

Suivi par acoustique passive du bruit ambiant et de la fréquentation des mammifères marins dans le cadre du parc éolien en mer de Normandie

Etat de référence

Identification du document

Référence du document	QO.20210225.10.RAP.05A
Donneur d'ordre	Ministère Écologie Énergie Territoires
Client	Ministère Écologie Énergie Territoires
Reference du contrat	

PROJET	DOC	CHRONO	VER	IND	CLIENT	ACRO	DATE	TYPE	CLASS
QO.20210225.10	RAP	001	05	A	MTES	PEM	17.10.2023	PROD	DR



Ocean Noise Forecasting Monitoring & Mitigation



Historique du document

Ver	Ind.	Responsable	Date	Vérification	Validation	Transmission	Description
01	A	J. Bellanger/ M. Caillat / J. Ringelstein	13.09.2022	J. Chompret	D. Clorennec	27.10.2022	Version initiale suivi partiel hiver/printemps/été 2022
02	A	M. Caillat / J. Bellanger	01.12.2022	J. Chompret	D. Clorennec	09.12.2022	Prise en compte des commentaires DREAL
03	A	J. Bellanger / J. Chompret	19.01.2022	J. Chompret	D. Clorennec	09.05.2023	Ajout synthèse état de référence
04	A	J. Bellanger / J. Chompret / M. Caillat	01.08.2022	J. Chompret	D. Clorennec	08.08.2023	Mise à jour des résultats
05	A	J. Bellanger / J. Chompret / M. Caillat	01.09.2022	J. Chompret	D. Clorennec	17.10.2023	Prise en compte commentaires AMOE

Citation

Bellanger J., Chompret J., Clorennec D., Ringelstein J., Caillat M. (2023), Suivi par acoustique passive du bruit ambiant et de la fréquentation des mammifères marins dans le cadre du parc éolien en mer de Normandie, Etat de référence, numéro QO.20210225.10.RAP.001.05A, Quiet-Oceans, Brest, France

Table des matières

Table des matières.....	3
Liste des figures	4
Liste des tableaux	8
Lexique des mots techniques	11
Chapitre I. Synthèse du suivi durant l'état de référence	14
I.1. Suivi acoustique des niveaux de bruits sous-marins	15
I.2. Suivi acoustique des mammifères marins	17
Chapitre II. Présentation de l'étude.....	19
Chapitre III. Introduction.....	20
III.1. La problématique du bruit sous-marin	20
III.2. Qu'est-ce que le chorus sonore sous-marin.....	21
Chapitre IV. Protocole de mesures acoustiques.....	23
IV.1. Les systèmes de mesure	27
IV.2. Données in-situ collectées	30
Chapitre V. Analyse des niveaux sonores mesurés	40
V.1. Interaction du courant de marnage avec les systèmes acoustiques sub-surface.....	40
V.2. Année 2022	41
V.3. Année 2023	104
Chapitre VI. Cartographie du bruit ambiant.....	120
VI.1. Plateforme de modélisation	120
VI.2. Cartographie statistique	122
Chapitre VII. Détection des signaux biologiques	131
VII.1. Connaissance biologique a priori du site	131
VII.2. Portée de détection des enregistreurs acoustiques.....	137
VII.3. Procédé de traitement bioacoustique	139
VII.4. Résultats	144
VII.5. Limites et difficultés rencontrées.....	156
Chapitre VIII. Conclusions	159
VIII.1. Analyse du bruit physique.....	160
VIII.2. Analyse des signaux biologiques	160
Chapitre IX. Annexes.....	161
IX.1. Mémoire sur le protocole de mouillage	161
IX.2. Mémoire sur la prolongation de suivi.....	172
IX.3. Mémoire sur l'enregistreur acoustique	178
IX.4. Courbes d'évolution temporelle du bruit dans la bande filtrée [50Hz-40kHz]	183
Bibliographie	193

Liste des figures

Figure 1 : Protocole géographique du suivi acoustique.....	14
Figure 2 : Synthèse de la statistique des niveaux sonores par station (avec présence d'un enregistreur acoustique) et par saison (niveau intégré dans la bande de 50 Hz à 40 kHz).....	16
Figure 3 : Contexte géographique de l'étude.....	19
Figure 4 : Echelle qualitative des niveaux (émis à un mètre) et fréquences des sources sonores anthropiques, biologiques et naturelles dans le milieu marin. Source : OSPAR.	20
Figure 5 : Composition du chorus sonore sous-marin.	21
Figure 6 : 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 (Dosit.org, 2016).....	22
Figure 7 : Protocole géographique des mesures acoustiques longues durées entre mars 2022 et avril 2023....	25
Figure 8 : Protocole géographique des mesures acoustiques longues durées à partir de mai 2023.	25
Figure 9 : Enregistreur acoustique autonome (à gauche), flotteur subsurface avec panier (au centre) et cage de fond (à droite).	28
Figure 10 : Illustration d'un système POD.....	30
Figure 11 : Illustration de l'artéfact causé par le bruit de marnage, exemple de la station R3 pour la période de mars à mai 2022. Evolution du bruit permanent (orange) avec le marnage (bleu) pour la fréquence 20 Hz.	40
Figure 12 : Evolution du niveau dans la bande filtrée [50Hz-40kHz] au niveau de la station R4 en fonction du temps, lors de l'hiver 2022. Les courbes pour les autres stations sont disponibles en annexe.	43
Figure 13 : Corrélation du bruit permanent (orange) avec le vent (bleu) au niveau des stations R4 et R7 lors de l'hiver 2022.	44
Figure 14 : Répartition horaire des émergences anthropiques détectées lors de l'hiver 2022, au niveau de la station R4.	45
Figure 15 : En haut, spectrogramme illustratif d'un instant à faible perturbation anthropique au niveau de la station R7, dans la journée du 06 Mars 2022. En bas, évolution du niveau sonore (50 Hz - 10 kHz, exprimé en dB ref 1 μ Pa ²) en fonction du temps.....	46
Figure 16 : En haut, spectrogramme illustratif d'un passage de navire au niveau de la station R7, dans la soirée du 11 Mars 2022. En bas, évolution du niveau sonore (50 Hz - 10 kHz, exprimé en dB ref 1 μ Pa ²) en fonction du temps.	47
Figure 17 : Densité de navires dans le périmètre d'étude lors de l'hiver 2022 (du 01/03/2022 au 21/03/2022).	51
Figure 18 : Répartition fréquentielle de l'énergie acoustique mesurée en hiver 2022 (à gauche). Répartition horaire des niveaux sonores mesurés en hiver 2022 dans la bande 355-445Hz et 8.9-11.0kHz (à droite).	55
Figure 19 : Densités spectrales de puissance (exprimées en dB ref 1 μ Pa ² /Hz) de périodes représentatives choisies lors de l'hiver 2022. A gauche : période calme dans la nuit du 06 Mars 2022 à la station R7. A droite : passage proche de navire le 11 Mars 2022, à proximité de la station R7.	56
Figure 20 : Evolution du niveau dans la bande filtrée [50Hz-40kHz] au niveau de la station R4 en fonction du temps, lors du printemps 2022. Les courbes pour les autres stations sont disponibles en annexe. .	59
Figure 21 : Corrélation du bruit permanent (orange) avec le vent (bleu) au niveau des stations R4 et R3 lors du printemps 2022.	60
Figure 22 : Répartition horaire des émergences anthropiques détectées lors du printemps 2022, au niveau de la station R4.	61
Figure 23 : En haut, spectrogramme illustratif d'un passage de navire au niveau de la station R3 le 24 Avril 2022. En bas, évolution du niveau sonore (50 Hz - 10 kHz, exprimé en dB ref 1 μ Pa ²) en fonction du temps.	62

Figure 24 : Spectrogrammes illustrant un battage d'un pieu au niveau des stations R2 et R3, durant la nuit du 20 Avril 2022.	63
Figure 25 : Densité de navires dans le périmètre d'étude lors du printemps 2022 (du 21/03/2022 au 21/06/2022).	67
Figure 26 : Répartition fréquentielle de l'énergie acoustique mesurée au printemps 2022 (à gauche). Répartition horaire des niveaux sonores mesurés au printemps 2022 dans la bande 355 - 445Hz et 8.9 - 11kHz (à droite).	71
Figure 27 : Densités spectrales de puissance (exprimées en dB ref 1 μ Pa ² /Hz) de périodes représentatives choisies lors du printemps 2022. A gauche : passage de navire dans la journée du 24 Avril 2022 à proximité de la station R3. A droite : bruit de battage dans la nuit du 20 Avril 2022, capté par l'enregistreur à la station R3.	72
Figure 28 : Evolution du niveau dans la bande filtrée [50Hz-40kHz] au point R4 en fonction du temps, lors de l'été 2022. Les courbes pour les autres stations sont disponibles en annexe.	75
Figure 29 : Corrélation du bruit permanent (orange) avec le vent (bleu) au niveau des stations R4 et R2 lors de l'été 2022.	76
Figure 30 : Répartition horaire des émergences anthropiques détectées lors de l'été 2022, au niveau de la station R4.	77
Figure 31 : Spectrogramme illustratif de l'activité des organismes benthiques à proximité de la station R4, lors de l'été 2022.	77
Figure 32 : En haut, spectrogramme illustratif d'un passage de navire au niveau de la station R4 le 23 Juin 2022. En bas, évolution du niveau sonore (50Hz-10kHz, exprimé en dB ref 1 μ Pa ²) en fonction du temps.	78
Figure 33 : Densité de navires dans le périmètre d'étude lors de l'été 2022 (du 21/06/2022 au 20/09/2022). .	82
Figure 34 : Répartition fréquentielle de l'énergie acoustique mesurée lors de l'été 2022 (à gauche). Répartition horaire des niveaux sonores mesurés lors de l'été 2022 dans la bande 355-445Hz et 8.9-11.0kHz (à droite).	87
Figure 35 : Densités spectrales de puissance (exprimées en dB ref 1 μ Pa ² /Hz) de périodes représentatives choisies lors de l'été 2022. A gauche : activité benthique à proximité de la station R4. A droite : passage de navire le 23/06/2023 à proximité de la station R4.	88
Figure 36 : Evolution du niveau dans la bande filtrée [50Hz-40kHz] au niveau de la station R4 en fonction du temps, lors de l'automne 2022. Les courbes pour les autres stations sont disponibles en annexe. .	91
Figure 37 : Corrélation du bruit permanent (orange) avec le vent (bleu) au niveau des stations R4 et R7 lors de l'automne 2022.	92
Figure 38 : Spectrogramme illustratif d'un coup de vent dans la soirée du 30 Septembre 2022, à proximité de la station R7.	93
Figure 39 : Répartition horaire des émergences anthropiques détectées lors de l'automne 2022, au niveau de la station R4.	93
Figure 40 : En haut, spectrogramme illustratif d'une période des travaux captés à proximité de la station R4, du 31 Octobre au 02 Novembre 2022. En bas, évolution du niveau sonore dans la bande filtrée [50Hz-40kHz] (exprimé en dB ref 1 μ Pa ²) à la station R4 en fonction du temps sur les 3 jours de travaux. .	94
Figure 41 : Densité de navires dans le périmètre d'étude lors de l'automne 2022 (du 21/09/2022 au 20/12/2022).	98
Figure 42 : Répartition fréquentielle de l'énergie acoustique mesurée lors de l'automne 2022 (à gauche). Répartition horaire des niveaux sonores mesurés en automne 2022 dans la bande 355-445Hz et 8.9-11.0kHz (à droite).	102
Figure 43 : Densités spectrales de puissance (exprimées en dB ref 1 μ Pa ² /Hz) de périodes représentatives choisies lors de l'automne 2022. A gauche : coup de vent à la station R7. A droite : travaux à proximité de la station R4, du 30/10 au 02/11/2022.	103
Figure 44 : Evolution du niveau dans la bande filtrée [50Hz-40kHz] au point R4 en fonction du temps, lors de l'hiver 2023. Les courbes pour les autres stations sont disponibles en annexe.	106

Figure 45 : Corrélation du bruit permanent (orange) avec le vent (bleu) au niveau des stations R4, R2 et R3 lors de l'hiver 2023.....	108
Figure 46 : Répartition horaire des émergences anthropiques détectées lors de l'hiver 2023, au niveau de la station R4.	108
Figure 47 : En haut, spectrogramme illustratif d'un passage de navire au niveau de la station R3 le 14 Janvier 2023. En bas, évolution du niveau sonore (50Hz-10kHz, exprimé en dB ref 1 μ Pa ²) en fonction du temps.....	109
Figure 48 : Spectrogramme illustratif d'un moment calme à proximité de la station R7.....	110
Figure 49 : Densité de navires dans le périmètre d'étude lors de l'hiver 2023 (du 21/12/2022 au 21/03/2023).	114
Figure 50 : Répartition fréquentielle de l'énergie acoustique mesurée lors de l'hiver 2023 (à gauche). Répartition horaire des niveaux sonores mesurés en hiver 2023 dans la bande 355-445Hz et 8.9-11.0kHz (à droite).	118
Figure 51 : Densités spectrales de puissance (exprimées en dB ref 1 μ Pa ² /Hz) des instants représentatifs choisis lors de l'hiver 2023 : à gauche, période calme en R3, à droite passage proche de navire à proximité de R3 le 14/01/2023.	119
Figure 52 : Description schématique de la plateforme opérationnelle de prévision des bruits. (Source: Quiet-Oceans)	121
Figure 53 : Niveau sonore induit par le vent en fonction de la fréquence et de la vitesse.	123
Figure 54 : Densité de trafic dans la zone étendue au printemps 2022	124
Figure 55 : Gabarit sonore des navires en fonction de la longueur, la vitesse et la fréquence	125
Figure 56 : Distribution des niveaux sonores dans la bande filtrée [50Hz-40kHz] (en rouge, courbe prédite avec offsets, en bleu, donnée mesurée) à la station R4, à l'issue du processus de calibration.	125
Figure 57 : Cartographie statistique du bruit (11 Hz - 5.65 kHz) par saison, calculée aux percentiles 10% (à gauche) et 50% (à droite).....	130
Figure 58 : Schéma de la classification scientifique des espèces océaniques et marines de mammifères. Source : Quiet-Oceans.	132
Figure 59 : Famille des Delphinidés – Grand dauphin (<i>Tursiops truncatus</i>). Source : EcoOcéan Institut.	133
Figure 60 : Famille des Phocoenidés - Groupe de Marsouins communs (<i>Phocoena phocoena</i>). Source : GREMM.	133
Figure 61 : Famille des Phocidés – Phoque gris (<i>Halichoerus grypus</i>). Source : AMP.	133
Figure 62 : Sifflements de Delphinidés émis entre 2 kHz et 25 kHz. Source : Quiet-Oceans.	134
Figure 63 : Clics de Delphinidés émis entre 10 kHz et 180 kHz. Source : Quiet-Oceans.....	134
Figure 64 : Clics de Marsouins communs, <i>Phocoena phocoena</i> , émis dans la bande fréquentielle allant de 110 à 150 kHz.	136
Figure 65 : Clics de Marsouins communs, <i>Phocoena phocoena</i> , lors d'une activité de chasse (clics d'écholocation).	136
Figure 66 : Clics de Phoque gris (<i>Halichoerus grypus</i>) émis entre 0.2 et 12 kHz (Prawirasasra et al., 2021).....	136
Figure 67 : Grognements de Phoque gris (<i>Halichoerus grypus</i>) émis entre 50 Hz et 400 Hz. Source : NOAA. ..	136
Figure 68 : Procédure générale appliquée à la donnée brute pour le traitement bioacoustique des enregistrements sonores.	139
Figure 69 : Procédure appliquée pour la réalisation de l'inter-comparaison de l'enregistreur acoustique et du système POD.	144
Figure 70: Nombre de quartiles inspectés par jour et par station. Le rectangle rouge au milieu représente la moyenne avec son intervalle de confiance.....	145
Figure 71 : Exemple de signaux acoustiques émis par une espèce de Delphinidés non-identifiée au niveau de la station R4 en décembre 2022.	146
Figure 72 : Répartition des détections classifiées par espèces ou groupe d'espèce parmi les quartiles validés sur l'ensemble de la période d'étude, du 02 mars au 09 février 2023. Probable biologique (gris foncé) :	

quartiles pour lesquels un signal acoustique biologique est observé mais non identifié ; <i>Autres</i> (gris clair) : proportion de quartiles sans détections de mammifères marins.....	146
Figure 73 : Distribution du taux journalier de Delphinidés via la donnée des enregistreurs acoustiques au niveau des stations R2, R3, R4 et R7.....	148
Figure 74 : Distribution du taux journalier de Marsouins communs (<i>Phocoena phocoena</i>) via la donnée enregistreurs acoustiques au niveau des stations R2, R3, R4 et R7.	149
Figure 75 : Répartition des détections réalisées par le système POD (C-POD ou F-POD) sur l'ensemble de la période d'étude, du 02 mars au 08 février 2023. Rouge : Dauphin <i>sp.</i> ; Vert : Marsouin commun.	150
Figure 76 : Indice mensuel de présence des Dauphin <i>sp.</i> au niveau de chaque station. Ces résultats incluent uniquement les données des enregistreurs acoustiques.	151
Figure 77 : Indice mensuel de présence des Marsouins communs (<i>Phocoena phocoena</i>) au niveau de chaque station. Ces résultats incluent uniquement les données des enregistreurs acoustiques.	151
Figure 78 : Indice mensuel de présence des Marsouins communs (<i>Phocoena phocoena</i>) et des Delphinidés (<i>Delphinidae sp.</i>) au niveau de chaque station. Ces résultats incluent uniquement les données des systèmes PODs.	152
Figure 79 : Répartition des différents comportements observés par famille et par station à partir des données des enregistreurs acoustiques.	153
Figure 80 : Protocole géographique des mesures acoustiques.....	161
Figure 81 : Type de mouillage pour le suivi acoustique long terme.....	163
Figure 82 : Illustration de la cage R4 avant déploiement	165
Figure 83 : Ligne de mouillage de subsurface	166
Figure 84 : Principe de récupération de la ligne de subsurface	166
Figure 85 : Bilan chronologique des évènements du projet Centre Manche AO4	168
Figure 86 : Protocole géographique des mesures acoustiques.....	173
Figure 87 : Détections visuelles sur la période 2022 (avion et bateau) (source Biotope)	175
Figure 88 : Protocole géographique des mesures acoustiques.....	179
Figure 89 : Courbe de calibration de l'enregistreur SOUNDTRAP HF600 (S/N 6740).....	181
Figure 90 : Spectrogramme justifiant d'une écoute possible au-delà de la fréquence de 150 kHz	182

Liste des tableaux

Tableau 1 : Synthèse des données disponibles en fonction des stations et des objectifs.....	15
Tableau 2 : Zones d'implantation du suivi acoustique entre mars 2022 et avril 2023.....	24
Tableau 3 : Emplacement des stations acoustiques suite au nouveau protocole (à partir de mai 2023). Les cases en vert correspondent aux changements par rapport au protocole initial.....	24
Tableau 4 : Configuration du mouillage en fonction de la station et l'année de mesure.....	26
Tableau 5 : Caractéristiques techniques de l'enregistreur SoundTrap.....	28
Tableau 6 : Synthèse des informations sur les LEG réalisés durant cette étude.....	30
Tableau 7 : Synthèse des données acoustiques collectées durant la campagne du 03/03 au 31/05/2022.....	32
Tableau 8 : Synthèse des données acoustiques collectées durant la campagne du 30/05 au 03/08/2022.....	33
Tableau 9 : Synthèse des données acoustiques collectées durant la campagne du 03/08 au 29/11/2022.....	34
Tableau 10 : Synthèse des données acoustiques collectées durant la campagne du 05/12/2022 au 09/02/2023.....	35
Tableau 11: Synthèse des données acoustiques collectées durant la campagne du 08/02/2023 au 24/05/2023.....	36
Tableau 12 : Synthèse des données acoustiques collectées ou en cours d'acquisition.....	38
Tableau 13 : Statistiques des niveaux sonores (50 Hz - 40 kHz) à la station R2 (exprimés en dB ref 1µPa ²) durant la saison hiver 2022.....	48
Tableau 14 : Statistiques des niveaux sonores (50 Hz - 40 kHz) à la station R3 (exprimés en dB ref 1µPa ²) durant la saison hiver 2022.....	48
Tableau 15 : Statistiques des niveaux sonores (50 Hz - 40 kHz) à la station R4 (exprimés en dB ref 1µPa ²) durant la saison hiver 2022.....	48
Tableau 16 : Statistiques des niveaux sonores (50 Hz - 40 kHz) à la station R7 (exprimés en dB ref 1µPa ²) durant la saison hiver 2022.....	48
Tableau 17 : Distribution statistique du bruit mesuré dans le tiers d'octave 63Hz, en fonction de la zone, pour la saison hiver 2022.....	53
Tableau 18 : Distribution statistique du bruit mesuré dans le tiers d'octave 125Hz, en fonction de la zone, pour la saison hiver 2022.....	53
Tableau 19 : Statistiques des niveaux sonores (50Hz -40 kHz) à la station R2 (exprimés en dB ref 1µPa ²) durant la saison printemps 2022.....	64
Tableau 20 : Statistiques des niveaux sonores (50Hz -40 kHz) à la station R3 (exprimés en dB ref 1µPa ²) durant la saison printemps 2022.....	64
Tableau 21 : Statistiques des niveaux sonores (50Hz -40 kHz) à la station R4 (exprimés en dB ref 1µPa ²) durant la saison printemps 2022.....	64
Tableau 22 : Statistiques des niveaux sonores (50Hz -40 kHz) à la station R7 (exprimés en dB ref 1µPa ²) durant la saison printemps 2022.....	64
Tableau 23 : Distribution statistique du bruit mesuré dans le tiers d'octave 63Hz, en fonction de la zone, pour la saison printemps 2022.....	69
Tableau 24 : Distribution statistique du bruit mesuré dans le tiers d'octave 125Hz, en fonction de la zone, pour la saison printemps 2022.....	69
Tableau 25 : Statistiques des niveaux sonores (50Hz -40 kHz) à la station R2 (exprimés en dB ref 1µPa ²) durant la saison été 2022.....	79
Tableau 26 : Statistiques des niveaux sonores (50Hz -40 kHz) à la station R3 (exprimés en dB ref 1µPa ²) durant la saison été 2022.....	79
Tableau 27 : Statistiques des niveaux sonores (50Hz -40 kHz) à la station R4 (exprimés en dB ref 1µPa ²) durant la saison été 2022.....	79
Tableau 28 : Statistiques des niveaux sonores (50Hz -40 kHz) à la station R7 (exprimés en dB ref 1µPa ²) durant la saison été 2022.....	79

Tableau 29 : Distribution statistique du bruit mesuré dans le tiers d’octave 63Hz, en fonction de la zone, pour la saison été 2022.	85
Tableau 30 : Distribution statistique du bruit mesuré dans le tiers d’octave 125Hz, en fonction de la zone, pour la saison été 2022.	85
Tableau 31 : Statistiques des niveaux sonores (50Hz -40 kHz) à la station R2 (exprimés en dB ref 1µPa ²) durant la saison automne 2022.	95
Tableau 32 : Statistiques des niveaux sonores (50Hz -40 kHz) à la station R3 (exprimés en dB ref 1µPa ²) durant la saison automne 2022.	95
Tableau 33 : Statistiques des niveaux sonores (50Hz -40 kHz) à la station R4 (exprimés en dB ref 1µPa ²) durant la saison automne 2022.	95
Tableau 34 : Statistiques des niveaux sonores (50Hz -40 kHz) à la station R7 (exprimés en dB ref 1µPa ²) durant la saison automne 2022.	95
Tableau 35 : Distribution statistique du bruit mesuré dans le tiers d’octave 63Hz, en fonction de la zone, pour la saison automne 2022.	100
Tableau 36 : Distribution statistique du bruit mesuré dans le tiers d’octave 125Hz, en fonction de la zone, pour la saison automne 2022.	100
Tableau 37 : Statistiques des niveaux sonores (50Hz -40 kHz) à la station R2 (exprimés en dB ref 1µPa ²) durant la saison hiver 2023.	111
Tableau 38 : Statistiques des niveaux sonores (50Hz -40 kHz) à la station R3 (exprimés en dB ref 1µPa ²) durant la saison hiver 2023.	111
Tableau 39 : Statistiques des niveaux sonores (50Hz -40 kHz) à la station R4 (exprimés en dB ref 1µPa ²) durant la saison hiver 2023.	111
Tableau 40 : Distribution statistique du bruit mesuré dans le tiers d’octave 63Hz, en fonction de la zone, pour la saison hiver 2023.	116
Tableau 41 : Distribution statistique du bruit mesuré dans le tiers d’octave 125Hz, en fonction de la zone, pour la saison hiver 2023.	116
Tableau 42 : Synthèse des données environnementales utilisées pour la modélisation acoustique.	122
Tableau 43 : Erreur moyenne résiduelle sur le bruit dans la bande filtrée [50Hz-40kHz] en sortie du processus de calibration, par station.	125
Tableau 44 : Limites de la zone cartographiée.	126
Tableau 45 : Synthèse des données concernant les mammifères marins susceptibles d’être présents au large de la Normandie à proximité des zones d’étude.	133
Tableau 46 : Exemple de la diversité de sifflements émis par les Delphinidés avec le spectrogramme des émissions des espèces susceptibles d’être présentes au large de la Normandie.	134
Tableau 47 : 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 (saison hivernale).	138
Tableau 48: 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 (saison estivale).	138
Tableau 49 : Synthèse de l’inter-comparaison entre les résultats du système C-POD et de l’enregistreur acoustique au niveau des stations R2 et R3 pour l’ensemble des saisons 2022 et l’hiver 2023. Cette inter-comparaison a été réalisée (1) sur la base des détections avec un indice de confiance élevé à modéré pour le C-POD et (2) sur des périodes d’acquisition similaire aux deux systèmes, soit 30% du temps.	155
Tableau 50 : Synthèse des avantages/inconvénients des systèmes de mesure.	157
Tableau 51 : Descriptif des points de mesure.	162
Tableau 52 : Présentation critères de choix en fonction type de mouillage sur la zone Centre Manche.	164
Tableau 53 : Identification et classification des problèmes rencontrés.	167
Tableau 54 : Statistique de réussite sur les opérations de relevage des lignes de mouillage (R1, R2, R3, R5, R6, R7).	169



Tableau 55 : Statistique de réussite sur les opérations de relevage de la cage en R4	169
Tableau 56 : Descriptif des points de mesure	173
Tableau 57 : Bilan des campagnes et des données par point de mesure	174
Tableau 58 : synthèse des données disponibles pour la cartographie du bruit ambiant et l'évaluation de la fréquentation des mammifères marins.	177
Tableau 59 : Descriptif des points de mesure.	178
Tableau 60 : Tableau comparatif des enregistreurs.	180

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 active

Emission de signaux acoustiques de référence afin de quantifier les pertes subies par les ondes acoustiques lorsqu'elles se propagent dans le milieu marin.

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. $1\mu\text{Pa}^2$.

Faux-positif

Evènement où le test fait une prédiction positive et le sujet a un résultat négatif. Par exemple, l'enregistreur acoustique permet la détection de clics de Delphinidés qui, après vérifications, sont absents de la donnée audio.

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.

Marnage

Modification de la hauteur d'eau principalement lié à l'effet des marées. Il s'exprime en mètres et est référencé sur le zéro hydrographique. Le zéro hydrographique est voisin du niveau des plus basses mers astronomiques.

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. $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$.

PAM (Passive Acoustic monitoring).

Système de mesures acoustiques temps-réel et/ou autonome permettant le suivi sur de longues périodes de la présence/fréquentation des espèces marines et des niveaux sonores.

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. 1µPa @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. 1µPa.

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.

Quartile

Période de temps significative permettant de discrétiser une campagne de mesure. La durée d'un quartile est de l'ordre de quelques minutes.

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.

Vrai-positif

Evènement où le test fait une prédiction positive et le sujet a un résultat positif. Par exemple, l'enregistreur acoustique permet la détection de clics de Delphinidés qui, après vérifications, sont bien présents dans la donnée audio.

Chapitre I. Synthèse du suivi durant l'état de référence

Dans le cadre du projet de parc éolien en mer de Normandie, Quiet-Oceans et Biotope ont été mandatés par le ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires pour établir l'état de référence acoustique sur une durée d'un an et le suivi de la fréquentation des mammifères marins sur une durée de deux ans par acoustique passive sur la zone des futurs parcs éoliens en mer. Ces suivis concernant le bruit ambiant sous-marin et les mammifères marins devront être poursuivis pendant la phase de construction et tout au long de la période d'exploitation du parc éolien selon le principe Before-After-Control-Impact (BACI) et Gradient Sampling.

Afin de répondre aux objectifs opérationnels de suivi acoustique longue durée, sept stations de mesure ont été équipées d'un enregistreur acoustique autonome et/ ou d'un système POD. Ces stations de mesure (R1 à R7) sont déployées dans la zone des futurs parcs éoliens et au large (Figure 1).

Du point de vue de la mise en œuvre opérationnelle du suivi par acoustique passive, la grande majorité des systèmes acoustiques ont collectés le nombre de jours attendus pour chacune des saisons de l'état de référence 2022-2023 (Tableau 1). La deuxième année de suivi acoustique permettra de pallier à l'absence de données pour certaines stations et saisons déficitaires.

Cette synthèse propose une analyse des données collectées pour la période du 02 mars 2022 au 09 février 2023. Les résultats obtenus sont représentatifs des niveaux sonores et de la distribution spatio-temporelle des espèces de mammifères marins pour l'année de référence 2022-2023. A noter, la donnée récupérée sur la période du 09 février au 24 mai 2023 est actuellement en cours d'analyse.

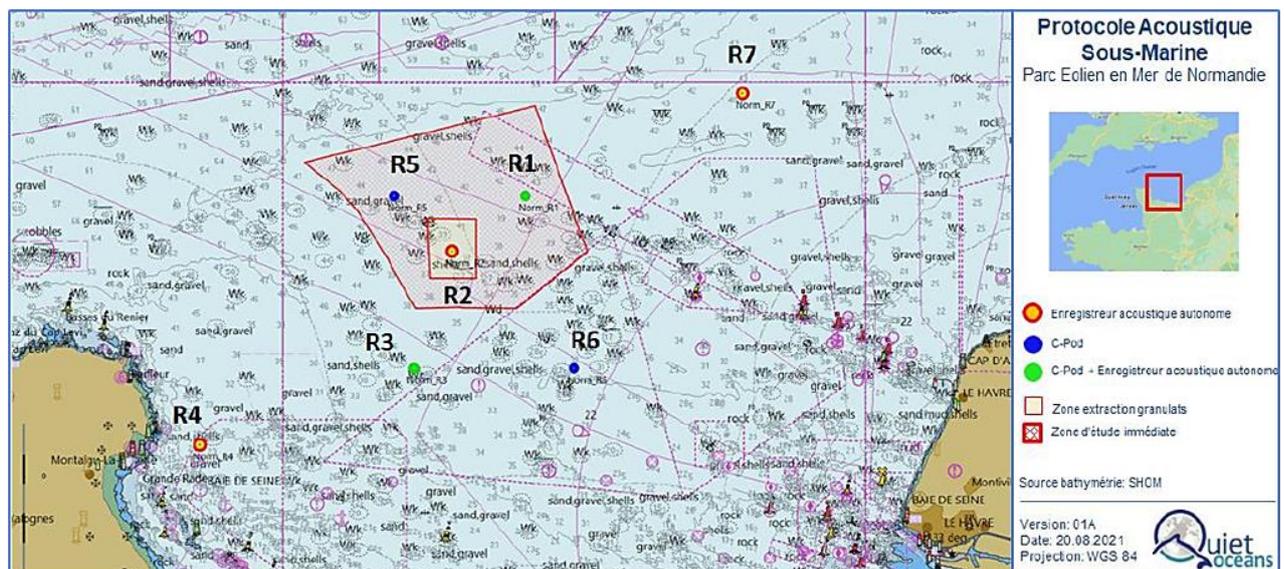


Figure 1 : Protocole géographique du suivi acoustique.

Tableau 1 : Synthèse des données disponibles en fonction des stations et des objectifs.

Zone	Station	Printemps 2022		Été 2022		Automne 2022		Hiver 2023	
		Cartographie bruit ambiant	Fréquentation biologique						
Proche	R1								
	R2					NA			
	R5	NA		NA		NA		NA	
Intermédiaire	R3								
	R6	NA		NA		NA		NA	
Éloignée	R4								
	R7								

	Données exploitables
	Données manquantes
	Données en attente de récupération
	Données récupérées en cours de validation
NA	Système de mesure non adapté

I.1. Suivi acoustique des niveaux de bruits sous-marins

I.1.1. Suivi des niveaux sonores par station

En termes de bruit physique, les analyses dans la bande de fréquence de 50 Hz à 40 kHz de la donnée collectée par les enregistreurs acoustiques sur la période du 03 mars 2022 au 21 Mars 2023 montrent la superposition :

- ✓ D'un bruit permanent, dépendant majoritairement du vent, variant de 98 dB ref 1 μ Pa² (station R4) à 120 dB ref 1 μ Pa² (station R2) ;
- ✓ Par des émergences anthropiques courtes, résultant à des niveaux allant jusqu'à 155 dB ref 1 μ Pa² majoritairement dues aux passages de navires. Leur intensité dépend de la distance hydrophone/navire.

Les organismes benthiques (organismes vivants sur le fond marin) sont responsables d'une élévation du niveau de bruit permanent allant de 1 à 2 dB dans la bande de fréquence entre 4 kHz et 20 kHz, le long d'une tranche horaire principalement nocturne répartie entre 18h et 08h UTC.

La Figure 2 synthétise la statistique des niveaux sonores par station et par saison ayant fait l'objet d'un suivi acoustique par enregistreur autonome passif. Le percentile P99 % illustre préférentiellement les niveaux courants et régulièrement liés au bruit d'origine environnemental, le percentile P1% illustre les bruits rares et intenses induits majoritairement par le trafic des navires

Les niveaux de bruit médians (exprimés dans la bande de fréquence entre 50 Hz et 40 kHz) relevés varient de 103 dB ref 1 μ Pa² (station R4, zone côtière éloignée) à 113 dB ref 1 μ Pa² (station R2, zone proche). Lors de l'été 2022, ces niveaux sont en baisse de -3 dB à la station R3 (zone intermédiaire), et en légère hausse de +2.4 dB à la station R4 (zone éloignée).

Les niveaux de bruit maximums (1%) relevés varient de 116.9 (R4) à 129 (R3) dB ref 1 μPa^2 . Lors de l'été 2022, ces niveaux sont en baisse aux stations R2 et R3 (-4.5 et -6.3dB), probablement en raison d'une diminution de la fréquentation immédiate par les navires de pêche. Au contraire, l'augmentation du trafic côtier lors de l'été 2022 induit une hausse à la station R4 (+5dB). Ces niveaux reviennent à des valeurs proches du printemps et de l'hiver 2022 lors des suivis automne 2022 et hiver 2023.

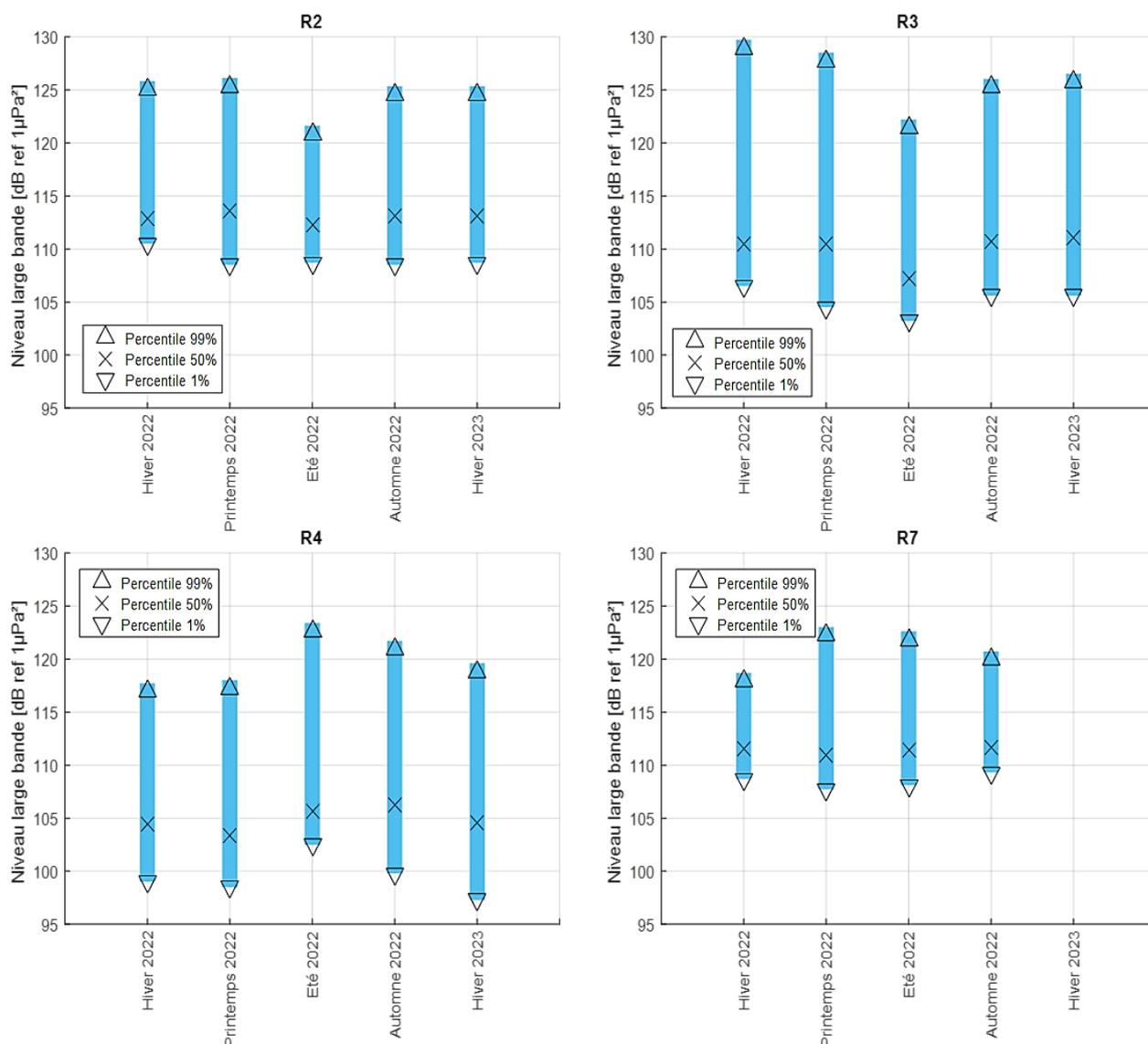


Figure 2 : Synthèse de la statistique des niveaux sonores par station (avec présence d'un enregistreur acoustique) et par saison (niveau intégré dans la bande de 50 Hz à 40 kHz).

1.1.2. Cartographie du bruit existant

Les données mesurées ont été utilisées afin de réaliser la cartographie calibrée du bruit existant sur zone, en fonction de la saison, via la plateforme Quonops®. L'analyse des bruits ambiants permettra également d'affiner la portée de détection des mammifères marins par espèces.

1.2. Suivi acoustique 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. En fonction du système de mesure déployé (enregistreur acoustique et/ou système POD), un traitement spécifique semi-automatique a été réalisé afin d'établir des statistiques de fréquentation des familles de mammifères marins (Phocoenidés, Delphinidés et Phocidés) présentes sur la zone d'étude.

Le traitement bioacoustique de la donnée recueillie par les enregistreurs acoustiques consiste à détecter les signaux biologiques dans les données audio à l'aide du logiciel PAMGuard, interface experte de la détection et classification des signaux émis par les mammifères marins. L'algorithme de détection proposé par PAMGuard 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 (visuelle et auditive) des événements sonores détectés par le logiciel PAMGuard a été réalisée par les experts bioacoustiques de Quiet-Oceans et Biotope. 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.

Un détecteur POD est un système autonome analysant uniquement les signaux impulsifs (clics) et procédant à la classification de ces derniers grâce à un algorithme embarqué développé par Chelonia Ltd. Chaque détection/classification proposée par le système est pondérée par un indice de confiance (élevé, modéré, faible ou très faible), qui après analyse globale, permet d'établir un statut de fréquentation des Delphinidés et des Phocoenidés uniquement via leurs émissions de clics. Toutefois, le système autonome POD ne conserve pas de fichier audio associé à ces classifications et ne permet donc pas la vérification manuelle des détections proposées. Dans ce contexte, des déploiements simultanés d'un enregistreur acoustique et d'un système POD ont été effectués pour certaines stations (R1 et R3) afin de qualifier les résultats obtenus via la donnée du système POD et par conséquent caractériser la fiabilité des détections dans l'environnement spécifique de la zone du projet.

1.2.1. Suivi acoustique des cétacés

Les analyses bioacoustiques ont permis de noter la présence de Marsouins communs (*Phocoena phocoena*) et Delphinidés, tels que le Grand Dauphin (*Tursiops truncatus*) et le Dauphin commun (*Delphinus delphis*), au niveau de chaque station. D'autres espèces de Delphinidés telles que le Dauphin de Risso (*Grampus griseus*), le Dauphin bleu-et-blanc (*Stenella coeruleoalba*) et le Globicéphale noir (*Globicephala melas*) ont été identifiés au moins une fois dans l'ensemble de la donnée analysée.

Les Marsouins communs (*Phocoena phocoena*) sont quotidiennement présents aux niveaux des stations R3 (entre la future zone du parc éolien et la côte) et R7 (station éloignée). Cette présence est moins marquée mais régulière au niveau des stations R2 (dans la zone du futur parc) et R4 (proche de la côte). Les signatures acoustiques émises par cette famille indiquent de manière générale des comportements de socialisation/écholocation au niveau des stations R4 et R7. Le comportement de chasse est prédominant dans la zone du futur parc éolien (station R2) et, entre la zone du futur parc et la côte (station R3).

Les sifflements et clics émis par les Delphinidés renseignent sur la présence régulière de ces derniers dans, et, au large du site (stations R2, R3, R4 et R7). Une hausse significative de cette présence est observée à partir de

la période hivernale 2023. La plupart de ces signatures acoustiques s'apparentent essentiellement à un comportement de socialisation/communication entre les individus.

1.2.2. Suivi acoustique des Phocidés

A ce stade de l'étude, aucun signal acoustique n'a permis de détecter la présence de Phoques aux alentours des zones d'études. Etant donné les distances à la côte, ce résultat est conforme aux attentes.

1.2.3. Inter-comparaison des systèmes acoustiques

L'analyse spécifique de la qualification des détections du système C-POD permet de noter que :

- ✓ Dans un contexte environnemental acoustiquement calme (absence de bruit benthique et/ou anthropique intense), le système C-POD permet une bonne détection des signaux impulsifs biologiques quelle que soit l'espèce émettrice avec en moyenne 91% de bonnes détections pour les Delphinidés et 95.5% pour les Phocoenidés ;
- ✓ Dans un contexte environnemental relativement bruyant, le système C-POD est perturbé par la présence de bruit anthropique et ne permet pas une bonne détection des signaux impulsifs biologiques ;
- ✓ L'enregistreur acoustique a permis de démontrer une perte quantitative des contacts acoustiques détectés par le C-POD, ce qui altère significativement l'estimation de fréquentation du site, et ce principalement pour les Delphinidés avec 27 périodes de détections réalisées par l'enregistreur acoustique contre 6 pour le système C-POD.

La poursuite de cette qualification via une analyse détaillée des instants pour lesquels le C-POD n'a pas réalisé de détections permettra d'affiner ces résultats.

Chapitre II. Présentation de l'étude

Dans le cadre du projet de parc éolien en mer de Normandie, Quiet-Oceans et Biotope ont été mandatés par le ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires pour la réalisation de l'état initial acoustique et le suivi de la fréquentation des mammifères marins par acoustique passive sur la zone du futur parc (Figure 3).

Les objectifs de cette étude sont de :

- ✓ Mettre en œuvre un suivi acoustique passif à l'aide d'enregistreurs autonomes ;
- ✓ Etablir la cartographie du bruit existant ;
- ✓ Suivre la fréquentation de la zone par les mammifères marins ;
- ✓ Dresser un état de référence acoustique et bioacoustique du site, qui servira de base de comparaison lors de la phase travaux du projet.

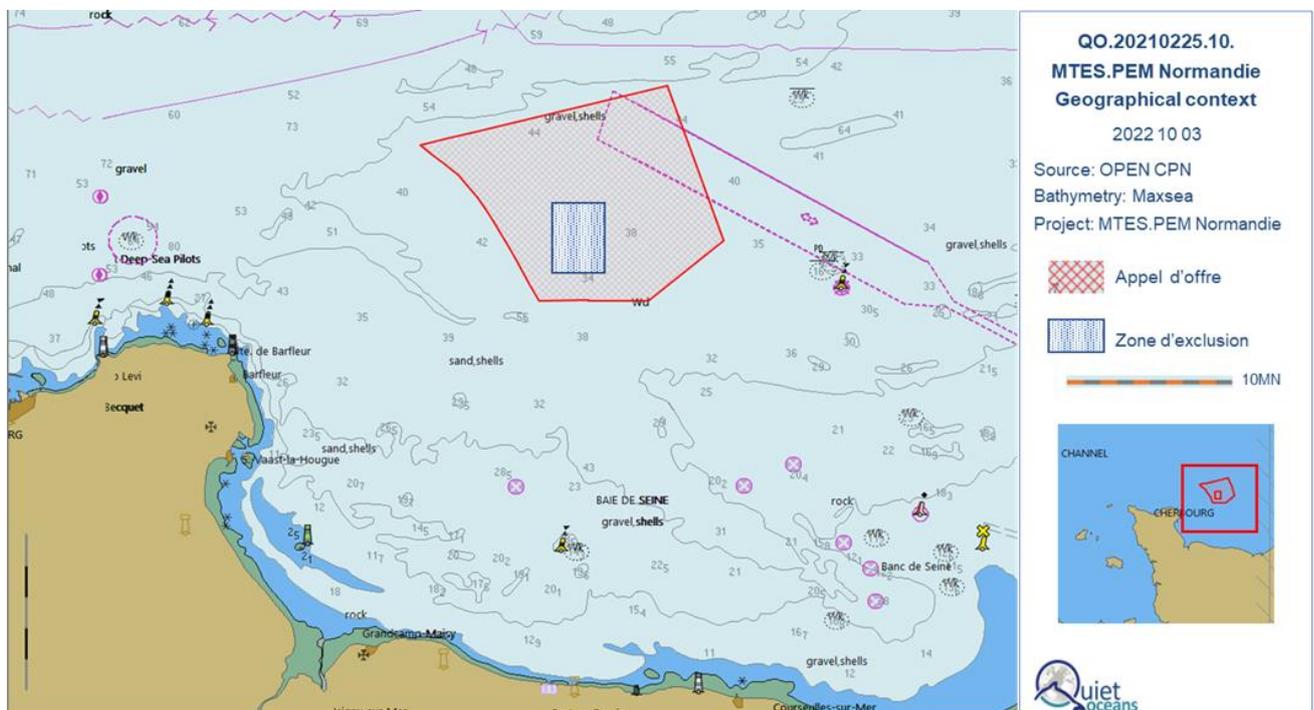


Figure 3 : Contexte géographique de l'étude.

Chapitre III. 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.

III.1. La problématique du bruit sous-marin

Le monde sous-marin est tout sauf silencieux, et est composé d'un chœur 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. 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 $1 \mu\text{Pa}$ en acoustique sous-marine, contre $20 \mu\text{Pa}$ 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 4 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.

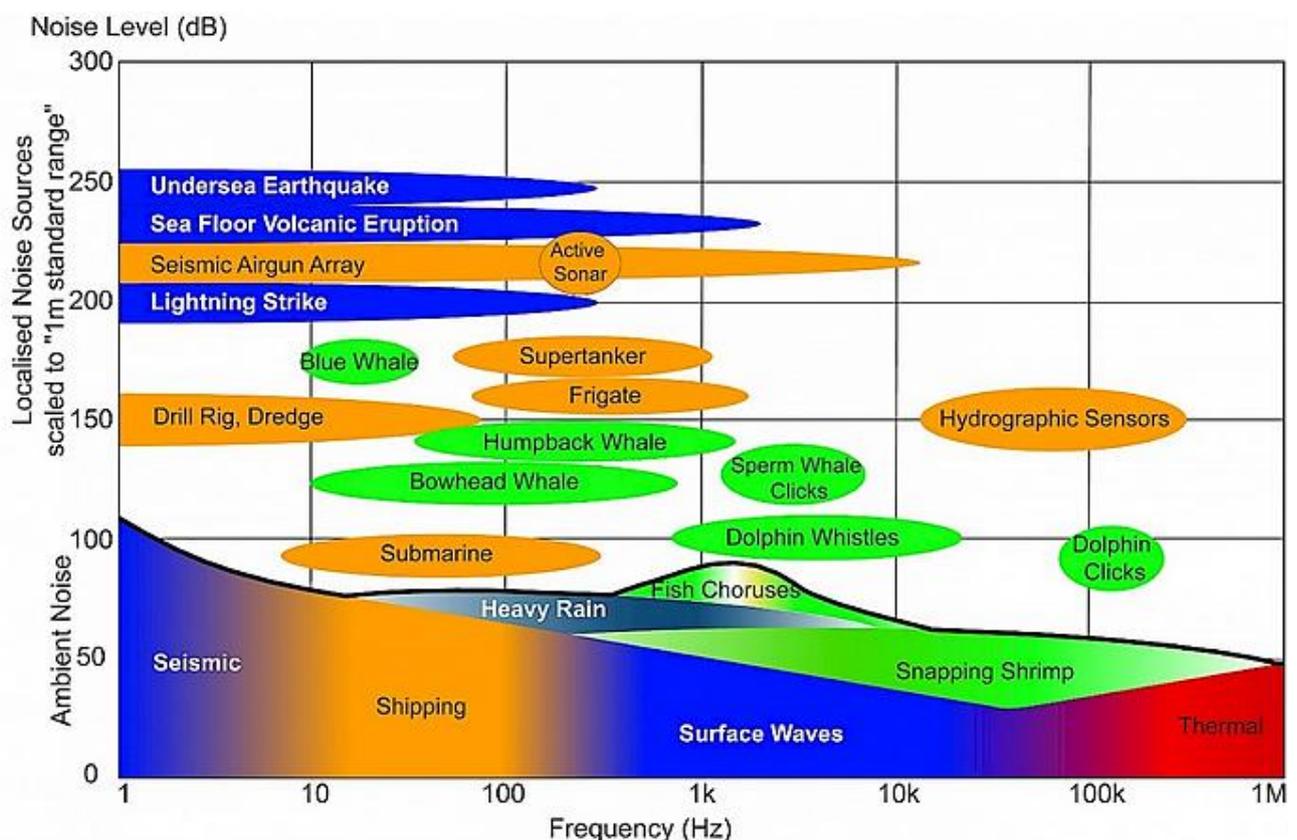


Figure 4 : Echelle qualitative des niveaux (émis à un mètre) et fréquences des sources sonores anthropiques, biologiques et naturelles dans le milieu marin. Source : OSPAR.

III.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 dominent les uns par rapport aux autres pour former le contexte sonore d'une aire d'étude (Figure 5). La Figure 6 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.

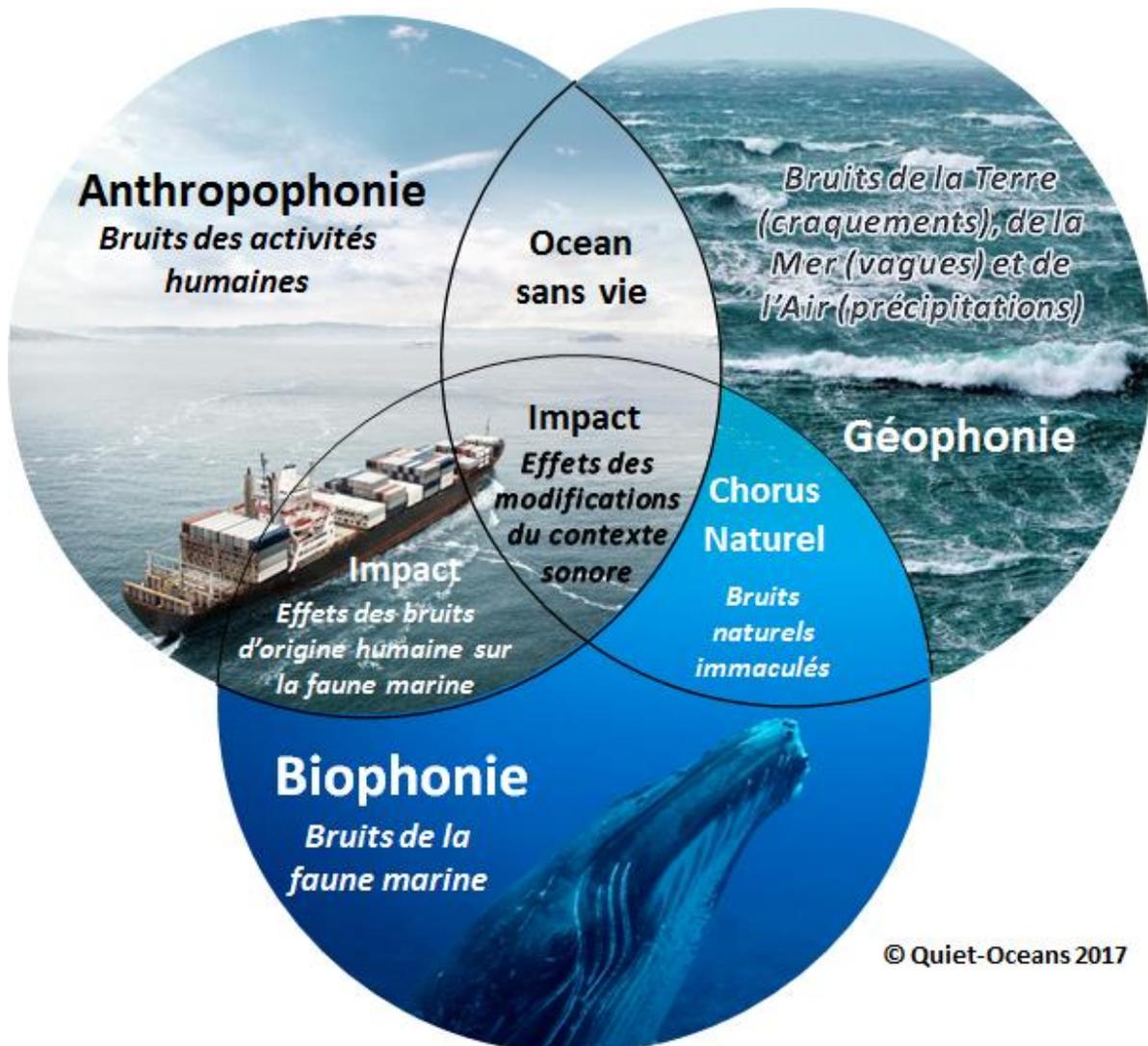


Figure 5 : Composition du chorus sonore sous-marin.

