Tableau 9 : Distance d'émergence acoustique d'une éolienne en fonctionnement.

Conditions sonores (niveaux de bruits environnemental)	Rotation éolienne < 7rpm	Rotation éolienne > 7rpm
Niveau de bruit ambiant basal (conditions très calmes : faible houle, peu de vent ; i.e. 25% des niveaux les plus bas mesurés sur les stations de référence) : $SPL_{10-250Hz} = 84$ dB re $1 \mu Pa^2$	12 km	6 km
Niveau ambiant moyen par condition calme (houle<1m et vitesse vent <5m/s) : $SPL_{10-250Hz} = 88$ dB re $1 \mu Pa^2$	4.5 km	3 km
Niveau ambiant : $SPL_{10-250Hz} = 91$ dB re $1 \mu Pa^2$ (vent<5m/s, houle variable)	2 km	2 km
Niveau ambiant bruyant (conditions agitées, vent>5m/s) $SPL_{10-250Hz} = 97$ dB re $1 \mu Pa^2$	0.6 km	0.6 km



Les mesures et estimations de l'émergence acoustique d'une éolienne en fonctionnement (Figure 30) permettent ensuite de prédire sur l'ensemble des éoliennes l'émergence acoustique du parc en fonctionnement (cf. Annexe 8.2). Les variations d'émergences acoustiques du parc sont illustrées sur des cartes de bruit en Annexe 8.2.2, selon différents scénarios d'activités (ex. nombres d'éoliennes en fonctionnement et vitesses de rotation des éoliennes). On observe que l'émergence acoustique maximale du parc peut atteindre une centaine de kilomètres.

Ces niveaux sonores reçus, sont à mettre en relation avec les capacités auditives des mammifères marins, afin de déterminer zones d'impact potentiels, comme décrit en Annexe 8.2.1 (Tableau 17). On observe alors dans les résultats en Annexe 8.2.3 qu'aucune émergence⁸ acoustique du parc pour les cétacés HF (delphinidés) et THF (marsouins), quelles que soient les conditions de fonctionnement du parc. Pour les phocidés, une émergence est détectable jusqu'à 1 km lorsque les éoliennes tournent à moins de 7 rpm, et jusqu'à 100 m au-delà de 7rpm, tout en restant inaudibles (sauf à une dizaine de mètres) mais pouvant potentiellement masquer d'autres signaux acoustiques d'intérêt pour ces espèces (Tableau 17). Quant aux mysticètes (cétacés BF), elles pourraient entendre les bruits des éoliennes par effet cumulé dans toute l'enceinte du parc (zone d'audibilité), plus particulièrement à une distance de 100 à 500m d'une unique éolienne, avec une émergence acoustique de 10 à 75 km en fonction des vitesses de rotations des éoliennes (Tableau 17). Dans ces zones les bruits du parc en fonctionnement pourraient masquer certaines vocalises de ces espèces, produites dans les mêmes gammes de fréquences du parc.

En résumé, la composante anthropophonique du parc est essentiellement constitué de bruits de passages de navires, de « boat landing » (transfert de personnel sur les éoliennes) ainsi que du bruit d'éoliennes en fonctionnement.

La signature acoustique des éoliennes se caractérise entre **10-250 Hz**, avec des niveaux sources dans cette bande de fréquence estimée entre **128,4 et 137,2 dB re 1 µPa2 @1m**, en fonction des vitesses de rotation des pâles, puisque les niveaux mesurés augmentent quand les rotations s'accroissent. L'émergence acoustique d'une éolienne est estimée en moyenne entre 2 et 4,5 km lors par faible houle, mais l'émergence peut varier de quelques centaines de mètres pour des conditions de bruit ambiant élevé (mer agitée et vent) jusqu'à une empreinte maximale d'une dizaine de kilomètres (avec un bruit ambiant basal).

Le bruit du parc en fonctionnement peut être audible pour les grandes baleines ainsi que les phoques, mais peuvent venir masquer d'autres signaux pour ces dernières et pour les phoques, tandis que les bruits des éoliennes sont inaudibles pour les delphinidés et marsouins (cf Annexe 8.2).

⁸ L'émergence acoustique pour les mammifères marins est définie ici comme l'aire à l'intérieur de laquelle le niveau du signal d'intérêt est supérieur au niveau du bruit ambiant, pouvant présenter du masquage acoustique même si l'intensité peut ne pas être assez élevée pour qu'il soit distinguable par l'espèce cible (Figure 71). C'est la zone d'influence la plus étendue.

4.4 Contribution des conditions environnementales

4.4.1 Influence du vent

Une première description générale consiste à mettre en relation les variations temporelles du bruit ambiant médian (filtre médian appliqué au SPL_{rms} pour retirer les bruits impulsifs tels que des passages de navire; cf. section 3.4.2.2) et les variations des conditions de vent au cours du temps. En se focalisant sur les quatre stations NW, SW, SE et MB, on observe une relation positive entre l'augmentation de la vitesse du vent et le niveau bruit ambiant médian, (pentes positives pour les deux régressions, avec $p < 0,05$, Figure 31 et Figure 32) sauf pour les stations du MB et NW sur la période estivale (pentes nulles, $p > 0,05$, Figure 31). Lors de la période estivale, les pentes des deux stations du sud (SE et SW) sont plus petites que sur la période hivernale, mais cela peut s'expliquer par des vitesses de vent moins élevées en été (< 10 m/s) qu'en hiver (pouvant dépasser les 15m/s). Ainsi, on observe **en été que moins de 10% de la variance des niveaux de bruit médian ambiant mesurés sur les deux stations du sud** peuvent être expliqués par la vitesse du vent tandis qu'**en hiver 30 et 40% de la variance des niveaux sonores mesurés sur les quatre stations peuvent être expliqué par le vent** (voire les R^2 sur Figure 31 et Figure 32). Il est intéressant de noter que la pente de cette régression estimée en hiver dans le Mor Braz est moins importante que pour les stations proches du parc, suggérant qu'une augmentation de la vitesse du vent dans le parc peut engendrer plus de bruit au sein du parc du fait des autres effets corrélés au vent (comme la vitesse de rotation des pales ou de vibrations des éoliennes, cf. Figure 27, ou encore la houle).

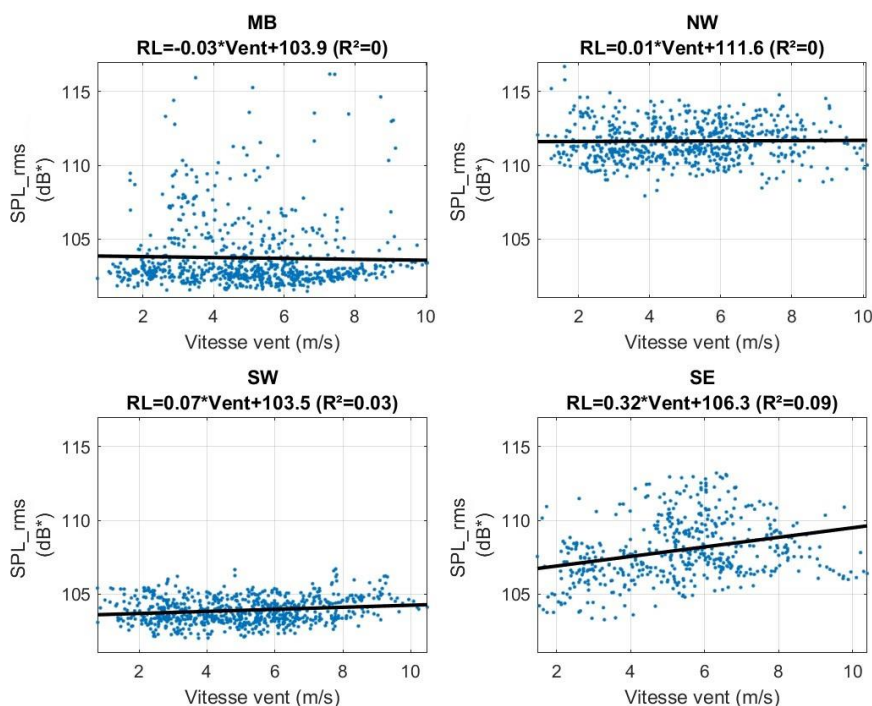


Figure 31. Régression linéaire entre la vitesse du vent (m/s) et les niveaux médians SPL_{rms} estimés sur les quatre stations : MB, NW, SW et SE lors du suivi estival (2023).

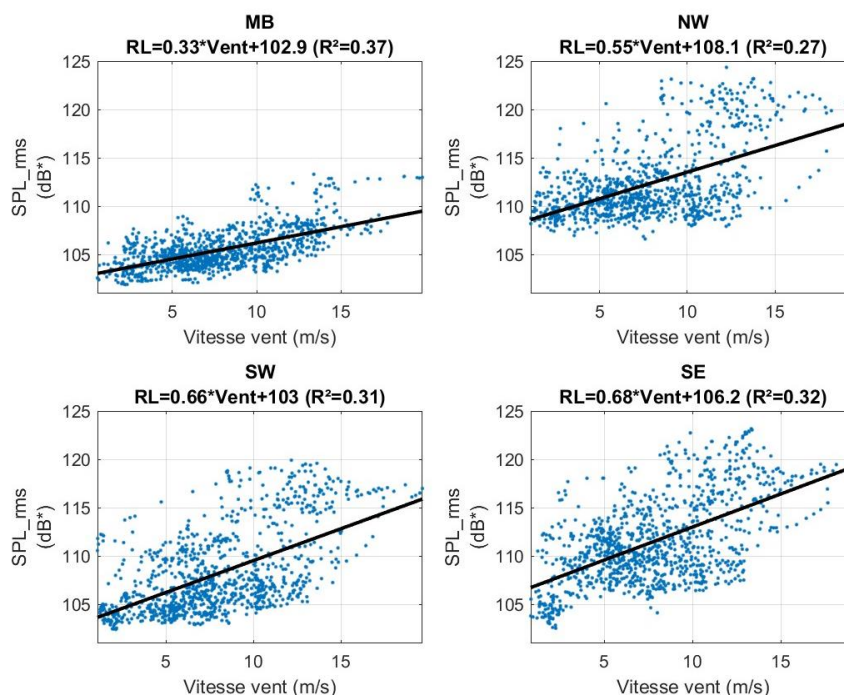


Figure 32. Régression linéaire entre la vitesse du vent (m/s) et les niveaux médians SPL_{rms} estimés sur les quatre stations : MB, NW, SW et SE lors du suivi hivernal (2024).

En se focalisant sur une caractérisation un peu plus fine au niveau fréquentiel, Figure 33 et Figure 34 présentent les spectres médians de bruit ambiant des stations SW et MB en fonction des conditions de vent (échelle de Beaufort) sur les deux périodes de suivis.

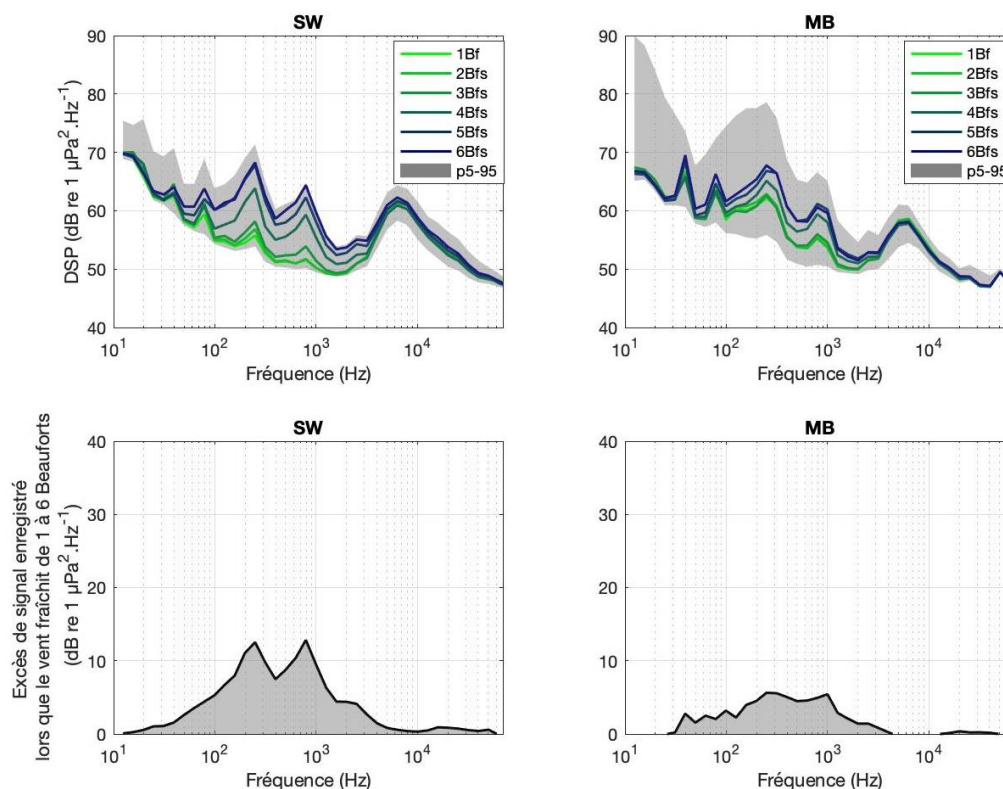


Figure 33. Spectres médians du bruit enregistré en été 2023 au sein des stations SW et MB en fonction des conditions de vents (échelle de Beaufort). La deuxième ligne de figures montre l'excès de signal généré par un vent fraîchissant de 1 à 6 Bfs.

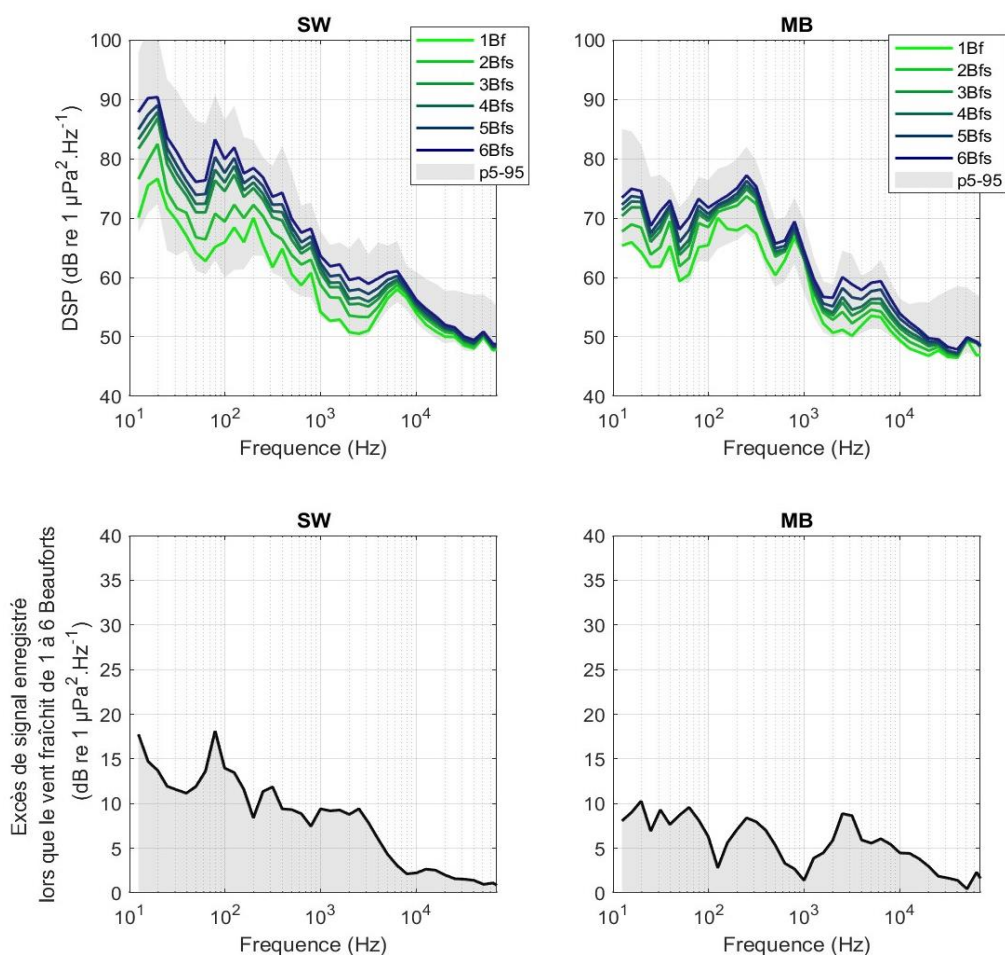


Figure 34. Spectres médians du bruit enregistré en hiver 2024 au sein des stations SW et MB en fonction des conditions de vents (échelle de Beaufort). La deuxième ligne de figures montre l'excès de signal généré par un vent fraîchissant de 1 à 4 Bfs.

Comme évoqué précédemment, les stations SW et MB ne semblent pas être influencées par le bruit généré par les éoliennes. L'augmentation de la vitesse du vent génère une augmentation de l'intensité acoustique dans la bande de fréquence 50-1200 Hz avec un maximum compris entre 250 et 1000 Hz. Lorsque le vent fraîchit de 1 à 6 Bfs, on observe sur le suivi estival une augmentation de 12 et 5 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$ à 250 Hz et 800 Hz pour SW et MB respectivement. Pendant le suivi hivernal, cette augmentation s'observe également à 250 Hz avec des écarts de 12 et 8 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$ sur SW et MB respectivement, tandis qu'à 800 Hz la différence est moins marquée. Lorsque le vent fraîchit, on observe sur les 2 stations en hiver des écarts entre 60 et 70 Hz ainsi qu'à 2500 Hz.

De plus, le suivi hivernal de la station SW révèle également un pic d'intensité à 20 Hz, qui varie notamment avec le vent (Figure 34), mais qui pourrait être lié aux augmentations de la houle (pouvant grossir avec une augmentation de la vitesse du vent) décrites dans la section suivante.

4.4.2 Influence de la houle

La description générale de la relation entre les variations temporelles du bruit ambiant médian (filtre médian appliqué au SPL_{rms} pour retirer les bruits impulsifs tels que des passages de navire ; cf. section 3.4.2.2) et les variations de la hauteur de la houle révèle une relation positive, plus marquée en hiver qu'en été. En effet, en se focalisant sur les quatre stations NW, SW, SE et MB, on observe une relation positive entre l'augmentation de la vitesse du vent et le niveau de bruit ambiant médian (pentes positives pour les régressions sur les deux périodes suivies, avec $p < 0,05$, Figure 31 et Figure 32). Lors de la période estivale, les pentes sont plus petites que sur la période hivernale, mais en été les hauteurs de houles étaient moins élevées (<2 m) qu'en hiver (pouvant atteindre 5m). Ainsi, on observe qu'entre **1 à 10 % de la variance des niveaux de bruit médian ambiant mesurés sur les 3 stations du parc en été peuvent être expliqués par la hauteur de la houle** tandis qu'en hiver entre **50 et 85 % de la variance des niveaux sonores des 4 stations s'expliquent par la houle** (voire les R^2 sur Figure 31 et Figure 32). Il est intéressant de noter que la pente de cette régression estimée dans le Mor Braz est moins importante que pour les stations proches du parc, suggérant qu'une augmentation de la hauteur de la houle peut engendrer plus de bruit au sein du parc du fait des autres effets corrélés à cette variable (comme vu précédemment avec la vitesse du vent, d'autant plus que la hauteur de la houle résulte souvent d'une augmentation de la vitesse du vent).

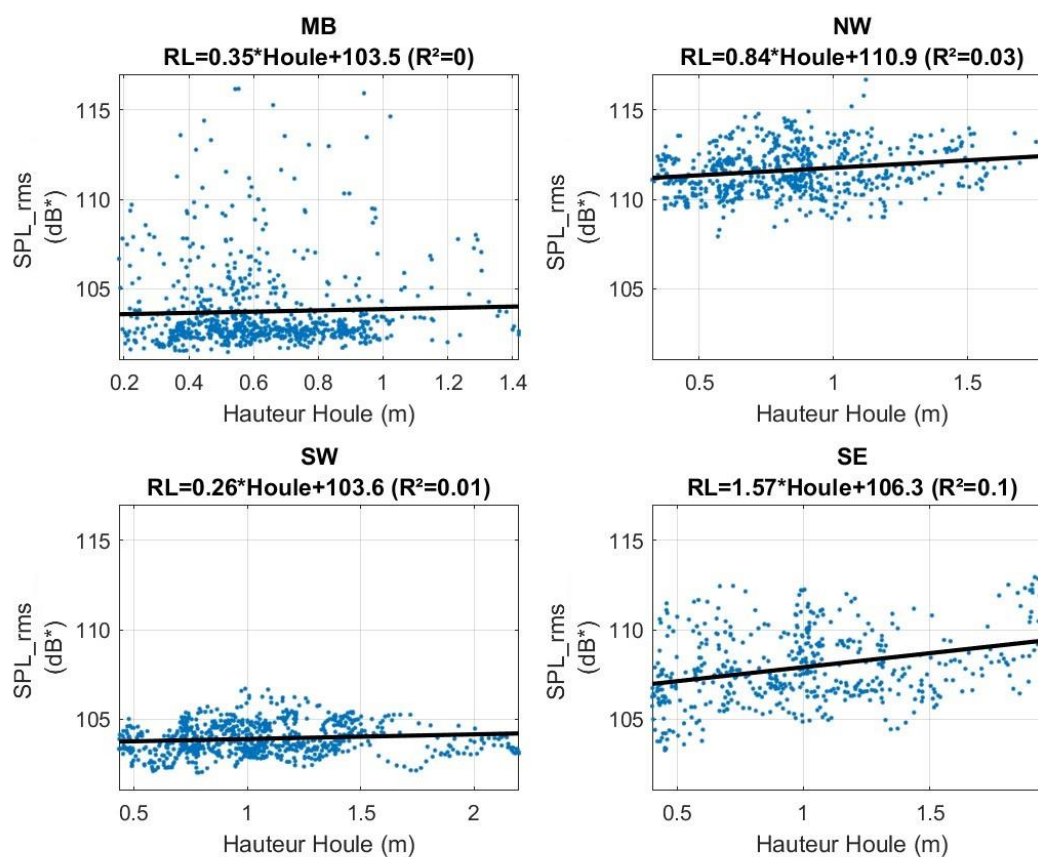


Figure 35. Régression linéaire entre la hauteur de la houle (m) et les niveaux médians SPL_{rms} estimés sur les quatre stations : MB, NW, SW et SE lors du suivi estival (2023).

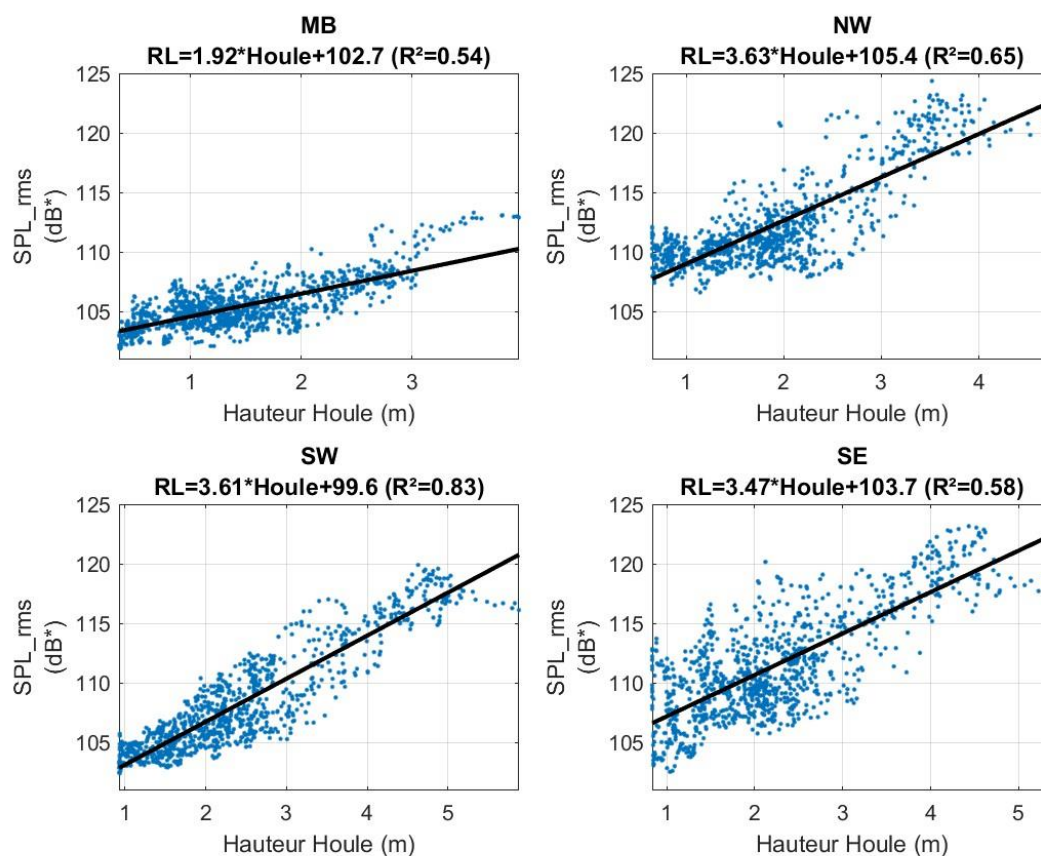


Figure 36. Régression linéaire entre la vitesse du vent (m/s) et les niveaux médians SPL_{rms} estimés sur les quatre stations : MB, NW, SW et SE lors du suivi hivernal (2024).

Figure 37 et Figure 38 présentent les spectres médians de bruit ambiant enregistrés au sein des différentes stations en fonction de la hauteur de la houle.

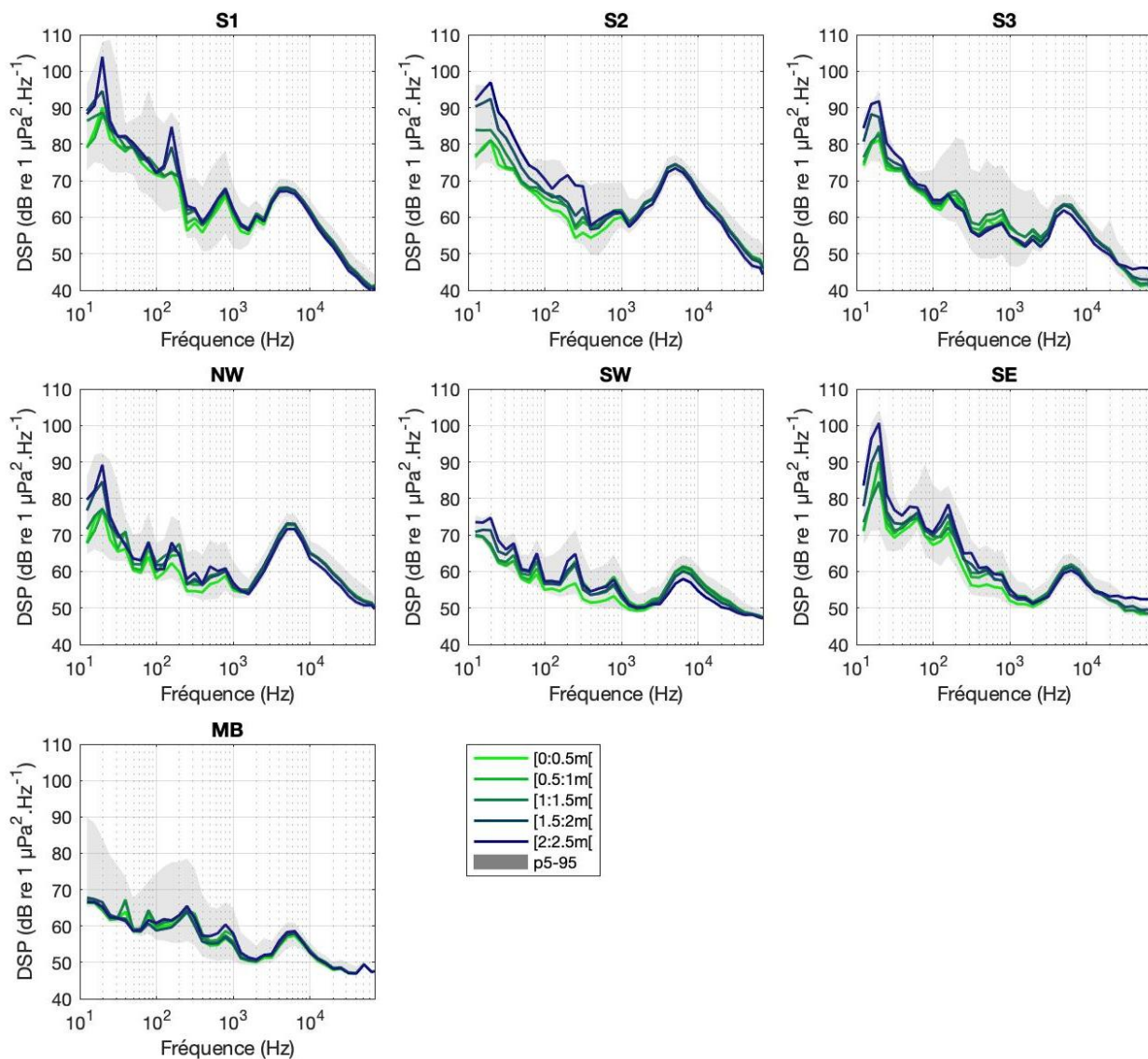


Figure 37. Spectres médians du bruit enregistré au sein des stations l'été 2023, en fonction des conditions de houle.

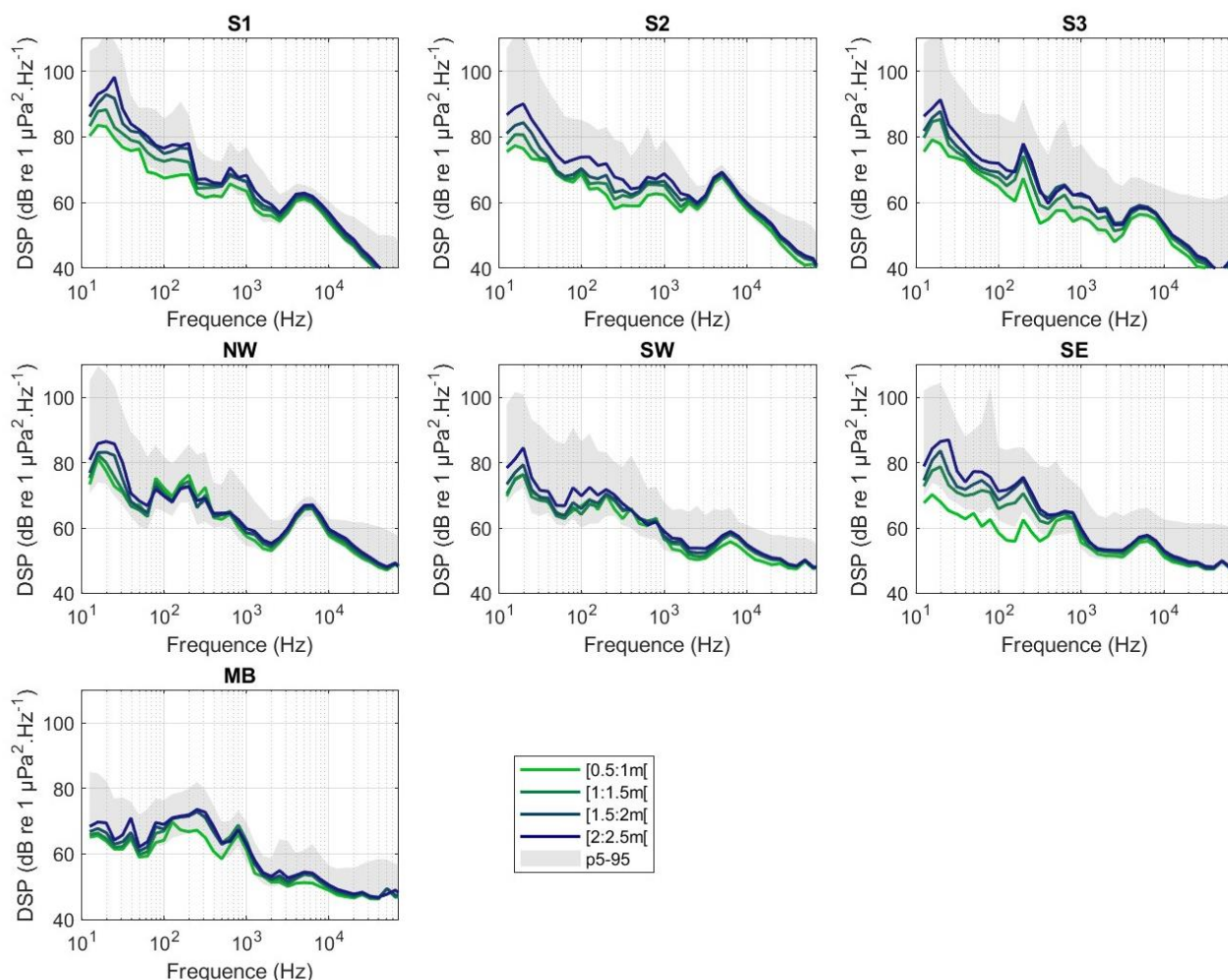


Figure 38. Spectres médians du bruit enregistré au sein des stations en hiver 2024, en fonction des conditions de houle.

L'augmentation de la houle génère une augmentation des niveaux sonores reçus pour les fréquences inférieures à 1000 Hz. Plusieurs observations notables peuvent être faites :

- Une forte augmentation de l'intensité sonore est visible autour de 20 Hz pour les stations situées au sein du parc en été comme en hiver ;
- Les niveaux reçus à 250 et 1000 Hz diminuent par forte houle (> 1.5m) pour la station S3 en été ;
- Les niveaux sonores dans la bande de fréquence centrée autour de 6.4 kHz diminuent par forte houle (> 2 m) pour l'ensemble des stations en été, sauf MB.

Les épisodes de fortes houles (> 1.5m) sont moins fréquents en été qu'en hiver. Ceci peut expliquer que l'augmentation des niveaux sonores associée ne semble pas avoir d'influence sur les niveaux sonores et spectres médians rapportés précédemment pour la période estivale.



En résumé, la composante géophonique du parc dans le paysage sonore peut être décrit par les bruits de la houle caractérisable en dessous de 1000Hz dont la composante est plus marquée en hiver qu'en été. Les bruits du vent sont difficiles à discriminer dans le paysage sonore du parc éolien du fait de leur corrélation avec les vitesses de rotation des pâles.

4.5 Cycle acoustique et activité biologique

Un cycle journalier est observé sur les séries temporelles de niveaux sonores de certaines stations (S2, NW, et SW ; Figure 15). Ce pattern est bien visible sur le spectrogramme long-terme présenté précédemment (Figure 21). Ce bruit est constitué de nombreuses impulsions émises sur une large bande de fréquence et semble correspondre au pic d'énergie centré autour de 6 kHz visible sur les spectres médians du bruit ambiant de chaque station.

Pour confirmer cette observation, une analyse de Lomb-Scargle est appliquée sur les séries temporelles des niveaux sonores reçus dans la bande de fréquence correspondant au tiers d'octave centré autour de 6 kHz ($SPL_{5.6-7.1kHz}$). Les périodogrammes obtenus (Figure 39 et Figure 40) montrent la distribution de la puissance des signaux périodiques dans ces séries de données. Ils mettent en évidence les cycles dominants (périodes) et leur intensité relative.

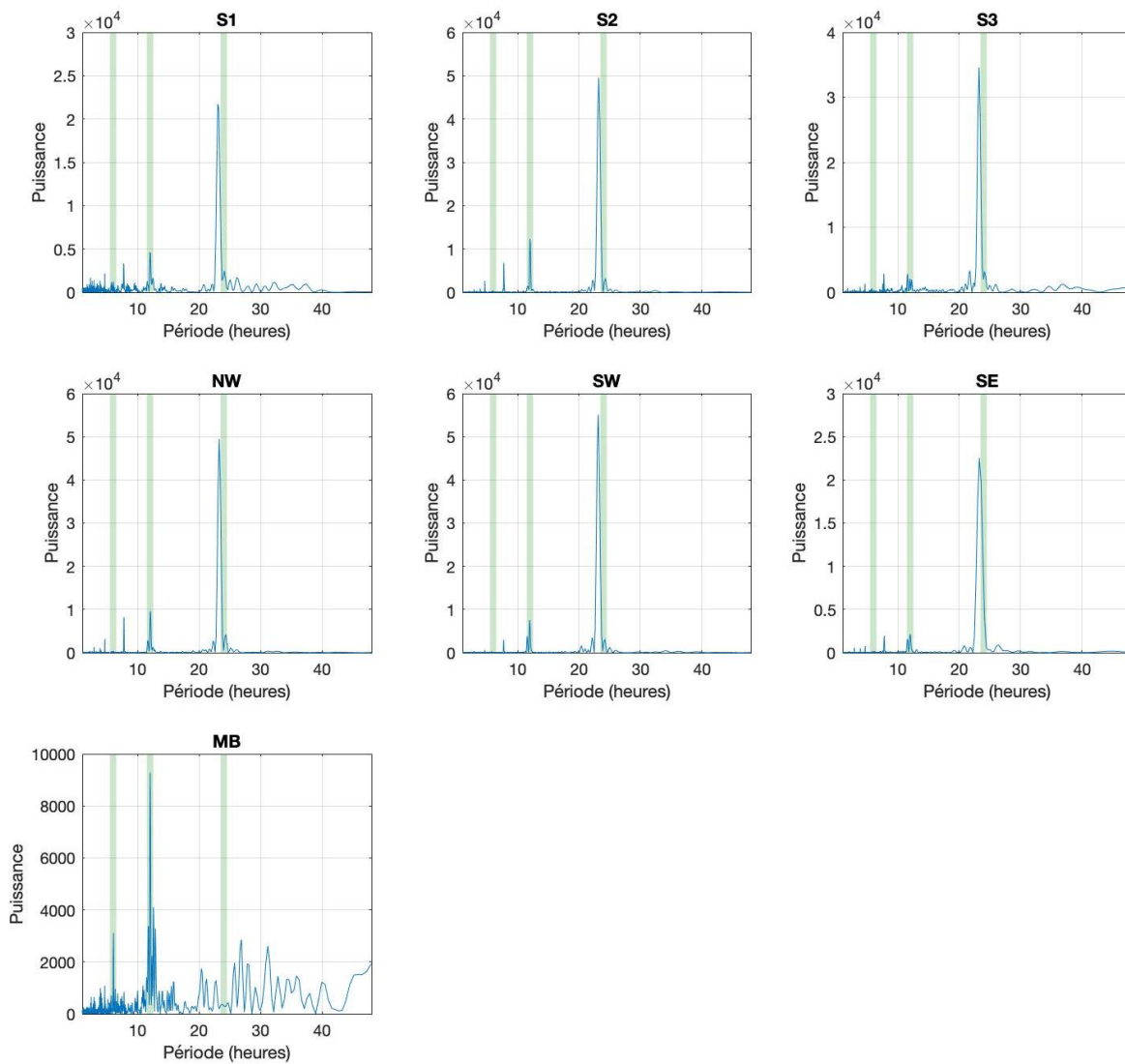


Figure 39. Périodogrammes de Lomb-Scargle calculés pour chaque station en été 2023, sur les séries temporelles des niveaux sonores reçus dans la bande de fréquence correspondant au tiers d'octave centrée autour de 6 kHz ($SPL_{5,6-7,1kHz}$). Les bandes vertes indiquent les périodes égales à des cycles de 6, 12 et 24h.

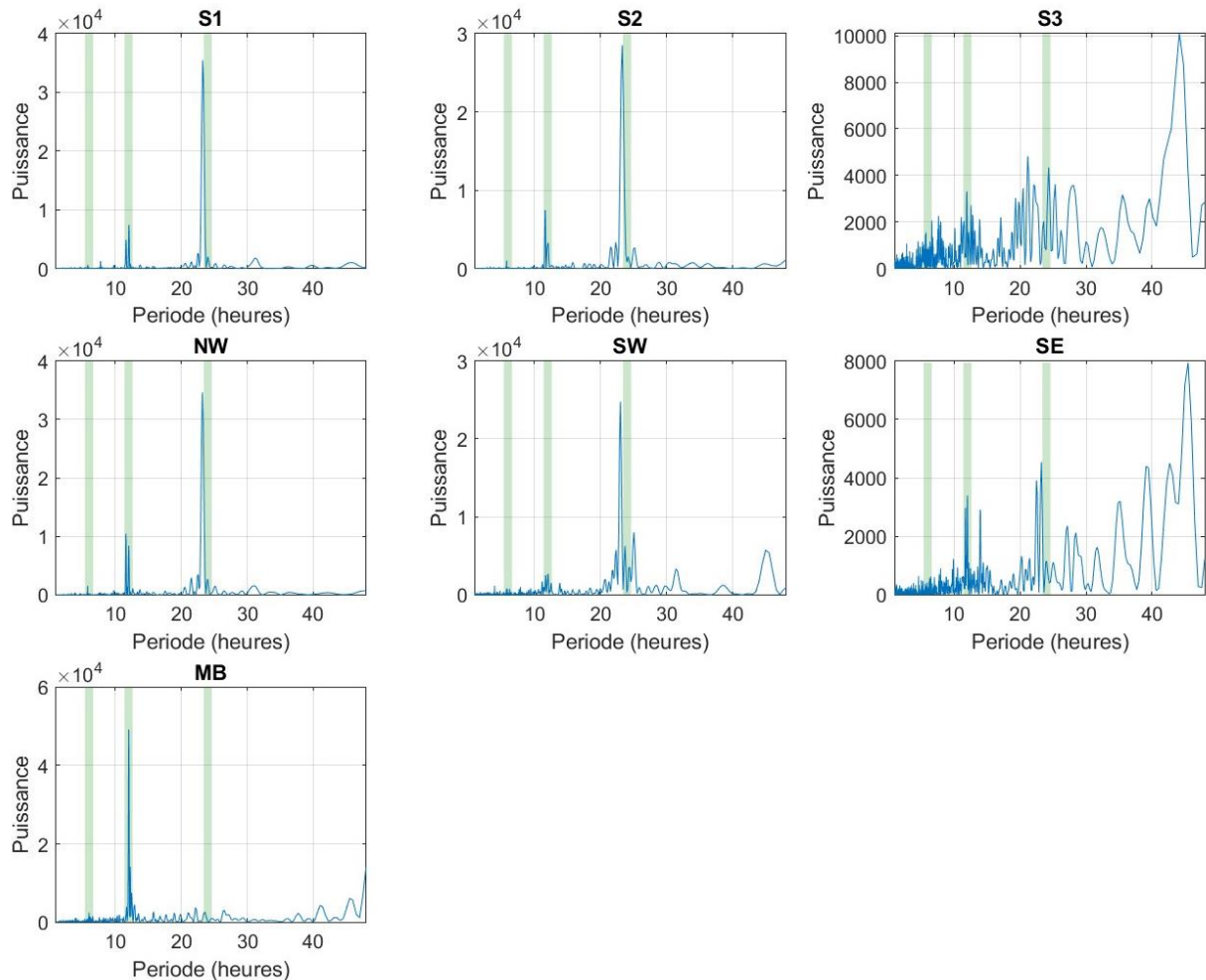


Figure 40. Périodogrammes de Lomb-Scargle calculés pour chaque station en hiver 2024, sur les séries temporelles des niveaux sonores reçus dans la bande de fréquence correspondant au tiers d'octave centrée autour de 6 kHz ($SPL_{5,6-7,1kHz}$). Les bandes vertes indiquent les périodes égales à des cycles de 6, 12 et 24h.

On observe un cycle d'une période de 24 h pour l'ensemble des stations, sauf pour MB (Figure 39 et Figure 40). Les cycles sur les périodogrammes sont toutefois moins nettes sur SW et SE en hiver. Ce résultat montre que les niveaux sonores enregistrés au sein de ces stations dans la bande de fréquence centrée autour de 6 kHz fluctuent suivant un cycle journalier. Ce cycle est particulièrement marqué pour les stations S2, NW et SW en été et sur S1, S2 et NW en hiver. La Figure 41 montre que ces niveaux sonores sont plus élevés la nuit que le jour avec des pics d'intensité sonore à l'aube et au crépuscule. Cette cyclicité jour - nuit avec des pics à l'aube et au crépuscule peut s'expliquer par une activité biologique et notamment dans cette bande de fréquence centrée autour de 6 kHz, caractéristique des bruits produits par l'activité de la faune benthique (Mathias *et al.*, 2016).

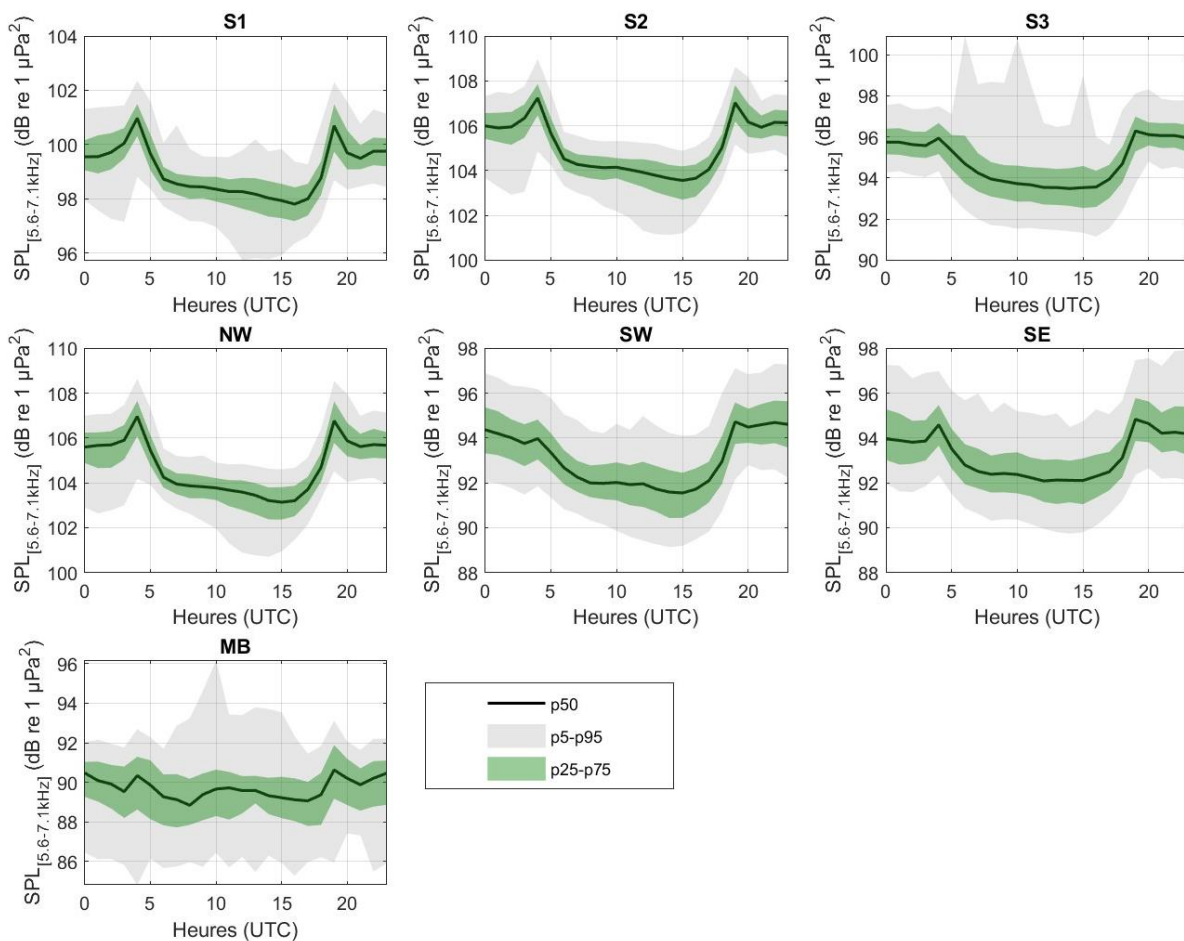


Figure 41. Niveaux de bruit enregistrés dans la bande de tiers d'octave centrée autour de 6 kHz en fonction des heures de la journée pour chaque station lors de la période estivale 2023.

