

***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)***

Suivi en phase d'installation

Identification du document

Référence du document	QO.20220106.10.RAP.02A
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	002	02	A	EDF-RE	PGL	28.11.2025	PROD	DR



Ocean Noise Forecasting Monitoring & Mitigation



Historique du document						
Ver	Ind.	Responsable	Date	Validation	Transmission	Description
01	A	J. Bellanger / J. Chompret	13.12.2023	D. Clorennec	12.01.2024	Version initiale
02	A	J. Chompret	25.11.2025		28.11.2025	Prise en compte commentaires EDF- RE

Citation

Bellanger J., Chompret J., Clorennec D.,(2024), 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), Suivi en phase d'installation, numéro QO.20220106.10.RAP.002.02A, 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	20
Chapitre IV. Analyse des niveaux sonores mesurés	23
IV.1. Période du 02/08 au 07/09/2023	23
IV.2. Période du 07/09 au 06/10/2023	31
IV.3. Analyse inter-saison	40
Chapitre V. Analyse spécifique des activités du chantier	42
V.1. Croisement des activités du chantiers avec les niveaux de bruit perçus	42
V.2. Estimation des niveaux sonores émis par le chantier	48
Chapitre VI. Détection des signaux biologiques	66
VI.1. Connaissances biologiques	66
VI.2. Portée de détection des enregistreurs acoustiques	72
VI.3. Procédé de traitement bioacoustique	74
VI.4. Résultats	75
VI.5. Limites et difficultés rencontrées	93
Chapitre VII. Conclusions	95
VII.1. Analyse des niveaux sonores	96
VII.2. Suivi des travaux	97
VII.3. Analyse de la fréquentation et du comportement des mammifères marins	98
VII.4. Synthèse à l'échelle du projet	99
Bibliographie	102
Annexes	103

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 : Protocole géographique des stations acoustiques.....	17
Figure 6 : Enregistreur acoustique autonome (à gauche) et ligne instrumentée avec son panier (à droite).	18
Figure 7 : Evolution des niveaux intégrés dans la bande [20Hz;40kHz] (exprimés en dB ref 1μPa ²) mesurés lors du suivi aout/septembre 2023.	25
Figure 8 : Corrélation du bruit permanent (orange) avec les conditions météorologiques (bleu) dans la zone d'étude lors du suivi aout/septembre 2023.....	25
Figure 9 : En haut, spectrogramme illustrant les opérations en régime stationnaire du Normand Installer en début de journée du 14/ Août 2023, à proximité du capteur de la station R2. En bas, évolution simultanée du niveau sonore exprimé dans la bande 20Hz-3kHz.	27
Figure 10 : Répartition fréquentielle de l'énergie acoustique mesurée lors du suivi aout/septembre 2023 (à gauche). Répartition horaire des émergences sonores lors du suivi aout/septembre 2023, au percentile 50% dans les bandes 89Hz-110Hz (au centre) et 7.1-8.9kHz (à droite).	30
Figure 11 : Evolution des niveaux intégrés dans la bande [20Hz;40kHz] (entre 20 Hz et 40 kHz, exprimés en dB ref 1μPa ²) mesurés lors du suivi septembre/octobre 2023.	32
Figure 12 : Corrélation du bruit permanent (orange) avec les conditions météorologiques (bleu) dans la zone d'étude lors du suivi septembre/octobre 2023.....	33
Figure 13 : En haut, spectrogramme du passage proche du navire projet « MULTRATUG 18 » à proximité de la station R3, dans la journée du 14 Septembre 2023. En bas, niveau sonore associé à ce passage de navire (20Hz-5kHz) exprimé en dB ref 1μPa ²	34
Figure 14 : Spectrogramme illustrant un moment calme dans la soirée du 10 Septembre 2023 à proximité de la station R1.....	35
Figure 15 : Répartition fréquentielle de l'énergie acoustique mesurée lors du suivi septembre/octobre 2023 (à gauche). Répartition horaire des émergences sonores lors du suivi septembre/octobre 2023, au percentile 50% dans les bandes 89Hz-110Hz (au centre) et 7.1-8.9kHz (à droite).	39
Figure 16 : Synthèse de la statistique des niveaux sonores par suivi et station.	41
Figure 17 : Schéma de placement des éléments temporaires et dédiés lors de l'installation d'une éolienne flottante.(source EDF-RE)	42
Figure 18 : Croisement des niveaux sonores large bande reçus lors du suivi des travaux d'installation avec les périodes de travaux déclarés.	45
Figure 19 : Corrélation entre le niveau de bruit reçu lors des travaux dans le tiers d'octave 125Hz (bleu) et la distance séparant le navire Normand Installer de chaque capteur acoustique (rouge).....	46
Figure 20 : Corrélation entre le niveau de bruit reçu lors des travaux dans le tiers d'octave 20kHz (bleu) et la distance séparant le navire Normand Installer de chaque capteur acoustique (rouge).....	47
Figure 21 : Protocole de traitement des données.....	48
Figure 22 : En haut, spectrogramme (20Hz-10kHz, exprimé en dB ref 1μPa ² /Hz) du bruit reçu lors d'un instant de référence, correspondant au bruit ambiant capté par l'hydrophone déployé en R2. En bas, évolution du niveau large bande (20Hz-10kHz, dB ref 1μPa ²) correspondant à la même fenêtre temporelle.	50
Figure 23 : niveaux reçus en fonction de la fréquence (dB ref 1μPa ² /Hz) lors de la pose des ancres de FOWT2 (médiane en bleu et distribution dans l'aire grise) comparés au bruit ambiant médian (jaune) et au bruit ambiant de référence (noir, P10% +6dB) utilisé pour l'inversion acoustique.....	52

Figure 24 : niveaux reçus en fonction de la fréquence (dB ref 1 μ Pa ² /Hz) lors de la pose des ballasts de FOWT2 (médiane en bleu et distribution dans l'aire grise) comparés au bruit ambiant médian (jaune) et au bruit ambiant de référence (noir, P10% +6dB) utilisé pour l'inversion acoustique	52
Figure 25 : Pose des ancres et des ballasts de FOWT2 dans la journée du 14/08/2023. En haut, spectrogramme (20Hz-10kHz, exprimé en dB ref 1 μ Pa ² /Hz) du bruit reçu lors des ateliers. En bas, évolution du niveau large bande (20Hz-10kHz, dB ref 1 μ Pa ²) correspondant.....	53
Figure 26 : Installation des dedicated lines de FOWT3 dans la journée du 23/08/2023. A- Niveaux reçus en fonction de la fréquence (dB ref 1 μ Pa ² /Hz) de l'atelier (médiane en bleu et distribution dans l'aire grise) comparés au bruit ambiant médian (jaune) et au bruit ambiant de référence (noir, P10% +6dB) utilisé pour l'inversion acoustique.	55
Figure 27 : Installation des bouées temporaires de FOWT3 les 24 et 25/08/2023. A- Niveaux reçus en fonction de la fréquence (dB ref 1 μ Pa ² /Hz) de l'atelier (médiane en bleu et distribution dans l'aire grise) comparés au bruit ambiant médian (jaune) et au bruit ambiant de référence (noir, P10% +6dB) utilisé pour l'inversion acoustique.	56
Figure 28 : Remorquage de FOWT3 le 11/09/2023. A- Niveaux reçus en fonction de la fréquence (dB ref 1 μ Pa ² /Hz) de l'atelier (médiane en bleu et distribution dans l'aire grise) comparés au bruit ambiant médian (jaune) et au bruit ambiant de référence (noir, P10% +6dB) utilisé pour l'inversion acoustique.	58
Figure 29 : Connexion des chaines d'ancrage de FOWT2 les 28 et 29/09/2023. A- Niveaux reçus en fonction de la fréquence (dB ref 1 μ Pa ² /Hz) de l'atelier (médiane en bleu et distribution dans l'aire grise) comparés au bruit ambiant médian (jaune) et au bruit ambiant de référence (noir, P10% +6dB) utilisé pour l'inversion acoustique.....	60
Figure 30 : Illustration du calcul des pertes acoustiques à la fréquence 500Hz.	61
Figure 31 : Estimation des niveaux de source émis à 1m en fonction de la fréquence, pour les ateliers étudiés (dB ref 1 μ Pa ² /Hz @1m). Les valeurs médianes sont tracées en bleu, et les dispersions sont tracées en gris (clair : min/max, foncé : médiane $\pm$ σ).	63
Figure 32 : Spectre des niveaux émis pour les ateliers étudiés (dB ref 1 μ Pa ² /Hz @1m).	64
Figure 33 : Cartographie de l'empreinte sonore large bande (11Hz-5.65kHz) du Normand Installer en opérations au niveau de l'éolienne FOWT3 au percentile 5%.....	65
Figure 34 : Schéma de la classification scientifique des espèces océaniques et marines de mammifères. Source : Quiet-Oceans.	67
Figure 35 : Famille des Delphinidés – Grand dauphin (<i>Tursiops truncatus</i>). Source : EcoOcéan Institut.	68
Figure 36 : Famille des Delphinidés – Dauphin commun (<i>Delphinus delphis</i>). Source : NOAA.	68
Figure 37 : Famille des Balénoptéridés – Rorqual commun (<i>Balaenoptera physalus</i>). Source : MICS.	68
Figure 38 : Famille des Physétéridés – Cachalot (<i>Physeter macrocephalus</i>). Source : AMP.	68
Figure 39 : Sifflements de Delphinidés émis entre 2 kHz et 25 kHz. Source : Quiet-Oceans.	69
Figure 40 : Clics de Delphinidés émis entre 10 kHz et 180 kHz. Source : Quiet-Oceans.	69
Figure 41 : 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.....	71
Figure 42 : Pulses émis par le Rorqual commun (<i>Balaenoptera physalus</i>).	71
Figure 43 : Clics de Cachalot macrocéphale (<i>Physeter macrocephalus</i>) entre 2 et 30 kHz. Source : Quiet-Oceans.	72
Figure 44 : Procédure générale appliquée à la donnée brute pour le traitement bioacoustique des enregistrements sonores.....	74
Figure 45 : Périodes de détections des clics et sifflements de Delphinidés en fonction du jour et de la nuit au niveau de chaque station (R1, R2 et R3) entre le 13 et 27 août 2023.....	77
Figure 46 : Sifflement de très faible intensité émis par un Delphinidé, Dauphin <i>sp.</i> , à proximité de la station R1. Enregistrement du 18/08/2023 vers 09h51 UTC.	78

Figure 47 : Trains de clics d'écholocation, buzz, sifflements et quelques cris pulsés émis par les Delphinidés évoquant une activité de chasse opportuniste à proximité de la station R3. Enregistrement du 29/08/2023 vers 09h40 UTC.....	78
Figure 48 : 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, R2 et R3) entre le 13 et 27 août 2023.	79
Figure 49 : 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 22/08/2023 vers 23h21 UTC.	80
Figure 50 : Pulses émis seuls par un Rorqual commun, <i>Balaenoptera physalus</i> , entre 27 Hz et 17 Hz (« 20-Hz signal ») à proximité de la station R2. Enregistrement du 26/08/2023 vers 18h36 UTC.	80
Figure 51 : 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 R3. Enregistrement du 17/08/2023 vers 23h21 UTC.	80
Figure 52 : Sifflements émis par le Grand Dauphin (<i>Tursiops truncatus</i>) entre 5 et 14 kHz le 26/08/2023 vers 09h45 UTC au niveau de la station R3.	81
Figure 53 : Périodes de détections des clics et sifflements de Delphinidés en fonction du jour et de la nuit au niveau de chaque station (R1, R2 et R3) entre le 22 septembre et 06 octobre 2023.	84
Figure 54 : Trains de clics d'écholocation émis par les Delphinidés entre 15 kHz et 120 kHz, au niveau de la station R3. Enregistrement du 05/10/2023 vers 04h35 UTC.	85
Figure 55 : Trains de clics de communication émis par les Delphinidés entre 15 kHz et 70 kHz, à proximité de la station R3. Enregistrement du 06/10/2023 vers 05h09 UTC.	85
Figure 56 : 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, R2 et R3) entre le 22 septembre et 06 octobre 2023.	86
Figure 57: 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 22/09/2023 vers 20h27 UTC.	87
Figure 58 : 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 R2. Enregistrement du 29/09/2023 vers 05h27 UTC.	87
Figure 59 : Pulses émis seuls par un Rorqual commun, <i>Balaenoptera physalus</i> , entre 27 Hz et 17 Hz (« 20-Hz signal ») à proximité de la station R3. Enregistrement du 04/10/2023 vers 16h33 UTC.	87
Figure 60 : Sifflements de faible intensité émis par le Grand Dauphin (<i>Tursiops truncatus</i>) entre 3 et 7 kHz le 26/09/2023 vers 16h23 UTC au niveau de la station R2.	88

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.....	20
Tableau 6 : Synthèse des données acoustiques collectées durant la campagne du 02/08/2023 au 07/09/2023.	21
Tableau 7 : Synthèse des données acoustiques collectées durant la campagne du 07/09/2023 au 06/10/2023.	22
Tableau 8 : Statistiques des niveaux sonores (20Hz -40 kHz) à la station R1 (exprimés en dB ref 1μPa ²) lors du suivi aout/septembre 2023.	25
Tableau 9 : Statistiques des niveaux sonores (20Hz -40 kHz) à la station R2 (exprimés en dB ref 1μPa ²) lors du suivi aout/septembre 2023.	26
Tableau 10 : Statistiques des niveaux sonores (20Hz -40 kHz) à la station R3 (exprimés en dB ref 1μPa ²) lors du suivi aout/septembre 2023.	26
Tableau 11 : Statistiques des niveaux sonores (20Hz -40 kHz) à la station R1 (exprimés en dB ref 1μPa ²) lors du suivi septembre/octobre 2023.	36
Tableau 12 : Statistiques des niveaux sonores (20Hz -40 kHz) à la station R2 (exprimés en dB ref 1μPa ²) lors du suivi septembre/octobre 2023.	36
Tableau 13 : Statistiques des niveaux sonores (20Hz -40 kHz) à la station R3 (exprimés en dB ref 1μPa ²) lors du suivi septembre/octobre 2023.	36
Tableau 14 : Définition des périodes temporelles et des capteurs retenus pour l'inversion acoustique.	49
Tableau 15 : Estimation des niveaux de source intégrés dans la bande 20Hz-40kHz (dB ref 1μPa ² @1m) pour chaque atelier.....	64
Tableau 16 : 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.....	68
Tableau 17 : 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.....	70
Tableau 18 : 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.	73
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'automne 2023.	73
Tableau 20 : Définition des indicateurs de la fréquentation par les mammifères marins adaptés à la durée d'acquisition.	75
Tableau 21 : Synthèse des résultats quant à la présence des mammifères marins entre le 13 et 27 août 2023 au niveau des stations de mesure R1, R2 et R3. Ces résultats ont été obtenus suite à l'analyse des détections réalisées dans la donnée des enregistreurs acoustiques (enregistrement en continu). ..	82
Tableau 22 : Synthèse des résultats quant à la présence des mammifères marins entre le 22 septembre et 06 octobre 2023 au niveau des stations de mesure R1, R2 et R3. Ces résultats ont été obtenus suite à l'analyse des détections réalisées dans la donnée des enregistreurs acoustiques (enregistrement en continu).	89
Tableau 23 : Synthèse des résultats quant à la présence de mammifères marins durant l'Etat de Référence (hiver et été 2023) et la phase d'installation du projet (été et automne 2023) au niveau des stations R1 et R3. Ces résultats ont été obtenus suite à l'analyse des détections réalisées par les enregistreurs acoustiques (enregistrement en continu). Le taux de classification est calculé sur la base du nombre	



d'enregistrements considérés « vrais positifs » c'est-à-dire avec présence confirmée de signatures
acoustiques.....92

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).101

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.

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 μPa (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 μPa^2 .

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.



*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)

Suivi en phase d'installation

Référence : QO.20220106.10.RAP.002.02A

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 du parc éolien flottant Provence Grand Large (PGL) vise à raccorder trois éoliennes flottantes au large de Fos-sur-Mer. Quiet-Oceans a été mandatée pour le suivi acoustique passif ainsi que le suivi de la fréquentation des mammifères marins par acoustique passive à proximité de la zone de travaux (Figure 1) lors de la phase d'installation du parc. Cette étude fait suite à la phase état de référence acoustique réalisée en 2023 (Clorennec et al., 2023).

Les objectifs de cette étude en phase d'installation 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 ;
- ✓ Estimer l'impact acoustique des travaux en regard de l'état de référence ;
- ✓ Cartographier l'empreinte sonore des travaux;
- ✓ Caractériser la fréquentation du site par les mammifères marins et les comportements associés.

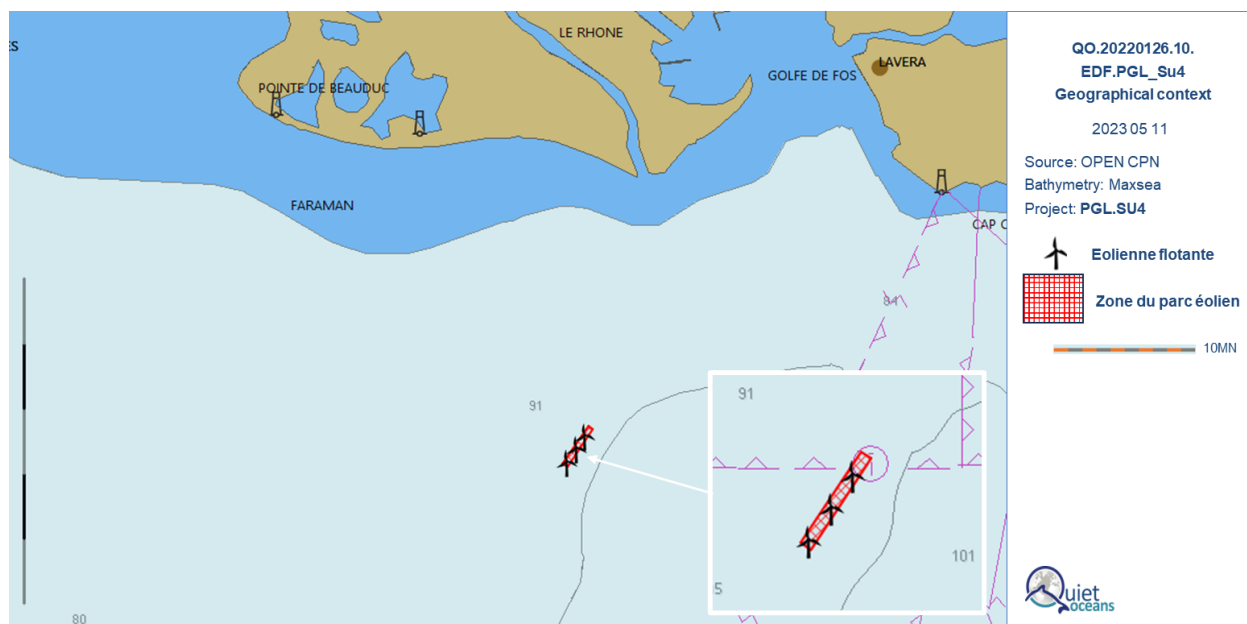


Figure 1 : Contexte géographique de l'étude.

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.

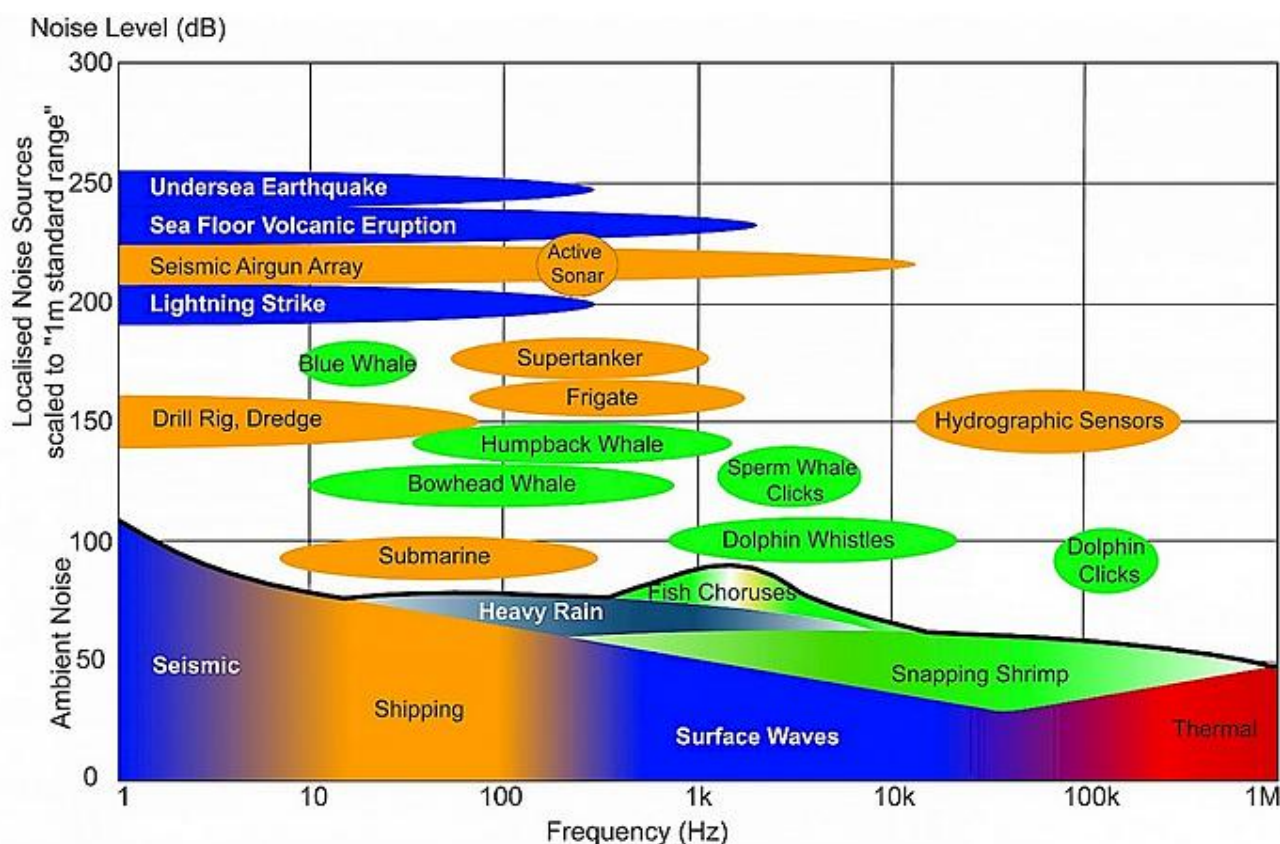


Figure 2 : Echelle qualitative des niveaux (émis à un mètre) et fréquences des sources sonores anthropiques, biologiques et naturelles dans le milieu marin. Source : OSPAR.

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.

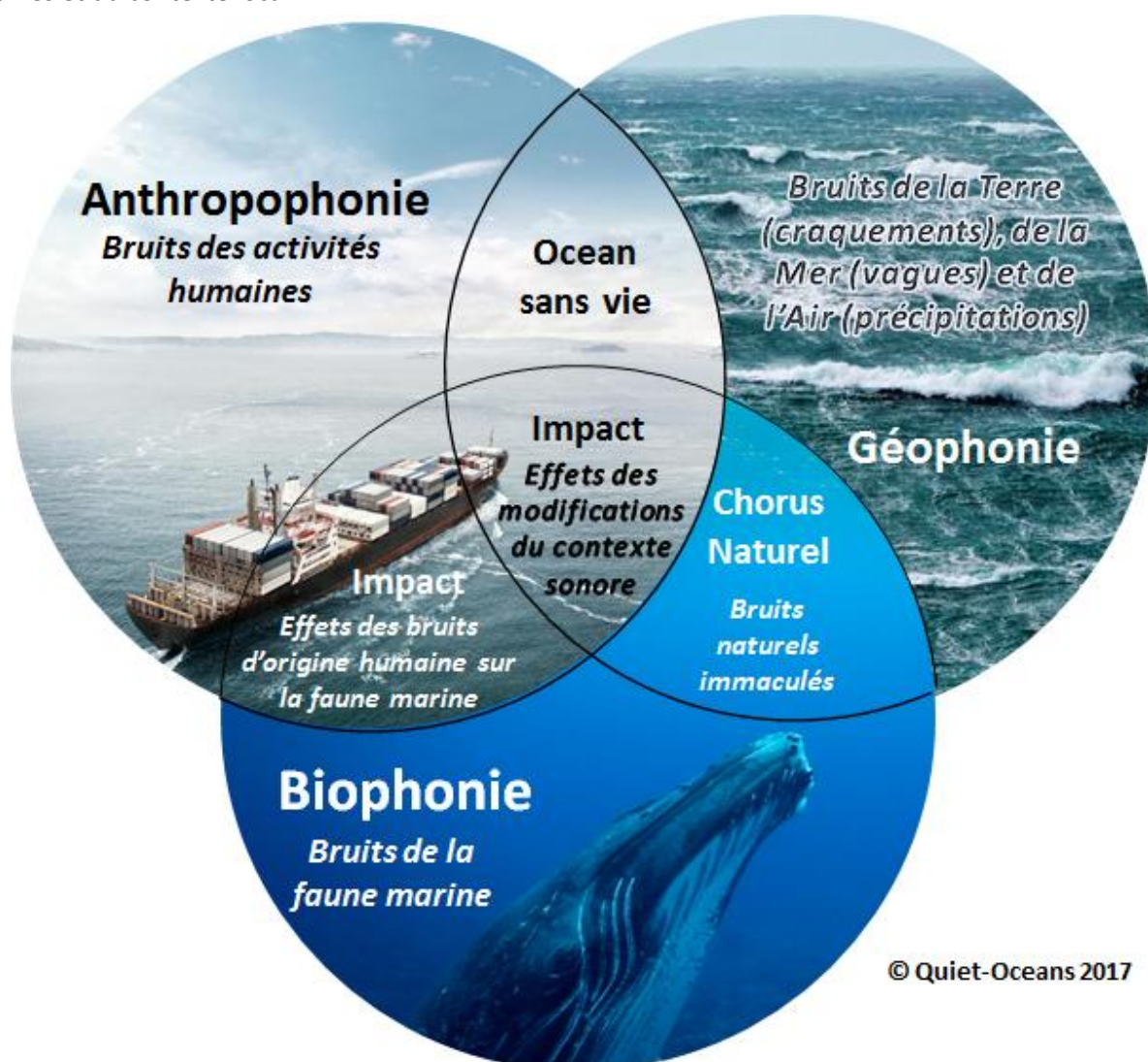


Figure 3 : Composition du chorus sonore sous-marin.

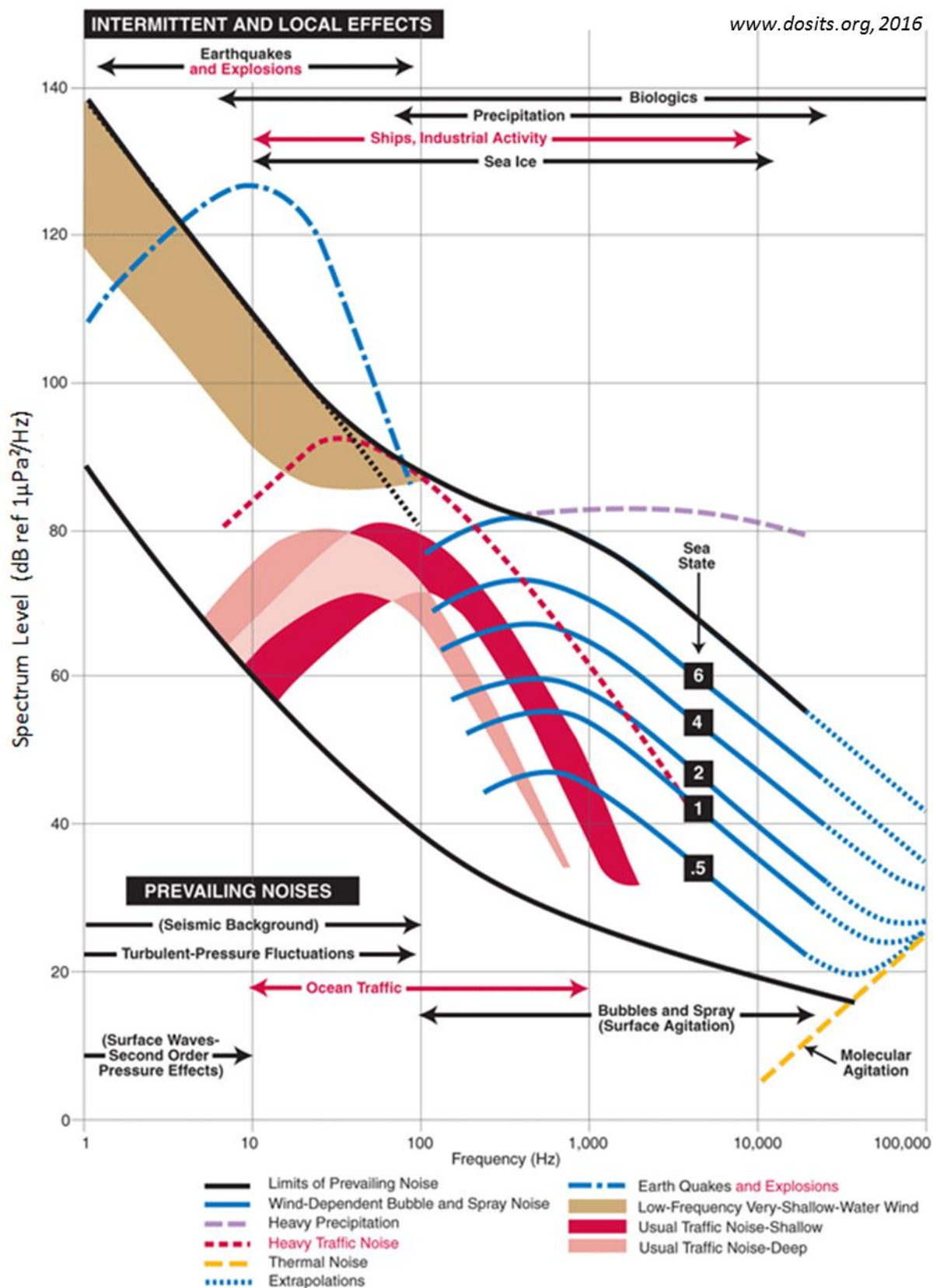


Figure 4 : Synthèse des niveaux de bruit typiques en fonction de la fréquence et de la nature de la source de bruit. Ces valeurs peuvent être très dépendantes du site, de la saison, et du contexte . Source (Dosits.org, 2016).

Chapitre III. Protocole de mesures acoustiques

Afin de qualifier le bruit existant et caractériser la fréquentation du site par les mammifères marins lors de la phase d'installation, 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 quatre stations sur une durée cumulée de deux mois (deux périodes d'un mois réparties sur deux saisons).

Pour chacune de ces mesures par acoustique passive, les objectifs opérationnels concernent le déploiement de quatre lignes de mouillage équipées d'un enregistreur acoustique autonome, immergé à une profondeur intermédiaire dans la colonne d'eau. Chacun de ces systèmes acoustiques est déployé pour une durée minimale de 30 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 5 illustre la position de ces différentes zones de mesures acoustiques pour l'état de référence.

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.

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 centre 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

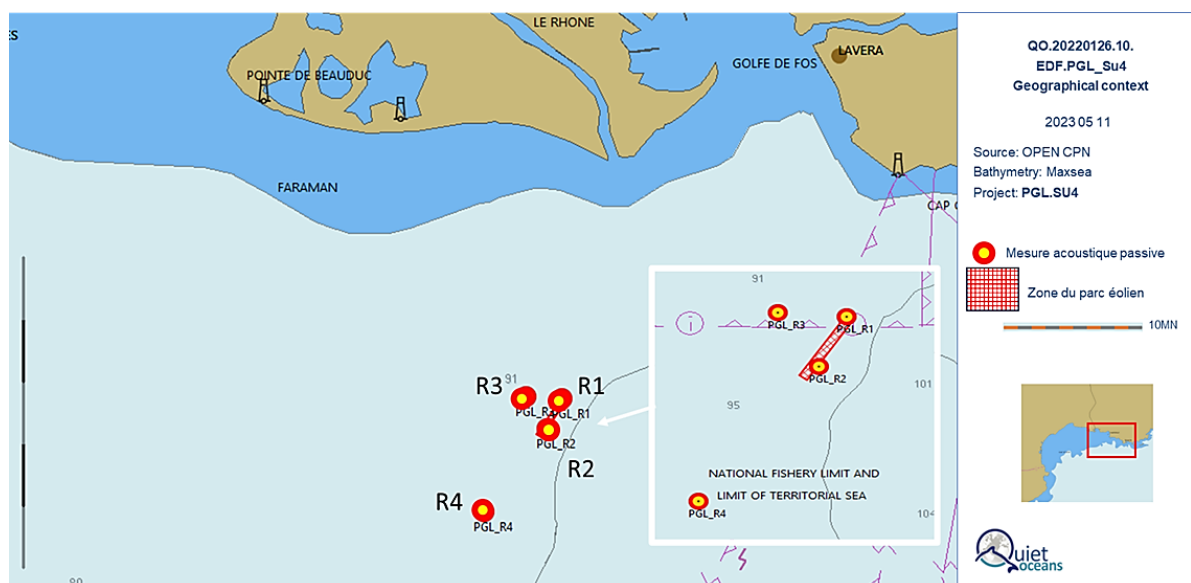


Figure 5 : Protocole géographique des stations acoustiques.

III.1. Les systèmes de mesure

Des enregistreurs acoustiques autonomes sont utilisés pour capturer une série temporelle significative. Une sonde CTD, déployée ponctuellement, permet d'obtenir localement le profil de célérité du son dans la colonne d'eau

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 6 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 6 : 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.

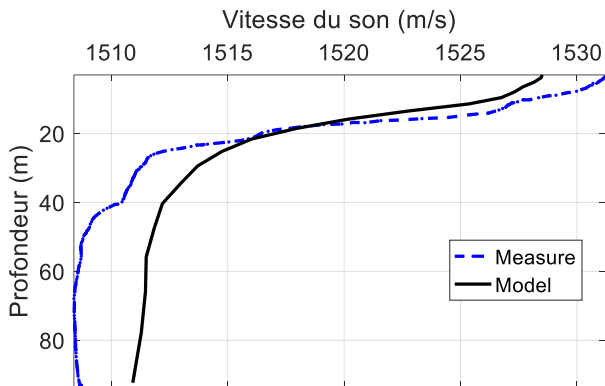
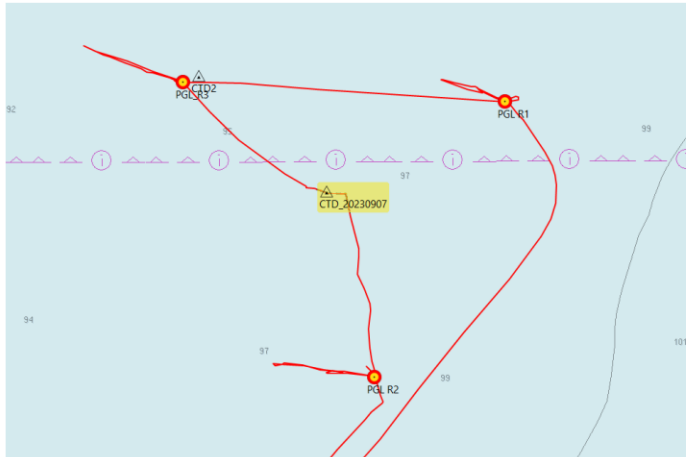
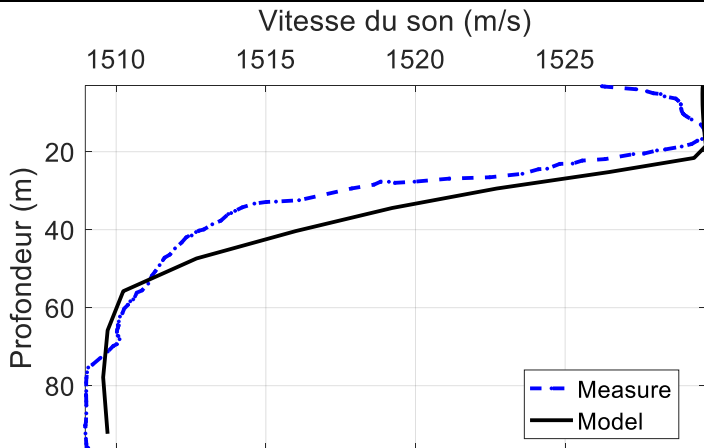
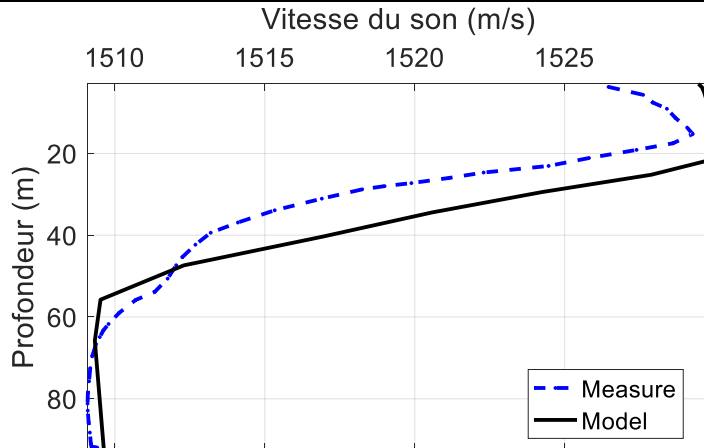
Globalement, ces profils montrent un bon accord entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites par la plateforme de prédiction, la différence provient uniquement de l'écart absolu des valeurs. Ces écarts n'induisent pas d'augmentation quant à l'incertitude sur la cartographie du bruit. L'information prépondérante est la différence de vitesse relative dans la colonne d'eau qui influence l'orientation de 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 à l'échelle 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.

