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

15/04/2024

Rapport élaboré le 15/04/2024, 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 suite à la relecture de Nathalie Tertre	Elie Retailleau (SOMME) Gaëtan Richard (SOMME)	Delphine Mathias (SOMME)
3	15/04/2024	Mise à jour suite au retour des experts du CTE	Elie Retailleau (SOMME) Gaëtan Richard (SOMME)	Delphine Mathias (SOMME)

Contacts :

SOMME - Société d'Observation Multi-Modale de l'Environnement
Siège social : 2 rue de Suède, Bloc III Porte Océane, 56400 Auray.
Antenne brestoise : 38 rue Jim Sévellec, 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 document est la propriété de PBG.

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 Mapple 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.

Citation :
Retailleau E., Richard G., Mathias D. (2023). 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. Bureau d'études SOMME, Brest, France.

Table des matières

TABLE DES MATIERES IV

LISTE DES FIGURES VI

LISTE DES TABLEAUX VIII

DEFINITIONS IX

1 INTRODUCTION : PRESENTATION DU CONTEXTE DE L'ETUDE 1

2 NOTIONS THEORIQUES 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 6
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 MATERIEL ET METHODES 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 22

4 RESULTATS 28

4.1 DONNEES ACQUISES 28
4.2 DESCRIPTION GENERALE DU BRUIT AMBIANT 28
4.3 CONTRIBUTION DES ACTIVITES ANTHROPIQUES 33
4.3.1 Trafic maritime 33
4.3.2 Bruit généré par le parc éolien 36
4.4 CONTRIBUTION DES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES 39
4.4.1 Influence du vent 39
4.4.2 Influence de la houle 40
4.5 CONTRIBUTION DE LA FAUNE 41
4.6 FREQUENTATION DE L'AIRE D'ETUDE PAR LES CETACES 44
4.6.1 Présence de delphinidés 44
4.6.2 Présence des marsouins 49

5 INTERPRETATION DES RESULTATS ET DISCUSSION 52

5.1 LES DIFFERENTS CONTRIBUTEURS AU PAYSAGE ACOUSTIQUE 52

5.1.1 Le parc éolien 52
5.1.2 Le trafic maritime 52
5.1.3 Le vent 52
5.1.4 La houle 53
5.1.5 La faune benthique 53
5.1.6 Comparaison avec les suivis précédents 55
5.2 FREQUENTATION DE LA ZONE PAR LES CETACES 56
5.2.1 Delphinidés 56
5.2.2 Marsouins 58
5.2.3 Limites du suivi acoustique des cétacés 60
6 CONCLUSION 61
7 BIBLIOGRAPHIE 64
8 ANNEXES 68
8.1 DETERMINATION DES EVENEMENTS DE PRESENCE DE DELPHINIDES 68
8.2 RESULTATS DES FREQUENTATIONS PAR LES CETACES OBTENUS AVEC UN CYCLE CONTINU 71
8.2.1 Présence de delphinidés 71
8.2.2 Présence des marsouins 75
8.3 PROTOCOLE DE SUIVI EN PHASE D'EXPLOITATION 77

Liste des figures

FIGURE 1. CHAINE DE TRANSMISSION ACOUSTIQUE D'UNE SOURCE VERS UN RECEPTEUR (CHAUVAUD, S., CHAUVAUD, L., & JOLIVET, A., 2018; BONNEL, J., CHAUVAUD, S., CHAUVAUD, L., MARS, J., MATHIAS, D., & FREDERIC, O., 2022). 3
FIGURE 2. REPRESENTATIONS GRAPHIQUES POUR DECRIE UN SIGNAL ACOUSTIQUE. L'EXEMPLE ICI REPRESENTE DEUX TONALES A 50 ET 100 HZ. 6
FIGURE 3. LES DIFFERENTES SOURCES SONORES CONSTITUANT LES PAYSAGES ACOUSTIQUES. 8
FIGURE 4. SPECTROGRAMMES DE SIFFLEMENTS EMIS PAR DES DAUPHINS COMMUNS. EXTRAIT DE SOLDEVILLA ET AL., 2008 10
FIGURE 5. SPECTROGRAMME (A), OSCILLOGRAMME (B) ET SPECTRE ACOUSTIQUE (C) DE CLICS EMIS PAR UN DAUPHIN COMMUN. FIGURE REALISEE A PARTIR DE DONNEES FOURNIES PAR PAPALE ET AL., 2015 11
FIGURE 6. SPECTROGRAMME (A), OSCILLOGRAMME (B) ET SPECTRE ACOUSTIQUE (C) DE CLICS EMIS PAR UN MARSOUIN COMMUN. FIGURE REALISEE A PARTIR DE DONNEES INTERNES A SOMME. 12
FIGURE 7. SYSTEME D'ACQUISITION ACOUSTIQUE LARGE BANDE (ENREGISTREUR ET HYDROPHONE) POSITIONNE SUR UN MOUILLAGE DE SUB-SURFACE ET PRET A ETRE DEPLOYE (SOURCE : SOMME). 15
FIGURE 8. SCHEMA DU MOUILLAGE UTILISE. 16
FIGURE 9. LOCALISATIONS DES STATIONS ACOUSTIQUES. 17
FIGURE 10 : DIFFERENTES METRIQUES UTILISEES POUR EVALUER LES NIVEAUX DE BRUIT. 19
FIGURE 11. CAPTURE D'ECRAN DE L'INTERFACE PAMGUARD INCLUANT LES MODULES DE DETECTION DE CLICS (FLECHES NOIRES) ET DE SIFFLEMENTS (WMD ; COURBES BLEUES). 23
FIGURE 12. EXEMPLES DES SPECTROGRAMMES DE BONNES ET FAUSSES DETECTIONS (DE DAUPHIN A GAUCHE ET MARSOUIN A DROITE) CLASSEES PAR L'ALGORITHME D'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE PUIS VERIFIEES PAR UN ACOUSTICIEN SOMME. 24
FIGURE 13. EXEMPLE D'UN SPECTROGRAMME D'UNE MINUTE SUR LA BANDE DE FREQUENCE 1 A 40 KHZ, AVEC PRESENCE DE BUZZES DE DAUPHINS. 25
FIGURE 14. SCHEMA D'UN DIAGRAMME EN VIOLON EN COMPARAISON AVEC UN DIAGRAMME EN BOITE (BOXPLOT). 27
FIGURE 15. SUIVI TEMPOREL DES NIVEAUX DE BRUIT AMBIANT SPL_{RMS} PAR STATION. LES POINTS ROUGES CORRESPONDENT AUX PASSAGES DE NAVIRE DETECTES. 29
FIGURE 16. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES NIVEAUX SONORES SPL_{RMS} (DB RE 1 MPA) ET LARGES BANDES (INTEGRES DANS LES GAMMES DE FREQUENCES 10-30 HZ, 10-250 HZ, 100-1000 HZ, 5600-7100 HZ ET 20-40000 HZ ; DB RE 1 MPA^2) ENREGISTRES POUR CHAQUE STATION. 30
FIGURE 17. SPECTRES MEDIANS DU BRUIT AMBIANT ENREGISTRE AU SEIN DE CHAQUE STATION. 31
FIGURE 18. SPECTROGRAMME LONG TERME CALCULE SUR UNE PERIODE D'UNE SEMAINE ENREGISTREE PAR LA STATION S1. 32
FIGURE 19. SPECTROGRAMME D'UN PASSAGE DE NAVIRE ENREGISTRE PAR LA STATION MB. 33
FIGURE 20. SPECTROGRAMME MONTRANT DES SIGNAUX GENERES PAR UNE MANŒUVRE DE "BOAT LANDING" ET UN PASSAGE DE NAVIRE, ENREGISTRE AU NIVEAU DE LA STATION S1. 34
FIGURE 21. SPECTRE ACOUSTIQUE DU "BOAT LANDING" ET DU PASSAGE DE NAVIRE VISIBLE SUR LA FIGURE 20. L'EXCES DE SIGNAL GENERE PAR CES ACTIVITES PAR RAPPORT AU BRUIT AMBIANT (FIGURE 20) EST PRESENTE EN DESSOUS DE CHAQUE SPECTRE. . 35
FIGURE 22. RELATION ENTRE LA VITESSE DU VENT, LA VITESSE DE ROTATION DES PALES DE L'EOLIENNE F1 (RPM : ROTATION PAR MINUTE) ET LE NIVEAU DE VIBRATION MOYEN DE SON MAT. 36
FIGURE 23. RELATION ENTRE LES NIVEAUX DE BRUIT REÇUS DANS LA BANDE DE FREQUENCE 10-30 HZ ET LA VITESSE DE ROTATION (RPM) DE L'EOLIENNE LA PLUS PORCHE POUR CHAQUE STATION (R EST LA DISTANCE STATION – EOLIENNE). LES PERIODES AVEC UNE HOULE SUPERIEURE A 1.5M N'ONT PAS ETE PRISES EN COMPTE. 37
FIGURE 24. EXCES DE SIGNAL ENREGISTRE AU NIVEAU DES STATIONS SITUEES DANS OU A PROXIMITE DIRECTE DU PARC PAR RAPPORT AU BRUIT AMBIANT ENREGISTRE AU NIVEAU DE LA STATION TEMOIN SW (SITUEE EN DEHORS DU PARC). 38
FIGURE 25. SPECTRES MEDIANS DU BRUIT ENREGISTRE AU SEIN DES STATIONS SW ET MB EN FONCTION DES CONDITIONS DE VENTS (ECHELLE DE BEAUFORT). LA DEUXIEME LIGNE DE FIGURES MONTRE L'EXCES DE SIGNAL GENERE PAR UN VENT FRAICHISSANT DE 1 A 6 BFS. 39
FIGURE 26. SPECTRES MEDIANS DU BRUIT ENREGISTRE AU SEIN DES STATIONS EN FONCTION DES CONDITIONS DE HOULE. 40
FIGURE 27. PERIODOGRAMMES DE LOMB-SCARGLE CALCULES POUR CHAQUE STATION, SUR LES SERIES TEMPORELLES DES NIVEAUX SONORES REÇUS DANS LA BANDE DE FREQUENCE CORRESPONDANT AU TIERS D'OCTAVE CENTREE AUTOUR DE 6 KHZ ($SPL_{5.6\text{-}7.1kHz}$). LES BANDES VERTES INDIQUENT LES PERIODES EGALES A 6, 12 ET 24H. 42
FIGURE 28. NIVEAUX DE BRUIT ENREGISTRES DANS LA BANDE DE TIERS D'OCTAVE CENTREE AUTOUR DE 6 KHZ EN FONCTION DES HEURES DE LA JOURNEE POUR LA STATION SW. 43
FIGURE 29. SPECTROGRAMMES DE VOCALISES DE DELPHINIDES INCLUANT DES (A) SIFFLEMENTS ENREGISTRES SUR LA STATION SE LE 10 AOUT 2023 (12H17) ET (B) DES CLICS D'ECHOLOCALISATION (DONT DES « BUZZES ») ENREGISTRES SUR LA STATION DU MB LE

19 AOUT 2023 (16H10). LES FIGURES C ET D REPRESENTENT RESPECTIVEMENT UN OSCILLOGRAMME (C) ET UN SPECTRE DE PUISSANCE (D) D'UN BUZZ. 44
FIGURE 30. OCCURRENCES DES PRESENCES ACOUSTIQUES DE DELPHINIDES SUR LES 4 STATIONS REPRESENTEES PAR LE NOMBRE D'HEURES POSITIVES PAR JOUR (DIAGRAMMES EN BARRE) ET DE LA REPARTITION HORAIRE DE DETECTION DE SIFFLEMENTS ET DE BUZZES (DIAGRAMMES EN ROSACE, HEURES POSITIVES). 46
FIGURE 31. COMPARAISON ENTRE LES STATIONS DU NOMBRE D'EVENEMENTS DE PRESENCE ACOUSTIQUE DES MARSOUINS PAR HEURES D'ENREGISTREMENT, POUR LES 3 DIFFERENTES PERIODES JOURNALIERES : JOUR, NUIT ET AUBE - CREPUSCULE..... 48
FIGURE 32. DENSITES DE PROBABILITE DES POURCENTAGES DE MINUTES POSITIVES AVEC PRESENCE DE BUZZES (ROUGE) ET AVEC PRESENCE DE SIFFLEMENTS (BLEU), REPRESENTEES SOUS FORME DE DIAGRAMMES EN VIOLON PAR STATION. CES DIAGRAMMES PERMETTENT DE DECRIRE LA DISTRIBUTION DES POURCENTAGES DE MINUTES POSITIVES PAR EVENEMENT DE PRESENCE, AINSI UNE AUGMENTATION DES COURBES REVELENT DONC UNE AUGMENTATION DE LA PROBABILITE D'OBSERVER CES VALEURS. 48
FIGURE 33. SPECTROGRAMME (A) D'UN TRAIN DE CLICS DE MARSOUIN ENREGISTRE SUR LA STATION DU MOR BRAZ LE 9 AOUT 2023 (22H46). LES FIGURES B ET C PRESENTENT RESPECTIVEMENT UN OSCILLOGRAMME (B) ET UN SPECTRE (C) D'UN CLIC. 49
FIGURE 34. OCCURRENCE DES CLICS DE MARSOUINS SUR LES DEUX STATIONS REVELANT DES PRESENCES (LE GRAPHIQUE EN BARRE REPRESENTE LE NOMBRE D'HEURES POSITIVES PAR JOUR AU COURS DU SUIVI ET LES DIAGRAMMES EN ROSACE, LA REPARTITION HORAIRE DE CES HEURES POSITIVES). 50
FIGURE 35. COMPARAISON ENTRE LES STATIONS DU NOMBRE D'EVENEMENTS DE PRESENCE ACOUSTIQUE DES MARSOUINS PAR HEURES D'ENREGISTREMENT, POUR LES 3 DIFFERENTES PERIODES JOURNALIERES : JOUR, NUIT ET AUBE - CREPUSCULE..... 51
FIGURE 36. CARTOGRAPHIE DES HABITATS BENTHIQUES REFERENCES DANS LA ZONE D'ETUDE REALISEE LORS DE L'ETUDE D'IMPACT DU PROJET. 54
FIGURE 37. COMPARAISON DES SPECTRES DE BRUIT AMBIANT RELEVES EN ETE LORS DE L'ETAT DE REFERENCE ET DES PHASES DE CONSTRUCTION ET D'EXPLOITATION. 56
FIGURE 38. COMPARAISON DES BANDES DE FREQUENCES ASSOCIEES AUX DIFFERENTES SOURCES SONORES IDENTIFIEES LORS DE CE SUIVI AVEC LES GAMMES D'AUDITION DE DIVERS GROUPES D'ESPECES MARINES..... 61
FIGURE 39. COMPARAISON DU BRUIT AMBIANT MEDIAN REÇU AU NIVEAUX DES STATIONS NW, SW, SE ET MB AVEC LES AUDIOGRAMMES DES CETACES BASSE FREQUENCE (LF), MOYENNE FREQUENCE (MF) ET HAUTE FREQUENCE (HF). 62
FIGURE 40. EXEMPLE DE SEQUENCES DE DETECTIONS DE SONS DE DELPHINIDE AU COURS DU TEMPS ET DETERMINATION DE 3 EVENEMENTS DE PRESENCE BASE SUR UN INTERVALLE INTER-DETECTION DE 10 MIN (FIGURE 41). 68
FIGURE 41. FREQUENCE DES INTERVALLES (MINUTES) INTER-DETECTIONS DE SIFFLEMENTS DE DAUPHINS SUR LE CYCLE EN CONTINUE.69
FIGURE 42. FREQUENCE DES INTERVALLES (MINUTES) INTER-DETECTIONS DE SIFFLEMENTS DE DAUPHINS SUR LE CYCLE A 30%. 70
FIGURE 43. OCCURRENCES DES PRESENCES ACOUSTIQUES DE DAUPHINS SUR LES 4 STATIONS REPRESENTEES PAR LE NOMBRE D'HEURES POSITIVES PAR JOUR (DIAGRAMMES BARS) ET DE LA REPARTITION HORAIRE DE DETECTION DE VOCALISES ET DE BUZZES (DIAGRAMMES EN ROSACE, HEURES POSITIVES), OBTENUES AVEC UN CYCLE D'ENREGISTREMENT CONTINU. 72
FIGURE 44. COMPARAISON ENTRE LES STATIONS DU NOMBRE D'EVENEMENTS DE PRESENCE ACOUSTIQUE (OBTENUES AVEC UN CYCLE CONTINUE) DE DELPHINIDES PAR HEURES D'ENREGISTREMENT, POUR LES 3 DIFFERENTES PERIODES JOURNALIERES : JOUR, NUIT ET AUBE - CREPUSCULE..... 74
FIGURE 45. DENSITES DE PROBABILITE DES POURCENTAGES DE MINUTES POSITIVES AVEC PRESENCE DE BUZZES (ROUGE) ET AVEC PRESENCE DE SIFFLEMENTS (BLEU), REPRESENTEES SOUS FORME DE DIAGRAMMES EN VIOLON PAR STATION, AVEC UN CYCLE D'ENREGISTREMENT CONTINU. CES DIAGRAMMES PERMETTENT DE DECRIRE LA DISTRIBUTION DES POURCENTAGES DE MINUTES POSITIVES PAR EVENEMENT DE PRESENCE, AINSI UNE AUGMENTATION DES COURBES REVELENT DONC UNE AUGMENTATION DE LA PROBABILITE D'OBSERVER CES VALEURS. 75
FIGURE 46. OCCURRENCE DES CLICS DE MARSOUINS SUR LES DEUX STATIONS REVELANT DES PRESENCES (LE GRAPHIQUE EN BARRE REPRESENTE LE NOMBRE D'HEURES POSITIVES PAR JOUR AU COURS DU SUIVI ET LES DIAGRAMMES EN ROSACE, LA REPARTITION HORAIRE DE CES HEURES POSITIVES). 75
FIGURE 47. COMPARAISON ENTRE LES STATIONS DU NOMBRE D'EVENEMENTS DE PRESENCE ACOUSTIQUE (OBTENUES AVEC UN CYCLE CONTINUE) DES MARSOUINS PAR HEURES D'ENREGISTREMENT, POUR LES 3 DIFFERENTES PERIODES JOURNALIERES : JOUR, NUIT ET AUBE - CREPUSCULE..... 76

Liste des tableaux

TABLEAU 1. RECAPITULATIF DES ETUDES ET REUNIONS MENEES SUR LES COMPOSANTES ENVIRONNEMENTALES BRUIT ET MAMMIFERES MARINS DEPUIS L'ETAT INITIAL DANS LE CADRE DU PROJET DE PARC EOLIEN DU BANC DE GUERANDE (SOURCE : EDF-RE)..... 1
TABLEAU 2. RESUME DES DIFFERENTES METRIQUES UTILISEES POUR DECRIRE LES NIVEAUX SONORES..... 5
TABLEAU 3. CARACTERISTIQUES DES STATIONS DEPLOYEES DANS LE CADRE DE CE SUIVI (LES LIGNES GRISEES CORRESPONDENT AUX STATIONS ADDITIONNELLES UTILISEES POUR CARACTERISER LE BRUIT DES EOLIENNES EN FONCTIONNEMENT). 18
TABLEAU 4. FREQUENCES CENTRALES ET BORNES DES BANDES DE TIERS D'OCTAVES UTILISEES DANS CETTE ETUDE. 20
TABLEAU 5. PARAMETRES UTILISES POUR LES DETECTEURS DE SIFFLEMENT DES DELPHINIDES (WMD)..... 23
TABLEAU 6. PARAMETRES UTILISES POUR LES DETECTEURS DE CLICS DE MARSOUINS (CD)..... 23
TABLEAU 7. DEFINITION DE LA FREQUENTATION PAR LES MAMMIFERES MARINS (CHOMPRET ET AL., 2019 ; 2022). 26
TABLEAU 8. RESUME DU NOMBRE DE DETECTION DE PASSAGES DE NAVIRES PAR STATION. 33
TABLEAU 9. RESUME DES DETECTIONS DE DELPHINIDES (AVEC UN CYCLE D'ACQUISITION DE 30 %, VOIR ANNEXE 8.2.1 POUR LES RESULTATS AVEC UN CYCLE CONTINU). 47
TABLEAU 10. RESUME DES DETECTIONS DE MARSOUINS (AVEC UN CYCLE D'ACQUISITION DE 30 %, VOIR ANNEXE 8.2.2 POUR LES RESULTATS AVEC UN CYCLE CONTINU). 50
TABLEAU 11. COMPARAISON DES NIVEAUX SONORES ($SPL_{20\text{-}40000Hz}$) ENREGISTRES AU SEIN DES STATIONS NW, SE, SW ET MB (LES DISTANCES INDIQUEES CORRESPONDENT AUX DISTANCES SEPARANT LES STATIONS DES EOLIENNES LES PLUS PROCHES) AVEC CEUX RELEVES LORS DE L'ETAT DE REFERENCE ET LA PHASE DE CONSTRUCTION (CE TABLEAU PRESENTE LES NIVEAUX DE BRUIT MEDIANS AINSI QUE LES PREMIERS ET TROISIEMES QUARTILES ASSOCIES). 55
TABLEAU 12. SYNTHESE ET COMPARAISON DES FREQUENTATIONS DES STATIONS PAR LES MAMMIFERES MARINS OBSERVEES EN SAISON ESTIVALE DURANT L'ETAT DE REFERENCE (ETE 2019), LA PHASE DE CONSTRUCTION (ETE 2021 ET ETE 2022) ET DURANT LA PHASE D'EXPLOITATION (ETE 2023) DU PARC EOLIEN EN MER DU BANC DE GUERANDE. 59
TABLEAU 13. RESUME DES DETECTIONS DE DELPHINIDES (AVEC UN CYCLE D'ACQUISITION DE CONTINU). 73
TABLEAU 14. RESUME DES DETECTIONS DE MARSOUINS (AVEC UN CYLCE D'ACQUISITION DE 100 %)..... 76

Définitions

Abréviation	Définition
Clics NBHF	Clics "Narrow Band High Frequency", clics d'écholocalisation 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).
Niveaux sonores source	Niveaux sonores reçus à 1 m d'une source de bruit. Ces niveaux sont estimés à partir du bruit reçu à une certaine distance de la source et des pertes de propagation acoustique dans le milieu.
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 subdivisé en trois tiers d'octave.
PBG	Acronyme pour la société "Parc du Banc de Guérande" : société de projet exploitant le parc éolien en mer de Saint Nazaire pour le compte du consortium composé de EDF Renouvelables et de Mapple Power
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	« Source Level », niveau de bruit enregistré à 1 m d'une source sonore.
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 au large de Saint-Nazaire est entré en exploitation en 2023, devenant le premier parc éolien offshore en fonctionnement sur le littoral métropolitain français. Son développement et son exploitation sont portés par la société Parc du Banc de Guérande (PBG), pour le compte du consortium composé de EDF Renouvelables et de Mapple Power. La société PBG bénéficie en effet 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 (soit pendant d'exploitation du projet pour la troisième phase).

Cette étude acoustique (MSU8) s'inscrit dans le cadre du suivi de la phase d'exploitation du parc du banc de Guérande. 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

Ce document est la propriété de PBG.

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)
Date	**Prochaines échéances**
septembre 2024 (date à confirmer)	CTE n°11 : présentation du rapport de la première campagne de suivi en phase d'exploitation (campagne été 2023)

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*).

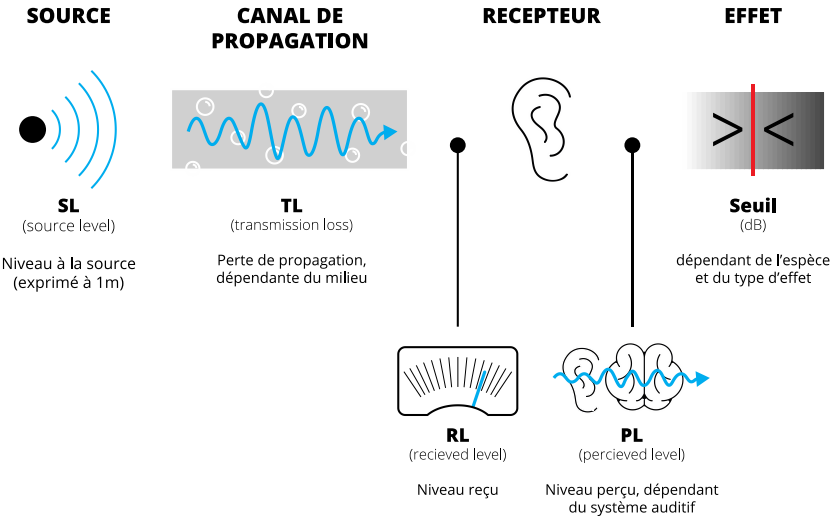


Figure 1. Chaine de transmission acoustique d'une source vers un récepteur (Chauvaud, S., Chauvaud, L., & Jolivet, A., 2018; Bonnel, J., Chauvaud, S., Chauvaud, L., Mars, J., Mathias, D., & Frédéric, O., 2022).

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 (*Pc-c* ou *Pp-p*) qui est la pression prise entre le maximum et le minimum de la pression acoustique, et la pression crête (*P0-c* ou *P0-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 μPa^2s.

- **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 µPa^2/Hz. Des niveaux larges bandes (exprimés en dB re 1 µPa^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 $SPL_{p\text{-}p}$) 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 µPa	Continu
Niveau d'exposition sonore	SEL	dB re. 1 µPa^{2}s	Impulsif
Niveau large bande	$SPL_{[Freq1\text{-}Freq2]}$	dB re. 1 µPa^2	Continu
Niveau de pression acoustique crête ou crête-crête	SPL_p ou $SPL_{p\text{-}p}$	dB re. 1 µPa	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.

