

Suivi par acoustique passive du bruit ambiant et de la fréquentation des mammifères marins dans le cadre de la construction du parc éolien flottant Provence Grand Large (PGL)

Etat de référence

Identification du document

Référence du document	QO.20220106.10.RAP.03A
Donneur d'ordre	EDF-RE
Client	EDF-RE
Contact	Emma Gouze (Emma.Gouze@edf-re.fr)
Reference du contrat	

PROJET	DOC	CHRONO	VER	IND	CLIENT	ACRO	DATE	TYPE	CLASS
QO.20220106.10	RAP	001	03	A	EDF-RE	PGL	19.03.2024	PROD	DR



Ocean Noise Forecasting Monitoring & Mitigation



Historique du document						
Ver	Ind.	Responsable	Date	Validation	Transmission	Description
01	A	J. Bellanger / J. Chompret	21.09.2023	D. Clorennec	13.10.2023	Version initiale
02	A	J. Bellanger / J. Chompret	15.11.2023	D. Clorennec	15.11.2023	Prise en compte des commentaires EDF-RE
03	A	J. Chompret	18.03.2024	D. Clorennec	19.03.2024	Prise en compte des commentaires EDF-RE

Citation

Bellanger J., Chompret J., Clorennec D.,(2023), Suivi par acoustique passive du bruit ambiant et de la fréquentation des mammifères marins dans le cadre de la construction du parc éolien flottant Provence Grand Large (PGL), Etat de référence, numéro QO.20220106.10.RAP.001.03A, Quiet-Oceans, Brest, France

Table des matières

Table des matières.....	3
Liste des figures	4
Liste des tableaux	7
Lexique des mots techniques	9
Chapitre I. Présentation de l'étude.....	12
Chapitre II. Introduction.....	13
II.1. La problématique du bruit sous-marin	13
II.2. Qu'est-ce que le chorus sonore sous-marin.....	14
Chapitre III. Protocole de mesures acoustiques.....	16
III.1. Les systèmes de mesure	17
III.2. Données collectées.....	21
Chapitre IV. Analyse des niveaux sonores mesurés	24
IV.1. Période hiver/printemps 2023 (données du 06/03 au 31/03/2023)	24
IV.2. Période été 2023 (données du 29/06 au 28/07/2023).....	34
Chapitre V. Cartographie du bruit ambiant.....	45
V.1. Plateforme de modélisation	45
V.2. Cartographie statistique	47
Chapitre VI. Détection des signaux biologiques	54
VI.1. Connaissances biologiques	54
VI.2. Portée de détection des enregistreurs acoustiques.....	60
VI.3. Procédé de traitement bioacoustique.....	62
VI.4. Résultats	63
VI.5. Limites et difficultés rencontrées.....	81
Chapitre VII. Conclusions	84
VII.1. Analyse des niveaux sonores	84
VII.2. Analyse de la fréquentation et du comportement des mammifères marins	86
Bibliographie	89

Liste des figures

Figure 1 : Contexte géographique de l'étude.....	12
Figure 2 : Echelle qualitative des niveaux (émis à un mètre) et fréquences des sources sonores anthropiques, biologiques et naturelles dans le milieu marin. Source : OSPAR.	13
Figure 3 : Composition du chœur sonore sous-marin.	14
Figure 4 : Synthèse des niveaux de bruit typiques en fonction de la fréquence et de la nature de la source de bruit. Ces valeurs peuvent être très dépendantes du site, de la saison, et du contexte . Source (Dosits.org, 2016).	15
Figure 5 : Illustration schématique des effets de la variation du profil de célérité sur la propagation du son (source Quiet-Oceans)	16
Figure 6 : Protocole géographique des mesures longues durées.....	17
Figure 7 : Enregistreur acoustique autonome (à gauche) et ligne instrumentée avec son panier (à droite).	18
Figure 8 : Evolution des niveaux intégrés dans la bande [20Hz;40kHz] (exprimés en dB ref 1µPa²) mesurés lors de la période hiver/printemps 2023.....	26
Figure 9 : Corrélation du bruit permanent (orange) avec les conditions météorologiques (bleu) dans la zone d'étude lors de la période hiver/printemps 2023.	27
Figure 10 : Carte de densité de navigation dans la zone d'étude lors de la période hiver/printemps 2023.	29
Figure 11 : Illustration d'un passage du navire de pêche 'Bernadette' proche de la station R3 En haut, spectrogramme; En bas, niveau sonore associé (bande de 20Hz-5kHz) exprimé en dB ref 1µPa²....	30
Figure 12 : Répartition fréquentielle de l'énergie acoustique mesurée en hiver/printemps 2023 (à gauche). Répartition horaire des émergences sonores en hiver/printemps 2023, au percentile 50% dans les bandes 89Hz-110Hz (au centre) et 7.1-8.9kHz (à droite).	33
Figure 13 : Evolution des niveaux intégrés dans la bande [20Hz;40kHz] (entre 20 Hz et 40 kHz, exprimés en dB ref 1µPa²) mesurés lors de la période été 2023.....	36
Figure 14 : Corrélation du bruit permanent (orange) avec les conditions météorologiques (bleu) dans la zone d'étude lors période été 2023.....	37
Figure 15 : En haut, spectrogramme du passage proche du navire cargo « GLEN » à proximité de la station R1, dans la journée du 09 Juillet 2023. En bas, niveau sonore associé à ce passage de navire (20Hz-10kHz) exprimé en dB ref 1µPa².	38
Figure 16 : Spectrogrammes d'évènements acoustiques repérés lors de la période été 2023, à proximité de la station R4.	39
Figure 17 : Carte de densité de navigation dans la zone d'étude lors de la période été 2023.	41
Figure 18 : Répartition fréquentielle de l'énergie acoustique mesurée en été 2023 (à gauche). Répartition horaire des émergences sonores en été 2023, au percentile 50% dans les bandes 89Hz-110Hz (au centre) et 7.1-8.9kHz (à droite).	44
Figure 19 : Description schématique de la plateforme opérationnelle de prévision des bruits. (Source: Quiet-Oceans)	46
Figure 20 : Niveau sonore induit par le vent en fonction de la fréquence et de la vitesse.	48
Figure 21 : Densité de trafic dans la zone au mois de Mars 2023.	49
Figure 22 : Gabarit sonore des navires en fonction de la longueur, la vitesse et la fréquence	50
Figure 23 : Distribution des niveaux sonores (en rouge, courbe prédite, en bleu, donnée mesurée) à la station R1, à l'issue du processus de calibration.	51
Figure 24 : Cartographie statistique du bruit (entre 20 Hz et 5.65 kHz) par mois, calculée aux percentiles 10% (à gauche) et 50% (à droite).....	53
Figure 25 : Schéma de la classification scientifique des espèces océaniques et marines de mammifères. Source : Quiet-Oceans.	55
Figure 26 : Famille des Delphinidés – Grand dauphin (<i>Tursiops truncatus</i>). Source : EcoOcéan Institut.	56
Figure 27 : Famille des Delphinidés – Dauphin commun (<i>Delphinus delphis</i>). Source : NOAA.	56
Figure 28 : Famille des Balénoptéridés – Rorqual commun (<i>Balaenoptera physalus</i>). Source : MICS.	56

Figure 29 : Famille des Physétéridés – Cachalot (<i>Physeter macrocephalus</i>). Source : AMP.	56
Figure 30 : Sifflements de Delphinidés émis entre 2 kHz et 25 kHz. Source : Quiet-Oceans.	57
Figure 31 : Clics de Delphinidés émis entre 10 kHz et 180 kHz. Source : Quiet-Oceans.	57
Figure 32 : Pulses (downsweep «) émis par un Rorqual commun (<i>Balaenoptera physalus</i>) entre 20 et 40 Hz. Source : Quiet-Oceans, enregistrement recueilli le 09/09/2018 via un hydrophone positionné à 35m de profondeur en mer Méditerranée.	59
Figure 33 : Pulses émis par le Rorqual commun (<i>Balaenoptera physalus</i>).	59
Figure 34 : Clics de Cachalot macrocéphale (<i>Physeter macrocephalus</i>) entre 2 et 30 kHz. Source : Quiet-Oceans.	60
Figure 35 : Procédure générale appliquée à la donnée brute pour le traitement bioacoustique des enregistrements sonores.	62
Figure 36 : Périodes de détections des clics et sifflements de Delphinidés en fonction du jour et de la nuit au niveau de chaque station (R1, R3 et R4) entre le 06 et 21 mars 2023.	65
Figure 37 : Trains de clics de communication et cris pulsés émis par les Delphinidés entre 3 et 85 kHz, à proximité de la station R1, suggérant un épisode de communication intense entre individus. Enregistrement du 10/03/2023 vers 23h16 UTC.	66
Figure 38 : Trains de clics d'écholocation et buzz émis par les Delphinidés entre 15 et 128 kHz à proximité de la station R3. Enregistrement du 15/03/2023 vers 06h19 UTC.	66
Figure 39 : Episode de chasse opportuniste observé lors de l'analyse bioacoustique des résultats concernant les Delphinidés à proximité de la station R4. Enregistrement du 16/03/2023 vers 20h02 UTC.	66
Figure 40 : Présence significative de cris pulsés émis par les Delphinidés évoquant une activité intense à proximité de la station R4. Enregistrement du 10/03/2023 vers 22h58 UTC.	66
Figure 41 : Périodes de détections des pulses émis par les Rorquals communs (<i>Balaenoptera physalus</i>) en fonction du jour et de la nuit au niveau de chaque station (R1, R3 et R4) entre le 06 et 21 mars 2023.	68
Figure 42 : Pulses émis en doublet par un Rorqual commun, <i>Balaenoptera physalus</i> , entre 27 Hz et 17 Hz (« 20- Hz signal ») à proximité de la station R1. Enregistrement du 10/03/2023 vers 19h56 UTC.	69
Figure 43 : Pulses émis en doublet par un Rorqual commun, <i>Balaenoptera physalus</i> , entre 27 Hz et 17 Hz (« 20- Hz signal ») à proximité de la station R4. Enregistrement du 10/03/2023 vers 19h09 UTC.	69
Figure 44 : Pulses émis par le Rorqual commun, <i>Balaenoptera physalus</i> , entre 55Hz et 38 Hz (« downsweep chirp ») à proximité de la station R3. Enregistrement du 15/03/2023 vers 04h00 UTC.	69
Figure 45 : Sifflements émis par le Grand Dauphin (<i>Tursiops truncatus</i>) entre 5 et 10 kHz le 07/03/2023 vers 09h06 UTC au niveau de la station R1.	71
Figure 46 : Sifflements probablement émis par le Dauphin commun (<i>Delphinus delphis</i>) entre 7 et 15 kHz le 06/03/2023 vers 21h56 UTC au niveau de la station R3.	71
Figure 47 : Périodes de détections des clics et sifflements de Delphinidés en fonction du jour et de la nuit au niveau de chaque station (R1, R3 et R4) entre le 29 juin et 15 juillet 2023.	74
Figure 48 : Episode de communication intense évoquant une quête de nourriture par les Delphinidés au niveau de la station R1. Enregistrement du 08/07/2023 vers 11h21 UTC.	75
Figure 49 : Episode de chasse avec l'émission de trains de clics d'écholocation, buzz, cris pulsés et sifflements par les Delphinidés à proximité de la station R3. Enregistrement du 30/06/2023 vers 09h58 UTC. ..	75
Figure 50 : Episode de chasse opportuniste observé lors de l'analyse bioacoustique des résultats concernant les Delphinidés à proximité de la station R4. Enregistrement du 06/07/2023 vers 21h55 UTC.	75
Figure 51 : Périodes de détections des pulses émis par les Rorquals communs (<i>Balaenoptera physalus</i>) en fonction du jour et de la nuit au niveau de chaque station (R1, R3 et R4) entre le 29 juin et 15 juillet 2023.	77
Figure 52 : Emission seul d'un « 20-Hz signal » entre 27 Hz et 17 Hz, ainsi que d'un « downsweep chirp » entre 60 Hz et 50 Hz par un Rorqual commun, <i>Balaenoptera physalus</i> , à proximité de la station R4. Enregistrement du 14/07/2023 vers 08h33 UTC.	78

Figure 53 : « 20-Hz signal » émis en doublet par un Rorqual commun, <i>Balaenoptera physalus</i> , à proximité de la station R3. Enregistrement du 06/07/2023 vers 21h48 UTC.....	78
Figure 54 : « Downsweep chirp » émis par le Rorqual commun, <i>Balaenoptera physalus</i> , entre 65 Hz et 45 Hz à proximité de la station R3. Enregistrement du 14/07/2023 vers 09h12 UTC.....	78
Figure 55 : Sifflements émis par le Grand Dauphin (<i>Tursiops truncatus</i>) entre 3 et 12 kHz le 08/07/2023 vers 11h18 UTC au niveau de la station R1.	79
Figure 56 : Sifflements émis par le Grand Dauphin (<i>Tursiops truncatus</i>) entre 3 et 12 kHz le 30/06/2023 vers 07h32 UTC au niveau de la station R3.	80

Liste des tableaux

Tableau 1: Zones d'implantation du suivi acoustique.	16
Tableau 2 : Caractéristiques techniques de l'enregistreur SYLENCE.	18
Tableau 3 : Caractéristiques de la sonde CTD.	18
Tableau 4 : Profils de célérité en fonction de la position et comparaison aux données de la base mondiale CMEMS.	19
Tableau 5 : Synthèse des informations sur les LEG réalisés durant cette étude.	21
Tableau 6 : Synthèse des données acoustiques collectées durant la campagne du 06/03/2023 au 30/03/2023.	22
Tableau 7 : Synthèse des données acoustiques collectées durant la campagne du 29/06/2023 au 02/08/2023.	23
Tableau 8 : Statistiques des niveaux sonores (20Hz -40 kHz) à la station R1 (exprimés en dB ref 1µPa²) lors de la période hiver/printemps 2023.	28
Tableau 9 : Statistiques des niveaux sonores (20Hz -40 kHz) dans la zone R3 (exprimés en dB ref 1µPa²) lors de la période hiver/printemps 2023.	28
Tableau 10 : Statistiques des niveaux sonores (20Hz -40 kHz) dans la zone R3 (exprimés en dB ref 1µPa²) lors de la période hiver/printemps 2023.	28
Tableau 11 : Statistiques des niveaux sonores (20Hz -40 kHz) à la station R2 (exprimés en dB ref 1µPa²) lors de la période été 2023.	40
Tableau 12 : Statistiques des niveaux sonores (20Hz -40 kHz) à la station R3 (exprimés en dB ref 1µPa²) lors de la période été 2023.	40
Tableau 13 : Statistiques des niveaux sonores (20Hz -40 kHz) à la station R3 (exprimés en dB ref 1µPa²) lors de la période été 2023.	40
Tableau 14 : Synthèse des données environnementales utilisées pour la modélisation acoustique.	47
Tableau 15 : Erreur moyenne résiduelle sur le bruit intégré dans la bande [20Hz ; 40kHz] en sortie du processus de calibration, par station.	51
Tableau 16 : Limites de la zone cartographiée.	51
Tableau 17 : Synthèse des données concernant les mammifères marins susceptibles d'être présents au large du golfe de Fos-sur-Mer et à proximité des zones d'étude. Source : Quiet-Oceans.	56
Tableau 18 : Exemple de la diversité de sifflements émis par les Delphinidés avec le spectrogramme des émissions des espèces supposées présentes au large de Fos-sur-Mer.	58
Tableau 19 : Synthèse des portées de détection pour chaque zone d'étude en fonction de certaines espèces de mammifères marins potentiellement présentes à proximité des zones d'études durant l'hiver 2023.	61
Tableau 20 : Synthèse des portées de détection pour chaque zone d'étude en fonction de certaines espèces de mammifères marins potentiellement présentes à proximité des zones d'études durant l'été 2023.	61
Tableau 21 : Définition des indicateurs de la fréquentation par les mammifères marins adaptés à la durée d'acquisition.	63
Tableau 22 : Synthèse des résultats quant à la présence des mammifères marins entre le 06 et 21 mars 2023 au niveau de chacune des stations de mesure (R1, R3 et R4). Ces résultats ont été obtenus suite à l'analyse des détections réalisées dans la donnée des enregistreurs acoustiques (enregistrement en continu).	72
Tableau 23 : Synthèse des résultats quant à la présence des mammifères marins entre le 29 juin et 15 juillet 2023 au niveau des stations de mesure R1, R3 et R4. Ces résultats ont été obtenus suite à l'analyse des détections réalisées dans la donnée des enregistreurs acoustiques (enregistrement en continu).	81
Tableau 24 : Synthèse des résultats quant à la présence acoustique des mammifères marins au niveau de chacune des stations d'étude. Ces résultats ont été obtenus suite à l'analyse des détections réalisées par les enregistreur acoustique (enregistrement en continu).	88



*Suivi par acoustique passive du bruit ambiant et de la fréquentation des
mammifères marins dans le cadre de la construction du parc éolien flottant
Provence Grand Large (PGL)*

Etat de référence

Référence : QO.20220106.10.RAP.001.03A

Lexique des mots techniques

L'acoustique sous-marine est un domaine scientifique de la mécanique des fluides. Elle utilise son propre vocabulaire et ses propres unités. Une définition des principaux termes utilisés est présentée dans ce lexique afin de faciliter la compréhension du document par le lecteur.

Acoustique passive

Mesure du bruit ambiant sans générer de bruit parasite qui puisse affecter l'observation du chorus sonore.

Actogramme

Représentation de la rythmicité d'une variable.

AIS

Automated Identification System est un système à bord des navires qui transmet à un réseau d'observation leurs identifications et leurs localisations en quasi temps-réel. Différentes stations réceptrices, mis en œuvre par les services de l'Etat ou des sociétés privées permettent ainsi de surveiller le trafic maritime en quasi-temps-réel. La couverture maximale peut atteindre 30 miles nautiques des côtes en fonction des conditions climatiques.

Chorus sonore

Le chorus sonore représente la diversité des sources sonores présentes dans le milieu marin. Il se compose de trois natures de bruits : les bruits naturel (ou géophonie), les bruits biologiques (ou biophonie) et les bruits d'origine humaine (anthropophonie).

CPA

Closest Point of Approach (en anglais) correspond à la distance minimale entre une trajectoire linéaire d'un navire et une position géographique (hydrophone par exemple).

Décibel

Le décibel (dB) est une mesure du niveau de pression acoustique, une quantité qui se trouve à la base de la perception du volume sonore. C'est une échelle logarithmique qui décrit un multiple d'une valeur de référence. Lorsque la puissance sonore double, la valeur en décibel augmente de 3 dB. En acoustique sous-marine, le niveau de référence du décibel est 1 μ Pa (micro Pascal), référence différente de l'acoustique aérienne. Les deux échelles ne sont donc pas comparables.

Empreinte sonore

Une empreinte sonore représente la distribution du niveau sonore d'une source de bruit qui émerge au-dessus du bruit existant lorsque cette source est absente.

Energie acoustique reçue

L'énergie reçue est égale au carré du signal de pression acoustique reçu. Elle s'exprime en dB réf. 1 μ Pa².

Fréquence sonore

La fréquence correspond au nombre d'oscillations de la pression sonore en une seconde. Les sons graves ont une fréquence basse, les sons aigus ont une fréquence élevée. L'unité de la fréquence est l'Hertz (Hz). A titre d'illustration, l'oreille humaine ne perçoit que les fréquences comprises entre 20 Hz et 20 kHz, bien que la limite supérieure diminue généralement avec l'âge. Les espèces sous-marines ont un spectre auditif différent.

Gabarit de bruit

Niveau de pression ou d'énergie sonore émis par une source à un mètre de distance, décrit en fonction de la fréquence.

Hydrophone

Un hydrophone est un microphone destiné à être utilisé sous l'eau. Il convertit une variation de pression en variation de tension électrique permettant ainsi l'enregistrement de la pression acoustique en fonction du temps.

ICI

ICI (Inter-Click Interval) fait référence à l'intervalle de temps entre deux clics (signaux impulsifs) consécutifs émis par un mammifère marin.

IPI

IPI (Inter-Pulse Interval) fait référence à l'intervalle de temps entre deux pulses consécutifs émis par un mammifère marin.

Mitigation

Mesure de réduction de bruit qui agit soit au niveau de la source soit au niveau de la propagation.

Octave

Une octave est l'intervalle séparant deux sons dont la fréquence fondamentale de l'un vaut le double de la fréquence de l'autre. Un tiers ou dixième d'octave est une fraction d'octave. La norme américaine American National Standard Institut (ANSI S1.11 2004) définit les fréquences centrales et les caractéristiques des filtres servant à les distinguer.

Niveau d'exposition sonore

Le niveau d'exposition sonore est l'intégrale de l'énergie acoustique reçue sur une bande de fréquence de sensibilité biologique (bande de fréquence effectivement perçue par une espèce) pendant une durée donnée. Il s'exprime en dB réf. $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$.

Percentile, ou centile, quantile

Un percentile correspond à la proportion du temps et de l'espace pour lequel le bruit dépasse un niveau donné. Dans le cas de cette étude, un percentile N donne donc le niveau de pression acoustique minimum que l'on mesurerait avec une probabilité de N% dans la zone géographique et la période de temps considérée.

Cette notion est très répandue, même dans la vie de tous les jours. A titre d'exemple, les carnets de santé de chaque individu présentent des courbes de répartition du poids de la population infantile en fonction de l'âge en percentiles : on peut par exemple y voir, pour chaque âge, « le poids moyen du dernier percentile », c'est-à-dire le poids moyen des 10 % des enfants les plus lourds, ou encore, le poids moyen des 5 % des enfants les plus légers. Le 50ième percentile représente quant à lui le poids médian, c'est-à-dire le poids de 50% des enfants d'un même âge.

Pertes de propagation

Les pertes de propagation acoustique correspondent à l'atténuation des ondes causée par le milieu de propagation en fonction de la distance à la source.

Pression acoustique crête à crête

La pression acoustique crête à crête est la différence d'amplitude de la pression acoustique entre sa valeur maximale et sa valeur minimale sur une période.

Pression acoustique émise

La pression acoustique émise par une source de bruit est l'amplitude du signal qui serait généré à un mètre de cette source si celle-ci était ponctuelle. Cette pression peut être exprimée en valeur instantanée, valeur moyenne, valeur efficace, ou en valeur maximale. Elle s'exprime en dB réf. $1\mu\text{Pa}$ @1m.

Pression acoustique reçue

La pression acoustique reçue est l'amplitude du signal acoustique tel qu'il peut être mesuré sur la bande de fréquences de réception d'un hydrophone à une distance donnée de toute source sonore. Cette pression peut être exprimée en valeur instantanée, valeur efficace, ou valeur maximale. Elle s'exprime en dB réf. $1\mu\text{Pa}$.

Profil de célérité

La célérité décrit la vitesse à laquelle les ondes sonores se déplacent dans le milieu marin. Elle est fonction de la profondeur, de la température et de la salinité. Sa variabilité est temporelle (en fonction des saisons, des événements météorologiques, etc.) et spatiale.



Quantile

Voir percentile.

Spectrogramme

Un spectrogramme est le résultat d'un traitement du signal acoustique qui permet la visualisation de ce signal en fonction du temps et de la fréquence. Cette représentation du signal offre des possibilités intéressantes quant à son analyse.

Chapitre I. Présentation de l'étude

Le projet de construction d'un parc éolien flottant Provence Grand Large vise à raccorder trois éoliennes flottantes au large de Fos-sur-Mer. Quiet-Oceans a été mandatée pour la réalisation de l'état de référence acoustique et le suivi de la fréquentation des mammifères marins par acoustique passive à proximité de la zone de travaux (Figure 1).

Les objectifs de cette étude sont de :

- ✓ Mettre en œuvre un suivi par acoustique passive à l'aide d'enregistreurs autonomes ;
- ✓ Caractériser les niveaux de bruit physique et leur variation dans le temps ;
- ✓ Cartographier l'état initial acoustique sous-marin lors de l'état de référence ;
- ✓ Caractériser la fréquentation du site par les mammifères marins et les comportements associés.

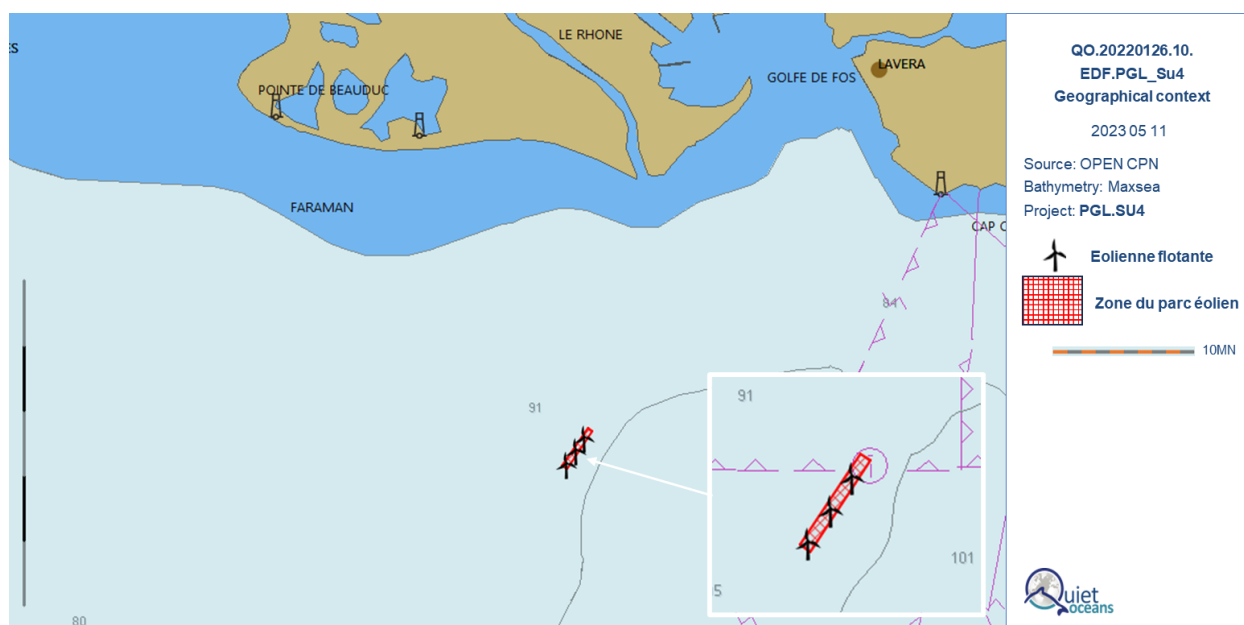


Figure 1 : Contexte géographique de l'étude.

Chapitre II. Introduction

Ce chapitre a pour objectif de familiariser le lecteur avec le domaine technique de l'acoustique sous-marine afin de faciliter la lecture de l'étude proprement dite. Il fait référence à des termes spécifiques du domaine de l'acoustique sous-marine. Nous invitons le lecteur à se référer au lexique disponible au début du document.

II.1. La problématique du bruit sous-marin

Le monde sous-marin est tout sauf silencieux, et est composé d'un chorus sonore regroupant trois familles de bruit : les bruits naturels (vagues, craquements sismiques...), les bruits biologiques (mammifères marins et autre biodiversité marine), et les bruits anthropiques (activités humaines, trafic maritime...).

Ces bruits sont de nature bien différente selon les endroits, les saisons, les conditions climatiques, l'heure de la journée, etc. Ainsi, le bruit sous-marin constitue une composante physique à évaluer dans un contexte géographique donné, et dont les modifications peuvent potentiellement avoir des conséquences sur l'écosystème et certains organismes marins sensibles à la pression.

Les niveaux de bruit sous-marin ne sont pas à comparer avec les niveaux de bruit aérien. En effet, le niveau de référence est de 1 μPa en acoustique sous-marine, contre 20 μPa dans l'air. De plus, avec une densité environ 1000 fois plus élevée que l'air, le milieu océanique est considéré comme un milieu de propagation incompressible contrairement à l'air. Ainsi, toute comparaison est à proscrire.

La Figure 2 donne, à titre illustratif, une échelle de niveaux sonores émis typiques, soit par les activités humaines, soit par la faune marine, soit par les conditions environnementales.

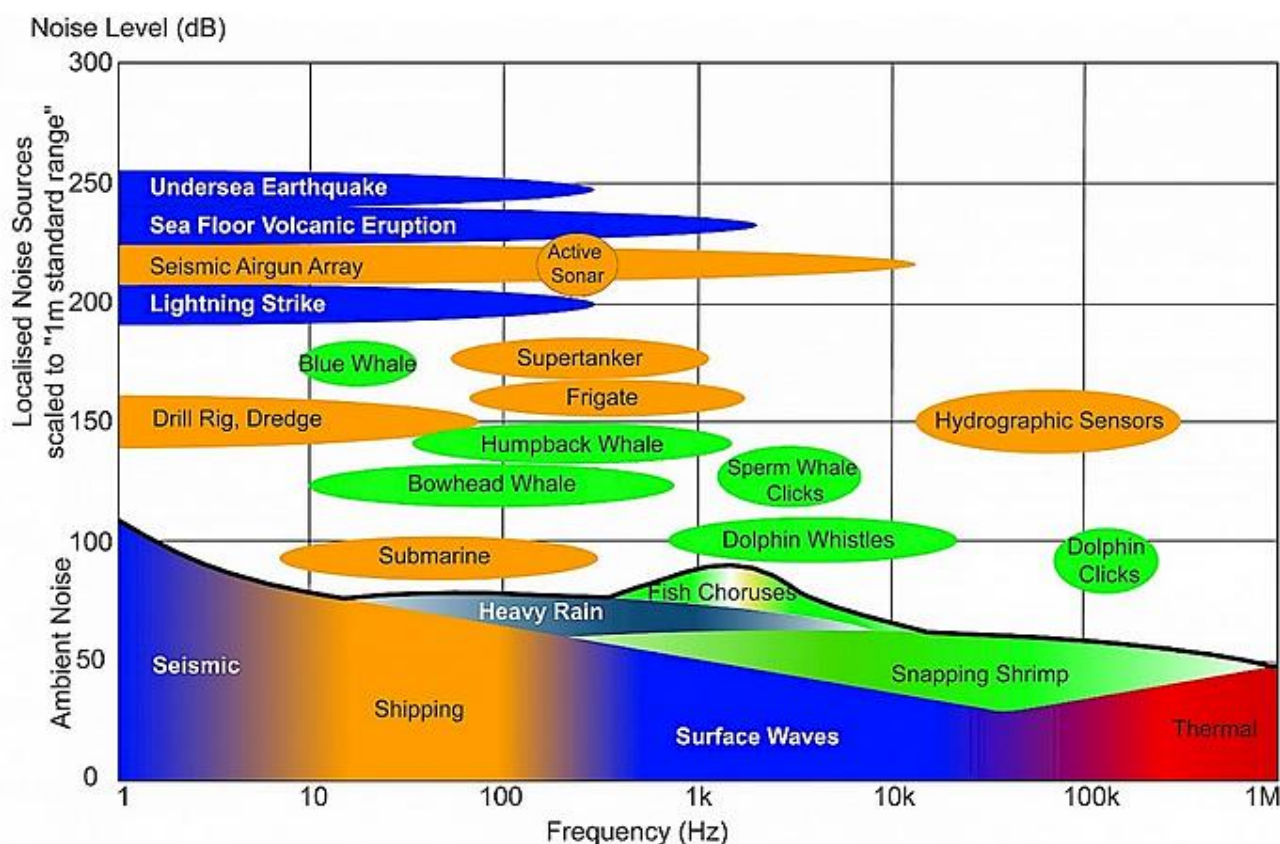


Figure 2 : Echelle qualitative des niveaux (émis à un mètre) et fréquences des sources sonores anthropiques, biologiques et naturelles dans le milieu marin. Source : OSPAR.

II.2. Qu'est-ce que le chorus sonore sous-marin

Le bruit sous-marin est un véritable chorus sonore où des bruits de différentes natures et origines se mélangent :

- ✓ Les bruits naturels ou géophonie regroupent les bruits issus des craquements de la Terre, des déplacements des sédiments marins, du déferlement des vagues, des précipitations, etc. ;
- ✓ Les bruits biologiques ou biophonie regroupent les bruits d'origine biologique générés par la faune marine ;
- ✓ Les bruits anthropiques, ou anthropophonie, sont les bruits d'origine humaine générés par les activités maritimes.

Tous ces bruits interagissent les uns avec les autres, se dominant les uns par rapport aux autres pour former le contexte sonore d'une aire d'étude (Figure 3). La Figure 4 synthétise les niveaux sonores typiques en dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ en fonction de leur origine (anthropique, environnementale ou biologique) et en fonction de la gamme de fréquence (Dosits.org, 2016). L'ensemble des sources sonores contribue au bruit ambiant avec une prédominance très variable en fonction de la fréquence, des conditions environnementales, des activités humaines et du contexte local.

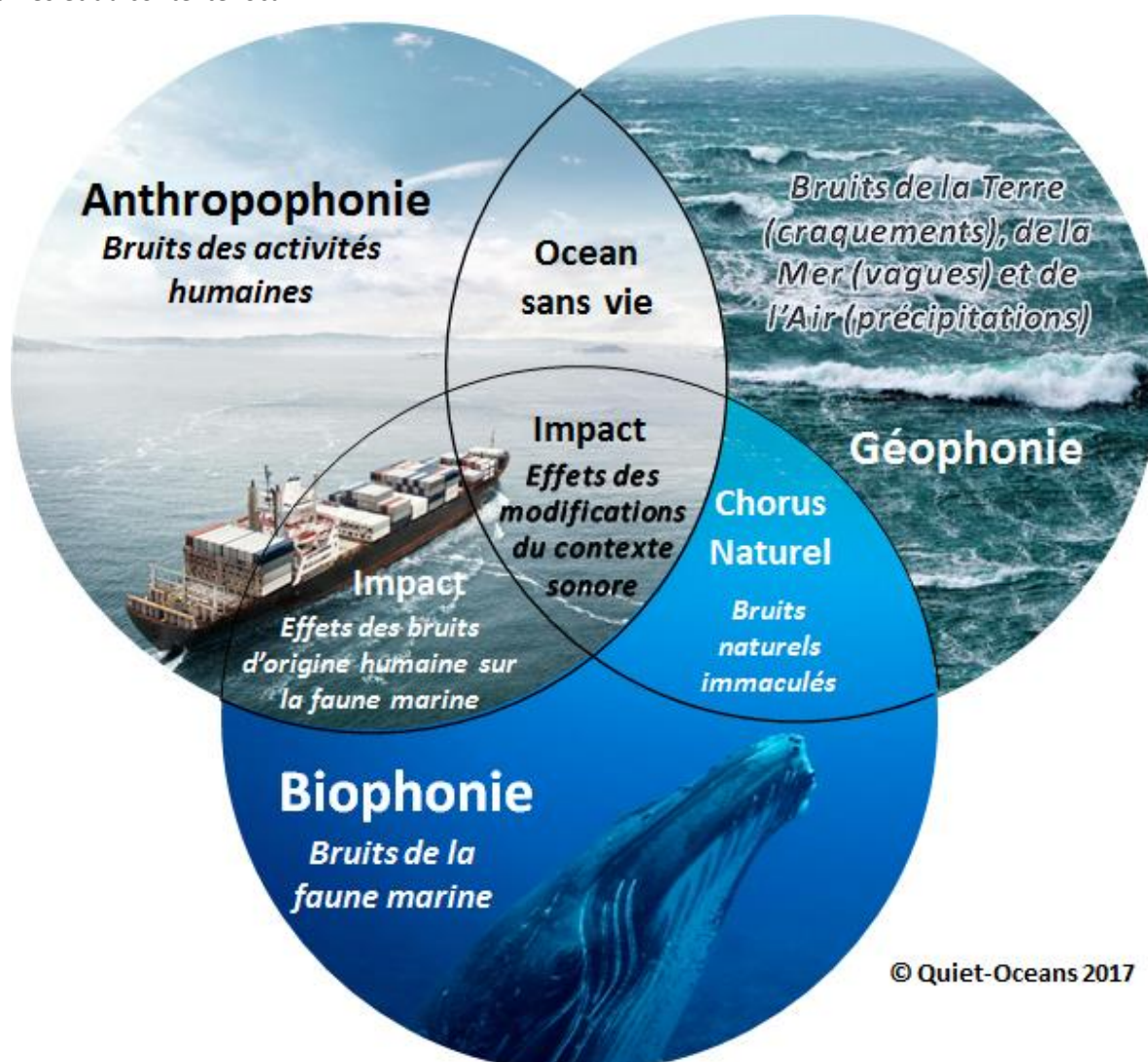


Figure 3 : Composition du chorus sonore sous-marin.