	Equidistance R1, R2 et R3		Localisation du point	
	Vitesse du son (m/s) 			
07/09/2023 (LEG05)				
	Station R2		Station R3	
	Vitesse du son (m/s) 		Vitesse du son (m/s) 	
06/10/2023 (LEG06)				

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)
04	03	02.08.2023	Déploiement	R1, R2, R3 et R4
05	03 et 04	07.09.2023	Relevage/déploiement	R1, R2, R3 et R4
06	04	06.10.2023	Relevage	R1, R2, et R3

III.2.1. Campagne du 02/08 au 07/09/2023

Durant cette période (été 2023), un total de quatre enregistreurs acoustiques passifs ont été déployés, soit un enregistreur acoustique au niveau de chaque station du 02 août au 07 septembre 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 de 36 jours pour les enregistreurs des stations R1, R2 et R3.

Le mouillage déployé au niveau de la station R4 a été chaluté, entraînant par conséquent la perte des données associées. 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.LEG05.pdf.

Tableau 6 : Synthèse des données acoustiques collectées durant la campagne du 02/08/2023 au 07/09/2023.

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-051	02.08.2023	07.09.2023	36	36	2376	1406	043°12.138'N	004°48.183' E	50	97,5
R2	ENR-049	02.08.2023	07.09.2023	36	36	2411	1422	043°11.049'N	004°47.573'E	50	98
R3	ENR-046	02.08.2023	07.09.2023	36	36	2410	1388	043°12.210'N	004°46.614'E	50	94
R4	ENR-050	02.08.2023	07.09.2023	N/A	N/A	N/A	N/A	043°08.486' N	004°44.777' E	50	95

	Données acoustiques collectées
	Données en attente de récupération
	Absence de données

III.2.2. Campagne du 07/09 au 06/10/2023

Durant cette période (automne 2023), un total de quatre enregistreurs acoustiques passifs ont été déployés, soit un enregistreur acoustique dans chaque zone du 07 septembre au 06 octobre 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 23 jours pour chaque enregistreur acoustique.

Conformément à la politique de rechange (spare) du projet, aucun enregistreur n'a été déployé à la station R4 lors du LEG 05, entraînant de ce fait l'absence de données collectées. 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.LEG06.pdf.

¹ Les fichiers sont au format audio de type flac.

Tableau 7 : Synthèse des données acoustiques collectées durant la campagne du 07/09/2023 au 06/10/2023.

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-064	07.09.2023	01.10.2023	23	23	1640	983	043°12.136'N	004°48.181' E	50	98,1
R2	ENR-047	07.09.2023	06.10.2023	23	23	1914	950	043°11.150'N	004°47.554'E	50	97
R3	ENR-048	07.09.2023	06.10.2023	23	23	1917	1112	043°12.204'N	004°46.614'E	50	94
R4	Pas de déploiement										

	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 filtrée de 20Hz à 40kHz ainsi qu'une caractérisation fréquentielle. Une analyse des niveaux sonores de la phase d'installation du parc est réalisée à partir des données collectées par les enregistreurs acoustiques dans chaque zone d'étude et pour chaque campagne (été et automne 2023).

IV.1. Période du 02/08 au 07/09/2023

IV.1.1. Analyse statistique du bruit ambiant

La Figure 7 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. 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.

En dehors des périodes de travaux effectifs, il apparaît que le bruit permanent fluctue entre 100 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 8).

Globalement, tous les capteurs ont perçu le bruit produit par le transit des navires rattachés aux travaux de pose des ancrs du parc Provence Grand Large. Ces opérations ont conduit à des augmentations de longue durée (jusqu'à plusieurs jours) du bruit jusqu'à des niveaux compris entre 120 et 140dB ref $1\mu\text{Pa}^2$, selon la distance entre les navires rattachés au projet et les capteurs acoustiques.

La signature acoustique prépondérante associée à ces passages des navires du chantier sont observables à différentes périodes :

- ✓ Du 02 au 07 Août ;
- ✓ Du 13 au 17 Août ;
- ✓ Du 19 au 25 Août.

Lors de ces périodes, le bruit naturel est partiellement masqué par le bruit du chantier. Une analyse plus fine de la corrélation entre les activités liées à l'installation du parc éolien et les niveaux sonores perçus par les capteurs est présentée. En fonction de la distance entre les capteurs acoustique, les passages proches et ponctuels des navires rattachés au projet font épisodiquement émerger les niveaux sonores jusqu'à 144.1dB ref $1\mu\text{Pa}^2$.

Afin de synthétiser l'information sur les niveaux sonores, les Tableau 8, Tableau 9, et Tableau 10 donnent la répartition statistique du bruit intégrés dans la bande de fréquence de 20 Hz à 40 kHz durant la période estivale 2023, pour chaque station :

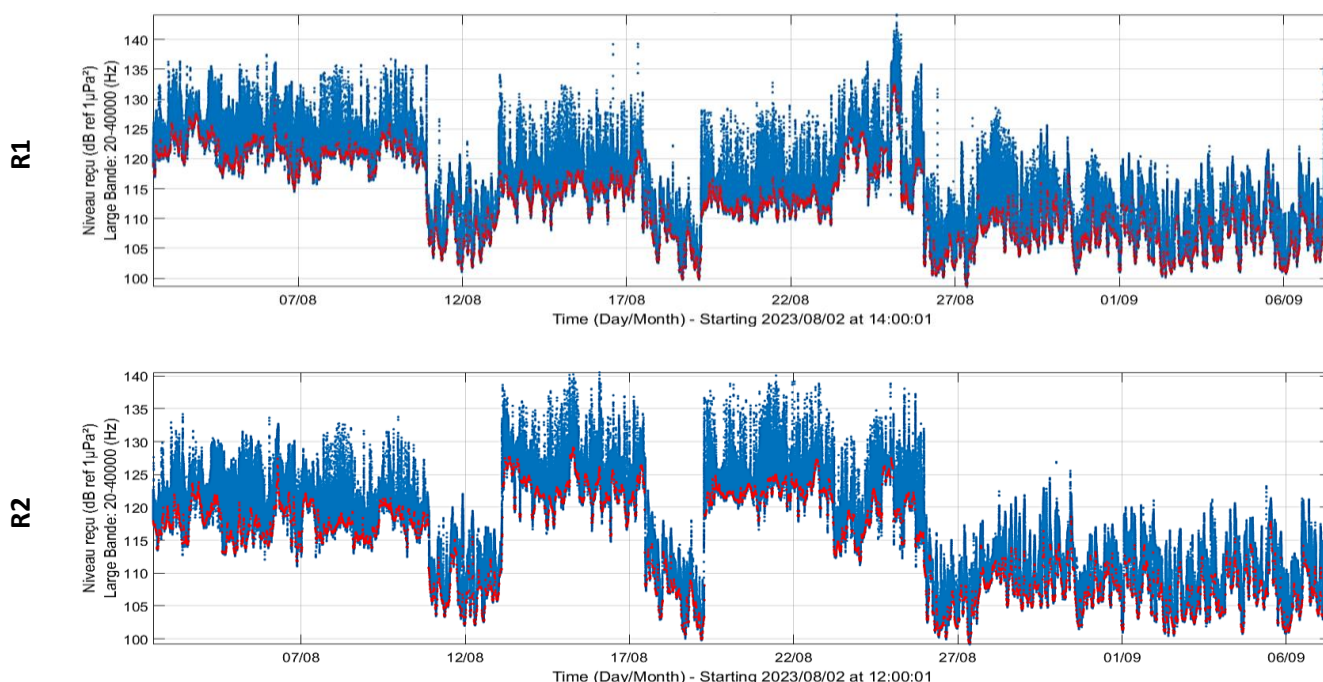
- ✓ Les niveaux faibles (99% du temps) sur cette période sont de 102.3 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R1), 102.4 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R2) et 102.1 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3).
- ✓ Les niveaux médians (50% du temps) sur cette période sont de 115.4 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R1), 117.8 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R1) et 113.8 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3). La station R2, placée au plus près des travaux, voit ses niveaux médians supérieurs aux autres stations.
- ✓ Les niveaux les plus forts et rares (percentile 1%) sur la période sont de 131.7 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R1), 130.7 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R2) et 124.2 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3). En comparaison des autres stations, la station R3, davantage éloignée des travaux de pose des ancrs voit des niveaux sonores plus limités (-6 à -7dB).

En comparaison de la période estivale de l'état de référence (Juillet 2023), les travaux induisent une augmentation médiane des niveaux sonores de +5.8dB au niveau de la station R1, et de +4.5dB au niveau de la station R3. Concernant les niveaux très rares et forts (percentile 1%), les travaux induisent une augmentation des niveaux sonores de +11.5dB au niveau de la station R1, et de +4.6dB au niveau de la station R3.

La différenciation jour/nuit permet également de mettre en évidence un accroissement modéré des niveaux de bruits le jour (de +1.0dB à +2.7dB) au percentile médian pour toutes les stations.

La Figure 9 trace le spectrogramme du bruit perçu par le capteur acoustique de la station R2 lors d'une phase de travail stationnaire du navire projet NORMAND INSTALLER, en début de journée du 14 Août 2023 :

- ✓ Hors phases de positionnement dynamique, le bruit est continu et produit une élévation d'environ +20dB par rapport au pied de bruit courant sur zone, avec un niveau moyen proche de 120 dB ref 1 μ Pa² ;
- ✓ Son énergie est localisée dans une bande de fréquence entre 0 et 1kHz, avec des émergences visibles jusqu'à environ 3kHz ;
- ✓ Par intermittence, le navire utilise son système de positionnement dynamique. Le niveau sonore augmente alors de +4 à +5 dB avec des niveaux absolus allant jusqu'à 124dB ref 1 μ Pa² ; le maximum d'énergie est compris dans la bande de fréquence entre 50 et 500Hz, et correspond au bruit des propulseurs.



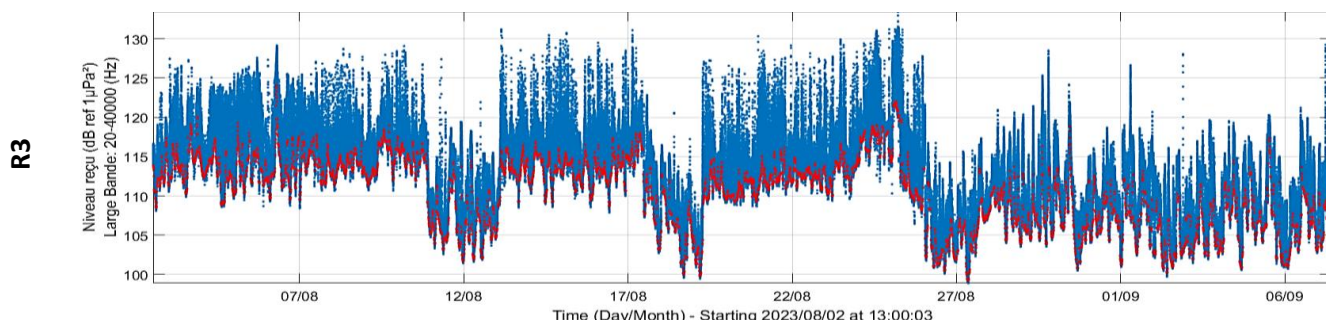


Figure 7 : Evolution des niveaux intégrés dans la bande [20Hz;40kHz] (exprimés en dB ref 1µPa²) mesurés lors du suivi aout/septembre 2023.

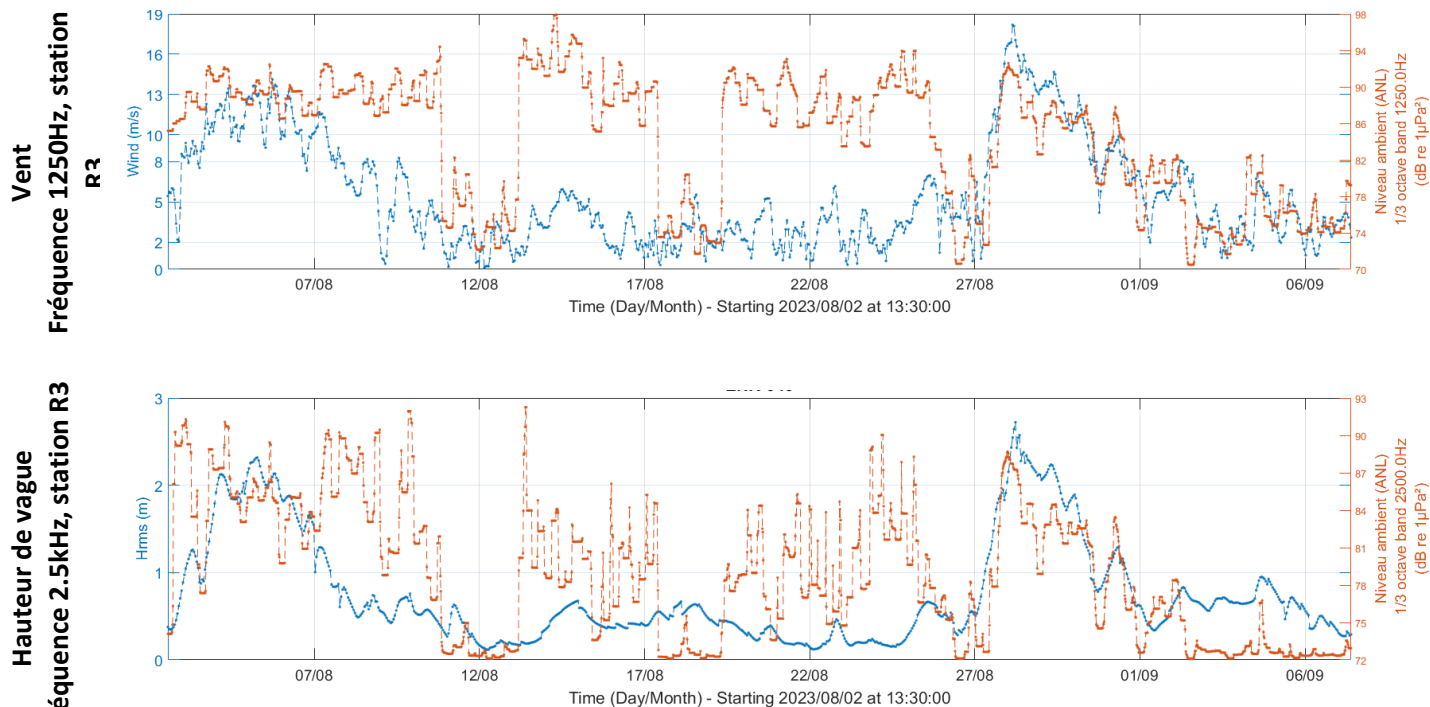


Figure 8 : Corrélation du bruit permanent (orange) avec les conditions météorologiques (bleu) dans la zone d'étude lors du suivi aout/septembre 2023.

Tableau 8 : Statistiques des niveaux sonores (20Hz -40 kHz) à la station R1 (exprimés en dB ref 1µPa²) lors du suivi aout/septembre 2023.

		Niveau très courant			Niveau Médian			Niveau très rare		
Percentile (%)		100	99	90	75	50	25	10	1	0
R1	Toute la période	98.5	102.3	106.2	110.0	115.4	121.5	125.1	131.7	144.1
	Jour	98.5	102.0	106.4	110.5	115.9	121.5	125.5	131.6	144.1
	Nuit	100.7	102.6	105.8	109.2	114.4	121.3	124.5	131.7	141.4
	Ecart Jour/Nuit	-2.2	-0.6	0.6	1.3	1.5	0.2	1.0	-0.1	2.8

Tableau 9 : Statistiques des niveaux sonores (20Hz -40 kHz) à la station R2 (exprimés en dB ref 1μPa²) lors du suivi aout/septembre 2023.

	Percentile (%)	Niveau très courant			Niveau Médian			Niveau très rare		
		100	99	90	75	50	25	10	1	0
R2	Toute la période	99.1	102.4	106.3	109.9	117.8	123.4	126.3	130.7	140.5
	Jour	99.1	102.2	106.5	110.5	118.9	124.0	126.8	130.9	140.2
	Nuit	100.8	102.8	105.9	109.0	116.1	122.6	125.5	129.9	140.5
	Ecart Jour/Nuit	-1.6	-0.5	0.6	1.6	2.7	1.4	1.3	1.0	-0.3

Tableau 10 : Statistiques des niveaux sonores (20Hz -40 kHz) à la station R3 (exprimés en dB ref 1μPa²) lors du suivi aout/septembre 2023.

	Percentile (%)	Niveau très courant			Niveau Médian			Niveau très rare		
		100	99	90	75	50	25	10	1	0
R3	Toute la période	98.9	102.1	105.8	109.1	113.8	116.7	119.1	124.2	133.5
	Jour	98.9	101.8	105.9	109.7	114.2	117.1	119.6	124.5	133.5
	Nuit	100.7	102.4	105.3	108.3	113.1	116.3	118.5	123.9	131.2
	Ecart Jour/Nuit	-1.8	-0.6	0.6	1.4	1.0	0.7	1.1	0.6	2.3

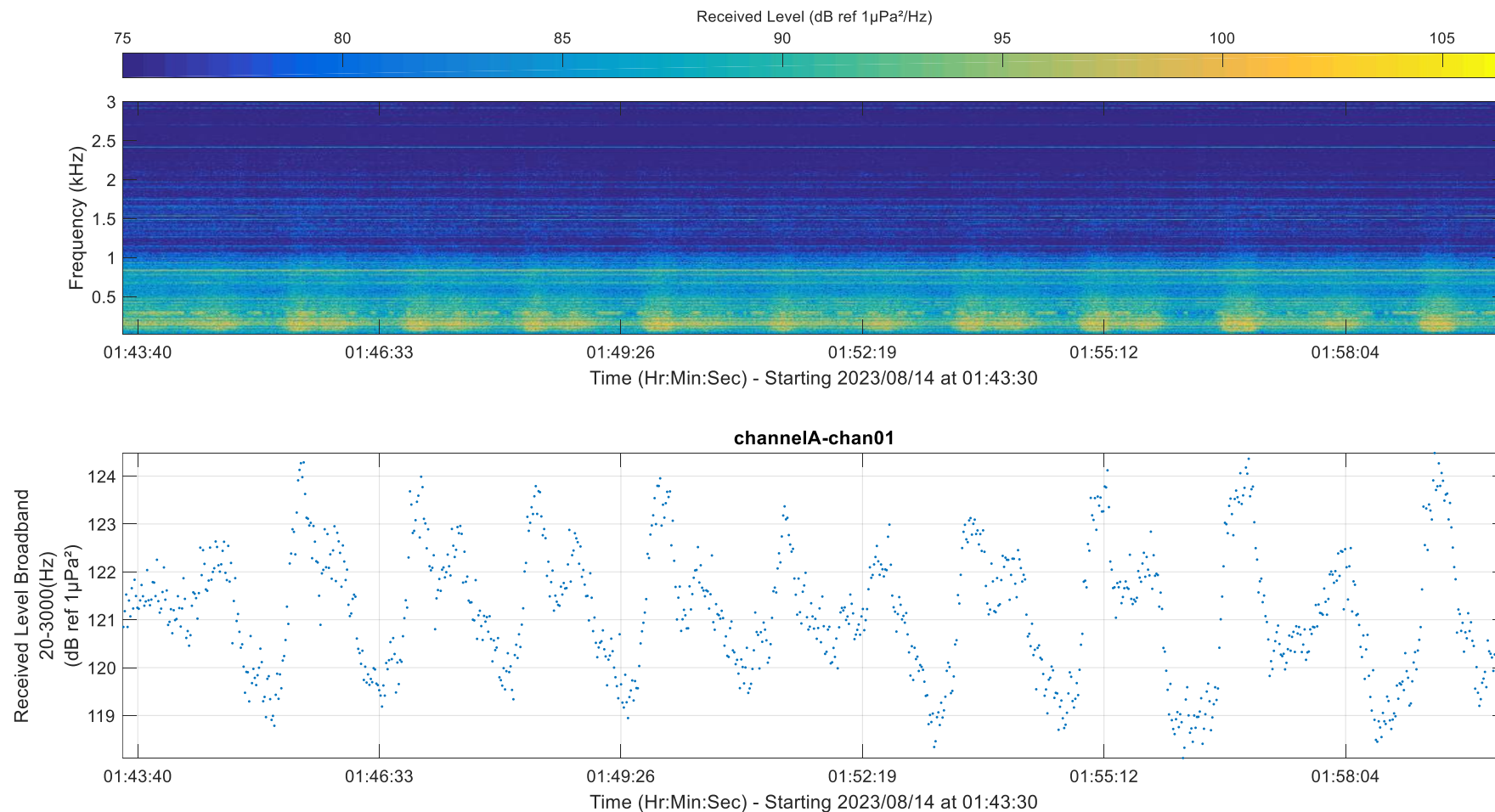


Figure 9 : En haut, spectrogramme illustrant les opérations en régime stationnaire du Normand Installer en début de journée du 14/ Août 2023, à proximité du capteur de la station R2. En bas, évolution simultanée du niveau sonore exprimé dans la bande 20Hz-3kHz.

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

La Figure 10 (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 l'activité des navires projets lors des travaux de pose des ancres, et crée une bosse de bruit significative entre 20 Hz et 1000 Hz avec des niveaux compris entre 90 et 105 dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ pour les stations R1 et R2 et entre 90 et 100dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ pour la station R3. A noter que la contribution acoustique des activités du chantier est visible jusqu'à la fréquence de 40 kHz, avec un profil de bruit reçu proche entre les stations R1 et R2.
- ✓ 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, la composante anthropique entre 20 et 1000 Hz reste visible avec des niveaux compris entre 65 et 80 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ pour le percentile 90%, et 70 et 90dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ pour le percentile 50%. Cette composante résulte ici de la compétition du trafic maritime en entrée et en sortie du port de Fos sur Mer, visible dans la bosse de bruit à 63Hz (75-80dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$), et les activités des navires rattachés au projet. Les courbes montrent cependant une bonne corrélation avec le modèle de Wenz pour les fréquences supérieures à 1000Hz pour les percentiles 90 et 99%.
- ✓ 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 50dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ selon la station étudiée.

Globalement, le bruit induit par les travaux a eu un effet sur la totalité du spectre du bruit reçu au moins 50% du temps. Une proportion comprise entre 10 et 50% du temps, les fréquences inférieures à 1000Hz sont dominées par les activités anthropiques du chantier, tandis que les fréquences supérieures sont dominées par les effets météorologiques et la vie benthique. Les stations R1 et R2 (dans le parc) montrent une répartition spectrale du bruit reçu très similaire.

La partie centrale de la Figure 10 montre les variations horaires des émergences sonores dans la bande de fréquence spécifique de 89 Hz à 110 Hz, au percentile 10%. Cette bande de fréquence représentative des activités anthropiques, permet de mettre en évidence un accroissement relatif du niveau sonore de +3 à +4 dB entre 06h00 et 20h00 UTC au niveau des stations R1 et R2. Ces conclusions coïncident avec les émergences diurnes constatées lors de l'analyse du bruit intégré dans la bande [20Hz;40kHz].

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 généralement de l'activité des organismes benthiques. Elle permet de mettre en évidence un accroissement relatif nocturne du niveau sonore, variant de +2 à +4 dB entre 18h00 et 06h00 UTC au niveau des stations R1, R2 et R3. A cette fréquence, les niveaux les plus faibles sont observés vers 16h UTC sur les trois stations.

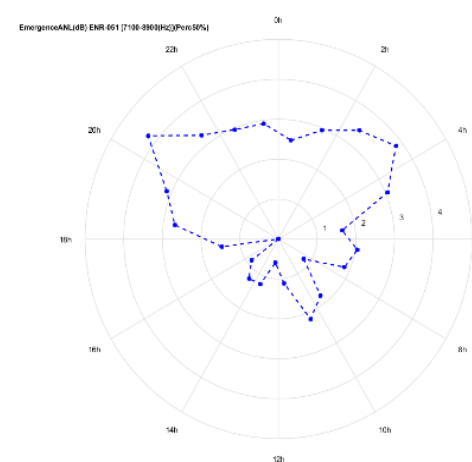
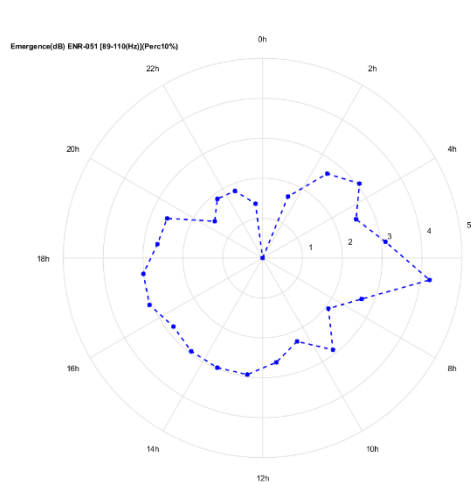
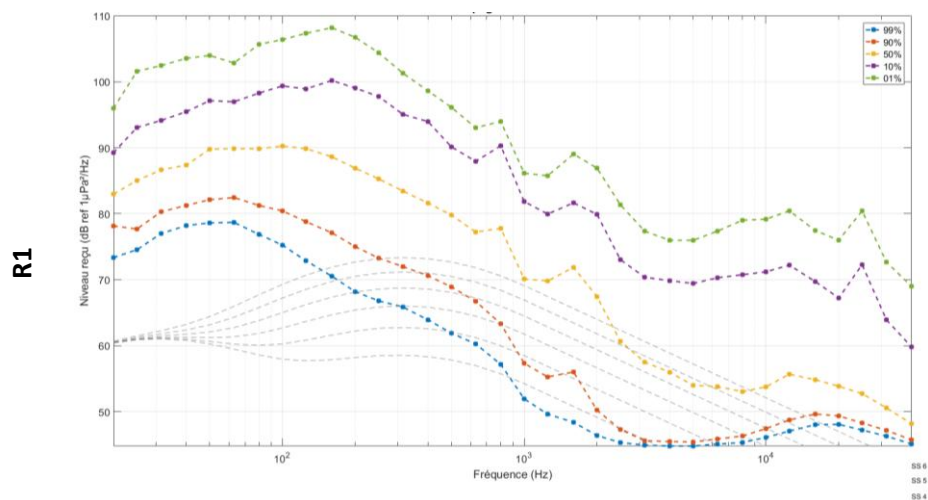
Vent/vagues

Navires

Activité benthique

89Hz - 110Hz Percentile 10%

7.1-8.9kHz Percentile 50%



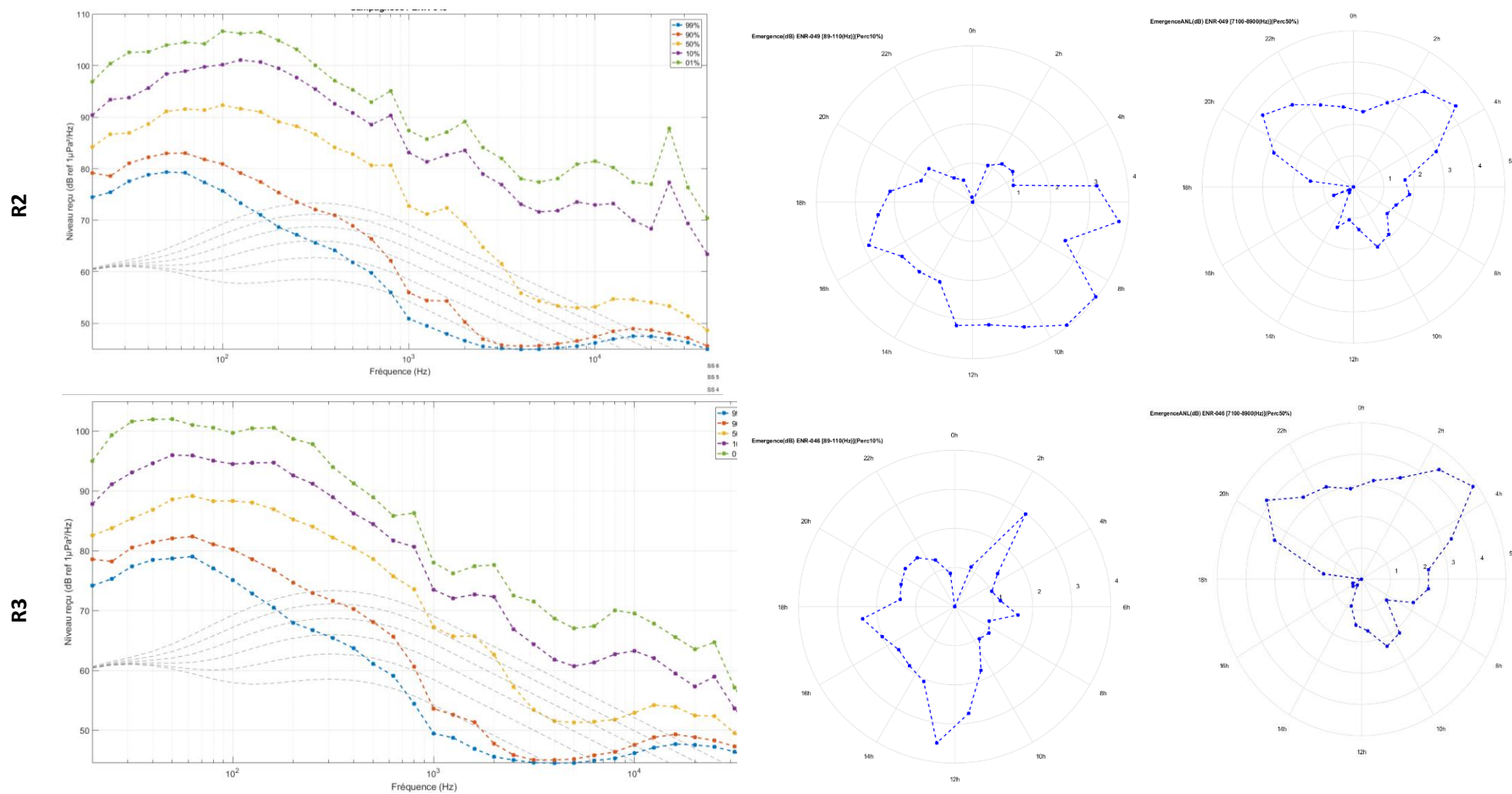


Figure 10 : Répartition fréquentielle de l'énergie acoustique mesurée lors du suivi aout/septembre 2023 (à gauche). Répartition horaire des émergences sonores lors du suivi aout/septembre 2023, au percentile 50% dans les bandes 89Hz-110Hz (au centre) et 7.1-8.9kHz (à droite).

IV.2. Période du 07/09 au 06/10/2023

IV.2.1. Analyse statistique du bruit ambiant

La Figure 11 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 allant du 07 Septembre au 06 Octobre 2023. En complément, la courbe rouge superposée montre l'évolution du niveau de bruit permanent ou « pied de bruit ». En dehors des périodes de travaux effectives (par exemple du 7 au 11 Septembre 2023), 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 précédent, 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 12).

Dans la majorité de la période temporelle étudiée, tous les capteurs ont perçu le bruit produit par les opérations des navires rattachés aux travaux d'installation du parc éolien. Ces opérations ont conduit à des augmentations de longue durée (jusqu'à plusieurs jours) du bruit jusqu'à des niveaux compris entre 120 et 140dB ref $1\mu\text{Pa}^2$, selon la distance entre les navires rattachés au projet et les capteurs acoustiques. Lors de ces périodes, le bruit naturel est partiellement masqué par le bruit du chantier.

En fonction de la distance entre les capteurs acoustique, les passages proches et ponctuels des navires rattachés au projet font épisodiquement émerger les niveaux sonores jusqu'à 148.1dB ref $1\mu\text{Pa}^2$.

Une analyse plus fine de la corrélation entre les activités liées à l'installation du parc éolien et les niveaux sonores perçus par les capteurs est présentée.

La Figure 13 illustre sous forme de spectrogramme le passage très proche du navire projet « MULTRATUG 18 » de la station R3 dans la journée du 14 Septembre 2023. Cet instant correspond au maximum d'énergie acoustique mesuré en R3 :

- ✓ La phase d'approche met en évidence une émergence dépendant de la distance entre le navire et le capteur, avec une composante continue à 600Hz. Un bruit résiduel basse fréquence (<1kHz) est causé probablement par les travaux à proximité du capteur.
- ✓ Au minimum de distance (CPA, à environ 40m du capteur acoustique), une augmentation courte (30s) du niveau sonore est visible jusqu'à 145 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 3kHz avec un maximum d'énergie pour les fréquences inférieures à 1 kHz, qui correspond au bruit de propulsion du navire ;
- ✓ 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).

Par opposition, la Figure 14 trace le spectrogramme d'un instant calme recensé au niveau de la station R1, dans la journée du 10 Septembre 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. Le niveau sonore est alors d'environ 106dB ref $1\mu\text{Pa}^2$, soient environ 14dB de moins que le niveau médian sur zone.

Afin de synthétiser l'information sur les niveaux sonores, les Tableau 11, Tableau 12 et Tableau 13 donnent la répartition statistique du bruit intégrés dans la bande de fréquence de 20 Hz à 40 kHz durant la période automnale 2023, pour chaque station :

- ✓ Les niveaux faibles (99% du temps) sur cette période sont de 102.2 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R1), 102.7 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R2) et 102.3 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3) ;

- ✓ Les niveaux médians (50% du temps) sur cette période sont de 120.8 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R1), 120.1 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R2) et 115.7 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R4) . A l'identique du suivi précédent, la station R3 perçoit environ 5dB de moins que les autres ;
- ✓ Les niveaux les plus forts et rares (percentile 1%) sur la période sont de 131.8 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R1), 133.8 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3) et 125.5 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R4). En comparaison des autres stations, la station R3, davantage éloignée des travaux voit des niveaux sonores plus modérés (-6 à -8dB) ;

En comparaison de la période estivale (Juillet) de l'état initial, les travaux ont fait augmenter les niveaux sonores de +11.2dB à la station R1, et de +6.4dB à la station R3 au percentile 50%. Concernant le percentile 1%, les travaux ont fait augmenter les niveaux sonores de +11.6dB à la station R1, et de +5.9dB à la station R3.

La différenciation jour/nuit permet également de mettre en évidence un accroissement modéré des niveaux de bruit le jour (+2.1dB) au percentile 1% pour la station R3.

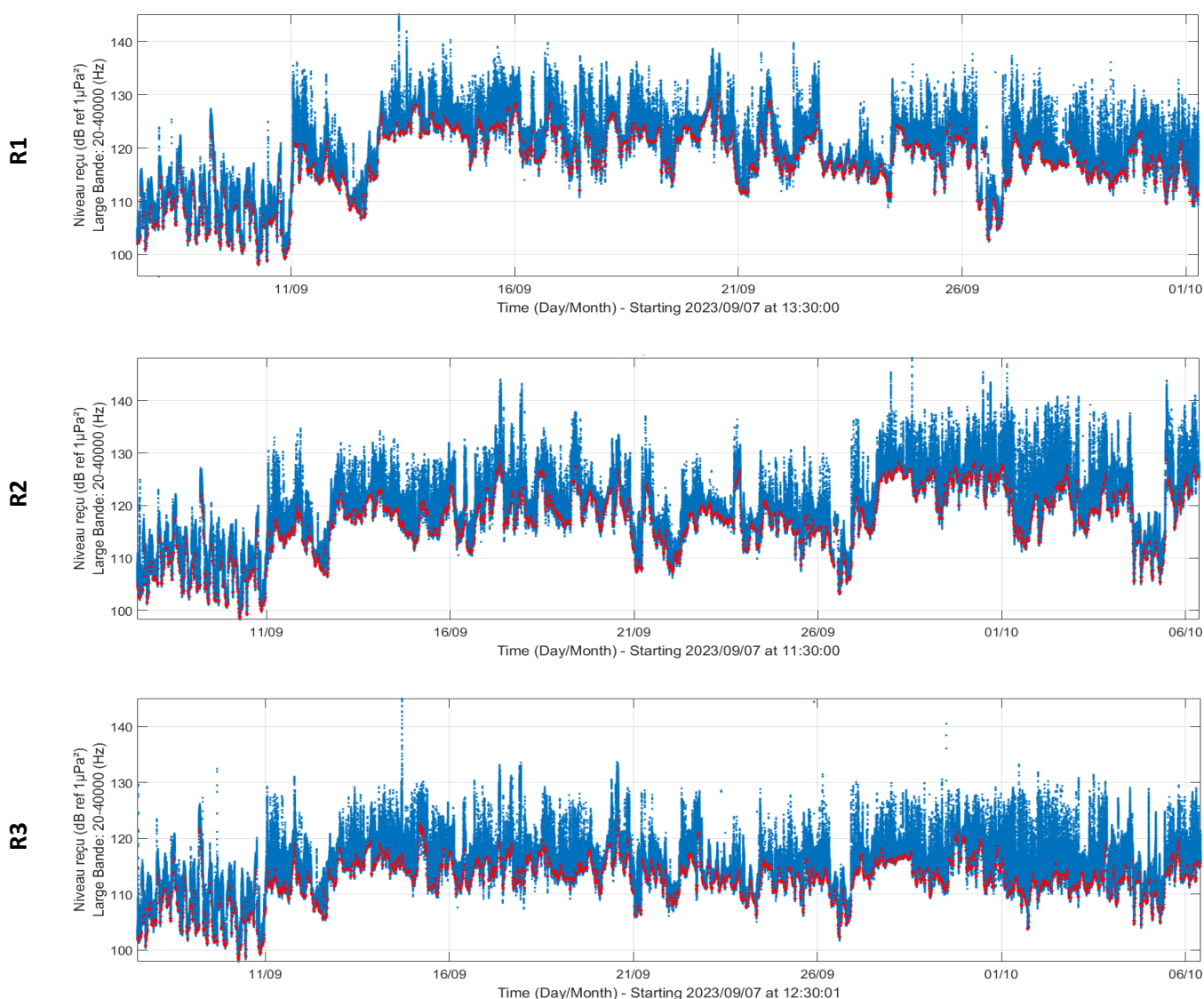
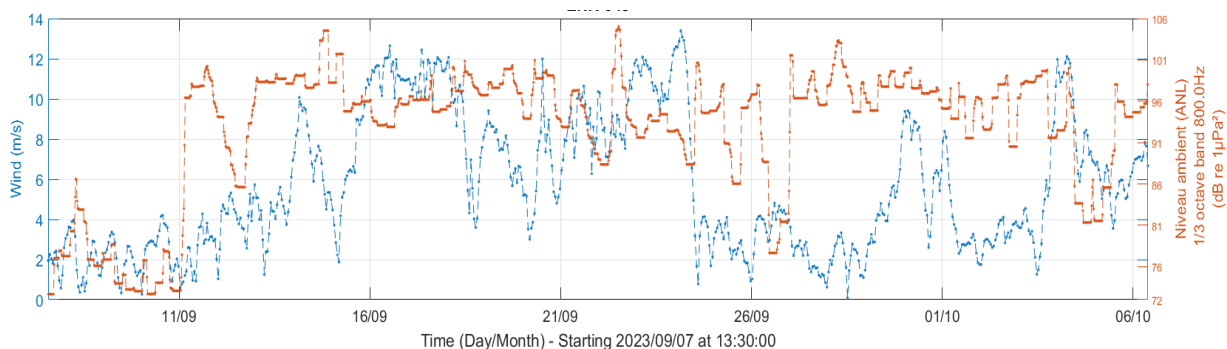


Figure 11 : Evolution des niveaux intégrés dans la bande [20Hz;40kHz] (entre 20 Hz et 40 kHz, exprimés en dB ref $1\mu\text{Pa}^2$) mesurés lors du suivi septembre/octobre 2023.