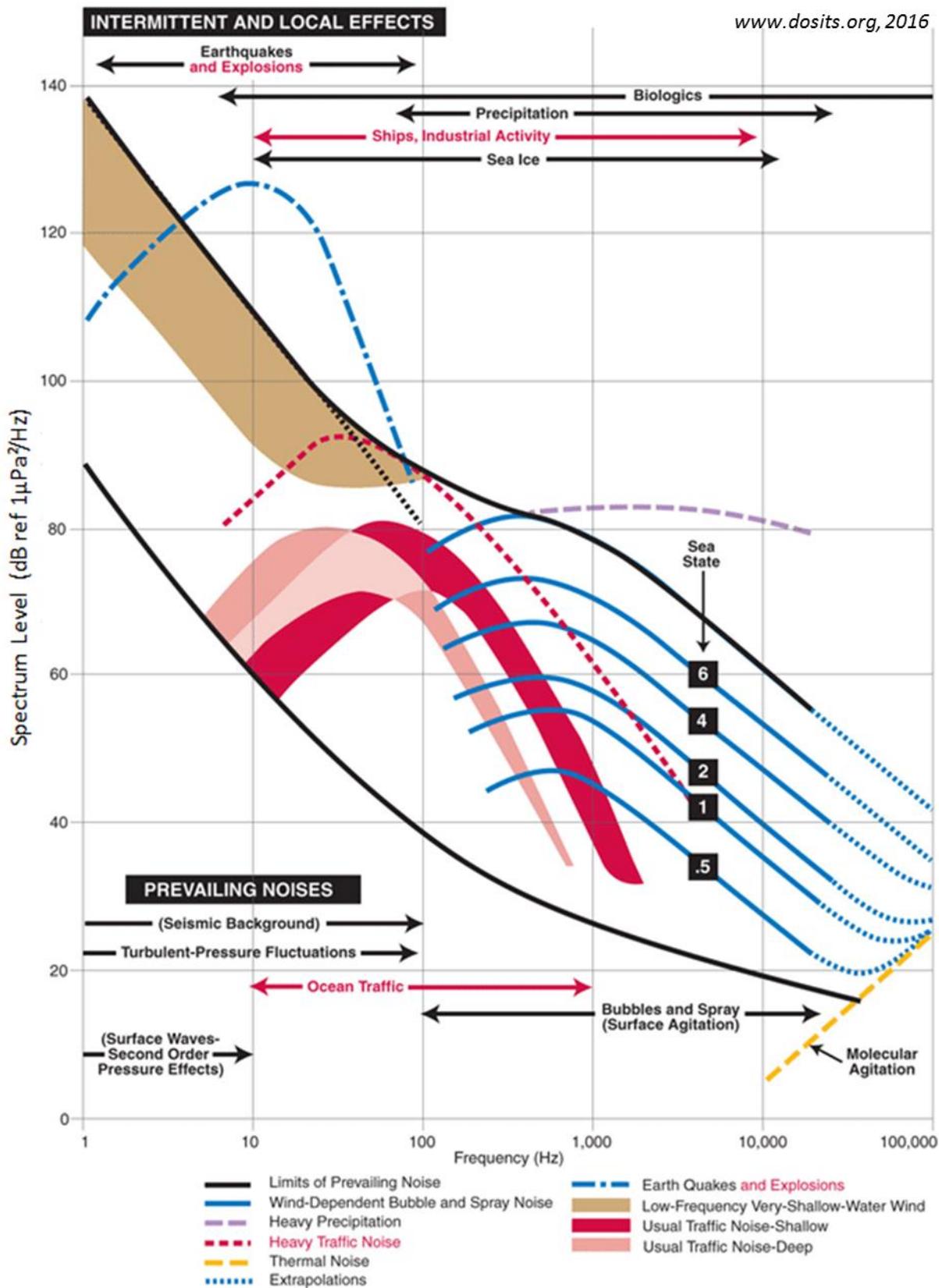


Figure 6 : Synthèse des niveaux de bruit typiques en fonction de la fréquence et de la nature de la source de bruit. Ces valeurs peuvent être très dépendantes du site, de la saison, et du contexte (Dosits.org, 2016).

Chapitre IV. Protocole de mesures acoustiques

Afin de pouvoir établir la cartographie du bruit existant et caractériser la fréquentation du site par les mammifères marins, un protocole de suivi acoustique a été défini en concertation avec le donneur d'ordre et les parties prenantes. Ce protocole impose des mesures par acoustique passive au niveau de plusieurs stations sur des durées respectives d'un an pour l'établissement de la cartographie du bruit et deux ans pour le suivi de la fréquentation du site par les mammifères marins.

Pour chacune des campagnes de suivi longue durée, les objectifs opérationnels de mesures concernent le déploiement :

- ✓ D'une cage équipée d'un enregistreur acoustique autonome et posée sur le fond de la mer ;
- ✓ De six flotteurs subsurface équipés d'un enregistreur acoustique autonome et/ou d'un système POD (C-POD ou F-POD) immergé(s) à une profondeur intermédiaire dans la colonne d'eau ;

A noter que le mouillage de type flotteur subsurface a été privilégié dans les hauteurs d'eau supérieure à 40 m afin de pouvoir intervenir plus facilement en cas de défaillance technique. En effet, dans ce contexte, une intervention par plongée ou par ROV est quasi-impossible ou très difficile pour des systèmes posés sur le fond. Pour plus d'informations sur le protocole de mouillage, il est recommandé de consulter le mémorandum QO.20210225.10.MEM.005.01A.MTES.PEM Normandie.NoteMouillage.pdf (copie en Annexe IX.1.).

Chacun de ces systèmes acoustiques est déployé pour une durée théorique de 75 jours en fonction des conditions météorologiques au moment du relevage des instruments. L'autonomie des systèmes permet un relevage jusqu'à 90 jours.

Le Tableau 2 indique les dénominations associées à chacune des zones d'implantation du suivi acoustique et la Figure 7 illustre la position de ces différentes zones de mesures acoustiques pour la première année de suivi (mars 2022 à mars 2023).

Suite aux retours d'expérience de cette première année de suivi acoustique et afin de sécuriser l'acquisition des données, un nouveau protocole a été acté le 28 mars 2022, puis mis en œuvre à partir de mai 2023 (Figure 8, Tableau 3 et Tableau 4):

- ✓ Les stations R1, R3 et R5 ont été déplacées à quelques kilomètres de leur emplacement d'origine, à proximité d'une épave. Le contexte environnemental est donc conservé pour ces stations dont les dénominations deviennent respectivement P1, P3 et P5.
- ✓ Les stations sont préférentiellement équipées d'enregistreurs acoustiques afin d'augmenter la qualité des données collectées. Cette modification fait suite aux résultats des travaux d'inter-comparaison entre les résultats des enregistreurs et PODs réalisés pour certaines stations.
- ✓ Toutes les stations sont désormais équipées d'une cage acoustique posée sur le fond et instrumentées d'un double largueur afin de sécuriser le relevage de l'instrument ;

Ce nouveau protocole a pour objectif de palier aux interactions avec les activités anthropiques sur site et ainsi de sécuriser au mieux la collecte des données acoustiques. Les sémaphores veillent sur les différentes stations acoustiques à travers des bulles de surveillance. En cas de présence d'un navire, un message est envoyé à ce dernier afin de le dérouter.

A noter, les stations P1 et P5 doivent faire l'objet d'un dédoublement d'instrumentation afin d'assurer la collecte de données acoustiques dans la zone proche du projet. Pour ce faire, une cage équipée d'un enregistreur et/ou POD est déployée à 50 m de la cage initiale déposée au niveau de ces stations. En cas de redondance de la donnée, le système ayant collecté le plus de données de bonne qualité sera privilégié pour l'analyse acoustique.

Tableau 2 : Zones d'implantation du suivi acoustique entre mars 2022 et avril 2023.

Station	Dénomination de la zone géographique	Longitude (WGS84)	Latitude (WGS84)	Système acoustique	Support
R1	Proche	00°35.0000'W	49°52.5000'N	Enregistreur POD	Flotteur subsurface
R2	Proche	00°42.5611'W	49°48.7922'N	Enregistreur	Flotteur subsurface
R3	Intermédiaire	00°46.5000'W	49°41.0000'N	Enregistreur POD	Flotteur subsurface
R4	Eloignée	01°08.5000'W	49°35.9000'N	Enregistreur	Cage sur le fond
R5	Proche	00°48.5000'W	49°52.5000' N	POD	Flotteur subsurface
R6	Intermédiaire	00°30.0000'W	49°41.0000' N	POD	Flotteur subsurface
R7	Eloignée	00°12.6000'W	49°59.3000' N	Enregistreur	Flotteur subsurface

Tableau 3 : Emplacement des stations acoustiques suite au nouveau protocole (à partir de mai 2023). Les cases en vert correspondent aux changements par rapport au protocole initial.

Station	Dénomination de la zone géographique	Longitude (WGS84)	Latitude (WGS84)	Système acoustique	Support	Nom de la station d'origine
P1 + doublon	Proche	00°33.1426'W	49°54.0707'N	Enregistreur	Cage sur le fond	R1
R2	Proche	Inchangée	Inchangée	Enregistreur	Cage sur le fond	R2
P3	Intermédiaire	00°49.2125'W	49°39.1458'N	Enregistreur POD	Cage sur le fond	R3
R4	Eloignée	Inchangée	Inchangée	Enregistreur	Cage sur le fond	R4
P5 + doublon	Proche	00°50.8309'W	49°51.6483'N	Enregistreur POD	Cage sur le fond	R5
R6	Intermédiaire	Inchangée	Inchangée	POD	Cage sur le fond	R6
R7	Eloignée	Inchangée	Inchangée	Enregistreur	Cage sur le fond	R7

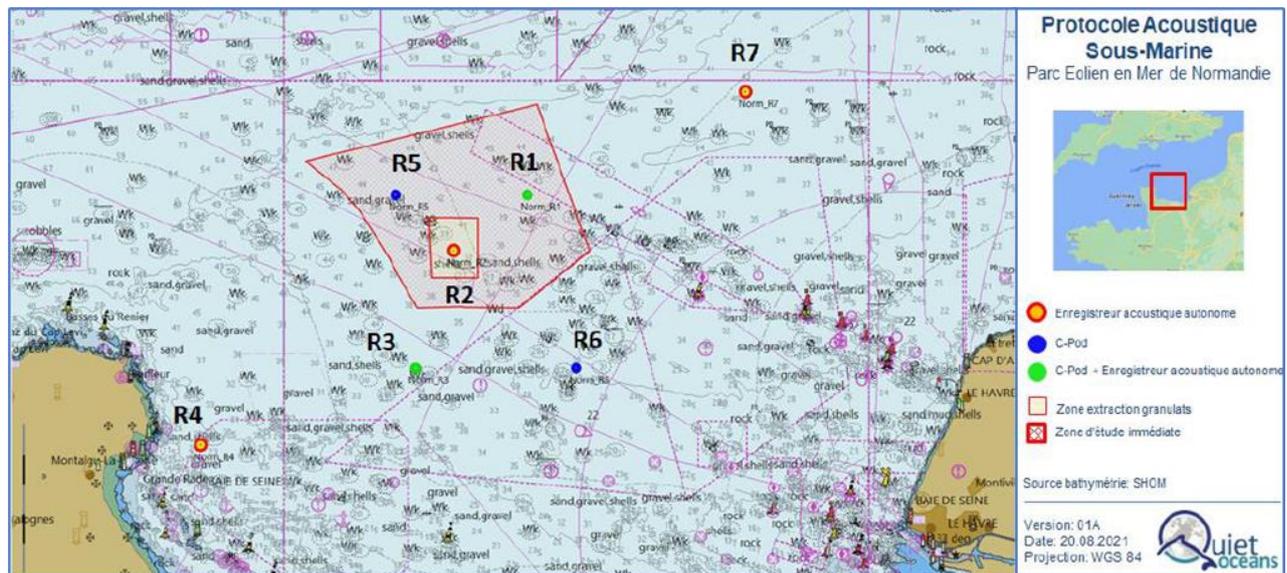


Figure 7 : Protocole géographique des mesures acoustiques longues durées entre mars 2022 et avril 2023.

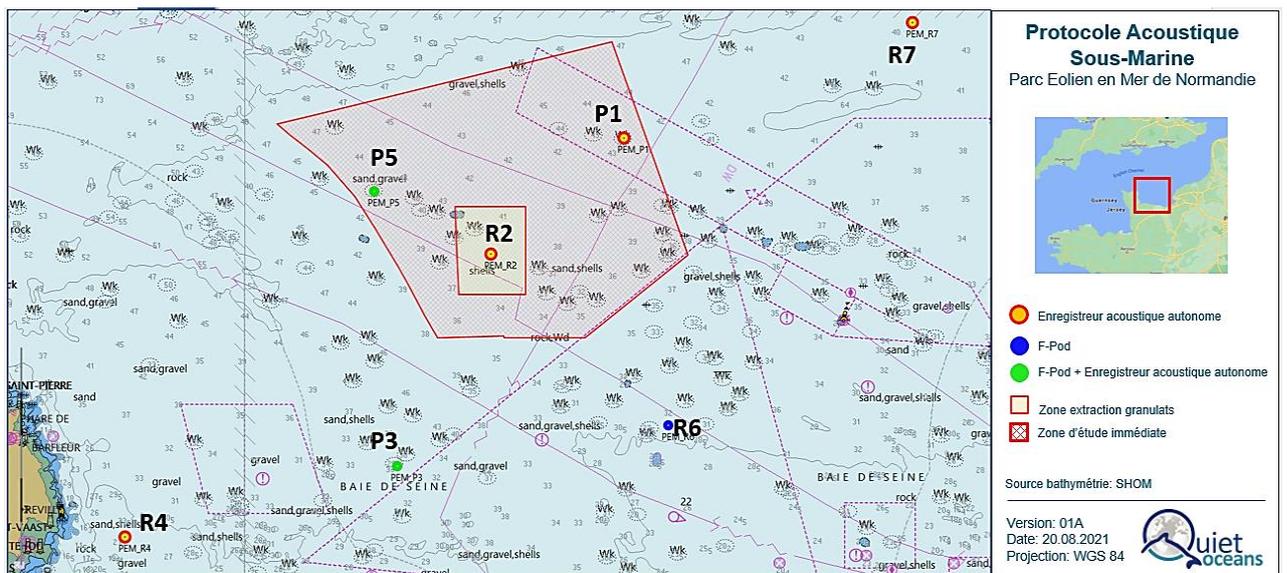


Figure 8 : Protocole géographique des mesures acoustiques longues durées à partir de mai 2023.

Tableau 4 : Configuration du mouillage en fonction de la station et l'année de mesure.

	Station	Configuration
1 ^{ère} année de suivi acoustique	R1, R2, R3, R5, R6 et R7	
2 ^{ème} année de suivi acoustique	R2, R4, R6 et R7 (R4 déjà équipée d'une cage durant la 1 ^{ère} année de suivi)	
	P3	
	P1 et P5	

IV.1. Les systèmes de mesure

Un enregistreur acoustique équipé d'un hydrophone permet de capter et stocker la diversité des sons, d'estimer les niveaux sonores et de capter les signatures acoustiques émises par la faune marine en post-traitement. Uniquement dédié à l'estimation de la fréquentation des mammifères marins, le système POD détecte automatiquement les clics émis par les Delphinidés et les Phocoenidés à l'aide d'un algorithme embarqué. Afin de pouvoir qualifier les résultats de la fréquentation obtenue via la donnée de ce système et par conséquent caractériser la fiabilité du système POD, des déploiements simultanés d'un enregistreur acoustique et d'un système POD (C-POD ou F-POD) ont été réalisés au niveau de certaines zones. En fonction des résultats de cette qualification, il serait alors envisageable d'optimiser le coût engendré par un suivi de la fréquentation des mammifères marins sur deux ans. Pour plus d'informations sur la prolongation du suivi de la présence des mammifères marins sur site, il est recommandé de consulter le mémorandum QO.20210225.10.MEM.004.02A.MTES.PEM Normandie.Prolongation du suivi acoustique.pdf (cf. Annexe IX.2.).

IV.1.1. Enregistreur acoustique pour les mesures de longue durée

L'enregistreur acoustique utilisé dans cette étude est un SoundTrap produit par la société Ocean Instruments et est intégré soit dans une cage de fond, soit sur une ligne de mouillage équipée d'un flotteur subsurface (Figure 9 et Tableau 5). Un enregistreur mesure et enregistre 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 niveaux de bruit émis par les mammifères marins.

La sauvegarde des signaux bruts dans un disque de grande capacité permet de stocker l'équivalent de 30 jours de mesures continues. Dans le cadre de cette étude, afin de trouver un compromis entre la fréquence des relevage/déploiement et la capacité d'acquisition du système, le choix a été fait de faire une acquisition cyclée soit 3 minutes ON et 7 minutes OFF. Cette durée d'acquisition (30%) est suffisante pour établir les tendances statistiques des niveaux sonores et de fréquentation des zones par les mammifères marins.

Les caractéristiques techniques du système de mesure 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 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 audio brute peuvent être vérifiés et validés par un opérateur spécialisé.

Pour plus d'informations concernant le choix et les caractéristiques de l'enregistreur acoustique dédié au suivi des niveaux sonores et à l'établissement de la fréquentation de mammifères marins, il est recommandé de consulter le mémorandum QO.20210225.10.MEM.006.01A.MTES.PEM Normandie.Note_Enregistreur.pdf (cf. Annexe IX.3.).



Figure 9 : Enregistreur acoustique autonome (à gauche), flotteur subsurface avec panier (au centre) et cage de fond (à droite).

Tableau 5 : Caractéristiques techniques de l'enregistreur SoundTrap.

Désignation	SoundTrap HT 600 HF
Autonomie	Jusqu'à 160 jours
Stockage	Jusqu'à 2To (90 jours mini)
Bande passante	20 Hz – 150 kHz
Sensibilité à la réception	-176dB dB ref. 1V/ μ PA
Fréquence échantillonnage	384 kHz
Résolution	16 bits
Format fichier	Format propriétaire (compression sans perte)

IV.1.2. Détecteur POD

Le détecteur POD (C-POD ou son successeur F-POD, fabriqué par Chelonia Limited) est un instrument spécialisé pour la détection automatique des clics de Marsouins communs (*Phocoena phocoena*) et des clics de Delphinidés dans la bande de fréquence allant de 9 à 170 kHz. Il détecte également les signaux des SONARs opérants dans cette gamme de fréquence.

Cet instrument comprend un hydrophone omnidirectionnel, un système embarqué de traitement du signal et une carte mémoire insérés dans un tube étanche. Constitué d'un capteur qui enregistre les sons du milieu marin et d'un algorithme de détection interne, son fonctionnement repose sur la comparaison directe de l'énergie présente entre une bande de fréquence de référence et celle des signaux d'intérêts. Lorsqu'un bruit est en phase avec ces critères, alors l'instant auquel le signal d'intérêt recherché a eu lieu et sa durée sont enregistrés, dans un fichier, comme un évènement. Toutefois aucun fragment audio n'est disponible.

Avant la mise à l'eau, la configuration des paramètres de détection tels que la fréquence de coupure du filtre passe-haut et du nombre maximal de clics détectés par minute sont programmés dans le système POD. Ces paramètres conditionnent la qualité des détections et l'occupation de l'espace mémoire.

Les paramètres utilisés pour le site de Normandie et les différentes campagnes réalisées sont les suivants :

- ✓ Une fréquence de coupure du filtre passe-haut à 40 kHz ;
- ✓ Un maximum de 4096 clics/min.

Le système POD présente des avantages certains, tels que le coût réduit de l'instrumentation, la facilité de traitement des données (semi-automatisé) et la durée d'autonomie importante en fonctionnement continu. Toutefois, cet instrument souffre de quelques limitations :

- ✓ Le fonctionnement en continu n'est pas réel car, chaque minute, la détection peut s'arrêter au bout d'un certain nombre de secondes si le nombre maximal de détections par minute est atteint. En cas de positionnement dans un environnement générateur de clics ressemblant à ceux des cétacés, comme par exemple une activité benthique soutenue, la capacité de détection des cétacés peut être très réduite (et faussée) au profit d'autres sons jusqu'à atteindre la limite d'enregistrement ;
- ✓ Bien qu'il soit possible de déterminer les activités de chasse via un post-traitement sur la durée de l'intervalle inter-clic (ICI) de chaque train de clics détectés, les activités de vocalises (signaux transitoires) des cétacés ne sont pas détectées. En effet, leur présence ne peut pas être détectée, notamment pendant les périodes de socialisation lorsque les cétacés vocalisent mais n'émettent pas de clics ;
- ✓ L'efficacité du détecteur varie selon les études. L'étude de Reyes-Zamudio (2005), réalisée dans la Zone Spéciale de Conservation de Cardigan Bay en Ecosse, a permis de montrer que 11% des clics émis par le Grand Dauphin (*Tursiops truncatus*) ont été détectés contre 82% pour une étude de la même espèce dans l'estuaire de Shannon en Irlande (Philpott et al. 2007). Une autre étude, dont le but était de comparer (1) les détections visuelles et acoustiques des Grands Dauphins et, (2) la probabilité de détection par les systèmes C-POD et par un enregistreur acoustique embarqué sur un bateau, a démontré que les systèmes C-POD n'ont pas détecté tous les clics d'écholocation des Grands Dauphins enregistrés par bateau. De plus, les systèmes C-POD n'ont pas systématiquement détectés les Delphinidés lorsqu'ils étaient observés visuellement (Bailey et al. 2010). Enfin, une étude comparant les résultats de deux systèmes C-POD côte à côte a fait apparaître des différences de détection jusqu'à 50% (Béesau et al. 2017) ;
- ✓ Le système C-POD agit comme une boîte noire sur laquelle les opérateurs n'ont pas de prise et dont ils ne peuvent connaître la fiabilité. Le signal original attestant la présence de l'évènement ainsi que les signaux non reconnus comme d'intérêt par l'algorithme ne sont pas conservés. Bien que ce fonctionnement permette d'économiser du stockage et ainsi de déployer le système sur de plus longues périodes, une vérification ou un contrôle qualité sont quant à eux rendus impossibles. Dans un contexte similaire, la donnée brute (clip du son) n'est pas enregistrée, et l'algorithme qui détecte et classe les signaux n'a pas été publié. L'algorithme est mis à jour régulièrement, impliquant alors que différentes séances d'acquisition qui utilisent des versions différentes ne sont pas vraiment directement comparables ;
- ✓ En l'absence de détection de vocalises, les clics ne permettent pas de renseigner sur l'activité ni sur les cinématiques des cétacés ;
- ✓ Le système C-POD ne renseigne pas sur le bruit ambiant et par conséquent, ne permet pas de calibrer la modélisation acoustique ni d'informer sur les activités anthropiques (à l'exception de certains sonars).

Ces informations concernant les limitations rencontrées avec le système POD appuient la décision d'un déploiement simultané de ce système à proximité immédiate d'un enregistreur acoustique sur certaines stations. En effet, ces déploiements simultanés permettront de qualifier les résultats du système POD et donc de caractériser sa fiabilité dans le contexte du projet.



Figure 10 : Illustration d'un système POD.

IV.2. Données in-situ collectées

Dans le cadre de cette étude, les paragraphes suivants font état des données collectées par les différents systèmes acoustiques déployés lors des différentes campagnes de mesure.

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 et POD) sur site et donc à une sortie bateau ;
- ✓ Une CAMPAGNE qui correspond à une période de collecte des données servant à l'analyse.

Le Tableau 6 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 6 : Synthèse des informations sur les LEG réalisés durant cette étude.

N° LEG	N° Campagne concernée	Date	Activité(s)	Station(s) concernée(s)
01	01	02.03.2022	Déploiement	R1 à R7
02	01et 02	30.05.2022	Relevage / déploiement	R1, R2, R3, R4, R6 et R7
03	02 et 03	03.08.2022	Relevage / déploiement	R1, R2, R3, R4, R6 et R7
04	03	02.09.2022	Déploiement	R5
05	03	03.10.2022	Relevage	R2, R5 et R7
06	03	18.10.2022	Relevage/ déploiement	R3, R6 et R4
07	03	29.11.2022	Relevage	R3, R6, R4 et R7
08	04	05.12.2022	Déploiement	R1 à R7
09	04 et 05	08.02.2023	Relevage / déploiement	R1 à R7
10	05 et 06	25.05.2023	Relevage / déploiement	R1 à R7
11	05	17.07.2023	Relevage	R1, R3, R4 et R5



IV.2.1. Campagne du 02/03 au 31/05/2022

Durant la campagne allant du 02 mars au 31 mai 2022, cinq enregistreurs acoustiques (ENR) et quatre systèmes autonomes C-POD ont été déployés. Le Tableau 7 synthétise les données collectées par ces systèmes acoustiques pour chacune des zones d'étude durant cette campagne.

Le système autonome C-POD fonctionne en continu sur toute la période de mesure tandis que l'enregistreur acoustique collecte 3 minutes de données toutes les 10 minutes, soit des acquisitions périodiques qui permettent de couvrir au total 30% du temps. A titre d'exemple, l'enregistreur acoustique situé au niveau de la station R2 (zone proche) a permis de couvrir 92 jours de mesure, soit 27 jours avec une acquisition périodique. Les acquisitions périodiques, ou duty cycle 30%, ont permis d'acquérir un total de 27 jours de données (Tableau 7) comme attendu.

A noter, durant le LEG 02, les systèmes acoustiques déployés aux stations R1 et R5 (zone proche) n'ont pas pu être récupérés. En effet, l'interrogation du largueur acoustique pour chacune de ces stations est restée sans réponse indiquant que la ligne de mouillage n'est plus présente dans la zone. Conformément au protocole, une ligne instrumentée de rechange a été déployée au niveau de la station R1. Pour plus d'informations, il est recommandé de consulter le compte-rendu de mission QO.20210225.10.CRM.002.01A.MTES.PEM Normandie.LEG02.pdf concernant le LEG 02.

Tableau 7 : Synthèse des données acoustiques collectées durant la campagne du 03/03 au 31/05/2022.

Zone	Nom enregistreur	Date de début	Date de fin	Durée campagne (j)	Durée enregistrement (j)	Nb de fichiers	Quantité donnés (Go) ¹	Latitude	Longitude	Immersion système/fond (m)	Hauteur d' eau CM (m)
R1	ENR-065	02/03/2022	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	49°52.506'N	00°35.010' W	3	47
	C-POD 3374	02/03/2022	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	49°52.506'N	00°35.010'W	4	47
R2	ENR-066	01/03/2022	31/05/2022	92	27	13249	543	49°48.796'N	00°42.588'W	3	41
R3	ENR-067	03/03/2022	30/05/2022	90	27	12989	416	49°40.999'N	00°46.488'W	4	51
	C-POD 3376	03/03/2022	30/05/2022	84	84	N/A	N/A	49°40.999'N	00°46.488'W	3	51
R4	ENR-068	03/03/2022	30/05/2022	90	27	12996	400	49°35.900'N	01°08.501' W	0,5	30
R5	C-POD 3377	03/03/2022	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	49°52.506'N	00°48.333' W	3	47
R6	C-POD 3378	02/03/2022	30/05/2022	84	84	NA	NA	49°40.956'N	00°30.183' W	3	38
R7	ENR-069	02/03/2022	30/05/2022	90	27	12968	402	49°59.296'N	00° 12.624' W	3	48

IV.2.2. Campagne du 30/05 au 03/08/2022

Durant la période allant du 30 Mai au 03 Août 2022, cinq enregistreurs et quatre systèmes autonomes C-POD ont été déployés. Le Tableau 8 synthétise les données collectées par ces systèmes acoustiques pour chacune des zones d'étude durant cette campagne.

Pour rappel, le système autonome C-POD fonctionne en continu sur toute la période de mesure tandis que l'enregistreur acoustique collecte 3 minutes de données toutes les 10 minutes, soit des acquisitions périodiques qui permettent de couvrir au total 30% du temps.

Lors du LEG 03, les systèmes acoustiques situés au niveau des stations R1 et R2 n'ont pas pu être récupérés :

- ✓ Suite à un découpage de la ligne de flottabilité (et du largueur communiquant) par un navire de pêche, la localisation des systèmes acoustiques de la station R1, posés sur le fond, s'est révélée impossible ;
- ✓ La ligne instrumentée de la station R2 a été partiellement récupérée (flotteur et balise uniquement) par un bateau de pêche, et l'interrogation du largueur acoustique est ensuite restée sans réponse.

Le matériel de remplacement a été privilégié sur la station R1. De ce fait, la station R5 n'était pas instrumentée en raison de l'absence de matériel de remplacement tel que défini dans le protocole. Pour ce point de mesure,

¹ Les fichiers sont au format audio de type flac.

un déploiement spécifique, correspondant au LEG 04 (cf. Tableau 6), a été réalisé ultérieurement à la date du 02 septembre 2022. Pour plus d'informations, il est recommandé de consulter les comptes-rendus de mission suivants :

- ✓ QO.20210225.10.CRM.003.01A.MTES.PEMNormandie.LEG03.pdf ;
- ✓ QO.20210225.10.CRM.004.01A.MTES.PEM Normandie.LEG04.pdf.

A noter, suite à une intervention extérieure à Quiet-Oceans, le système C-POD situé au niveau de la station R1 a été récupéré au mois de juillet 2023. Le tableau de synthèse des données acoustiques a été mis à jour en ce sens. Le système C-POD a permis de collecter 214 jours de données.

Tableau 8 : Synthèse des données acoustiques collectées durant la campagne du 30/05 au 03/08/2022.

Zone	Nom enregistreur	Date de début	Date de fin	Durée campagne (j)	Durée enregistrement (j)	Nb de fichiers	Quantité de données (Go)	Latitude	Longitude	Immersion système/fond (m)	Hauteur d'eau CM (m)
R1	ENR-067	31/05/2022	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	49° 52.503' N	00° 35.006' W	7	47
	C-POD 3376	31/05/2022	31/12/2022	214	214	N/A	N/A	49° 52.503' N	00° 35.006' W	8	47
R2	ENR-068	31/05/2022	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	49° 48.778' N	00° 42.589' W	7	45
R3	ENR-077	30/05/2022	03/08/2022	65	20	9397	295	49° 41.004' N	00° 46.520' W	7	46
	C-POD 3379	30/05/2022	03/08/2022	61	61	N/A	N/A	49° 41.004' N	00° 46.520' W	8	46
R4	ENR-069	31/05/2022	03/08/2022	65	20	9345	293	49° 35.891' N	01° 08.507' W	0,5	30
R5	Absence de déploiement										
R6	C-POD 3380	30/05/2022	03/08/2022	61	61	N/A	N/A	49° 40.994' N	00° 30.008' W	7	38
R7	ENR-080	30/05/2022	03/08/2022	65	19,5	9368	310	49° 59.331' N	00° 12.661' W	7	48

IV.2.3. Campagne du 03/08 au 29/11/2022

Durant la période allant du 03 Août au 29 Novembre 2022, quatre enregistreurs et quatre systèmes autonomes C-POD ont été déployés. Le Tableau 9 synthétise les données collectées par ces systèmes acoustiques pour chacune des zones d'étude durant cette campagne.

L'enregistreur acoustique et le C-POD respectivement déployés au niveau des stations R3 et R6 n'ont pas pu être récupérés. Pour plus d'informations, il est recommandé de consulter les comptes-rendus de mission suivants :

- ✓ QO.2021022510.DPR.005.01A.PEMN.LEG05.pdf ;
- ✓ QO.2021022510.DPR.006.01A.PEMN.LEG06.pdf ;
- ✓ QO.2021022510.DPR.007.01A.PEMN.LEG07_29112022.pdf.

Tableau 9 : Synthèse des données acoustiques collectées durant la campagne du 03/08 au 29/11/2022.

Zone	Nom enregistreur	Date de début	Date de fin	Durée campagne (i)	Durée enregistrement (j)	Nb de fichiers	Quantité de données (Go)	Latitude	Longitude	Immersion système/fond (m)	Hauteur d'eau CM (m)
R1	Absence de déploiement										
R2	ENR-080	03/08/2022	04/10/2022	63	18.9	9 215	320	49° 48.872' N	00° 42.725' W	7	42
	CPOD 3378	03/08/2022	04/10/2022	59	59	N/A	N/A	49° 48.872' N	00° 42.725' W	8	42
R3	ENR-077	03/08/2022	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	49° 40.990' N	00° 46.478' W	7	50.8
	CPOD 3379	03/08/2022	26/12/2022	145	145	N/A	N/A	49° 40.990' N	00° 46.478' W	8	50.8
R4	ENR-069	03/08/2022	29/11/2022	118	35.4	17 279	542	49° 35.906' N	01° 08.498' W	0.5	29.6
R5	CPOD 3375	02/09/2022	04/10/2022	34	34	N/A	N/A	49°52.568' N	00°48.490'W	8	49.8
R6	CPOD 3380	03/08/2022	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	49° 41.081' N	00° 30.040' W	8	37.6
R7	ENR-066	03/08/2022	01/11/2022	90	27	13 062	445	49° 59.295' N	00° 12.706' W	7	46.4

IV.2.4. Campagne du 05/12/2022 au 09/02/2023

Durant la période allant du 05 Décembre 2022 au 09 Février 2023, cinq enregistreurs et quatre systèmes autonomes POD (C-POD et F-POD) ont été déployés. Le Tableau 10 synthétise les données collectées par ces systèmes acoustiques pour chacune des zones d'étude durant cette campagne.

Suite à différents aléas, les enregistreurs acoustiques déployés au niveau des stations R1 et R7 n'ont pas pu être récupérés. Les systèmes C-POD et F-POD respectivement déployés au niveau des stations R1 et R6 ont bien été récupérés mais ont subi des dommages (probablement suite à une intervention extérieure) qui ont causé un arrêt anticipé des enregistrements. Pour plus d'informations, il est recommandé de consulter le compte-rendu de mission QO.20210225.10.CRM.009.01A.MTES.PEM Normandie.LEG09.pdf.

Tableau 10 : Synthèse des données acoustiques collectées durant la campagne du 05/12/2022 au 09/02/2023.

Zone	Nom enregistreur	Date de début	Date de fin	Durée campagne (j)	Durée enregistrement (j)	Nb de fichiers	Quantité de données (Go)	Latitude	Longitude	Immersion système/fond (m)	Hauteur d'eau CM (m)
R1	ENR-080	05/12/2022	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	49°52.509'N	00°35.028'W	7	48
	CPOD 3375	05/12/2022	21/12/2022	16	16	N/A	N/A	49°52.509' N	00°35.028'W	8	48
R2	ENR-086	05/12/2022	08/02/2023	66	19.8	9648	314	49°48.804' N	00°42.589'W	7	41
R3	ENR-087	05/12/2022	08/02/2023	66	19.8	9648	313	49°40.994' N	00°46.468'W	7	45
	CPOD 3378	05/12/2022	08/02/2023	66	66	N/A	N/A	49°40.994' N	00°46.468'W	8	45
R4	ENR-88	05/12/2022	09/02/2023	67	20.1	9648	311	49°35.902' N	01°08.500W	7	26
R5	FPOD 7116	05/12/2022	08/02/2023	66	66	N/A	N/A	49°52.517' N	00°48.314'W	7	47
R6	FPOD 7117	05/12/2022	01/01/2023	27	27	N/A	N/A	49°40.950' N	00°30.231'W	7	37
R7	ENR-089	05/12/2022	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	49°59.286' N	00°12.600'W	7	48

IV.2.5. Campagne du 09/02 au 24/05/2023

Durant la période allant du 08 février au 24 mai 2023, quatre enregistreurs et quatre systèmes autonomes POD (C-POD et F-POD) ont été déployés. Le Tableau 11 synthétise les données collectées par ces systèmes acoustiques pour chacune des zones d'études durant cette campagne. Pour plus d'informations, il est recommandé de consulter la présentation QO.20210225.10.PRES.011.02A.MTES.PEM Normandie.Bilan_JUIN_2023_BilanLEG10.pdf.

Tableau 11: Synthèse des données acoustiques collectées durant la campagne du 08/02/2023 au 24/05/2023.

Zone	Nom enregistreur	Date de début	Date de fin	Durée campagne (j)	Durée enregistrement (j)	Nb de fichiers	Quantité de données (Go)	Latitude	Longitude	Immersion système/fond (m)	Hauteur d'eau CM (m)
R1	Absence de déploiement										
R2	ENR-072	08/02/2023	25/05/2023	106	34	16289	524	49°48.7922'N	00°42.5611'W	7	25
R3	ENR-066	08/02/2023	28/04/2023	80	24	11539	665	49°39.1460'N	00°49.2120'W	7	41
	FPOD 7117	08/02/2023	19/06/2023	132	76	N/A	N/A	49°39.1460'N	00°49.2120'W	1.5	41
R4	ENR-070	08/02/2023	19/07/2023	162	49	23358	709	49°35.9030'N	01°08.4890'W	7	30
R5	CPOD 3378	08/02/2023	07/05/2023	88	88	N/A	N/A	49°52.4970'N	00°48.2950'W	7	47
R6	FPOD 7116	08/02/2023	24/05/2023	105	98	N/A	N/A	49°40.9640'N	00°30.2010'W	7	37
R7	ENR-073	08/02/2023	17/03/2023	37	13	6354	192	49°59.3130'N	00°12.6140'W	7	45.3



*Suivi par acoustique passive du bruit ambiant et de la
fréquentation des mammifères marins dans le cadre du parc
éolien en mer de Normandie*

Etat de référence

Référence : QO.20210225.10.RAP.001.05A

IV.2.6. Synthèse des données collectées

Une synthèse des mesures acoustiques acquises pour chaque station (R1 à R7) et chaque système acoustique est fournie dans le Tableau 12.

Tableau 12 : Synthèse des données acoustiques collectées ou en cours d'acquisition

		Mois		Mars		Avril		Mai		Juin		Juillet		Août		Septembre		Octobre		
		LEG	1						2				3		4			5	6	
Station	Campagne		Campagne 01						Campagne 02						Campagne 03					
	Type																			
R1	Enregistreur		[Red]						[Red]						[Red]					
	CPOD		[Red]						[Red]						[Red]					
R2	Enregistreur		[Green]						[Red]						[Green]					
	CPOD (misC3)		[Hatched]						[Hatched]						[Green]					
R3	Enregistreur		[Green]						[Green]						[Red]					
	CPOD		[Green]						[Green]						[Green]					
R4	Enregistreur		[Green]						[Green]						[Green]					
R5	CPOD		[Red]						[Red]						[Red]					
R6	CPOD		[Green]						[Green]						[Red]					
R7	Enregistreur		[Green]						[Green]						[Green]					

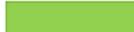
		Mois		Novembre		Décembre		Janvier		Février		Mars		Avril		Mai		Juin		Juillet		Aout	
		LEG	7	8					9						10					11			
Station	Campagne		Campagne 04						Campagne 05														
	Type																						
R1	Enregistreur		[Red]						[Red]						[Green]								
	CPOD		[Green]						[Red]						[Green]								
R2	Enregistreur		[Hatched]						[Green]						[Green]								
	CPOD (misC3)		[Hatched]						[Hatched]						[Green]								
R3	Enregistreur		[Red]						[Green]						[Red]								
	CPOD		[Green]						[Green]						[Green]								
R4	Enregistreur		[Green]						[Green]						[Green]								
R5	CPOD		[Hatched]						[Green]						[Green]								
R6	CPOD		[Red]						[Green]						[Green]								
R7	Enregistreur		[Red]						[Red]						[Green]								



*Suivi par acoustique passive du bruit ambiant et de la
fréquentation des mammifères marins dans le cadre du parc
éolien en mer de Normandie*

Etat de référence

Référence : QO.20210225.10.RAP.001.05A

	Données présentes et valides
	Matériel déployé / en cours d'acquisition
	Données absentes: pas de déploiement car prévu dans le protocole
	Données non récupérées mais matériel présent: problème technique
	Données non récupérées mais matériel présent: causes extérieures (pêche, chalut)
	Données présentes mais invalides
	Données absentes et matériel absent: causes extérieures (pêche, chalut)
	Données absentes et matériel absent: matériel enlevé sur demande du client
	Données absentes et matériel absent: pas de déploiement car indisponibilité matériel (politique de rechange)
	Données absentes car arrêt de l'enregistreur (limite du matériel ou problème technique)

Chapitre V. Analyse des niveaux sonores mesurés

Une analyse des niveaux sonores de l'état de référence est établie à partir des données collectées par les enregistreurs acoustiques de chaque station et pour chaque saison (hiver, printemps, été et automne). En l'absence de courbe de calibration fournie par le constructeur, une inter-calibration a été effectuée avec un système acoustique passive de référence (cf. IX.3.). Le résultat montre un écart très faible pour les fréquences supérieures à 100 Hz.

Pour rappel, l'enregistreur acoustique déployé au niveau de la station R1 n'a pas pu être récupéré pour l'ensemble des saisons. Cette partie fait donc état des analyses réalisées pour les enregistreurs acoustiques déployés au niveau des stations R2, R3, R4 et R7.

V.1. Interaction du courant de marnage avec les systèmes acoustiques sub-surface

Classiquement, les contributeurs prédominants dans l'évolution du bruit en zone côtière sont :

- ✓ Les activités anthropiques, et plus particulièrement le trafic maritime (pêche, plaisance, commerce...);
- ✓ Les sources de bruit météo-océaniques, à savoir majoritairement le vent;
- ✓ L'activité des organismes benthiques évoluant sur le fond marin, selon la nature du substrat sur zone.

Après une analyse des niveaux sonores, il apparaît que les niveaux dans la bande filtrée [50Hz-40kHz] des systèmes acoustiques déployés dans cette zone sont significativement corrélés aux effets de marée (marnage, coefficient de marée, courants induits, déplacement sédimentaire). En effet, les niveaux dans la bande filtrée [50Hz-40kHz] sont impactés par des bruits très probablement engendrés par les courants sur zone. Les fréquences inférieures à 50 Hz sont notablement parasitées par ce phénomène, comme illustré dans la Figure 11. Ces bruits n'ont pas d'origine physique et ne sont pas représentatifs du paysage acoustique. Ils peuvent de surcroît masquer les potentielles émergences anthropiques pour les fréquences inférieures à 50 Hz.

Dans ce contexte, et afin de préserver la qualité et la représentativité des données mesurées, il a été décidé :

- ✓ De réduire la bande de fréquence étudiée entre 50 Hz et 40 kHz;
- ✓ D'appliquer un filtrage spécifique aux enregistreurs acoustiques déployés à une profondeur intermédiaire de la colonne d'eau via un flotteur subsurface (stations R2, R3 et R7).
- ✓ L'enregistreur de la station R4 étant posé sur le fond a été moins soumis aux courants sur zone, et n'a pas donc pas subi de filtrage spécifique.

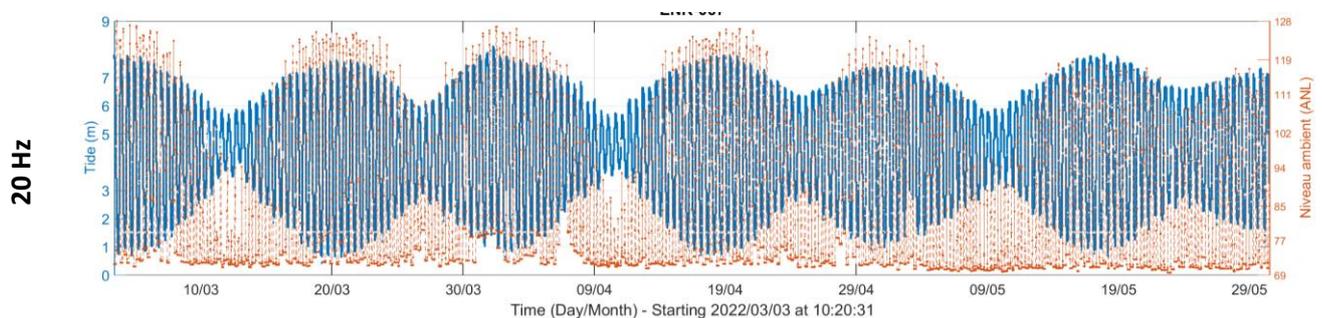


Figure 11 : Illustration de l'artéfact causé par le bruit de marnage, exemple de la station R3 pour la période de mars à mai 2022. Evolution du bruit permanent (orange) avec le marnage (bleu) pour la fréquence 20 Hz.

V.2. Année 2022

V.2.1. Période Hiver (du 02/03/2022 au 20/03/2022)

V.2.1.a. Analyse du bruit ambiant dans la bande filtrée [50Hz-40kHz]

L'évolution des niveaux sonores est établie dans la bande de fréquence entre 50 Hz et 40kHz, en fonction du temps, lors de l'hiver 2022 pour chacun des enregistreurs acoustiques déployés au niveau des stations R2, R3, R4 et R7. 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, l'évolution du niveau de bruit permanent ou « pied de bruit » est établie afin d'établir une corrélation au bruit environnemental. La Figure 12 montre l'évolution des niveaux sonores entre 50Hz et 40kHz à la station R4. La courbe rouge superposée montre l'évolution du niveau de bruit permanent ou « pied de bruit ». Les courbes des autres stations sont disponibles en annexe de ce rapport. Concernant les stations R1, R2, R3 et R7, le bruit permanent fluctue périodiquement entre 110 et 120dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ de manière corrélée avec les effets météorologiques, à savoir principalement la vitesse du vent pour les fréquences allant jusqu'à 8 kHz, comme illustré dans la Figure 13. Le bruit permanent au niveau de la station R4 fluctue entre 100 et 105dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ probablement en raison du positionnement de l'enregistreur acoustique dans une cage de fond.

Ce bruit permanent est ponctuellement dominé par des émergences anthropiques courtes (d'une durée de 5 à 15min) et intenses, correspondant aux passages proches de navires. Ces derniers font émerger les niveaux sonores de 15 à 30dB, induisant des niveaux absolus allant jusqu'à un maximum de 141.3dB ref $1\mu\text{Pa}^2$. Après détection des passages de ces événements intenses acoustiquement, soit une élévation d'au moins 15 dB du niveau sonore permanent, on relève en moyenne 6 événements par jour au niveau de la station R4. La Figure 14 montre la répartition horaire des émergences anthropiques détectées au niveau de la station R4, qui semble indépendante de l'heure. Le comptage des événements acoustiquement significatifs pour les autres stations est impossible en raison du traitement appliqué aux données.

La Figure 15 montre le spectrogramme d'un instant considéré calme (absence de perturbation anthropique) au niveau de la zone R7, le 6 Mars 2022 à 21h UTC. La partie basse illustre l'évolution du niveau sonore dans la bande filtrée [50Hz-40kHz] en fonction du temps. Durant cette portion de signal, le niveau sonore est faible et relativement stable avec une variation de $\pm 1\text{dB}$ autour de 110 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$. La partie supérieure montre une prédominance des fréquences comprises entre 0 et 2 kHz, qui correspond majoritairement à la contribution acoustique du vent et de la houle. L'activité des organismes benthiques est visible et consiste en des signaux impulsionsnels (lignes verticales) visibles entre 5 et 10 kHz.

En contraste, la Figure 16 correspond au spectrogramme d'un passage de navire très proche du système acoustique déployé au niveau de la station R7, le 11 Mars 2022 :

- ✓ Lors de l'approche, le niveau sonore augmente au fur et à mesure que la distance navire/hydrophone décroît, avec des émergences sonores en frange ;
- ✓ Au minimum de distance (CPA), une augmentation du niveau sonore est observée jusqu'à 145 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$, sur la bande de fréquence de 50 Hz à 10 kHz avec un maximum d'énergie aux fréquences inférieures à 1 kHz.

Les Tableau 13, Tableau 14, Tableau 15 et Tableau 16 donnent la répartition statistique des niveaux de bruit dans la bande filtrée [50Hz-40kHz] durant la saison hivernale 2022 pour chaque station d'étude :

- ✓ Les niveaux médians (50% du temps) sur la période sont de 112.9 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R2), 110.5 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3), 104.5 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R4) et 111.5 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R7). Le niveau sonore médian de la station R4 est moins élevé (-6 à -8.5dB) en comparaison des autres stations. Ce phénomène est dû à la plus faible interaction de la structure porteuse du capteur (cage) avec la colonne d'eau, ainsi qu'à la plus faible navigation commerciale à proximité du capteur ;

- ✓ Les niveaux maximum (percentile 1%) sur la période sont de 125.0 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R2), 128.9 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3), 116.9 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R4) et 117.9 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R7).

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

- ✓ La station R2 est située en périphérie d'une route commerciale secondaire et perçoit des passages lointains de navires de pêche ;
- ✓ La station R3 se situe à proximité d'un couloir de navigation utilisé par les cargos ;
- ✓ La station R4 apparaît peu fréquentée ;
- ✓ La station R7 est isolée de la pêche (passages proches) mais des navires de type cargo passent à proximité non immédiate.

Ces informations sont toutefois partielles car cette analyse est basée uniquement sur l'AIS et ne prend pas en compte les données VMS (activité de pêche).

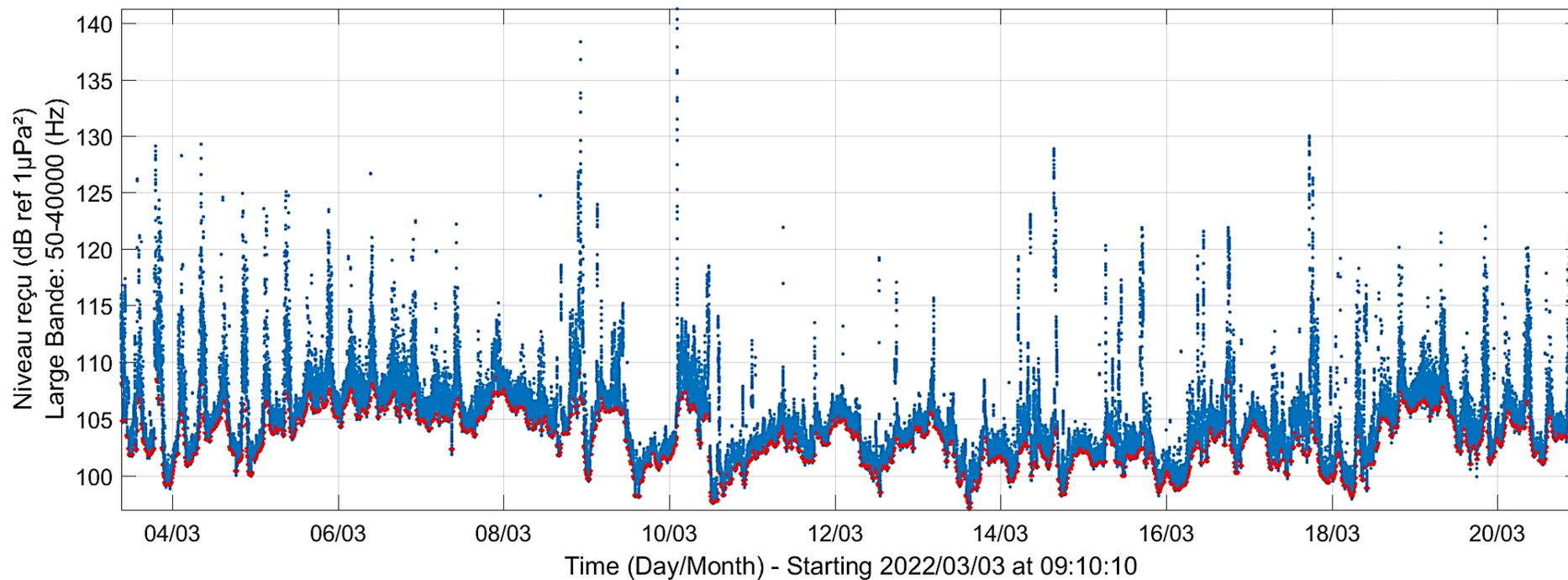


Figure 12 : Evolution du niveau dans la bande filtrée [50Hz-40kHz] au niveau de la station R4 en fonction du temps, lors de l'hiver 2022. Les courbes pour les autres stations sont disponibles en annexe.

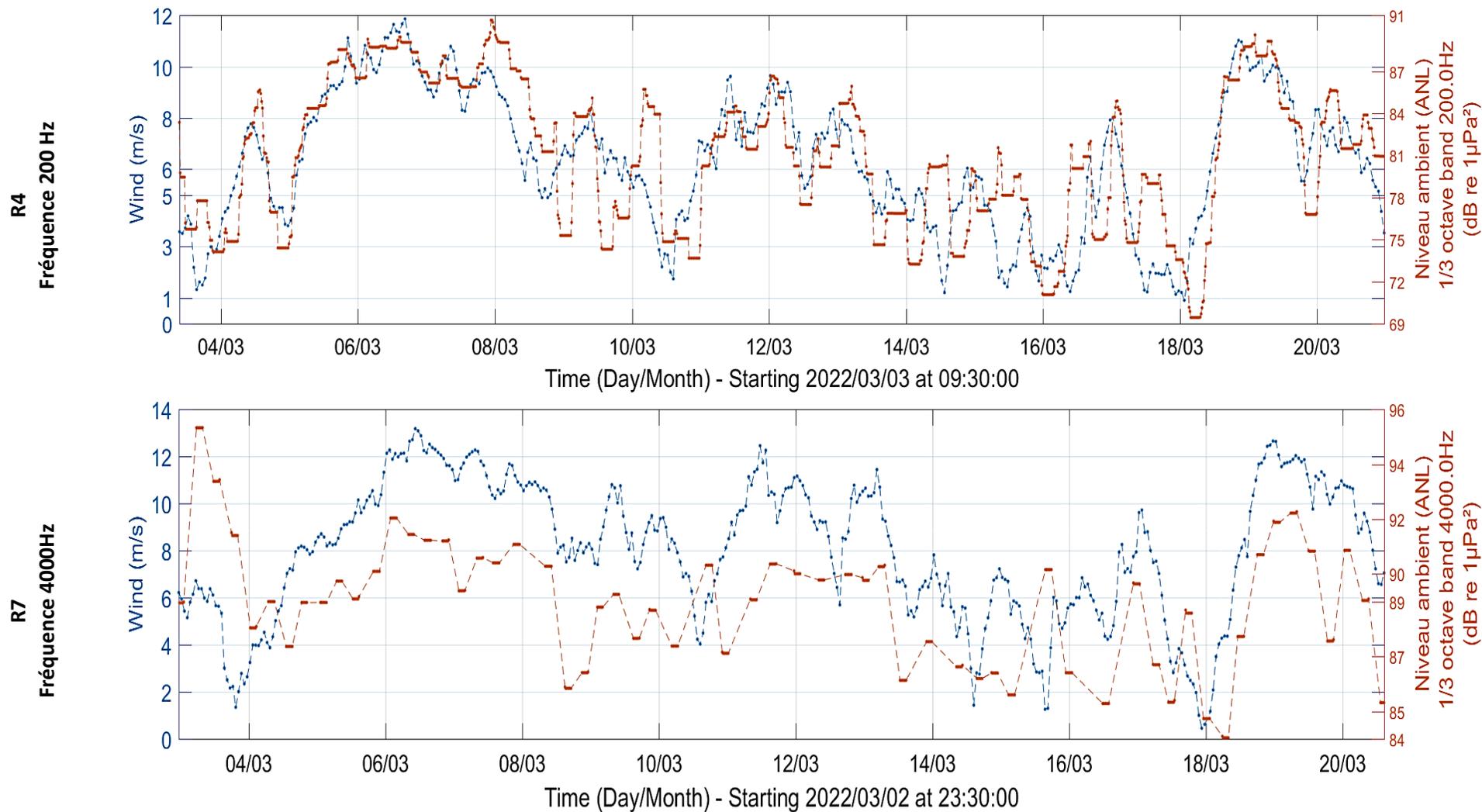


Figure 13 : Corrélation du bruit permanent (orange) avec le vent (bleu) au niveau des stations R4 et R7 lors de l'hiver 2022.