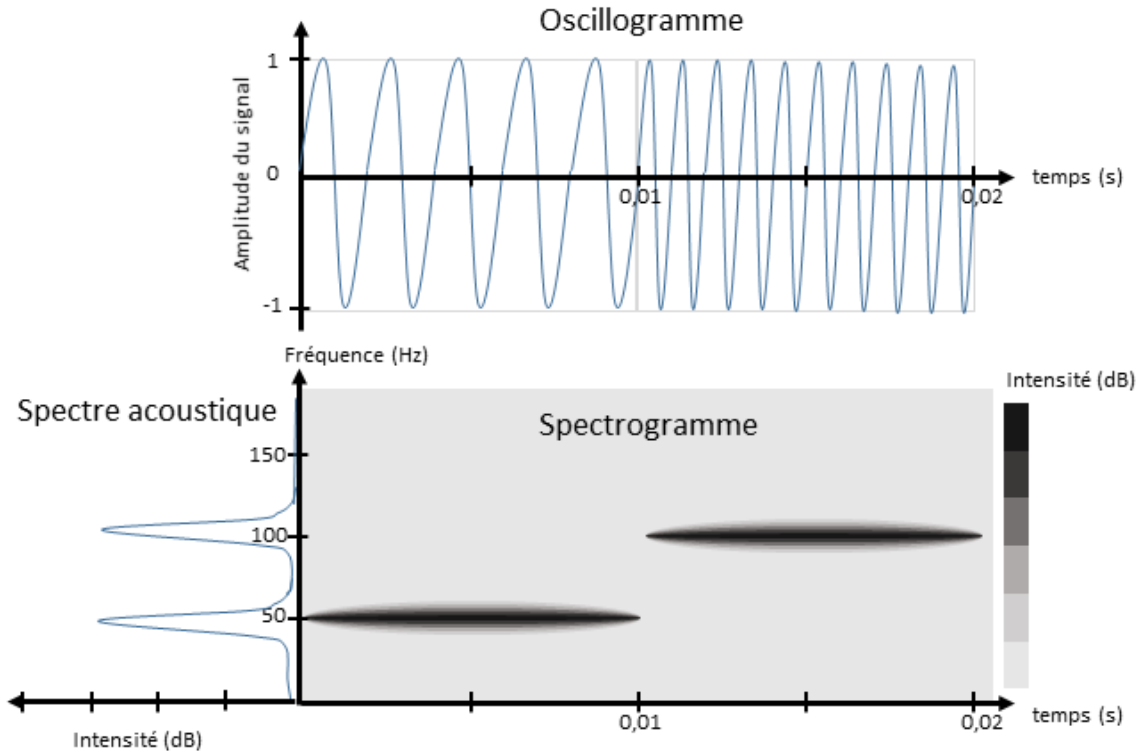


Figure 2. Représentations graphiques pour décrie un signal acoustique. L'exemple ici représente deux tonales à 50 et 100 Hz.

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 $TL_{spherique} = 20xlog(r)$ *[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 décroit alors en $1/r$ et les pertes de propagation dites « cylindriques » valent alors $TL_{cylindrique} = 10xlog(r)$ *[dB]* (Jensen *et al.,* 2011).
Les pertes par amortissement viennent s'additionner aux pertes géométriques et dépendent des propriétés physico-chimiques du milieu de propagation. Ces pertes résultent en partie du frottement visqueux qui convertie 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'écholocalisation 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*.).

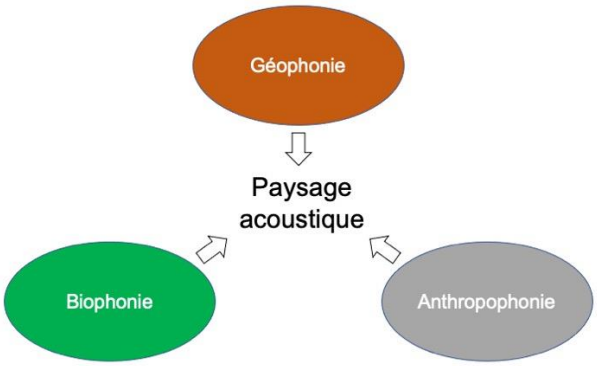


Figure 3. Les différentes sources sonores constituant les paysages acoustiques.

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 et de générer des clics d'écholocalisation (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, écholocalisation ; 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 inclues 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).

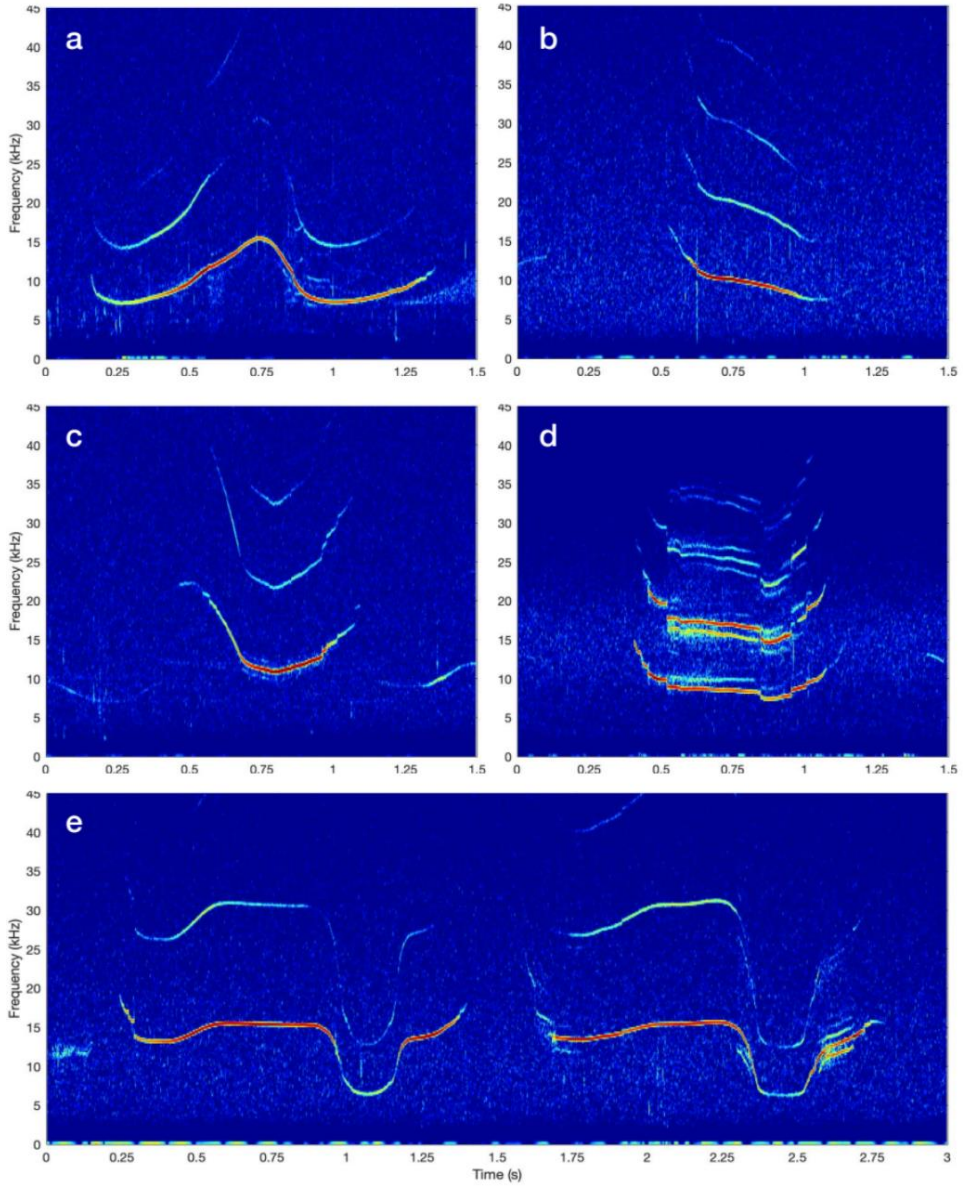


Figure 4. Spectrogrammes de sifflements émis par des dauphins communs. Extrait de Soldevilla et al., 2008

Les delphinidés émettent des trains de clics pour l'écholocalisation (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'écholocalisation (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 écholocalisation) 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'écholocalisation 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 µs (Simmonds *et al.,* 2004 ; Soldevilla *et al.,* 2008 ; Robbins *et al.,* 2016).

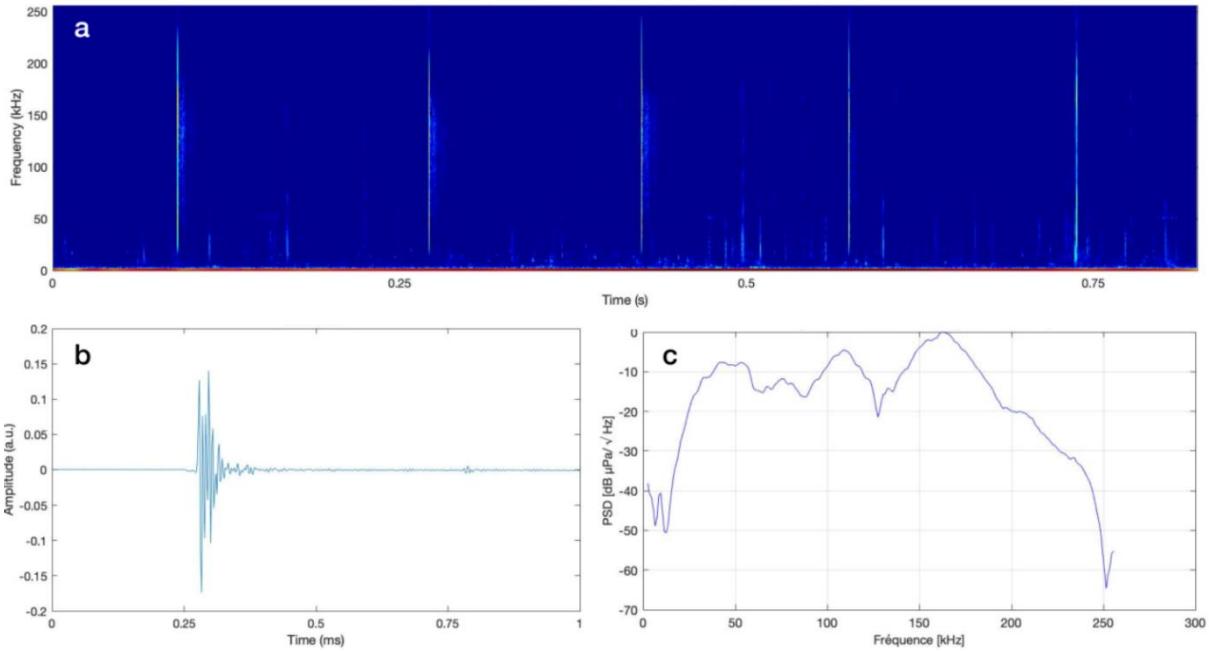


Figure 5. Spectrogramme (a), oscillogramme (b) et spectre acoustique (c) de clics émis par un dauphin commun. Figure réalisée à partir de données fournies par Papale et al., 2015

La similarité des répertoire acoustique (sifflements et clics d'écholocalisation) 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).

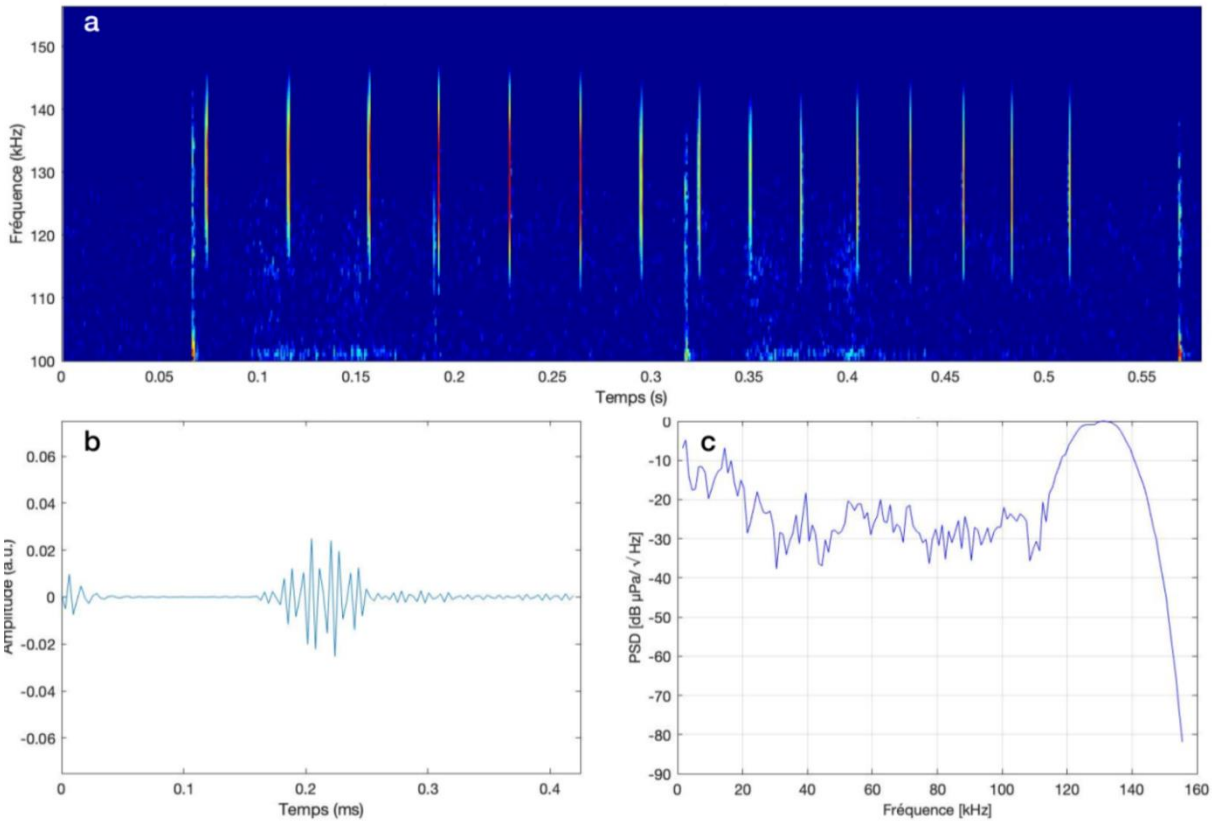


Figure 6. Spectrogramme (a), oscillogramme (b) et spectre acoustique (c) de clics émis par un marsouin commun. Figure réalisée à partir de données internes à SOMME.

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 µs. 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 est composée :

- D'un enregistreur autonome de données acoustiques brutes « Sylence-LP » (RTSYS) (Figure 7).
- D'un hydrophone large bande omnidirectionnel « HTI-99-HF » (S_H : −168 dB re 1 V µPa^{-1}).

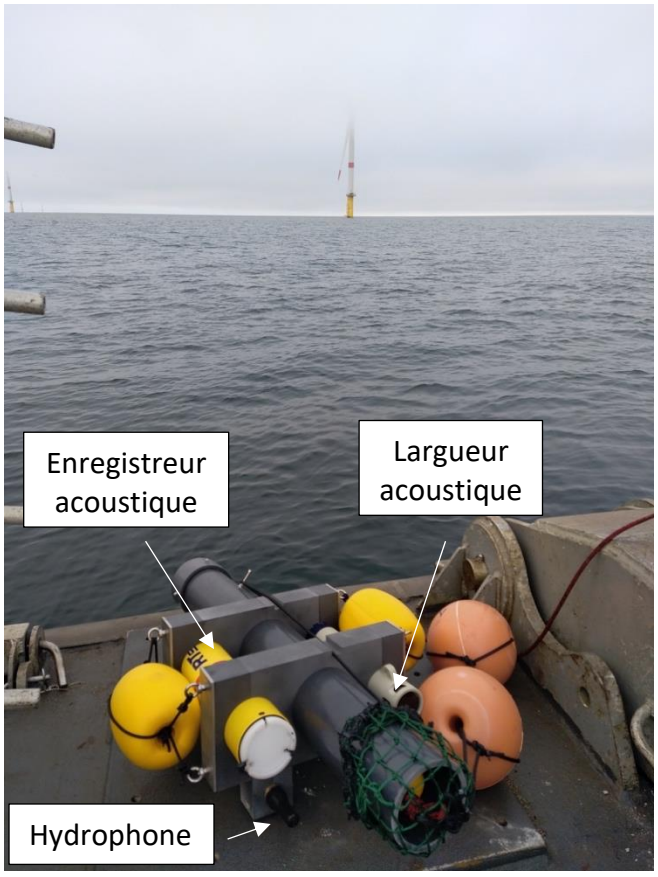


Figure 7. Système d'acquisition acoustique large bande (enregistreur et hydrophone) positionné sur un mouillage de sub-surface et prêt à être déployé (Source : SOMME).

Cette chaine 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 dB re 1 V µPa^{-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).

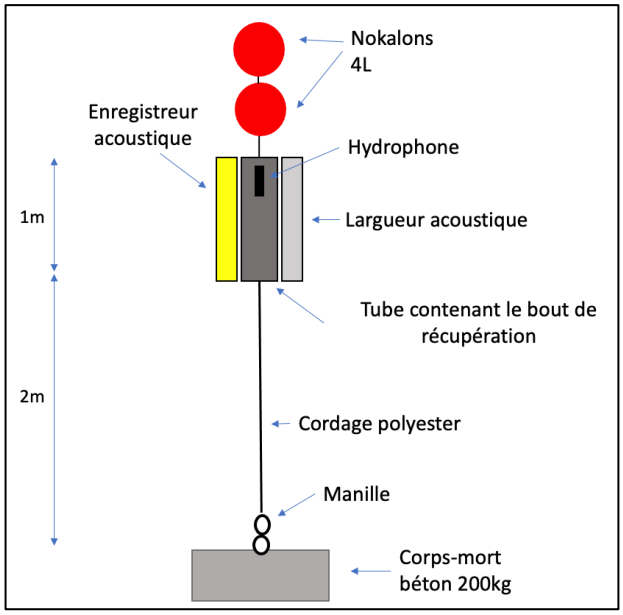


Figure 8. Schéma du mouillage utilisé.

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.

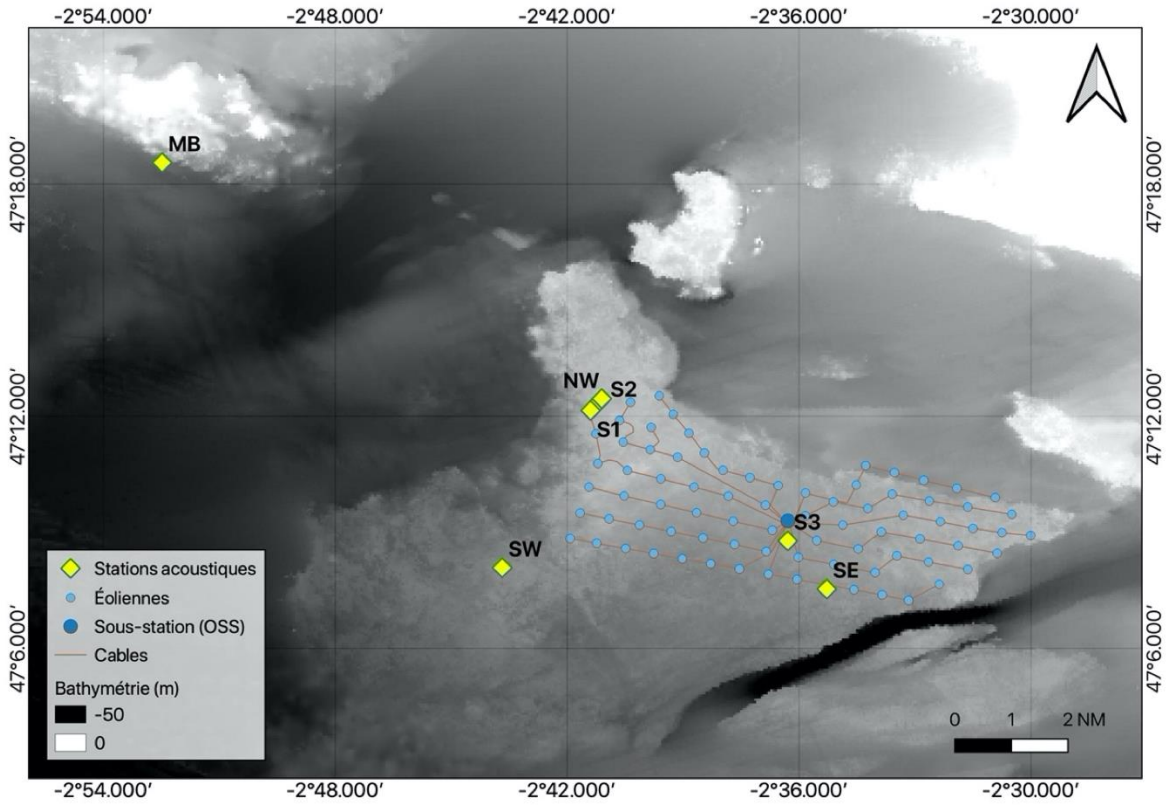


Figure 9. Localisations des stations acoustiques.

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)	Date déploiement	Date 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	09/08/2023	12/09/2023	09/08/2023 au 12/09/2023	Enregistreur large bande et hydrophone	-
SW	Sud-ouest du parc éolien	47°08.0868' N	2°43.6992' W	25	2640	09/08/2023	12/09/2023	09/08/2023 au 12/09/2023	Enregistreur large bande et hydrophone	-
SE	Sud-est du parc éolien	47°07.5413' N	2°35.2897' W	22	198	09/08/2023	12/09/2023	09/08/2023 au 30/08/2023	Enregistreur large bande et hydrophone	**Problème mémoire interne (arrêt de l'enregistrement le 30/08)**
MB	Mor Braz	47°18.5580' N	2°52.4935' W	30	18350	09/08/2023	12/09/2023	09/08/2023 au 12/09/2023	Enregistreur large bande et hydrophone	-
S1	Nord-ouest du parc éolien	47°12.1476' N	2°41.3950' W	14	75	09/08/2023	12/09/2023	09/08/2023 au 12/09/2023	Enregistreur large bande et hydrophone + GPR	-
S2	Nord-ouest du parc éolien	47°12.4539' N	2°41.1070' W	14	750	09/08/2023	12/09/2023	09/08/2023 au 12/09/2023	Enregistreur large bande et hydrophone + GPR	-
S3	Centre du parc éolien	47°08.7776' N	2°36.2918' W	20	725	09/08/2023	12/09/2023	09/08/2023 au 12/09/2023	Enregistreur large bande et hydrophone	-

Ce document est la propriété de PBG.

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 V µPa^{-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 µPa), 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 bandes[1] (dB re 1 µPa^2), noté $SPL_{[fmin-fmax]}$ 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 ($f_{1/3octave}$) sont délimitée par les fréquences minimale (f_{min}) et maximale (f_{max}) définies par : $f_{min}= f_{1/3octave} / (\sqrt{2})$ et $f_{max} = f_{1/3octave} * (\sqrt{2})$ (Tableau 4).

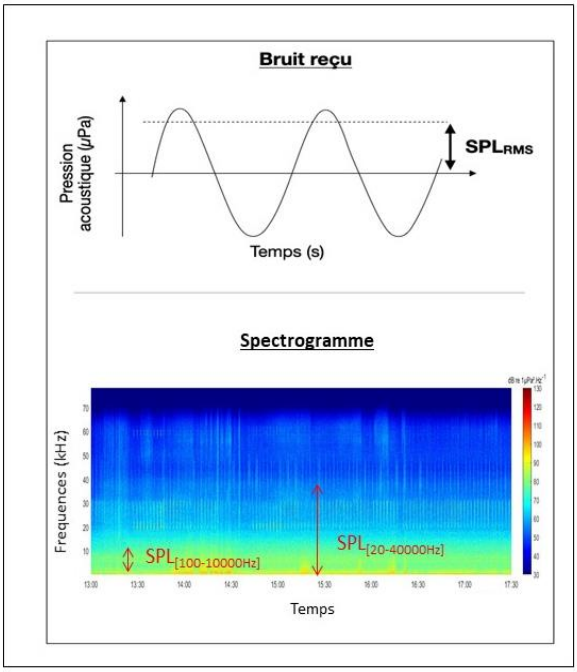


Figure 10 : Différentes métriques utilisées pour évaluer les niveaux de bruit.

[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 ($f_{1/3octave}$; 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 au cours du temps. Les distributions statistiques des niveaux sonores associés à chaque station sont également présentées sous forme de boites à moustaches (boxplot).

Des spectres acoustiques 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 S1) afin d'étudier la contribution des conditions environnementales et des activités humaines au bruit ambiant.

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 évènements 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.

3.4.3 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 :
    - Des dauphins communs et grands dauphins fréquentant régulièrement l'aire d'étude ;
    - 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'écholocalisation 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 - PAMGuard[2]).

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'écholocalisation). 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.