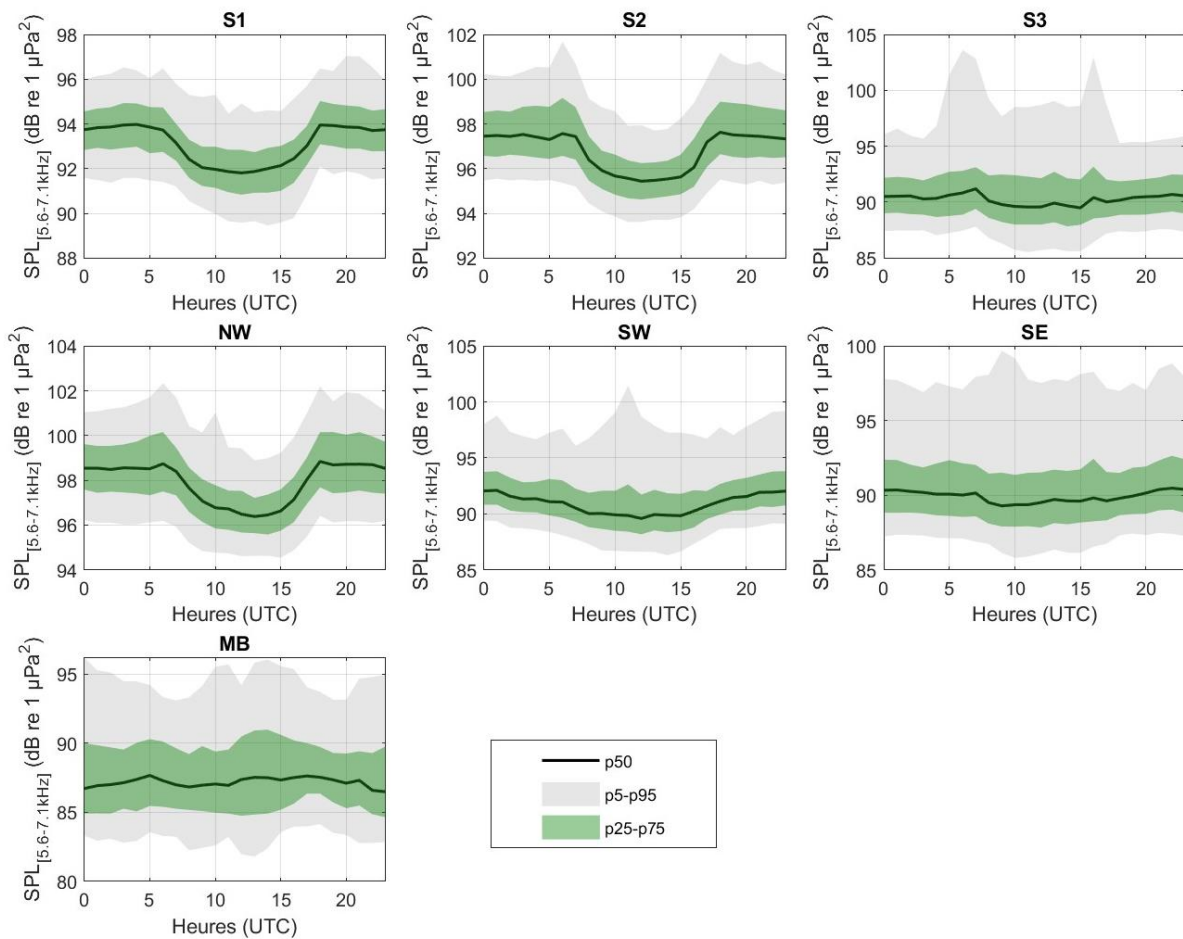


Figure 42. Niveaux de bruit enregistrés dans la bande de tiers d'octave centrée autour de 6 kHz en fonction des heures de la journée pour chaque station lors de la période hivernale 2024.

L'analyse de Lomb-Scargle montre également des cycles de 6 et 12 heures pour la plupart des stations dont le MB (Figure 39 et Figure 40), probablement associés aux phénomènes de marée.

En résumé, on observe une cyclicité jour - nuit avec des pics à l'aube et au crépuscule dans une bande de fréquence centrée autour de 6 kHz, caractéristique des bruits produits par l'activité de la faune benthique.

4.6 Fréquentation de l'aire d'étude par les cétacés

Les résultats de cette section sont basés sur des données rééchantillonnées avec un cycle d'acquisition de 30 % (soit 3 minutes toutes les 10 minutes) afin d'assurer l'inter-comparabilité des résultats de ce suivi avec les études précédentes (notamment l'état de référence).

4.6.1 Présence de delphinidés

Des sons de delphinidés, incluant des sifflements et des clics (dont des « buzzes »), ont été détectés sur les 4 stations suivies (MB, NW, SE et SW, cf. Figure 43).

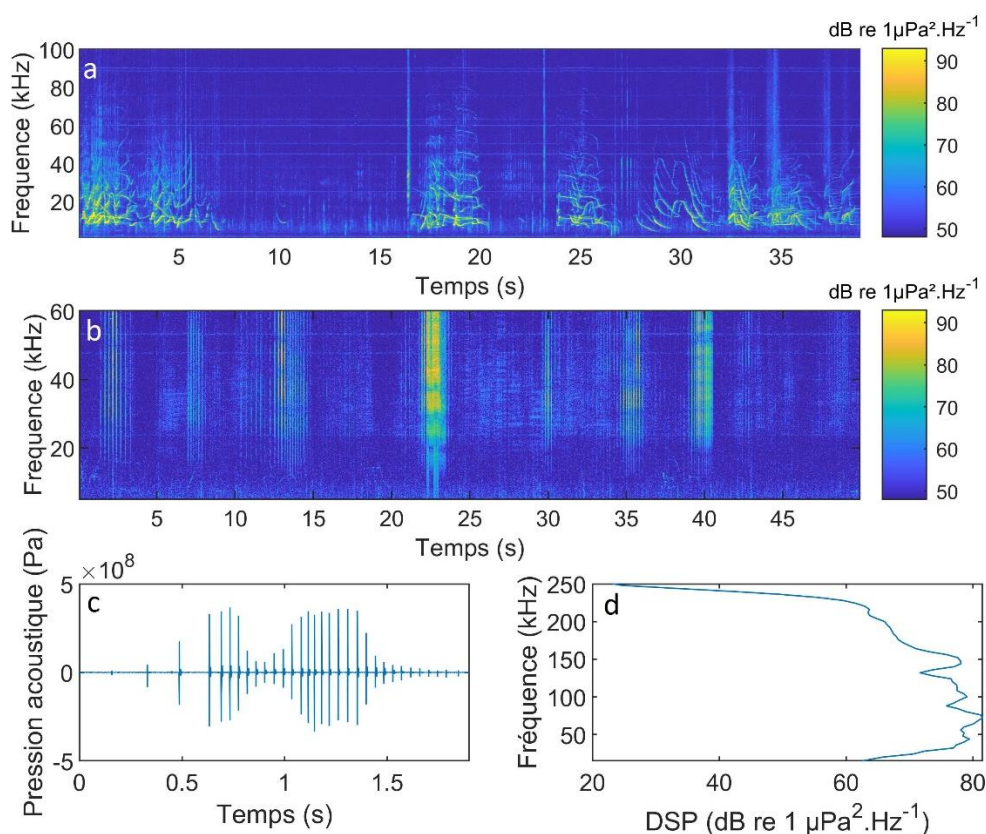


Figure 43. Spectrogrammes de vocalises de delphinidés incluant des (a) sifflements enregistrés sur la station SE le 10 août 2023 (12h17) et (b) des clics d'écholocalisation (dont des « buzzes ») enregistrés sur la station du MB le 19 août 2023 (16h10). Les figures c et d représentent respectivement un oscillogramme (c) et un spectre de puissance (d) d'un buzz.

Les données acquises mettent en évidence des variations spatiales (entre les stations) des présences acoustiques, et on observe de légères variations saisonnières sur les trois stations à proximité du parc éolien (NW, SW et SE).

Sur les deux stations situées au sud du parc (SW et SE), les fréquentations par les delphinidés sont occasionnelles à fréquentes (Tableau 10). On observe notamment :

- sur SE une fréquentation fréquente lors de l'été 2023 et occasionnelle lors de l'hiver 2024,
- sur SW une fréquentation occasionnelle à régulière en été et fréquente en hiver.



On observe toutefois lors des deux premières semaines d'enregistrement de la période estivale (du 9 au 23 août) des fréquentations quasiment quotidiennes sur ces deux stations, puis une diminution du nombre d'heures positives par jour jusqu'à la fin août (Figure 44). En effet, la fréquentation sur SW est plus occasionnelle en septembre, tandis que les enregistrements se sont interrompus sur la station SE, ne permettant pas de déterminer la fréquentation sur cette période. Ainsi bien que les nombres de minutes positives, d'heures positives et de jours positifs soient similaires à ceux obtenus sur la station SW, les pourcentages de présence sont plus élevés sur SE puisque la durée d'acquisition est plus faible.

Lors de la période estivale les détections enregistrées sont réparties sur 53 et 50 évènements de présence sur SE et SW respectivement, dont 22 évènements avec présence de buzzes pour SE et 15 évènements avec buzzes pour SW. Lors de la période hivernale, la fréquentation sur SW est plus importante avec des détections acoustiques fréquentes, que sur SE où les détections sont considérées comme occasionnelles. On observe en effet 28 et 119 évènements de présence sur SE et SW respectivement, dont 11 évènements avec présence de buzzes pour SE et 70 évènements avec buzzes pour SW. Les répartitions horaires des deux types de signaux n'indiquent pas de tendance significative (Figure 44), avec toutefois une légère prédominance de présence la nuit et à l'aube ou au crépuscule sur la station SE (hiver comme été) et pour sur SW en hiver (Figure 46).

La plus faible présence acoustique estivale de delphinidés est observée au nord-ouest du parc (NW), avec seulement 5 évènements de présence (dont 2 avec production de buzzes), répartis sur 5 jours différents, soit une fréquentation occasionnelle, voire quasi-exceptionnelle (Tableau 10 et Figure 44). En hiver la fréquentation est aussi occasionnelle mais avec un taux de présence plus élevé de 46,7% de jours positives répartis sur 29 évènements de présence (dont 13 avec production de buzzes, cf. Tableau 10 et Figure 45). Les détections ont plutôt été observées de jour en été et de nuit en hiver (Figure 44, Figure 45 et Figure 46), mais le faible nombre d'observations en été ne permet pas de conclure sur une tendance significative.

La station située dans le Mor Braz (MB) présente une fréquentation de delphinidés quotidienne en été et en hiver (selon la définition en section 3.4.3.4, cf. Figure 44), puisque 91,4 % et 93,3% des jours d'enregistrement estivale et hivernale, respectivement, présentent au moins une détection acoustique (Tableau 10). On observe toutefois des présences journalières un peu plus longue en été qu'en hiver avec de nombreuses journées dont le nombre d'heures positives dépassent 5h et quelques jours à 10h positives en été (Figure 44) contre une majorité de journées avec moins de 5h positives en hiver (Figure 45). Ces détections sont réparties sur 207 évènements de présence d'une durée moyenne de 487 ± 951 secondes lors de l'été 2023 et 174 évènements d'une durée moyenne de 259 ± 561 secondes en hiver 2024⁹. Lors de la période estivale, 46 % des évènements de présence acoustique présentaient des buzzes contre 79 % des évènements détectés en hiver (Tableau 10). La répartition horaire des sifflements et buzzes ainsi que le nombre d'évènements par période

⁹ Ces valeurs dépendent toutefois du choix du seuil de temps inter-détection pour déterminer des évènements (cf. Annexe 8.3.1) et du cycle d'acquisition. Par exemple, un temps inter-détection plus court entrainera la détermination d'un nombre d'évènements plus élevé, et un évènement de durée inférieure au cycle d'acquisition aurait une durée sous-estimée.

de la journée (c.-à-d. jour, nuit et aube/crépuscule) montrent des activités réparties toute la journée mais avec une prédominance pour la nuit et à l'aube ou au crépuscule (Figure 44, Figure 45 et Figure 46). On observe notamment une légère prédominance à partir de 3 h jusqu'en fin de journée vers 20 h lors de la période estivale (Figure 44) et jusqu'à minuit lors de la période hivernale (Figure 45).

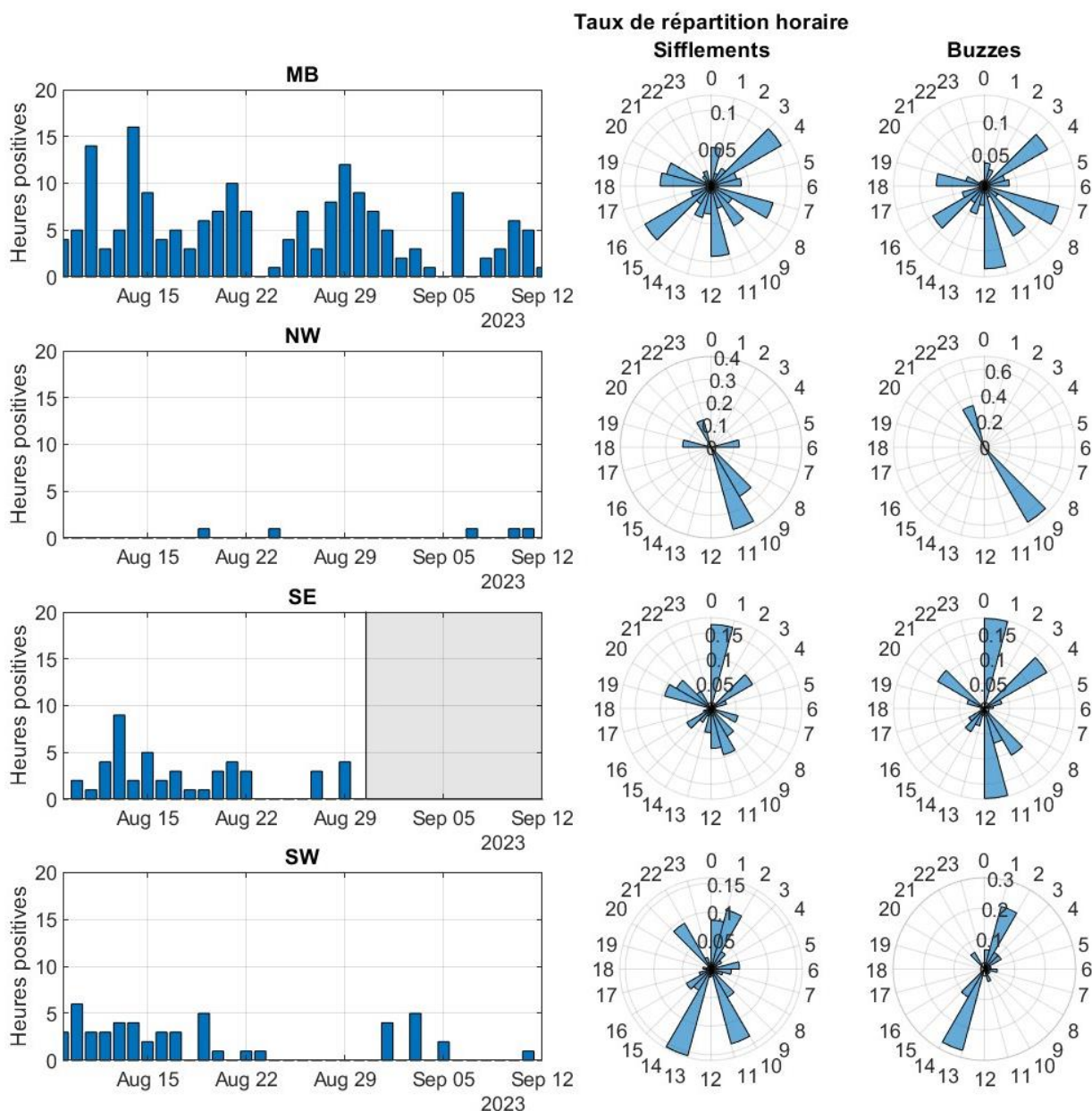


Figure 44. Occurrences des présences acoustiques de delphinidés en été sur les 4 stations représentées par le nombre d'heures positives par jour (diagrammes en barre) et de la répartition horaire de détection de sifflements et de buzzes (diagrammes en rosace, heures positives).



Taux de répartition horaire

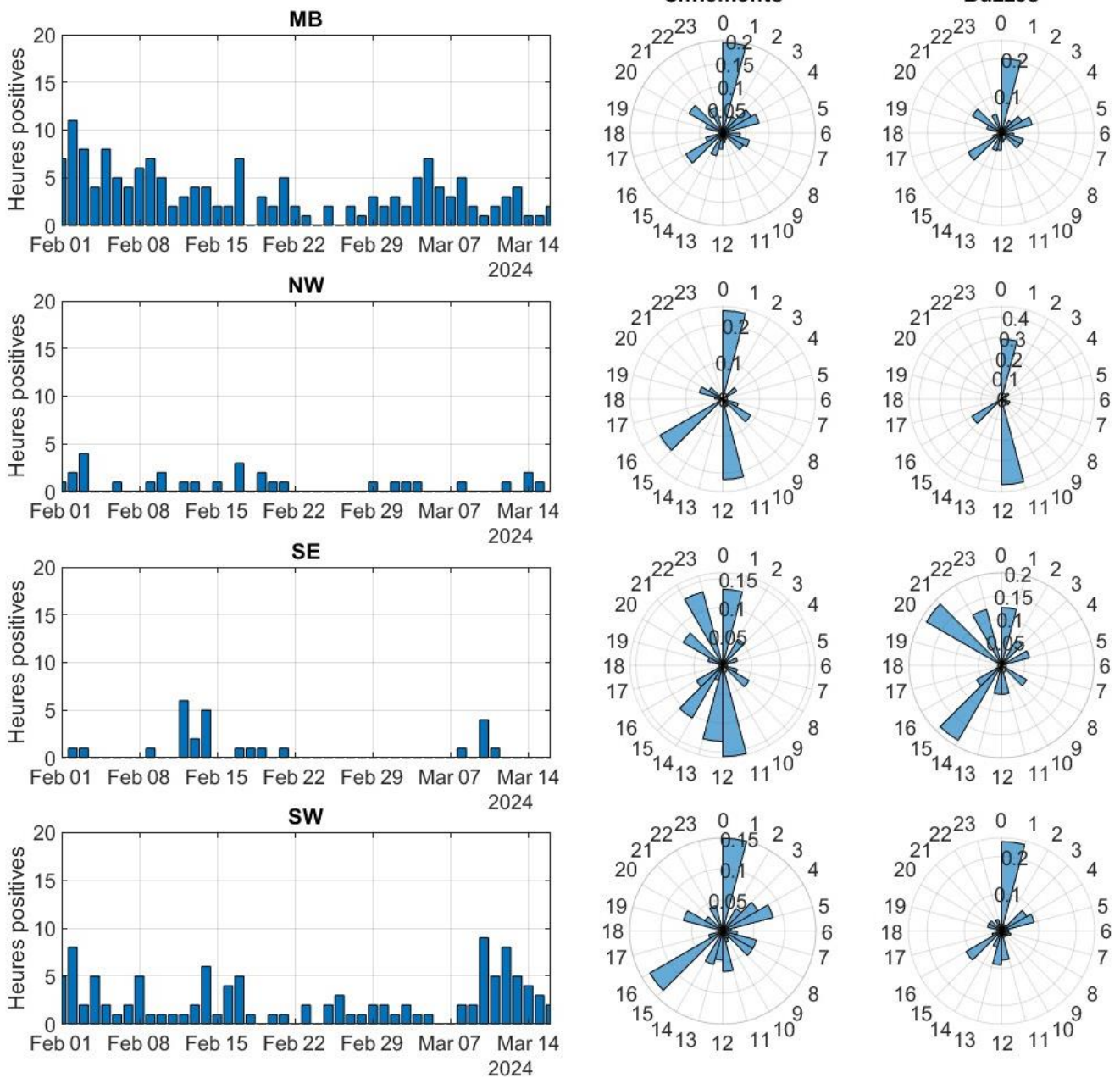


Figure 45. Occurrences des présences acoustiques de delphinidés en hiver sur les 4 stations représentées par le nombre d'heures positives par jour (diagrammes en barre) et de la répartition horaire de détection de sifflements et de buzzes (diagrammes en rosace, heures positives).



Tableau 10. Résumé des détections de delphinidés (avec un cycle d'acquisition de 30 %, voir Annexe 8.3.2.1 pour les résultats avec un cycle continu).

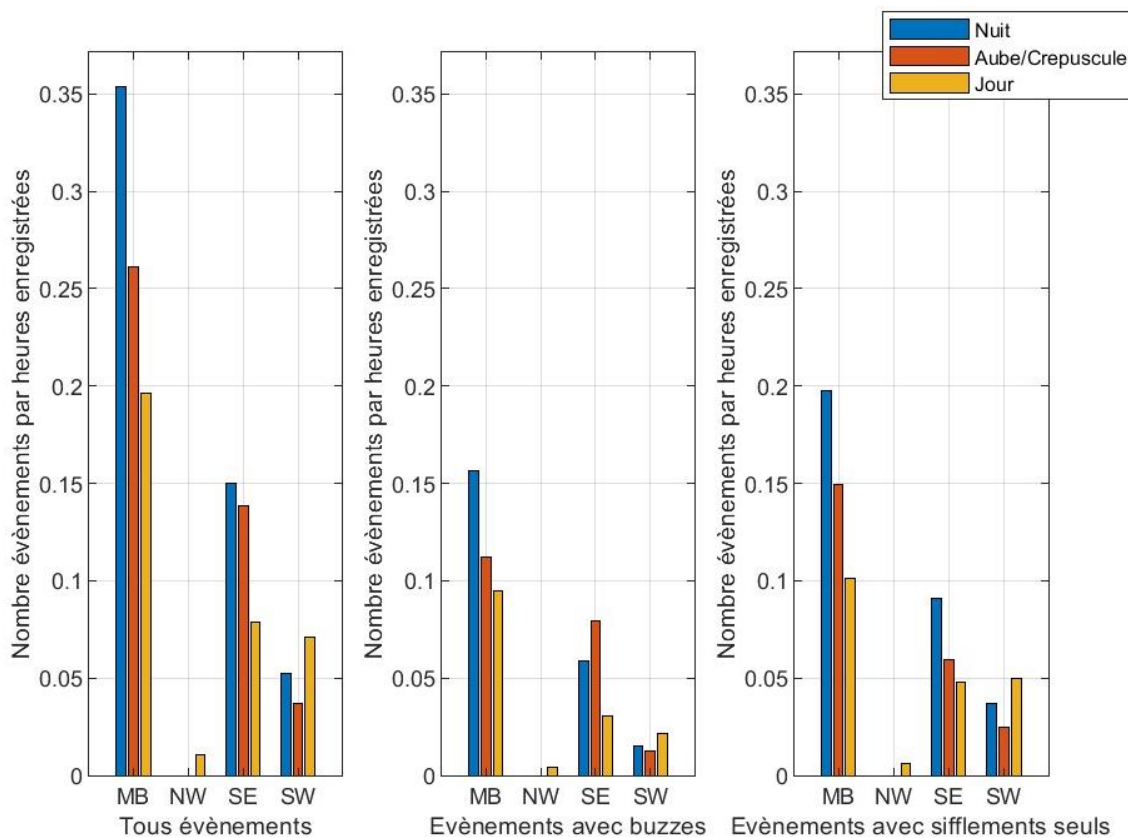
	Station	Minutes Positives ¹⁰	Heures positives	Jours positifs	Nombre d'évènement de présence	Durée moyenne des évènement (± écart type, en secondes)	Durée maximale en minutes	Nombre d'évènement avec buzz (% d'évènement)	Pourcentage de minutes positives avec buzzes lors des évènements	Pourcentage de minutes positives avec sifflements lors des évènements	Fréquentation
ETE (2023)	MB	786 (5,4 %)	186 (22,9 %)	32 (91,4 %)	207	487 ±952	142	95 (46 %)	43 %	79 %	Quotidienne
	NW	8 (0,1 %)	5 (0,6 %)	5 (14,3 %)	5	123 ±219	9	2 (40 %)	38 %	99 %	Occasionnelle
	SE	147 (1,7 %)	48 (9,3 %)	15 (69,4 %)	53	271 ±459	40	22 (42 %)	38 %	86 %	Fréquente
	SW	163 (1,1 %)	51 (6,3 %)	17 (48,6 %)	50	389 ±708	59	15 (30 %)	29 %	86 %	Occasionnelle à Régulière
HIVER (2024)	MB	449 (2,4 %)	157 (14,9 %)	42 (93,3 %)	174	259 ±561	62	137 (79 %)	81 %	82 %	Quotidienne
	NW	50 (0,3 %)	30 (2,8 %)	21 (46,7%)	29	125 ±282	18	13 (44%)	48 %	92 %	Occasionnelle
	SE	38 (0,2 %)	26 (2,5 %)	13 (28,9%)	28	31 ±36	3	11 (39 %)	42 %	99 %	Occasionnelle
	SW	265 (1,4 %)	113 (10,7 %)	40 (88,9%)	119	187 ±366	32	70 (59 %)	58 %	81 %	Fréquente à Quotidienne

¹⁰ Minutes positives de présence des évènements acoustiques comme définies dans la section 3.4.3.3 (et

Annexe 8.3.1)



ETE (2023)



HIVER (2024)

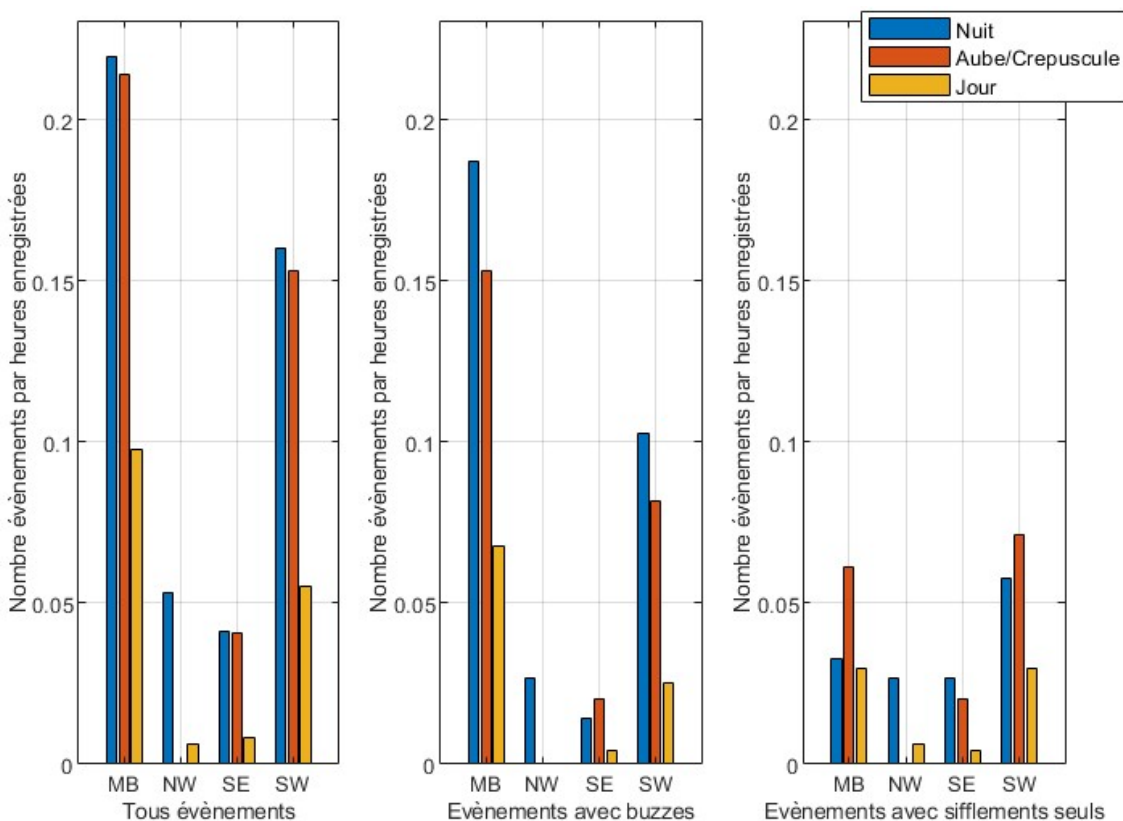


Figure 46. Comparaison du nombre d'évènements de présence acoustique des delphinidés par heures d'enregistrement entre les stations en été, pour les 3 différentes périodes journalières : Jour, Nuit et Aube - Crépuscule.



Concernant les comportements acoustiques, on observe de manière générale, la même répartition horaire entre la production de buzzes et de sifflements (pour les 4 stations et lors des deux périodes, cf. Figure 44, Figure 45 et Figure 46). Cependant, les taux de production de ces signaux ne sont pas identiques puisque la quasi-totalité du temps de présence comporte des sifflements (avec plus de 80 % de minutes positives des événements de présence présentant un sifflement, sur les 4 stations et 2 périodes des suivis) tandis que 29 à 43 % du temps de présence contient des buzzes en été, et 42 à 83 % de minutes positives en hiver (Tableau 10). On observe ainsi une production de buzzes plus importante en hiver qu'en été. Il est cependant intéressant de noter qu'à l'échelle des événements les individus semblent soit passer majoritairement leur temps à produire des buzzes (pourcentage de minutes positives élevé), soit ne pas produire de buzzes (pourcentage de minutes positives faible), comme on peut l'observer sur la densité de probabilité de la Figure 47. En effet, sur ces distributions des pourcentages de minutes positives avec buzzes (courbes rouge), on observe sur chacune des stations et pour les deux périodes suivies deux modes¹¹:

- un mode entre 0 à 25 % correspondant à augmentation de la probabilité d'obtenir des événements avec moins de 25 % du temps passé à produire des buzzes (et donc par conséquent des événements de présence avec essentiellement des sifflements) ;
- un mode entre 75 et 100 % correspondant à une augmentation de la probabilité d'obtenir pour des valeurs >75 % jusqu'à 100 % correspondant à des événements acoustiques présentant une production élevée de buzzes.

Quant aux pourcentages de minutes positives avec sifflements, on observe principalement un seul mode avec plus de 90 % du temps de présence à siffler, et quelques modes entre 25 et 75 % suggérant des événements avec moins de communication.

¹¹ Un mode correspond à une augmentation de la densité de probabilité (observable par une largeur du diagramme en violon plus importante), et signifie que ces valeurs (ici pourcentage de minute positive) sont plus fréquentes que pour les autres valeurs (dont le diagramme est moins épais). Ici la présence de deux modes signifie qu'il y a de fortes probabilités d'avoir :

i) soit des événements avec une forte production de buzzes (>75% de minutes positives à produire des buzzes) ;
ii) soit des événements avec une production de buzzes quasi nul (<25% de minutes positives) et donc ces événements seraient plutôt caractérisés par de la production de sifflement.

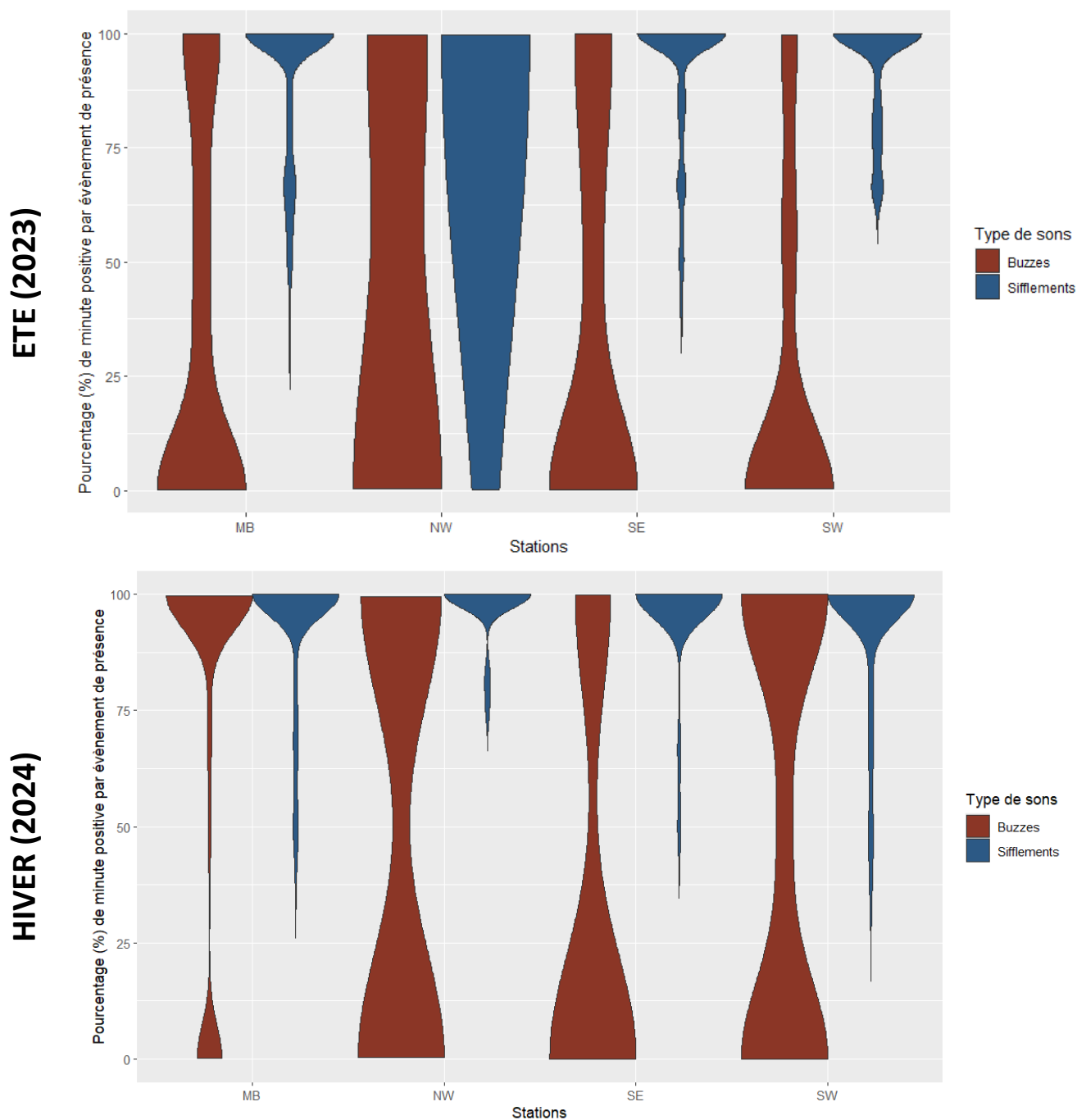


Figure 47. Densités de probabilité des pourcentages de minutes positives avec présence de buzzes (rouge) et avec présence de sifflements (bleu), représentées sous forme de diagrammes en violon par station. Ces diagrammes permettent de décrire la distribution des pourcentages de minutes positives par évènement de présence, ainsi une augmentation des courbes révèle donc une augmentation de la probabilité d'observer ces valeurs.

4.6.2 Présence des marsouins

La présence acoustique de marsouins (Figure 48) a été détectée sur deux stations lors de la période estivale (MB et SW) et sur l'ensemble des stations lors du suivi hivernal, avec une plus forte occurrence pour la station dans le Mor Braz (MB) lors des 2 périodes suivies.

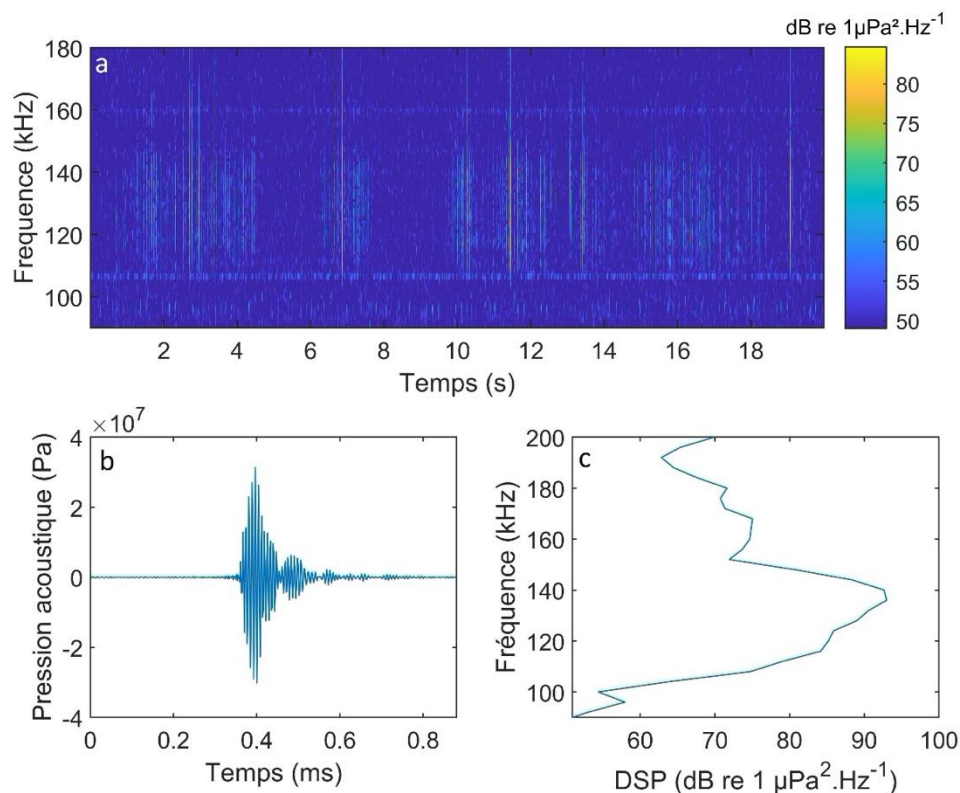


Figure 48. Spectrogramme (a) d'un train de clics de marsouin enregistré sur la station du Mor Braz le 9 août 2023 (22h46). Les figures b et c présentent respectivement un oscillogramme (b) et un spectre (c) d'un clic.

Dans le Mor Braz, 19 et 92 évènements de présence de marsouins ont été enregistrés respectivement l'été 2023 et en hiver 2024. Ces détections ont été enregistrées sur 19 heures différentes en été et 86 heures en hiver correspondant respectivement à 15 et 35 jours positifs (soit 42,9 % du nombre de jour de déploiement en été et 77,8 % en hiver, cf. Tableau 11). **La présence de marsouins dans le Mor Braz peut alors être catégorisée comme occasionnelle (presque régulière) en été et fréquente en hiver** (selon la définition en section 3.4.3.4, cf. Tableau 11, Figure 49 et Figure 50). La répartition horaire des trains de clics détectés ainsi que la période de chaque évènement de présence montrent une activité acoustique répartie à toute période de la journée mais avec une légère prédominance nocturne en été et de jour en hiver (Figure 49 et Figure 51).



La station du sud-ouest (SW) est la deuxième station avec le plus de détection et présentant également une saisonnalité entre l'été et l'hiver. En effet, une seule détection de jour est rapportée en été sur la station du SW (avec un cycle d'acquisition de 30 %), située à proximité du parc, ce qui en fait une présence exceptionnelle (Tableau 11 et Figure 49). Cependant la fréquentation hivernale est occasionnelle en hiver avec 17 événements de présence acoustique obtenues sur 24 % des jours de suivis.

Les deux dernières stations (NW et SE), ne présentent des détections acoustiques qu'en hiver, avec une plus forte occurrence sur la station au sud du parc (SE) avec 9 détections d'évènements acoustiques pour 2 évènements sur la station NW. La fréquentation au SE est occasionnelle comme sur la station SW mais avec un taux de présence plus faible (15,6 % de jours positifs, Tableau 11). Quant à la station NW, la fréquentation est considérée comme exceptionnelle avec une présence acoustique sur moins de 5 % des jours de suivis. Les observations sur les 3 stations situées autour du parc (NW, SW et SE) semblent révéler une diminution de la fréquentation pour les stations plus sud par rapport à la station au nord du parc.

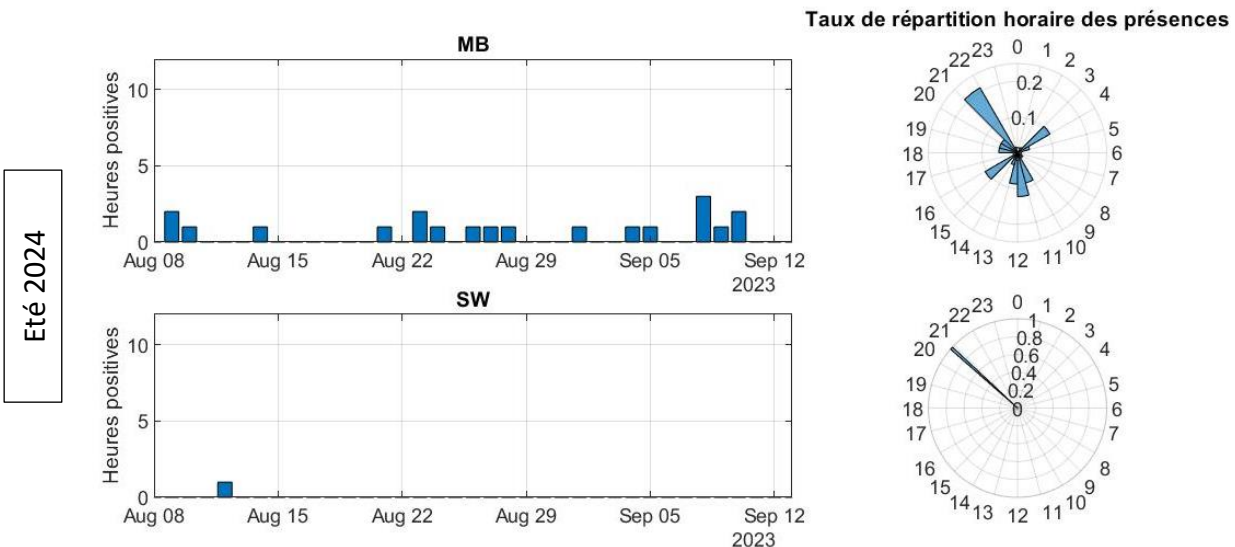


Figure 49. Occurrence des clics de marsouins sur les deux stations révélant des présences en été (le graphique en barre représente le nombre d'heures positives par jour au cours du suivi et les diagrammes en rosace, la répartition horaire de ces heures positives).

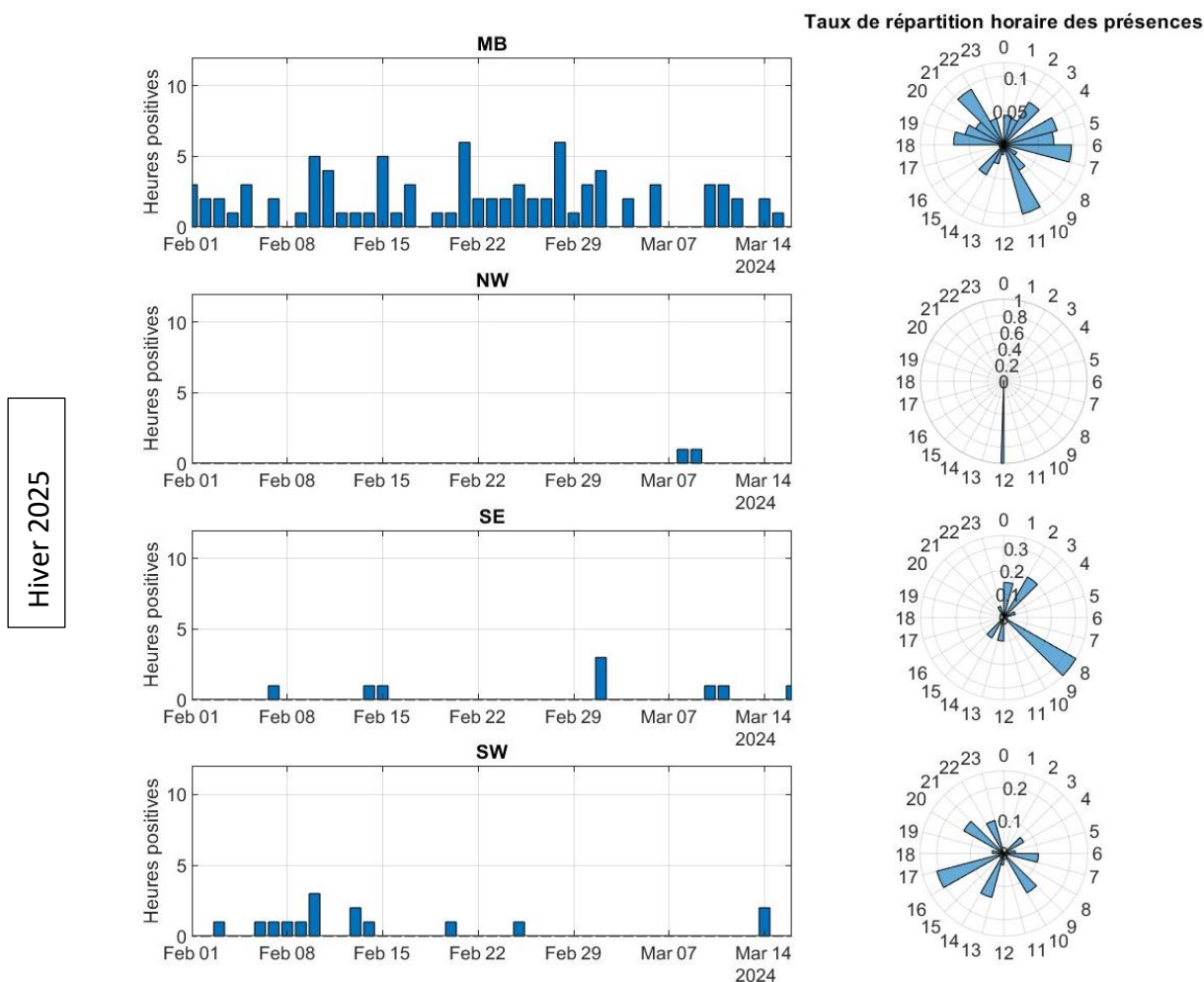


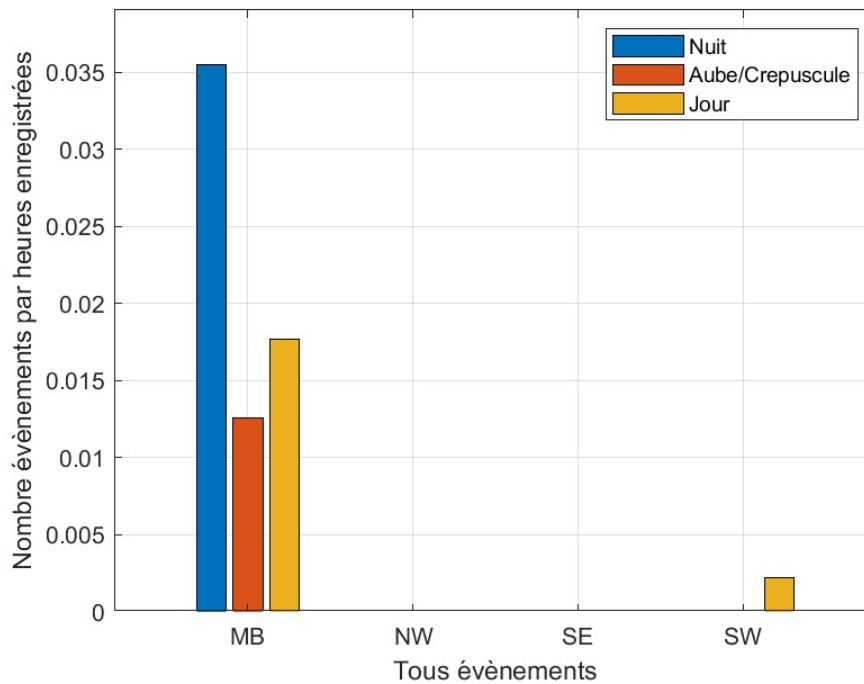
Figure 50. Occurrence des clics de marsouins sur les deux stations révélant des présences en hiver (le graphique en barre représente le nombre d'heures positives par jour au cours du suivi et les diagrammes en rosace, la répartition horaire de ces heures positives).



Tableau 11. Résumé des détections de marsouins (avec un cycle d'acquisition de 30 %, voir Annexe 8.3.2.2 pour les résultats avec un cycle continu).