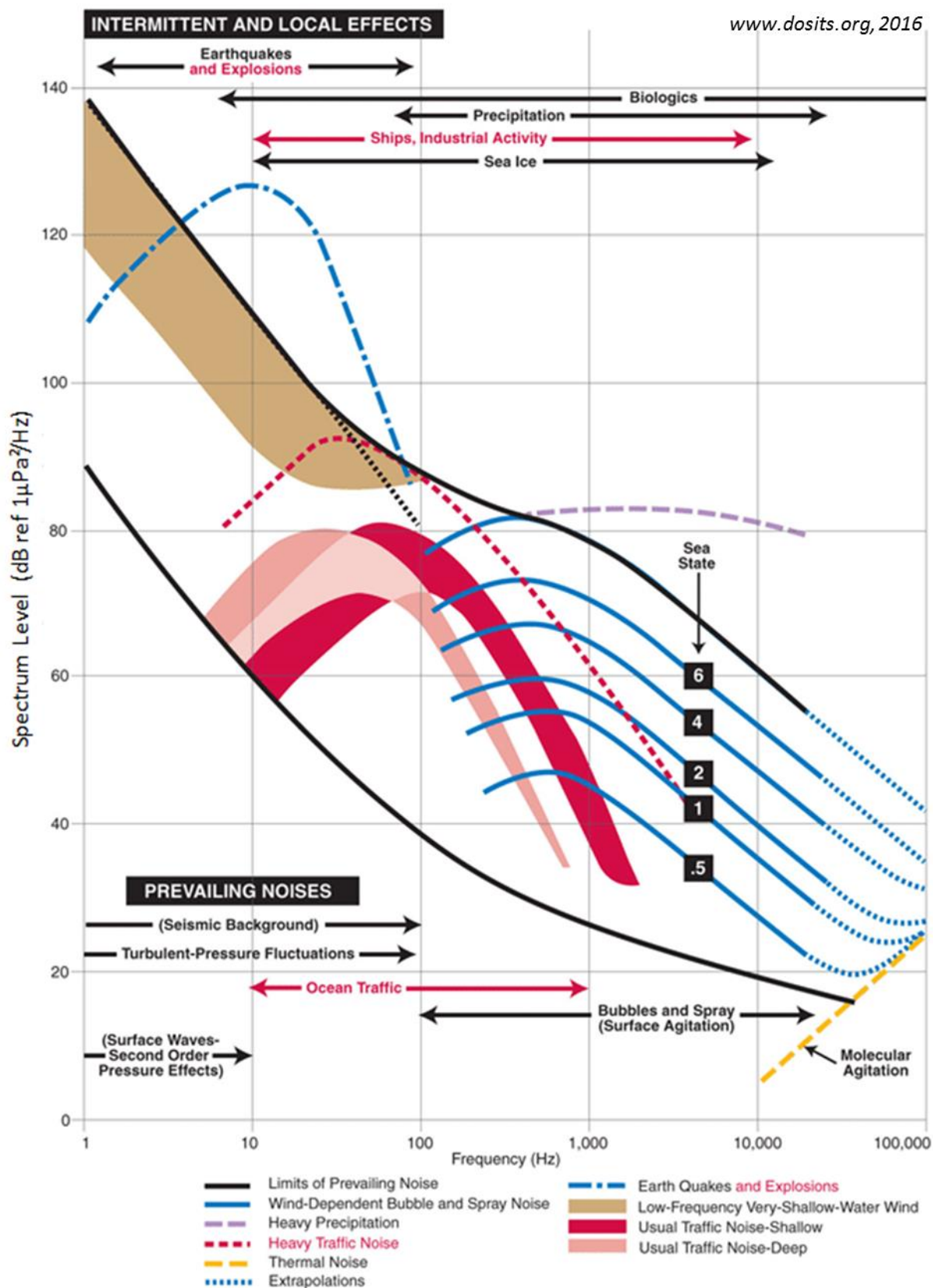


Figure 4 : Synthèse des niveaux de bruit typiques en fonction de la fréquence et de la nature de la source de bruit. Ces valeurs peuvent être très dépendantes du site, de la saison, et du contexte . Source (Dosits.org, 2016).

Chapitre III. Protocole de mesures acoustiques

Afin de qualifier le bruit existant et caractériser la fréquentation du site par les mammifères marins, un protocole de suivi acoustique a été défini en concertation avec le donneur d'ordre et les parties prenantes. Ce protocole impose des mesures par acoustique passive au niveau de trois stations sur une durée cumulée d'un mois (deux périodes de 15 jours réparties sur deux saisons).

Pour chacune de ces mesures par acoustique passive, les objectifs opérationnels concernent le déploiement de trois lignes de mouillage équipées d'un enregistreur acoustique autonome, immergé à une profondeur intermédiaire de la colonne d'eau. Chacun de ces systèmes acoustiques est déployé pour une durée minimale de 15 jours, avec une proportion de temps d'acquisition (ou duty cycle) de 100%, soit une acquisition continue du signal acoustique.

Le Tableau 1 indique les dénominations associées à chacune des zones d'implantation du suivi acoustique et la Figure 6 illustre la position de ces différentes zones de mesures acoustiques pour l'état de référence. A noter, en prévision d'un éventuel chevauchement des mesures avec le démarrage des travaux d'installation, un quatrième enregistreur acoustique a été déployé de manière ponctuelle au niveau de la station R2 (au sud du parc éolien). Conformément à l'Arrêté Préfectoral, "pour l'établissement de l'état de référence de bruit : une station au sein de la zone (de concession) et deux stations à l'extérieur de cette zone" sont déterminées en lien avec la pêche professionnelle. Dans le présent rapport concernant la phase d'état de référence, les analyses portent donc sur les mesures des stations R1, R3 et R4.

A l'aide d'une sonde CTD, des mesures du profil de célérité (température et salinité) ont été menées lors des déploiements et récupérations des enregistreurs acoustiques afin de recueillir les variations saisonnières dans la zone du projet. Ces mesures permettront de valider l'utilisation des données océanographiques issues de la plateforme CMEMS pour cartographier le bruit ambiant sur zone. Le profil de célérité conditionne la propagation sonore (Figure 5).

Tableau 1: Zones d'implantation du suivi acoustique.

Zone géographique	Identifiant projet (station)	Système acoustique	Support
Point permanent au nord du parc éolien	R1	Enregistreur autonome	Ligne instrumentée
Point ponctuel au sud du parc éolien	R2	Enregistreur autonome	Ligne instrumentée
Point de contrôle à 1500 m du parc	R3	Enregistreur autonome	Ligne instrumentée
Point de contrôle à 6500 m du parc	R4	Enregistreur autonome	Ligne instrumentée

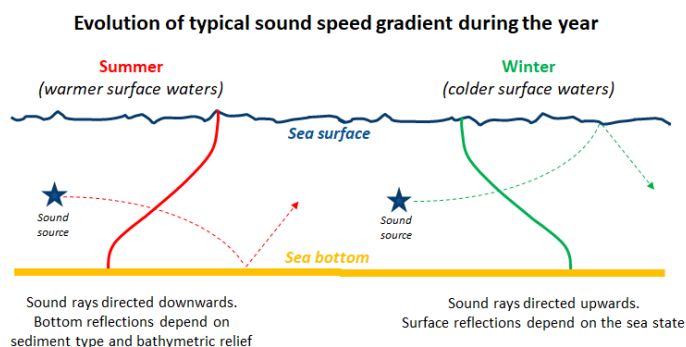


Figure 5 : Illustration schématique des effets de la variation du profil de célérité sur la propagation du son (source Quiet-Oceans)

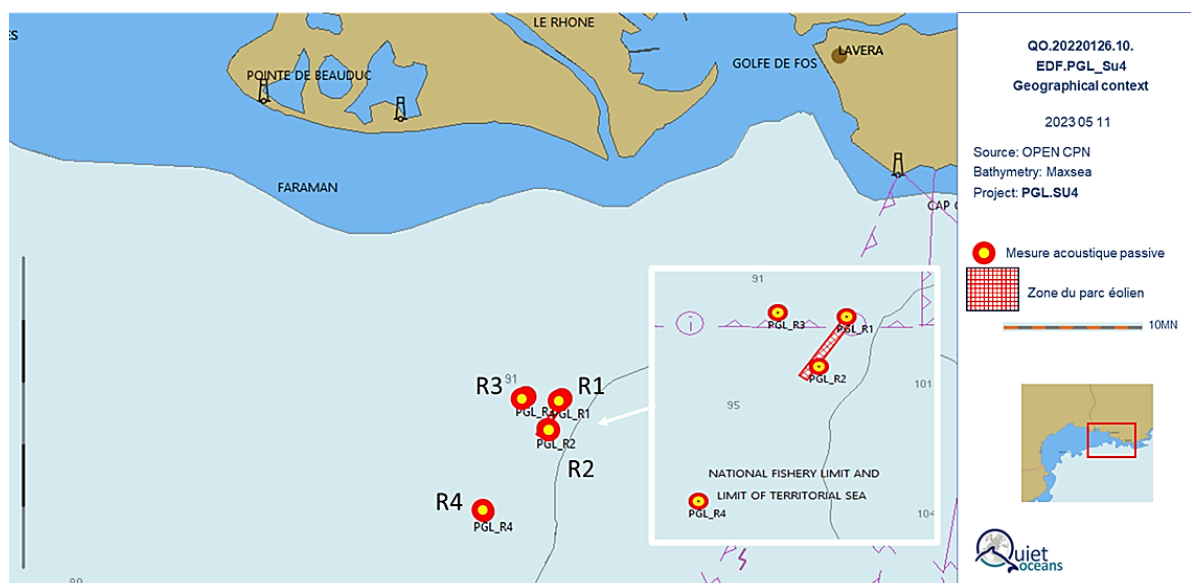


Figure 6 : Protocole géographique des mesures longues durées.

III.1. Les systèmes de mesure

III.1.1. Enregistreurs acoustiques autonomes

Le système de mesure mis en œuvre lors des suivis par acoustique passive est un enregistreur autonome. Ce dernier est équipé d'un hydrophone qui permet de capter la diversité des sons, de quantifier les niveaux sonores et de caractériser les signatures acoustiques émises par la faune marine en post-traitement.

L'enregistreur acoustique utilisé dans cette étude est du type Sylence produit par la société RTSYS et est intégré sur une ligne de mouillage (Figure 7 et Tableau 2). L'enregistreur mesure le signal acoustique sur une bande de fréquences jusqu'à 180 kHz, suffisante pour caractériser :

- (1) les niveaux de bruit ambiant naturel,
- (2) les bruits anthropiques liés en particulier au trafic maritime et aux activités de pêche,
- (3) les signatures acoustiques émises par les mammifères marins.

La sauvegarde des signaux bruts dans un disque de grande capacité permet de stocker l'équivalent de 45 jours si la mesure est effectuée en continu (ou duty cycle de 100%). Ses caractéristiques techniques sont adaptées à l'étude des bruits biologiques sur la zone d'étude. Un tel système d'acquisition permet de collecter, sur une large plage temporelle et sur une large gamme de fréquence, la diversité des bruits présents dans la zone d'étude (bruits anthropiques, bruits naturels et bruits biologiques). Les traitements, détections et analyses effectués en laboratoire sur cette donnée brute peuvent être vérifiés et validés par un opérateur spécialisé.

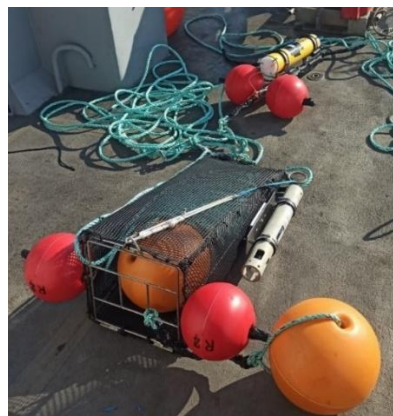


Figure 7 : Enregistreur acoustique autonome (à gauche) et ligne instrumentée avec son panier (à droite).

Tableau 2 : Caractéristiques techniques de l'enregistreur SYLENCE.

Désignation	SYLENCE équipé d'un hydrophone HTI99HF
Autonomie	Jusqu'à 45 jours si duty cycle de 100%
Bande passante	10 Hz – 180 kHz
Sensibilité à la réception	-170dB dB ref. 1V/ μ PA
Gain	15 dB
Fréquence échantillonnage	512 kHz
Résolution	16 bits
Format fichier	wav

III.1.2. Sonde CTD

Une mesure par une sonde CTD, dont les caractéristiques sont présentées dans le Tableau 3, permet l'extraction du profil de vitesse du son au sein de la colonne d'eau.

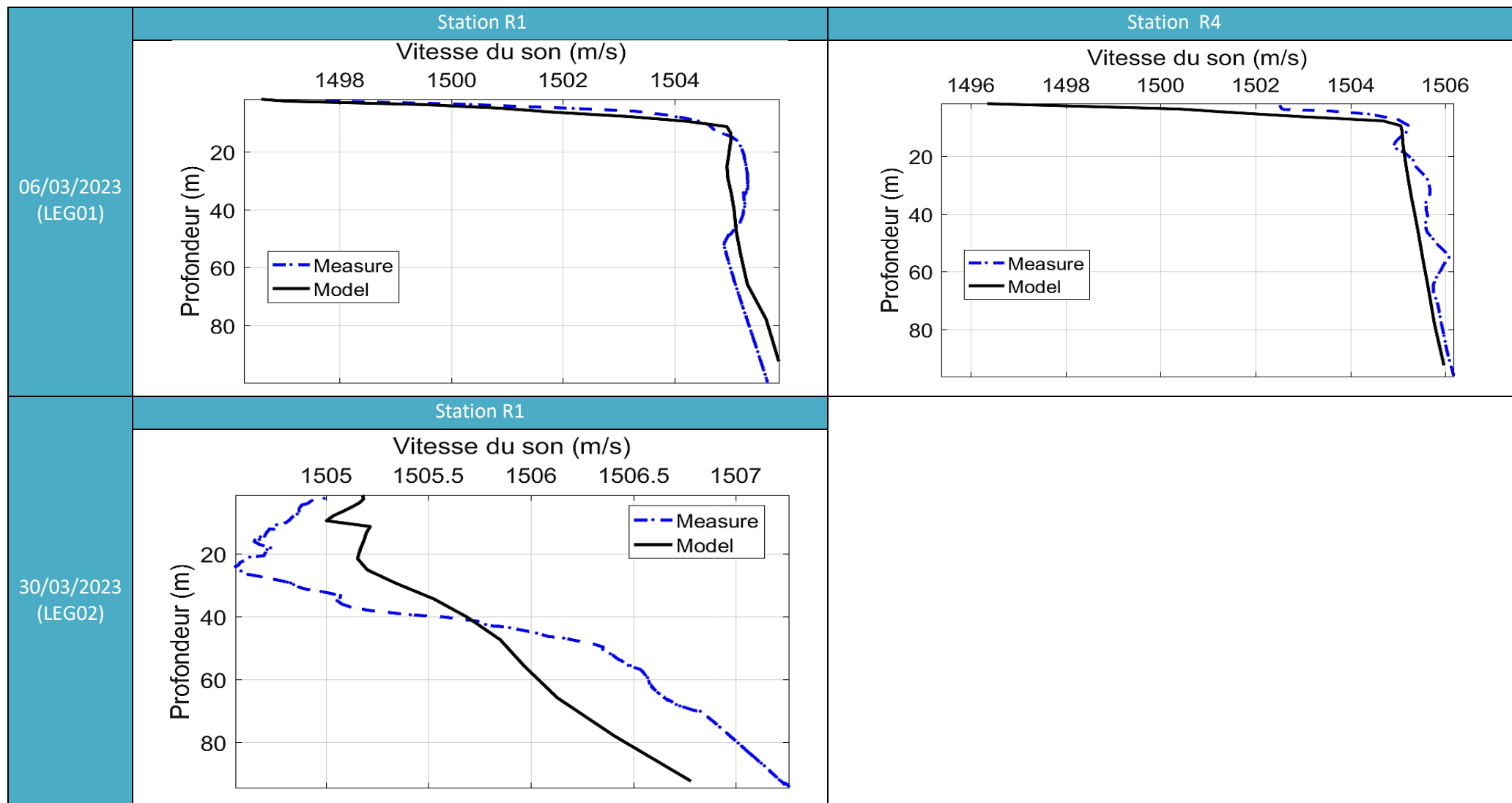
Le Tableau 4 synthétise pour chacune des campagnes de mesure les profils de célérité mesurés (courbes bleues) et les profils prédits par la plateforme CMEMS Copernicus Marine Environment Monitoring Service (courbes noires) aux mêmes emplacements et aux mêmes dates. Globalement, ces profils montrent un très bon accord entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites par la plateforme de prédiction, la différence provient uniquement de l'écart absolu des valeurs. Ces écarts n'induisent pas d'augmentation quant à l'incertitude sur la cartographie du bruit. L'information prépondérante est la différence de vitesse relative dans la colonne d'eau qui influence la propagation des ondes acoustiques vers la surface dans le cas de la zone du golfe de Fos-sur-Mer. Ces mesures valident de ce fait les données de prédiction de la plateforme CMEMS qui sont utilisées pour cartographier le bruit ambiant sur l'ensemble de la zone d'étude.

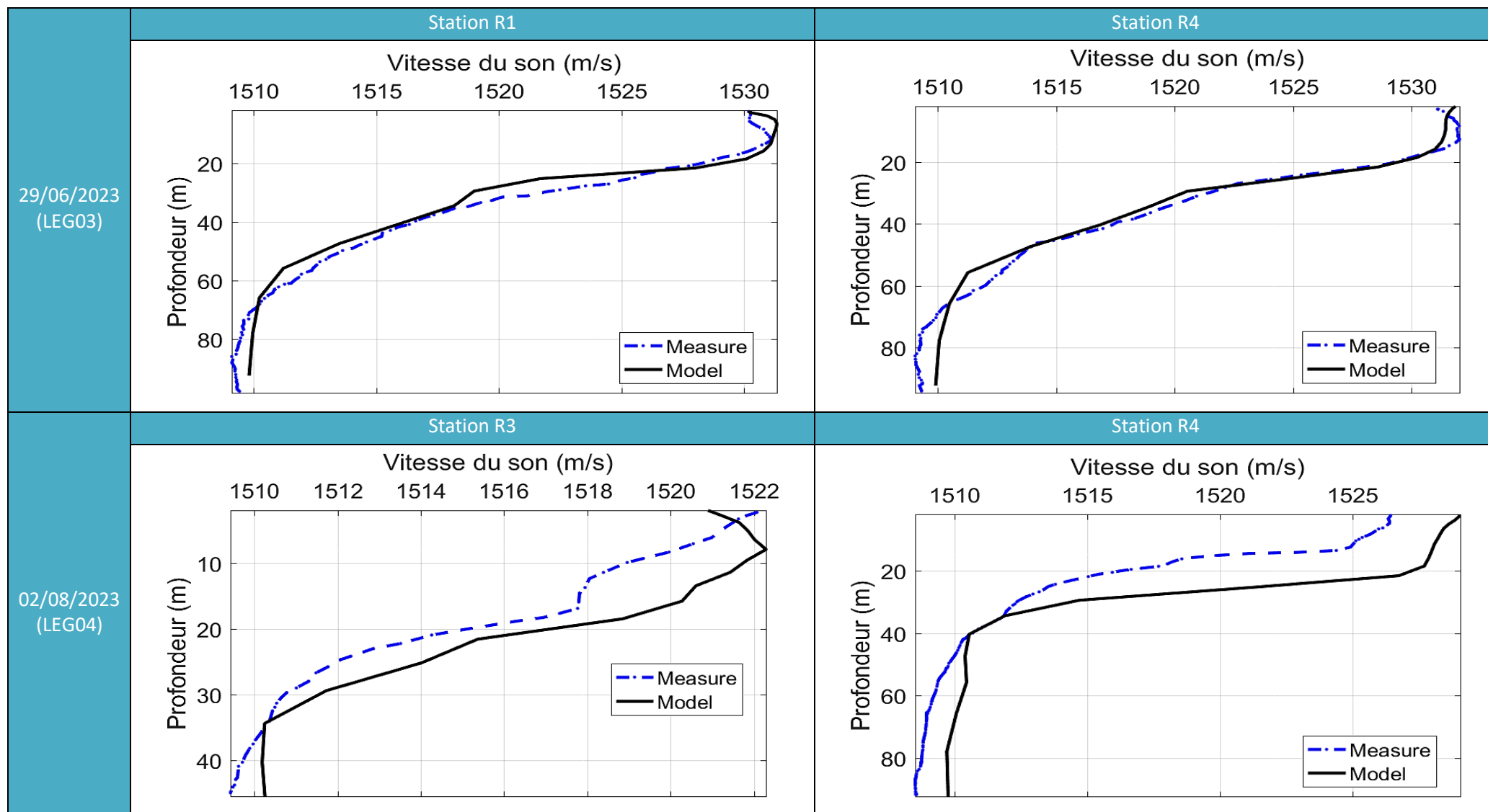
Tableau 3 : Caractéristiques de la sonde CTD.

Marque	GARMIN
Modèle	WISENS CTD300
Profondeur (D)	Gamme : 300m – Précision : 0.15%
Température (T)	Gamme : -2°C à +3°C - Précision : 0.005°C
Conductivité (C)	Gamme : 0-70 mS/cm - Précision : 0,04 mS/cm
Cadence de mesure	1 Hz
Format	CSV



Tableau 4 : Profils de célérité en fonction de la position et comparaison aux données de la base mondiale CMEMS.





III.2. Données collectées

Pour les différentes campagnes de mesure, les paragraphes suivants font état des données collectées par les différents systèmes acoustiques déployés.

Afin d'aider à la compréhension de ce document, il faut distinguer :

- ✓ Un **LEG**, terme employé dans le domaine de l'instrumentation afin de caractériser une mission en mer sur une ou plusieurs journées. En d'autres termes, le LEG correspond aux opérations de relevage et/ou de déploiement des systèmes acoustiques (enregistreur) sur site et donc à une sortie bateau ;
- ✓ Une **CAMPAGNE** qui correspond à une période d'enregistrement des données.

Le Tableau 5 synthétise les informations générales sur les LEG réalisés durant cette étude, à savoir le numéro de campagne (période de données collectées) associé à chaque LEG ainsi que l'activité correspondante (déploiement et/ou relevage des systèmes acoustiques).

Tableau 5 : Synthèse des informations sur les LEG réalisés durant cette étude.

N° LEG	N° Campagne concernée	Date	Activité(s)	Station(s) concernée(s)
01	01	06.03.2023	Déploiement	R1, R3 et R4
02	01	30.03.2023	Relevage	R1, R3 et R4
03	02	28.06.2023	Déploiement	R1, R2, R3 et R4
04	02	02.08.2023	Relevage	R1, R2, R3 et R4

III.2.1. Campagne du 06/03 au 31/03/2023

Durant la période hiver/printemps 2023, un total de trois enregistreurs acoustiques passifs ont été déployés, soit un enregistreur acoustique dans chaque zone du 06 au 31 Mars 2023. Le Tableau 6 synthétise les données collectées par ces enregistreurs acoustiques pour chacune des zones d'étude. La durée en jour des données acquises est comprise entre 24 et 25 jours pour chaque enregistreur acoustique.

Pour plus d'informations sur les conditions de déploiement et récupération des enregistreurs acoustiques, il est recommandé de consulter le document de compte rendu de mission suivant :

QO.20220126.10.CRM.002.01A.EDF.PGL.LEG02.pdf.

Tableau 6 : Synthèse des données acoustiques collectées durant la campagne du 06/03/2023 au 30/03/2023.

Station	Nom enregistreur	Date de début	Date de fin	Durée campagne	Durée enregistrement (j)	Nb de fichiers	Quantité donnés (Go) ¹	Latitude	Longitude	Immersion système/fond (m)	Hauteur d' eau CM (m)
R1	ENR.048	06/03/2023	30/03/2023	24	24	1602	927	043° 12.132' N	004° 48.181' E	50	98
R3	ENR.049	06/03/2023	31/03/2023	25	25	1698	980	043° 12.203' N	004° 46.602' E	50	98
R4	ENR.051	06/03/2023	30/03/2023	24	24	1590	922	043° 08.480' N	004° 44.764' E	50	96

	Données acoustiques collectées
	Données en attente de récupération
	Absence de données

III.2.2. Campagne du 29/06 au 02/08/2023

Durant la période été 2023, un total de quatre enregistreurs acoustiques passifs ont été déployés, soit un enregistreur acoustique dans chaque zone du 29 juin au 02 août 2023. Le Tableau 7 synthétise les données collectées par ces enregistreurs acoustiques pour chacune des zones d'étude. La durée en jour des données acquises est de 29 jours pour chaque enregistreur acoustique.

Pour plus d'informations sur les conditions de déploiement et récupération des enregistreurs acoustiques, il est recommandé de consulter le document de compte rendu de mission suivant :

QO.20220126.10.CRM.004.01A.EDF.PGL.LEG04.pdf.

¹ Les fichiers sont au format audio de type flac.

Tableau 7 : Synthèse des données acoustiques collectées durant la campagne du 29/06/2023 au 02/08/2023.

Zone	Nom enregistreur	Date de début	Date de fin	Durée campagne	Durée enregistrement (i)	Nb de fichiers	Quantité donnés (Go)	Latitude	Longitude	Immersion système/fond (m)	Hauteur d' eau CM (m)
R1	ENR.048	29/06/2023	02/08/2023	29	29	2789	1110	043°12.136' N	004°48.181' E	50	98
R2	ENR.046	29/06/2023	02/08/2023	29	29	2023	1116	043°11.151' N	004°47.541'E	50	98
R3	ENR.051	29/06/2023	02/08/2023	29	29	3018	1103	043°12.207 'N	004°46.600'E	50	98
R4	ENR.049	29/06/2023	02/08/2023	29	29	1994	1119	043°08.486' N	004°44.764' E	50	96

	Données acoustiques collectées
	Données en attente de récupération
	Absence de données

Chapitre IV. Analyse des niveaux sonores mesurés

Cette partie propose une analyse des niveaux sonores intégrés dans la bande [20Hz;40kHz] mesurés ainsi qu'une caractérisation fréquentielle. Une analyse des niveaux sonores de l'état de référence est réalisée à partir des données collectées par les enregistreurs acoustiques dans chaque zone d'étude et pour chaque campagne (hiver/printemps et été 2023).

IV.1. Période hiver/printemps 2023 (données du 06/03 au 31/03/2023)

IV.1.1. Analyse statistique du bruit ambiant

La Figure 8 montre l'évolution des niveaux sonores intégrés dans la bande de fréquence entre 20 Hz et 40 kHz, en fonction du temps (courbe bleue) pour chacune des stations lors de la période hiver/printemps 2023. Cette bande de fréquence correspond aux fréquences prédominantes des émissions sonores anthropiques (trafic, sondeur, activités de pêche, travaux en mer, ...), environnementales (houle, vent, vagues, déplacement sédimentaire, ...) et biologiques (activité benthique, ...). En complément, la courbe rouge superposée montre l'évolution du niveau de bruit permanent ou « pied de bruit » généralement conditionné par les contraintes météorologiques. Il apparaît que le bruit permanent fluctue entre 102 et 115 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ pour chacune des stations acoustiques. Ces niveaux, classiques pour une zone côtière, sont la conséquence de la navigation commerciale intensive à distance des capteurs acoustiques. Les facteurs les plus déterminants de ces variations correspondent aux phénomènes météorologiques, à savoir la vitesse du vent et la hauteur de vague, pour les fréquences supérieures à 500Hz (Figure 9).

Le paysage sonore est ponctuellement dominé par des émergences anthropiques courtes (d'une durée de 5 à 15 minutes) et intenses, correspondant aux passages de navires à proximité du capteur. Selon la distance de passage vis-à-vis du capteur acoustique, ces derniers font émerger les niveaux sonores de +10 dB à +40 dB en comparaison du bruit permanent et induisent des niveaux sonores allant jusqu'à 145 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$. Suite à la détection des passages de ces événements intenses acoustiquement, soit une élévation d'au moins 15 dB vis-à-vis du niveau sonore permanent, on relève en moyenne moins d'un événement acoustiquement significatif par jour au niveau des trois stations. Ceci indique que la zone couverte par les capteurs acoustiques est peu influencée par les passages proches de navires. En considérant les passages plus lointains, soit une élévation d'au moins 10dB vis-à-vis du niveau sonore permanent, on détecte en moyenne :

- ✓ 4 événements significatifs par jour au niveau de la station R1 ;
- ✓ 5 événements significatifs par jour au niveau de la station R3 ;
- ✓ 4 événements significatifs par jour au niveau de la station R4.

Afin de synthétiser l'information sur les niveaux sonores, les Tableau 8, Tableau 9, et Tableau 10 donnent la répartition statistique du bruit intégrés entre 20 Hz et 40 kHz durant la période hiver/printemps 2023, pour chaque station :

- ✓ Les niveaux faibles (99% du temps) sur cette période sont de 103.8 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R1), 104.5 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3) et 104.0 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R4) ;
- ✓ Les niveaux médians (50% du temps) sur cette période sont de 110.6 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R1), 111.2 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3) et 110.7 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R4) . Ces niveaux, modérément élevés pour une zone côtière, sont la conséquence de la navigation commerciale intensive à distance des capteurs acoustiques ;
- ✓ Les niveaux les plus forts et rares (percentile 1%) sur la période sont de 120.8 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R1), 122.5 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3) et 120.4 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R4). Ces niveaux sont relativement faibles, et reflètent la plus faible fréquentation maritime à l'intérieur de la zone d'étude.

La différenciation jour/nuit permet également de mettre en évidence un accroissement modéré des niveaux de bruits le jour (+1.3dB) au percentile médian pour toutes les stations.

La Figure 10 permet de mettre en regard les statistiques des niveaux sonores mesurés et la densité de navires issue des données AIS uniquement, dans le périmètre d'étude :

- ✓ Bien que relativement éloignée du parc, la navigation commerciale (cargos) en entrée et en sortie du port de Fos-sur-Mer est intensive à l'Est, au Sud et au Nord du parc. Ce phénomène fait alors augmenter les niveaux sonores médians mesurés.
- ✓ Les trois stations sont fréquentées par la navigation de pêche, qui représente probablement la plupart des émergences acoustiques visibles. La station R3 semble davantage fréquentée que les autres.

Ces conclusions sont toutefois partielles, car cette analyse est basée uniquement sur l'AIS (localisation obligatoire des navires de plus de 300 tonnes) et ne prend pas en compte les données VMS (localisation non diffusée des navires de pêche en action) ainsi que la navigation des potentiels navires de plaisance non équipés de balise AIS.

A titre d'exemple, la Figure 11 illustre le perception acoustique sous forme de spectrogramme d'un passage proche du navire de pêche « Bernadette » de la station R3 sur la journée du 06 Mars 2023 :

- ✓ Lors de l'approche, le niveau sonore augmente au fur et à mesure que la distance séparant le navire de l'hydrophone décroît, avec des émergences sonores en raies ;
- ✓ Au minimum de distance (CPA, Closest Point of Approach), une augmentation courte (30s) du niveau sonore est visible jusqu'à 145 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$, dans une bande fréquentielle entre 50 Hz et 3 kHz avec un maximum d'énergie pour les fréquences inférieures à 1 kHz ;
- ✓ Lors de l'éloignement, le niveau décroît avec la distance.

✓

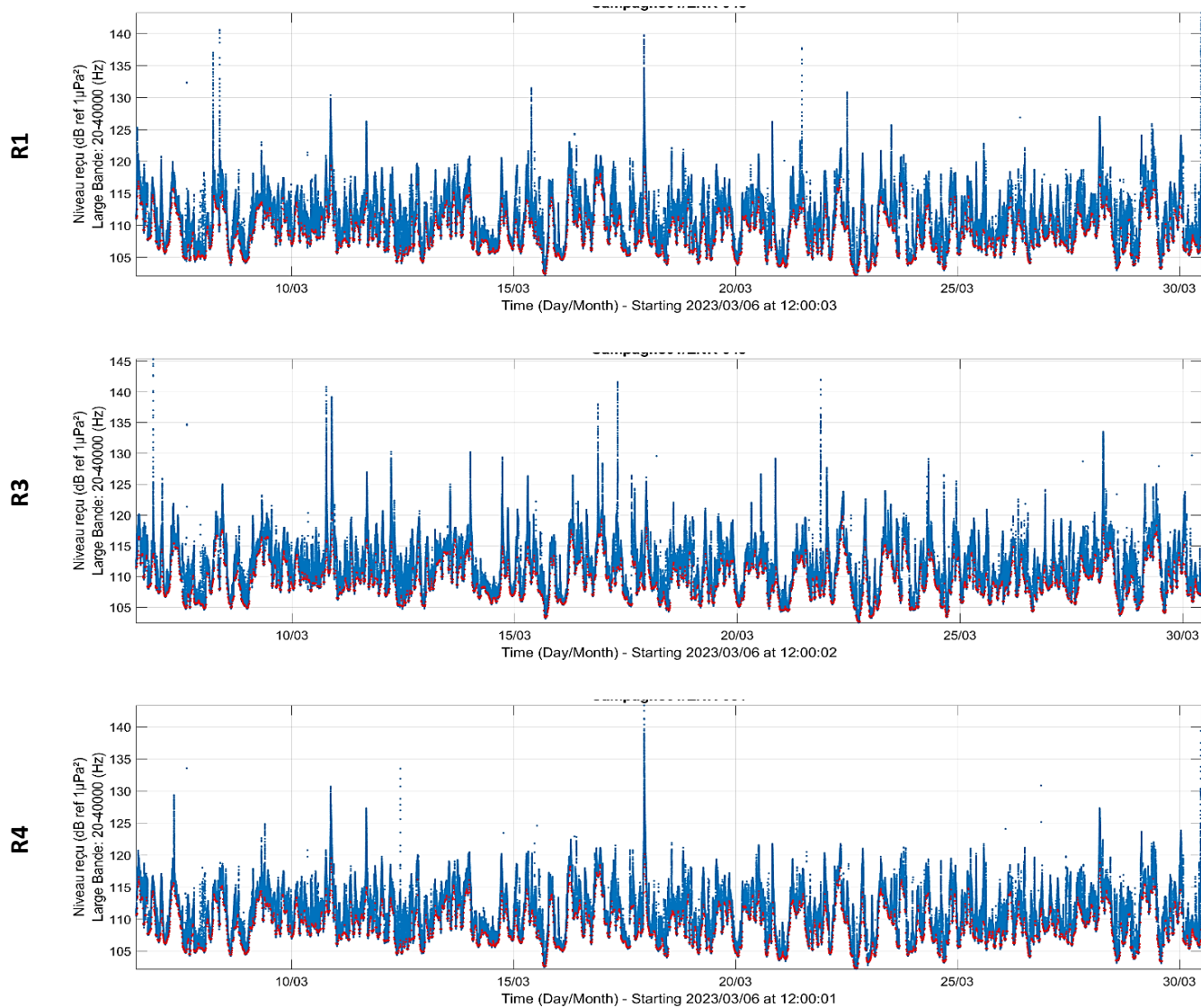


Figure 8 : Evolution des niveaux intégrés dans la bande [20Hz;40kHz] (exprimés en dB ref 1µPa²) mesurés lors de la période hiver/printemps 2023.

Vent
Fréquence 800 Hz, station R4

Hauteur de vague
Fréquence 6.3kHz, station R1

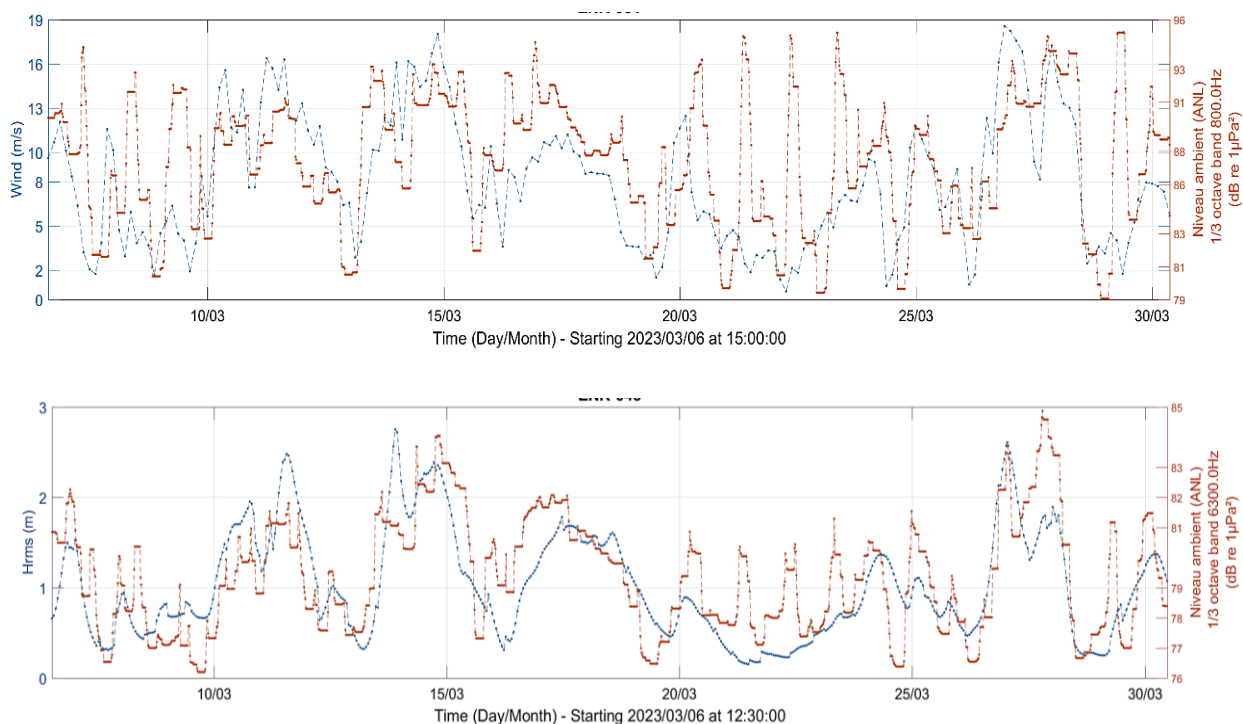


Figure 9 : Corrélation du bruit permanent (orange) avec les conditions météorologiques (bleu) dans la zone d'étude lors de la période hiver/printemps 2023.