Vent
Fréquence 800 Hz, station R3



Hauteur de vague
Fréquence 4 kHz, station R2

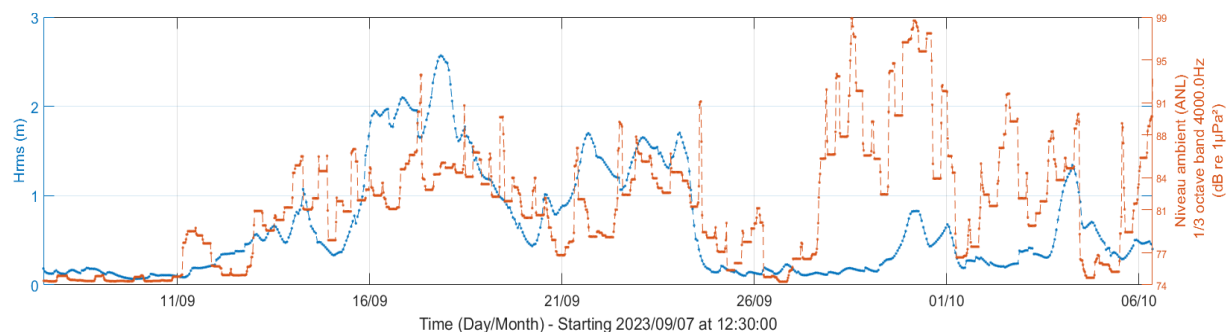


Figure 12 : Corrélation du bruit permanent (orange) avec les conditions météorologiques (bleu) dans la zone d'étude lors du suivi septembre/octobre 2023

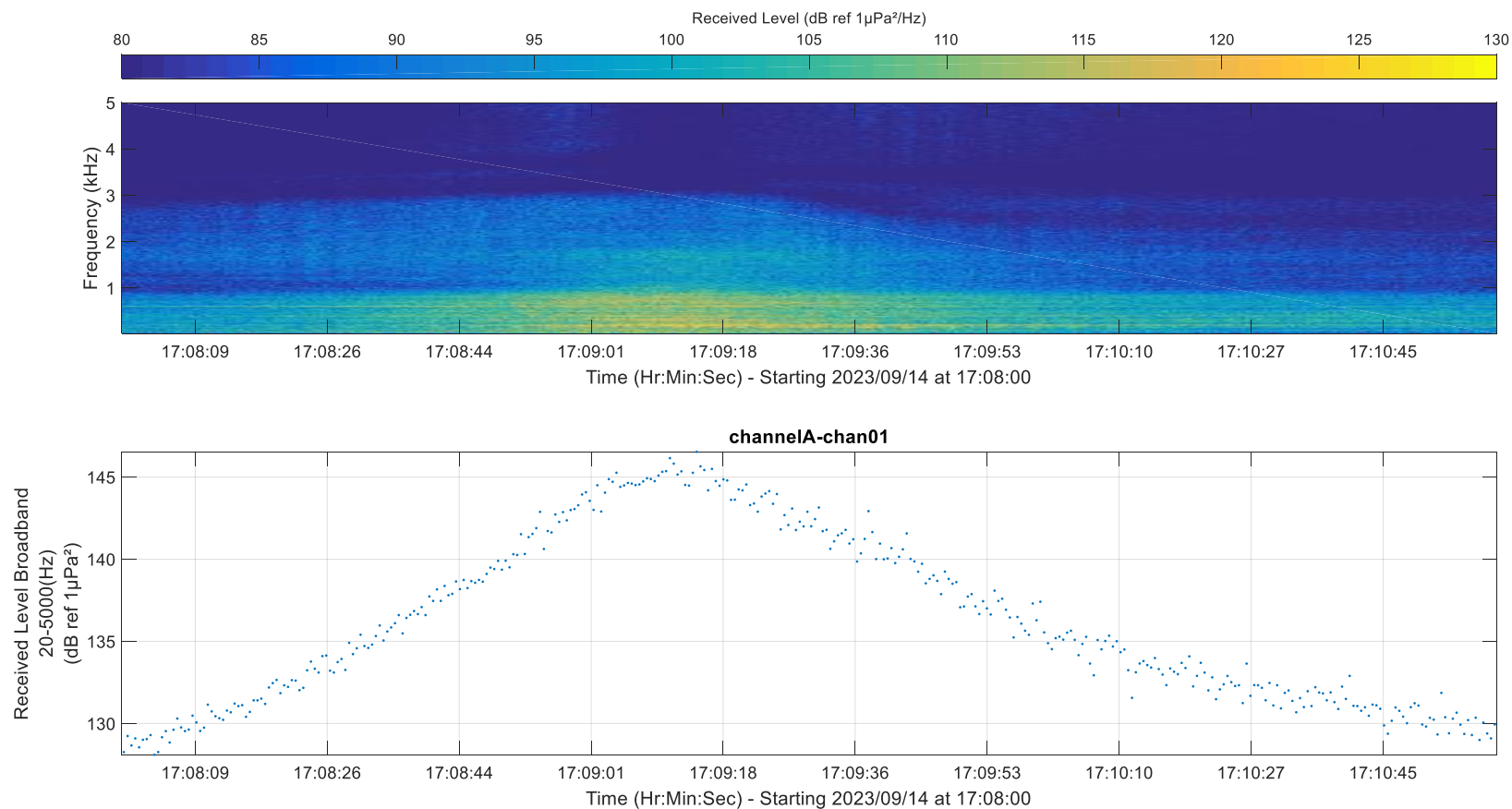


Figure 13 : En haut, spectrogramme du passage proche du navire projet « MULTRATUG 18 » à proximité de la station R3, dans la journée du 14 Septembre 2023. En bas, niveau sonore associé à ce passage de navire (20Hz-5kHz) exprimé en dB ref 1 μPa^2 .

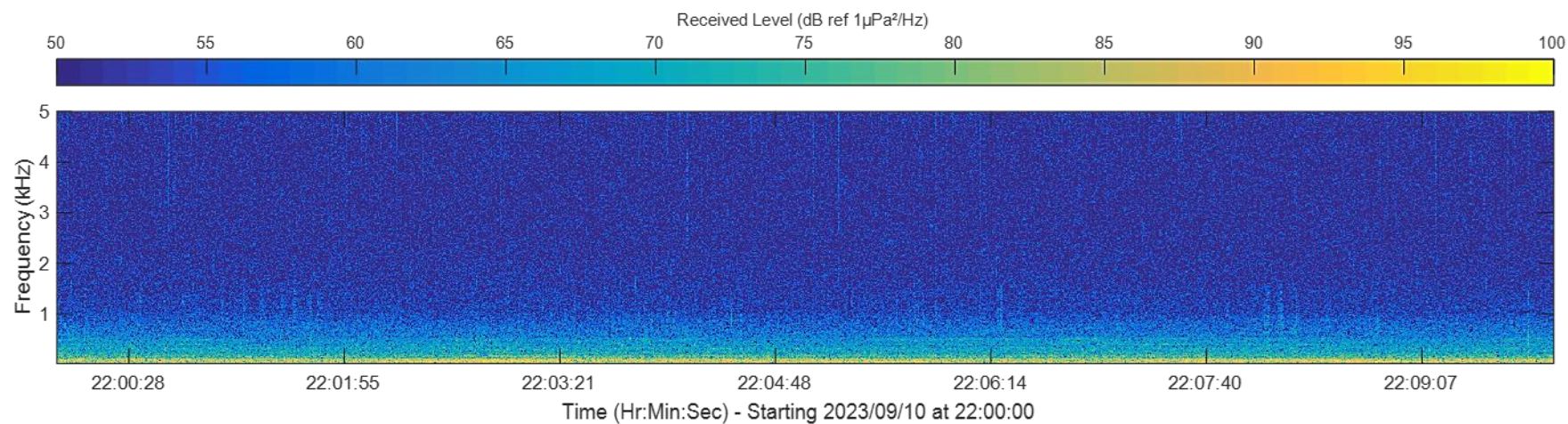


Figure 14 : Spectrogramme illustrant un moment calme dans la soirée du 10 Septembre 2023 à proximité de la station R1.

Tableau 11 : Statistiques des niveaux sonores (20Hz -40 kHz) à la station R1 (exprimés en dB ref 1µPa²) lors du suivi septembre/octobre 2023.

	Percentile (%)	Niveau très courant			Niveau Médian			Niveau très rare		
		100	99	90	75	50	25	10	1	0
R1	Toute la période	95.9	102.2	109.8	116.2	120.8	124.5	127.3	131.8	145.1
	Jour	98.0	102.4	109.7	115.8	120.8	124.5	127.3	132.3	145.1
	Nuit	95.9	101.8	109.8	116.2	120.6	124.3	127.2	131.6	137.3
	Ecart Jour/Nuit	2.1	0.6	-0.1	-0.4	0.2	0.2	0.1	0.8	7.8

Tableau 12 : Statistiques des niveaux sonores (20Hz -40 kHz) à la station R2 (exprimés en dB ref 1µPa²) lors du suivi septembre/octobre 2023.

	Percentile (%)	Niveau très courant			Niveau Médian			Niveau très rare		
		100	99	90	75	50	25	10	1	0
R2	Toute la période	98.2	102.7	110.1	115.7	120.1	124.7	127.9	133.8	148.1
	Jour	98.2	102.7	110.0	115.6	119.8	124.5	127.9	134.5	148.1
	Nuit	99.7	102.4	109.9	115.5	120.4	125.0	128.0	133.4	146.9
	Ecart Jour/Nuit	-1.4	0.3	0.1	0.1	-0.6	-0.5	-0.2	1.0	1.3

Tableau 13 : Statistiques des niveaux sonores (20Hz -40 kHz) à la station R3 (exprimés en dB ref 1µPa²) lors du suivi septembre/octobre 2023.

	Percentile (%)	Niveau très courant			Niveau Médian			Niveau très rare		
		100	99	90	75	50	25	10	1	0
R3	Toute la période	97.9	102.3	109.1	112.9	115.7	118.0	120.2	125.5	145.1
	Jour	97.9	102.5	109.0	113.0	116.0	118.2	120.3	126.8	145.1
	Nuit	99.1	102.0	109.1	112.6	115.4	117.8	120.2	124.7	144.5
	Ecart Jour/Nuit	-1.2	0.5	-0.1	0.5	0.6	0.3	0.1	2.1	0.6

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

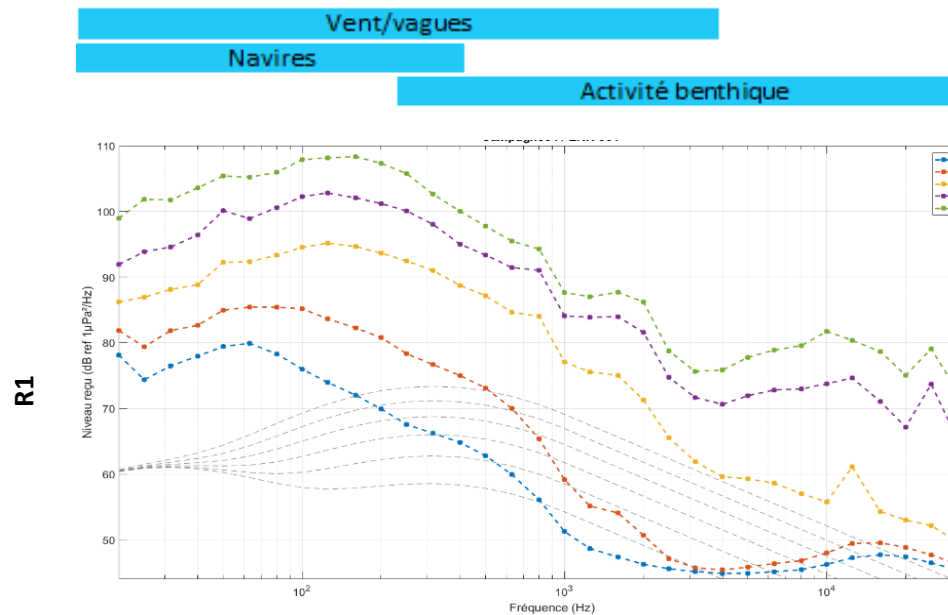
La partie gauche de la Figure 15 donne la répartition statistique fréquentielle de l'énergie sonore en fonction de la zone d'étude. Les courbes du modèle mondial de Wenz (courbes de référence) tracées en pointillés gris (Wenz, 1962) montrent l'état de référence acoustique d'un océan soumis uniquement au bruit environnemental.

- ✓ Concernant les percentiles forts (courbes vertes/violettes, percentiles inférieurs à 10%), l'influence des activités anthropiques est visible, notamment l'activité des navires projets, et crée une bosse de bruit significative entre 20 Hz et 1000 Hz avec des niveaux compris entre 90 et 110 dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ pour les stations R1 et R2, et entre 90 et 100 dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ pour la station R3. A noter que la contribution acoustique des activités du chantier est visible jusqu'à la fréquence de 40 kHz, avec un profil de bruit reçu proche entre les stations R1 et R2.
- ✓ L'allure des spectres aux percentiles médians à faibles (courbes jaunes/orange/bleue, percentiles supérieurs à 50%) n'est que partiellement corrélée au modèle de Wenz. En basse fréquence, la composante anthropique entre 20 et 1000 Hz reste visible avec des niveaux compris entre 65 et 85 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ pour le percentile 90%, et 70 et 90dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ pour le percentile 50%. Cette composante résulte ici de la compétition du trafic maritime en entrée et en sortie du port de Fos sur Mer, visible dans la bosse de bruit à 63Hz (75-80dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$), et les activités des navires rattachés au projet. Les courbes montrent cependant une bonne corrélation avec le modèle de Wenz pour les fréquences supérieures à 1000Hz pour les percentiles 90 et 99%.
- ✓ 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 50dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ selon la station étudiée.

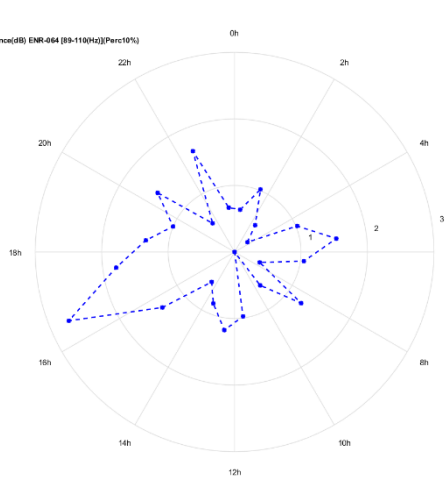
Globalement, l'allure des courbes spectrales est similaire entre les deux suivis en phase d'installation.

La partie centrale de la Figure 15 montre les variations horaires des émergences sonores dans la bande de fréquence spécifique de 89 Hz à 110 Hz, au percentile 10%. Cette bande de fréquence représentative des activités anthropiques, permet de mettre en évidence un accroissement du niveau sonore de 1 à 3 dB entre 08h00 et 20h00 UTC au niveau de la station R3. Aucune tendance horaire significative n'est mise en évidence aux stations R1 et R2. Ces conclusions coïncident avec les émergences diurnes constatées lors de l'analyse du bruit intégré dans la bande [20Hz;40kHz].

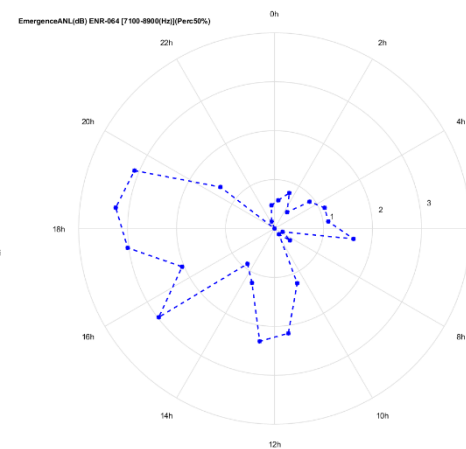
La partie droite de la Figure 15 montre les variations horaires relatives des émergences sonores dans la bande de fréquence spécifique de 7.1 Hz à 8.9 kHz, au percentile 50%. Cette bande de fréquence est par opposition, représentative de l'activité des organismes benthiques. Elle permet de mettre en évidence un accroissement relatif nocturne du niveau sonore, variant de +2 à +4 dB entre 18h00 et 06h00 UTC au niveau de la stations R2, ainsi qu'un accroissement compris entre 1.5 et 2dB entre 20h et 04h00 UTC au niveau de la station R3. La station R1 montre un profil horaire différent, avec une émergence comprise entre 2 et 3dB entre 11h et 19hUTC. Cette plage horaire diurne indique une prédominance du bruit d'origine anthropique sur le bruit benthique, qui est nocturne. A cette fréquence, les niveaux les plus faibles sont observés vers 11h UTC sur les trois stations.



89Hz - 110Hz Percentile 10%



7.1-8.9kHz Percentile 50%



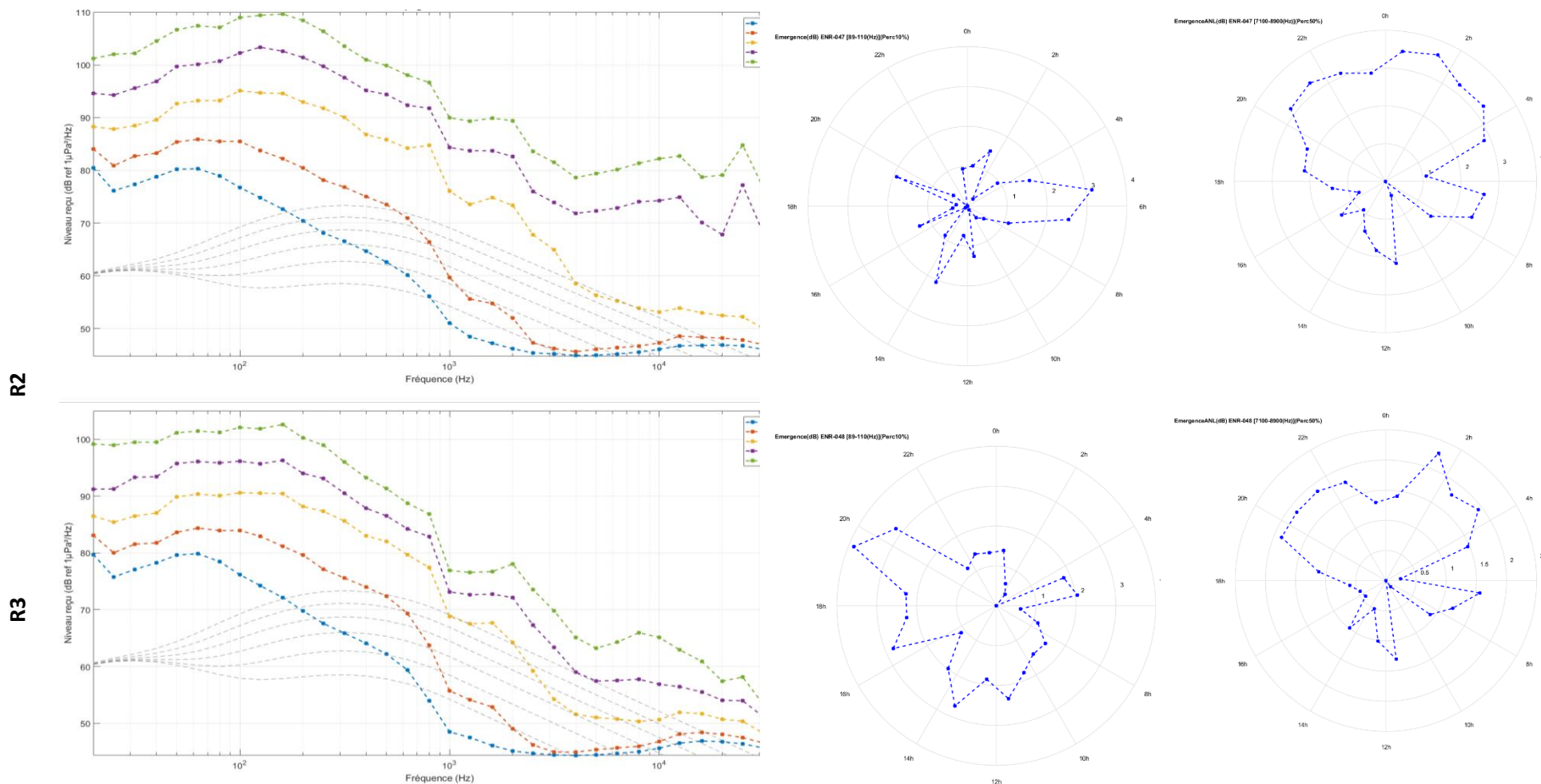


Figure 15 : Répartition fréquentielle de l'énergie acoustique mesurée lors du suivi septembre/octobre 2023 (à gauche). Répartition horaire des émergences sonores lors du suivi septembre/octobre 2023, au percentile 50% dans les bandes 89Hz-110Hz (au centre) et 7.1-8.9kHz (à droite).

IV.3. Analyse inter-saison

La Figure 16 synthétise la statistique des niveaux sonores exprimés dans la bande de fréquence entre 20 Hz et 40 kHz selon différents percentiles (1%, 50% et 99%) perçus au niveau de chaque station lors de la phase travaux du projet (bleu). A titre de comparaison, les valeurs relevées lors l'état de référence sont tracées en jaune :

Les niveaux de bruit médians (50% du temps) varient de 113,8 (R3) à 117,8 (R2) dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ lors du premier suivi travaux (aout/septembre 2023). Ainsi, les points en zone proche du parc (R1 et R2) ont été davantage impactés (+1 à +4dB) par les travaux que le point R3 (zone éloignée du parc). D'un point de vue temporel, les opérations ayant eu lieu au mois de septembre/Octobre ont induit une augmentation modérée (+2dB) en R2 et R3 à significative (+5dB) en R1. En comparaison des niveaux mesurés lors de l'état de référence, les travaux ont induit une augmentation permanente significative du bruit allant de +5 à +10dB pour le point R1 et de +3 à +5 dB pour le point R3. Pour rappel, la comparaison n'est pas disponible pour le point R2 en raison de l'absence d'analyse des niveaux sonores lors de la phase état de référence.

Les niveaux forts (soit 1% du temps) relevés varient de 124.2 (R3) à 131.7 (R1) dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ lors du premier suivi. Ces niveaux sont en augmentation (+3.1dB) au niveau de la station R2 lors du second suivi, probablement en raison en raison d'une intensification des activités projet à proximité du capteur. A l'identique des niveaux médians, les points en zone proche (R1 et R2) semblent davantage influencés par les travaux avec des augmentations significatives du bruit de l'ordre de +10dB en comparaison des niveaux relevés lors de l'état de référence au point R1. Ce phénomène est modéré en zone éloignée avec +3 à +5dB d'augmentation relevés au point R3.

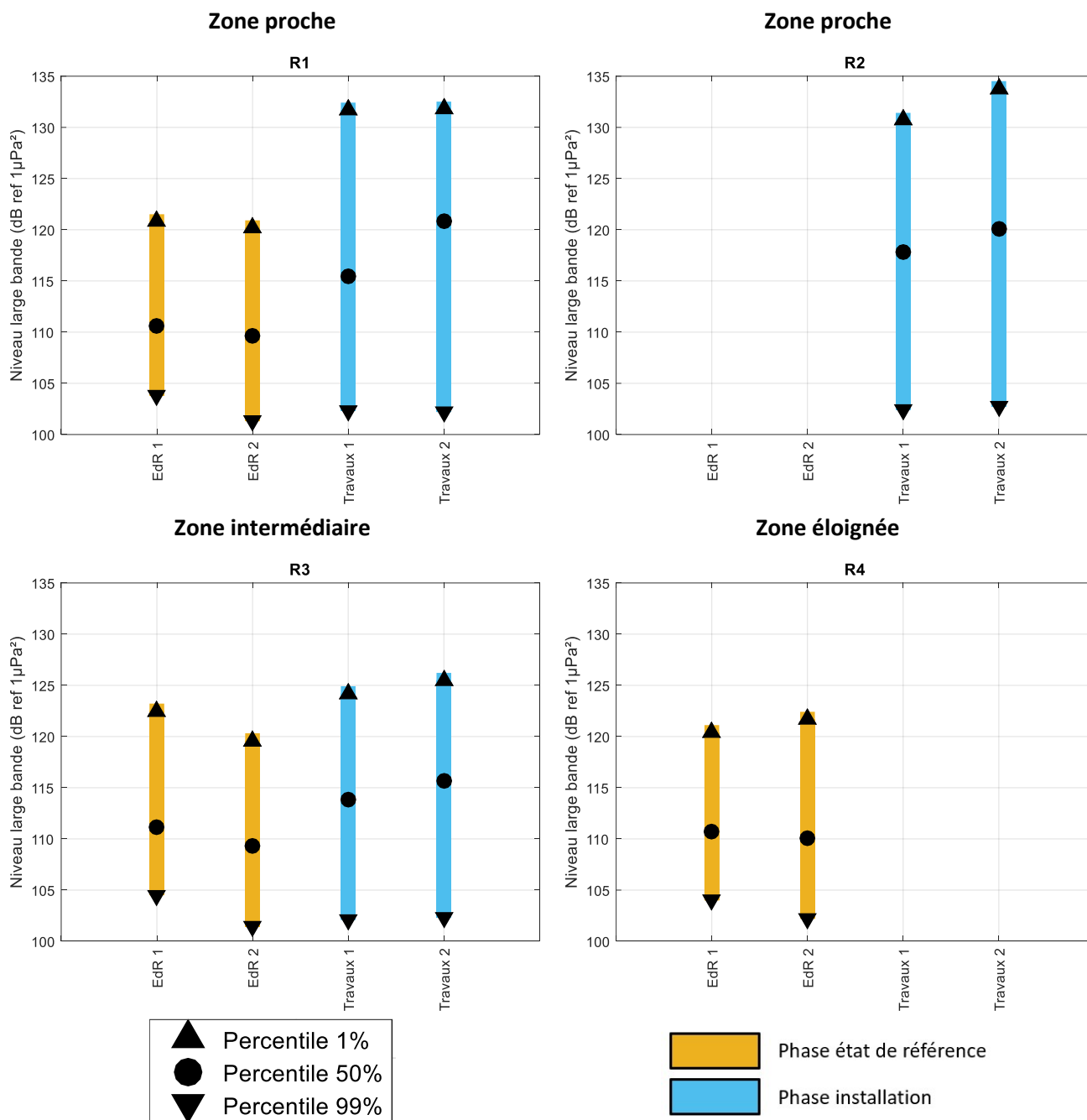


Figure 16 : Synthèse de la statistique des niveaux sonores par suivi et station.
(En orange : Etat de référence, en bleu : Phase d'installation)

Chapitre V. Analyse spécifique des activités du chantier

Cette partie de l'étude vise à analyser la corrélation entre l'évolution des niveaux sonores perçus par les capteurs acoustiques et les activités spécifiques liées au projet d'installation des éoliennes du parc éolien Provence Grand Large. Une analyse temporelle est proposée puis complétée par une étude par inversion acoustique pour estimer d'une part le niveau de source et d'autre part l'empreinte sonore de différents ateliers du projet en regard du bruit ambiant de référence. Un résumé des étapes clé lors de l'installation des éoliennes flottantes est disponible ci-dessous (Figure 17) :

- ✓ **Étape n°1 : Pose des ancres** - Une ancre au Nord, une au Sud, et une à l'Ouest de l'éolienne ;
- ✓ **Étape n°2 : Pose des ballasts sur les ancres** - Pose de disques en acier sur chacune des 3 ancres d'une éolienne pour les lester ;
- ✓ **Étape n°3 : Pose des 6 chaînes d'ancrage** - Accrochage de 2 chaînes d'ancrage sur chacune des 3 ancres ;
- ✓ **Étape n°4 : Pose des 3 lignes dédiées au jack-down** ;
- ✓ **Étape n°5 : Installation des 3 bouées temporaires pour les tugs** - Utilisation de bouées temporaires pour guider les remorqueurs lors du positionnement de l'éolienne flottante ;
- ✓ **Étape n°6 : Remorquage** - Les tugs remorquent l'éolienne depuis le port de Fos jusqu'à la position finale précise (environ 17 km de transit en mer) ;
- ✓ **Étape n°7 : Connexion des 6 chaînes d'ancrage au flotteur** - Utilisation des dedicated lines pour tirer le flotteur vers le fond ;
- ✓ **Étape n°8 : - Retrait des dedicated lines** utilisées pour tirer le flotteur vers le fond ;
- ✓ **Étape n°9 : Récupération des ancres** « installation aid » et des bouées temporaires.

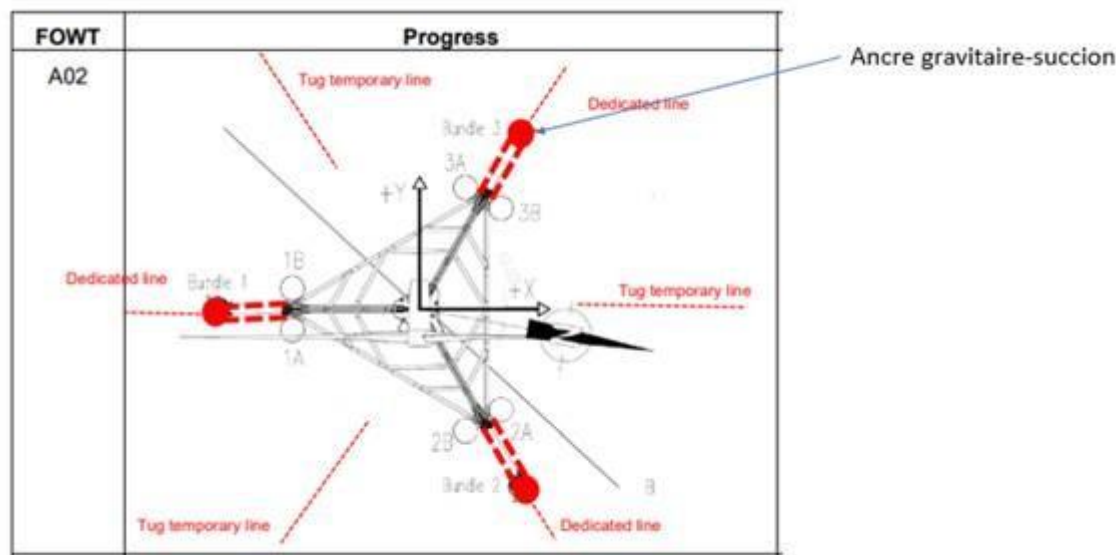


Figure 17 : Schéma de placement des éléments temporaires et dédiés lors de l'installation d'une éolienne flottante.(source EDF-RE)

V.1. Croisement des activités des chantiers avec les niveaux de bruit perçus

A partir des données de planning fournies par EDF-RE (consultables en annexe de ce rapport), une correspondance a pu être réalisée entre les périodes déclarées de travaux et les niveaux de bruit perçus par les différents systèmes acoustiques déployés au cours des deux campagnes de suivi.

Afin de synthétiser l'ensemble des informations techniques et acoustiques de l'étude, la Figure 18 trace, pour chaque station, l'évolution des niveaux sonores dans la bande filtrée [20Hz ;40kHz] lors des deux suivis

acoustiques. Les périodes de travaux déclarées sont encadrées respectivement en jaune pour l'éolienne Sud (FOWT1), en bleu pour l'éolienne centrale (FOWT2) et en rouge pour l'éolienne Nord (FOWT3). A titre d'exemple, la période allant du 14 au 17 Aout 2023 comprend les opérations de pose des ancrs, des ballasts sur les ancrs et des chaînes d'ancrage au niveau de l'éolienne centrale du parc(FOWT2). Durant cette période, les niveaux sonores reçus varient de 120 à 130 (en R1), 125 à 140 (en R2) et 115 à 130 (en R3) dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ pendant plusieurs jours, soit des augmentations comprises entre +5 et +35dB en regard des niveaux perçus en l'absence de travaux (110dB en moyenne le 12 Aout 2023). En raison de sa proximité avec les ateliers, la station R2 est plus affectée acoustiquement (+10dB en moyenne) par les travaux. Les travaux de pose des ancrs, ballast et chaînes d'ancrages des autres éoliennes contribuent de la même manière aux augmentations des niveaux perçus sur les trois stations acoustiques au cours du mois d'Aout.

Les opérations de pose des 3 lignes dédiées au jack down et d'installation des 3 bouées temporaires pour les navires tugs mettent en jeu des augmentations des niveaux sonores similaires aux autres opérations de pose.

Les phases de remorquage (par exemple, remorquage de l'éolienne nord le 11 septembre 2023) sont plus courtes et font atteindre les niveaux sonores jusqu'à des valeurs de 130dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ sur moins d'une journée. Tout au long des travaux, le transit des navires rattachés au projet fait ponctuellement augmenter les niveaux sonores proportionnellement avec leur distance d'approche des capteurs jusqu'à atteindre des niveaux voisins de 140dB ref $1\mu\text{Pa}^2$.

Pour affiner le croisement entre les sources de bruit rattachées au projet et les augmentations des niveaux sonores évoquées ci-dessus, la Figure 19 trace l'évolution du niveau sonore reçu pour chaque station acoustique à la fréquence particulière de 125Hz en bleu (fréquence faisant apparaître la contribution anthropique du chantier). La courbe rouge superposée correspond à la distance instantanée séparant le navire Normand Installer (navire supposé le plus bruyant) de chaque capteur acoustique.