	Stations	Nombres d'évènements de présence	Minutes positives	Heures positives	Jours positifs	Durée moyenne des évènements (± écart type, en secondes)	Durée maximale en seconde	Fréquentation
ETE (2023)	MB	19	26 (0,2 %)	19 (2,3 %)	15 (42,9 %)	24,3 ±20,9	77	Occasionnelle
	NW	0	0 (0 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	0	0	Absence
	SE	0	0 (0 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	0	0	Absence
	SW	1	1 (0,01 %)	1 (0,1 %)	1 (2,9 %)	10	10	Exceptionnelle
HIVER (2024)	MB	92	132 (0,7 %)	86 (8,1 %)	35 (77,8 %)	119 ±285	1315	Fréquente
	NW	2	3 (0,01 %)	2 (0,2 %)	2 (4,4 %)	53 ±57	93	Exceptionnelle
	SE	9	12 (0,07 %)	9 (0,9 %)	7 (15,6 %)	27 ±28	86	Occasionnelle
	SW	17	19 (0,1 %)	15 (1,4 %)	11 (24,4 %)	15 ±17	82	Occasionnelle

ETE (2023)



HIVER (2024)

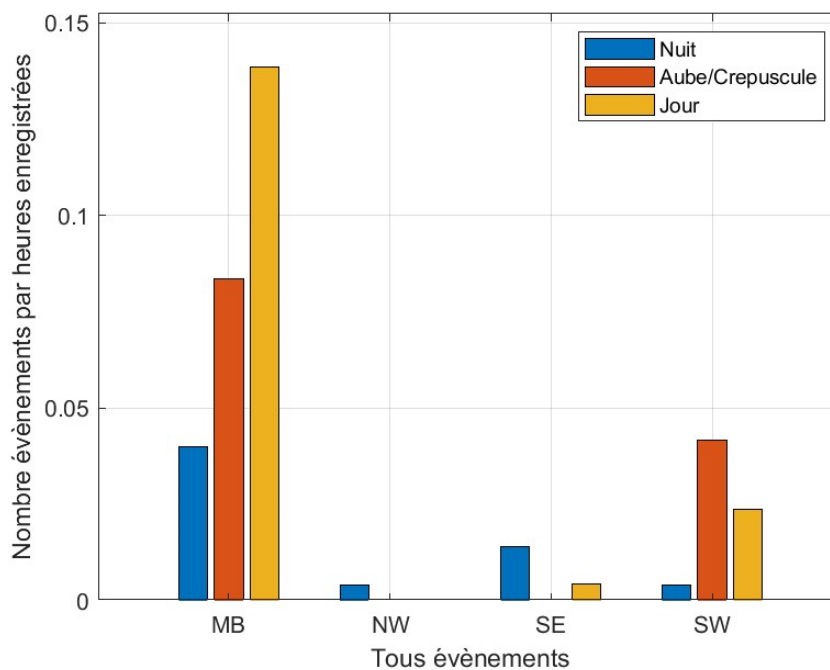


Figure 51. Comparaison entre les stations du nombre d'évènements de présence acoustique des marsouins par heures d'enregistrement, pour les 3 différentes périodes journalières : Jour, Nuit et Aube - Crépuscule.



En résumé, on observe sur les stations du parc des présences acoustiques de :

- **delphinidés** sur les deux saisons, avec plus de détection acoustique sur les stations au sud du parc qu'au nord, dont des évènements acoustiques avec production de buzzes suggérant de potentiels évènements de chasse.

- **marsouins** plutôt en hiver et sur les stations au sud du parc

La station MB révèle les plus forts taux de détections acoustiques pour les delphinidés et les marsouins.

5 Interprétation des résultats et discussion

5.1 Les différents contributeurs au paysage acoustique

Les résultats de ce suivi acoustique ont permis de caractériser les différentes composantes du paysage sonore, notamment via l'anthrophonie (sons générés par les éoliennes en fonctionnement et bruits de navires), via la géophonie (contribution acoustique de la houle et du vent) et de la biophonie (bruits issus de la faune benthique et détections de cétacés, décrites à part en section 5.2).

5.1.1 Le parc éolien

La comparaison des niveaux tiers d'octave du bruit enregistré au sein des différentes stations, ainsi que la caractérisation des sons sous-marins d'une éolienne en fonctionnement (cf. Annexe 8.1) montrent que **les éoliennes génèrent un bruit basse fréquence entre 10 et 250 Hz avec une composante fréquentielle principale comprise entre 10 et 30 Hz**. Ce bruit est notamment visible sur l'ensemble des stations situées au sein ou à proximité immédiate du parc (S1, SE, NW, S2 et S3), avec des niveaux reçus (dans cette gamme de fréquence 10-250 Hz) qui diminuent en s'éloignant du parc. On observe des niveaux sonores maximum pour la station S1 située à 75 m de l'éolienne F01 (SPL_{10-250Hz} médian : 109 et 114 dB re 1 µPa² entre l'été 2023 et l'hiver 2024). Toutefois, en considérant la distance à l'éolienne la plus proche, la station S3 (au centre du parc) montre des niveaux légèrement supérieurs aux autres stations. En effet, les niveaux SPL_{10-250Hz} mesuré en S3 est environ 1,3 dB supérieur au niveau SPL_{10-250Hz} attendu à cette distance (soit l'écart à la régression linéaire)¹². Cette différence pourrait traduire un effet cumulé des différentes éoliennes autour de cette station (effet moins marqué sur les autres stations étant en périphérie du parc).

Située à plus de 2600 m, la station SW (sud-ouest du parc) semble en limite d'empreinte acoustique. Sur cette station, le bruit généré par le parc est difficile à distinguer du bruit ambiant. En effet, lors du suivi estival le spectre acoustique ne révèle pas de signature claire entre 10-250 Hz. Cependant sur le suivi hivernale le spectre montre une signature dans ces gammes de fréquence, confirmant l'estimation d'une **émergence acoustique moyenne de 2**

¹² En comparaison, la station S2 se situant à la même distance d'une éolienne que S3 présente un écart à la régression de 0,7 dB.



à **4,5 km** pour une éolienne en fonctionnement **dans la bande de fréquence 10-250Hz**. Toutefois, l'émergence acoustique varie en fonction du bruit ambiant, ainsi par temps très calme, l'empreinte sonore d'une éolienne pourrait atteindre la dizaine de kilomètres, mais il faut considérer que dans ces conditions, si le vent est trop faible (<3 m/s) alors les éoliennes ne seront pas en fonctionnement. Dans le cas de conditions environnementales plus élevées, l'empreinte sonore d'une éolienne en fonctionnement ne dépasserait pas quelques centaines de mètres. En effet, cette bande de fréquence entre 10 et 250 Hz est également caractéristiques des bruits de la houle (cf. section 5.1.4) et des signatures acoustiques des navires (cf. 5.1.2) pouvant entraîner du masquage acoustique.

Les caractéristiques (contenu fréquentiel, intensité) du bruit généré par les éoliennes en fonctionnement sont liées à la vitesse de rotation des pales des éoliennes. La **fréquence principale du bruit généré par le parc augmente avec la vitesse de rotation des pales** (cf. Annexe 8.1). Bien que globalement positive, la relation entre les niveaux de bruit émis et la vitesse de rotation des pales est complexe (ni linéaire ni monotone). On observe notamment des niveaux sonores plus importants pour des vitesses de rotation comprises entre 7 et 12 rpm mais dont la propagation diminue plus rapidement que pour des vitesses de rotation plus faible. Ainsi lorsqu'une éolienne fonctionne à des vitesses de rotations entre 3 et 7 rpm, son niveau source (128,4 dB re 1 μPa^2 @1m) sera plus faible qu'à des vitesses plus importantes (137,2 dB re 1 μPa^2 @1m), mais elle peut présenter une empreinte sonore deux fois plus grande (ex. 12 km pour des vitesses <7 rpm contre 6 km pour des vitesses >7rpm, par condition calme). Cette différence de perte de propagation entre les deux régimes peut potentiellement s'expliquer par la variation fréquentielle de la signature acoustique de l'éolienne en fonctionnement. En effet la composante principale est plus basse en fréquence lorsque l'éolienne tourne plus lentement et elle monte en fréquence avec des régimes plus rapide, or les sons basses fréquences se propagent plus loin que les sons hautes fréquences. Une autre explication pourrait venir des niveaux de bruit ambiant avec notamment des niveaux plus faibles lorsque les éoliennes tournent moins vite (puisque moins de vent).

En considérant l'ensemble des éoliennes en fonctionnement (cf. Annexe 8.2.3), l'émergence acoustique du parc peut atteindre la centaine de kilomètres. Toutefois, considérant les seuils auditifs des espèces de mammifères marins susceptibles de fréquenter le parc, on observe que l'émergence acoustique (comme définie dans la section 8.3.1)¹³ du parc est nul pour les delphinidés et marsouins (fréquentant la zone du parc, cf. section 5.2). En effet, les bruits des éoliennes sont émis à des fréquences difficilement perceptibles selon les capacités auditives de ces espèces. Pour les phocidés et mysticètes, l'empreinte sonore du parc peut se limiter à l'enceinte du parc dans certains cas et atteindre au maximum 75 km (pour les mysticètes), zones dans lesquels les bruits du parc sont susceptibles de venir masquer d'autres signaux d'intérêts pour ces espèces, sans pour autant être audible par les individus (Erbe et al. 2016). En effet, les résultats décrits en Annexe 8.2.3 suggèrent que les bruits du parc éoliens seraient audibles principalement pour les mysticètes dans l'enceinte du parc et pour les phocidés à proximité d'une éolienne (dans un rayon d'une dizaine de mètre).

¹³ L'émergence acoustique pour les mammifères marins est la zone d'influence la plus étendue à l'intérieur de laquelle le niveau du signal d'intérêt est supérieur au niveau du bruit ambiant, pouvant présenter du masquage acoustique même si le signal n'est pas clairement audible par l'espèce cible (Figure 71).



5.1.2 Le trafic maritime

Des passages de navires ponctuels ont été détectés au niveau de chaque station. L'algorithme de détection étant basé sur des pics d'énergie, seuls les navires passant à proximité de l'hydrophone sont retenus. Cette méthode permet toutefois de décrire de manière relative le trafic maritime enregistré sur les différentes stations. Une plus forte présence de navire a été observée à proximité des stations Mor Braz (MB) sur les deux périodes suivies, ainsi que sur S3 au sein du parc éolien en été et sur les deux stations à l'ouest du parc (NW et SW) lors de la période hivernale, comparés aux autres stations.

Les passages de navires détectés au niveau de la station MB située proche de l'île d'Hoëdic (2 MN au sud du port de la croix) reflètent probablement les activités de plaisance estivales ainsi que de la pêche en été comme en hiver. L'activité de pêche pourrait également expliquer les augmentations de présence de navires sur les stations à l'ouest du parc en hiver (NW et SW), notamment avec les ports de pêche du Croisic et de La Turballe situés au nord-ouest du parc.

La station S3 est située à proximité de la sous-station électrique (OSS). Il est probable que les événements détectés correspondent aux transferts de personnels et autres activités liées à la maintenance de la sous-station. En effet des travaux de mise en service finale (« final commissioning ») ont été réalisés pendant la période de suivi estival, ce qui expliquerait également la baisse de détection en hiver sur la station S3. À l'été 2023, le SOV Olympic Triton (navire de ravitaillement offshore de 95 m de long ; MMSI : 259424000) accompagné d'un CTV étaient sur site en continu (24/7) pour assurer l'hébergement du personnel et effectuer leur transfert vers les éoliennes.

Des pics d'énergie sont remarqués entre 200 et 1000 Hz sur le spectre de bruit ambiant médian de la quasi-totalité des stations (S1, S3, NW, SW, SE et MB). Une augmentation en journée du bruit ambiant est observée dans cette même gamme de fréquence sur les spectrogrammes long terme (Figure 21). Ces observations reflètent probablement le bruit de fond généré par le trafic maritime lointain.

5.1.3 Le vent

La contribution du vent dans le paysage sonore lors du suivi estival (vitesse du vent expliquant moins de 10 % de la variance des niveaux de bruit médian) est moins importante que lors du suivi hivernal (vitesse du vent expliquant 30 et 40 % de la variance des niveaux sonores médian). Cette différence s'explique notamment par des conditions météorologiques généralement plus clémentes en été qu'en hiver.

La signature acoustique du vent est toutefois identique entre l'hiver et l'été avec une composante **dans la bande de fréquence 50-1200 Hz dont un maximum d'énergie entre 250 et 1000 Hz**. Cette gamme de fréquence est commune à celle du bruit des navires, induisant des effets de masquage entre ces sources sonores. Cette compétition entre le bruit environnemental (vent) et le trafic maritime avait déjà été mise en évidence lors de l'état de référence. D'après ces mesures réalisées avant l'implantation du parc éolien, le bruit enregistré dans la bande de fréquences inférieure à 1 kHz était majoritairement dominé par



le bruit environnemental et était maximum en intensité pour les fréquences comprises entre 200 et 1000 Hz. Le cycle journalier observé dans cette bande de fréquence suggère que le bruit enregistré lors du suivi, réalisé en phase d'exploitation, est principalement dominé par le trafic maritime.

5.1.4 La houle

La contribution de la houle dans le paysage sonore lors du suivi estival (hauteur de la houle expliquant moins de 10 % de la variance des niveaux de bruit médian) est moins importante que lors du suivi hivernal (hauteur de la houle expliquant 50 et 85 % de la variance des niveaux sonores médian). Cette différence s'explique (comme pour la vitesse du vent) par des conditions météorologiques généralement plus clémentes en été qu'en hiver.

La signature acoustique du vent est toutefois identique entre l'hiver et l'été avec une composante dans les fréquences inférieures à 1000 Hz. Une forte augmentation de l'intensité sonore est visible autour de 20 Hz pour les stations situées au sein du parc. Ceci peut être induit par des profondeurs plus faibles au niveau de ces stations. En effet, plus la hauteur d'eau est faible, plus le déferlement des vagues est favorisé et la contribution du bruit des vagues au bruit ambiant est importante.

Sur le suivi estival on observe lors de fortes houles (> 2 m) que les niveaux reçus à 250 et 1000 Hz diminuent pour la station S3. Or cette bande de fréquence correspond également aux gammes de signatures acoustiques des navires (cf. 5.1.2). Ainsi, la diminution du niveau sonore dans cette bande de fréquence pourrait s'expliquer par une diminution des activités maritimes autour de la sous-station électrique (OSS), étant donné que les transferts par CTV sont arrêtés lorsque la houle dépasse 2 m de hauteur.

5.1.5 La faune benthique

Des cycles journaliers ont été observés dans la bande de fréquence centrée autour de 6 kHz pour l'ensemble des stations situées au sein du parc éolien lors du suivi estival, et principalement sur les 3 stations situées au nord-ouest du parc (S1, S2 et NW) lors du suivi hivernal. Les niveaux sonores dans cette gamme de fréquences sont plus élevés la nuit que le jour avec un pic d'énergie à l'aube et au crépuscule. Des observations similaires avaient été réalisées durant la saison estivale lors de l'état de référence. Bien que les espèces et mécanismes de production sonore impliqués soient encore inconnus dans cette région, l'état de référence et la littérature actuelle présentent ce phénomène comme lié à l'activité de la faune benthique (Mathias *et al.*, 2016). Ce phénomène est plus ou moins marqué selon les stations. Comme remarqué lors de l'état de référence, cette activité sonore benthique est significativement plus intense dans le secteur Nord-Ouest du parc, avec des cycles marqués en été comme en hiver. Des mesures réalisées lors de l'étude d'impact montraient également un bruit plus intense pour une bande de fréquence entre 5 et 10 kHz au niveau d'une station située au centre du parc (P1) par rapport à deux autres stations (P2, P3) situées à l'extérieur. Ces variations reflètent probablement des différences d'habitats et communautés benthiques (Figure 52).

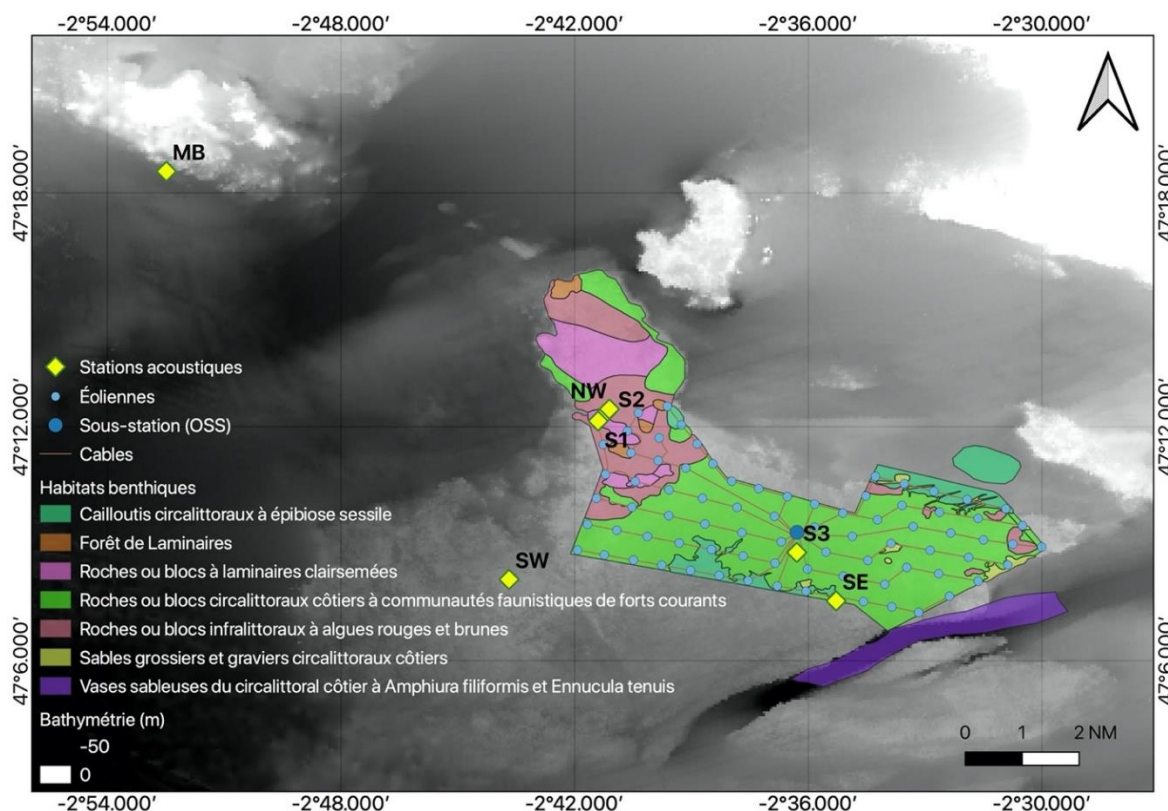


Figure 52. Cartographie des habitats benthiques référencés dans la zone d'étude réalisée lors de l'étude d'impact du projet.

Les stations du secteur Nord-Ouest du parc, pour lesquelles une forte activité sonore benthique est observée, sont positionnées sur des habitats benthiques infralittoraux caractérisés par des roches et blocs à laminaires (S1) et à algues rouges et brunes (NW, S2). Moins profonds, ces habitats accueillent une faune marine diversifiée dont des grands crustacés (ex : homards, tourteaux, araignées de mer). Les stations S3 et SE sont situées sur des roches ou blocs circalittoraux à communautés faunistiques de forts courants. D'après les données du réseau de surveillance de la flore et de la faune benthique marine REBENT¹⁴, les stations SW et MB sont situées sur l'habitat « graviers propres du côtier à *Branchiostoma lanceolatum* et *Venus fasciata* ». L'écosystème de MB, localisé dans un secteur de fonds sableux, semble particulièrement différent de ceux des autres stations. En effet, le bruit ambiant comporte une faible composante sonore associée à la faune benthique ($SPL_{5.6-7.1\text{ kHz}}$), et présente des cycles de 6 et 12h marqués (SPL_{rms}) reflétant très probablement les courants de marée plus importants.

¹⁴ Atlas des fonds meubles du plateau continental du golfe de Gascogne : cartes biosédimentaires (Source Chassé C., Glémarec M., 1976)



Les niveaux sonores dans la bande de fréquence centrée autour de 6 kHz diminuent par forte houle (> 2m) pour l'ensemble des stations, sauf pour MB. Deux hypothèses peuvent expliquer cette observation :

- Il est possible que la faune benthique soit moins active lorsque les conditions de mer sont importantes et donc génère moins de bruit dans cette gamme de fréquence.
- Citant l'état de référence, les vagues diffusent et absorbent les ondes acoustiques d'autant mieux par fort état de mer. Cependant, les vagues, par déferlement génèrent un bruit propre qui a pour effet d'élever le niveau de bruit ambiant. Par fort état de mer, le bruit naturel des vagues augmente tandis que les autres sources de bruit portent moins bien.

5.1.6 Comparaison avec les suivis précédents

Sur la période estivale, les niveaux de bruit ambiant relevés dans cette étude au niveau des stations NW, SE et SW sont légèrement inférieurs (-1.9 ± 0.26) à ceux mesurés lors de l'état de référence acoustique du projet (Chompret *et al.*, 2019) et supérieurs à ceux relevés en phase de construction (Chompret *et al.*, 2023, cf. Tableau 12). Pour rappel, les niveaux relevés sur la phase de construction ne font pas référence aux niveaux de bruit mesurés spécifiquement lors des ateliers de travaux, mais correspondent à des niveaux de bruit ambiant sur une plus grande échelle temporelle, intégrant donc les émissions sonores de tous les travaux réalisés, mais également des périodes sans atelier particulier¹⁵.

Les niveaux sonores mesurés sur la station témoin, située hors zone d'influence du bruit du parc, dans le Mor Braz (MB), sont similaires à ceux enregistrés lors des précédents suivis lors de la première année de construction et lors de la deuxième année (absence de mesures lors de l'état de référence, cf. Tableau 12).

Sur la période hivernale, on retrouve des niveaux similaires sur les stations NW, SE et SW aux niveaux de bruit ambiant estimés lors des hivers 2020 (état de référence) et 2022 (phase de construction). Sur la station du Mor Braz le niveau du bruit ambiant est cohérent avec les mesures réalisées en 2022 (Tableau 12).

¹⁵ Les niveaux sonores spécifiques à chaque type d'atelier réalisé lors des travaux d'installation des fondations des éoliennes (forage ou battage) sont présentés dans le rapport Chompret *et al.*, 2023.

Tableau 12. Comparaison des niveaux sonores ($SPL_{20-40000\text{Hz}}$) enregistrés au sein des stations NW, SE, SW et MB (les distances indiquées correspondent aux distances séparant les stations des éoliennes les plus proches) avec ceux relevés lors de l'état de référence et la phase de construction (ce tableau présente les niveaux de bruit médians ainsi que les premiers et troisièmes quartiles associés).

Station	État de référence ($SPL_{20-40000\text{Hz}}$ [dB re 1 μPa^2])		Phase de construction ($SPL_{20-40000\text{Hz}}$ [dB re 1 μPa^2])			Phase d'exploitation ($SPL_{20-40000\text{Hz}}$ [dB re 1 μPa^2])	
	Été 2019	Hiver 2020	Été 2021	Hiver 2022	Été 2022	Été 2023	Hiver 2024
NW (565 m)	113 (112,3-113,7)	110,6 (108,1-114,7)	108,5 (107-110,3)	107,9 (105,4 -111,6)	107,9 (106,4 -110,1)	110,8 (109,9-112,2)	107,1 (105,8-108,8)
SE (198 m)	106,5 (105,3-107,9)	106,7 (104,4-112,3)	99,3 (97,6-101,2)	101,6 (98,7-104,4)	103,4 (100,5 -109,4)	104,8 (102,9-107,1)	106,5 (103,9-110,7)
SW (2640 m)	103,1 (101,8-105,6)	106,9 (104,9-110,7)	99,1 (97,2 -100,9)	102,1 (99,0 -106,6)	99,9 (98,2 -101,3)	101,3 (100,3 -102,6)	104,0 (101,4-107,5)
MB (18350 m)	NA	NA	98,8 (97,0-101,3)	99,7 (97,0-102,9)	97,1 (95,7 -99,2)	98,7 (97,8-99,7)	102,1 (100,2-104,3)

La comparaison des spectres de bruit ambiant mesurés en été et en hiver lors de l'état de référence, et des phases de construction et d'exploitation montre de légère variation entre les suivis pour les fréquences associées à l'activité benthique (centrées autour de 6 kHz ; Figure 53). Pour les suivis estivaux et hivernaux, le bruit reçu dans cette bande de fréquence est maximal lors de l'état de référence diminue lors de la phase de construction puis remonte en phase d'exploitation. Malgré l'absence de donnée sur la station témoin MB lors de l'état de référence, on observe une tendance similaire à cette station témoin pour les suivis réalisés en 2021-2022 (phases de construction) et les suivis 2023-2024 (en phase d'exploitation) (Figure 53). Ce phénomène est ainsi probablement lié à des facteurs environnementaux affectant l'activité benthique sur une échelle spatiale supérieure à celle du parc.

Cette comparaison des spectres montre également l'ajout de bruit généré par le parc éolien dans le paysage sonore en phase d'exploitation dans des gammes de fréquences inférieures à 250 Hz.

On observe également des différences dans la gamme de fréquences s'étalant de 250 à 1000 Hz qui peut être expliquées par des conditions météorologiques ou activités maritimes différentes lors des périodes de mesure (ex. MB, SW), avec notamment des niveaux moins élevés pendant la phase d'exploitation par rapport aux suivis précédents.

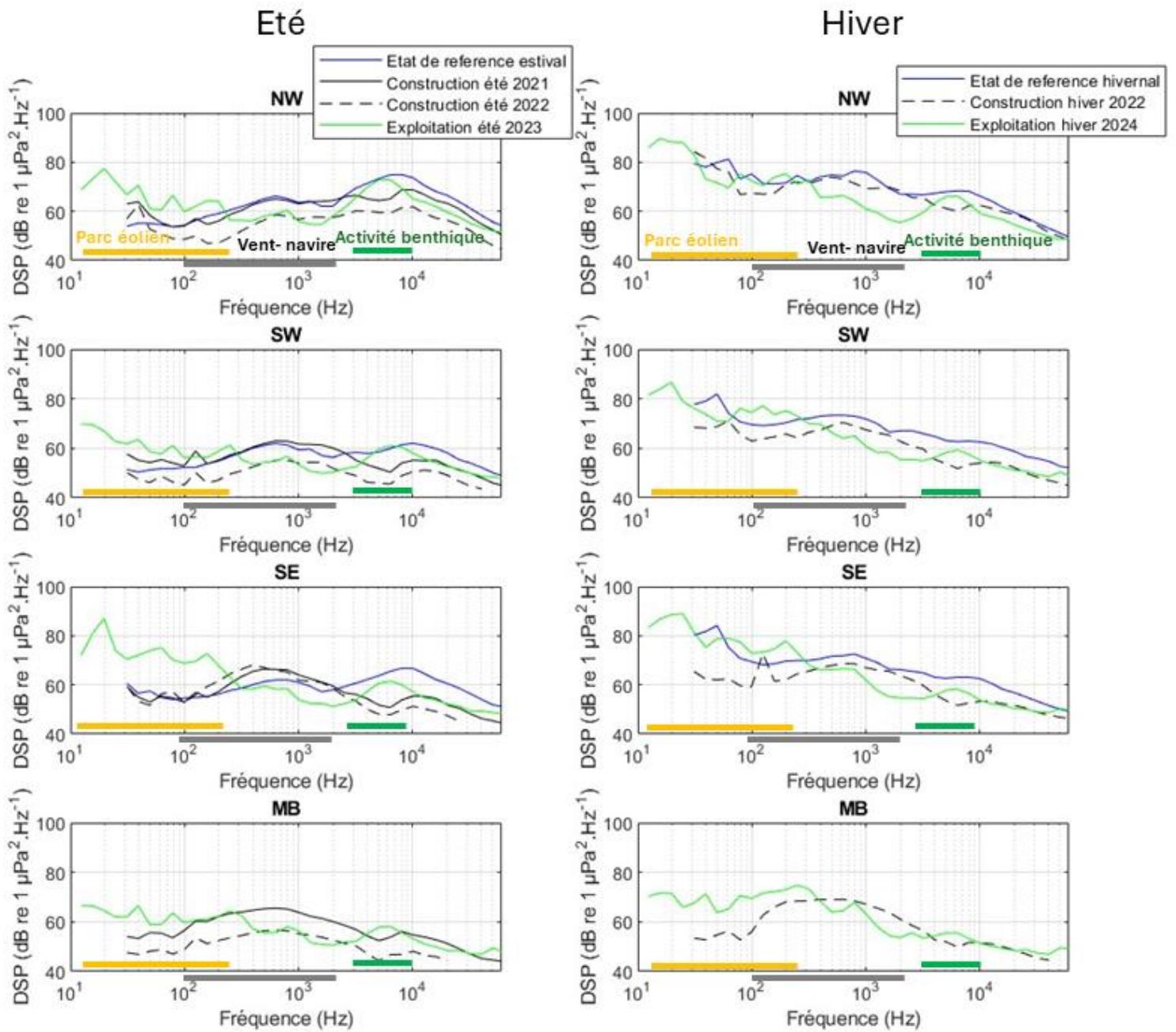


Figure 53. Comparaison des spectres de bruit ambiant relevés en été et en hiver lors de l'état de référence et des phases de construction et d'exploitation.



5.1.7 Bilan sur le paysage sonore du parc éolien en fonctionnement

- Lorsque l'on compare le spectre du bruit ambiant médian reçu au sein des différentes stations avec les audiogrammes des différents groupes de mammifères marins (basse, moyenne et haute fréquence), on remarque que le bruit médian généré par le parc est uniquement audible par les cétacés basse fréquence (mysticètes¹⁶) au niveau des stations proches du parc, notamment sur la station SE (~200 m d'une éolienne) sur la période estivale et hivernale, et sur la station NW (~500 m d'une éolienne) sur la période hivernale (Figure 54). La composante basse fréquence sur SW qui serait audible par les mysticètes, pourrait être soit l'empreinte du parc soit des bruits dus à la houle.
- Les niveaux de bruit ambiant relevés dans cette étude sont légèrement inférieurs à ceux enregistrés lors de l'état de référence. Une évolution générale (diminution lors de la construction et augmentation lors de l'exploitation) des niveaux sonores dans la gamme de fréquence associée à la faune benthique est observée sur l'ensemble des stations, y compris celle située dans le Mor Braz, en dehors de la zone d'empreinte acoustique du parc. Cette tendance est ainsi possiblement induite par un facteur environnemental influençant l'activité benthique à plus large échelle.
- Similairement à l'état de référence, on observe une forte composante sonore associée à l'activité de la faune benthique sur la zone du parc, en particulier dans le secteur Nord-Ouest, caractérisé par des habitats rocheux infralittoraux et associés à une faune diversifiée.

¹⁶ Parmi les cétacés basse fréquence susceptibles d'être observés aux environs du parc éolien en mer de Saint Nazaire, seul le petit rorqual a été considéré lors de l'état initial conduit en 2014 comme fréquentant occasionnellement le secteur. Toutefois, aucun individu n'a été observés aux environs sur parc éolien en mer depuis le depuis des campagnes d'inventaires et de suivis.

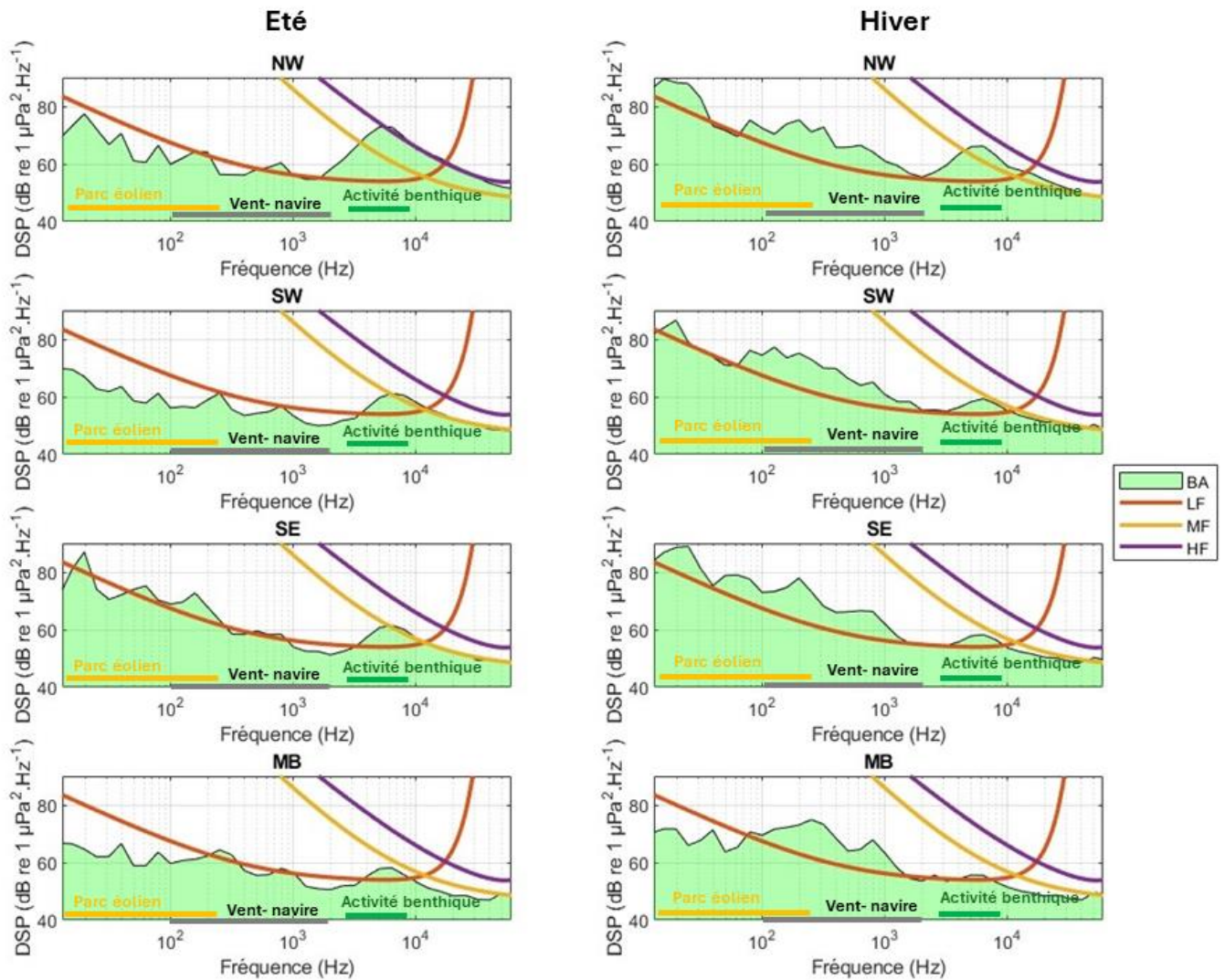


Figure 54. Comparaison du bruit ambiant médian reçu au niveaux des stations NW, SW, SE et MB avec les audiogrammes des cétacés basse fréquence (LF), moyenne fréquence (MF) et haute fréquence (HF).

5.2 Fréquentation de la zone par les cétacés

5.2.1 Delphinidés

La présence acoustique de delphinidés a été enregistrée sur l'ensemble des quatre stations lors des deux périodes suivies (estivale et hivernale) en première année de phase d'exploitation du parc éolien en mer du banc de Guérande. Les taux de détections acoustiques présentent de légères variations saisonnières notamment sur les deux stations situées à l'ouest du parc (NW et SW), avec des taux de détection supérieurs en hiver qu'en été. À l'inverse, la station au sud-est (SE) révèle une présence acoustique plus importante en été qu'en hiver. On observe également des différences de taux de présence entre la station du Mor Braz (station MB située à proximité d'Hoëdic) présentant une fréquentation quotidienne (quelle que soit la saison) et les autres stations situées à proximité du parc éolien, où les fréquentations sont plutôt occasionnelles à fréquentes. En se focalisant à l'échelle du parc, on observe plus de détections au sud de celui-ci qu'au nord (plus marquée sur la période estivale qu'hivernale). Les différences spatiales et saisonnières des taux de fréquentation des delphinidés observées lors de ce suivi en phase d'exploitation sont cohérentes avec les différences saisonnières et spatiales observées lors de l'état de référence (Chompret *et al.*, 2019) et lors du suivi en phase de construction du parc (Chompret *et al.*, 2023), comme synthétisé dans le Tableau 13 pour les suivis estivaux et le

Tableau 14 pour les suivis hivernaux. On observe entre les différentes années de suivis de légères variations de taux de détections acoustiques. Sur la station NW on observe une très légère augmentation du taux de présence acoustique par rapport à l'état de référence. Sur la station SW on observe plutôt une légère diminution de la présence acoustique en été, tandis qu'en hiver on observe un retour vers les mêmes tendances qu'à l'état de références après une diminution de la fréquentation pendant les phases de travaux. On observe cette même tendance sur SE en été (ré-augmentation de la présence par rapport aux suivis en phase travaux), tandis qu'en hiver on observe une légère diminution de la présence au cours des années. Sur la station MB on observe des taux qui semble constant au cours des années en été, mais une augmentation en hiver en 2024 par rapport à 2022.

Les différences spatiales de présence acoustiques ainsi que les variations saisonnières observées autour du parc sont cohérentes avec les densités estivales et hivernales de petits delphinidés (dauphins communs et dauphins bleu et blanc) et de grands dauphins, estimées à partir des données des campagnes aériennes via SAMM (Van Canneyt *et al.* 2014), et SCANS III (Hammond *et al.* 2017), SAMM II (Laran *et al.*, 2022) et SAMM IV-SAMM II (Van Canneyt *et al.* 2024), ainsi que des modèles d'habitats préférentiels MANGA (Analyse bibliographique environnementale du projet d'éoliennes flottantes au sud de la Bretagne, TBM Environnement, 2020, cf. Figure 82 et Figure 83). Ces modélisations montrent notamment sur la période estivale un gradient positif de densité de la côte vers le large pour les petits delphinidés, avec des densités en été autour de 0,05 individus par maille de 3x3 km (9 km²) au nord du parc (et dans le Mor Braz), et des densités variant de 0,05 à 0,15 individus par 9 km² vers l'ouest et sud-ouest du parc. Pour les grands dauphins, les variations de densités sont plus localisées avec des densités plus faibles au nord ($\leq 0,025$ individu par 9km²) qu'au sud du parc, où l'on retrouve la même densité que dans le Mor Braz (0,025 à 0,05 individu par 9 km²). Pour la période hivernale, les petits delphinidés ont une distribution un peu plus côtière qu'en



été avec des densités de 0,1 à 0,25 individu par 9 km² dans le parc, similairement au Mor Braz. Pour les grands dauphins, leur distribution est localisée sur une petite zone à l'ouest du parc avec des densités de 0,025 à 0,05 individu par 9 km².

Ainsi, l'augmentation de la présence acoustique de delphinidés sur les stations à l'ouest du parc (NW et SW) en hiver pourrait s'expliquer par l'utilisation potentielle de cet habitat par les grands dauphins en hiver (Figure 82) ainsi que la présence de petits delphinidés (Figure 83). La présence de ces derniers pourrait également expliquer une partie des détections acoustiques sur la station du sud-est (SE) à cette même période hivernale (Figure 83), mais l'absence de grands dauphins expliquerait que le taux de détections acoustiques soit moins important que sur les autres stations à l'ouest du parc (NW et SW, Figure 82). À l'inverse, la densité de grands dauphins au sud du parc en été pourrait expliquer l'augmentation du taux de détections acoustiques sur cette station du sud-est (SE) par rapport à l'hiver (Figure 82). Cependant, le taux de détections acoustiques plus important sur la station du sud-ouest (SW) que sur la station SE, ainsi que les taux de détections plus important sur les stations du sud du parc par rapport à celle au nord, pourraient s'expliquer par la densité des petits delphinidés qui augmente en s'éloignant de la côte (Figure 83). Quant au Mor Braz, le fort taux de détection tout au long de l'année pourrait s'expliquer par la densité de petits delphinidés en hiver et de grands dauphins en été (Figure 82, Figure 83).

La présence acoustique des delphinidés sur les différentes stations n'a pas révélé de prédominance horaire nette, avec des détections pouvant avoir lieux à différentes heures de la journée. Toutefois, on observe des taux de détections (soit le nombre de détection par heures d'enregistrement) plus importants la nuit et à l'aube ou au crépuscule que pendant le jour sur l'ensemble des stations, sauf pour la station du sud-ouest lors du suivi estival (où les taux sont similaires quelle que soit la période de la journée) ainsi que la station du nord-ouest (NW) qui ne présente des détections que de jour. Le nombre très faible de présences acoustiques sur cette station ne permet pas de conclure à une absence significative à cette période¹⁷. Ces observations sont cohérentes avec les suivis précédents pour lesquels les delphinidés étaient observées aux mêmes périodes (Chompret *et al.*, 2019, 2023).

Des signaux de communication (sifflements) et des clics d'écholocation ont été enregistrés sur toutes les stations. Ces signaux acoustiques ne peuvent traduire avec certitude le comportement des delphinidés, mais sont toutefois de bons indices sur leur activité potentielle. En effet, les signaux de communication sont des indices pertinents d'activités sociales ou de coordination de groupe (ex. cohésion en chasse). Quant aux clics d'écholocation, utilisés comme biosonar actif pour estimer la direction et la distance de cibles sous l'eau (Au, 1993 ; Backus & Schevill, 1966 ; Griffin, 1958 ; Simmons *et al.*, 1979 ; Zimmer, 2011), ils peuvent être associées à des individus prospectant dans leur environnement (déplacement, interactions sociales et chasse). Les individus augmentent leurs taux de clics d'écholocation pour appréhender plus finement leur environnement, comme lorsqu'ils s'approchent d'une proie, ce qui se traduit par des sons perçus comme des "buzzes". Ces signaux peuvent être considérés comme de bons indicateurs d'épisodes de recherche alimentaire, voire de tentatives de capture (Fais *et al.*, 2016 ; Goold & Jones, 1995 ; Holt *et al.*,

¹⁷ A noter des observations de nuit ont eu lieu en considérant un cycle d'acquisition continue.



2019 ; Johnson *et al.*, 2004 ; L. A Miller *et al.*, 1995 ; P. J. O. Miller *et al.*, 2004 ; Richard *et al.*, 2021 ; Wisniewska *et al.*, 2014).

Ainsi, en associant les buzzes comme des indices de tentatives de capture, on peut estimer qu'entre un tiers à la moitié des évènements de présence acoustique seraient des évènements de chasse. En effet, lors de ces évènements avec production de buzzes, le pourcentage de minutes positives contenant ces signaux est élevé (comme observé sur les densités de probabilité ; cf. Figure 47), signifiant des activités avec des taux productions de buzzes élevées, ce qui suggère des activités de chasse. Ces observations seraient cohérentes avec les évènements de chasse suggérés dans les suivis précédents sur la plupart des stations (Chompret *et al.*, 2023, cf. Tableau 13). On observe également que la quasi-totalité du temps passé par les individus détectés à proximité des stations, comporte des sifflements (*c.-à-d.* des signaux de communication). De manière générale, il ne semble pas y avoir de différence entre la répartition horaire des productions de buzzes et celle des sifflements (pour les 4 stations).

5.2.2 Marsouins

La présence acoustique des marsouins relevée sur les stations lors des deux périodes suivies (estivale et hivernale) en première année de phase d'exploitation du parc éolien en mer du banc de Guérande, révèle une saisonnalité de la fréquentation de cette espèce dans la zone d'étude ainsi que des préférences spatiales. Comme pour les delphinidés, la station du Mor Braz présente une plus forte fréquentation que les autres stations situées à proximité du parc éolien, quelle que soit la période. De manière générale, un plus fort taux de présence est observé en hiver qu'en été. Parmi les trois autres stations situées à proximité du parc, seule la station du sud-ouest présente des détections acoustiques (réparties sur un seul évènement de présence) en été tandis qu'elles présentent toutes des détections acoustiques en hiver. Sur cette période hivernale, on note des taux de détections plus importants sur les stations au sud du parc (SE et SW), avec des fréquentations occasionnelles, que sur celle du nord (NW), présentant une fréquentation exceptionnelle. Les différences de taux de fréquentation des marsouins entre les stations acoustiques et entre les saisons suivies, sont cohérentes avec les différences saisonnières et spatiales observées lors de l'état de référence (Chompret *et al.*, 2019) et lors du suivi en phase de construction du parc (Chompret *et al.*, 2023), comme synthétisé dans le Tableau 13 pour les suivis estivaux et le Tableau 14 pour les suivis hivernaux. Toutefois, on observe une tendance à la diminution des taux de présence acoustique des marsouins au cours des années sur les stations du parc en hiver et en été. Sur la station du Mor Braz on observe une tendance à la diminution en été et augmentation en hiver, toutefois l'absence de données lors de l'état de référence dans le Mor Braz ne permette pas de conclure à une tendance nette.



Les variations spatiales et saisonnières de présence acoustique autour du parc sont relativement cohérentes avec les densités estivales et hivernales connues des marsouins estimées à partir des données des campagnes aériennes via SAMM (Van Canneyt *et al.* 2014), et SCANS III (Hammond *et al.* 2017), SAMM II (Laran *et al.*, 2022) et SAMM IV-SAMM II (Van Canneyt *et al.* 2024), ainsi que des modèles d'habitats préférentiels MANGA (TBM Environnement, 2020, cf. Figure 84). En effet, les plus fortes détections acoustiques sur la station du Mor Braz lors des deux périodes de suivis peuvent s'expliquer par des densités de marsouins supérieures à celle du parc, avec une estimation variant 0,05 à 0,15 individus par maille de 9km² sur la période estivale et entre 0,05 à 0,10 individus par maille de 9km² sur la période hivernale. Au niveau du parc on observe sur la période estivale des densités de 0,025 à 0,05 individus au sud du parc et 0,010 à 0,025 individus au nord du parc. Ce gradient nord-sud de densité pourrait expliquer en partie les quelques détections sur la station au sud-est du parc (SE) lors du suivi estival (Figure 84). Pour la période hivernale, les marsouins ont une distribution plus proche de la côte par rapport à l'été, avec des densités de 0,01 à 0,05 individu par 9 km² au niveau du parc (Figure 84). Ces estimations de densités n'expliquent pas la différence de détections acoustiques entre la station au nord du parc (NW) et les deux stations au sud (SE et SW) et les stations sud, mais pourraient expliquer la différence saisonnière avec une augmentation des détections acoustiques sur les trois stations du parc en hiver.

Les taux de répartition horaires des détections de marsouin montrent des présences sur toutes les phases de la journée. On observe toutefois une légère prédominance de détection la nuit plutôt que le jour lors du suivi estival (sur MB, SW ayant trop peu de détections pour pouvoir conclure) et à l'inverse des taux de détections légèrement supérieurs le jour et à l'aube ou au crépuscule en hiver (MB et S, SE et NW ayant trop peu de détections pour pouvoir conclure).



Tableau 13. Synthèse et comparaison des fréquentations des stations par les mammifères marins observées en saison estivale durant l'état de référence (été 2019), la phase de construction (été 2021 et été 2022) et durant la phase d'exploitation (été 2023) du parc éolien en mer du banc de Guérande. Les flèches indiquent une **tendance** sur l'évolution (↗ augmentation, ↘ diminution ou → tendance constante) de fréquentation par rapport à l'état de référence (sauf pour le MB dont l'absence de données en 2020 ne permet pas la même comparaison). Cette **tendance est à considérer avec précaution puisque les flèches reflètent des changements de catégories de fréquentation (Tableau 7) plutôt qu'une évolution stricte des variations des taux de présence journalières** (données non disponibles dans le rapport de l'état de référence).

		NORD-OUEST (NW)				MOR BRAZ (MB)			
		2019	2021	2022	2023	2019	2021	2022	2023
Delphinidés	Fréquentation	Exceptionnelle	Occasionnelle	Exceptionnelle	Occasionnelle ↗	-	Quotidienne	Quotidienne	Quotidienne
	Rythme nyctéméral ¹⁸	-	Jour/ Nuit / Aube et Crépuscule	Jour/ Aube et Crépuscule	Jour	-	Jour/ Nuit / Aube et Crépuscule	Jour/ Nuit / Aube et Crépuscule	Jour/ Nuit / Aube et Crépuscule
	Comportements (acoustiques) ¹⁹	<i>Socialisation / déplacement</i>	<i>Socialisation</i>	-	Sifflements et Buzzes (chasse probable)	-	<i>Socialisation / chasse</i>	<i>Socialisation / chasse</i>	Sifflements et Buzzes (chasse probable)
Marsouins ²⁰	Fréquentation	Exceptionnelle	Exceptionnelle	Absente	Absente	-	Régulière	Régulière	Occasionnelle
	Rythme nyctéméral	-	Jour	-	-	-	Jour/ Nuit / Aube et Crépuscule	Jour/ Nuit / Aube et Crépuscule	Jour/ Nuit / Aube et Crépuscule
		SUD-OUEST (SW)				SUD-EST (SE)			
		2019	2021	2022	2023	2019	2021	2022	2023
Delphinidés	Fréquentation	Quotidienne à Régulière	Régulière	Occasionnelle à Régulière	Occasionnelle à Régulière	Quotidienne à Occasionnelle	Régulière	Occasionnelle	Fréquente
	Rythme nyctéméral ¹⁸	-	Jour/ Nuit / Aube et Crépuscule	Jour/ Nuit / Aube et Crépuscule	Jour/ Nuit / Aube et Crépuscule	-	Jour/ Nuit / Aube et Crépuscule	Jour/ Nuit / Aube et Crépuscule	Jour/ Nuit / Aube et Crépuscule
	Comportements (acoustique) ¹⁹	<i>Socialisation / chasse opportuniste</i>	<i>Socialisation / chasse opportuniste</i>	<i>Socialisation / chasse opportuniste</i>	Sifflements et Buzzes (chasse probable)	<i>Socialisation</i>	<i>Socialisation</i>	<i>Socialisation/sondage environnement</i>	Sifflements et Buzzes (chasse probable)
Marsouins ¹⁰	Fréquentation	Régulière	Occasionnelle	Occasionnelle	Exceptionnelle ↘	Absente	Occasionnelle	Exceptionnelle	Absente →
	Rythme nyctéméral	-	Jour/ Nuit / Aube et Crépuscule	Jour/ Nuit / Aube et Crépuscule	Jour	-	Jour/ Aube et Crépuscule	Jour/ Aube et Crépuscule	-

¹⁸ Sont reportés sur cette ligne si les détections ont eu lieu de jour, de nuit et ou à l'aube et crépuscule. Les informations des précédents suivis ont été récupérés dans les résultats, quand ces derniers étaient clairement décrits. La définition de « plage horaire préférentielle » des précédents rapports n'a pas été gardée par manque de définition claire et étant plutôt considéré comme une interprétation des résultats.