Tableau 8 : Statistiques des niveaux sonores (20Hz -40 kHz) à la station R1 (exprimés en dB ref 1μPa²) lors de la période hiver/printemps 2023.

	Percentile (%)	Niveau très courant			Niveau Médian				Niveau très rare	
		100	99	90	75	50	25	10	1	0
R1	Toute la période	102.1	103.8	106	107.8	110.6	113.5	115.9	120.8	143.2
	Jour	102.1	103.5	106.4	108.2	111.2	113.9	116	120.6	143.2
	Nuit	102.7	104	105.6	107.4	109.9	112.9	115.6	120.8	139.7
	Ecart Jour/Nuit	-0.6	-0.4	0.8	0.8	1.3	1	0.5	-0.2	3.5

Tableau 9 : Statistiques des niveaux sonores (20Hz -40 kHz) dans la zone R3 (exprimés en dB ref 1μPa²) lors de la période hiver/printemps 2023.

	Percentile (%)	Niveau très courant			Niveau Médian				Niveau très rare	
		100	99	90	75	50	25	10	1	0
R3	Toute la période	102.5	104.5	106.6	108.5	111.2	114.2	116.8	122.5	145.3
	Jour	102.5	104.2	106.9	108.8	111.8	114.8	117.2	122.1	141.6
	Nuit	103.2	104.7	106.3	108.1	110.5	113.6	116.1	122.5	145.3
	Ecart Jour/Nuit	-0.8	-0.5	0.6	0.7	1.3	1.2	1.1	-0.5	-3.7

Tableau 10 : Statistiques des niveaux sonores (20Hz -40 kHz) dans la zone R3 (exprimés en dB ref 1μPa²) lors de la période hiver/printemps 2023.

	Percentile (%)	Niveau très courant			Niveau Médian				Niveau très rare	
		100	99	90	75	50	25	10	1	0
R4	Toute la période	102.2	104	106.2	108	110.7	113.5	115.7	120.4	143.3
	Jour	102.2	103.6	106.5	108.3	111.2	113.9	115.9	119.8	139.3
	Nuit	102.8	104.2	105.8	107.6	110	112.9	115.4	120.8	143.3
	Ecart Jour/Nuit	-0.6	-0.5	0.7	0.7	1.3	0.9	0.5	-1	-4

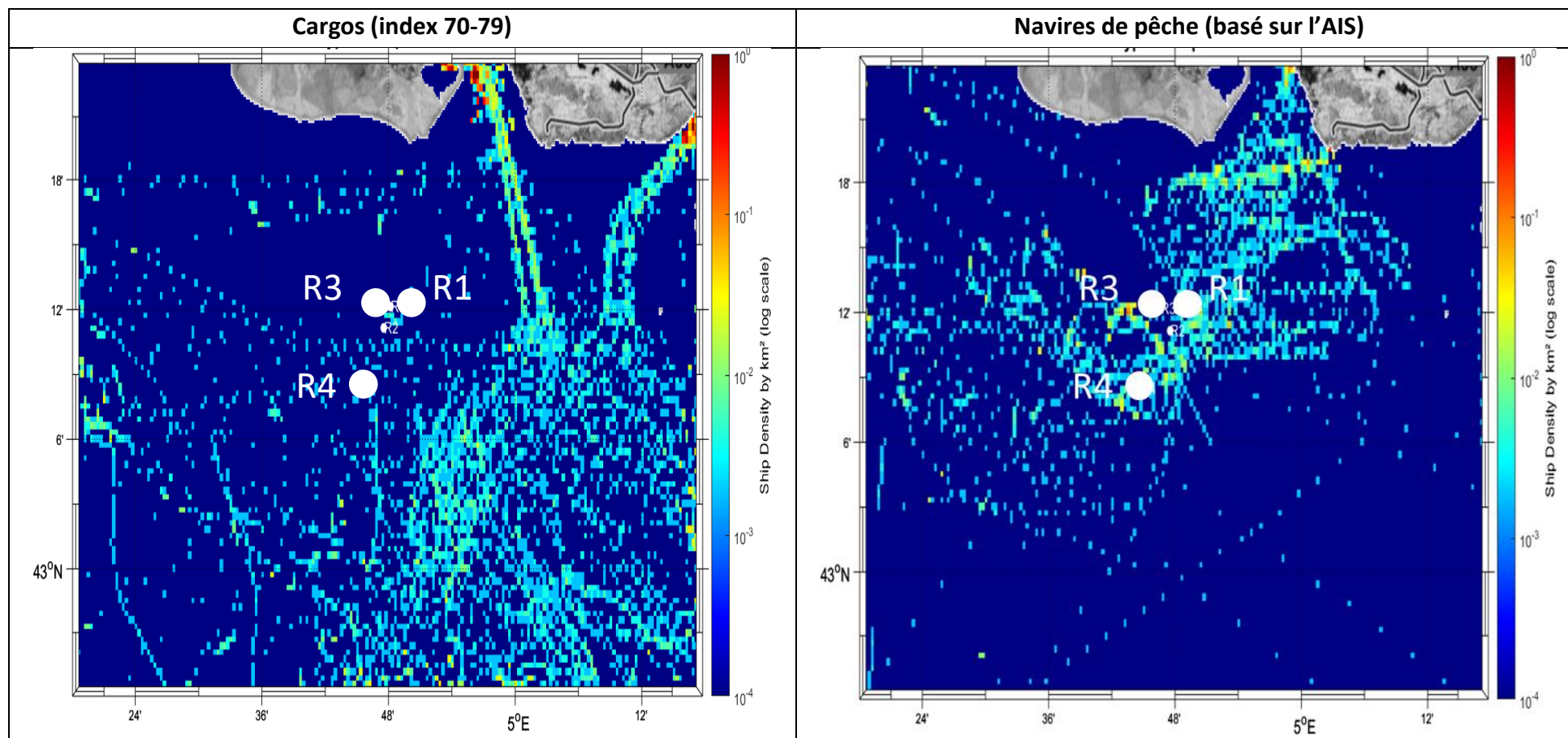


Figure 10 : Carte de densité de navigation dans la zone d'étude lors de la période hiver/printemps 2023.

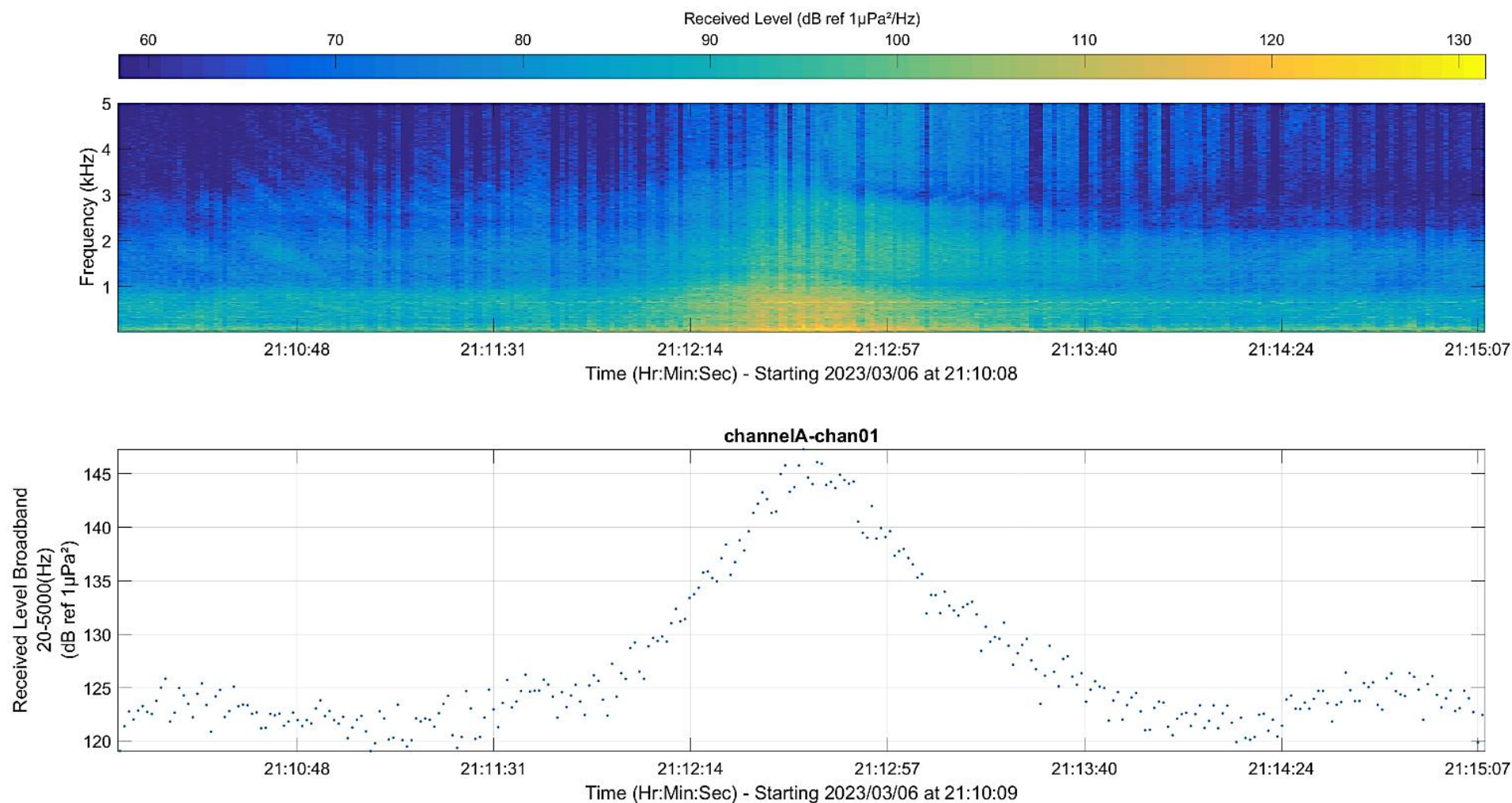


Figure 11 : Illustration d'un passage du navire de pêche 'Bernadette' proche de la station R3 En haut, spectrogramme;
En bas, niveau sonore associé (bande de 20Hz-5kHz) exprimé en dB ref 1 μPa^2 .

IV.1.2. Analyse du bruit ambiant par bandes de fréquence

La Figure 12 (partie gauche) donne la répartition statistique fréquentielle de l'énergie sonore en fonction de la zone d'étude. Les courbes du modèle mondial de Wenz (courbes de référence) tracées en pointillés gris (Wenz, 1962) montrent l'état de référence acoustique d'un océan soumis uniquement au bruit environnemental.

- ✓ Concernant les percentiles forts (courbes vertes/violettes, percentiles inférieurs à 10%), l'influence des activités anthropiques est visible, notamment la propulsion des navires, et crée une bosse de bruit significative entre 40 Hz et 100 Hz avec des niveaux compris entre 90 et 103 dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ selon la zone étudiée. A noter que la contribution acoustique des activités anthropiques est visible jusqu'à la fréquence de 2.5 kHz.
- ✓ L'allure des spectres aux percentiles médians à faibles (courbes jaunes/orange/bleue, percentiles supérieurs à 50%) est généralement corrélée au modèle de Wenz, ce qui n'est que partiellement le cas ici. En basse fréquence, le pic anthropique rencontré entre 70 et 100 Hz reste visible avec des niveaux compris entre 80 et 85 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ pour le percentile 90%. Il apparaît donc que la fréquentation de la zone d'étude par les navires est quasi constante, et influence durablement le paysage sonore pour les fréquences inférieures à 500Hz. Les courbes montrent une bonne corrélation avec le modèle de Wenz pour les fréquences supérieures à 500Hz.
- ✓ Les spectres mettent en évidence l'activité des organismes benthiques, qui est visible par une bosse de bruit entre 7 et 20kHz. Cette activité est recensée au niveau des trois stations acoustiques avec des niveaux compris entre 48 et 55dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ selon la zone étudiée.

Globalement, les fréquences inférieures à 2500Hz sont dominées par les activités anthropiques, tandis que les fréquences supérieures sont dominées par les effets météorologiques et la vie benthique. Les trois stations montrent un profil de bruit très proche.

La partie centrale de la Figure 12 montre les variations horaires des émergences sonores dans la bande de fréquence spécifique de 89 Hz à 110 Hz, au percentile 50%. Cette bande de fréquence représentative des activités anthropiques, permet de mettre en évidence un accroissement du niveau sonore de 3 à 6 dB entre 06h00 et 22h00 UTC au niveau des stations R1, R3 et R4. Ces conclusions coïncident avec les émergences diurnes constatées lors de l'analyse du bruit intégré dans la bande [20Hz;40kHz]. Un creux est cependant visible et non expliqué à 14h sur les trois stations.

La partie droite de la Figure 11 montre les variations horaires relatives des émergences sonores dans la bande de fréquence spécifique de 7.1 Hz à 8.9 kHz, au percentile 50%. Cette bande de fréquence est par opposition, représentative de l'activité des organismes benthiques. Elle permet de mettre en évidence un accroissement relatif nocturne du niveau sonore, variant de +2 à +3 dB entre 20h00 et 08h00 UTC au niveau des stations R1, R3 et R4. A cette fréquence, les niveaux les plus faibles sont observés vers 16h UTC sur les trois stations.

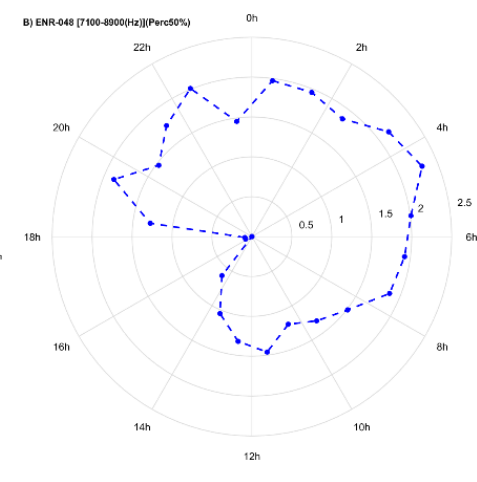
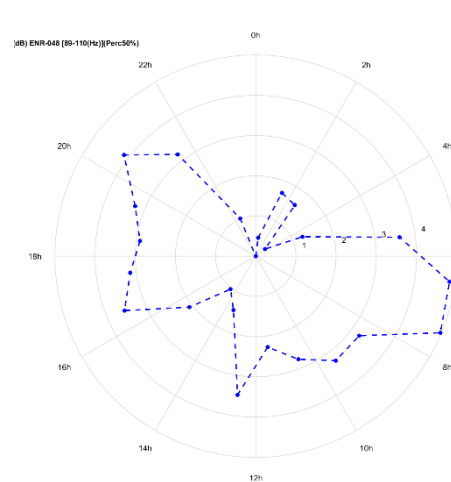
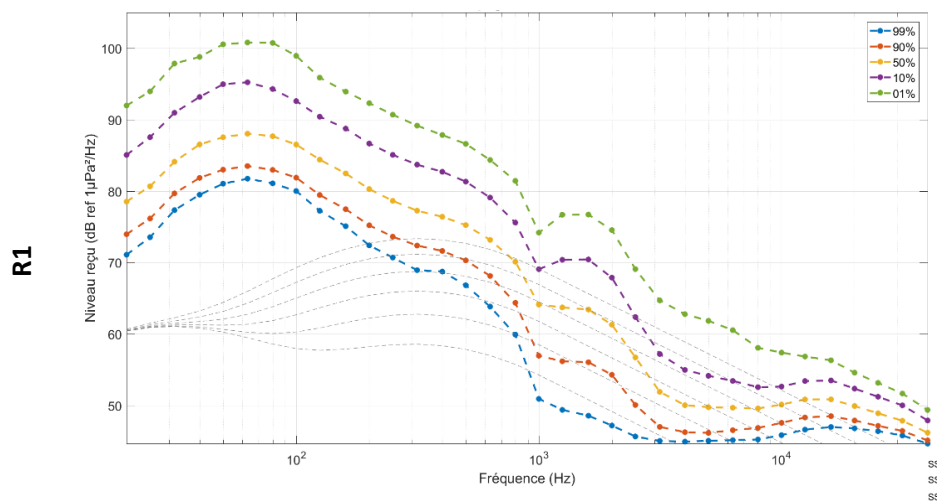
Vent/vagues

Navires

Activité benthique

89Hz - 110Hz Percentile 50%

7.1-8.9kHz Percentile 50%



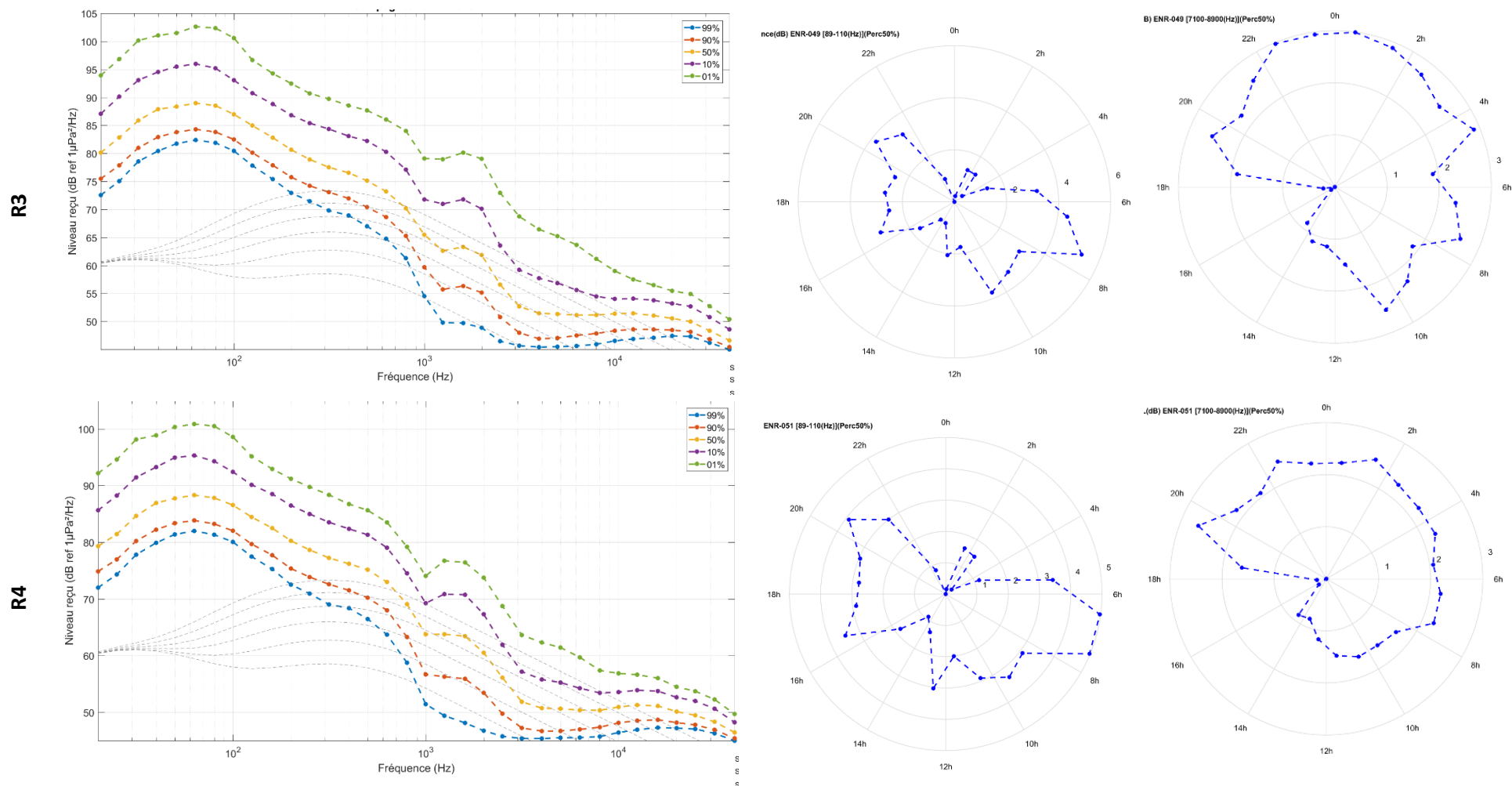


Figure 12 : Répartition fréquentielle de l'énergie acoustique mesurée en hiver/printemps 2023 (à gauche). Répartition horaire des émergences sonores en hiver/printemps 2023, au percentile 50% dans les bandes 89Hz-110Hz (au centre) et 7.1-8.9kHz (à droite).

IV.2. Période été 2023 (données du 29/06 au 28/07/2023)

IV.2.1. Analyse statistique du bruit ambiant

La Figure 13 montre l'évolution des niveaux sonores intégrés dans la bande de fréquence entre 20 Hz et 40 kHz, en fonction du temps (courbe bleue) pour chacune des stations lors de la période été 2023. En complément, la courbe rouge superposée montre l'évolution du niveau de bruit permanent ou « pied de bruit ». Le bruit permanent fluctue ici entre 100 et 120 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ pour chacune des stations acoustiques. Pareillement aux résultats du suivi hiver/printemps 2023, les facteurs les plus déterminants de ces variations correspondent aux phénomènes météorologiques, à savoir la vitesse du vent et la hauteur de vague pour les fréquences supérieures à 500Hz (Figure 14).

Le paysage sonore est ponctuellement dominé par des émergences anthropiques courtes (d'une durée de 5 à 15 min) et intenses, correspondant aux passages de navires à proximité du capteur. Selon la distance de passage vis-à-vis du capteur acoustique, ces passages induisent des niveaux sonores allant jusqu'à 146.4 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$. A l'identique de la période hiver/printemps 2023, on relève en moyenne moins d'un évènement acoustiquement significatif par jour au niveau des trois stations. Ceci indique que la zone couverte par les capteurs acoustiques est peu influencée par les passages proches de navires. En considérant les passages plus lointains, soit une élévation d'au moins 10dB vis-à-vis du niveau sonore permanent, on détecte en moyenne :

- ✓ 7 évènements significatifs par jour au niveau de la station R1 ;
- ✓ 6 évènements significatifs par jour au niveau de la station R3 ;
- ✓ 7 évènements significatifs par jour au niveau de la station R4.

Ces chiffres sont en hausse (entre 25 et 75% en fonction des stations) par rapport à la fréquentation estimée lors de la période hiver/printemps 2023.

La Figure 15 illustre sous forme de spectrogramme le passage très proche du navire cargo « Glen » de la station R1 sur la journée du 09 Juillet 2023. Cet instant correspond au maximum d'énergie acoustique mesuré lors de l'été 2023 :

- ✓ Lors de l'approche, le niveau sonore augmente au fur et à mesure que la distance séparant le navire de l'hydrophone décroît, avec des émergences sonores en raies ;
- ✓ Au minimum de distance (CPA, à environ 70m du capteur acoustique), une augmentation courte (30s) du niveau sonore est visible jusqu'à 146.4 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$, soit environ 30dB d'émergence en regard du bruit médian sur zone, dans une bande fréquentielle entre 50 Hz et 10 kHz avec un maximum d'énergie pour les fréquences inférieures à 1 kHz ;
- ✓ Lors de l'éloignement, le niveau décroît avec la distance. L'asymétrie visible entre l'approche et l'éloignement du navire met en évidence la directivité de la source du navire (position de l'hélice à l'arrière).

La partie supérieure de la Figure 16 trace le spectrogramme de travaux de vibrocoring, probablement réalisés dans le cadre d'études géophysiques par le navire support « Roxanne Z » ou « Tecnoambiente » (appellation RTE), dans la journée du 10 Juillet 2023 à proximité (environ 350m) du capteur de la station R4. En dehors des périodes de travaux à proprement parler, le spectrogramme met en évidence un bruit continu restreint aux fréquences inférieures à 3kHz, correspondant probablement au bruit émis par le navire en stationnement et par ses équipements embarqués. Hors phase de travaux, le niveau sonore (20Hz-10kHz) est d'environ 113.5dB ref $1\mu\text{Pa}^2$. Des périodes courtes (quelques secondes) de travaux sont visibles par l'apparition de signaux dits harmoniques avec des émergences sonores d'amplitude modérée comprises entre 2 et 10kHz, et des fréquences caractéristiques réparties selon un espacement régulier (lignes parallèles sur le spectrogramme). Le niveau sonore augmente alors d'environ 1.5dB.

Par opposition, la partie inférieure de la figure trace le spectrogramme d'un instant calme recensé au niveau de la station R4, dans la journée du 14 Juillet 2023. Cet épisode calme est caractérisé par l'absence de sources

anthropiques proche, et met alors en évidence la contribution basse fréquence (moins de 1kHz) liée au vent et à la houle. Les lignes verticales visibles entre 6 et 10kHz correspondent aux émissions acoustiques produites par l'activité des organismes benthiques. Le niveau sonore est alors d'environ 99dB ref $1\mu\text{Pa}^2$, soit 16 dB de moins que lors de l'épisode de travaux mentionné ci-dessus.

Afin de synthétiser l'information sur les niveaux sonores, les Tableau 11, Tableau 12 et Tableau 13 donnent la répartition statistique du bruit exprimé entre 20 Hz et 40 kHz durant la période été 2023, pour chaque station :

- ✓ Les niveaux faibles (99% du temps) sur cette période sont de 101.3 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R1), 101.4 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3) et 102.2 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R4) . Les conditions météo plus favorables font baisser les niveaux sonores (de -2 à -3dB) vis-à-vis de ceux relevés lors de la période hiver/printemps 2023 ;
- ✓ Les niveaux médians (50% du temps) sur cette période sont de 109.6 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R1), 109.3 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3) et 110.1 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R4) . En comparaison des valeurs relevées lors de la période hiver/printemps 2023, ces niveaux sont en légère baisse (-1.9dB) à la station R3.
- ✓ Les niveaux les plus forts et rares (percentile 1%) sur la période sont de 120.2 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R1), 119.6 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3) et 121.7 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R4). Ces niveaux sont aussi en baisse (-3dB) à la station R3.

La différenciation jour/nuit permet également de mettre en évidence un accroissement modéré des niveaux de bruit le jour (+2dB) au percentile 1% pour la station R1.

La Figure 17 permet de mettre en regard les statistiques des niveaux sonores mesurés et la densité de navires issue des données AIS uniquement, dans le périmètre d'étude :

- ✓ La navigation commerciale est stable entre les deux périodes de suivi.
- ✓ La navigation de pêche, sans avoir réellement diminuée, s'est éloignée du parc lors de l'été 2023. Ce phénomène peut alors expliquer la baisse des niveaux sonores relevés aux percentiles 50 et 1% à la station R3.

Ces conclusions sont toutefois partielles, car cette analyse est basée uniquement sur l'AIS et ne prend pas en compte les données VMS.

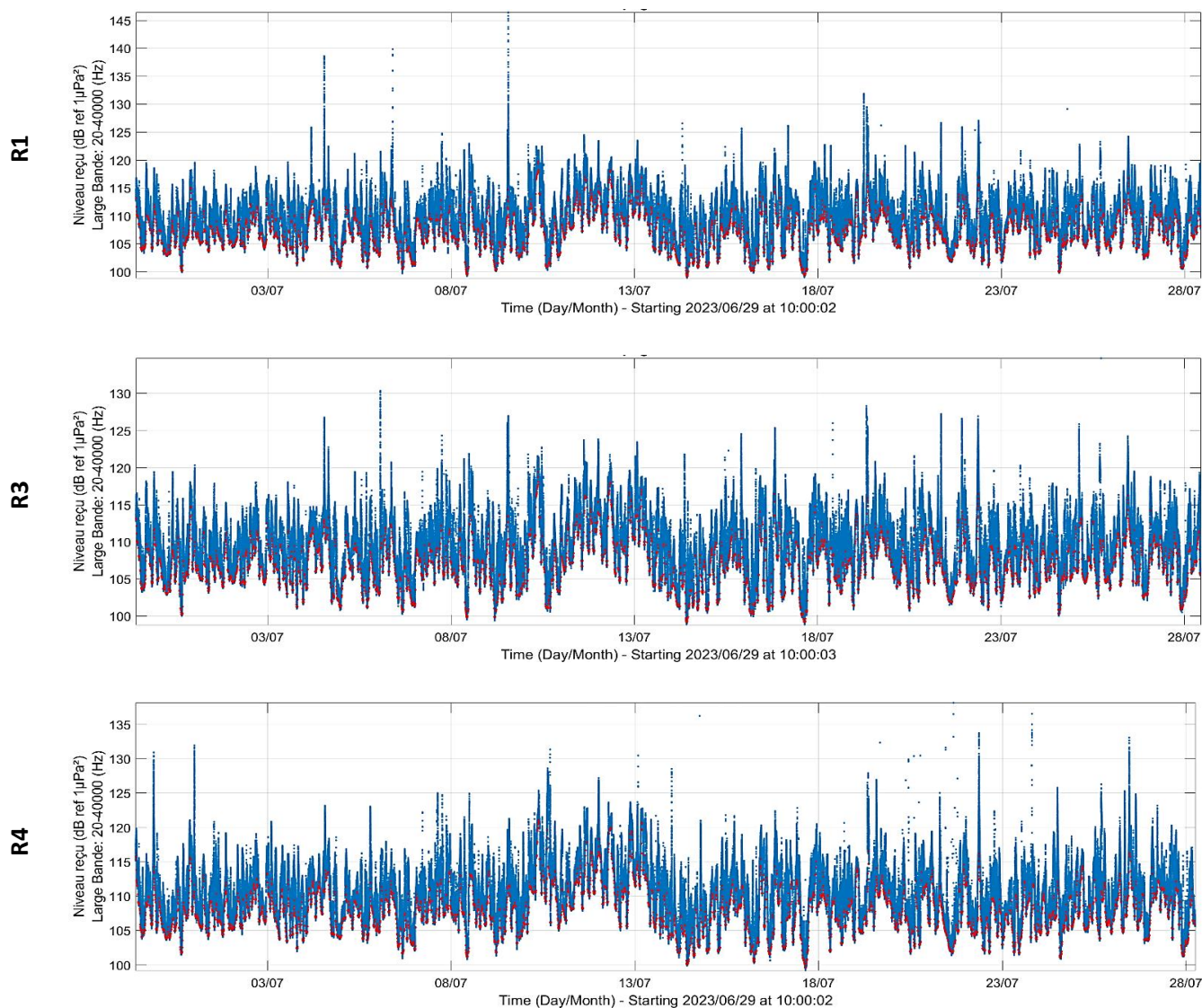
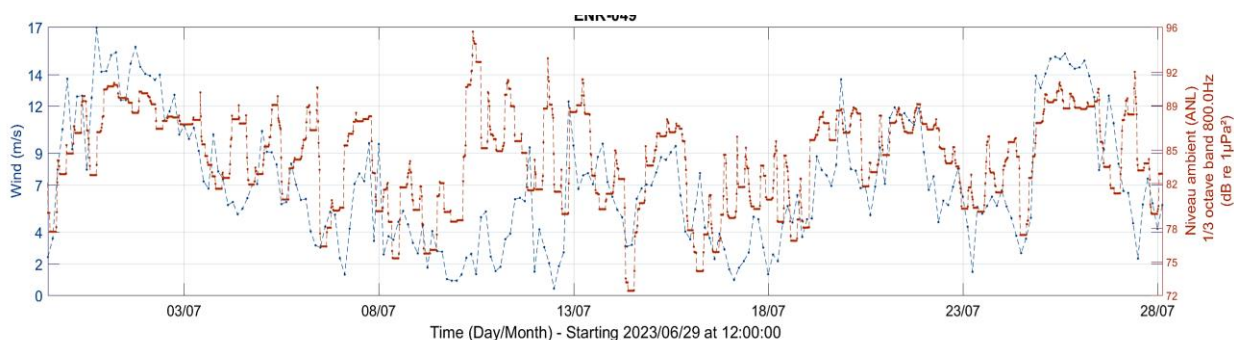


Figure 13 : Evolution des niveaux intégrés dans la bande [20Hz;40kHz] (entre 20 Hz et 40 kHz, exprimés en dB ref 1µPa²) mesurés lors de la période été 2023.

Vent
Fréquence 800 Hz, station R4



Hauteur de vague
Fréquence 4 kHz, station R3

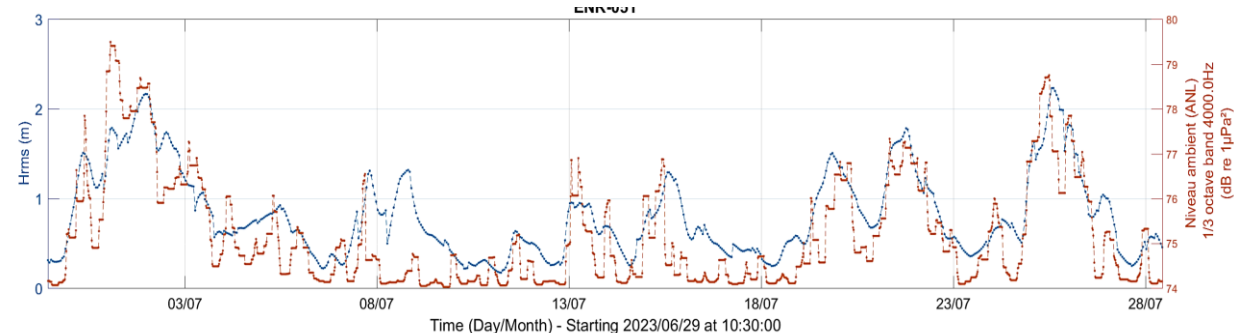


Figure 14 : Corrélation du bruit permanent (orange) avec les conditions météorologiques (bleu) dans la zone d'étude lors période été 2023.