[2] https://www.pamguard.org

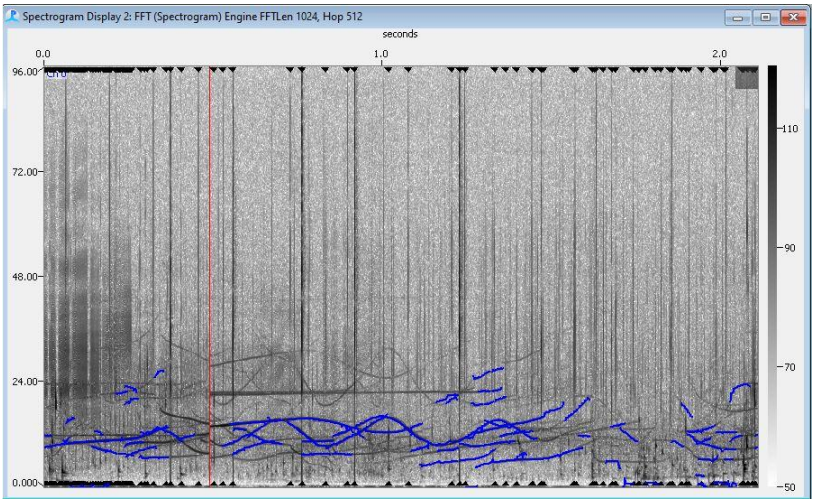


Figure 11. Capture d'écran de l'interface PAMGuard incluant les modules de détection de clics (flèches noires) et de sifflements (WMD ; courbes bleues).

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)

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 inclue dans les résultats.

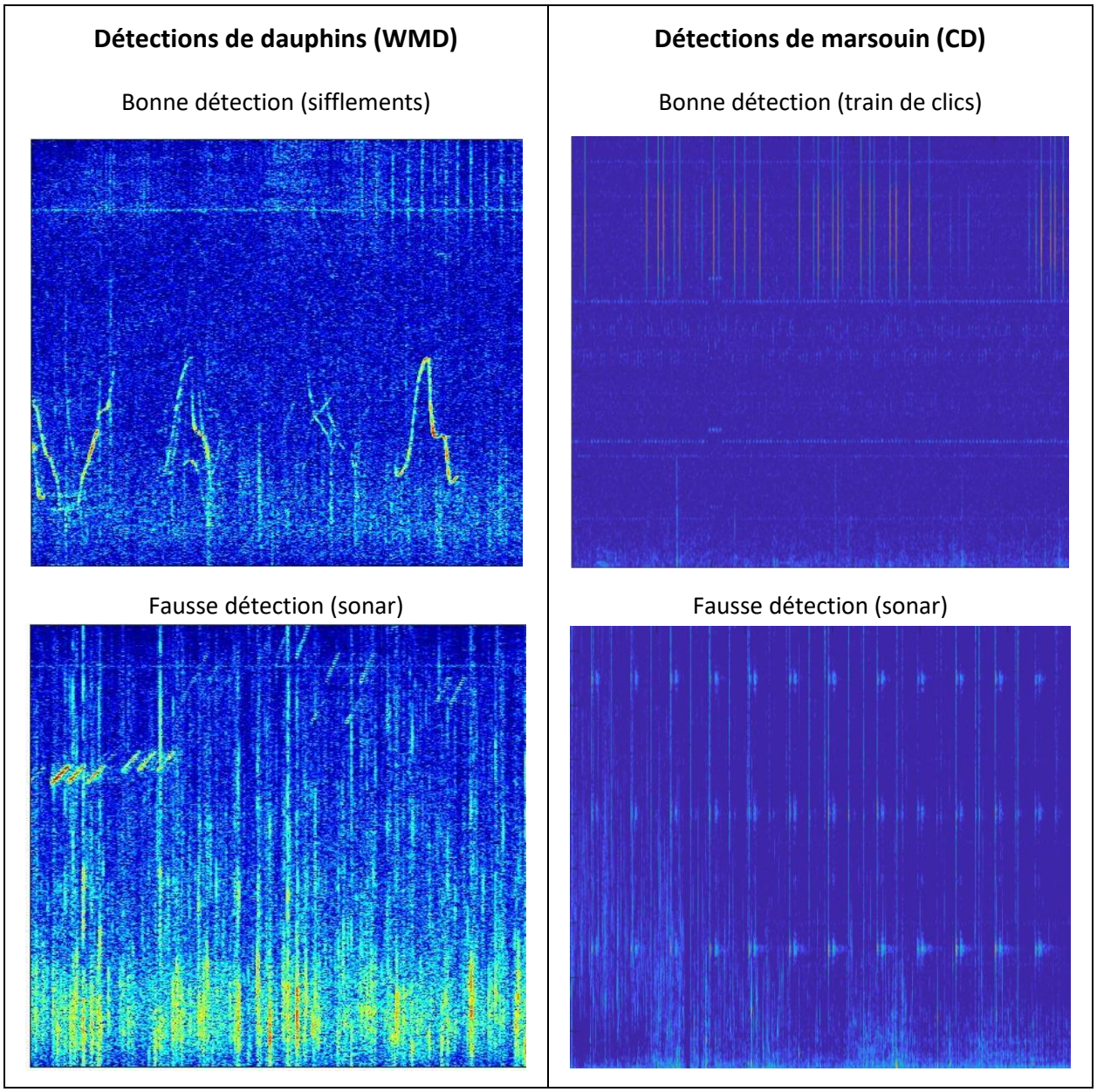


Figure 12. Exemples des spectrogrammes de bonnes et fausses détections (de dauphin à gauche et marsouin à droite) classées par l'algorithme d'intelligence artificielle puis vérifiées par un acousticien SOMME.

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 8.1. 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'écholocalisation associée et notamment la présence de « buzzes » (Figure 13), décrits comme une accélération des taux de clics (Madsen 2004).

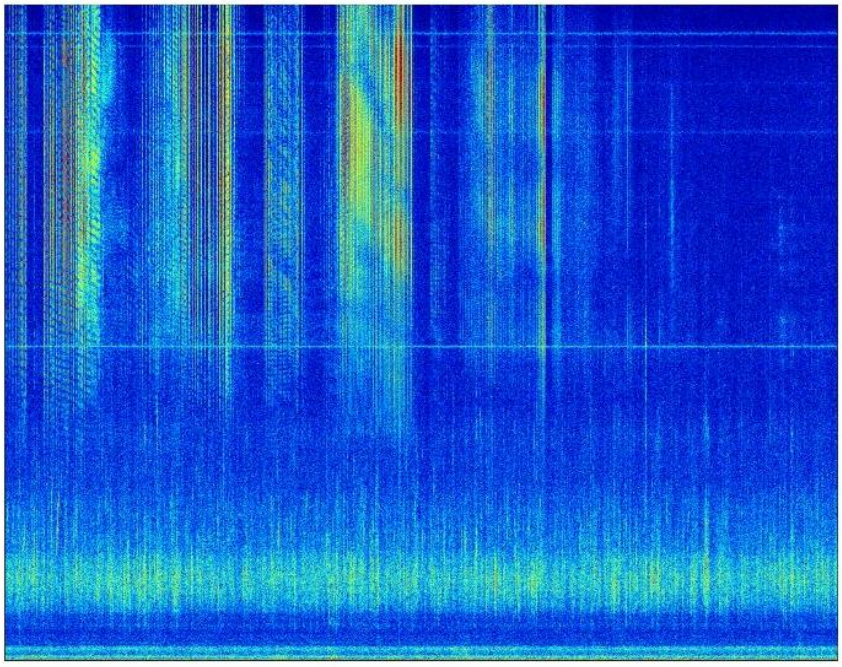


Figure 13. Exemple d'un spectrogramme d'une minute sur la bande de fréquence 1 à 40 kHz, avec présence de buzzes de dauphins.

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 8.1), 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.,* 2022) :

Tableau 7. Définition de la fréquentation par les mammifères marins (Chompret et al., 2019 ; 2022).

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 ± 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 boite, aussi appelé *boxplot*, ne permet pas toujours de révéler, cf Figure 14).

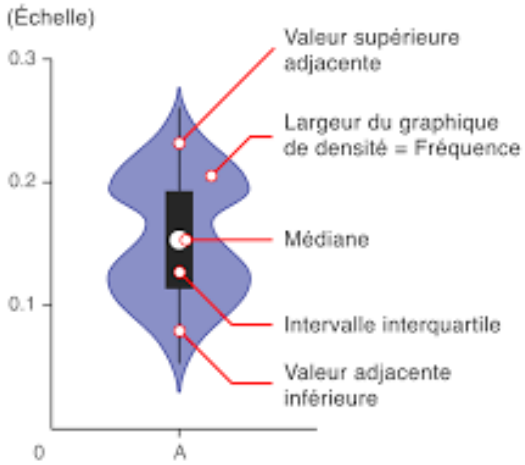


Figure 14. Schéma[3] d'un diagramme en violon en comparaison avec un diagramme en boite (boxplot).

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.

[3] 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 35 jours de données acoustiques a été obtenu sur 6 des 7 stations, et 23 jours de données pour SE (suite à un problème de mémoire interne de l'enregistreur acoustique, Tableau 3). 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

La Figure 15 présente les séries temporelles des niveaux de bruit ambiant (SPL_{rms}) enregistrés pour chaque station. La Figure 16 montre la distribution statistique de ces niveaux sonores. Les niveaux de bruit reçus varient selon les stations (Figure 15 ; Figure 16). 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 µPa. Les niveaux rms médians les plus bas sont enregistrés pour les stations SW (103,8 dB re 1 µPa) et MB (102,9 dB re 1 µPa).
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), est également variable selon les stations, avec un maximum pour S3 (centre du parc éolien) et MB (dans le Mor Braz, au sud d'Hoedic).
Des cycles plus ou moins marqués sont également observés dans les séries temporelles de niveaux sonores de certaines stations. 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. Ces patterns sont décrits dans la section 4.5.

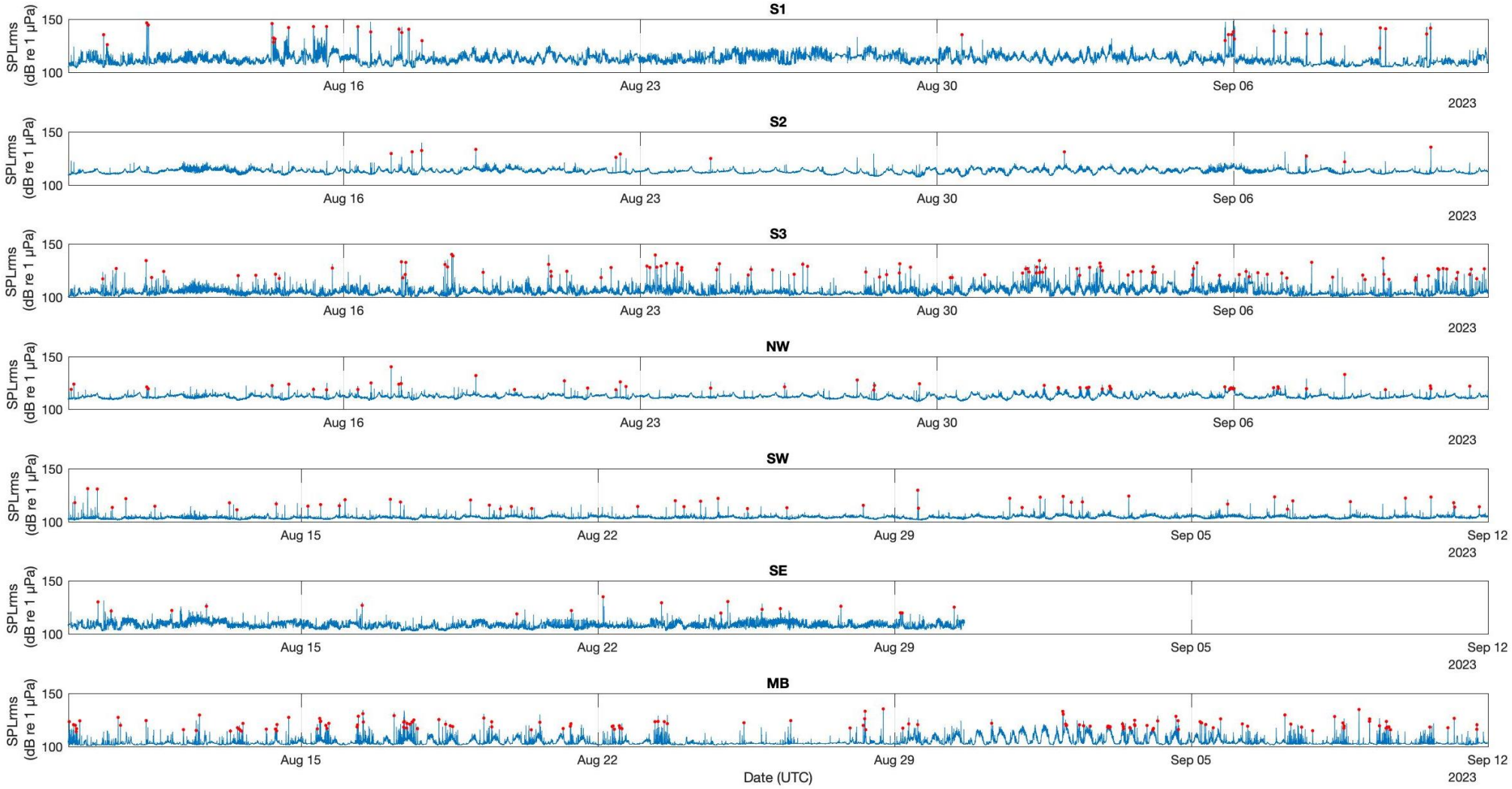


Figure 15. Suivi temporel des niveaux de bruit ambiant SPL_{rms} par station. Les points rouges correspondent aux passages de navire détectés.

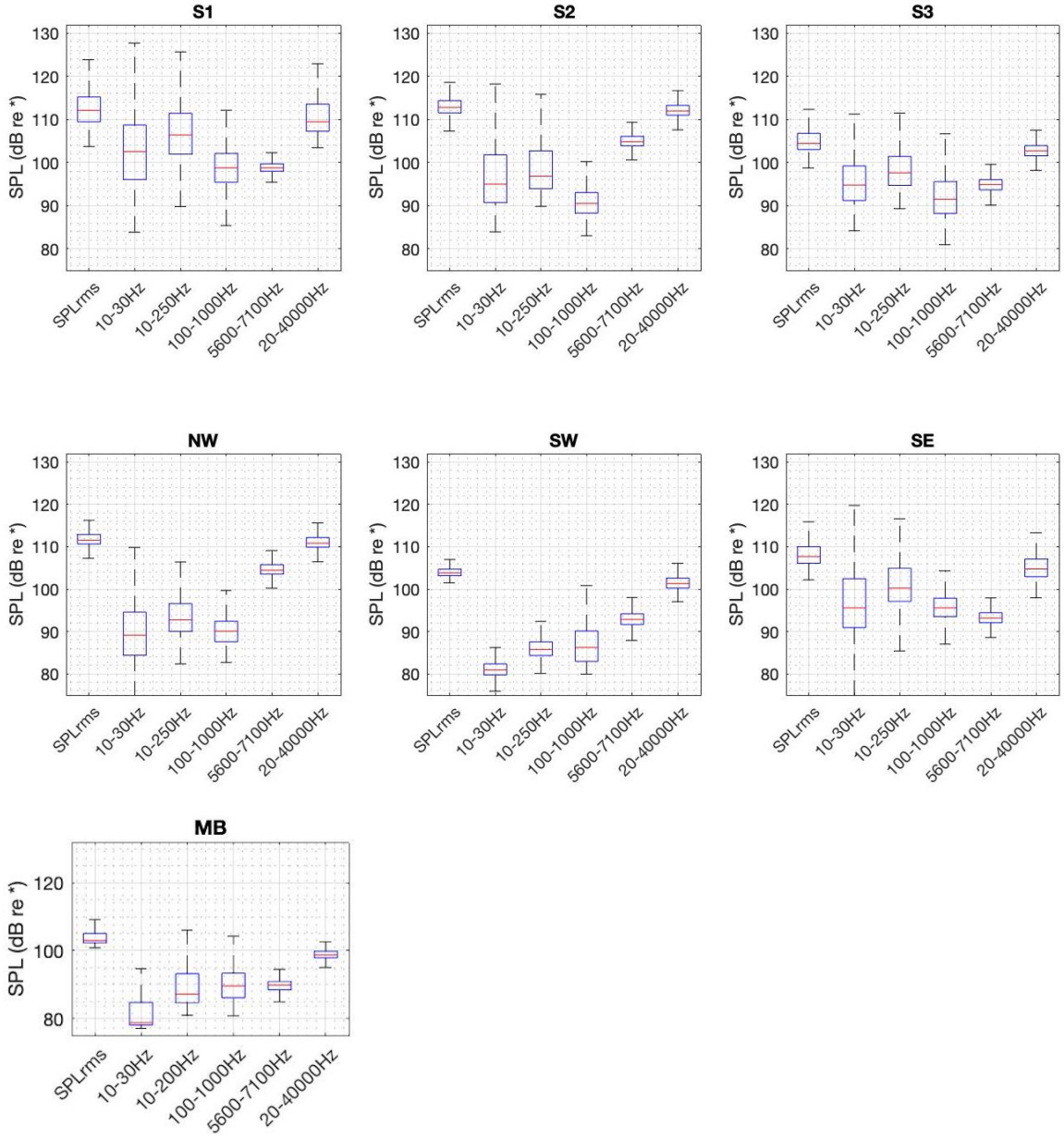


Figure 16. Distribution statistique des niveaux sonores SPL_{rms} (dB re 1 µPa) et larges bandes (intégrés dans les gammes de fréquences 10-30 Hz, 10-250 Hz, 100-1000 Hz, 5600-7100 Hz et 20-40000 Hz ; dB re 1 μPa^2) enregistrés pour chaque station.

Le contenu fréquentiel du bruit ambiant enregistré varie selon les stations (Figure 17). 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 16 ; Figure 17). Cette composante n'est pas 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), et MB située en dehors de celui-ci (à plus de 18 km, proche de l'ile d'Hoëdic). Deux autres pics d'énergie sont remarqués à 200 et 800 Hz pour l'ensemble des stations (Figure 17). Bien que moins marquée pour MB, l'ensemble des stations présente également une forte composante fréquentielle centrée autour de 6 kHz (Figure 16 ; Figure 17).

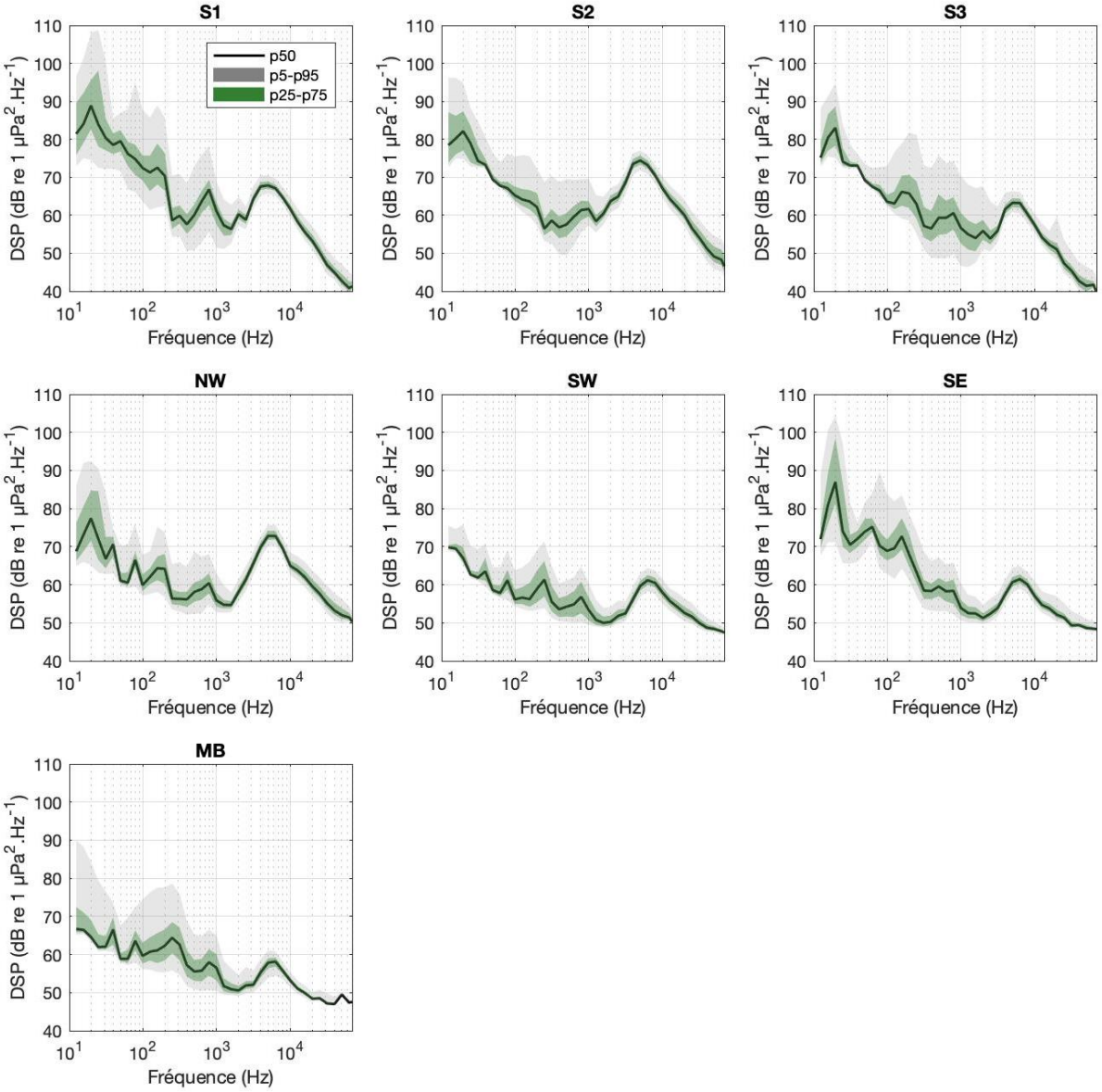


Figure 17. Spectres médians du bruit ambiant enregistré au sein de chaque station.

La réalisation de spectrogrammes long-terme permet d'aller plus loin dans la caractérisation du paysage sonore en montrant comment ces composantes fréquentielles évoluent au cours du temps.

La Figure 18 présente 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.

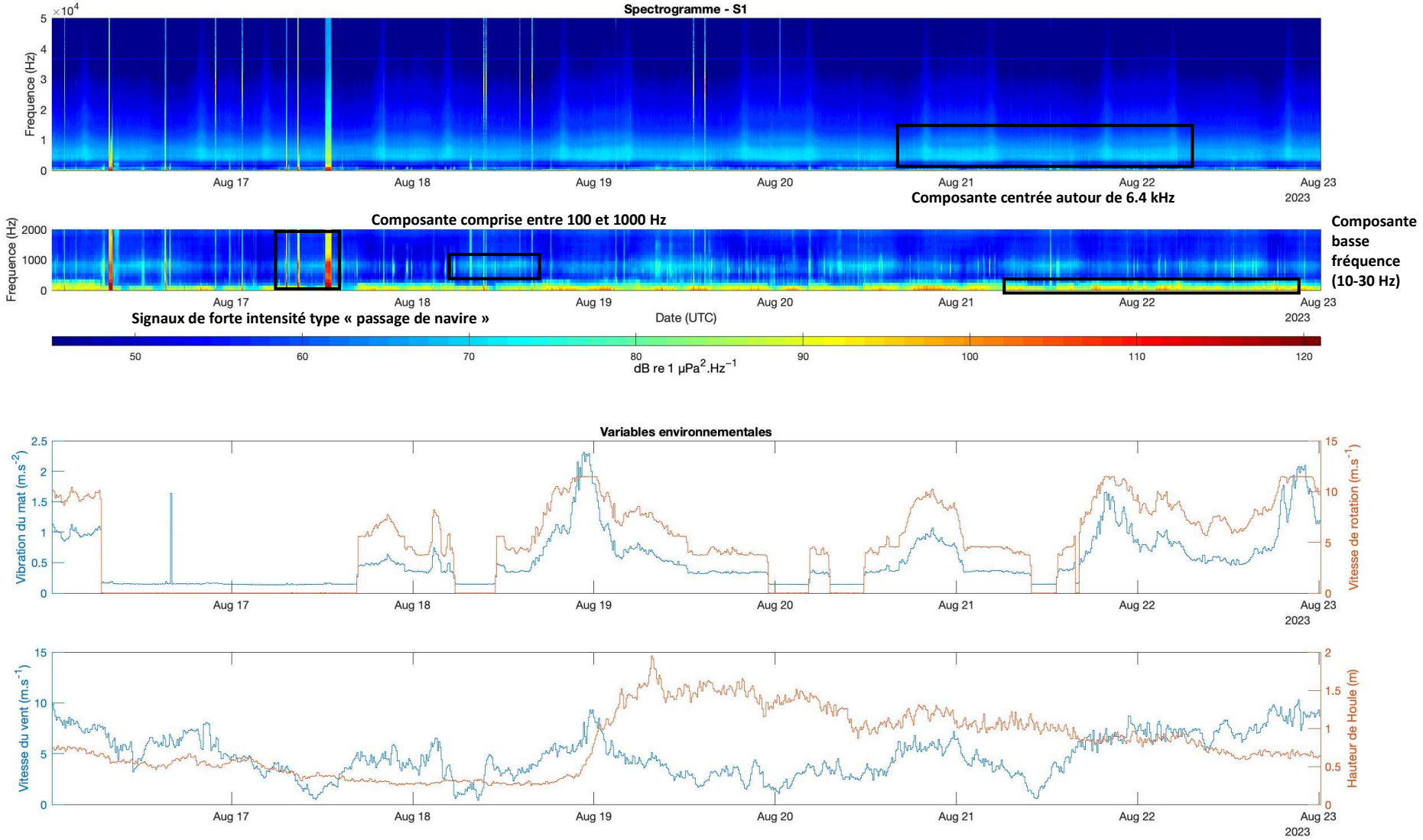


Figure 18. Spectrogramme long terme calculé sur une période d'une semaine enregistrée par la station S1.