A titre d'exemple, la pose des ancrs, des ballasts et des chaînes pour l'éolienne nord (FOWT3) ayant eu lieu du 7 au 11 Aout 2023 montre :

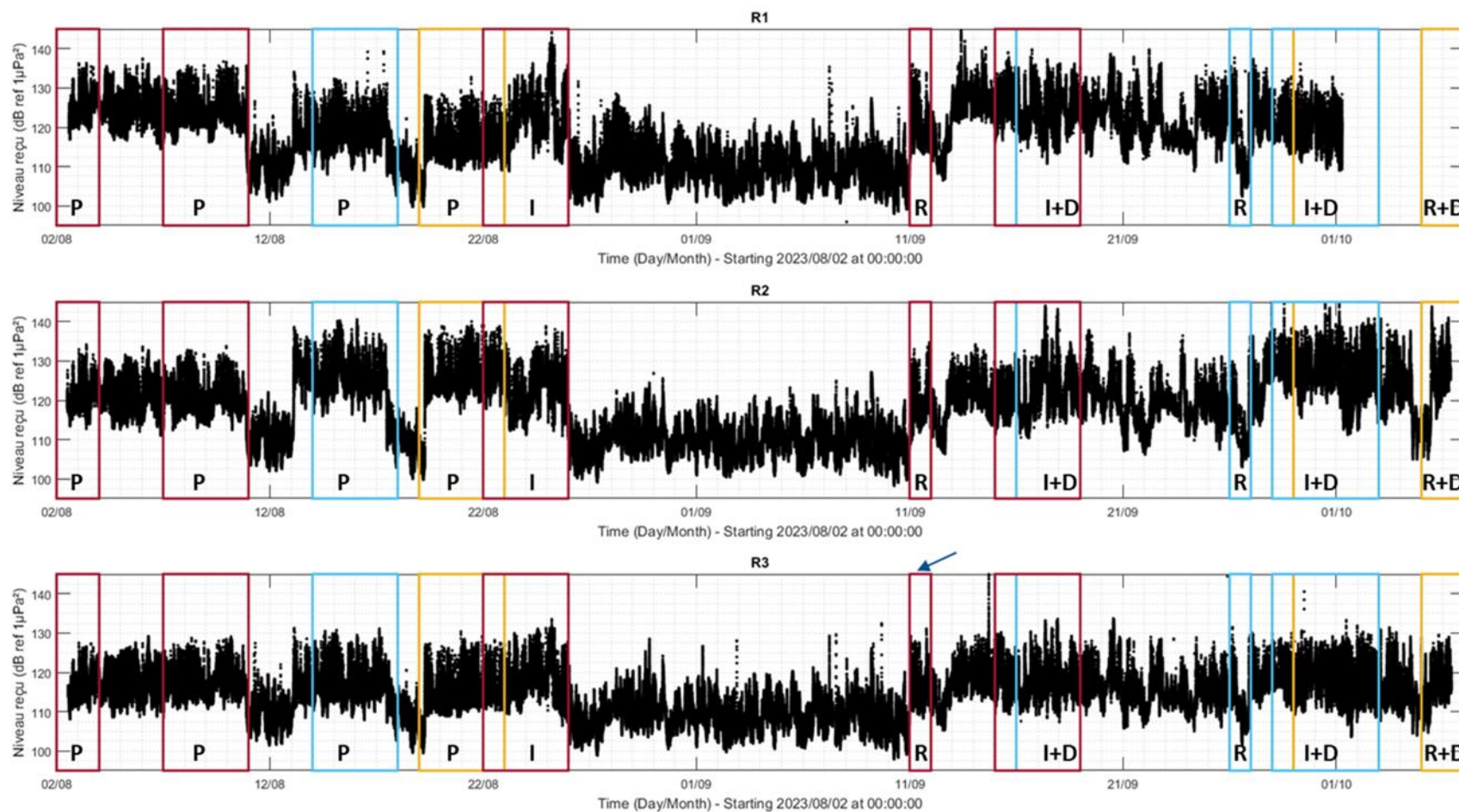
- ✓ Une distance moyenne d'environ 750m pour le point R1, avec un niveau sonore moyen d'environ 115dB ref $1\mu\text{Pa}^2$;
- ✓ Une distance moyenne d'environ 1.5km pour le point R2, avec un niveau sonore moyen d'environ 110dB ref $1\mu\text{Pa}^2$;
- ✓ Une distance moyenne de 2km pour point R3, avec un niveau sonore moyen d'environ 107dB ref $1\mu\text{Pa}^2$.

La période de pose des ancrs, ballast et chaînes mentionnée ci-dessus pour l'éolienne centrale (14 au 17 Aout) montre :

- ✓ Une distance moyenne de 600 m pour le point R2, avec un niveau sonore moyen d'environ 115dB ref $1\mu\text{Pa}^2$;
- ✓ Une distance moyenne navire/hydrophone de 1.5km pour le point R1, avec un niveau sonore moyen d'environ 110dB ref $1\mu\text{Pa}^2$;
- ✓ Une distance moyenne de 2km pour point R3, avec un niveau sonore moyen d'environ 107dB ref $1\mu\text{Pa}^2$.

Ces deux exemples mettent en évidence la nette corrélation entre la distance du Normand Installer et les niveaux de bruits reçus par les capteurs acoustiques jusqu'à au moins 3km. Durant le reste des travaux, le Normand Installer semble également être la source de bruit de premier ordre, avec une évolution inversement proportionnelle entre la distance navire/hydrophone et le niveau sonore à mesuré à la fréquence 125Hz, visible par exemple le 13 Septembre (phase d'approche), le 21 Septembre (phase d'éloignement) ou du 29 Septembre au 5 Octobre (phase de stationnement proche en R2). Bien qu'il soit impossible de nier l'influence des autres sources du projet (navires de surveillance, navires remorqueurs...), la présence du Normand Installer permet d'expliquer la majorité des élévations du niveau sonore au niveau de trois capteurs pour cette fréquence 125Hz, et par extension dans l'évolution des niveaux de bruit large bande en considérant l'énergie acoustique mise en jeu.

Pour la fréquence spécifique de 20 kHz, la même méthodologie d'analyse est appliquée et est illustrée sur la Figure 20 . Cette fréquence est usuellement utilisée par les Delphinidés pour communiquer, et permet de mettre en évidence un effet de masquage partiel à complet du bruit ambiant par le Normand Installer jusqu'à environ 1.5km de distance, avec des élévations du niveau sonore allant de 100 à 120dB ref $1\mu\text{Pa}^2$, soit +5 à +25dB d'augmentation en regard du bruit ambiant sur zone (90dB ref $1\mu\text{Pa}^2$) à cette fréquence.



Pose des ancres, ballast et chaînes d'ancrage: P
Installation des lignes et des bouées : I
Remorquage : R
Dépose: D

— FOWT1 (sud)
— FOWT2 (centre)
— FOWT3 (nord)

Figure 18 : Croisement des niveaux sonores large bande reçus lors du suivi des travaux d'installation avec les périodes de travaux déclarés.

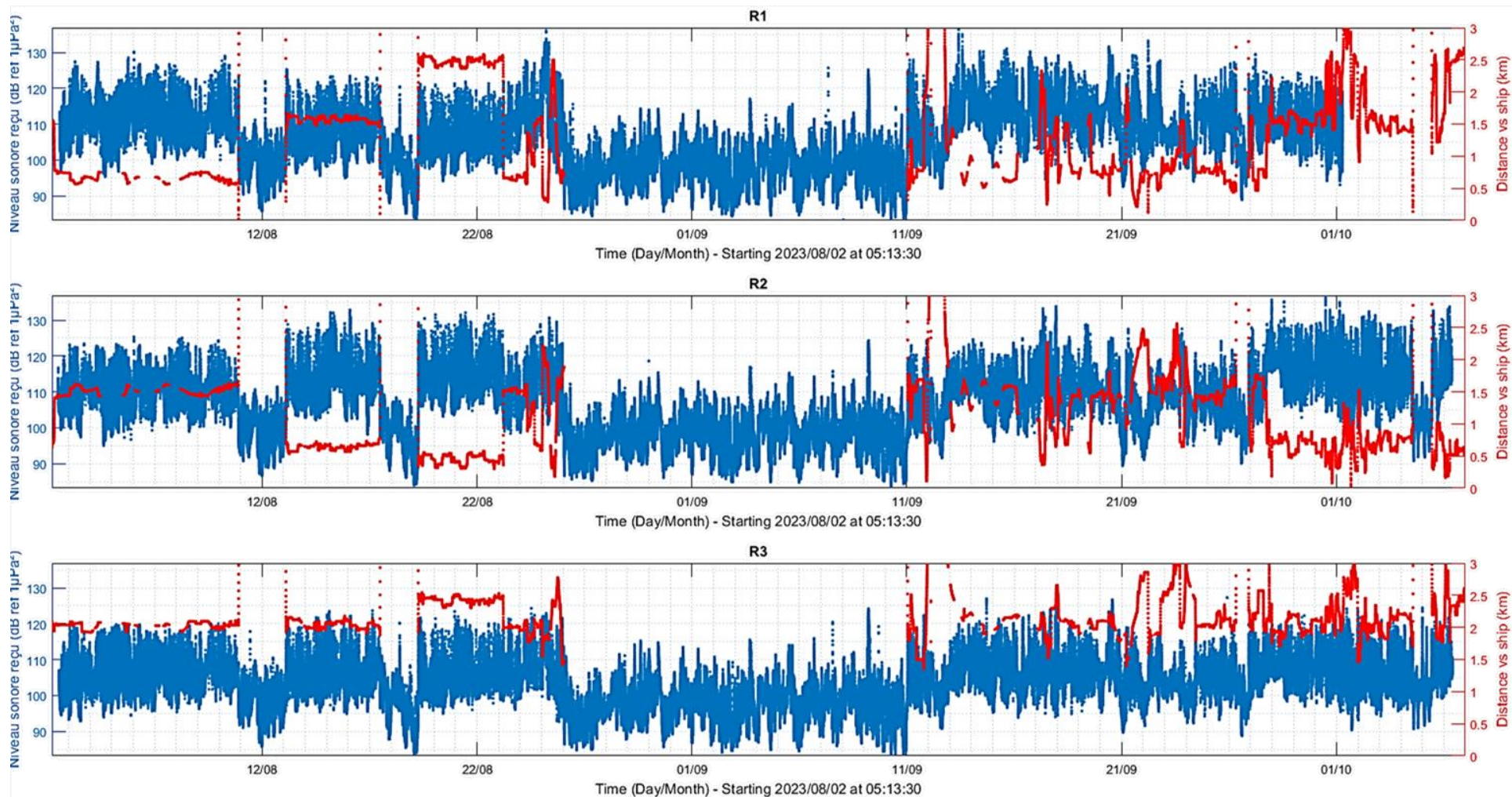


Figure 19 : Corrélation entre le niveau de bruit reçu lors des travaux dans le tiers d'octave 125Hz (bleu) et la distance séparant le navire Normand Installer de chaque capteur acoustique (rouge).

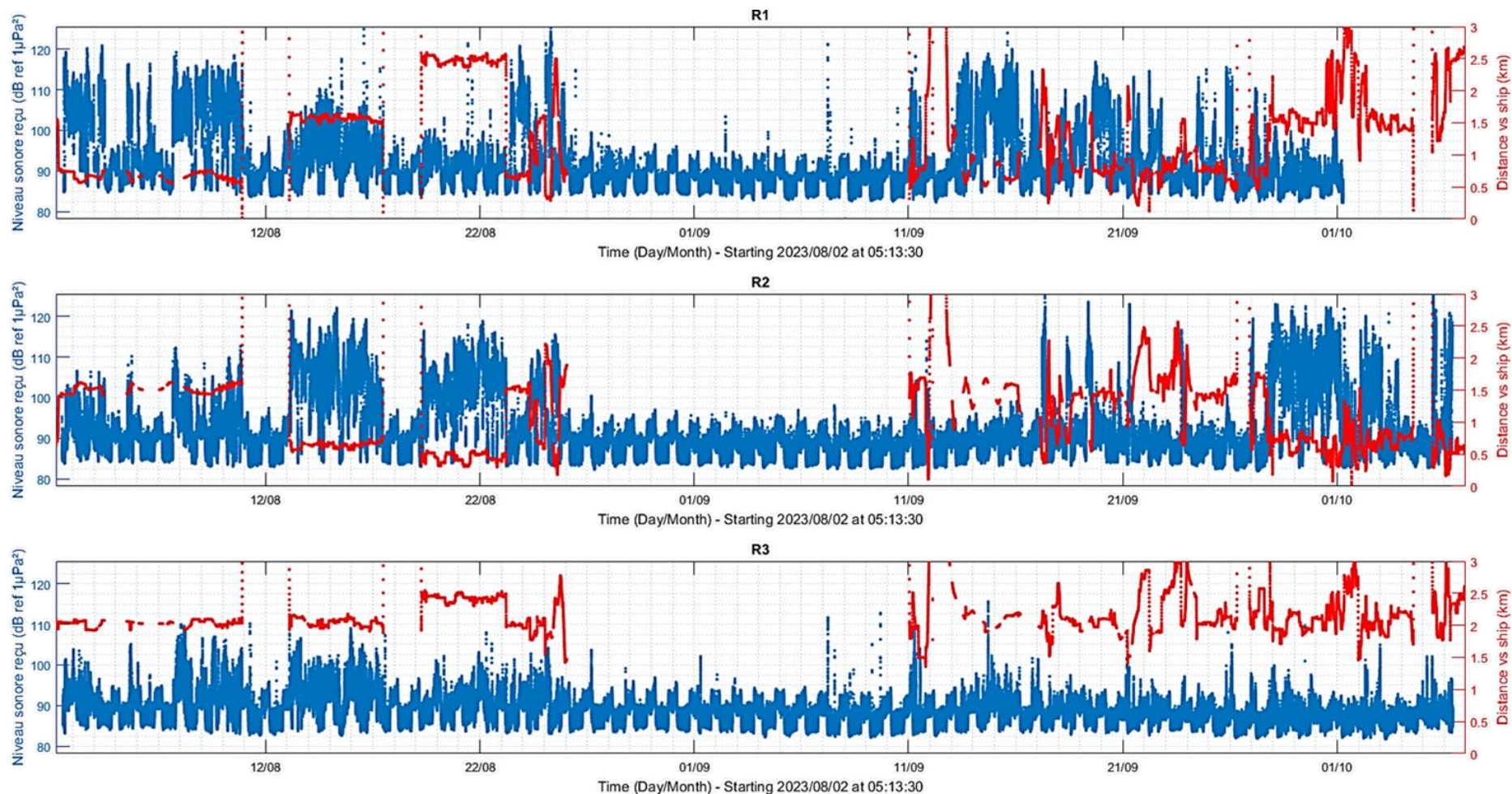


Figure 20 : Corrélation entre le niveau de bruit reçu lors des travaux dans le tiers d'octave 20kHz (bleu) et la distance séparant le navire Normand Installer de chaque capteur acoustique (rouge).

V.2. Estimation des niveaux sonores émis par le chantier

Cette partie de l'étude vise à réaliser une estimation des niveaux sonores émis par les différents ateliers mis en place lors des travaux.

V.2.1. Protocole de traitement

A partir des mesures acoustiques collectées et des phases identifiées des travaux du projet, en fonction de la fréquence, les niveaux sonores d'un atelier sont mis en regard des niveaux sonores de référence afin d'établir l'émergence significative d'un atelier (dépassement du bruit existant) (Figure 21). Pour chaque fréquence, en utilisant la plateforme Quonops® de modélisation de la propagation sonore, les pertes de propagation sont estimées entre la source de bruit (atelier) et la position des capteurs. Cette plateforme prend en compte les données environnementales sur site, à savoir, la bathymétrie, la nature du fond, le marnage et le profil de célérité à la date des travaux. Ces pertes acoustiques modélisées additionnées aux émergences sonores permettent d'estimer le gabarit de bruit (niveau de source) de l'atelier afin de cartographier son empreinte sonore (zone de perception).

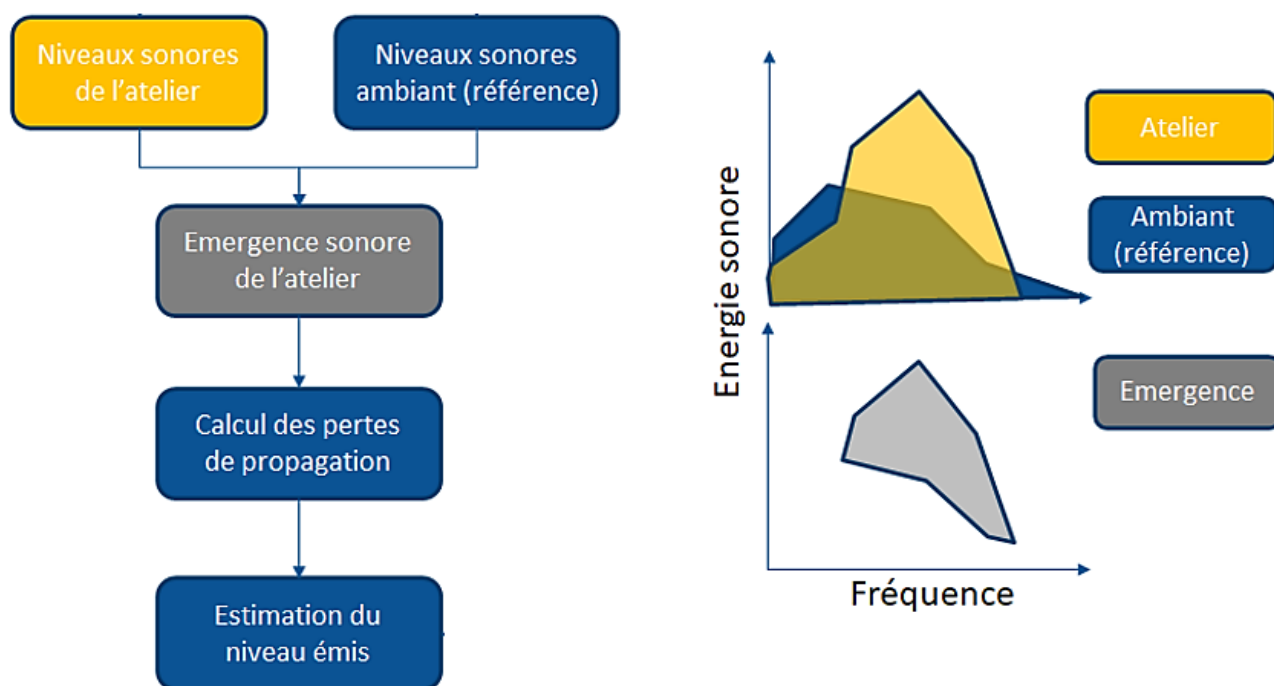


Figure 21 : Protocole de traitement des données.

V.2.2. Choix des périodes travaux

Le choix des périodes d'intérêt a été optimisé pour éviter le recouvrement des ateliers et ainsi discriminer la source principale de bruit (plusieurs activités sont possibles en simultanément, notamment sur le mois de Septembre). Le Tableau 14 définit respectivement les dates de début et de fin (en heures UTC) des ateliers retenus pour l'inversion acoustique. Les dates servant à établir les niveaux de références (niveaux ambiants sans activité du chantier) sont indiquées dans les colonnes de droite.

L'analyse s'intéresse en priorité à :

- ✓ La pose des ancres sur l'éolienne centrale (FOWT2), dans la journée du 14 Aout ;

- ✓ La pose des ballasts sur les ancrs de l'éolienne centrale, dans la soirée du 14 Aout ;
- ✓ L'installation des dedicated lines pour les tugs au niveau de l'éolienne nord, dans la journée du 23 Aout ;
- ✓ La mise à l'eau des bouées temporaires et des chaines pour les tugs au niveau de l'éolienne nord, les 24 et 25 Aout ;
- ✓ Le remorquage de l'éolienne Nord dans la journée du 11 Septembre.

A titre d'illustration, la partie haute de la Figure 22 trace le spectrogramme d'une période de référence (19/08/2023 de 0 à 6hUTC) au point R2. Aucune contribution acoustique n'est à noter en dehors d'un bruit basse fréquence intermittent compris entre 0 et 500Hz, avec des niveaux sonores bande étroite compris entre 70 et 90dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$, causés probablement par la navigation commerciale en entrée et sortie du port de Fos sur Mer et/ou par le transit lointain des navires rattachés au projet (hors Normand installer). La partie basse de la figure trace l'évolution du niveau sonore sur cette même période, intégré dans la bande de 20Hz à 10kHz. Ce dernier fluctue entre 100 et 107dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ en fonction du trafic maritime lointain. Ainsi, il apparaît qu'aucune perturbation notable du paysage sonore n'est à noter en dehors des phases de travaux ce jour. Le bruit engendré par les générateurs électriques installés² sur les plateformes temporaires (au-dessus de la surface) des futures éoliennes ne semble pas perceptible au niveau de la station R2 placée à 500m.

Tableau 14 : Définition des périodes temporelles et des capteurs retenus pour l'inversion acoustique.

Atelier	Station	Eolienne	Début période travaux (UTC)	Fin période travaux (UTC)	Début période ambiant (UTC)	Fin période ambiant (UTC)
Pose des ancrs	R2	Centrale (FOWT2)	14/08/2023 02 :00	14/08/2023 16:00	19/08/2023 00:00	19/08/2023 06:00
Pose des ballasts	R2	Centrale (FOWT2)	14/08/2023 18:00	14/08/2023 22:00	19/08/2023 00:00	19/08/2023 06:00
Installation des dedicated lines	R1	Nord (FOWT3)	23/08/2023 05 :40	24/08/2023 00:00	19/08/2023 00:00	19/08/2023 06:00
Installation des bouées	R1	Nord (FOWT3)	24/08/2023 09 :00	26/08/2023 00 : 00	19/08/2023 00:00	19/08/2023 06:00
Remorquage	R1	Nord (FOWT3)	11/09/2023 00 :00	11/09/2023 20 :00	10/09/2023 19 :00	11/09/2023 00 :00
Connexion des chaines d'ancrage	R2	Centrale (FOWT2)	28/09/2023 11 :00	29/09/2023 13 :00	10/09/2023 19 :00	11/09/2023 00 :00

² Ces générateurs permettent d'assurer l'alimentation électrique des activités rattachées au projet avant le raccordement des éoliennes au réseau.

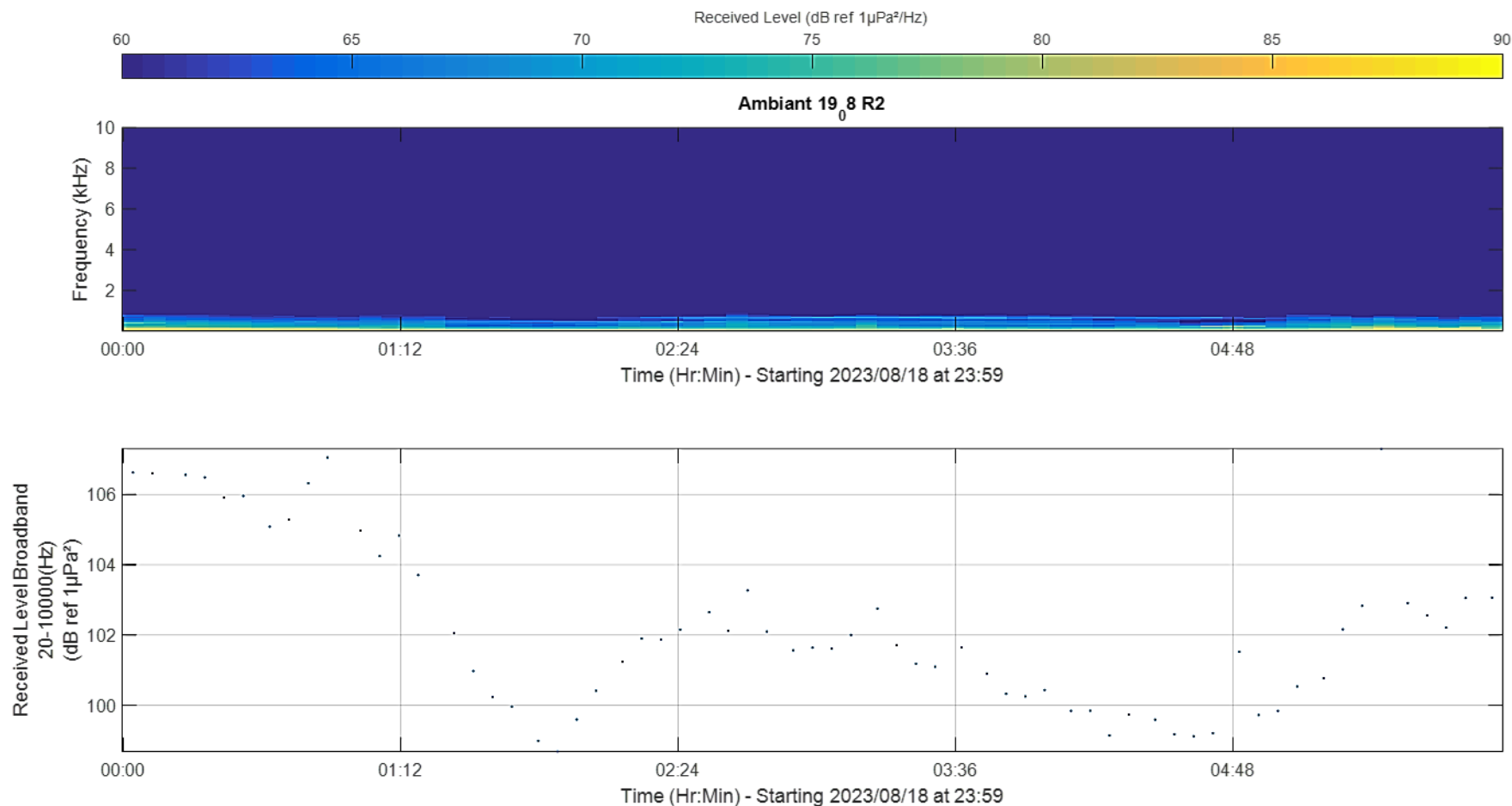


Figure 22 : En haut, spectrogramme (20Hz-10kHz, exprimé en dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$) du bruit reçu lors d'un instant de référence, correspondant au bruit ambiant capté par l'hydrophone déployé en R2. En bas, évolution du niveau large bande (20Hz-10kHz, dB ref $1\mu\text{Pa}^2$) correspondant à la même fenêtre temporelle.

V.2.3. Analyse du bruit reçu

Ce paragraphe analyse les niveaux de bruit reçus par les capteurs utilisés lors de chaque atelier étudié. Une analyse en fréquence est proposée en regard des niveaux de référence. Une analyse temps/fréquence complète la compréhension du bruit induit par chaque phase de travaux.

V.2.3.a. Phase : Pose des ancrs et ballasts

Les Figure 23 et Figure 24 synthétisent les niveaux reçus lors de la pose des ancrs et de la pose des ballasts de l'éolienne FOWT2. Pour chaque période analysée, sont tracés :

- ✓ En bleu, le niveau reçu médian lors de la mise œuvre de l'atelier ;
- ✓ En gris, la dispersion (min/max) des niveaux reçus lors de la mise œuvre de l'atelier ;
- ✓ En jaune, niveau reçu médian lors de la période de référence ;
- ✓ En noir pointillé, le niveau sonore minimum de référence à atteindre lors de la mise œuvre de l'atelier afin d'effectuer l'inversion de propagation (critère : percentile 10% du bruit de référence +6dB) : seule l'aire grise située au-dessus de ce seuil est utilisée pour réaliser l'inversion acoustique (émergence significative). De cette façon, pour chaque fréquence, seul le bruit généré par l'atelier fait l'objet d'une inversion.

Le profil du bruit reçu lors des travaux de pose des ancrs montre des émergences médianes sur la majorité des fréquences étudiées, avec un maximum d'énergie compris dans la bande de fréquence entre 50Hz et 3kHz, et des bosses de bruit ponctuelles (valeurs maximales) de 113dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ à 125Hz, 103dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ à 600Hz et 90dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ à 2kHz. Un bruit de sondeur est également visible et récurrent dans le tiers d'octave 25kHz. Le profil du bruit reçu lors de la pose des ballasts sur les ancrs est très proche avec des émergences sur la totalité des fréquences étudiées. L'énergie acoustique entre 300 et 600Hz est plus élevée que lors des opérations de pose des ancrs. La variabilité du bruit reçu lors de ces ateliers est modérément élevée notamment pour les fréquences inférieures à 1kHz (hauteur de l'aire grise à un maximum de 20dB de variabilité) et les spectres médians montrent des émergences modérées en regard du bruit permanent, ce qui suggère une période cumulée courte d'activité intense dans les fenêtres temporelles étudiées.

La partie haute de la Figure 25 trace le spectrogramme du bruit reçu sur la journée du 14/08/2023 au point R2. La période étudiée de pose des ancrs est encadrée en rouge et la période étudiée de pose des ballasts est encadrée en vert. Cette représentation permet de mettre en évidence des raies de bruit induites probablement par la machinerie interne du Normand Installer son ROV, avec une multitude de lignes horizontales réparties entre 0 et 10kHz. Des augmentations (+5dB) locales des niveaux sonores sont visibles dans la bande 0-500Hz, causées très probablement par l'utilisation du positionnement dynamique par le navire support. La partie basse de la figure trace l'évolution du niveau sonore sur cette même période, intégré dans la bande 20Hz-10kHz. Lors de la pose des ancrs, le niveau sonore est de 122dB (± 2 dB) ref $1\mu\text{Pa}^2$, et converge autour de 124dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ lors de la pose des ballasts sur les ancrs.

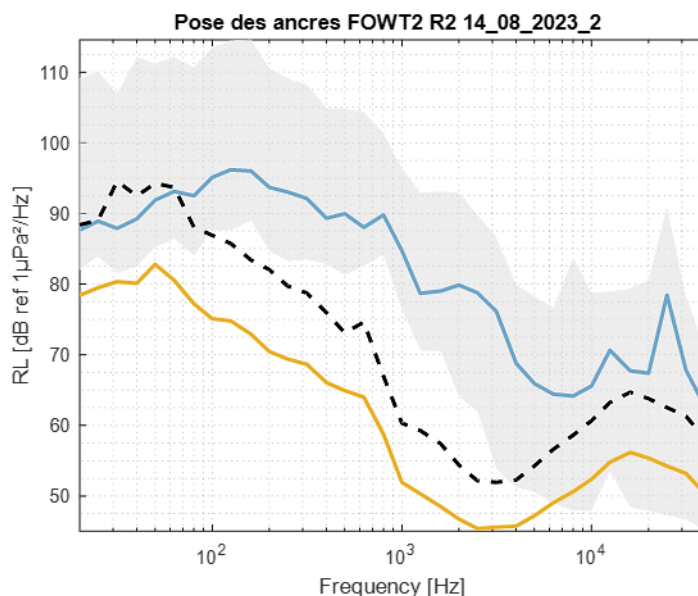


Figure 23 : niveaux reçus en fonction de la fréquence (dB ref 1µPa²/Hz) lors de la pose des ancrs de FOWT2 (médiane en bleu et distribution dans l'aire grise) comparés au bruit ambiant médian (jaune) et au bruit ambiant de référence (noir, P10% +6dB) utilisé pour l'inversion acoustique.

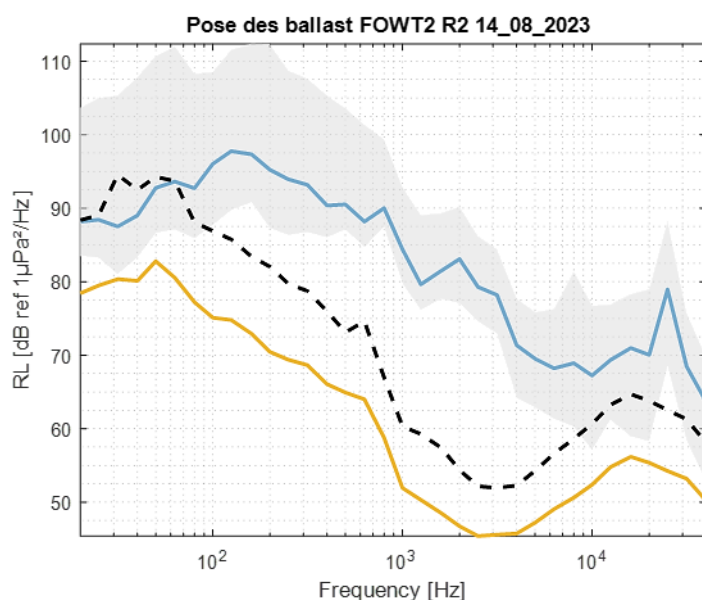
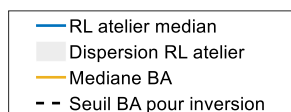


Figure 24 : niveaux reçus en fonction de la fréquence (dB ref 1µPa²/Hz) lors de la pose des ballasts de FOWT2 (médiane en bleu et distribution dans l'aire grise) comparés au bruit ambiant médian (jaune) et au bruit ambiant de référence (noir, P10% +6dB) utilisé pour l'inversion acoustique

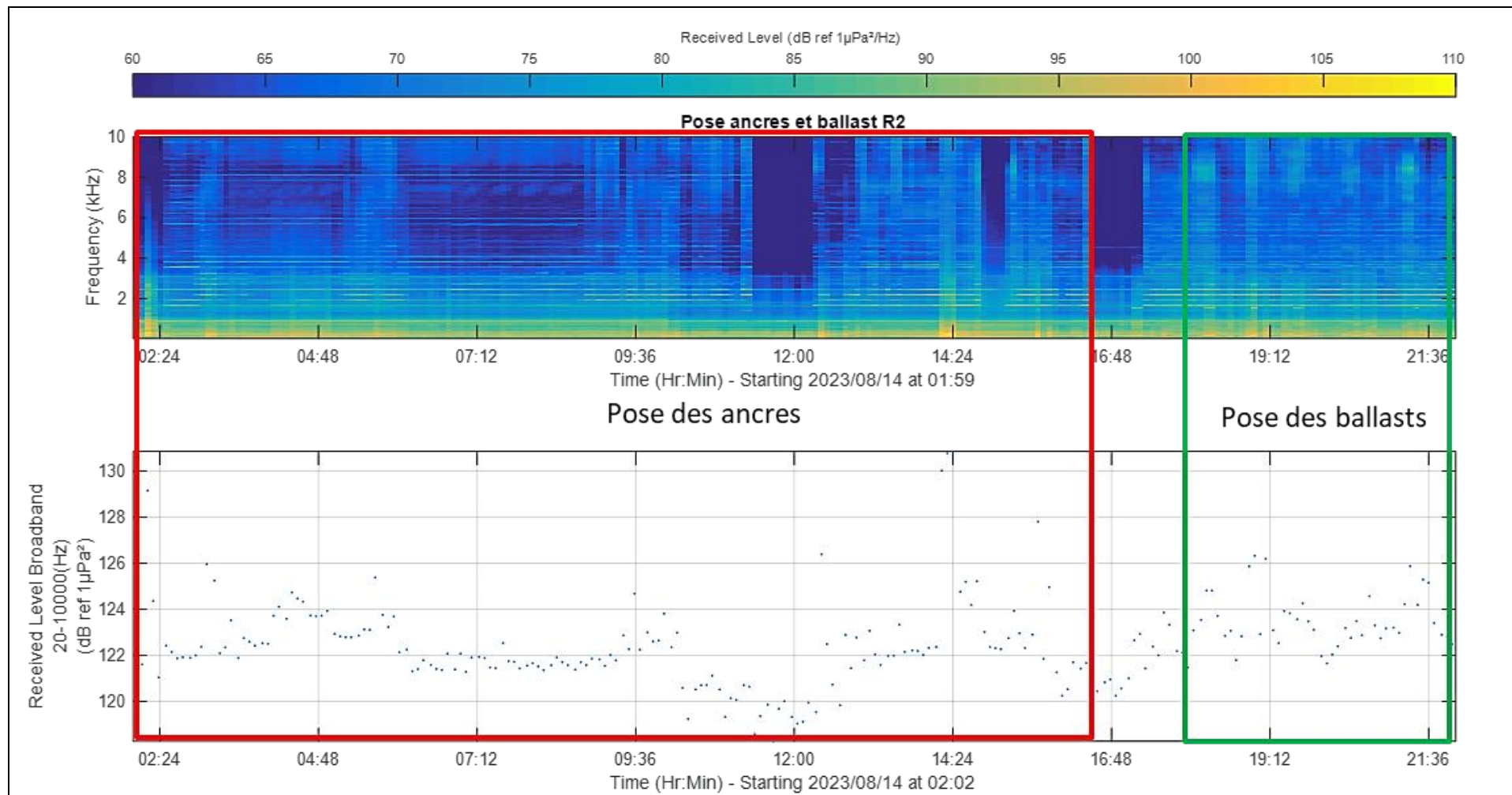


Figure 25 : Pose des ancrs et des ballasts de FOWT2 dans la journée du 14/08/2023. En haut, spectrogramme (20Hz-10kHz, exprimé en dB ref 1 μ Pa²/Hz) du bruit reçu lors des ateliers. En bas, évolution du niveau large bande (20Hz-10kHz, dB ref 1 μ Pa²) correspondant.

V.2.3.b. Phase : Installation des dedicated lines et bouées

La Figure 26-A synthétise les niveaux reçus lors des différents ateliers de l'installation des dedicated lines sur l'éolienne FOWT3.

Le profil du bruit reçu lors des travaux de pose des dedicated lines montre des émergences médianes sur la majorité des fréquences étudiées, avec un maximum d'énergie compris dans les bandes de fréquence [0 ; 1kHz] et [2.5 ; 40kHz]. La variabilité du bruit reçu lors de l'atelier est importante notamment pour les fréquences supérieures à 1kHz (hauteur de l'aire grise à maximum 30dB de variabilité) et le spectre médian montre des émergences modérées en regard du bruit de référence, ce qui suggère une période cumulée courte d'activité et intense dans la fenêtre temporelle étudiée. Les périodes d'activités intenses (valeurs maximales) montrent des bosses de bruits ponctuelles) à 25Hz, 40Hz, 150Hz, 2kHz et 8kHz avec des niveaux sonores compris entre 90 et 113dB pour ces fréquences spécifiques.

La Figure 26-B trace le spectrogramme du bruit reçu lors de l'installation des dedicated lines au point R1. Cette représentation permet de mettre en évidence :

- ✓ Un bruit continu basse fréquence (<500Hz) correspondant au groupe propulseur du Normand Installer ;
- ✓ Deux périodes (11h-15hUTC et 18h-0h UTC) où émerge des raies de bruit induites probablement par la machinerie interne du Normand Installer et son ROV, avec une multitude de lignes horizontales réparties entre 0 et 10kHz.

Des augmentations locales des niveaux sonores (+5dB) sont visibles dans la bande 0-500Hz, engendrées très probablement par l'utilisation du positionnement dynamique du navire support. Une augmentation des niveaux sonores dans la bande 2-8kHz est également visible entre 20h et 21h30 UTC et peut correspondre à la pose de la dedicated line « DL 03W ». La partie basse trace l'évolution du niveau sonore sur cette même période, intégré dans la bande 20Hz-10kHz. Il varie de 118dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ lors des phases de stationnement du NI et passe à 128dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (+10dB) lors des phases d'activité intense.