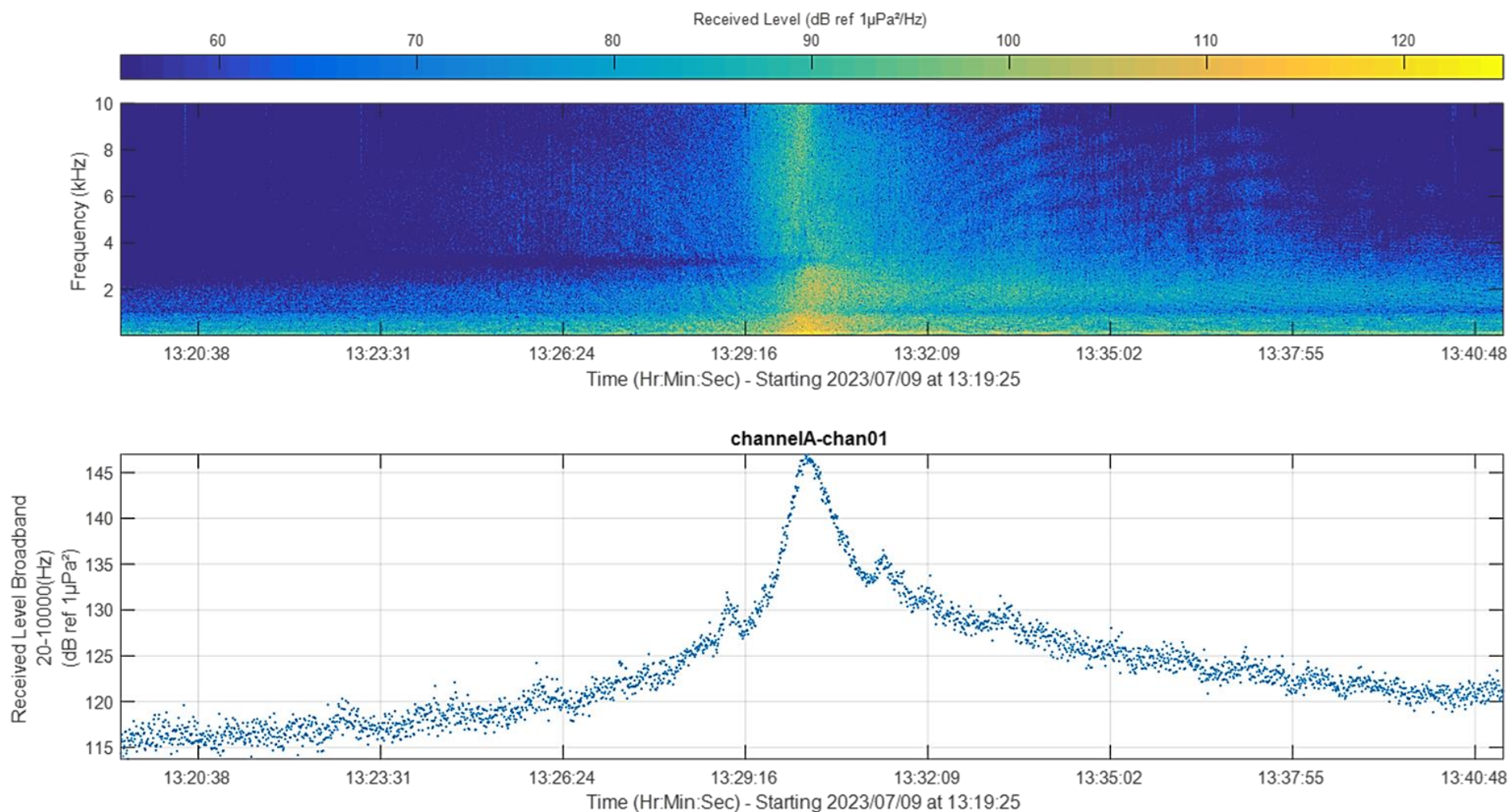
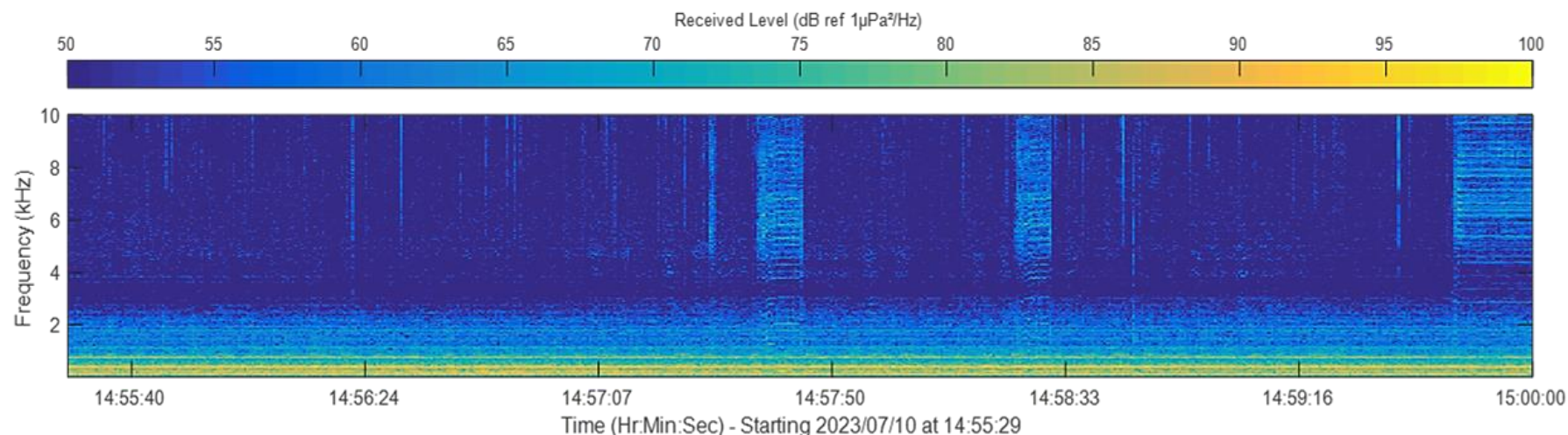


Figure 15 : En haut, spectrogramme du passage proche du navire cargo « GLEN » à proximité de la station R1, dans la journée du 09 Juillet 2023. En bas, niveau sonore associé à ce passage de navire (20Hz-10kHz) exprimé en dB ref 1 μPa^2 .

Travaux du Roxanne Z dans la journée
du 10/07/2023



Moment calme dans la journée du
14/07/2023

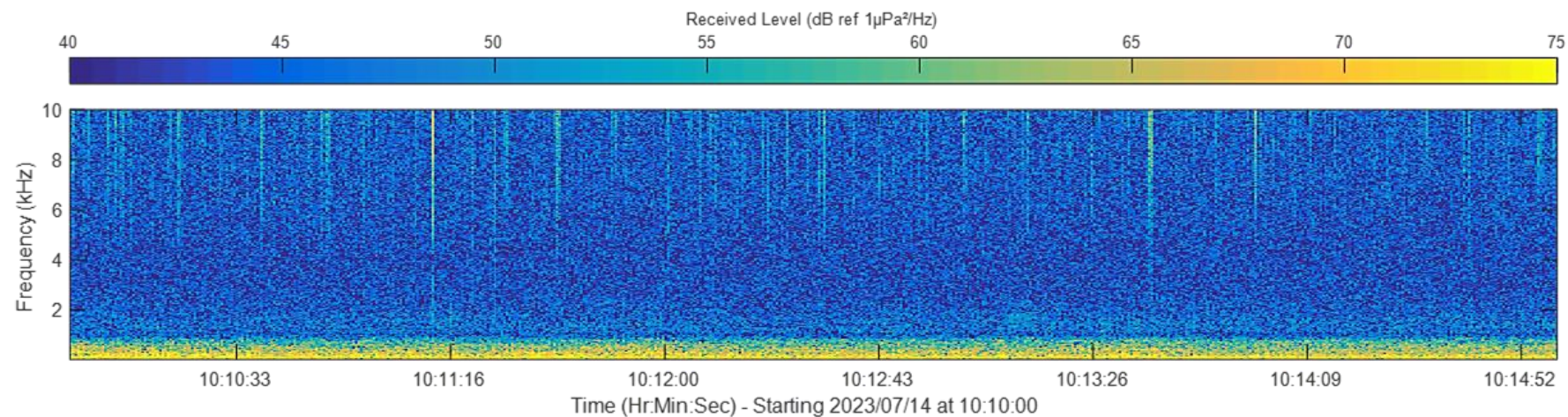


Figure 16 : Spectrogrammes d'événements acoustiques repérés lors de la période été 2023, à proximité de la station R4.

Tableau 11 : Statistiques des niveaux sonores (20Hz -40 kHz) à la station R2 (exprimés en dB ref 1µPa²) lors de la période été 2023.

	Percentile (%)	Niveau très courant			Niveau Médian			Niveau très rare		
		100	99	90	75	50	25	10	1	0
R1	Toute la période	98.9	101.3	104.4	106.8	109.6	112.5	115.1	120.2	146.4
	Jour	98.9	101	104.5	107	109.8	112.5	115.2	120.7	146.4
	Nuit	100.4	101.6	104	106.2	109.1	112.1	115	118.7	125.9
	Ecart Jour/Nuit	-1.6	-0.6	0.4	0.8	0.7	0.4	0.2	2	20.5

Tableau 12 : Statistiques des niveaux sonores (20Hz -40 kHz) à la station R3 (exprimés en dB ref 1µPa²) lors de la période été 2023.

	Percentile (%)	Niveau très courant			Niveau Médian			Niveau très rare		
		100	99	90	75	50	25	10	1	0
R3	Toute la période	98.8	101.4	104.3	106.6	109.3	112	114.6	119.6	134.7
	Jour	98.8	101.2	104.4	106.7	109.4	112	114.6	120	134.7
	Nuit	100.4	101.8	104.1	106.1	108.8	111.8	114.6	119.2	130.4
	Ecart Jour/Nuit	-1.6	-0.6	0.3	0.6	0.5	0.2	0	0.8	4.4

Tableau 13 : Statistiques des niveaux sonores (20Hz -40 kHz) à la station R3 (exprimés en dB ref 1µPa²) lors de la période été 2023.

	Percentile (%)	Niveau très courant			Niveau Médian			Niveau très rare		
		100	99	90	75	50	25	10	1	0
R4	Toute la période	99.2	102.2	105.3	107.4	110.1	113	115.7	121.7	138.1
	Jour	99.2	101.9	105.2	107.4	110.1	112.9	115.7	121.9	138.1
	Nuit	101.2	102.8	105.3	107.3	109.9	112.9	115.8	121.2	131.9
	Ecart Jour/Nuit	-2	-0.9	-0.2	0.1	0.3	0	0	0.8	6.2

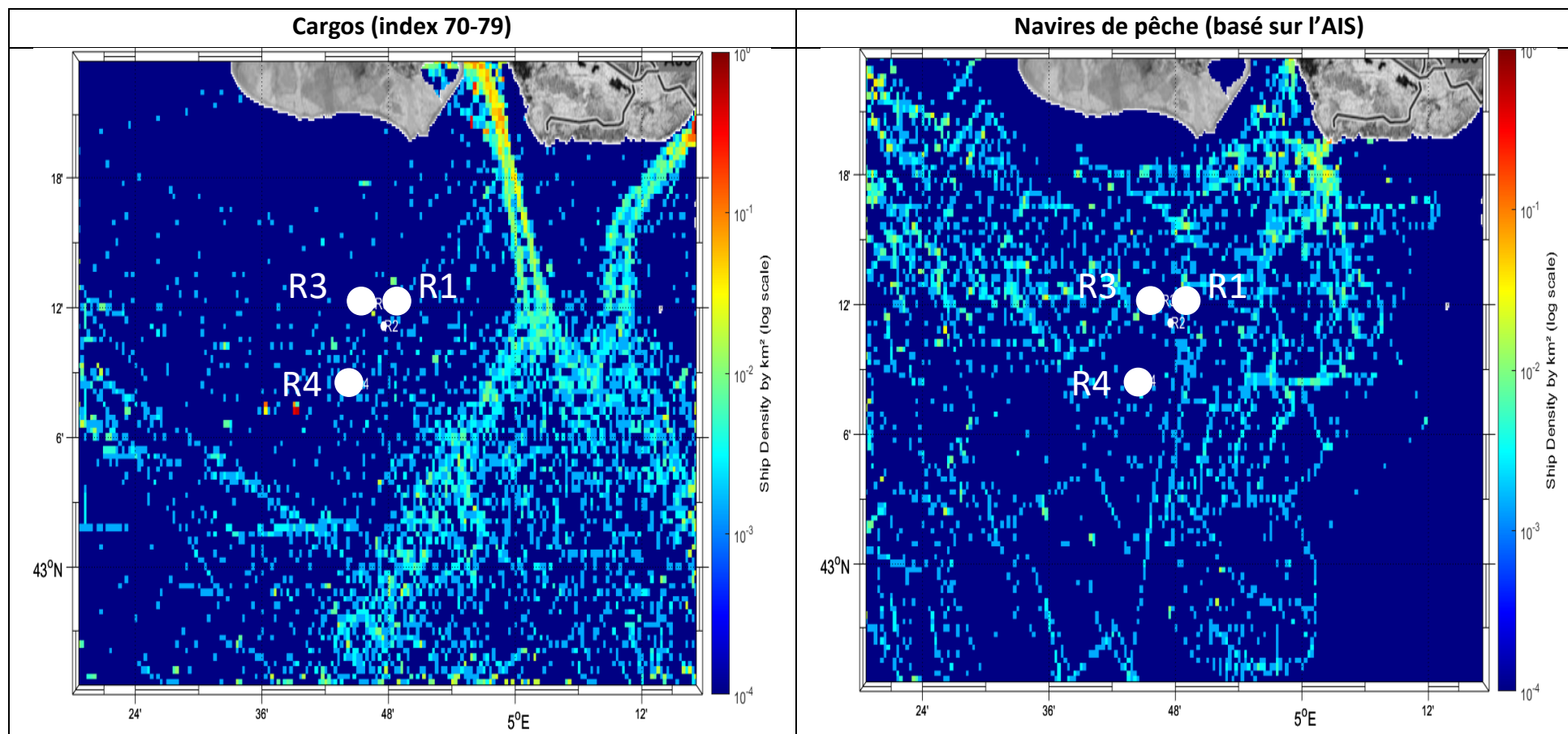


Figure 17 : Carte de densité de navigation dans la zone d'étude lors de la période été 2023.

IV.2.2. Analyse du bruit ambiant par bandes de fréquence

La Figure 18 (partie gauche) donne la répartition statistique fréquentielle de l'énergie sonore en fonction de la zone d'étude. Les courbes du modèle de Wenz (courbes de référence) tracées en pointillés gris (Wenz, 1962) montrent l'état de référence acoustique d'un océan soumis uniquement au bruit environnemental.

- ✓ Concernant les percentiles forts (courbes vertes/violettes, percentiles inférieurs à 10%), l'influence des activités anthropiques est visible, notamment la propulsion des navires, et crée une bosse de bruit significative entre 40 Hz et 100 Hz avec des niveaux compris entre 90 et 100 dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ selon la zone étudiée. La baisse des niveaux intégrés dans la bande [20Hz;40kHz] calculée à la station R3 lors de l'été 2023 est associée à la baisse de l'énergie mesurée au sein de cette composante basse fréquence. A noter que la contribution acoustique des activités anthropiques est visible jusqu'à la fréquence de 2.5 kHz.
- ✓ Concernant les percentiles médians à faibles (courbes jaune/orange/bleue, percentiles supérieurs à 50%), en basse fréquence, le pic rencontré entre 70 et 100 Hz reste visible avec des niveaux compris entre 78 et 85 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ pour le percentile 90%. Ce phénomène est identique à celui rencontré lors du suivi hiver/printemps 2023, est témoin de l'influence de la navigation pour les fréquences inférieures à 500Hz. Les courbes montrent une bonne corrélation avec le modèle de Wenz pour les fréquences supérieures à 500Hz.
- ✓ A l'identique du suivi hiver/printemps 2023, les spectres mettent en évidence l'activité des organismes benthiques, qui est visible par une bosse de bruit entre 7 et 20kHz. Cette activité est recensée au niveau des trois stations acoustiques et engendre des niveaux compris entre 48 et 50dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ selon la zone étudiée.

Les trois stations montrent un profil de bruit très proche entre elles. Ces profils sont aussi très proches des profils de bruit reçu mesurés lors du suivi effectué en hiver/printemps 2023.

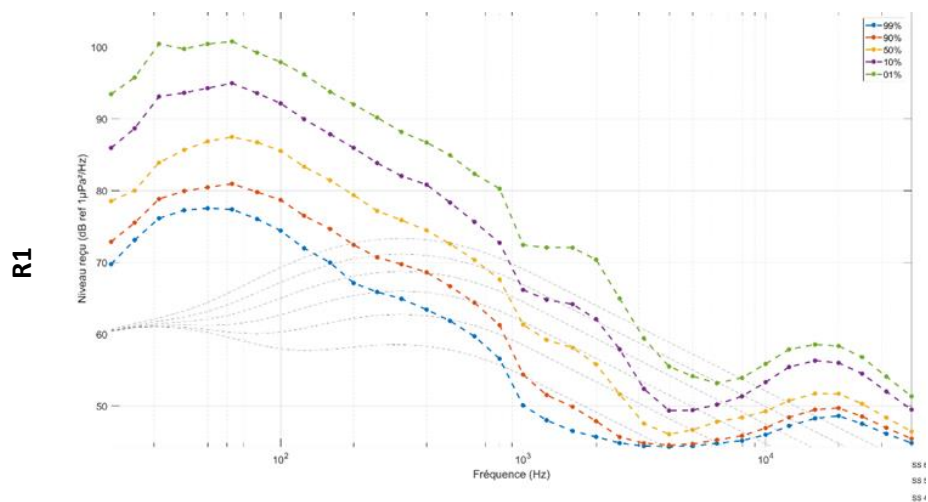
La partie centrale de la figure montre les variations horaires des émergences sonores dans la bande de fréquence spécifique de 89 Hz à 110 Hz, au percentile 50%. Cette bande de fréquence, représentative des activités anthropiques, permet de mettre en évidence un accroissement du niveau sonore de 2 à 3 dB entre 08h00 et 21h00 UTC au niveau des stations R1, R3 et R4.

La partie droite de la figure montre les variations horaires des émergences sonores dans la bande de fréquence spécifique de 7.1 Hz à 8.9 kHz, au percentile 50%. Elle permet de mettre en évidence un accroissement nocturne du niveau sonore correspondant à l'activité des organismes benthiques, d'environ +3 à +4 dB entre 21h00 et 03h00 UTC au niveau des stations R1, R3 et R4. Cette distinction jour/nuit est plus forte que celle rencontrée lors du suivi hiver/printemps 2023, ce qui suggère une saisonnalité de l'activité benthique. Ce phénomène a déjà été rencontré dans le cadre d'autres projets (état de référence des futurs parcs éoliens en Mer de Normandie, état de référence du parc éolien de St Nazaire par exemple).

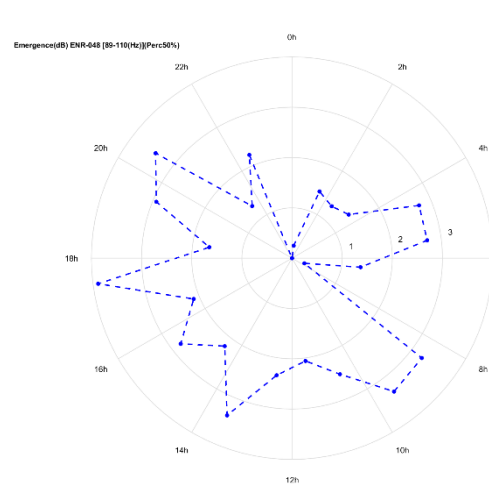
Vent/vagues

Navires

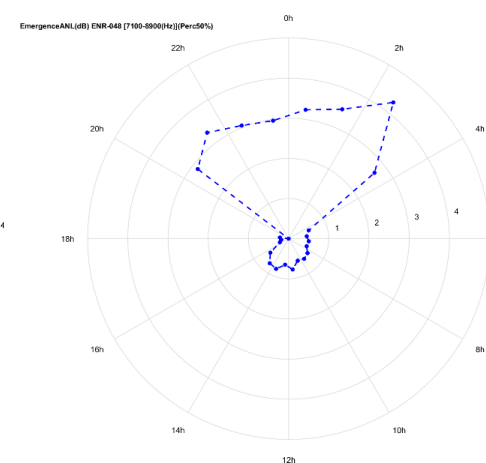
Activité benthique



89Hz - 110Hz Percentile 50%



7.1-8.9kHz Percentile 50%



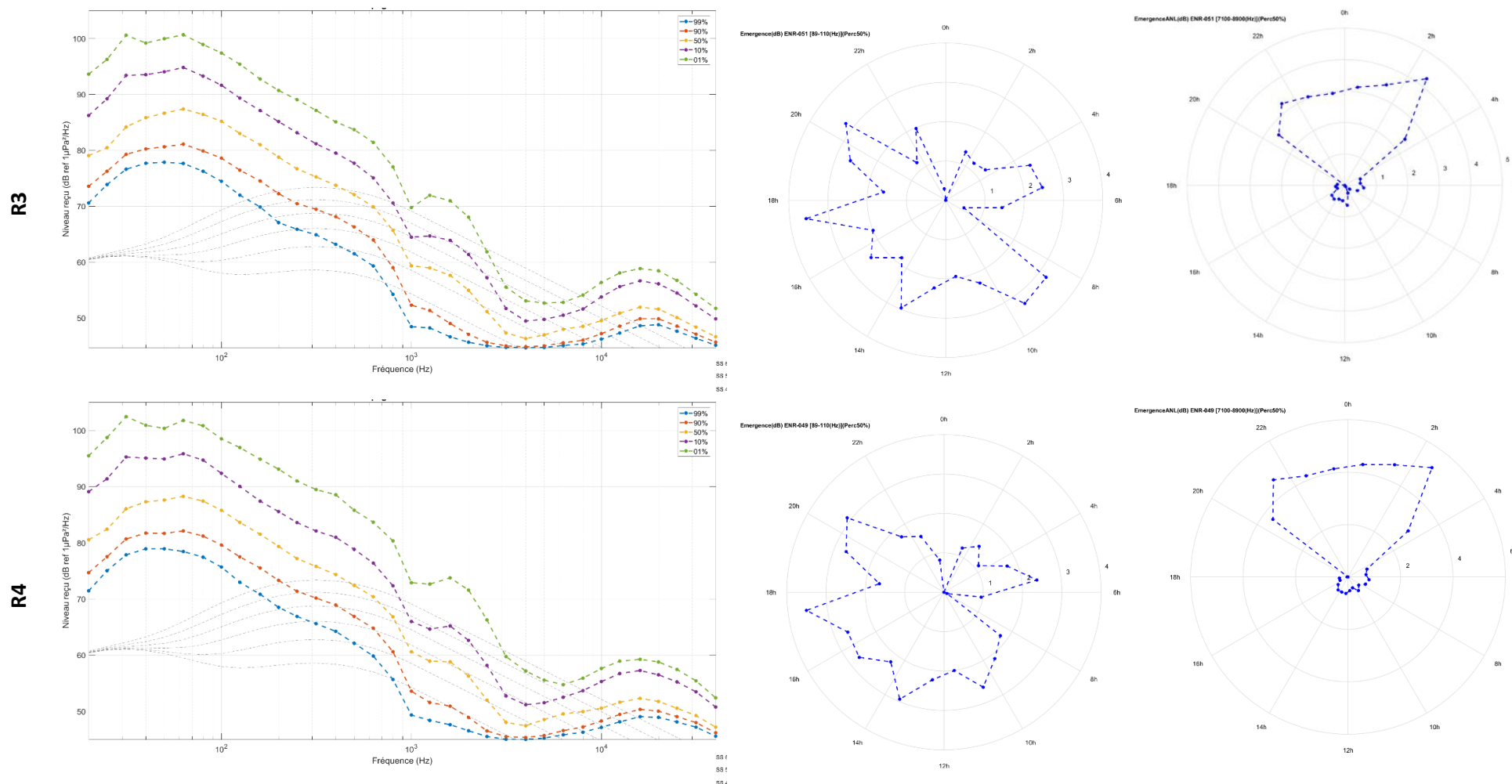


Figure 18 : Répartition fréquentielle de l'énergie acoustique mesurée en été 2023 (à gauche). Répartition horaire des émergences sonores en été 2023, au percentile 50% dans les bandes 89Hz-110Hz (au centre) et 7.1-8.9kHz (à droite).

Chapitre V. Cartographie du bruit ambiant

Ce chapitre a pour objectif de décrire la méthode et les outils utilisés pour modéliser la propagation des bruits dans le milieu marin. La cartographie statistique de l'état de référence intègre les sources de bruit (naturelles et anthropiques), prend en compte les conditions environnementales lors de la propagation du son ainsi que les données de mesure.

V.1. Plateforme de modélisation

L'estimation des champs sonores se fait par simulation numérique impliquant l'usage de modèles prenant en compte l'ensemble des paramètres qui conditionne la propagation sonore sous-marine (bathymétrie, profil de célérité, données météo-océaniques, sources de bruit, sédimentologie, données de mesure in situ...). Quiet-Oceans propose une modélisation par équations paraboliques (Jensen, Kuperman, Porter, & Schmidt, 2000) (Collins M. D., 1994) (Collins, Cederberg, King, & Chin-Bing, 1996) qui traduit fidèlement la propagation du bruit dans la colonne d'eau en résolvant l'Equation de Helmholtz :

$$\Delta p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \delta(t - t_0, r - r_0)$$
$$\rho c^2 = p \rho_0 \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{\nabla} p = 0$$
$$j2\pi f \rho_0 \vec{v} + \vec{\nabla} p = 0$$

où p est la pression acoustique, C est la célérité du son dans l'eau ou dans le sédiment, t est le temps, t_0 est l'instant d'émission du signal, et $\mathbf{r}$ la position tridimensionnelle du point d'observation et $\mathbf{r}_0$ la position tridimensionnelle de la source par hypothèse ponctuelle.

Les profils de célérité du son dans l'eau sont proportionnels à la température de l'eau, la salinité et la pression (ou profondeur). Le principal effet de ces non-homogénéités dans les distributions de vitesse du son est de courber les rayons de propagation et de créer des chenaux de propagation. Ces phénomènes complexes sont toutefois prédictibles par simulation numérique. La modélisation de la propagation du son se fera par une succession de modélisations dans des plans verticaux interpolés de façon cylindrique.

V.1.1. La plateforme de prévision du bruit anthropique Quonops®

Afin de parvenir à ces résultats, Quiet-Oceans développe et opère Quonops®, un système opérationnel de surveillance et de prédiction du bruit anthropique en mer (European Union Brevet n° EP2488839, 2009). A l'instar des systèmes de prévision météorologique, cette plateforme puissante et brevetée produit une estimation de la distribution spatio-temporelle des niveaux de bruit générés par l'ensemble des activités humaines en mer. Les activités maritimes couvertes sont nombreuses parmi lesquelles le trafic maritime, les opérations de prospection pétrolière, les exercices militaires de lutte sous-marine, la construction et les opérations en mer d'extraction des énergies fossiles, la construction et l'exploitation des éoliennes en mer, les forages et dynamitages sous-marins, etc. La donnée produite par Quonops® couvre les besoins tels que définis dans les réglementations nationales et internationales, existantes et émergentes, concernant les niveaux de pollution et la préservation des habitats, des écosystèmes marins et la protection des espèces marines (Folegot & Clorennec, 2015). Elle offre une connaissance nouvelle des pollutions sonores par l'intermédiaire d'une cartographie des distributions et permet d'appréhender les volets acoustiques des études d'incidences, et les

optimisations de planification et de mitigation des activités industrielles maritimes dans leur conformité environnementale.

V.1.2. Une plateforme répondant aux plus hauts standards internationaux

Dans le cadre du projet européen AQUO (Achieve QUIeter Oceans), Quiet-Oceans a organisé et participé à une initiative internationale d'inter-comparaison de huit modèles acoustiques utilisés en acoustique sous-marine, dont ceux mis en œuvre dans Quonops®. Ce travail a consisté à définir plusieurs scénarios test de propagation théoriques et réalistes et à évaluer/comparer les résultats des différents modèles de propagation acoustique des différents instituts de recherche. Les résultats, rendus publics dans une publication scientifique commune (Collin, et al., 2015), ont démontré que les modèles mis en œuvre par Quonops® font partie du meilleur de l'état de l'art international.

V.1.3. Quels paramètres sont pris en compte dans les modélisations ?

La plateforme de modélisation Quonops® prend en compte l'essentiel des données qui conditionnent la propagation des bruits dans le milieu marin (Figure 19) :

- ✓ Les données environnementales, à savoir la bathymétrie, la nature des fonds, la température et la salinité de l'eau, le marnage et l'état de mer ;
- ✓ Les données anthropiques descriptives des activités humaines en mer qui introduisent de l'énergie sonore dans le milieu marin ;
- ✓ Les données in-situ le cas échéant afin de calibrer la cartographie.

Les résultats obtenus sous la forme de cartes sonores retranscrivent fidèlement les caractéristiques propres de la propagation des bruits et des usages maritimes spécifiques au site d'étude.

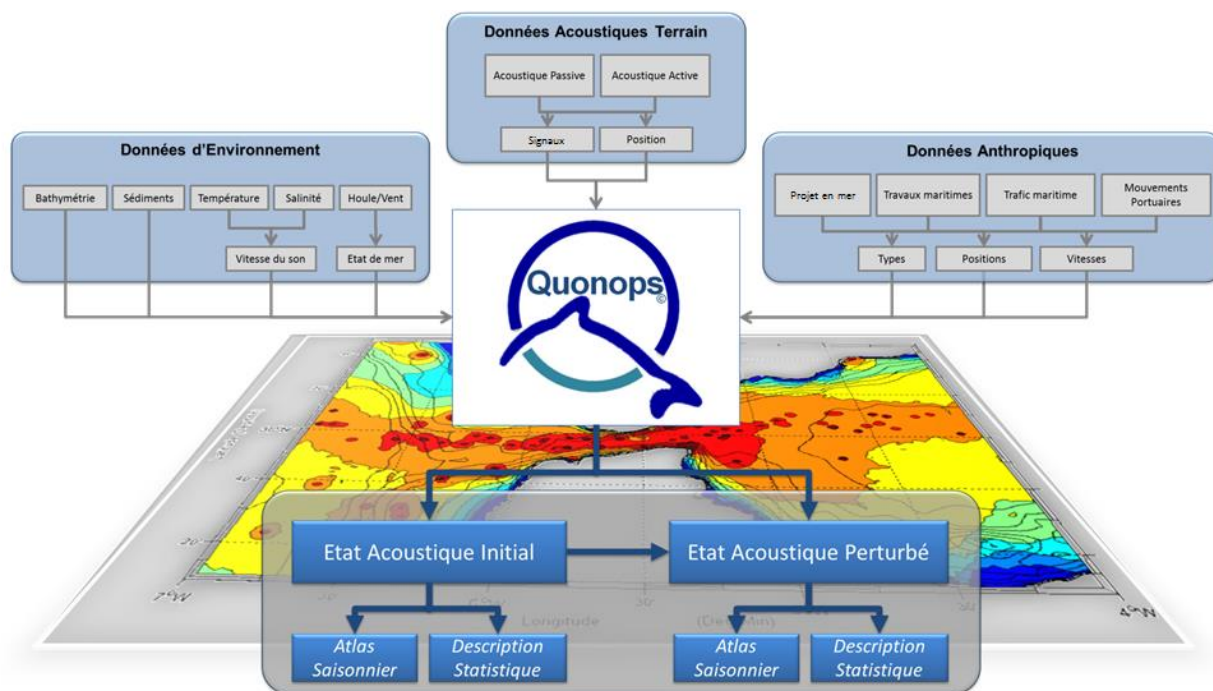


Figure 19 : Description schématique de la plateforme opérationnelle de prévision des bruits. (Source: Quiet-Oceans)

Dans le cadre de ce projet, le Tableau 14 référence les fournisseurs et les résolutions pour chaque donnée environnementale servant à la modélisation acoustique et à l'élaboration des cartes de bruit.

Tableau 14 : Synthèse des données environnementales utilisées pour la modélisation acoustique.

Couche	Source	Resolution spatiale		Resolution Temporelle
Bathymétrie	Emodnet	lon 33.9 (m)	lat 49.4 (m)	-
Profil de célérité	CMEMS	lon 2117.0 (m)	lat 3088.0 (m)	24 h
Nature du fond	SHOM	lon 1325.9 (m)	lat 1852.0 (m)	-
Hauteur de vague	CMEMS	lon 2117.0 (m)	lat 3088.0 (m)	1 h
Vitesse du vent	CMEMS	lon 17.0 (km)	lat 27.0 (km)	6h
Marée	COI (SHOM)	Le port le plus proche		5 min

V.1.4. Estimation par octave

La modélisation a été effectuée à la fréquence centrale f_m de chaque octave dans la bande d'émission des sources acoustiques. Pour obtenir des niveaux dans un octave, on suppose que l'énergie à la fréquence centrale est constante dans chaque octave.

Par conséquent, le niveau est donné par :

$$SPL_1 = SPL_{f_m} + 10 \cdot \log_{10} (f_2 - f_1)$$

où SPL_1 est le niveau de pression acoustique dans l'octave compris entre f_1 et f_2 tel que défini par les standards (American National Standards Institute, 2004) et (IEC61260, 1995), et SPL_{f_m} est le niveau de pression acoustique modélisé à la fréquence centrale f_m .

V.2. Cartographie statistique

Afin de prendre en compte la nature stochastique du bruit ambiant, les cartes sonores produites par la plateforme Quonops® sont réalisées selon toutes les combinaisons d'un ensemble de situations environnementales représentatives du site d'étude et de situations anthropiques représentatives des activités maritimes existantes au voisinage du site et générant du bruit. Une approche par la méthode de Monte Carlo² (Folegot, Thomas, 2013), (Guelton et al., 2014), (Sutton et al., 2013) permet ensuite de cartographier les statistiques des champs sonores instantanés établis chaque heure, et de décrire l'état sonore de l'aire d'étude en termes de probabilité de niveau acoustique et de distribution spatiale.

V.2.1. Sources de bruit

Le vent (indirectement les vagues) et les activités maritimes existantes sont des sources de bruit. La méthodologie de cartographie du bruit existant exploite :

- ✓ Les données de vent issues de Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS);
- ✓ Les données descriptives du trafic maritime issues de l'acquisition des données *Automated Identification System* (AIS). L'AIS est un système à bord des navires qui transmet à un réseau d'observation (par messages radio VHF et/ou satellites) leurs identifications et leurs localisations en quasi-temps-réel (International Maritime Organisation, 2004). Différentes stations réceptrices permettent ainsi de surveiller le trafic maritime. La couverture maximale peut atteindre 30 milles nautiques des côtes en fonction des conditions climatiques. Si l'équipement AIS est obligatoire pour la navigation commerciale,

² La méthode de Monte Carlo est une méthode numérique, qui utilise des tirages aléatoires pour réaliser le calcul d'une quantité déterministe. Largement utilisée dans les domaines de la finance, des sciences de la Terre et des sciences de la Vie.

la plaisance n'est pas concernée par cette réglementation, et les plaisanciers ne font pas tous le choix de s'équiper. Aussi, les navires non équipés d'un système d'identification et de localisation AIS ne sont pas pris en compte dans cette étude.

D'autres sources peuvent intervenir de manière marginale, par exemple le bruit induit par le déplacement sédimentaire, mais aucun modèle n'existe à ce jour permettant de prédire les niveaux sonores engendrés.

V.2.1.a. Source de bruit liée au vent

Les données de vent sur la période sont converties en niveau de bruit pour chaque fréquence grâce aux formules de conversion de Ainslie (Ainslie, 2010). Ce bruit est ajouté au bruit des activités maritimes préexistantes au voisinage de la zone projet. La Figure 20 illustre le niveau sonore induit par cette composante environnementale en fonction de sa vitesse et de la fréquence.

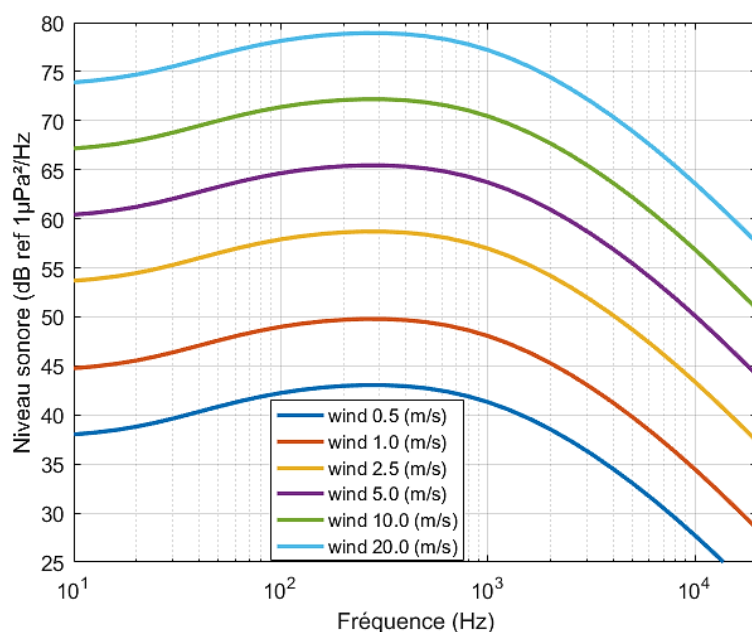


Figure 20 : Niveau sonore induit par le vent en fonction de la fréquence et de la vitesse.

V.2.1.b. Sources de bruit émises par les activités maritimes présentes dans la zone projet

La Figure 21 illustre la densité de trafic maritime de pêche (à gauche) et du trafic maritime commercial (cargos, à droite), issue du traitement des données AIS pour le mois de Mars 2023 (période synchrone avec la mesure de bruit in situ) et interpolées à la résolution de 1 minute. Ces données de trafic sont directement exploitées dans l'élaboration des cartes de bruit de l'état de référence (discrétisées à raison d'une situation de trafic par heure) grâce à la plateforme de modélisation du bruit sous-marin Quonops®.

La fréquentation à l'intérieur du parc est majoritairement liée aux navires de pêche. Les navires les plus bruyants (les cargos, index AIS 70-79 et les tankers, index AIS 80-89) naviguent quant à eux sur les rails dédiés au trafic commercial, situés relativement à l'Est, au Nord et au Sud de la zone du parc éolien : leur contribution acoustique, bien que non négligeable pour les niveaux de bruits médians et faibles, sera diminuée par la distance.