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 18).

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) et S3 (au centre du parc éolien) comparé aux autres stations.

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

Station	Nombre de passages de navire détectés du 09/08/2023 12:00 au 12/09/2023 00:00 (UTC)
S1	28
S2	11
S3	105
NW	41
SW	42
SE	14
MB	129

Ces passages de navire génèrent des bruits continus, d'une durée de l'ordre de la dizaine de minutes (Figure 19 ; Figure 20). Les fréquences reçues dépendent de la distance 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 19 ; Figure 20, Figure 21). On observe également différentes raies d'énergie à certaines fréquences spécifiques (entre 50 et 200 Hz, Figure 21). Ces évènements acoustiques sont souvent associés à des sons impulsifs générés par les systèmes sonar des navires (Figure 19).

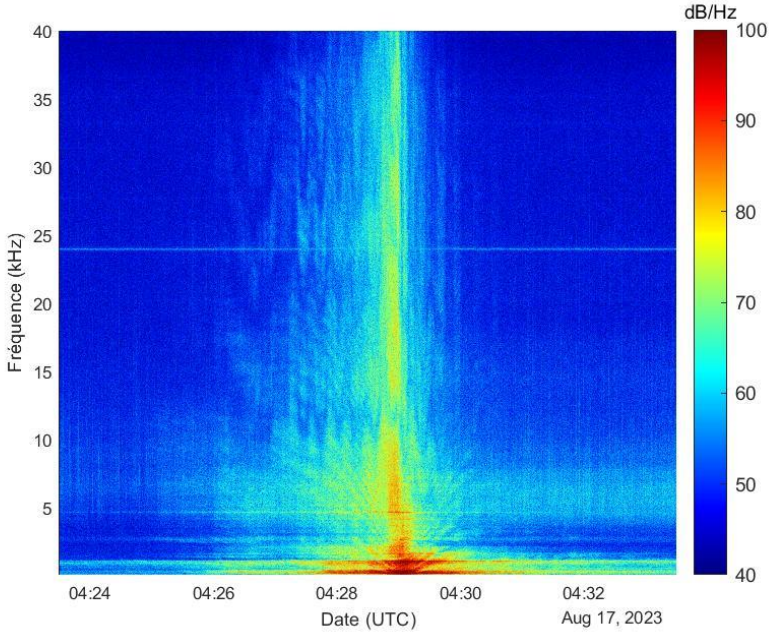


Figure 19. Spectrogramme d'un passage de navire enregistré par la station MB.

Des bruits de navires spécifiques ont été observés sur les stations situées au sein du parc, notamment sur la station S1 (Figure 20). Le spectre acoustique de ces évènements présente des similitudes avec ceux des passages de navire (Figure 19 ; Figure 21). Cependant, ces bruits de navire sont caractérisés par des durées et intensités plus importantes (Figure 20). Ces caractéristiques suggèrent qu'ils correspondent aux manœuvres de « boat landing », c'est-à-dire l'approche de la fondation et la poussée du bateau contre la structure pour permettre le transfert de personnel sur les éoliennes.

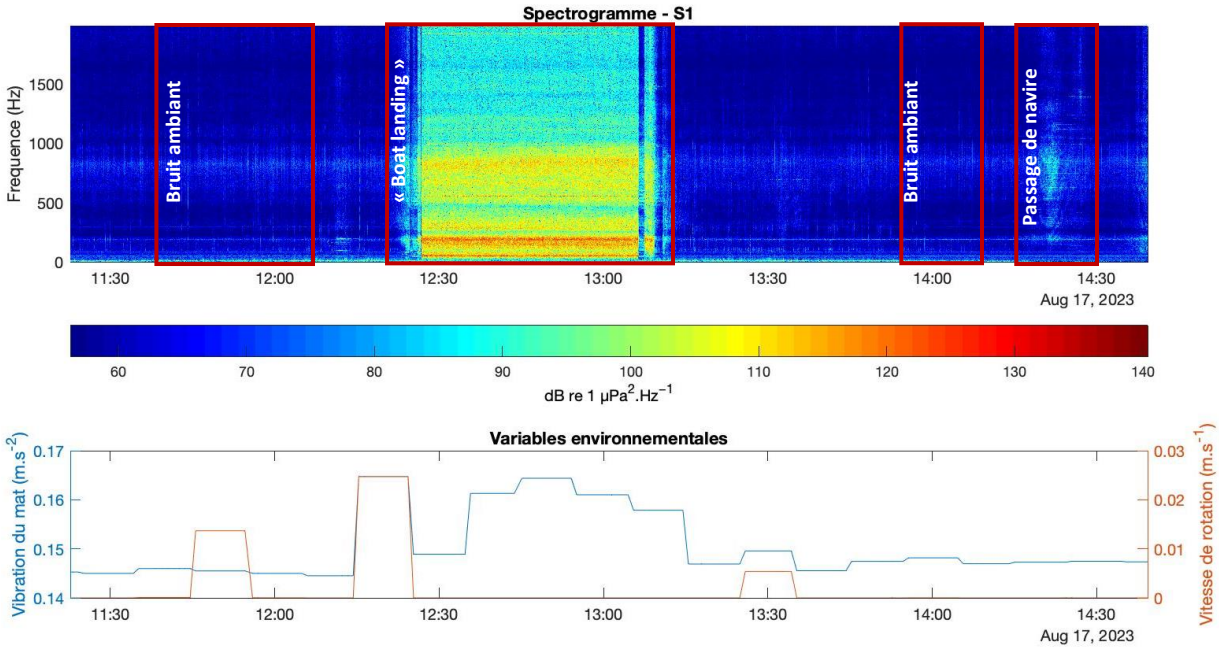


Figure 20. Spectrogramme montrant des signaux générés par une manœuvre de "boat landing" et un passage de navire, enregistré au niveau de la station S1.

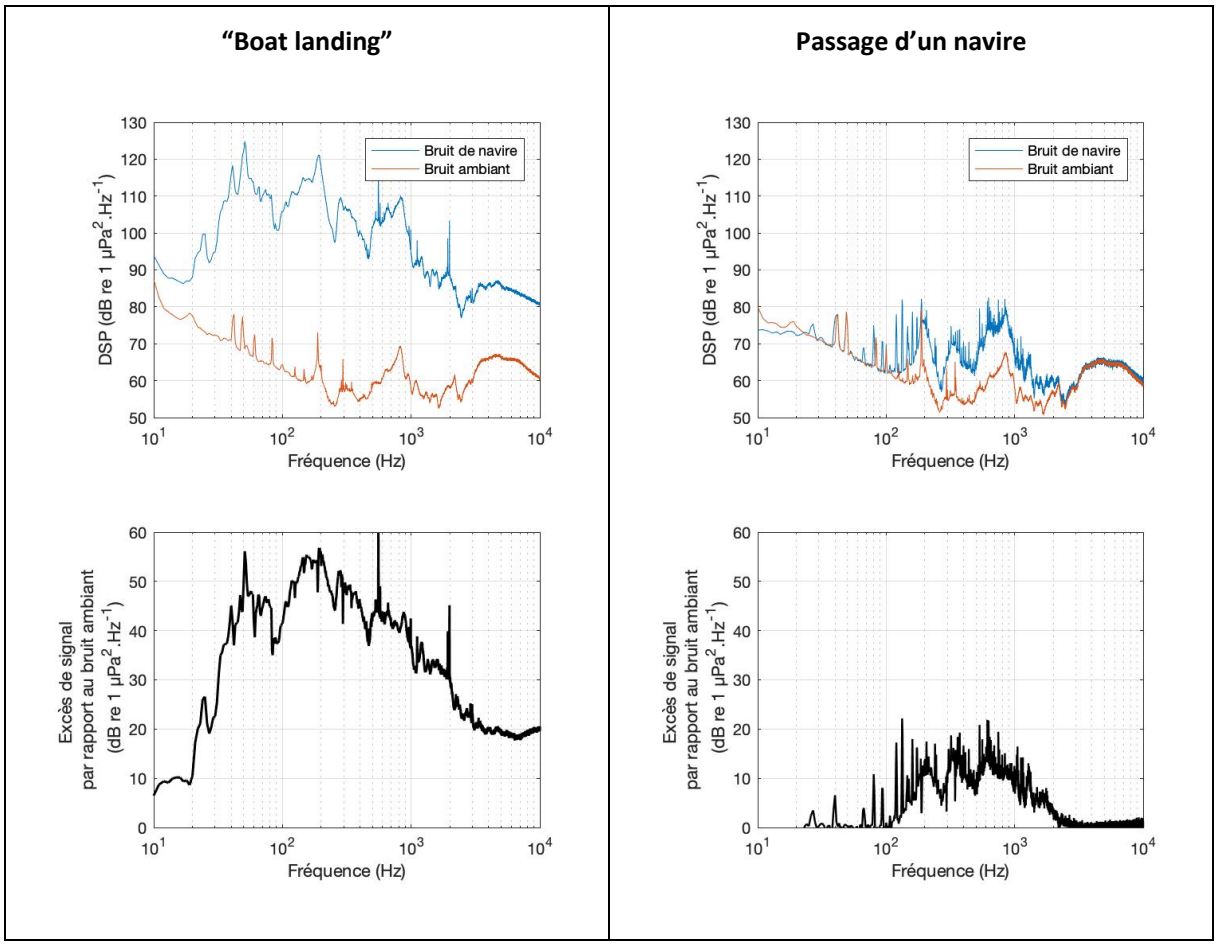


Figure 21. Spectre acoustique du "boat landing" et du passage de navire visible sur la Figure 20. L'excès de signal généré par ces activités par rapport au bruit ambiant (Figure 20) est présenté en dessous de chaque spectre.

4.3.2 Bruit généré par le parc éolien

Les niveaux de bruit reçus dans la bande de fréquence 10-250 Hz ($SPL_{10\text{-}250Hz}$) 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 (106 dB re 1 µPa^2 ; Figure 16).

Théoriquement, le bruit généré par les éoliennes en fonctionnement est induit par la vibration de leur mat, engendrée par la rotation des pales. La Figure 22 montre la relation entre le vent, la vitesse de rotation des pales de l'éolienne F01 et le niveau de vibration moyen de son mat. Les données de vibration du mat proviennent d'un accéléromètre fixé directement sur l'éolienne (F01). Les niveaux de vibration du mat enregistrés sont corrélés positivement à la vitesse du vent et à la vitesse de rotation des pales (Figure 22). La vitesse de rotation plafonne à 11,5 rpm, correspondant à la vitesse plateau (maximale) des éoliennes du parc du banc de Guérande (Haliade 150). Une fois cette vitesse de rotation atteinte, le niveau de vibration du mat continu d'augmenter avec la vitesse du vent jusqu'à un maximum enregistré à 2.9 m.s^{-2}[4]. On observe également que lorsque l'éolienne est à l'arrêt, le niveau de vibration de son mat est égal à 0.15 m.s^{-2}.

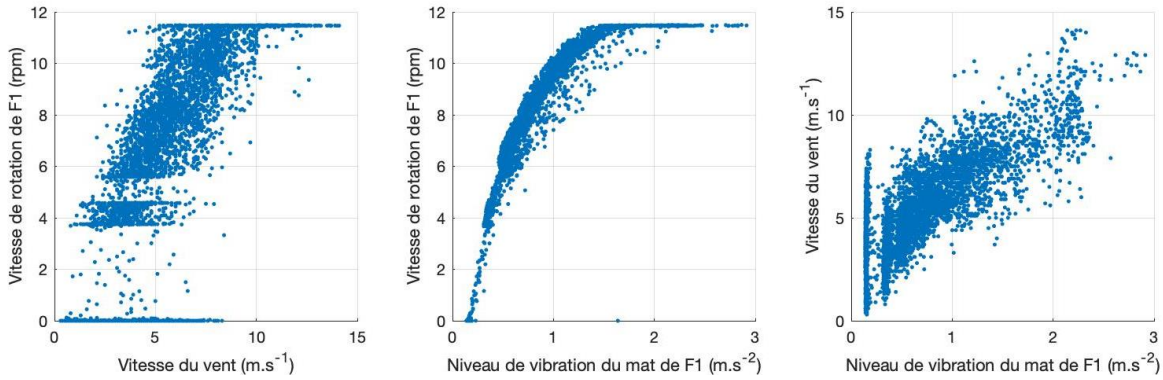


Figure 22. Relation entre la vitesse du vent, la vitesse de rotation des pales de l'éolienne F1 (rpm : rotation par minute) et le niveau de vibration moyen de son mat.

Les niveaux acoustiques large bande $SPL_{10\text{-}250Hz}$ enregistrés au niveau de chaque station ont été comparés à la vitesse de rotation des pales de l'éolienne la plus proche (Figure 23). Des relations entre ces deux variables sont visibles pour les stations S1, SE, NW, S2 et S3 (Figure 23). Ces relations sont plus marquées pour les stations les plus proches des éoliennes (S1, SE, NW). Bien que globalement positives, ces relations ne sont ni linéaires ni monotone. La forme de la relation comporte des courbures et un maximum compris entre 8 et 10 rpm selon les stations.

Les niveaux $SPL_{10\text{-}250Hz}$ 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 et 4.5).

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

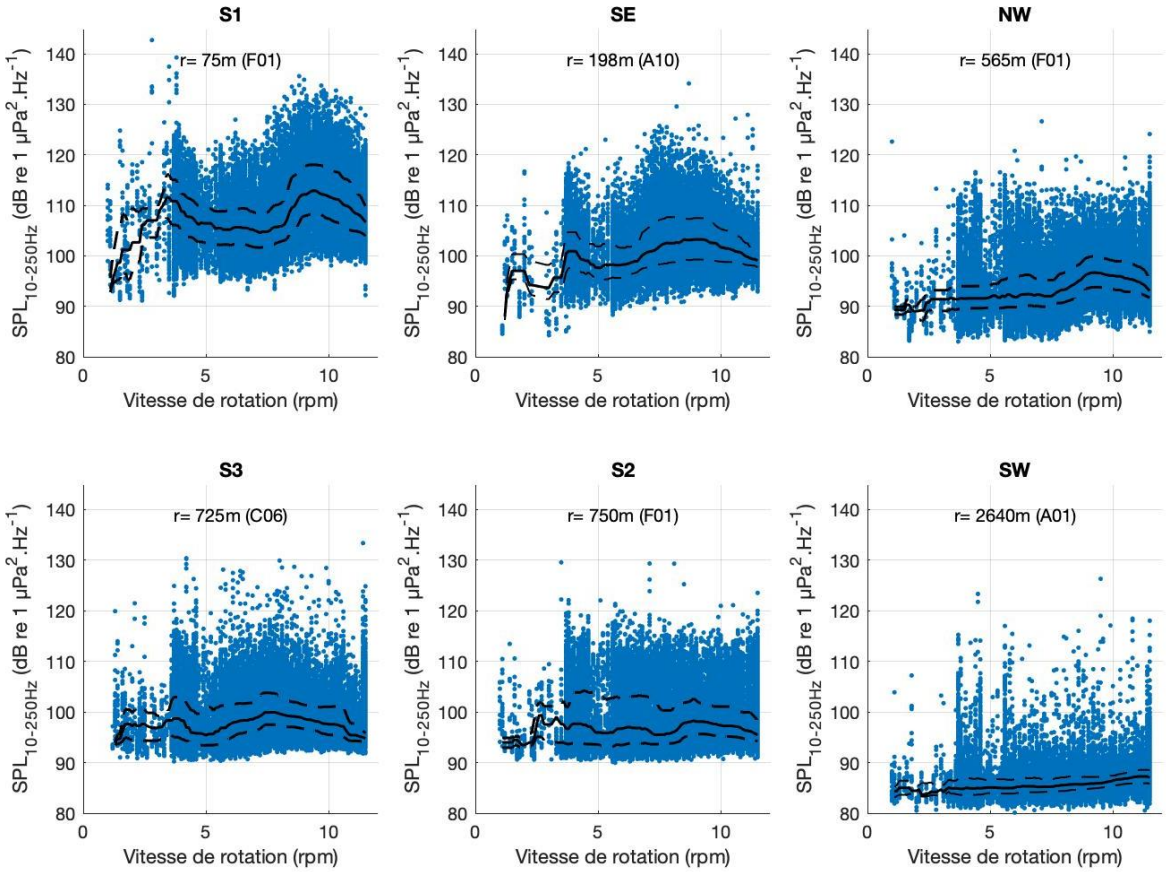


Figure 23. Relation entre les niveaux de bruit reçus dans la bande de fréquence 10-30 Hz et la vitesse de rotation (rpm) de l'éolienne la plus porche pour chaque station (r est la distance station – éolienne). Les périodes avec une houle supérieure à 1.5m n'ont pas été prises en compte.

La Figure 24 montre la différence entre les spectres acoustiques du bruit enregistré au niveau des stations situées dans le parc par rapport au bruit enregistré au niveau de la station témoin SW.

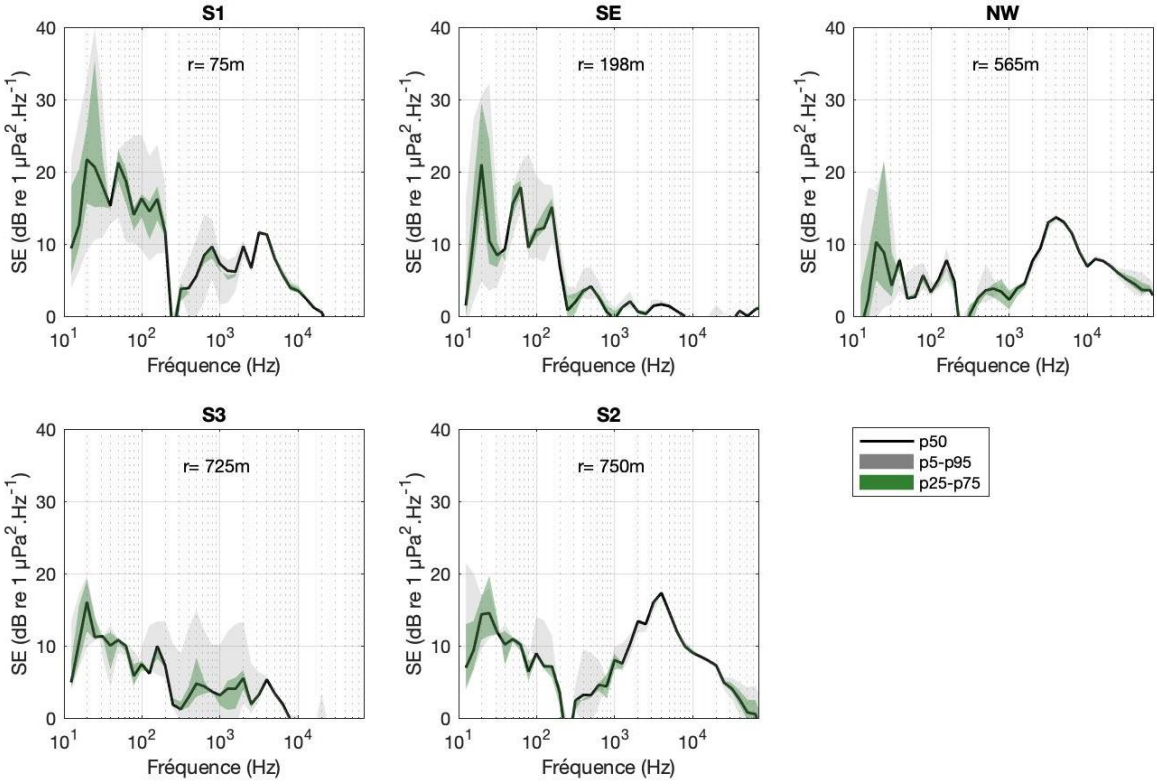


Figure 24. Excès de signal enregistré au niveau des stations situées dans ou à proximité directe du parc par rapport au bruit ambiant enregistré au niveau de la station témoin SW (située en dehors du parc).

Cette figure met ainsi en évidence l'excès du signal généré par le parc par rapport au bruit ambiant. Le parc génère du bruit dans la gamme de fréquence 10-250Hz avec un maximum d'intensité centré autour de 20Hz (Figure 24). Comme indiqué précédemment, le bruit reçu dans cette bande de fréquence est positivement corrélé avec la distance séparant la station de l'éolienne la plus proche. 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 24) sont probablement générées par les différents modes de fonctionnement des éoliennes durant le suivi (vitesse de rotation).

4.4 Contribution des conditions environnementales

4.4.1 Influence du vent

La figure suivante présente les spectres médians de bruit ambiant des stations SW et MB en fonction des conditions de vent (échelle de Beaufort).

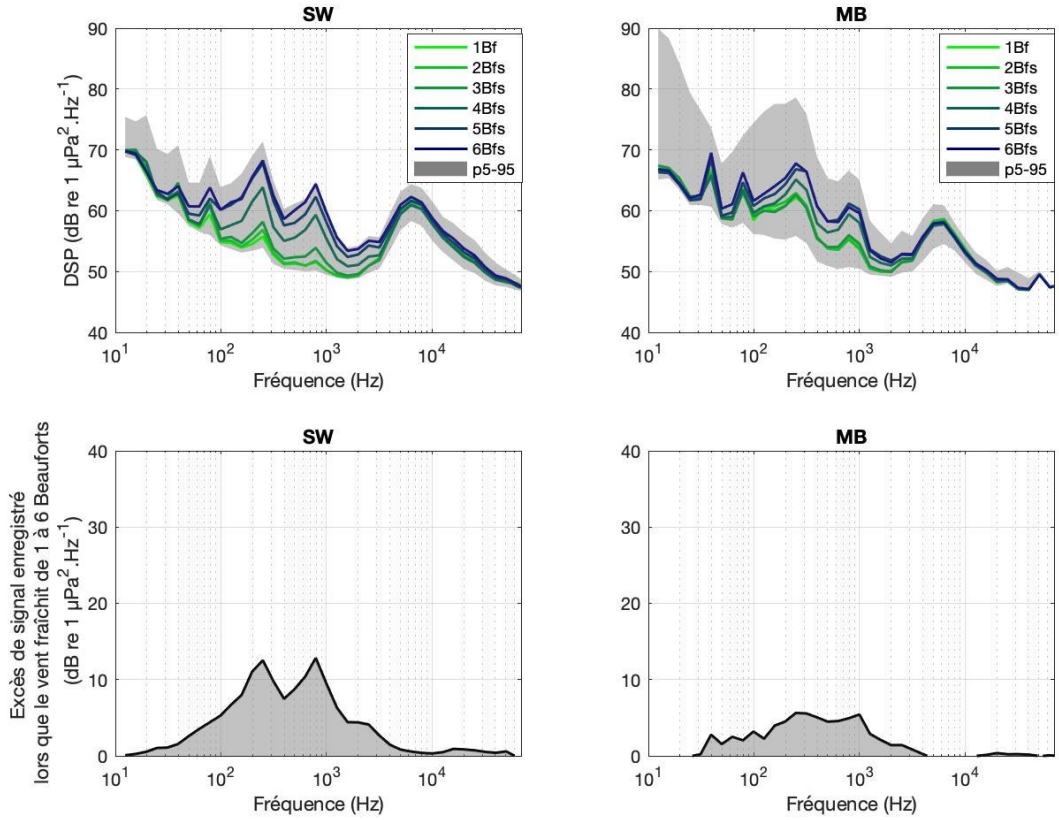


Figure 25. Spectres médians du bruit enregistré au sein des stations SW et MB en fonction des conditions de vents (échelle de Beaufort). La deuxième ligne de figures montre l'excès de signal généré par un vent fraichissant de 1 à 6 Bfs.

Comme évoqué précédemment, les stations SW et MB ne sont pas 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 fraichit de 1 à 6 Bfs, on observe une augmentation de 12 et 5 dB re 1 $\mu Pa^2.Hz^{-1}$ à 250 Hz et 800 Hz pour SW et MB respectivement.

4.4.2 Influence de la houle

La figure suivante présente les spectres médians de bruit ambiant enregistré au sein des différentes stations en fonction de la hauteur de la houle.