La Figure 27-A trace synthétise les niveaux reçus lors de la pose des bouées temporaires pour les tugs. Le profil du bruit reçu lors de la pose des bouées temporaires met en jeu des émergences sur la totalité des fréquences étudiées. Les spectres du bruit reçu médian et maximum montrent des maximums d'énergie situés dans les bandes fréquentielles [50 ; 1000Hz] avec des niveaux compris entre 90 et 123dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$, [1k ; 3kHz] avec des niveaux compris entre 87 et 103dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ et un bruit de sondeur à 25kHz compris entre 85 et 90dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$. Le spectre médian du bruit reçu lors de l'atelier est plus proche du haut de l'aire grise que lors de la pose des dedicated lines, ce qui correspond à une activité davantage lissée lors de cet atelier.

La Figure 27-B trace le spectrogramme du bruit reçu lors de la pose des bouées temporaires au point R1. Cette représentation permet de mettre en évidence :

- ✓ Un bruit continu basse fréquence (<500Hz) correspondant au groupe propulseur du Normand Installer ;
- ✓ L'émergence de raies induites probablement par la machinerie interne du Normand Installer et son ROV, avec une multitude de lignes horizontales réparties entre 0 et 10kHz.

Le navire est au plus proche du capteur dans la matinée du 25/08 et montre un profil d'émergence dans la bande filtrée (0-10kHz) avec un maximum d'énergie pour les fréquences inférieures à 500Hz. La partie basse de la figure trace l'évolution du niveau sonore sur cette même période, intégré dans la bande filtrée 20Hz-10kHz. Il varie de 120dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ lors des phases de stationnement du Normand installer et passe à 135dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (+15dB) dans la matinée du 25/08.

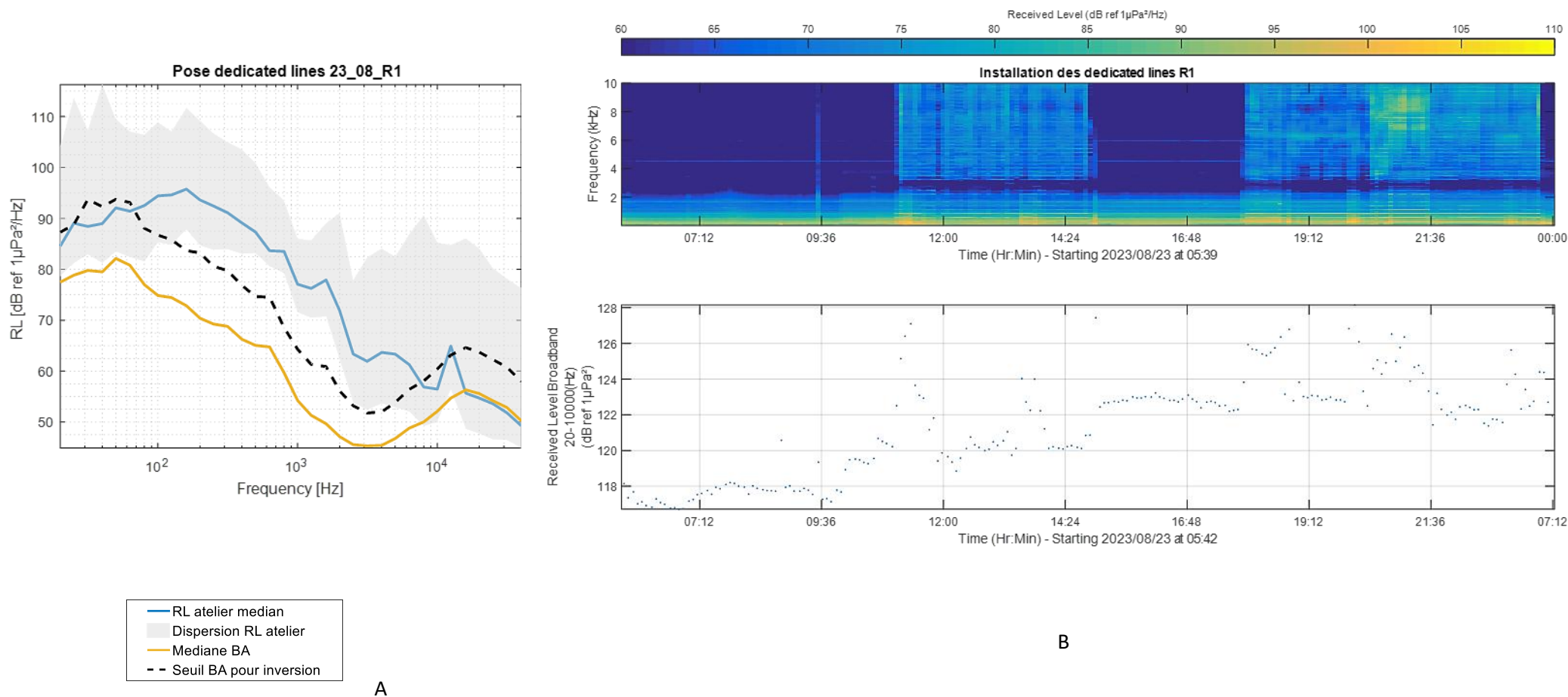
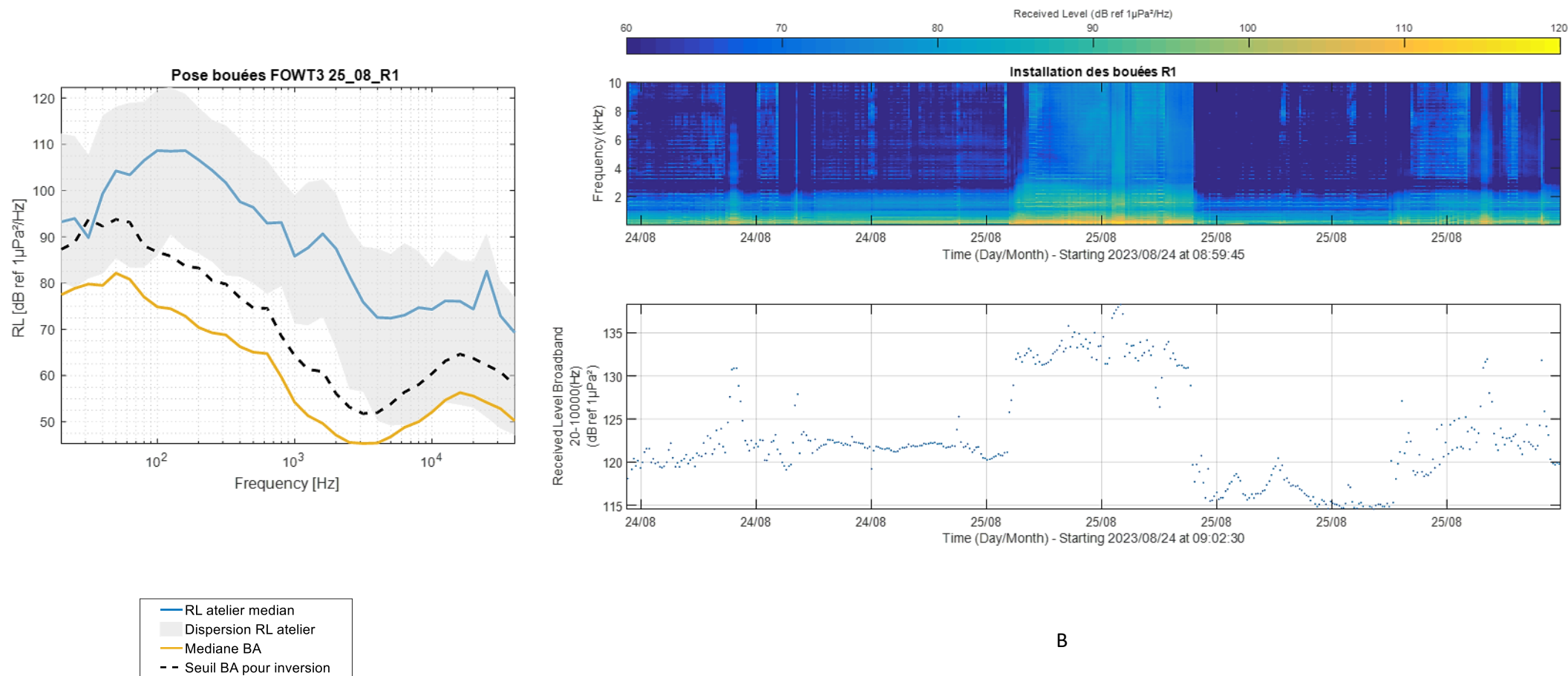


Figure 26 : Installation des dedicated lines de FOWT3 dans la journée du 23/08/2023.

A- Niveaux reçus en fonction de la fréquence (dB ref 1µPa²/Hz) de l'atelier (médiane en bleu et distribution dans l'aire grise) comparés au bruit ambiant médian (jaune) et au bruit ambiant de référence (noir, P10% +6dB) utilisé pour l'inversion acoustique.

B- En haut, spectrogramme (20Hz-10kHz, exprimé en dB ref 1µPa²/Hz) du bruit reçu lors de l'atelier. En bas, évolution du niveau large bande (20Hz-10kHz, dB ref 1µPa²) correspondant.



A

B

Figure 27 : Installation des bouées temporaires de FOWT3 les 24 et 25/08/2023.

A- Niveaux reçus en fonction de la fréquence (dB ref 1µPa²/Hz) de l'atelier (médiane en bleu et distribution dans l'aire grise) comparés au bruit ambiant médian (jaune) et au bruit ambiant de référence (noir, P10% +6dB) utilisé pour l'inversion acoustique.

B-En haut, spectrogramme (20Hz-10kHz, exprimé en dB ref 1µPa²/Hz) du bruit reçu lors de l'atelier. En bas, évolution du niveau large bande (20Hz-10kHz, dB ref 1µPa²) correspondant.

V.2.3.c. Remorquage FOWT3

La Figure 28-A synthétise les niveaux reçus lors du remorquage de l'éolienne FOWT3. La variabilité du bruit reçu lors de l'atelier est importante (hauteur de l'aire grise à +40dB de variabilité) et le spectre médian montre des émergences modérées en regard du bruit permanent, ce qui suggère une période cumulée courte d'activité intense, correspondant très probablement au transit des navires projet dans la fenêtre temporelle étudiée. Le spectre du bruit reçu maximum montre une émergence sur la totalité de la bande fréquentielle -seul un creux à 3kHz est à noter- avec des niveaux compris entre 80 et 115dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ selon la fréquence étudiée.

La partie haute de la Figure 28-B trace le spectrogramme du bruit reçu lors du remorquage de l'éolienne FOWT3, au point R1. Cette représentation permet de mettre en évidence entre 1h et environ 9h UTC :

- ✓ Un bruit continu basse fréquence (<500Hz) correspondant au groupe propulseur du Normand Installer et des autres navires sur zone ;
- ✓ L'émergence d'un bruit dit harmonique induit probablement par la machinerie interne du Normand Installer et son ROV, avec une multitude de lignes horizontales réparties entre 0 et 10kHz ;
- ✓ L'émergence ponctuelle d'un bruit basse fréquence (>500Hz) correspondant probablement à l'utilisation du positionnement dynamique par le NI ou à son transit sur la zone du chantier.

La partie basse de la figure trace l'évolution du niveau sonore sur cette même période, intégré dans la bande 20Hz-10kHz. Il varie de 120dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ à 135dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (+15dB) en fonction de la distance séparant le navire du capteur.

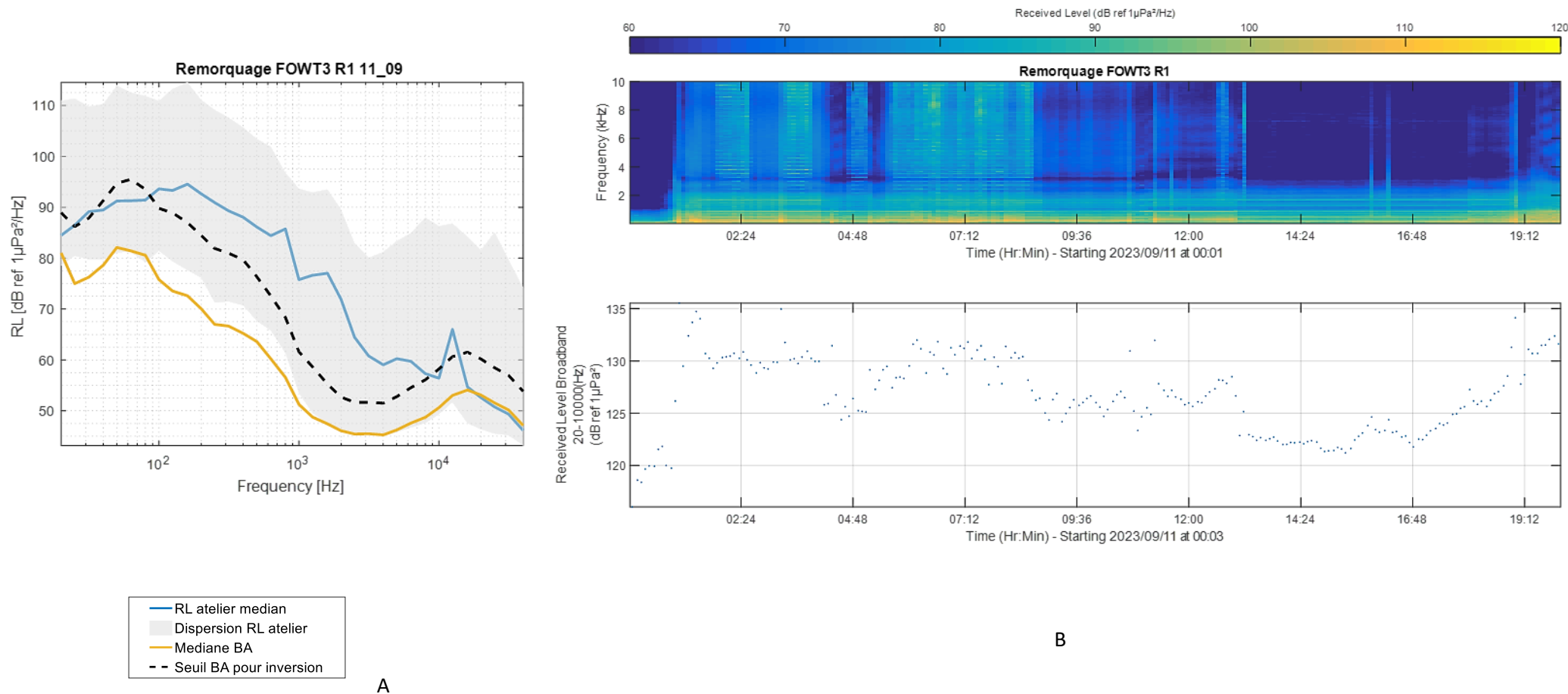


Figure 28 : Remorquage de FOWT3 le 11/09/2023.

A- Niveaux reçus en fonction de la fréquence (dB ref 1µPa²/Hz) de l'atelier (médiane en bleu et distribution dans l'aire grise) comparés au bruit ambiant médian (jaune) et au bruit ambiant de référence (noir, P10% +6dB) utilisé pour l'inversion acoustique.

B-En haut, spectrogramme (20Hz-10kHz, exprimé en dB ref 1µPa²/Hz) du bruit reçu lors de l'atelier. En bas, évolution du niveau large bande (20Hz-10kHz, dB ref 1µPa²) correspondant.

V.2.3.d. Connexion des chaînes d'ancrage FOWT2

La Figure 29-A synthétise les niveaux reçus lors de la connexion des chaînes d'ancrage de l'éolienne FOWT2.

La variabilité du bruit reçu lors de l'atelier est importante (hauteur de l'aire grise correspondant à maximum 40dB de variabilité) notamment pour les fréquences supérieures à 1kHz, et le spectre médian est éloigné du spectre maximum, ce qui suggère un fractionnement de l'activité en plusieurs phases. Les spectres du bruit reçu médian et maximum montrent un maximum d'énergie entre 50Hz et 2kHz, avec des pics de 120-125dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ visibles à 60Hz, 125Hz, 250Hz, 500Hz (bruit harmonique).

La partie haute de la Figure 29-B trace le spectrogramme du bruit reçu lors du remorquage de l'éolienne FOWT3, au point R1. Cette représentation permet de mettre en évidence entre 1h et environ 9h UTC :

- ✓ Un bruit continu basse fréquence (<500Hz) correspondant au groupe propulseur du Normand Installer;
- ✓ L'émergence d'un bruit dit « en peigne » induit probablement par la machinerie interne du Normand Installer et son ROV, avec une multitude de lignes horizontales réparties entre 0 et 10kHz ;
- ✓ L'émergence ponctuelle d'un bruit basse fréquence (>500Hz) correspondant probablement à l'utilisation du positionnement dynamique par le NI ou à son transit sur la zone du chantier.

La partie basse de la figure trace l'évolution du niveau sonore sur cette même période, intégré dans la bande 20Hz-10kHz. Il varie de 120dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ à 135dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (+15dB) en fonction de la distance séparant le navire du capteur.

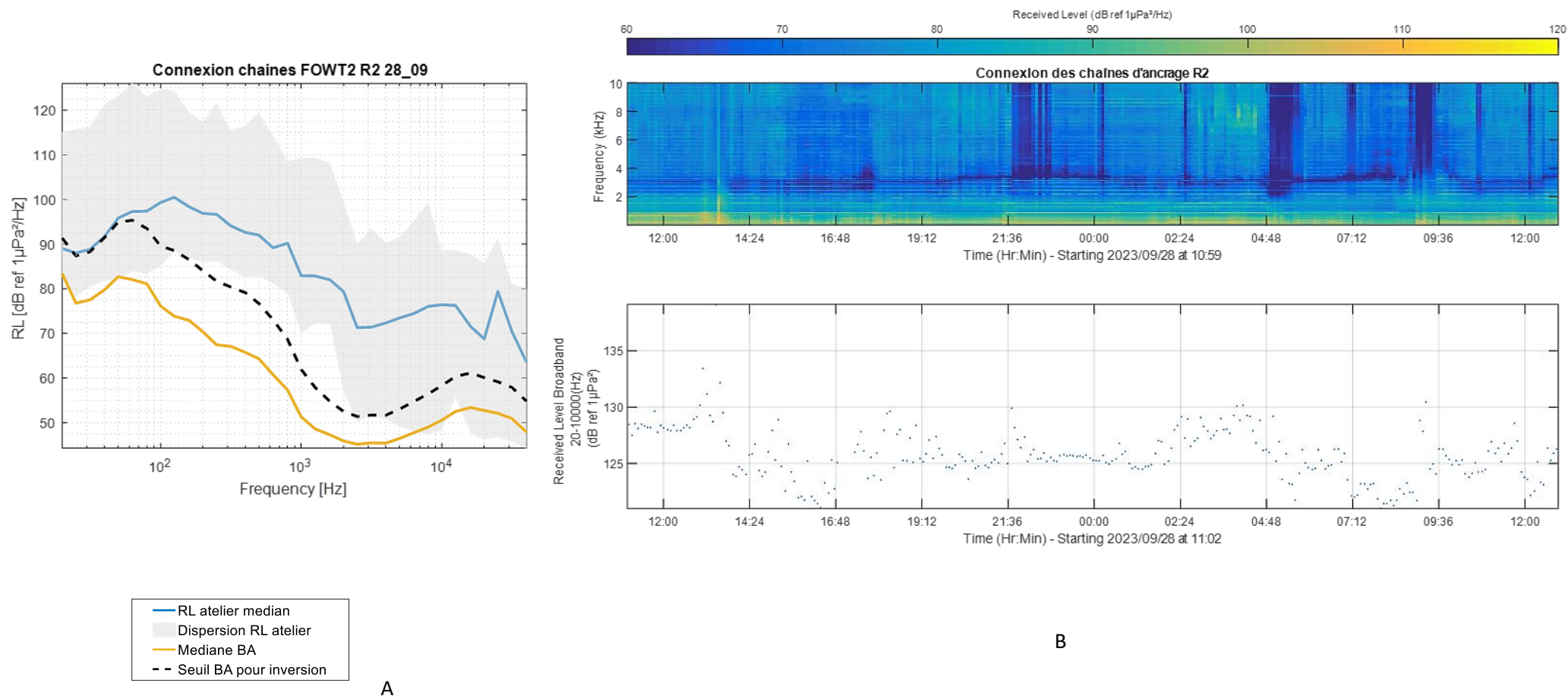


Figure 29 : Connexion des chaines d'ancrage de FOWT2 les 28 et 29/09/2023.

A- Niveaux reçus en fonction de la fréquence (dB ref 1µPa²/Hz) de l'atelier (médiane en bleu et distribution dans l'aire grise) comparés au bruit ambiant médian (jaune) et au bruit ambiant de référence (noir, P10% +6dB) utilisé pour l'inversion acoustique.

B- En haut, spectrogramme (20Hz-10kHz, exprimé en dB ref 1µPa²/Hz) du bruit reçu lors de l'atelier. En bas, évolution du niveau large bande (20Hz-10kHz, dB ref 1µPa²) correspondant.

V.2.4. Inversion acoustique et estimation des niveaux de source

A partir des données d'émergence sonore au niveau des capteurs et de la modélisation des pertes de transmission calculées par la plateforme Quonops®, l'estimation du niveau sonore émis à 1 mètre (par convention) est proposée. En considérant l'hypothèse que la source principale de bruit est assimilable au navire NORMAND INSTALLER, la profondeur de source est placée à 2/3 du tirant d'eau du navire, soit environ 5.40m. Le récepteur est quant à lui placé à 50m de la surface (immersion du capteur acoustique). Pour tenir compte la variabilité des distances source/ récepteur, le calcul des pertes est réalisé pour chaque segment temporel de signal conservé suite au filtrage des émergences acoustiques. Une illustration des pertes de transmission calculées à la fréquence de 500Hz est proposée dans la Figure 30.

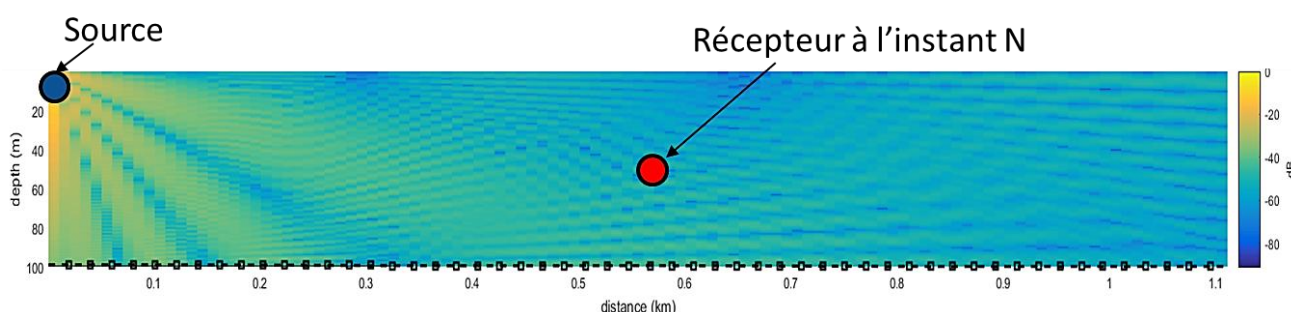


Figure 30 : Illustration du calcul des pertes acoustiques à la fréquence 500Hz.

La Figure 31 fournit les estimations du niveau sonore à un mètre des ateliers (dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ @1m), en fonction de la fréquence :

- ✓ La distribution médiane d'énergie à la source est tracée en bleu ;
- ✓ La dispersion (min/max) de la distribution d'énergie à la source est tracée en gris clair ;
- ✓ La distribution médiane et l'écart type associé sont tracés en gris foncé.

En complément, la Figure 32 synthétise les niveaux médians estimés à un mètre pour tous les ateliers analysés. Le Tableau 15 donne les niveaux large bande (exprimés en dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ @1m) pour chaque prédiction.

Globalement, tous les ateliers inversés (hors remorquage) mettent en évidence la même tendance, et laissent à penser que le bruit issu du navire support (Normand Installer) est prépondérant dans le bruit émis par le projet. On retrouve ainsi sur chaque spectre du bruit estimé à la source :

- ✓ Une émergence tonale comprise entre 20 et 50Hz, d'amplitude 170dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ @1m, correspondant au bruit de propulsion du Normand Installer ;
- ✓ Une bosse de bruit entre 100 et 1000Hz, avec des niveaux décroissants avec la fréquence compris entre 140 et 150dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ @1m. Les valeurs calculées lors de la pose des bouées temporaires sont supérieures dans cette bande avec des niveaux compris entre 140 et 160dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ @1m ;
- ✓ Une bosse de bruit entre 1 et 10kHz, correspondant probablement au bruit de machinerie embarquée sur le Normand Installer et potentiellement aux travaux réalisés par le ROV, avec des niveaux compris entre 130 et 140dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ @1m. Le profil calculé lors de la pose des dedicated lines dévie des autres entre 1.5 et 4 kHz ;
- ✓ Un bruit tonal engendré très probablement par un sondeur, avec des niveaux convergeant tous vers 140dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ @1m.

Le profil de bruit calculé lors du remorquage de l'éolienne FOWT3 partage globalement l'allure des autres, mais présente un abaissement d'environ -15dB en comparaison des autres phases entre 100Hz et 10kHz. Ceci est explicable :

- ✓ Par le fait que le Normand Installer puisse être moins sollicité lors des opérations de remorquage et de placement de l'éolienne, en effet ces opérations sont assurées par trois remorqueurs ;
- ✓ Par l'incertitude liée à la distance de source : les positions des remorqueurs ne sont pas prises en compte dans l'inversion acoustique, ce qui peut fausser le calcul des pertes.

Un log détaillé des opérations de la journée du 11 Septembre 2023 pourrait permettre d'améliorer la compréhension du bruit mis en jeu lors des opérations de remorquage.

Les niveaux large bande médians à la source sont relativement regroupés pour les opérations de pose des ancres/ ballasts/dedicated lines et pour les opérations de chaînes d'ancrage avec des valeurs allant de 182.0 à 183.7 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ @1m. Les opérations de pose des bouées entraînent un niveau de source large bande supérieur avec 185.6dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ @1m. Ces valeurs large bande sont cohérentes avec le bruit émis par le même type de navire support étudiés dans d'autres projets éoliens.

De manière identique à l'estimation par bande de fréquences, l'estimation du bruit émis par le remorquage de l'éolienne FOWT3 est significativement inférieure aux autres (-2.7 à -6.3dB) avec une valeur médiane de 179.3dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ @1m.

A partir des mesures in-situ, sans tenir compte de la sensibilité auditive des espèces, une cartographie de l'empreinte sonore du Normand Installer est établie par la plateforme Quonops. A titre conservatif, le niveau de source utilisé est le profil médian le plus énergétique, à savoir celui correspondant à la pose des bouées temporaires. La source est placée au niveau de l'éolienne FOWT3 (Nord du parc). La cartographie présentée dans la Figure 33 montre l'empreinte sonore large bande du Normand Installer (Niveau de source de 185.6dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ @1m) seuillée à 110dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (niveau de bruit ambiant médian mesurée sur zone lors de l'état de référence), sans notion d'audiogramme des mammifères marins. Avec ces hypothèses, la cartographie donne une perception du bruit maximale jusqu'à 11.5km et médiane jusqu'à 8.75km autour du navire. Les cartographies tenant compte des audiogrammes des cétacés basse et moyenne fréquence sont disponibles en annexe de ce rapport.

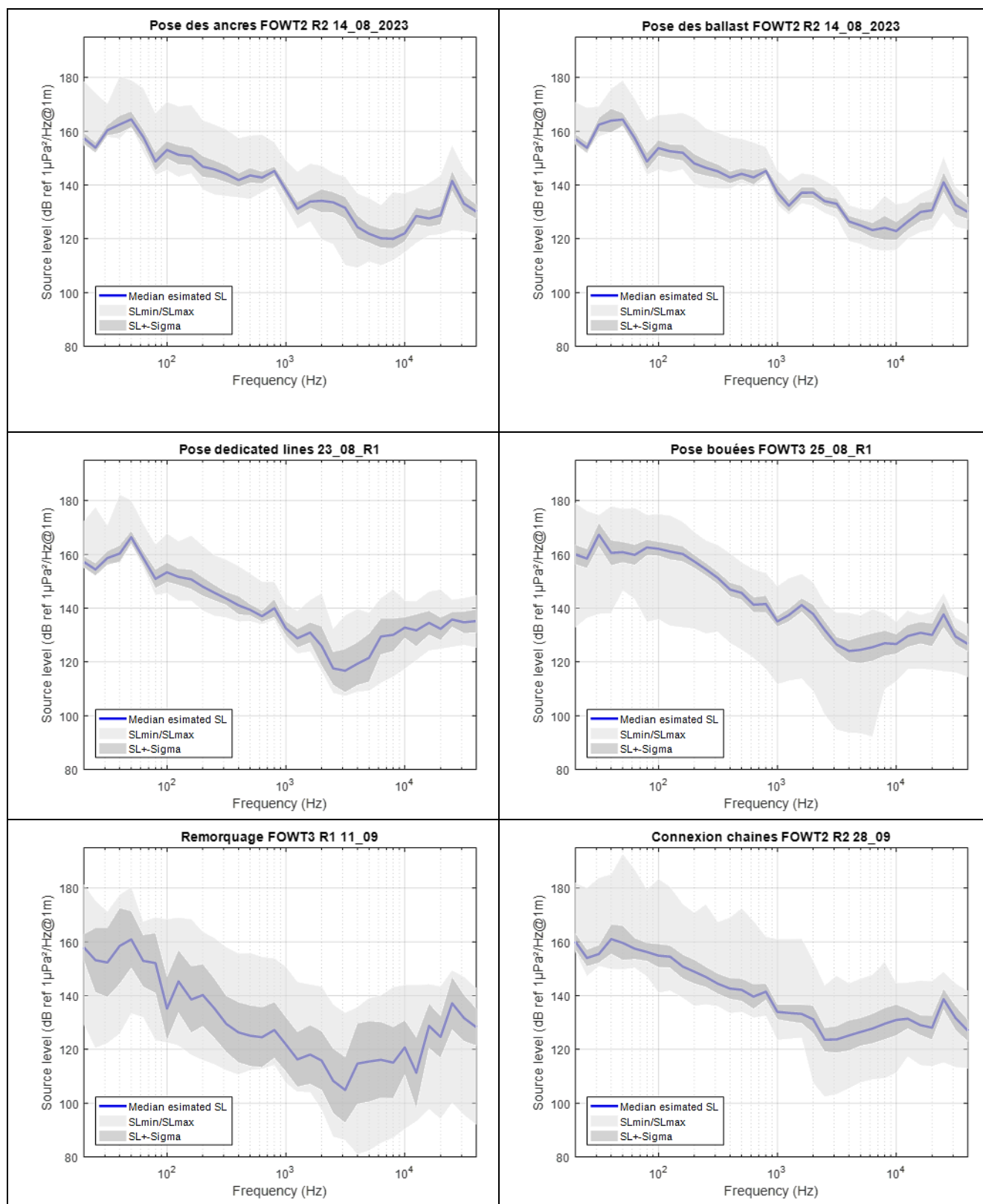


Figure 31 : Estimation des niveaux de source émis à 1m en fonction de la fréquence, pour les ateliers étudiés (dB ref 1 $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}@1\text{m}$). Les valeurs médianes sont tracées en bleu, et les dispersions sont tracées en gris (clair : min/max, foncé : médiane $\pm$ σ).

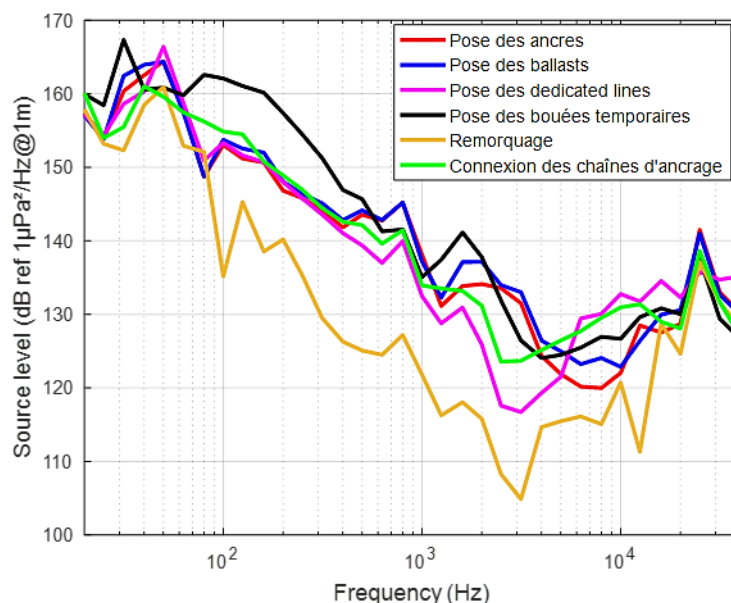


Figure 32 : Spectre des niveaux émis pour les ateliers étudiés (dB ref 1µPa²/Hz @1m).

Tableau 15 : Estimation des niveaux de source intégrés dans la bande 20Hz-40kHz (dB ref 1µPa² @1m) pour chaque atelier.

Atelier	Niveau de source médian (20Hz-40kHz) dB ref 1µPa²@1m
Pose ancres	183,5
Pose des ballasts	183,7
Pose dedicated lines	183,3
Pose bouées	185,6
Remorquage	179,3
Connexion des chaînes d'ancrage	182,0

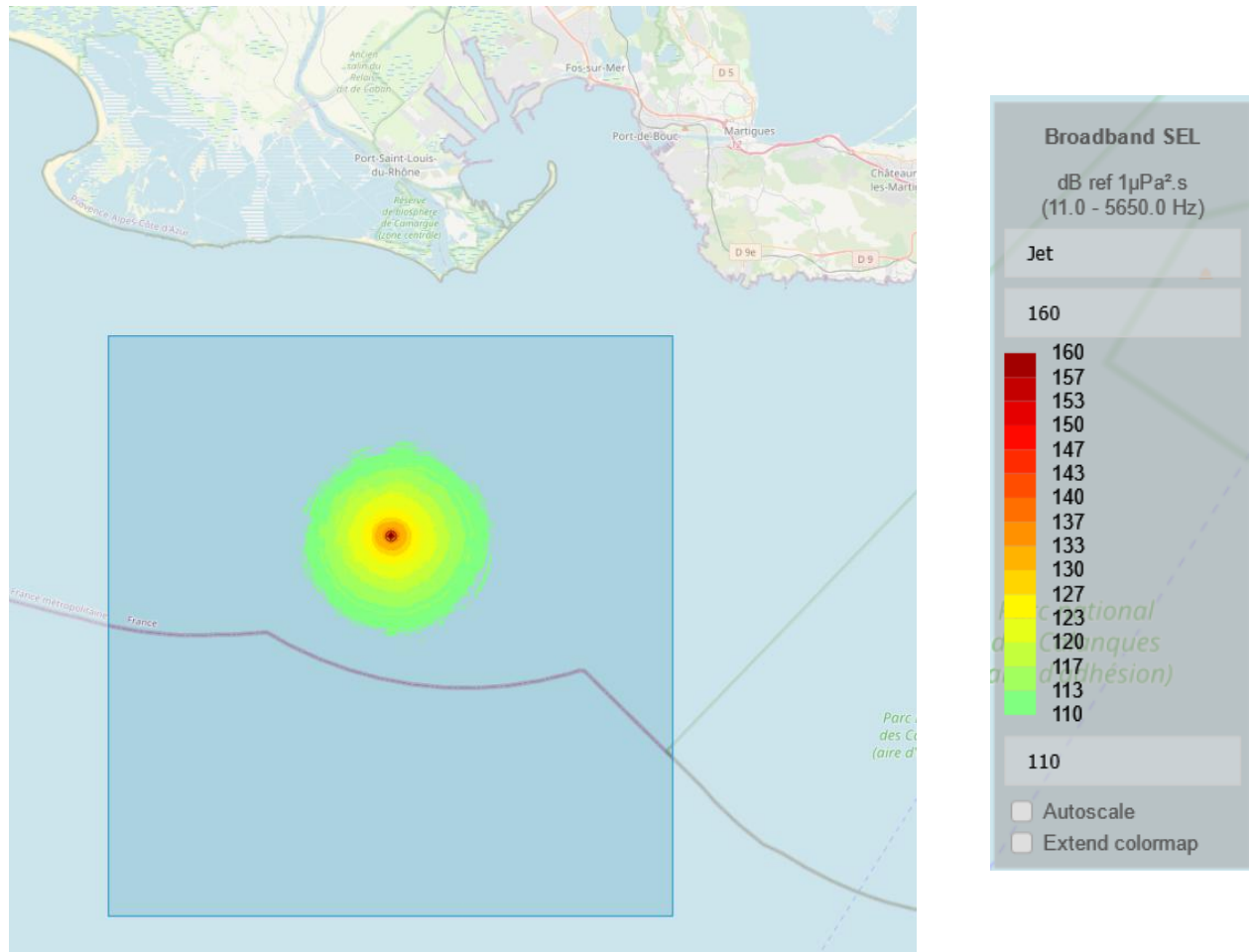


Figure 33 : Cartographie de l'empreinte sonore large bande (11Hz-5.65kHz) du Normand Installer en opérations au niveau de l'éolienne FOWT3 au percentile 5%.

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 34).

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 Phoques et l'éléphant de mer (*Mirounga sp.*).