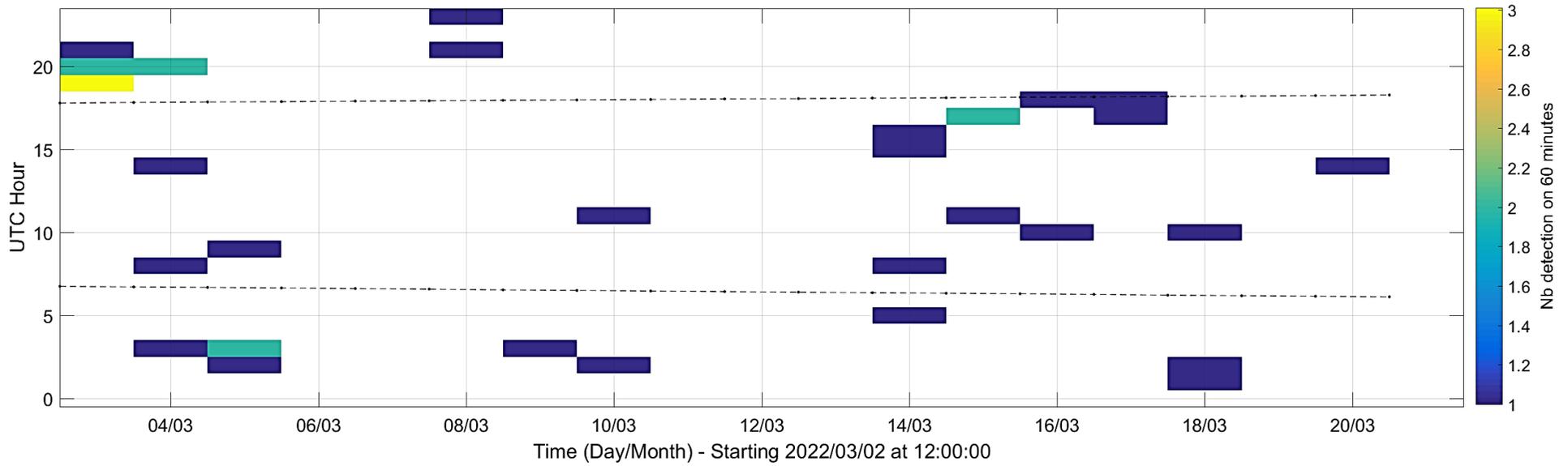


Figure 14 : Répartition horaire des émergences anthropiques détectées lors de l'hiver 2022, au niveau de la station R4.

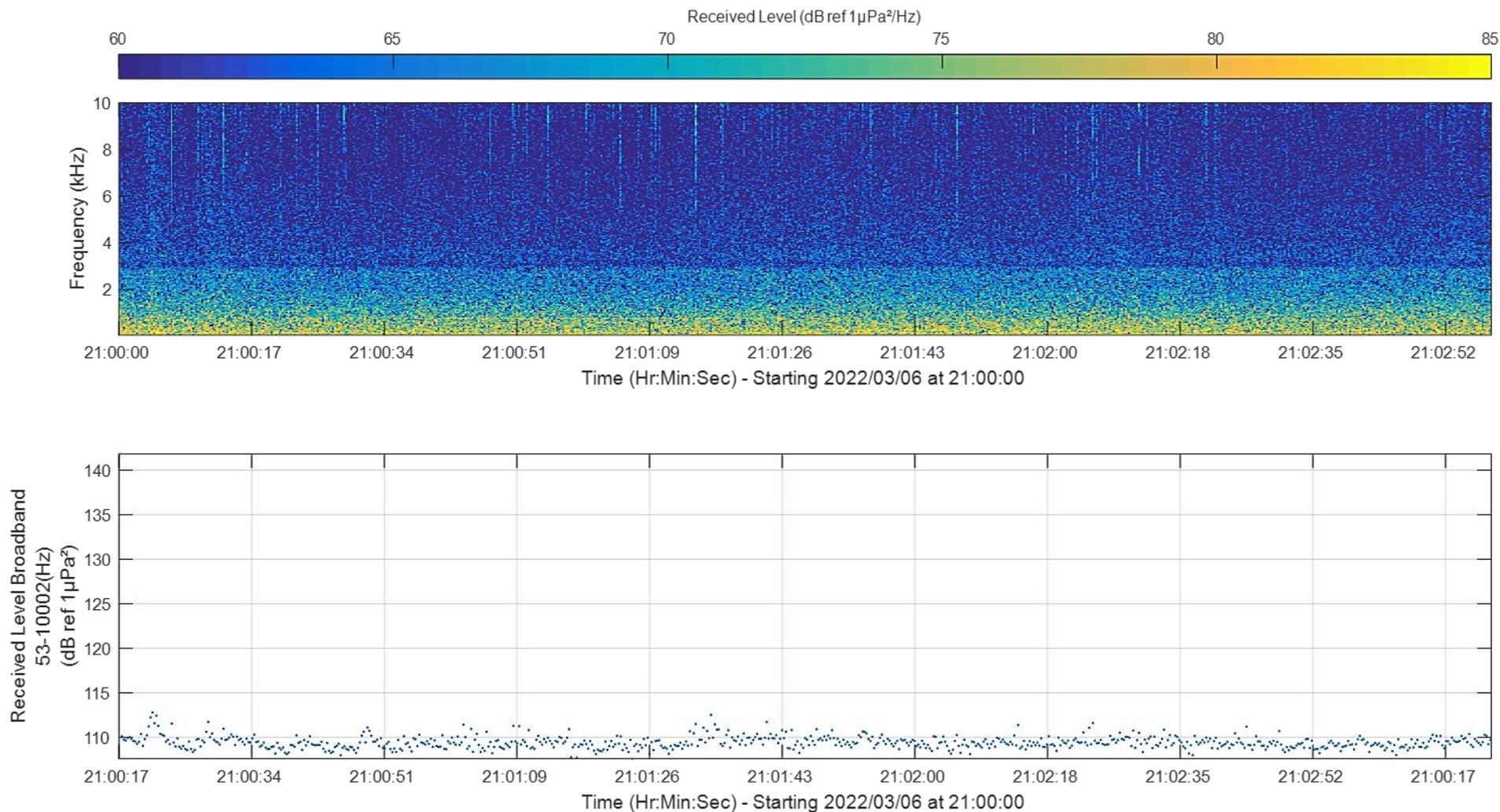


Figure 15 : En haut, spectrogramme illustratif d'un instant à faible perturbation anthropique au niveau de la station R7, dans la journée du 06 Mars 2022. En bas, évolution du niveau sonore (50 Hz - 10 kHz, exprimé en dB ref 1 μPa^2) en fonction du temps.

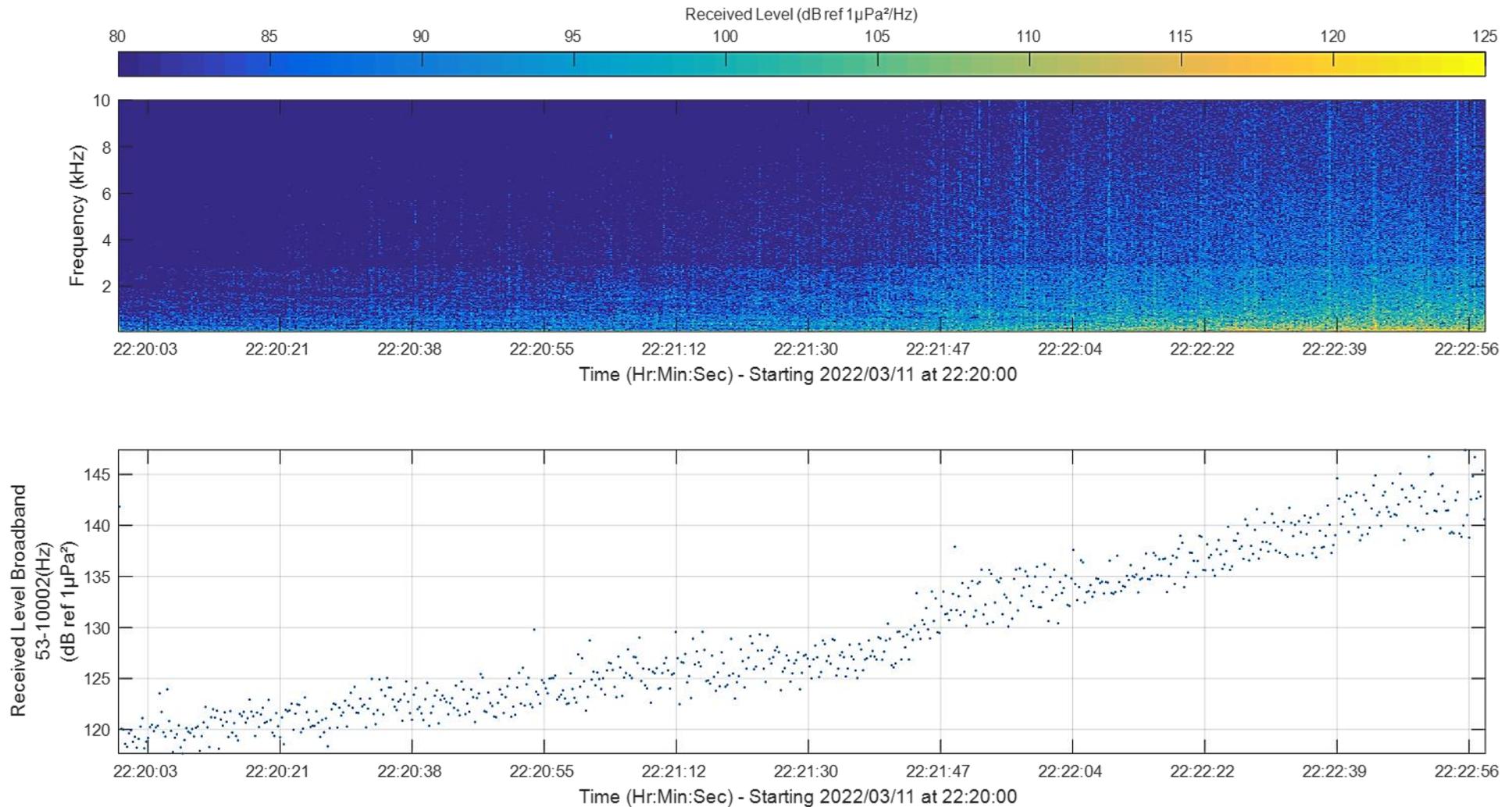


Figure 16 : En haut, spectrogramme illustratif d'un passage de navire au niveau de la station R7, dans la soirée du 11 Mars 2022. En bas, évolution du niveau sonore (50 Hz – 10 kHz, exprimé en dB ref 1 μ Pa²) en fonction du temps.

Tableau 13 : Statistiques des niveaux sonores (50 Hz - 40 kHz) à la station R2 (exprimés en dB ref 1 μ Pa²) durant la saison hiver 2022.

	Percentile (%)	Niveau minimum et très courant			Niveau Médian			Niveau maximum et très rare		
		100	99	90	75	50	25	10	1	0
R2	Toute la période	109.9	110.5	111.2	111.8	112.9	114.9	117	125	127.5
	Jour	109.9	110.3	110.9	111.4	112.6	114.2	116.8	124.1	125.8
	Nuit	110.5	110.8	111.6	112.1	113.3	115.6	118.1	126.4	127.5
	Ecart Jour/Nuit	-0.5	-0.5	-0.7	-0.6	-0.6	-1.4	-1.3	-2.3	-1.7

Tableau 14 : Statistiques des niveaux sonores (50 Hz - 40 kHz) à la station R3 (exprimés en dB ref 1 μ Pa²) durant la saison hiver 2022.

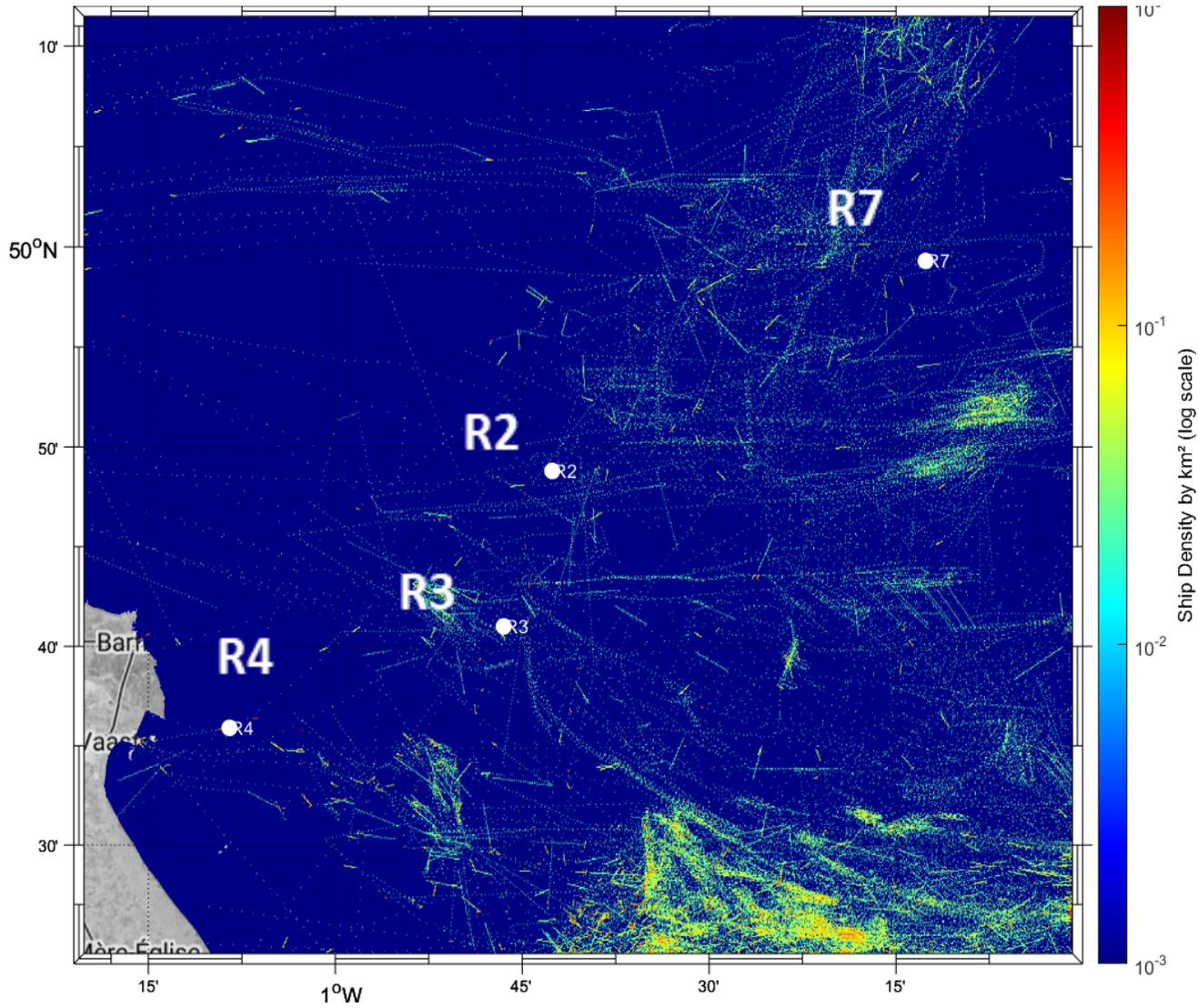
	Percentile (%)	Niveau minimum et très courant			Niveau Médian			Niveau maximum et très rare		
		100	99	90	75	50	25	10	1	0
R3	Toute la période	106.1	106.5	107.9	109.2	110.5	113.1	118.2	128.9	134.3
	Jour	106.1	106.3	107.3	108.6	110.1	112.3	118.5	126.8	129.9
	Nuit	107.7	108	108.7	109.5	111.3	113.4	118	131.6	133.3
	Ecart Jour/Nuit	-1.6	-1.7	-1.4	-0.9	-1.2	-1	0.6	-4.8	-3.3

Tableau 15 : Statistiques des niveaux sonores (50 Hz - 40 kHz) à la station R4 (exprimés en dB ref 1 μ Pa²) durant la saison hiver 2022.

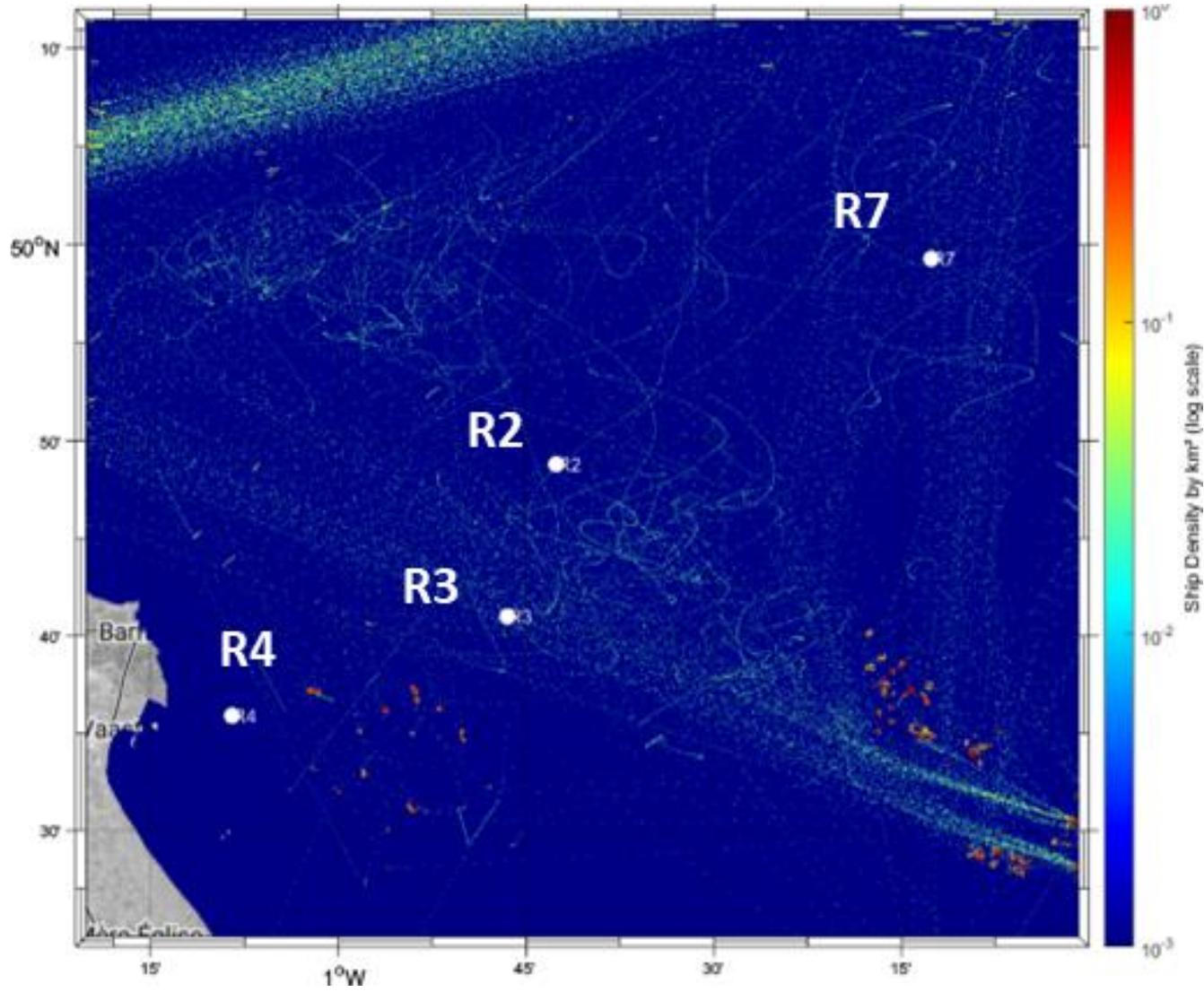
	Percentile (%)	Niveau minimum et très courant			Niveau Médian			Niveau maximum et très rare		
		100	99	90	75	50	25	10	1	0
R4	Toute la période	97.0	99.0	101.0	102.5	104.5	106.7	108.8	116.9	141.3
	Jour	97.0	98.5	101.2	102.7	104.6	106.5	108.8	116.8	130.0
	Nuit	98.2	99.3	100.8	102.2	104.4	106.9	108.9	116.8	141.3
	Ecart Jour/Nuit	-1.2	-0.9	0.4	0.5	0.2	-0.5	-0.2	0.0	-11.3

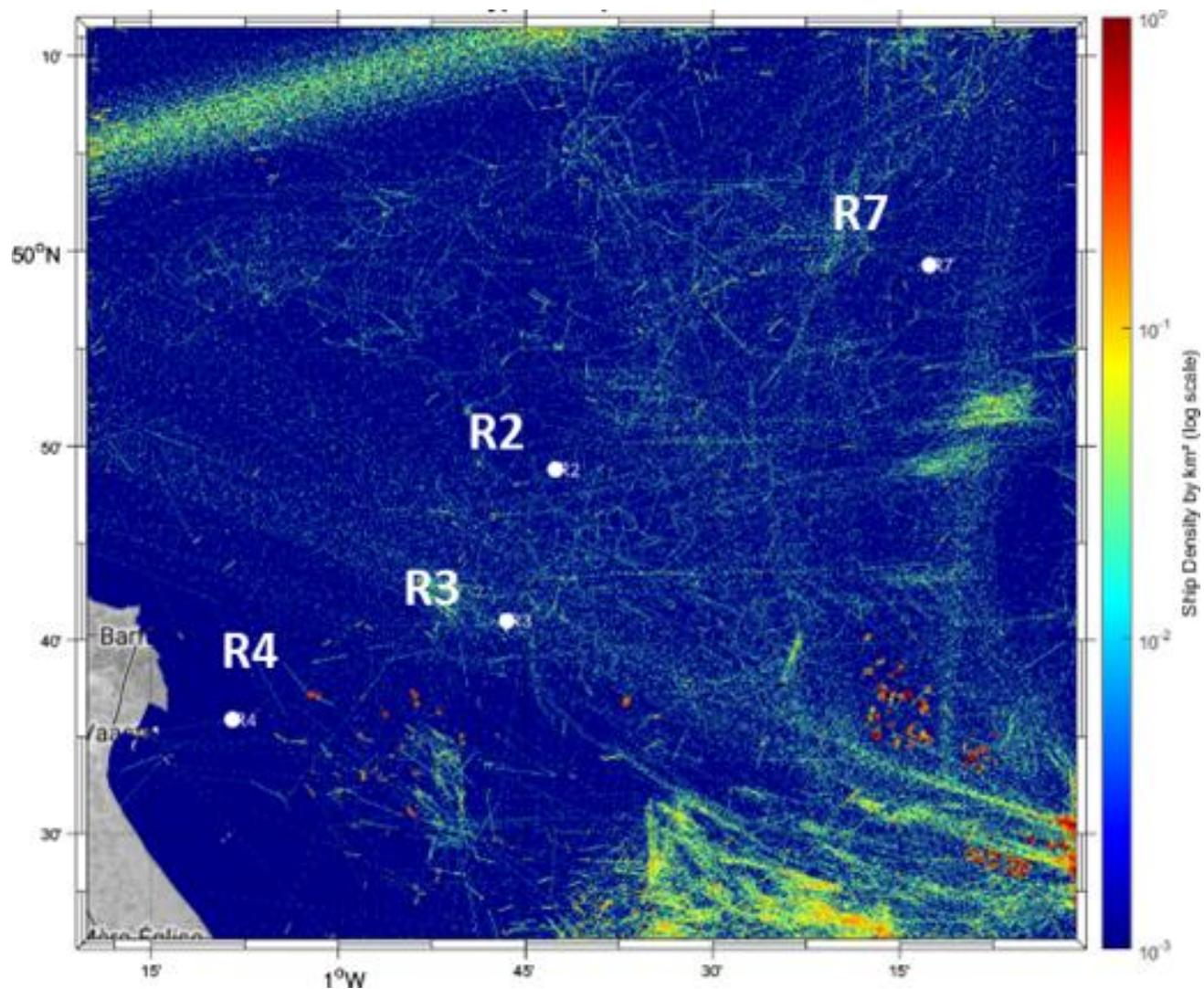
Tableau 16 : Statistiques des niveaux sonores (50 Hz - 40 kHz) à la station R7 (exprimés en dB ref 1 μ Pa²) durant la saison hiver 2022.

	Percentile (%)	Niveau minimum et très courant			Niveau Médian			Niveau maximum et très rare		
		100	99	90	75	50	25	10	1	0
R7	Toute la période	108.3	108.7	109.8	110.7	111.5	113.3	115.1	117.9	121.2
	Jour	108.4	108.7	109.9	110.9	111.8	113.4	115	117.5	118.9
	Nuit	108.3	108.6	109.5	110.5	111.2	113	114.8	119.1	121.2
	Ecart Jour/Nuit	0.1	0.1	0.3	0.4	0.6	0.5	0.2	-1.6	-2.3



Navires de pêches (basé sur l'AIS)





Tous les navires

Figure 17 : Densité de navires dans le périmètre d'étude lors de l'hiver 2022 (du 01/03/2022 au 21/03/2022).

V.2.1.b. Analyse du bruit ambiant par bandes de fréquences

Les Tableau 17 et Tableau 18 constituent le descripteur 11 de la DCSMM et donnent la répartition statistique des niveaux sonore (dB ref $1\mu\text{Pa}^2$, tiers d'octave) relevés aux fréquences 63 et 125 Hz, pour chaque station.

Concernant la fréquence 63 Hz :

- ✓ Les niveaux médians (50% du temps) sur la période sont de 97.6 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R2), 90.8 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3), 76.0 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R4) et 94.6 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R7). La station R2 apparaît comme la plus bruyante en comparaison des autres stations. Le niveau sonore médian de la station R4 est moins élevé (-15 à -20dB) en comparaison des autres stations. Ce phénomène est dû à la plus faible interaction de la structure porteuse du capteur (cage) avec la colonne d'eau.
- ✓ Les niveaux maximum (percentile 1%) sur la période sont de 112.9 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R2), 118.4 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3), 104.9 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R4) et 111.5 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R7). Davantage fréquentée par la navigation commerciale, la station R3 apparaît comme plus bruyante en comparaison des autres zones.

Concernant la fréquence 125 Hz :

- ✓ Les niveaux médians (50% du temps) sur la période sont de 100.5 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R2), 97.4 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3), 81.5 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R4) et 98.5 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R7). A l'identique de la fréquence 63Hz, la station R2 apparaît comme la plus bruyante en comparaison des autres stations, tandis que la station R4 apparaît comme significativement moins bruyante (-15 à -19dB).
- ✓ Les niveaux maximum (percentile 1%) sur la période sont de 113.1 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R2), 121.5 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3), 96.5 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R4) et 105.2 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R7). Davantage fréquentée par la navigation commerciale, la station R3 apparaît également comme plus bruyante en comparaison des autres zones.

La Figure 18 (partie gauche) donne la répartition fréquentielle de l'énergie sonore en fonction de la zone d'étude :

- ✓ En basses fréquences, et dans les percentiles les plus forts (courbes vertes/violettes, percentiles inférieurs à 10%), les activités anthropiques sont visibles, notamment la propulsion des navires, qui crée une « bosse » de bruit significative de 100 Hz à 150 Hz. Les niveaux dans cette bande fréquentielle sont compris entre 90 et 105 dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ selon la station étudiée. Les bruits résiduels induits par le courant de marée accroissent les niveaux mesurés pour les fréquences inférieures à 100 Hz pour les stations R2, R3 et R7 ;
- ✓ Pour les percentiles faibles à médians (courbes bleue/orange/ jaune, percentiles supérieurs ou égaux à 50%), les effets météo et les bruits anthropiques se superposent en suivant globalement les tendances des courbes de Wenz (courbes de référence) en pointillés gris (Wenz, 1962) , qui montrent l'état de référence acoustique d'un océan soumis uniquement au bruit environnemental. Ce phénomène est visible entre 100 Hz et environ 2.5 kHz ;
- ✓ L'activité benthique forme une bosse visible de 4 kHz à 20 kHz, dans les percentiles faibles/médians (courbes bleues, oranges et jaunes). Des niveaux de l'ordre de 60 dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ (R2 et R4), et 55 dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ (R3 et R7) montrent une disparité de concentration selon les stations.

Pour la station R4, la partie droite de cette figure montre les variations horaires des niveaux compris entre 355 Hz et 445 Hz (bande de fréquence représentative des activités anthropiques), ainsi qu'entre 8.9 kHz et 11 kHz. Aucune plage horaire préférentielle des émergences sonores induites par les activités anthropiques n'est mise en évidence pour les niveaux compris entre 355 Hz et 445 Hz. Toutefois, on constate une tendance nocturne de l'activité benthique, avec une élévation allant de 1.5 dB dans une tranche horaire répartie entre 20h et 08h UTC pour les niveaux compris entre 8.9 kHz et 11 kHz. Le filtrage des données réalisé pour les autres enregistreurs acoustiques rend impossible l'affichage de la répartition horaire des niveaux sonores.

Par analogie avec l'analyse du bruit dans la bande filtrée [50Hz-40kHz], la Figure 19 trace la statistique des densités spectrales de puissance d'une période de 3 minutes à faible perturbation anthropique (journée du 06 Mars 2022, partie gauche) et d'un passage proche de navire au niveau de la station R7 (11 Mars 2022, partie droite). Les niveaux sont exprimés en dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$.

- ✓ La valeur minimale de l'énergie sonore par fréquence est tracée en bleu ;
- ✓ La valeur médiane de l'énergie sonore par fréquence est tracée en noire ;
- ✓ La valeur maximale de l'énergie sonore par fréquence est tracée en rouge.

Les deux périodes montrent des valeurs minimales proches avec une prédominance des courants de marnage en basse fréquence (<100Hz).

Concernant l'instant à faible perturbation anthropique, la distribution est resserrée et montre des niveaux maximums d'environ 100 dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ atteints à 50 Hz. Au-delà, le profil de bruit est similaire au modèle de Wenz mentionné ci-dessus, et montre la prédominance des conditions météorologiques dans le paysage sonore ;

Le passage du navire à proximité de la station R7 montre des profils de bruits de forme différente et d'amplitude significativement supérieure : un maximum de 130dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ est atteint à 50 Hz et correspond à la propulsion du navire. Lorsque le navire est au plus proche du capteur (courbe rouge), le bruit du navire est étendue en fréquence et émerge sur toute cette bande fréquentielle, avec des niveaux supérieurs à 110 dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ jusqu'à environ 500 Hz.

Tableau 17 : Distribution statistique du bruit mesuré dans le tiers d'octave 63Hz, en fonction de la zone, pour la saison hiver 2022.

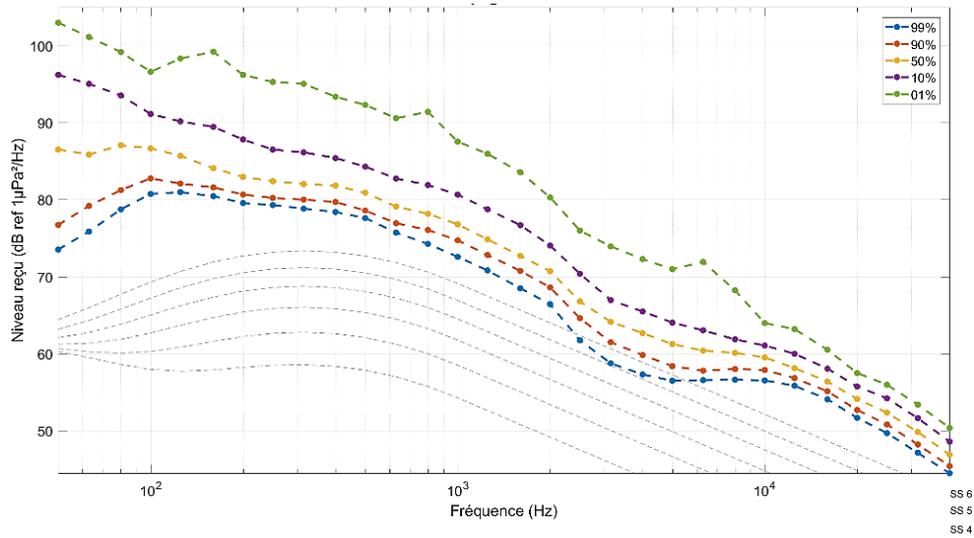
Percentile	(%)	100	99	90	75	50	25	10	1	0
R2	(dB ref $1\mu\text{Pa}^2$)	86.1	87.6	90.9	93.8	97.6	102.4	106.8	112.9	115.4
R3	(dB ref $1\mu\text{Pa}^2$)	78.3	80.0	83.9	86.9	90.8	97.7	106.9	118.9	126.1
R4	(dB ref $1\mu\text{Pa}^2$)	70.0	71.1	71.8	72.7	76.0	82.7	90.1	104.9	134.4
R7	(dB ref $1\mu\text{Pa}^2$)	81.2	84.2	87.4	90.4	94.6	99.9	103.3	111.5	116.6

Tableau 18 : Distribution statistique du bruit mesuré dans le tiers d'octave 125Hz, en fonction de la zone, pour la saison hiver 2022.

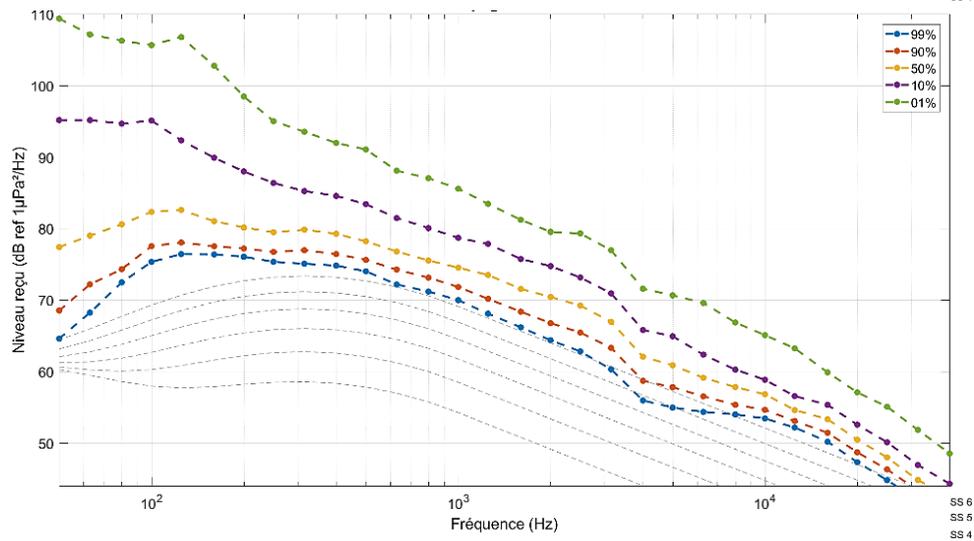
Percentile	(%)	100	99	90	75	50	25	10	1	0
R2	(dB ref $1\mu\text{Pa}^2$)	95.1	95.7	96.9	98.5	100.5	102.4	104.9	113.1	114.9
R3	(dB ref $1\mu\text{Pa}^2$)	89.7	91.2	92.8	94.3	97.4	100.5	107.1	121.5	128.7
R4	(dB ref $1\mu\text{Pa}^2$)	68.4	69.4	71.9	76.2	81.5	86.0	89.3	96.5	125.1
R7	(dB ref $1\mu\text{Pa}^2$)	92.6	94.1	96.1	97.3	98.5	99.9	101.1	105.2	108.2



R2



R3



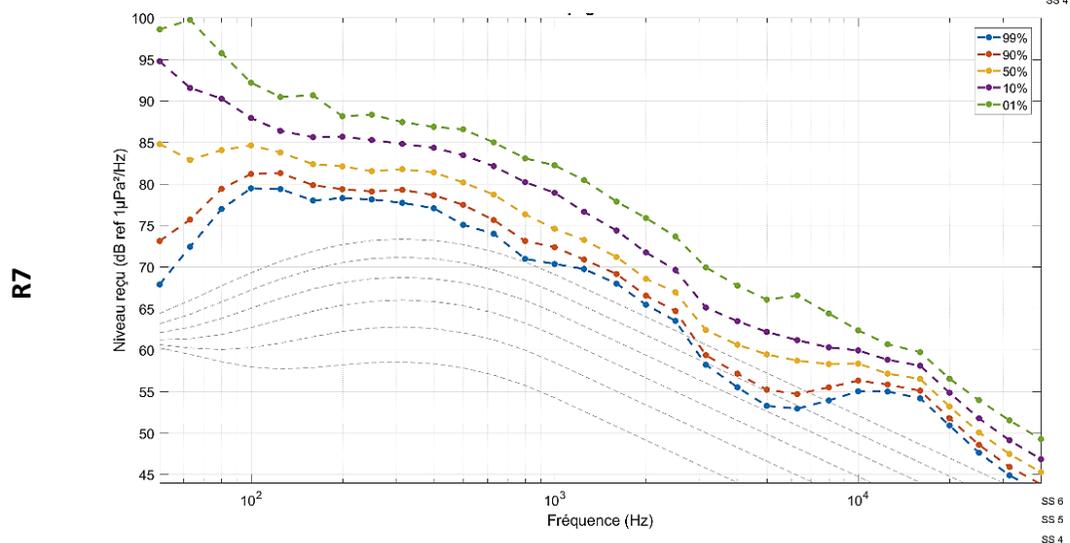
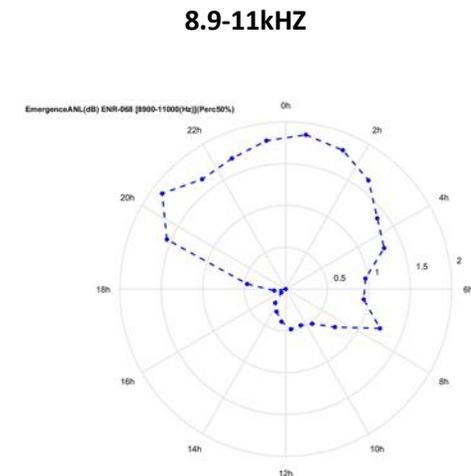
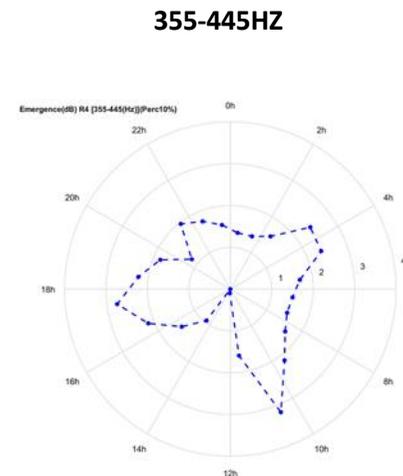
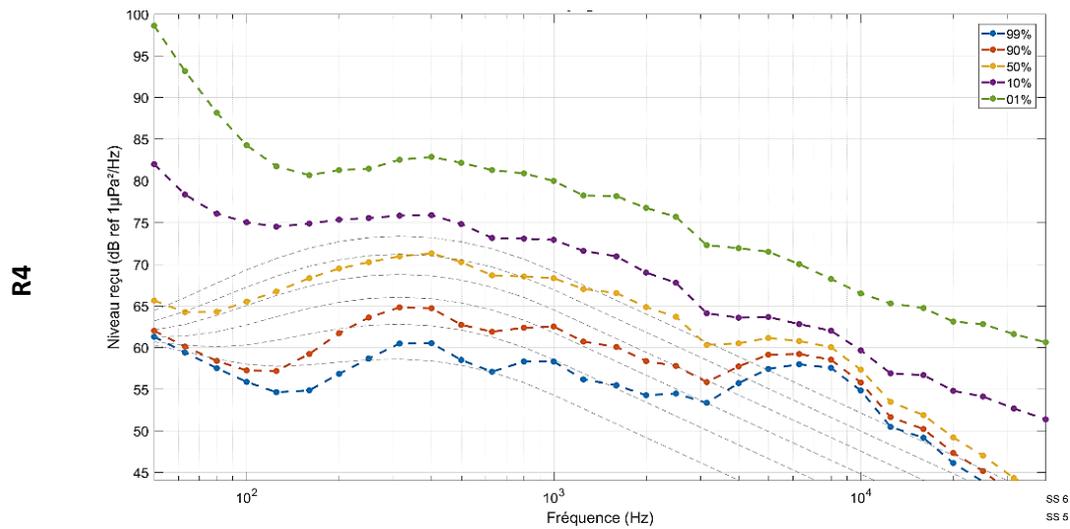
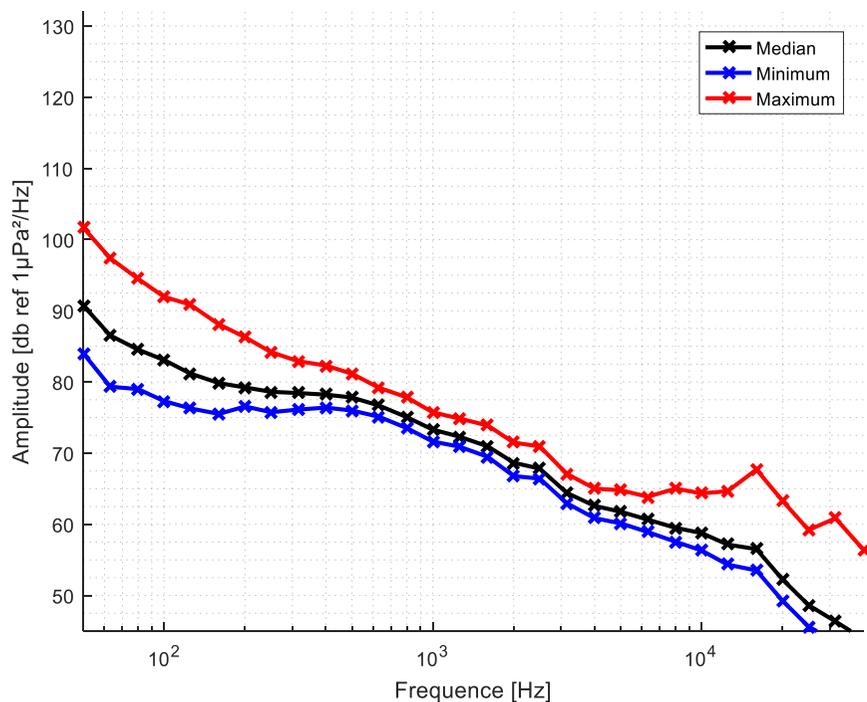


Figure 18 : Répartition fréquentielle de l'énergie acoustique mesurée en hiver 2022 (à gauche).
Répartition horaire des niveaux sonores mesurés en hiver 2022 dans la bande 355-445Hz et 8.9-11.0kHz (à droite).

Période calme (06/03/2022) en R7



Passage de navire (11/03/2022) en R7

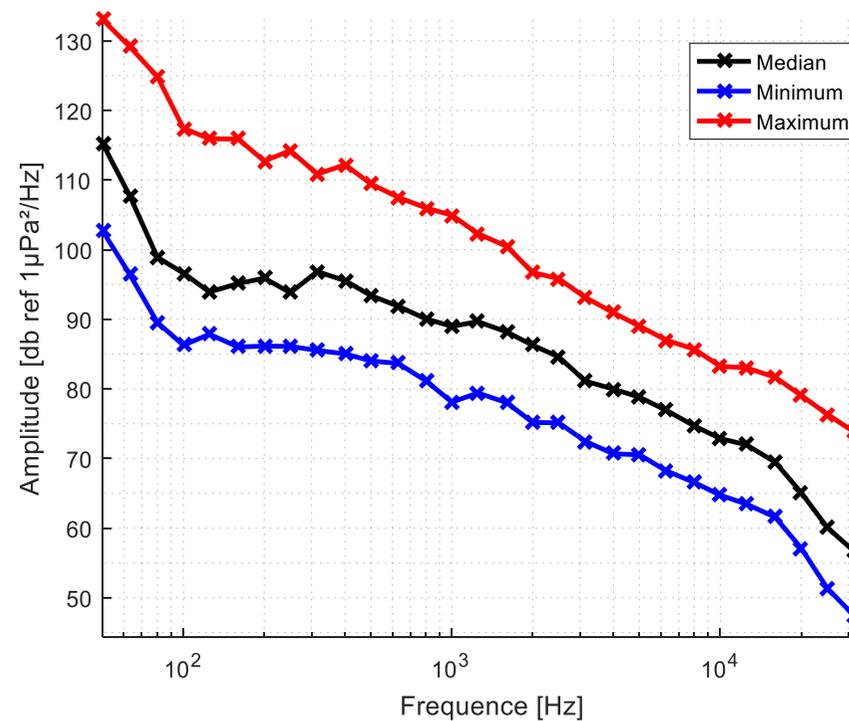


Figure 19 : Densités spectrales de puissance (exprimées en dB ref 1µPa²/Hz) de périodes représentatives choisies lors de l'hiver 2022. A gauche : période calme dans la nuit du 06 Mars 2022 à la station R7. A droite : passage proche de navire le 11 Mars 2022, à proximité de la station R7.

V.2.2. Période Printemps (du 21/03/2022 au 20/06/2022)

V.2.2.a. Analyse du bruit ambiant dans la bande filtrée [50Hz-40kHz]

De manière similaire à la saison hivernale 2022, l'évolution des niveaux sonores est établie entre 50 Hz et 40 kHz en fonction du temps.

La Figure 20 montre l'évolution des niveaux sonores entre 50 Hz et 40 kHz à la station R4. La courbe rouge superposée montre l'évolution du niveau de bruit permanent ou « pied de bruit ». Les courbes des autres stations sont disponibles en annexe de ce rapport. Le bruit permanent (ou bruit environnemental) fluctue entre 108 et 120 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ pour les stations R2, R3 et R7. L'hydrophone de la station R4 est quant à lui moins soumis aux effets de marée et voit son pied de bruit fluctuer aux alentours de 100 et 105 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$, probablement en raison du positionnement du système dans une cage de fond. A l'identique de l'hiver 2022, les effets météorologiques sont les contributeurs majoritaires au bruit permanent, à savoir principalement la vitesse du vent pour les fréquences allant jusqu'à 8 kHz, comme illustré dans la Figure 21. A titre d'exemple, un coup de vent visible aux alentours du 30 Mars 2022 (vitesse de vent d'environ 15 m/s) fait augmenter le pied de bruit à environ 110 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ à la station R4 et 115 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ aux stations R2, R3 et R7.

Le paysage sonore est ponctuellement dominé par des émergences anthropiques courtes (d'une durée de 5 à 15min) et intenses, correspondant aux passages proches de navires. Selon la distance d'approche, ces derniers font émerger les niveaux sonores de 15 dB à plus de 30 dB, résultant à des niveaux absolus allant jusqu'à un maximum de 159.5 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$. Après détection des passages de ces événements intenses acoustiquement, soit une élévation d'au moins 15 dB du niveau sonore permanent, on relève en moyenne 10 événements par jour au niveau de la station R4, soit une légère augmentation par rapport à l'hiver 2022. La Figure 22 montre la répartition horaire des émergences anthropiques détectées au niveau de la station R4, qui est concentrée entre 06h et 18h UTC. Le comptage des événements acoustiquement significatifs pour les autres stations est impossible en raison du traitement appliqué aux données (cf. V.1.).

La Figure 23 correspond au spectrogramme d'un passage de navire très proche du système acoustique déployé au niveau de la station R3, le 24 Avril 2022 :

- ✓ Lors de l'approche, le niveau sonore augmente au fur et à mesure que la distance navire/hydrophone décroît, avec des émergences sonores en frange ;
- ✓ Au minimum de distance (CPA), une augmentation courte (30s) du niveau sonore est observée jusqu'à 158 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$, sur la bande de 50Hz à 10kHz avec un maximum d'énergie aux fréquences inférieures à 1 kHz ;
- ✓ Lors de l'éloignement, le niveau décroît avec la distance.

Le 20 Avril 2022, les capteurs déployés au niveau des stations R2 et R3 ont été exposés à du bruit de battage de pieu vraisemblablement issu d'un chantier maritime à proximité du périmètre d'étude, illustré dans la Figure 24. Le bruit de battage consiste en une série de signaux impulsifs espacés de quelques secondes, correspondant à l'impact du marteau sur le pieu. Le niveau sonore perçu augmente ici jusqu'à environ 150 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$. Une analyse détaillée des travaux effectués à cette date pourrait permettre de mieux évaluer la relation entre la distance de la source de bruit et les niveaux sonores perçus.

Les Tableau 19, Tableau 20, Tableau 21 et Tableau 22 donnent la répartition statistique du bruit dans la bande filtrée [50Hz-40kHz] durant le printemps 2022, pour chaque station d'étude :

- ✓ Les niveaux médians (50% du temps) sur la période sont de 113.6 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R2), 110.4 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3), 103.3 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R4) et 110.9 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R7). Ces niveaux sont stables en comparaison de ceux relevés lors de l'hiver 2022. La station R4 apparaît comme moins bruyante (-7 à -10dB) en comparaison des autres stations : ceci est dû à la plus faible interaction de la structure porteuse du capteur (cage) avec la colonne d'eau, ainsi qu'à la plus faible navigation commerciale à proximité du capteur ;

- ✓ Les niveaux maximum (percentile 1%) sur la période sont de 125.3 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R2), 127.7 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3), 117.2 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R4) et 122.2 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R7). A l'exception de la station R7 (+5dB), les niveaux mesurés sont relativement stables en comparaison de ceux relevés en hiver 2022. La station R4 apparaît de nouveau préservée des activités anthropiques (-5 à -10dB).

La Figure 25 permet de mettre en regard les statistiques des niveaux sonores mesurés et la densité de navires issue des données AIS uniquement, dans le périmètre d'étude :

- ✓ La station R2 est située en périphérie d'une route commerciale secondaire et voit des passages lointains de navires de pêche ;
- ✓ La station R3 se situe sur un couloir de navigation cargo et est fréquentée par les navires de pêche ;
- ✓ La station R4 apparaît peu fréquentée ;
- ✓ La station R7 est isolée de la pêche (passages proches) mais des cargos passent à proximité non immédiate.

Globalement, la stabilité des niveaux sonores est relativement corrélée à la stabilité de la navigation sur zone. Ces informations sont toutefois partielles, car cette analyse est basée uniquement sur l'AIS et ne prend pas en compte les données VMS.

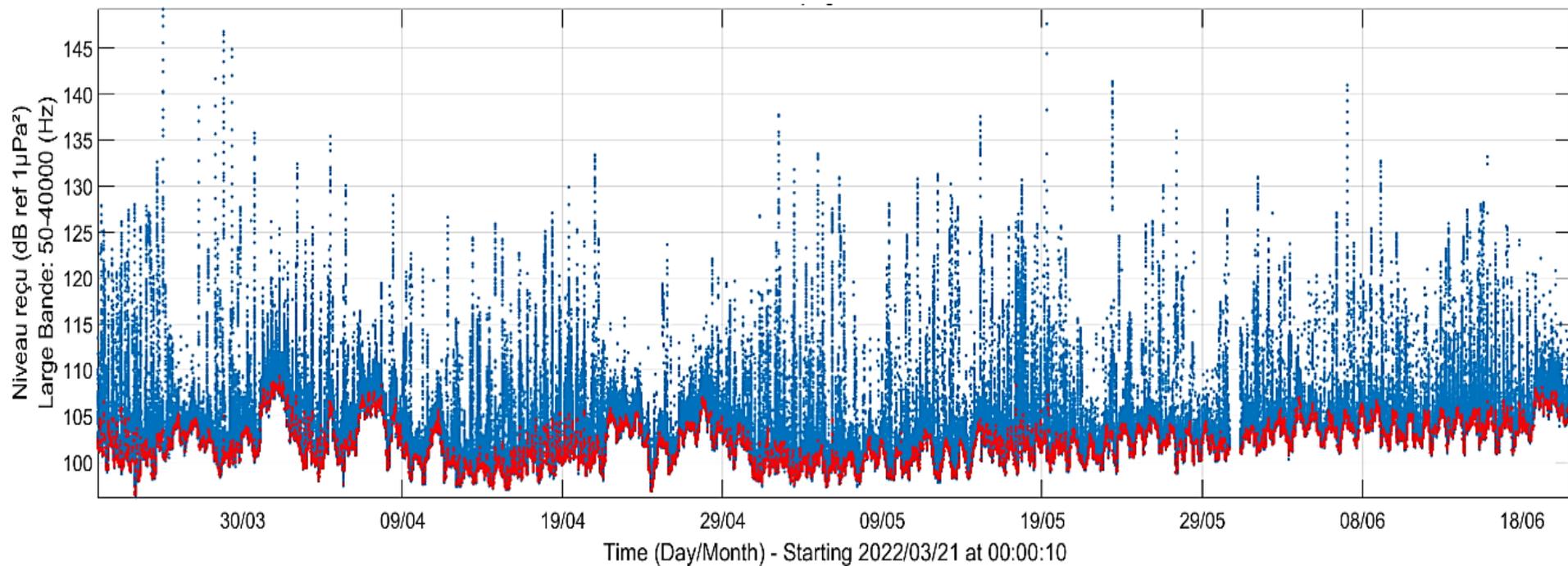


Figure 20 : Evolution du niveau dans la bande filtrée [50Hz-40kHz] au niveau de la station R4 en fonction du temps, lors du printemps 2022. Les courbes pour les autres stations sont disponibles en annexe.

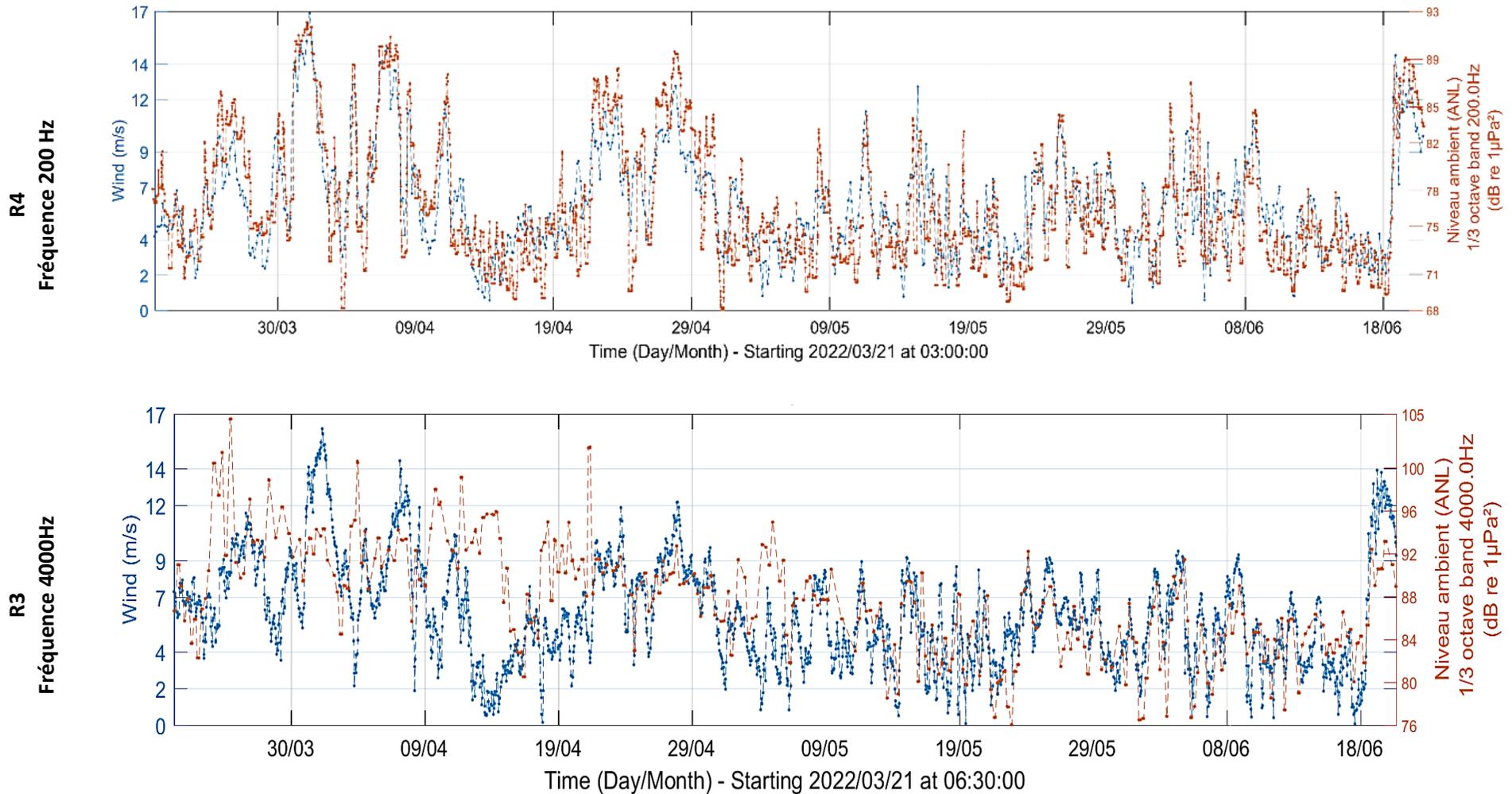


Figure 21 : Corrélation du bruit permanent (orange) avec le vent (bleu) au niveau des stations R4 et R3 lors du printemps 2022.