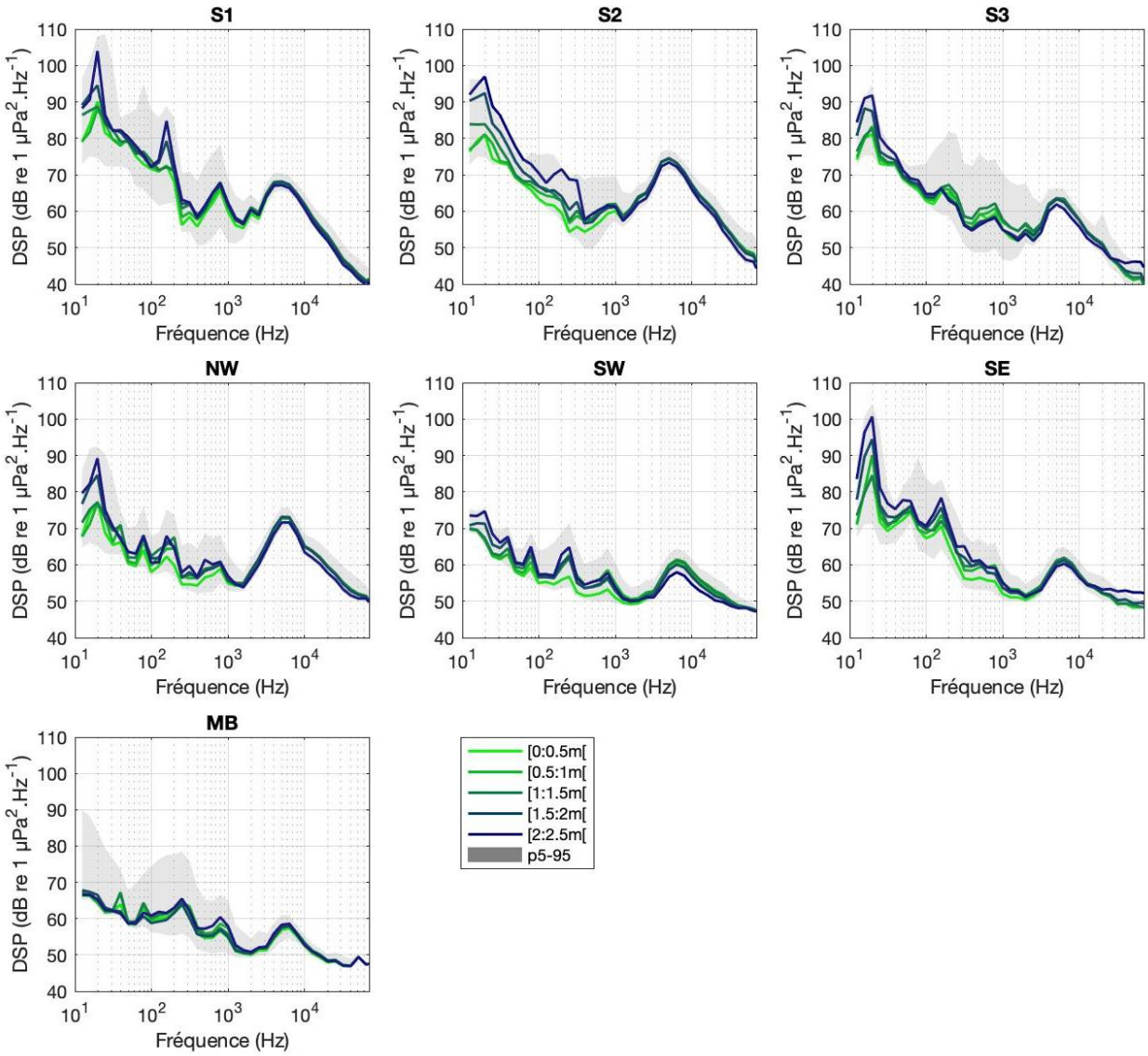


Figure 26. Spectres médians du bruit enregistré au sein des stations en fonction des conditions de houle.

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 ;
- Les niveaux reçus à 250 et 1000 Hz diminuent par forte houle (> 1.5m) pour la station S3 ;
- 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, sauf MB.

Les épisodes de fortes houles (> 1.) étant rares durant ce suivi réalisé en période estivale, l'augmentation des niveaux sonores associée n'a pas d'influence sur les niveaux sonores et spectres médians rapportés précédemment.

4.5 Contribution de la faune

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 18). 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 ($SPL_{5.6\text{-}7.1kHz}$). Les périodogrammes obtenus (Figure 27) 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.

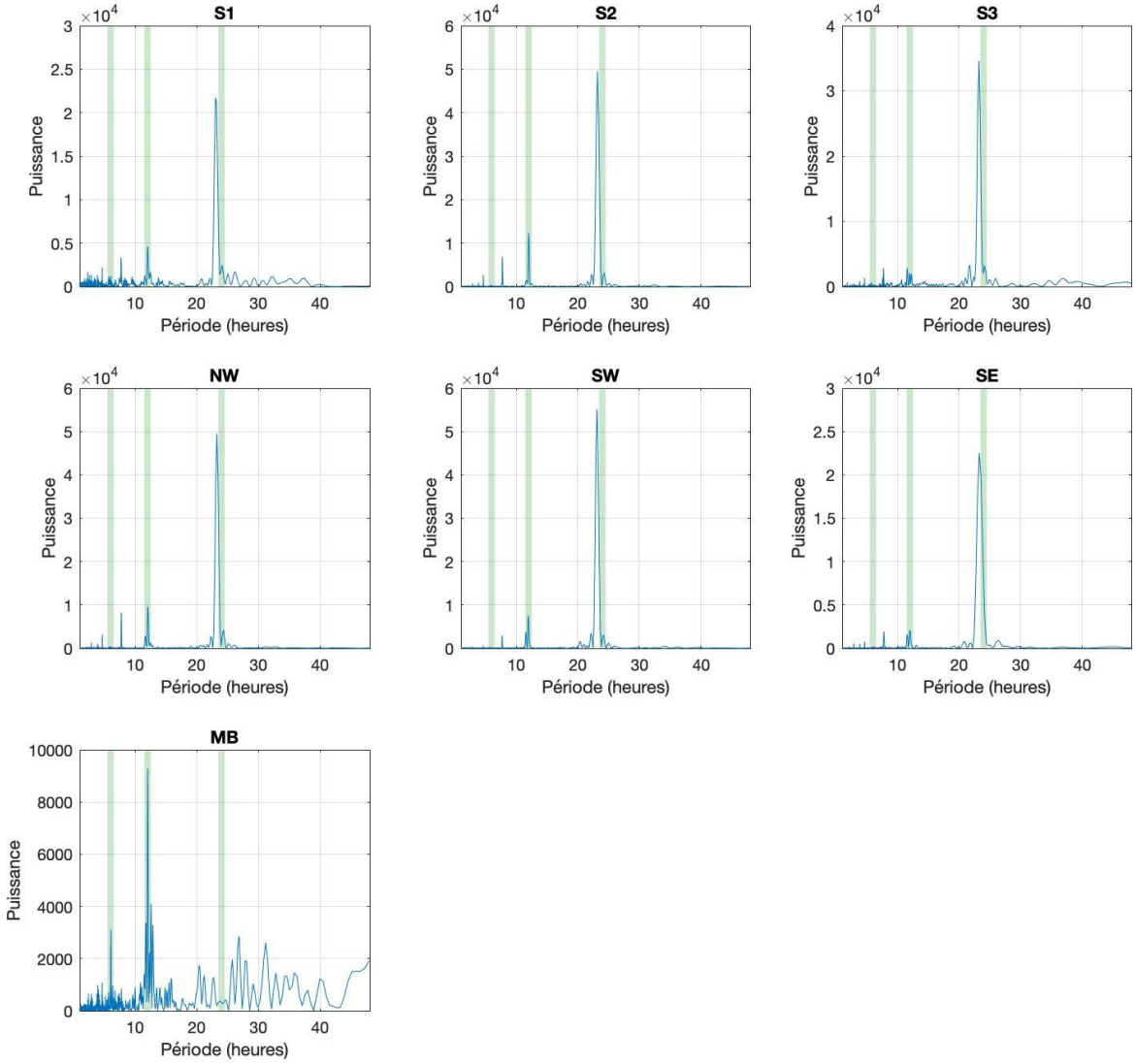


Figure 27. Périodogrammes de Lomb-Scargle calculés pour chaque station, sur les séries temporelles des niveaux sonores reçus dans la bande de fréquence correspondant au tiers d'octave centrée autour de 6 kHz ($SPL_{5.6\text{-}7.1kHz}$). Les bandes vertes indiquent les périodes égales à 6, 12 et 24h.

On observe un cycle d'une période de 24hic de puissance) pour l'ensemble des stations, sauf pour MB (Figure 27). 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. La Figure 28 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.

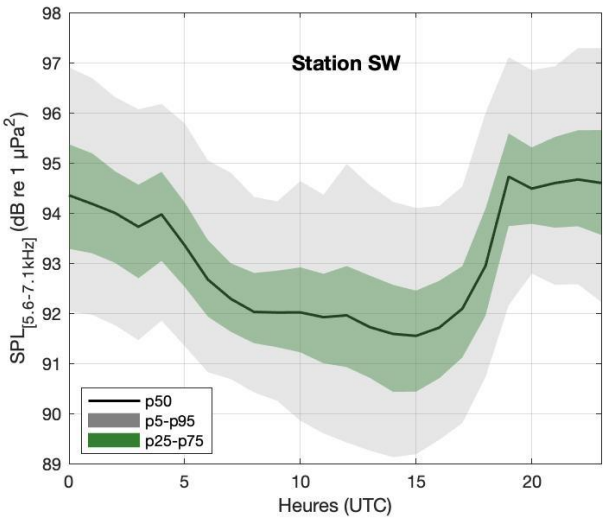


Figure 28. Niveaux de bruit enregistrés dans la bande de tiers d'octave centrée autour de 6 kHz en fonction des heures de la journée pour la station SW.

L'analyse de Lomb-Scargle montre également des cycles de 6 heures et 12 pour la station MB (Figure 27), probablement associés aux phénomènes de marée.

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).

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 29).

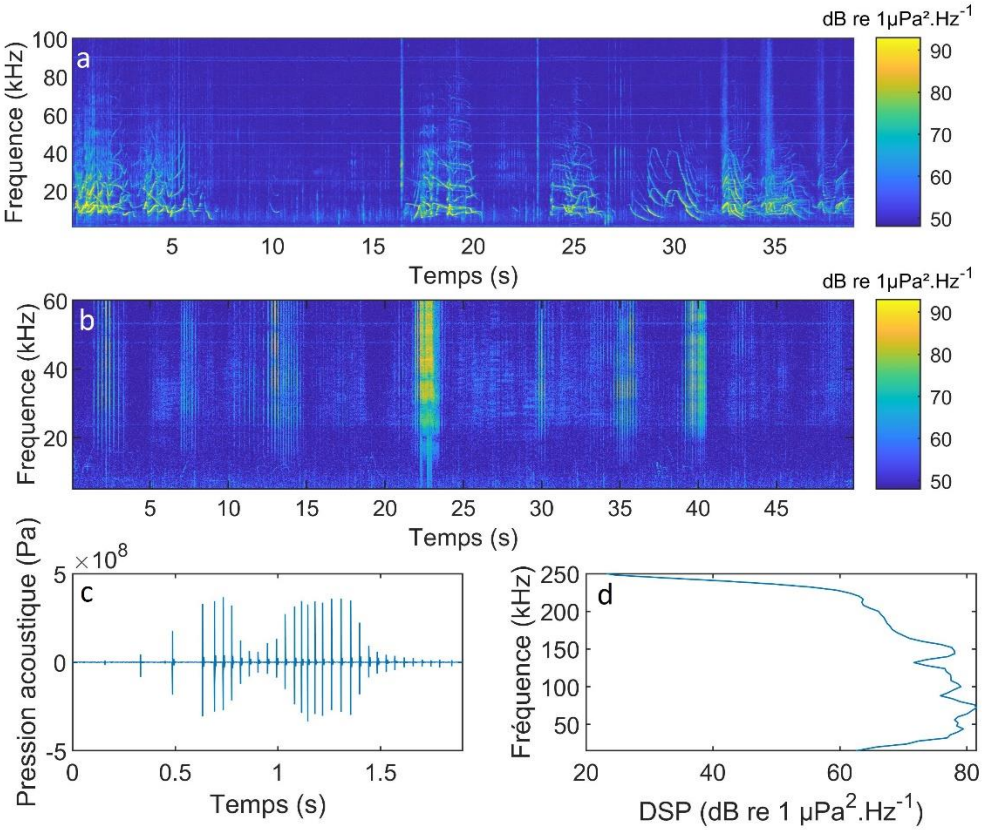


Figure 29. Spectrogrammes de vocalises de delphinidés incluant des (a) sifflements enregistrés sur la station SE le 10 août 2023 (12h17) et (b) des clics d'écholocalisation (dont des « buzzes ») enregistrés sur la station du MB le 19 août 2023 (16h10). Les figures c et d représentent respectivement un 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.

En effet, la station située dans le Mor Braz (MB) présente une fréquentation de delphinidés quotidienne (selon la définition en section 3.4.3.4, cf. Figure 30), puisque 91.4 % des jours d'enregistrement présentent au moins une détection acoustique (Tableau 9). La répartition horaire des sifflements et buzzes enregistrés montre une activité acoustique répartie aussi bien de jour que de nuit, à l'aube ou au crépuscule (Figure 31), avec une légère prédominance à partir de 3h jusqu'en fin de journée vers 20h (Figure 30). Ces détections sont réparties sur 207 évènements de présence, d'en moyenne 487±951 secondes (ces valeurs sont toutefois contraintes par le choix du seuil de temps inter-détection pour déterminer des évènements et du cycle d'acquisition), parmi lesquels 95 évènements présentaient des buzzes (Tableau 9).

Sur les deux stations situées au sud du parc les fréquentations par les delphinidés sont fréquentes (SE) et occasionnelles à régulières (SW) sur l'ensemble du déploiement. On observe toutefois lors des deux premières semaines d'enregistrement (du 9 au 23 aout) des fréquentations quasiment quotidiennes sur ces deux stations, puis une diminution du nombre d'heures positives par jour jusqu'à la fin août (Figure 30). En effet, la fréquentation sur SW est plus occasionnelle septembre, tandis que l'enregistreur de la station SE a arrêté son acquisition 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. 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. Les répartitions horaires des deux types de signaux n'indiquent pas de tendance significative (Figure 30), avec des présences détectées aussi bien de jour que de nuit, à l'aube ou au crépuscule (Figure 31).

La plus faible présence acoustique 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 (Tableau 9 et Figure 30). Les détections ont été obtenues de jour et à l'aube ou au crépuscule (Figure 30 et Figure 31), mais le faible nombre d'observations (6 évènements) ne permet pas de conclure sur une tendance significative. La fréquentation sur la station NW peut donc être considérée comme occasionnelle.

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, cf. Figure 30 et Figure 31). Cependant, les taux de production de ces signaux ne sont pas identiques puisque la quasi-totalité (79 à 99 %) du temps de présence (minutes positives cumulées sur l'ensemble du suivi, par station) comporte des sifflements tandis que 29 à 43 % du temps de présence contient des buzzes (Tableau 9). Il est cependant intéressant de noter que par évènement, lorsque les individus produisent des buzzes, le pourcentage de minutes positives peut être élevés, comme on peut l'observer sur la densité de probabilité de la Figure 32. En effet, sur ces distributions des pourcentages de minutes positives avec buzzes, on observe sur chacune des stations deux modes avec :

- une forte densité entre 0 à 10 % 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.

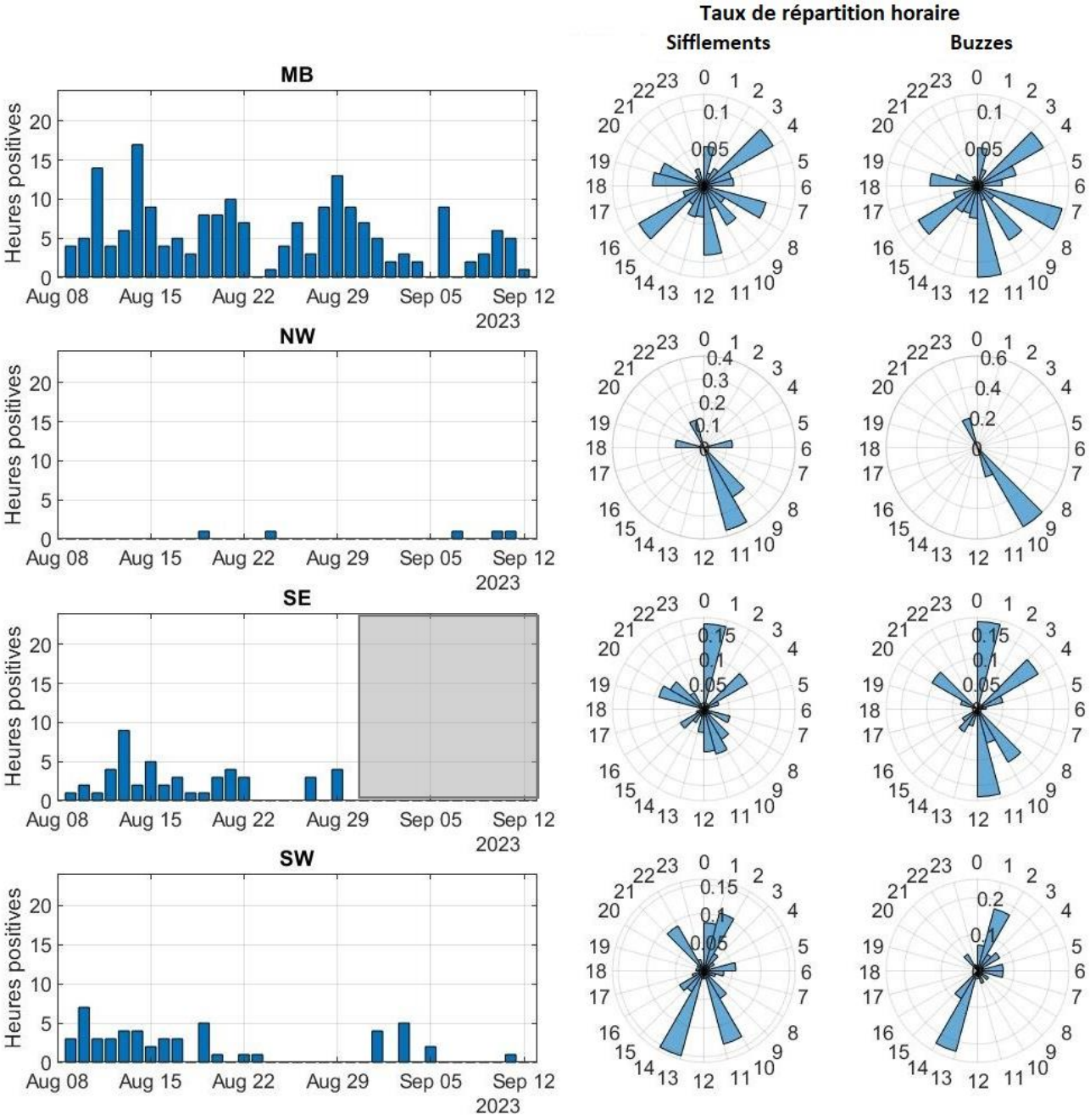


Figure 30. Occurrences des présences acoustiques de delphinidés sur les 4 stations représentées par le nombre d'heures positives par jour (diagrammes en barre) et de la répartition horaire de détection de sifflements et de buzzes (diagrammes en rosace, heures positives).

Tableau 9. Résumé des détections de delphinidés (avec un cycle d'acquisition de 30 %, voir Annexe 8.2.1 pour les résultats avec un cycle continu).

Station	***Minutes Positives[5]***	***Heures positives***	***Jours positifs***	***Nombre d'événement 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***
MB	786 (5,4 %)	186 (22,9 %)	32 (91,4 %)	207	487 ±952	142	95 (46 %)	43 %	79 %	Quotidienne
NW	8 (0,07 %)	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

[5] Minutes positives de présence des évènements acoustiques comme définies dans la section 3.4.3.3 (et Annexe 8.1)

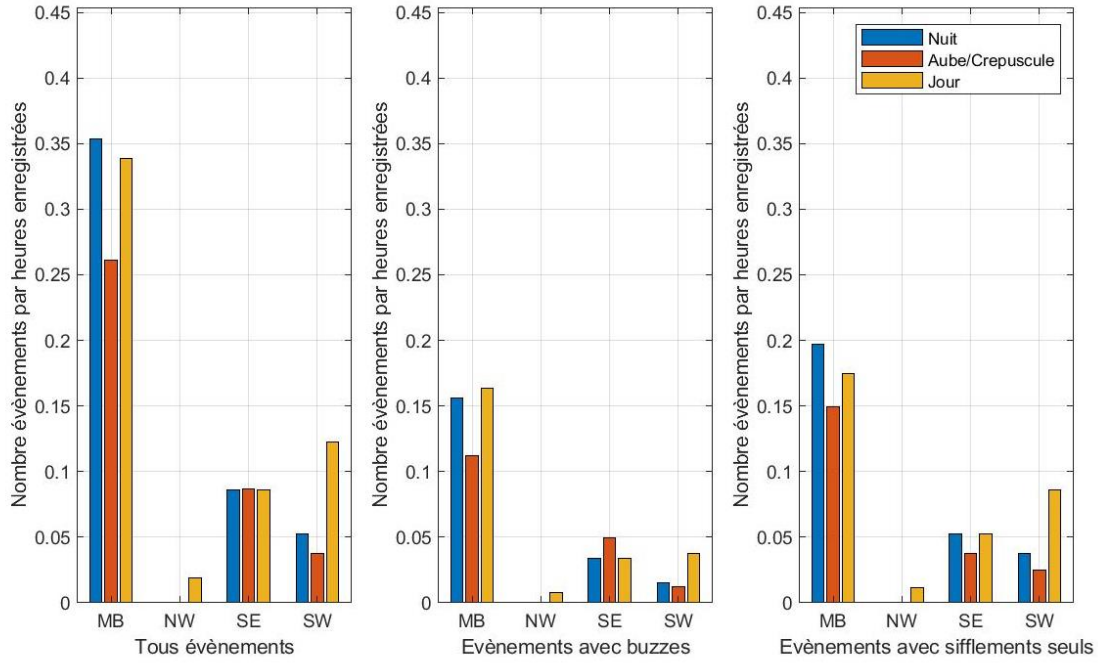


Figure 31. Comparaison entre les stations du nombre d'évènements de présence acoustique des marsouins par heures d'enregistrement, pour les 3 différentes périodes journalières : Jour, Nuit et Aube - Crépuscule.

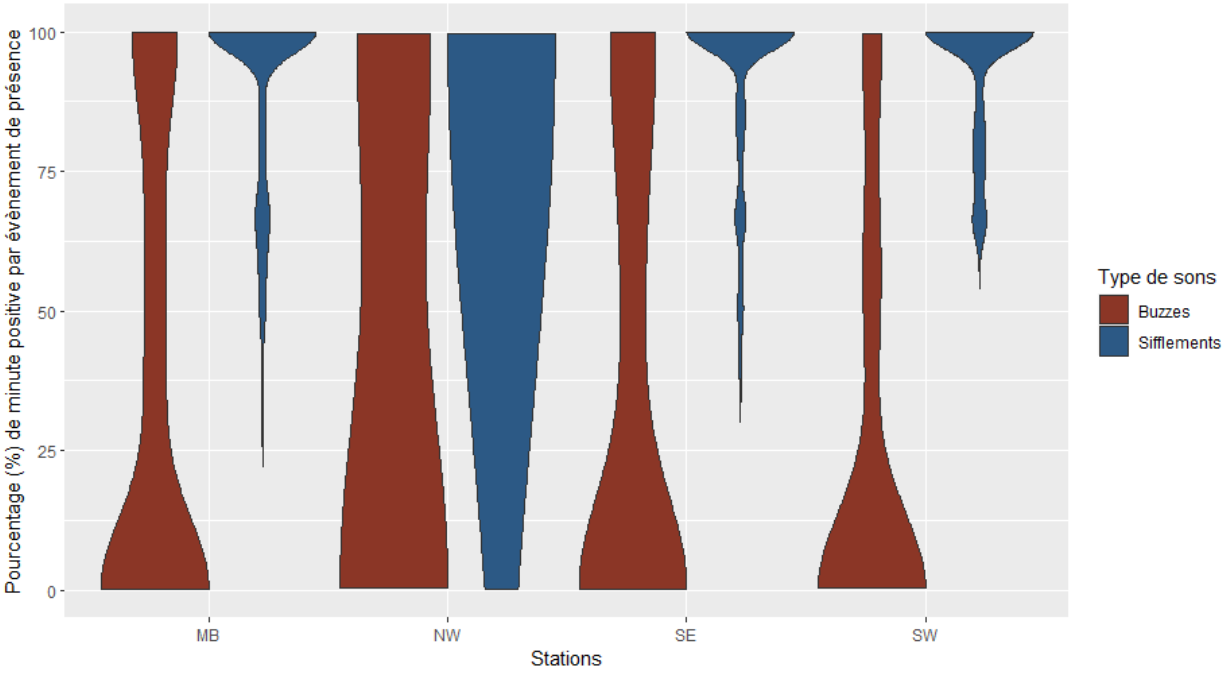


Figure 32. Densités de probabilité des pourcentages de minutes positives avec présence de buzzes (rouge) et avec présence de sifflements (bleu), représentées sous forme de diagrammes en violon par station. Ces diagrammes permettent de décrire la distribution des pourcentages de minutes positives par évènement de présence, ainsi une augmentation des courbes révèlent donc une augmentation de la probabilité d'observer ces valeurs.

4.6.2 Présence des marsouins

Une présence acoustique de marsouins (Figure 33) a été détectée sur les stations MB et SW, avec une plus forte occurrence pour la station MB située dans le Mor Braz.