¹⁹ Les comportements décrits pour les delphinidés lors des précédents suivis sont reportés ici tels qu'ils ont été interprétés. L'absence de méthodologie sur la classification des comportements dans les précédents rapports ne permet pas de réaliser les mêmes conclusions. La littérature ne permet également pas de soutenir avec certitude les interprétations sur les comportements. Ainsi, sont reportés pour la colonne 2023 les comportements acoustiques (cf. sections 3.4.3.3 et 4.6.1). Pour les marsouins aucun comportement n'est reporté par manque de connaissance.

²⁰ Les détections de marsouins étant des événements courts et ponctuels, leur probabilité de détection diminue avec un cycle d'acquisition à 30%, entraînant des sous-estimations de la fréquentation des sites (cf. 8.3.2.2). Les fréquentations obtenues avec un cycle continu (Tableau 19) sont indiquées en annexe à titre informatif.



Tableau 14. Synthèse et comparaison des fréquentations des stations par les mammifères marins observées en saison hivernale durant l'état de référence (hiver 2020), la phase de construction (hiver 2022) et durant la phase d'exploitation (été 2023) du parc éolien en mer du banc de Guérande. Les flèches indiquent une **tendance** sur l'évolution (↗ augmentation, ↘ diminution ou → tendance constante) de fréquentation par rapport à l'état de référence (sauf pour le MB dont l'absence de données en 2020 ne permet pas la même comparaison). Cette **tendance est à considérer avec précaution puisque les flèches reflètent des changements de catégories de fréquentation (Tableau 7) plutôt qu'une évolution stricte des variations des taux de présence journalières** (données non disponibles dans le rapport de l'état de référence).

		NORD-OUEST (NW)			MOR BRAZ (MB)		
		2020	2022	2024	2020	2022	2024
Delphinidés	Fréquentation	Exceptionnelle	Occasionnelle	Occasionnelle ↗	-	Occasionnelle	Quotidienne
	Rythme nyctéméral ¹⁸	-	Jour/ Nuit / Aube et Crépuscule	Jour / Nuit	-	Jour/ Nuit / Aube et Crépuscule	Jour/ Nuit / Aube et Crépuscule
	Comportements (acoustique) ¹⁹	<i>Socialisation / en déplacement</i>	<i>Socialisation</i>	Sifflements et Buzzes (chasse probable)	-	<i>Socialisation / chasse opportuniste</i>	Sifflements et Buzzes (chasse probable)
Marsouins ¹⁰	Fréquentation	Occasionnelle	Exceptionnelle	Exceptionnelle ↘	-	Régulière	Fréquente
	Rythme nyctéméral	-	Nuit	Nuit	-	Jour/ Nuit / Aube et Crépuscule	Jour/ Nuit / Aube et Crépuscule
		SUD-OUEST (SW)			SUD-EST (SE)		
		2020	2022	2024	2020	2022	2024
Delphinidés	Fréquentation	Quotidienne	Régulière	Fréquente à Quotidienne →	Régulière à occasionnelle	Régulière	Occasionnelle →
	Rythme nyctéméral ¹⁸	-	Jour/ Nuit / Aube et Crépuscule	Jour/ Nuit / Aube et Crépuscule	-	Jour/ Nuit / Aube et Crépuscule	Jour/ Nuit / Aube et Crépuscule
	Comportements (acoustique) ¹⁹	<i>Socialisation / rare comportement de chasse</i>	<i>Socialisation / chasse opportuniste</i>	Sifflements et Buzzes (chasse probable)	<i>Socialisation / en déplacement</i>	<i>Socialisation/sondage environnement</i>	Sifflements et Buzzes (chasse probable)
Marsouins ¹⁰	Fréquentation	Régulière	Occasionnelle	Occasionnelle ↘	Régulière	Exceptionnelle	Occasionnelle ↘
	Rythme nyctéméral	-	Jour/ Nuit / Aube et Crépuscule	Jour/ Nuit / Aube et Crépuscule	-	Jour/ Nuit	Jour/ Nuit



5.2.3 Limites générales de l'acoustique passive pour le suivi de cétacés

Afin d'interpréter convenablement les résultats de cette étude, il est important d'être conscient que les suivis acoustiques présentent certaines limites :

- Les rayons de détection sont variables selon les espèces. A titre d'exemple, les clics émis à de hautes fréquences (100-150 kHz) par les marsouins sont associés à une forte directivité et sont rapidement atténués dans le milieu (perte de propagation par absorption). Leur rayon de détection (de l'ordre de la centaine de mètre ; Tougaard *et al.* 2006 ; Kyhn *et al.*, 2012, Clausen *et al.*, 2019) est donc faible par rapport aux delphinidés (de l'ordre de la dizaine de kilomètre). De plus, un bruit ambiant élevé peut diminuer le rayon de détection des signaux des cétacés cibles.
- Seuls les individus émettant des signaux acoustiques sont détectés, ainsi il ne peut pas être exclu que des individus silencieux soient passés dans un rayon de détection autour des stations acoustiques.
- L'identification au rang de l'espèce des delphinidés est impossible à ce jour, au vu des caractéristiques acoustiques similaires de leurs émissions sonores (section 2.6.1). Bien que certaines études montrent de fines variations interspécifiques sur des populations éloignées (Californie), aucune étude de référence n'a été menée en Atlantique. Or il a été montré que les signaux émis varient selon les populations (notamment en fonction du bruit ambiant).
- De la même manière, le manque d'étude de référence empêche une caractérisation fiable des comportements réalisés à partir des signaux acoustiques détectés seuls. Les signaux acoustiques ne peuvent donc traduire avec certitude le comportement des espèces cibles, mais peuvent toutefois être de bons indices sur l'activité potentielle des individus détectés acoustiquement (ex. signaux de communication ou clics d'écholocalisation utilisés comme biosonar).
- Un cycle d'acquisition de 30 % diminue la probabilité de détections de signaux de mammifères marins, entraînant une sous-estimation des estimations de fréquentations, notamment pour les événements plus occasionnels (cf. Annexe 8.3.2).



5.2.4 Bilan sur la fréquentation de la zone par les mammifères marins

- Les fréquentations des delphinidés et des marsouins au niveau des stations suivies semblent révéler des tendances spatiales (entre les stations) et de saisonnalités (hiver vs. été) similaires aux suivis précédents, notamment lors de l'état de référence avant les travaux d'installation du parc éolien²¹. Toutefois, les variations spatio-temporelles entre suivis restent à confirmer et à préciser par l'analyse de l'évolution des taux de présence des mammifères marins depuis l'état de référence²².
- Des vocalises de delphinidés ont été enregistrées sur toutes les stations. La fréquentation des delphinidés est qualifiée d'occasionnelle (au nord-ouest) à fréquente (au sud-est) dans le parc et de quotidienne dans le Mor Braz. La présence de buzzes dans les rencontres (événements) acoustiques de delphinidés enregistrées suggère que 29 % à 43 % de ces événements peuvent être associés à de potentiels épisodes de recherche de nourriture (chasse).
- Des clics de marsouins ont été enregistrés uniquement au niveau des stations du Mor Braz (fréquentation occasionnelle) et du sud-ouest (fréquentation exceptionnelle).

²¹ Toutefois ces observations diffèrent légèrement avec les conclusions des observations visuelles réalisées par Biotope. En effet, les dauphins ont été observés au printemps et en été et les marsouins en décembre. Les observations de marsouins ont été faites plutôt au nord de la zone d'étude, alors que celles de dauphins plutôt au sud. Le très faible nombre d'observation ne permet pas de définir s'il y a une zone de préférence pour ces espèces.

²² Il faut faire attention à la surinterprétation sur les évolutions de fréquentation entre la phase d'exploitation et les précédentes phases (décrites par les flèches dans le Tableau 13 et le Tableau 14), puisque cette évolution est estimée sur des changements de catégories de fréquentations (Tableau 7) plutôt que sur une comparaison des pourcentages (données non disponibles dans les précédents rapports). En effet, une variation de ± 5 % de jours positifs peut entraîner une interprétation à une diminution ou augmentation de la fréquentation là où une variation de ± 30 % de jours positifs peut conduire à une interprétation d'une fréquentation constante/identique (ex. pour des fréquentations occasionnelles).



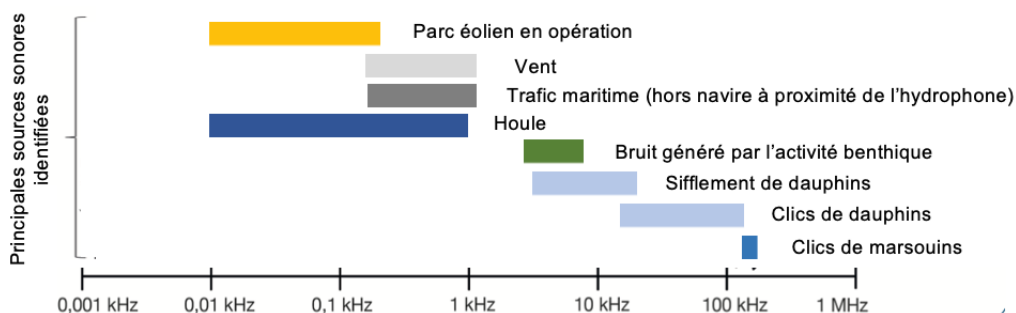
6 Conclusion

- Différents contributeurs au **paysage sonore** ont été identifiés dont le fonctionnement du parc éolien, le trafic maritime, la houle, le vent et l'activité biologique benthique.
- Les éoliennes en fonctionnement génèrent un bruit dans la gamme de fréquence allant de **10 à 250 Hz**, et un niveau à la source dans cette bande de fréquence entre **128 et 138 dB re 1 μPa^2 @1m** selon la vitesse de rotation des pales. Ces observations sont cohérentes et complètent la description du bruit des éoliennes en fonctionnement disponible dans la littérature actuelle.
- **L'émergence acoustique²³** d'une éolienne en fonctionnement est estimée entre 600m et 12km avec **une émergence acoustique moyenne de 2 à 4,5 km**.
- Le **parc en fonctionnement n'est pas audible par les marsouins et delphinidés**. Il est **audible** par les phocidés à proximité d'une éolienne et par les cétacés basses fréquences au sein du parc et pourrait venir **masquer** des signaux acoustiques pour ces espèces. Cependant la probabilité de présence dans l'enceinte du parc de ces groupes d'espèces (phocidés, cétacés basse fréquence) étant faible²⁴, par conséquent le **risque d'impact est faible voire négligeable**.
- Les niveaux sonores des CTV, en particulier lors des opérations de Boat Landing, sont similaires à des bruits de navire (cf. Persohn *et al.*, (2020) : Guide du Ministère de la Transition Écologique et Solidaire), et restent en dessous des seuils TTS/PTS des cétacés.
- Les **marsouins** semblent favoriser le sud du parc plutôt que le nord, et ont été détectés essentiellement en hiver.
- Les **delphinidés** ont été détecté sur les deux périodes (été et hiver), et semblent favoriser la zone sud du parc en été et l'ouest du parc en hiver.

²³ L'émergence acoustique (considérée indépendamment des espèces marines) est ici définie comme le niveau du bruit d'une éolienne au-dessus du bruit ambiant, cette émergence acoustique évolue donc en fonction des variations du bruit ambiant (bruit de navire, conditions environnementales, etc.)

²⁴ Les phocidés et grandes baleines ne font pas partie des espèces couramment rencontrées dans l'aire d'étude : observations rares dans le cadre des suivis (acoustique passive et observation de la mégafaune) réalisés depuis l'état initial et jusqu'à ce jour.

Principaux contributeurs au bruit ambiant identifiés dans cette étude



Gammes d'auditions de différents groupes d'espèces marines

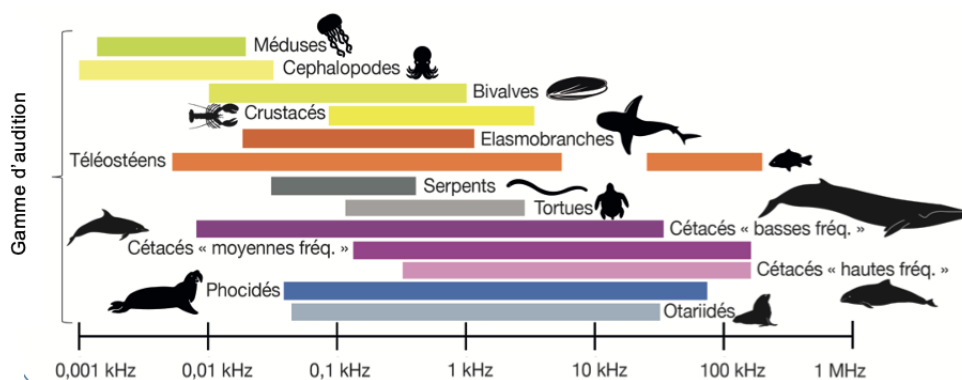


Figure 55. Comparaison des bandes de fréquences associées aux différentes sources sonores identifiées lors de ce suivi avec les gammes d'audition de divers groupes d'espèces marines (figure dérivée de Bonnel et al. 2022).

7 Bibliographie

- Al-Badour, F., Sunar, M., & Cheded, L. (2011). Vibration analysis of rotating machinery using time–frequency analysis and wavelet techniques. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(6), 2083–2101.
- Ansmann, I. C., Goold, J. C., Evans, P. G., et al. (2007). Variation in the whistle characteristics of short-beaked common dolphins, *Delphinus delphis*, at two locations around the British Isles. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 87(1), 19–26.
- Artigao, E., Koukoura, S., Honrubia-Escribano, A., Carroll, J., McDonald, A., & Gómez-Lázaro, E. (2018). Current signature and vibration analyses to diagnose an in-service wind turbine drive train. *Energies*, 11(4), 960.
- Asselin, S., Hammill, M. O., & Barrette, C. (1993). Underwater vocalizations of ice breeding grey seals. *Canadian Journal of Zoology*, 71(11), 2211–2219.
- Au, W. W., Kastelein, R. A., Rippe, T., & Schooneman, N. M. (1999). Transmission beam pattern and echolocation signals of a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 106(6), 3699–3705.
- Au, W. W. (2004). Echolocation signals of wild dolphins. *Acoustical Physics*, 50(4), 454–462.
- Au, W. W. (2012). *The sonar of dolphins*. Springer Science & Business Media.
- Betke, K., Schultz-von Glahn, M., & Matuschek, R. (2004, March). Underwater noise emissions from offshore wind turbines. In *Proc CFA/DAGA*.
- Bonnel, J., Chauvaud, S., Chauvaud, L., Mars, J., Mathias, D., & Frédéric, O. (2022). Effets des sons anthropiques sur la faune marine : Cas des projets éoliens offshore. Quae.
- Caldwell, M. C., & Caldwell, D. K. (1968). Vocalization of naive captive dolphins in small groups. *Science*, 159(3819), 1121–1123.
- Chauvaud, S., Chauvaud, L., & Jolivet, A. (2018). Impacts des sons anthropiques sur la faune marine. Editions Quae. (Nouvelle édition en cours de publication).
- Chompert, J., Clorennec, D. & Folegot, T. (2019), Suivi acoustique passif du bruit ambiant et des mammifères marins dans le cadre du parc éolien en mer de Saint-Nazaire, Etat de référence, numéro QO.20180622.01.RAP.001.05A, Quiet-Oceans, Brest, France
- Chompert, J., Bellanger, J. & Clorennec, D. (2023), Suivi par acoustique passive du bruit ambiant et de la fréquentation des mammifères marins dans le cadre de la construction du parc éolien en mer de Saint-Nazaire, Phase de construction : Mesure de Suivi N°8, numéro QO.20201021.10.RAP.001.09A, Quiet-Oceans, Brest, France
- Clausen, K. T., Wahlberg, M., Beedholm, K., et al. (2011). Click communication in harbour porpoises *Phocoena phocoena*. *Bioacoustics*, 20(1), 1–28.
- Clausen, K. T., Tougaard, J., Carstensen, J., Delefosse, M., & Teilmann, J. (2019). Noise affects porpoise click detections—the magnitude of the effect depends on logger type and detection filter settings. *Bioacoustics*, 28(5), 443–458.
- Collins, M. D. (1995). User's Guide for RAM Versions 1.0 and 1.0 p. *Naval Research Lab, Washington, DC*, 20375, 14.
- Dorémus G., Blanchard A., Sanchez T., Peltier H., Van Canneyt O., Genu M., Chabrolle A. 2022. MEGASCOPE : Suivi de la distribution de la mégafaune marine en Manche, Atlantique et Méditerranée en 2021. Rapport scientifique de l'Observatoire Pelagis.
- Elmer, K. H., Gerasch, W. J., Neumann, T., Gabriel, J., Betke, K., & SCHULTZ V GLAHN, M. (2006, November). Measurement and reduction of offshore wind turbine construction noise. In *DEWEK 2006 Conference* (pp. 22–23).
- Erbe, C., Reichmuth, C., Cunningham, K., Lucke, K., & Dooling, R. (2016). Communication masking in marine mammals: A review and research strategy. *Marine pollution bulletin*, 103(1–2), 15–38.



- Fais, A., Johnson, M., Wilson, M., Aguilar Soto, N., & Madsen, P. T. (2016). Sperm whale predator-prey interactions involve chasing and buzzing, but no acoustic stunning. *Scientific Reports*, 6, 28562. <https://doi.org/10.1038/srep28562>
- Fletcher, H., 1940. Auditory patterns. *Rev. Mod. Phys.* 12, 47–65.
- Frasier, K. E., Wiggins, S. M., Harris, D., Marques, T. A., Thomas, L., & Hildebrand, J. A. (2016). Delphinid echolocation click detection probability on near-seafloor sensors. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 140(3), 1918-1930.
- Goodson, A. D., & Sturtivant, C. R. (1996). Sonar characteristics of the harbour porpoise (*Phocoena phocoena*): source levels and spectrum. *ICES Journal of Marine Science*, 53(2), 465-472.
- Goold, J. C., & Jones, S. E. (1995). Time and frequency domain characteristics of sperm whale clicks. *Journal of the Acoustical Society of America*, 98(3), 1279–1291. <https://doi.org/10.1121/1.413465>
- Goold, J. C. (2000). A diel pattern in vocal activity of short-beaked common dolphins, *Delphinus delphis*. *Marine Mammal Science*, 16(1), 240–244.
- Hammond, P.S et al. (2017). Estimates of cetacean abundance in European Atlantic waters in summer 2016 from the SCANS-III aerial and shipboard surveys. SCANS-III project report 2.
- Hansen, M., Wahlberg, M., & Madsen, P. T. (2008). Low-frequency components in harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) clicks: communication signal, by-products, or artifacts?. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 124(6), 4059-4068.
- Hatakeyama, Y., & Soeda, H. (1990). Studies on echolocation of porpoises taken in salmon gillnet fisheries. In *Sensory abilities of cetaceans* (pp. 269-281). Springer, Boston, MA.
- Henderson, E. E., Hildebrand, J. A., Smith, M. H., & Falcone, E. A. (2012). The behavioral context of common dolphin (*Delphinus* sp.) vocalizations. *Marine Mammal Science*, 28(3), 439–460. <https://doi.org/10.1111/j.1748-7692.2011.00498.x>
- Holt, M. M., Hanson, M. B., Emmons, C. K., Haas, D. K., Giles, D. A., & Hogan, J. T. (2019). Sounds associated with foraging and prey capture in individual fish-eating killer whales, *Orcinus orca*. *Journal of the Acoustical Society of America*, 146(5), 3475–3486. <https://doi.org/10.1121/1.5133388>
- Houser, D. S., Helweg, D. A., & Moore, P. W. (1999). Classification of dolphin echolocation clicks by energy and frequency distributions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 106(3), 1579-1585.
- Janik, V. M. (2000). Source levels and the estimated active space of bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) whistles in the Moray Firth, Scotland. *Journal of Comparative Physiology A*, 186, 673-680.
- Jensen, F. H., Bejder, L., Wahlberg, M., et al. (2009). Biosonar adjustments to target range of echolocating bottlenose dolphins (*Tursiops* sp.) in the wild. *Journal of Experimental Biology*, 212(8), 1078-1086.
- Jensen, F., Kuperman, W., Porter, M. and Schmidt, H. (2011) *Computational Ocean Acoustics*. 2nd Edition, Springer-Verlag, New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8678-8>
- Jensen, F. H., Beedholm, K., Wahlberg, M., Bejder, L., & Madsen, P. T. (2012). Estimated communication range and energetic cost of bottlenose dolphin whistles in a tropical habitat. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(1), 582-592.
- Johnson, M., Madsen, P. T., Zimmer, W. M. X., Aguilar de Soto, N., & Tyack, P. L. (2004). Beaked whales echolocate on prey. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 271, S383–S386. <https://doi.org/10.1098/sbl.2004.0208>
- Kikuchi, R. (2010). Risk formulation for the sonic effects of offshore wind farms on fish in the EU region. *Marine Pollution Bulletin*, 60 (2), 172-177.
- Kinda, B.G., Simard, Y., Gervaise, C., Mars, J. I., & Fortier, L. (2013). Under-ice ambient noise in Eastern Beaufort Sea, Canadian Arctic, and its relation to environmental forcing. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(1), 77-87. <https://doi.org/10.1121/1.4808330>



- Kim, K. H., Hursky, P., Porter, M. B., Hildebrand, J. A., Elizabeth, E., & Wiggins, S. M. (2006). *Automated passive acoustic tracking of dolphins in free-ranging pods*. 6.
- Kumar, B. K., Diwakar, G., & Satynarayana, M. R. S. (2012). Determination of unbalance in rotating machine using vibration signature analysis. *Int. J. Mod. Eng. Res*, 2(5), 33415-33421.
- Kyhn, L. A., Tougaard, J., Thomas, L., Duve, L. R., Stenback, J., Amundin, M., ... & Teilmann, J. (2012). From echolocation clicks to animal density—Acoustic sampling of harbor porpoises with static dataloggers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(1), 550-560.
- Laran S., Genu M., Authier M., Blanchard A., Doremus G., Sanchez T., Spitz J., Van Canneyt O. (2022). Distribution et abondance de la mégafaune marine en France métropolitaine. Rapport final de la campagne SAMM II Atlantique-Manche – Hiver 2021 de l'Observatoire Pelagis (UAR 3462, La Rochelle Université / CNRS) pour la Direction de l'Eau et de la Biodiversité et L'Office Français de la Biodiversité. 72 pages.
- Lindell, H. (2003). Utgrunden off-shore wind farm-Measurements of underwater noise.
- Linnenschmidt, M., Teilmann, J., Akamatsu, T., et al. (2013). Biosonar, dive, and foraging activity of satellite tracked harbor porpoises (*Phocoena phocoena*). *Marine Mammal Science*, 29(2), E77-E97.
- Madsen, P. T., Kerr, I., & Payne, R. (2004). Echolocation clicks of two free-ranging, oceanic delphinids with different food preferences: false killer whales *Pseudorca crassidens* and Risso's dolphins *Grampus griseus*. *Journal of Experimental Biology*, 207(11), 1811-1823.
- Madsen, P. T., Wahlberg, M., Tougaard, J., Lucke, K., & Tyack, P. (2006). Wind turbine underwater noise and marine mammals: implications of current knowledge and data needs. *Marine ecology progress series*, 309, 279-295.
- Mathias, D., Gervaise, C., & Di Iorio, L. (2016). Wind dependence of shallow water ambient noise in a biologically rich temperate coastal area. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(5), 4179-4179. <https://doi.org/10.1121/1.4941917>
- Miller, P. J. O., Johnson, M. P., & Tyack, P. L. (2004). Sperm whale behaviour indicates the use of echolocation click buzzes “creaks” in prey capture. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 271(1554), 2239–2247. <https://doi.org/10.1098/rspb.2004.2863>
- Møhl, B., & Andersen, S. (1973). Echolocation: high-frequency component in the click of the Harbour Porpoise (*Phocoena ph. L.*). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 54(5), 1368-1372.
- Nakamura, K. (2003). Comparison of click characteristics among odontocete species. *Advances in the Study of Echolocation in Bats and Dolphins*.
- National Marine Fisheries Service (2018). 2018 Revisions to: Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing (Version 2.0): Underwater Thresholds for Onset of Permanent and Temporary Threshold Shifts (Report No. NMFS-OPR-59). *Report by National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*.
- National Marine Fisheries Service (2024). Update to: Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing (Version 3.0): Underwater Thresholds for Onset of Permanent and Temporary Threshold Shifts. U.S Dept. of Commer., NOAA. NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-71, 182p.
- Pangerc, T., Theobald, P. D., Wang, L. S., Robinson, S. P., & Lepper, P. A. (2016). Measurement and characterisation of radiated underwater sound from a 3.6 MW monopile wind turbine. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 140(4), 2913-2922.
- Papale, E., Azzolin, M., Cascao, I., et al. (2014). Macro-and micro-geographic variation of short-beaked common dolphin's whistles in the Mediterranean Sea and Atlantic Ocean. *Ethology Ecology & Evolution*, 26(4), 392-404.
- Papale, E., Gamba, M., Perez-Gil, M., Martin, V. M., & Giacoma, C. (2015). Dolphins Adjust Species-Specific Frequency Parameters to Compensate for Increasing Background Noise. *PLOS ONE*, 10(4), e0121711. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0121711>
- Pettex A. et al. (2014). Final results of aerial surveys conducted in winter 2011/12 and summer 2012 for the French Marine Protected Area Agence and the French Ministry of Ecology.



- Petrella, V., Martinez, E., Anderson, M. G., & Stockin, K. A. (2012). Whistle characteristics of common dolphins (*Delphinus* sp.) in the Hauraki Gulf, New Zealand. *Marine Mammal Science*, 28(3), 479–496. <https://doi.org/10.1111/j.1748-7692.2011.00499.x>
- Persohn, C., Helloco, L., Baudinière, E., & Martinez, L. (2020). Préconisations pour limiter les impacts des émissions acoustiques en mer d'origine anthropique sur la faune marine. Ministère de la transition écologique et solidaire.
- Pérez Tadeo, M.; Gammell, M.; O'Brien, J (2023). First Steps towards the Automated Detection of Underwater Vocalisations of Grey Seals (*Halichoerus grypus*) in the Basket Islands, Southwest Ireland. *J. Mar. Sci.Eng.2023,11,351*. <https://doi.org/10.3390/jmse11020351>.
- Porter, M. B. (1992). *The KRAKEN normal mode program*. Naval Research Lab Washington DC.
- Porter, M. B., & Bucker, H. P. (1987). Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 82(4), 1349-1359.
- Porter, M. B., & Liu, Y. C. (1994). Finite-element ray tracing. *Theoretical and computational acoustics*, 2, 947-956.
- Prawirasasra, M. S., Mustonen, M., & Klauson, A. (2021). The underwater soundscape at Gulf of Riga marine-protected areas. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(8), 915.
- Rankin, S., Archer, F., Keating, J. L., et al. (2017). Acoustic classification of dolphins in the California Current using whistles, echolocation clicks, and burst pulses. *Marine Mammal Science*, 33(2), 520-540.
- Richard, G., Filatova, O. A., Samarra, F. I., Fedutin, I. D., Lammers, M., & Miller, P. J. (2017). Icelandic herring-eating killer whales feed at night. *Marine biology*, 164, 1-13.
- Richard, G., Bonnel, J., Beesau, J., Calvo, E., Cassiano, F., Dramet, M., Glaziou, A., Korycka, K., Guinet, C., & Samaran, F. (2021). Passive acoustic monitoring reveals feeding attempts at close range from soaking demersal longlines by two killer whale ecotypes. *Marine Mammal Science*, 1–22. <https://doi.org/10.1111/mms.12860>
- Richardson, W. J., Greene Jr, C. R., Malme, C. I., et al. (2013). *Marine mammals and noise*. Academic press.
- Robbins, J. R., Brandecker, A., Cronin, M., et al. (2016). Handling dolphin detections from CPODs, with the development of acoustic parameters for verification and the exploration of species identification possibilities. *Bioacoustics*, 25(2), 99-110.
- Sibly RM, Nott HMR, Fletcher DJ (1990) Splitting behaviour into bouts. *Anim Behav* 39:63–69. doi:10.1016/S0003-3472(05)80726-2
- Sigray, P., & Andersson, M. H. (2011). Particle motion measured at an operational wind turbine in relation to hearing sensitivity in fish. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 130(1), 200-207.
- Simmonds, M., Dolman, S., & Weilgart, L. (2004). *Oceans of noise: A WDCS science report* Whale and Dolphin Conservation Society, 23-36.
- Slater PJB, Lester NP (1982) Minimising errors in splitting behaviour into bouts. *Behaviour* 79:153–161. doi:10.1163/156853982X00229
- Soldevilla, M. S., Henderson, E. E., Campbell, G. S., et al. (2008). Classification of Risso's and Pacific white-sided dolphins using spectral properties of echolocation clicks. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 124(1), 609-624.
- Southall, B., Bowles, A., Ellison, W., Finneran, J., Gentry, R., Greene, C., et al. (2007). *Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Initial Scientific Recommendations*. *Aquatic Mammals*, 33 (4), 411-521.
- Southall, B. L., Finneran, J. J., Reichmuth, C., Nachtigall, P. E., Ketten, D. R., Bowles, A. E., ... & Tyack, P. L. (2019). *Marine mammal noise exposure criteria: Updated scientific recommendations for residual hearing effects*. *Aquatic Mammals*, 45(2), 125-232.
- Sørensen, P. M., Wisniewska, D. M., Jensen, F. H., et al. (2018). Click communication in wild harbour porpoises (*Phocoena phocoena*). *Scientific reports*, 8(1), 9702.
- Stockin, K. A., Binedell, V., Wiseman, N., et al. (2009). Behavior of free-ranging common dolphins (*Delphinus* sp.) in the Hauraki Gulf, New Zealand. *Marine Mammal Science*, 25(2), 283-301.



- Teilmann, J., Miller, L. A., Kirketerp, T., et al. (2002). Characteristics of echolocation signals used by a harbour porpoise (*Phocoena phocoena*) in a target detection experiment. *Aquatic Mammals*, 28(3), 275-284.
- Terhune, J.M (2019). The underwater vocal complexity of seals (Phocidae) is not related to their phylogeny. *Canadian Journal of Zoology*. 97(3): 232-240.
- Tougaard, Jakob & Poulsen, L.R. & Amundin, Mats & Larsen, F. & Hansen, J.R. & Teilmann, Jonas. (2006). Detection function of T-PODs and estimation of porpoise densities.
- Tougaard, J., Hermannsen, L., & Madsen, P. T. (2020). How loud is the underwater noise from operating offshore wind turbines?. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 148(5), 2885-2893.
- Van Canneyt O., Authier M., Caurant F., Peltier H., Spitz J. & Ridoux V., 2014. Aide à la mise en oeuvre d'une stratégie de surveillance pour les mammifères marins et tortues marines dans les eaux de France métropolitaine. 75 pp. (Ed In : Cahier Technique De L'observatoire Pelagis – Ums 3462). Université de La Rochelle / CNRS
- Van Canneyt O., Sanchez T., Blanchard A., Dorémus G., Laran S., Spitz J., Authier M. & A. Gilles. (2024). Distribution de la mégafaune marine en France métropolitaine et résultats des analyses du système digital STORMM lors de la campagne SCANS IV (été 2022), de l'Observatoire Pelagis (UAR 3462, La Rochelle Université / CNRS) pour la Direction de l'Eau et de la Biodiversité et L'Office Français de la Biodiversité. 67p.
- Villadsgaard, A., Wahlberg, M., & Tougaard, J. (2007). Echolocation signals of wild harbour porpoises, *Phocoena phocoena*. *Journal of Experimental Biology*, 210(1), 56-64.
- Westwood, E. K., Tindle, C. T., & Chapman, N. R. (1996). A normal mode model for acousto-elastic ocean environments. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 100(6), 3631-3645.
- Wiggins, S. M., Frasier, K. E., Elizabeth Henderson, E., & Hildebrand, J. A. (2013). Tracking dolphin whistles using an autonomous acoustic recorder array. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 133(6), 3813–3818. <https://doi.org/10.1121/1.4802645>
- Wisniewska, D. M., Johnson, M., Nachtigall, P. E., & Madsen, P. T. (2014). Buzzing during biosonar-based interception of prey in the delphinids *Tursiops truncatus* and *Pseudorca crassidens*. *Journal of Experimental Biology*, 217(24), 4279–4282.

8 Annexes

8.1 Caractérisation du bruit généré par une éolienne en fonctionnement

8.1.1 Contexte

Récemment, Tougaard et al. (2020) a passé en revue les mesures disponibles du bruit émis dans différents parcs éoliens en fonctionnement en Europe du Nord. Le bruit associé au fonctionnement des éoliennes est généralement décrit comme continu, basse fréquence avec plusieurs composantes tonale' à des fréquences inférieures à 1000 Hz et d'intensité relativement faible (niveaux générés à la source 10 à 20 dB inférieurs à ceux générés par des navires dans la même gamme de fréquences ; Pangerc *et al.*, 2016; Tougaard *et al.*, 2020).

Le bruit enregistré par Pangerc *et al.* (2016) à proximité d'une éolienne (3.6MW, fondation monopieux) du parc de Sheringham Shoal au Royaume-Uni, présentait une fréquence principale à 162 Hz. Bien que d'amplitude plus faible, d'autres composantes tonales étaient également présentes, à des fréquences comprises entre environ 20 et 330 Hz. Les caractéristiques du bruit mesuré, tant en termes de fréquence que d'amplitude (niveau sonore), variaient en fonction de la vitesse du vent. De même, Betke (2006) a montré que le bruit produit par une éolienne du parc éolien de Horns Rev était principalement concentré sur deux composantes spectrales (tonales), et que la fréquence de ces tonales dépendait de la vitesse de rotation des pales. À la vitesse nominale, elles étaient d'environ 150 Hz et 300 Hz (Betke, 2006). Tougaard *et al.* (2020) montre une corrélation entre la puissance des éoliennes (en MW) et les niveaux sonores mesurés. De plus, il a été observé que le niveau de bruit varie en fonction de certains paramètres, comme la vitesse de rotation des pales, le fonctionnement de la boîte de vitesses et du générateur d'électricité (Madsen *et al.*, 2006; Betke *et al.*, 2004; Sigray et Andersson, 2011; Pangerc *et al.*, 2016). L'origine du bruit des éoliennes réside ainsi dans les vibrations mécaniques de la nacelle générées par la rotation des composants entraînés par le vent (Pangerc *et al.*, 2016). Les fortes fréquences tonales observées correspondent aux fréquences d'engrènement des roues dentées dans la boîte de vitesses et à leurs harmoniques (Pangerc *et al.*, 2016). Les vibrations induites par le vent directement sur le mat à des vitesses de vents élevées ont également été identifiées comme une source possible de bruit (Elmer *et al.*, 2007; Tougaard *et al.*, 2020).

La corrélation entre les vibrations mécaniques du mat de l'éolienne (mesurées via un accéléromètre) et les niveaux sonores mesurés dans la colonne d'eau, démontrée par Lindell (2003) et Sigray et Andersson (2011), corrobore l'idée que les vibrations provenant de la nacelle se propage ensuite à travers le mat jusqu'aux fondations (Pangerc *et al.*, 2016, Tougaard *et al.*, 2020). Bien que non démontré statistiquement à notre connaissance, le type de fondation est ainsi également susceptible de générer des différences dans les niveaux de bruit reçus à proximité des éoliennes en fonctionnement (Tougaard *et al.*, 2020).

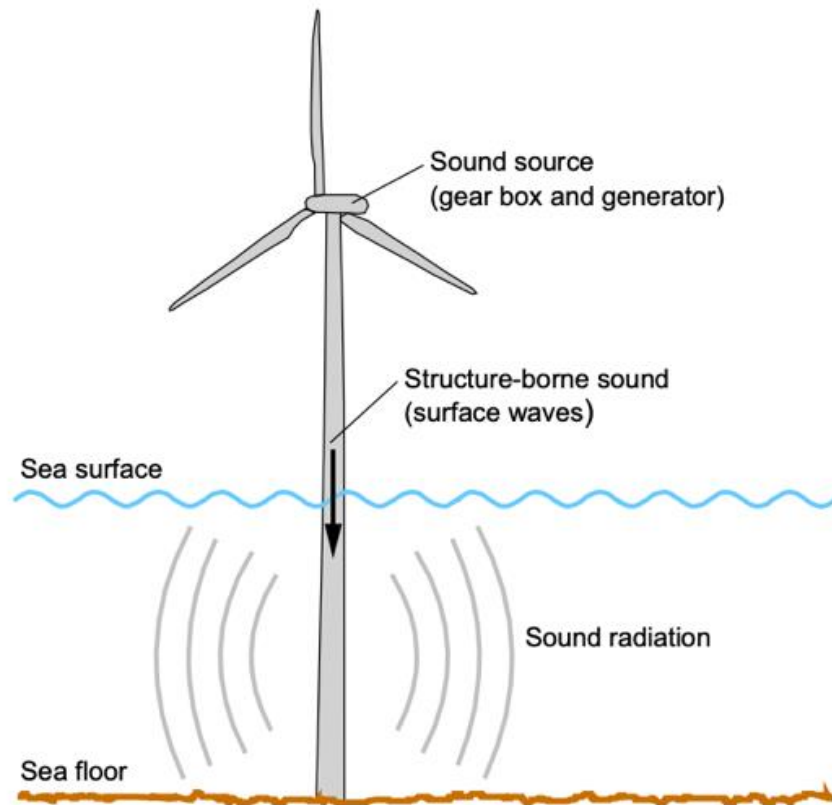


Figure 56. Schéma des mécanismes du bruit sous-marin généré par une éolienne offshore issu de Betke (2004).

Pour les éoliennes dont les fondations sont enfoncées dans le fond marin, on s'attend à ce que ces vibrations structurelles se transmettent dans le substrat (Pangerc *et al.*, 2016 ; Hawkins 2021). Bien que l'on connaisse la manière dont le parc éolien affecte le substrat, à ce jour les vibrations du substrat générées ont reçu très peu d'attention comparé au bruit reçu dans la colonne d'eau (peu de mesures disponibles ; Hawkins 2021).

L'objectif est de caractériser l'émergence acoustique d'une éolienne en fonctionnement dans le contexte environnemental local, afin de discuter de l'effet du bruit sous-marin généré par le parc éolien en fonctionnement sur les espèces marines qui fréquentent la zone (crustacés, poissons, mammifères marins, oiseaux plongeurs).

Des mesures de vibration du substrat ont également été réalisées afin de compléter la caractérisation du bruit généré par les éoliennes en fonctionnement présentée dans cette étude. Cette approche novatrice est particulièrement adaptée pour étudier l'environnement vibratoire des espèces benthiques.

8.1.2 Caractéristiques des éoliennes étudiées

Les éoliennes du parc du banc de Guérande sont des turbines Haliade 150 de 6 MW implantées avec des fondations monopieux (Figure 57). Ces turbines tournent pour des vitesses de vent comprises entre 11 et 90 km/h. Leurs vitesses de rotation minimale (démarrage) et maximale (plateau) sont respectivement de 3.8 et 11.5 rpm (rotation par minute).

Les fondations ont été installées pour majorité sur substrat rocheux, seules XX fondations sont implantées sur substrat meuble au nord du parc éolien.

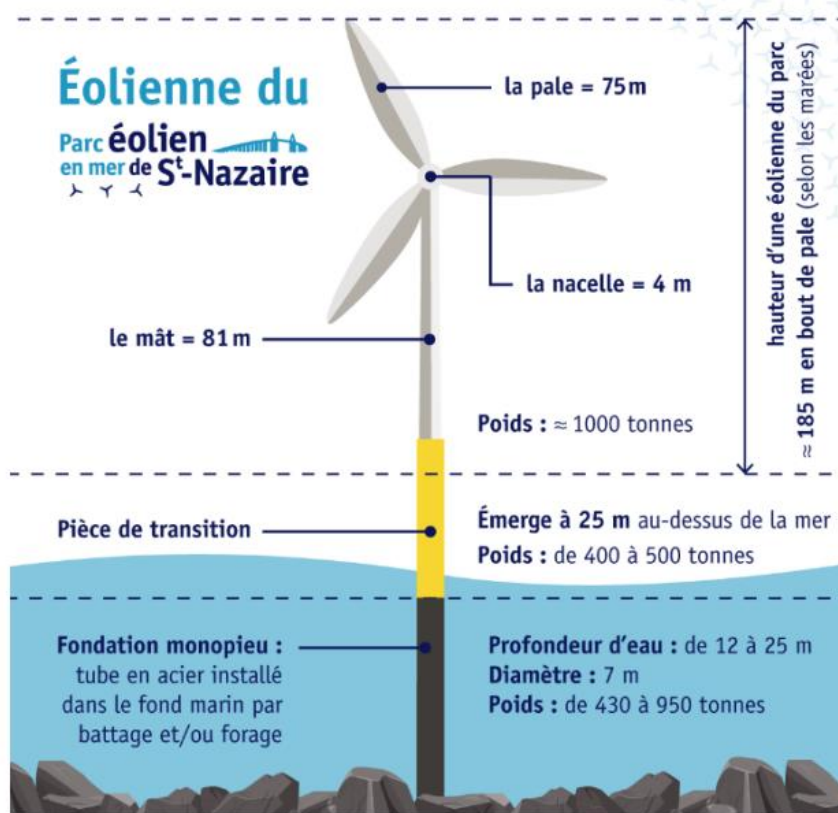


Figure 57. Caractéristiques des éoliennes implantées sur le parc éolien en mer de St Nazaire.

8.1.3 Stations de mesures

Trois stations de mesures acoustiques ont été déployées (S1, S2, S3), en plus de celles prévues dans le cadre du suivi MSU8 (stations NW, SW, SE et MB déployées pour le suivi du bruit ambiant et des mammifères marins), afin d'étudier spécifiquement le bruit généré par les éoliennes en fonctionnement (cf. sections 3.2 et 3.3).

Les stations S1 et S2 ont été déployées à 75 et 750 m de l'éolienne F01 située dans l'extrémité Nord-Ouest du parc éolien (Figure 58). Ces stations ont été positionnées de manière à former un gradient de distance en s'écartant du parc vers le nord. Ce transect a également été défini de manière à inclure la station NW du suivi MSU8. La profondeur minimale (Lowest Astronomical Tide «) de ce site d'étude est de 14 m CM. Les stations S1 et NW sont

positionnées sur des roches ou blocs à laminaires clairsemées tandis que la station S2 est située sur des roches ou blocs infralittoraux à algues rouges et brunes (Figure 58).

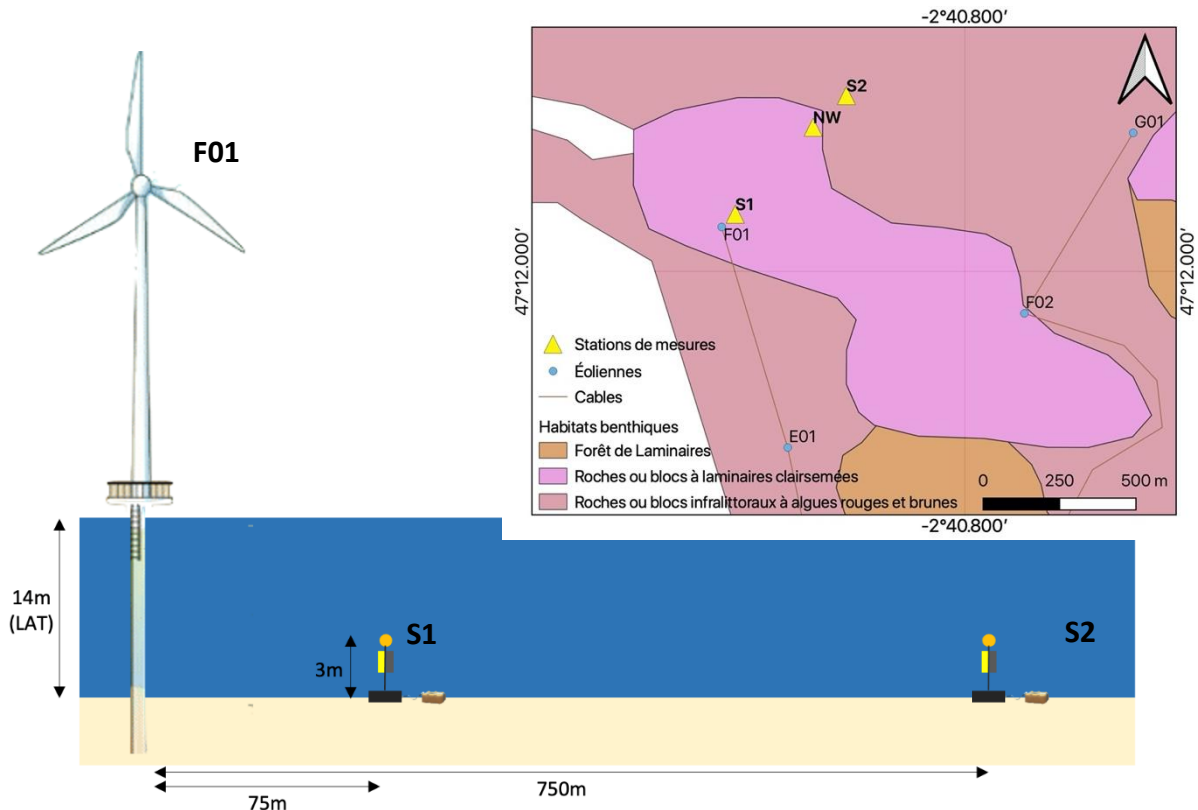


Figure 58. Schéma et localisation de stations de mesures déployées autour de l'éolienne F01.

Ces stations ont été déployées lors de deux campagnes d'acquisition de données, réalisées en été 2023 puis en hiver 2024.

8.1.4 Traitement et analyse des données

8.1.4.1 Caractérisation fréquentielle du bruit d'une éolienne en fonctionnement

Des spectrogrammes sont réalisés pour illustrer la signature acoustique du bruit généré par une éolienne en fonctionnement (éolienne F01). Ces spectrogrammes sont mis en relation avec la vitesse de rotation des pales et le niveau de vibrations du mat.

Afin d'analyser plus finement le contenu fréquentiel du bruit généré par l'éolienne F01, des densités spectrales de puissance (DSPs, spectres acoustiques présentant la répartition fréquentielle du bruit reçu) ont été calculées pour chaque minute enregistrée par les hydrophones aux stations S1 et S2. Des DSPs médianes ont ensuite été estimées par classe de vitesse de rotation de 0.2 rpm. Afin d'éviter un biais engendré par des valeurs extrêmes aberrantes, seules les classes de vitesse de rotation avec un minimum de 120 minutes d'enregistrement ont été conservées. Des représentations en cascade (graphiques 3D) sont ensuite utilisés pour illustrer l'évolution du contenu fréquentiel des signaux reçus (DSPs) au



niveau des stations S1 et S2, en fonction de la vitesse de rotation des pales. La rotation des éoliennes étant directement liée à la vitesse du vent, l'évolution des DSPs en fonction de la vitesse de rotation des pales est à la fois influencée par le bruit généré par l'éolienne et par l'augmentation du bruit ambiant (BA) induite par le vent. Afin de confirmer les observations réalisées à partir des spectres du bruit reçu, l'excès de bruit généré par l'éolienne F01 par rapport au bruit ambiant (incluant le vent) est calculé en soustrayant aux DSPs précédemment calculées, les DSPs médianes du bruit ambiant. Deux approches ont été appliquées et présentées en annexe.

8.1.4.2 Niveaux de bruit générés par une éolienne en fonctionnement

Cette partie reprend la méthodologie décrite en section 3.4.2, en se focalisant sur les stations à proximité de l'éolienne F01, soient : NW, S1 et S2. Les niveaux $SPL_{10-250Hz}$ sont estimés et mis en relation avec la vitesse de rotation des pales de l'éolienne F01. Les niveaux sources dans cette bande de fréquence ($SL_{10-250Hz}$) sont ensuite estimés pour chaque vitesse de rotation en utilisant la régression linéaire appropriée (<7rpm ou >7rpm) et déterminée dans la section 4.3.2.