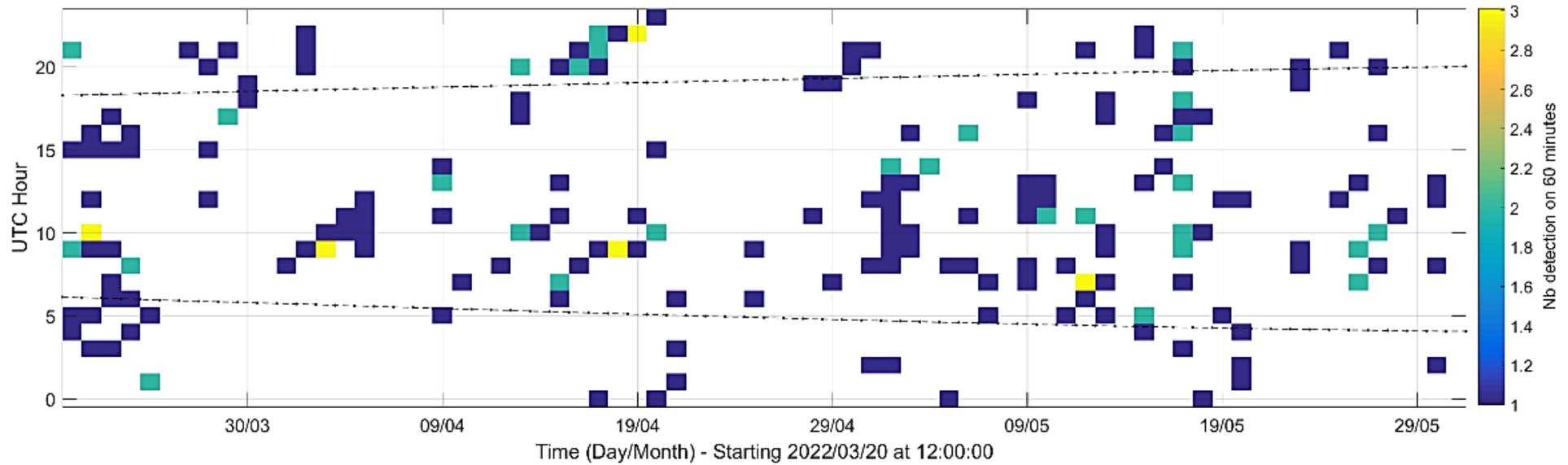


Figure 22 : Répartition horaire des émergences anthropiques détectées lors du printemps 2022, au niveau de la station R4.

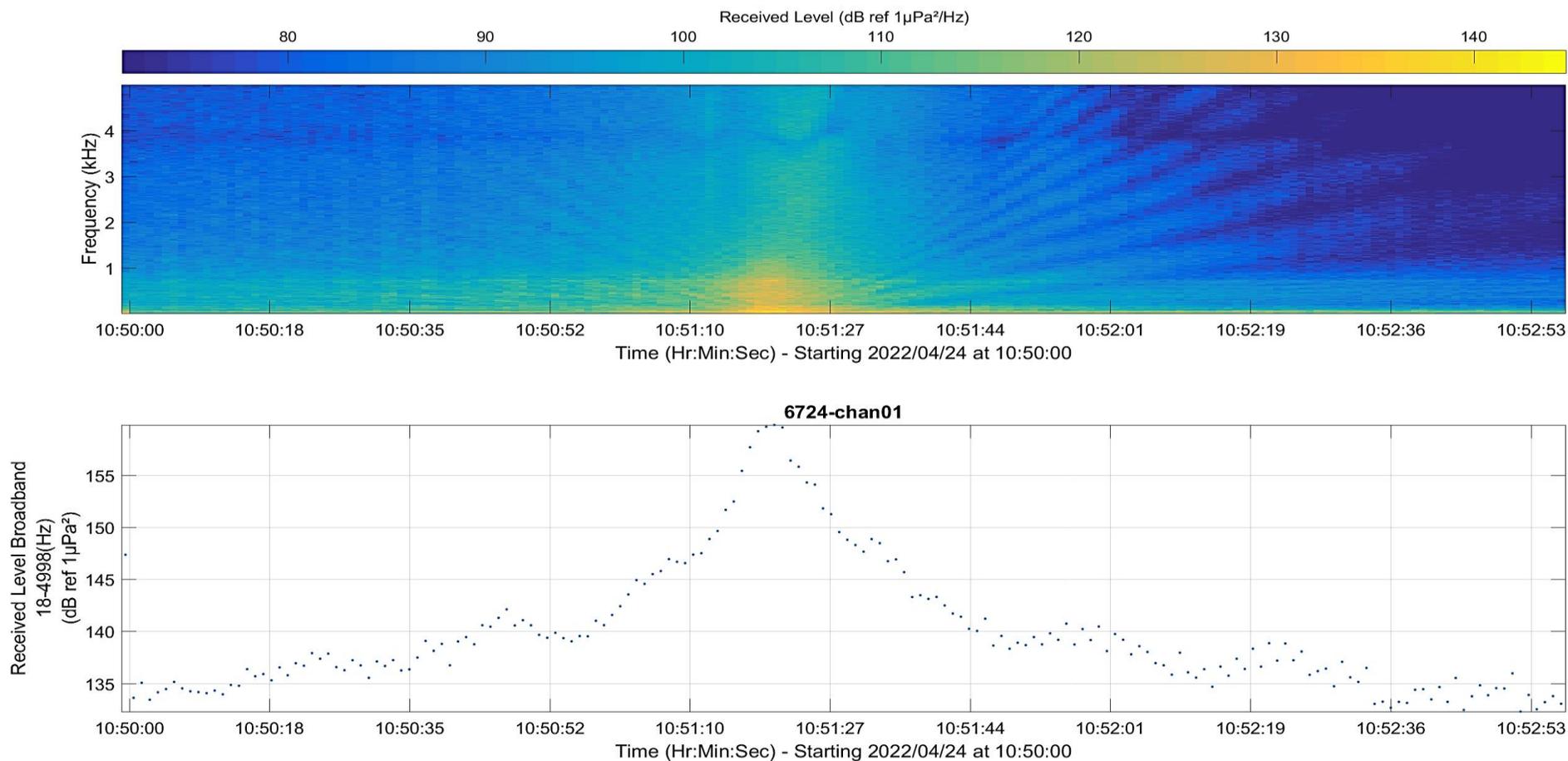


Figure 23 : En haut, spectrogramme illustratif d'un passage de navire au niveau de la station R3 le 24 Avril 2022. En bas, évolution du niveau sonore (50 Hz – 10 kHz, exprimé en dB ref 1 μ Pa²) en fonction du temps.

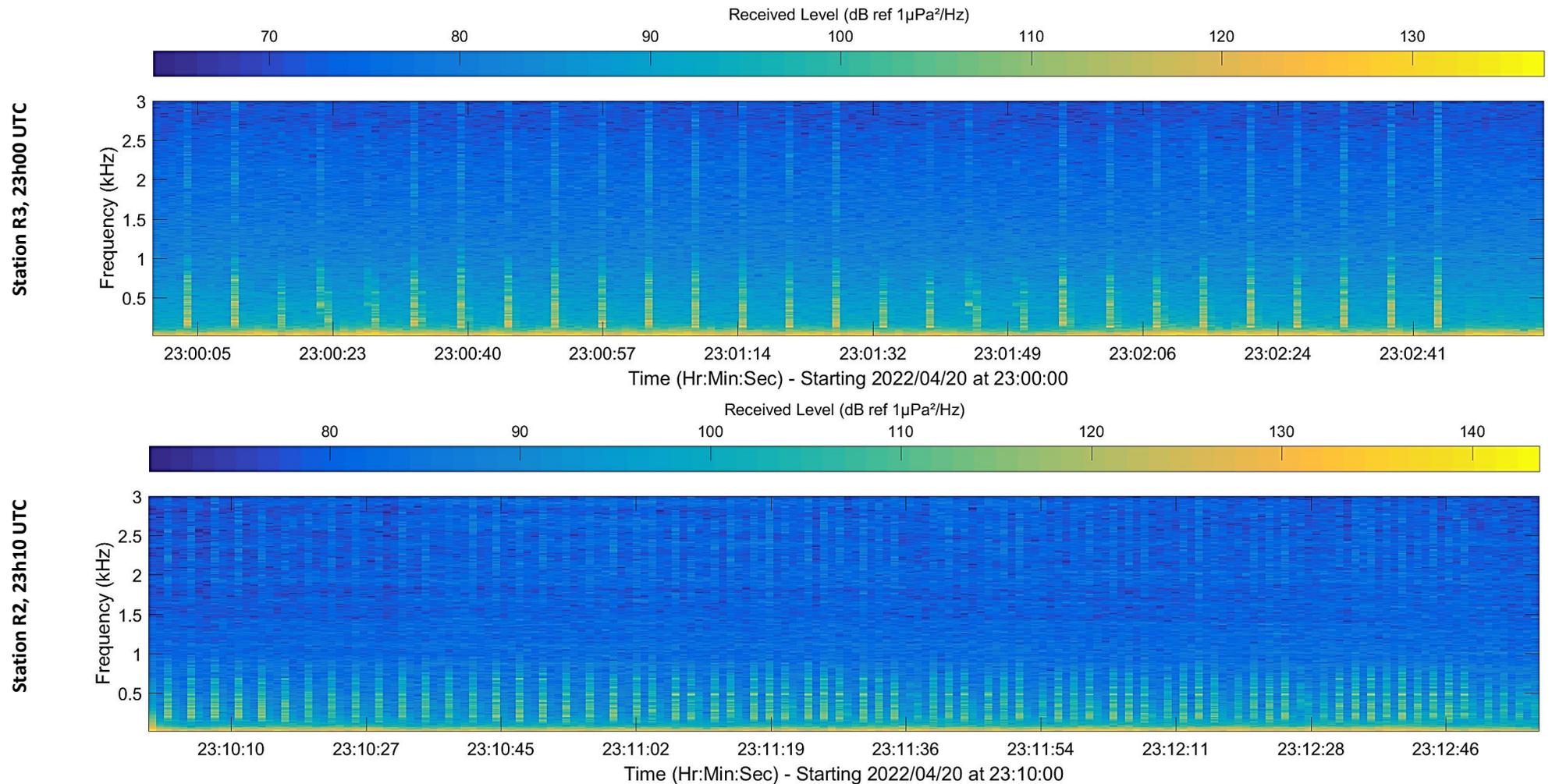


Figure 24 : Spectrogrammes illustrant un battage d'un pieu au niveau des stations R2 et R3, durant la nuit du 20 Avril 2022.

Tableau 19 : Statistiques des niveaux sonores (50Hz -40 kHz) à la station R2 (exprimés en dB ref 1 μ Pa²) durant la saison printemps 2022.

	Percentile (%)	Niveau minimum et très courant			Niveau Médian				Niveau maximum et très rare	
		100	99	90	75	50	25	10	1	0
R2	Toute la période	107.7	108.5	110.3	111.8	113.6	115.6	118	125.3	130.3
	Jour	108.2	108.7	110.7	112	113.7	115.7	118.4	126.1	130.3
	Nuit	107.7	108.4	110.1	111.7	113.6	115.8	118	123.4	126.5
	Ecart Jour/Nuit	0.4	0.2	0.6	0.4	0	-0.1	0.3	2.7	3.8

Tableau 20 : Statistiques des niveaux sonores (50Hz -40 kHz) à la station R3 (exprimés en dB ref 1 μ Pa²) durant la saison printemps 2022.

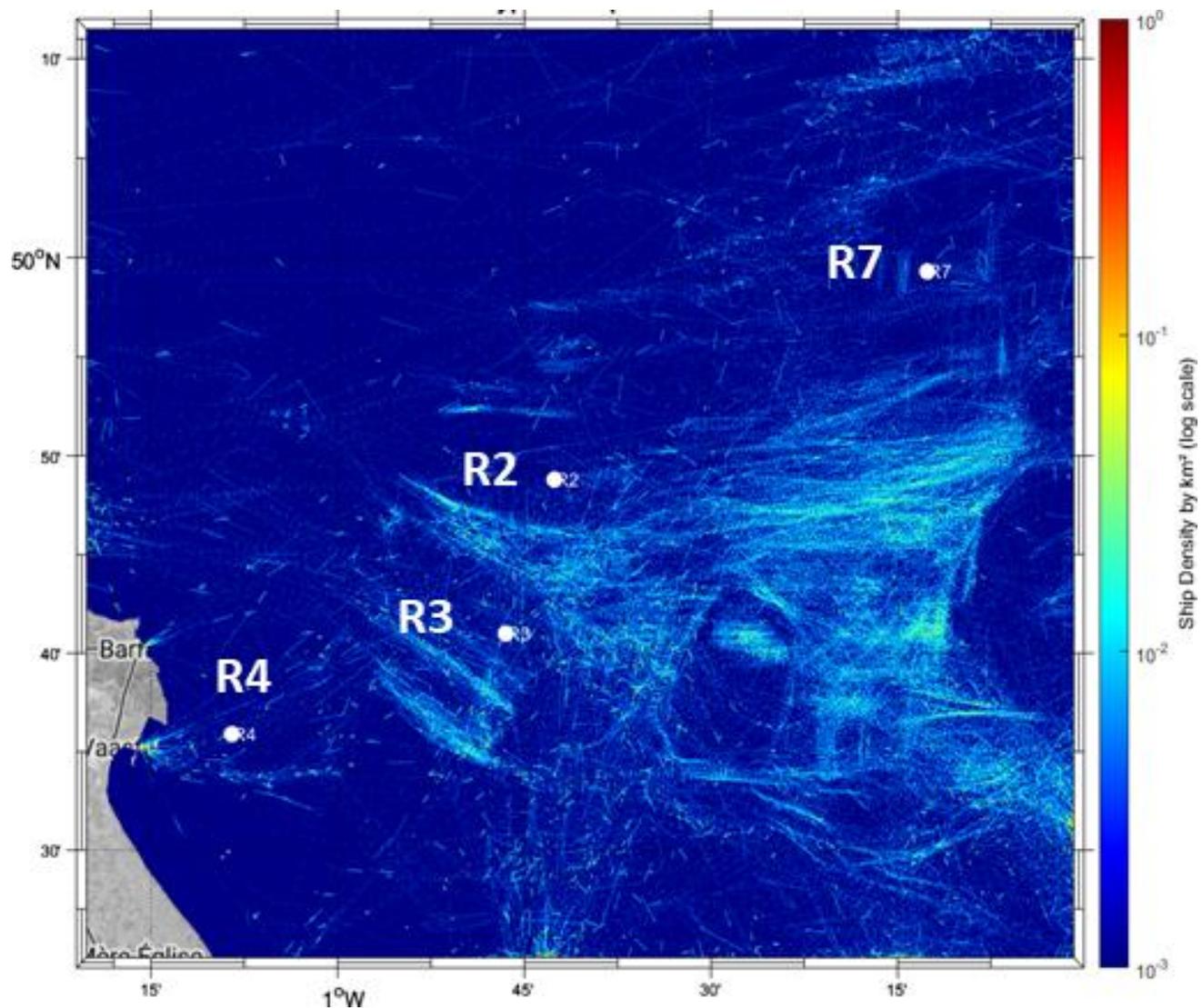
	Percentile (%)	Niveau minimum et très courant			Niveau Médian				Niveau maximum et très rare	
		100	99	90	75	50	25	10	1	0
R3	Toute la période	102.4	104.5	106.3	108	110.4	113.6	118.4	127.7	159.5
	Jour	103.6	104.6	106.2	107.9	110.2	113.7	118.6	130.2	159.5
	Nuit	102.4	103.6	106.5	108.1	110.5	113.4	117.5	123.5	127.6
	Ecart Jour/Nuit	1.2	1	-0.3	-0.1	-0.3	0.2	1.1	6.7	31.8

Tableau 21 : Statistiques des niveaux sonores (50Hz -40 kHz) à la station R4 (exprimés en dB ref 1 μ Pa²) durant la saison printemps 2022.

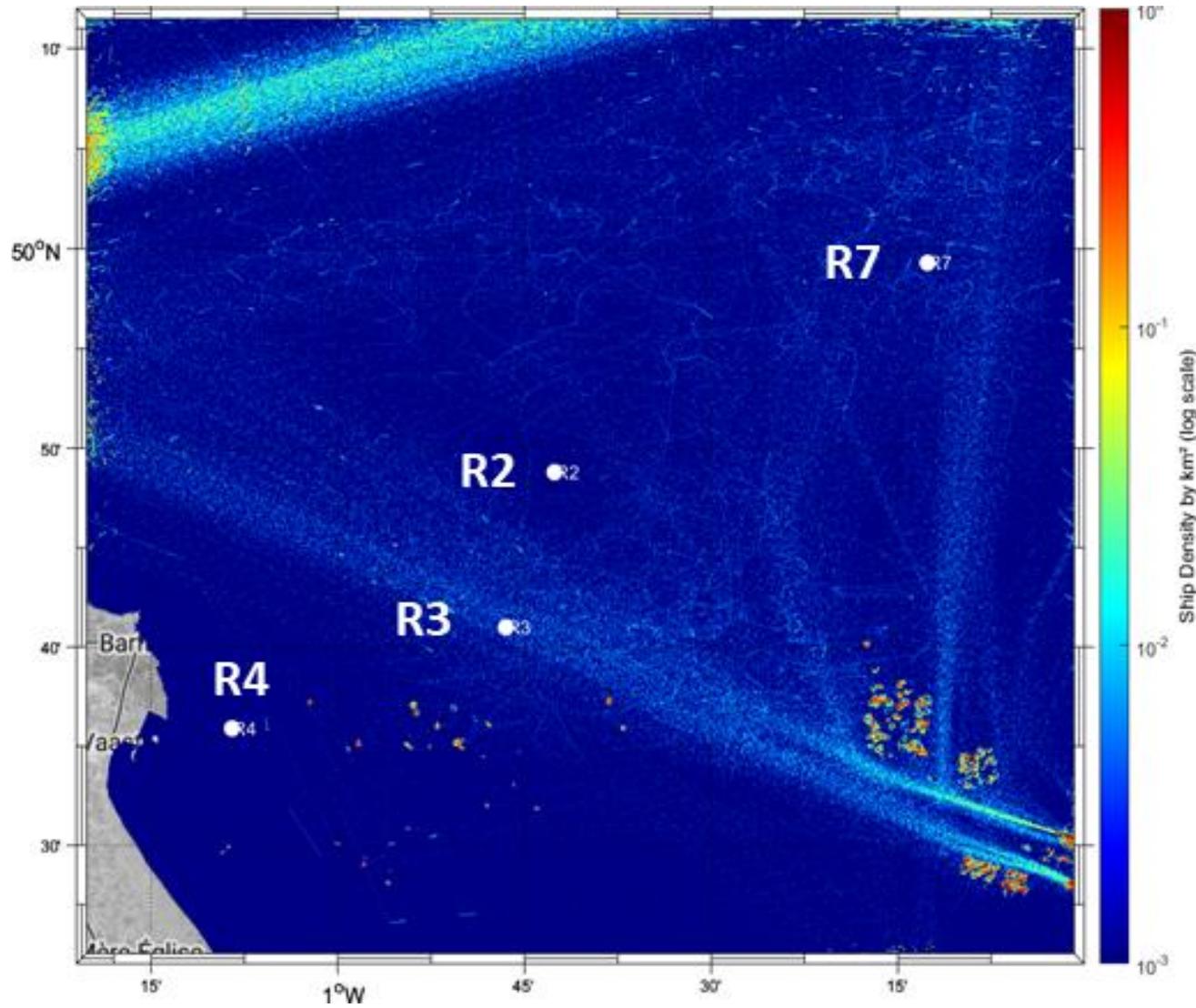
	Percentile (%)	Niveau minimum et très courant			Niveau Médian				Niveau maximum et très rare	
		100	99	90	75	50	25	10	1	0
R4	Toute la période	96.1	98.3	99.8	101.0	102.6	104.6	107.4	117.1	149.2
	Jour	96.1	98.1	99.5	100.7	102.5	104.6	107.8	118.2	147.6
	Nuit	98.1	99.3	100.4	101.3	102.9	104.8	107.0	115.6	149.2
	Ecart Jour/Nuit	-2.0	-1.2	-0.9	-0.6	-0.4	-0.2	0.8	2.5	-1.6

Tableau 22 : Statistiques des niveaux sonores (50Hz -40 kHz) à la station R7 (exprimés en dB ref 1 μ Pa²) durant la saison printemps 2022.

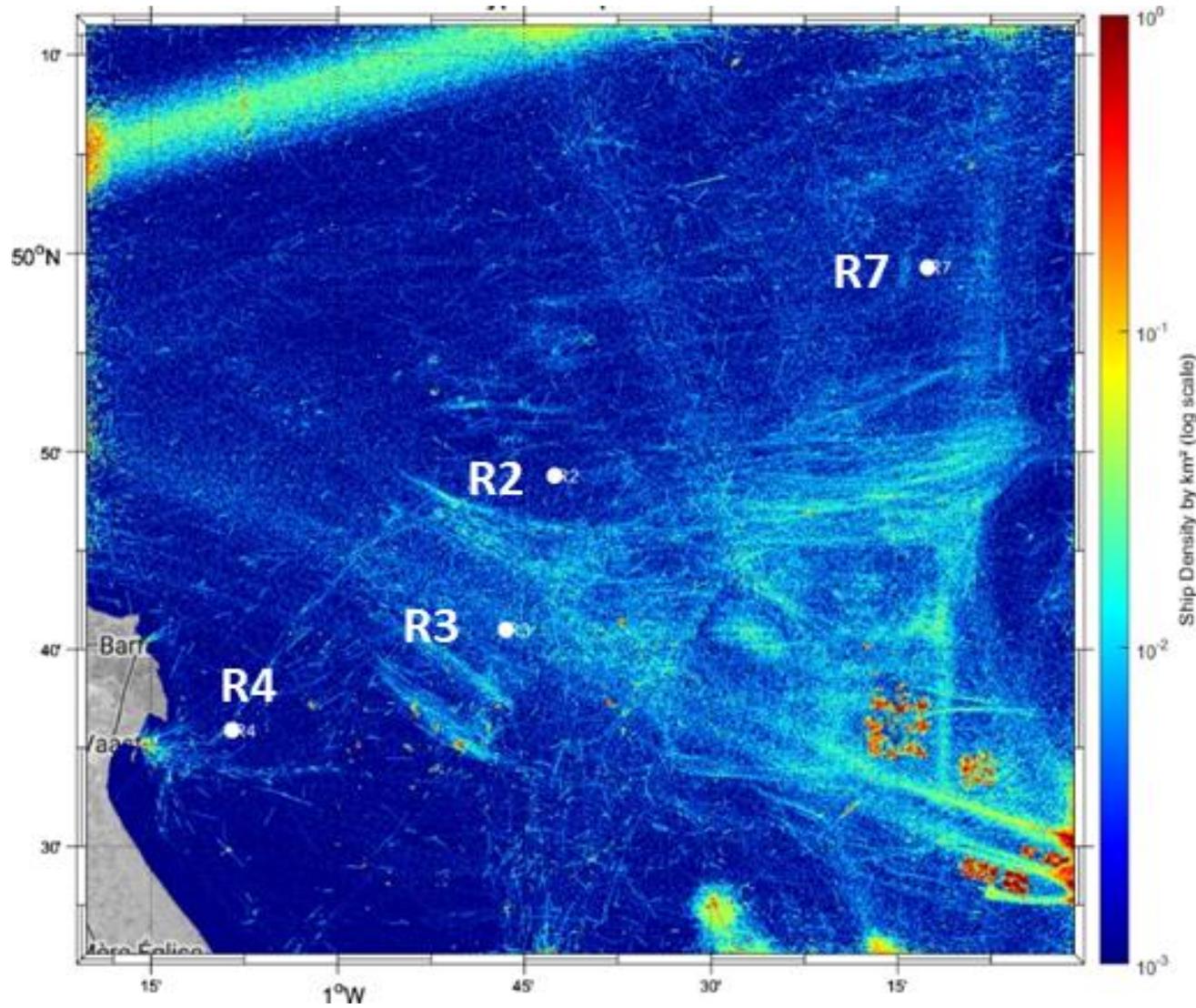
	Percentile (%)	Niveau minimum et très courant			Niveau Médian				Niveau maximum et très rare	
		100	99	90	75	50	25	10	1	0
R7	Toute la période	105.7	107.7	108.8	109.7	110.9	112.6	114.9	122.2	146.6
	Jour	106.4	107.7	108.8	109.8	111.1	113	116.1	123.5	146.6
	Nuit	105.7	107.4	108.8	109.6	110.7	112	113	117.5	130
	Ecart Jour/Nuit	0.7	0.3	0.1	0.2	0.4	1	3	6	16.6



Navires de pêche (basé sur l'AIS)



Cargos



Tous les navires

Figure 25 : Densité de navires dans le périmètre d'étude lors du printemps 2022 (du 21/03/2022 au 21/06/2022).

V.2.2.b. Analyse du bruit ambiant par bandes de fréquences

Les Tableau 23 et Tableau 24 constituent le descripteur 11 de la DCSMM et donnent la répartition statistique des niveaux sonore (dB ref $1\mu\text{Pa}^2$, tiers d'octave) relevés aux fréquences 63 et 125 Hz, pour chaque station.

Concernant la fréquence 63 Hz :

- ✓ Les niveaux médians (50% du temps) sur la période sont de 99.1 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R2), 92.9 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3), 74.9 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R4) et 93.0 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R7). La station R2 apparaît comme la plus bruyante en comparaison des autres stations, tandis que le niveau sonore médian de la station R4 est moins élevé (-18 à -26 dB) en comparaison des autres stations. Ce phénomène est dû à la plus faible interaction de la structure porteuse du capteur (cage) avec la colonne d'eau.
- ✓ Les niveaux maximum (percentile 1%) sur la période sont de 118.4 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R2), 121.4 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3), 102.3 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R4) et 112.8 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R7). Davantage fréquentée par la navigation commerciale, la station R3 apparaît comme plus bruyante en comparaison des autres stations.

Concernant la fréquence 125 Hz :

- ✓ Les niveaux médians (50% du temps) sur la période sont de 101.1 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R2), 97.4 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3), 75.6 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R4) et 98.5 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R7). La station R2 apparaît ici comme la plus bruyante en comparaison des autres stations, tandis que la station R4 apparaît comme significativement moins bruyante.
- ✓ Les niveaux maximum (percentile 1%) sur la période sont de 112.0 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R2), 116.1 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3), 95.6 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R4) et 108.6 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R7). Davantage fréquentée par la navigation commerciale, la station R3 apparaît également comme plus bruyante en comparaison des autres zones.

La partie gauche de la Figure 26 donne la répartition fréquentielle de l'énergie sonore en fonction de la zone d'étude :

- ✓ En basses fréquences, et dans les percentiles les plus forts (courbes vertes/violettes, percentiles inférieurs à 10%), les activités anthropiques sont visibles, notamment la propulsion des navires, qui crée une « bosse » de bruit significative autour de 150 Hz pour les stations R2 et R7. Ce phénomène est également visible à la station R3. Les niveaux dans cette bande fréquentielle sont compris entre 90 et 100 dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ selon la station étudiée. Les bruits résiduels induits par le courant de marée accroissent légèrement les niveaux mesurés pour les fréquences inférieures à 100Hz aux stations R2, R3 et R7.
- ✓ Pour les percentiles faibles à médians (courbes bleue/orange/ jaune, percentiles supérieurs ou égaux à 50%), les effets météorologiques et les bruits anthropiques se superposent en suivant les tendances des courbes de Wenz en pointillés gris (courbes de référence, Wenz, 1962) , qui montrent l'état de référence acoustique d'un océan soumis uniquement au bruit environnemental. Ce phénomène est visible entre 100 Hz et environ 2.5 kHz.
- ✓ L'activité benthique, qui semble proche de celle rencontrée en hiver 2022, forme une bosse visible de 4 kHz à 20 kHz dans les percentiles faibles/médians (courbes bleues, oranges et jaunes). Des niveaux de l'ordre de 60 dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ (R2), et 55dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ (R3, R4 et R7) montrent une disparité de concentration selon les zones de mesure.

Pour la station R4, la partie droite de cette figure montre les variations horaires des niveaux compris entre 355 Hz et 445 Hz (bande de fréquence représentative des activités anthropiques), ainsi qu'entre 8.9 kHz et 11 kHz. Cette représentation met alors en évidence un accroissement compris entre 2 et 3 dB dans une plage horaire répartie entre 08h et 18h UTC pour les niveaux compris entre 355 Hz et 445 Hz. Cette plage temporelle correspond à la plage de fréquentation estimée dans l'analyse du bruit dans la bande filtrée [50Hz-40kHz]. Pour les niveaux compris entre 8.9 kHz et 11 kHz, on constate une tendance nocturne de l'activité benthique, avec une élévation allant de 1.5 à 2 dB dans une tranche horaire répartie entre 20h et 06h UTC.

Par analogie avec l'analyse du bruit dans la bande filtrée [50Hz-40kHz], la Figure 27 trace la statistique des densités spectrales de puissance d'une période d'une durée de 3 minutes d'un passage proche de navire au niveau de la station R3 (24 Avril 2022, partie gauche) et du bruit de battage reçu à la station R3 dans la soirée du 20 Avril 2022 (partie droite). Les niveaux sont exprimés en dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$.

- ✓ La valeur minimale de l'énergie sonore par fréquence est tracée en bleu ;
- ✓ La valeur médiane de l'énergie sonore par fréquence est tracée en noire ;
- ✓ La valeur maximale de l'énergie sonore par fréquence est tracée en rouge.

Le passage du navire à proximité de la station R3 montre des profils de bruits d'allure proche jusqu'à environ 5 kHz, dont l'amplitude dépend uniquement de la distance séparant le navire du capteur. Un maximum de 140 dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ est atteint à 50 Hz et correspond à la propulsion du navire. Lorsque le navire est au plus proche du capteur (courbe rouge), le bruit du navire émerge sur toute la bande fréquentielle, avec des niveaux supérieurs à 110 dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ jusqu'à environ 3 kHz.

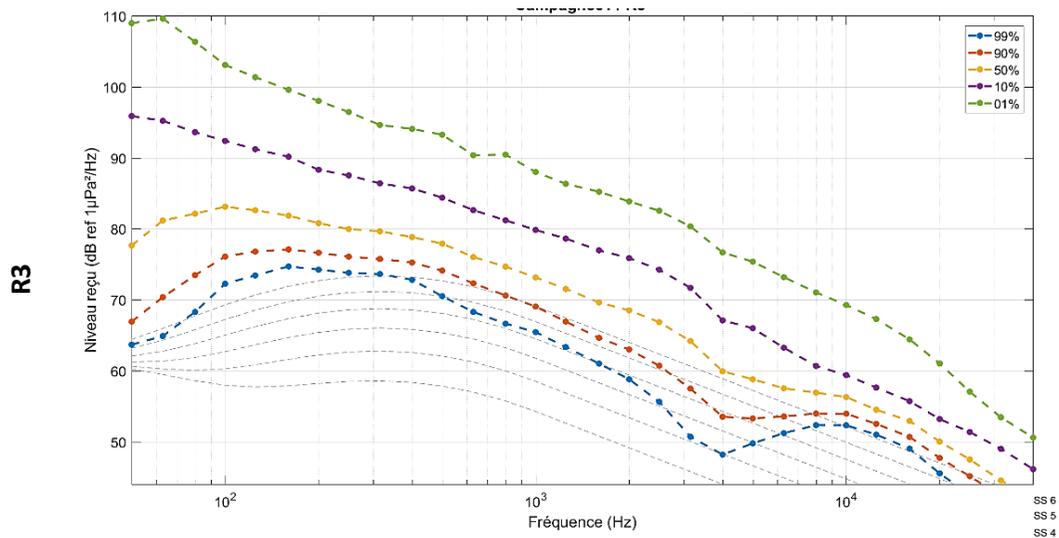
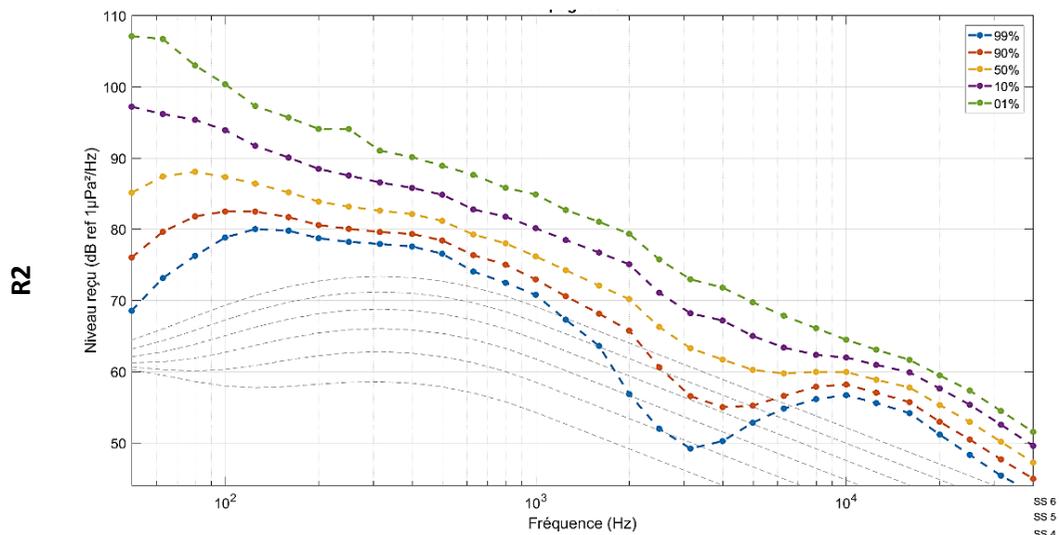
De par sa nature impulsionnelle, le bruit de battage (partie droite) n'émerge qu'occasionnellement sur la fenêtre étudiée. Ainsi, les profils de bruit médian et minimum sont proches et correspondent majoritairement au bruit ambiant sur zone. Lorsque le battage a lieu (courbe rouge, bruit maximum), une émergence est visible entre 100 Hz et 3 kHz. Les niveaux dans cette bande sont compris entre 80 et 110 dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$, avec un maximum d'énergie à 200 Hz. Ce profil d'émergence modéré suggère une distance atelier/capteur importante.

Tableau 23 : Distribution statistique du bruit mesuré dans le tiers d'octave 63Hz, en fonction de la zone, pour la saison printemps 2022.

Percentile	(%)	100	99	90	75	50	25	10	1	0
R2	(dB ref $1\mu\text{Pa}^2$)	80.8	84.9	91.4	95.0	99.1	103.5	107.9	118.4	125.2
R3	(dB ref $1\mu\text{Pa}^2$)	73.8	76.6	82.1	87.2	92.9	99.8	107.0	121.4	154.6
R4	(dB ref $1\mu\text{Pa}^2$)	70.2	71.3	72.0	72.9	74.9	80.7	88.0	102.3	131.5
R7	(dB ref $1\mu\text{Pa}^2$)	77.2	81.9	86.9	89.3	93.0	98.4	103.4	112.8	140.5

Tableau 24 : Distribution statistique du bruit mesuré dans le tiers d'octave 125Hz, en fonction de la zone, pour la saison printemps 2022.

Percentile	(%)	100	99	90	75	50	25	10	1	0
R2	(dB ref $1\mu\text{Pa}^2$)	93.0	94.8	97.2	99.0	101.1	103.5	106.5	112.0	118.6
R3	(dB ref $1\mu\text{Pa}^2$)	86.3	88.2	91.6	94.1	97.4	101.4	106.0	116.1	146.8
R4	(dB ref $1\mu\text{Pa}^2$)	67.7	69.0	70.1	71.6	75.6	82.2	87.4	95.6	141.1
R7	(dB ref $1\mu\text{Pa}^2$)	90.9	93.1	95.4	96.9	98.5	100.4	102.3	108.6	137.0



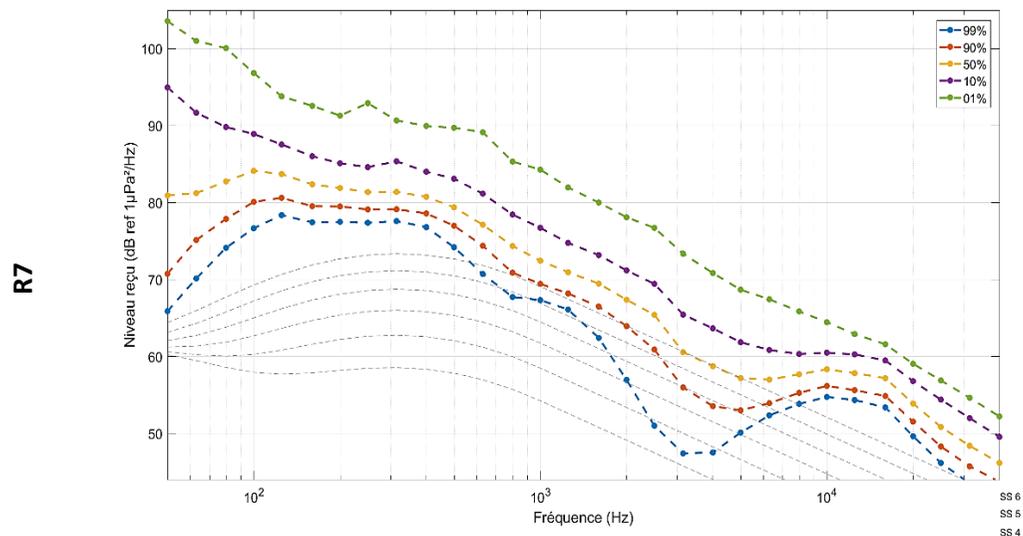
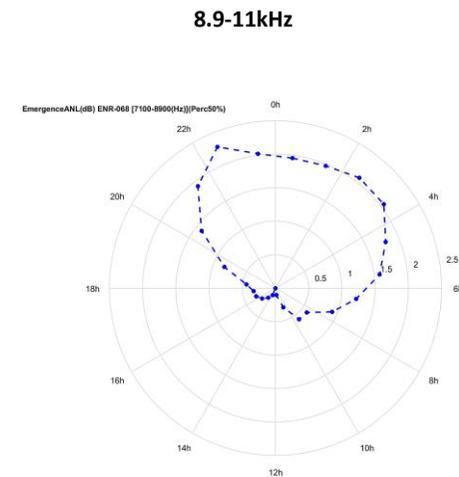
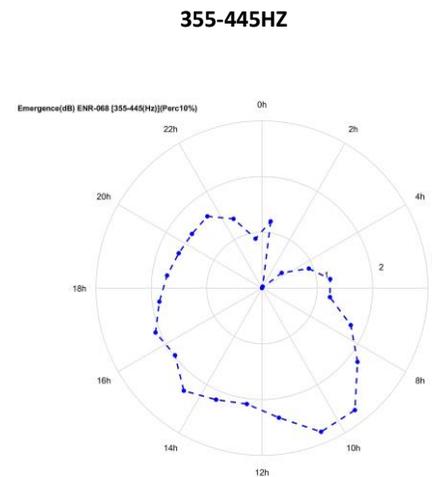
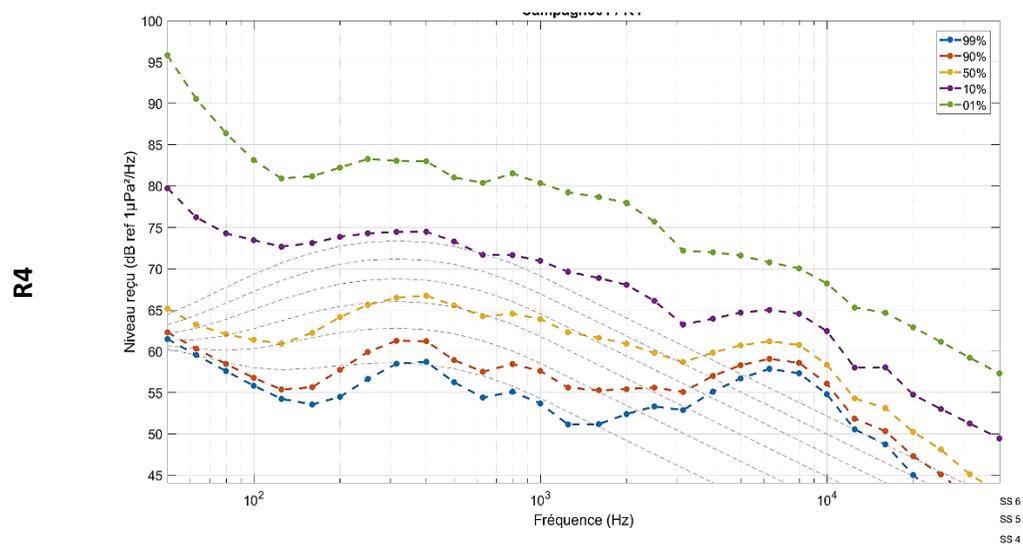


Figure 26 : Répartition fréquentielle de l'énergie acoustique mesurée au printemps 2022 (à gauche). Répartition horaire des niveaux sonores mesurés au printemps 2022 dans la bande 355 - 445Hz et 8.9 - 11kHz (à droite).

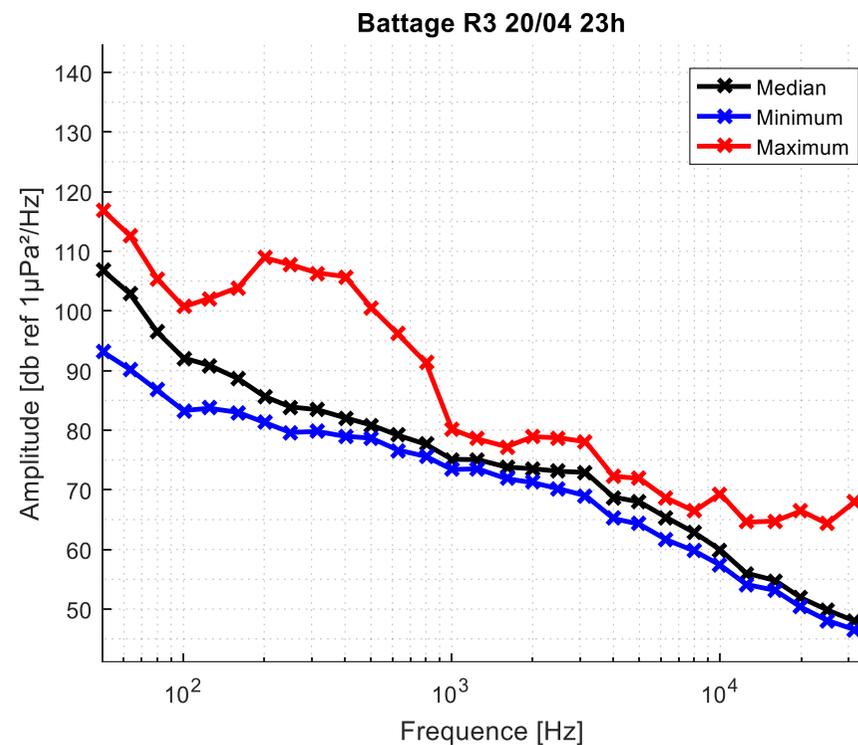
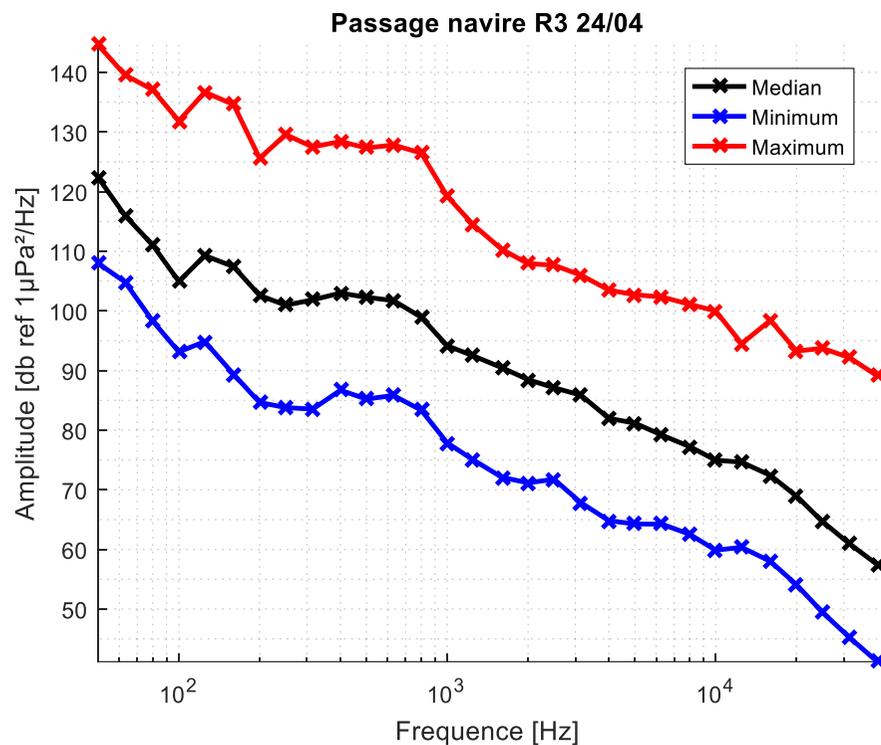


Figure 27 : Densités spectrales de puissance (exprimées en dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$) de périodes représentatives choisies lors du printemps 2022. A gauche : passage de navire dans la journée du 24 Avril 2022 à proximité de la station R3. A droite : bruit de battage dans la nuit du 20 Avril 2022, capté par l'enregistreur à la station R3.

V.2.3. Période Eté (du 21/06 au 20/09/2022)

L'enregistreur acoustique déployé au niveau de la station R2 n'a pas pu être récupéré pour la saison estivale 2022. Dans ce contexte, l'analyse des données récupérées pour cette station est réalisée sur la période restreinte du 03 août au 20 septembre 2022.

V.2.3.a. Analyse du bruit ambiant dans la bande filtrée [50Hz-40kHz]

La Figure 28 montre l'évolution des niveaux sonores entre 50 Hz et 40 kHz à la station R4. La courbe rouge superposée montre l'évolution du niveau de bruit permanent ou « pied de bruit ». Les courbes des autres stations sont disponibles en annexe de ce rapport. Le bruit permanent (ou pied de bruit) fluctue entre 108 et 120 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ pour les stations R2 et R7, et entre 103 et 115 dB pour la station R3. L'hydrophone de la station R4 est quant à lui moins soumis aux effets de marée et voit son pied de bruit fluctuer aux alentours de 100 et 110 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$. A l'identique des autres saisons, les effets météorologiques sont les contributeurs majoritaires au bruit permanent, à savoir principalement la vitesse du vent pour les fréquences allant jusqu'à 8 kHz, comme illustré dans la Figure 29. Le bruit permanent mesuré en R4 fluctue d'environ 2 dB de façon journalière : ce phénomène est probablement causé par l'activité des organismes benthiques, qui tend à être nocturne.

Le paysage sonore est ponctuellement dominé par des émergences anthropiques courtes et intenses, correspondant aux passages proches de navires. Ces derniers font émerger les niveaux sonores de 15 dB à plus de 30 dB, résultant à des niveaux absolus allant jusqu'à un maximum de 150 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$. On relève en moyenne 6 événements acoustiquement significatifs par jour au niveau de la station R4. La Figure 30 montre la répartition horaire des émergences anthropiques détectées au niveau de la station R4, qui est concentrée entre 06h et 15h UTC. Le comptage des événements acoustiquement significatifs pour les autres stations est impossible en raison du traitement appliqué aux données (cf. V.1.).

La Figure 31 illustre, par un spectrogramme, le bruit perçu par le capteur de la station R4 dans la nuit du 08 Juillet 2022. Ce moment est considéré comme à faible perturbation anthropique (niveau dans la bande filtrée [50Hz-40kHz] de 105 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$). L'activité des organismes benthiques est présente entre 4 et 10 kHz et visible sur le spectrogramme par les traits verticaux jaunes. En dehors de cette activité, aucune source sonore ne semble émerger significativement.

En contraste, la Figure 32 correspond au spectrogramme d'un passage de navire très proche du système acoustique déployé au niveau de la station R4, le 23 Juin 2022 :

- ✓ Le navire est proche du capteur au début de la fenêtre d'étude avec un niveau sonore de 130 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$. Le bruit émerge du bruit permanent sur toute la bande de fréquence [50 Hz ; 10kHz]. Son intensité augmente au fur et à mesure que la distance navire/hydrophone décroît, avec des émergences sonores en frange (effet doppler);
- ✓ Au minimum de distance (CPA), une augmentation courte du niveau sonore est observée jusqu'à 150 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$. Cette augmentation est étendue en fréquence avec un maximum d'énergie entre 0 et 1 kHz ;
- ✓ Lors de l'éloignement, le niveau décroît avec la distance. Une diminution brève du niveau sonore est visible lorsque le navire semble couper ses moteurs aux alentours de 06 :42 :10 UTC.

Les Tableau 25, Tableau 26, Tableau 27 et Tableau 28 donnent la répartition statistique du bruit dans la bande filtrée [50Hz-40kHz] durant l'été 2022, pour chaque station :

- ✓ Les niveaux médians (50% du temps) sur la période sont de 112.3 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R2), 107.2 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3), 105.7 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R4) et 111.4 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R7). Ces niveaux sont en légère diminution (-3.2dB) pour la station R3 et en légère augmentation (+2.4dB) pour la station R4.
- ✓ Les niveaux maximum (percentile 1%) sur la période sont de 120.8 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R2), 121.4 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3), 122.6 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R4) et 121.8 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R7). En comparaison des niveaux sonores relevés au printemps sont en hausse à la station R4 (+5.4dB) et en baisse (-4.5 et -6.3dB) aux stations R2 et R3.

La Figure 33 permet de mettre en regard les statistiques des niveaux sonores mesurés et la densité de navires issue des données AIS uniquement, dans le périmètre d'étude :

- ✓ En comparaison du printemps 2022, les stations R2 et R3 semblent moins fréquentées par les navires de pêche lors de l'été 2022. Ce phénomène explique la baisse des niveaux sonores observée lors de l'été 2022 ;
- ✓ La station R4 semble davantage fréquentée (tous navires) que lors du printemps et de l'hiver 2022. En effet, la navigation de plaisance côtière est accrue, et fait augmenter les niveaux sonores lors de l'été 2022 ;
- ✓ La station R7 voit une fréquentation stable (tous navires) en comparaison du printemps 2022.

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

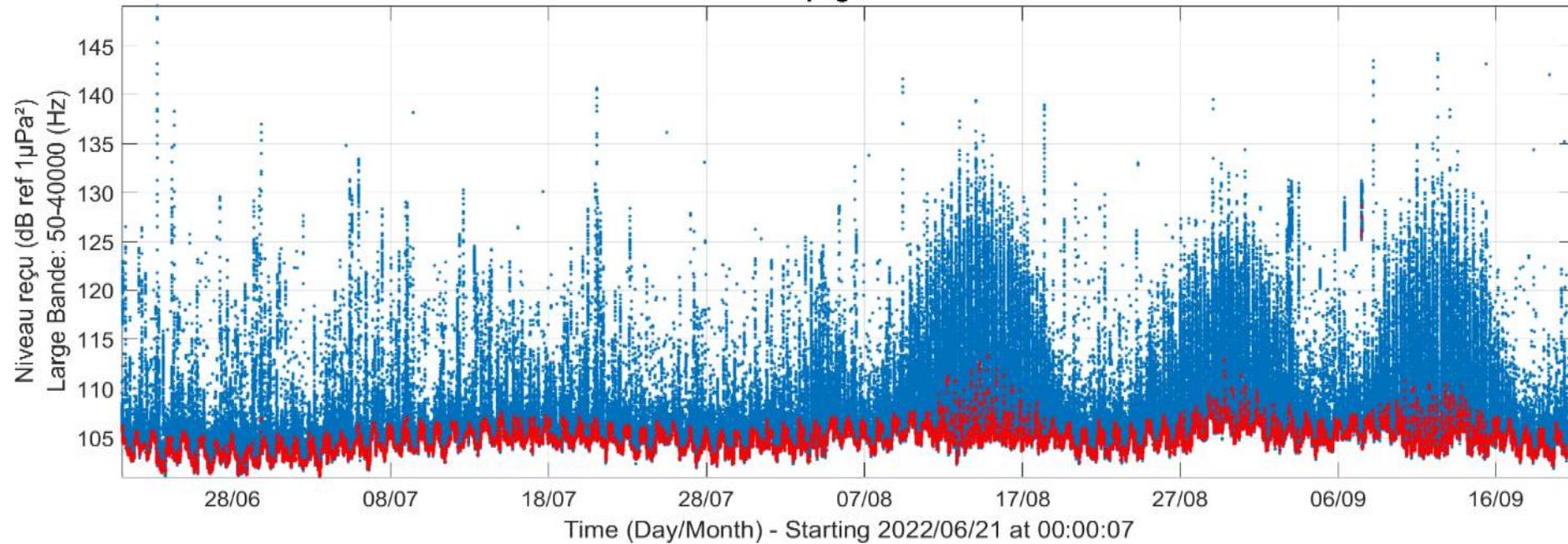


Figure 28 : Evolution du niveau dans la bande filtrée [50Hz-40kHz] au point R4 en fonction du temps, lors de l'été 2022. Les courbes pour les autres stations sont disponibles en annexe.