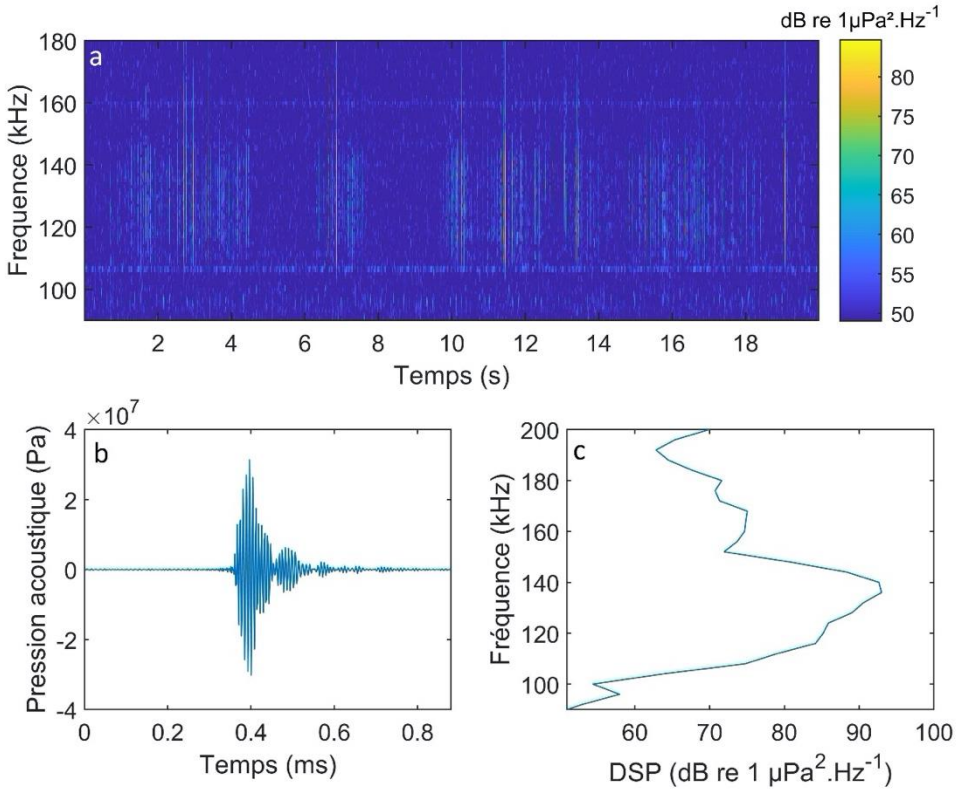


Figure 33. Spectrogramme (a) d'un train de clics de marsouin enregistré sur la station du Mor Braz le 9 aout 2023 (22h46). Les figures b et c présentent respectivement un oscillogramme (b) et un spectre (c) d'un clic.

Dans le Mor Braz, 19 évènements de présence de marsouin (correspondant à 26 minutes positives) ont été enregistrées sur 19 heures différentes, réparties sur 15 jours différents (soit 42.9 % du nombre de jour de déploiement, cf. Tableau 10). La présence de marsouins dans le Mor Braz peut alors être catégorisée comme occasionnelle (presque régulière) selon la définition en section 3.4.3.4 (Tableau 10 et Figure 34). La répartition horaire des trains de clics détectés ainsi que la période de chaque évènement de présence montre une activité acoustique répartie aussi bien de jour que de nuit, à l'aube ou au crépuscule (Figure 34 et Figure 35), avec une légère prédominance du nombre d'évènements par heure obtenu à l'aube ou crépuscule.

Une seule détection de jour est rapportée 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 10 et Figure 34).

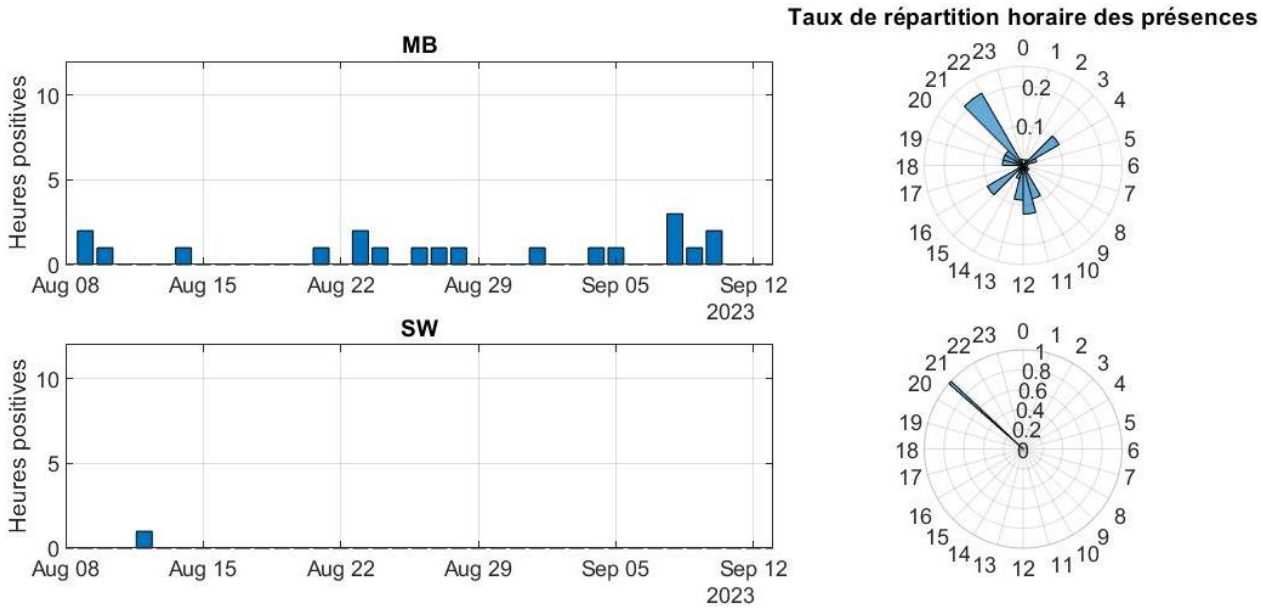


Figure 34. Occurrence des clics de marsouins sur les deux stations révélant des présences (le graphique en barre représente le nombre d'heures positives par jour au cours du suivi et les diagrammes en rosace, la répartition horaire de ces heures positives).

Tableau 10. Résumé des détections de marsouins (avec un cycle d'acquisition de 30 %, voir Annexe 8.2.2 pour les résultats avec un cycle continu).

Stations	***Nombres d'évènements de présence***	***Minutes positives***	***Heures positives***	***Jours positifs***	***Durée moyenne des évènement (± écart type, en secondes)***	***Durée maximale en seconde***	***Fréquentation***
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

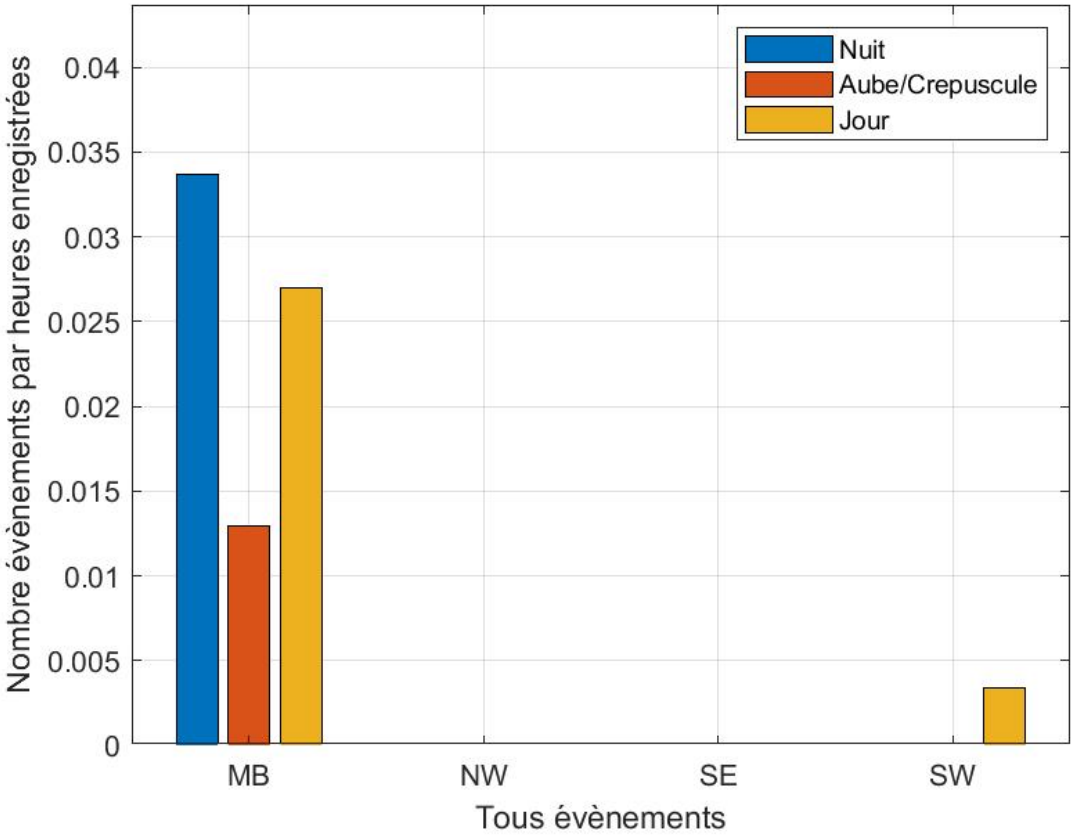


Figure 35. Comparaison entre les stations du nombre d'évènements de présence acoustique des marsouins par heures d'enregistrement, pour les 3 différentes périodes journalières : Jour, Nuit et Aube - Crépuscule.

5 Interprétation des résultats et discussion

5.1 Les différents contributeurs au paysage acoustique

Différents contributeurs au bruit ambiant ont pu être identifiés au sein des enregistrements :

5.1.1 Le parc éolien

La comparaison des niveaux tiers d'octave du bruit enregistré au sein des différentes stations montre que le parc éolien semble généré un bruit basse fréquence inférieur à 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 10-200 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 ($SPL_{10\text{-}200Hz}$ médian : 109 dB re 1 μPa^2). Située à plus de 2600m, 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.
Les caractéristiques (contenu fréquentiel, intensité) du bruit généré par le parc 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. Bien que globalement positive, la relation entre les niveaux de bruit émis et la vitesse de rotation des pales est complexe (ni linéaires ni monotone), on observe notamment des niveaux sonores plus importants pour des vitesses de rotation comprises entre 8 et 10 rpm.

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 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) et S3 comparés aux autres stations.
La station S3 est située à proximité de la sous-station électrique (OSS). Il 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 suivie. 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.
Les passages de navires détectés au niveau de la station MB située proche de l'ile d'Hoëdic (2 MN au sud du port de la croix) reflètent probablement les activités de plaisance estivales. 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 observé dans cette même gamme de fréquence sur les spectrogrammes long terme (Figure 18). Ces observations reflètent probablement le bruit de fond généré par le trafic maritime lointain.

5.1.3 Le vent

Le vent génère une augmentation des niveaux sonores dans la bande de fréquence 50-1200 Hz avec 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 en été 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 évoqué précédemment, suggère que le bruit enregistré lors de ce suivi, réalisé en phase d'exploitation et en été, est principalement dominé par le trafic maritime.

5.1.4 La houle

L'augmentation de la houle génère une augmentation des niveaux sonores reçus 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, d'après l'étude d'impact acoustique du projet, 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. Lors de fortes houles (> 2 m), les niveaux reçus à 250 et 1000 Hz diminuent pour la station S3. Ceci s'explique par la diminution des activités maritimes autours de la sous-station électrique (OSS), étant donné que les transferts par CTV sont arrêtés lorsque la houle dépasse 2 m de hauteur. Les épisodes de fortes houles (> 1.5m) étaient rares durant ce suivi et donc n'influencent pas les niveaux sonores et les spectres médians rapportés. Cependant le bruit généré par cette variable environnementale est susceptible de masquer le bruit des éoliennes (pris en compte pour la caractérisation du bruit des éoliennes en fonctionnement).

5.1.5 La faune benthique

Des cycles journaliers ont été observés pour l'ensemble des stations situées au sein du parc éolien dans la bande de fréquence centrée autour de 6 kHz. 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 inconnu 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. 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) situé à l'extérieur. Ces variations reflètent probablement des différences d'habitats et communautés benthiques.

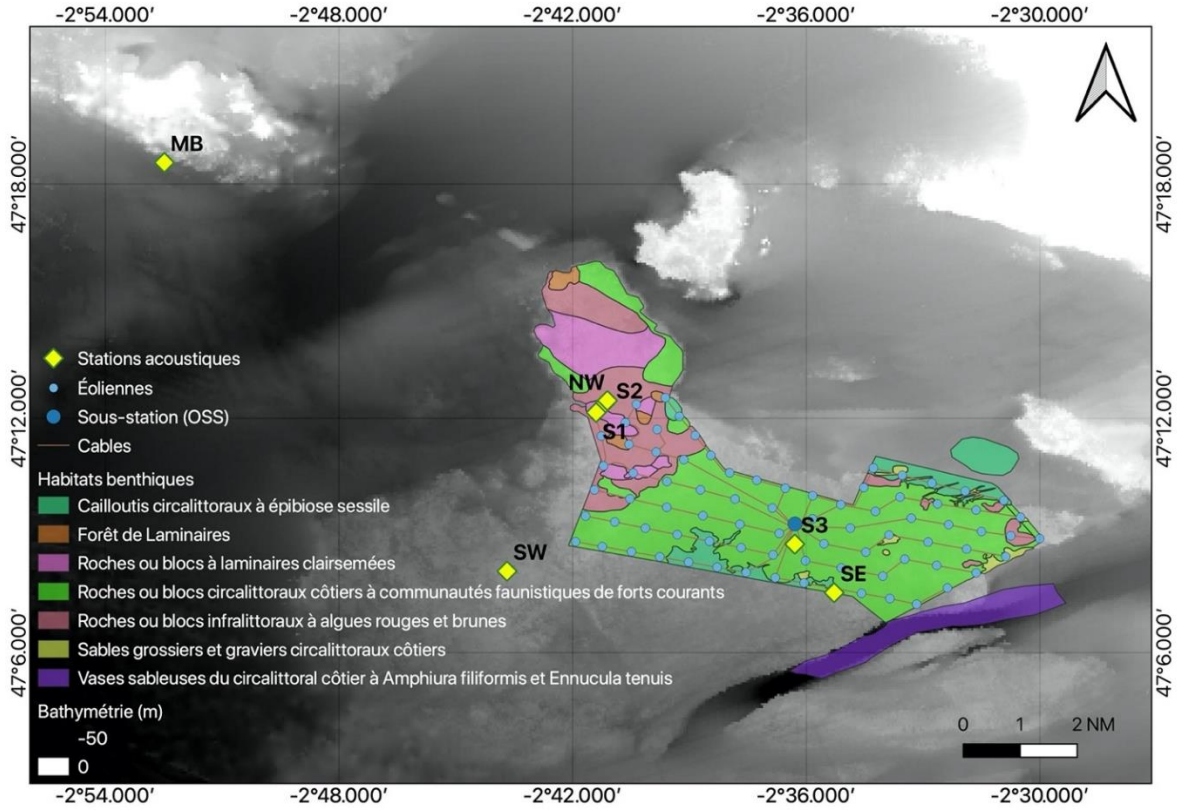


Figure 36. Cartographie des habitats benthiques référencés dans la zone d'étude réalisée lors de l'étude d'impact du projet.

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 REBENT[6], les stations SW et MB sont situées graviers propres du côtier à *Branchiostoma lanceolatum* et *Venus fasciata*. L'écosystème de MB semble particulièrement différent de ceux des autres stations. En effet, le bruit ambiant comporte une faible composante sonore associée à la faune benthique ($SPL_{5.6\text{-}7.1\ kHz}$), et présente des cycles de 6 et 12h marqués (SPL_{rms}) reflétant très probablement les courants de marée plus importants.

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

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

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

Les niveaux de bruit ambiant relevés sur la période estivale 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 et supérieurs à ceux relevés en phase de construction (Tableau 11). 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 dela première année de construction et lors de la deuxième année (absence de mesures lors de l'état de référence, cf. Tableau 11).

Tableau 11. Comparaison des niveaux sonores ($SPL_{20\text{-}40000Hz}$) 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).

Station	**État de référence ($SPL_{20\text{-}40000Hz}$ [dB re 1 µPa²])**		**Phase de construction ($SPL_{20\text{-}40000Hz}$ [dB re 1 µPa²])**			**Phase d'exploitation ($SPL_{20\text{-}40000Hz}$ [dB re 1 µPa²])**	
	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)*	*Suivi prévu en Hiver 2024*
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)*	
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)*	
MB (18350 m)	NA	NA	98.8 *(97-101.3)*	99.7 *(97.0-102.9)*	97.1 *(95.7 - 99.2)*	98.7 *(97.8-99.7)*	

La comparaison des spectres de bruit ambiant mesurés en été lors de l'état de référence, et des phases de construction et d'exploitation montre que cette tendance est marquée pour les fréquences associées à l'activité benthique (centrées autour de 6kHz ; Figure 37). Le bruit reçu dans cette bande de fréquence est maximal lors de l'état de référence, diminue lors de la phase de construction avec un minimum lors de la deuxième année (2022) 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 pour les phases de construction et d'exploitation (Figure 37). Ce phénomène est ainsi probablement lié à des facteurs environnementaux affectant l'activité benthique sur une échelle spatiale supérieure à celle du parc.

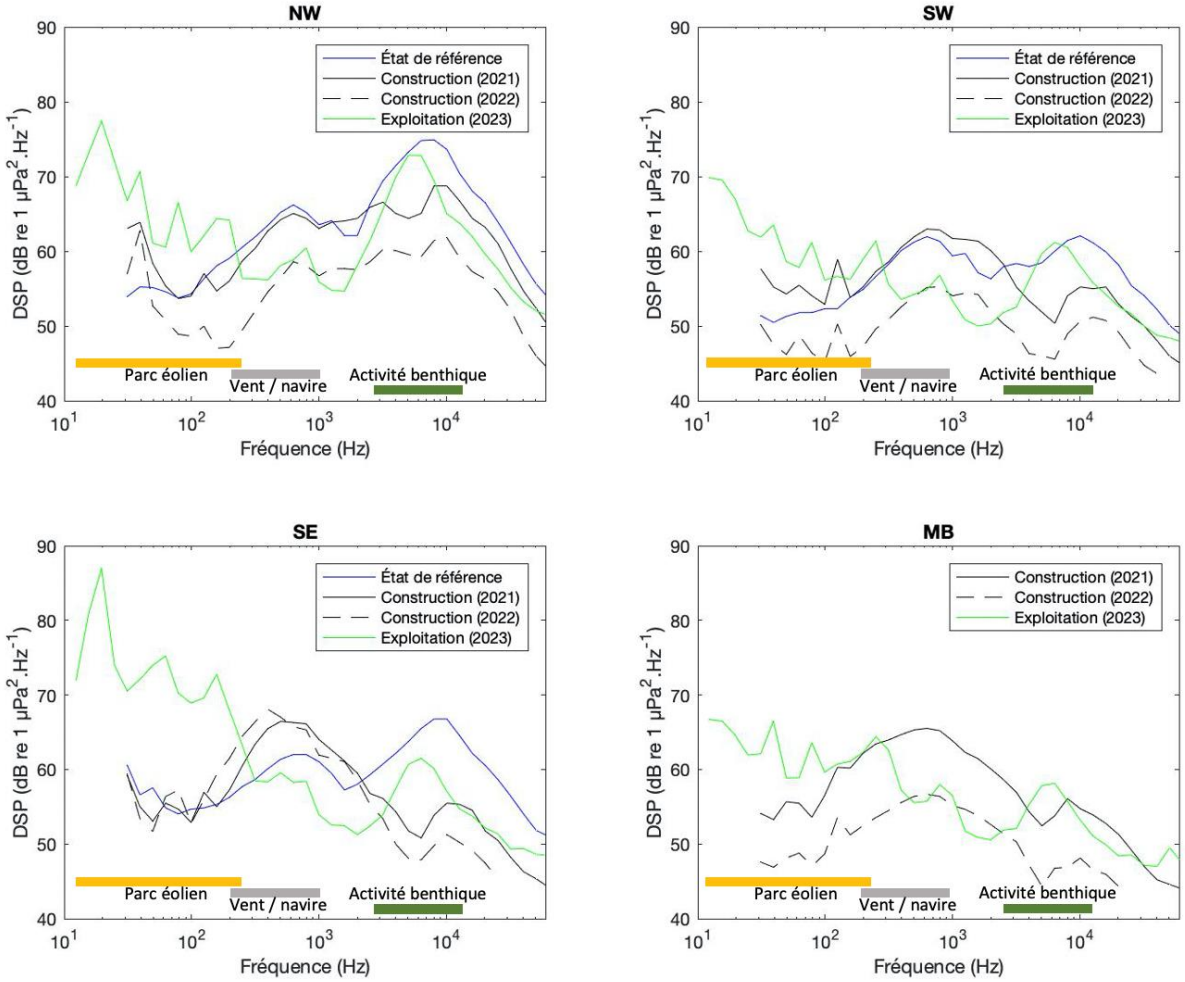


Figure 37. Comparaison des spectres de bruit ambiant relevés en été lors de l'état de référence et des phases de construction et d'exploitation.

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 différentes lors des périodes de mesure (ex. MB, SW) et une augmentation de l'activité anthropique sur zone en phase de construction (ex. SE).

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, suivies mais avec des variations spatiales observées par des différences de taux de présence entre les stations : avec une plus forte fréquentation dans le Mor Braz (quotidienne) que sur les stations à proximité du parc éolien, et plus de détections au sud de celui-ci qu'au nord. Les

différences de taux de fréquentation sont cohérentes avec celles observées lors de l'état de référence (Chompret *et al.,* 2019) et lors du suivi en phase de construction du parc (Chompret *et al.,* 2022), comme synthétisé dans le Tableau 12.

De plus, la différence spatiale de présence acoustiques Nord-Sud est cohérente avec les densités estivales de petits delphinidés (dauphins communs et dauphins bleu et blanc) et de grands dauphins, estimées à partir des données des campagnes aériennes SAMM, 2011/2012, et SCANS III, 2016 (Laran *et al.,* 2022) ainsi que des modèles d'habitats préférentiels MANGA (Analyse bibliographique environnementale du projet d'éoliennes flottantes au sud de la Bretagne, TBM Environnement, 2020). Ces modélisations montrent un gradient positif de densité de la côte vers le large pour les petits delphinidés, avec des densités en été inférieure à 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 (≤ 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).

La présence acoustique des delphinidés sur les différentes stations n'a pas révélé de tendance temporelle nette. En effet les détections ont eu lieu de jour, de nuit et à l'aube ou crépuscule. Seule la station du nord-ouest (NW) ne présente pas de détections de nuit mais le nombre très faible de présences sur cette station ne permet pas de conclure à une absence significative à cette période (et des observations de nuit ont eu lieu en considérant un cycle d'acquisition continue). Ces observations sont cohérentes avec les suivis précedents pour lesquels les delphinidés étaient observées aux mêmes périodes (Chompret *et al.,* 2019, 2022).

Des signaux de communication (sifflements) et des clics d'écholocalisation 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'écholocalisation, 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'écholocalisation 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 même de tentatives de capture (Fais *et al.,* 2016 ; Goold & Jones, 1995 ; Holt *et al.,* 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 32), 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.,* 2022, cf. Tableau 12). 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

Une présence acoustique de marsouins a été enregistrée sur la station MB située dans le Mor Braz à proximité d'Hoëdic et SW située au sud-ouest du parc. Cette fréquentation est qualifiée de quotidienne pour MB et exceptionnelle pour la station SW. Les différences de fréquentation, dont l'absence de détection sur les stations situées au sud-est et du nord-ouest du parc, sont cohérentes avec les fréquentations observées lors de l'état de référence (Chompret *et al.,* 2019) et lors du suivi en phase de construction du parc (Chompret *et al.,* 2022), comme synthétisé dans le Tableau 12.

Cette différence spatiale de présence acoustique entre le Mor Braz et le site du parc éolien est également cohérente avec les modèles de densités estivales de marsouins (TBM Environnement, 2020 ; Laran *et al.,* 2022). En effet, la densité de marsouin dans le Mor Braz varie entre 0,10 à 0,20 individus par maille de 9km², contre 0,025 à 0,05 individus au sud du parc et 0,010 à 0,025 individus au nord du parc.

Les taux de répartition horaires des détections de marsouin montrent des présences de jour, de nuit et à l'aube ou crépuscule.

Tableau 12. 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.

		NORD-OUEST (NW)				MOR BRAZ (MB)			
		2019	***2021***	***2022***	***2023***	***2019***	***2021***	***2022***	***2023***
Delphinidés	**Fréquentation**	Exceptionnelle	Occasionnelle	Exceptionnelle	Occasionnelle	-	Quotidienne	Quotidienne	Quotidienne
	Rythme nycthéméral[7]	-	Jour/ Nuit / Aube et Crépuscule	Jour/ Aube et Crépuscule	Jour / Aube et Crépuscule	-	Jour/ Nuit / Aube et Crépuscule	Jour/ Nuit / Aube et Crépuscule	Jour/ Nuit / Aube et Crépuscule
	Comportements (acoustiques)[8]	*Socialisation / déplacement*	*Socialisation*	-	Sifflements et Buzzes (chasse probable)	-	*Socialisation / chasse*	*Socialisation / chasse*	Sifflements et Buzzes (chasse probable)
Marsouins[9]	**Fréquentation**	Exceptionnelle	Exceptionnelle	Absente	Absente	-	Régulière	Régulière	Occasionnelle
	Rythme nycthéméral	-	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 nycthéméral	-	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)	*Socialisation / chasse opportuniste*	*Socialisation / chasse opportuniste*	*Socialisation / chasse opportuniste*	Sifflements et Buzzes (chasse probable)	*Socialisation*	*Socialisation*	*Socialisation/sondage environnement*	Sifflements et Buzzes (chasse probable)
Marsouins[9]	**Fréquentation**	Régulière	Occasionnelle	Occasionnelle	Exceptionnelle	Absente	Occasionnelle	Exceptionnelle	Absente
	Rythme nycthéméral	-	Jour/ Nuit / Aube et Crépuscule	Jour/ Nuit / Aube et Crépuscule	Jour/ Nuit	-	Jour/ Aube et Crépuscule	Jour/ Aube et Crépuscule	-

[7] 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. La définition de « plage horaire préférentielle » n'a pas été gardée par manque de définition claire et semblant être plutôt une interprétation.