8.1.5 Résultats

8.1.5.1 Caractérisation fréquentielle du bruit d'une éolienne en fonctionnement

Les spectrogrammes suivants montrent la signature acoustique du bruit généré par l'éolienne F01, enregistré par la station S1 dans différentes conditions de vent. La signature acoustique est caractérisable par des raies spectrales.

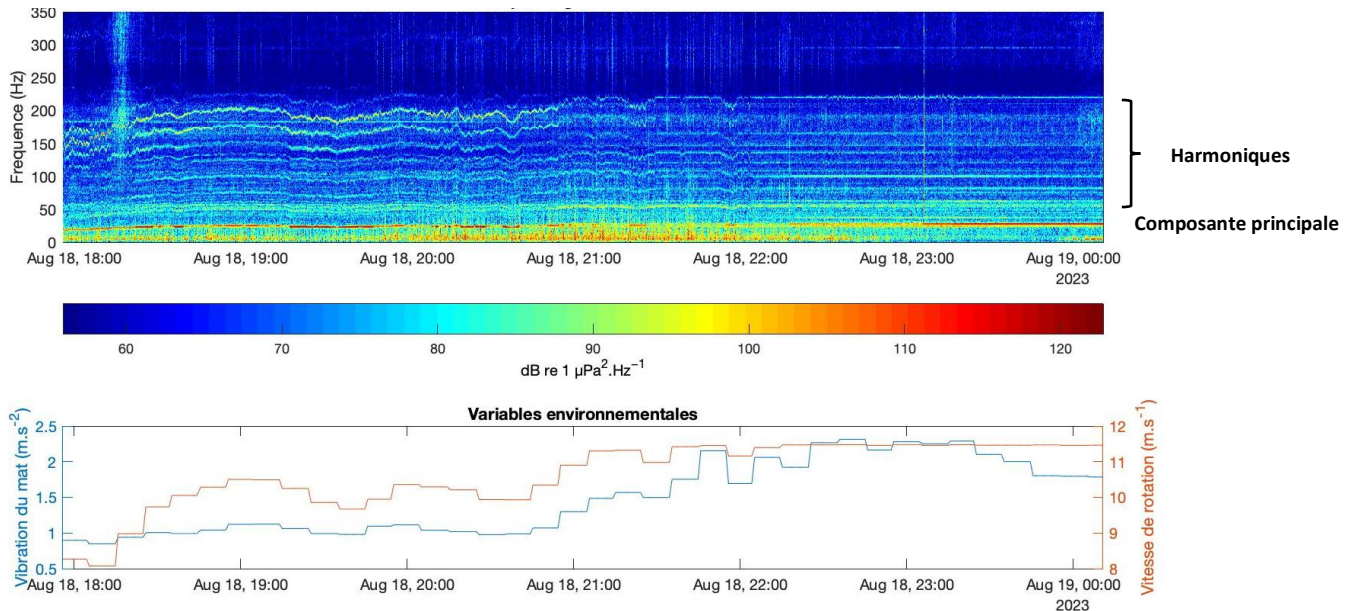


Figure 59. Spectrogramme du bruit généré par les éoliennes en fonctionnement, enregistré sur S1 en été 2023, lors de fortes conditions de vent.

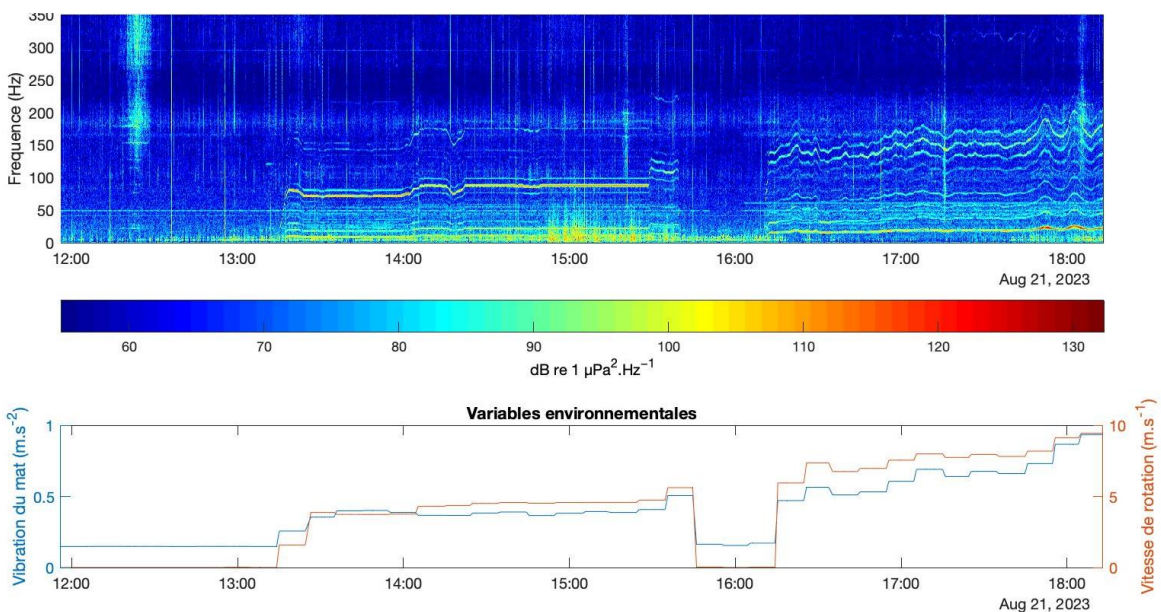


Figure 60. Spectrogramme du bruit généré par les éoliennes en fonctionnement, enregistré sur S1 en été 2023 lors de conditions de vent variables.



On observe un signal continu, constitué de raies dont une composante principale autour 20Hz et différentes harmoniques visibles jusqu'à 200 Hz. Ce signal semble moduler en fréquence avec la vitesse de rotation des éoliennes. Plus la vitesse de rotation augmente, plus la fréquence des signaux générés (principale et harmoniques) augmente. On remarque que la fréquence des signaux est stable lorsque la vitesse de rotation des pales plafonne à 11.5 rpm (c'est-à-dire la vitesse maximale de rotation de l'Haliade 150).

La Figure 61 montrent l'évolution du contenu fréquentiel (DSPs médians) des signaux enregistrés au niveau des stations S1 et S2, en été 2023 et en hiver 2024, en fonction de la vitesse de rotation des pales.

Cette figure permet d'observer en détail, l'évolution du contenu fréquentiel du bruit reçu en fonction de l'activité de l'éolienne F01.

Comme observé sur les spectrogrammes (Figure 59, Figure 60), le bruit reçu à 75 m de l'éolienne (S1) contient différentes composantes qui varient en fonction de la vitesse de rotation des pales (Figure 61) :

- On observe une fréquence principale qui varie de 10 à 30 Hz en fonction de la vitesse de rotation et différentes harmoniques associées. Les fréquences des harmoniques correspondent à des multiples de la fréquence principale. La fréquence de la dernière harmonique observée est égale au multiple de 7 de la principale et présente des fréquences modulant de 70 à 210 Hz. L'intensité de la fréquence principale est maximale entre 8.8 et 10 rpm avec un niveau reçu de 93.65 dB re 1 $\mu\text{Pa}\cdot\text{Hz}^{-1}$ à 75 m en été 2023.
- On observe également des pics d'énergie à des fréquences spécifiques pour certaines classes de rotation, et notamment à 3.8, 4.6, 5.6 et 11.4 rpm.
- On remarque également une composante à 50 Hz dont l'intensité augmente avec la vitesse de rotation (de 80 dB, à 75 m de l'éolienne, pour une vitesse de rotation de 3.6 rpm à 88 dB à partir de 8.2 rpm), et la présence d'harmoniques associées à 100 et 200Hz.

Bien qu'atténuée, la composante principale décrite précédemment est visible sur le bruit enregistré par la station S2, située à 750m de l'éolienne F01. Les harmoniques et pics d'intensité décrits précédemment sont masqués par le bruit ambiant. Le signal à 50 Hz n'est également pas retrouvé.

Les enregistrements réalisés en hiver présentent une forte composante basse fréquence (< 10 Hz). Cette composante est visible à la fois sur les enregistrements de S1 et de S2. Cette composante est positivement corrélée avec la hauteur de la houle (particulièrement importantes en hiver 2024). Bien que cette composante domine le contenu fréquentiel en terme d'intensité, elle ne masque pas le bruit généré par l'éolienne F01.

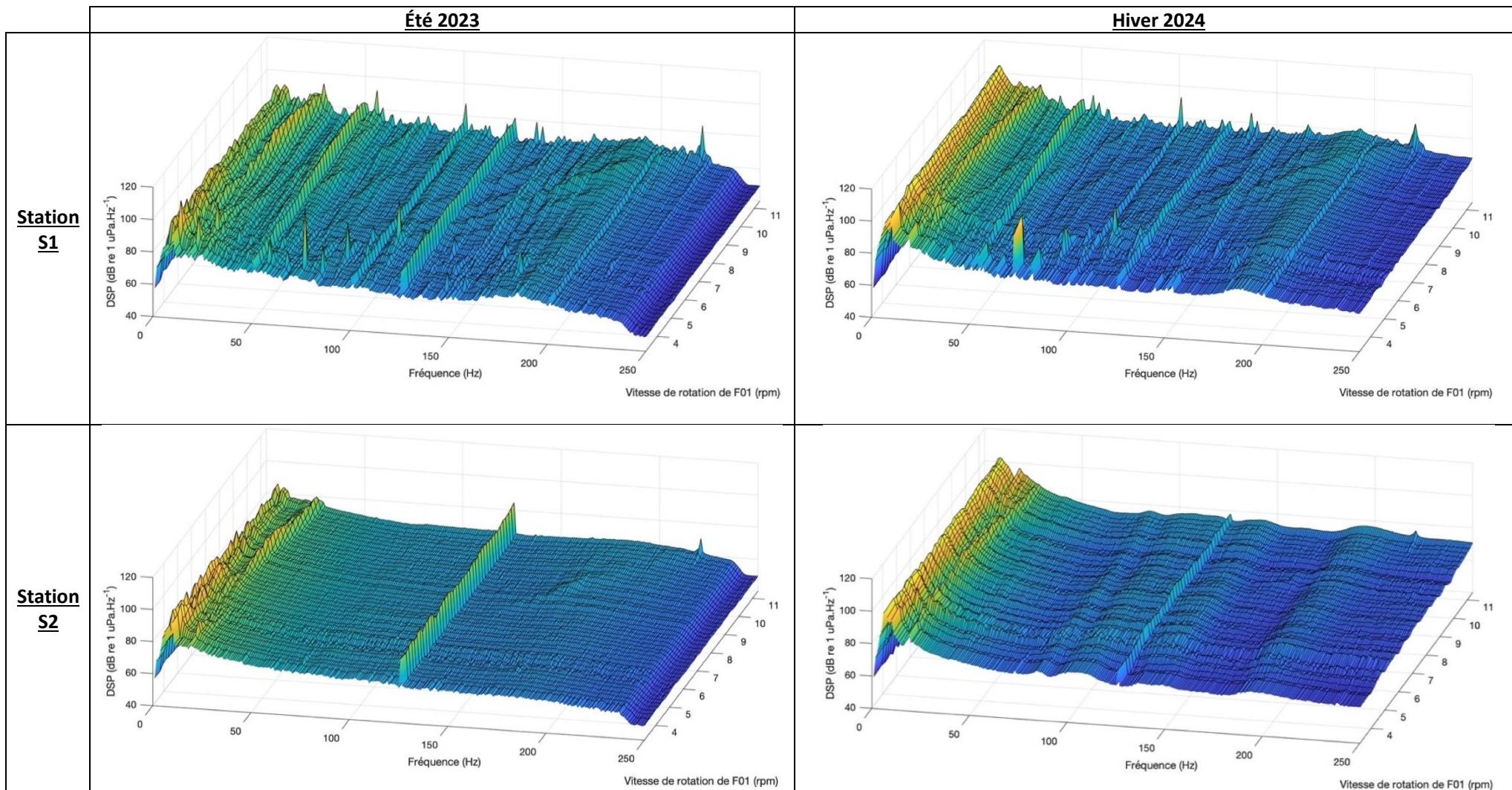


Figure 61. Spectres médians du bruit reçus à 75 et 750m de l'éolienne F01 en fonction de la vitesse de rotation de ses pales lors des deux campagnes de mesures réalisées.



Afin de confirmer les observations réalisées à partir des spectres du bruit reçu (Figure 61), le bruit reçu au niveau de stations S1 et S2 lorsque l'éolienne F01 est en fonctionnement a été comparé au bruit ambiant :

$$\text{Excès de Signal (SE)} = \text{bruit reçu} - \text{bruit ambiant}$$

Cette approche permet de faire ressortir la part du bruit enregistré, qui est directement associée au fonctionnement de l'éolienne F01. Cet excès de signal peut être interprété comme « l'émergence acoustique » du bruit généré par l'éolienne, ou encore son « empreinte sonore ».

Le bruit ambiant utilisé pour calculer cet excès de signal peut être estimé de différentes manières. Chacune de ces méthodes comportent leurs avantages mais aussi certains biais :

- Estimation du bruit ambiant à partir du bruit enregistré au niveau de ces mêmes stations (S1 et S2), lorsque l'éolienne est à l'arrêt (vitesse de rotation égale 0)
 - o Biais généré par la variabilité temporelle du bruit ambiant (cf. 8.1.5.2.a)
 - o Biais généré par la variabilité spatiale du bruit ambiant (cf. 8.1.5.2.b)

Les figures résultantes sont présentées en annexe. Les deux approches montrent les mêmes composantes fréquentielles que celles décrites précédemment, confirmant ainsi les observations réalisées à partir des spectres du bruit reçu (Figure 61).

8.1.5.2 Niveau sonore et émergence acoustique d'une éolienne

a) Niveaux de bruit reçu et source de l'éolienne F01.

La figure suivante présente les niveaux sonores médians reçus (RL) dans la bande de fréquence 10-250 Hz ($SPL_{10-250Hz}$) en fonction de la vitesse de rotation de l'éolienne F01 (rotation par minute). Ces figures présentent les données acquises en été 2023 (Figure 62.a) et en hiver 2024 (Figure 62.b) au niveau des stations S1 NW et S2, situées respectivement à 75m, 565 et 750m de l'éolienne F01.

Les niveaux sonores ($SPL_{10-250Hz}$) enregistrés par la station S1 varient entre 100 et 115 dB re 1 μPa^2 . Ces niveaux sonores (enregistrés au niveau de la station S1) présentent une relation non linéaire avec la vitesse de rotation des pales de l'éolienne F01. Les niveaux sonores enregistrés sont maximaux pour des vitesses de rotation des pales comprises entre 9 et 10 rpm. On observe également des niveaux sonores plus importants lors du démarrage de l'éolienne (autours de 3.8 rpm). On observe ces mêmes tendances sur NW, à des intensités plus faible (étant plus loin de l'éolienne). Quant au bruit enregistré au niveau de la station S2 (située à 750 m de l'éolienne F01), les données enregistrées en été 2023 ne semble pas présenter de relation avec l'activité de l'éolienne F01. Les données enregistrées en hiver 2024 montre une relation positive avec la vitesse de rotation de F01. Il est probable que cette relation soit influencée par d'autres variables environnementales colinéaires à la vitesse de rotation de l'éolienne F01 telle que la vitesse du vent et indirectement les conditions de mer, avec notamment la hauteur de la houle. En effet on observe sur les données estivales des niveaux supérieurs sur S2 par rapport à NW, bien qu'elle se situe plus loin de l'éolienne, suggérant une contribution d'autres sources acoustiques.

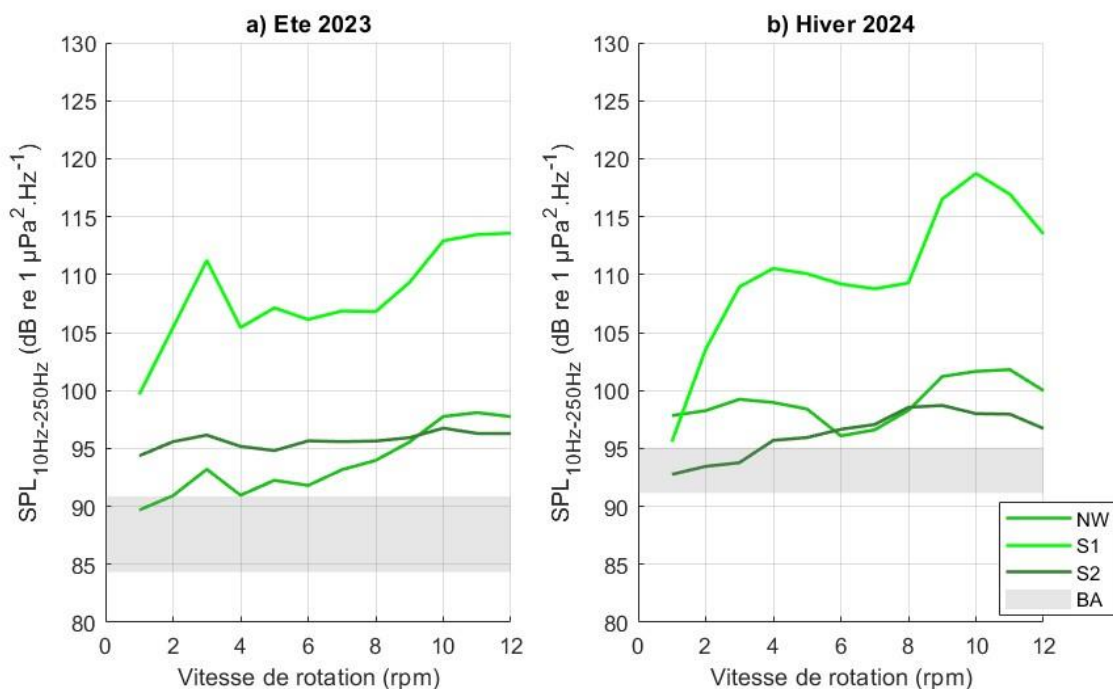


Figure 62. Niveaux sonores médians reçus (RL) dans la bande de fréquence 10-250Hz ($SPL_{10-250Hz}$), enregistrés en été 2023 (A) et hiver 2024 (B) au niveau des stations S1 et S2, en fonction de la vitesse de rotation de l'éolienne F01. Les lignes pointillées indiquent les niveaux de bruit ambiant enregistrés lorsque l'éolienne F01 ne tourne pas.

La figure suivante présente les niveaux générés à la source par l'éolienne F01 (dans la bande de fréquence 10-250 Hz), estimés en appliquant les modèles de perte de propagation défini précédemment (section 4.3.2 et Figure 30) sur les données mesurées sur toutes les stations S1, S2 et NW, en fonction de la vitesse de rotation de ses pales. Les niveaux médians générés à la source varient entre 120 et 145 dB re 1 μPa^2 selon la vitesse de rotation des pales. Il est intéressant de noter que l'application du modèle de propagation sur les 3 stations donnent des niveaux similaires, suggérant que la signature acoustique de F01 est bien perçue sur les 3 stations.

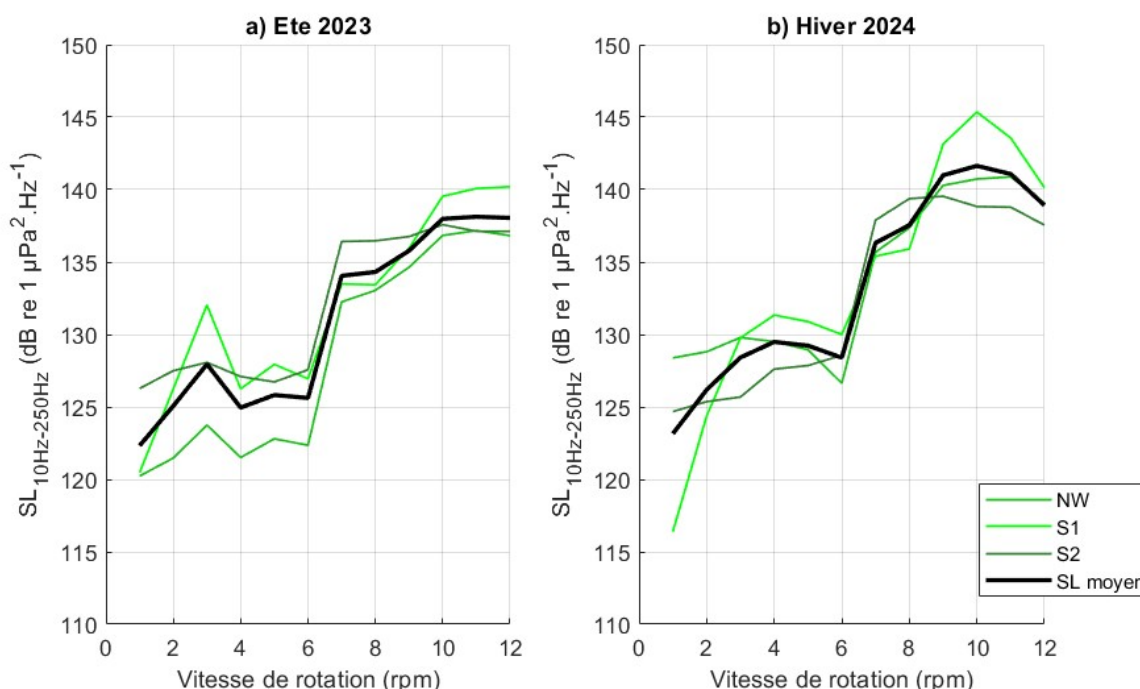


Figure 63. Estimation des niveaux sources générés par l'éolienne F01 à partir des régressions linéaires (Figure 30) et des données acquises sur les stations S1, S2 et NW, en fonction de la vitesse de rotation des pales de l'éolienne F01. La courbe noire représente la moyenne des 3 estimations du niveau source pour F01.

b) Empreinte estimée par rapport au bruit ambiant enregistré au niveau des stations S1 et S2 lorsque l'éolienne est à l'arrêt.

Le bruit reçu au niveau de stations S1 et S2 lorsque l'éolienne est active a été comparé au bruit ambiant, enregistré au niveau de ces mêmes stations, lorsque l'éolienne est à l'arrêt (vitesse de rotation égale 0)²⁵ :

Le bruit ambiant et le bruit généré par l'éolienne étant directement influencés par le vent, les données ont été divisées en deux catégories :

²⁵ Une autre approche a également été testée pour estimer cet excès de signal : le bruit reçu au niveau de stations S1 et S2 lorsque l'éolienne F01 est active a été comparé au bruit enregistré simultanément au niveau de la station SW, déployée dans le cadre du suivi MSU8 à l'extérieur du parc éolien (Annexe Erreur ! Source du renvoi introuvable.).



- Les données enregistrées lorsque les conditions de mer étaient comprises entre 1 et 3Bfs (vent : 1 à 19 km/h ; mer belle à peu agitée) ;
- Les données enregistrées lorsque les conditions de mer étaient comprises entre 3 et 6Bfs (vent : 20 à 49 km/h ; mer peu agitée à agitée).

Le spectre du bruit ambiant (et les conditions de vent et houle associées) pris en compte pour estimer les excès de signal sont systématiquement présentés.

Le fonctionnement des éoliennes étant corrélé à la vitesse du vent, certaines classes de rotation ne comporte aucune donnée (ex : classes de rotation faibles lorsque les conditions de vent sont inférieures à 3 Bfs).

Ces représentations confirment les observations réalisées à partir des spectres du bruit reçu (Figure 61), telle que la variation de la fréquence principale entre 10 et 30 Hz en fonction de la vitesse de rotation, ainsi que la composante à 50 Hz dont l'intensité augmente avec la vitesse de rotation.

Suivi en phase d'exploitation du parc éolien en mer de Saint-Nazaire
 Suivi du bruit sous-marin et des mammifères marins, été 2023-hiver 2024 (MSU8)
 Référence du document : SOMME_EDF-MSU8-2023-2024
 Version : 8

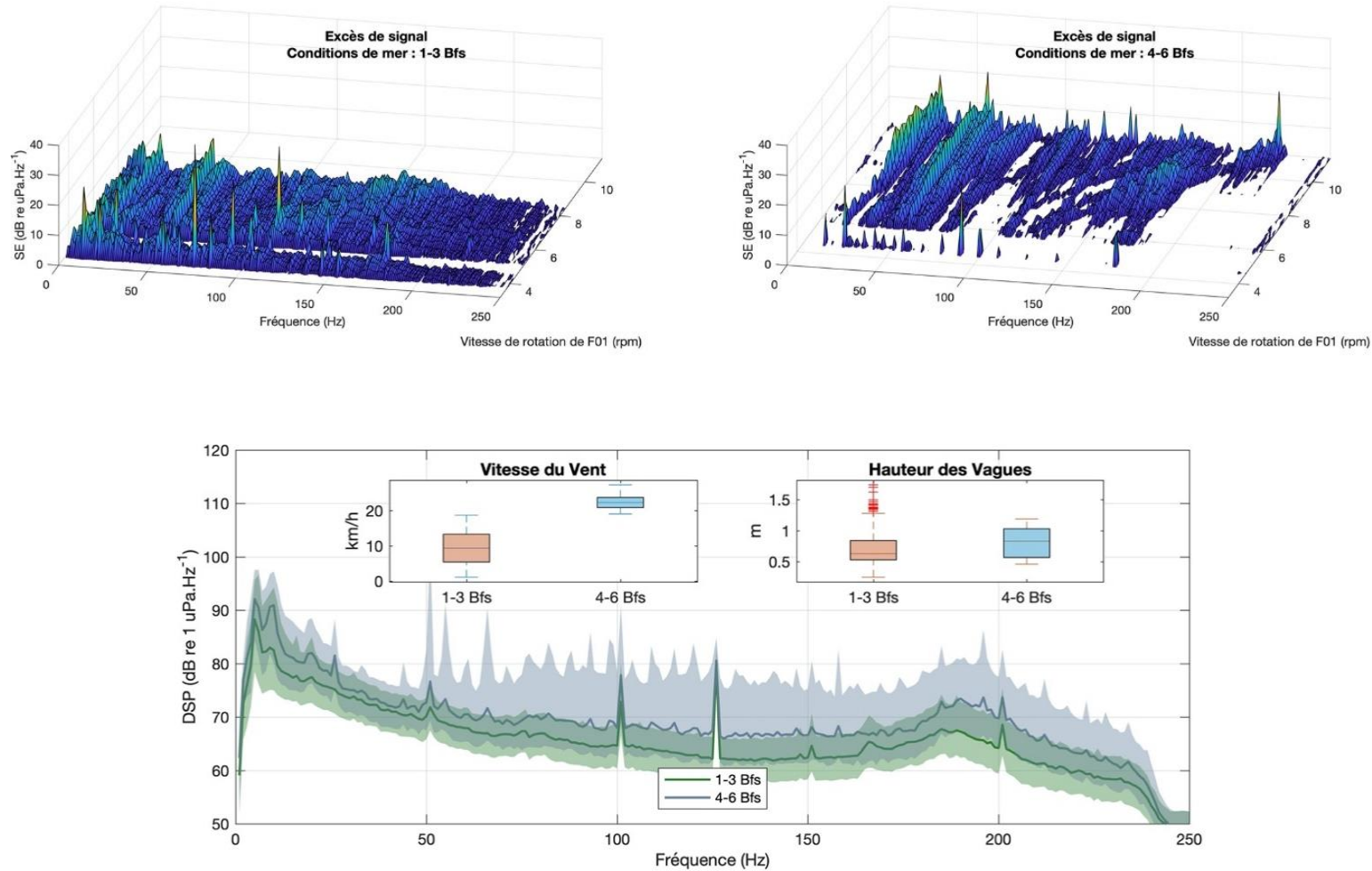


Figure 64. Excès de signal enregistré au-dessus du bruit ambiant (éolienne F01 à l'arrêt) au niveau de la station S1, située à 75m de l'éolienne F01 en fonction de la vitesse de rotation des pales en été 2023. L'excès de signal est estimé par rapport au bruit ambiant en prenant en compte deux catégories de conditions de mer : 1-3 Bfs (en vert), 4-6 Bfs (en gris). Les conditions de vent et de houle correspondantes sont présentées par des diagrammes à moustache.

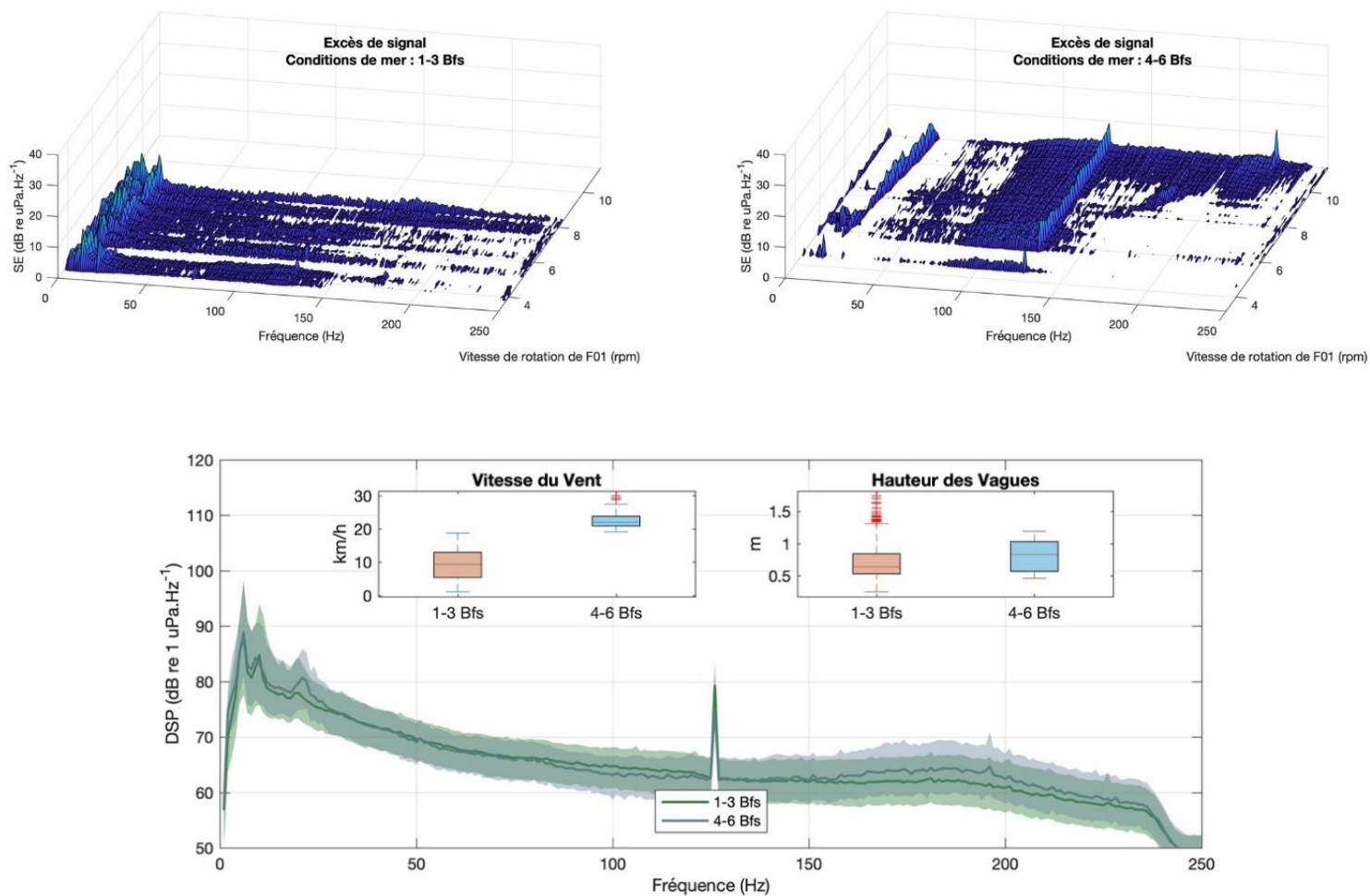


Figure 65. Excès de signal enregistré au-dessus du bruit ambiant (éolienne F01 à l'arrêt) au niveau de la station S2, située à 750m de l'éolienne F01 en fonction de la vitesse de rotation des pales en été 2023. L'excès de signal est estimé par rapport au bruit ambiant en prenant en compte deux catégories de conditions de mer : 1-3 Bfs (en vert), 4-6 Bfs (en gris). Les conditions de vent et de houle correspondantes sont présentées par des diagrammes à moustache.

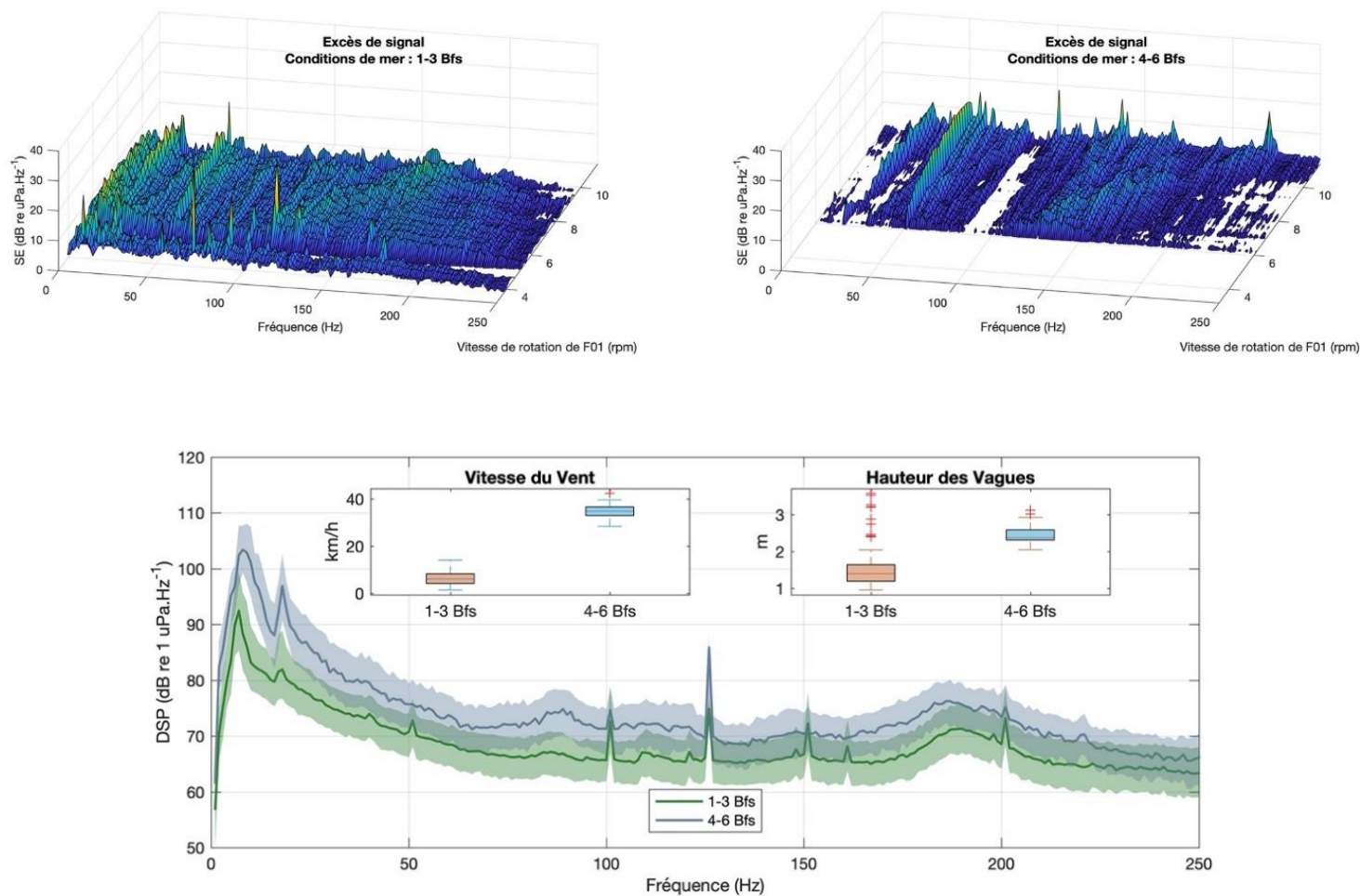


Figure 66. Excès de signal enregistré au-dessus du bruit ambiant (éolienne F01 à l'arrêt) au niveau de la station S1, située à 75m de l'éolienne F01 en fonction de la vitesse de rotation des pales en hiver 2024. L'excès de signal est estimé par rapport au bruit ambiant en prenant en compte deux catégories de conditions de mer : 1-3 Bfs (en vert), 4-6 Bfs (en gris). Les conditions de vent et de houle correspondantes sont présentées par des diagrammes à moustache.

Suivi en phase d'exploitation du parc éolien en mer de Saint-Nazaire
 Suivi du bruit sous-marin et des mammifères marins, été 2023-hiver 2024 (MSU8)
 Référence du document : SOMME_EDF-MSU8-2023-2024
 Version : 8

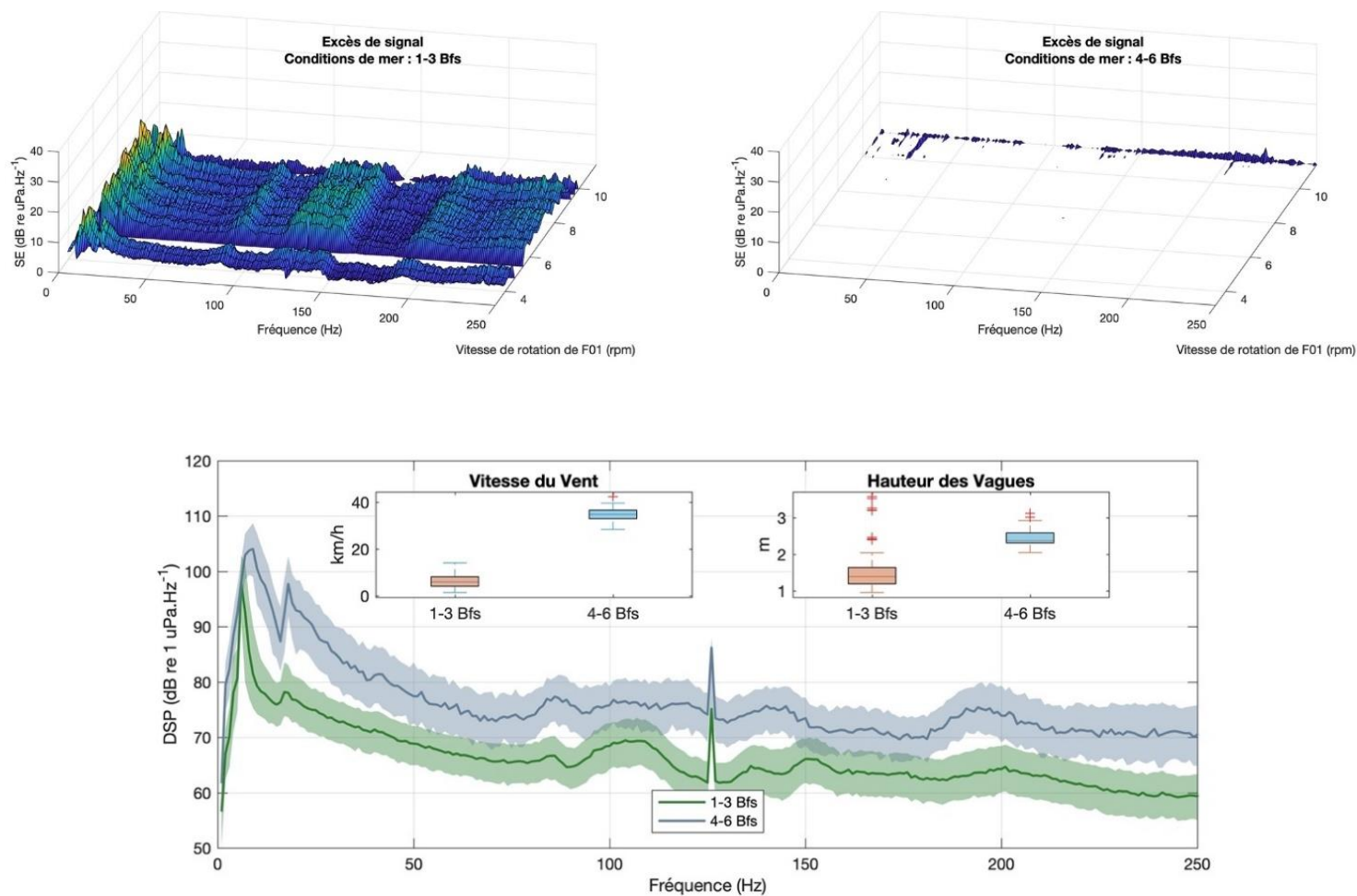


Figure 67. Excès de signal enregistré au-dessus du bruit ambiant (éolienne F01 à l'arrêt) au niveau de la station S2, située à 750m de l'éolienne F01 en fonction de la vitesse de rotation des pales en hiver 2024. L'excès de signal est estimé par rapport au bruit ambiant en prenant en compte deux catégories de conditions de mer : 1-3 Bfs (en vert), 4-6 Bfs (en gris). Les conditions de vent et de houle correspondantes sont présentées par des diagrammes à moustache.

c) Empreinte estimée par rapport au bruit ambiant enregistré au niveau de la station SW.

Afin d'estimer l'excès de bruit généré par le fonctionnement de l'éolienne F01, le bruit reçu au niveau de la station S1 lorsque l'éolienne est active, a été comparé au bruit enregistré simultanément au niveau de la station témoin SW (suivi MSU8). Cette approche montre les mêmes composantes fréquentielles (entre 10 et 30 Hz, ainsi qu'à 50 Hz et les harmoniques associées) que celles décrites précédemment (Figure 68).

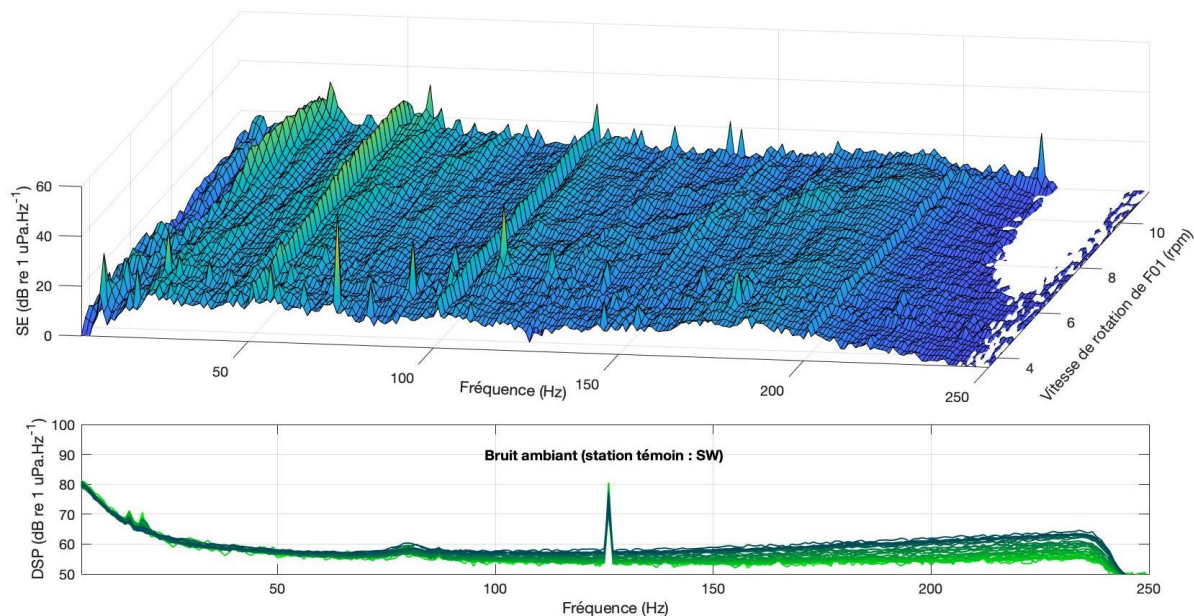


Figure 68. Excès de signal, enregistré au niveau de la station S1, au-dessus du bruit ambiant en fonction de la vitesse de rotation des pales de l'éolienne F01. Le bruit ambiant considéré pour calculer l'excès de signal, est le bruit enregistré au niveau de la station témoin SW sur la même période.



8.1.6 Interprétation des résultats

Le signal acoustique généré par les éoliennes en fonctionnement dans la colonne d'eau est complexe et varie en fonction de la vitesse de rotation des pales :

- Il comporte une composante principale qui varie de 10 à 30 Hz simultanément avec la vitesse de rotation et différentes harmoniques correspondant à des multiples de la fréquence principale. D'après les mesures réalisées à 75 m de l'éolienne F01, l'intensité de cette fréquence principale est maximale entre 8.8 et 10 rpm (93.65 dB re 1 μ Pa.Hz⁻¹).
Ces caractéristiques sont cohérentes avec les informations issues de la littérature scientifique. Des mesures réalisées par Pangerc *et al.* (2016) à 50m de deux éoliennes en fonctionnement (Siemens SWT-3.6-107, 3,6 MW, fondation monopieux) montrent notamment différentes composantes tonales comprises entre 20 et 330 Hz environ. Les caractéristiques sonores mesurées, tant en termes de fréquence que d'amplitude, varient également en fonction de la vitesse du vent. Le niveau de pression acoustique augmente avec la vitesse du vent jusqu'à environ 10 m/s, puis diminue (Pangerc *et al.*, 2016). Cette étude rapporte que le bruit sous-marin généré par les éoliennes en fonctionnement provient principalement de pièces mécaniques mobiles de la nacelle (Pangerc *et al.*, 2016). Le déséquilibre des rotors et le désalignement de l'arbre²⁶ sont les principales causes de ces vibrations (Al-Badour *et al.*, 2011 ; Kumar *et al.*, 2012 ; Artigao *et al.*, 2018). La fréquence principale correspond généralement à la fréquence du déséquilibre (1X) et les harmoniques, correspondant à des multiples de cette dernière (appelées 2X, 3X...etc.), informent sur le désalignement de l'arbre (Artigao *et al.*, 2018).
- Des pics d'énergie sont observés à des fréquences spécifiques pour certaines classes de rotation, et notamment à 3.8, 4.6, 5.6 et 11.4 rpm. Les classes de rotation égales à 3.8 et 11.4 rpm correspondent respectivement à la vitesse de démarrage et à la vitesse plateau (maximale) des éoliennes étudiées. Les vitesses de rotation égales à 4.6, 5.6 rpm semblent également correspondre à des régimes de fonctionnement particuliers. En effet, la distribution des valeurs de vitesse de rotation enregistrées lors de ce suivi montre une surreprésentation de ces classes (3.8, 4.6, 5.6 et 11.4 rpm).
- Une composante à 50 Hz dont l'intensité augmente avec la vitesse de rotation est également enregistrée à 75 m de l'éolienne. Correspondant à la fréquence du courant alternatif, il est probable que cette composante soit corrélée avec la quantité d'électricité produite par l'éolienne. Cette composante n'est pas retrouvée à 750 m.

²⁶ L'écart de la position relative de l'arbre par rapport à un axe de rotation colinéaire mesuré aux points de transmission de puissance lorsque l'équipement fonctionne dans des conditions normales.



- Un modèle de propagation simplifié a été estimé à partir des mesures des stations S1 et NW (suivi MSU8) situées à 75 et 565 m de l'éolienne F01. Avec un coefficient de perte de propagation estimé à $-16 \cdot \log(r)$, ce modèle prévoit des niveaux ($SPL_{10-250\text{Hz}}$) médians générés à la source par l'éolienne F01, compris entre 134 et 144 dB re $1 \mu\text{Pa}^2$ selon la vitesse de rotation des pales. Le bruit enregistré au niveau de la station S2, située à 750 m de F01, est fortement atténué. Seules la composante principale et certaines fréquences émises à des régimes de fonctionnement (rotation) particuliers de l'éolienne F01 sont encore visibles. Ces niveaux sources estimés sont cohérents avec ceux rapportés dans la littérature (Tougaard *et al.*, 2020). Cependant les niveaux de bruit reçu à 565m de l'éolienne F01, utilisés pour estimer le modèle de propagation, sont proches du bruit ambiant, ce qui entraîne potentiellement une sous-estimation des pertes de propagation et des niveaux sources.
En comparant l'ensemble des données disponibles à ce jour, Tougaard *et al.* (2020) rapportent que, dans des environnements où le bruit ambiant est élevé en raison de la navigation ou de la vitesse du vent, le bruit généré par des éoliennes en fonctionnement est masqué, à moins d'être très proche des éoliennes individuelles. Toutefois, la relation de perte de propagation obtenue dans ce suivi, appliquée à des niveaux source moyens variant entre 120 et 145 dB re $1 \mu\text{Pa}^2$ selon la vitesse de rotation des pales, permet d'estimer une émergence acoustique moyenne d'une éolien est estimée **entre 2 et 4,5 km** en fonction de la vitesse de rotation (les rotations moins rapides propageant plus loin que les plus rapides, cf. section 4.3.2).