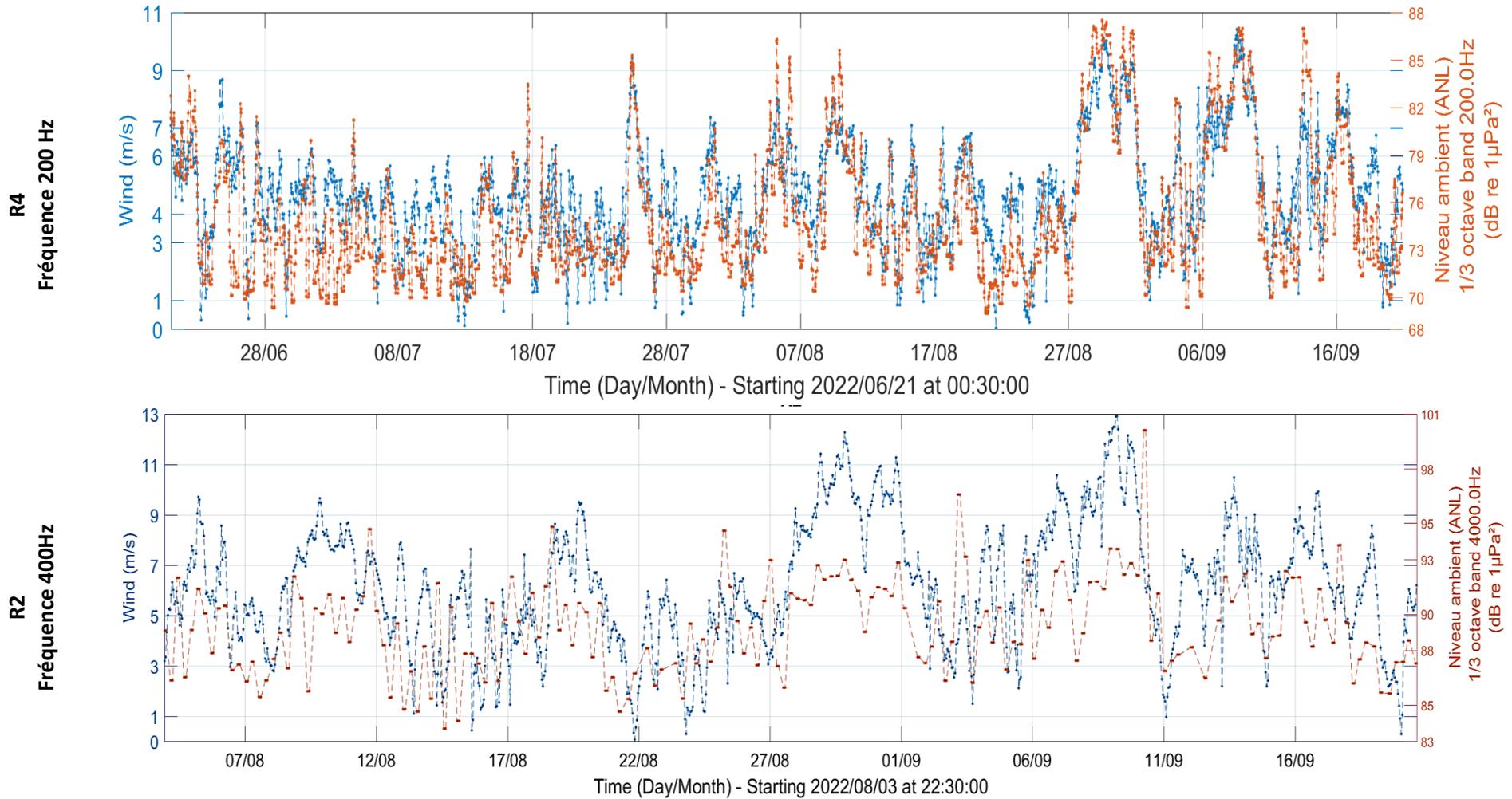


Figure 29 : Corrélation du bruit permanent (orange) avec le vent (bleu) au niveau des stations R4 et R2 lors de l'été 2022.

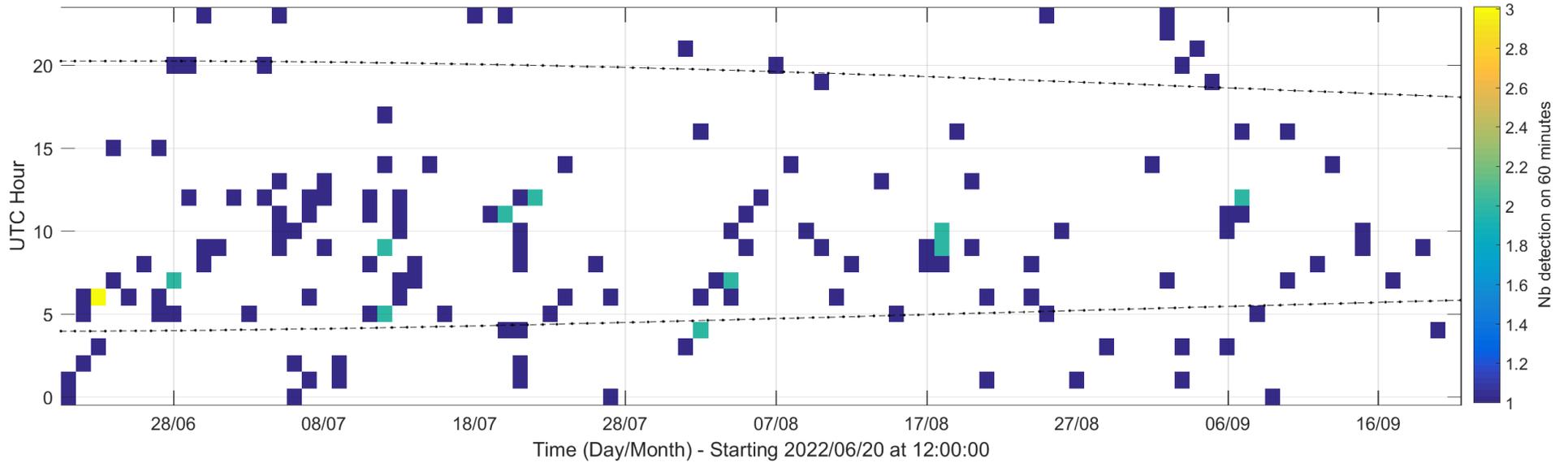


Figure 30 : Répartition horaire des émergences anthropiques détectées lors de l'été 2022, au niveau de la station R4.

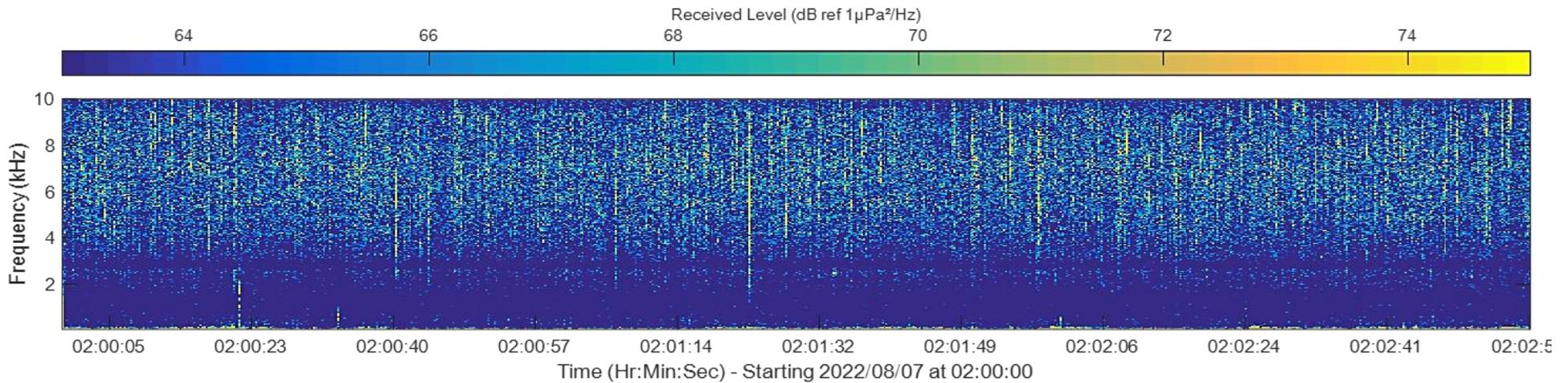


Figure 31 : Spectrogramme illustratif de l'activité des organismes benthiques à proximité de la station R4, lors de l'été 2022.

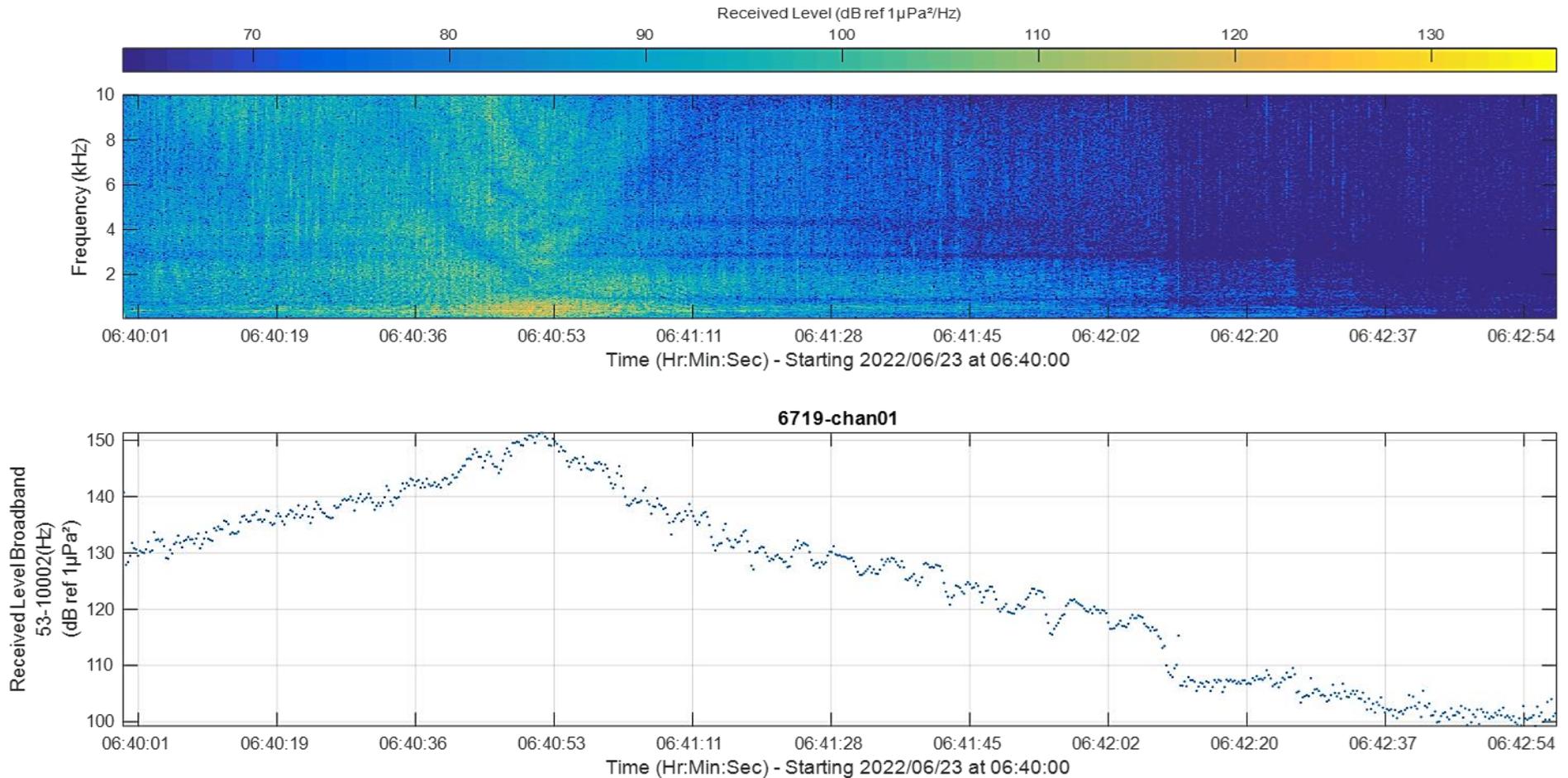


Figure 32 : En haut, spectrogramme illustratif d'un passage de navire au niveau de la station R4 le 23 Juin 2022. En bas, évolution du niveau sonore (50Hz-10kHz, exprimé en dB ref 1 μ Pa²) en fonction du temps.

Tableau 25 : Statistiques des niveaux sonores (50Hz -40 kHz) à la station R2 (exprimés en dB ref 1µPa²) durant la saison été 2022.

	Percentile (%)	Niveau minimum et très courant				Niveau Médian			Niveau maximum et très rare	
		100	99	90	75	50	25	10	1	0
R2	Toute la période	108.1	108.7	109.9	110.7	112.3	114.7	117.2	120.8	123.2
	Jour	108.3	108.9	110.1	110.7	112.3	114.7	117.2	120.9	123.2
	Nuit	108.1	108.5	109.6	110.7	112.2	114.4	116.5	119.8	121.2
	Ecart Jour/Nuit	0.3	0.4	0.5	0	0	0.3	0.8	1.1	2

Tableau 26 : Statistiques des niveaux sonores (50Hz -40 kHz) à la station R3 (exprimés en dB ref 1µPa²) durant la saison été 2022.

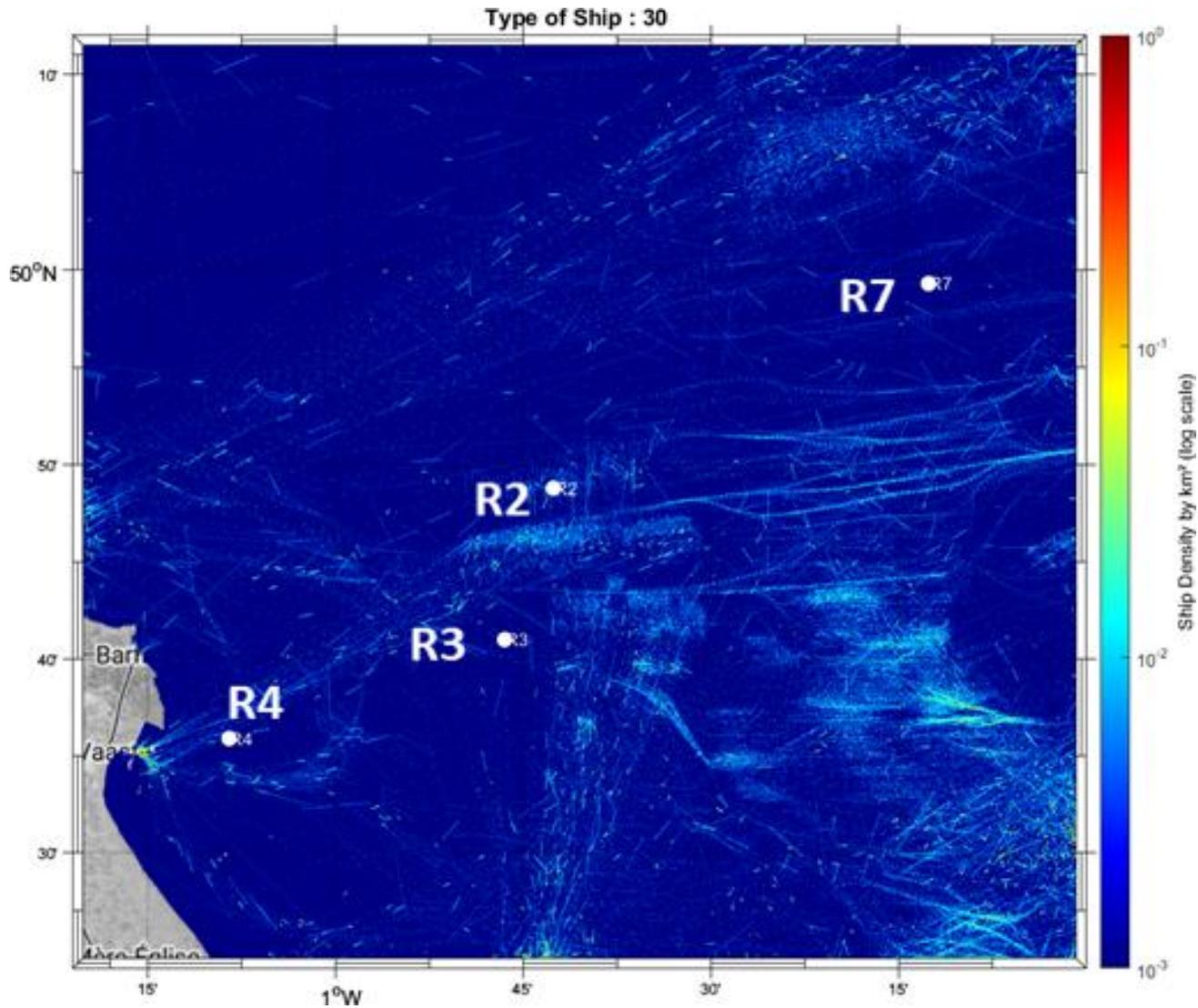
	Percentile (%)	Niveau minimum et très courant				Niveau Médian			Niveau maximum et très rare	
		100	99	90	75	50	25	10	1	0
R3	Toute la période	102.2	103.2	104.8	106	107.2	108.8	111.5	121.4	133
	Jour	102.9	103.4	104.9	106.1	107.3	108.6	111.2	116.1	128.7
	Nuit	102.2	102.4	104.5	105.8	106.8	108.4	110	128.3	133
	Ecart Jour/Nuit	0.7	0.9	0.4	0.2	0.5	0.2	1.2	-12.2	-4.2

Tableau 27 : Statistiques des niveaux sonores (50Hz -40 kHz) à la station R4 (exprimés en dB ref 1µPa²) durant la saison été 2022.

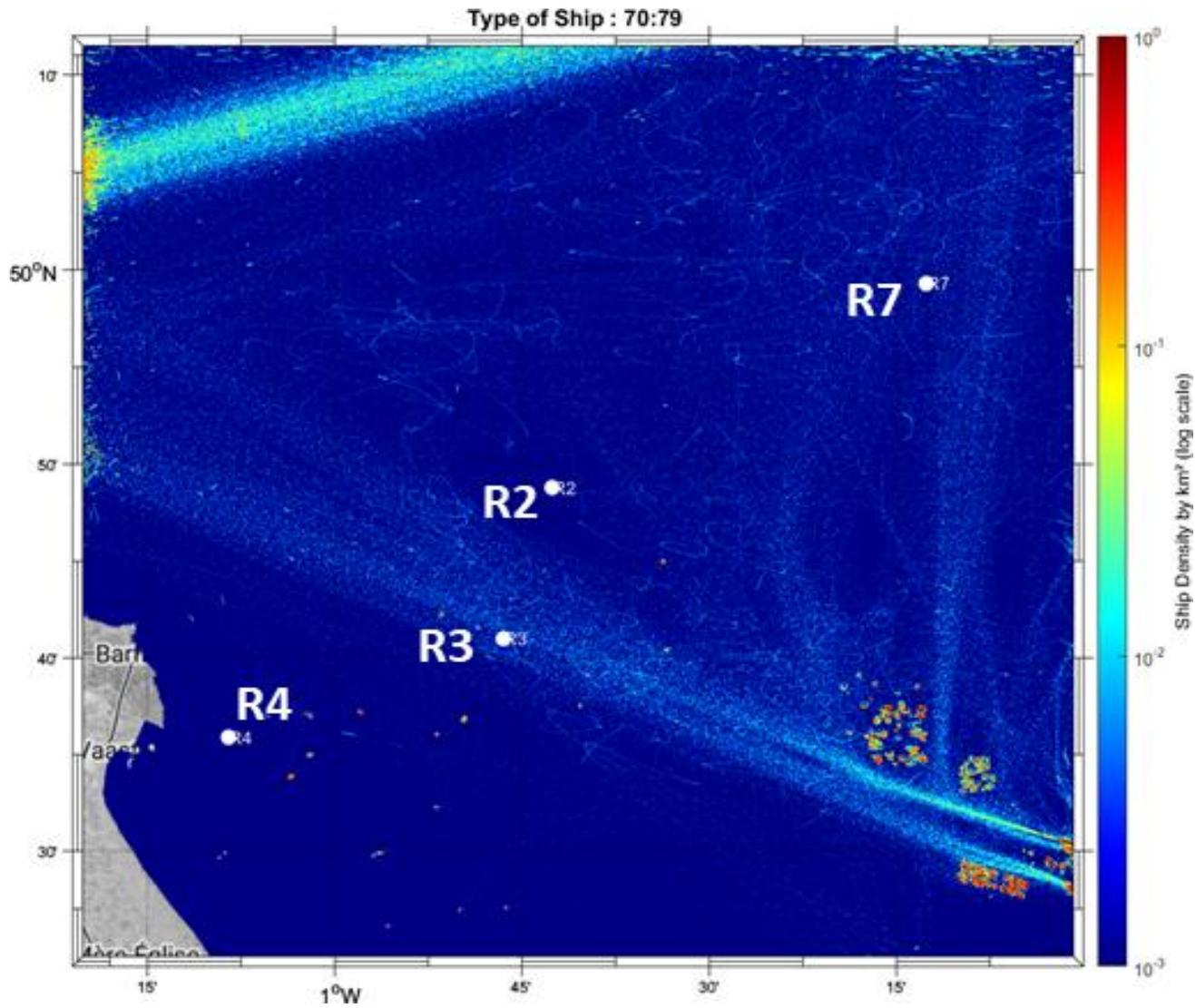
	Percentile (%)	Niveau minimum et très courant				Niveau Médian			Niveau maximum et très rare	
		100	99	90	75	50	25	10	1	0
R4	Toute la période	101	102.5	103.8	104.6	105.7	107.1	110.6	122.6	149.1
	Jour	101	102.3	103.5	104.2	105.1	106.3	110.2	122.1	149.1
	Nuit	101.1	103.6	104.8	105.6	106.5	107.7	111.6	123.8	140.6
	Ecart Jour/Nuit	-0.2	-1.3	-1.3	-1.4	-1.4	-1.3	-1.4	-1.7	8.4

Tableau 28 : Statistiques des niveaux sonores (50Hz -40 kHz) à la station R7 (exprimés en dB ref 1µPa²) durant la saison été 2022.

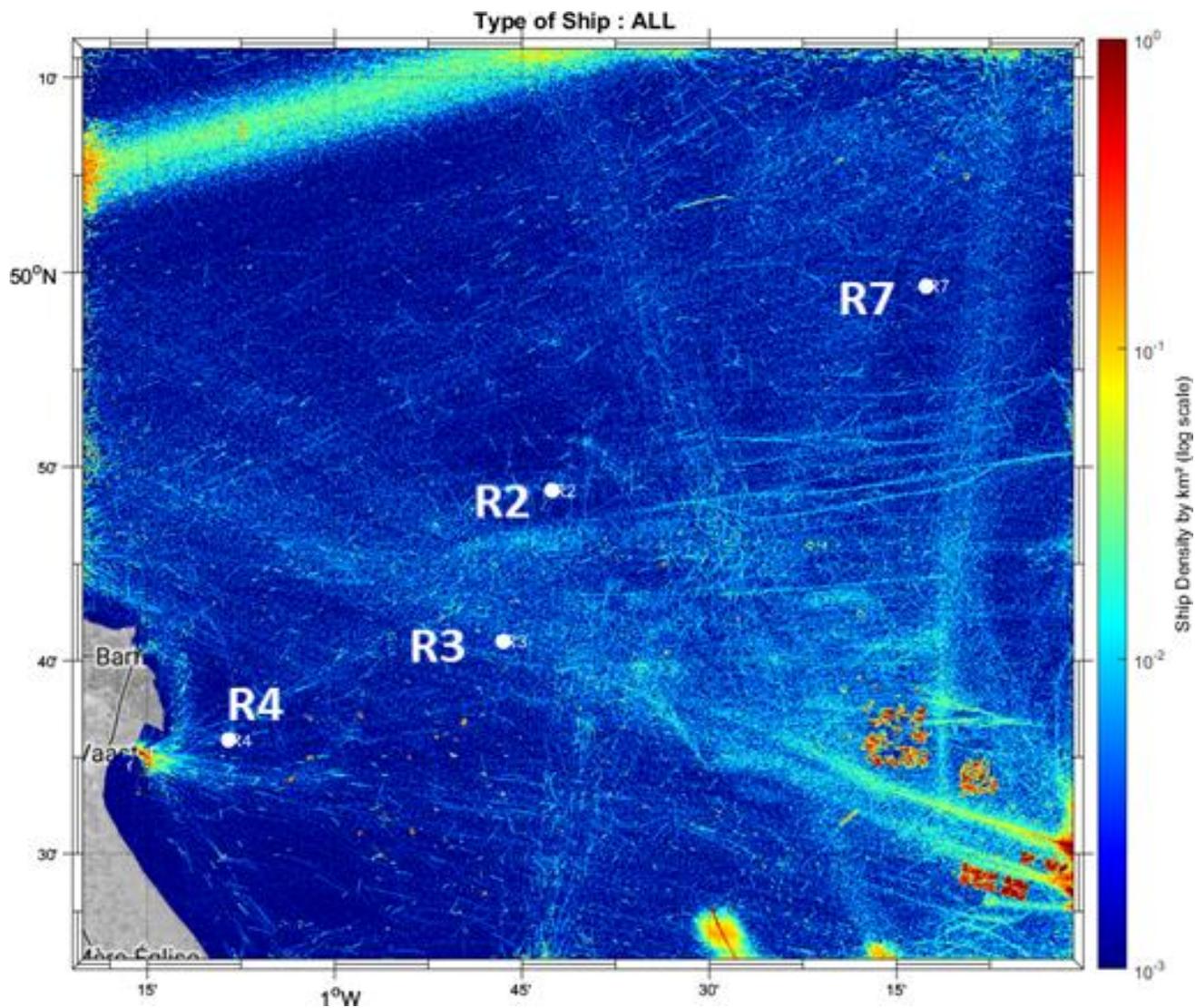
	Percentile (%)	Niveau minimum et très courant				Niveau Médian			Niveau maximum et très rare	
		100	99	90	75	50	25	10	1	0
R7	Toute la période	107	108.1	109.5	110.3	111.4	112.6	114.4	121.8	131.1
	Jour	107.1	108.2	109.5	110.3	111.3	112.6	114.6	121.3	131.1
	Nuit	107	108.1	109.5	110.3	111.3	112.3	114	121.6	127.7
	Ecart Jour/Nuit	0.2	0.1	0	0	0	0.3	0.7	-0.2	3.4



Navires de pêche (basé sur l'AIS)



Cargos



Tous les navires

Figure 33 : Densité de navires dans le périmètre d'étude lors de l'été 2022 (du 21/06/2022 au 20/09/2022).

V.2.3.b. Analyse du bruit ambiant par bandes de fréquences

Les Tableau 17 et Tableau 18 constituent le descripteur 11 de la DCSMM et donnent la répartition statistique des niveaux sonore (dB ref $1\mu\text{Pa}^2$, tiers d'octave) relevés aux fréquences 63 et 125 Hz, pour chaque station.

Concernant la fréquence 63 Hz :

- ✓ Les niveaux médians (50% du temps) sur la période sont de 96.7 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R2), 87.8 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3), 75.2 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R4) et 91.5 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R7). La station R2 apparaît comme la plus bruyante en comparaison des autres stations tandis que le niveau sonore médian de la station R4 est moins élevé (-15 à -20 dB) en comparaison des autres stations. Ce phénomène est dû à la plus faible interaction de la structure porteuse du capteur (cage) avec la colonne d'eau.
- ✓ Les niveaux maximum (percentile 1%) sur la période sont de 112.0 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R2), 110.6 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3), 91.1 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R4) et 112.2 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R7).

Concernant la fréquence 125 Hz :

- ✓ Les niveaux médians (50% du temps) sur la période sont de 100.5 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R2), 97.4 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3), 81.5 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R4) et 98.5 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R7). A l'identique de la fréquence 63Hz, la station R2 apparaît comme la plus bruyante en comparaison des autres stations, tandis que la station R4 apparaît comme significativement moins bruyante (-15 à -19dB).
- ✓ Les niveaux maximum (percentile 1%) sur la période sont de 113.1 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R2), 121.5 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3), 96.5 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R4) et 105.2 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R7). Davantage fréquentée par la navigation commerciale, la station R3 apparaît également comme plus bruyante en comparaison des autres zones.

La partie gauche de la Figure 34 donne la répartition fréquentielle de l'énergie sonore en fonction de la zone d'étude :

- ✓ En basses fréquences, et dans les percentiles les plus forts (courbes vertes/violettes, percentiles inférieurs à 10%), les activités anthropiques sont visibles, notamment la propulsion des navires, qui crée une « bosse » de bruit significative autour de 100 Hz aux stations R2, R3 et R7. Les niveaux dans cette bande fréquentielle sont compris entre 90 et 95 dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ selon la station étudiée. Les bruits résiduels induits par le courant de marée accroissent légèrement les niveaux mesurés pour les fréquences inférieures à 100 Hz aux stations R2, R3 et R7 ;
- ✓ Pour les percentiles faibles à médians (courbes bleue/orange/ jaune, percentiles supérieurs ou égaux à 50%), les effets météorologiques et les bruits anthropiques se superposent en suivant les tendances des courbes de Wenz en pointillés gris (courbes de référence, Wenz, 1962) , qui montrent l'état de référence acoustique d'un océan soumis uniquement au bruit environnemental. Ce phénomène est visible entre 100 Hz et environ 2.5 kHz ;
- ✓ L'activité des organismes benthiques forme une bosse visible de 4 kHz à 20 kHz dans les percentiles faibles/médians (courbes bleues, oranges et jaunes). Des niveaux de l'ordre de 60 dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ sont mesurés aux quatre stations, et semblent en légère augmentation par rapport au printemps 2022.

Pour la station R4, la partie droite de cette figure montre les variations horaires des niveaux compris entre 355 Hz et 445 Hz (bande de fréquence représentative des activités anthropiques), ainsi qu'entre 8.9 kHz et 11 kHz. Cette représentation met alors en évidence un accroissement modéré, compris entre 1 et 2 dB dans une plage horaire répartie entre 06h et 12h UTC pour les niveaux compris entre 355 Hz et 445 Hz. Pour les niveaux compris entre 8.9 kHz et 11 kHz, une élévation allant de 1.5 à 2 dB est visible dans une tranche horaire répartie entre 18h et 04h UTC.

La Figure 35 trace la statistique des densités spectrales de puissance d'une période d'une période de 3 minutes correspondant à l'activité benthique captée à proximité de la station R4 (08 Juillet 2022, à gauche) et d'un

passage proche de navire au niveau de la station R4 (23 Juin 2022, à droite). Les niveaux sont exprimés en dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$. Ces périodes sont les mêmes que ceux considérés dans l'étude dans la bande filtrée [50Hz-40kHz]. Les deux bruits étudiés montrent des profils de bruit minimum (courbes bleues) proches. Le passage du navire à proximité de la station R4 émerge sur environ 50% de la fenêtre temporelle, avec des bosses de bruit visibles à 100, 200 et 300 Hz. Ce type de bruit est typique des embarcations à moteurs externe, de taille plus réduite (les navires de grande taille ont généralement une fréquence centrale en dessus de 100 Hz). Lorsque le navire est au plus proche du capteur (courbe rouge), le bruit du navire émerge sur toute la bande fréquentielle, avec un maximum de 133dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ à 100 Hz.

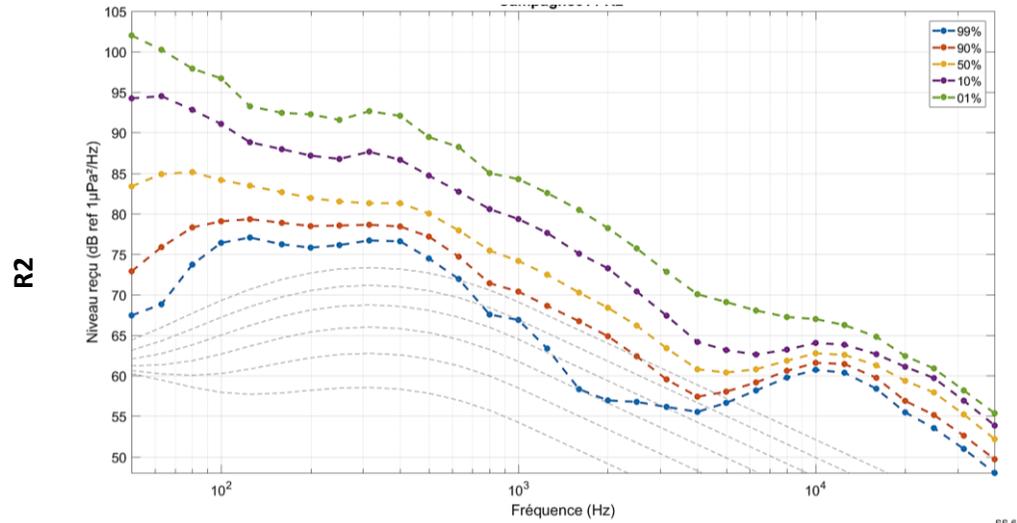
A l'identique des spectres du suivi longue durée, le bruit induit par l'activité des organismes benthiques émerge entre 4 et 20 kHz, avec des niveaux maximums de 70dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ dans cette bande fréquentielle.

Tableau 29 : Distribution statistique du bruit mesuré dans le tiers d'octave 63Hz, en fonction de la zone, pour la saison été 2022.

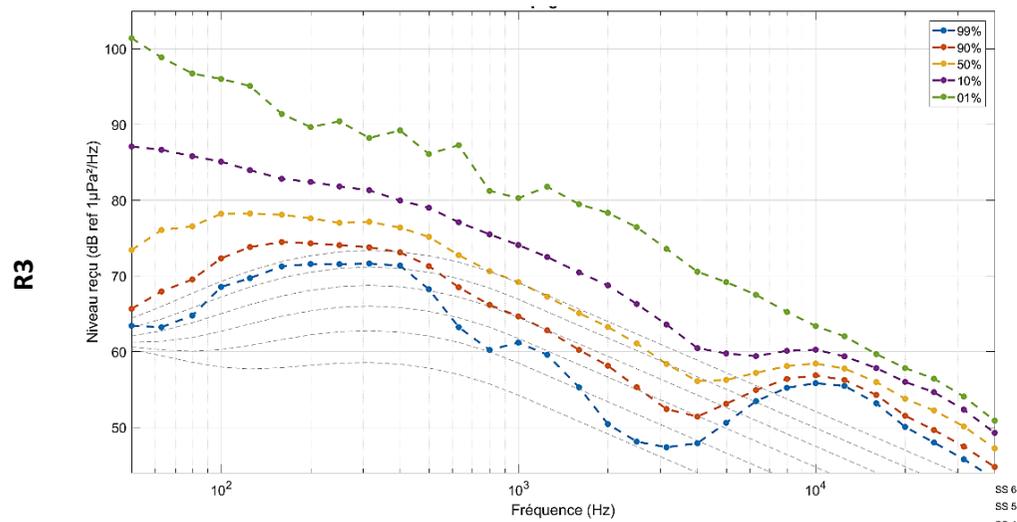
Percentile	(%)	100	99	90	75	50	25	10	1	0
R2	(dB ref 1 μ Pa ²)	77.9	80.6	87.6	91.5	96.7	102.4	106.3	112.0	116.8
R3	(dB ref 1 μ Pa ²)	72.5	75.0	79.7	83.2	87.8	93.0	98.4	110.6	126.4
R4	(dB ref 1 μ Pa ²)	71.5	72.3	73.1	73.8	75.2	77.7	81.5	91.1	113.3
R7	(dB ref 1 μ Pa ²)	76.4	80.1	84.7	87.6	91.5	95.9	100.7	112.2	123.1

Tableau 30 : Distribution statistique du bruit mesuré dans le tiers d'octave 125Hz, en fonction de la zone, pour la saison été 2022.

Percentile	(%)	100	99	90	75	50	25	10	1	0
R2	(dB ref 1 μ Pa ²)	90.0	91.8	94.1	95.7	98.2	100.7	103.6	108.0	112.0
R3	(dB ref 1 μ Pa ²)	81.9	84.5	88.6	90.6	93.0	95.8	98.7	109.9	122.4
R4	(dB ref 1 μ Pa ²)	69.4	70.1	71.2	72.6	75.2	79.6	84.2	90.9	111.7
R7	(dB ref 1 μ Pa ²)	90.2	91.8	94.3	95.8	97.4	99.4	101.4	108.7	118.3



SS 6



SS 6

SS 5

SS 4

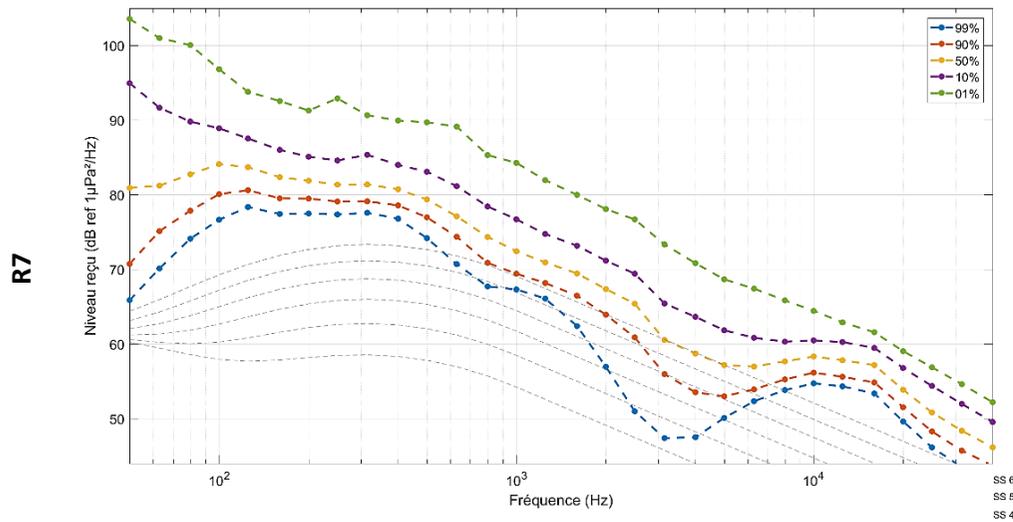
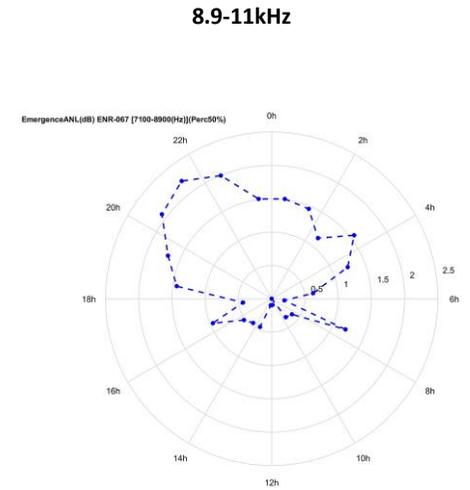
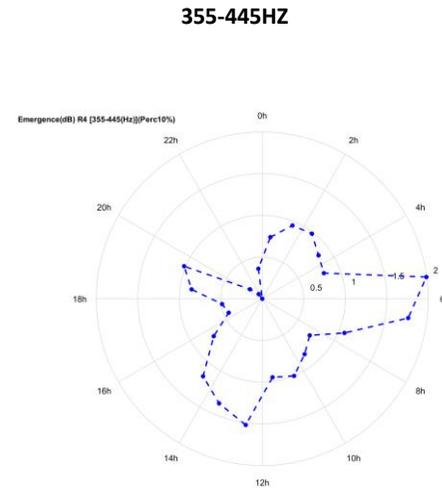
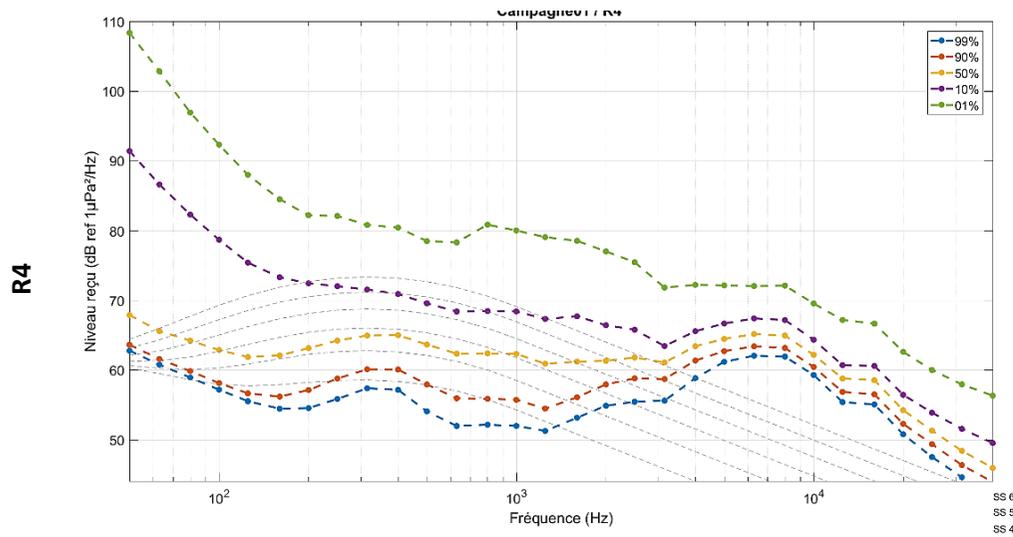
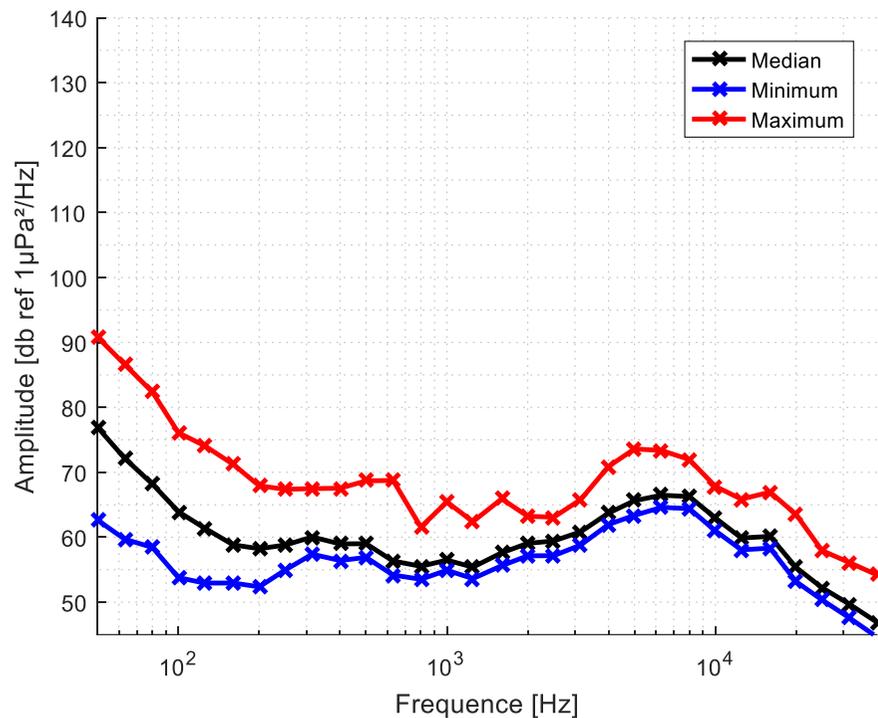


Figure 34 : Répartition fréquentielle de l'énergie acoustique mesurée lors de l'été 2022 (à gauche). Répartition horaire des niveaux sonores mesurés lors de l'été 2022 dans la bande 355-445Hz et 8.9-11.0kHz (à droite).

Activité benthique en R4



Passage de navire proche de R4 le 23/06/2023

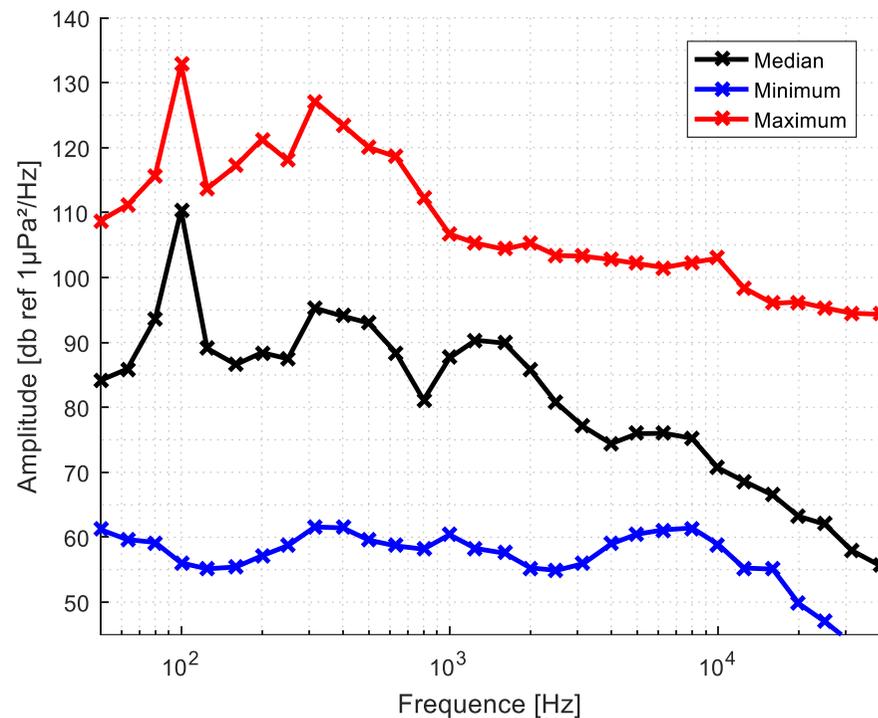


Figure 35 : Densités spectrales de puissance (exprimées en dB ref 1µPa²/Hz) de périodes représentatives choisies lors de l'été 2022. A gauche : activité benthique à proximité de la station R4. A droite : passage de navire le 23/06/2023 à proximité de la station R4.

V.2.4. Période Automne (du 21/09/2022 au 21/12/2022)

L'enregistreur acoustique déployé au niveau de la station R3 n'a pas pu être récupéré à la fin de la campagne n°03 (03/08 au 29/11/2022). Dans ce contexte, l'analyse pour la période automnale est réalisée sur la période restreinte du 05/12 au 21/12/2022 pour cette station.

V.2.4.a. Analyse du bruit ambiant dans la bande filtrée [50Hz-40kHz]

La Figure 36 montre l'évolution des niveaux sonores entre 50 Hz et 40 kHz à la station R4. La courbe rouge superposée montre l'évolution du niveau de bruit permanent ou « pied de bruit ». Les courbes des autres stations sont disponibles en annexe de ce rapport.

Le bruit permanent (ou pied de bruit) fluctue entre 105 et 120 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ pour les stations R2, R3 et R7. L'hydrophone de la station R4 voit son pied de bruit fluctuer entre 95 et 108 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ probablement en raison du positionnement du système dans une cage de fond. A l'identique des autres suivis, les effets météorologiques sont les contributeurs majoritaires au bruit permanent, à savoir principalement la vitesse du vent pour les fréquences allant jusqu'à 8kHz, comme illustré dans la Figure 37. Par exemple, un coup de vent dans la soirée du 30 Septembre au 1^{er} Octobre 2022 avec une vitesse d'environ 16 m/s fait augmenter le bruit permanent à 4 kHz de 5 dB (89 à 94 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$) à proximité de la station R7. Ce moment est illustré dans la Figure 38, qui montre une émergence étendue en fréquence visible entre 0 et environ 3 kHz lorsque le vent est au maximum de vitesse.

Les passages de navires dominant ponctuellement le bruit permanent, et font émerger les niveaux sonores jusqu'à un maximum de 151.7 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$. On relève en moyenne 5 événements acoustiquement significatifs par jour au niveau de la station R4, soit une fréquentation légèrement en baisse par rapport à l'été 2022. La Figure 39 montre la répartition horaire des émergences anthropiques détectées au niveau de la station R4, qui ne montre pas de tendance significative. Le comptage des événements acoustiquement significatifs pour les autres stations est impossible en raison du traitement appliqué aux données.

La station R4 est également témoin de potentiels travaux à proximité du capteur qui ont lieu du 31 Octobre au 02 Novembre 2022. Ces travaux d'origine inconnue (le navire « ARGO » est vu à proximité du capteur sur cette période temporelle) font augmenter le niveau sonore dans la bande filtrée [50Hz-40kHz] de 110 à 120 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ pour toute la durée des travaux, comme illustré dans la partie basse de la Figure 40. La partie haute de cette figure trace le spectrogramme des travaux sur une période de temps plus courte (3 min), dans la nuit du 02 Novembre 2022. Le bruit induit par les travaux est composé d'une émergence étendue dans les basses fréquences (<1kHz) et d'une composante harmonique avec des raies (signaux acoustiques continus mono-fréquentiels) à 1 et 3 kHz.

Les Tableau 31, Tableau 32, Tableau 33 et Tableau 34 donnent la répartition statistique du bruit dans la bande filtrée [50Hz-40kHz] durant l'automne 2022, pour chaque station :

- ✓ Les niveaux médians (50% du temps) sur la période sont de 113.5 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R2), 110.7 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3), 106.2 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R4) et 111.7 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R7). Hormis une augmentation modérée (+3.5dB, équivalent au printemps 2022) au niveau de la station R3, ces niveaux sont proches de ceux mesurés lors de l'été 2022.
- ✓ Les niveaux maximum (percentile 1%) sur la période sont de 125.4 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R2), 125.2 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3), 120.9 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R4) et 119.9 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R7). Ces niveaux sont en augmentation au niveau des stations R2 et R3, et reviennent à des valeurs proches de celles rencontrées lors du printemps 2022.

La Figure 41 permet de mettre en regard les statistiques des niveaux sonores mesurés et la densité de navires issue des données AIS uniquement, dans le périmètre d'étude. En comparaison de l'été 2022, les stations R2 et R3 semblent plus fréquentées par les navires de pêche, avec des cartes proches du printemps 2022. Ce



*Suivi par acoustique passive du bruit ambiant et de la
fréquentation des mammifères marins dans le cadre du parc
éolien en mer de Normandie*

Etat de référence

Référence : QO.20210225.10.RAP.001.05A

phénomène explique alors l'augmentation des niveaux au percentile 1% pour ces stations, qui reviennent aux niveaux mesurés lors du printemps 2022.

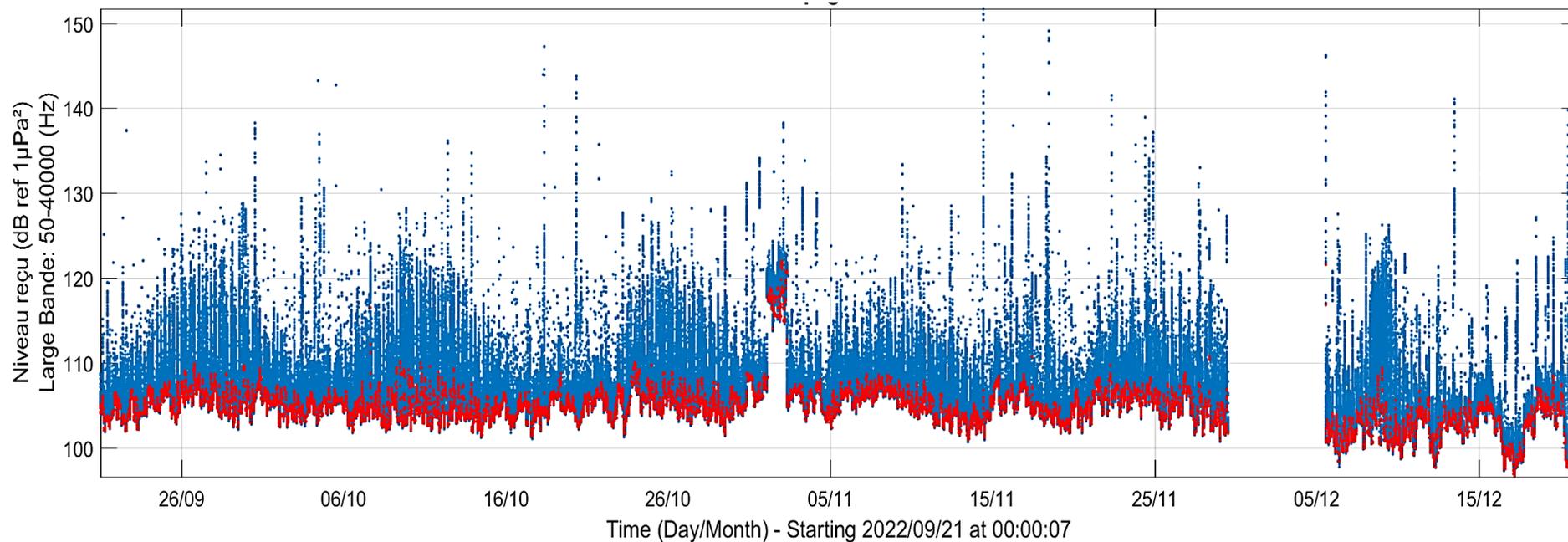


Figure 36 : Evolution du niveau dans la bande filtrée [50Hz-40kHz] au niveau de la station R4 en fonction du temps, lors de l'automne 2022. Les courbes pour les autres stations sont disponibles en annexe.

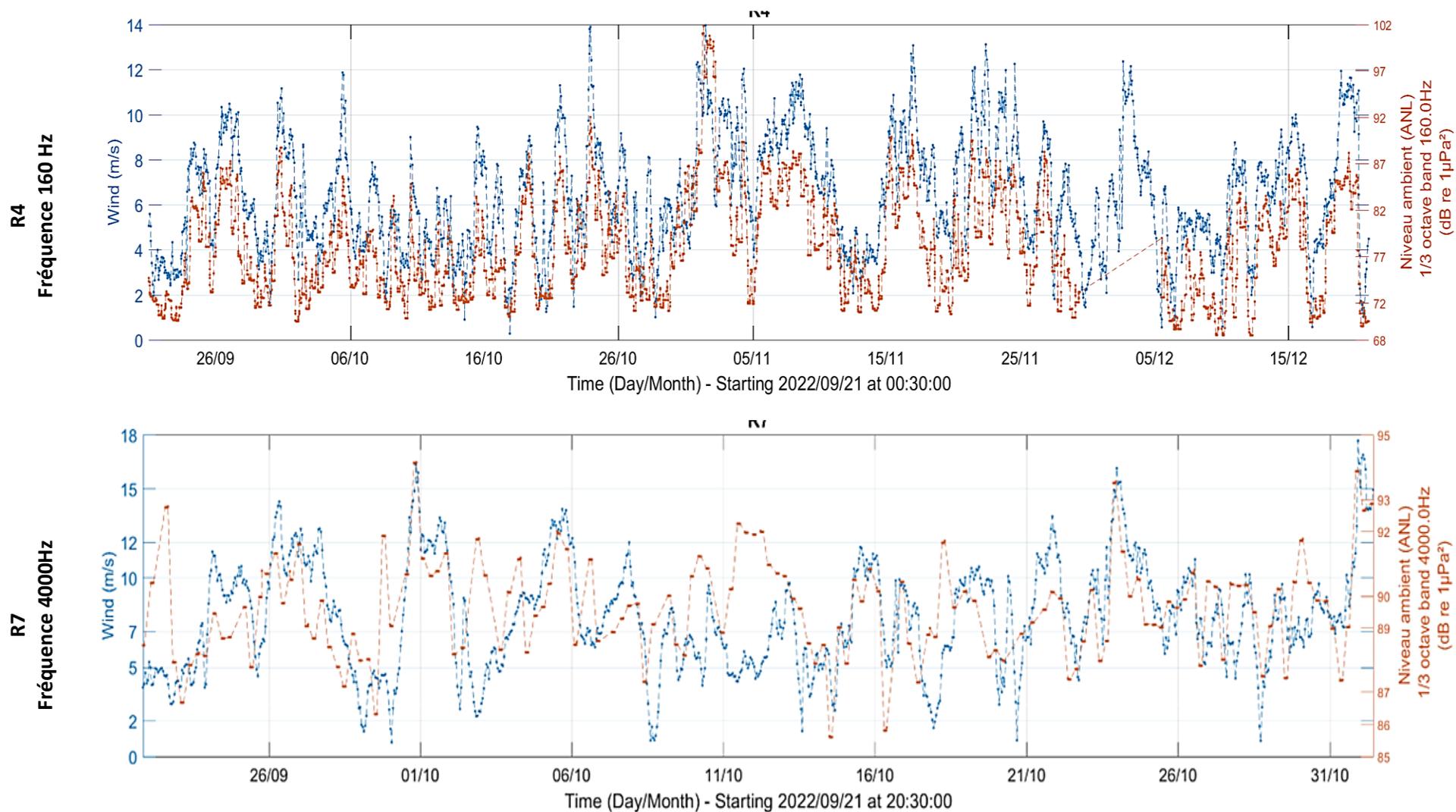


Figure 37 : Corrélation du bruit permanent (orange) avec le vent (bleu) au niveau des stations R4 et R7 lors de l'automne 2022.