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

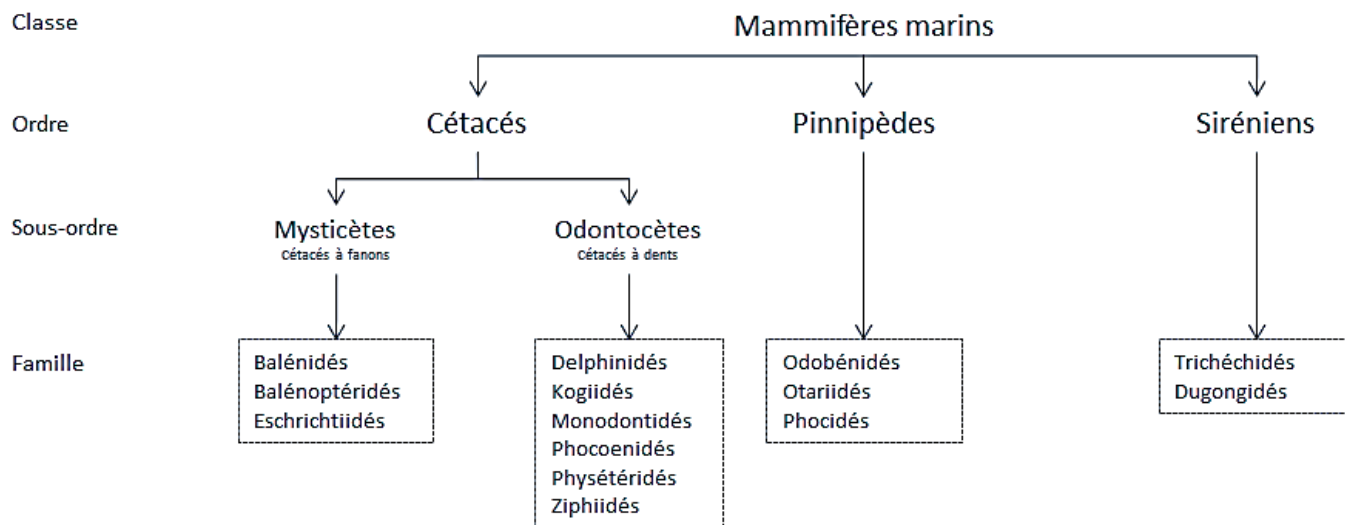


Figure 34 : Schéma de la classification scientifique des espèces océaniques et marines de mammifères. Source : Quiet-Oceans.

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

Le Tableau 16 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 5). 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).

Pour plus d'informations, 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 16 : 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 35 : Famille des Delphinidés – Grand dauphin (*Tursiops truncatus*). Source : EcoOcéan Institut.



Figure 36 : Famille des Delphinidés – Dauphin commun (*Delphinus delphis*). Source : NOAA.



Figure 37 : Famille des Balénoptéridés – Rorqual commun (*Balaenoptera physalus*). Source : MICS.



Figure 38 : 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 39 et la Figure 40.

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 17). 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.

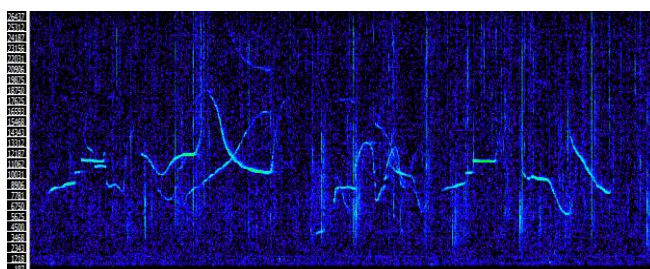


Figure 39 : Sifflements de Delphinidés émis entre 2 kHz et 25 kHz. Source : Quiet-Oceans.

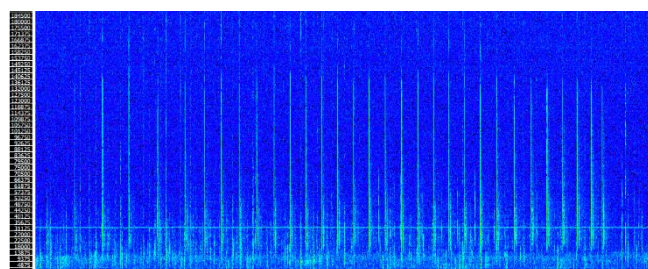
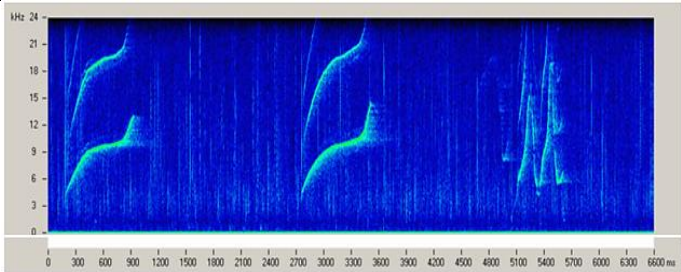
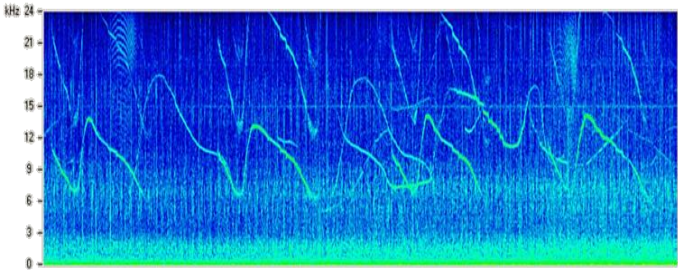
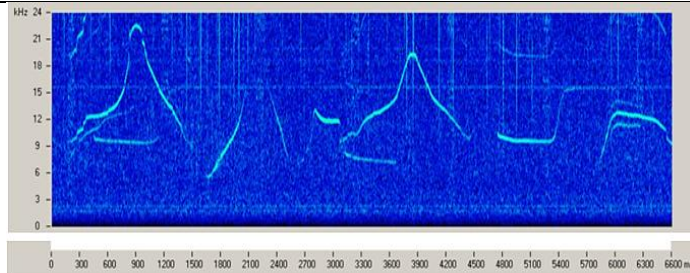
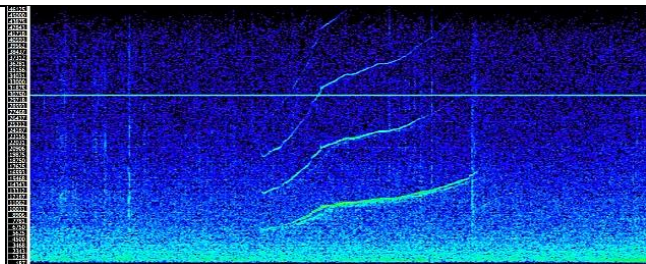
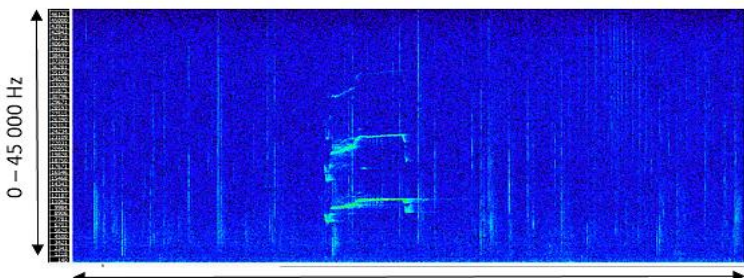


Figure 40 : Clics de Delphinidés émis entre 10 kHz et 180 kHz. Source : Quiet-Oceans.

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 17 : 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 (« downsweep ») 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 41). Ce signal est émis soit seul (Figure 42A), en doublet (Figure 42B) 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 « downsweep chirps » (Figure 42E) et « 130-Hz upsweep » (Figure 7D, Garcia et al., 2020).

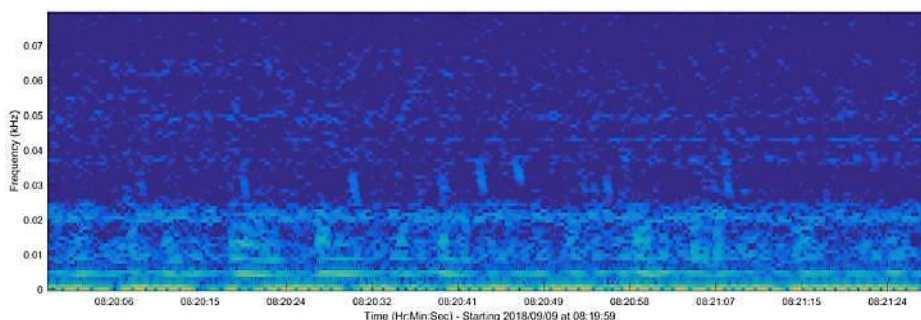


Figure 41 : Pulses (downsweep) émis par un Rorqual commun (*Balaenoptera physalus*) entre 20 et 40 Hz. Source : Quiet-Oceans, enregistrement recueilli le 09/09/2018 via un hydrophone positionné à 35m de profondeur en mer Méditerranée.

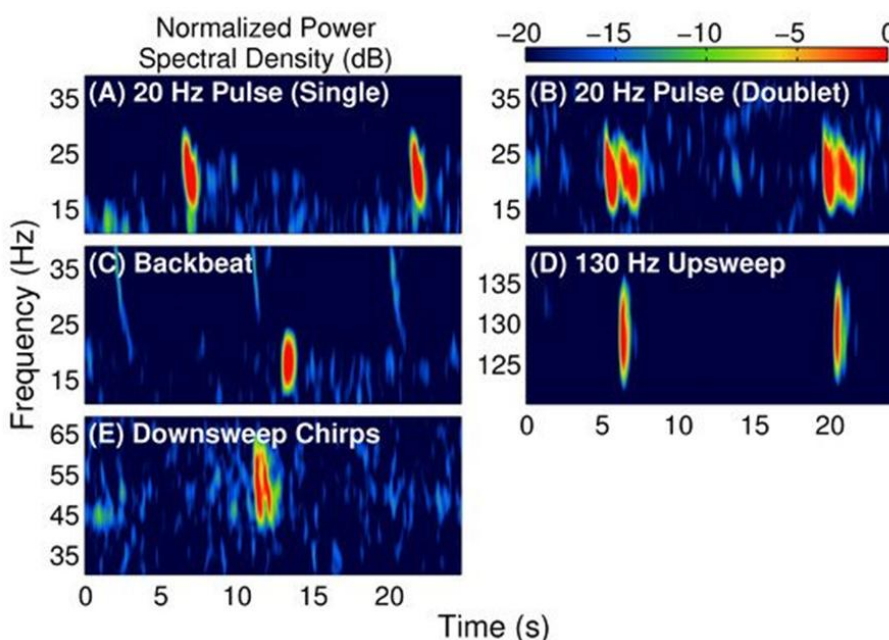


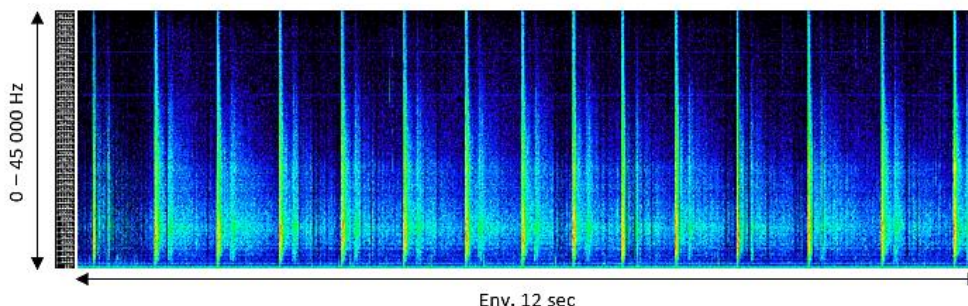
Figure 42 : Pulses émis par le Rorqual commun (*Balaenoptera physalus*).

(A) 20-Hz pulse (single), (B) 20-Hz pulse (doublet), (C) backbeat, (D) 130-Hz upsweep, (E) downsweep 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 43) (Erbe et al., 2017).

Figure 43 : 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 18 et Tableau 19 synthétisent respectivement les statistiques des distances de détection théoriques pour les espèces de Delphinidés potentiellement présentes au large de Fos-sur-Mer aux périodes estivale et automnale 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, R2 et R3. Pour rappel, aucune donnée n'est disponible au niveau de la station R4 suite à un chalutage de la station acoustique (cf. III.2.).

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 200m).

En comparaison de l'état de référence, les portées de détections obtenues dans le cadre de la phase d'installation sont plus faibles au niveau des stations R1 (zone proche) et R3 (zone intermédiaire), et ce principalement au regard de la saison hivernale 2023. Le bruit anthropique plus important généré durant la phase d'installation est probablement à l'origine de cette baisse des portées de détections.

Tableau 18 : 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	146	327	692	1798	2798
		R2	113	259	588	1904	2959
		R3	467	721	1168	2089	3174
	Dauphin bleu-et-blanc <i>Stenella coeruleoalba</i>	R1	20	91	198	321	426
		R2	14	82	214	337	444
		R3	79	156	233	341	433

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'automne 2023.

Famille	Espèce	Zone	Portée de détection (m)				
			Proportion du temps (%)				
			95	75	50	25	5
Delphinidés	Grand dauphin <i>Tursiops truncatus</i>	R1	131	227	429	819	2901
		R2	104	258	426	884	2880
		R3	512	736	991	1495	3218
	Dauphin bleu-et-blanc <i>Stenella coeruleoalba</i>	R1	19	53	150	255	436
		R2	14	108	216	321	458
		R3	142	240	297	373	471

VI.3. Procédé de traitement bioacoustique

La Figure 44 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.

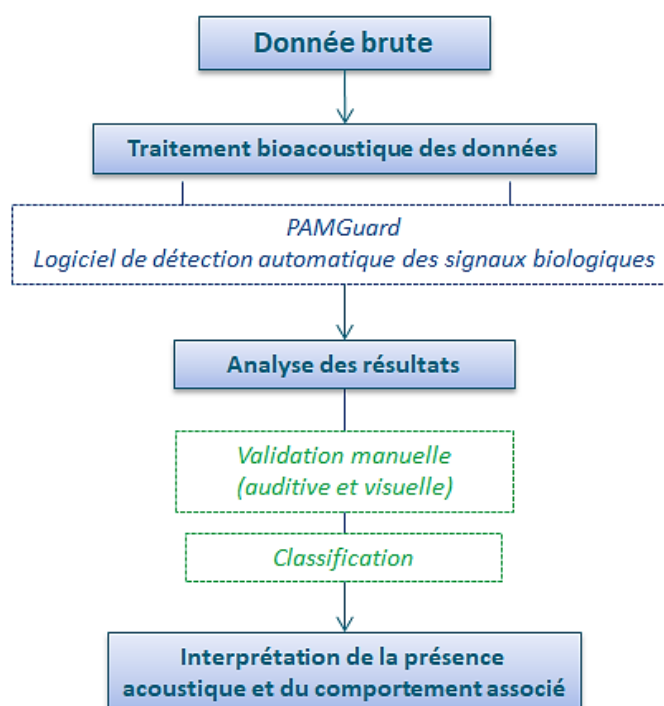


Figure 44 : Procédure générale appliquée à la donnée brute pour le traitement bioacoustique des enregistrements sonores.

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 (estivale et automnale) 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 20, 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 20 : 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 été 2023 (13/08/2023 au 27/08/2023)

Durant cette campagne, le déploiement d'un enregistreur acoustique a été réalisé au niveau de chacune des stations du projet (R1, R2, R3 et R4) du 02 août au 07 septembre 2023. Conformément au protocole, l'analyse des données a été réalisée sur une durée spécifique de 15 jours soit du 13 au 27 août 2023. Cette période a été définie par EDF-EN en regard des activités du chantier.

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

i. Famille des Delphinidés

La Figure 45 représente les périodes de présence acoustique des Delphinidés (détections des clics et sifflements) dans la donnée recueillie par les enregistreurs acoustiques au niveau des stations R1, R2 et R3 pour la période du 13 au 27 août 2023 (période estivale).

Suite à la vérification manuelle des détections automatiques réalisées par le logiciel PAMGuard, il apparaît que l'ensemble de la zone d'étude est très peu fréquenté par les Delphinidés. En effet, au niveau des stations R1 (au nord du parc éolien) et R3 (à 1500m en dehors du parc éolien), les Delphinidés sont exceptionnellement présents avec un total de trois périodes de détections sur 15 jours de mesure.

Au niveau de la station R1, un unique sifflement de faible intensité (Figure 46) a été détecté le 18 août 2023 vers 09h51 UTC. Au niveau de la station R3, deux périodes de détections ont été réalisées sur la journée du 26 août 2023 entre 09h30 et 10h00 UTC (Figure 47) avec l'observation des signatures acoustiques suivantes :

- ✓ Détection de « buzzs » ;
- ✓ Détection de trains de clics d'écholocation entre 15 et 128 kHz ;
- ✓ Un ICI variable (plus ou moins court) pour chaque train de clics détectés ;
- ✓ Détections de sifflements et quelques cris pulsés.

L'ensemble de ces signatures évoquent un probable épisode de chasse à proximité de la station R3. Toutefois, la faible présence acoustique des Delphinidés sur site rend complexe, voire impossible, d'établir le comportement de ces mammifères marins sur site. Cet épisode de chasse est donc considéré opportuniste.

A noter, les Delphinidés sont acoustiquement absents à proximité de la station R2. En effet, aucun signal acoustique associé à la présence de Delphinidés (clics et/ou sifflements) n'a été détecté sur la totalité de la période sur cette station située au sud du parc éolien.

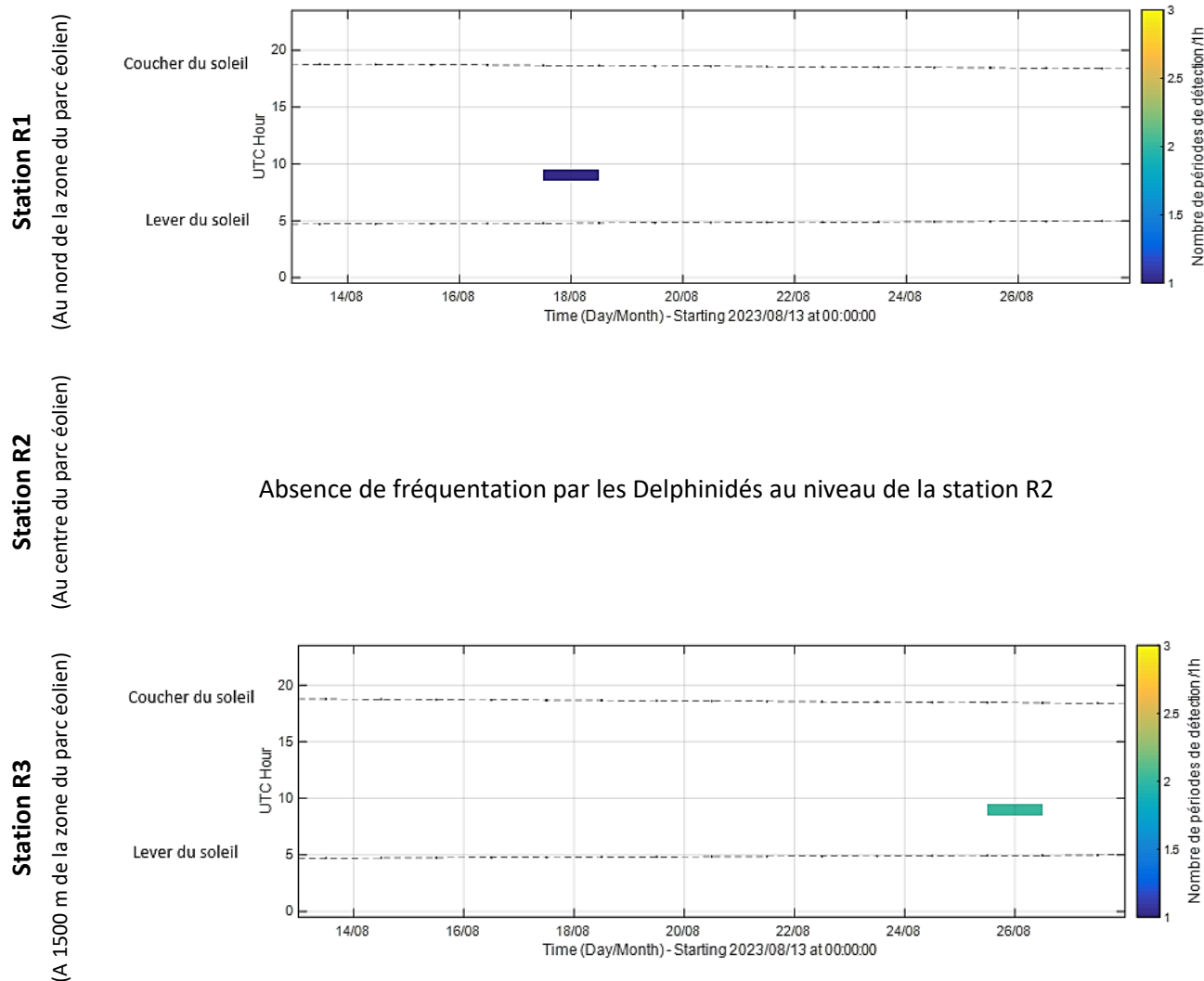


Figure 45 : Périodes de détections des clics et sifflements de Delphinidés en fonction du jour et de la nuit au niveau de chaque station (R1, R2 et R3) entre le 13 et 27 août 2023.

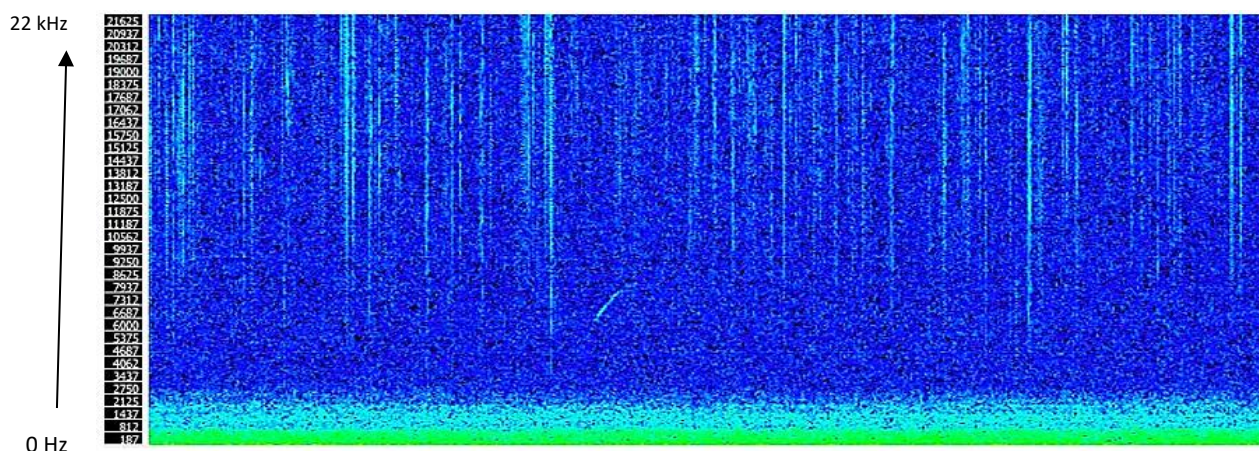


Figure 46 : Sifflement de très faible intensité émis par un Delphinidé, Dauphin *sp.*, à proximité de la station R1. Enregistrement du 18/08/2023 vers 09h51 UTC.

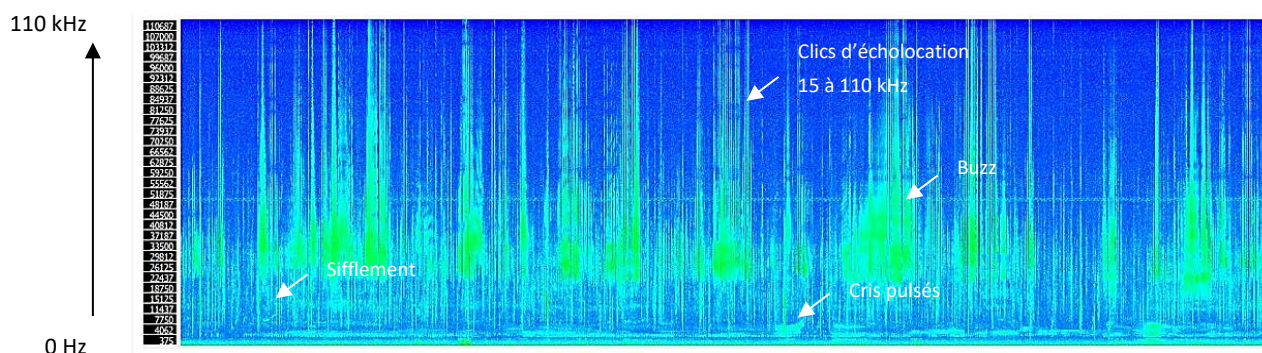


Figure 47 : Trains de clics d'écholocation, buzz, sifflements et quelques cris pulsés émis par les Delphinidés évoquant une activité de chasse opportuniste à proximité de la station R3. Enregistrement du 29/08/2023 vers 09h40 UTC.

ii. Famille des Balénoptéridés

La Figure 48 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, R2 et R3 pour la période du 13 au 27 août 2023. Il apparaît que la présence du Rorqual commun est occasionnelle au niveau des stations de mesure R1 et R2 avec un taux de présence acoustique respectif de :

- ✓ 33% au niveau de la station R1 (au nord de la zone du parc éolien), avec 14 périodes de détections d'impulsions basses fréquences observées sur 5 jours pour un total de 15 jours de mesure ;
- ✓ 40% au niveau de la station R2 (au centre du parc éolien), avec 7 périodes de détections d'impulsions basses fréquences observées sur 6 jours pour un total de 15 jours de mesure.

Au niveau de la station R1, la détection des impulsions basses fréquences a été réalisé indépendamment des heures de la journée et se concentrent principalement entre le 19 et 25 août 2023. Au niveau de la station R2, les impulsions ont été détectées en grande majorité durant la période nocturne. Les signatures acoustiques détectées correspondent à des impulsions de 20 Hz (pulses ou « 20-Hz signal », cf VI.1.3.b.) émis principalement en doublet (Figure 49). Seules quelques détections ont permis de noter la présence de pulses émis seuls (Figure 50). L'ensemble de ces détections de pulses est associé 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, les Rorquals communs sont régulièrement présents avec un taux de présence acoustique de 60% soit 24 périodes de détections sur 9 jours pour un total de 15 jours de mesure. Les détections ont été réalisées aussi bien de jour comme de nuit. Aucune période préférentielle de passage n'a donc pu être établie pour la présence des Rorquals communs à 1500m de la zone de concession du parc éolien. Les résultats de la validation bioacoustique sont similaires à ceux obtenus au niveau de la station R1 avec la détection d'impulsions de 20 Hz émis en doublet (Figure 51) en grande majorité entre le 19 et 25 août 2023.

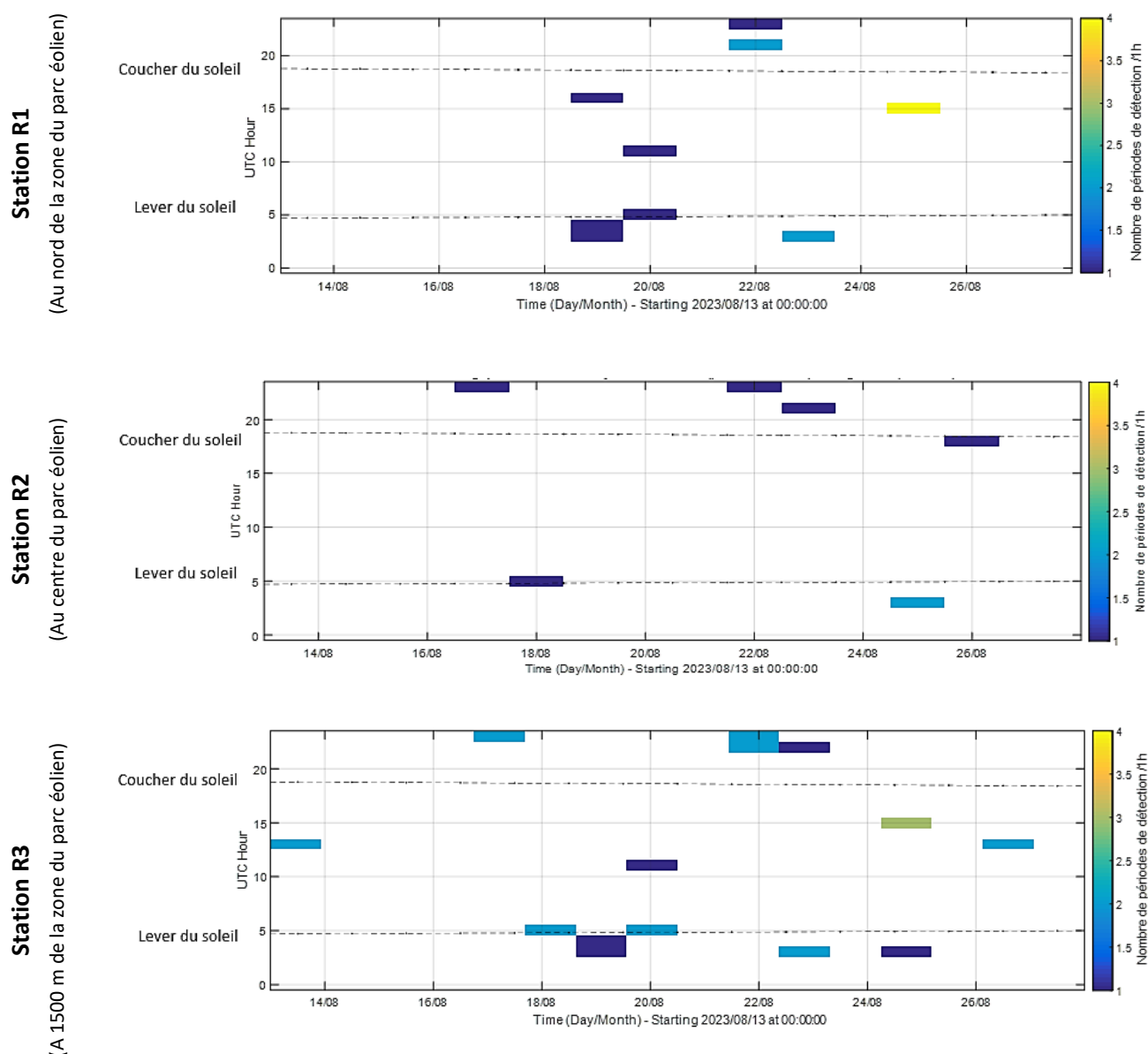


Figure 48 : Périodes de détections des pulses émis par les Rorquals communs (*Balaenoptera physalus*) en fonction du jour et de la nuit au niveau de chaque station (R1, R2 et R3) entre le 13 et 27 août 2023.

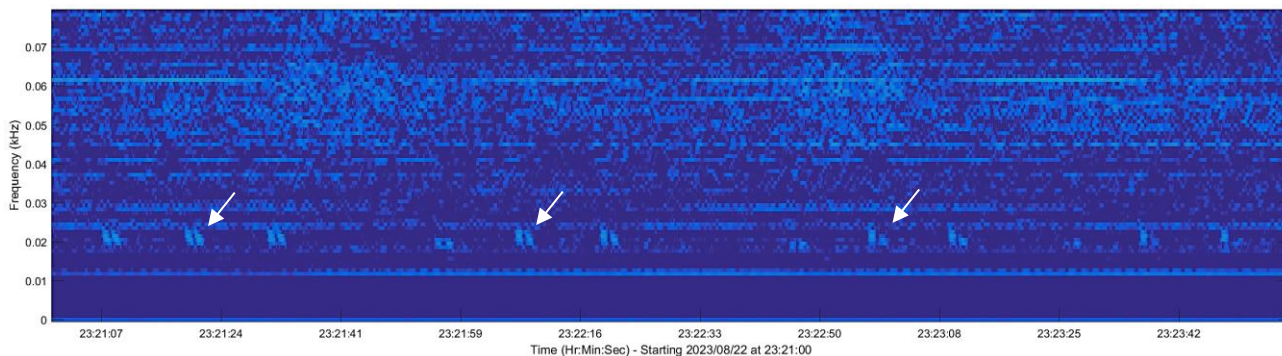


Figure 49 : Pulses émis en doublet par un Rorqual commun, *Balaenoptera physalus*, entre 27 Hz et 17 Hz (« 20-Hz signal ») à proximité de la station R1. Enregistrement du 22/08/2023 vers 23h21 UTC.

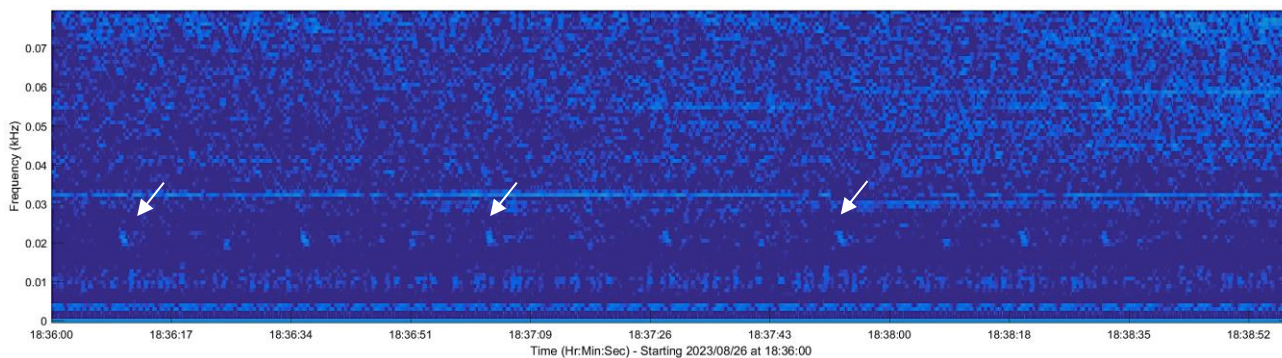


Figure 50 : Pulses émis seuls par un Rorqual commun, *Balaenoptera physalus*, entre 27 Hz et 17 Hz (« 20-Hz signal ») à proximité de la station R2. Enregistrement du 26/08/2023 vers 18h36 UTC.

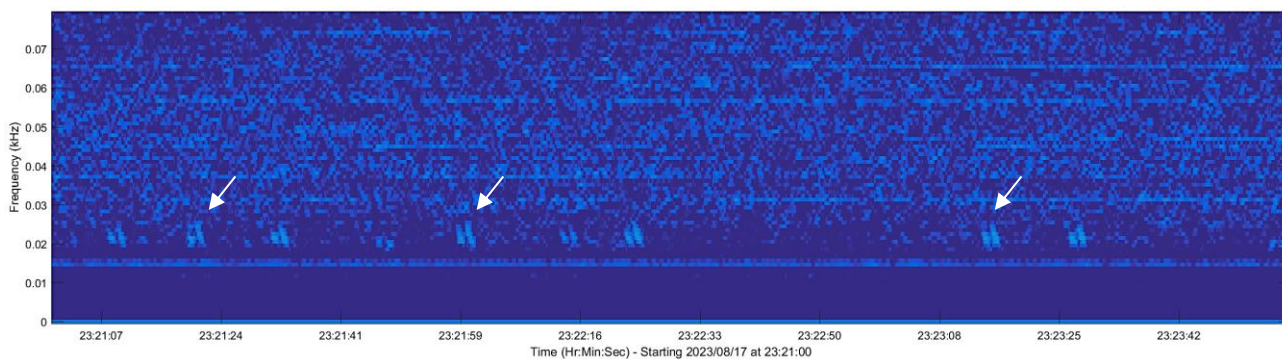


Figure 51 : Pulses émis en doublet par un Rorqual commun, *Balaenoptera physalus*, entre 27 Hz et 17 Hz (« 20-Hz signal ») à proximité de la station R3. Enregistrement du 17/08/2023 vers 23h21 UTC.

iii. Famille des Physétéridés

Le Cachalot, *Physeter macrocephalus*, est considéré acoustiquement absent entre le 13 et 27 août 2023 au niveau de chacune des stations (R1, R2 et R3). 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 13 au 27 août 2023, la très faible présence acoustique des Delphinidés ne permet pas d'établir un quelconque comportement de ces mammifères marins aux alentours des stations d'études. Seul un épisode de chasse qualifié d'opportuniste a pu être mis en évidence sur la journée du 26 août 2023 au niveau de la station R3 (point de contrôle située à 1 500 m de la zone du parc éolien). Cet épisode est isolé et non représentatif du comportement des Delphinidés sur site.

Concernant les Rorquals communs, une analyse approfondie des impulsions basses fréquences détectés en dessous de 100 Hz sur la période du 13 au 27 août 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 quelques sifflements observés au niveau de la station R3 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 14 kHz (Figure 52).

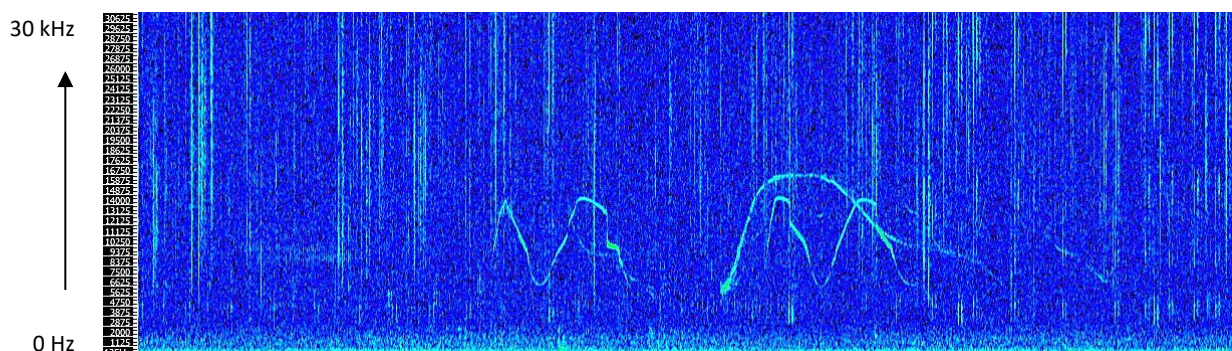


Figure 52 : Sifflements émis par le Grand Dauphin (*Tursiops truncatus*) entre 5 et 14 kHz le 26/08/2023 vers 09h45 UTC au niveau de la station R3.