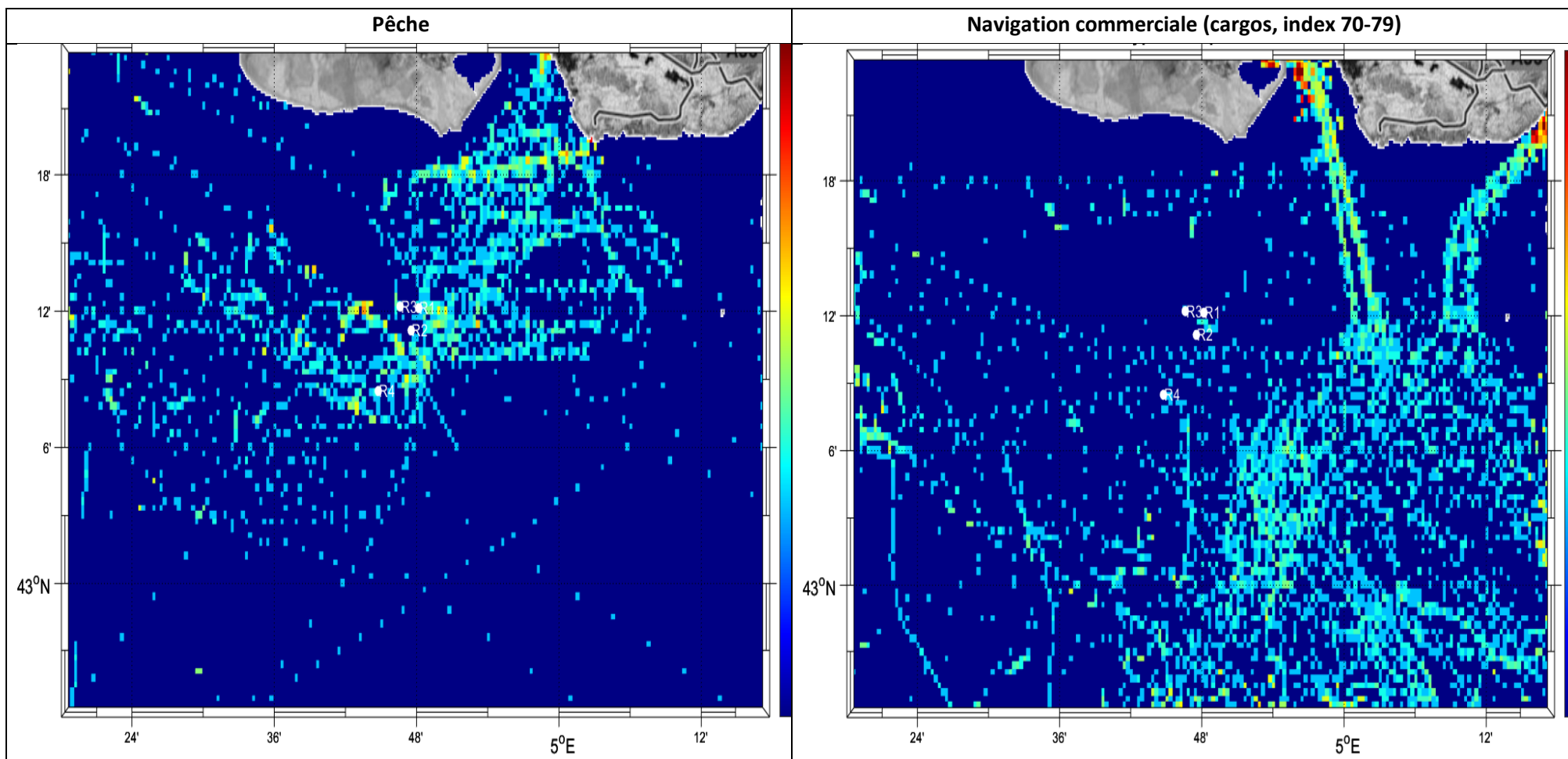


Figure 21 : Densité de trafic dans la zone au mois de Mars 2023.

Les bruits générés par le trafic maritime existant sont estimés selon le modèle de RANDI (Ross, 1976), et dépendent du type de navire, de leur vitesse instantanée et de leur longueur. Chaque navire fréquentant la zone est une source de bruit (à l'exception des voiliers, index AIS 36), dont la modélisation est réalisée grâce à des gabarits sonores moyens variant en fonction de la fréquence et des catégories de navires (exprimés en dB réf. $1\mu\text{Pa}/\text{VHz}$ @ 1m et précis avec un écart-type de 3dB pour rendre compte de la variabilité entre les navires). Une variété de niveaux émis est illustrée en fonction de la fréquence (Figure 22). Ces gabarits proviennent de la littérature (Wagstaff, 1973) (Breeding, 1996) (Macgillivray & de Jong, 2021), et sont corrigés en fonction de la vitesse et de la longueur des navires. La modélisation des cartes du bruit existant repose sur un ensemble de situations instantanées par saison.

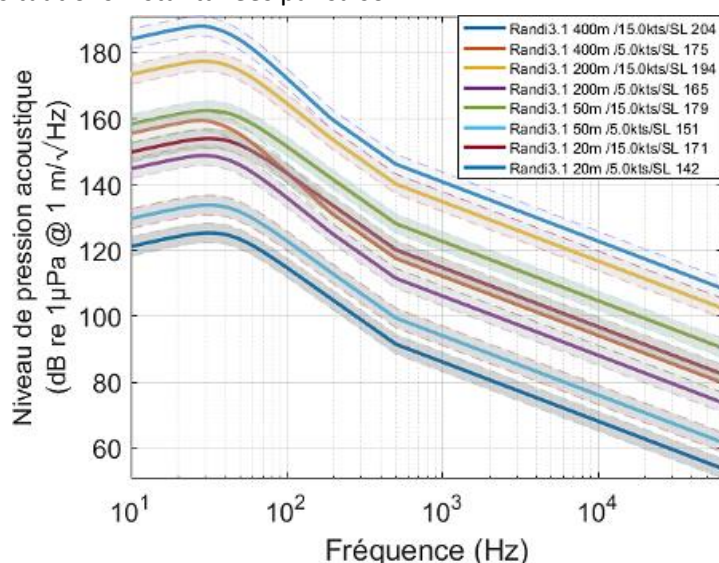


Figure 22 : Gabarit sonore des navires en fonction de la longueur, la vitesse et la fréquence

V.2.2. Calibration

À partir des données mesurées sur chaque zone, une comparaison des données modélisées avec les données mesurées est réalisée. Pour chaque bande fréquentielle entre 31Hz et 4kHz, des ajustements sont effectués quant aux bruits engendrés par le trafic maritime et le bruit induit par les composantes environnementales (vent, vagues). Ces valeurs d'ajustement spécifiques à chaque station sont ensuite utilisées lors de la cartographie calibrée du bruit existant, et permettent de pallier les incertitudes des modèles. A titre d'illustration, la Figure 23 compare la distribution statistique des niveaux sonores mesurés (en bleu) avec celle des niveaux sonores prédits et corrigés pour la station R1. Le Tableau 15 synthétise pour chaque station, l'erreur quadratique moyenne résiduelle (RMSE, exprimée en dB) entre le bruit modélisé et le bruit mesuré après calibration des ajustements. Le processus de calibration est conforme aux attentes pour les stations R1, R3 et R4 avec des erreurs moyennes de l'ordre de 1dB.

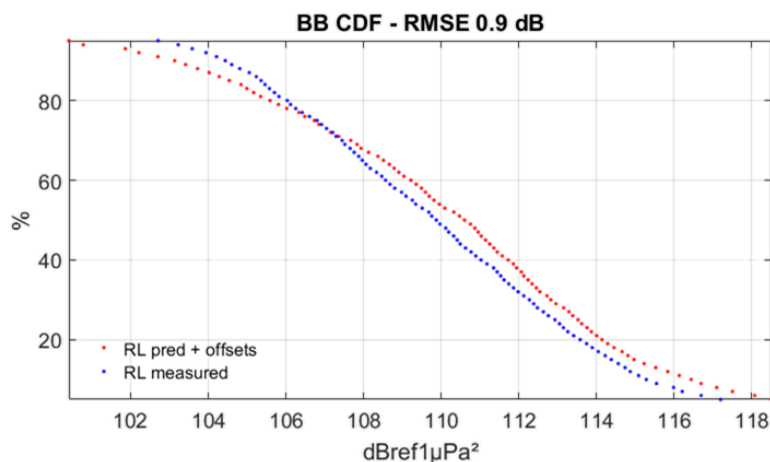


Figure 23 : Distribution des niveaux sonores (en rouge, courbe prédite, en bleu, donnée mesurée) à la station R1, à l'issue du processus de calibration.

Station	Erreur moyenne (RMSE) sur le bruit (dB)
R1	0.9
R3	1.0
R4	1.2

Tableau 15 : Erreur moyenne résiduelle sur le bruit intégré dans la bande [20Hz ; 40kHz] en sortie du processus de calibration, par station.

V.2.3. Cartographie du bruit existant

Le bruit ambiant existant est cartographié sous forme de statistique à l'aide des percentiles (95^{ème}, 90^{ème}, 75^{ème}, 50^{ème}, 25^{ème}, 10^{ème} et 5^{ème} percentiles). Le 50^{ème} percentile est la valeur médiane, ce qui signifie que les niveaux indiqués sur la carte sont atteints la moitié du temps. La cartographie est établie dans la zone définie par les coordonnées du Tableau 16.

La Figure 24 illustre la cartographie statistique du bruit dans la bande (20Hz-5.65kHz) calculée pour les mois de Mars et de Juillet 2023. La résolution cartographique est de 54m.

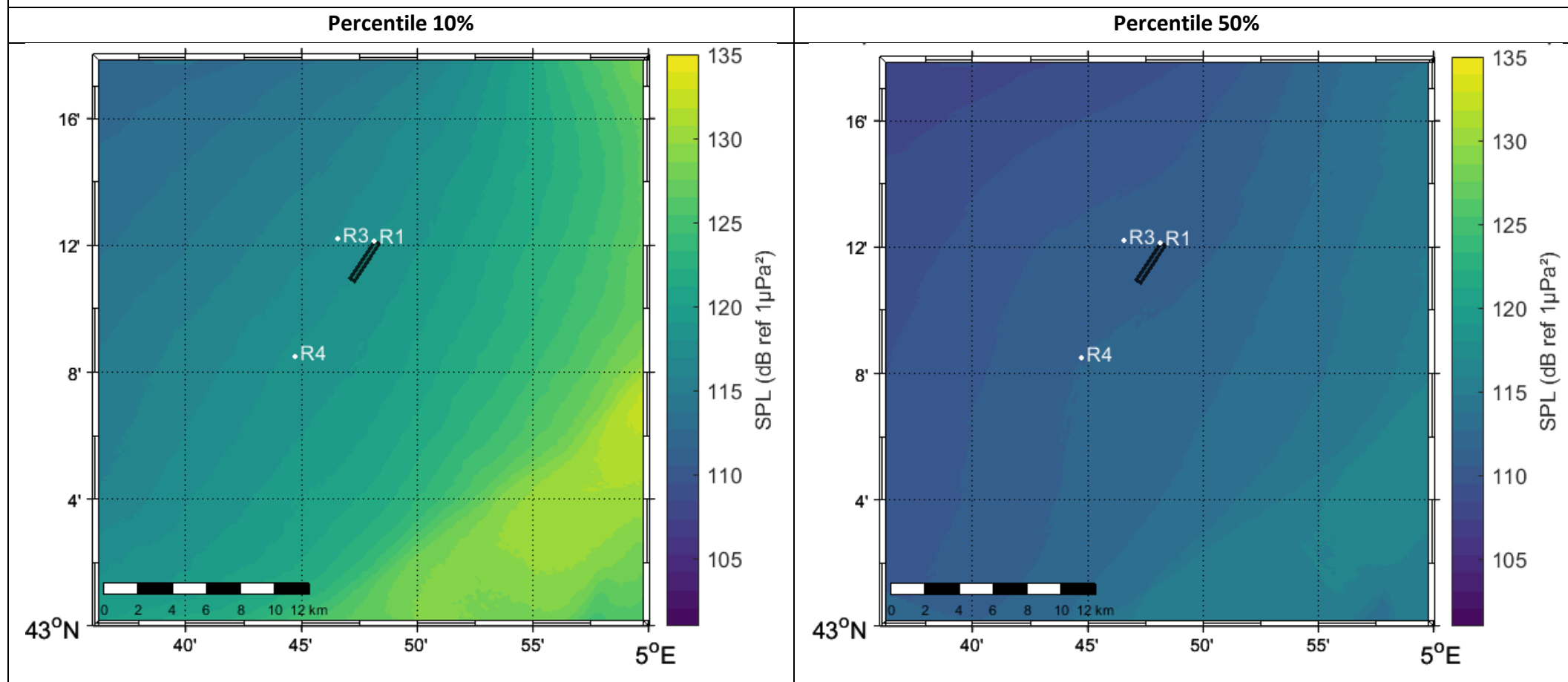
Les cartographies au percentile 10% (niveaux forts et rares) mettent en évidence la continuité du trafic commercial, avec une variation quasi nulle des émergences (vert clair) de bruit en entrée et en sortie du port de Fos-sur-Mer. Au percentile médian (50%), les cartes traduisent la relative homogénéité du bruit environnemental en fonction de la saison, et montrent l'influence permanente du trafic commercial à proximité de la zone du parc éolien, avec des niveaux de bruits médians valant environ 110dB au niveau des trois stations de mesures étudiées dans cette étude. Ces constats coïncident avec les conclusions du suivi du bruit ambiant par mesure acoustique.

L'ensemble des cartographies statistiques saisonnières et mensuelles est disponible pour les mois de Mars et Juillet 2023 disponible à la demande sur la plateforme QOS : <http://qos.quiet-oceans.com>.

Tableau 16 : Limites de la zone cartographiée



Cartographie statistique du bruit ambiant en Mars 2023



Cartographie statistique du bruit ambiant en Juillet 2023

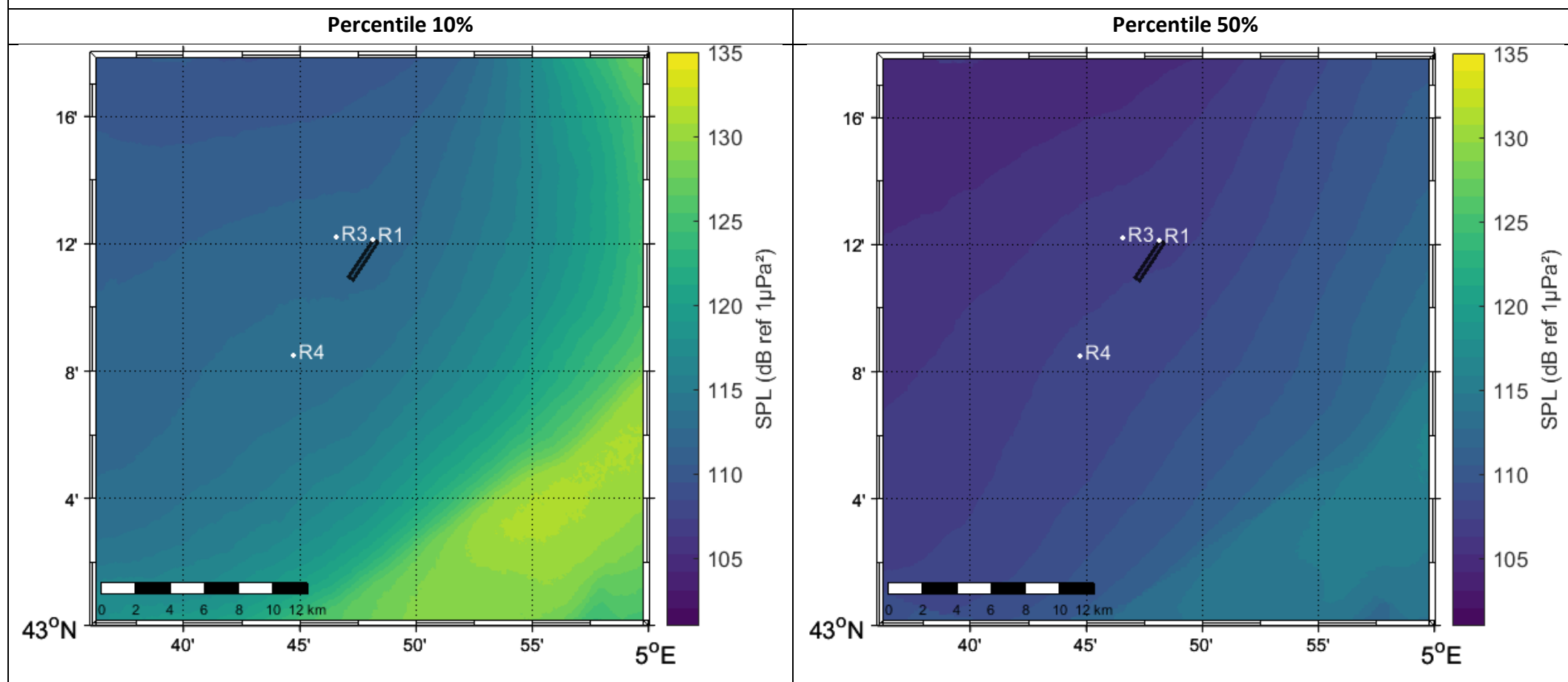


Figure 24 : Cartographie statistique du bruit (entre 20 Hz et 5.65 kHz) par mois, calculée aux percentiles 10% (à gauche) et 50% (à droite).

Chapitre VI. Détection des signaux biologiques

Une analyse bioacoustique de la donnée recueillie par les enregistreurs acoustiques a été réalisée afin de déterminer la fréquentation des mammifères marins couramment présents à proximité des zones d'études mais également de spécifier si possible le comportement des espèces identifiées.

VI.1. Connaissances biologiques

VI.1.1. Rappel sur la classification scientifique des espèces

La classification scientifique des espèces océaniques et marines de mammifères est répartie selon trois ordres : les Cétacés, les Pinnipèdes et les Siréniens (Figure 25).

L'ordre des Cétacés est divisé selon le sous-ordre des Mysticètes (cétacés à fanons) et le sous-ordre des Odontocètes (cétacés à dents). Chacun de ces sous-ordres comporte des familles dans lesquelles sont réparties les différentes espèces de mammifères marins :

- ✓ Sous-ordre des Mysticètes
 - Famille des Balénidés regroupant les espèces de Baleine franche ;
 - Famille des Balénoptéridés regroupant les espèces de Rorquals et la Baleine à bosse ;
 - Famille des Eschrichtiidés ne comportant qu'une seule espèce, la Baleine grise (*Eschrichtius robustus*) ;
- ✓ Sous-ordre des Odontocètes
 - Famille des Delphinidés regroupant les espèces de Dauphins, d'Orques et de Globicéphales ;
 - Famille des Kogiidés ne comportant que deux espèces, le Cachalot pygmé (*Kogia breviceps*) et le Cachalot nain (*Kogia simus*) ;
 - Famille des Monodontidés ne comportant que deux espèces, le Béluga (*Delphinapterus leucas*) et le Narval (*Monodon monoceros*) ;
 - Famille des Phocoenidés regroupant les espèces de Marsouins ;
 - Famille des Physétéridés ne comportant qu'une seule espèce, le Cachalot macrocéphale (*Physeter macrocephalus*) ;
 - Famille des Ziphiidés regroupant les espèces de Baleines à bec.

L'ordre des Pinnipèdes est composé de trois familles. La famille des Odobénidés dont la seule espèce caractéristique est le Morse (*Odobenus rosmarus*), la famille des Otariidés qui regroupe les espèces d'Otaries et le Lion de mer, et la famille des Phocidés qui regroupe les espèces de Phoque et l'éléphant de mer (*Mirounga sp.*).

L'ordre des Siréniens est divisé en deux familles de mammifères marins herbivores avec la famille des Trichéhidés qui regroupe les espèces de Lamantins et la famille des Dugongidés qui est représentée uniquement par le Dugong (*Dugong dugong*).

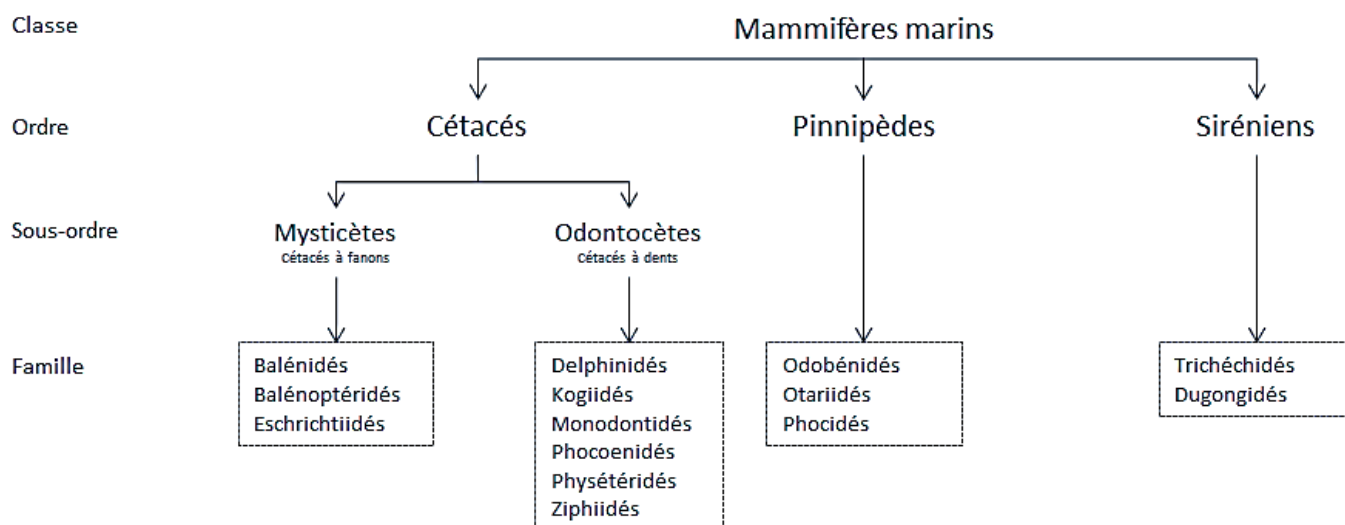


Figure 25 : Schéma de la classification scientifique des espèces océaniques et marines de mammifères. Source : Quiet-Oceans.

VI.1.2. Fréquentation a priori du site par les mammifères marins

Le Tableau 17 synthétise les informations recensées via des données bibliographiques concernant les mammifères marins susceptibles d'être rencontrés au large du golfe de Fos-sur-Mer, et à proximité des zones étudiées (cf. Figure 6). Pour plus d'informations, il est possible de consulter l'étude d'impact environnemental (PEOPGL (2017)).

Ce recensement permet de définir les familles de mammifères marins qui seront acoustiquement recherchées durant le traitement et l'analyse bioacoustique de la donnée collectée.

Le statut UICN de chaque espèce correspond aux codes d'évaluation des menaces qui renvoient aux Catégories de la Liste Rouge 2001 UICN et aux Critères version 3.1. Les espèces évaluées sont classifiées ainsi :

- ✓ DD = Données Insuffisantes (manque d'informations suffisantes sur les espèces et leur abondance) ;
- ✓ LC = Moins Concernée (l'espèce est largement répartie et abondante) ;
- ✓ NT = Non Menacée (l'espèce n'est pas menacée, mais le sera probablement dans un avenir proche) ;
- ✓ VU = Vulnérable (l'espèce présente un risque élevé d'extinction dans la nature sauvage) ;
- ✓ EN = En Danger (l'espèce affronte un risque très élevé d'extinction dans la nature) ;
- ✓ CR = En Danger Critique (risque extrêmement élevé d'extinction dans la nature).

Plus d'informations sur les catégories UICN sont consultables sur le site <http://www.redlist.org>.

Dans la zone d'étude, quatre espèces de mammifères marins susceptibles d'être présentes au large du golfe de Fos-sur-Mer sont référencées selon un risque fort selon les critères UICN : Globicéphale noir (*Globicephala melas*), Dauphin de Risso (*Grampus griseus*), Rorqual commun (*Balaenoptera physalus*) et Cachalot (*Physeter macrocephalus*).

Du point de vue acoustique, chaque espèce de mammifères marins est catégorisée en quatre classes définies par (Southall et al., 2019):

- ✓ Basses fréquences (acronyme LF) : 0.2 - 19 kHz ;
- ✓ Hautes fréquences (acronyme HF) : 8.8 - 110 kHz ;
- ✓ Très hautes fréquences (acronyme VHF) : 12-140 kHz ;
- ✓ Les pinnipèdes ont leur propre catégorie acoustique (acronyme PCW) : 1.9 -30 kHz.

Tableau 17 : Synthèse des données concernant les mammifères marins susceptibles d'être présents au large du golfe de Fos-sur-Mer et à proximité des zones d'étude. Source : Quiet-Oceans.

Famille	Espèce		Statut UICN en France	Catégorie acoustique
	Nom commun	Nom Latin		
Delphinidés	Grand Dauphin	<i>Tursiops truncatus</i>	LC	HF
	Dauphin commun	<i>Delphinus delphis</i>	LC	HF
	Dauphin bleu et blanc	<i>Stenella coeruleoalba</i>	LC	HF
	Globicéphale noir	<i>Globicephala melas</i>	VU	HF
	Dauphin de Risso	<i>Grampus griseus</i>	VU	HF
Balénoptéridés	Rorqual commun	<i>Balaenoptera physalus</i>	VU	LF
Physétéridés	Cachalot	<i>Physeter macrocephalus</i>	VU	HF



Figure 26 : Famille des Delphinidés – Grand dauphin (*Tursiops truncatus*). Source : EcoOcéan Institut.



Figure 27 : Famille des Delphinidés – Dauphin commun (*Delphinus delphis*). Source : NOAA.



Figure 28 : Famille des Balénoptéridés – Rorqual commun (*Balaenoptera physalus*). Source : MICS.



Figure 29 : Famille des Physétéridés – Cachalot (*Physeter macrocephalus*). Source : AMP.

VI.1.3. Signature acoustique des cétacés

Chaque famille de mammifères marins se caractérise par des émissions sonores, transitoires et/ou impulsives, qui dans le cadre d'un suivi par acoustique passive permettent l'identification des espèces ainsi qu'un suivi de la fréquentation du site par ces derniers.

VI.1.3.a. Sons émis par les Delphinidés

Les Delphinidés se caractérisent acoustiquement par des émissions de sifflements (signaux transitoires) et de clics (signaux impulsifs) représentés respectivement par la Figure 30 et la Figure 31.

Les sifflements, utilisés pour la communication entre les différents individus (but social), sont émis dans une bande fréquentielle allant généralement de 2 à 25 kHz. Chaque espèce de Delphinidés a sa propre gamme d'émissions caractéristique pour une grande diversité de sifflements émis (Tableau 18). Il est possible à partir des caractéristiques acoustiques de ces signaux, d'identifier les espèces de Delphinidés émettrices. Toutefois, la similarité de ces caractéristiques pour certaines espèces peut complexifier l'exercice de leur classification³.

Les clics émis dans la bande fréquentielle allant de 10 à 85 kHz servent également à la communication, tandis que ceux émis entre 10 et 180 kHz sont utilisés pour l'écholocalisation⁴. A noter que les ensembles de 100 à 1 000 clics par secondes sont nommés « buzz » et sont particulièrement émis durant les activités de chasse.

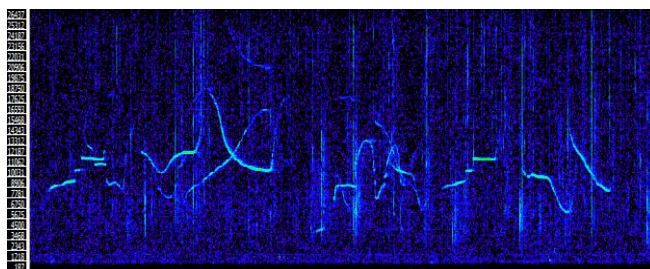


Figure 30 : Sifflements de Delphinidés émis entre 2 kHz et 25 kHz. Source : Quiet-Oceans.

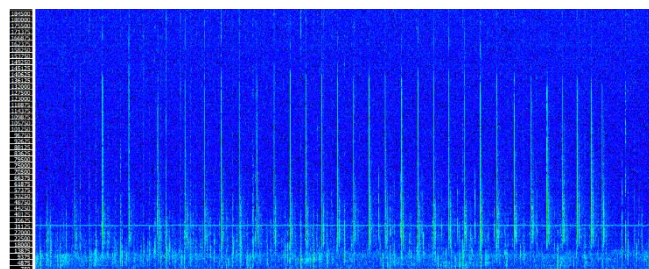
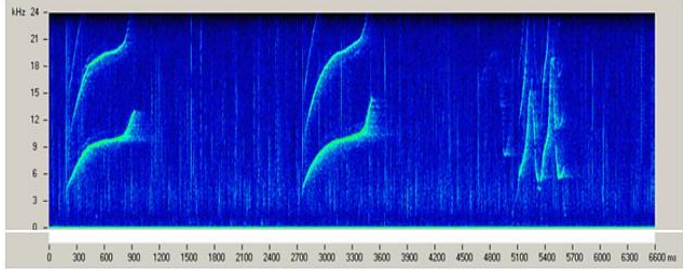
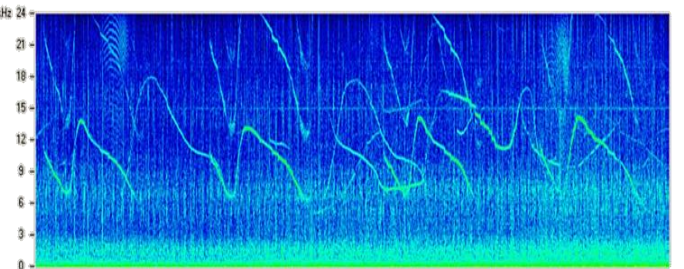
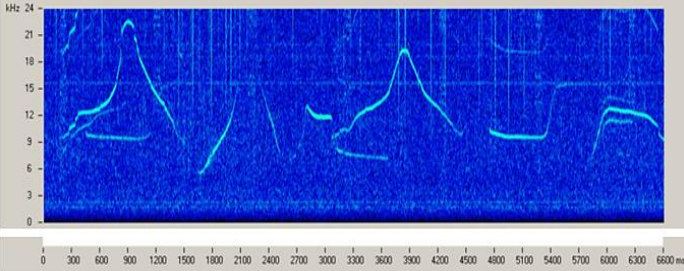
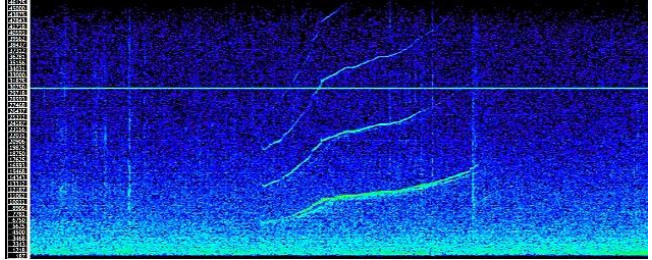
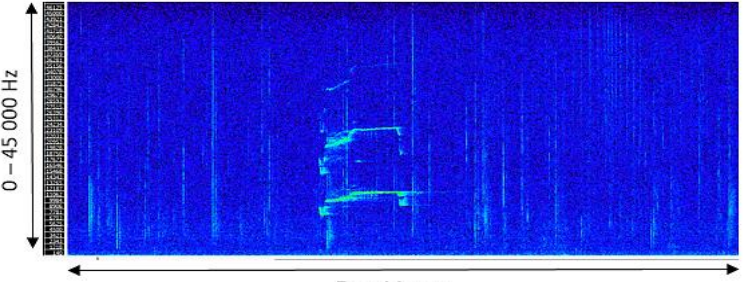


Figure 31 : Clics de Delphinidés émis entre 10 kHz et 180 kHz. Source : Quiet-Oceans.

³ La classification permet d'associer l'espèce animale correspondante à un signal biologique.

⁴ Evènement renseignant les Delphinidés sur le milieu dans lequel ils évoluent mais également indicateur d'une quête de nourriture.

Tableau 18 : Exemple de la diversité de sifflements émis par les Delphinidés avec le spectrogramme des émissions des espèces supposées présentes au large de Fos-sur-Mer.

Espèce	Bande de fréquence	Spectrogramme
Grand dauphin (<i>Tursiops truncatus</i>)	5 à 25 kHz	 http://www-3.unipv.it/cibra/edu_dolphins_uk.html
Dauphin bleu-et-blanc (<i>Stenella coeruleoalba</i>)	3.5 à 28.5 kHz	 http://www-3.unipv.it/cibra/edu_dolphins_uk.html
Dauphin commun (<i>Delphinus delphis</i>)	Variation géographique mais en moyenne entre 5 et 20 kHz	 http://www-3.unipv.it/cibra/edu_dolphins_uk.html
Globicéphale noir (<i>Globicephala melas</i>)	4.2 à 8.9 kHz	 Source : Quiet-Oceans
Dauphin de Risso (<i>Grampus griseus</i>)	4 à 22 kHz	 Env. 11 sec Source : Quiet-Oceans

VI.1.3.b. Sons émis par les Balénoptéridés

Le Rorqual commun (*Balaenoptera physalus*) se caractérise acoustiquement par l'émission de pulses en très basse fréquence, entre 15 Hz et 130 Hz. L'émission la plus connue est une impulsion à modulation de fréquence descendante (« down sweep ») qui a une durée moyenne d'environ 1 seconde et une fréquence fondamentale aux alentours de 20 Hz, ce qui lui vaut d'être communément connue sous le nom de « 20-Hz signal » (Figure 32). Ce signal est émis soit seul (Figure 33A), en doublet (Figure 33B) ou en triplet, et est associé à la cohésion sociale et la reproduction (Erbe et al., 2017; Samaran et al., 2009). Cette impulsion de 20 Hz est parfois associée à (1) l'émission d'un « short pulse », signal émis avec une durée similaire en plus haute fréquence aux alentours de 99 Hz et (2) un signal plus court et très peu modulé aux alentours de 15 Hz qui est nommé « backbeat » (Figure 7C, Garcia et al., 2020; Samaran et al., 2009). Le Rorqual commun émet également des impulsions à modulation de fréquence descendante entre 30 et 100 Hz et à modulation de fréquence ascendante entre 125 et 130 Hz qui sont respectivement connus sous le nom de « down sweep chirps » (Figure 33E) et « 130-Hz upsweep » (Figure 7D, Garcia et al., 2020).

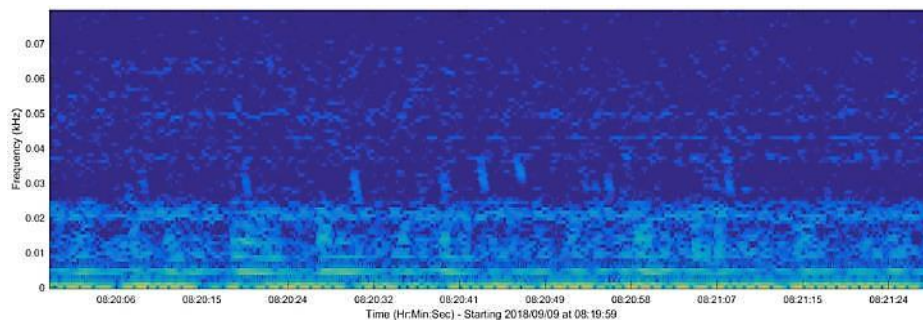


Figure 32 : Pulses (« down sweep ») émis par un Rorqual commun (*Balaenoptera physalus*) entre 20 et 40 Hz. Source : Quiet-Oceans, enregistrement recueilli le 09/09/2018 via un hydrophone positionné à 35m de profondeur en mer Méditerranée.