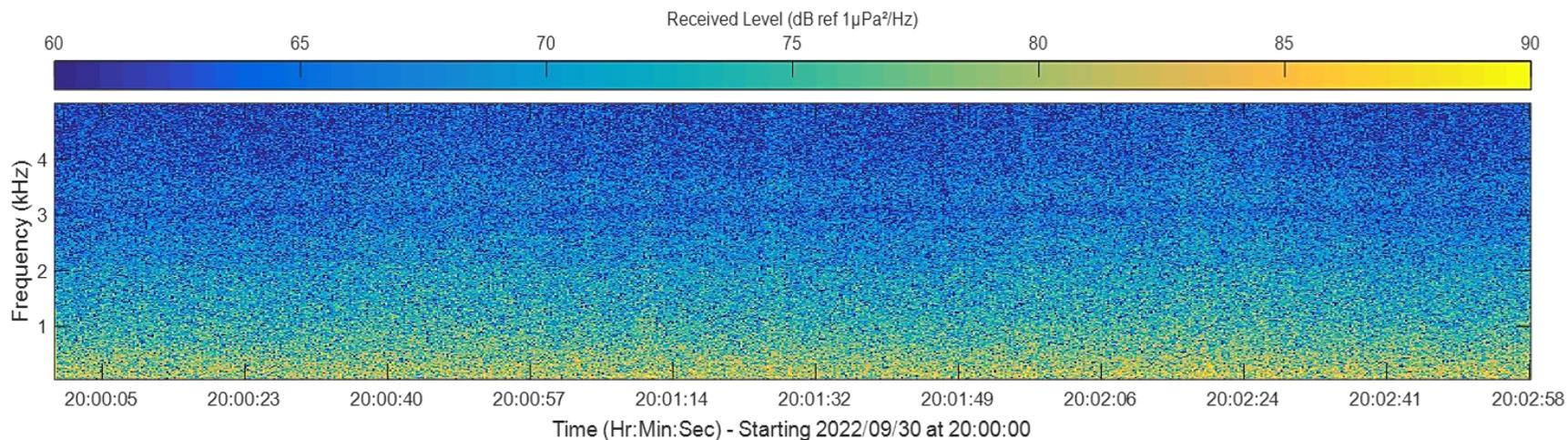


Figure 38 : Spectrogramme illustratif d'un coup de vent dans la soirée du 30 Septembre 2022, à proximité de la station R7.

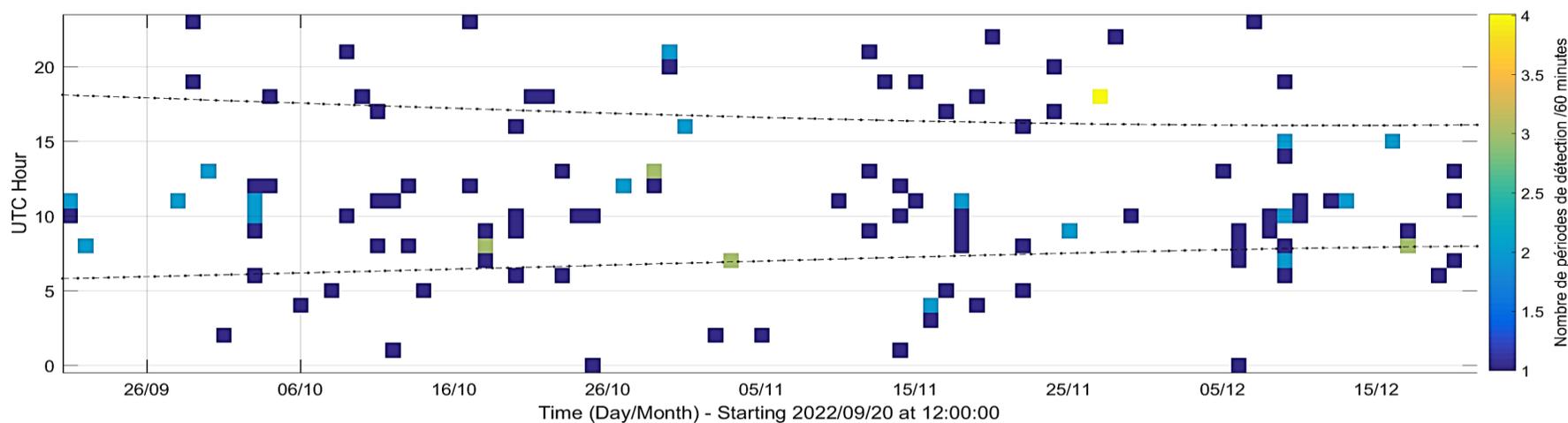


Figure 39 : Répartition horaire des émergences anthropiques détectées lors de l'automne 2022, au niveau de la station R4.

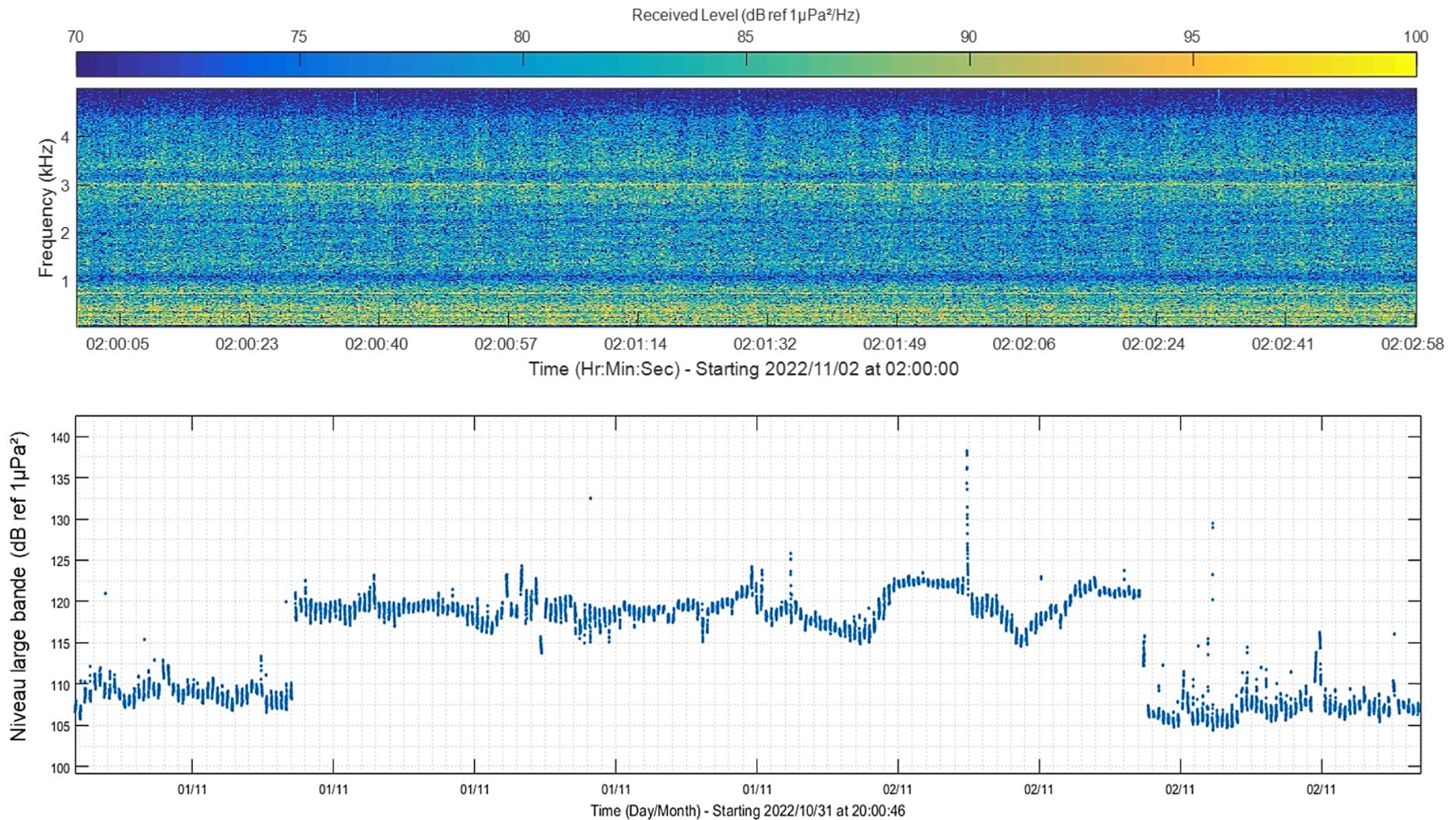


Figure 40 : En haut, spectrogramme illustratif d'une période des travaux captés à proximité de la station R4, du 31 Octobre au 02 Novembre 2022. En bas, évolution du niveau sonore dans la bande filtrée [50Hz-40kHz] (exprimé en dB ref 1 μPa^2) à la station R4 en fonction du temps sur les 3 jours de travaux.

Tableau 31 : Statistiques des niveaux sonores (50Hz -40 kHz) à la station R2 (exprimés en dB ref 1 μ Pa²) durant la saison automne 2022.

	Percentile (%)	Niveau minimum et très courant			Niveau Médian				Niveau maximum et très rare	
		100	99	90	75	50	25	10	1	0
R2	Toute la période	108.5	109.2	110	111.1	113.5	116.5	119.5	125.4	128.7
	Jour	109.8	109.9	110.8	113	115.5	117.3	119.9	126.9	128.7
	Nuit	108.5	109	109.7	110.7	113.4	115.4	119.6	124.8	127.3
	Ecart Jour/Nuit	1.3	0.9	1.1	2.3	2.1	1.9	0.3	2.1	1.4

Tableau 32 : Statistiques des niveaux sonores (50Hz -40 kHz) à la station R3 (exprimés en dB ref 1 μ Pa²) durant la saison automne 2022.

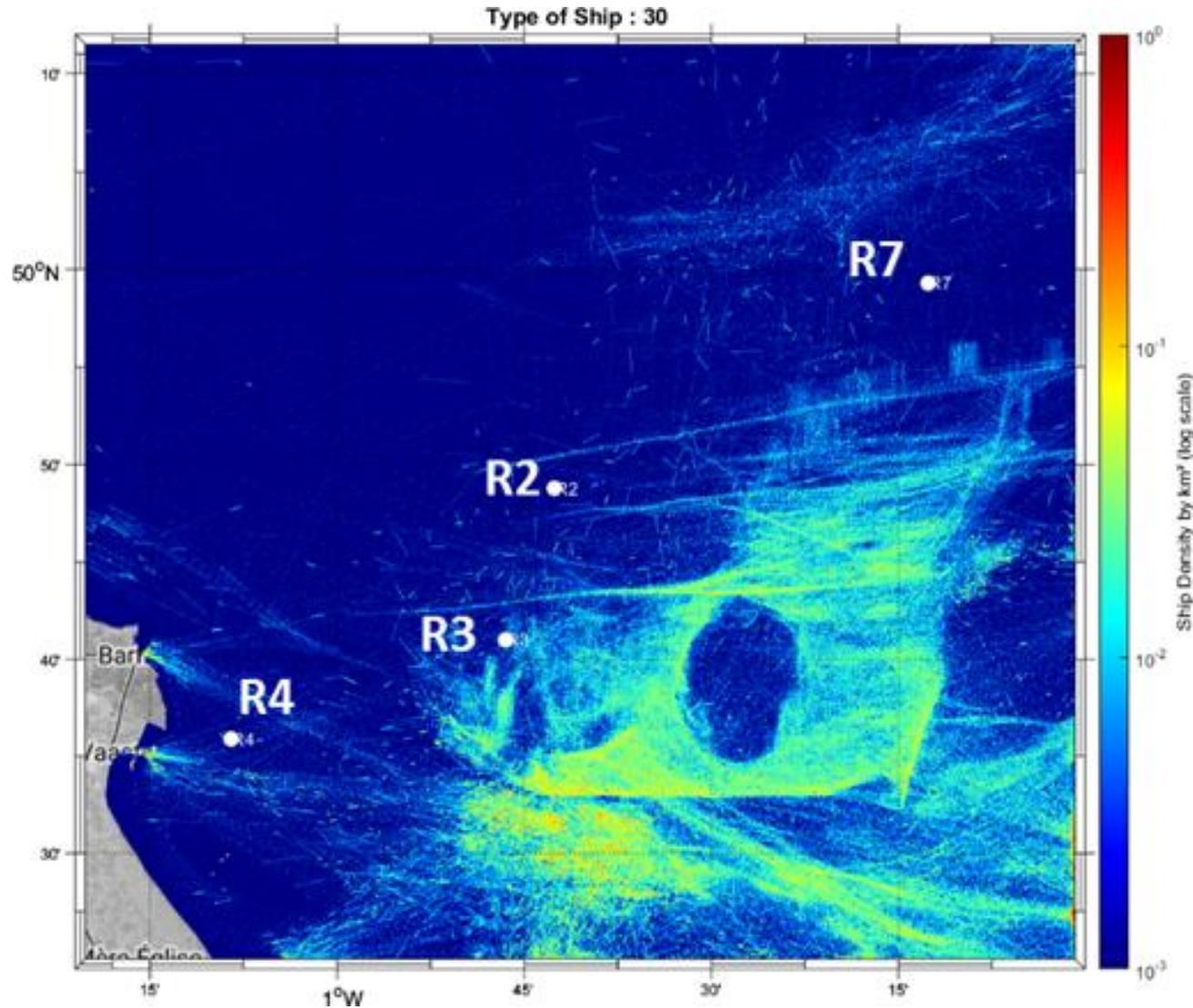
	Percentile (%)	Niveau minimum et très courant			Niveau Médian				Niveau maximum et très rare	
		100	99	90	75	50	25	10	1	0
R3	Toute la période	105.1	105.6	107.2	109	110.7	112.2	114.7	125.2	128.7
	Jour	105.4	105.6	107.4	108.9	110.9	112.5	116.2	126.9	128.4
	Nuit	105.1	105.6	107.1	109.1	110.6	112.1	114.7	124.8	128.7
	Ecart Jour/Nuit	0.3	0	0.2	-0.2	0.3	0.4	1.5	2.1	-0.3

Tableau 33 : Statistiques des niveaux sonores (50Hz -40 kHz) à la station R4 (exprimés en dB ref 1 μ Pa²) durant la saison automne 2022.

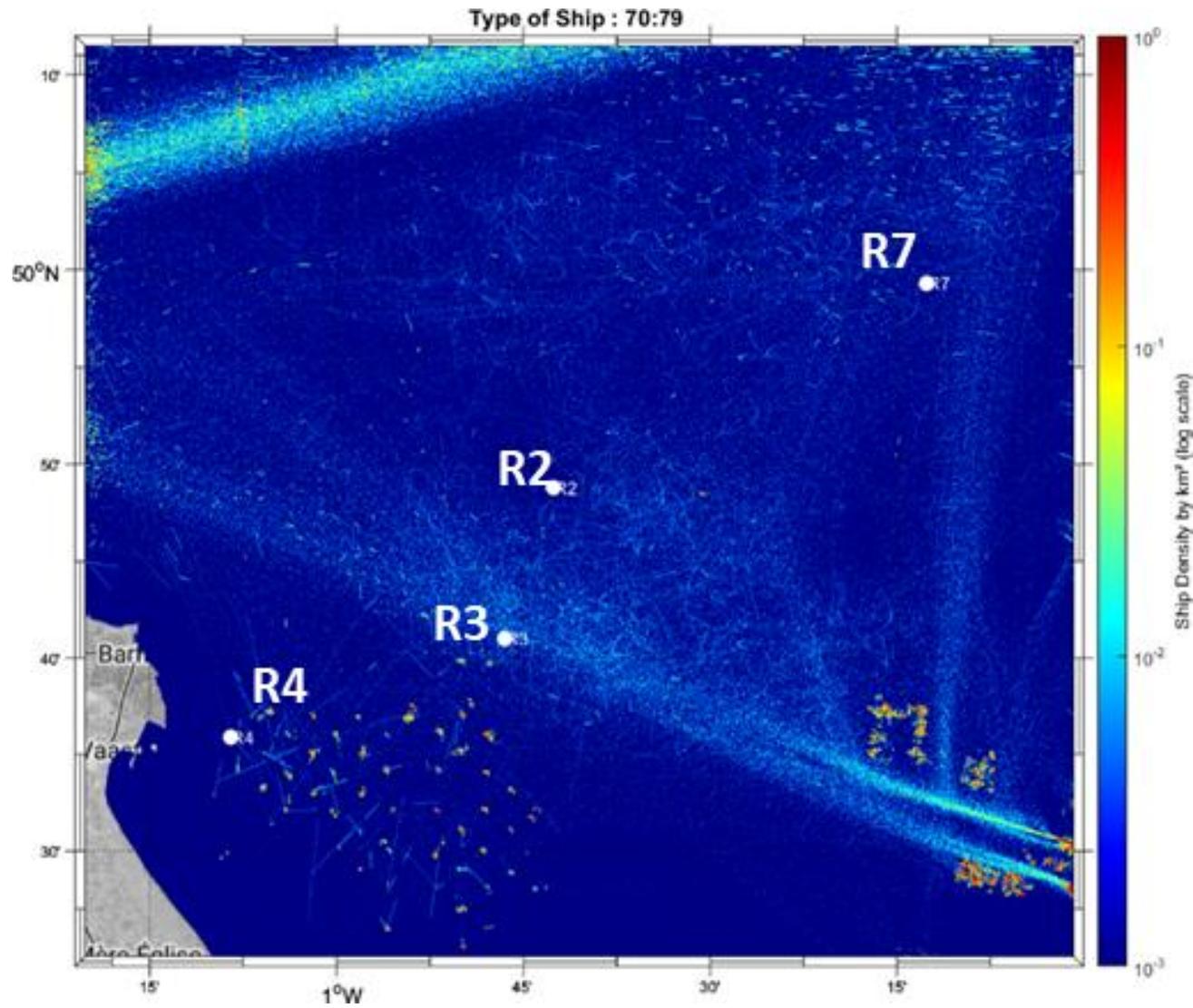
	Percentile (%)	Niveau minimum et très courant			Niveau Médian				Niveau maximum et très rare	
		100	99	90	75	50	25	10	1	0
R4	Toute la période	96.6	99.8	103.4	104.6	106.2	108.1	111.3	120.9	151.7
	Jour	97.1	99.6	103.3	104.4	105.9	108.1	111.9	121.1	151.7
	Nuit	96.6	99.9	103.4	104.8	106.4	108.1	110.9	120.5	138.2
	Ecart Jour/Nuit	0.5	-0.3	-0.1	-0.4	-0.5	-0.0	0.9	0.6	13.4

Tableau 34 : Statistiques des niveaux sonores (50Hz -40 kHz) à la station R7 (exprimés en dB ref 1 μ Pa²) durant la saison automne 2022.

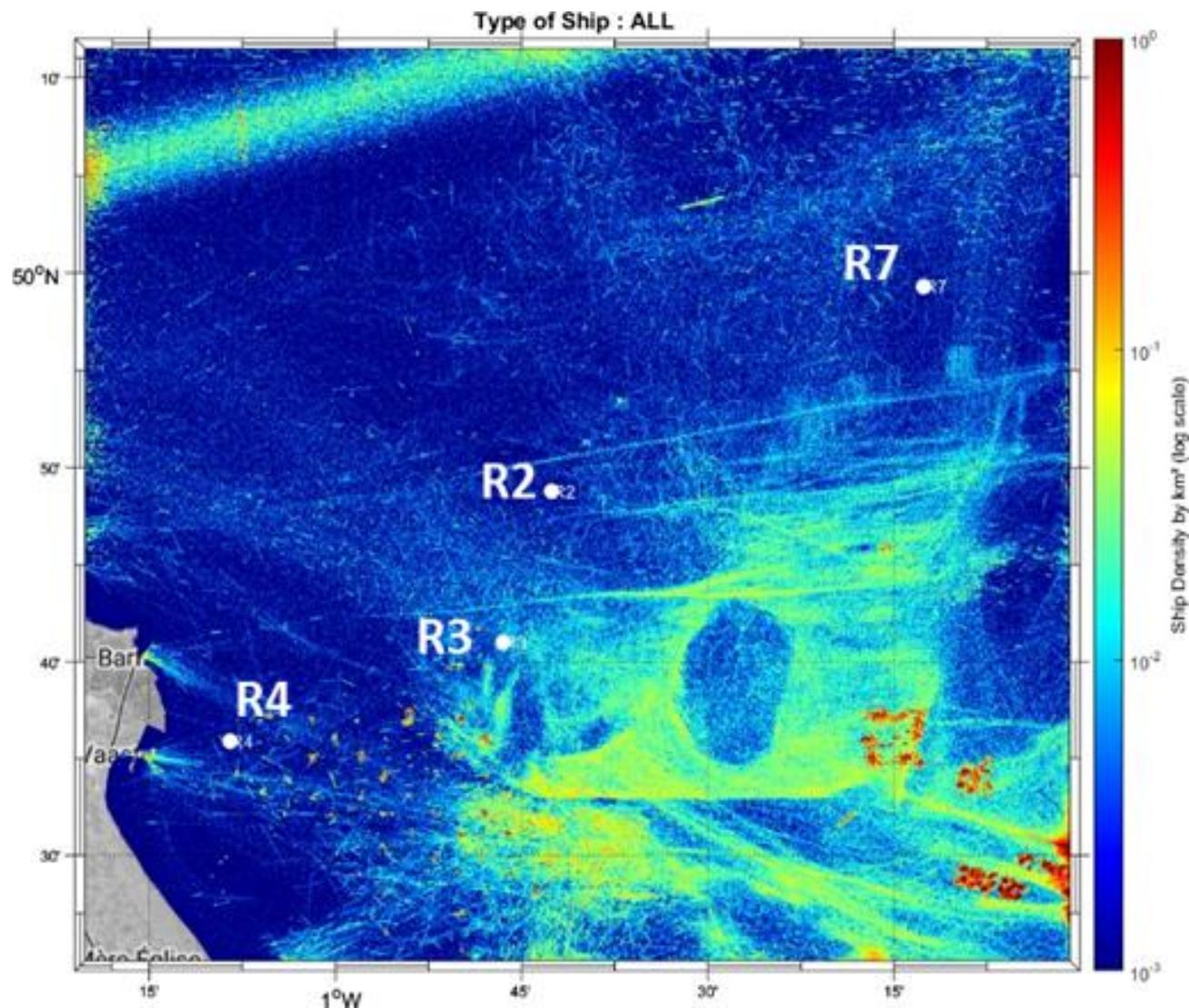
	Percentile (%)	Niveau minimum et très courant			Niveau Médian				Niveau maximum et très rare	
		100	99	90	75	50	25	10	1	0
R7	Toute la période	108.4	109.3	110.1	110.8	111.7	112.8	114.1	119.9	127.9
	Jour	108.4	108.9	110.2	111	111.9	112.9	114.5	117.7	123.8
	Nuit	109.1	109.5	110.1	110.6	111.5	112.7	113.8	122.8	127.9
	Ecart Jour/Nuit	-0.7	-0.6	0.1	0.3	0.3	0.2	0.6	-5	-4.2



Navires de pêche (basé sur l'AIS)



Cargos



Tous les navires

Figure 41 : Densité de navires dans le périmètre d'étude lors de l'automne 2022 (du 21/09/2022 au 20/12/2022).

V.2.4.b. Analyse du bruit ambiant par bande de fréquences

Les Tableau 35 et Tableau 36 constituent le descripteur 11 de la DCSMM et donnent la répartition statistique des niveaux sonore (dB ref $1\mu\text{Pa}^2$, tiers d'octave) relevés aux fréquences 63 et 125 Hz, pour chaque station.

Concernant la fréquence 63 Hz :

- ✓ Les niveaux médians sur la période sont de 98.4 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R2), 89.4 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3), 82.3 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R4) et 92.5 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R7). La station R2 apparait comme la plus bruyante en comparaison des autres stations. Le niveau sonore médian de la station R4 est moins élevé (-7 à -16dB) en comparaison des autres stations.
- ✓ Les niveaux maximum (percentile 1%) sur la période sont de 114.8 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R2), 119.9 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3), 109.4 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R4) et 112.7 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R7). Les stations R2 et R3, davantage fréquentées par les navires de pêches, apparaissent plus bruyantes.

Concernant la fréquence 125 Hz :

- ✓ Les niveaux médians sur la période sont de 100.5 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R2), 96.8 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3), 83.0 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R4) et 97.8 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R7). A l'identique de la fréquence 63 Hz, la station R2 apparait comme la plus bruyante en comparaison des autres stations, tandis que la station R4 apparait comme significativement moins bruyante (-14 à -17dB).
- ✓ Les niveaux maximum (percentile 1%) sur la période sont de 110.1 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R2), 112.7 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3), 104.8 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R4) et 105.7 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R7). Les stations R2 et R3 sont ici également les plus bruyantes.

La partie gauche de la Figure 42 donne la répartition fréquentielle de l'énergie sonore en fonction de la zone d'étude :

- ✓ En basses fréquences, et dans les percentiles les plus forts (courbes vertes/violettes, percentiles inférieurs à 10%), les activités anthropiques sont visibles, notamment la propulsion des navires, qui crée une « bosse » de bruit significative entre 150 et 400 Hz pour toutes les stations. Les niveaux dans cette bande fréquentielle sont compris entre 90 et 95 dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ selon la station étudiée. Les bruits résiduels induits par le courant de marée accroissent les niveaux mesurés pour les fréquences inférieures à 100 Hz aux stations R2, R3 et R7 ;
- ✓ Pour les percentiles faibles à médians (courbes bleue/orange/ jaune, percentiles supérieurs ou égaux à 50%), les effets météorologiques et les bruits anthropiques se superposent en suivant les tendances des courbes de Wenz en pointillés gris. Ce phénomène est visible entre 100 Hz et environ 2.5 kHz, avec des niveaux plus forts pour les stations R2, R3 et R7 en raison des effets de marnage ;
- ✓ L'activité des organismes benthiques forme une bosse visible de 4 kHz à 20 kHz dans les percentiles faibles/médians (courbes bleues, oranges et jaunes). Des niveaux compris entre 50 et 60 dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ varient selon la station, et semblent en baisse par rapport à l'été 2022.

Pour la station R4, la partie droite de cette figure montre les variations horaires des niveaux compris entre 355 Hz et 445 Hz (bande de fréquence représentative des activités anthropiques), ainsi qu'entre 8.9 kHz et 11 kHz. Un accroissement de 2dB dans une plage horaire répartie entre 06h et 16h UTC est à noter pour les niveaux compris entre 355 Hz et 445 Hz. L'activité benthique est en légère baisse lors de l'automne, avec une élévation modérée de 1 à 1.5 dB dans une tranche horaire répartie entre 18h et 06h UTC pour les niveaux compris entre 8.9 kHz et 11 kHz.

La Figure 43 trace la statistique des densités spectrales de puissance d'une période de 3 minutes correspondant au coup de vent étudié à proximité de la station R7 (30 Septembre 2022, à gauche) et des travaux d'origine inconnue à proximité de la station R4 (02 Novembre 2022, à droite). Les niveaux sont exprimés en dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$.

Le coup de vent du 30 Septembre 2022 met en jeu un profil de bruit quasi linéaire, typique d'un bruit d'écoulement lointain (bruit rose²). Ce bruit est continu et varie peu en fonction du temps (peu d'écart entre les différents percentiles considérés)

Les travaux à proximité de la station R4 font émerger un bruit étendu en fréquence entre 80 Hz et environ 5 kHz, avec une multitude d'émergences tonales, visibles par les pics dans les spectres affichés. Le niveau maximum (~100dB ref 1µPa²) est atteint à 100 Hz et peut provenir d'un positionnement dynamique d'un navire support. Le spectre du bruit suggère une distance travaux/capteur de l'ordre de quelques centaines de mètres à un kilomètre.

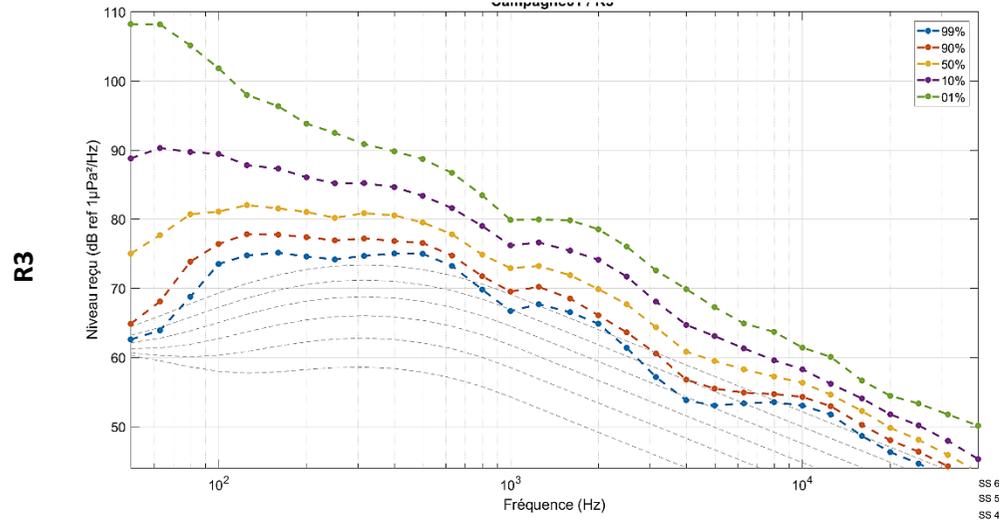
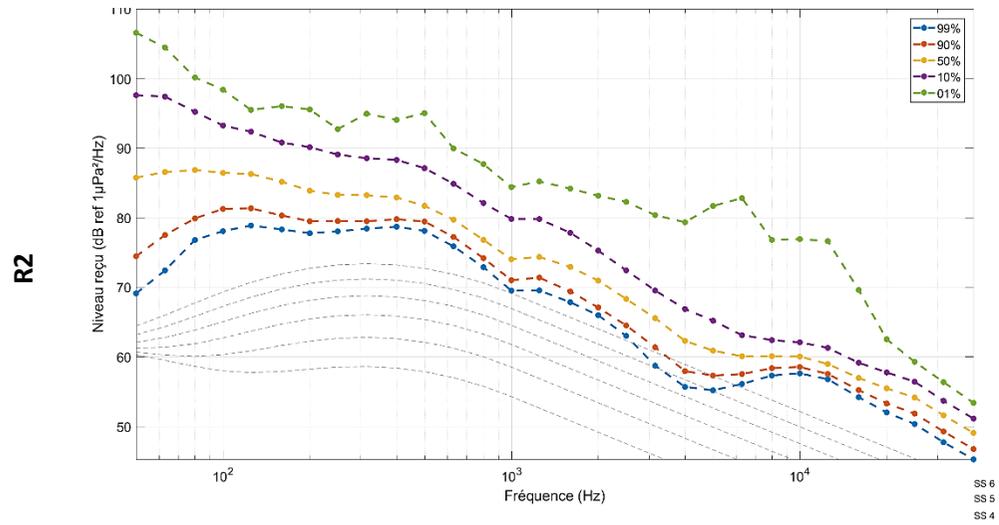
Tableau 35 : Distribution statistique du bruit mesuré dans le tiers d'octave 63Hz, en fonction de la zone, pour la saison automne 2022.

Percentile	(%)	100	99	90	75	50	25	10	1	0
R2	(dB ref 1µPa ²)	81.3	83.4	88.5	93.1	98.4	103.8	108.4	114.8	118.7
R3	(dB ref 1µPa ²)	74.2	75.6	79.8	84.7	89.4	94.5	102.0	119.9	124.6
R4	(dB ref 1µPa ²)	69.8	71.3	74.2	77.0	82.3	90.6	98.7	109.4	141.1
R7	(dB ref 1µPa ²)	78.5	81.4	85.9	88.9	92.5	96.1	100.9	112.7	125.7

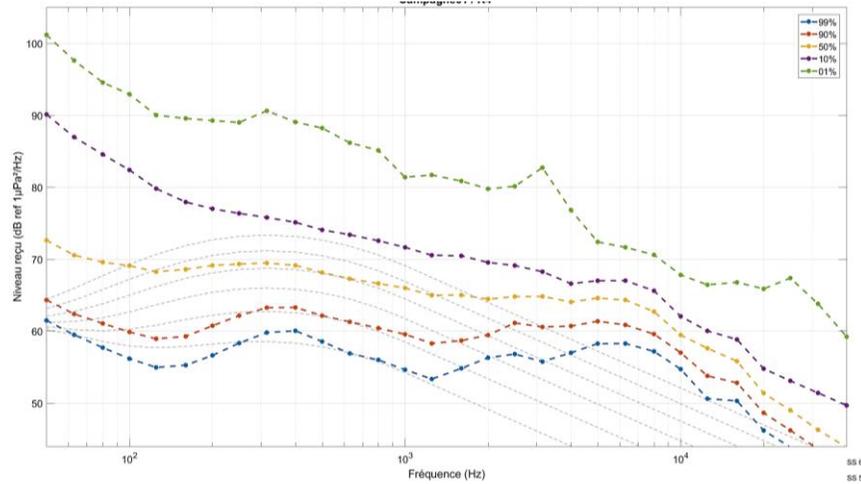
Tableau 36 : Distribution statistique du bruit mesuré dans le tiers d'octave 125Hz, en fonction de la zone, pour la saison automne 2022.

Percentile	(%)	100	99	90	75	50	25	10	1	0
R2	(dB ref 1µPa ²)	91.0	93.0	95.9	97.7	100.5	102.8	106.1	110.1	114.9
R3	(dB ref 1µPa ²)	88.0	89.5	92.6	94.6	96.8	99.8	102.5	112.7	116.5
R4	(dB ref 1µPa ²)	67.9	69.7	73.7	77.5	83.0	88.5	94.6	104.8	144.2
R7	(dB ref 1µPa ²)	90.4	92.8	95.1	96.4	97.8	99.6	101.4	105.7	117.2

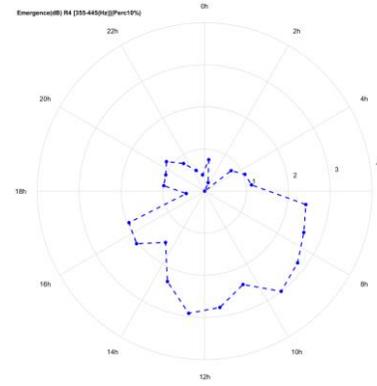
² Le bruit rose est un signal dont l'amplitude est constante par bande d'octave.



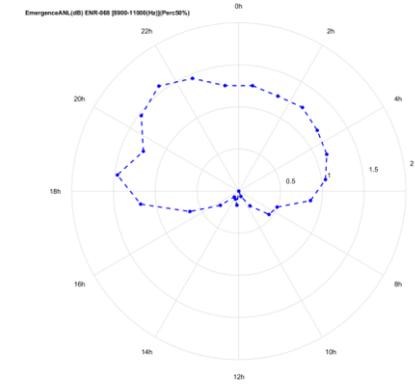
R4



355-445HZ



8.9-11kHz



R7

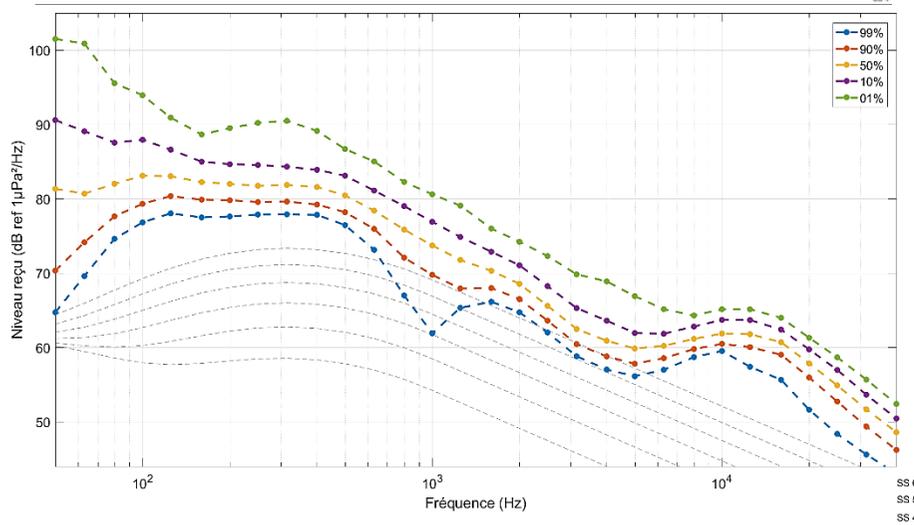
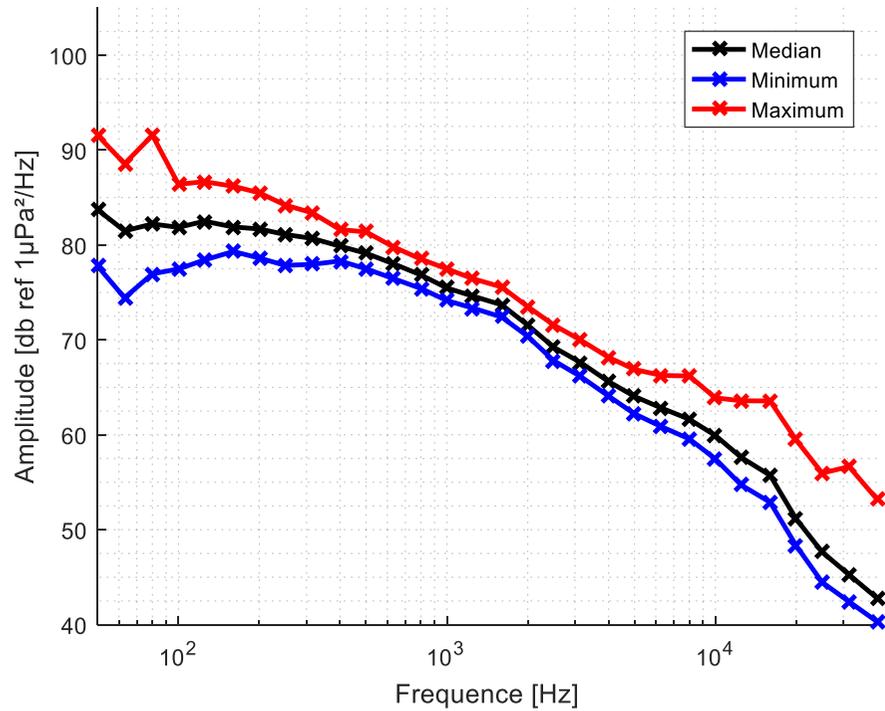


Figure 42 : Répartition fréquentielle de l'énergie acoustique mesurée lors de l'automne 2022 (à gauche). Répartition horaire des niveaux sonores mesurés en automne 2022 dans la bande 355-445Hz et 8.9-11.0kHz (à droite).

Coup de vent en R7 (30/09/2022)



Travaux à proximité de R4 (02/11/2022)

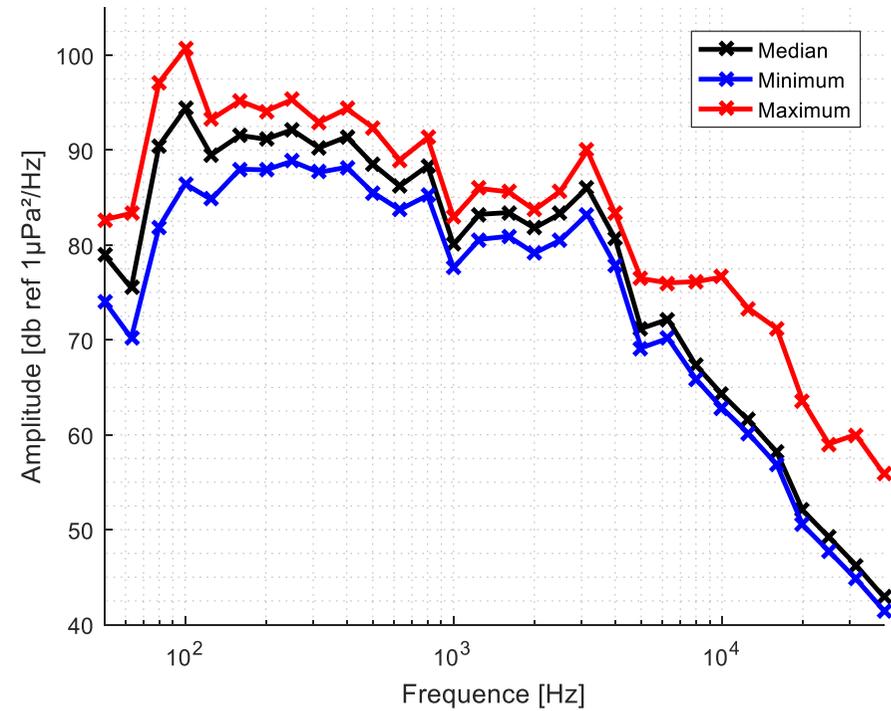


Figure 43 : Densités spectrales de puissance (exprimées en dB ref 1µPa²/Hz) de périodes représentatives choisies lors de l'automne 2022. A gauche : coup de vent à la station R7. A droite : travaux à proximité de la station R4, du 30/10 au 02/11/2022.

V.3. Année 2023

V.3.1. Période Hiver (du 21/12/2022 au 20/03/2023)

L'analyse des résultats pour la période hivernale 2022-2023 est réalisée du 21 décembre 2022 au 09 février 2023 pour les stations R3 et R4.

V.3.1.a. Analyse du bruit ambiant dans la bande filtrée [50Hz-40kHz]

La Figure 44 montre l'évolution des niveaux sonores entre 50 Hz et 40 kHz à la station R4. La courbe rouge superposée montre l'évolution du niveau de bruit permanent ou « pied de bruit ». Les courbes des autres stations sont disponibles en annexe de ce rapport.

A l'identique de l'automne 2022, le bruit permanent (ou pied de bruit) fluctue entre 105 et 120 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ pour les stations R2 et R3. L'hydrophone de la station R4 voit son pied de bruit fluctuer aux alentours de 95 et 108 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$. Les effets météorologiques montrent également une bonne corrélation avec l'évolution du bruit permanent, comme illustré dans la Figure 45.

Les passages de navires dominant ponctuellement le bruit permanent, et font émerger les niveaux sonores jusqu'à un maximum de 150.8 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$. La fréquentation anthropique de la station R4 est faible, avec une moyenne de 4 événements acoustiquement significatifs détectés par jour. La Figure 46 montre la répartition horaire des émergences anthropiques détectées au niveau de la station R4, qui est resserrée dans la période diurne (08h-16h UTC). Le comptage des événements acoustiquement significatifs pour les autres stations est impossible en raison du traitement appliqué aux données (cf. V.1.)

La partie haute de la Figure 47 trace le spectrogramme illustratif d'un passage de navire, apparenté au maximum d'énergie acoustique relevé au niveau de la station R3, le 14 Janvier 2023. La partie basse de la figure montre l'évolution du niveau sonore (50Hz-10kHz, exprimé en dB ref $1\mu\text{Pa}^2$) en fonction du temps lors du passage du navire :

- ✓ Lors de son approche, le navire fait d'abord émerger un bruit basse fréquence, avec des niveaux sonores de l'ordre de 130 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$. Son intensité et sa largeur fréquentielle augmentent au fur et à mesure que la distance navire/hydrophone décroît, avec des émergences sonores en frange (effet doppler);
- ✓ Au minimum de distance (CPA), une augmentation courte du niveau sonore est observée jusqu'à 150 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$. Cette augmentation est étendue en fréquence avec un maximum d'énergie entre 0 et 500 Hz.

Par opposition, la Figure 48 trace le spectrogramme du minimum d'énergie acoustique recensé lors de l'hiver 2023 au niveau de la station R3, le 1^{er} Janvier 2023. Le niveau maximum est compris entre 0 et 1kHz, et correspond au bruit environnemental généré par la houle et le vent.

Les Tableau 37, Tableau 38 et Tableau 39 donnent la répartition statistique du bruit dans la bande filtrée [50Hz-40kHz] durant l'hiver 2023, pour chaque station :

- ✓ Les niveaux médians (50% du temps) sur la période sont de 113.1 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R2), 111.0 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3) et 104.6 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R4). Ces niveaux sont proches de ceux mesurés lors de l'automne 2022 ;
- ✓ Les niveaux maximum (percentile 1%) sur la période sont de 124.5 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R2), 125.7 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3) et 118.8 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R4). Ces valeurs sont également proches de celles rencontrées lors de l'automne 2022.

La Figure 49 permet de mettre en regard les statistiques des niveaux sonores mesurés et la densité de navires issue des données AIS uniquement, dans le périmètre d'étude. En comparaison de l'automne 2022, la baisse de la fréquentation des navires de pêche (AIS 30) à proximité des stations R2 et R3 semble compensée par une plus grande fréquentation des autres types de navires, ce qui peut expliquer la stabilité des niveaux sonores dans la



*Suivi par acoustique passive du bruit ambiant et de la
fréquentation des mammifères marins dans le cadre du parc
éolien en mer de Normandie*

Etat de référence

Référence : QO.20210225.10.RAP.001.05A

bande filtrée [50Hz-40kHz] au percentile 1% à ces stations. La station R4 semble également davantage fréquentée en sortie du port de Barfleur par les bateaux de pêche, bien que cela ne transparaisse pas dans les niveaux sonores relevés. Ces conclusions sont toutefois partielles car basées uniquement sur les données AIS (et pas VMS)

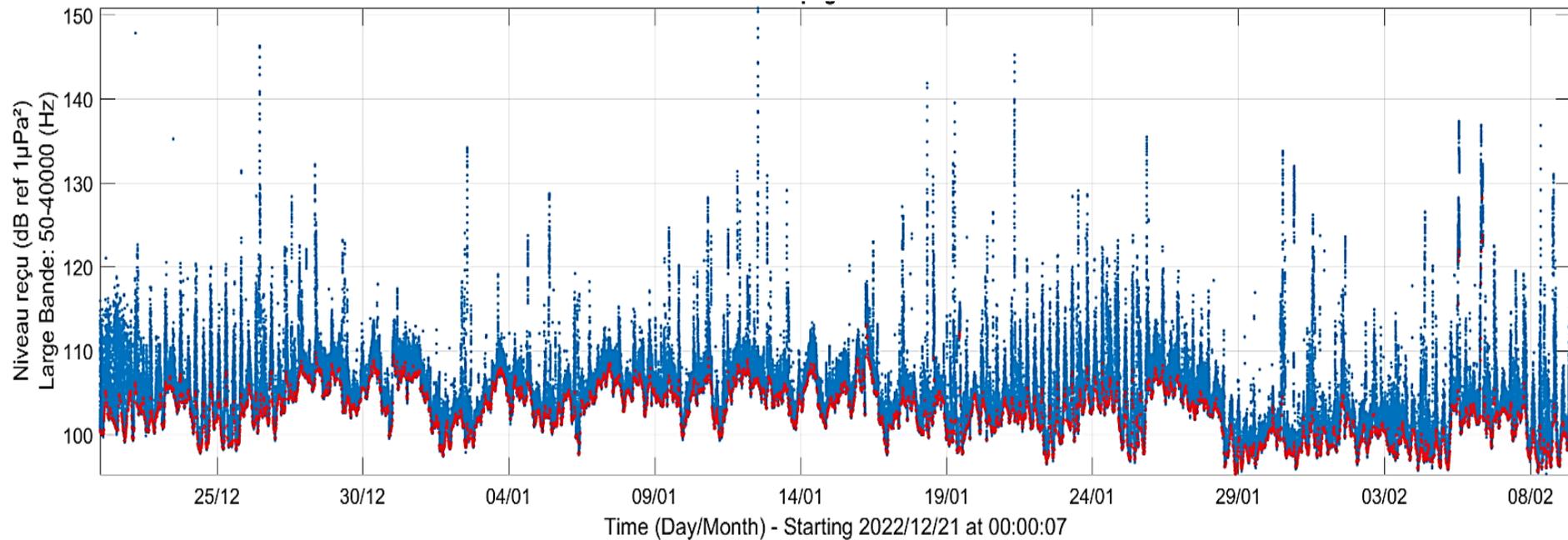


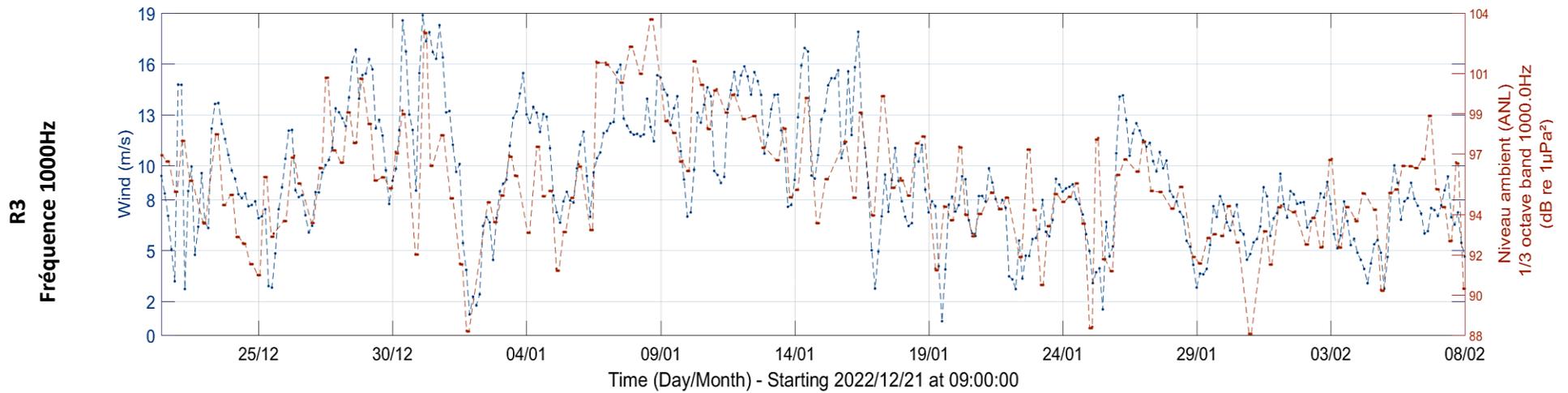
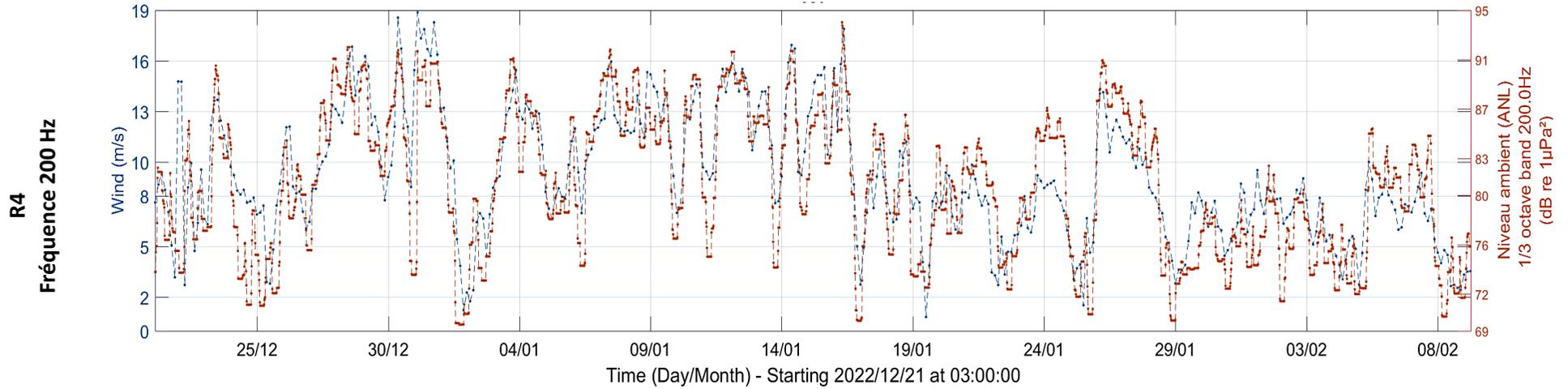
Figure 44 : Evolution du niveau dans la bande filtrée [50Hz-40kHz] au point R4 en fonction du temps, lors de l'hiver 2023. Les courbes pour les autres stations sont disponibles en annexe.



Suivi par acoustique passive du bruit ambiant et de la
fréquentation des mammifères marins dans le cadre du parc
éolien en mer de Normandie

Etat de référence

Référence : QO.20210225.10.RAP.001.05A



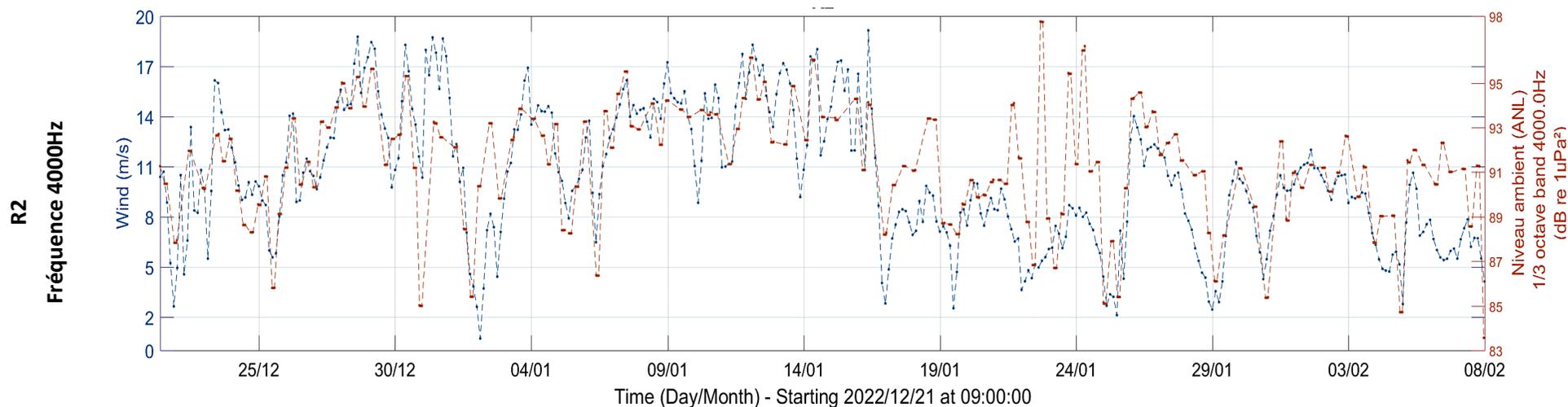


Figure 45 : Corrélation du bruit permanent (orange) avec le vent (bleu) au niveau des stations R4, R2 et R3 lors de l'hiver 2023.