8.1.7 Conclusion

- L'éolienne F01 génère un bruit dans la bande de fréquence **10-250 Hz** avec des caractéristiques similaires aux vibrations mécaniques générées par les machines tournantes. Les signaux émis sont composés d'une fréquence principale entre 10 et 30 Hz et de différentes harmoniques dont les fréquences correspondent à des multiples de la principale. L'intensité de cette fréquence principale est maximale pour des vitesses de rotation comprises entre 8 et 10 rpm. Une composante à 50 Hz est également enregistrée à 75 m et augmente en intensité simultanément avec la rotation de l'éolienne. Différents régimes de vitesse de rotation semblent ressortir, pour lesquelles des pics d'énergie sont observés à des fréquences spécifiques.
- Les estimations du bruit généré à la source, dans la bande de fréquence 10-250Hz, par l'éolienne F01 en fonctionnement varient entre **120 et 145 dB re 1 μPa^2 @ 1 m** selon la vitesse de rotation des pales. Le bruit généré est rapidement atténué avec une empreinte acoustique théorique estimée **entre 2 et 4,5 km** (en fonction de la vitesse de rotation). Le bruit généré est susceptible d'être masqué par le bruit produit par la houle et le trafic maritime. L'estimation de l'émergence acoustique dépend des conditions environnementales et donc bruit ambiant et varie de 600 m pour un environnement bruyant (quelle que soit la vitesse de rotation) à 6 voire 12 km pour des conditions calme en fonction de la vitesse de rotation (cf. section 4.3.2).
- Les observations réalisées lors de cette étude sont cohérentes et complètent la description du bruit des éoliennes en fonctionnement disponible dans la littérature actuelle.

8.2 Emergence acoustiques du parc éolien

8.2.1 Description générale de la méthodologie

L'émergence acoustique du bruit d'une éolienne est définie par le niveau reçu (noté RL ou SPL) au-dessus d'un niveau de référence (NL) et estimé dans une bande de fréquence d'intérêt. L'émergence acoustique se calcule alors par la différence de ces deux niveau, notée SE (*Signal Excess*) :

$$SE=RL-NL$$

Afin de caractériser l'émergence acoustique du parc en fonctionnement, il est alors possible de simuler différents scénarios en considérant un certain nombre d'éoliennes en fonctionnement ainsi que leur vitesse de rotation. Toutefois dans le régime de rotation des éoliennes et dépendant de la vitesse de vent (Figure 27), variable environnemental influençant le bruit ambiant (cf. section 4.4.1). Ainsi le niveau de bruit ambiant est déterminé en moyennant les niveaux reçus sur une station de référence en fonction de la vitesse de vent correspondant aux vitesses de rotation des éoliennes.

En cas d'émergence positive il est alors possible d'estimer si le niveau reçu (RL) peut également être perçu par des espèces cibles. **Le niveau perçu est alors le niveau sonore reçu pondéré par les caractéristiques de la fonction de transfert de l'appareil auditif** de l'espèce



considérée. Ce niveau perçu est ensuite comparé à un seuil permettant de définir les impacts potentiels sur les espèces cibles.

Pour un type d'impact particulier et une espèce animale visée, la démarche pour prédire la zone potentielle d'impact acoustique consiste à comparer **le niveau sonore perçu par l'espèce considérée en fonction de sa position par rapport à la source et un seuil d'impact**. Les positions pour lesquelles les niveaux sonores perçus sont supérieurs au seuil d'impact constituent la zone d'impact potentiel. La prédiction des zones d'impact s'effectue via une démarche associant des données *in situ* et de la modélisation prédictive.

Pour les mammifères marins, les audiogrammes et les seuils utilisés sont classiquement extraits de deux références choisies pour leur qualité (travaux de synthèse d'un comité d'experts internationaux, évaluations par les paires et par la communauté scientifique et environnementaliste) et leur acceptation par la communauté scientifique. La première référence, Southall et al. (2007) est largement utilisée dans les études d'impact antérieures à 2017. La seconde, NMFS (2018, actualisé en 2024) est un travail commandité par l'administration américaine (NOAA) qui actualise les fonctions de transferts auditives et les seuils proposés dans Southall et al. (2007), et qui a donné lieu à la publication Southall et al. (2019). Ces seuils de NMFS 2024 sont plus bas que ceux de Southall et al. (2007) mais les fonctions de transfert sont plus sélectives (Figure 69).

Dans cette partie, **les seuils et les fonctions de transfert utilisés proviennent de NMFS (2024) et Southall et al. (2019) à l'exception du seuil pour un changement comportemental pour lequel celui de Southall et al. (2007) est conservé car il est non défini dans NMFS. De plus pour le seuil d'audibilité, l'approche développée dans Erbe et al. (2016) est appliquée**. Les seuils retenus sont présentés dans le Tableau 15 pour des sons continus.

Six groupes de mammifères marins ont ainsi été définis en fonction de leurs capacités auditives (Figure 69) : les Cétacés basses fréquences, les Cétacés hautes fréquences, les Cétacés très hautes fréquences, les Phocidés, les Siréniens, et les autres Carnivores (Southall et al., 2019). Leurs capacités auditives se définissent à la fois par leur audiogramme et par leurs seuils de sensibilité, comme décrit en Figure 69.

Tableau 15 : Seuils utilisés pour identifier les risques d'impact des travaux produisant des sons impulsionnels (ex : battage de pieu). Ils sont définis par NMFS (2024) à l'exception du seuil pour un changement comportemental issu de Southall et al. (2007) et du seuil pour l'audibilité (Erbe et al. 2016) qui correspond au bruit ambiant défini l'état de référence acoustique du projet.

GROUPES FONCTIONNELS	SEUIL PTS (SPL dB re.1μPa)	SEUIL TTS (SPL dB re.1μPa)	SEUIL POUR UN CHANGEMENT COMORTEMENTAL ²⁷ (SPL dB re.1μPa)	SEUIL POUR AUDIBILITE (SPL dB re.1μPa ²)
Cétacés BF	222	216	120	NL+CR ²⁸
Cétacés HF	230	224		
Cétacés THF	202	196		
Phocidés	223	217		

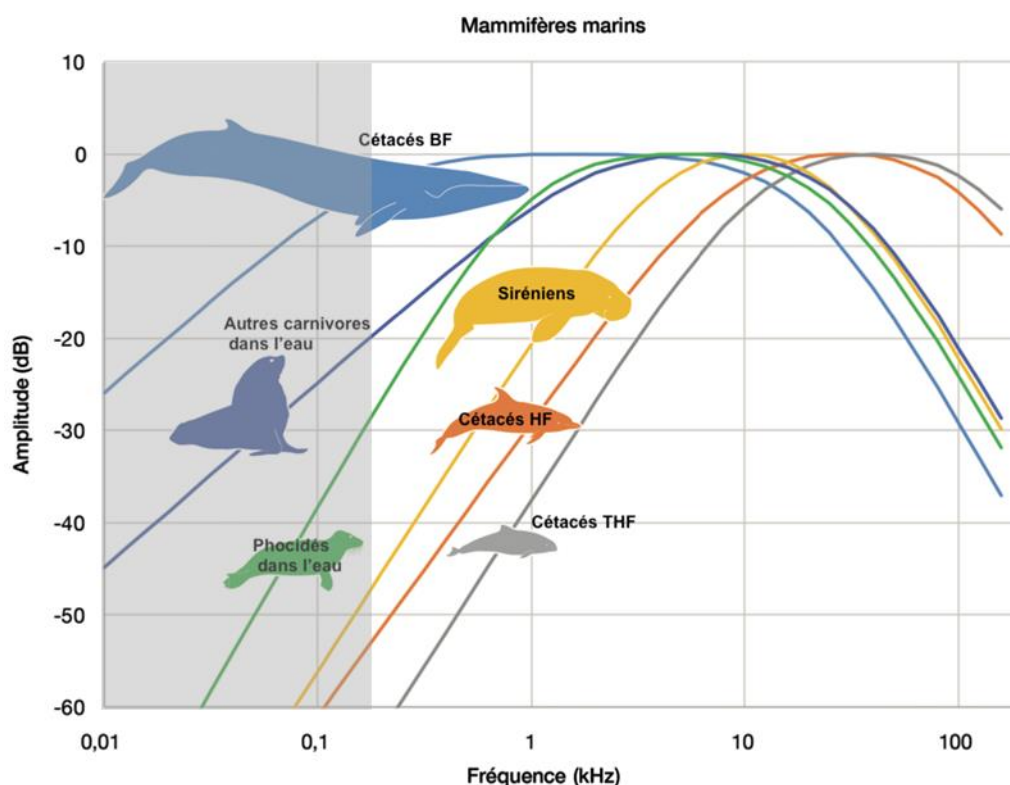


Figure 69 : Forme des fonctions de pondération pour les 6 groupes fonctionnels de mammifères marins présentes selon NMFS (2018) et Southall et al. (2019), avec la bande de fréquence de la signature acoustique du parc éolien en gris clair. Adapté de Bonnel et al., 2022.

En fonction des caractéristiques du son émis (puissance acoustique, bande de fréquence), des caractéristiques du système de réception et la position de l'animal par rapport à la source, les impacts potentiels des sons sur les animaux marins varient de la « simple gêne » à des traumatismes pouvant provoquer une mort immédiate ou différée. Le niveau sonore reçu étant fonction de la distance à la source, certains impacts ne sont observés qu'à proximité de la source. D'après Kikuchi (2010), ces zones, pour lesquelles les différents impacts sont susceptibles d'être observés (Figure 70), sont :

²⁷ NMFS 2024 et Southall et al. 2019 ne précisant rien pour le changement de comportement, on conserve le seuil défini par Southall et al. (2007). Les réactions comportementales y sont classées suivant un indice variant de 1 à 9 (1 : pas de réaction, 9 : panique, échouage), le niveau de 120 dB est susceptible de provoquer des réactions d'indices variant de 2 à 4 (alerte individuelle, changement mineur et modéré de la vitesse, de la direction de nage, du rythme de respiration et du profil de plongée, mais pas de réaction d'évitement de la source sonore).

²⁸ Voir définition dans la suite de la section, selon Erbe et al. 2016 (cf. Figure 71).



- La **zone d'émergence acoustique**, définie comme l'aire à l'intérieur de laquelle le niveau du signal d'intérêt est supérieur au niveau du bruit ambiant. C'est la zone d'influence la plus étendue, pouvant couvrir une aire assez importante. De plus, cette zone peut également présenter du **masquage acoustique**, c'est-à-dire avec du bruit suffisamment fort pour interférer avec la détection d'autres signaux pour l'espèce cibles (ex. vocalises de communication). Toutefois, bien que le signal d'intérêt ait un niveau supérieur au bruit ambiant, son intensité peut ne pas être assez élevée pour qu'il soit distinguable par l'espèce cible (Figure 71).
- La **zone d'audibilité**, définie comme l'aire à l'intérieur de laquelle une espèce est capable de distinguer le signal d'intérêt. Un son est considéré comme audible si l'intensité est supérieure au seuil de l'audiogramme de l'espèce cible, et que son intensité est supérieure d'une valeur seuil (le rapport critique, CR) par rapport au bruit ambiant (Fletcher 1940, Erbe et al. 2016) tel que : $RL > NL + CR$ (Figure 71). En effet, si l'intensité du signal d'intérêt est trop proche du niveau de bruit ambiant alors le système auditif de l'espèce cible n'est pas capable de le distinguer clairement, sortant ainsi de l'audible (Fletcher, 1940).
- La **zone de réactivité**, c'est-à-dire la zone dans laquelle on observe un changement de comportement chez l'animal après réception de l'onde sonore. Ce changement de comportement peut survenir même à des niveaux faibles entraînant des réactions d'évitement et peuvent couvrir une large aire océanique et par conséquent affecter des populations entières (Norro et al. 2010 ; Nedwell et al. 2012).
- La **zone de traumatisme**, définie comme la zone dans laquelle le son est assez fort pour provoquer des lésions du système auditif. Ces lésions peuvent provoquer une augmentation temporaire (**Temporal Threshold Shift, TTS**) ou permanente (**Permanent Threshold Shift, PTS**) des seuils d'audition, des blessures physiologiques pouvant conduire à la mort immédiate ou différée. Cette zone est généralement située dans le voisinage immédiat de la source.

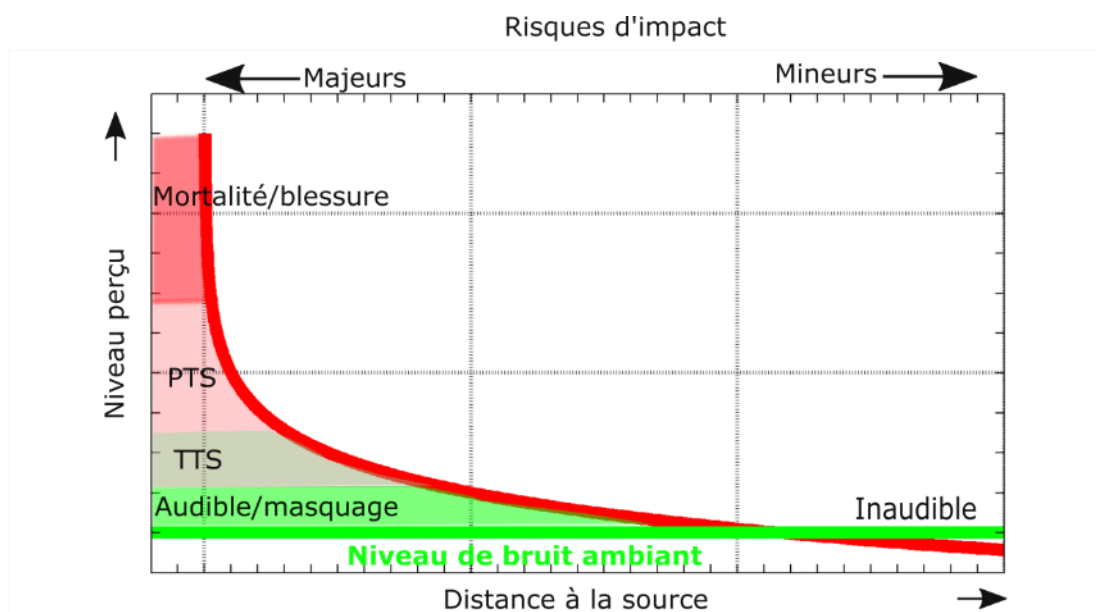


Figure 70 : Zones de risque d'impact acoustique

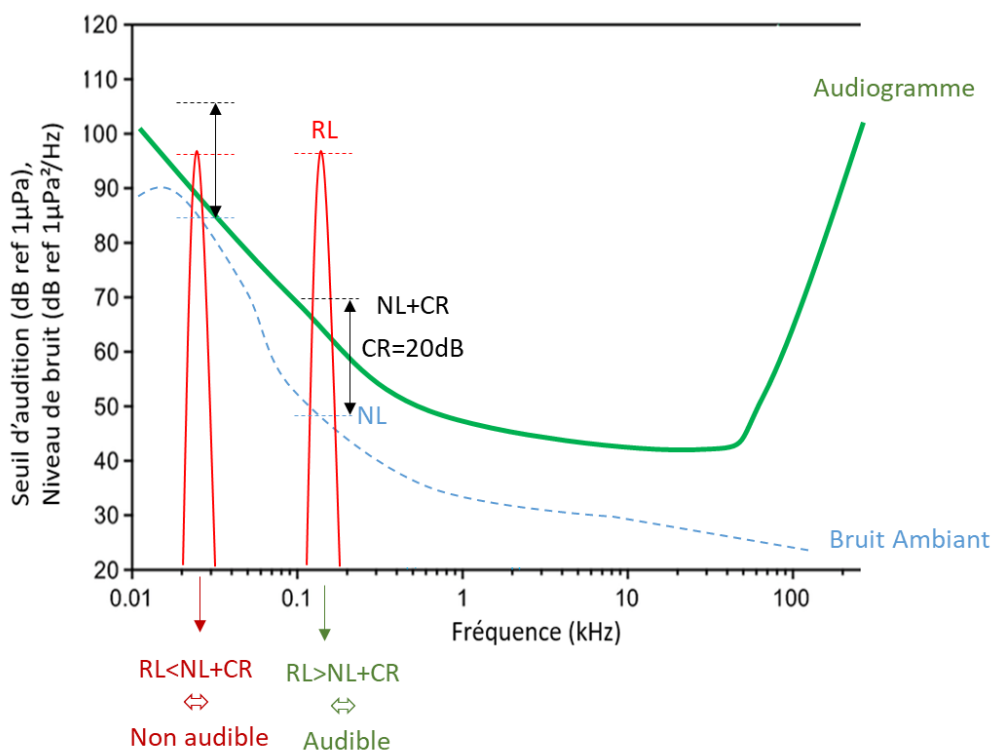


Figure 71 : Détermination de l'audibilité d'un signal représenté par une tonale en rouge vis-à-vis de l'audiogramme d'une espèce cible en vert et de son rapport critique (CR)²⁹ avec un certain niveau de bruit ambiant représenté par sa DSP en bleue. Adapté de Erbe et al., 2016.

²⁹ Le rapport critique (*critical ratio*, CR) est défini comme le rapport entre la puissance du signal et la puissance du bruit dans une bande critique de fréquences, à partir duquel le signal devient juste audible en présence d'un bruit de masquage (Fletcher 1940).



8.2.2 Cartographie des niveaux reçus et émergence acoustique du parc

Les cartes ci-dessous représentent le niveaux reçus dans la bande de fréquence 10-250 Hz, ($RL_{10-250Hz}$), ainsi que la différence entre le niveau reçu et le niveau de bruit pour différents scénarios d'activité du parc, noté SE^{30} , soient : avec 25 %, 50 % et 100 % des éoliennes en fonctionnement, et en considérant que ces éoliennes tournent à plus ou moins de 7 rpm. Pour chaque régime le niveau de bruit ambiant est déterminé en moyennant les niveaux $SPL_{10-250Hz}$ sur la station MB (utilisée comme station de référence). Ainsi, deux niveaux de bruits ambiants sont calculés en fonction de la vitesse de vent : inférieur ou supérieur à $5 m.s^{-1}$. Cette vitesse de vent correspond au seuil de 7 rpm d'une éolienne, vitesse de rotation générant des niveaux de bruit éolien différenciés (cf. Figure 27).

Ainsi pour la cartographie avec le scénario des éoliennes tournant à une vitesse inférieure à 7 rpm, le niveau de bruit ambiant est estimé pour des vitesses de vents inférieures à $5m.s^{-1}$ à :

$$NL_{10-250Hz} = 91 \text{ dB re } 1 \mu Pa^2.$$

Et pour le scénario des éoliennes tournant à une vitesse supérieure à 7 rpm, le niveau de bruit ambiant est estimé pour des vitesses de vents supérieurs à $5m.s^{-1}$ à :

$$NL_{10-250Hz} = 97 \text{ dB re } 1 \mu Pa^2.$$

La plus grande émergence acoustique avoisine un rayon de 100 km, lorsque toutes les éoliennes du parc sont en fonctionnement, avec le même régime (<7 rpm) et avec des conditions environnementales assez calme (vitesse de vent inférieur à $5 m.s^{-1}$, cf. Tableau 16). Tandis qu'à 25 % du parc en fonctionnement l'émergence ne semble pas dépasser les 3 km lorsque le vent dépasse les $5 m.s^{-1}$ et que les éoliennes tournent à plus de 7 rpm (Tableau 16).

La différence d'émergence acoustique entre les deux régimes de rotation des éoliennes s'explique par la différence de bruit ambiant et la différence de perte de propagation décrite dans la section 4.3.2. Ainsi les éoliennes tournant moins vite propagent plus loin dans un environnement moins bruyant ce qui engendre une émergence acoustique plus importante que lorsque les éoliennes tournent plus vite.

Ces valeurs d'émergence acoustiques sont à mettre en parallèle avec les seuils auditifs des espèces cibles, comme discuté dans la section suivante.

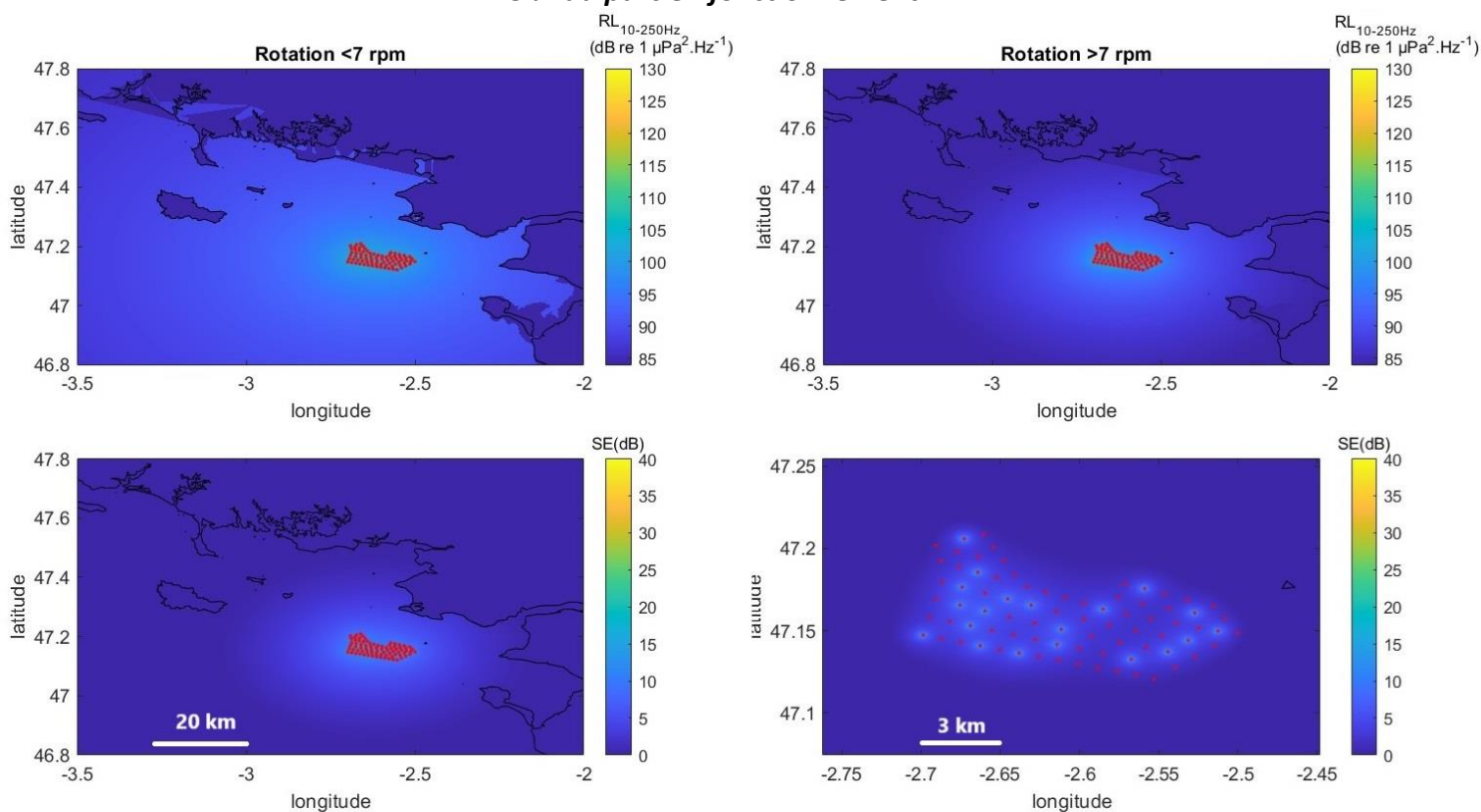
³⁰ Cette différence est notée SE pour « *Signal Excess* », cette métrique décrit l'émergence acoustique d'une source sonore dans le bruit ambiant.



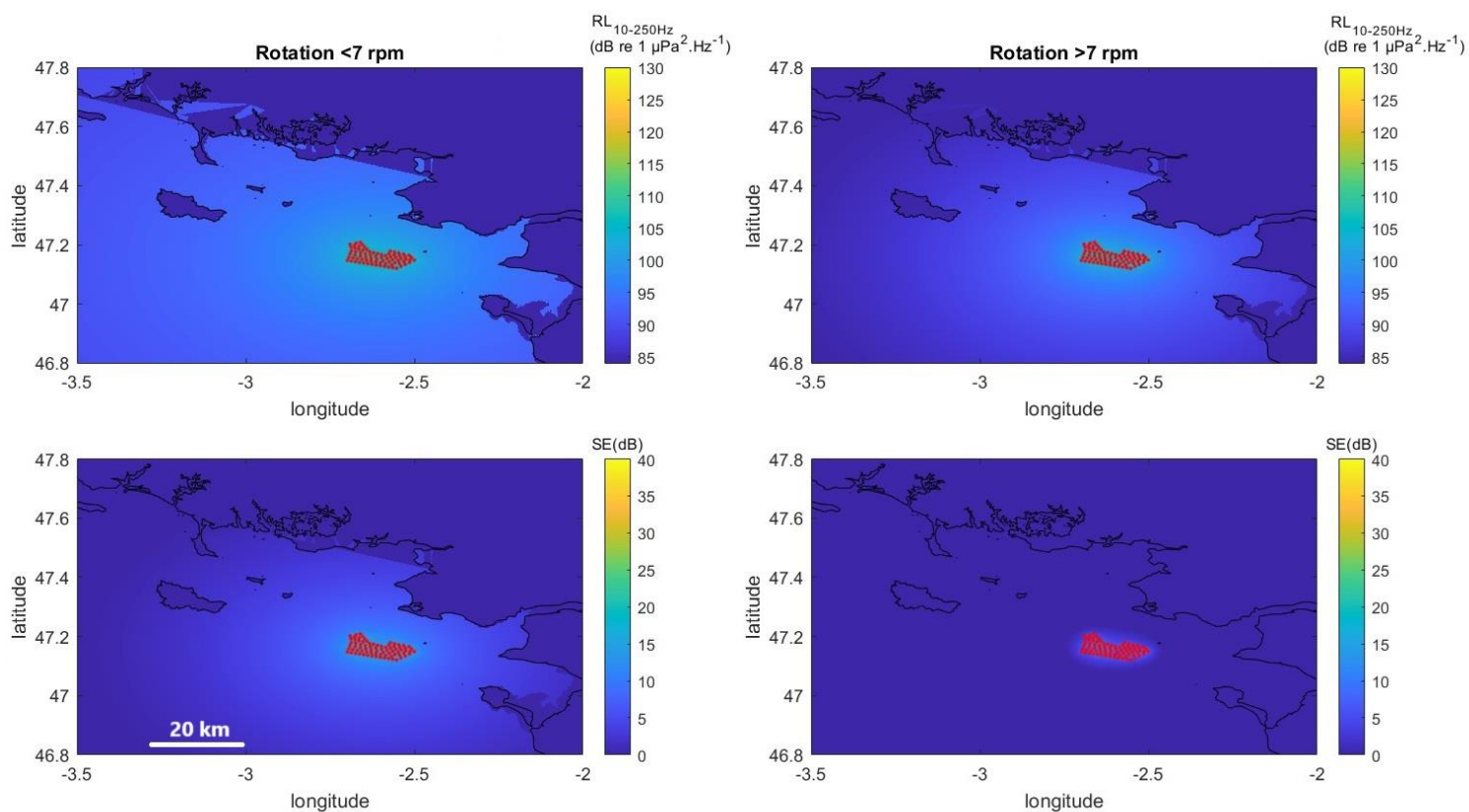
Tableau 16 : Emergence acoustique du parc éolien en fonctionnement.

Emergence acoustique (SE>0) du parc en fonctionnement	Rotation éoliennes < 7rpm Vitesse vent < 5 m.s ⁻¹ NL _{10-250Hz} = 91 dB re 1 μPa ²	Rotation éoliennes > 7rpm Vitesse vent > 5 m.s ⁻¹ NL _{10-250Hz} = 97 dB re 1 μPa ²
1 éolienne	4 km	0.6 km
25% des éoliennes	30 km	2 km
50% des éoliennes	60 km	4 km
100% des éoliennes	120 km	9 km

25 % du parc en fonctionnement :

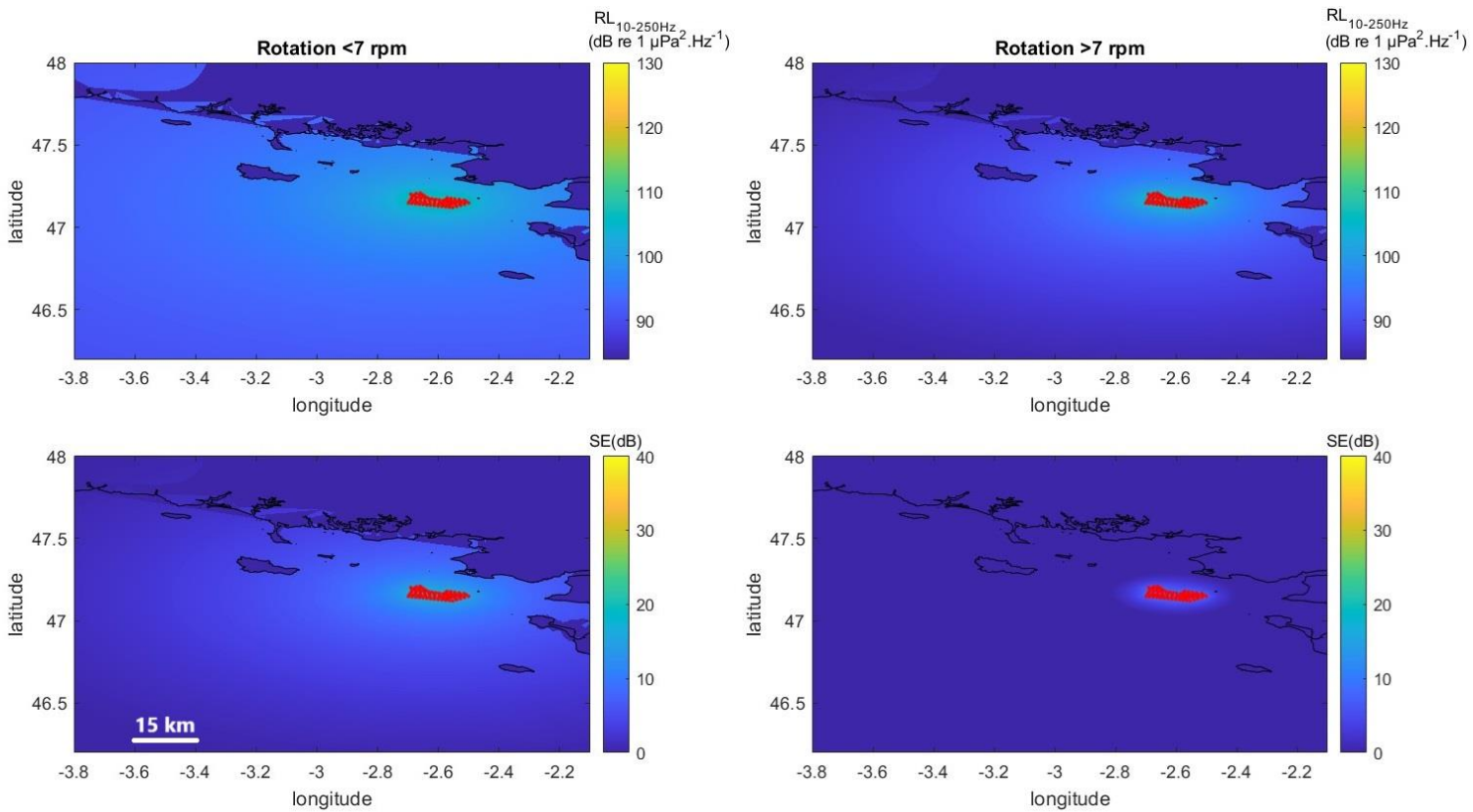


50 % du parc en fonctionnement :

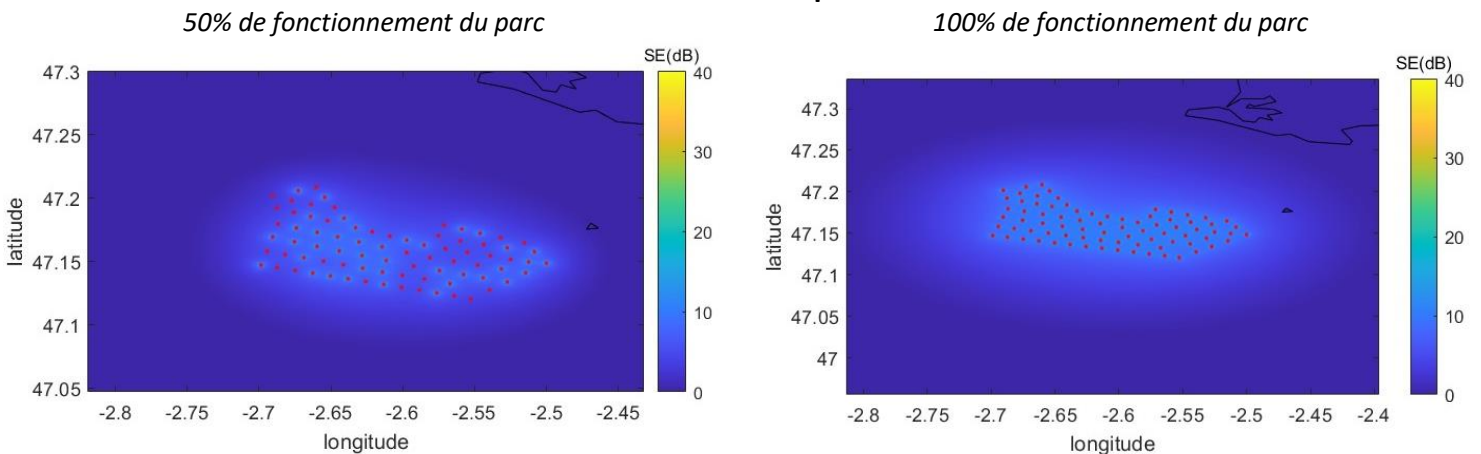




100 % du parc en fonctionnement :



Zoom sur les émergences acoustiques (SE) à l'échelle du parc pour 50% et 100% de fonctionnement à vitesse > 7 rpm





8.2.3 Zones d'impacts potentiels par groupe de mammifères marins

Ci-dessous sont représentés des cartes de zones d'impacts potentiels pour les quatre groupes d'espèces susceptibles d'être présents dans la zone d'étude. Pour ces représentations, 100% des éoliennes sont considérées en fonctionnement (pour une approche plus conservative), avec les deux régimes de vitesse de rotation des pâles des éoliennes.

On n'observe aucune émergence acoustique³¹ du parc en fonctionnement pour les cétacés HF (delphinidés) et THF (marsouins), quelles que soient les conditions environnementales et la vitesse de rotation des éoliennes dans le parc.

Pour les **phocidés**, on observe une émergence acoustique qui se limite à l'enceinte du parc lorsque les éoliennes tournent à moins de 7 rpm (avec un bruit ambiant plus faible) tandis que l'émergence ne dépasse pas les 100 m autour des éoliennes lorsqu'elles tournent à plus de 7 rpm (Tableau 17). Dans ces zones les bruits des éoliennes peuvent venir masquer certains signaux produits dans les mêmes gammes de fréquence pour les phoques, mais les niveaux sonores des éoliennes semblent rester relativement faibles pour que les phoques ne puissent pas les distinguer (c'est-à-dire inaudible), sauf à une dizaine de mètre d'une éolienne lorsque celle-ci tourne à plus de 7 rpm, soit avec un niveau source plus élevé (Tableau 17).

Finalement, **seuls les cétacés BF (mysticètes) sont susceptibles d'entendre les bruits des éoliennes en fonctionnement, mais seulement au sein du parc et pour des vitesses de rotations inférieures à 7 rpm** (soit dans des conditions environnementales calmes, cf. Tableau 17). Dans ces conditions, l'émergence acoustique³² du parc dans la gamme de fréquence 10-250 Hz par ces espèces peut atteindre 75 km, contre moins de 15 km lorsque les éoliennes tournent plus vite avec plus de vent, suggérant que les vocalises de baleines produites dans les mêmes gammes de fréquence pourraient être masquées dans ces zones. **Aucun groupe d'espèce ne présente des risques de pertes d'audition temporaire ou permanente (TTS et PTS).**

³¹ Les niveaux d'émergence acoustique du parc se situent en dessous des seuils d'audibilité des mammifères marins HF et THF de la zone.

³² L'émergence acoustique pour les mammifères marins est définie ici comme l'aire à l'intérieur de laquelle le niveau du signal d'intérêt est supérieur au niveau du bruit ambiant, pouvant présenter du masquage acoustique même si l'intensité peut ne pas être assez élevée pour qu'il soit distinguable par l'espèce cible (Figure 71). C'est la zone d'influence la plus étendue.

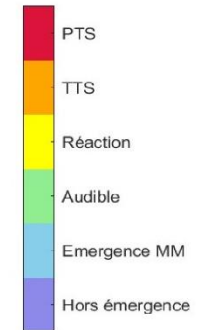
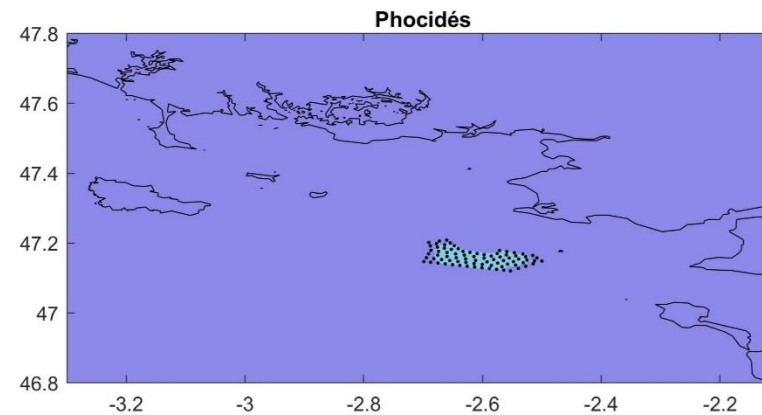
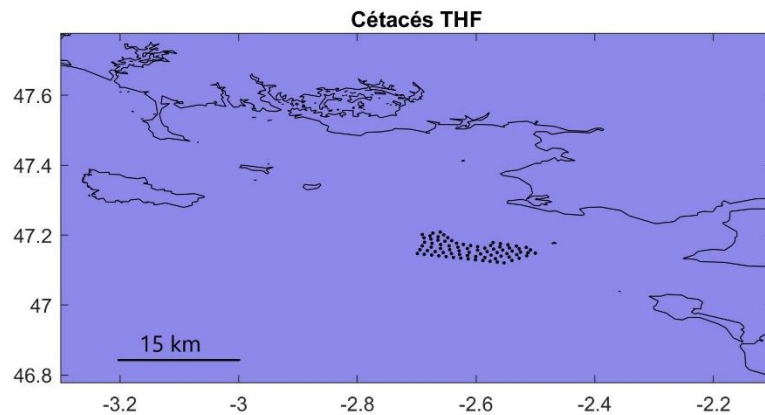
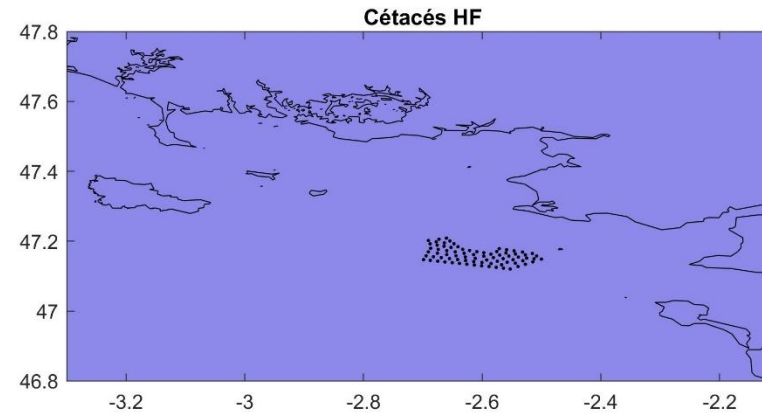
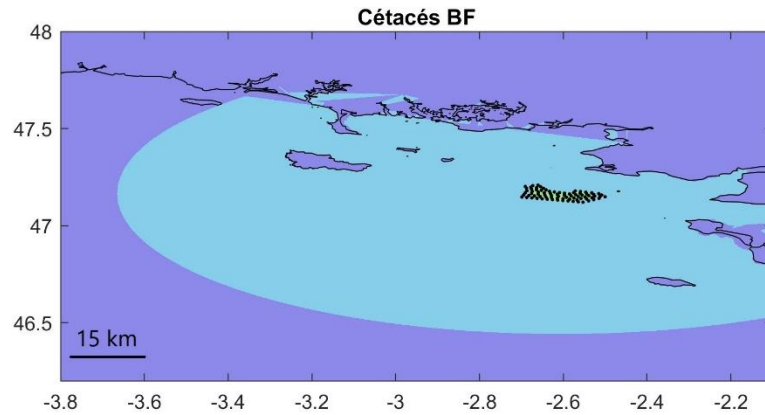


Tableau 17. Bilan des émergences acoustiques (selon définition section 8.2.1) pour 100% des éoliennes en rotation.