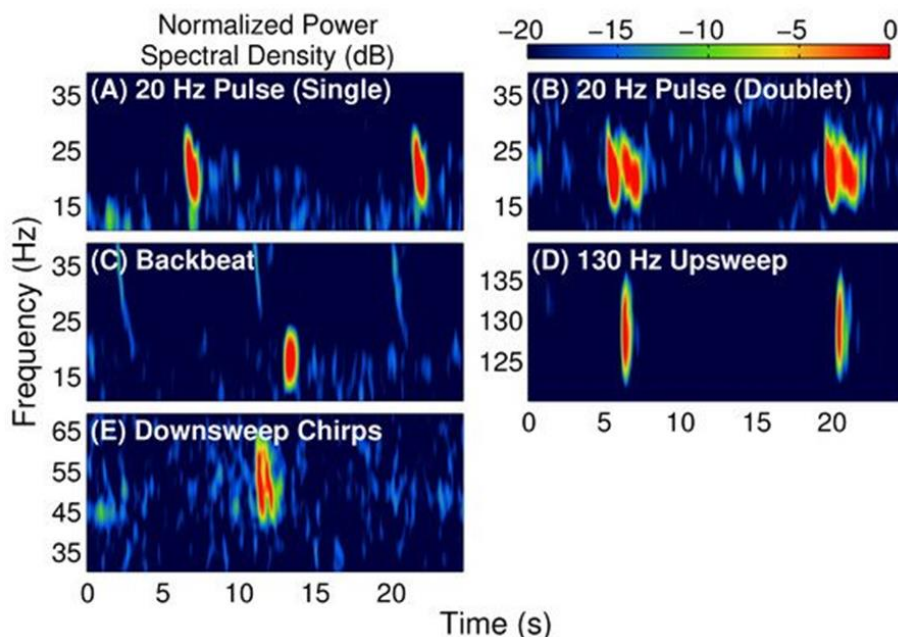


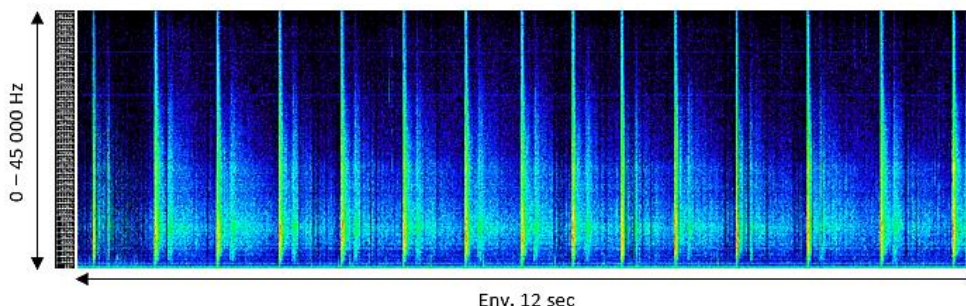
Figure 33 : Pulses émis par le Rorqual commun (*Balaenoptera physalus*).

(A) 20-Hz pulse (single), (B) 20-Hz pulse (doublet), (C) backbeat, (D) 130-Hz upsweep, (E) down sweep chirp. Source : (Garcia et al., 2020).

VI.1.3.c. Sons émis par les Physétéridés

La famille des Physétéridés est représentée par une seule espèce de mammifère marin : le Cachalot macrocéphale (*Physeter macrocephalus*). Ce dernier émet exclusivement des clics, hautement directionnels, dans une gamme de fréquence allant de 2 à 30 kHz et d'une durée moyenne de 20 ms (Figure 34) (Erbe et al., 2017).

Figure 34 : Clics de Cachalot macrocéphale (*Physeter macrocephalus*) entre 2 et 30 kHz. Source : Quiet-Oceans.



VI.2. Portée de détection des enregistreurs acoustiques

Comme énoncé dans les paragraphes précédents, le recensement des espèces susceptibles d'être présentes sur zone renseigne sur le caractère commun ou occasionnel de ces dernières au large du golfe de Fos-sur-Mer. Dans ce contexte, il est possible d'estimer la distance de détection pour deux espèces en particulier grâce à la disponibilité des caractéristiques de leur émissions acoustiques (sifflements) dans la littérature (Richardson et al., 2013):

- ✓ Le Grand dauphin (*Tursiops truncatus*) émet des sifflements à des niveaux sonores compris entre 125 et 173 dB ref. 1µPa @1m dans la bande de fréquence [800 Hz - 24 kHz] ;
- ✓ Le Dauphin bleu et blanc (*Stenella coeruleoalba*) émet des sifflements à des niveaux sonores de l'ordre de 130 dB ref. 1µPa @1m dans la bande de fréquence [6 kHz - 24 kHz].

Les connaissances sur les caractéristiques acoustiques concernant le Dauphin commun (*Delphinus delphis*) ne sont, à ce jour, pas suffisamment fines pour estimer avec certitude la portée de détection pour cette espèce. Toutefois, les émissions de sifflements par les Dauphins communs se rapprochent en intensité et en bande de fréquence de celles du Grand Dauphin (*Tursiops truncatus*). En première approximation, les portées de détection de cette espèce peuvent donc être extrapolées à celles du Dauphin commun.

Le calcul des portées de détection quant aux émissions de signaux impulsifs (clics) par les mammifères marins ne peut être réalisé faute d'informations suffisantes sur leurs caractéristiques acoustiques. Toutefois, la littérature renseigne sur la portée de détection des clics de Cachalots (*Physeter macrocephalus*). Ces derniers émettent des clics hautement directionnels, entre 2 et 30 kHz, qui sont généralement audibles dans un rayon de 8 à 40 km autour de l'enregistreur acoustique (Todd et al., 2015).

La portée acoustique de détection des individus est fonction du bruit ambiant instantané, des caractéristiques acoustiques d'émission des espèces et des conditions de propagation des signaux des espèces autour de l'hydrophone. En effet, plus le bruit environnant est élevé, plus il est difficile de capter le son d'un animal lointain. De même, plus l'espèce émet un son fort, plus il sera possible de capter ses sons à de grandes distances. Enfin, plus les sons des mammifères marins sont absorbés par le milieu marin, plus il sera difficile de capter un son lointain. La connaissance de ces paramètres permet donc d'estimer les portées de détection théoriques pour chacune des espèces étudiées. Ces paramètres sont calculés (1) à partir du bruit ambiant mesuré par les enregistreurs acoustiques et (2) par modélisation des signaux des espèces recensées pour différentes situations environnementales représentatives de la période de mesure. Le calcul du rapport signal (des espèces) sur bruit (ambiant) permet alors d'évaluer les distances de détection.

Les Tableau 19 et Tableau 20 synthétisent respectivement les statistiques des distances de détection théoriques pour les espèces de Delphinidés potentiellement présentes au large de Fos-sur-Mer aux périodes hivernale et estivale 2023. Les portées de détection sont fournies pour différentes proportions de temps (95%, 50%, etc...) et pour chaque zone d'étude équipée d'un enregistreur acoustique, soit pour les stations R1, R3 et R4. Les résultats obtenus mettent en évidence une différence significative de portée de détection médiane (50% du temps) entre les différentes espèces de Delphinidés. Cette différence peut être expliquée d'une part, par l'écart entre les niveaux d'émission de chaque espèce et d'autre part, par l'intensité du bruit existant dans la bande de fréquence spécifique du signal bioacoustique de l'espèce considérée. En particulier, le Dauphin bleu-et-blanc, dont les sifflements sont émis à un niveau sonore plus faible que celui du Grand Dauphin, montre une portée de détection beaucoup plus faible (environ 300m).

Tableau 19 : Synthèse des portées de détection pour chaque zone d'étude en fonction de certaines espèces de mammifères marins potentiellement présentes à proximité des zones d'études durant l'hiver 2023.

Famille	Espèce	Zone	Portée de détection (m)				
			Proportion du temps (%)				
			95	75	50	25	5
Delphinidés	Grand dauphin <i>Tursiops truncatus</i>	R1	819	1364	1741	2169	2876
		R3	626	1281	1644	2002	2627
		R4	829	1375	1767	2160	2847
	Dauphin bleu-et-blanc <i>Stenella coeruleoalba</i>	R1	244	298	339	389	459
		R3	213	264	303	355	428
		R4	230	279	320	369	437

Tableau 20 : Synthèse des portées de détection pour chaque zone d'étude en fonction de certaines espèces de mammifères marins potentiellement présentes à proximité des zones d'études durant l'été 2023.

Famille	Espèce	Zone	Portée de détection (m)				
			Proportion du temps (%)				
			95	75	50	25	5
Delphinidés	Grand dauphin <i>Tursiops truncatus</i>	R1	1272	1668	1964	2374	3114
		R3	1371	1753	2076	2554	3186
		R4	1154	1564	1879	2352	2972
	Dauphin bleu-et-blanc <i>Stenella coeruleoalba</i>	R1	181	231	323	368	421
		R3	178	227	324	365	415
		R4	162	203	304	340	386

VI.3. Procédé de traitement bioacoustique

La Figure 35 illustre la procédure générale appliquée à la donnée brute pour le traitement bioacoustique des enregistrements sonores. Ce traitement bioacoustique consiste à détecter les signaux biologiques dans les données audio brutes (au format FLAC) à l'aide d'un logiciel dédié, puis à réaliser le contrôle et l'analyse des résultats obtenus via une validation manuelle des événements sonores détectés.

A noter, chaque enregistreur permet la détection des signatures acoustiques des mammifères marins dans un périmètre plus ou moins étendu en fonction de l'espèce autour du capteur (cf. VI.2.). Toutefois, étant donnée le dispositif de mesure équipé d'un seul hydrophone, il n'est pas possible de localiser l'espèce détectée. De plus, étant donné le plan d'échantillonnage des capteurs déployés (plusieurs kilomètres entre les points de mesure) et les propriétés de chaque capteur (absence de synchronisation pps), aucune méthode de triangulation n'est applicable pour localiser un mammifère marin acoustiquement détecté.

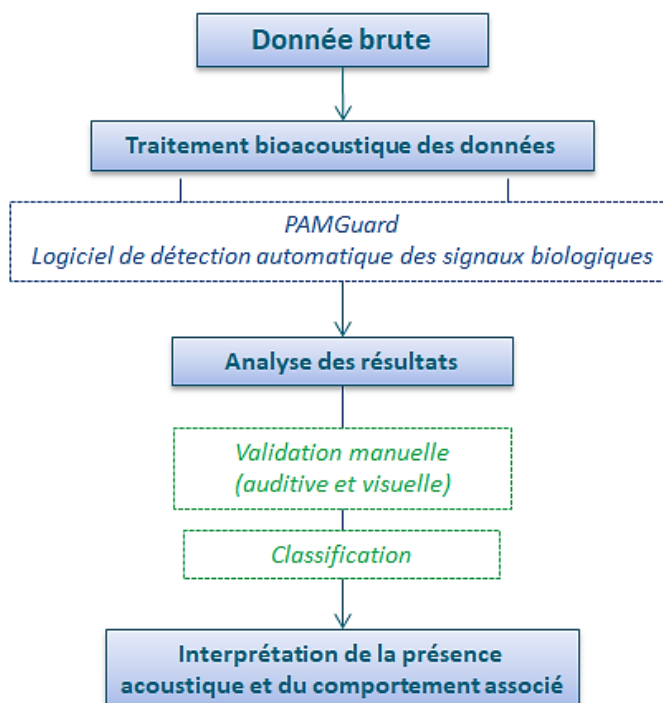


Figure 35 : Procédure générale appliquée à la donnée brute pour le traitement bioacoustique des enregistrements sonores.

VI.3.1. Algorithmes de détection et d'identification des événements sonores

La détection automatique des signaux biologiques dans les enregistrements sonores a été réalisée par le logiciel PAMGuard développé par le laboratoire *Sea Mammal Research Unit* (SMRU) de l'Université de Saint-Andrews en Ecosse. Il s'agit d'un logiciel libre d'utilisation qui a été développé dans le but de fournir une interface universelle pour la détection, la classification et la localisation des signaux émis par les mammifères marins. Bien qu'ayant une portée biologique, un détecteur tel que celui proposé par PAMGuard appuie sa recherche sur des signaux physiques, spécifiques au type de signal à détecter.

VI.3.1.a. Détection des signaux biologiques transitoires

Dans le cadre de cette étude, deux détecteurs de signaux transitoires ont été créés et calibrés afin de permettre la détection de signaux d'origine biologique de type « sifflement » émis par les Delphinidés et de type « pulse » émis par les Balénoptéridés. Les algorithmes permettent la détection d'une part de signaux transitoires allant de 2 kHz à 20 kHz, bande fréquentielle couvrant les différentes variétés d'émissions de sifflements par les Delphinidés, et d'autre part de signaux de type « pulses » inférieurs à 100 Hz émis par les Balénoptéridés.

VI.3.1.b. Détection des signaux biologiques impulsifs

La détection automatique des signaux impulsifs se base sur l'émergence de leur énergie sonore dans la bande d'émission préférentielle de chaque famille de mammifères marins. Deux détecteurs spécifiques ont donc été créés et calibrés afin d'obtenir une détection optimale des signaux de type « clics » émis par les Delphinidés entre 25 et 85 kHz, et les Cachalots entre 2 et 30 kHz.

VI.3.2. Validation des évènements sonores

Afin de mesurer la justesse et la cohérence des résultats issus des algorithmes de détection automatique, une validation manuelle (visuelle et auditive) a été réalisée par l'experte bioacoustique de Quiet-Oceans. Cette validation permet d'une part de qualifier l'ensemble des résultats de la détection automatique et d'autre part d'analyser finement le comportement des espèces détectées.

Cette validation est complétée par la réalisation d'une classification. Cette classification, ou reconnaissance taxonomique, fait intervenir des critères portant sur la gamme fréquentielle (fréquence de début et de fin des signaux, fréquences minimum et maximum, etc...) et la durée des vocalises, ainsi que sur le nombre de points d'inflexion et d'harmoniques permettant d'identifier le cétacé à l'origine des émissions transitoires.

VI.4. Résultats

La fréquentation de chaque zone par les mammifères marins a été établie pour chacune des périodes (hivernale et estivale) dont les durées d'étude sont de 15 jours. En bioacoustique, cette courte durée d'étude (15 jours) rend difficile l'établissement de la fréquentation d'un site et a encouragé une adaptation des indicateurs de présence présentés dans le Tableau 21, habituellement utilisés dans le cadre de projet avec une durée d'étude équivalente à un mois à minima. Ces indicateurs permettent de caractériser le type de fréquentation aux alentours des zones d'études.

Tableau 21 : Définition des indicateurs de la fréquentation par les mammifères marins adaptés à la durée d'acquisition.

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	40 à 70%
Occasionnelle	Périodes de détections irrégulières dans le temps	10 à 40%
Exceptionnelle	Une ou deux périodes de détections sur la période d'étude	< 10%
Absence	Absence de détection	0 %

VI.4.1. Campagne hiver 2023 (06/03/2023 au 21/03/2023)

Durant cette campagne, le déploiement d'un enregistreur acoustique a été réalisé au niveau de chacune des stations permanentes du projet (R1, R3 et R4) du 06 au 30 mars 2023. Conformément au protocole, l'analyse des données pour chaque station a été réalisée sur une durée d'environ 16 jours soit du 06 au 21 mars 2023.

VI.4.1.a. Fréquentation du site par les mammifères marins

i. Famille des Delphinidés

La Figure 36 représente les périodes de présence acoustique des Delphinidés (détections des clics et sifflements) dans la donnée recueillie par les enregistreurs acoustiques au niveau de chaque station (R1, R3 et R4) pour la période du 06 au 21 mars 2023 (période hivernale).

Suite à la vérification manuelle des détections automatiques réalisées par le logiciel PAMGuard, il apparaît que les Delphinidés sont régulièrement présents au niveau de la station R1, située au nord de la zone de concession du parc, avec un taux de présence acoustique proche de 69%. En effet, 29 périodes de détections de clics et sifflements ont été observés sur 11 jours pour un total de 16 jours d'enregistrement.

De manière générale, la détection des signatures acoustiques des Delphinidés a été réalisée en période nocturne à hauteur de 65.5% avec une différenciation au niveau des détections de sifflements qui ont été détectés aussi bien de jour comme de nuit.

La présence majoritaire de sifflements observés dans les enregistrements, avec la présence de cris pulsés, permet de supposer un comportement associé à la socialisation/communication. En effet, les cris pulsés jouent un rôle dans les interactions sociales et expriment une communication intense (Figure 37). Ce résultat est renforcé par la présence de clics de communication dont la fréquence d'émission est inférieure à 80 kHz.

Au niveau de la station R3, point de contrôle située à 1 500 m de la zone du parc éolien, la présence acoustique des Delphinidés est quotidienne avec un taux de présence acoustique de 75% sur l'ensemble de la période d'étude. En effet, 35 périodes de détections de clics et sifflements ont été observées sur 12 jours pour un total de 16 jours d'enregistrement. Le nombre de passage quotidien des Delphinidés sur ces 12 jours est d'environ 2 (± 2) passages par jour.

De manière générale, la détection des signatures acoustiques des Delphinidés a été réalisée en période diurne à hauteur de 60%. Le comportement des Delphinidés sur site est associé principalement à des interactions sociales avec la présence majoritaire de sifflements mais également la présence de quelques clics dont la fréquence d'émission est inférieure à 80 kHz. L'observation de clics d'écholocation dans la donnée supposent un sondage de l'environnement dans lequel les cétacés évoluent (Figure 38).

Au niveau de la station R4, point de contrôle situé à 6 500 m de la zone du parc éolien, les Delphinidés sont régulièrement présents avec un taux de présence acoustique de 50% sur l'ensemble de la période d'étude. Un total de 30 périodes de détections de clics et sifflements a été observée sur 8 jours pour un total de 16 jours de mesure. Sur ces 8 jours de présence acoustique, il est possible de noter en moyenne 1 (± 3) passages par jour de Delphinidés à proximité de la zone.

De manière générale, la détection des signatures acoustiques des Delphinidés a été réalisée en période nocturne à hauteur de 70%. A noter que l'ensemble des détections de clics émis par les Delphinidés a été réalisé de nuit, période propice aux activités de chasse. Cependant, seul un épisode de chasse a été observé le 16 mars 2023 vers 20h02 UTC (Figure 39) :

- ✓ Détections de « buzzs » ;
- ✓ Détections de nombreux clics d'écholocation entre 15 et 192 kHz ;
- ✓ Un ICI variable (plus ou moins court) pour chaque train de clics détectés.

Cet épisode de chasse est considéré opportuniste. Le comportement des Delphinidés est principalement associé à la socialisation/communication entre individus via la présence des sifflements. La présence significative de cris pulsés sur certaines journées évoque une activité intense sur site (Figure 40).

Au niveau de chacune des stations, il apparaît que la plupart des signatures acoustiques détectées sont émises en faible densité et avec une faible intensité évoquant un probable passage des Delphinidés au large des zones d'études. Cette hypothèse est principalement associée aux émissions de sifflements par les Delphinidés qui représentent la majorité des détections réalisées dans la donnée recueillie.

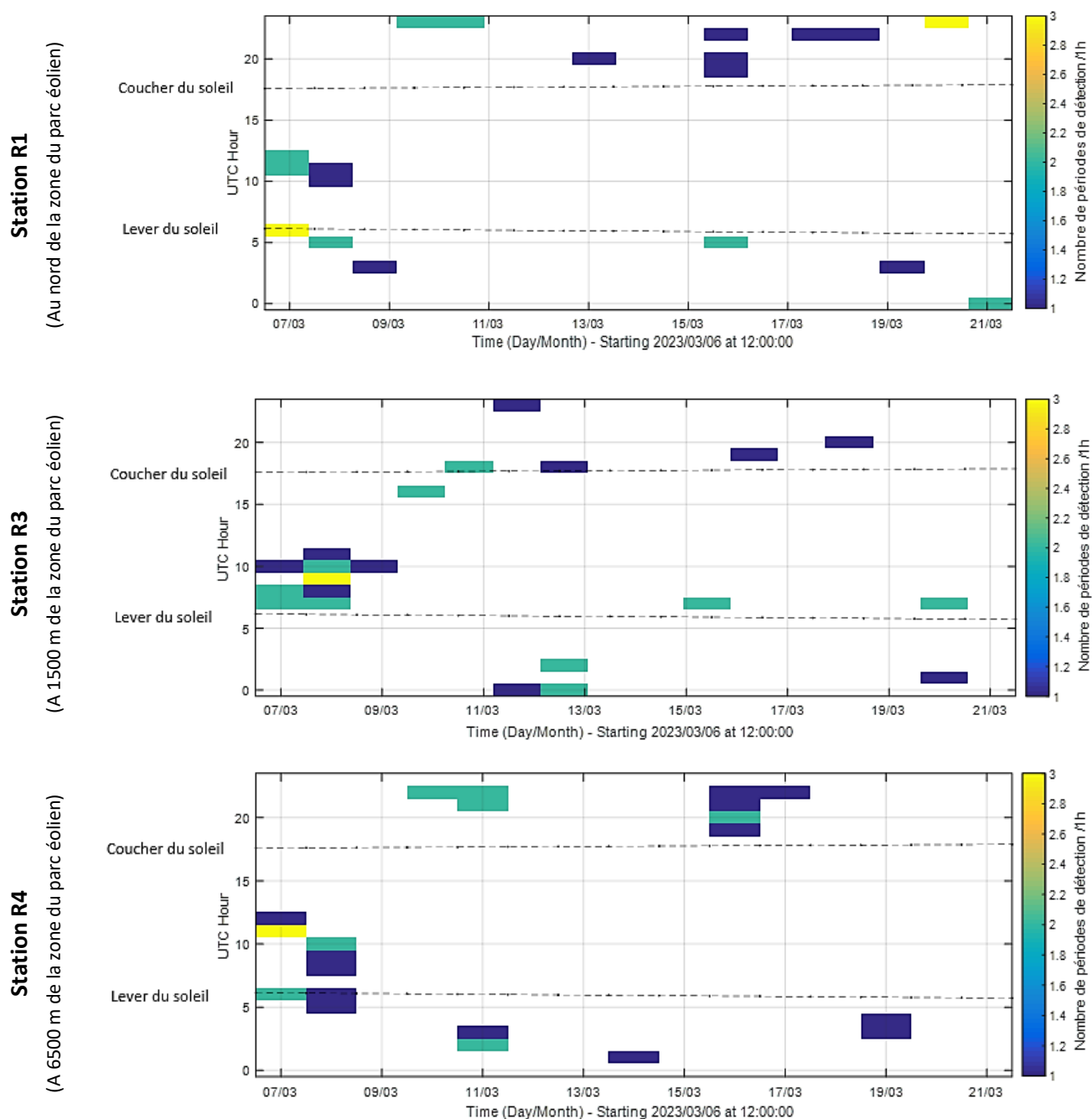


Figure 36 : Périodes de détections des clics et sifflements de Delphinidés en fonction du jour et de la nuit au niveau de chaque station (R1, R3 et R4) entre le 06 et 21 mars 2023.

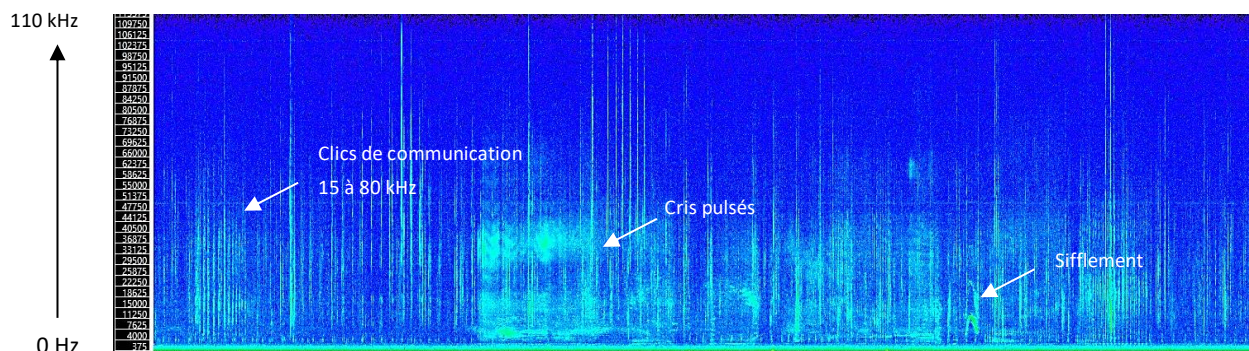


Figure 37 : Trains de clics de communication et cris pulsés émis par les Delphinidés entre 3 et 85 kHz, à proximité de la station R1, suggérant un épisode de communication intense entre individus. Enregistrement du 10/03/2023 vers 23h16 UTC.

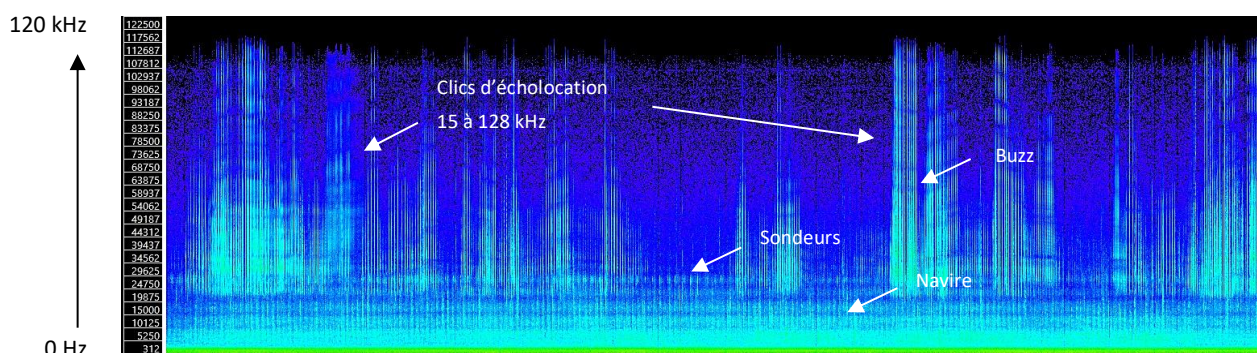


Figure 38 : Trains de clics d'écholocation et buzz émis par les Delphinidés entre 15 et 128 kHz à proximité de la station R3. Enregistrement du 15/03/2023 vers 06h19 UTC.

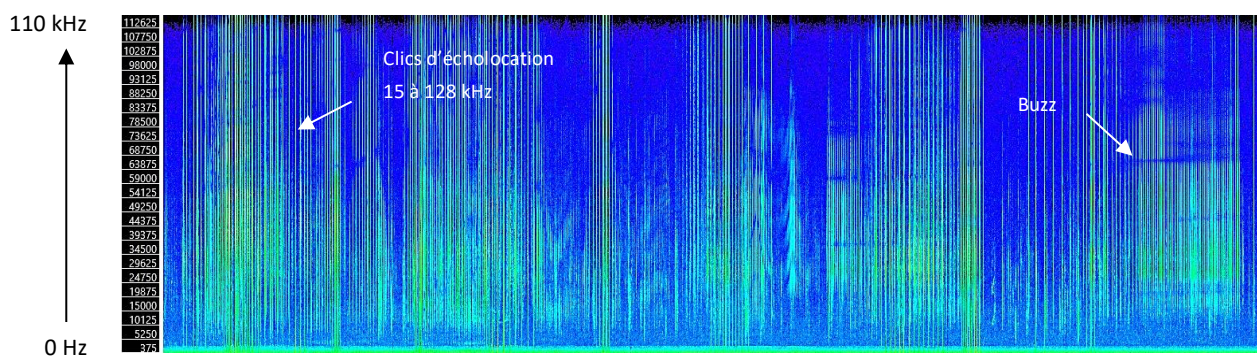


Figure 39 : Episode de chasse opportuniste observé lors de l'analyse bioacoustique des résultats concernant les Delphinidés à proximité de la station R4. Enregistrement du 16/03/2023 vers 20h02 UTC.

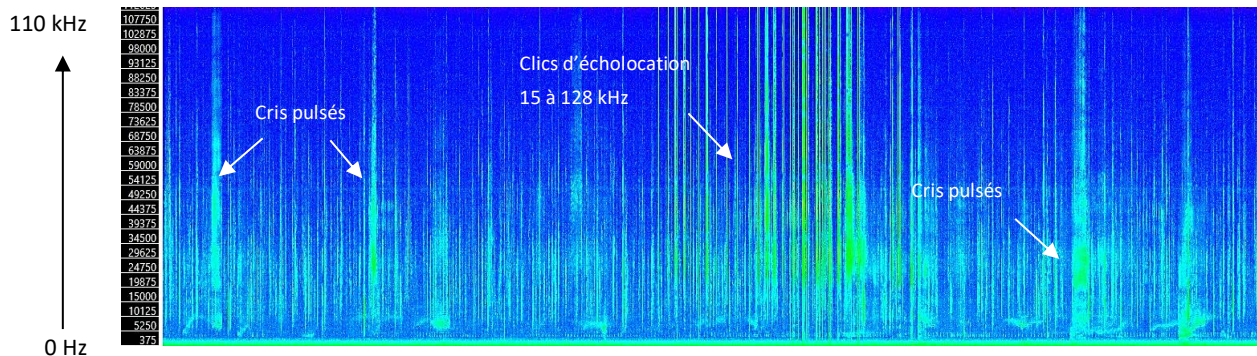


Figure 40 : Présence significative de cris pulsés émis par les Delphinidés évoquant une activité intense à proximité de la station R4. Enregistrement du 10/03/2023 vers 22h58 UTC.

ii. Famille des Balénoptéridés

La Figure 41 représente les périodes de détections des signaux acoustiques basses fréquences émis par les Rorquals communs (*Balaenoptera Physalus*) dans la donnée recueillie par les enregistreurs acoustiques au niveau de chaque station (R1, R3 et R4) pour la période du 06 au 21 mars 2023. Il apparaît que la présence du Rorqual commun est occasionnelle au niveau de chacune des stations de mesure avec un taux de présence acoustique respectif de :

- ✓ 13% au niveau de la station R1 (au nord de la zone du parc éolien), avec 6 périodes de détections d'impulsions basses fréquences observées sur 2 jours pour un total de 16 jours de mesure ;
- ✓ 25% au niveau de la station R3 (à 1 500 m de la zone du parc éolien), avec 5 périodes de détections d'impulsions basses fréquences observées sur 4 jours pour un total de 16 jours de mesure ;
- ✓ 13% au niveau de la station R4 (à 6 500 m de la zone du parc éolien), avec 5 périodes de détections d'impulsions basses fréquences observées sur 2 jours pour un total de 16 jours de mesure.

Au niveau des stations R1 et R4, la détection des impulsions basses fréquences a été réalisé uniquement en période nocturne et se concentrent principalement sur la journée du 10 mars 2023 entre 18h30 UTC et 20h10 UTC. Les signatures acoustiques détectées sur cette journée correspondent à des impulsions de 20 Hz (pulses ou « 20-Hz signal », cf. VI.1.3.b.) émis en doublet (Figure 42 et Figure 43). Ces pulses sont associés à une fonction sociale et seraient émis par les Rorquals communs (1) lors d'un déplacement en groupe afin de maintenir la cohésion sociale et/ou (2) uniquement par les mâles pendant la saison de reproduction connue de l'espèce c'est-à-dire durant l'hiver (Romagosa et al., 2021; Širović et al., 2013). Une analyse approfondie des caractéristiques d'émissions de ces signaux (émissions à intervalle régulier ou irrégulier par exemple) lié à la biologie de l'espèce permettrait d'appuyer l'une ou l'autre de ces hypothèses (1 ou 2) quant à l'utilisation du site par ce mammifère marin.

Au niveau de la station R3, la grande majorité des détections a été réalisé durant la période nocturne à hauteur de 80% et correspond également à des pulses dit « 20-Hz signal ». Toutefois, quelques détections observées sur la journée du 15 mars 2023 vers 04h00 UTC (Figure 44) sont associés à des pulses de fréquence descendante émis entre 30 Hz et 100 Hz. Ce type de signal, autrement appelé « 40-Hz signal » ou « downsweep chirp », fait référence à un comportement associé à l'alimentation (Romagosa et al., 2021).

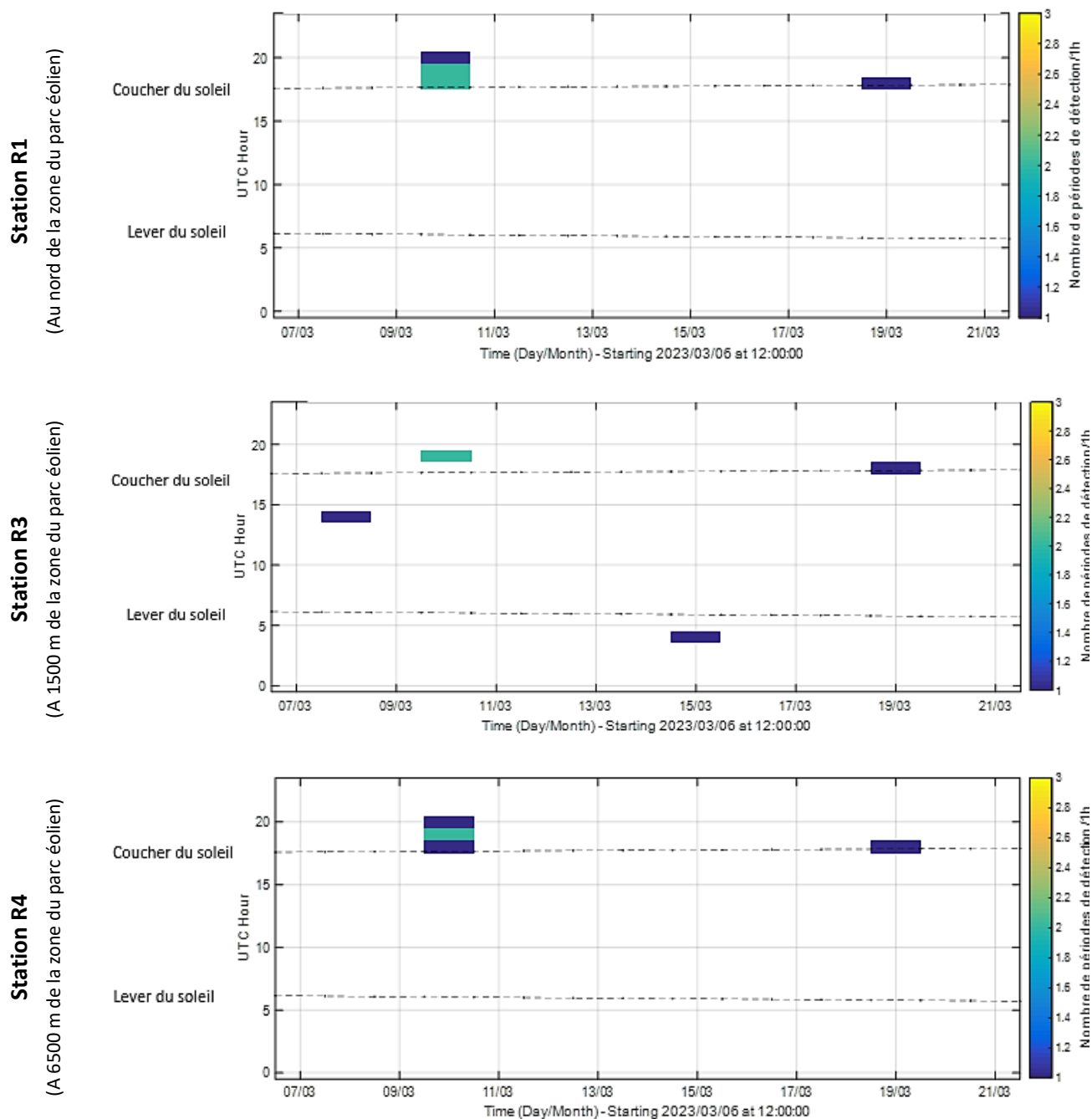


Figure 41 : Périodes de détections des pulses émis par les Rorquals communs (*Balaenoptera physalus*) en fonction du jour et de la nuit au niveau de chaque station (R1, R3 et R4) entre le 06 et 21 mars 2023.

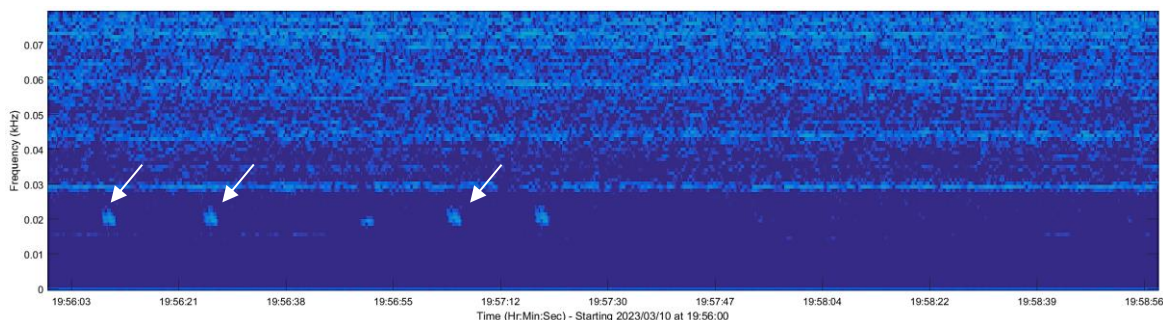


Figure 42 : Pulses émis en doublet par un Rorqual commun, *Balaenoptera physalus*, entre 27 Hz et 17 Hz (« 20-Hz signal ») à proximité de la station R1. Enregistrement du 10/03/2023 vers 19h56 UTC.