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

Le Tableau 21 synthétise les résultats obtenus via les enregistreurs acoustiques (enregistrement en continu) quant à la présence des mammifères marins au niveau des stations de mesure R1, R2 et R3 entre le 13 et 27 août 2023 (période estivale) :

- ✓ Les stations d'étude sont très peu fréquentées par les Delphinidés avec une présence exceptionnelle (6%) au niveau des stations R1 et R3 et une absence acoustique au niveau de la station R2 ;
- ✓ Les stations R1 et R2 sont occasionnellement fréquentées par les Rorquals communs avec un taux de présence respectif de 33% et 40%. La station R3 apparaît comme la station la plus fréquentée avec 60% 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.

A la vue des résultats obtenus, le comportement des Delphinidés sur site n'a pas pu être précisément établi en conséquence d'une très faible fréquentation des zones d'études par ces derniers. A l'inverse, le comportement prédominant des Rorquals communs est associé à la cohésion sociale.

Tableau 21 : Synthèse des résultats quant à la présence des mammifères marins entre le 13 et 27 août 2023 au niveau des stations de mesure R1, R2 et R3. 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	R2 Au centre du parc	R3 A 1500 m du parc	R1 Au nord du parc	R2 Au centre du parc	R3 A 1500 m du parc
Delphinidés	Exceptionnelle (6%)	Absence (0%)	Exceptionnelle (6%)	N/A	N/A	N/A
Balénoptéridés	Occasionnelle (33%)	Occasionnelle (40%)	Régulière (60%)	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 automne 2023 (22/09/2023 au 06/10/2023)

Conformément au protocole, l'analyse des données a été réalisée pour les stations R1, R2 et R3 sur une durée de 15 jours soit du 22 septembre au 06 octobre 2023. Cette période a été définie par EDF-EN en regard des activités du chantier.

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

i. Famille des Delphinidés

La Figure 53 représente les périodes de présence acoustique des Delphinidés (détections des clics et sifflements) dans la donnée recueillie par les enregistreurs acoustiques au niveau des stations R1, R2 et R3 pour la période du 22 septembre au 06 octobre 2023 (période automnale).

Les Delphinidés sont acoustiquement absents au niveau de la station R1. En effet, aucun clics et/ou sifflements associés à la présence de Delphinidés n'a été détecté sur la totalité de la période sur cette station située au nord de la zone de concession du parc éolien.

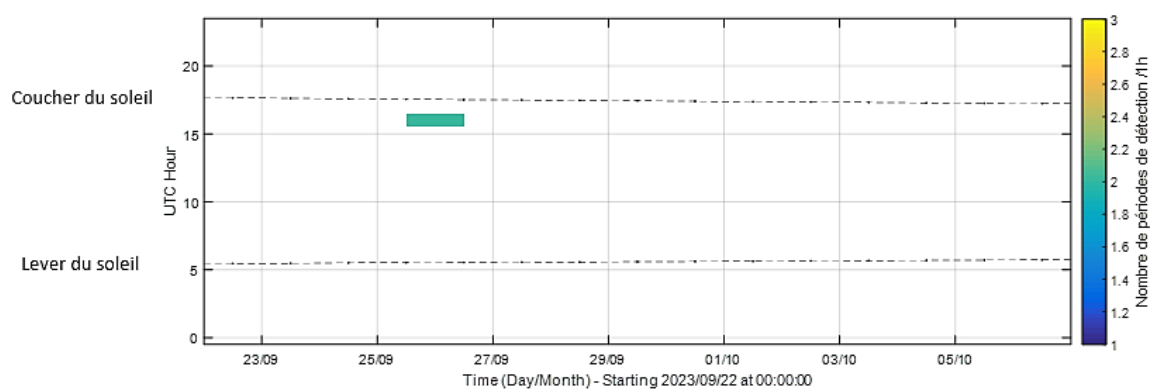
Au niveau de la station R2, la présence des Delphinidés est exceptionnelle avec deux périodes de détection sur la journée du 26 septembre 2023 entre 16h20 et 16h30 UTC. Les détections réalisées correspondent à des sifflements d'intensité plus ou moins faible et marquent alors un comportement de socialisation/communication entre individus. Toutefois, à la vue du faible nombre de détections, ce comportement est minoritaire sur l'ensemble de la période d'étude et n'est pas représentatif du comportement des Delphinidés sur site.

Au niveau de la station R3, les Delphinidés sont occasionnellement présents avec un taux de présence acoustique proche de 14% sur l'ensemble de la période d'étude. Un total de 5 périodes de détections de clics a été observé sur les journées du 05 et 06 octobre 2023 pour un total de 15 jours d'enregistrement. Lors de l'analyse bioacoustique, plusieurs caractéristiques des clics détectés ont permis de noter un comportement de sondage de l'environnement dans lequel les cétacés évoluent via l'observation de clics d'écholocation (Figure 54) mais également d'interactions entre individus via la présence de clics dont la fréquence d'émission est inférieure à 80 kHz (Figure 55).

Station R1
(Au nord de la zone du parc éolien)

Absence de fréquentation par les Delphinidés au niveau de la station R1

Station R2
(Au centre du parc éolien)



Station R3
(A 1500m de la zone du parc éolien)

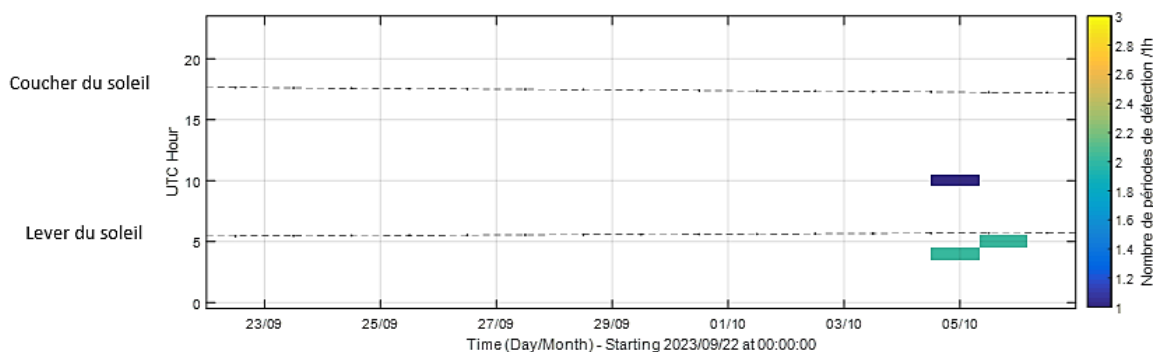


Figure 53 : Périodes de détections des clics et sifflements de Delphinidés en fonction du jour et de la nuit au niveau de chaque station (R1, R2 et R3) entre le 22 septembre et 06 octobre 2023.

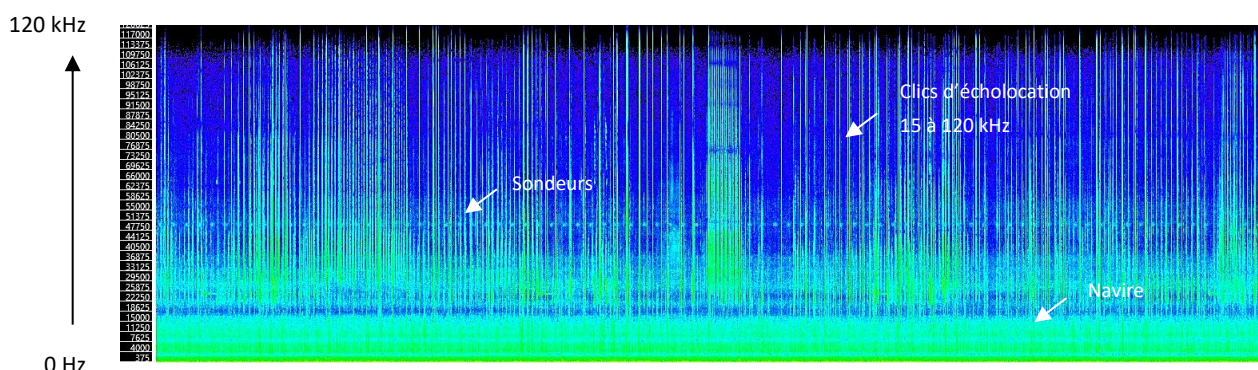


Figure 54 : Trains de clics d'écholocation émis par les Delphinidés entre 15 kHz et 120 kHz, au niveau de la station R3. Enregistrement du 05/10/2023 vers 04h35 UTC.

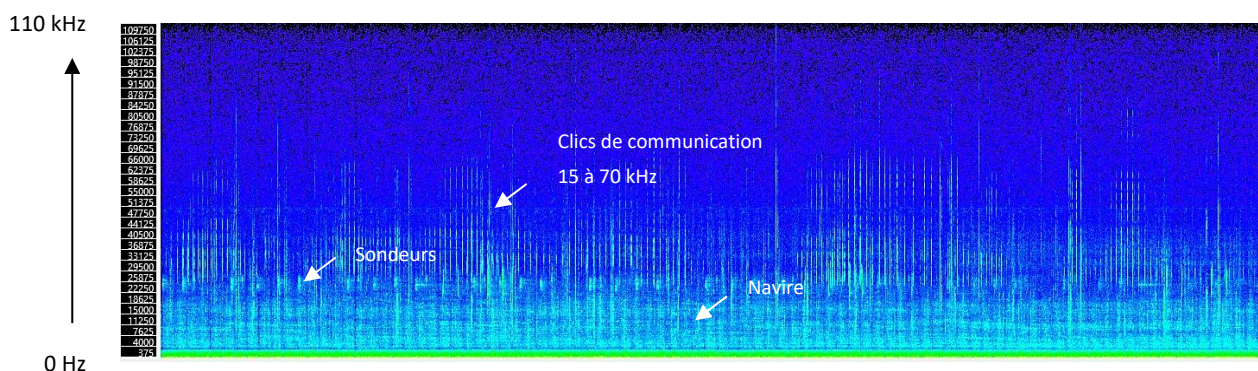


Figure 55 : Trains de clics de communication émis par les Delphinidés entre 15 kHz et 70 kHz, à proximité de la station R3. Enregistrement du 06/10/2023 vers 05h09 UTC.

ii. Famille des Balénoptéridés

La Figure 56 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, R2 et R3 pour la période du 22 septembre au 06 octobre 2023.

Il apparaît que la présence des Rorquals communs est occasionnelle au niveau de la station R1 avec un taux de présence acoustique proche de 27%, soit 37 périodes de détections d'impulsions basses fréquences observées sur 4 jours pour un total de 15 jours d'enregistrement.

Au niveau des stations R2 et R3, la présence acoustique de ces mammifères marins est régulière avec un taux respectif de :

- ✓ 47% au niveau de la station R2, avec 48 périodes de détections d'impulsions basses fréquences observées sur 7 jours pour un total de 15 jours d'enregistrement ;
- ✓ 54% au niveau de la station R3, avec 54 périodes de détections d'impulsions basses fréquences observées sur 8 jours pour un total de 15 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 nuit et se concentrent sur la journée du 29 septembre 2023 entre 02h30 et 07h00 UTC. Les signatures acoustiques détectées correspondent à des pulses « 20-Hz signal » émis seul (figure) ou en doublet (figure) et sont associés à une fonction sociale (Romagosa et al., 2021; Širović et al., 2013).

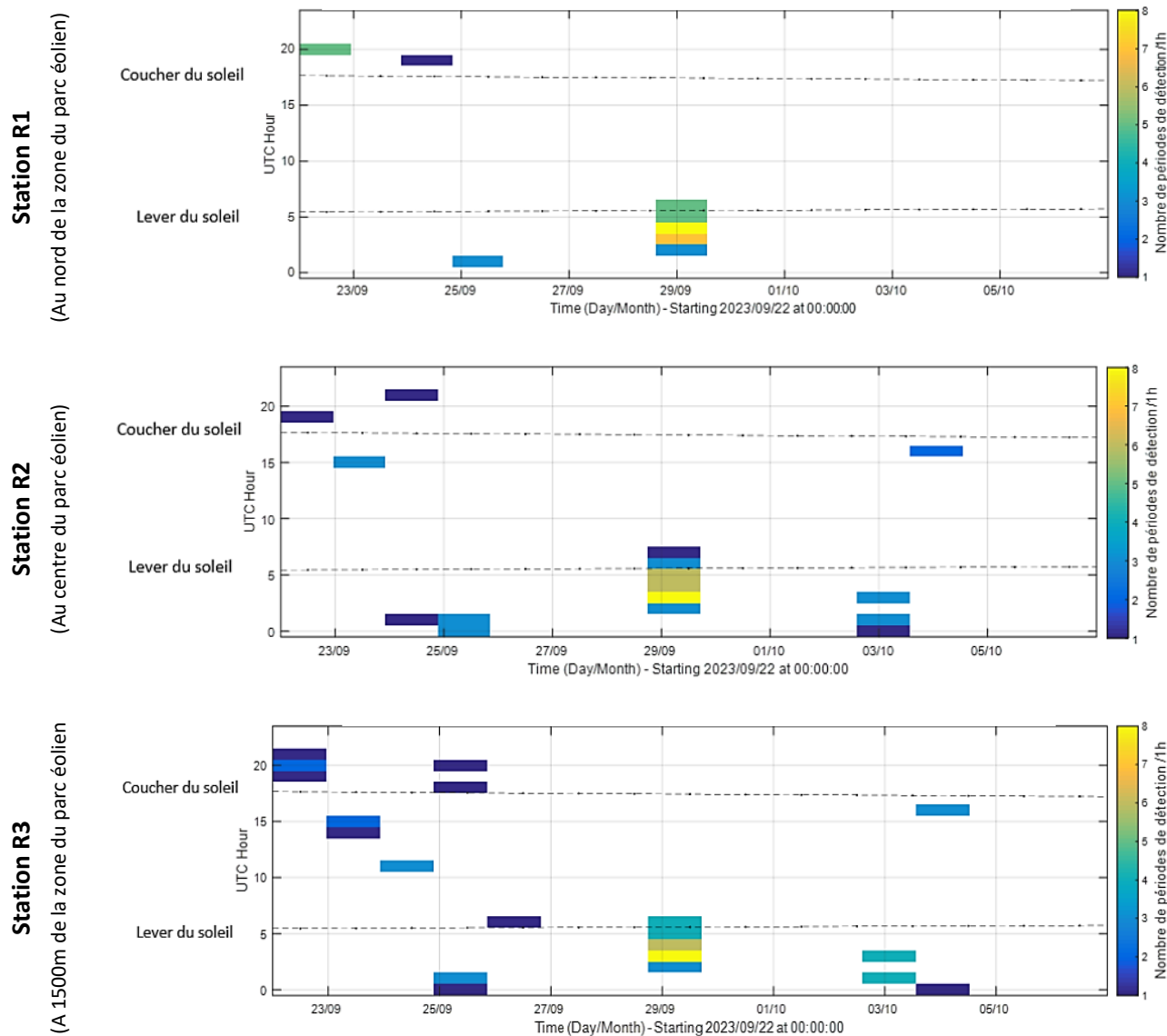


Figure 56 : Périodes de détections des pulses émis par les Rorquals communs (*Balaenoptera physalus*) en fonction du jour et de la nuit au niveau de chaque station (R1, R2 et R3) entre le 22 septembre et 06 octobre 2023.

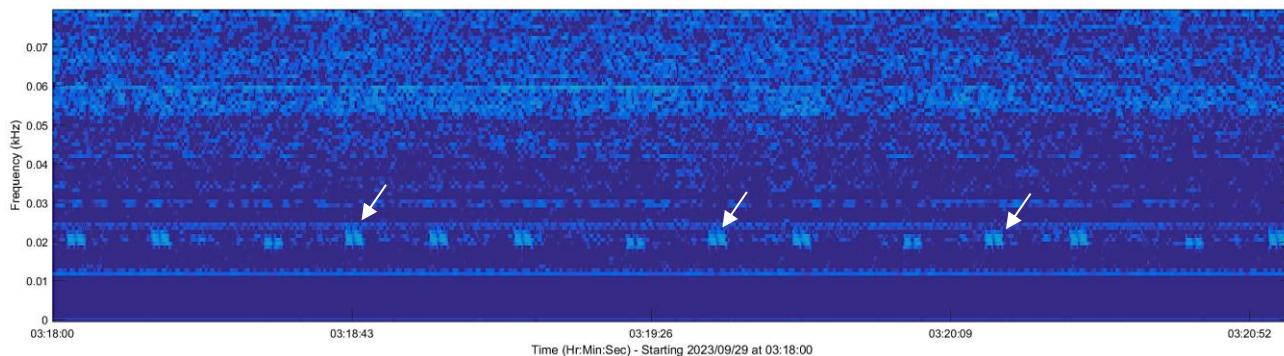


Figure 57: Pulses émis en doublet par un Rorqual commun, *Balaenoptera physalus*, entre 27 Hz et 17 Hz (« 20-Hz signal ») à proximité de la station R1. Enregistrement du 22/09/2023 vers 20h27 UTC.

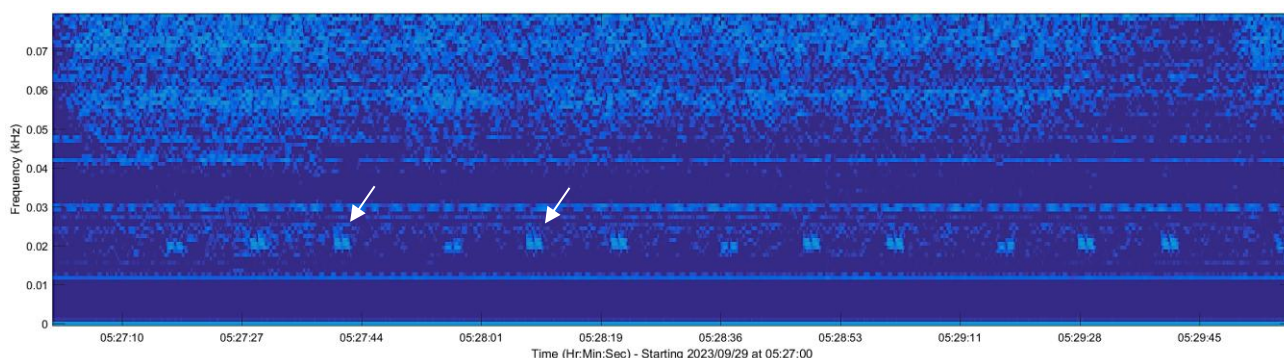


Figure 58 : Pulses émis en doublet par un Rorqual commun, *Balaenoptera physalus*, entre 27 Hz et 17 Hz (« 20-Hz signal ») à proximité de la station R2. Enregistrement du 29/09/2023 vers 05h27 UTC.

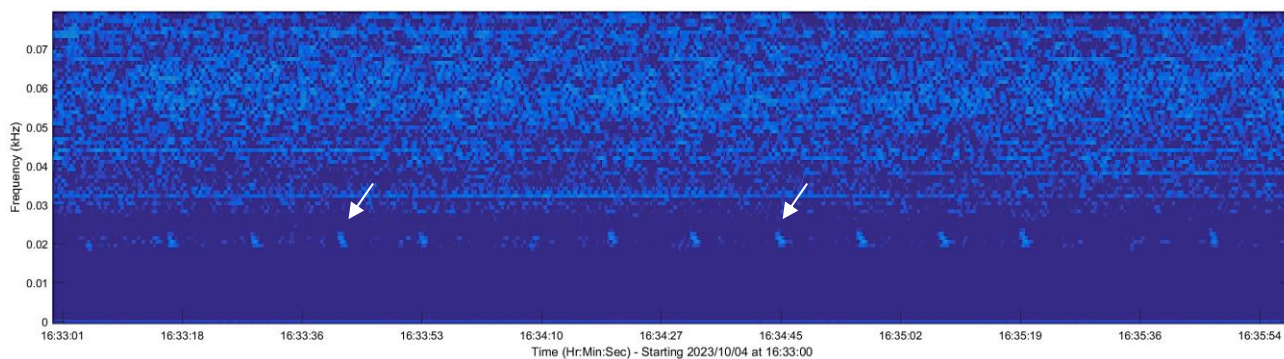


Figure 59 : Pulses émis seuls par un Rorqual commun, *Balaenoptera physalus*, entre 27 Hz et 17 Hz (« 20-Hz signal ») à proximité de la station R3. Enregistrement du 04/10/2023 vers 16h33 UTC.

iii. Famille des Physétéridés

Le Cachalot, *Physeter macrocephalus*, est considéré acoustiquement absent entre le 22 septembre et 06 octobre 2023 au niveau des stations R1, R2 et R3. 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 estivale, du 13 au 27 août 2023.

VI.4.2.b. Comportements observés

Sur la période allant du 22 septembre au 06 octobre 2023, l'analyse des enregistrements qui contiennent des contacts acoustiques de Delphinidés au niveau des stations R2 et R3 indiquent de manière générale un comportement de socialisation par la présence de quelques sifflements et de clics émis entre 15 et 80 kHz. Certaines détections de clics d'écholocation ont également permis de mettre en évidence un sondage de l'environnement dans lequel les cétacés évoluent, principalement au niveau de la station R3.

Concernant les Rorquals communs, les signatures acoustiques majoritairement détectés dans la donnée correspondent à des « 20-Hz signal » émis en doublet et sont associés à une fonction de cohésion sociale et/ou de reproduction (Romagosa et al., 2021; Širović et al., 2013).

VI.4.2.c. Classification des signaux biologiques

Une classification des sifflements observés au niveau de la station R2 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 7 kHz (Figure 60).

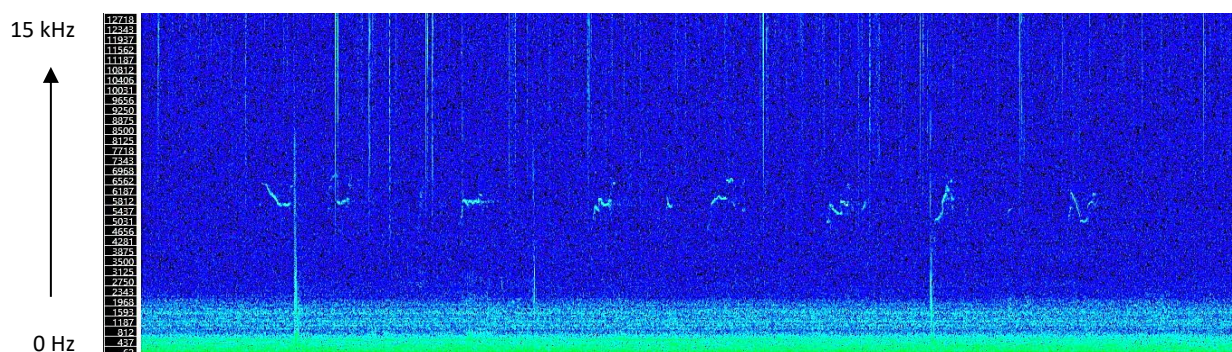


Figure 60 : Sifflements de faible intensité émis par le Grand Dauphin (*Tursiops truncatus*) entre 3 et 7 kHz le 26/09/2023 vers 16h23 UTC au niveau de la station R2.

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

Le Tableau 12 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 22 septembre et 06 octobre 2023 (période automnale) :

- ✓ Les stations R1 (au nord de la zone du parc éolien) et R2 (au centre de la zone du parc éolien) sont très peu fréquentées par les Delphinidés avec une présence exceptionnelle au niveau de la station R1 et une absence acoustique au niveau de la station R2 ;
- ✓ Les stations R1 et R2 sont occasionnellement à régulièrement fréquentées par les Rorquals communs avec un taux de présence respectif de 27% et 47% ;
- ✓ La station R3 apparaît comme la station la plus fréquentée par les mammifères marins avec une présence occasionnelle de Delphinidés (14%) et régulière de Rorquals communs (54%).

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

A la vue des résultats obtenus, il est possible de noter un comportement de sondage de l'environnement et de communication entre individus pour les Delphinidés et ce, principalement au niveau de la station R3. Concernant les Rorquals communs, leur comportement est lié à la cohésion sociale.

En comparaison des résultats obtenus pour la période estivale 2023 (cf. VI.4.1.), il est possible de noter la légère hausse de fréquentation de la station R3 par les Delphinidés en automne 2023 avec une présence acoustique passant respectivement d'exceptionnelle à occasionnelle sur le site. A l'inverse, la fréquentation de ces mammifères marins est similaire au niveau des stations R1 et R2 que ce soit en été ou automne 2023.

Concernant les Rorquals communs, la fréquentation est similaire sur chacune des saisons au niveau des stations R1 et R3, et est en hausse au niveau de la station R2 en passant d'occasionnelle en été 2023 à régulière en automne 2023.

Au niveau des comportements, la comparaison entre les saisons ne peut être établie pour les Delphinidés à la vue de la faible fréquentation de la zone d'étude par ces derniers. Toutefois, un comportement de socialisation a été mis en évidence pour les Rorquals communs et ce, quelle que soit la saison.

Tableau 22 : Synthèse des résultats quant à la présence des mammifères marins entre le 22 septembre et 06 octobre 2023 au niveau des stations de mesure R1, R2 et R3. 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	R2 Au centre du parc	R3 A 1500 m du parc	R1 Au nord du parc	R2 Au centre du parc	R3 A 1500 m du parc
Delphinidés	Absence (0%)	Exceptionnelle (6%)	Occasionnelle (14%)	N/A	N/A	Socialisation / Sondage de l'environnement
Balénoptéridés	Occasionnelle (27%)	Régulière (47%)	Régulière (54%)	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.4.3. Analyse en regard de l'état de référence (06/03/2023 au 15/07/2023)

Pour rappel, l'état de référence acoustique a permis de caractériser la fréquentation du site par les mammifères marins par acoustique passive sur les périodes d'études du 06 au 21 mars 2023 (hiver) puis du 29 juin au 15 juillet 2023 (été). L'analyse des résultats obtenus lors de l'état de référence a permis de mettre en évidence la présence régulière des Delphinidés au niveau des stations R1 (au nord dans la zone du parc éolien) et R4 (à 6500m de la zone du parc éolien) quelle que soit la saison, et une baisse de fréquentation entre l'hiver et l'été 2023 au niveau de la station R3 (à 1500m de la zone du parc éolien). Un comportement associé à la communication entre individus est notable pour la saison hivernale 2023 tandis que la saison estivale 2023 est plus propice aux quêtes de nourritures et épisodes de chasse. En dehors de la station R4 pour laquelle la fréquentation par les Rorquals communs diminue entre l'hiver et l'été 2023 en passant respectivement d'occasionnelle à exceptionnelle, ces mammifères marins sont occasionnellement présents au niveau des stations R1 et R3 et ce, quelle que soit la saison. Un comportement associé à la cohésion sociale est prédominant durant l'hiver 2023 tandis qu'un comportement lié à l'alimentation est majoritaire durant l'été 2023.

Une inter-comparaison des résultats obtenus pour l'état de référence et la phase d'installation du projet a pu être réalisée pour les stations R1 et R3, stations pour lesquelles la donnée est disponible pour chacune des saisons étudiées (hiver, été et automne 2023).

Cette inter-comparaison permet de mettre en évidence la baisse significative de fréquentation des Delphinidés au niveau des stations R1 et R3 en passant respectivement de régulière et quotidienne durant l'état de référence à exceptionnelle durant la phase d'installation en août 2023 (été). Cette baisse de fréquentation est également particulièrement notable en septembre 2023 (automne) avec l'absence des Delphinidés au niveau de la station d'étude R1 (dans la zone du parc). A l'inverse, durant cette saison, la fréquentation des Delphinidés est plus ou moins stable au niveau de la station R3 avec une présence occasionnelle.

La fréquentation des Rorquals communs au niveau de la station R1 est constante d'une saison à l'autre avec une présence acoustique occasionnelle. Au niveau de la station R3, point de contrôle situé à 1500 m de la zone du parc éolien, il est possible de noter une hausse de la fréquentation par les Rorquals communs entre l'état de référence et la phase d'installation avec une présence acoustique passant d'occasionnelle à régulière. Que ce soit au niveau de la station R1 ou R3, le comportement diffère sur la période estivale 2023 entre l'état de référence et la phase d'installation. En effet, un comportement d'alimentation est notable sur la période d'analyse juin/juillet 2023 tandis qu'un comportement associé à la cohésion sociale est prédominant en août 2023.

À la suite de ces constatations, il est possible d'émettre plusieurs hypothèses quant à la baisse significative de fréquentation des Delphinidés observée entre l'état de référence (hiver/été 2023) et la phase d'installation (été/automne 2023) aux alentours des stations R1 (zone proche) et R3 (zone intermédiaire) :

- L'impact météorologique : parmi les causes potentielles, une hypothèse serait que les conditions environnementales locales (météo, houle, etc...) aient été défavorables à la présence des prédateurs de l'ichtyofaune sur les secteurs côtiers de Provence en deuxième partie d'été 2023. En effet, selon les conditions météorologiques, l'activité planctonique peut être faible et générer une faible abondance des proies des cétacés tels que les poissons et calamars. Toutefois, cette hypothèse semble peu vraisemblable. Les statistiques de vent à proximité de Fos-sur-Mer sont comparables d'une saison à l'autre. La cause environnementale peut donc clairement être à rejeter ;
- L'impact lié à la phénologie des cétacés : une autre hypothèse serait que cette baisse de fréquentation soit d'origine saisonnière et liée à la phénologie des Delphinidés, en particulier des Grand Dauphins (*Tursiops truncatus*). Ces derniers correspondent à une espèce résidente au large de Fos-sur-Mer et font l'objet de suivis pour des projets tels que TursMed et GDGeM (Juret & et Julie Jourdan, 2020; Labach & Barbier, 2016). Les résultats obtenus dans le cadre du projet TursMed ont montré un faible nombre d'observations des Delphinidés en juin 2019. A l'inverse, de nombreuses observations de Grand Dauphins associées à des

comportements de voyage, d'alimentation et de socialisation ont été réalisées dans la période entre août et octobre 2020. Ces résultats sont en opposition avec ceux obtenus dans le cadre de notre suivi acoustique de la phase d'installation pour le parc éolien PGL avec une fréquentation régulière en juin 2023 et une fréquentation exceptionnelle jusqu'à de l'absence de fréquentation entre août à septembre 2023. L'hypothèse liée à la phénologie des Delphinidés est donc peu vraisemblable ;

- L'impact acoustique du bruit cumulé sur les Cétacés : il est possible que le bruit engendré localement par les travaux de la phase d'installation et le déplacement des navires associés (bruit continu ou transitoire) dérange directement les mammifères marins qui vont chercher à éviter la zone anthropisée. En effet, le bruit des travaux cumulé sur une période significative de temps peut avoir amené les Delphinidés à éviter le secteur et ainsi fuir cette zone bruyante. L'absence de donnée au niveau de la station R4 située à 6500 m du chantier ne permet pas de confirmer cette hypothèse ;
- L'impact acoustique indirect du bruit sur les maillons inférieurs de la chaîne alimentaire : l'ichtyofaune qui qualifie l'ensemble des poissons, sont quant à eux également sensibles au bruit anthropique. A ce jour, bien que les effets du bruit anthropique (ponctuel ou continu) sur l'ichtyofaune sont peu connus et sont toujours étudiés par la communauté scientifique (Popper, et al. 2014), il est possible que le bruit local des travaux ait dérangé directement et contraint les poissons à éviter le secteur bruyant entraînant indirectement le déplacement de leurs prédateurs, les Delphinidés.

Tableau 23 : Synthèse des résultats quant à la présence de mammifères marins durant l'Etat de Référence (hiver et été 2023) et la phase d'installation du projet (été et automne 2023) au niveau des stations R1 et R3. Ces résultats ont été obtenus suite à l'analyse des détections réalisées par les enregistreurs acoustiques (enregistrement en continu). Le taux de classification est calculé sur la base du nombre d'enregistrements considérés « vrais positifs » c'est-à-dire avec présence confirmée de signatures acoustiques.

			Station R1		Station R3	
			Au nord de la zone du parc éolien		A 1500m de la zone du parc éolien	
			Delphinidés	Balénoptéridés	Delphinidés	Balénoptéridés
Etat de Référence	HIVER 2023 Mars 2023	Fréquentation du site	Régulière (61%)	Occasionnelle (13%)	Quotidienne (75%)	Occasionnelle (25%)
		Plage horaire préférentielle	Nuit	Nuit	Jour	Nuit
		Comportement	Social/transit	Cohésion sociale	Social/transit	Cohésion sociale
		Classification	<i>Dauphin sp.</i> (85%) <i>Tursiops truncatus</i> (15%)	<i>Balaenoptera physalus</i> (100%)	<i>Dauphin sp.</i> (89%) <i>Delphinus delphis</i> (11%)	<i>Balaenoptera physalus</i> (100%)
	ETE 2023 Juin / Juillet 2023	Fréquentation du site	Régulière (59%)	Occasionnelle (12%)	Occasionnelle (35%)	Occasionnelle (18%)
		Plage horaire préférentielle	Jour	Jour	Jour	Jour
		Comportement	Social/chasse opportuniste	Alimentation	Social/chasse	Alimentation
		Classification	<i>Dauphin sp.</i> (85%) <i>Tursiops truncatus</i> (15%)	<i>Balaenoptera physalus</i> (100%)	<i>Dauphin sp.</i> (62%) <i>Tursiops truncatus</i> (38%)	<i>Balaenoptera physalus</i> (100%)
Phase d' installation	ETE 2023 Août 2023	Fréquentation du site	Exceptionnelle (6%)	Occasionnelle (33%)	Exceptionnelle (6%)	Régulière (60%)
		Plage horaire préférentielle	Jour	Jour/Nuit	Jour	Jour/Nuit
		Comportement	N/A	Cohésion sociale	N/A	Cohésion sociale
		Classification	N/A	<i>Balaenoptera physalus</i> (100%)	<i>Tursiops truncatus</i> (50%) <i>Dauphin sp.</i> (50%)	<i>Balaenoptera physalus</i> (100%)
	AUTOMNE 2023 Septembre 2023	Fréquentation du site	Absence (0%)	Occasionnelle (27%)	Occasionnelle (14%)	Régulière (54%)
		Plage horaire préférentielle	N/A	Nuit	Nuit	Nuit
		Comportement	N/A	Cohésion sociale	Social/Sondage environnement	Cohésion sociale
		Classification	N/A	<i>Balaenoptera physalus</i> (100%)	N/A	<i>Balaenoptera physalus</i> (100%)

Hausse de la fréquentation en regard de l'Etat de Référence
 Fréquentation similaire à l'Etat de Référence
 Baisse de la fréquentation en regard de l'Etat de Référence

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 ce problème de temps de traitement des données, des algorithmes de détection automatique peuvent être utilisés. Lorsque l'efficacité de ces algorithmes est erronée par 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 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 le suivi acoustique passif ainsi que le suivi de la fréquentation des mammifères marins par acoustique passive à proximité de la zone de travaux (Figure 1) lors de la phase d'installation du parc. Cette étude fait suite à la phase état de référence réalisée en 2023.

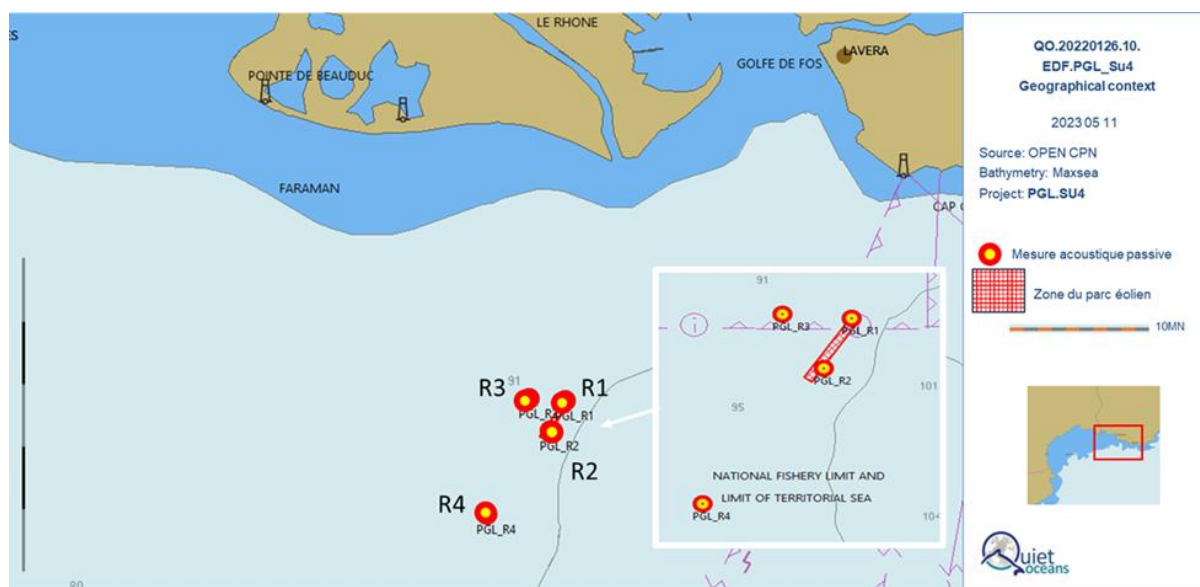
Les objectifs de cette étude sont de :

- ✓ 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 ;
- ✓ Estimer l'impact des travaux sur le bruit physique en regard de l'état de référence ;
- ✓ Cartographier l'empreinte sonore des travaux d'installation ;
- ✓ 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 ;
- ✓ Deux 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 projet sur zone.