[8] 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.

[9] Les détections de marsouins étant des évènements courts et ponctuels, leur probabilité de détection diminue avec un cycle d'acquisition à 30%, entrainant des sous-estimation de la fréquentation des sites (cf. 8.2.2). Les fréquentations obtenues avec un cycle continu (Tableau 14) sont indiquées en annexe à titre informatif.

Ce document est la propriété de PBG.

5.2.3 Limites du suivi acoustique des 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, entrainant une sous-estimation des estimations de fréquentations, notamment pour les évènements plus occasionnels (cf. Annexe 8.2).

Ce document est la propriété de PBG.

6 Conclusion

Bruit ambiant dans l'aire d'étude du parc éolien en mer de St Nazaire

- Différents contributeurs au bruit ambiant ont été identifiés dont le parc éolien, le trafic maritime, la houle, le vent et l'activité biologique benthique.
- Le parc éolien en exploitation génère un bruit dans la gamme de fréquence allant de 10 à 250 Hz. Ce bruit est susceptible d'être masqué par la houle.

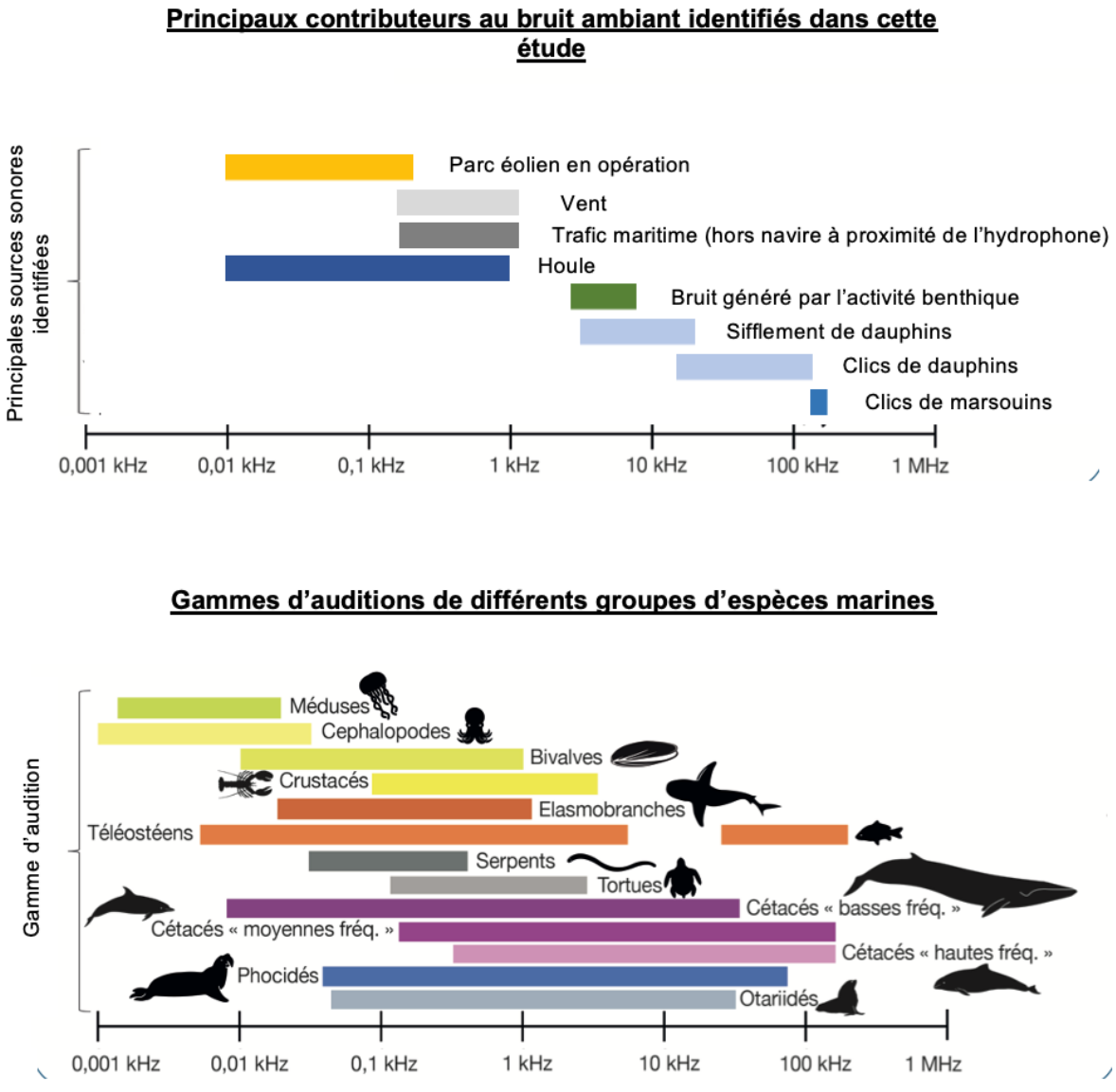


Figure 38. Comparaison des bandes de fréquences associées aux différentes sources sonores identifiées lors de ce suivi avec les gammes d'audition de divers groupes d'espèces marines.

- 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 bruit médian généré par le parc est

uniquement audible par les cétacés basse fréquence (mysticètes) au niveau de la station SE située à 198 m d'une éolienne (Figure 39).

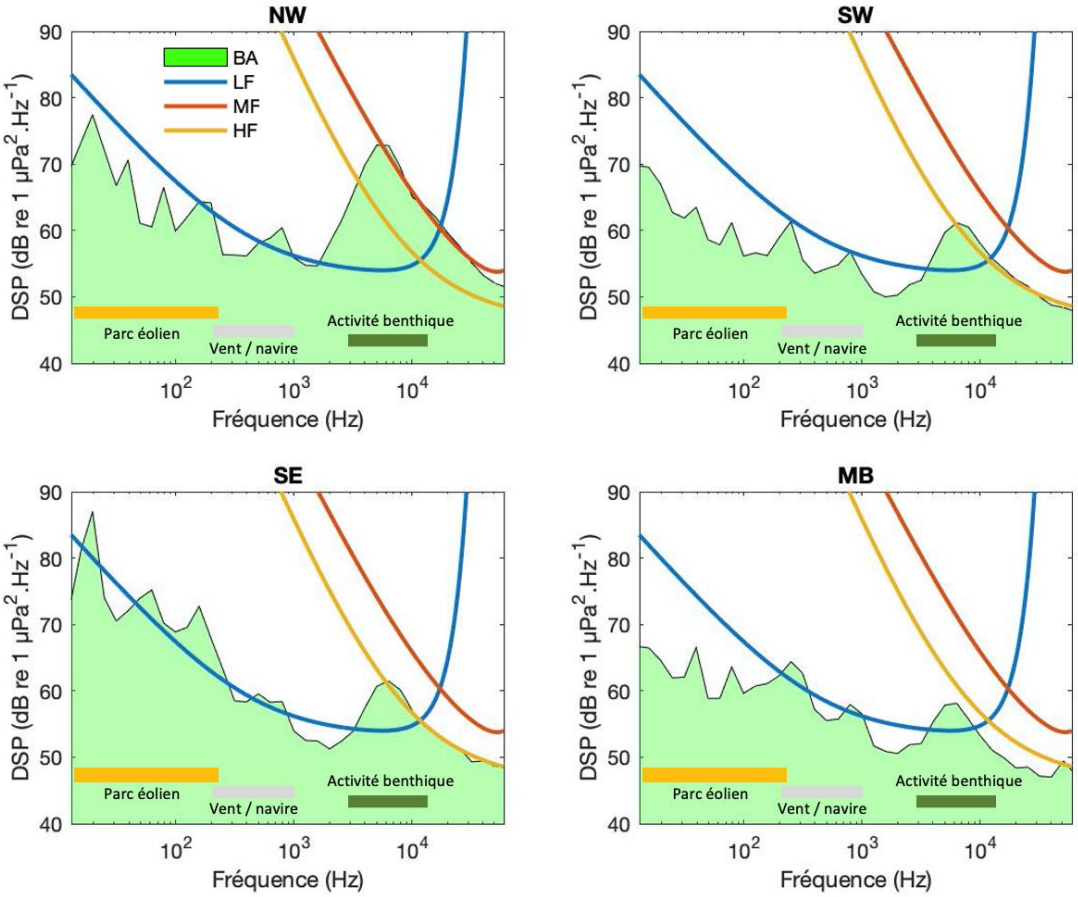


Figure 39. Comparaison du bruit ambiant médian reçu au niveaux des stations NW, SW, SE et MB avec les audiogrammes des cétacés basse fréquence (LF), moyenne fréquence (MF) et haute fréquence (HF).

- Les niveaux de bruit ambiant relevés dans cette étude sont légèrement inférieurs à ceux enregistrés lors de l'état de référence. Une évolution générale des niveaux sonores dans la gamme de fréquence associée à la faune benthique est observée sur l'ensemble des stations, y compris celle située 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.

Fréquentation de la zone par les mammifères marins

- La fréquentation des delphinidés et des marsouins au niveau des stations suivies est cohérente avec les suivis précédents, notamment lors de l'état de référence avant les travaux d'installation du parc éolien.
- 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 évènements 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).

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.

Bellanger J., Chompret J., Clorennec D., Ringelstein J., Caillat M. (2022), Suivi par acoustique passive du bruit ambiant et de la fréquentation des mammifères marins dans le cadre du parc éolien en mer de Normandie, Rapport intermédiaire, numéro QO.20210225.10.RAP.001.02A, Quiet-Oceans, Brest, France

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).

Chompret J., Clorennec D. (2022), Suivi acoustique passif du bruit ambiant et des mammifères marins dans le cadre du parc éolien en mer de Courseulles, Etat de référence, numéro QO.20200818.10.RAP.001.02A, 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.

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

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. I*CES 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.

Hammond, P.S et al. (2021). Estimates of cetacean abundance in European Atlantic waters in summer 2016 from the SCANS-III aerial and shipboard surveys. SCANS-III project report 3.

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

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.

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.

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.

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

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 Blasket 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

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. T*he Journal of the Acoustical Society of America, 124(1), 609-624.*

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.

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. https://doi.org/10.1242/jeb.113415

8 Annexes

8.1 Détermination des évènements de présence de delphinidés

Les spectrogrammes de 10 secondes contenant des vocalises de delphinidés produisent des séquences de présence semblant se produire par épisodes (Figure 40). 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 41). En appliquant une fonction de lissage sur ces probabilités en fonction des intervalles inter-détections, on observe sur la Figure 41 que la probabilité relative par durée diminue rapidement avec l'augmentation des durées inter-évènements, 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-évènement sont plus courtes et plus commune (forte probabilité relative).
On obtient alors une durée seuil d'environ 10 minutes entre deux détections acoustique pour déterminer un nouvel « évènement de présence » (Figure 41).
Cette durée seuil de 10 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 durée inter-détections avec ce cycle d'acquisition on observe des modes sur la distribution des intervalles inter-détection qui correspondes au cycles d'enregistrement de 30% (Figure 42). 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 évènement.

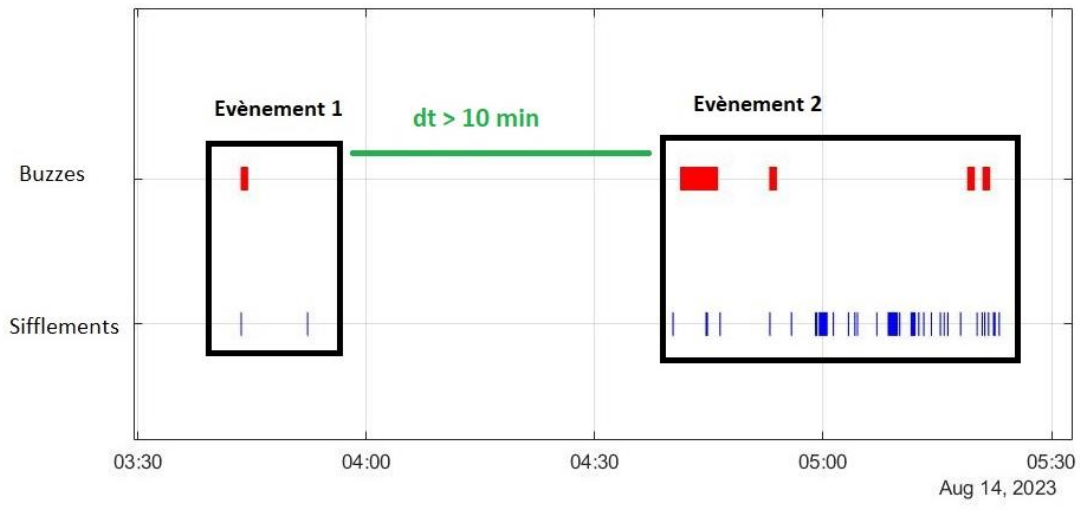


Figure 40. Exemple de séquences de détections de sons de delphinidé au cours du temps et détermination de 3 évènements de présence basé sur un intervalle inter-détection de 10 min (Figure 41).

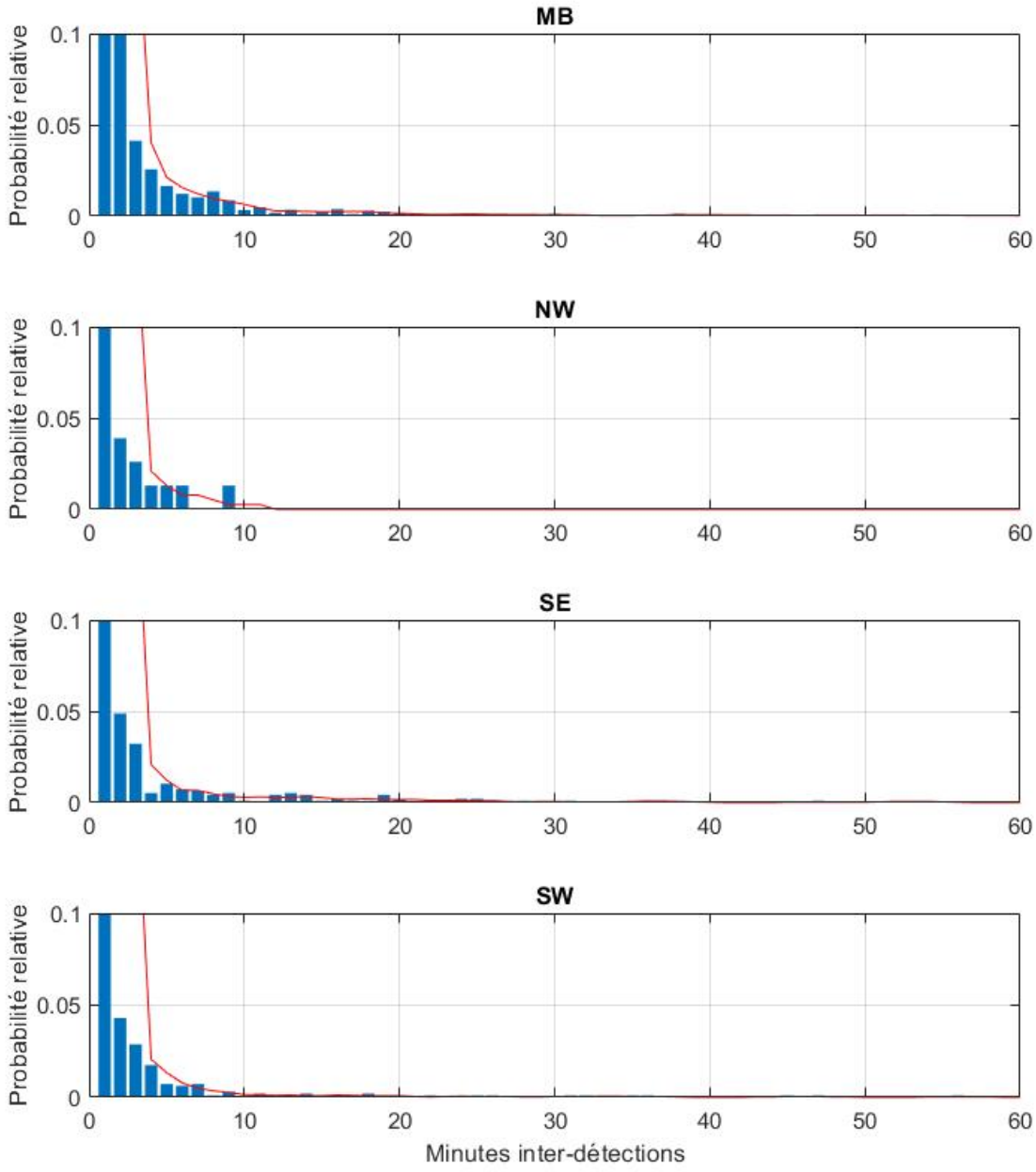


Figure 41. Fréquence des intervalles (minutes) inter-détections de sifflements de dauphins sur le cycle en continue.

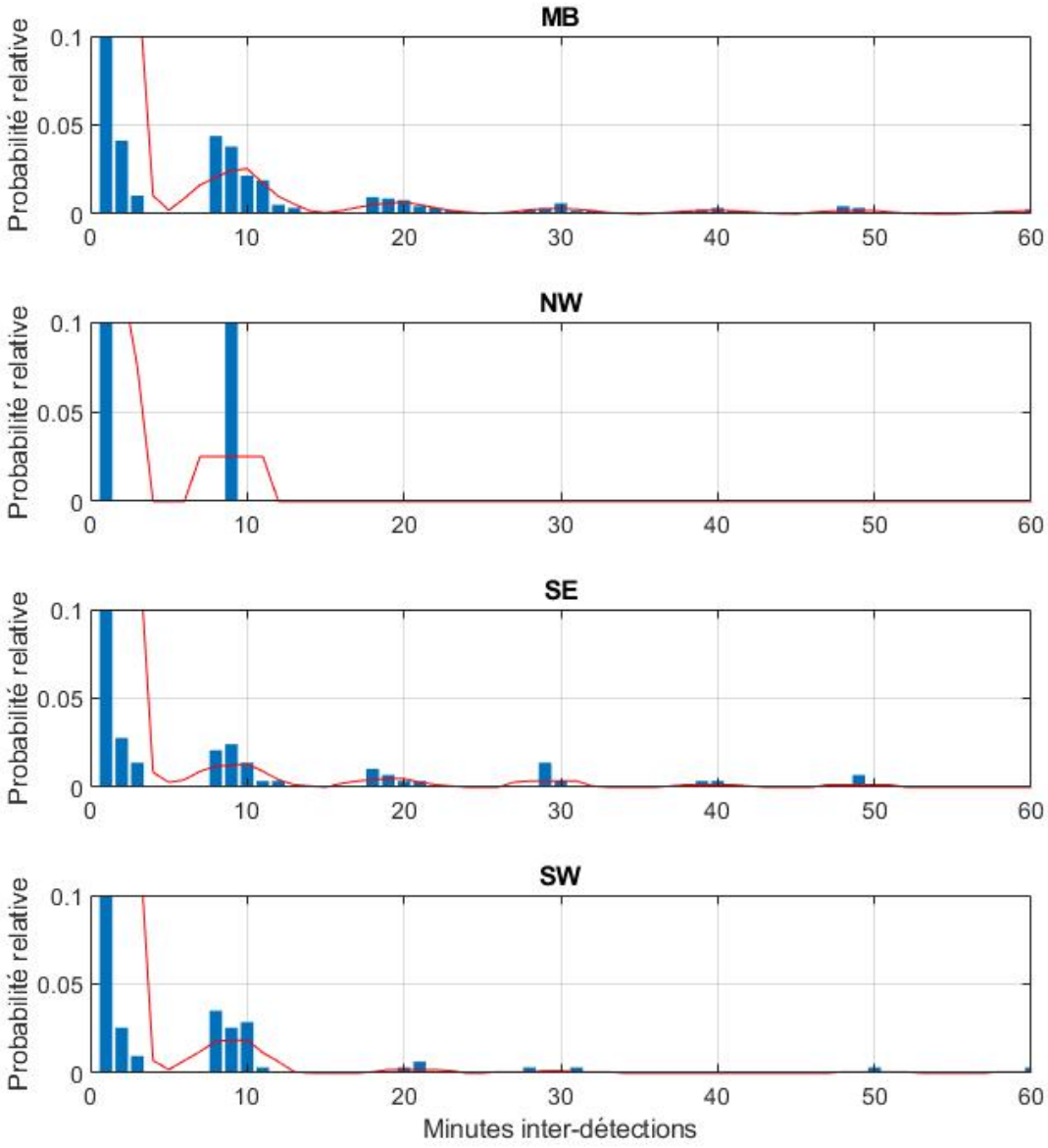


Figure 42. Fréquence des intervalles (minutes) inter-détections de sifflements de dauphins sur le cycle à 30%.

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

8.2.1 Présence de delphinidés

Le Mor Braz présente une fréquentation de delphinidés quotidienne avec 97,1 % des jours d'enregistrement présentant au moins une détection acoustique (Tableau 13). 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 jusqu'en fin de journée vers 20 h (Figure 43). Ces détections sont réparties sur 282 évènements de présence, d'en moyenne 864±1676 secondes (dont un évènement atteignant plus de 4 heures), parmi lesquels 121 évènements présentaient des productions de buzz (Tableau 13).

Sur les deux stations du sud (SE et SW) les fréquentations sont assez similaires avec des détections quotidiennes sur les deux premières d'enregistrement (du 9 au 23 aout), puis une diminution du nombre d'heures positives par jour jusqu'à la fin août (Figure 43). 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 43).

La plus faible présence acoustique 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 13 et Figure 43). La fréquentation sur la station NW peut donc être considérée comme occasionnelle.

Les résultats obtenus par un enregistrement continu (Tableau 13 et Figure 43) différent que très peu de ceux obtenus avec un cycle d'acquisition de 30 % (Tableau 9 et Figure 30). On observe une légère sous-estimation des temps positifs ainsi que du nombre d'évènement, de par la diminution de la probabilité de détection de signaux avec des sons de 30 %. Cependant, il est notable que l'estimation des taux de répartition des horaires de présence donne des résultats similaires. Les estimations de fréquentation sont quasiment les même entre les deux cycles d'acquisitions, surtout pour les stations avec de forte taux de présence. 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.

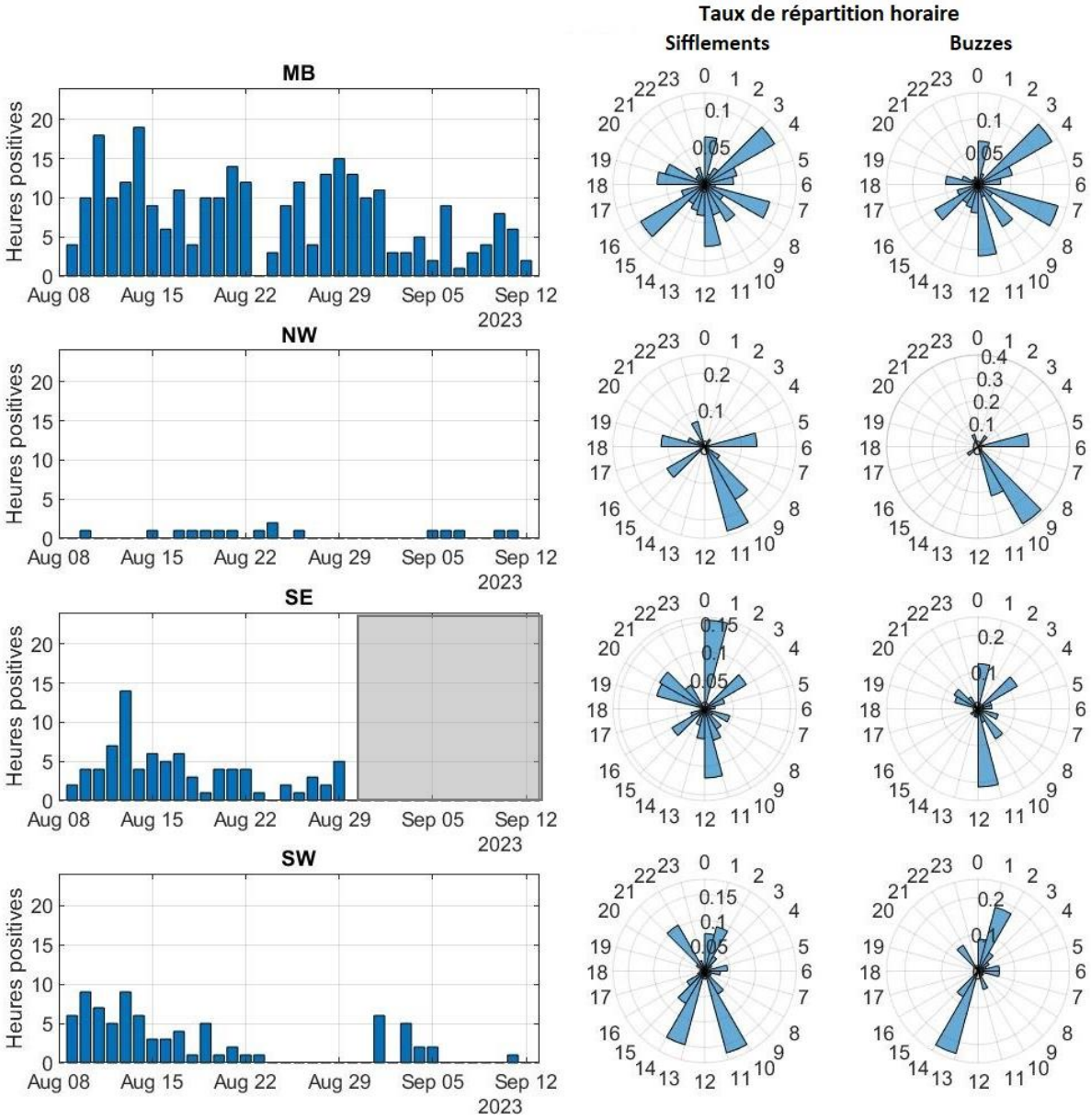


Figure 43. Occurrences des présences acoustiques de dauphins sur les 4 stations représentées par le nombre d'heures positives par jour (diagrammes bars) et de la répartition horaire de détection de vocalises et de buzzes (diagrammes en rosace, heures positives), obtenues avec un cycle d'enregistrement continu.