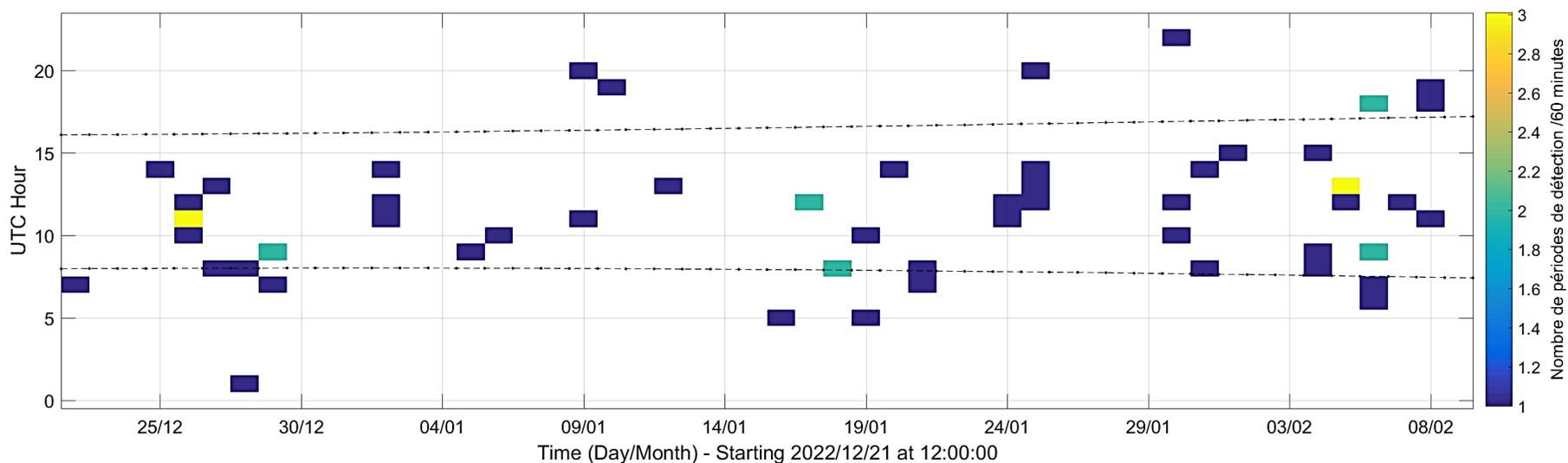


Figure 46 : Répartition horaire des émergences anthropiques détectées lors de l'hiver 2023, au niveau de la station R4.

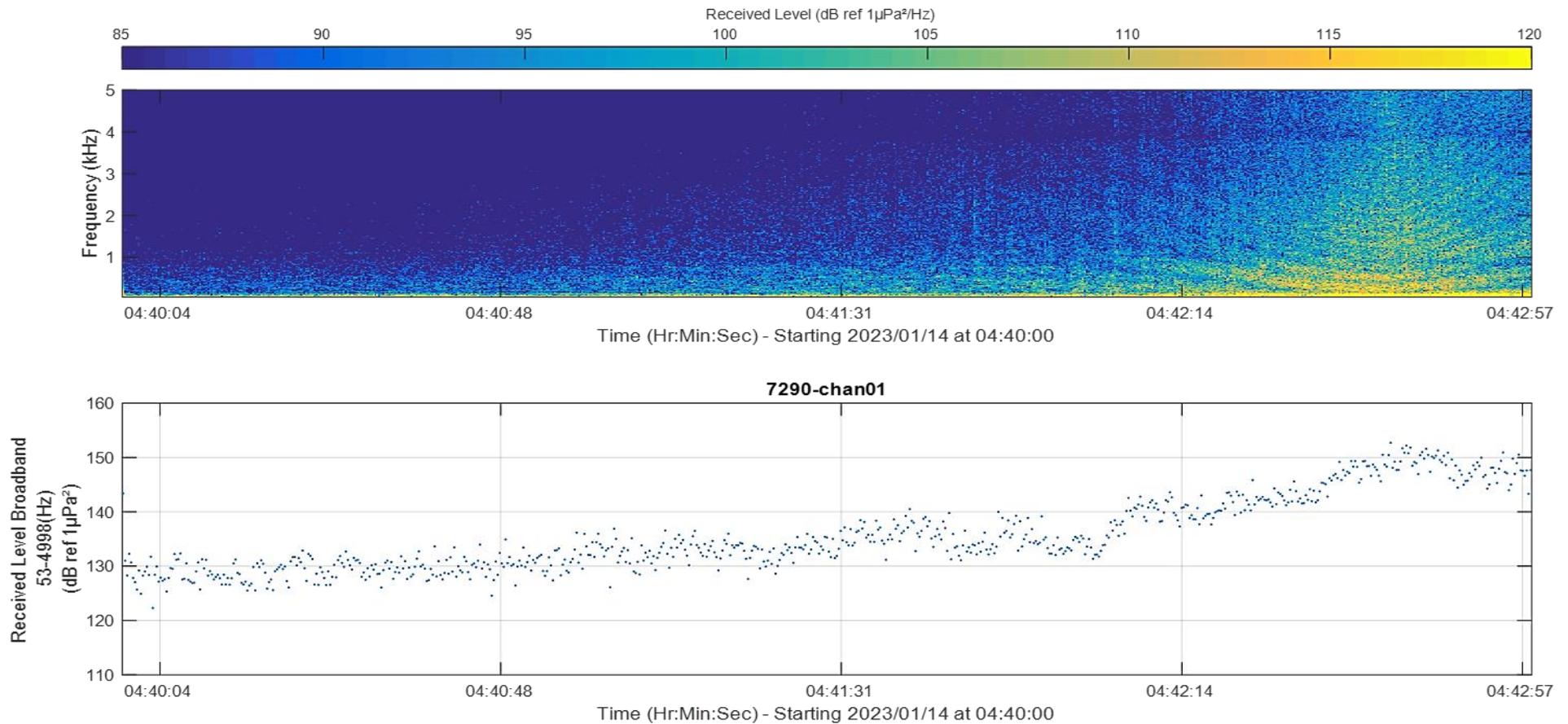


Figure 47 : En haut, spectrogramme illustratif d'un passage de navire au niveau de la station R3 le 14 Janvier 2023. En bas, évolution du niveau sonore (50Hz-10kHz, exprimé en dB ref 1µPa²) en fonction du temps.

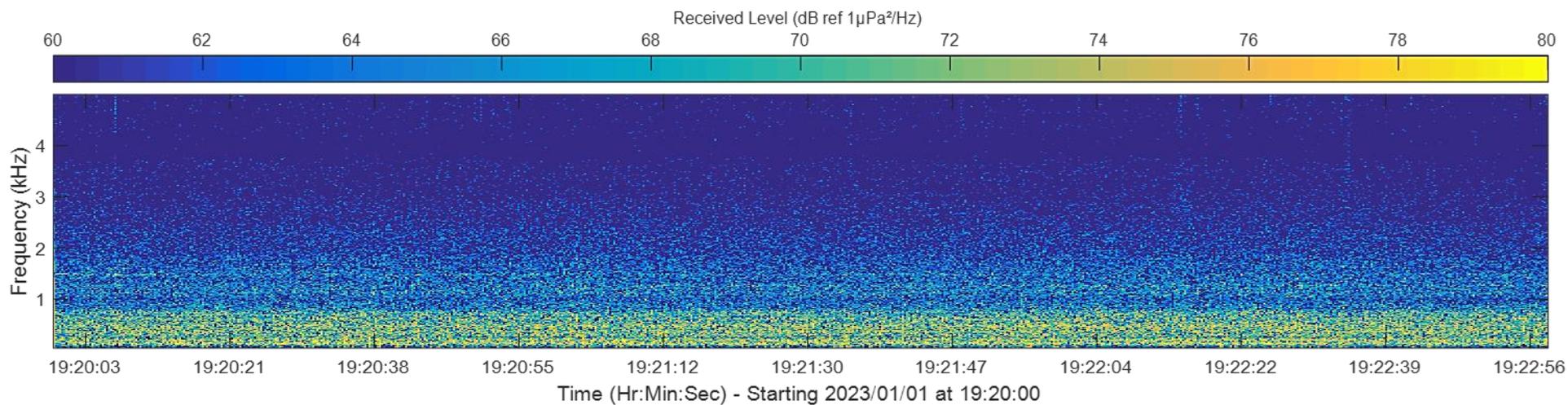


Figure 48 : Spectrogramme illustratif d'un moment calme à proximité de la station R7.

Tableau 37 : Statistiques des niveaux sonores (50Hz -40 kHz) à la station R2 (exprimés en dB ref 1 μ Pa²) durant la saison hiver 2023.

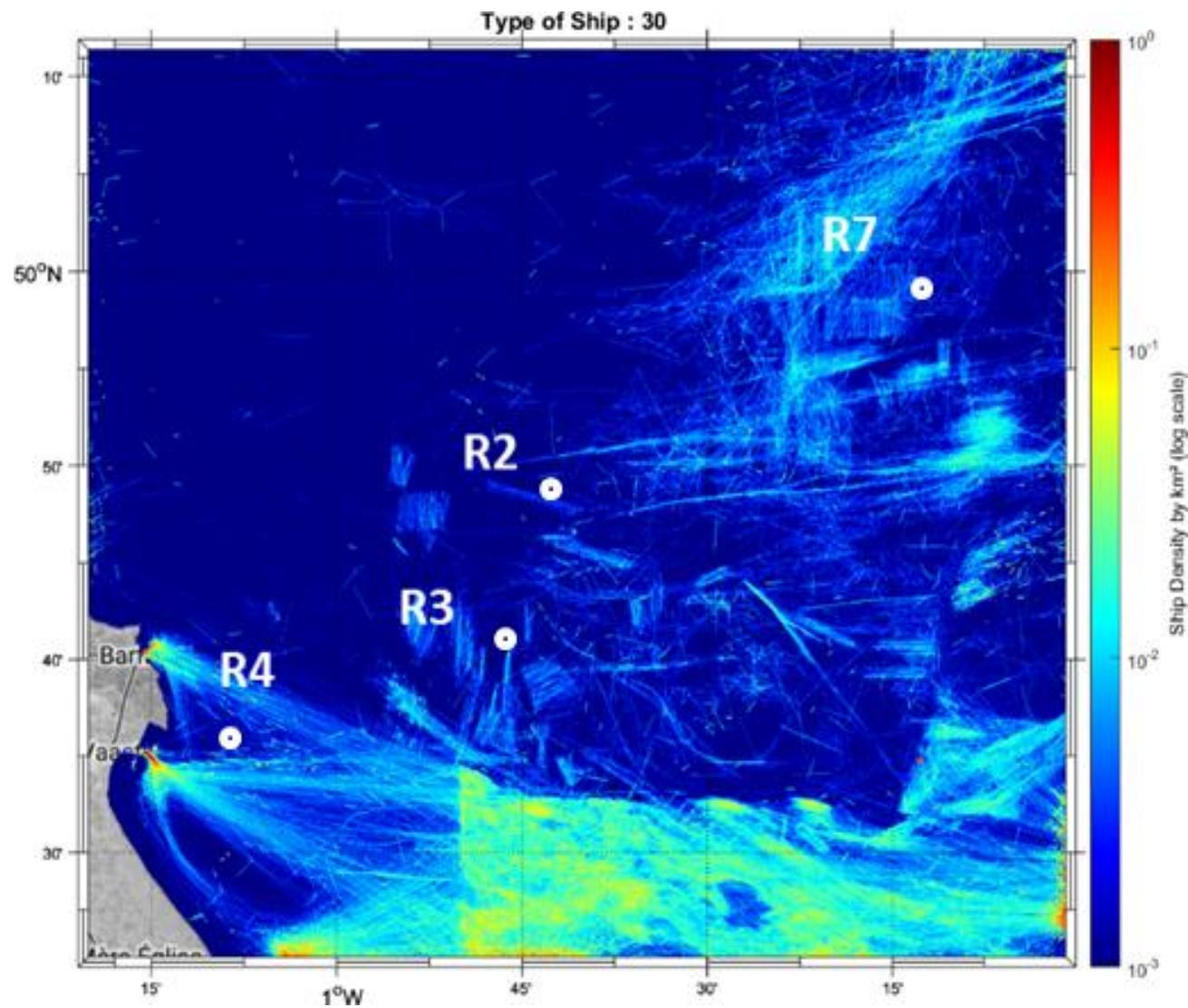
	Percentile (%)	Niveau minimum et très courant				Niveau Médian			Niveau maximum et très rare	
		100	99	90	75	50	25	10	1	0
R2	Toute la période	106.3	108.7	110.5	111.7	113.1	115.0	117.4	124.5	131.6
	Jour	108.3	108.8	110.6	111.6	113.0	114.9	117.7	125.3	131.6
	Nuit	106.3	108.4	110.4	111.6	112.9	115.0	117.2	124.3	128.6
	Ecart Jour/Nuit	2.0	0.3	0.2	-0.0	0.0	-0.1	0.5	0.9	3.0

Tableau 38 : Statistiques des niveaux sonores (50Hz -40 kHz) à la station R3 (exprimés en dB ref 1 μ Pa²) durant la saison hiver 2023.

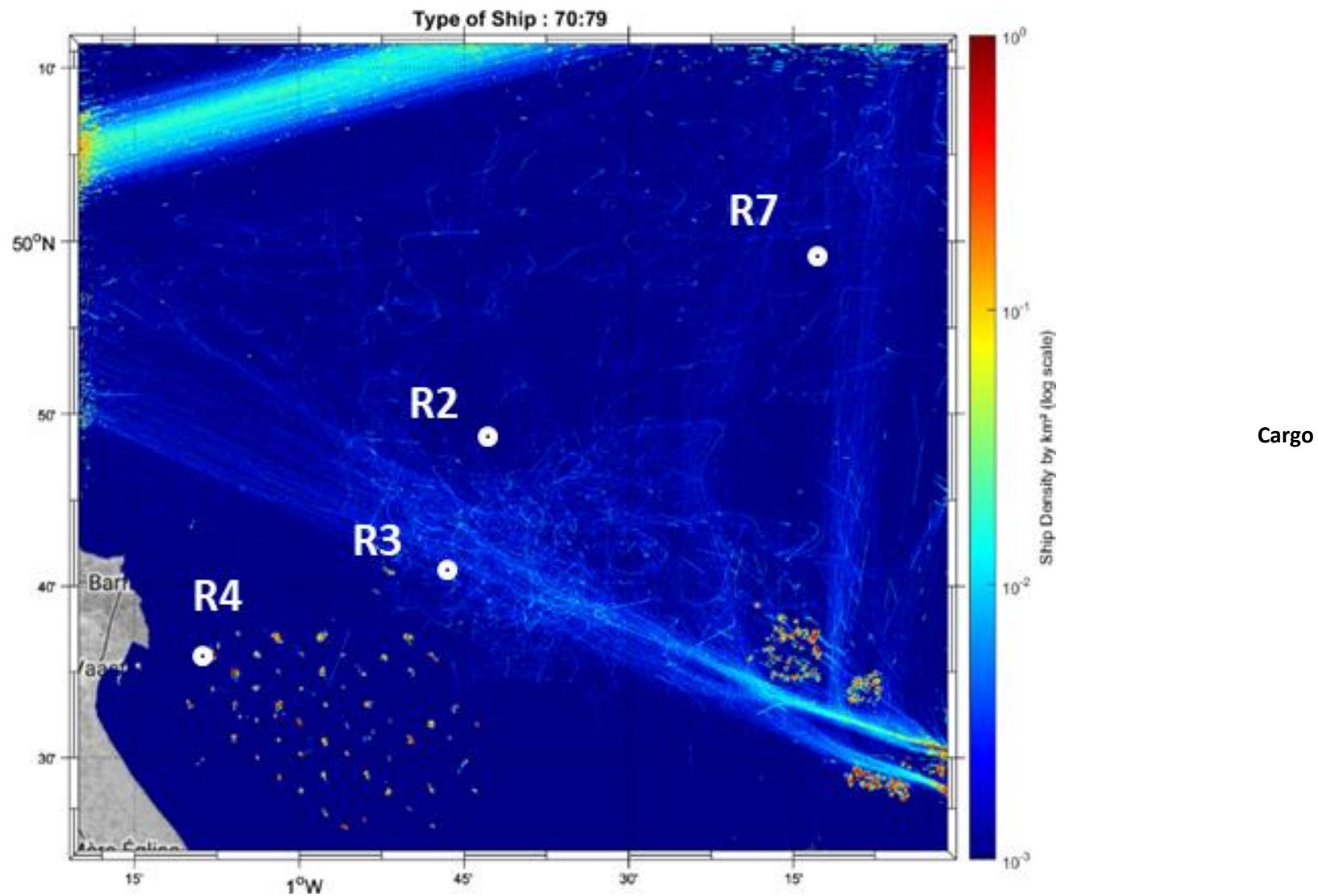
	Percentile (%)	Niveau minimum et très courant				Niveau Médian			Niveau maximum et très rare	
		100	99	90	75	50	25	10	1	0
R3	Toute la période	103.5	105.6	107.4	108.7	111.0	113.9	117.3	125.7	136.0
	Jour	106.2	106.9	107.8	109.0	110.7	114.2	117.4	126.6	133.2
	Nuit	103.5	104.1	106.8	108.4	111.0	113.5	116.8	124.9	136.0
	Ecart Jour/Nuit	2.7	2.8	1.0	0.6	-0.3	0.7	0.6	1.7	-2.8

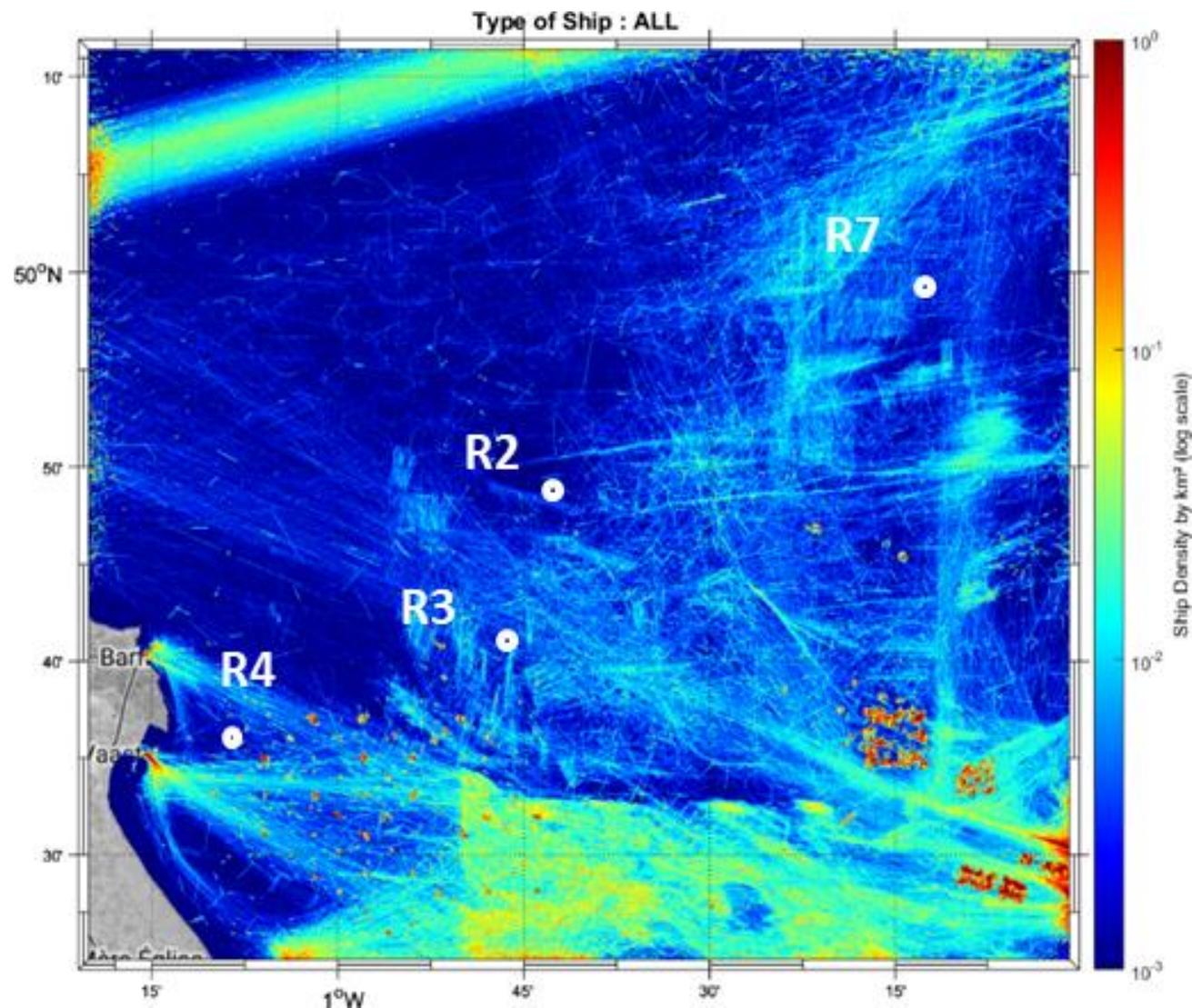
Tableau 39 : Statistiques des niveaux sonores (50Hz -40 kHz) à la station R4 (exprimés en dB ref 1 μ Pa²) durant la saison hiver 2023.

	Percentile (%)	Niveau minimum et très courant				Niveau Médian			Niveau maximum et très rare	
		100	99	90	75	50	25	10	1	0
R4	Toute la période	95.3	97.3	99.8	102.0	104.6	107.0	109.3	118.8	150.8
	Jour	95.3	97.5	99.7	102.1	105.0	107.5	109.9	123.5	150.8
	Nuit	95.3	97.1	99.8	101.9	104.4	106.7	109.0	115.5	147.8
	Ecart Jour/Nuit	0.0	0.4	-0.1	0.2	0.6	0.8	0.9	8.0	3.0



Navires de pêche (basé sur l'AIS)





Tous les navires

Figure 49 : Densité de navires dans le périmètre d'étude lors de l'hiver 2023 (du 21/12/2022 au 21/03/2023).

V.3.1.b. Analyse du bruit ambiant par bande de fréquences

Les Tableaux 40 et 41 constituent le descripteur 11 de la DCSMM et donnent la répartition statistique des niveaux sonores (dB ref $1\mu\text{Pa}^2$, tiers d'octave) relevés aux fréquences 63 et 125 Hz, pour chaque station.

Concernant la fréquence 63 Hz :

- ✓ Les niveaux médians sur la période sont de 98.0 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R2), 92.3 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3) et 81.5 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R4). La zone R2 apparaît comme la plus bruyante en comparaison des autres stations.
- ✓ Les niveaux maximum (percentile 1%) sur la période sont de 114.2 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R2), 118.5 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3) et 106.4 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R4). Les stations R2 et R3 sont ici plus bruyantes.

Concernant la fréquence 125 Hz :

- ✓ Les niveaux médians sur la période sont de 100.3 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R2), 97.1 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3) et 82.6 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R4). À l'identique de la fréquence 63 Hz, la station R2 apparaît comme la plus bruyante en comparaison des autres stations, tandis que la station R4 apparaît comme significativement moins bruyante.
- ✓ Les niveaux maximum (percentile 1%) sur la période sont de 112.4 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R2), 112.8 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R3) et 99.3 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ (R4). Les stations R2 et R3 sont ici également les plus bruyantes.

La partie gauche de la Figure 50 donne la répartition fréquentielle de l'énergie sonore en fonction de la zone d'étude :

- ✓ En basses fréquences, et dans les percentiles les plus forts (courbes vertes/violettes, percentiles inférieurs à 10%), les activités anthropiques sont visibles, notamment la propulsion des navires, qui crée une « bosse » de bruit significative entre 100 et 400 Hz pour toutes les stations. Les niveaux dans cette bande fréquentielle sont compris entre 85 et 100 dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ selon la station étudiée. Au percentile 1%, les passages de navires émergent sur toute la bande fréquentielle.
- ✓ Pour les percentiles faibles à médians (courbes bleue/orange/jaune, percentiles supérieurs ou égaux à 50%), les effets météorologiques et les bruits anthropiques se superposent en suivant les tendances des courbes de Wenz en pointillés gris. Ce phénomène est visible entre 100 Hz et environ 3 kHz, avec des niveaux plus forts pour les stations R2 et R3 en raison des effets de marée ;
- ✓ L'activité des organismes benthiques forme une bosse visible de 4 kHz à 20 kHz dans les percentiles faibles/médians (courbes bleues, oranges et jaunes). Des niveaux allant de 50 à 55 dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ varient selon la station, et sont plus faibles en comparaison des autres saisons.

Pour la station R4, la partie droite de cette figure montre les variations horaires des niveaux compris entre 355 Hz et 445 Hz (bande de fréquence représentative des activités anthropiques), ainsi qu'entre 8.9 kHz et 11 kHz. Un accroissement de 2dB dans une plage horaire répartie entre 8h et 14h UTC (période diurne) est à noter pour les niveaux compris entre 355 Hz et 445 Hz. Une élévation modérée de 1 à 1.5dB est visible dans une tranche horaire répartie entre 18h et 6h UTC pour les niveaux compris entre 8.9 kHz et 11 kHz.

La Figure 51 trace la statistique des densités spectrales de puissance d'un instant d'une durée de 3 minutes correspondant au minimum d'énergie acoustique enregistré au niveau de la station R3 (1^{er} Janvier 2023, à gauche) et au maximum d'énergie acoustique lors d'un passage de navire (14 Janvier 2023, à droite). Les niveaux sont exprimés en dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$.

Lors de l'épisode à faible perturbation anthropique, (1^{er} Janvier 2023), les spectres montrent la contribution du bruit environnemental en suivant les tendances du modèle de Wenz. L'émergence en haute fréquence correspond probablement à de l'activité benthique ponctuelle.

Le passage du navire à proximité de la station R3 (14 Janvier 2023) montre des profils de bruits d'allure proche jusqu'à environ 10 KHz, dont l'amplitude dépend uniquement de la distance séparant le navire du capteur. Un

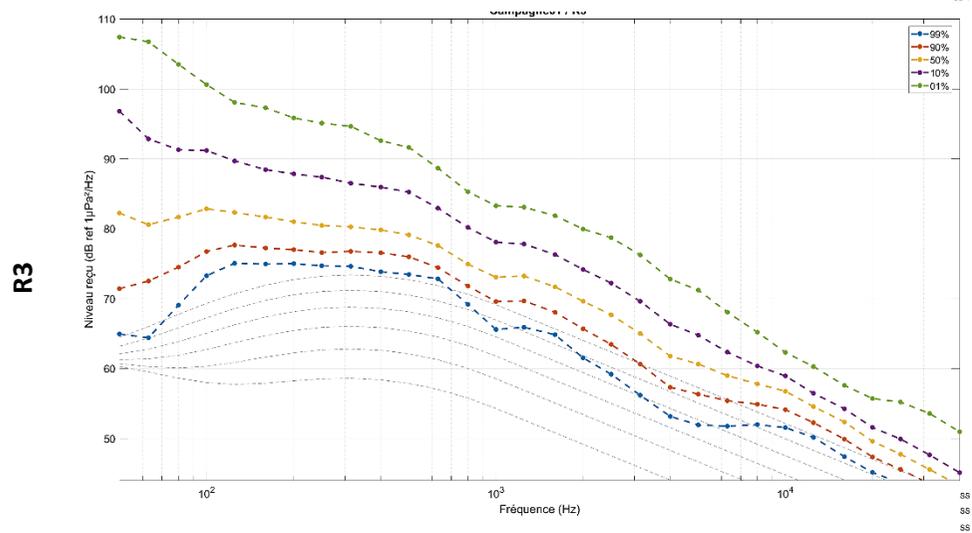
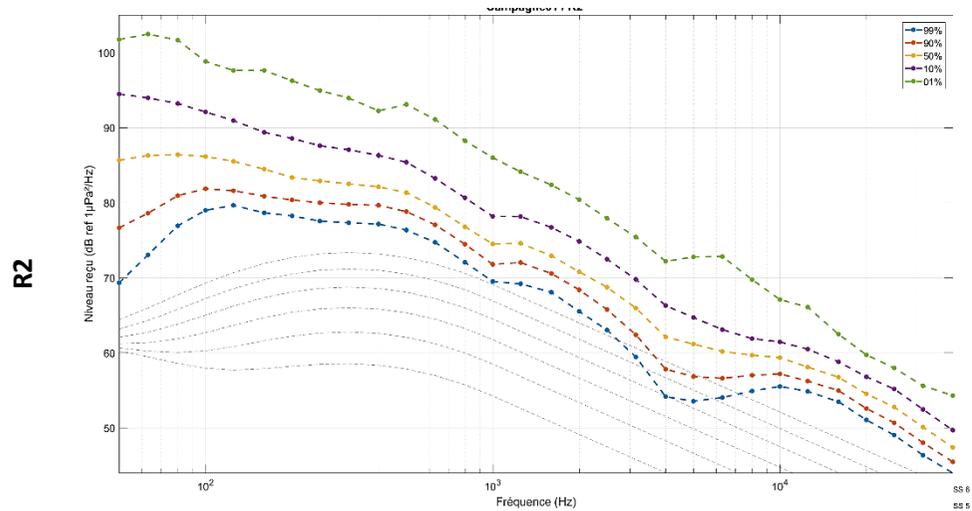
maximum de 140 dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ est atteint à 70 Hz et correspond à la propulsion du navire. Lorsque le navire est au plus proche du capteur (courbe rouge), le bruit du navire émerge sur toute la bande fréquentielle (50 Hz et 10 kHz) avec des niveaux supérieurs à 110 dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ jusqu'à environ 600 Hz. Ce profil est typique d'un navire commercial.

Tableau 40 : Distribution statistique du bruit mesuré dans le tiers d'octave 63Hz, en fonction de la zone, pour la saison hiver 2023.

Percentile	(%)	100	99	90	75	50	25	10	1	0
R2	(dB ref $1\mu\text{Pa}^2$)	82.1	84.8	90.3	94.3	98.0	102.1	105.7	114.2	122.2
R3	(dB ref $1\mu\text{Pa}^2$)	73.0	76.1	84.2	87.7	92.3	98.8	104.6	118.5	132.7
R4	(dB ref $1\mu\text{Pa}^2$)	69.5	70.8	71.8	74.7	81.5	88.6	95.4	106.4	134.8

Tableau 41 : Distribution statistique du bruit mesuré dans le tiers d'octave 125Hz, en fonction de la zone, pour la saison hiver 2023.

Percentile	(%)	100	99	90	75	50	25	10	1	0
R2	(dB ref $1\mu\text{Pa}^2$)	92.0	94.4	96.4	98.1	100.3	102.9	105.7	112.4	120.1
R3	(dB ref $1\mu\text{Pa}^2$)	88.5	89.8	92.4	94.2	97.1	101.0	104.4	112.8	121.0
R4	(dB ref $1\mu\text{Pa}^2$)	67.8	68.9	71.9	76.4	82.6	87.5	90.9	99.3	143.9



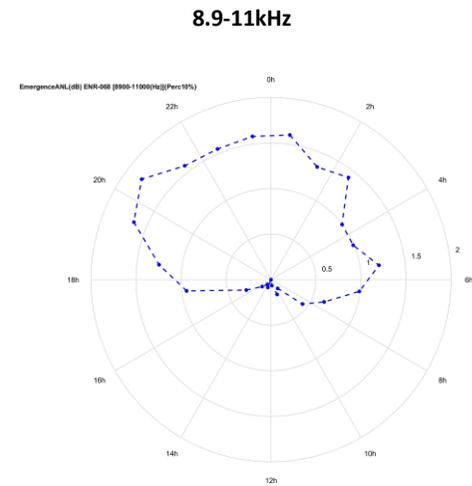
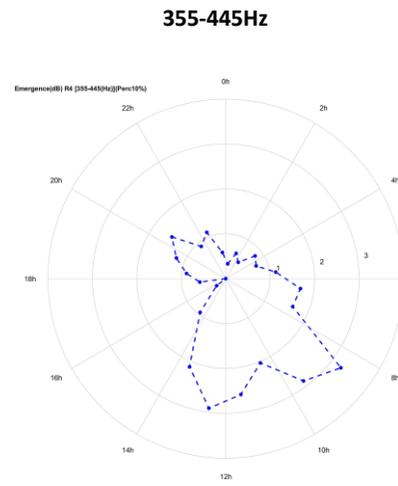
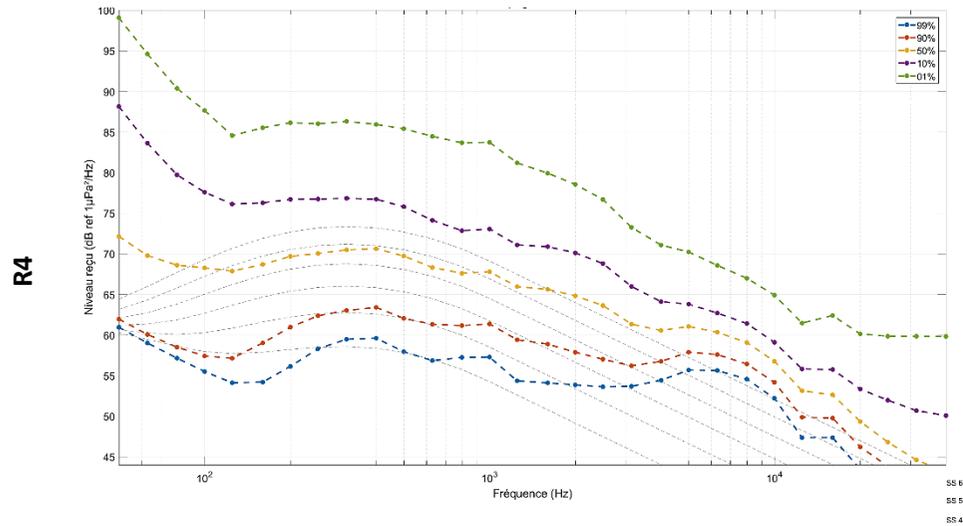
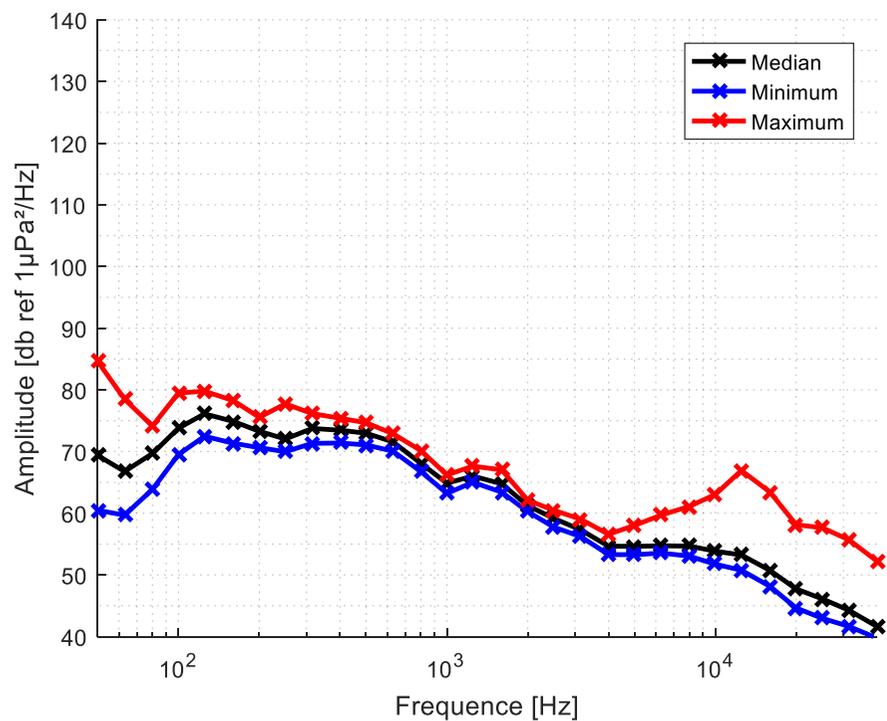


Figure 50 : Répartition fréquentielle de l'énergie acoustique mesurée lors de l'hiver 2023 (à gauche). Répartition horaire des niveaux sonores mesurés en hiver 2023 dans la bande 355-445Hz et 8.9-11.0kHz (à droite).

Période calme à proximité de R3 (minimum d'énergie) le 01/01/2023



Passage de navire à proximité de R3 (maximum d'énergie) le 14/01/2023

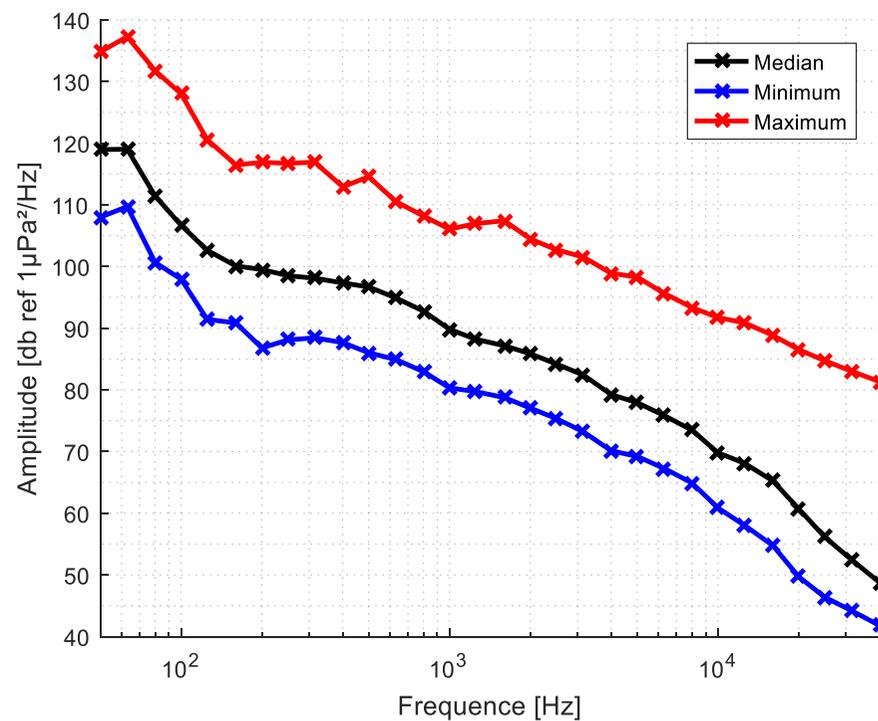


Figure 51 : Densités spectrales de puissance (exprimées en dB ref 1µPa²/Hz) des instants représentatifs choisis lors de l'hiver 2023 : à gauche, période calme en R3, à droite passage proche de navire à proximité de R3 le 14/01/2023.

Chapitre VI. Cartographie du bruit ambiant

Ce chapitre a pour objectif de décrire la méthode et les outils utilisés pour modéliser la propagation des bruits dans le milieu marin.

VI.1. Plateforme de modélisation

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

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

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

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

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

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

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

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

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

La plateforme de modélisation Quonops® prend en compte l'essentiel des données qui conditionnent la propagation des bruits dans le milieu marin (Figure 52) :

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

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

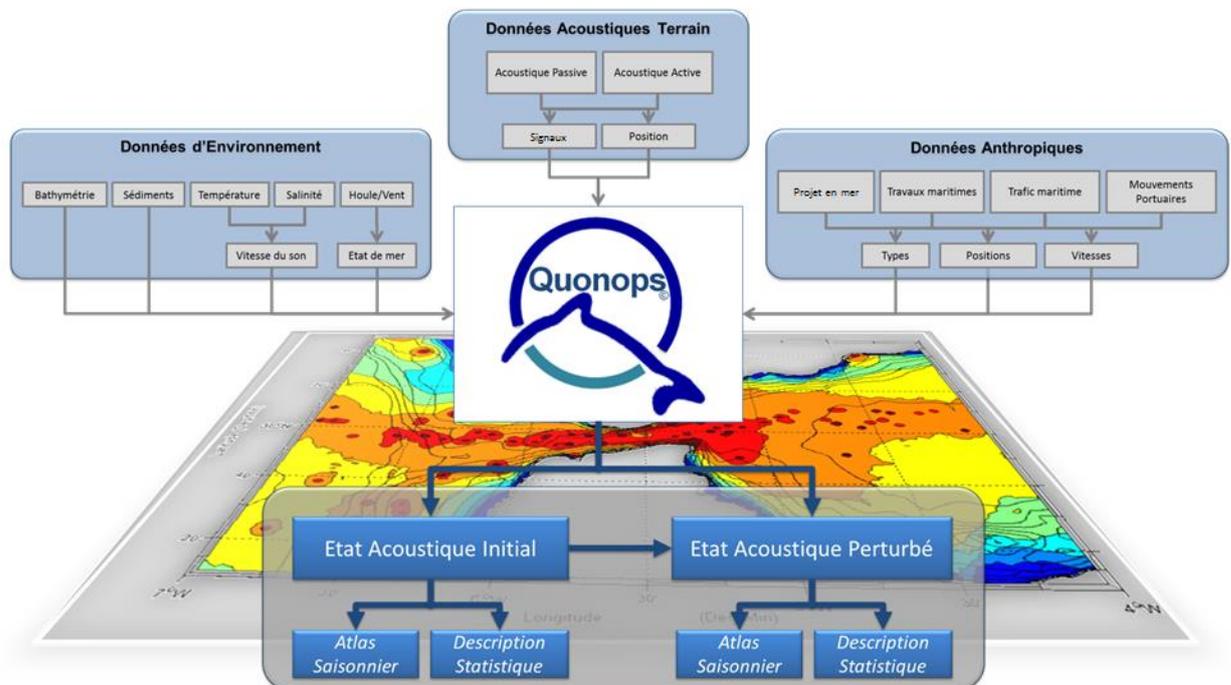


Figure 52 : Description schématique de la plateforme opérationnelle de prévision des bruits. (Source: Quiet-Oceans)

Dans le cadre de ce projet, le Tableau 42 référence les fournisseurs et les résolutions pour chaque donnée environnementale servant à la modélisation acoustique et à l'élaboration des cartes de bruit.

Tableau 42 : Synthèse des données environnementales utilisées pour la modélisation acoustique.

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

VI.1.4. Estimation par octave

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

Par conséquent, le niveau est donné par :

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

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

VI.2. Cartographie statistique

Afin de prendre en compte la nature stochastique du bruit ambiant, les cartes sonores produites par la plateforme Quonops® sont réalisées selon toutes les combinaisons d'un ensemble de situations environnementales représentatives du site d'étude et de situations anthropiques représentatives des activités maritimes existantes au voisinage du site et générant du bruit. Une approche par la méthode de Monte Carlo³ (Folegot, Thomas, 2013), (Guelton et al., 2014), (Sutton et al., 2013) permet ensuite de cartographier les statistiques des champs sonores, et de décrire l'état sonore de l'aire d'étude en termes de probabilité de niveau acoustique et de distribution spatiale.

VI.2.1. Sources de bruit

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

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

³ La méthode de Monte Carlo est une méthode numérique, qui utilise des tirages aléatoires pour réaliser le calcul d'une quantité déterministe. Largement utilisée dans les domaines de la finance, des sciences de la Terre et des sciences de la Vie.

de s'équiper. Aussi, les navires non équipés d'un système d'identification et de localisation AIS ne sont pas pris en compte dans cette étude.

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

VI.2.1.a. Source de bruit liée au vent

Les données de vent sur la période sont converties en niveau de bruit pour chaque fréquence grâce aux formules de conversion de Ainslie (Ainslie, 2010). Ce bruit est ajouté au bruit des activités maritimes préexistantes au voisinage de la zone projet. La Figure 53 illustre le niveau sonore induit par cette composante environnementale en fonction de sa vitesse et de la fréquence.

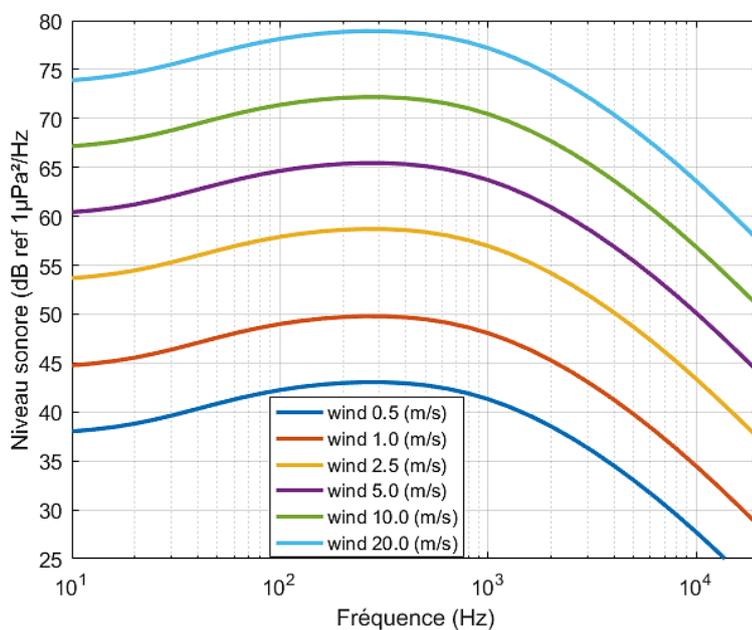


Figure 53 : Niveau sonore induit par le vent en fonction de la fréquence et de la vitesse.

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

La Figure 54 illustre la densité de trafic maritime, sans distinction de la nature de l'activité, issue du traitement des données AIS pour le printemps 2022 (période synchrone avec la mesure de bruit in situ) et interpolées à la résolution de 1 minute. Ces données de trafic sont directement exploitées dans l'élaboration des cartes de bruit de l'état initial (discrétisées à raison d'une situation de trafic par heure) grâce à la plateforme de modélisation du bruit sous-marin Quonops©. Ces trafics correspondent au passage régulier :

- ✓ De tankers et de cargos pour le trafic commercial ;
- ✓ De navires de passagers ;
- ✓ De navires de plaisance et pêche.

La carte met en évidence la prédominance des routes de circulation entre les différents ports en manche centrale et orientale ainsi que les axes de circulation entre ces deux bassins. En bordure sud Est du périmètre de la zone du parc éolien, la fréquentation est majoritairement liée aux navires de pêche. Au nord du parc, se trouve la route commerciale la plus empruntée de la zone d'étude (trafic commercial en Manche).

Les cartes de densité de trafic maritime sont calculées de manière spécifique pour les catégories de navires majoritairement présentes autour de la zone d'étude. Les navires les plus bruyants (les cargos, index AIS 70-79 et les tankers, index AIS 80-89) naviguent quant à eux sur les rails dédiés au trafic commercial, situés relativement au nord, à l'Ouest et à l'Est de la zone du parc éolien : leur contribution acoustique sera ainsi diminuée par la distance.

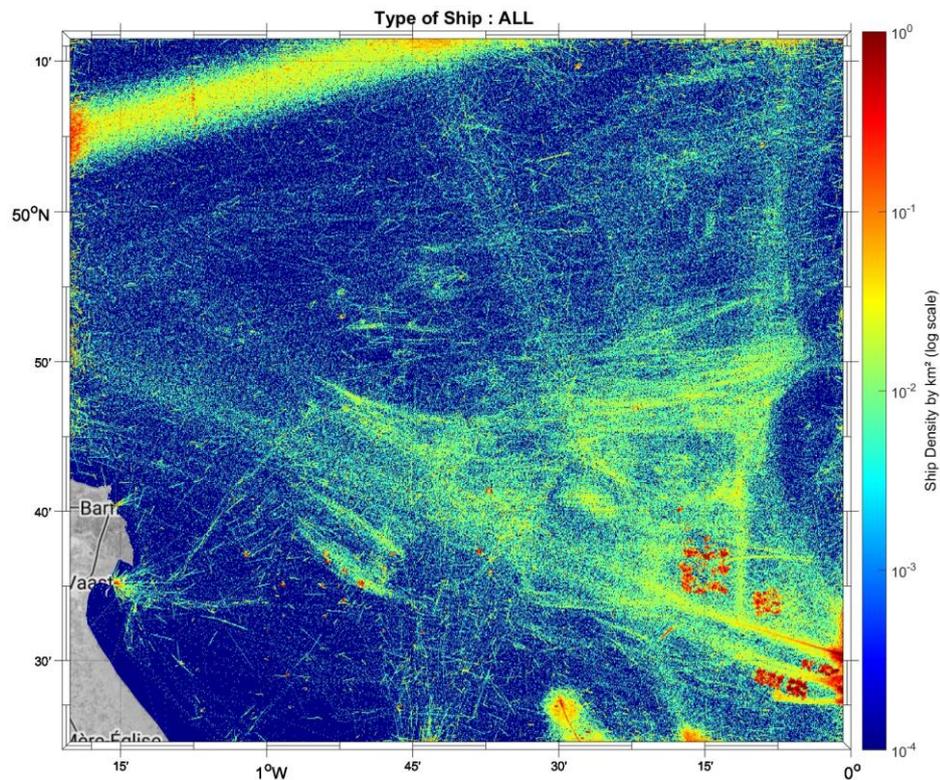


Figure 54 : Densité de trafic dans la zone étendue au printemps 2022

Les bruits générés par le trafic maritime existant sont estimés selon le modèle de RANDI (Ross, 1976), et dépendent du type de navire, de leur vitesse instantanée et de leur longueur. Chaque navire fréquentant la zone est une source de bruit (à l'exception des voiliers, index AIS 36), dont la modélisation est réalisée grâce à des gabarits sonores moyens variant en fonction de la fréquence et des catégories de navires (exprimés en dB réf. $1\mu\text{Pa}/\text{VHz}$ @1m et précis avec un écart-type de 3dB pour rendre compte de la variabilité entre les navires). Une variété de niveaux émis est illustrée en fonction de la fréquence (Figure 55). Ces gabarits proviennent de la littérature (Wagstaff, 1973) (Breeding, 1996), et sont corrigés en fonction de la vitesse et de la longueur des navires. La modélisation des cartes du bruit existant repose sur un ensemble de situations instantanées par saison.

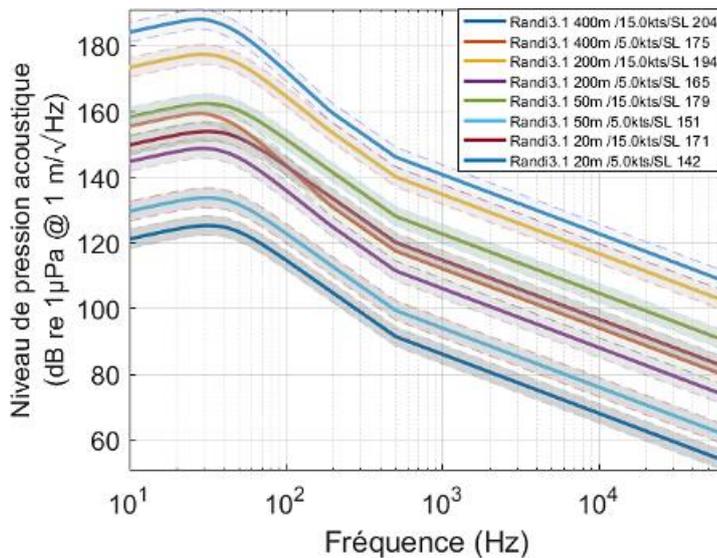


Figure 55 : Gabarit sonore des navires en fonction de la longueur, la vitesse et la fréquence

VI.2.2. Calibration

À partir des données mesurées sur chaque zone, un ajustement est effectué afin de calibrer les cartes de bruit de l'état de référence. A titre d'illustration, la Figure 56 compare la distribution statistique des niveaux sonores mesurés (en bleu) avec celle des niveaux sonores dans la bande filtrée [50Hz-40kHz] prédits et corrigés pour la station R4. Pour chaque station, le Tableau 43 synthétise, pour chaque zone, l'erreur quadratique moyenne résiduelle (RMSE, exprimée en dB) entre le bruit modélisé et le bruit mesuré. Le processus de calibration est conforme pour les stations R2, R3 et R4 avec des erreurs moyennes de l'ordre de 1dB. La zone R7 présente une erreur moyenne légèrement plus élevée (1.8dB) et nécessitera une analyse complémentaire pour pouvoir être prise en compte dans le processus de calibration.

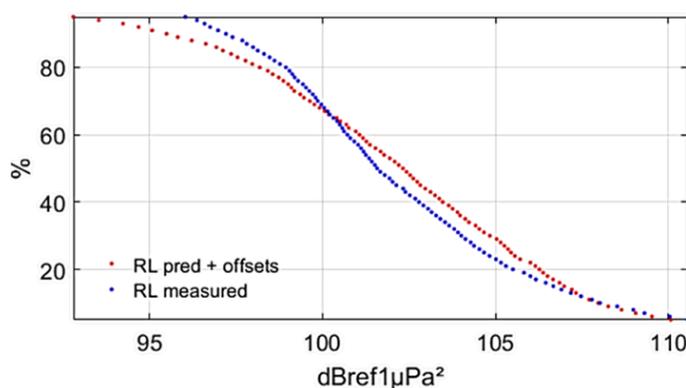


Figure 56 : Distribution des niveaux sonores dans la bande filtrée [50Hz-40kHz] (en rouge, courbe prédite avec offsets, en bleu, donnée mesurée) à la station R4, à l'issue du processus de calibration.

Station	Erreur moyenne (RMSE) sur le bruit dans la bande filtrée [50Hz-40kHz] (dB)
R2	1,1
R3	1,0
R4	0,9
R7	1,8

Tableau 43 : Erreur moyenne résiduelle sur le bruit dans la bande filtrée [50Hz-40kHz] en sortie du processus de calibration, par station.

VI.2.3. Cartographie du bruit existant

Le bruit ambiant existant est cartographié sous forme de statistique à l'aide des percentiles (95^{ème}, 90^{ème}, 75^{ème}, 50^{ème}, 25^{ème}, 10^{ème} et 5^{ème} percentiles). Le 50^{ème} percentile est la valeur médiane, ce qui signifie que les niveaux indiqués sur la carte sont atteints la moitié du temps. La cartographie est établie dans la zone définie par les coordonnées du Tableau 44.

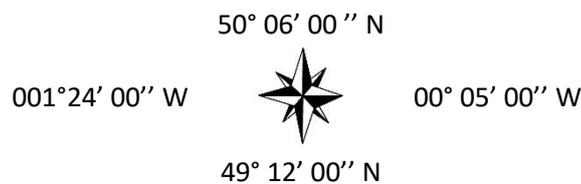
La Figure 57 illustre la cartographie statistique du bruit (11Hz-5.65kHz) calculée pour les saisons printemps, été, automne 2022 et hiver 2023 dans la zone d'étude.

Les cartographies au percentile 10% mettent en évidence la continuité du trafic commercial avec des émergences (vert clair) de bruit en sortie du port du havre et sur les axes de transit dans la Manche. La saison hiver 2023 semble davantage impactée par la navigation des navires de pêche. Au percentile médian, les cartes traduisent la relative homogénéité du bruit environnementale en fonction de la saison. Ce constat rejoint les conclusions du suivi du bruit ambiant par mesure acoustique.