	VITESSE DE ROTATION <7 RPM					VITESSE DE ROTATION >7 RPM				
	Emergence (Masquage)	Audibilité	Réaction	TTS	PTS	Emergence (Masquage)	Audibilité	Réaction	TTS	PTS
CÉTACÉS BF	75 km du parc	<ul style="list-style-type: none"> Tout le parc 500 m d'une éolienne 	10 m d'une éolienne	-	-	15 km du parc	100 m d'une éolienne	20 m d'une éolienne	-	-
CÉTACÉS HF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CÉTACÉS THF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PHOCIDÉS	<ul style="list-style-type: none"> Tout le parc 500 m d'une éolienne 	10 m d'une éolienne	-	-	-	100 m d'une éolienne	-	-	-	-

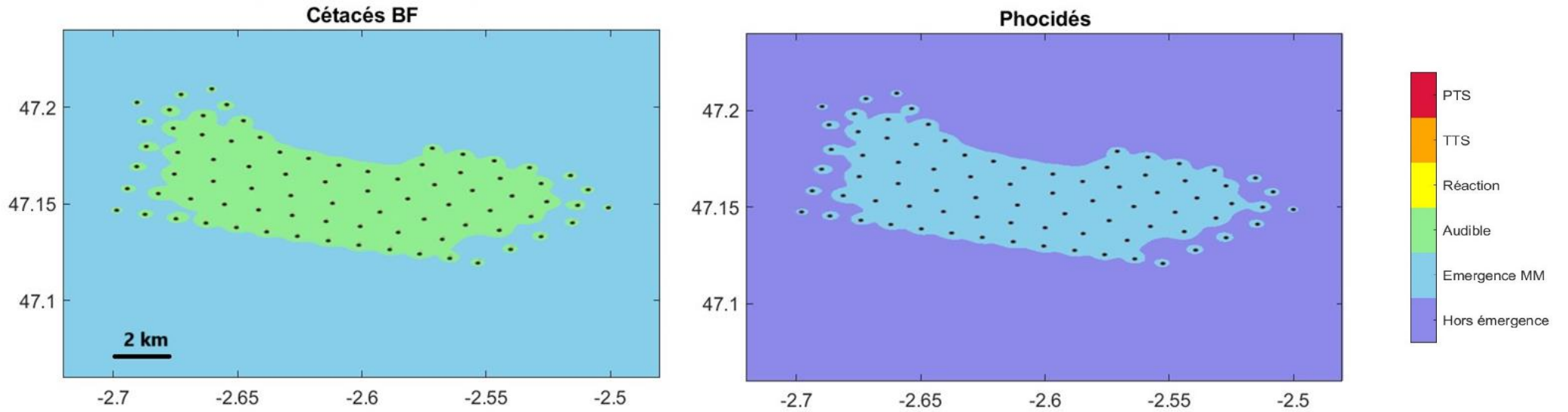


Zones d'impacts potentiels du parc avec 100% des éoliennes en rotation à moins de 7rpm:



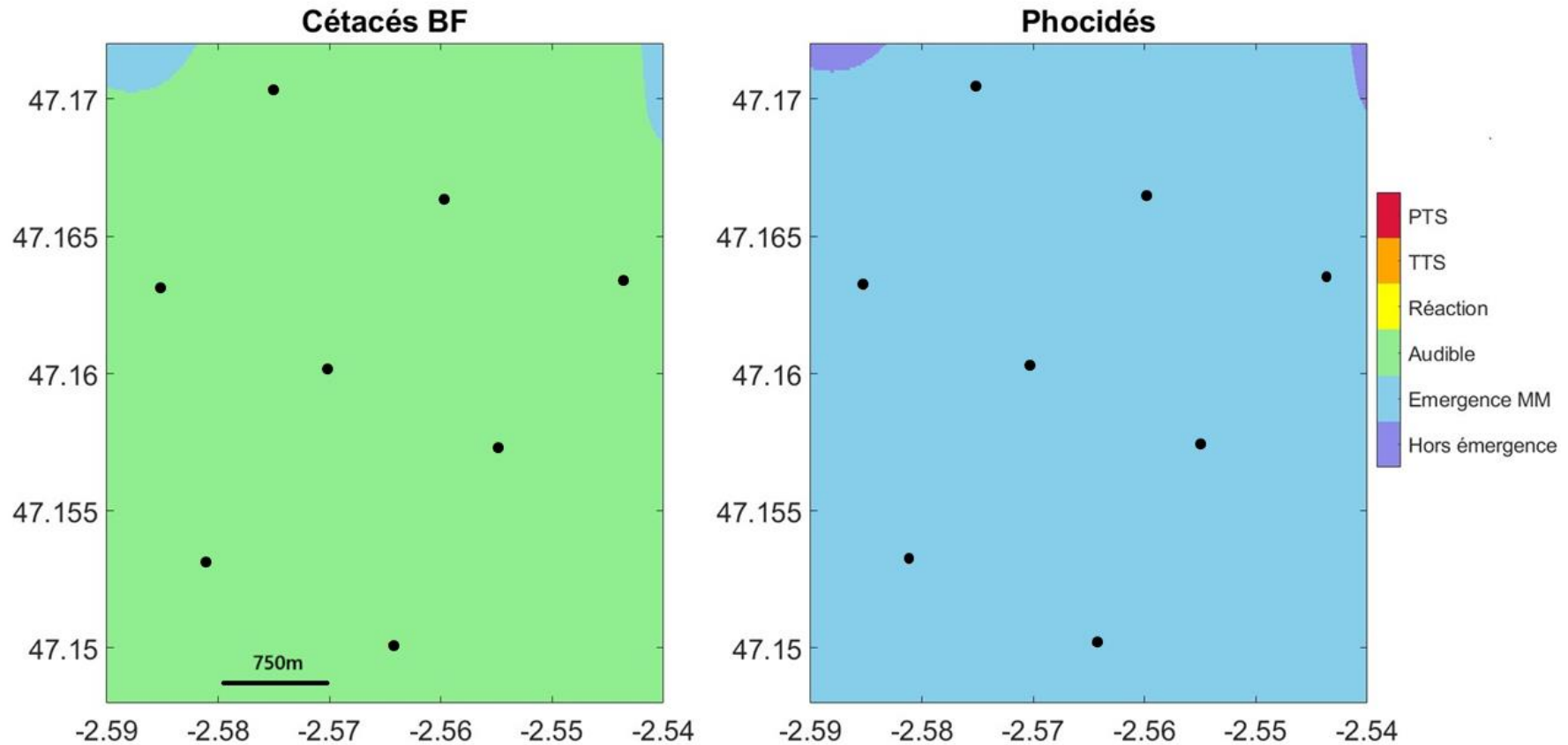


Zoom à l'échelle du parc (<7rpm):



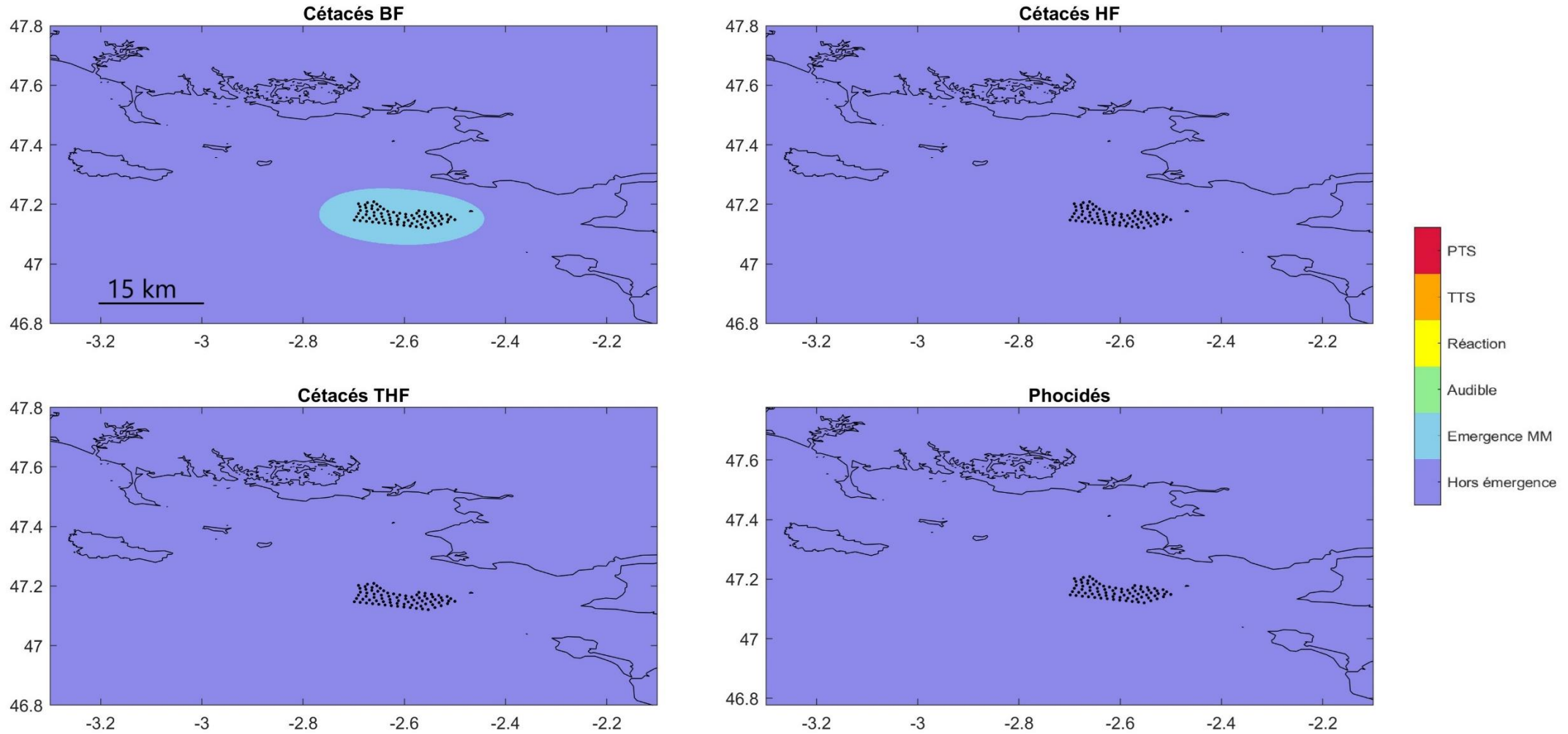


Zoom dans le parc (<7rpm):



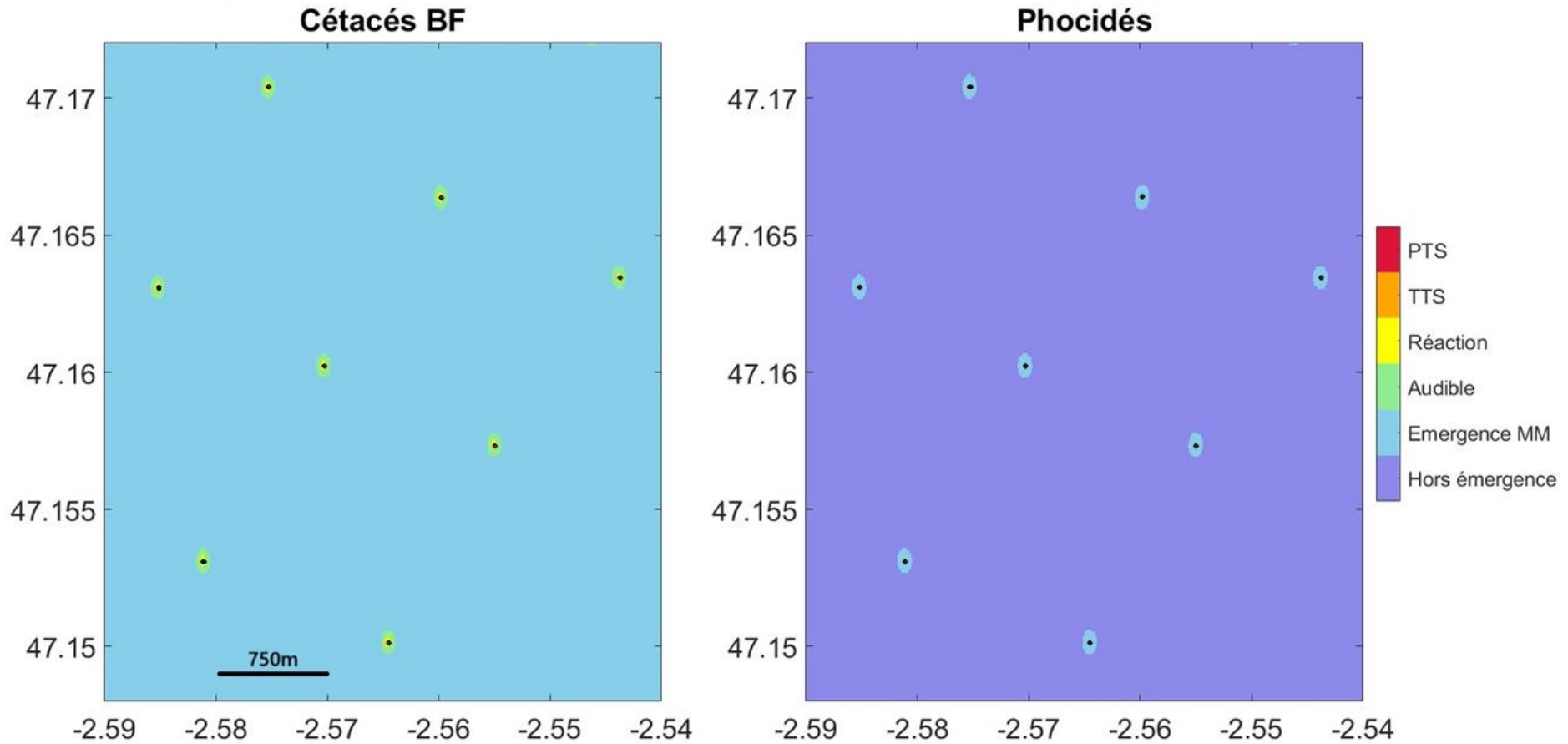


Zones d'impacts potentiels du parc avec 100% des éoliennes en rotation à plus de 7rpm:





Zoom dans le parc :



8.3 Mammifères marins

8.3.1 Détermination des évènements de présence acoustique

Les spectrogrammes de 10 secondes contenant des vocalises de delphinidés produisent des séquences de présence semblant se produire par épisodes (Figure 72). L'absence de sons peut être due à une véritable absence des individus ou au fait que les delphinidés ne vocalisent pas. Nous avons cherché à définir objectivement un seuil d'intervalle de temps entre les détections permettant d'établir un « événement de présence » (Richard *et al.*, 2017). Pour cela, nous avons réalisé une analyse par séquence sur la distribution des intervalles inter-détection (Slater & Lester 1982 ; Sibly *et al.*, 1990). Nous avons estimé la probabilité relative des intervalles inter-détection estimée en minutes, pour les 4 stations d'intérêt (Figure 73). En appliquant une fonction de lissage sur ces probabilités en fonction des intervalles inter-détections, on observe sur la Figure 73 que la probabilité relative par durée diminue rapidement avec l'augmentation des durées inter-événements, jusqu'à atteindre un plateau, c'est-à-dire qu'au-delà d'un temps d'inter-détections toutes les valeurs ont la même probabilité d'avoir lieu mais sont peu fréquentes (faible probabilité relative). Avant ce plateau les durées inter-événement sont plus courtes et plus communes (forte probabilité relative). On obtient alors une durée seuil d'environ 15 minutes entre deux détections acoustique pour déterminer un nouvel « événement de présence » (Figure 73).

Cette durée seuil de 15 minutes est déterminée à partir du jeu de données continu. Le cycle d'acquisition de 3 min toutes les 10 minutes correspond à peu près à ce seuil. En effet si on regarde les durées inter-détection avec ce cycle d'acquisition, on observe des modes sur la distribution des intervalles inter-détection qui correspondent aux cycles d'enregistrement de 30 % (Figure 74). On observe qu'au-delà de 13 minutes les probabilités relatives diminuent fortement. En choisissant ce seuil cela revient à déterminer que des sifflements observés sur 2 fichiers audio de 3 min consécutifs appartiennent au même événement.

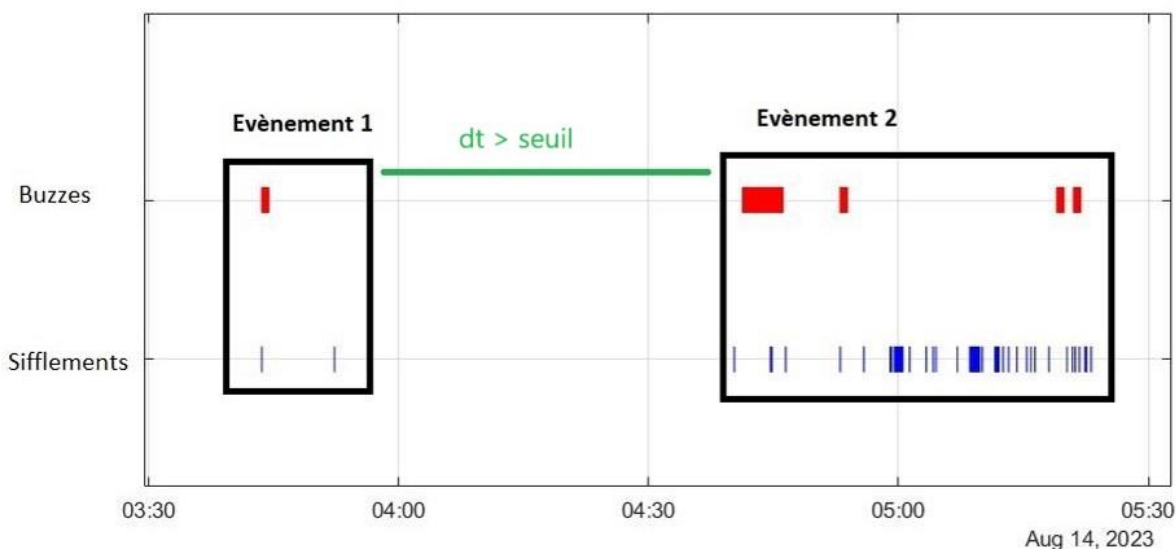


Figure 72. Exemple de séquences de détections de sons de delphinidés au cours du temps et détermination de 3 événements de présence basé sur un intervalle inter-détection de 10 min (Figure 73).

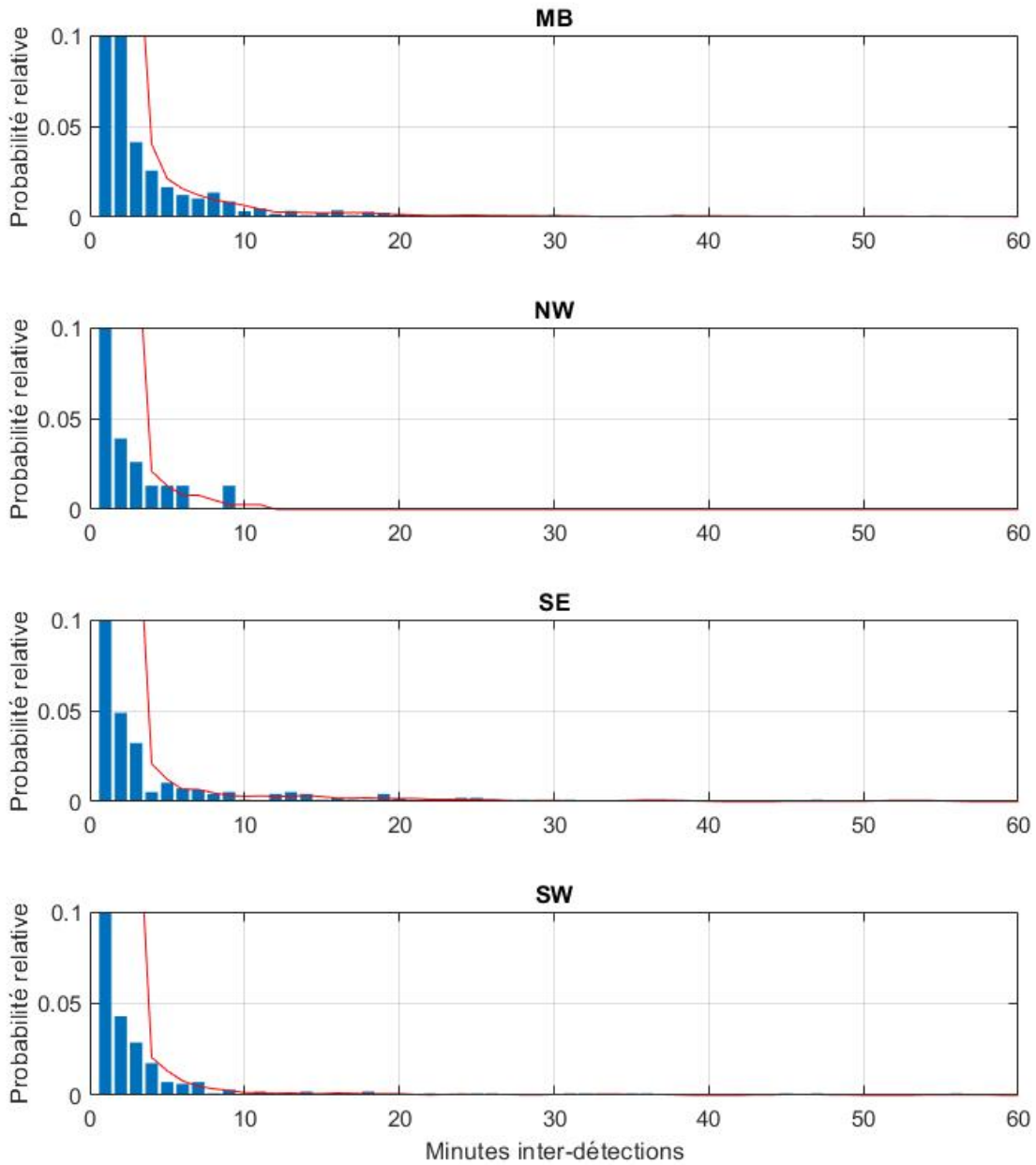


Figure 73. Fréquence des intervalles (minutes) inter-détections de sifflements de dauphins sur le cycle en continue.

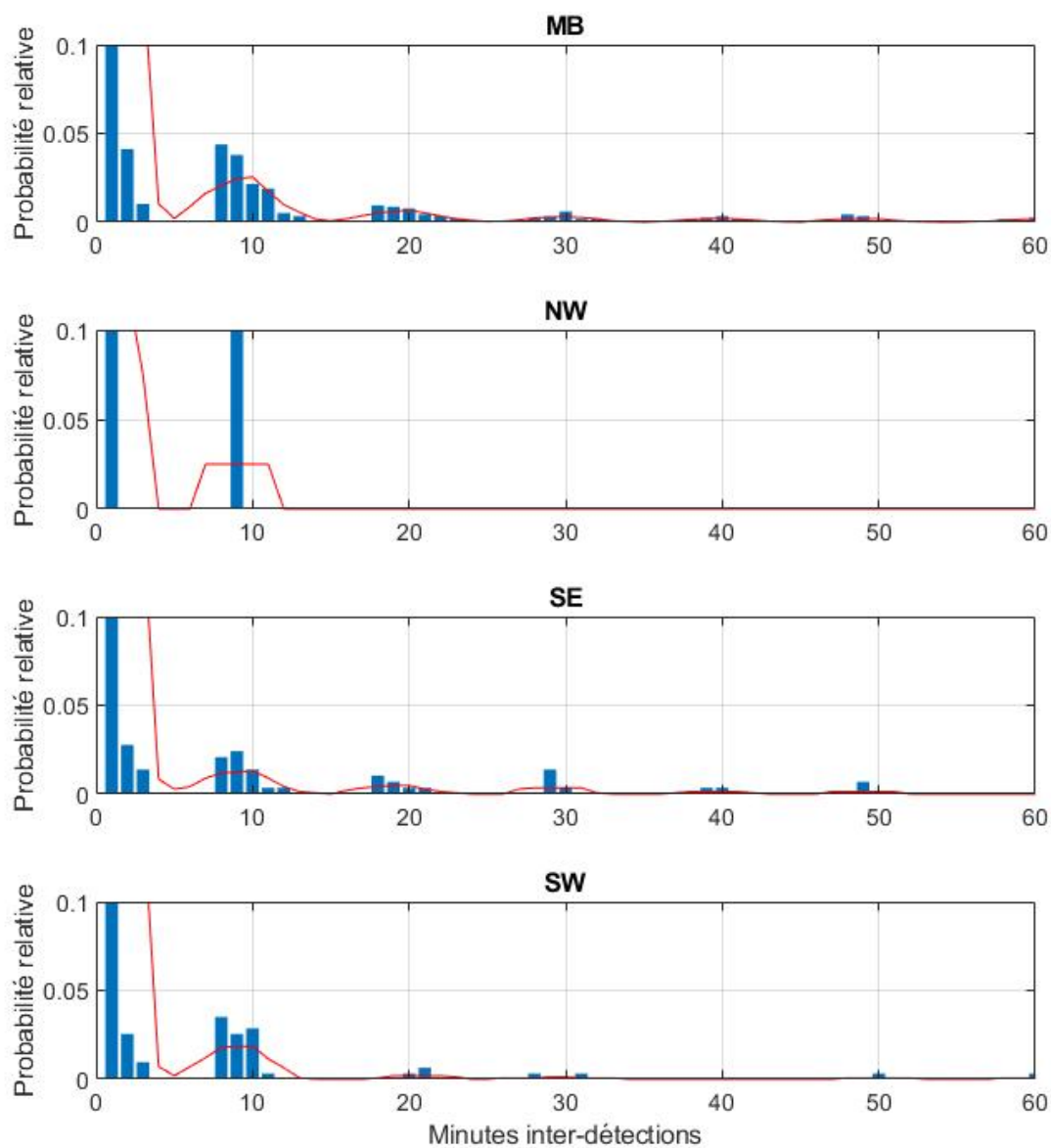


Figure 74. Fréquence des intervalles (minutes) inter-détections de sifflements de dauphins sur le cycle à 30 %.



8.3.2 Résultats des fréquentations par les cétacés obtenus avec un cycle continu

8.3.2.1 Présence de delphinidés

Le Mor Braz présente une fréquentation de delphinidés quotidienne avec 97,1 % et 100% des jours d'enregistrement présentant au moins une détection acoustique, respectivement en été et en hiver (Tableau 18). Les répartitions horaires de sifflements et buzzes détectés indiquent une activité acoustique réalisée sur toute la journée, avec une légère prédominance à partir de 3 h (UTC) jusqu'en fin de journée vers 20 h (UTC) en été (Figure 75) et vers 16h (UTC) et minuit (UTC) en hiver (Figure 76). Ces détections sont réparties sur 282 évènements de présence (d'en moyenne 864 ± 1676 secondes, dont un évènement atteignant plus de 4 heures) en été et 330 en hiver (d'en moyenne 483 ± 968 secondes). Parmi les évènements de présence, on observe 121 évènements avec production de buzz en été et 244 en hiver (soit un pourcentage d'évènements avec potentiellement de la chasse plus importante en hiver qu'en été, cf. Tableau 18).

Pour les deux stations du sud (SE et SW), la période estivale présente des détections quotidiennes sur les deux premières semaines d'enregistrement (du 9 au 23 août), puis une diminution du nombre d'heures positives par jour jusqu'à la fin août (Figure 75). En septembre la fréquentation sur la station SW est plus occasionnelle, tandis que l'enregistreur de la station SE a arrêté son acquisition ne permettant pas de déterminer la fréquentation sur cette période. Les détections sur les deux stations sont réparties sur 83 et 78 évènements de présence sur SE et SW, respectivement dont 35 évènements avec présence de buzzes pour SE et 101 évènements de présence, dont 26 évènements avec présence de buzzes pour SW. Les répartitions horaires des deux types de signaux indiquent des activités acoustiques prédominantes en milieu de nuit et en milieu de journée pour les deux stations (Figure 75). En hiver, la fréquentation sur SW est plus importante avec des détections acoustiques quotidiennes, que sur SE où les détections sont considérées comme fréquentes. On observe en effet 61 et 253 évènements de présence sur SE et SW respectivement, dont 24 évènements



avec présence de buzzes pour SE et 173 évènements avec buzzes pour SW. Les répartitions horaires des deux types de signaux n'indiquent pas de tendance significative (Figure 76), avec toutefois une légère prédominance de présence la nuit et à l'aube ou crépuscule sur la station SE (hiver comme été) et pour sur SW en hiver (Figure 77).

La plus faible présence acoustique estivale de delphinidé s'observe au nord-ouest du parc, avec seulement 16 évènements de présence, dont 6 avec production de buzzes, répartis sur 5 jours différents (Tableau 18 et Figure 75). La fréquentation sur la station NW peut donc être considérée comme occasionnelle. Cette fréquentation augmente en hiver avec une présence acoustique régulière (Tableau 18 et Figure 76).



Les résultats obtenus par l'analyse des données issues d'un enregistrement continu (Tableau 18, Figure 75 et Figure 76) donnent des tendances assez proches à ceux obtenus avec un cycle d'acquisition de 30 % (Tableau 10, Figure 44 et Figure 45). On observe toutefois une légère sous-estimation des temps positifs ainsi que du nombre d'évènement, par la diminution de la probabilité de détection de signaux avec des sons de 30 %, résultant à une sous-estimation de certaine fréquentation sur quelques stations. Par exemple, des fréquentations estimées comme quotidiennes avec un cycle continu sont estimés comme fréquentes avec un cycle de 30% (ou encore fréquentes en continu à occasionnelles à 30%). Toutefois de manière générale, les sous-estimations sont moins marquées pour les stations avec de forts taux de détections. En effet, la probabilité de « rater » des évènements acoustiques en diminuant le cycle d'acquisition est moins forte en présence d'une forte activité acoustique (en nombre de signaux et en durée). Ainsi, les fréquentations seront plutôt sous-estimées lorsque les activités acoustiques sont plus ponctuelles. Il est également notable que l'estimation des taux de répartition des horaires de présence ainsi que les taux de détections en fonction de la période de la journée (jour, nuit, aube ou crépuscule, cf. Figure 46 et Figure 77) donnent des résultats similaires entre les deux cycles d'acquisition. De même, concernant les comportements acoustiques, on observe les mêmes tendances de production de buzzes et de sifflements entre les deux cycles d'acquisitions (Figure 47 et Figure 78). En effet, sur les données obtenues avec un cycle continu, l'observation des distributions des pourcentages de minutes positives avec buzzes montre deux modes avec :

- une forte densité entre 0 à 25 % correspondant à des évènements de présence avec essentiellement des sifflements ;
- et une augmentation des densités de probabilité pour des valeurs >75 % jusqu'à 100 % correspondant à des évènements acoustiques présentant une production élevée de buzzes.

Quant aux pourcentages de minutes positives avec sifflements, on observe principalement un mode avec plus de 90 % du temps de présence à siffler, et quelques modes entre 25 et 75 % suggérant des évènements avec moins de communication.

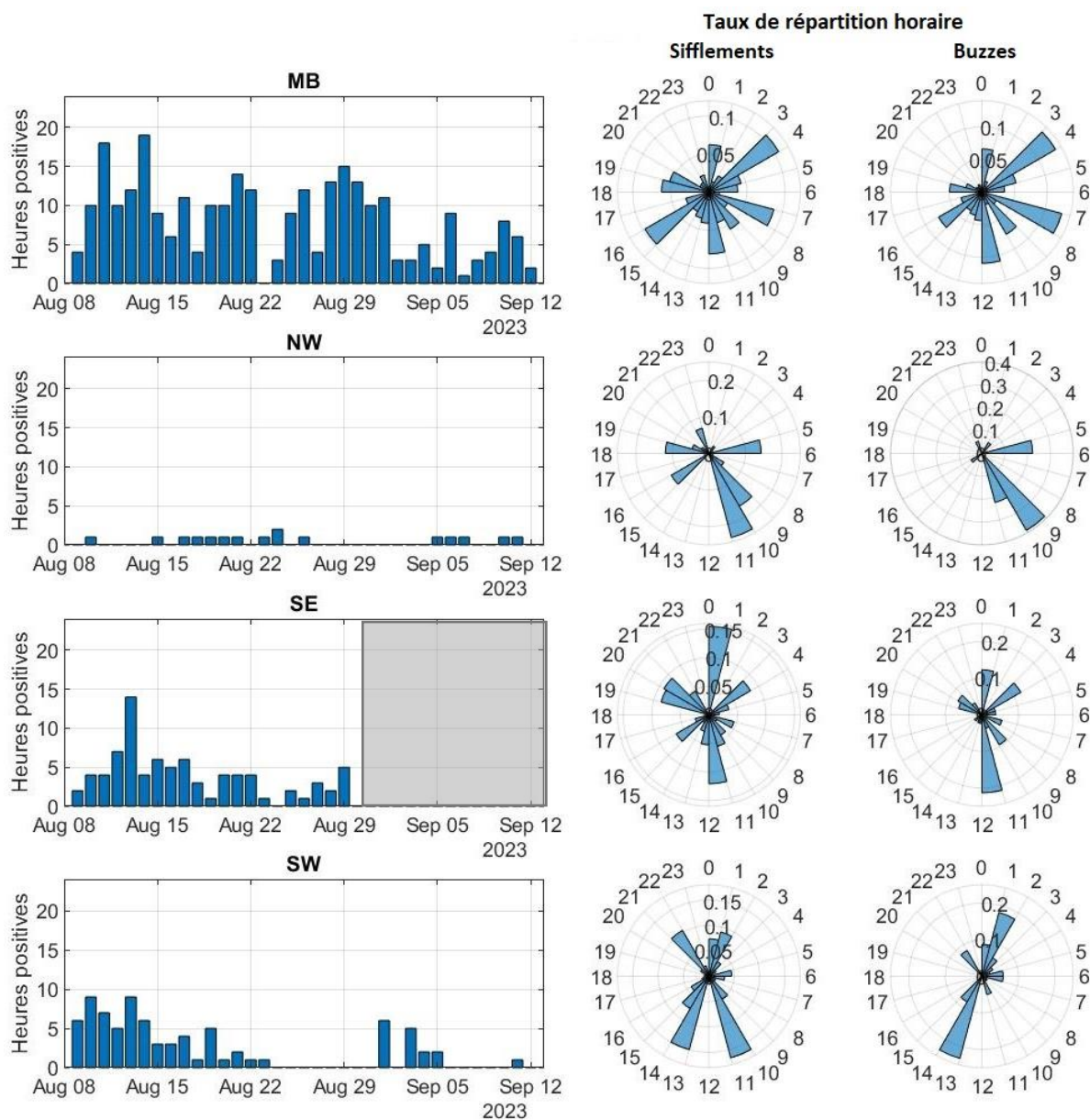


Figure 75. Occurrences des présences acoustiques de dauphins sur les 4 stations en été (2023) représentées par le nombre d'heures positives par jour (diagrammes bars) et de la répartition horaire de détection de vocalises et de buzzes (diagrammes en rosace, heures positives), obtenues avec un cycle d'enregistrement continu.

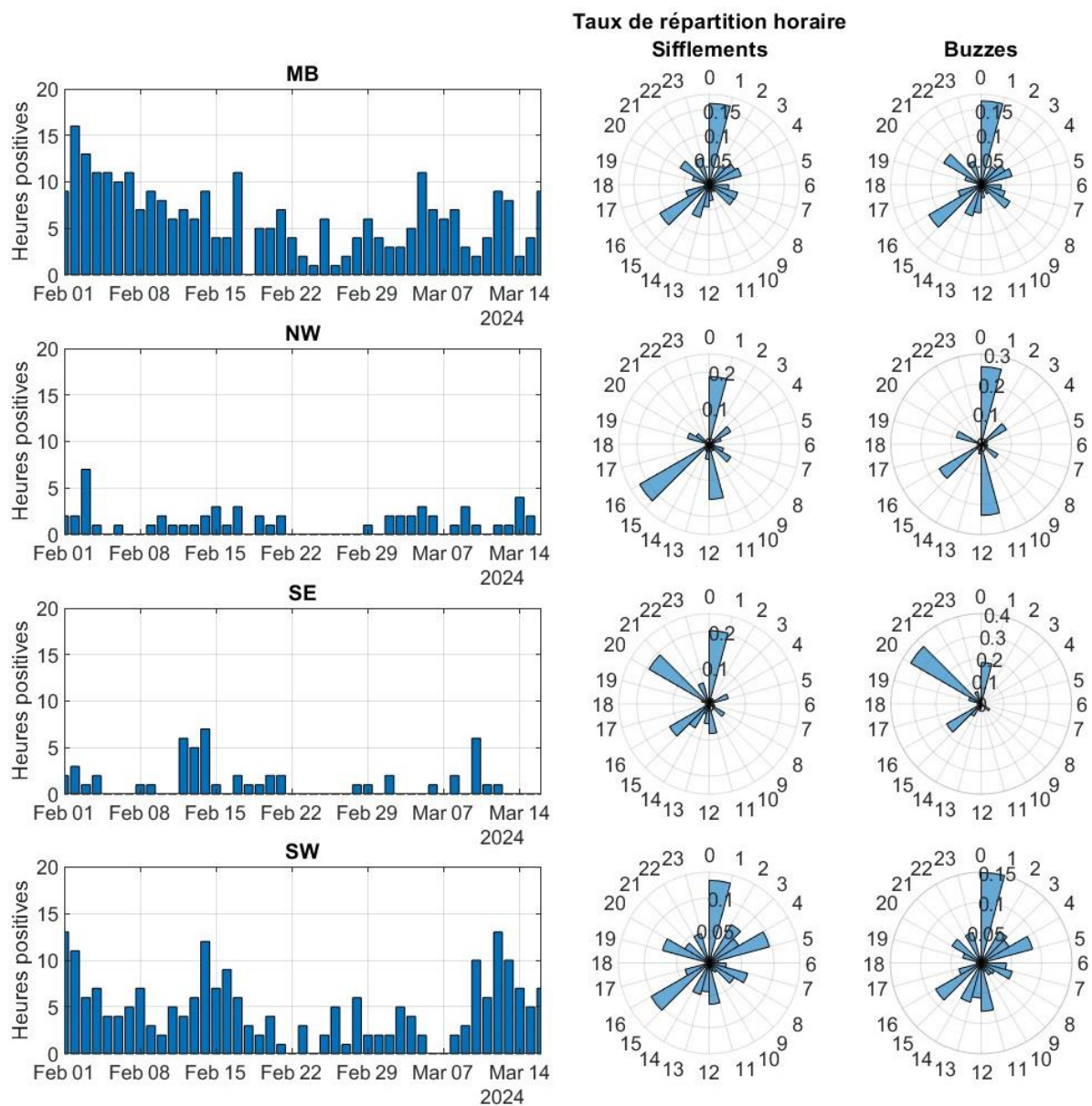


Figure 76. Occurrences des présences acoustiques de dauphins sur les 4 stations en hiver (2024) représentées par le nombre d'heures positives par jour (diagrammes bars) et de la répartition horaire de détection de vocalises et de buzzes (diagrammes en rosace, heures positives), obtenues avec un cycle d'enregistrement continu.



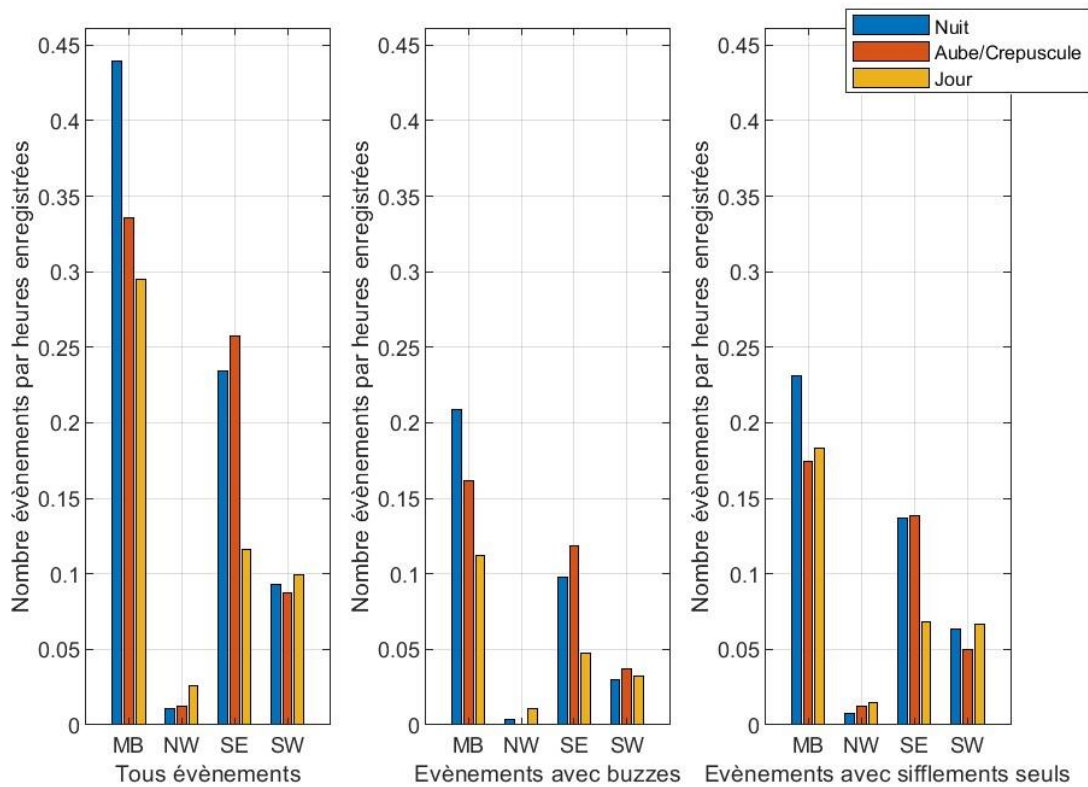
Tableau 18. Résumé des détections de delphinidés (avec un cycle d'acquisition de continu).

	Station	Minutes Positives ³³	Heures positives	Jours positifs	Nombre d'évènement de présence	Durée moyenne des évènement (± écart type, en secondes)	Durée maximale en minutes	Nombre d'évènement avec buzz (% d'évènement)	Pourcentage de minutes positives avec buzzes lors des évènements	Pourcentage de minutes positives avec sifflements lors des évènements	Fréquentation
ETE (2023)	MB	4336 (8,9 %)	285 (35 %)	34 (97,1 %)	282	864 ±1676	287	121 (43 %)	31 %	49 %	Quotidienne
	NW	61 (0,1 %)	16 (0,6 %)	15 (42,9 %)	16	173 ±330	22	6 (38 %)	30 %	69 %	Occasionnelle à régulière
	SE	828 (1,8 %)	82 (9,3 %)	20 (87 %)	83	539 ±849	77	35 (42 %)	26 %	54 %	Quotidienne
	SW	689 (1,1 %)	79 (9,7 %)	20 (57,1 %)	78	472 ±805	82	26 (33 %)	25 %	61 %	Occasionnelle à fréquente
HIVER (2024)	MB	2967 (4,7 %)	295 (27,9 %)	45 (100 %)	330	483 ±968	132	244 (74 %)	75 %	45 %	Quotidienne
	NW	290 (0,5 %)	60 (5,7 %)	31 (68,9 %)	59	237 ±546	42	29 (49 %)	32 %	50 %	Régulière
	SE	371 (0,6 %)	56 (5,3 %)	24 (53,3 %)	61	306 ±668	76	24 (39 %)	43 %	49 %	Régulière
	SW	1859 (2,9 %)	230 (21,8 %)	42 (93,3 %)	253	380 ±706	73	173 (68 %)	46 %	45 %	Quotidienne

³³ Minutes positives de présence des évènements acoustiques comme définies dans la section 3.4.3.3 (et Annexe 8.3.1)



ETE (2023)



HIVER (2024)

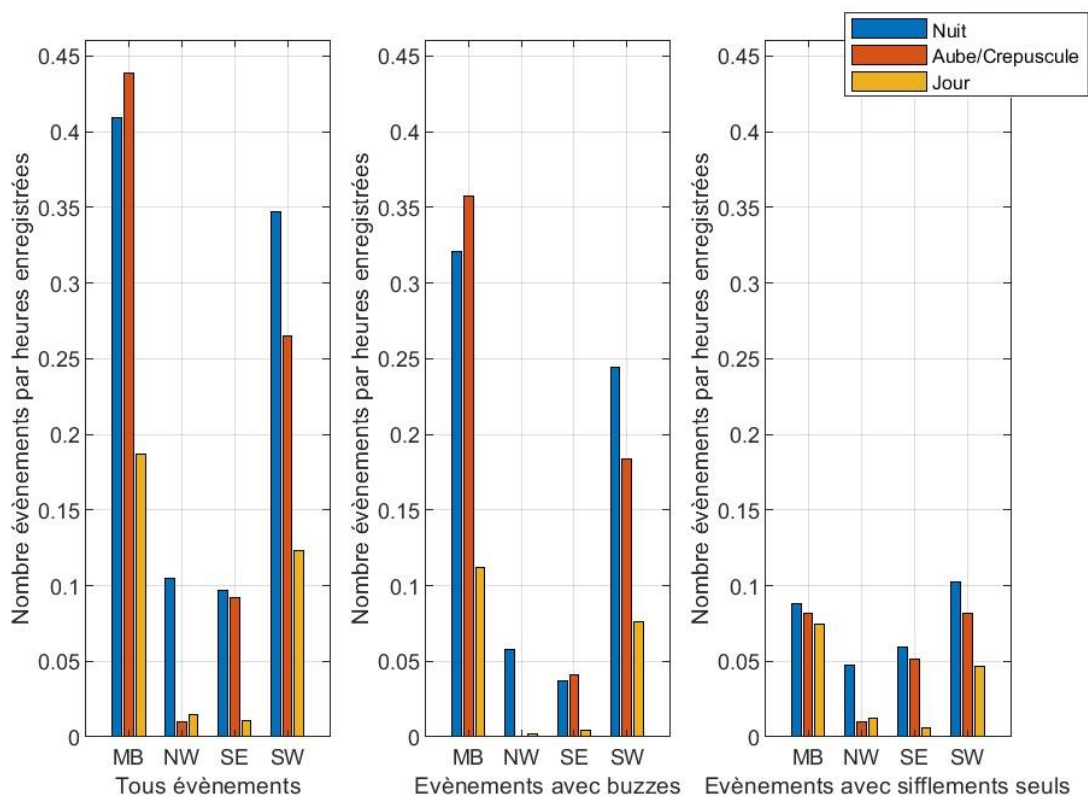


Figure 77. Comparaison entre les stations du nombre d'évènements de présence acoustique (obtenues avec un cycle continue) de delphinidés par heures d'enregistrement, pour les 3 différentes périodes journalières : Jour, Nuit et Aube - Crépuscule.

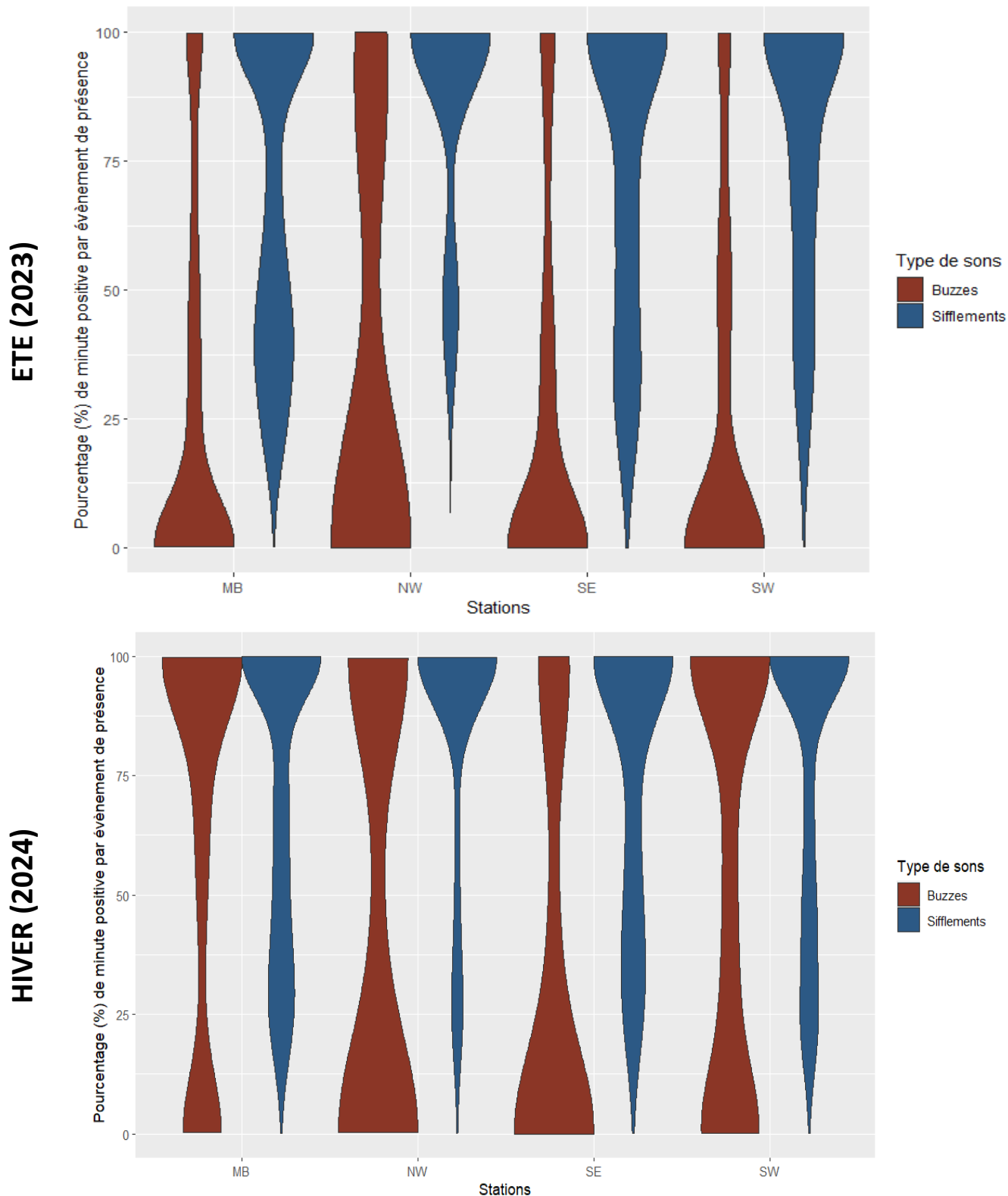




Figure 78. Densités de probabilité des pourcentages de minutes positives avec présence de buzzes (rouge) et avec présence de sifflements (bleu), représentées sous forme de diagrammes en violon par station, et obtenues avec un cycle d'enregistrement continu. Ces diagrammes permettent de décrire la distribution des pourcentages de minutes positives par évènement de présence, ainsi une augmentation des courbes révèle donc une augmentation de la probabilité d'observer ces valeurs.

8.3.2.2 Présence des marsouins

Dans le Mor Braz, 19 et 186 évènements de présence de marsouin ont été enregistrés respectivement l'été 2023 et en hiver 2024. Ces détections ont été enregistrées sur 46 heures différentes en été et 175 heures en hiver correspondant respectivement à 25 et 43 jours positifs (soit 71,9 % du nombre de jour de déploiement en été et 95,6 % en hiver, cf. Tableau 11). La présence de marsouins dans le Mor Braz peut alors être catégorisée comme fréquente en été et quotidienne en hiver (selon la définition en section 3.4.3.4, cf. Tableau 19, et Figure 80). La répartition horaire des trains de clics détectés ainsi que la période de chaque évènement de présence montrent une activité acoustique répartie à toute période de la journée mais avec une légère prédominance nocturne en été et de jour en hiver (Figure 81).

La station du sud-ouest (SW) est la deuxième station avec le plus de détection et présentant également une saisonnalité entre l'été et l'hiver. En effet 4 détections réparties sur 4 jours (équivalent à 11,4% du temps de suivi) sur la station du SW, située à proximité du parc, ce qui en fait une présence occasionnelle (voire exceptionnelle, cf Tableau 19 et Figure 79). La fréquentation hivernale est plus importante avec des détections régulières en hiver, avec 42 évènements de présence acoustique obtenues sur la moitié des jours de suivis (Tableau 19 et Figure 80).

Les deux dernières stations (NW et SE), ne présentent des détections acoustiques qu'en hiver, avec une plus forte occurrence sur la station au sud du parc (SE) avec 17 détections d'évènements acoustiques pour 4 évènements sur la station NW. La fréquentation au SE comme occasionnelle comme sur la station SW mais avec un taux de présence plus faible (24,4 % de jours positifs, Tableau 19). Quant à la station NW, la fréquentation est considérée comme exceptionnelle avec une présence acoustique de 8,9% des jours de suivis.

Les résultats obtenus par un enregistrement continu (Tableau 19, Figure 79 et Figure 80) sont légèrement différents de ceux obtenus avec un cycle d'acquisition de 30 % (Tableau 11, Figure 49 et Figure 50). En effet la comparaison des pourcentages de temps positifs révèle qu'à l'échelle de la minute on obtient des pourcentages similaires étant donné que cette estimation prend en compte le nombre de minutes d'enregistrement uniquement, tandis qu'à l'échelle de heures positives et des jours positifs, on sous-estime la présence de marsouin avec le cycle de 30 %. Par conséquent, les estimations de fréquentation sont légèrement sous-estimées avec le cycle d'enregistrement de 30 %. On note toutefois que pour les deux stations ne présentant pas de détection sur la période estivale (NW et SE) avec l'acquisition de 30 %, on obtient le même résultat avec l'acquisition continue, ainsi l'absence de présence ne semble pas être un biais d'échantillonnage. Comme pour la détection des delphinidés, on observe que l'estimation des taux de répartition des horaires de présence ainsi que les taux de détections en fonction de la période de la journée (jour, nuit, aube ou crépuscule, cf. Figure 51 et Figure 81) donnent des résultats similaires entre les deux cycles d'acquisition.

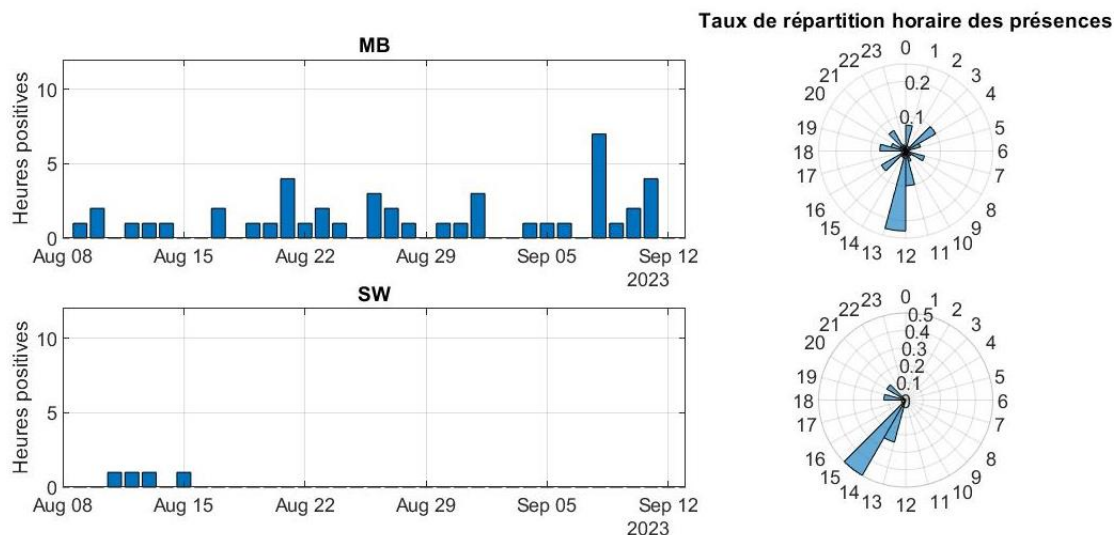


Figure 79. Occurrence des clics de marsouins obtenues l'été (2023) sur les deux stations révélant des présences (le graphique en barre représente le nombre d'heures positives par jour au cours du suivi et les diagrammes en rosace, la répartition horaire de ces heures positives).