Tableau 13. Résumé des détections de delphinidés (avec un cycle d'acquisition de continu).

Station	***Minutes Positives[10]***	***Heures positives***	***Jours positifs***	***Nombre d'événement de présence***	***Durée moyenne des évènement (± écart type, en secondes)***	***Durée maximale en seconde***	***Nombre d'évènement avec buzz (%d'évènement)***	***Pourcentage de minutes positives avec buzzes lors des évènements***	***Pourcentage de minutes positives avec vocalises lors des évènements***	***Fréquentation***
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

[10] Minutes positives de présence définies par les évènements (cf. section 8.1)

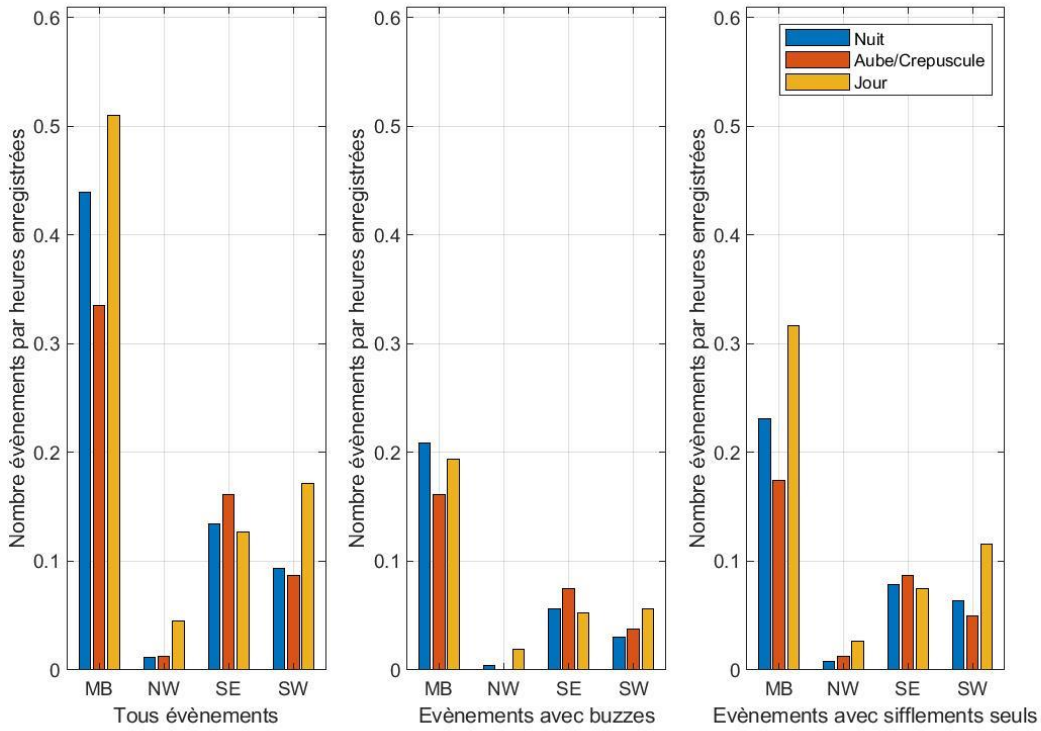


Figure 44. Comparaison entre les stations du nombre d'évènements de présence acoustique (obtenues avec un cycle continue) de delphinidés par heures d'enregistrement, pour les 3 différentes périodes journalières : Jour, Nuit et Aube - Crépuscule.

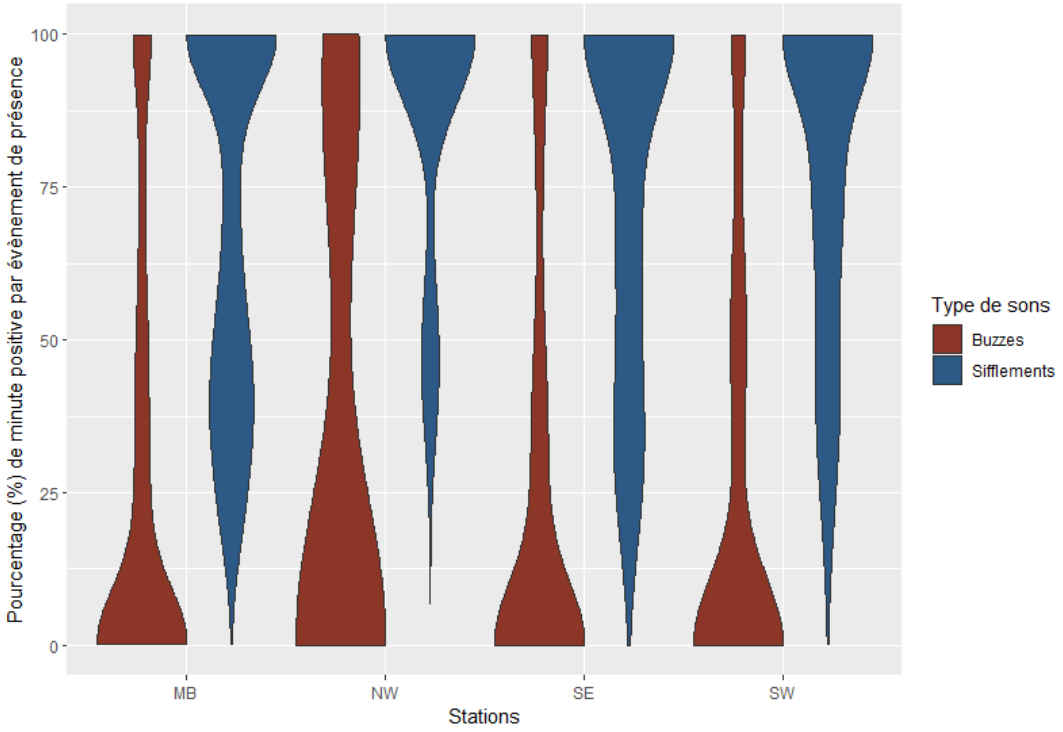


Figure 45. Densités de probabilité des pourcentages de minutes positives avec présence de buzzes (rouge) et avec présence de sifflements (bleu), représentées sous forme de diagrammes en violon par station, avec un cycle d'enregistrement continu. Ces diagrammes permettent de décrire la distribution des pourcentages de minutes positives par évènement de présence, ainsi une augmentation des courbes révèlent donc une augmentation de la probabilité d'observer ces valeurs.

8.2.2 Présence des marsouins

La présence acoustique de marsouin a été détectée sur les deux stations MB et SW, avec une plus forte occurrence dans le Mor Braz (181 détections) qu'à proximité du parc (8 détections sur la station du sud-ouest, cf Tableau 14).

Les 79 minutes positives de marsouins détectées dans le Mor Braz ont été observées sur 46 heures différentes, réparties sur 25 jours différents (soit 71,4 % du nombre de jour de déploiement, cf. Tableau 14). La présence de marsouins dans le Mor Braz peut alors être catégorisée comme très fréquente voire quasi-quotidienne, avec 8 périodes de 1 à 2 jours maximum sans détection (Figure 46). Sur la station du sud-ouest 11,4 % des jours d'acquisition ont révélé une présence de marsouins. Cette présence acoustique est concentrée sur 4 jours au début du déploiement : soit une fréquentation fréquente sur la première semaine d'enregistrement, mais occasionnelle sur l'ensemble du déploiement (Figure 46).

Les taux de répartition horaire (diagrammes en rosace) sur les deux stations indiquent une présence plus forte en milieu de journée, entre 12 et 15 heures (Figure 46).

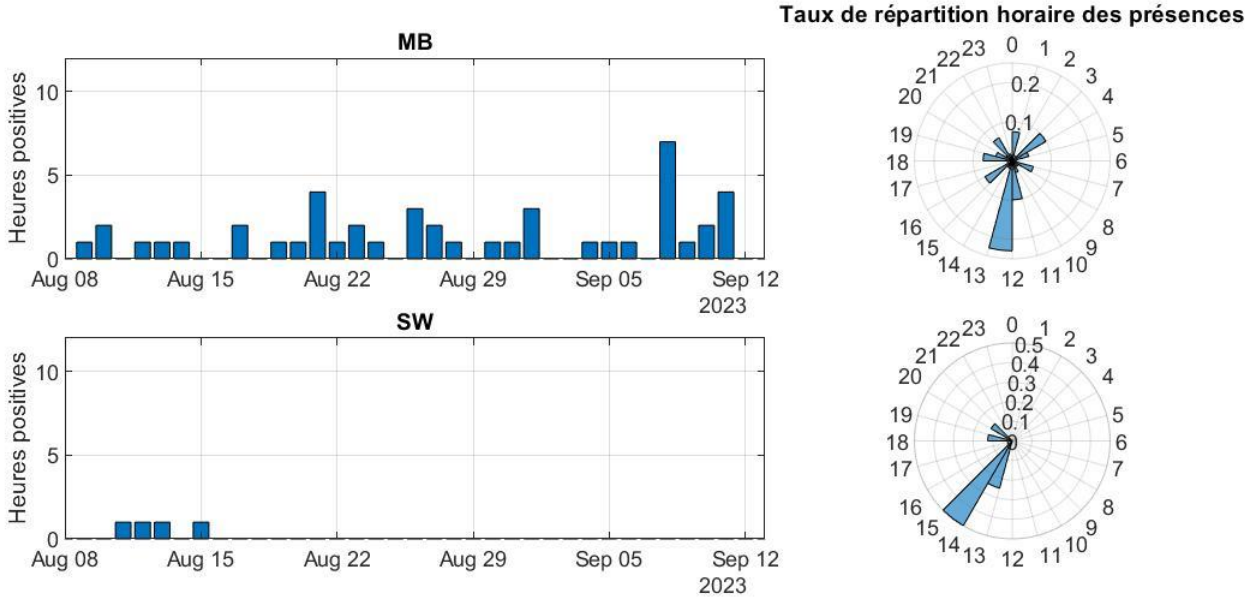


Figure 46. Occurrence des clics de marsouins sur les deux stations révélant des présences (le graphique en barre représente le nombre d'heures positives par jour au cours du suivi et les diagrammes en rosace, la répartition horaire de ces heures positives).

Tableau 14. Résumé des détections de marsouins (avec un cylce d'acquisition de 100 %).

Stations	***Nombres d'évènements de présence***	***Minutes positives***	***Heures positives***	***Jours positifs***	***Durée moyenne des évènement (± écart type, en secondes)***	***Durée maximale en minutes***	***Fréquentation***
MB	19	79 (0,2 %)	46 (5,7 %)	25 (71,4 %)	80,4 ±169,1	17,4	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 %)	19,2 ±13,9	0,2	Occasionnelle

Les résultats obtenus par un enregistrement continu (Tableau 14 et Figure 46) sont légèrement différents de ceux obtenus avec un cycle d'acquisition de 30 % (Tableau 10 et Figure 34). 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 %.

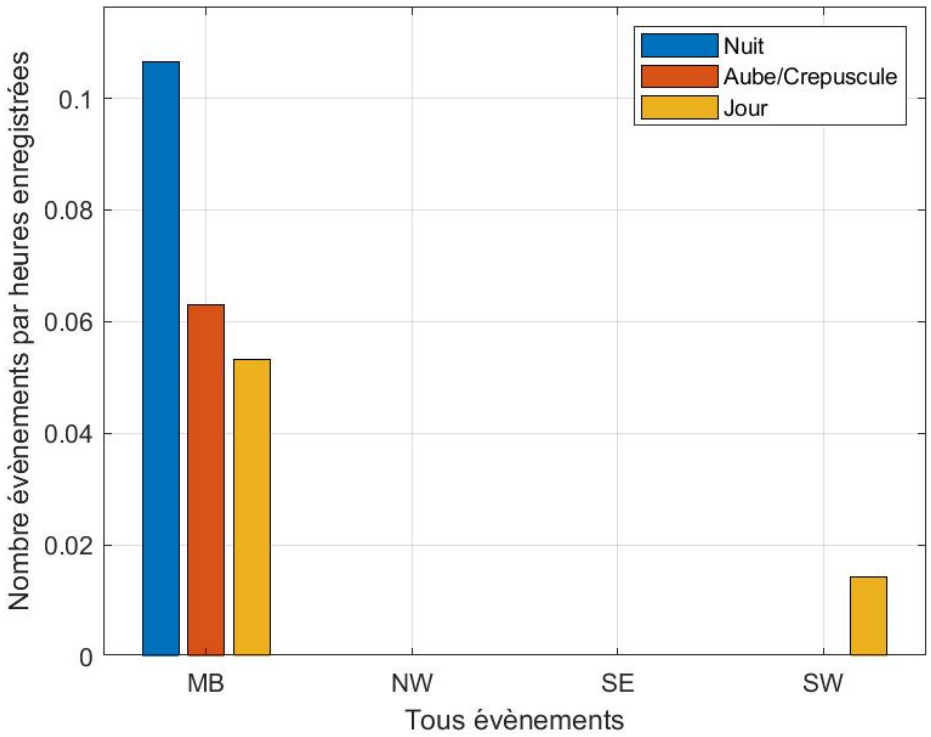


Figure 47. Comparaison entre les stations du nombre d'évènements de présence acoustique (obtenues avec un cycle continue) des marsouins par heures d'enregistrement, pour les 3 différentes périodes journalières : Jour, Nuit et Aube - Crépuscule.

8.3 Protocole de suivi en phase d'exploitation

Parc éolien en mer de St-Nazaire

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

Ce document est la propriété de PBG.

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

Ce document est la propriété de PBG.

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

Objectifs du suivi

Suivre la fréquentation de la zone par les mammifères marins ;

Suivre le bruit ambiant.

Calendrier de mise en œuvre de ce protocole

Phase(s)	Validation préalable
Etat de référence : avant le début du chantier en mer	CTE – Mai 2019

Protocole du suivi

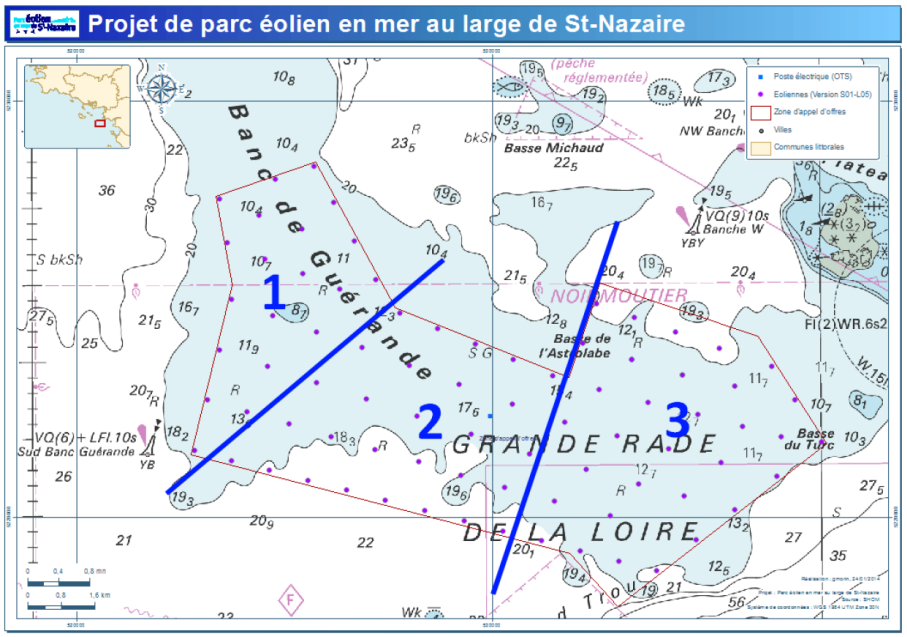
Focus sur la zone d'implantation indispensable – Fine échelle spatio-temporelle. Espèces cibles : marsouins et petits delphinidés.

- **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

Ce document est la propriété de PBG.

du parc et les hydrophones répartis dans chacune de ces zones.



LOCALISATION DES CAMPAGNES DE SUIVI ACOUSTIQUE

Partenaires envisagés

Bureau d'étude spécialisé en acoustique sous-marine et bio-acoustique.

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 besoin de la caractérisation de l'état initial et de l'analyse des impacts, une étude visant à produire des connaissances sur l'ambiance 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 ;

Ce document est la propriété de PBG.

- 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.

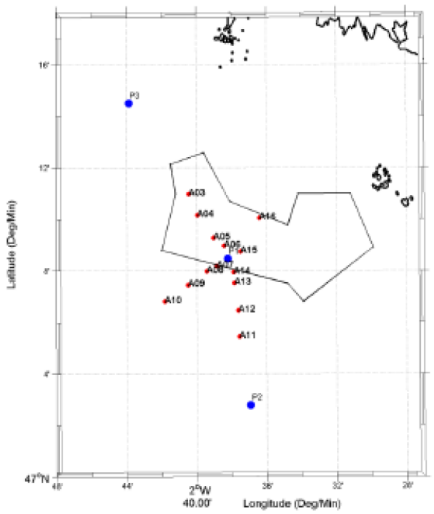


Figure 7 : Positions des enregistreurs acoustiques (P) et des émissions actives (A) ayant servi à la calibration des résultats de l'étude.

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.

Ce document est la propriété de PBG.

Moyens d'acoustique passive mis en œuvre

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

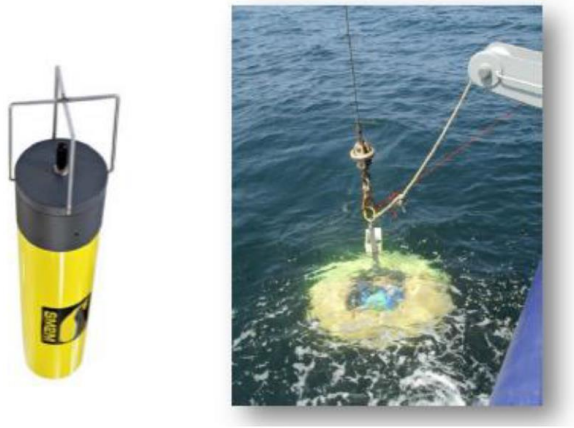


Figure 8 : Gauche : SM2M de la société Wildlife Acoustics. Droite : mise en œuvre de la cage instrumentée (source : Quiet-Oceans)

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.

Ce document est la propriété de PBG.

Ces résultats ont abouti à des mesures de gestion des risques proposées par BioConsult (BioConsult, 2013, rapport annexé à l'Etude 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

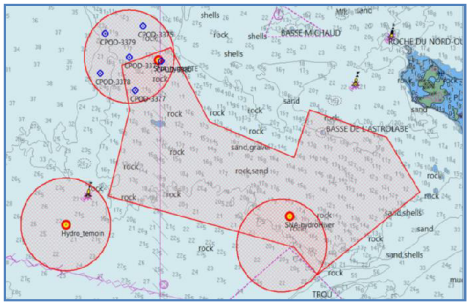
- Delphinidés (clics et sifflements)
  - Grand dauphin, *Tursiops truncatus*
  - Dauphin commun, *Delphinus delphis*
  - Dauphin de Risso, *Grampus griseus*
  - Globicéphale noir, *Globicephala melas*
- Phocoenidés (clics à haute fréquence)
  - Marsouin commun, Phocoena phocoena

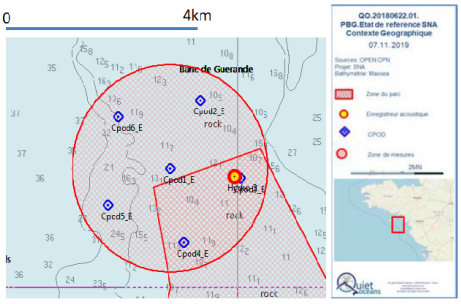
La mise en œuvre de cette mesure a été confiée au bureau d'étude spécialisé QUIET OCEANS. Les informations ci-dessous sont extraites du rapport **QO.20180622.01.RAP.001.05A**, présenté aux membres du Comité Technique Environnemental le 16 septembre 2020.

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:

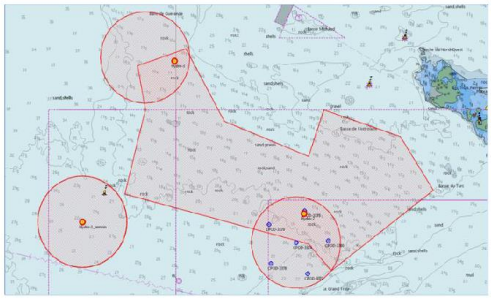
- Campagne été 2019 (20 juin au 30 octobre 2019)

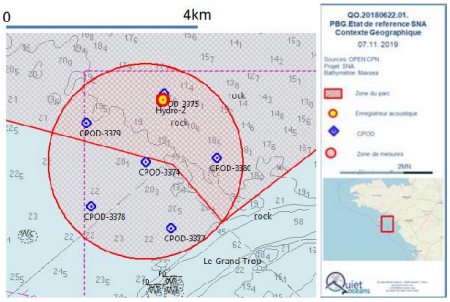




Ce document est la propriété de PBG.

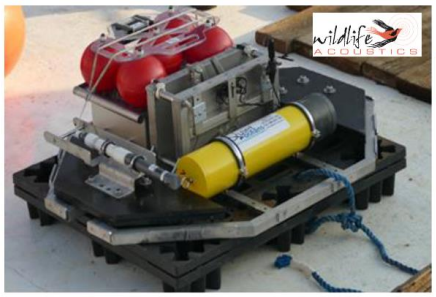
- Campagne hiver 2020 (25 janvier au 18 mai 2020)





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 ;

Ce document est la propriété de PBG.

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 fournit 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.**

Ce document est la propriété de PBG.

3 Fiche mesure MSU8 – phase d'exploitation

MSU 8		SUIVI Phase d'exploitation	ECOSYSTEMES Mammifères marins

SUIVI DES MAMMIFERES MARINS PAR ACOUSTIQUE PASSIVE

Objectifs du suivi

- **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.**

Calendrier prévisionnel de mise en œuvre de ce protocole

Phase(s)	Validation préalable
Exploitation (éoliennes en fonctionnement)	CTE – juin 2023

Protocole du suivi

Protocole de terrain

1. Suivi du bruit ambiant et des mammifères marins : déploiement de 4 enregistreurs acoustiques
   - 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 :
     - 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

Ce document est la propriété de PBG.

OFF)

- 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 *in situ* du bruit d'une éolienne en fonctionnement et du bruit du parc éolien :
   - 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

- Modélisation - cartographie de l'empreinte acoustique du parc en fonctionnement :
  - 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 *in situ* ;
- 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 %

- 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 :

- 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

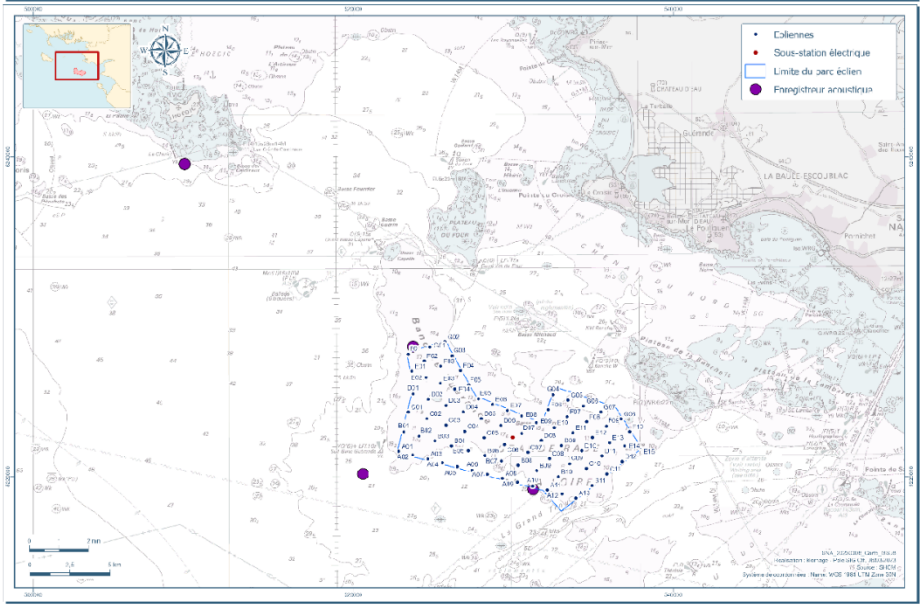
Ce document est la propriété de PBG.

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

Ce document est la propriété de PBG.

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 connaitre le traitement fait de la donnée ni de retraiter *a postériori* 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.

Ce document est la propriété de PBG.