Ce document propose une analyse des données collectées du 02 août au 06 octobre 2023. Les résultats obtenus sont représentatifs des niveaux sonores et de la distribution spatio-temporelle des espèces de mammifères marins pour la phase d'installation 2023.



VII.1. Analyse des niveaux sonores

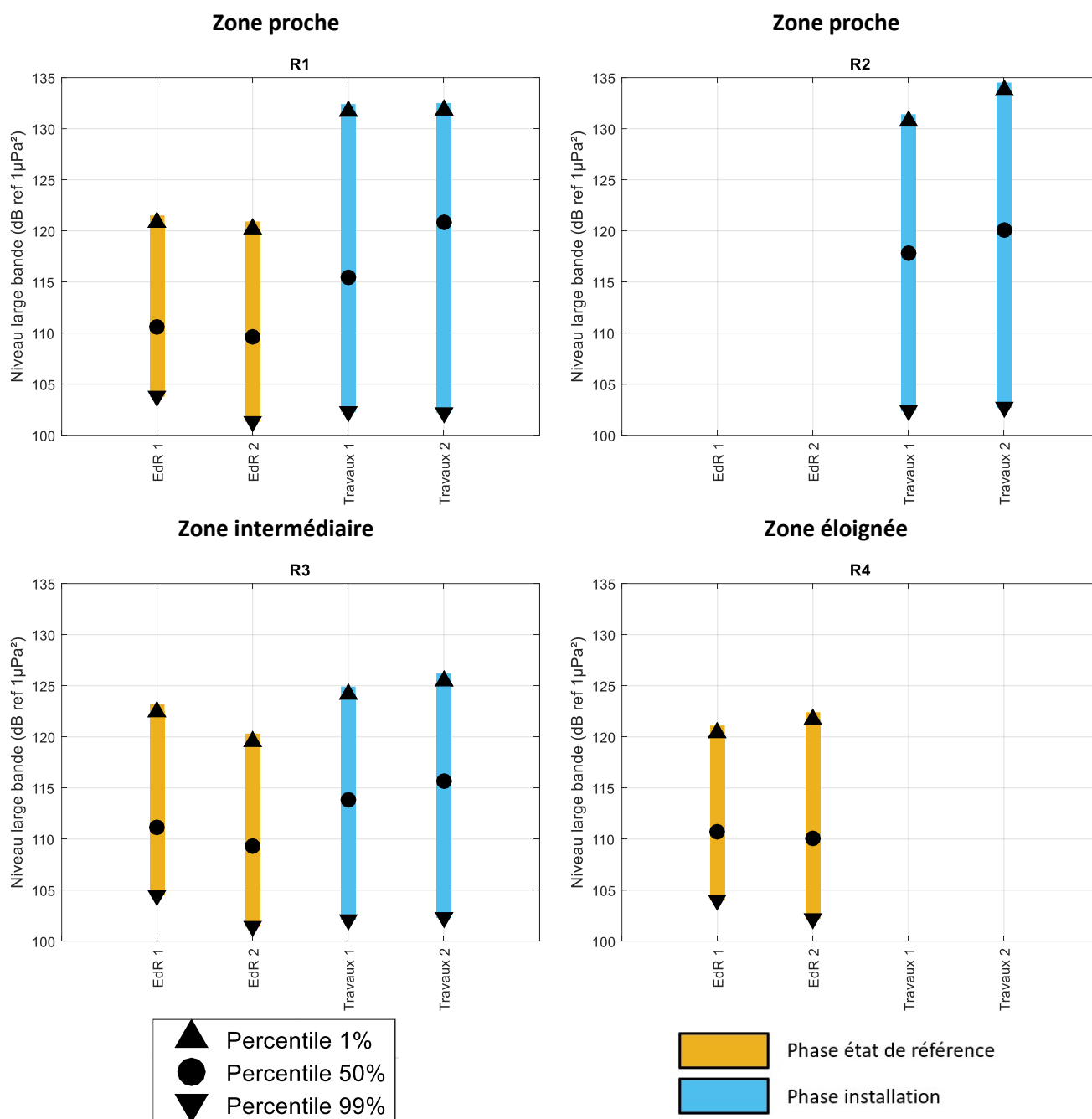
L'analyse du bruit physique sur la période des travaux (août à octobre 2023) montre l'existence d'un bruit permanent, dépendant majoritairement de la hauteur de vague et du vent pour les fréquences supérieures à 500 Hz, et variant de 100 à 120 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ en l'absence de travaux. Dans la majorité de la période étudiée, tous les capteurs ont perçu le bruit produit par les opérations des navires rattachés aux travaux d'installation du parc éolien. Ces opérations ont conduit à des augmentations de longue durée (jusqu'à plusieurs jours) du bruit jusqu'à des niveaux courants compris entre 120 et 140dB ref $1\mu\text{Pa}^2$, selon la distance entre les navires rattachés au projet et les capteurs acoustiques.

La figure ci-dessous synthétise la statistique des niveaux sonores exprimés dans la bande filtrée de fréquence entre 20 Hz et 40 kHz selon différents percentiles (1%, 50% et 99%) perçus au niveau de chaque station lors de la phase d'installation du projet (bleu). A titre de comparaison, les valeurs relevées lors l'état de référence sont tracées en orange. Les stations R1 et R2 (zone proche du parc) ont été davantage impactées (+1 à +4dB) par les travaux que la station R3 (zone éloignée du parc). D'un point de vue temporel, les opérations ayant eu lieu au mois de septembre/octobre 2023 ont induit une augmentation modérée (+2dB) en R2 et R3 à significative (+5dB) en R1. En comparaison des niveaux mesurés lors de l'état de référence, les travaux de la phase d'installation ont induit une augmentation permanente significative du bruit allant de +5 à +10dB au niveau de la station R1 et de +3 à +5dB au niveau de la station R3. Pour rappel, la comparaison n'est pas disponible au niveau de la station R2 en raison de l'absence d'analyse des niveaux sonores lors de la phase état de référence.

Les niveaux forts (soit 1% du temps) sont en augmentation (+3.1dB) au niveau de la station R2 lors du second suivi, probablement en raison d'une intensification des activités projet à proximité du capteur. A l'identique des niveaux médians, les stations en zone proche (R1 et R2) semblent davantage influencées par les travaux d'installation avec des augmentations significatives du bruit de l'ordre de +10dB en comparaison des niveaux relevés lors de l'état de référence à proximité de la station R1. Ce phénomène est modéré en zone éloignée avec +3 à +5dB d'augmentation relevés au niveau de la station R3.

L'analyse spectrale montre également que le bruit induit par les travaux d'installation a eu un effet sur la totalité du spectre du bruit reçu au moins 50% du temps. Une proportion du temps comprise entre 10 et 50%, les fréquences inférieures à 1000Hz sont dominées par les activités anthropiques, tandis que les fréquences supérieures sont dominées par les effets météorologiques et la vie benthique. Les stations R1 et R2 montrent un profil de bruit reçu très proche.

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 +1 à +4 dB, entre 06h00 et 20h00 UTC lors du premier suivi (été 2023) et 08h00 et 20h00 UTC lors du second suivi (automne 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 +2 à +4 dB entre 18h00 et 06h00 UTC lors du premier suivi. Lors du second suivi, cette plage horaire est décalée entre 11h et 19h UTC probablement en raison du masquage de l'activité benthique par les activités rattachées au projet.



VII.2. Suivi des travaux

Suite à l'analyse des données de planning fournies par EDF-ER, une corrélation entre les périodes de travaux déclarées et les niveaux de bruit perçus a été établie et permet de mettre en évidence que opérations rattachées au projet ont entraîné des augmentations significatives (+5 à +35dB) des niveaux sonores en comparaison du bruit ambiant sur zone pour des durées variant de quelques heures à plusieurs jours.

Le croisement des niveaux sonores mesurés à la fréquence spécifique de 125 Hz avec la navigation du navire chantier Normand Installer (navire supposé le plus bruyant du projet) permet d'expliquer la majorité des variations des niveaux sonores large bande mesurés lors de la phase de travaux, avec une corrélation nette entre

les niveaux sonores et la distance navire/capteur jusqu'à une distance d'au moins 3km. La même analyse à la fréquence spécifique de 20kHz (fréquence utilisée par les Delphinidés), révèle un effet de masquage partiel à complet du bruit ambiant par le Normand Installer jusqu'à environ 1.5km de distance, avec des élévations du niveau sonore de 100 à 120 dB, soit +5 à +25dB d'augmentation par rapport au bruit ambiant sur zone (90dB ref $1\mu\text{Pa}^2$) à cette fréquence.

Les mesures in-situ ont été utilisées pour réaliser l'estimation des niveaux à la source lors de six activités distinctes du projet, à savoir :

- ✓ La pose des ancrs ;
- ✓ La pose des ballasts sur les ancrs ;
- ✓ La pose des dedicated lines ;
- ✓ La pose des bouées temporaires pour les tugs ;
- ✓ Le remorquage d'une éolienne ;
- ✓ La connexion des chaînes d'ancrage.

La majorité des ateliers inversés présentent une allure similaire, suggérant que le bruit émanant du navire support (Normand Installer) joue un rôle prépondérant dans le bruit généré par le projet en phase d'installation. Le profil de bruit calculé lors du remorquage de l'éolienne FOWT3 suit globalement la même tendance que les autres, mais présente un décalage d'environ -15dB dans la bande de fréquence entre 100Hz et 10kHz. L'examen détaillé du log de la journée du 11 septembre 2023 pourrait fournir des informations utiles pour une meilleure compréhension du bruit généré lors des opérations de remorquage.

Les niveaux de bruit estimés à la source varient de 182.0 à 183.7 dB ref $1\mu\text{Pa}@1\text{m}$ pour la plupart des ateliers et atteignent 185.6 dB ref $1\mu\text{Pa}@1\text{m}$ lors de la pose de bouées. Le remorquage de l'éolienne FOWT3 émet un bruit (médiane de 179.3 dB ref $1\mu\text{Pa}^2@1\text{m}$) significativement inférieur de -2.7 à -6.3 dB en comparaison des autres.

A partir de niveau de source, une cartographie conservatrice de l'empreinte sonore du navire Normand Installer a été établie et suggère une perception du bruit projet dans un rayon maximal de 11.5 km et dans un rayon médian de 8.75 km autour du navire, sans considération de l'audiogramme des mammifères marins. Les cartographies tenant compte des audiogrammes des cétacés basse et moyenne fréquence sont disponibles en annexe de ce rapport.

VII.3. 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) présentent 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 (estivale et automnale) 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 communs (*Balaenoptera physalus*) au niveau de chaque station de mesure et Delphinidés, tels que le Grand

Dauphin (*Tursiops truncatus*) au niveau des stations R2 et R3, mais également de noter l'absence acoustique de Cachalots (*Physeter macrocephalus*) sur site quelle que soit la saison.

Sur la période d'étude (phase d'installation) du 13 au 27 août 2023 (été 2023), l'analyse des signaux bioacoustiques émis par les mammifères marins dans et à proximité du parc éolien montre une présence acoustique significativement faible de Delphinidés au niveau des stations R1 (au nord de la zone de concession du parc PGL) et R3 (point de contrôle situé à 1500m à l'ouest de la zone de concession du parc PGL) ainsi que l'absence de ces cétacés au niveau de la station R2 située au centre du parc PGL. Les quelques détections réalisées ne permettent pas l'établissement du comportement des Delphinidés présents sur site. Les Rorquals communs sont, quant à eux, occasionnellement présents au niveau des stations R1 et R2 durant la période estivale 2023. La station R3 apparaît comme la station la plus fréquentée avec une présence régulière de ces mammifères marins aussi bien de jour comme de nuit. Les signatures acoustiques basses fréquences (pulses ou « 20-Hz signal ») détectées sont associées 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 (phase d'installation) du 22 septembre au 06 octobre 2023 (automne 2023), la station R3 apparaît à nouveau comme la station la plus fréquentée par les mammifères marins avec une présence acoustique occasionnelle de Delphinidés et régulière de Rorquals communs. Les stations R1 et R2 restent très peu fréquentées par les Delphinidés et occasionnellement à régulièrement pour les Rorquals communs. Le comportement prédominant des Delphinidés à proximité de la station R3 est la socialisation avec la présence de quelques sifflements et le sondage de l'environnement dans lequel les cétacés évoluent via l'émission de clics d'écholocation. A noter, quelle que soit la zone d'étude, la majorité des détections des signatures acoustiques (« 20-Hz pulse ») émis par les Rorquals communs se concentrent sur la journée du 29 septembre 2023 entre 20h30 et 07h00 UTC.

L'analyse saisonnière montre une légère hausse de fréquentation au niveau de la station R3 par les Delphinidés en automne 2023 avec une présence acoustique passant respectivement d'exceptionnelle à occasionnelle sur le site. A l'inverse, la fréquentation de ces mammifères marins est similaire au niveau des stations R1 et R2 que ce soit en été ou automne 2023 avec une présence significativement faible à nulle. La présence de Rorquals communs aux alentours des stations R1 et R3 est similaire d'une saison à l'autre avec respectivement une présence occasionnelle et régulière. Quelle que la saison, un comportement associé à la cohésion sociale est mis en évidence pour les Rorquals communs via l'émission en doublet de pulses à 20 Hz (« 20-Hz pulse »). Le tableau ci-dessous synthétise le statut de fréquentation des mammifères marins en fonction de la station d'écoute et de la période.

VII.4. Synthèse à l'échelle du projet

Pour rappel, l'état de référence acoustique a permis de caractériser la fréquentation du site par les mammifères marins par acoustique passive sur les périodes d'étude du 06 au 21 mars 2023 (hiver) puis du 29 juin au 15 juillet 2023 (été). La comparaison des résultats obtenus pour l'état de référence et la phase d'installation du projet a mis en évidence une baisse significative de fréquentation des Delphinidés au niveau des stations R1 et R3 tandis que la fréquentation des Rorquals communs au niveau de la station R1 reste constante d'une saison à l'autre et, est en hausse au niveau de la station R3 durant la phase d'installation.

Suite à ces constations, plusieurs hypothèses quant à la baisse significative de fréquentation des Delphinidés entre l'état de référence et la phase d'installation ont été émises avec des analyses sur l'impact météorologique,

sur la phénologie des cétacés mais également sur l'impact acoustique du bruit cumulé direct et indirect. Toutefois, une interprétation de ces résultats reste difficile à établir à la vue des données disponibles à des saisons bien distinctes (hiver, été et automne).

A ce jour, en phase d'exploitation du parc éolien flottant, le protocole établi prévoit la poursuite des suivis acoustiques en mars et juillet 2024 sur des périodes de 3 semaines. Afin de pouvoir confirmer ou infirmer, les hypothèses quant à la fréquentation des mammifères marins et disposer du recul nécessaire à l'interprétation, nous recommandons de poursuivre le suivi acoustique des mammifères marins au niveau de chacune des stations de mesure R1, R2, R3 et R4 sur des saisons similaires à l'état de référence et à la phase d'installation (de mars à octobre). Ces recommandations s'inscrivent dans le cadre du protocole BACI (Before-After-Control-Intervention) qui recommande de suivre l'évolution des indicateurs avant, pendant et après les travaux.

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 R2			Station R3		
		Au nord de la zone du parc éolien			Au centre du parc éolien			A 1500m de la zone du parc éolien		
		Delphinidés	Balénoptéridés	Physétéridés	Delphinidés	Balénoptéridés	Physétéridés	Delphinidés	Balénoptéridés	Physétéridés
Été 2023 13/08/2023 au 27/08/2023	Fréquentation du site	Exceptionnelle (6%)	Occasionnelle (33%)	Absence (0%)	Absence (0%)	Occasionnelle (40%)	Absence (0%)	Exceptionnelle (6%)	Régulière (60%)	Absence (0%)
	Plage horaire préférentielle	Jour	Jour/Nuit	N/A	N/A	Nuit	N/A	Jour	Jour/Nuit	N/A
	Comportement	N/A	Cohésion sociale	N/A	N/A	Cohésion sociale	N/A	N/A	Cohésion sociale	N/A
	Classification	N/A	<i>Balaenoptera physalus</i>	N/A	N/A	<i>Balaenoptera physalus</i>	N/A	<i>Tursiops truncatus</i>	<i>Balaenoptera physalus</i>	N/A
Automne 2023 22/09/2023 au 06/10/2023	Fréquentation du site	Absence (0%)	Occasionnelle (27%)	Absence (0%)	Exceptionnelle (6%)	Régulière (47%)	Absence (0%)	Occasionnelle (14%)	Régulière (54%)	Absence (0%)
	Plage horaire préférentielle	N/A	Nuit	N/A	Nuit	Nuit	N/A	Nuit	Nuit	N/A
	Comportement	N/A	Cohésion sociale	N/A	Social	Cohésion sociale	N/A	Social/Sondage environnement	Cohésion sociale	N/A
	Classification	N/A	<i>Balaenoptera physalus</i>	N/A	<i>Tursiops truncatus</i>	<i>Balaenoptera physalus</i>	N/A	N/A	<i>Balaenoptera physalus</i>	N/A

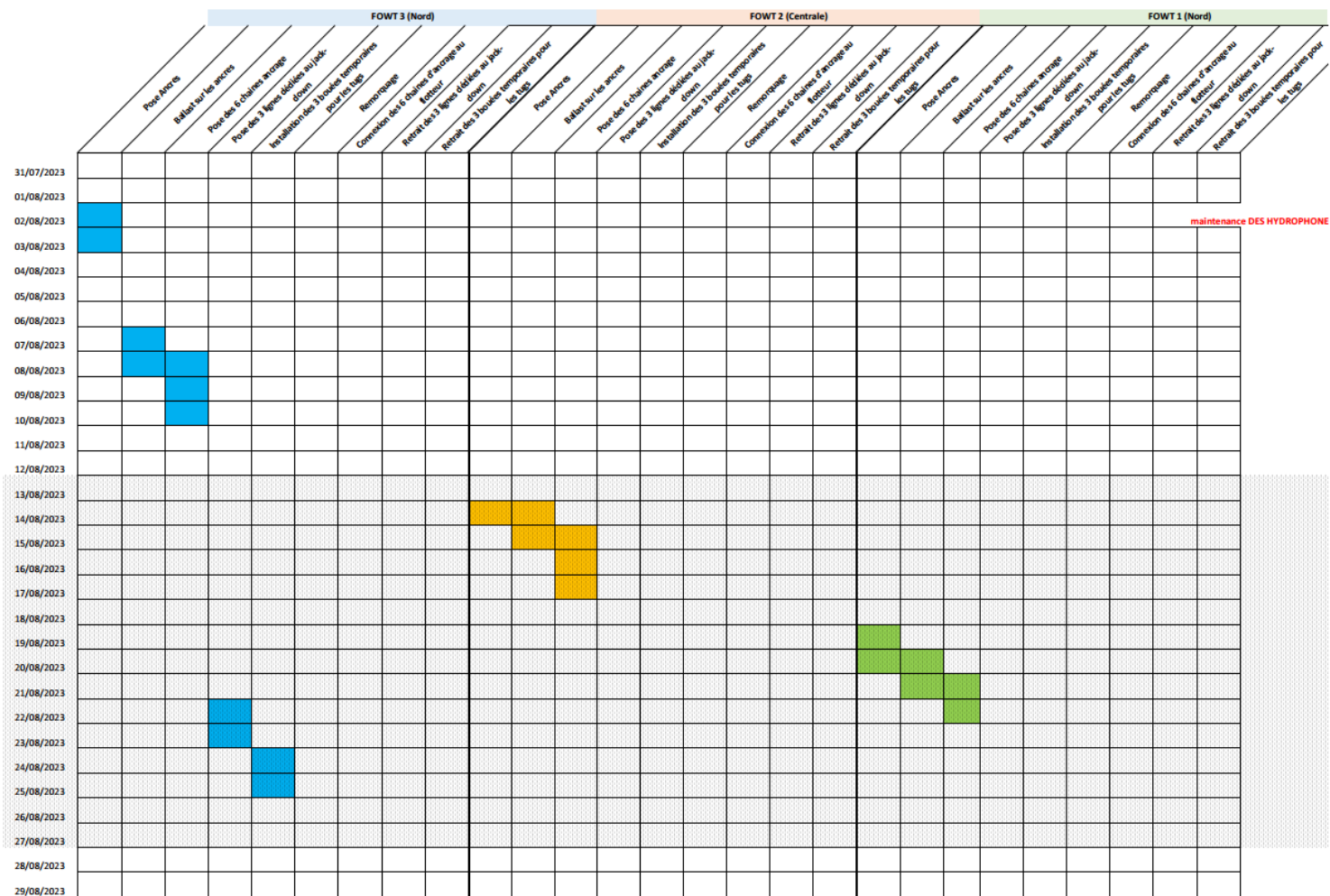
Fréquentation				
Quotidienne >70%	Régulière 50 à 70%	Occasionnelle 10 à 50%	Exceptionnelle <10%	Absence 0%

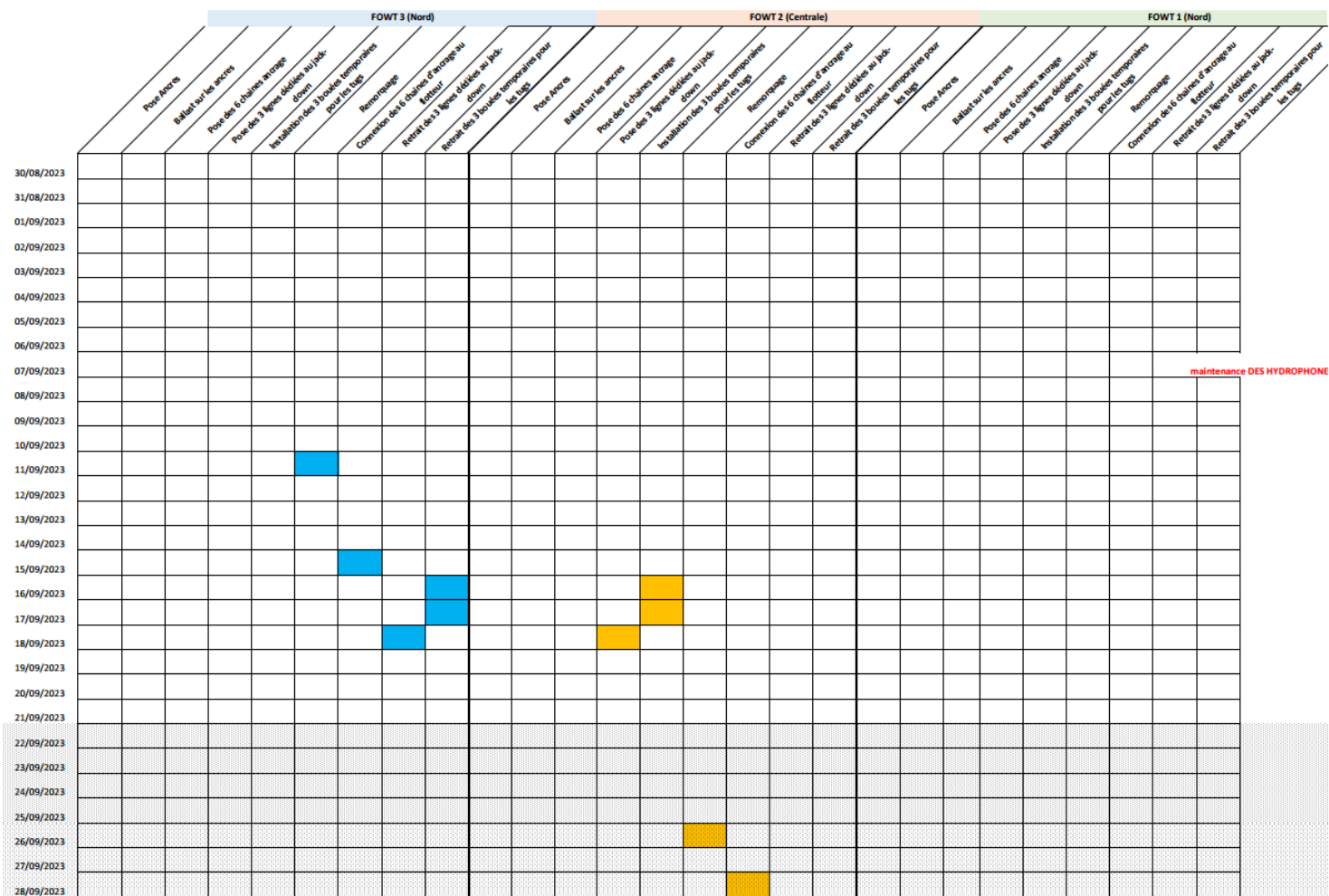
Bibliographie

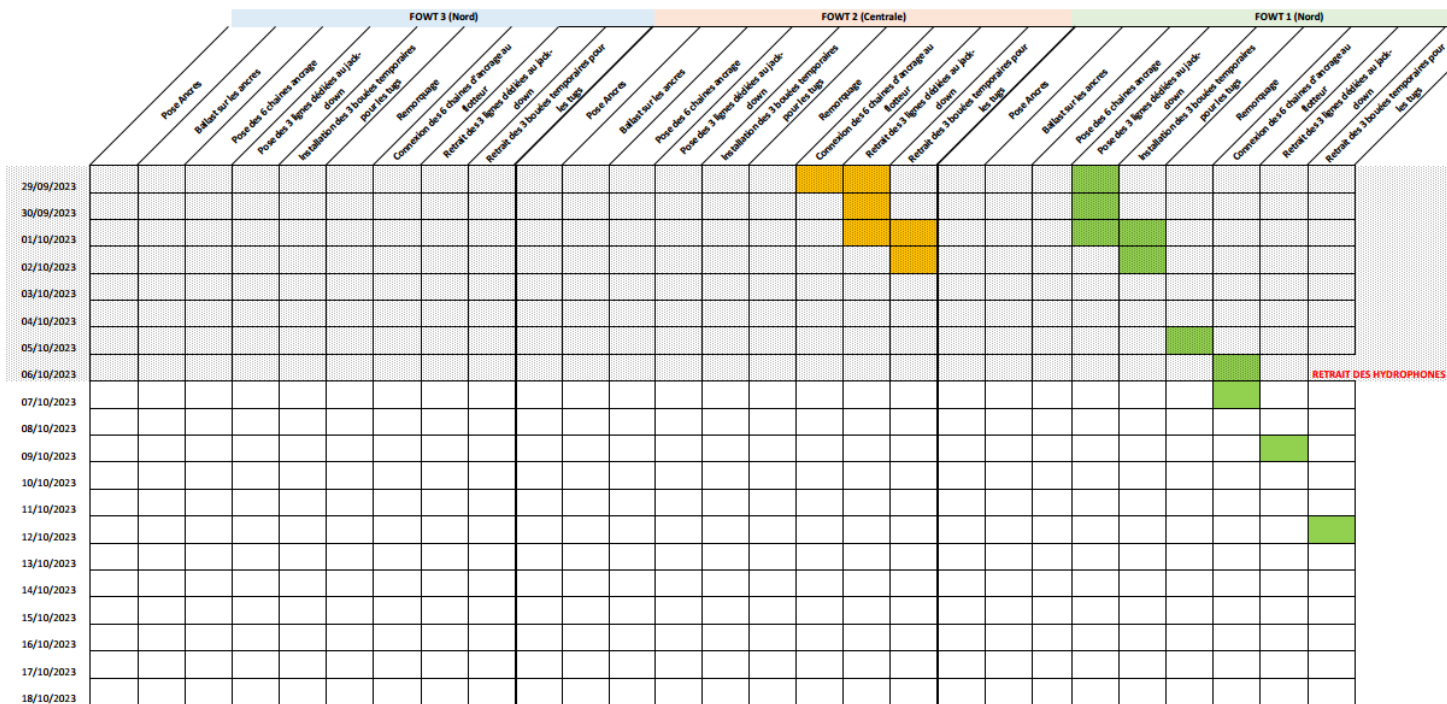
- Clorennec, D., Chompret, J., & Bellanger, J. (2023). *Suivi par acoustique passive du bruit ambiant et de la fréquentation des mammifères marins dans le cadre de la construction du parc éolien flottant Provence Grand Large (PGL)*.
- Erbe, C., Dunlop, R., Jenner, K. C. S., Jenner, M. N. M., McCauley, 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>
- 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>
- Juret, L., & et Julie Jourdan. (2020). *PROJET TURSMED : rapport TURSMED*. 112.
- Labach, H., & Barbier, M. (2016). *PROJET GDEGeM Grand Dauphin Etude et Gestion en Méditerranée*. 40. http://www.gdegem.org/sites/gdegem.org/files/documentation/gis3m_gdegem_rapport_technique_final.pdf
- 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>
- 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>
- 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.

Annexes

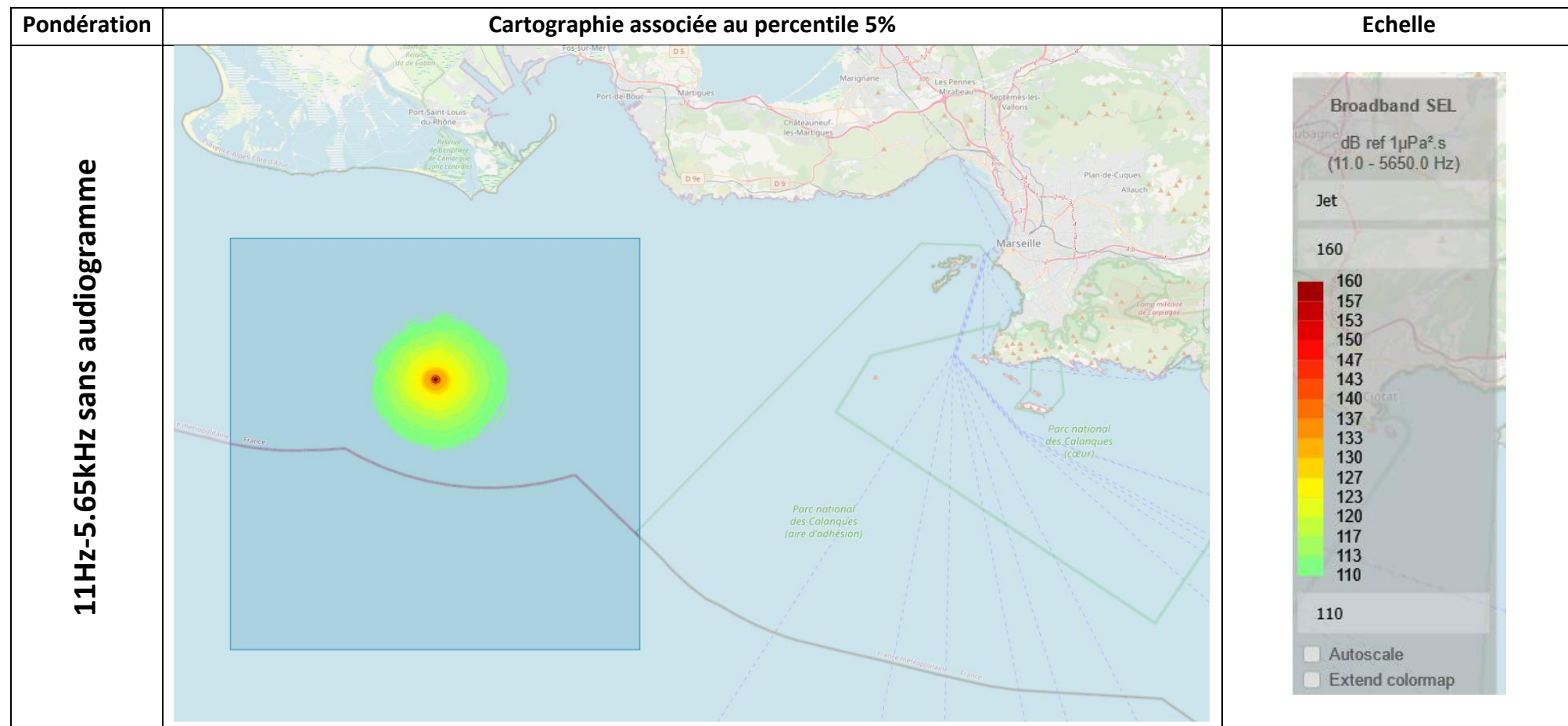
Cadencement des travaux d'installation du parc (source EDF)



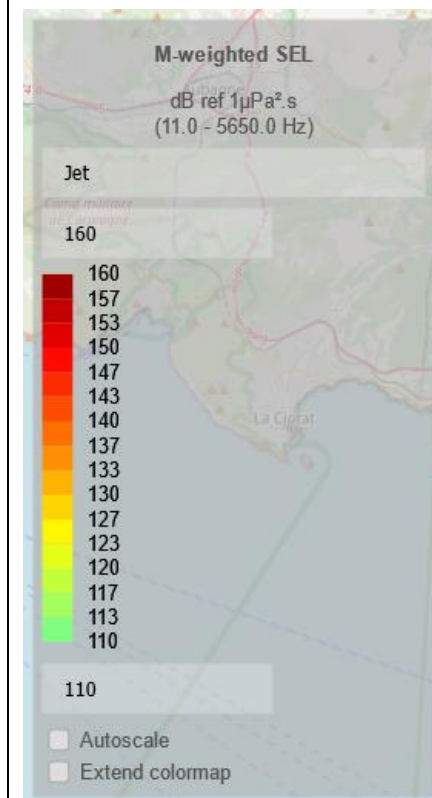
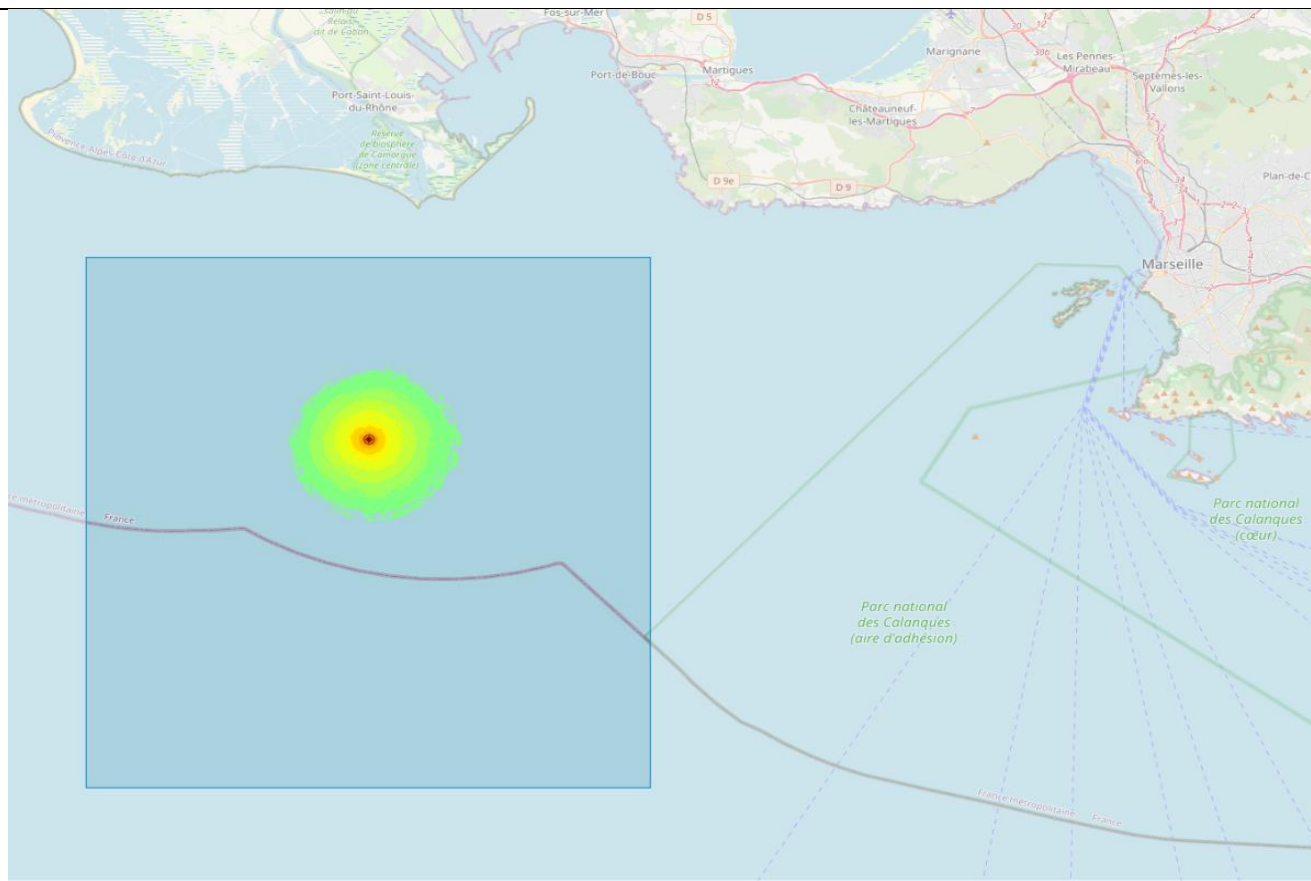




Cartographies de l'empreinte sonore du Normand Installer



11Hz-5.65kHz cétacés basse fréquence



11Hz-5.65kHz cétacés moyenne fréquence