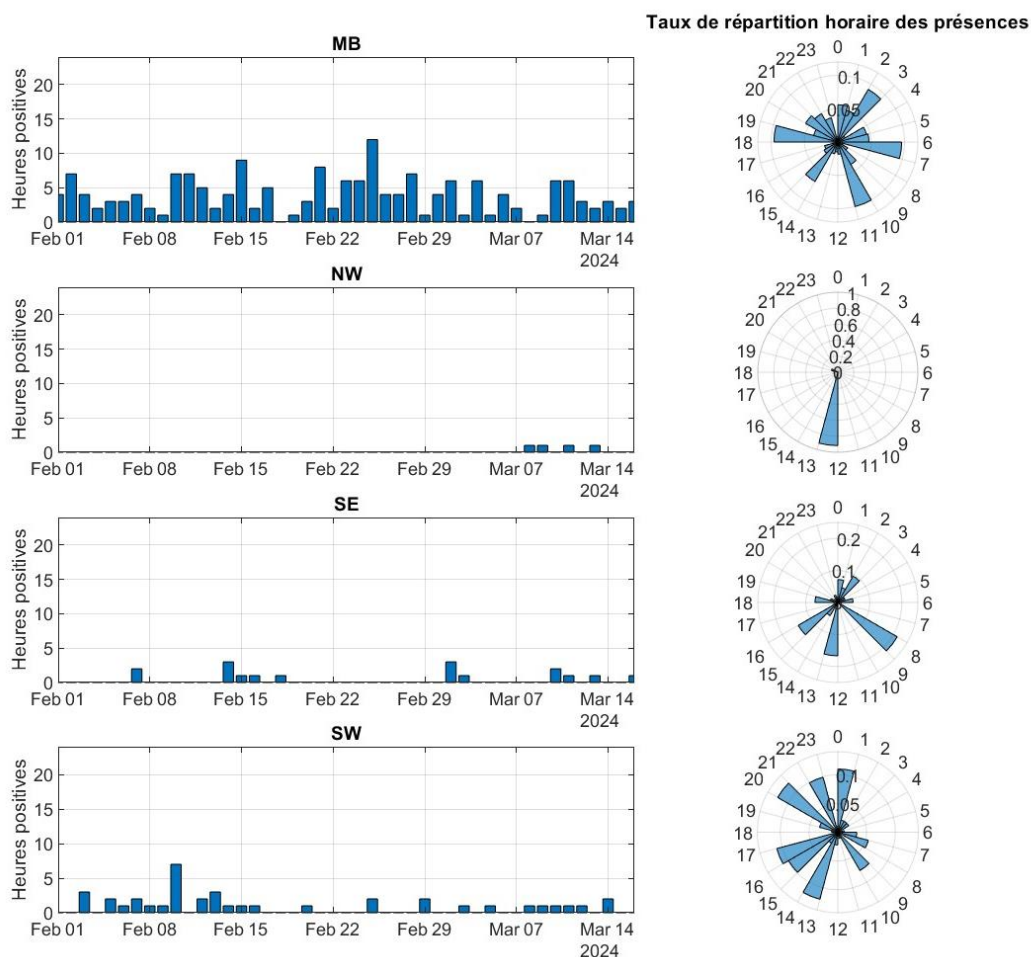


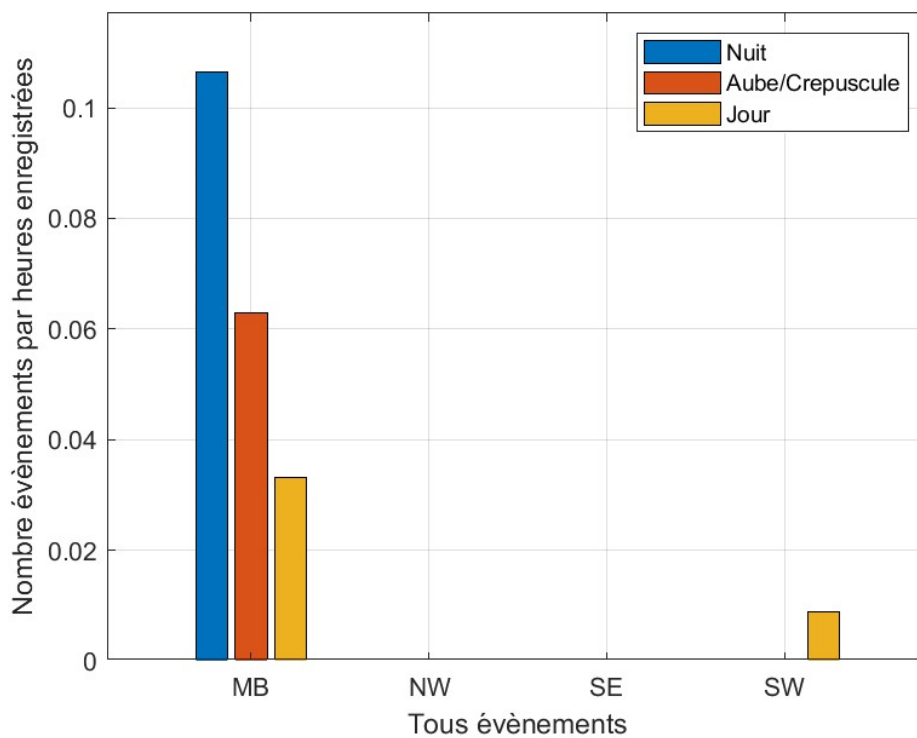
Figure 80. Occurrence des clics de marsouins obtenues en hiver (2024) sur les quatre stations (le graphique en barre représente le nombre d'heures positives par jour au cours du suivi et les diagrammes en rosace, la répartition horaire de ces heures positives).



Tableau 19. Résumé des détections de marsouins (avec un cycle d'acquisition de 100 %).

	Stations	Nombres d'évènements de présence	Minutes positives	Heures positives	Jours positifs	Durée moyenne des évènements (± écart type, en secondes)	Durée maximale en minutes	Fréquentation
ETE (2023)	MB	19	79 (0,2 %)	46 (5,7 %)	25 (71,4 %)	80 ±169	17	Fréquente
	NW	0	0 (0 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	0	0	Absence
	SE	0	0 (0 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	0	0	Absence
	SW	4	5 (0,01 %)	4 (0,5 %)	4 (11,4 %)	19 ±14	0,2	Occasionnelle
HIVER (2024)	MB	186	409 (0,6 %)	175 (16,6 %)	43 (95,6 %)	239 ±417	42	Quotidienne
	NW	4	6 (0,01 %)	4 (0,4 %)	4 (8,9 %)	43 ±43	2	Exceptionnelle
	SE	17	26 (0,04 %)	17 (1,6 %)	11 (24,4 %)	41 ±60	4	Occasionnelle
	SW	42	54 (0,09 %)	39 (3,7 %)	23 (51,1 %)	37 ±62	4	Régulière

ETE (2023)



HIVER (2024)

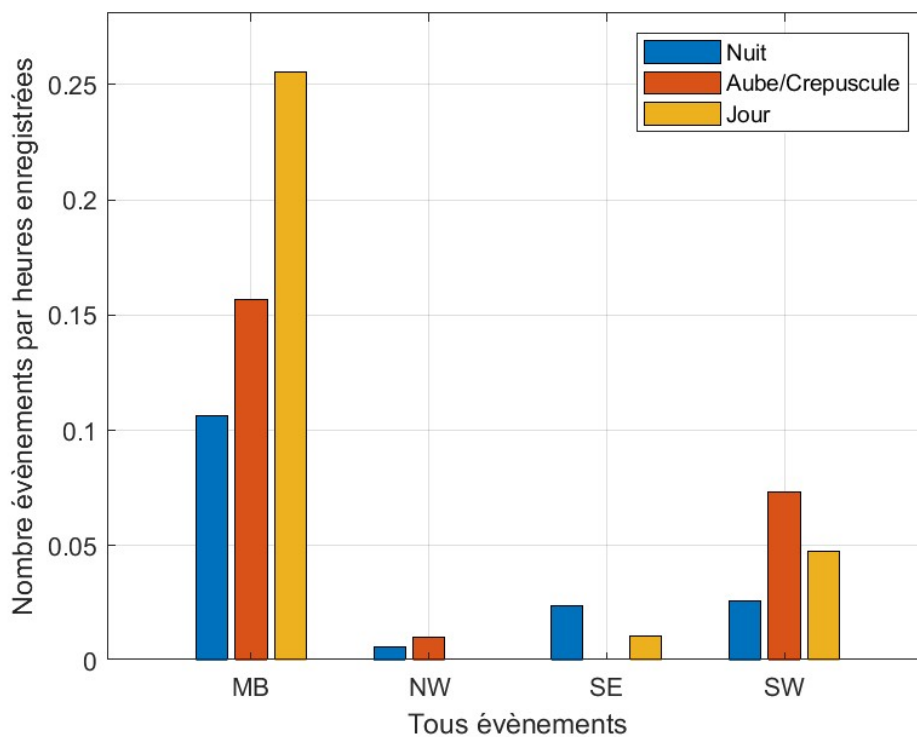


Figure 81. Comparaison entre les stations du nombre d'événements de présence acoustique (obtenues avec un cycle continue) des marsouins par heures d'enregistrement, pour les 3 différentes périodes journalières : Jour, Nuit et Aube - Crépuscule.

8.3.3 Cartes de densités des delphinidés et marsouins.

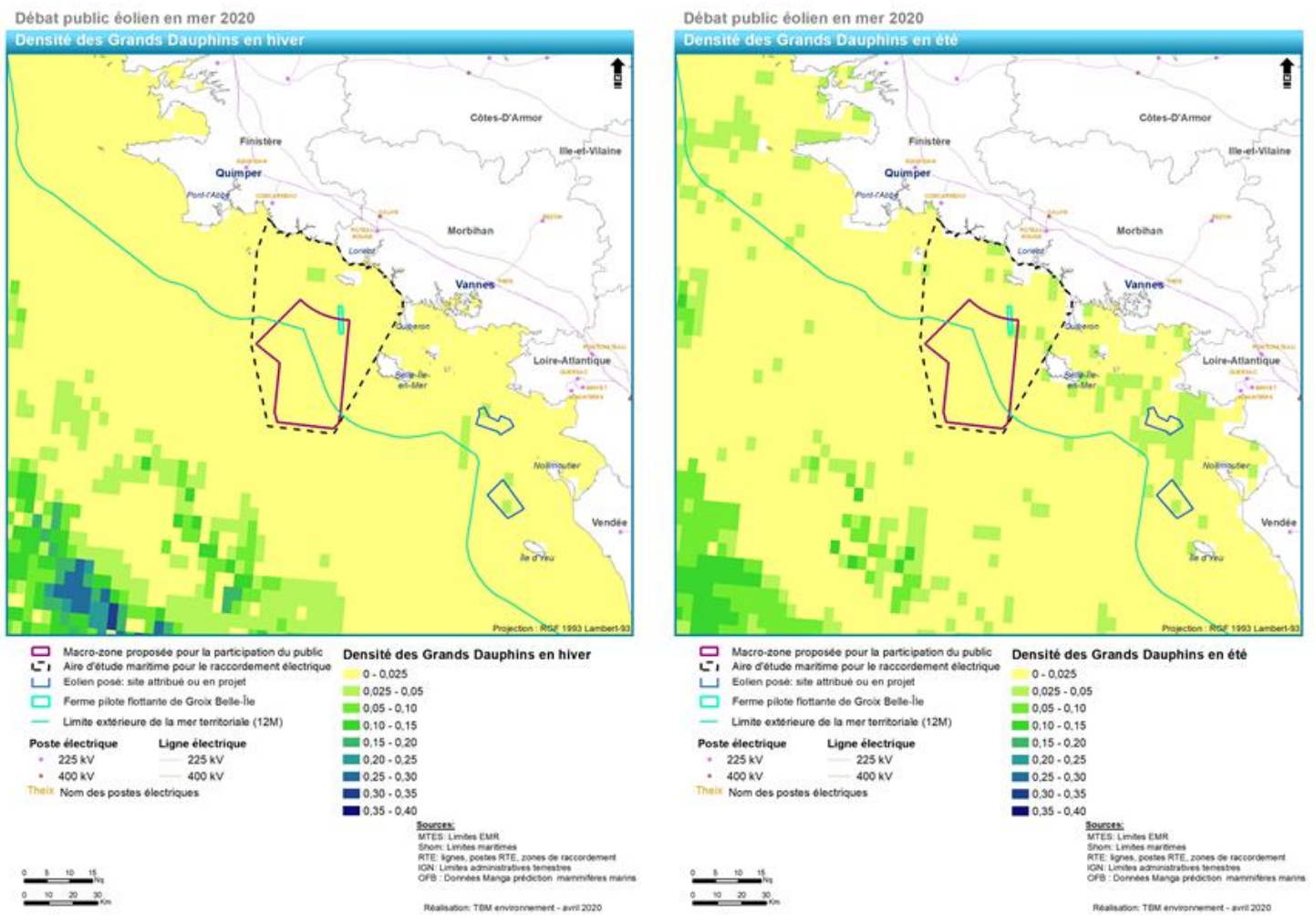


Figure 82. Densités des grands dauphins en hiver (à gauche) et en été (à droite). Cartes issues de l'analyse bibliographique environnementale du projet d'éoliennes flottantes au sud de la Bretagne, TBM Environnement, 2020.

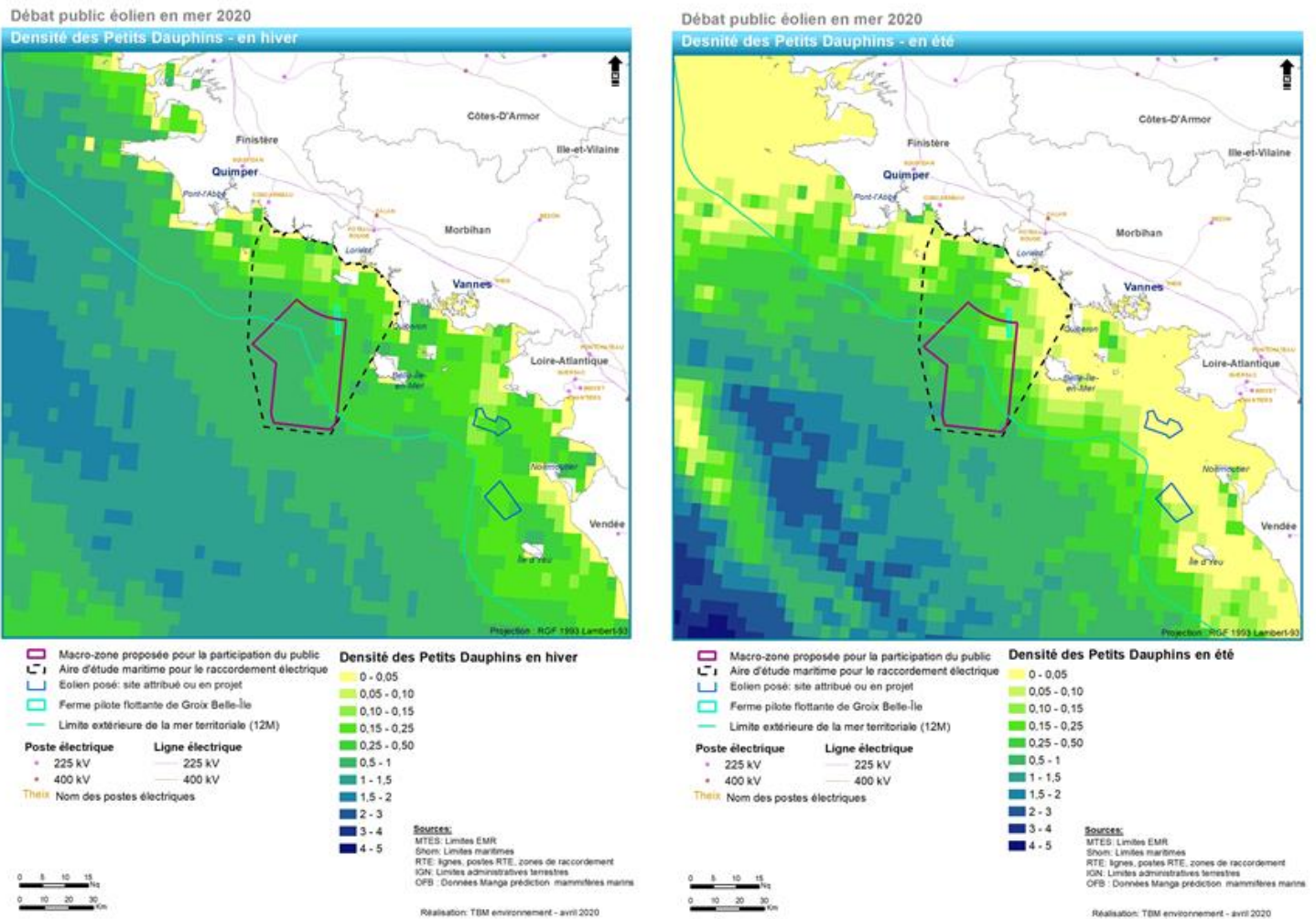


Figure 83. Densités des petits delphinidés (dauphins communs et dauphins bleu et blanc) en hiver (à gauche) et en été (à droite). Cartes issues de l'analyse bibliographique environnementale du projet d'éoliennes flottantes au sud de la Bretagne, TBM Environnement, 2020.

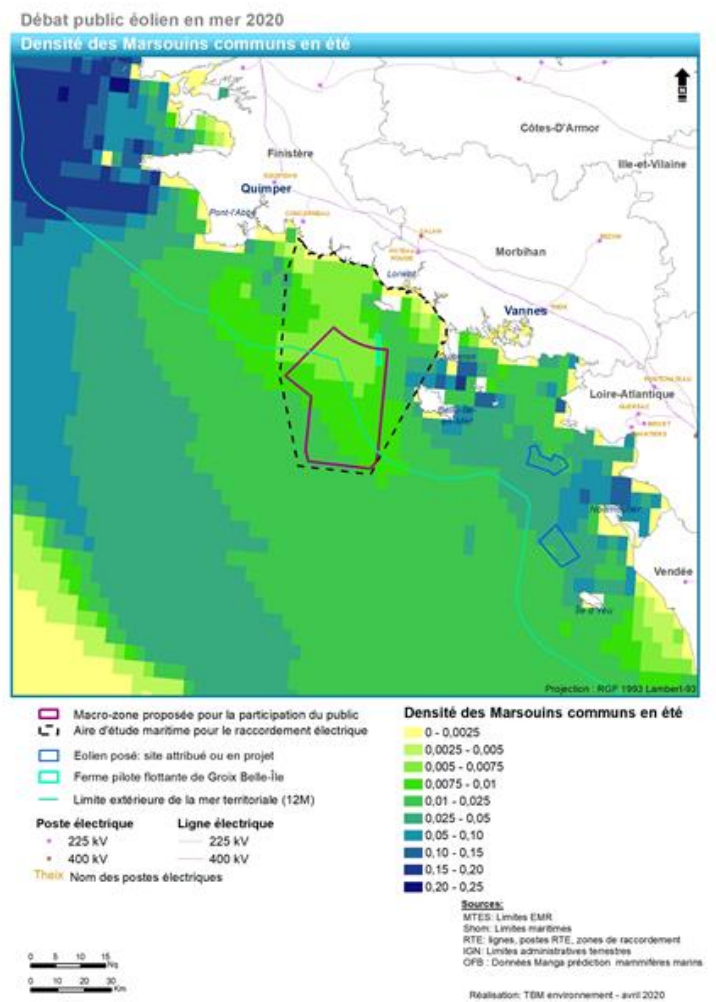
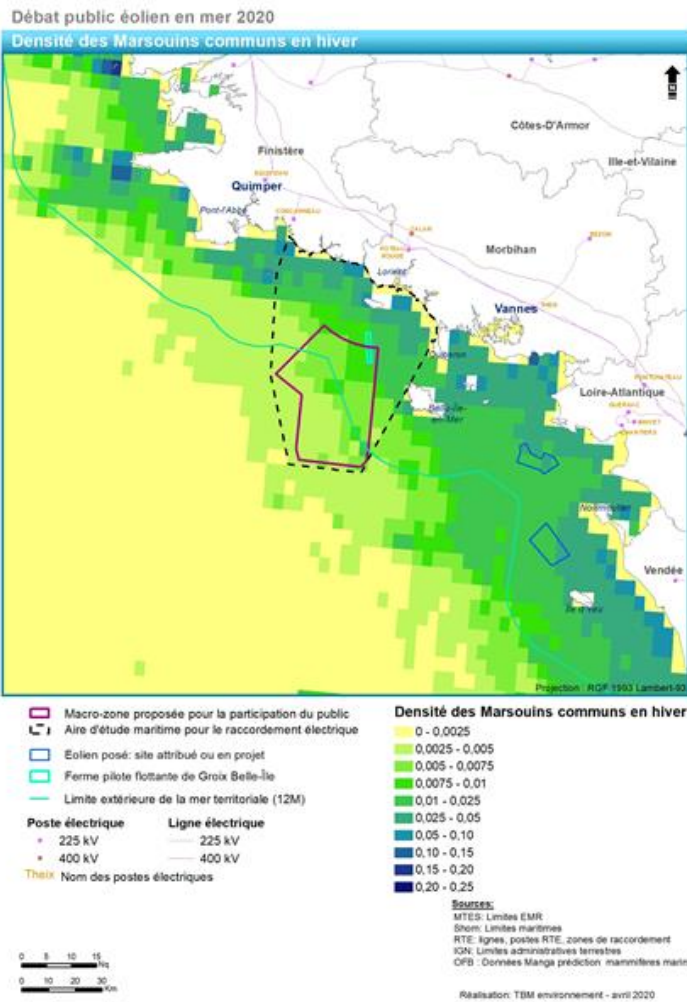


Figure 84. Densités des marsouins communs en hiver (à gauche) et en été (à droite). Cartes issues de l'analyse bibliographique environnementale du projet d'éoliennes flottantes au sud de la Bretagne, TBM Environnement, 2020.



8.4 Protocole de suivi en phase d'exploitation



ENV-002960

Parc du Banc de Guérande

SAINT-NAZAIRE

MSU8 : Suivi du bruit sous-marin et des mammifères marins

Protocole de suivi en phase d'Exploitation

N° de version	Objet de la présente version	Date
1	Protocole soumis au CTE de juin 2023	05/05/2023

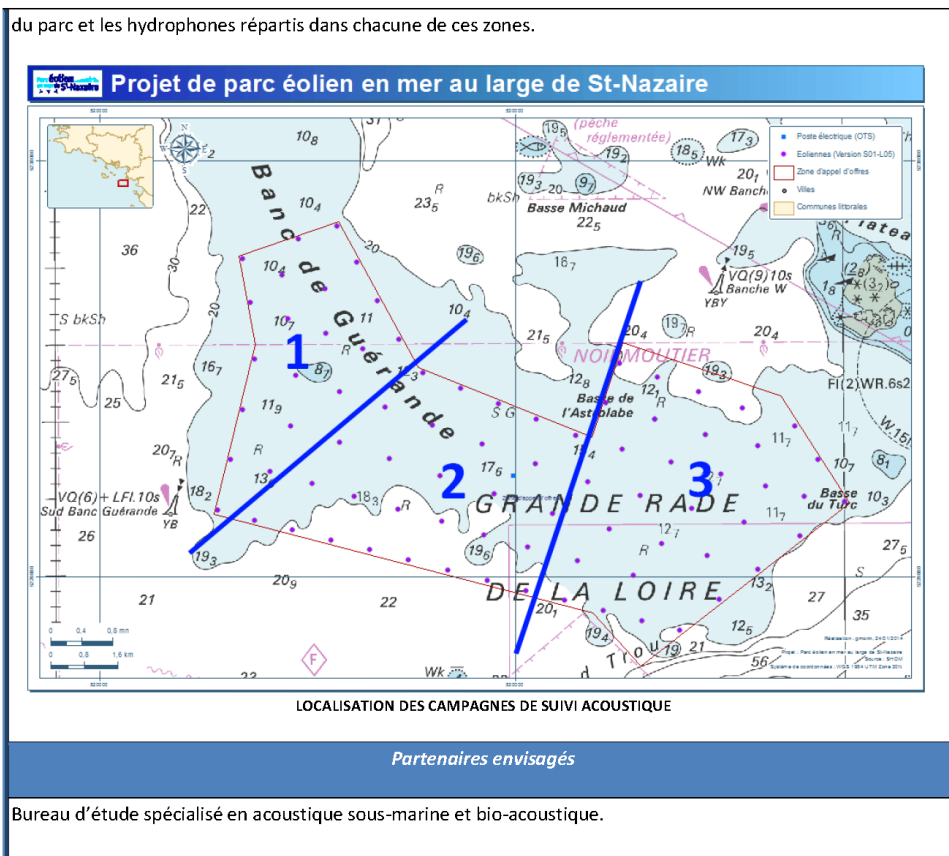


SOMMAIRE

1	Rappel de la « fiche mesure » validée au stade « état de référence »	3
2	Rappel des suivis réalisés avant l'installation du parc éolien	4
2.1	Etat initial du projet : données de l'étude d'impact.....	4
2.2	Suivis réalisés durant l'état de référence (pré-construction).....	7
2.3	Constat issus de l'Etat initial et de l'Etat de référence	9
3	Fiche mesure MSU8 – phase d'exploitation	10
4	Précisions relatives à certains points du protocole	12
4.1	Absence de recours à la technique du C-POD	12
4.2	Choix d'un suivi additionnel dans le secteur du Mor Braz	13
4.3	Bruit d'une éolienne en fonctionnement : état des connaissances.....	13

1 Rappel de la « fiche mesure » validée au stade « état de référence »

MSU 8	SUIVI	ECOSYSTEMES Mammifères marins
SUIVI DES MAMMIFERES MARINS PAR ACOUSTIQUE PASSIVE		
<i>Objectifs du suivi</i>		
Suivre la fréquentation de la zone par les mammifères marins ; Suivre le bruit ambiant.		
<i>Calendrier de mise en œuvre de ce protocole</i>		
Phase(s)	Validation préalable	
Etat de référence : avant le début du chantier en mer	CTE – Mai 2019	
<i>Protocole du suivi</i>		
Focus sur la zone d'implantation indispensable – Fine échelle spatio-temporelle. Espèces cibles : marsouins et petits delphinidés.		
<ul style="list-style-type: none"> • Volet 1 : Déploiement d'un à trois hydrophones large bande ou enregistreurs passifs se dérouleront sur deux périodes d'acquisition, une en hiver et une en été, pour chacune une durée de 15 jours avec un échantillonnage proposé de 5 min/h. • Volet 2 : Installation de six dispositifs d'enregistrement automatique de type C-Pod (3 à l'intérieur du parc, 3 en périphérie immédiate) sur deux périodes d'un mois (hiver, été). 		
		
Les campagnes par hydrophones et C-pod seront menées parallèlement afin de pouvoir comparer les données récoltées. Les dispositifs seront répartis dans chacune des trois zones (voir carte ci-dessous) identifiées pour la pose des différents dispositifs acoustiques avec 2 C-pod dans chaque zone à l'intérieur et en périphérie immédiate		



2 Rappel des suivis réalisés avant l'installation du parc éolien

2.1 Etat initial du projet : données de l'étude d'impact

Pour les besoins de la caractérisation de l'état initial et de l'analyse des impacts, une étude visant à produire des connaissances sur l'ambiance de la zone d'étude a été confiée en 2013 au bureau d'étude spécialisé QUIET OCEANS. Les informations ci-dessous sont extraites du rapport **QO.RAP.20121212.01.001, version 2.2**, annexée à l'Etude d'Impact Environnementale (2015).

Des campagnes de mesures en mer ont été réalisées en 2013 afin de caractériser statistiquement le bruit existant sur zone et établir des prévisions de distribution des bruits liés au projet. Cette connaissance se base sur :

- une campagne de mesures acoustiques conduite sur et à proximité de la zone projet qui permet de calibrer les cartes du bruit existant ;

- des conditions environnementales saisonnières du site (océanographie, houle, vagues, bathymétrie, nature des fonds, etc.) ;
- des activités maritimes déjà existantes ;
- des sources de bruits associées aux types d'activités maritimes.

L'ensemble de ces informations ont été intégrées dans la plateforme Quonops© de Quiet-Oceans et servent d'hypothèses spatio-temporelles pour l'intégralité des prédictions. Elles fournissent le contexte environnemental représentatif de la zone d'étude.

Campagne de mesures acoustiques in-situ

Protocole

Une série de mesures in-situ a été réalisée dans et à proximité du futur parc éolien pendant la période du 22/07 au 13/08/2013. Aux points de mesure P1, P2 et P3 ont été déployés des enregistreurs passifs permettant d'évaluer les niveaux sonores actuellement présents. Des transmissions actives de signaux acoustiques calibrés (points Ai) ont permis de réduire les incertitudes, en particulier sur la nature géoacoustique des fonds.

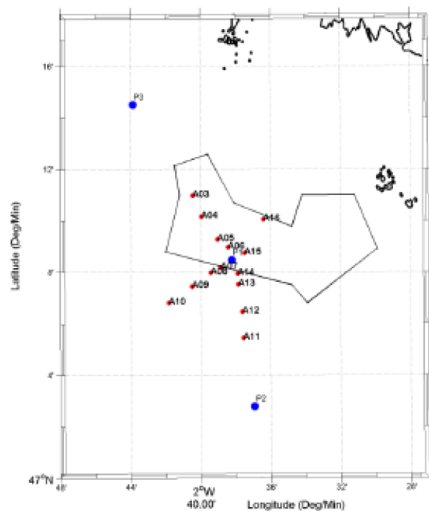


Figure 7 : Positions des enregistreurs acoustiques (P) et des émissions actives (A) ayant servi à la calibration des résultats de l'étude.

Localisation des enregistreurs passifs	Longitude	Latitude	Immersion	Distance au centre du parc (en mille nautique)
P1	002°38'12.804"W	47°8'28.272"N	Posé sur le fond	1.95
P2	002°36'55.764"W	47°2'47.268"N	Posé sur le fond	7.24
P3	002°43'52.080"W	47°14'31.02"N	Posé sur le fond	6.75

Tableau 6 : Caractéristiques des déploiements des instruments d'acoustique passive.

Moyens d'acoustique passive mis en œuvre

- Instruments d'acoustique passive mis en œuvre : enregistreurs autonomes SM2M de Wildlife Acoustics



Figure 8 : Gauche : SM2M de la société Wildlife Acoustics. Droite : mise en œuvre de la cage instrumentée (source : Quiet-Oceans)

Moyens d'acoustique active mis en œuvre

- système d'acoustique actif PULSE©, développé spécifiquement par Quiet-Oceans



Figure 9 : Exemple d'instrumentation acoustique active portable (source Quiet-Oceans)

Analyse des données et interprétation

La démarche suivie pour fournir des cartes de risques prédictives a consisté à :

1. Etablir une situation acoustique de référence calibrée avant la mise en place de l'installation,
2. Etablir le champ acoustique rayonné par les différentes phases liées à l'installation,
3. Etablir l'empreinte acoustique d'une phase donnée en identifiant les zones géographiques pour lesquelles le niveau sonore créé par la phase est supérieur au bruit de mesure,
4. Etablir à l'intérieur de cette empreinte acoustique une carte de risque en recherchant les positions pour lesquelles le niveau d'exposition sonore cumulé est supérieur à un seuil donné. Les risques pris en compte sont la perte permanente d'audition, la perte temporaire d'audition et le dérangement comportemental.

Ces résultats ont aboutis à des mesures de gestion des risques proposées par BioConsult (BioConsult, 2013, rapport annexé à l'Étude d'Impact Environnemental, 2015). Sur la base de ces propositions, des mesures de réduction d'impact et de suivi du projet ont été élaborées telles que la Fiche Mesure MSU8.

2.2 Suivis réalisés durant l'état de référence (pré-construction)

Les informations ci-dessous sont extraites du rapport **QO.20180622.01.RAP.001.05A.PBG.Etat de reference SNA.Rapport_20200826**.

Les **objectifs de l'état de référence** sont :

- De mettre en œuvre un suivi acoustique à l'aide d'enregistreurs acoustiques autonomes et de C-POD ;
- De traiter les données mesurées afin de déterminer le bruit ambiant sous-marin ainsi que la fréquentation et le comportement des mammifères marins ;
- De caractériser le bruit ambiant de référence avant la phase de travaux ;
- De caractériser la fréquentation du site par les mammifères marins avant la phase de construction.

Les **espèces recherchées** sont considérées comme communément présentes au large de Saint-Nazaire

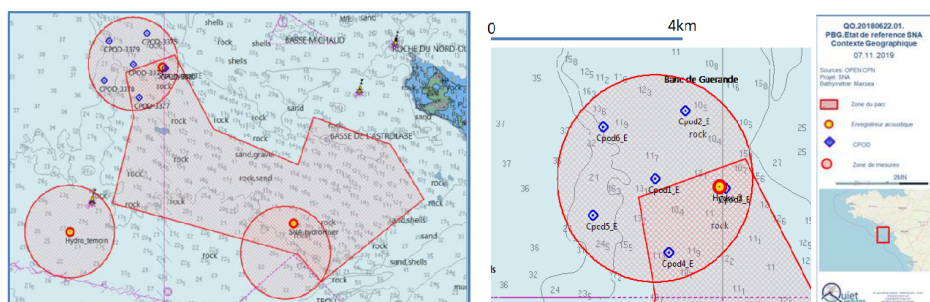
- Delphinidés (clics et sifflements)
 - Grand dauphin, *Tursiops truncatus*
 - Dauphin commun, *Delphinus delphis*
 - Dauphin de Risso, *Grampus griseus*
 - Globicéphale noir, *Globicephala melas*
- Phocoenidés (clics à haute fréquence)
 - Marsouin commun, *Phocoena phocoena*

La mise en œuvre de cette mesure a été confiée au bureau d'étude spécialisé QUIET OCEANS. Les informations ci-dessous sont extraites du rapport **QO.20180622.01.RAP.001.05A**, présenté aux membres du Comité Technique Environnemental le 16 septembre 2020.

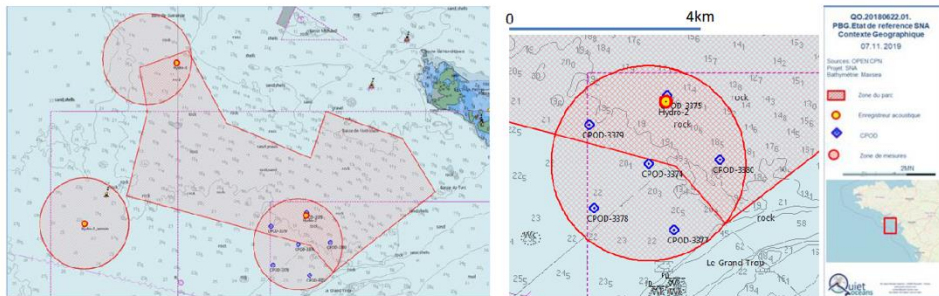
Protocoles de mesures :

Le protocole de mesures de l'état de référence a été validé lors du CTE de mai 2019. Deux campagnes ont été réalisées :

- Campagne été 2019 (20 juin au 30 octobre 2019)



- Campagne hiver 2020 (25 janvier au 18 mai 2020)



Avec deux systèmes de mesure :

- 3 enregistreurs acoustiques : 30 jours de mesure par saison, accès à la donnée brute ;



Système	WildLife Acoustics
Enregistreur	SM3M
Hydrophone	HTI99-HF
Bande de fréquence	10Hz-180kHz (10 Hz à 80 kHz dans une bande +/- 2 dB)
Cycle	03 min ON / 07 min OFF

- 6 Détecteurs C-POD : 100 jours de mesure par saison, Détection automatique des clics de Delphinidés et Phocoenidés ;



Analyse des données et interprétation

- Cartographie du bruit ambiant pour chaque saison : intégration des données dans la plateforme Quonops® de Quiet-Oceans et ajustement afin de calibrer les cartes de bruit ;
- Traitement bioacoustique des données : analyse indépendante des données collectées par les enregistreurs acoustiques et des données collectées par les systèmes autonomes C-POD :
 - détection automatique des signaux biologiques dans les enregistrements sonores : utilisation du logiciel PAMGuard ;
 - C-POD : logiciel spécifique fourni par le constructeur Chelonia Limited.Identification des espèces qui vocalisent dans l'aire d'étude et interprétation de leur présence et comportements.

2.3 Constat issus de l'Etat initial et de l'Etat de référence

- Les données issues des C-POD sont peu satisfaisantes :
 - Absence de détection de signaux pourtant enregistrés sur l'enregistreur acoustique positionné à proximité (problème non-expliqué en l'absence d'information sur l'algorithme de traitement intégré aux C-POD) ;
 - Impossibilité de valider la mesure par un opérateur en post-traitement car la donnée acoustique brute n'est pas conservée par le système C-POD.⇒ Recommandation du bureau d'étude spécialisé : **Préférer l'utilisation d'enregistreurs acoustiques pour le suivi.**
- Compte tenu de la dispersion du bruit ambiant et des sources de bruits environnantes, il n'existe pas de véritable « zone témoin » pour réaliser un suivi avec comparaison de données acquises en parallèle.
⇒ Recommandation du bureau d'étude spécialisé : **Réaliser un suivi dont l'analyse des données permet de comparer l'ambiance acoustique et la présence des mammifères marins AVANT / PENDANT les travaux / APRES les travaux.**
- Le secteur Nord-Ouest semble être une zone privilégiée par les mammifères marins : constat issu des enregistrements acoustiques et confirmé par les observations visuelles en mer.
⇒ **Approfondir le suivi dans ce secteur afin d'évaluer l'influence du projet sur la fréquentation de l'aire d'étude élargie.**



3 Fiche mesure MSU8 – phase d'exploitation

MSU 8	SUIVI	ECOSYSTEMES
	Phase d'exploitation	Mammifères marins
SUIVI DES MAMMIFERES MARINS PAR ACOUSTIQUE PASSIVE		
<i>Objectifs du suivi</i>		
<ul style="list-style-type: none"> • Evaluer l'impact du bruit du parc éolien sur le bruit ambiant ; • Suivre la fréquentation de la zone par les mammifères marins dans le contexte de l'existence d'un parc éolien en fonctionnement. 		
<i>Calendrier prévisionnel de mise en œuvre de ce protocole</i>		
Phase(s)		Validation préalable
Exploitation (éoliennes en fonctionnement)		CTE – juin 2023
<i>Protocole du suivi</i>		
<p>Protocole de terrain</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Suivi du bruit ambiant et des mammifères marins : déploiement de 4 enregistreurs acoustiques <ul style="list-style-type: none"> ○ 1 enregistreur au Nord-ouest : 47° 12.3702' N 002° 41.1949' W , localisation légèrement déplacée en limite extérieur du parc, positionnement au plus près de la localisation de « Cpod1_E » lors de l'Etat de Référence ; ○ 1 enregistreur au Sud-ouest : position antérieure = 47° 08.0850' N 002° 43.6975'W, nouvelle position à déterminer suite à plusieurs relevages de matériel par des engins de pêche lors des suivis antérieurs : échanges en cours dans le cadre de la demande d'AOT du DPM pour détermination d'une zone à proximité mais évitant les risques d'interférence avec les engins de pêche (cf. carte : pointillés violet); ○ 1 enregistreur au Sud-est : 47° 07.5412' N 002° 35.2906' W, localisation légèrement déplacée en limite extérieur du parc, positionnement au plus près de la localisation de « CPOD_3374 » lors de l'Etat de Référence. ○ 1 enregistreur dans le Mor Braz : 47° 18.5547' N 002° 52.4947' W, à environ 20km au Nord-Ouest du parc éolien ○ Fréquence de suivi = 3 cycles été + hiver : <ul style="list-style-type: none"> ▪ 1 mois en juillet / août 2023 ▪ 1 mois en janvier / février 2024 ▪ 1 mois en juillet / août 2024 ▪ 1 mois en janvier / février 2025 ▪ 1 mois en juillet / août 2025 ▪ 1 mois en janvier / février 2026 ○ Fréquence d'échantillonnage = même protocole qu'avec les enregistreurs acoustiques déployés lors de l'état de référence : 3 minutes d'enregistrement toutes les 10 minutes (3min ON / 7min 		



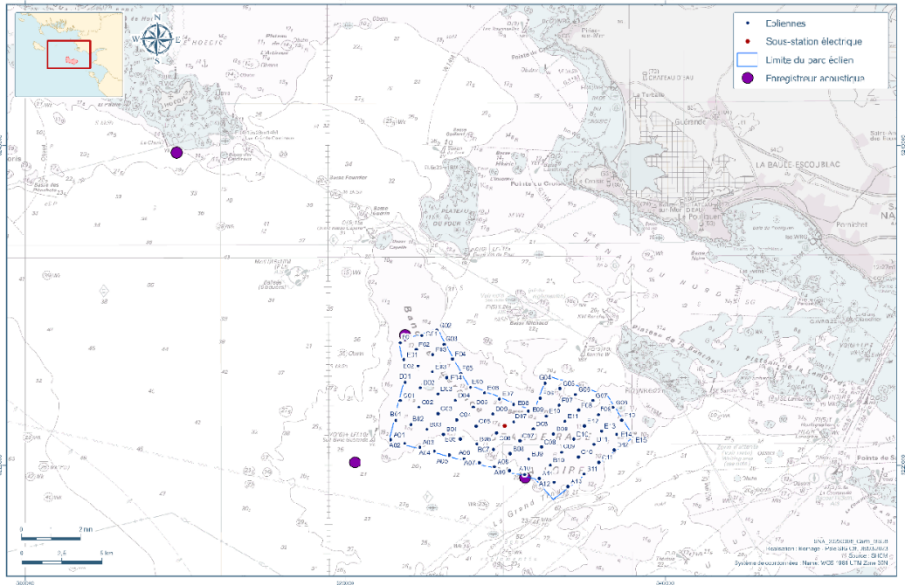
OFF)		
<ul style="list-style-type: none"> ○ Distance de détection des mammifères marins variable selon le bruit ambiant instantané, les caractéristiques acoustiques d'émission des espèces considérées et les conditions de propagation du son autour de l'hydrophone : de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres. 		
2. Mesures <i>in situ</i> du bruit d'une éolienne en fonctionnement et du bruit du parc éolien :		
<ul style="list-style-type: none"> ○ positionnement d'un enregistreur acoustique à proximité d'une l'éolienne : distance à déterminer avec le bureau d'étude expert ; ○ utilisation complémentaire des données enregistrées aux stations périphériques ; ○ 1 mois de mesure à l'été 2023 et/ou 1 mois de mesure en hiver 2024 en fonction des données récoltées v/s les conditions de vent in situ. 		
Analyse des données et interprétation		
<ul style="list-style-type: none"> • Modélisation - cartographie de l'empreinte acoustique du parc en fonctionnement : <ul style="list-style-type: none"> ○ pour différentes vitesses de vent ; ○ pour différentes gammes de fréquence ; • Traitement bioacoustique des données par détection automatique des signaux biologiques dans les enregistrements sonores et évaluation de la portée de détection <i>in situ</i> ; • Comparaison de la fréquentation avec les données de l'Etat de référence En la matière, la méthode de catégorisation de la fréquentation utilisée lors de l'état de référence sera reprise afin d'utiliser le même référentiel de caractérisation de la fréquentation, cf. tableau ci-dessous (source Quiet Oceans) :		
Fréquentation	Caractéristiques	
	Périodes de détections	Taux de présence sur la période d'étude
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	Périodes de détections irrégulières dans le temps	10 à 50%
Exceptionnelle	Une ou deux périodes de détections sur la période d'étude	< 10%
Absence	Absence de détection	0 %
<ul style="list-style-type: none"> • Evaluation de la fréquentation par rapport aux niveaux de bruit engendré par le parc éolien ; • Mise en perspective avec les observations visuelles opportunistes depuis les navires en charge de la maintenance du parc éolien et les données recueillies dans le cadre des observations visuelles opportunistes des mammifères marins dans le cadre de la mesure de suivi MSU10 (Avifaune) (comparaisons qualitatives en terme de présence / absence). L'analyse des données devra s'attacher à répondre aux questions suivantes :		
<ul style="list-style-type: none"> • Quel est l'impact du parc éolien en fonctionnement sur le bruit ambiant ? • Les mammifères marins sont-ils présents à proximité du parc éolien ? • Un secteur tel que le Mor Braz, connu pour être assez fréquentés par les mammifères marins, est-il 		

toujours fréquenté par les mammifères marins ?

Restitution des résultats

- Un rapport intermédiaire après chaque campagne de suivi ;
- Un rapport final courant 2026, contenant l'interprétation de l'ensemble des résultats acquis dans le cadre de cette mesure de suivi.

Suivi du parc éolien en mer de St Nazaire par acoustique passive



LOCALISATION DES ENREGISTREURS DE SUIVI ACOUSTIQUE

Partenaires envisagés

Bureau d'étude expert en acoustique et bioacoustique sous-marine

4 Précisions relatives à certains points du protocole

4.1 Absence de recours à la technique du C-POD

Dans le cadre de l'Etat de Référence (2019-2020), deux types de systèmes ont été utilisés : des enregistreurs acoustiques passifs (pendant 1 mois) et des systèmes automatiques C-POD (pendant 3 mois). L'enregistreur acoustique capte tous types de signaux entre 10Hz et 180kHz, par cycles de 3 minutes ON et 7 minutes OFF, afin d'obtenir un échantillon représentatif. L'enregistreur automatique C-POD ne capte que les clics, en interprète le



signal selon un algorithme intégré dans le système C-POD (et non communiqué à l'utilisateur), et restitue l'information traitée sans enregistrement parallèle de la donnée acoustique brute. Il n'est donc pas possible à l'utilisateur de connaître le traitement fait de la donnée ni de retraiter *a posteriori* les signaux en cas d'incertitude sur les résultats.

Lors des suivis 2019-2020, un hydrophone et un C-POD ont été placés côte à côte afin de vérifier la concordance de leurs données. Les résultats ont montré que le C-POD ne capte pas tous les signaux et que, dans la cas d'une ambiance sonore bruyante, certains signaux anthropiques ont été interprétés comme des signaux biologiques.

Pour toutes ces raisons, il a été proposé et validé en CTE (17 novembre 2020) de ne pas recourir à la technologie des C-POD dans la cadre de la mesure de suivi MSU8, mais d'augmenter l'effort de suivi par enregistreur acoustique passif en ajoutant une station de mesure.

4.2 Choix d'un suivi additionnel dans le secteur du Mor Braz

Depuis le suivi en phase de construction, un enregistreur acoustique a été déployé dans le secteur géographique du Mor Braz. Ce secteur a été sélectionné en concertation avec les membres du CTE et bureaux d'étude experts qui sont intervenus dans la cadre de l'Etat de Référence pour le suivi du bruit sous-marin et des mammifères marins (MSU8) et les suivis opportunistes visuels de la mégafaune marine (MSU10). De nombreuses observations visuelles de mammifères marins ont été réalisées dans ce secteur qui revêt un intérêt particulier pour ces espèces.

En conséquence, il a été jugé intéressant de procéder à un suivi de la présence / de l'absence de mammifères marins dans ce secteur pendant la période de travaux puis en phase d'exploitation en mettant ces résultats en perspective des niveaux de bruits dans le périmètre d'enregistrement. La cartographie des empreintes sonores propres au parc éolien en fonctionnement permettra de juger de l'impact sonore du parc dans le secteur du Mor Braz.

4.3 Bruit d'une éolienne en fonctionnement : état des connaissances

Les bruits générés par les éoliennes se produisent principalement des sons aérodynamiques large bande, par exemple lorsque les pales de l'éolienne passent au niveau du mât (différence d'écoulements) ou lors de l'interaction des pales avec des turbulences atmosphériques.

Ces sons ne se transmettent pas directement au milieu marin, mais les vibrations se propageant *via* le mât et les fondations jusque dans la colonne d'eau et le sol. Le bruit sous-marin des éoliennes en fonctionnement est essentiellement caractérisé par un bruit continu large bande avec un maximum d'énergie compris entre 16 Hz et 1 000 Hz (Betke, 2006; Betke et al., 2004; Wahlberg & Westerberg, 2005). Les niveaux sonores dépendent de la taille des éoliennes, du type de fondation et de la vitesse du vent. Le niveau de bruit augmente avec l'accélération de la rotation. Parallèlement, l'accélération de la vitesse du vent augmente naturellement le bruit ambiant sous-marin. Selon Nedwell et al. (2003), la différence entre le bruit sous-marin de l'éolienne et le bruit sous-marins ambiant reste de ce fait à un niveau constant.