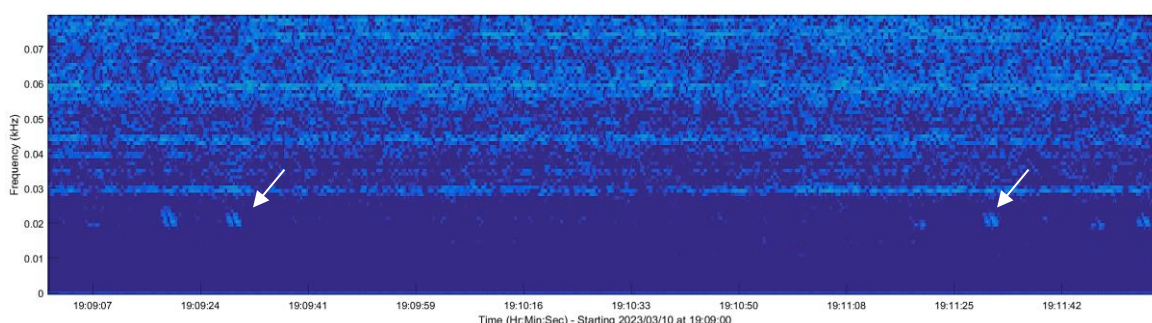


Figure 43 : Pulses émis en doublet par un Rorqual commun, *Balaenoptera physalus*, entre 27 Hz et 17 Hz (« 20-Hz signal ») à proximité de la station R4. Enregistrement du 10/03/2023 vers 19h09 UTC.

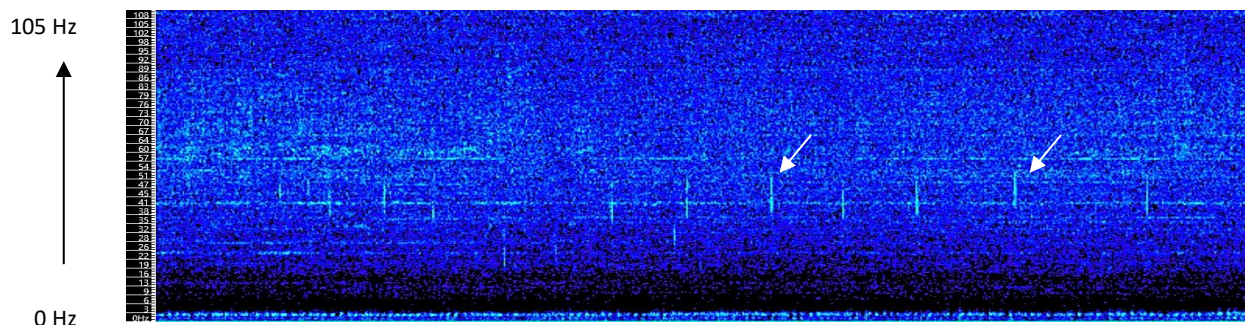


Figure 44 : Pulses émis par le Rorqual commun, *Balaenoptera physalus*, entre 55Hz et 38 Hz (« downsweep chirp ») à proximité de la station R3. Enregistrement du 15/03/2023 vers 04h00 UTC.

iii. Famille des Physétéridés

Le Cachalot, *Physeter macrocephalus*, est considéré acoustiquement absent entre le 06 et 21 mars 2023 au niveau de chacune des stations (R1, R3 et R4). En effet, aucun signal acoustique associé à la présence de Cachalots sur site (clics hautement directionnels émis entre 2 et 30 kHz) n'a été détecté sur la totalité de la période.

VI.4.1.b. Comportements observés

Sur la période allant du 06 au 21 mars 2023, l'analyse des enregistrements qui contiennent des contacts acoustiques de Delphinidés indiquent de manière générale des comportements de socialisation par la présence majoritaire de sifflements entre 2 et 25 kHz, et de quelques clics entre 15 et 80 kHz. Toutefois, une analyse détaillée de l'ensemble des contacts acoustiques a permis de mettre en évidence le caractère écholocatif de certains clics associés à des buzzs (cf. Figure 38, VI.4.1.a. i) indiquant un comportement de sondage de l'environnement dans lequel les cétacés évoluent. Seul un épisode de chasse opportuniste a été relevé sur l'ensemble de la période d'étude, à proximité de la station R4 (point de contrôle située à 6 500 m de la zone du parc éolien). A noter, la faible densité et intensité d'émission des signatures acoustiques des Delphinidés observées dans la donnée pour la période hivernale 2023 évoquent un probable transit de ces derniers au large des trois stations d'étude (R1, R3 et R4).

Concernant les Rorquals communs, une analyse approfondie des impulsions basses fréquences détectés en dessous de 100 Hz sur la période du 06 au 21 mars 2023 permettraient d'affiner la compréhension sur ces émissions et donc sur l'utilisation du site par ces mammifères marins. Toutefois, la communauté scientifique s'accordent à dire que les impulsions de 20 (« 20-Hz signal ») observées dans la donnée émis par les Rorquals communs sont associés à une fonction de cohésion sociale et/ou de reproduction (Romagosa et al., 2021; Širović et al., 2013).

VI.4.1.c. Classification des signaux biologiques détectés

Une classification des sifflements observés dans la bande fréquentielle allant de 2 à 25 kHz lors de l'étape de validation auditive et visuelle des signaux biologiques a été réalisée afin d'identifier les espèces émettrices (cf. VI.3.2.). Après analyse des caractéristiques acoustiques des sifflements détectés, il a été possible d'identifier des sifflements émis par :

- ✓ Le Grand Dauphin, *Tursiops truncatus*, entre 5 et 10 kHz (Figure 45) ;
- ✓ Le Dauphin commun, *Delphinus delphis*, entre 7 et 15 kHz (Figure 46).

Il apparaît que le Grand Dauphin est l'espèce prédominante dans l'ensemble de la donnée enregistrée au niveau des zones d'études R1 et R4, tandis que le Dauphin commun a uniquement été observé au niveau de la station R3 de manière ponctuelle. En effet, au niveau de cette station, le nombre de périodes de détections classifiées comme appartenant à cette espèce est de 3 sur un total de 28 périodes contenant des sifflements.

Toutes les espèces de Delphinidés n'ont pas pu être identifiées avec certitude, en raison de la faible intensité sonore de la majorité des sifflements détectés. En conséquence, les caractéristiques acoustiques peu visibles ont rendu la classification à l'espèce quasi-impossible. Toutefois, il est possible d'affirmer leur appartenance au genre dauphin *sp.*

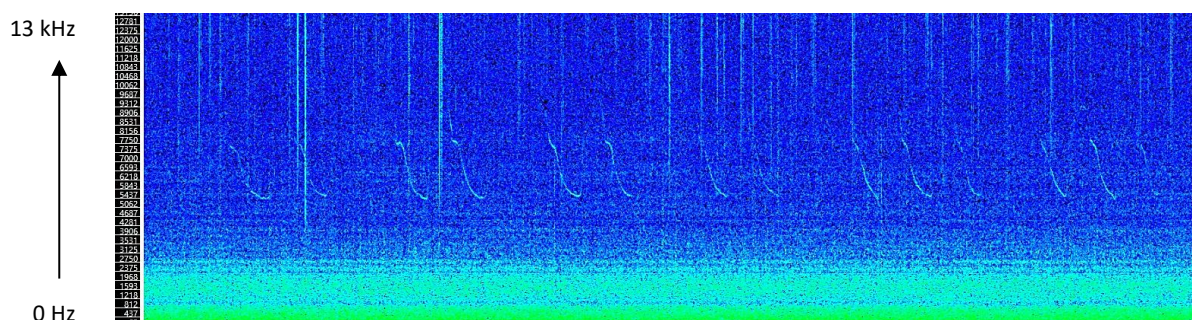


Figure 45 : Sifflements émis par le Grand Dauphin (*Tursiops truncatus*) entre 5 et 10 kHz le 07/03/2023 vers 09h06 UTC au niveau de la station R1.

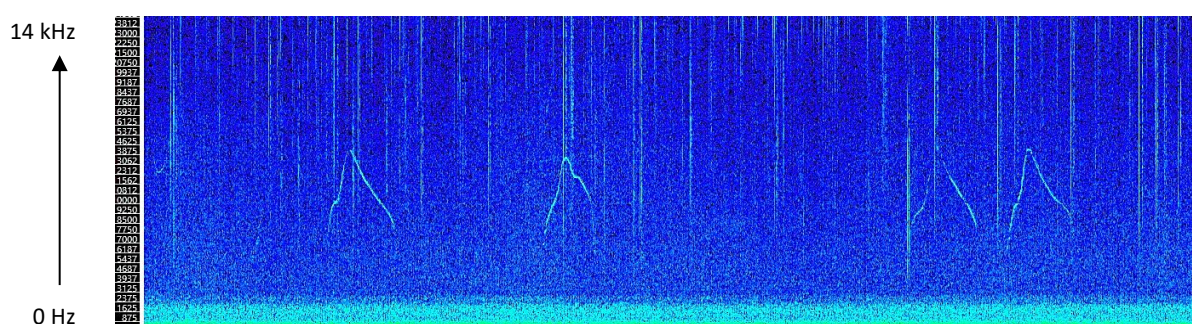


Figure 46 : Sifflements probablement émis par le Dauphin commun (*Delphinus delphis*) entre 7 et 15 kHz le 06/03/2023 vers 21h56 UTC au niveau de la station R3.

VI.4.1.d. Synthèse de la fréquentation du site

Le Tableau 22 synthétise les résultats obtenus via les enregistreurs acoustiques (enregistrement en continu) quant à la présence des mammifères marins au niveau de chaque station de mesure entre le 06 et 21 mars 2023 (période hivernale) :

- ✓ L'ensemble des stations d'étude sont régulièrement fréquentées par les Delphinidés, toutefois la station R3 (point de contrôle située à 1 500 m de la zone du parc éolien) apparaît comme l'emplacement le plus fréquenté par ces cétacés avec une présence quotidienne de Delphinidés (75%) ;
- ✓ L'ensemble des stations d'étude sont occasionnellement fréquentée par les Rorquals communs. La station R3 apparaît à nouveau comme la station la plus fréquentée avec 25% de présence acoustique de ce mammifère marin contre 13% pour les stations R1 et R4.

Il est possible de noter l'absence acoustique du Cachalot, *Physeter macrocephalus*, sur l'ensemble des stations d'étude.

Le comportement prédominant des Delphinidés à proximité de chacune des stations d'étude est la socialisation avec une présence majorité de sifflements observés dans les enregistrements. Concernant les Rorquals communs, le comportement prédominant est également associé à de la cohésion sociale.

Tableau 22 : Synthèse des résultats quant à la présence des mammifères marins entre le 06 et 21 mars 2023 au niveau de chacune des stations de mesure (R1, R3 et R4). Ces résultats ont été obtenus suite à l'analyse des détections réalisées dans la donnée des enregistreurs acoustiques (enregistrement en continu).

	Fréquentation du site			Comportement		
	R1 Au nord du parc	R3 A 1500 m du parc	R4 A 6500 m du parc	R1 Au nord du parc	R3 A 1500 m du parc	R4 A 6500 m du parc
Delphinidés	Régulière (69%)	Quotidienne (75%)	Régulière (50%)	Socialisation / transit	Socialisation / transit	Socialisation / chasse opportuniste
Balénoptéridés	Occasionnelle (13%)	Occasionnelle (25%)	Occasionnelle (13%)	Cohésion sociale et/ou associé à la période de reproduction	Cohésion sociale et/ou associé à la période de reproduction	Cohésion sociale et/ou associé à la période de reproduction
Physétéridés	Absence (0%)	Absence (0%)	Absence (0%)	N/A	N/A	N/A

VI.4.2. Campagne estivale 2023 (29/06/2023 au 15/07/2023)

Conformément au protocole, l'analyse des données a été réalisée pour chacune des stations permanentes (R1, R3 et R4) sur une durée d'environ 17 jours soit du 29 juin au 15 juillet 2023.

VI.4.2.a. Fréquentation du site par les mammifères marins

i. Famille des Delphinidés

La Figure 47 représente les périodes de présence acoustique des Delphinidés (détections des clics et sifflements) dans la donnée recueillie par les enregistreurs acoustiques au niveau des station R1, R3 et R4 pour la période du 29 juin au 15 juillet 2023 (période estivale).

Au niveau de la station R1, la présence acoustique des Delphinidés est régulière avec un taux de présence acoustique proche de 59%. En effet, 42 périodes de détections de clics et sifflements ont été observés sur 10 jours pour un total de 17 jours d'enregistrement. Le nombre de passage quotidien des Delphinidés sur ces 10 jours est d'environ 2 (± 3) passages par jour.

De manière générale, la détection des signatures acoustiques des Delphinidés a été réalisée en période diurne à hauteur de 76%. A noter, l'ensemble des détections de clics ont été réalisées uniquement en période diurne. Tout comme durant la période hivernale (cf. VI.4.1.a. i), le comportement observé au niveau du site R1 est un comportement de socialisation avec la présence majoritaire de sifflements dans la donnée. Sur la journée du 08 juillet 2023, une période de détections de clics d'écholocation associés à des « buzzs » et sifflements de forte intensité fait référence à un comportement de communication plus intense entre individus, voire même à un épisode de chasse opportuniste (Figure 48). Toutefois, ce comportement est minoritaire sur l'ensemble de la période d'étude.

Au niveau de la station R3, les Delphinidés sont occasionnellement présents avec un taux de présence acoustique de 35 % sur l'ensemble de la période d'étude. Un total de 31 périodes de détections de clics et sifflements a été observées sur 6 jours pour un total de 17 jours d'enregistrement.

De manière générale, la détection des signatures acoustiques des Delphinidés a principalement été réalisé durant le jour à hauteur de 65%.

Lors de l'analyse bioacoustique, plusieurs caractéristiques des signaux acoustiques détectés ont permis de noter des comportements associés à une quête de nourriture, et ce principalement en période nocturne (Figure 49) :

- ✓ Détections d'un nombre importants de clics ;
- ✓ Détections de « buzzs », cris pulsés et sifflements ;
- ✓ Détections de clics d'écholocalisation parfois intenses entre 10 et 128 kHz ;
- ✓ Un ICI variable (plus ou moins court) pour chaque train de clics détectés.

A noter que les sifflements détectés sont, de manière générale, de faible intensité sur l'ensemble de la période d'étude.

Au niveau de la station R4, les Delphinidés sont régulièrement présents avec un taux de présence acoustique proche de 50% sur l'ensemble de la période. En effet, 42 périodes de détections de clics et sifflements ont été observées sur 8 jours pour un total de 17 jours de mesure. Sur ces 8 jours de présence acoustique, il est possible de noter en moyenne 3 ($\pm$ 4) passages par jour de Delphinidés à proximité de la zone.

De manière générale, la détection des clics et sifflements a été constatée indépendamment des heures de la journée. Aucune période préférentielle de passage n'a donc pu être établie pour la présence des Delphinidés qui sont autant présents de jour comme de nuit à proximité de la station R4. Le comportement de ces cétacés est associé principalement à la socialisation/communication entre individus avec la présence majoritaire de sifflements dans les enregistrements associés à quelques clics dont la fréquence d'émission est inférieure à 80 kHz. Certaines interactions entre individus sont de forte intensité avec la présence de cris pulsés et de « buzzs ». Un probable épisode de chasse opportuniste a été mis en évidence par la détection de nombreux clics d'écholocation associés à ces « buzzs » (Figure 50).

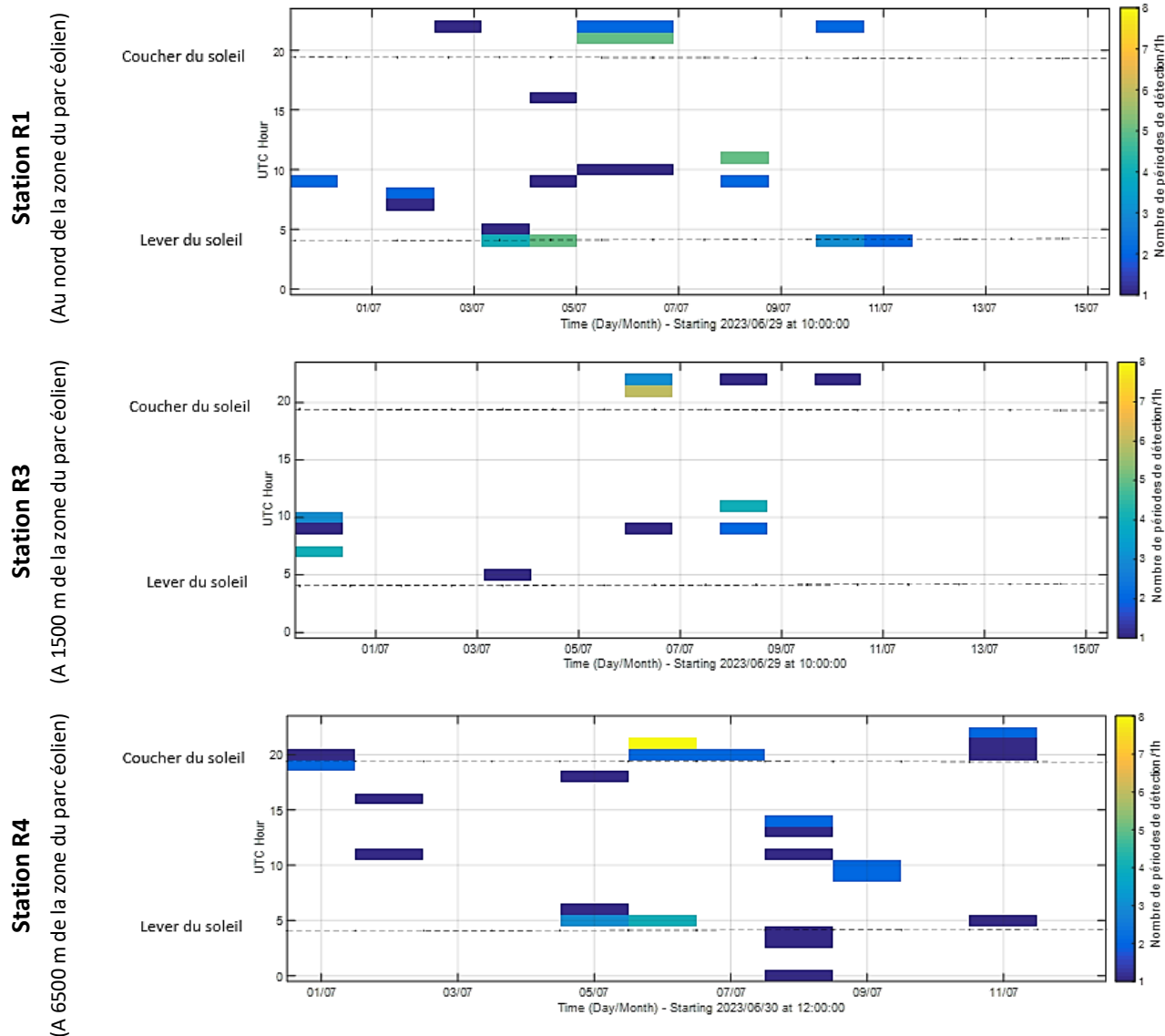


Figure 47 : Périodes de détections des clics et sifflements de Delphinidés en fonction du jour et de la nuit au niveau de chaque station (R1, R3 et R4) entre le 29 juin et 15 juillet 2023.

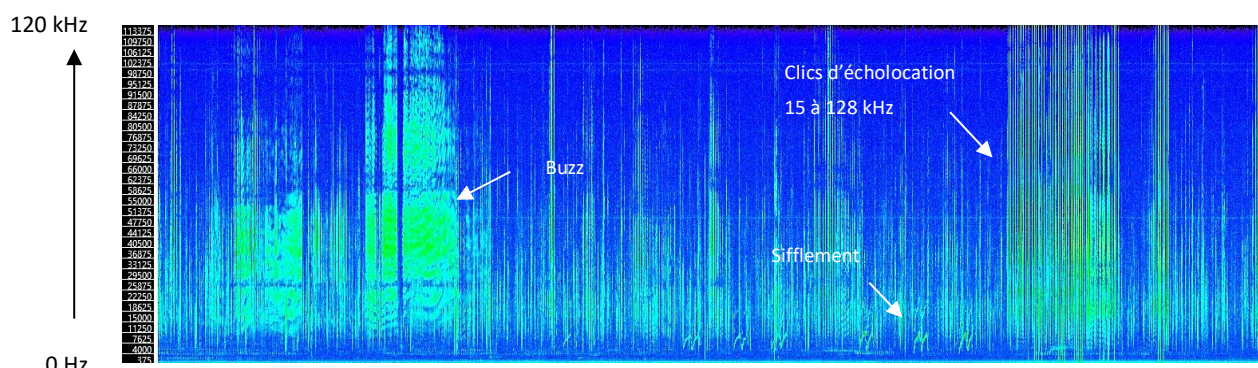


Figure 48 : Episode de communication intense évoquant une quête de nourriture par les Delphinidés au niveau de la station R1. Enregistrement du 08/07/2023 vers 11h21 UTC.

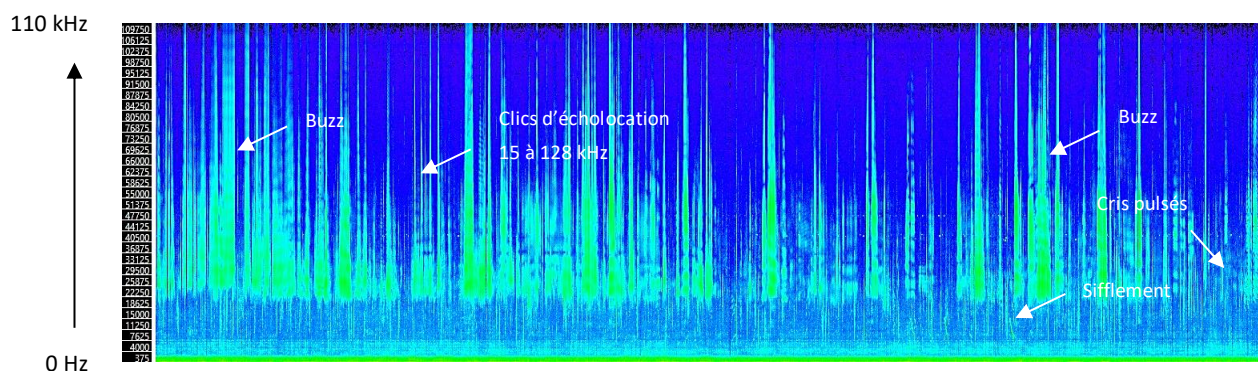


Figure 49 : Episode de chasse avec l'émission de trains de clics d'écholocation, buzz, cris pulsés et sifflements par les Delphinidés à proximité de la station R3. Enregistrement du 30/06/2023 vers 09h58 UTC.

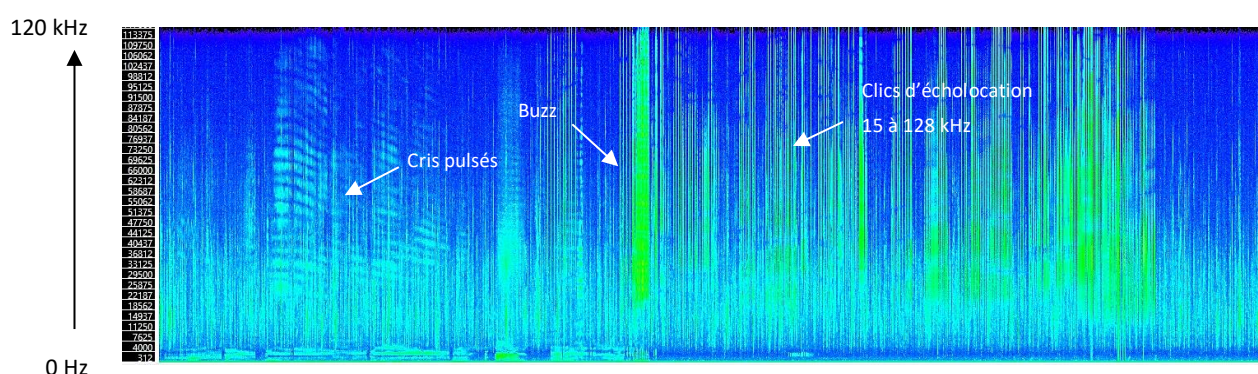


Figure 50 : Episode de chasse opportuniste observé lors de l'analyse bioacoustique des résultats concernant les Delphinidés à proximité de la station R4. Enregistrement du 06/07/2023 vers 21h55 UTC.

ii. Famille des Balénoptéridés

La Figure 51 représente les périodes de détections des signaux acoustiques basses fréquences émis par les Rorquals communs (*Balaenoptera Physalus*) dans la donnée recueillie par les enregistreurs acoustiques au niveau des stations R1, R3 et R4 pour la période du 29 juin au 15 juillet 2023.

Il apparaît que la présence des Rorquals communs est occasionnelle au niveau des station R1 et R3 avec un taux de présence acoustique respectif de :

- ✓ 12% au niveau de la station R1 (au nord de la zone du parc éolien), avec 9 périodes de détections d'impulsions basses fréquences observées sur 2 jours pour un total de 17 jours d'enregistrement ;
- ✓ 18% au niveau de la station R3 (à 1 500 m de la zone du parc éolien), avec 12 périodes de détections d'impulsions basses fréquences observées sur 3 jours pour un total de 17 jours d'enregistrements.

Au niveau de la station R4, la présence acoustique du Rorqual commun sur site est considérée exceptionnelle avec un taux de présence acoustique proche de 6%. En effet, 7 périodes de détections d'impulsions basses fréquences ont été observées sur 1 journée pour un total de 17 jours d'enregistrement.

Quelle que soit la zone d'étude, la totalité des détections des signatures acoustiques de ces mammifères marins a été réalisée en grande majorité durant la journée et se concentrent sur la journée du 14 juillet 2023 entre 08h00 UTC et 11h00 UTC. Les signatures acoustiques détectées sur cette journée correspondent à quelques « 20-Hz signal » émis seul (Figure 52) ou en doublet (Figure 53), mais également à des modulations de fréquence descendante entre 30 Hz et 100 Hz connus sous le nom de « downsweep chirp » (Figure 54). Ces derniers signaux sont majoritaires dans la donnée pour la période estivale. La communauté scientifique attribue une fonction d'alimentation à l'émission de ces signaux (Romagosa et al., 2021). Une analyse des caractéristiques acoustiques des « downsweep chirp » ainsi qu'une recherche bibliographique spécifique, permettraient d'affiner de confirmer et/ou d'affiner les connaissances sur la fonction de ces signaux et par conséquent, l'utilisation du site par les Rorquals communs en période estivale.

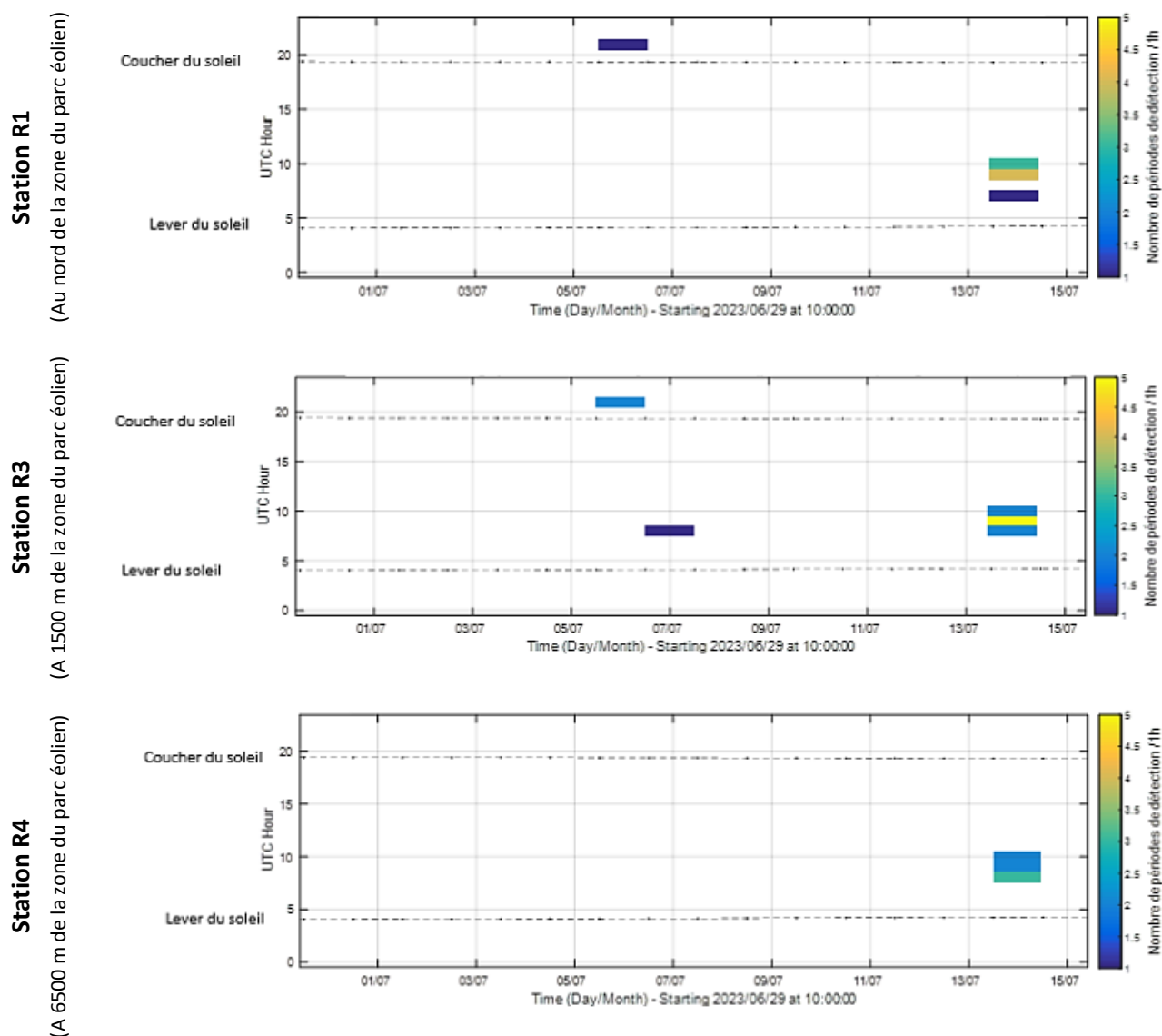


Figure 51 : Périodes de détections des pulses émis par les Rorquals communs (*Balaenoptera physalus*) en fonction du jour et de la nuit au niveau de chaque station (R1, R3 et R4) entre le 29 juin et 15 juillet 2023.

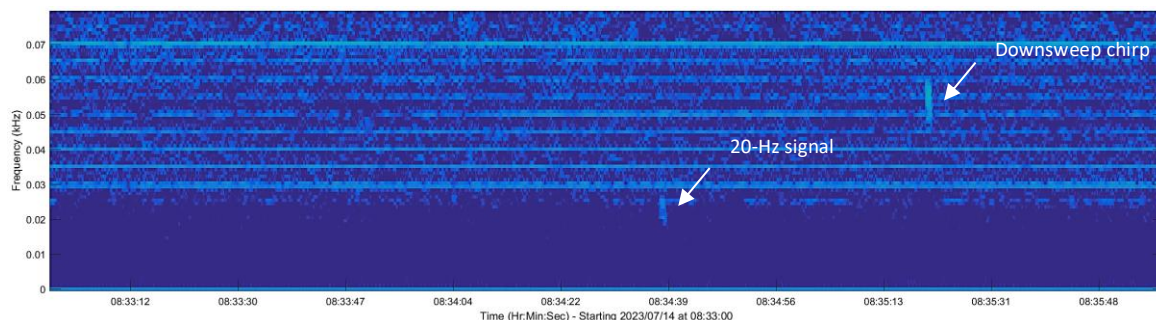


Figure 52 : Emission seul d'un « 20-Hz signal » entre 27 Hz et 17 Hz, ainsi que d'un « downsweep chirp » entre 60 Hz et 50 Hz par un Rorqual commun, *Balaenoptera physalus*, à proximité de la station R4. Enregistrement du 14/07/2023 vers 08h33 UTC.

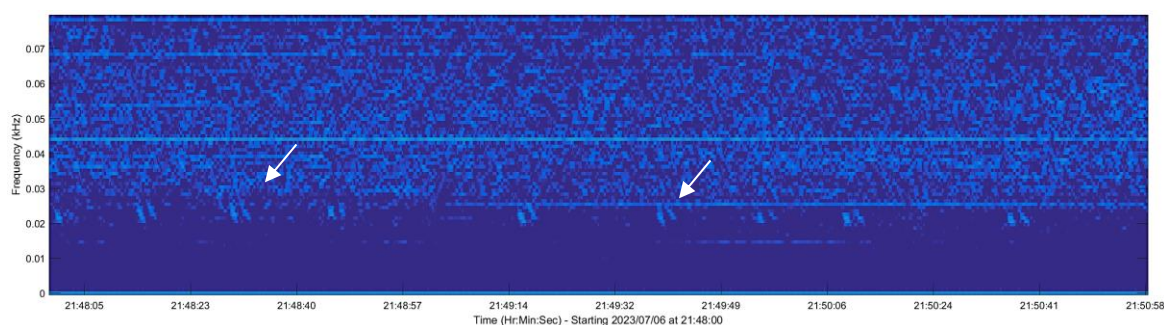


Figure 53 : « 20-Hz signal » émis en doublet par un Rorqual commun, *Balaenoptera physalus*, à proximité de la station R3. Enregistrement du 06/07/2023 vers 21h48 UTC.

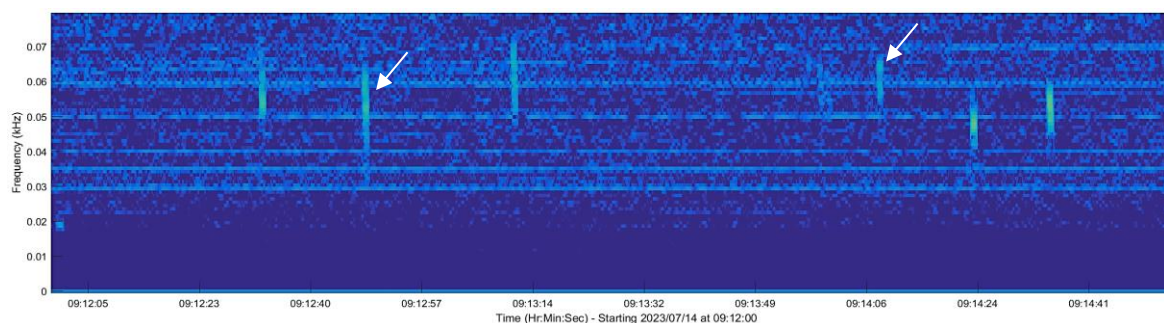


Figure 54 : « Downsweep chirp » émis par le Rorqual commun, *Balaenoptera physalus*, entre 65 Hz et 45 Hz à proximité de la station R3. Enregistrement du 14/07/2023 vers 09h12 UTC.

iii. Famille des Physétéridés

Le Cachalot, *Physeter macrocephalus*, est considéré acoustiquement absent entre le 29 juin et 15 juillet 2023 au niveau de chacune des stations (R1, R3 et R4). En effet, aucun signal acoustique associé à la présence de Cachalots sur site (clics hautement directionnels émis entre 2 et 30 kHz) n'a été détecté sur la totalité de la période. Ce résultat est similaire à celui obtenu lors de la période hivernale, du 06 au 21 mars 2023.

VI.4.2.b. Comportements observés

Sur la période du 26 juin au 15 juillet 2023, l'analyse des enregistrements qui contiennent des contacts acoustiques de Delphinidés indiquent de manière générale des comportements de socialisation par la présence majoritaire de sifflements entre 2 et 25 kHz, et de quelques clics entre 15 et 80 kHz. Toutefois, une analyse détaillée de l'ensemble des contacts acoustiques a permis de mettre en évidence le caractère écholocatif de certains clics associés à des « buzzs » et des cris pulsés (cf. Figure 49) indiquant quelques comportements de chasse et de quête de nourriture à proximité de chacune des stations. Bien que ces comportements de chasse restent moindres sur l'ensemble de la période analysée pour les stations R1 et R4 (comportements opportunistes), ils sont plus fréquents au niveau de la station R3 située à 1 500 m de la zone du parc éolien.

Concernant les Rorquals communs, les signatures acoustiques majoritairement détectés dans la donnée correspondent à des « downsweep chirp », autrement dit des modulations de fréquence descendante entre 30 Hz et 100 Hz. A ce jour, la communauté scientifique attribue une fonction d'alimentation à l'émission de ces signaux.

VI.4.2.c. Classification des signaux biologiques

Une classification des sifflements observés dans la bande fréquentielle allant de 2 à 25 kHz lors de l'étape de validation auditive et visuelle des signaux biologiques, a été réalisée afin d'identifier les espèces émettrices. Après analyse des caractéristiques acoustiques des sifflements détectés, il a été possible d'identifier des sifflements émis par le Grand Dauphin, *Tursiops truncatus*, entre 3 et 12 kHz au niveau de chacune des stations d'étude (Figure 55 et Figure 56). Le Grand Dauphin apparaît donc comme l'espèce prédominante sur l'ensemble de la période du 29 juin au 15 juillet 2023.

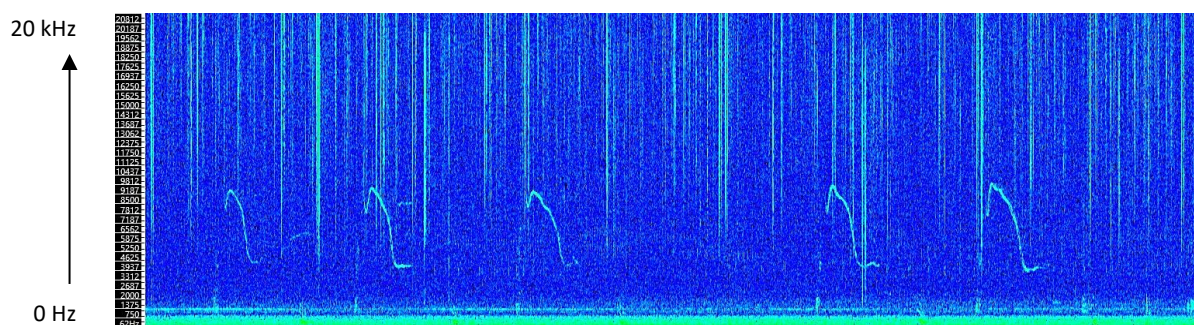


Figure 55 : Sifflements émis par le Grand Dauphin (*Tursiops truncatus*) entre 3 et 12 kHz le 08/07/2023 vers 11h18 UTC au niveau de la station R1.

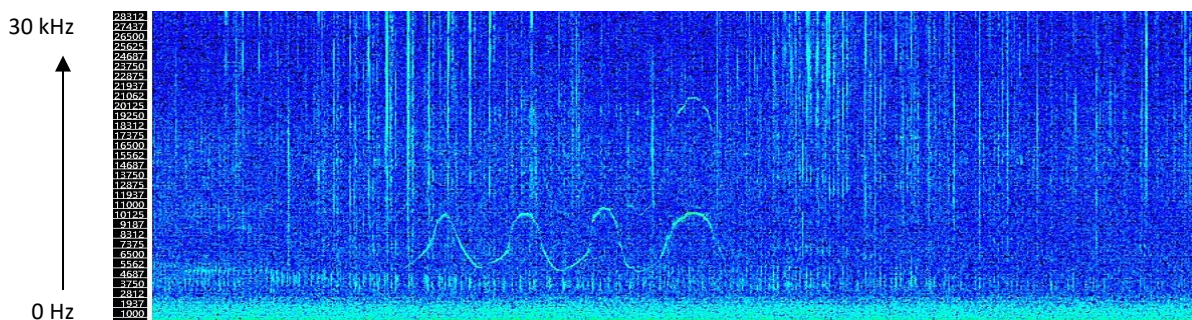


Figure 56 : Sifflements émis par le Grand Dauphin (*Tursiops truncatus*) entre 3 et 12 kHz le 30/06/2023 vers 07h32 UTC au niveau de la station R3.

VI.4.2.d. Synthèse de la fréquentation du site

Le Tableau 23 synthétise les résultats obtenus via les enregistreurs acoustiques (enregistrement en continu) quant à la présence des mammifères marins au niveau de chaque station de mesure entre le 29 juin et 15 juillet 2023 (période estivale) :

- ✓ Les stations R1 (au nord de la zone du parc éolien) et R4 (à 6 500 m de la zone du parc éolien) sont régulièrement fréquentées par les Delphinidés tandis que la station R3 (à 1 500 m de la zone du parc éolien) apparaît comme la station la moins fréquentée par ces cétacés avec une présence occasionnelle sur site ;
- ✓ Les stations R1 et R3 sont occasionnellement fréquentées par le Rorqual commun tandis que la station R4 apparaît comme la moins fréquentée par ce mammifère marin avec une présence exceptionnelle suite à la détection de signatures acoustiques uniquement sur la journée du 14 juillet 2023.

Il est possible de noter l'absence acoustique du Cachalot, *Physeter macrocephalus*, sur l'ensemble des stations d'étude.

Le comportement prédominant des Delphinidés à proximité de chacune des stations d'étude est la socialisation avec une présence majoritaire de sifflements observés dans les enregistrements. Toutefois, un comportement de quête de nourriture a été mis en évidence pour chacune des familles de mammifères marins (Delphinidés et Balénoptéridés), et ce principalement au niveau de la station R3 pour les Delphinidés.

En comparaison des résultats obtenus sur la période hivernale 2023 (cf. VI.4.1.d.), il est possible de noter la baisse significative de fréquentation de la station R3 par les Delphinidés en été 2023 avec une présence acoustique passant respectivement de quotidienne à occasionnelle sur le site. A l'inverse, la fréquentation de ces mammifères marins est similaire au niveau des stations R1 et R4 que ce soit en hiver ou en été 2023. Concernant les Rorquals communs, la fréquentation est similaire sur chacune des saisons au niveau des stations R1 et R3, et baisse légèrement au niveau de la station R4 en passant d'occasionnelle en hiver 2023 à exceptionnelle en été 2023.

Au niveau des comportements, le site apparaît comme une zone de nourriture (plus ou moins opportuniste) durant l'été 2023 et ce, pour chacune des familles de mammifères marins. Pour rappel, durant la période hivernale 2023, un comportement de socialisation était mis en évidence à la fois pour les Delphinidés et les Rorquals communs.

Tableau 23 : Synthèse des résultats quant à la présence des mammifères marins entre le 29 juin et 15 juillet 2023 au niveau des stations de mesure R1, R3 et R4. Ces résultats ont été obtenus suite à l'analyse des détections réalisées dans la donnée des enregistreurs acoustiques (enregistrement en continu).

	Fréquentation du site			Comportement		
	R1 Au nord du parc	R3 A 1500 m du parc	R4 A 6500 m du parc	R1 Au nord du parc	R3 A 1500 m du parc	R4 A 6500 m du parc
Delphinidés	Régulière (59%)	Occasionnelle (35%)	Régulière (50%)	Socialisation / chasse opportuniste	Socialisation / chasse	Socialisation / chasse opportuniste
Balénoptéridés	Occasionnelle (12%)	Occasionnelle (18%)	Exceptionnelle (6%)	Alimentation	Alimentation	Alimentation
Physétéridés	Absence (0%)	Absence (0%)	Absence (0%)	N/A	N/A	N/A

VI.5. Limites et difficultés rencontrées

La bioacoustique est une science puissante en termes de détections d'activités biologiques sous-marines. Elle permet d'acquérir des enregistrements par acoustique passive des sons émis par les animaux et ce, quelle que soit l'heure du jour et de la nuit. Toutefois, l'objectif même de détecter des sons d'origine animale aux caractéristiques variables et dans un environnement extrêmement fluctuant tel que celui de la mer, conduit à des limitations qu'il est nécessaire de prendre en compte lors de l'analyse et de l'interprétation des résultats.

VI.5.1. Traitement des données

La représentativité temporelle élevée est l'un des points forts de l'acquisition par acoustique passive. Cet avantage est toutefois controversé : si les conditions de bruit ambiant sont difficiles un volume très important de signatures acoustiques est généré dans la donnée. Le traitement de ces données peut alors s'avérer chronophage et coûteux. Pour pallier à ce problème de temps de traitement des données, des algorithmes de détection automatique peuvent être utilisés. Lorsque l'efficacité de ces algorithmes est erronée suite à la présence d'un fort bruit ambiant dans la donnée, une solution alternative consiste à recourir à la validation humaine des échantillons.

De manière générale, lorsque des algorithmes de détections automatiques sont utilisés pour le traitement de données audio, un post-traitement (à base de filtre) et un effort de validation humaine sont requis afin de pouvoir confirmer les résultats obtenus.

Dans le cadre de cette étude, un bruit ambiant persistant a été mis en évidence dans les composantes basses fréquences. Ce bruit ambiant est principalement dû à la présence de signaux anthropiques (passage de navire). Un post-traitement et une validation des détections automatiques provenant des enregistreurs ont donc été réalisés afin de pouvoir confirmer les résultats obtenus.

VI.5.2. Représentativité de la mesure

VI.5.2.a. Portée de détection et représentativité spatiale

La distance de détection d'un son émis par un mammifère marin est influencée par de nombreux facteurs. D'une part, les caractéristiques de l'émission sonore sont dépendantes de la source, c'est-à-dire de l'animal lui-même. La fréquence, l'amplitude et le type de son vont influencer sur la distance de détection et vont être fonction de l'espèce, du comportement et de l'orientation de l'animal par rapport à l'hydrophone. D'autre part, les caractéristiques de la propagation de l'émission sonore varient selon le milieu dans lequel elle se propage. Ces caractéristiques dépendent principalement de la température et salinité de l'eau, de la profondeur et de la proximité d'interfaces (côte, fond, cisaillement des masses d'eau). La détection est également fortement dépendante du bruit ambiant, qu'il soit généré par l'environnement, les organismes biologiques ou les activités humaines. L'ensemble de ces caractéristiques déterminent donc pour chaque espèce la portée de détection et par conséquent le périmètre de présence biologique associé (VI.2.).

En général, la portée de détection d'un mysticète est bien supérieure à celle d'un petit Delphinidé. Dans ce contexte, bien que la force de l'acoustique passive tienne à l'excellente représentativité temporelle de l'acquisition, il est important de pallier à la faible représentativité spatiale lorsqu'on recherche la présence de petits Delphinidés, tel que le Dauphin bleu et blanc (*Stenella coeruleoalba*) potentiellement présent au large de du golfe de Fos-sur-Mer.

Dans le cadre de cette étude, deux solutions ont été mises en œuvre pour atteindre cet objectif :

- ✓ Le choix adapté de la sensibilité de l'hydrophone qui permet d'optimiser la distance de détection tout en minimisant la saturation en présence d'un fort bruit ambiant ;
- ✓ La réplication spatiale (acquisition en plusieurs points), qui dans un milieu aux conditions relativement homogène permet de généraliser les résultats à l'ensemble de l'aire d'étude.

VI.5.2.b. Comportement de l'animal et dénombrement

En ce qui concerne la détection des mammifères marins par acoustique passive, le comportement de l'animal représente le facteur principal qui va influencer sur la détection des sons émis par ce dernier. En effet, les mammifères marins sont généralement plus actifs vocalement lorsqu'ils sont en socialisation ou en activité de chasse que lorsque qu'ils sont en transit ou au repos. Certaines espèces sont également plus discrètes que d'autres d'un point de vue acoustique : les petites espèces limiteront leurs vocalises afin d'éviter d'être repérées par leurs prédateurs (par exemple les Orques), tandis que d'autres espèces comme les Baleines à bec (*Ziphiidae*) sont discrètes de nature aussi bien dans leur comportement de surface que dans leurs vocalises. Dans ces conditions, il est donc probable qu'un individu ou un groupe qui passe à proximité de l'hydrophone ne soit pas détecté.

Il est important de préciser la difficulté d'estimer le nombre d'individus au sein d'un groupe sur la base seule de leurs émissions sonores. Cet exercice est quasi-impossible. Toutefois, il peut être possible de détecter si un individu est probablement seul ou en présence d'un groupe d'individus.

VI.5.3. Algorithme de détection automatique

De manière générale, les algorithmes de détection automatique identifient de manière fiable la présence, le cas échéant, de signaux impulsifs et/ou transitoires dans la donnée mesurée par acoustique passive. Toutefois, il apparaît qu'en présence d'un chorus sonore bruyant (1) le nombre de détections réalisées soit surestimé et, (2) les détections biologiques réalisées par l'algorithme s'apparentent en réalité à la détection de signaux anthropiques. En effet, la présence de bruit de mouillage tels que des chocs ou des grincements, provoqués par des chocs sur une surface ou par les vibrations d'éléments du mouillage acoustique à des fréquences inférieures à 5 kHz, peut entraîner une confusion pour l'algorithme de détection entre les signaux transitoires biologiques et ces signaux transitoires anthropiques. Dans un contexte similaire, la présence intensive de signaux impulsifs anthropiques dans la donnée mesurée, tels que ceux émis par un SONAR actif, peut donner lieu à des faux



positifs c'est-à-dire à la détection des signaux impulsifs émis par le SONAR actif dans la bande de fréquence d'émission des clics de Delphinidés. La vérification humaine offre alors une alternative satisfaisante dans la grande majorité des cas pour confirmer l'origine des détections réalisées.

Chapitre VII. Conclusions

Le projet de construction d'un parc éolien flottant Provence Grand Large vise à raccorder trois éoliennes flottantes au large de Fos-sur-Mer. Quiet-Oceans a été mandatée pour la réalisation de l'état de référence acoustique et le suivi de la fréquentation des mammifères marins par acoustique passive à proximité de la zone de concession du parc.

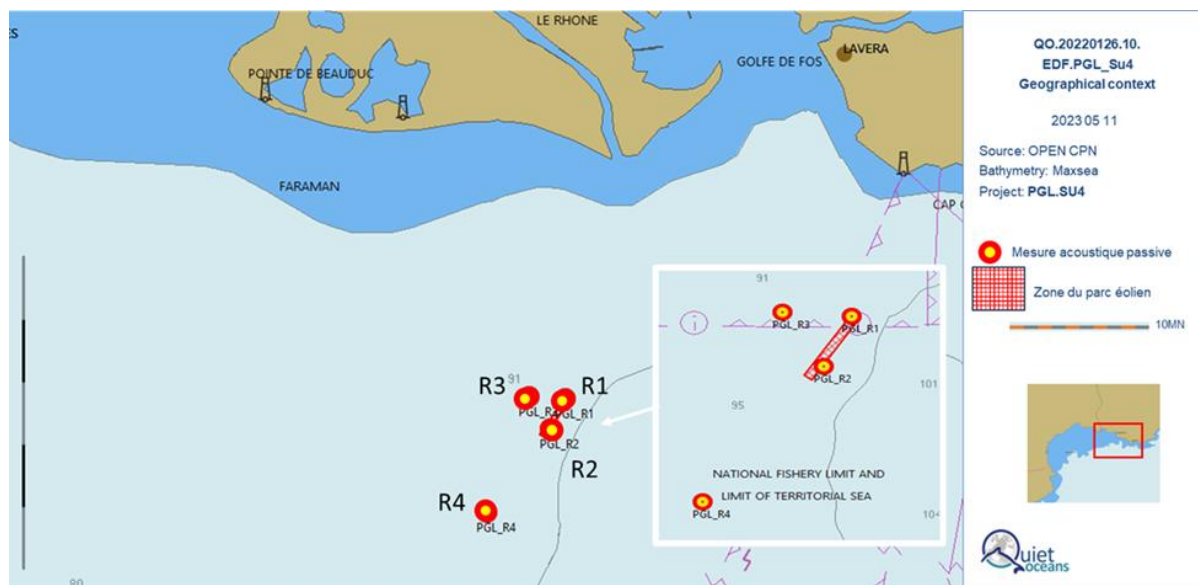
Les objectifs de cette étude sont de :

- ✓ Mettre en œuvre un suivi par acoustique passive à l'aide d'enregistreurs autonomes ;
- ✓ Caractériser les niveaux de bruit physique et leur variation dans le temps ;
- ✓ Cartographier l'état initial acoustique sous-marin lors de l'état de référence ;
- ✓ Caractériser la fréquentation du site par les mammifères marins et les comportements associés.

Pour répondre à ces objectifs, des campagnes de mesures acoustiques ont été menées, à savoir :

- ✓ Deux campagnes de mesures par acoustique passive d'un mois chacune ;
- ✓ Quatre campagnes de profils de célérité (température et salinité) lors des déploiements et récupération des enregistreurs acoustiques, afin de valider l'utilisation des données issues de la plateforme CMEMS pour cartographier le bruit ambiant sur zone.

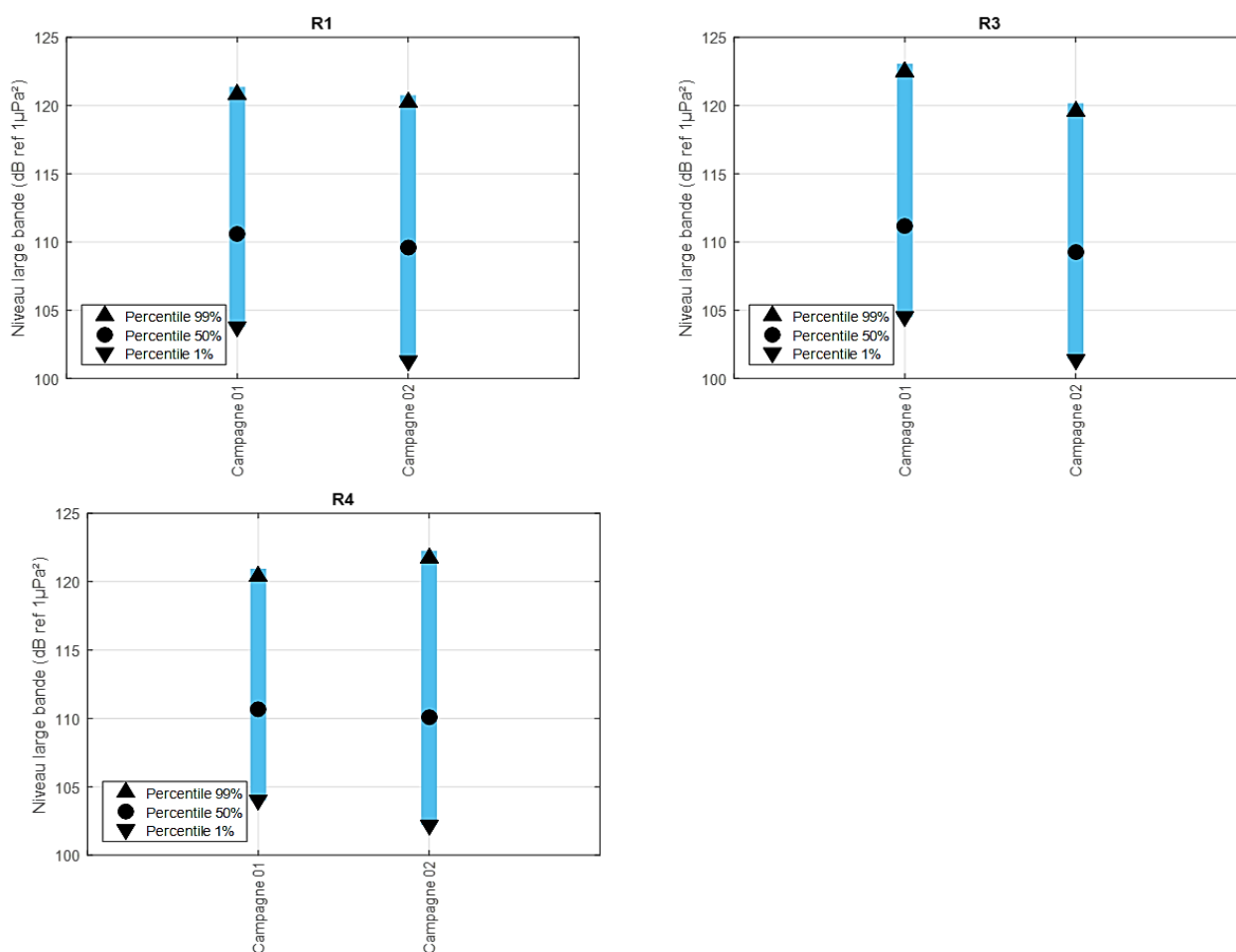
Ce document propose une analyse des données collectées pour les saisons hivernale et estivale 2023, respectivement du 06 au 31 mars 2023 et du 29 juin au 28 juillet 2023. Les résultats obtenus sont représentatifs des niveaux sonores et de la distribution spatio-temporelle des espèces de mammifères marins pour l'état de référence 2023.



- ✓ La superposition occasionnelle de signatures anthropiques courtes pouvant atteindre ponctuellement 145 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$, soient des émergences allant jusqu'à +40dB en regard du bruit permanent sur zone. Ces émergences sont majoritairement dues aux passages de navires de pêche. Leur intensité dépend de la distance entre la station acoustique et les navires de passage. Ainsi, on recense une moyenne journalière de 4 (R1), 5 (R3) et 4 (R4) événements acoustiques significatifs ayant entraîné une élévation d'au moins 10 dB par rapport au bruit courant sur zone lors du suivi hiver/printemps 2023. Ces émergences anthropiques semblent en légère hausse (7 en R1, 6 en R3 et 7 en R4) lors du suivi été 2023.

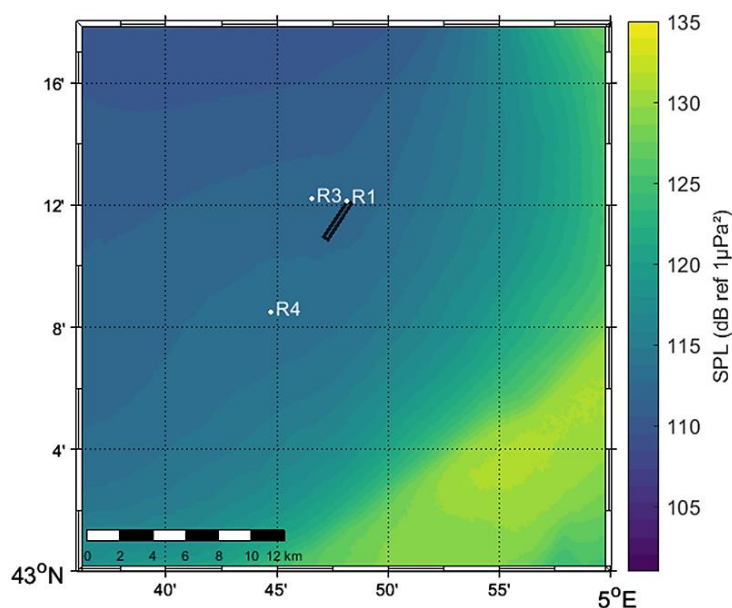
La figure ci-dessous synthétise la statistique des niveaux sonores selon différents percentiles (1%, 50% et 99%) perçus au niveau de chaque station :

- ✓ Les niveaux de bruit médians (50% du temps) (exprimés dans la bande de fréquence entre 20 Hz et 40 kHz) convergent autour de 110dB ref $1\mu\text{Pa}^2$. Ainsi, les zones proches (R1) et éloignées (R3 et R4) du futur parc éolien flottant voient peu de variation spatiale et temporelle de ces niveaux. Ces niveaux sont représentatifs d'une zone côtière à forte fréquentation maritime, et ne varient pas significativement d'une saison à l'autre.
- ✓ Les niveaux forts (soit 1% du temps) relevés varient de 120.4 (R4) à 122.5 (R3) dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ et montrent une faible fréquentation nautique à proximité immédiate de la zone d'étude. Ces niveaux sont en baisse (-2.9dB) au niveau de la station R3 lors de la période été 2023, probablement en raison de la baisse de pêche à proximité de la station acoustique.



L'analyse horaire des émergences sonores dans une bande fréquentielle spécifique aux activités anthropiques (89-110Hz, P50%) permet de mettre en évidence un accroissement du niveau sonore allant de 2 à 6 dB selon la saison et de la station, entre 06h00 et 22h00 UTC lors de l'hiver/printemps 2023 et 08h00 et 21h00 UTC lors de l'été 2023. La même analyse avec une bande fréquentielle spécifique à l'activité des organismes benthiques (7.1-8.9kHz, P50%) permet de mettre en évidence un accroissement du niveau sonore allant de 3 à 6 dB selon la saison et la station, entre 20h00 et 08h00 UTC en hiver/printemps 2023 et entre 21h00 et 3h00 UTC lors de l'été 2023.

Les données mesurées ont été utilisées afin de réaliser la cartographie calibrée du bruit existant sur zone, en fonction du mois, via la plateforme Quonops®. Les cartographies statistiques des niveaux sonores au percentile 10% (illustration au mois de Juillet 2023 ci-dessous) mettent en évidence la continuité du trafic commercial avec une variation quasi nulle des émergences (vert clair) de bruit en entrée et en sortie du port de Fos-sur-Mer. Au percentile médian, les cartes traduisent la relative homogénéité du bruit environnemental en fonction de la saison, et montrent l'influence permanente du trafic commercial à proximité non immédiate de la zone du parc éolien, avec des niveaux de bruits médians valant environ 110dB au niveau des trois points de mesures étudiés dans cette étude.



VII.2. Analyse de la fréquentation et du comportement des mammifères marins

Le suivi par acoustique passive en temps différé permet de renseigner sur la fréquentation du site par les mammifères marins via l'analyse des signatures bioacoustiques détectées au niveau de chaque station. Un traitement spécifique semi-automatique a été réalisé afin d'établir des statistiques de fréquentation des familles de mammifères marins (Delphinidés, Balénoptéridés et Physétéridés) présentes sur la zone d'étude.

Le traitement bioacoustique de la donnée recueillie par les enregistreurs acoustiques consiste à détecter les signaux biologiques dans les données collectées à l'aide du logiciel PAMGuard, interface experte de la détection et classification des signaux émis par les mammifères marins. L'algorithme de détection appuie sa recherche sur des signaux physiques, impulsifs et/ou transitoires, qui peuvent être perturbés par une présence dominante de signaux physiques d'origine anthropique. Dans ce contexte, une validation manuelle (auditive et visuelle) des événements sonores détectés par ce logiciel a été réalisée par l'experte bioacoustique de Quiet-Oceans. Cette validation permet d'une part de qualifier les résultats de la détection automatique et d'autre part, d'analyser finement le comportement des espèces détectées.

La fréquentation de chaque zone par les mammifères marins a été établie pour chacune des périodes (hivernale et estivale) dont les durées d'étude sont de 15 jours, conformément au cahier des charges du projet. L'analyse des données des enregistreurs acoustiques a permis de confirmer la présence acoustique de Rorqual commun (*Balaenoptera physalus*) et des Delphinidés au niveau de chaque station de mesure avec l'identification majoritaire du Grand Dauphin (*Tursiops truncatus*). La présence acoustique du Dauphin commun (*Delphinus delphis*) a été ponctuellement observée uniquement au niveau de la station R3.

Sur la période d'étude du 06 au 21 mars 2023 (hiver 2023), l'analyse des signaux bioacoustiques émis par les mammifères marins dans et à proximité du parc éolien montre une présence quotidienne de Delphinidés au niveau de la station R3, point de contrôle situé à 1500m à l'ouest de la zone de concession du parc éolien PGL. Cette station R3 apparaît comme étant l'emplacement le plus fréquenté par ces cétacés. Quelques épisodes de chasse opportunistes ont été mis en évidence au niveau de cette station, mais ce comportement reste minoritaire sur l'ensemble de la période d'étude. Au niveau des stations R1 (au nord de la zone de concession du parc PGL) et R4 (à 6500m de la zone de concession du parc PGL), la présence des Delphinidés est régulière. La faible densité et intensité des signatures acoustiques observées dans les enregistrements (principalement sifflements) supposent que les alentours de chacune des stations d'études représentent une zone de transit pour les Delphinidés. Un comportement social a également pu être mis en évidence via la détection majoritaire des sifflements et des clics émis entre 10 et 80 kHz. Les Rorquals communs sont, quant à eux, occasionnellement présents au niveau de chacune des stations durant la période hivernale 2023. Les détections des signatures acoustiques basses fréquences (pulses ou « 20-Hz signal ») de cette espèce se concentrent sur la journée du 10 mars 2023 entre 18h30 UTC et 20h10 UTC. Ces pulses sont associés à une fonction sociale et seraient émis par les Rorquals communs (1) lors d'un déplacement en groupe afin de maintenir la cohésion sociale et (2) uniquement par les mâles pendant la saison de reproduction connue de l'espèce c'est-à-dire durant l'hiver (Romagosa et al., 2021; Širović et al., 2013).

Sur la période d'étude du 29 juin au 15 juillet 2023 (été 2023), les stations R1 et R4 sont régulièrement fréquentées par les Delphinidés tandis que la station R3 apparaît comme la station la moins fréquentée par ces cétacés avec une présence occasionnelle sur le site. Les Rorquals communs, sont quant à eux, occasionnellement présents au niveau des stations R1 et R3, tandis que leur présence est considérée exceptionnelle au niveau de la station R4. A noter que quelle que soit la zone d'étude, la majorité des détections des signatures acoustiques (« 20-Hz pulse » et « downsweep chirp ») de ce mammifère marin se concentre sur la journée du 14 juillet 2023 entre 08h00 UTC et 11h00 UTC. Le comportement prédominant des Delphinidés à proximité de chacune des stations d'étude est la socialisation avec une présence majoritaire de sifflements observés dans les enregistrements. Toutefois, un comportement de quête de nourriture a été mis en évidence pour chacune des familles de mammifères marins (Delphinidés et Balénoptéridés), et ce principalement au niveau de la station R3 pour les Delphinidés.

L'analyse saisonnière montre une baisse significative de fréquentation de la station R3 par les Delphinidés entre l'hiver et l'été 2023 avec une présence acoustique passant respectivement de quotidienne à occasionnelle sur le site. A l'inverse, la fréquentation de ces mammifères marins est régulière au niveau des stations R1 et R4 indépendamment des saisons. La présence de Rorquals communs aux alentours des zones d'études est similaire d'une saison à l'autre avec une présence en majorité occasionnelle. Toutefois, le comportement de ce mammifère marin sur site diffère entre l'hiver et l'été 2023 avec un comportement associé à la cohésion sociale en hiver et axé sur l'alimentation en été. En effet, le site apparaît comme une zone de nourriture (plus ou moins opportuniste) durant l'été 2023 et ce, pour chacune des familles de mammifères marins. Le tableau ci-dessous synthétise le statut de fréquentation des mammifères marins en fonction de la station d'écoute et de la période.

Tableau 24 : Synthèse des résultats quant à la présence acoustique des mammifères marins au niveau de chacune des stations d'étude. Ces résultats ont été obtenus suite à l'analyse des détections réalisées par les enregistreurs acoustiques (enregistrement en continu).

		Station R1			Station R3			Station R4		
		Au nord de la zone du parc éolien			A 1500m de la zone du parc éolien			A 6500m de la zone du parc éolien		
		Delphinidés	Balénoptéridés	Physétéridés	Delphinidés	Balénoptéridés	Physétéridés	Delphinidés	Balénoptéridés	Physétéridés
Hiver 2023 06/03/2023 au 21/03/2023	Fréquentation du site	Régulière (69%)	Occasionnelle (13%)	Absence (0%)	Quotidienne (75%)	Occasionnelle (25%)	Absence (0%)	Régulière (50%)	Occasionnelle (13%)	Absence (0%)
	Plage horaire préférentielle	Nuit	Nuit	N/A	Jour	Nuit	N/A	Nuit	Nuit	N/A
	Comportement	Social / transit	Cohésion sociale	N/A	Social / transit	Cohésion sociale	N/A	Social / Chasse opportuniste	Cohésion sociale	N/A
	Principale espèce détectée	Dauphin sp. (a priori <i>Tursiops truncatus</i>)	<i>Balaenoptera physalus</i>	N/A	Dauphin sp.	<i>Balaenoptera physalus</i>	N/A	Dauphin sp. (a priori <i>Tursiops truncatus</i>)	<i>Balaenoptera physalus</i>	N/A
	Autre espèce ponctuelle	N/A			<i>Delphinus delphis</i>			N/A		
Été 2023 29/06/2023 au 15/07/2023	Fréquentation du site	Régulière (59%)	Occasionnelle (12%)	Absence (0%)	Occasionnelle (35%)	Occasionnelle (18%)	Absence (0%)	Régulière (50%)	Exceptionnelle (6%)	Absence (0%)
	Plage horaire préférentielle	Jour	Jour	N/A	Jour	Jour	N/A	Jour/Nuit	Jour	N/A
	Comportement	Social / Chasse opportuniste	Alimentation	N/A	Social / Chasse	Alimentation	N/A	Social / Chasse opportuniste	Alimentation	N/A
	Principale espèce détectée	Dauphin sp. (a priori <i>Tursiops truncatus</i>)	<i>Balaenoptera physalus</i>	N/A	Dauphin sp. (a priori <i>Tursiops truncatus</i>)	<i>Balaenoptera physalus</i>	N/A	Dauphin sp. (a priori <i>Tursiops truncatus</i>)	<i>Balaenoptera physalus</i>	N/A
	Autre espèce ponctuelle	N/A			N/A			N/A		

Fréquentation				
Quotidienne >70%	Régulière 50 à 70%	Occasionnelle 10 à 50%	Exceptionnelle <10%	Absence 0%

Bibliographie

- Ainslie, M. (2010). Principles of Sonar Performance Modelling. In *Principles of Sonar Performance Modelling*. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-87662-5>
- Erbe, C., Dunlop, R., Jenner, K. C. S., Jenner, M. N. M., McCauley, R. D., Parnum, I., Parsons, M., Rogers, T., & Salgado-Kent, C. (2017). Review of Underwater and In-Air Sounds Emitted by Australian and Antarctic Marine Mammals. *Acoustics Australia*. <https://doi.org/10.1007/s40857-017-0101-z>
- Folegot, Thomas, C. D. (2013). A Monté-Carlo approach to anthropogenic sound mapping. *Underwater Acoustics Conference, Corfu, Greece*.
- Garcia, H. A., Couture, T., Galor, A., Topple, J. M., Huang, W., Tiwari, D., & Ratilal, P. (2020). Comparing performances of five distinct automatic classifiers for fin whale vocalizations in beamformed spectrograms of coherent hydrophone array. *Remote Sensing*, 12(2), 1–25. <https://doi.org/10.3390/rs12020326>
- Guelton, S., Clorennec, D., Pardo, É., Brunet, P., & Folegot, T. (2014). *Quonops, la prévision opérationnelle en acoustique sous-marine sur grille de calcul*. https://hal-institut-mines-telecom.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/927502/filename/succes2013_resume_1.0_.pdf%5Cnhttps://hal.inria.fr/hal-00927502/document
- Macgillivray, A., & de Jong, C. (2021). A reference spectrum model for estimating source levels of marine shipping based on automated identification system data. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/jmse9040369>
- Richardson, W. J., Greene, C. R., Malme, C. I., Thomson, D. H., Moore, S. E., & Wiirsig, B. (2013). Marine Mammals and Noise. In *Marine Mammals and Noise*. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-02253-3>
- Romagosa, M., Pérez-Jorge, S., Cascão, I., Mouriño, H., Lehodey, P., Pereira, A., Marques, T. A., Matias, L., & Silva, M. A. (2021). Food talk: 40-Hz fin whale calls are associated with prey biomass. In *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* (Vol. 288, Issue 1954). <https://doi.org/10.1098/rspb.2021.1156>
- Ross. (1976). *Mechanics of Underwater Noise*. In *Pergamon, New York*.
- Samaran, F., Des, A., Acoustiques, S., Biologique, D. O., Stafford, K., Ridoux, V., Adam, O., & Guinet, C. (2009). *ANALYSE DES SIGNAUX ACOUSTIQUES D'ORIGINE BIOLOGIQUE ENREGISTRES DANS L'OCEAN INDIEN : IMPLICATIONS DANS LE RECENSEMENT ET LE SUIVI DES MOUVEMENTS SAISONNIERS DES CETACES* Flore Samaran To cite this version : HAL Id : tel-00365083. Université de la Rochelle.
- Širović, A., Williams, L. N., Kerosky, S. M., Wiggins, S. M., & Hildebrand, J. A. (2013). Temporal separation of two fin whale call types across the eastern North Pacific. *Marine Biology*. <https://doi.org/10.1007/s00227-012-2061-z>
- Southall, B. L., Finneran, J. J., Reichmuth, C., Nachtigall, P. E., Ketten, D. R., Bowles, A. E., Ellison, W. T., Nowacek, D. P., & Tyack, P. L. (2019). Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Updated Scientific Recommendations for Residual Hearing Effects. *Aquatic Mammals*, 45(2), 125–232. <https://doi.org/10.1578/AM.45.2.2019.125>
- Sutton, G., Jessopp, M., Clorennec, D., & Folegot, T. (2013). Mapping the Spatio-temporal Distribution of Underwater Noise in Irish Waters. STRIVE Report Series No. 121. In *EPA STRIVE Programme 2007-2013* (Issue March). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1673.1289>
- Todd, V., Todd, I. B., Gardiner, J. C., & Morrin, E. C. N. (2015). *Marine mammal observer & passive acoustic monitoring handbook* (O. S. C. Ltd (ed.)). Pelagic Publishing.