L'ensemble des cartographies (4480 cartes) statistiques saisonnières et mensuelles est disponible pour les mois de Mars 2022 à Mars 2023 disponible à la demande sur la plateforme QOS : <http://qos.quiet-oceans.com>. Ces cartes sont calculées selon :

- ✓ 7 percentiles ;
- ✓ 10 bandes de fréquences ;
- ✓ 16 plages temporelles (12 mois et 4 trimestres) ;
- ✓ 3 descriptions dans la colonne d'eau.

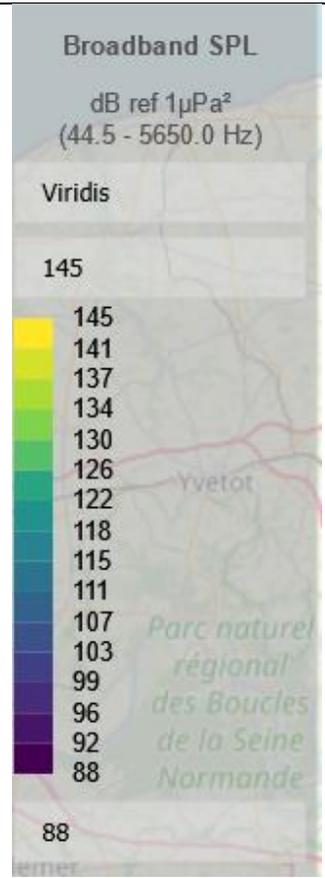
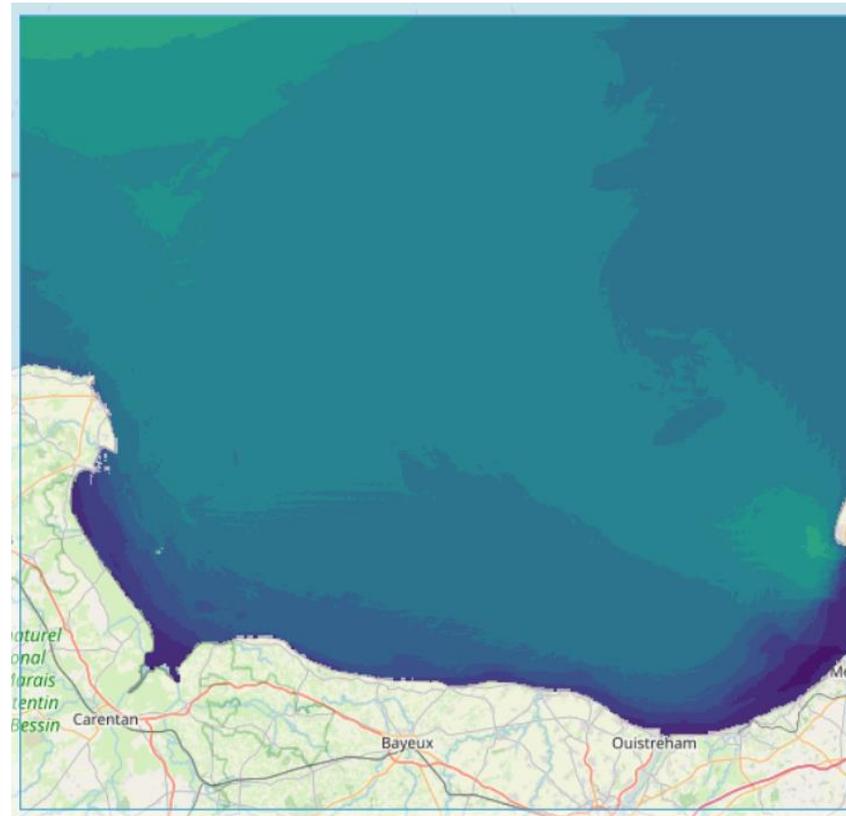
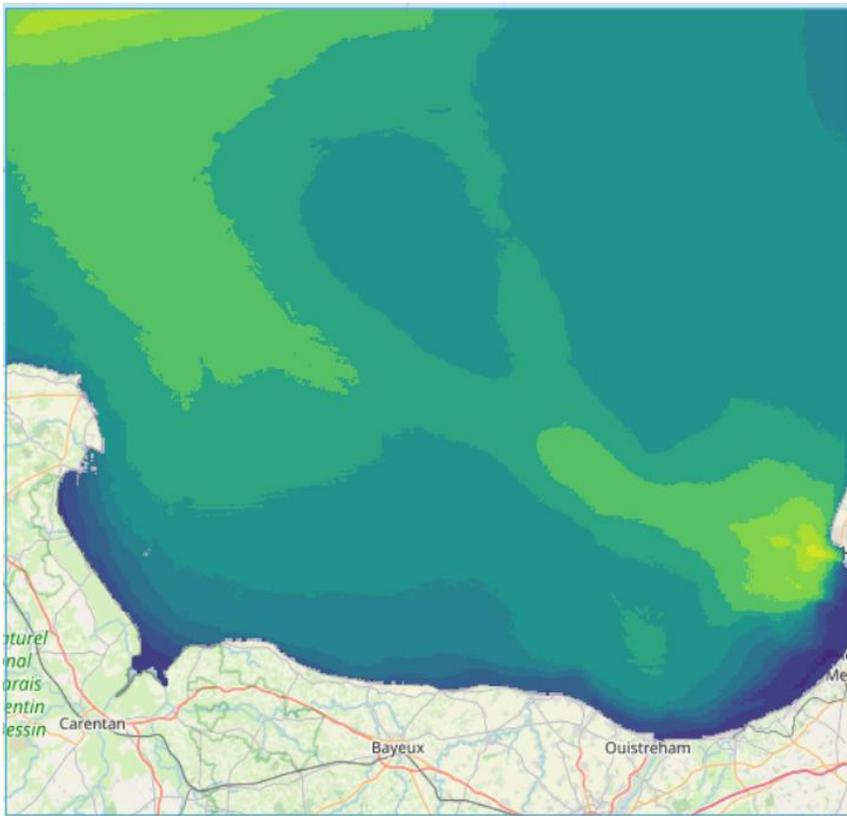
Tableau 44 : Limites de la zone cartographiée



Printemps 2022

P10%

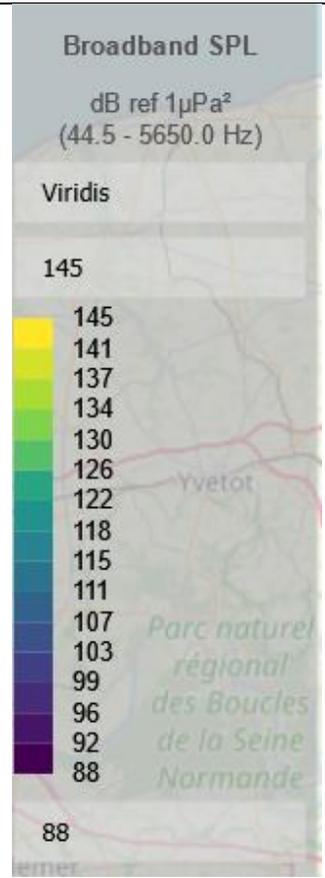
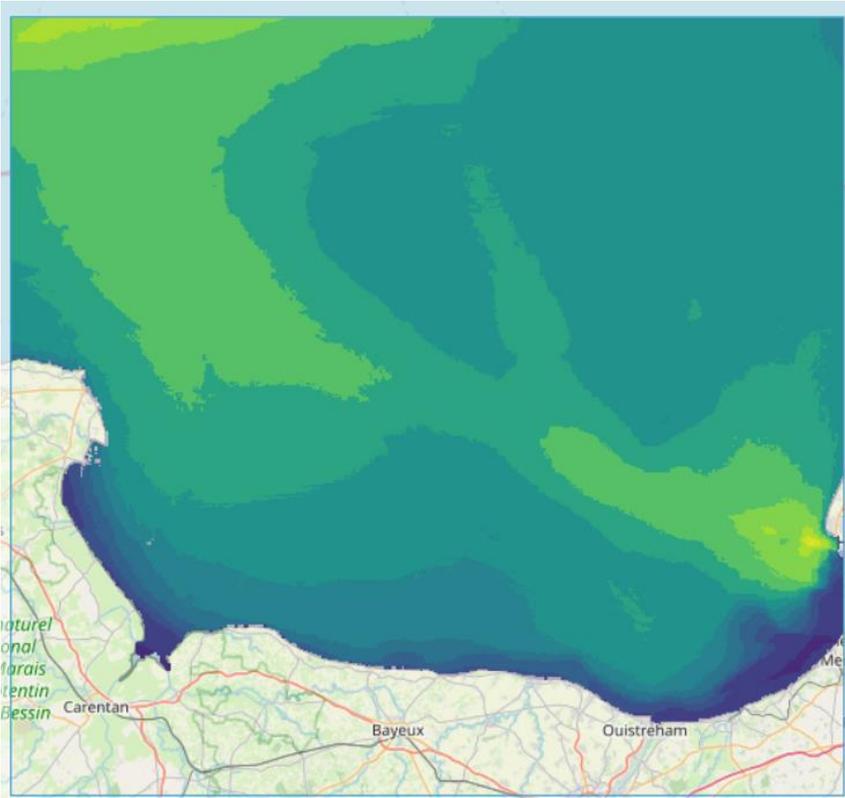
P50%



Eté 2022

P10%

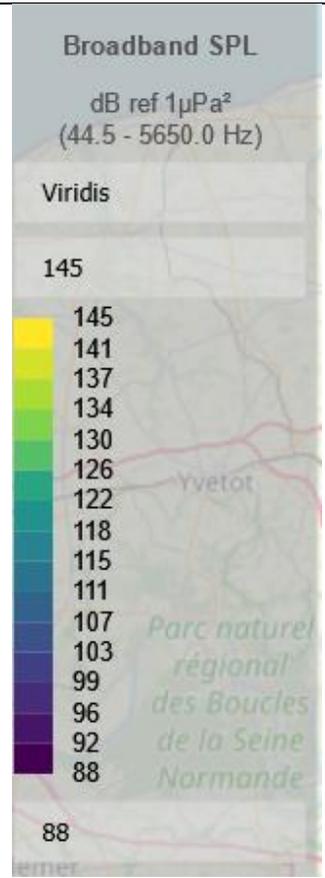
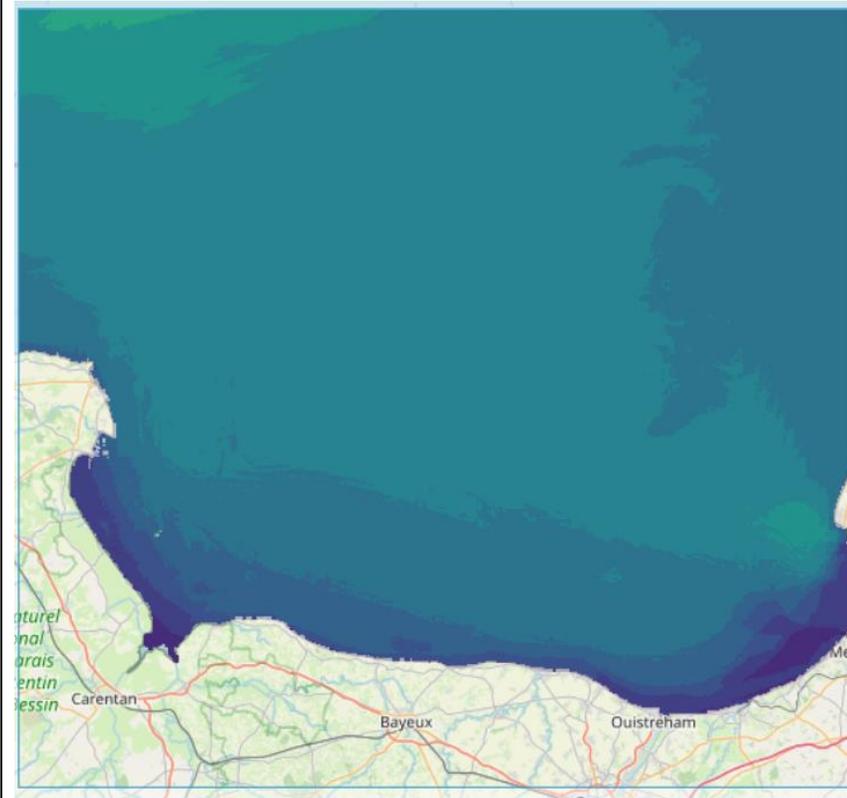
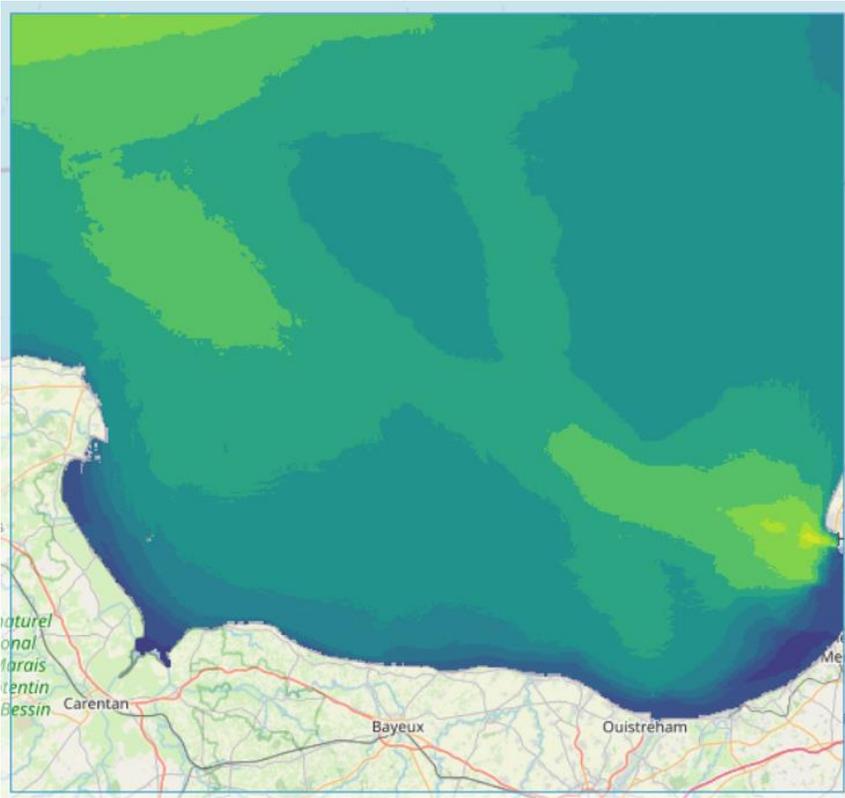
P50%



Automne 2022

P10%

P50%



Hiver 2023

P10%

P50%

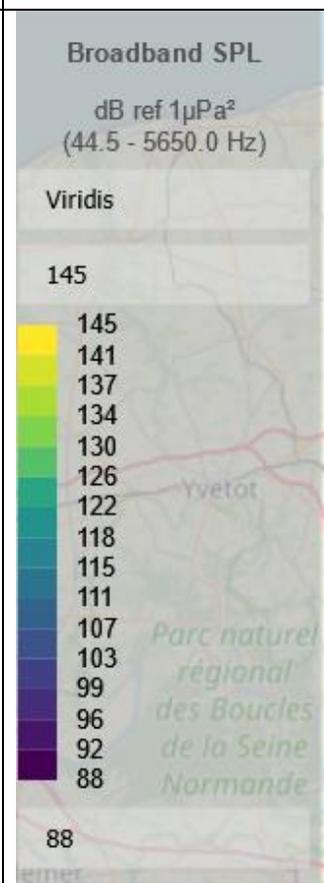
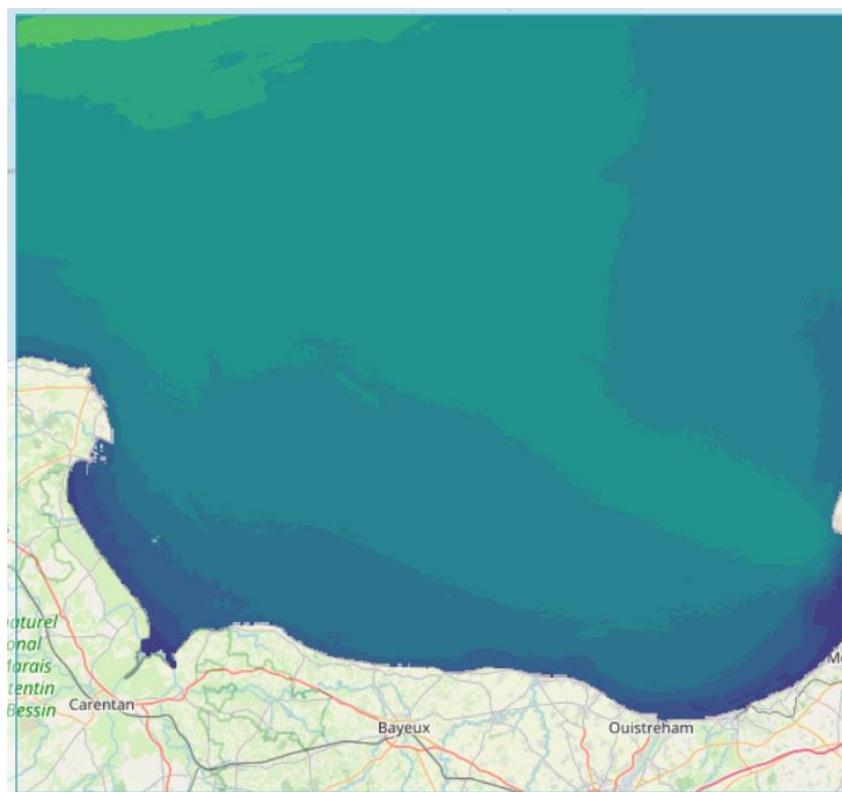
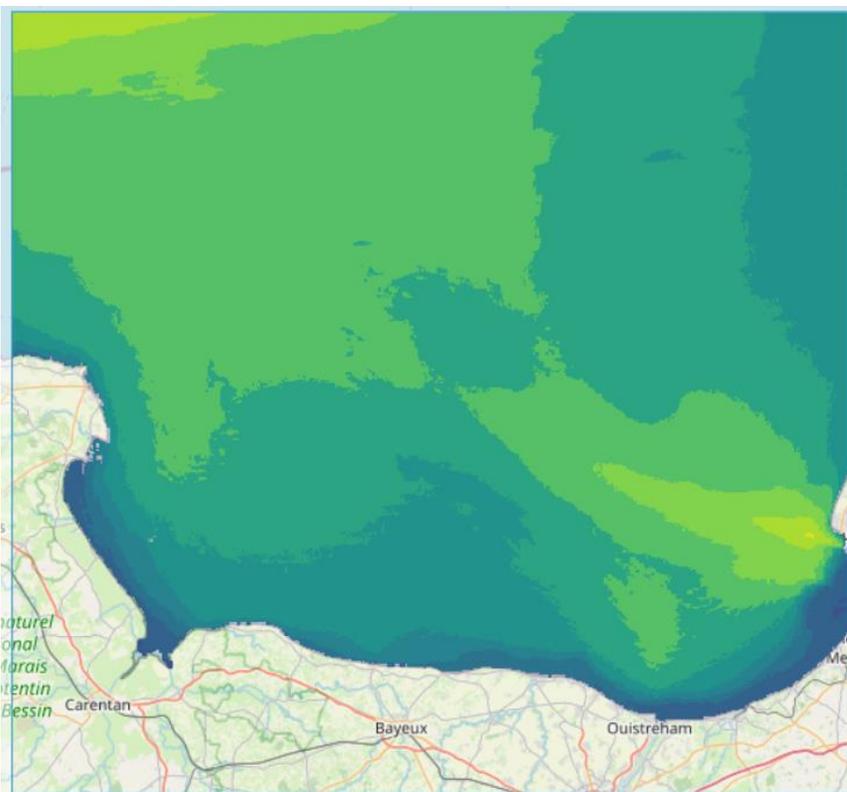


Figure 57 : Cartographie statistique du bruit (11 Hz - 5.65 kHz) par saison, calculée aux percentiles 10% (à gauche) et 50% (à droite).

Chapitre VII. Détection des signaux biologiques

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

VII.1. Connaissance biologique a priori du site

VII.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 58).

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

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

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

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

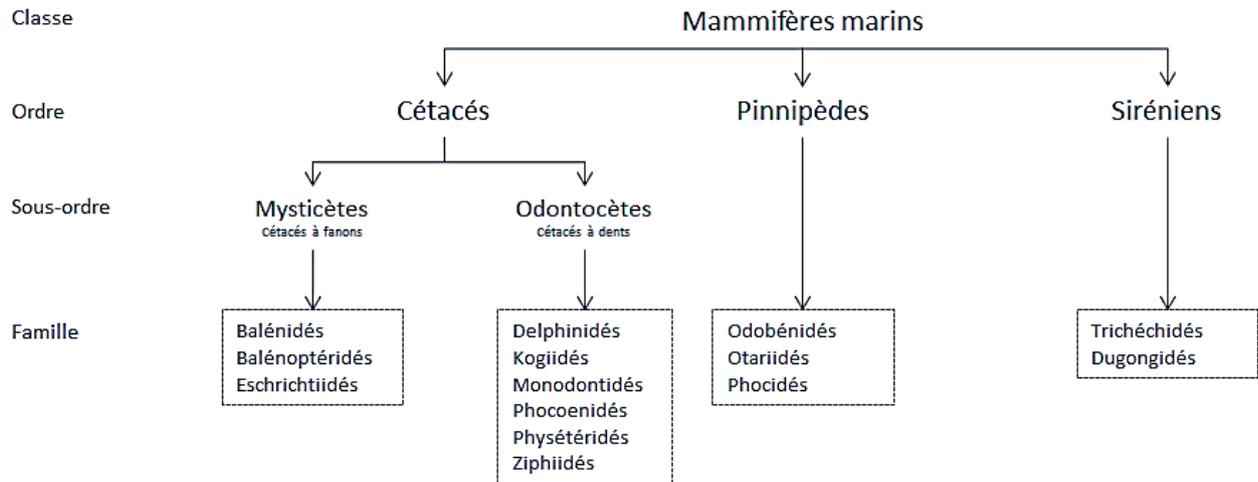


Figure 58 : Schéma de la classification scientifique des espèces océaniques et marines de mammifères. Source : Quiet-Oceans.

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

Le Tableau 45 synthétise les informations recensées via des données bibliographiques et des campagnes d'observations visuelles, concernant les mammifères marins susceptibles d'être rencontrés au large de la Normandie, et à proximité des zones étudiées (cf. Figure 7). Ce recensement permet de définir les familles de mammifères marins qui seront acoustiquement recherchées durant le traitement et l'analyse bioacoustique de la donnée audio.

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.

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

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

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

Tableau 45 : Synthèse des données concernant les mammifères marins susceptibles d'être présents au large de la Normandie à proximité des zones d'étude.

Famille	Espèce		Statut UICN	Statut de fréquentation du site	Catégorie acoustique
	Nom Usuel	Nom Latin			
Delphinidés	Grand dauphin	<i>Tursiops truncatus</i>	LC	Occasionnel	HF
	Dauphin bleu-et-blanc	<i>Stenella coeruleoalba</i>	LC	Occasionnel	HF
	Dauphin commun	<i>Delphinus delphis</i>	LC	Occasionnel	HF
	Dauphin de Risso	<i>Grampus griseus</i>	LC	Occasionnel	HF
	Globicéphale noir	<i>Globicephala melas</i>	LC	Erratique	HF
	Orque	<i>Orcinus orca</i>	DD	Erratique	HF
	Lagénorhynque à flanc blanc	<i>Lagenorhynchus acutus</i>	LC	Erratique	HF
Phocoenidés	Marsouin commun	<i>Phocoena phocoena</i>	LC	Permanent	VHF
Phocidés	Phoque gris	<i>Halichoerus grypus</i>	LC	Permanent	PCW



Figure 59 : Famille des Delphinidés – Grand dauphin (*Tursiops truncatus*). Source : EcoOcéan Institut.



Figure 60 : Famille des Phocoenidés - Groupe de Marsouins communs (*Phocoena phocoena*). Source : GREMM.



Figure 61 : Famille des Phocidés – Phoque gris (*Halichoerus grypus*). Source : AMP.

VII.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.

VII.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 62 et la Figure 63.

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 46). 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 classification⁴.

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'écholocation⁵. 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.

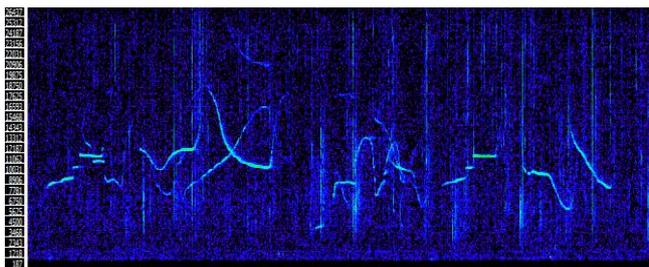


Figure 62 : Sifflements de Delphinidés émis entre 2 kHz et 25 kHz. Source : Quiet-Oceans.

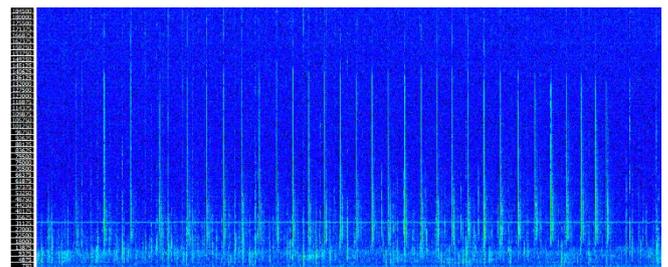
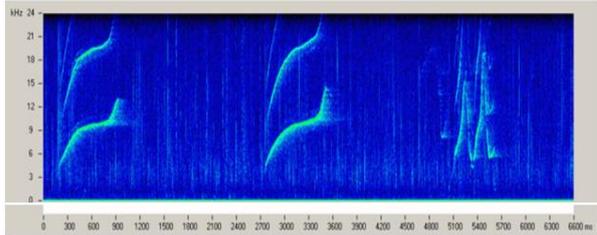


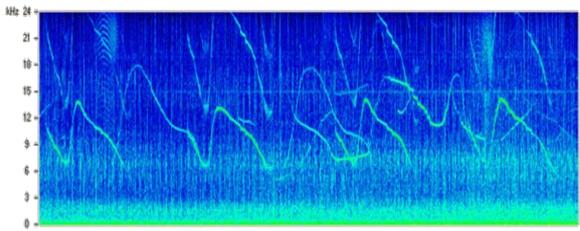
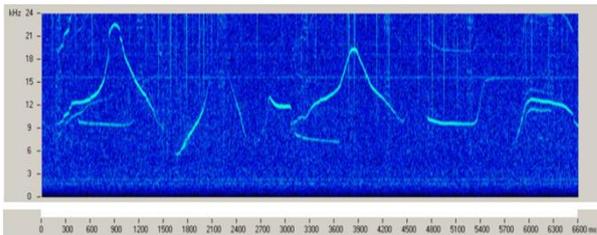
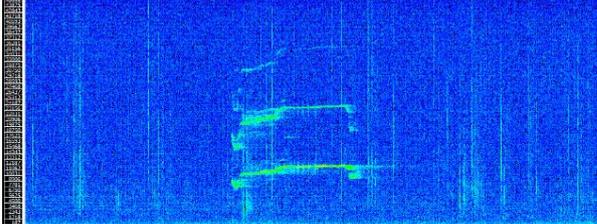
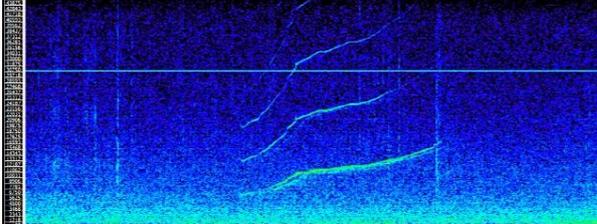
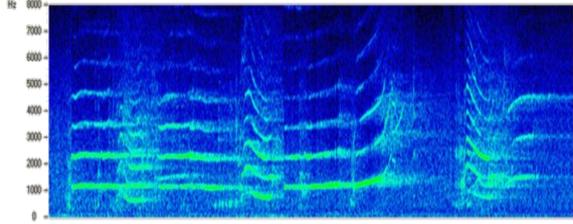
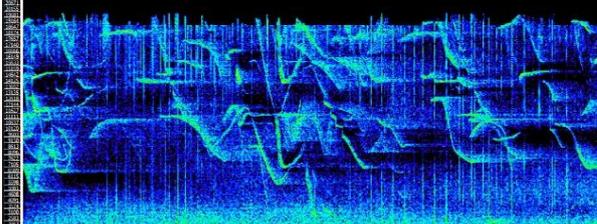
Figure 63 : Clics de Delphinidés émis entre 10 kHz et 180 kHz. Source : Quiet-Oceans.

Tableau 46 : Exemple de la diversité de sifflements émis par les Delphinidés avec le spectrogramme des émissions des espèces susceptibles d'être présentes au large de la Normandie.

Espèce	Bande de fréquence	Spectrogramme
Grand dauphin (<i>Tursiops truncatus</i>)	5 à 25 kHz	 <p>http://www-3.unipv.it/cibra/edu_dolphins_uk.html</p>

⁴ La classification permet d'associer l'espèce animale correspondante à un signal biologique.

⁵ Evènement renseignant les Delphinidés sur le milieu dans lequel ils évoluent mais également indicateur d'une quête de nourriture.

Espèce	Bande de fréquence	Spectrogramme
Dauphin bleu-et-blanc (<i>Stenella coeruleoalba</i>)	3.5 à 28.5 kHz	 <p>http://www-3.unipv.it/cibra/edu_dolphins_uk.html</p>
Dauphin commun (<i>Delphinus delphis</i>)	Variation géographique mais en moyenne entre 5 et 20 kHz	 <p>http://www-3.unipv.it/cibra/edu_dolphins_uk.html</p>
Dauphin de Risso (<i>Grampus griseus</i>)	4 à 22 kHz	 <p>Source : Quiet-Oceans</p>
Globicéphale noir (<i>Globicephala melas</i>)	4.2 à 8.9 kHz	 <p>Source : Quiet-Oceans</p>
Orque (<i>Orcinus orca</i>)	1 à 20 kHz	 <p>http://www-3.unipv.it/cibra/edu_occasional_uk.html</p>
Lagénorhynque à flanc blanc (<i>Lagenorhynchus acutus</i>)	6 à 15 kHz	 <p>https://www.nefsc.noaa.gov/psb/acoustics/sounds.html</p>

VII.1.3.b. Sons émis par les Phocoenidés

Les caractéristiques d'émission acoustique du Marsouin commun, *Phocoena phocoena*, sont des clics (signaux impulsifs) hautes fréquences dont la bande fréquentielle d'émission est concentrée dans la bande allant de 110 à 150 kHz. Les clics durent en moyenne 0.1 ms. Ces émissions sonores ont un double rôle, elles sont utilisées pour la communication (Figure 64) mais également pour l'écholocalisation (Figure 65).

L'écholocalisation, indicateur d'une quête de nourriture, se traduit par un changement d'intervalle de temps entre deux clics consécutifs, ICI (« *Inter-Click Interval* »), entre le moment où le Phocoenidé recherche une proie et le moment où il approche et capture cette dernière. Plus le Phocoenidé se rapproche de sa proie, plus l'ICI est court et peut être apparenté à un « buzz ». Lors de la recherche de la proie, l'intervalle de temps entre chaque clic est compris entre 30 et 100 ms. Cet intervalle se réduit progressivement jusqu'à une cadence d'un clic toutes les 1.5 ms lorsque le Phocoenidé n'est plus qu'à un ou deux mètres de sa proie (Miller & Wahlberg, 2013).

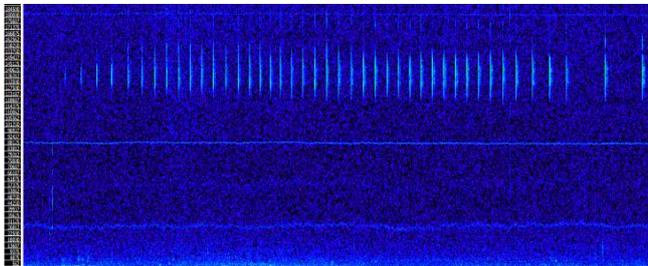


Figure 64 : Clics de Marsouins communs, *Phocoena phocoena*, émis dans la bande fréquentielle allant de 110 à 150 kHz.

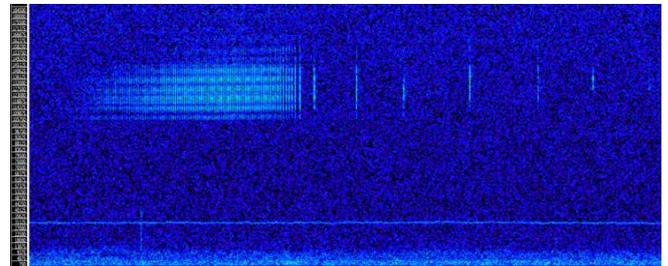


Figure 65 : Clics de Marsouins communs, *Phocoena phocoena*, lors d'une activité de chasse (clics d'écholocalisation).

VII.1.3.c. Sons émis par les Phocidés

Le Phoque gris, *Halichoerus grypus*, reste connu comme étant le moins vocal de la famille des Phocidés. Il émet des clics (signaux impulsifs) dans la bande fréquentielle allant de 0.2 à 12 kHz (Figure 66) ainsi que différents grognements (signaux modulés) dans la bande de fréquence allant de 0.1 et 5 kHz et dont le pic fréquentiel d'émission est compris entre 100 et 400 Hz (Figure 67) (Asselin et al., 1993; McCulloch, 1999; Prawirasasra et al., 2021; Schusterman et al., 1970; Todd et al., 2015). Selon la communauté scientifique, l'ensemble de ces vocalisations ne seraient produites que lors d'interactions sociales entre individus.

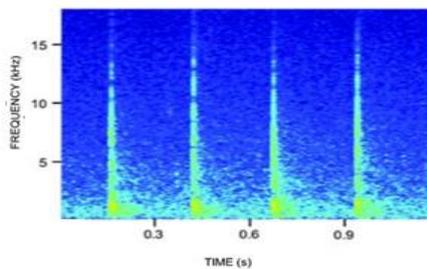


Figure 66 : Clics de Phoque gris (*Halichoerus grypus*) émis entre 0.2 et 12 kHz (Prawirasasra et al., 2021).

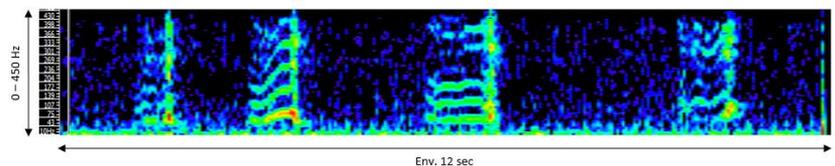


Figure 67 : Grognements de Phoque gris (*Halichoerus grypus*) émis entre 50 Hz et 400 Hz. Source : NOAA.

VII.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 de la Normandie. 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. 1 μ Pa @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. 1 μ Pa @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 adéquatement la portée de détection pour cette espèce. Toutefois, les émissions de sifflements par les Dauphins communs, espèce occasionnellement présente au large de la Normandie, 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 Marsouins communs (*Phocoena phocoena*). Ces derniers émettent des clics très haute fréquence, entre 110 et 150 kHz, qui sont généralement audibles dans un rayon de 200 à 300 m autour de l'enregistreur acoustique (Bailey et al., 2010; Tougaard et al., 2006).

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 47 et Tableau 48 synthétisent les statistiques des distances de détection respectives aux périodes hivernale et estivale. Les portées de détection sont fournies pour différentes proportions de temps (95%, 50%, etc...) pour chaque zone d'étude équipée d'un enregistreur acoustique, soit pour les stations R1, R2, R3, R4 et R7. En effet, les systèmes autonomes C-POD ne permettant pas de mesurer le bruit ambiant, l'estimation des portées de détection depuis ces systèmes n'est donc pas réalisable. Les résultats obtenus mettent en évidence une différence significative de portée de détection entre les différentes espèces de Delphinidés pour 50% du temps. 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 très faible.

Il apparaît également que les portées de détections sont plus étendues durant la saison hivernale que durant la saison estivale pour chacune des espèces potentiellement présentes sur site. Cette différence entre les deux saisons, hivernale et estivale, est la conséquence d'un bruit ambiant statistiquement plus élevé durant la saison estivale.

Pour rappel :

- ✓ L'enregistreur acoustique déployé au niveau de la station R1 n'a pas pu être récupéré à la fin des saisons hivernale et estivale 2022 (cf. IV.2.1. et IV.2.2.)
- ✓ L'enregistreur acoustique déployé au niveau de la station R2 n'a pas pu être récupéré à la fin de la saison estivale 2022 (cf. IV.2.2.).

Les portées de détections pour ces stations n'ont donc pas pu être estimées pour les périodes mentionnées.

Tableau 47 : 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 (saison hivernale).

Famille	Espèce	Zone	Portée de détection (m)				
			Proportion du temps (%)				
			95	75	50	25	5
Delphinidés	Grand dauphin <i>Tursiops truncatus</i>	R1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
		R2	313	482	591	690	848
		R3	216	473	687	921	1272
		R4	682	1045	1269	1496	1817
		R7	392	633	763	875	1030
	Dauphin bleu-et-blanc <i>Stenella coeruleoalba</i>	R1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
		R2	93	119	137	154	180
		R3	83	175	211	246	298
		R4	120	171	197	221	254
		R7	119	152	173	196	230

Tableau 48: 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 (saison estivale).

Famille	Espèce	Zone	Portée de détection (m)				
			Proportion du temps (%)				
			95	75	50	25	5
Delphinidés	Grand dauphin <i>Tursiops truncatus</i>	R1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
		R2	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
		R3	55	154	679	1020	1320
		R4	629	818	929	1044	1207
		R7	17	25	42	132	780
	Dauphin bleu-et-blanc <i>Stenella coeruleoalba</i>	R1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
		R2	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
		R3	34	91	139	169	209
		R4	85	105	120	137	157
		R7	8	11	21	73	127

VII.3. Procédé de traitement bioacoustique

Le traitement bioacoustique analyse indépendamment d'une part, les données collectées par les enregistreurs acoustiques et d'autre part, les données collectées par les systèmes autonomes POD (C-POD ou F-POD).

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. Toutefois, étant donnée le dispositif, 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 très précise par pulse par seconde - pps), aucune méthode de triangulation n'est applicable pour localiser l'espèce.

VII.3.1. Données issues d'un enregistreur acoustique

Le traitement bioacoustique de la donnée recueillie par les enregistreurs acoustiques consiste à détecter les signaux biologiques dans les données acoustiques brutes (au format audio 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 (Figure 68).

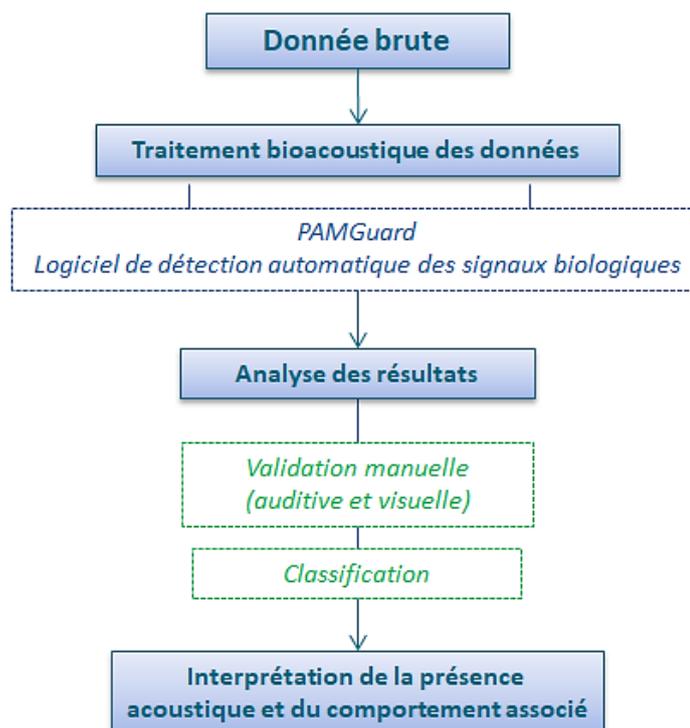


Figure 68 : Procédure générale appliquée à la donnée brute pour le traitement bioacoustique des enregistrements sonores.

VII.3.1.a. 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.

i. 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 de type « sifflements » émis par les Delphinidés entre 2 kHz et 20 kHz et de type « grognements » émis par les Phocidés entre 80 Hz et 1 500 Hz (cf. VII.1.3.).

ii. 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 Phocoenidés entre 110 et 150 kHz.

VII.3.1.b. 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 les experts bioacoustiques de Quiet-Oceans et Biotope. 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.

La procédure de validation manuelle consiste à discrétiser la donnée sur une durée de trois minutes pour obtenir des quartiles. Afin d'allier temps de validation et représentativité des résultats, une proportion de ces quartiles est soumise à la validation manuelle. Suite à la validation des évènements sonores présents dans chacun de ces quartiles, ces derniers sont classifiés en tant que :

- ✓ « vrai-positifs », lorsqu'au moins une détection de signatures acoustiques de mammifères marins est confirmée ;
- ✓ « faux-positifs », lorsque qu'aucune détection de signatures acoustiques de mammifères marins n'a été confirmée.

Cette validation des quartiles 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.

VII.3.1.c. Analyses des données bioacoustiques

i. Taux journalier de présence

Afin d'analyser la fréquentation des mammifères marins susceptibles d'être présents aux alentours du futur parc éolien, un taux journalier de présence acoustique a été mesuré pour chacune des zones d'études. Ce taux correspond à la proportion de quartile « vrais-positifs » par jour, j , parmi tous les quartiles validés visuellement le jour j :

$$\frac{((\text{Nombres de quartiles vrais_positifs}))_j}{(\text{Nombres de quartiles validés})_j}$$

La moyenne de ce taux journalier a été calculée pour chaque station (R1 à R7), pour chaque saison et pour chaque famille de mammifères marins.

ii. Phénologie mensuelle des détections

La phénologie des détections est représentée en utilisant un indice mensuel de présence. Cet indice mesure la proportion de jour dans un mois ayant au moins un quartile « vrai-positif » :

$$\frac{((\text{Nombre de jours avec au moins un quartile vrai-positif}))_m}{(\text{Nombres de quartiles validés})_m}$$

Cet indice mensuel de présence est calculé pour chaque station (R1 à R7) et pour chaque espèce de mammifères marins. Lorsque cet indice est regroupé par famille, il correspond à la somme des indices pour chaque espèce.

iii. Analyse des comportements

La répartition des différents comportements dans le temps et dans l'espace apporte une information clé sur pourquoi et comment les espèces utilisent leurs habitats. Cela permet d'identifier en particulier les zones et périodes de nourrissages, mais également les zones d'interaction sociale qui peuvent être importantes pendant les périodes de reproduction.

Pour chaque quartile « vrai-positif », les vocalisations observées ont été notées et répertoriées parmi 17 catégories reprenant différentes combinaisons possibles des types de vocalisation observés chez ces espèces (cf. VII.1.3.). Afin de faciliter l'analyse, ces catégories ont été associées à :

- ✓ 4 comportements pour les Delphinidés :
 - **Chasse**, à partir du moment où des « buzzs » sont présents dans les quartiles « vrais-positifs » ;
 - **Social**, si des sifflements, des clics sociaux (émis entre 10 et 80 kHz) et/ou des « cris pulsés » sont présents dans les quartiles ;
 - **Mixte**, quand tous les types de vocalisations sont présents dans un quartile « vrai-positif » ;
 - **Indéterminé**, lorsqu'il y a peu d'informations sur les vocalisations. Par exemple, en présence de clics d'écholocation uniquement, il est difficile d'établir le comportement des Delphinidés.
- ✓ 3 comportements pour le Marsouin commun (*Phocoena phocoena*) qui produit uniquement des clics en hautes fréquences (cf. VII.1.3.b.) :
 - **Écholocation**, lorsqu'il y a uniquement des trains de clics réguliers ;
 - **Chasse**, lorsqu'il y a uniquement des « buzzs » ou des trains de clics dont l'ICI (Intervalle Inter-Clic) se réduit jusqu'à former un « buzz » ;
 - **Mixte**, lorsqu'il y a uniquement des trains de clics d'écholocation, des trains de clics dont l'ICI (Intervalle Inter-Clic) se réduit jusqu'à former un « buzz », et/ou uniquement des « buzzs ».

Cette classification simplifie la réalité complexe des vocalisations et leur signification réelles reste une interprétation.

Afin d'appréhender cette distribution, la répartition temporelle des détections est représentée sur un graphique de type actogramme (représentation de la rythmicité d'une variable). Les détections seront distribuées en fonction de l'heure de la journée et de leur date. Chaque espèce est identifiée avec un symbole différent et chaque comportement avec une couleur différente. Afin de mieux visualiser la densité des détections dans cette espace temporelle, une densité de kernel est appliquée sur les données. La répartition des différents comportements est aussi représentée dans une figure par station et par espèce.

VII.3.2. Données issues d'un système autonome POD

VII.3.2.a. Algorithmes de détection et d'identification des évènements sonores

Comme décrit dans la partie IV.1.2. , un détecteur POD (C-POD ou F-POD) est un système autonome enregistrant les signaux impulsifs présents dans la colonne d'eau et pouvant procéder à la classification de ces derniers grâce à un algorithme interne comparant directement l'énergie présente entre une bande de fréquence de référence et celle des signaux d'intérêts. Le système POD permet donc une analyse de la fréquentation des zones d'étude par les Delphinidés et Phocoenidés.

Les fichiers bruts obtenus en sortie d'instrument sont traités via un logiciel spécifique fournit par le constructeur Chelonia Limited. Ce logiciel permet d'une part d'analyser la durée et la fréquence des évènements détectés et d'autre part, d'identifier la source des évènements selon quatre catégories :

- ✓ Cétacés Haute Fréquence (NBHF), pour les Phocoenidés ;
- ✓ Delphinidés ;
- ✓ SONAR ;
- ✓ Autres signaux impulsifs.

Un indice de confiance est attribué à chaque classification réalisée par le logiciel : élevé, modéré, faible ou très faible. L'analyse des résultats bioacoustiques a été réalisée sur les détections ayant un indice de confiance élevé à modéré, comme préconisé dans le document de référence sur l'évaluation des impacts des parcs éoliens offshore allemands (Aumüller et al., 2013). Il est important de préciser que le système autonome POD ne conserve pas de fichier audio brut et ne permet donc pas la vérification manuelle des détections.

VII.3.2.b. Analyses des données bioacoustiques

L'analyse des résultats bioacoustique du système POD a été réalisée uniquement sur les détections ayant un indice de confiance élevé à modéré (cf. IV.1.2.).

A noter, le travail d'inter-comparaison réalisé dans le cadre de cette étude (voir. VII.3.3.) permettra d'établir à la fois la proportion des quartiles confirmés, soit « vrais-positifs », et la proportion de contacts acoustiques non détectés par le système POD. A la suite de ce travail, il sera possible de corriger le nombre réel de détections réalisées par le POD.

i. Proportion des détections par jour

Pour rappel, le système POD ne conserve pas de fichier audio brut et ne permet donc pas la vérification manuelle des détections. Dans ce contexte, l'analyse bioacoustique de la donnée diffère de celle mise en œuvre pour la donnée de l'enregistreur. En effet, en l'absence de qualification des quartiles (« vrais-positifs » ou « faux-positifs »), la proportion journalière des détections par espèce est déterminée afin d'analyser la fréquentation du site via les systèmes PODs :

$$\frac{((\text{Nombre de détections}))_{j,\text{espèce}}}{(\text{Nombre de détections total})_j}$$

ii. Phénologie mensuelle des détections

L'indice mensuel calculé dans le cadre de la donnée de l'enregistreur acoustique (cf. VII.3.1.c. ii) intègre à la fois la données des enregistreurs et celle des systèmes PODs. En effet, à partir du moment où il y a un quartile « vrai-positif » ou une détection réalisée par le POD dans une journée, cette journée est considérée comme positive.

iii. Analyse des comportements

La donnée du système POD permet d'avoir un accès à des informations limitées sur le comportement de l'animal détecté acoustiquement. En effet, les activités de chasse peuvent être déterminées via un post-traitement sur la durée de l'intervalle inter-clic (ICI) de chaque train de clics détectés. Toutefois, ce post-traitement significatif

n'pas fait l'objet d'une mise en œuvre actuellement. De plus, la donnée audio brut n'étant pas disponible, et le système POD ne permettant pas la détection des signaux transitoires de type sifflements, le système POD ne donne pas accès aux informations sur les autres comportements de ces mammifères marins.

VII.3.3. Inter-comparaison des systèmes acoustiques

Afin de pouvoir qualifier les résultats de fréquentation obtenue via la donnée du système POD, des déploiements simultanés de ce système et d'un enregistreur acoustique ont été réalisés au niveau des zones proche (R1) et intermédiaire (R3) du projet pour la première année de suivi acoustique (cf. Chapitre IV). Cette qualification permettra par la suite de statuer sur la pertinence de déployer un système POD seul dans la colonne d'eau.

La configuration de ces déploiements consiste en un flotteur subsurface équipé à la fois d'un enregistreur acoustique autonome et d'un système POD immergé à une profondeur intermédiaire de la colonne d'eau, et espacés d'un à deux mètres sur la ligne de mouillage. Les deux systèmes sont donc soumis aux mêmes conditions environnementales et permettent la réalisation d'une inter-comparaison des résultats bioacoustiques.

Pour rappel, le système autonome POD (C-POD ou son successeur F-POD) enregistre en continu, soit 100% du temps, et attribue un indice de confiance à chaque détection réalisée (élevée, modérée, faible ou très faible). Dans ce contexte, la procédure d'inter-comparaison requiert (1) la discrétisation de la donnée afin de travailler sur des périodes d'acquisition comparable aux deux systèmes, soit sur 03 minutes d'acquisition toutes les 10 minutes (30% du temps) et, (2) la prise en compte des détections avec indice de confiance élevé à modéré comme préconisé dans le rapport de synthèse de l'étude MARSAC (Samaran et al., 2015).

Suite à la discrétisation de la donnée, les quartiles avec présence d'une (ou plusieurs) détection de signaux impulsifs réalisés par le POD sont dénombrés puis manuellement validés via la donnée audio de l'enregistreur acoustique positionné sur la même ligne de mouillage (Figure 69). Cette validation manuelle permet de déterminer les quartiles « vrais-positifs », c'est-à-dire avec une présence confirmée de signaux impulsifs biologiques, et donc de palier à l'absence de conservation des fichiers audio bruts par le système POD. L'origine des détections est donc vérifiée pour la totalité des quartiles avec présence de détections dont l'indice de confiance est élevé à modéré.

L'analyse des résultats obtenus pour l'inter-comparaison consiste à déterminer (1) le pourcentage de « vrais-positifs » du système POD, (2) les périodes communes aux deux systèmes acoustiques et (3) à mettre ces informations en regard du paysage acoustique et des conditions environnementales.

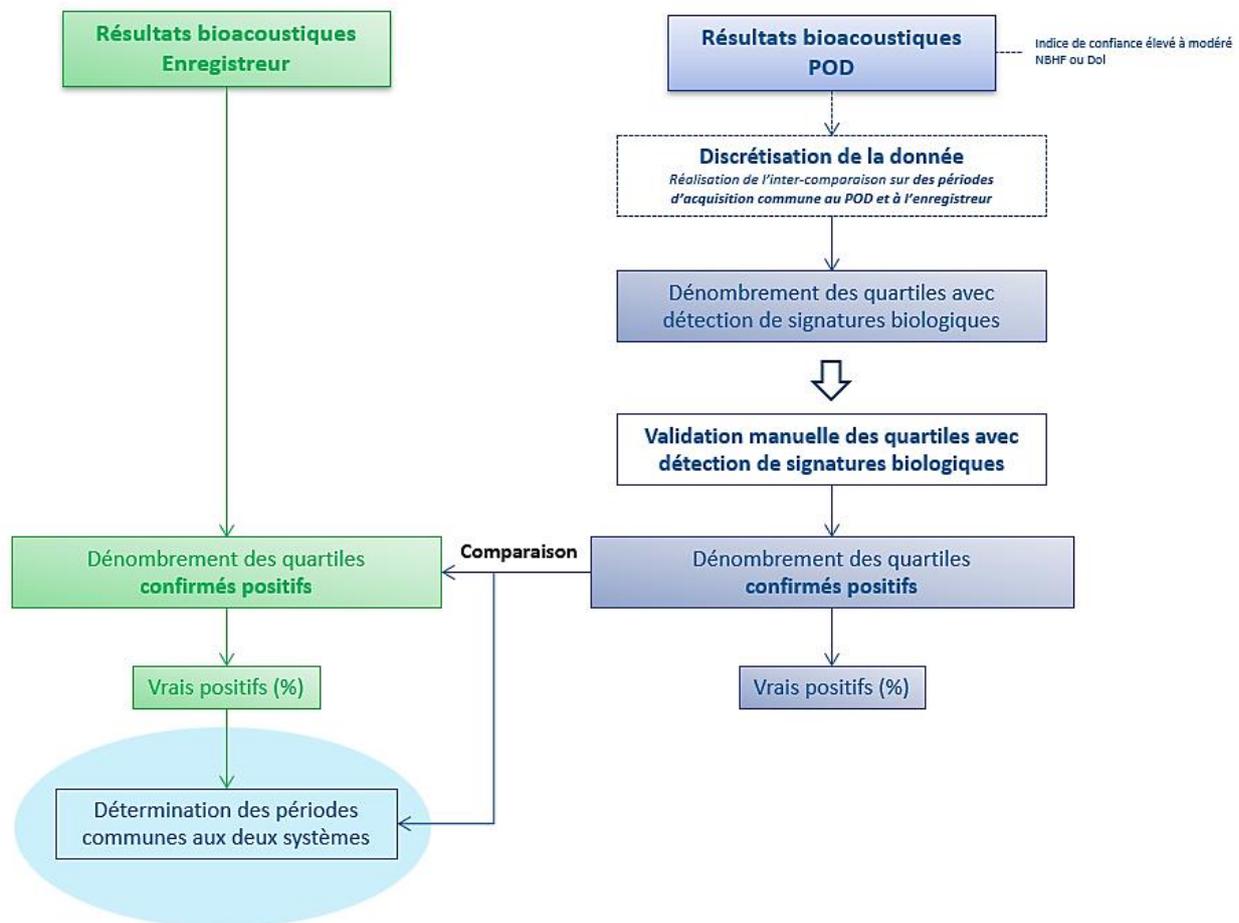


Figure 69 : Procédure appliquée pour la réalisation de l'inter-comparaison de l'enregistreur acoustique et du système POD.

VII.4. Résultats

Pour rappel, le déploiement d'un enregistreur acoustique et/ou d'un système POD a été réalisé dans chaque zone (proche, intermédiaire et éloignée) du 02 mars 2022 au 24 mai 2023. L'enregistreur acoustique déployé au niveau de la station R1 (zone proche) n'a pas pu être récupéré en raison de différents aléas (cf. IV.2.). En l'absence de donnée, l'analyse bioacoustique pour cette station n'a donc pas pu être réalisée.

Toutes les analyses réalisées dans le cadre de cette étude sont ciblées sur la période du 02 mars 2022 au 09 février 2023. Les résultats obtenus sont donc représentatifs de la distribution spatio-temporelle des espèces de mammifères marins pour l'année de référence 2022-2023. La donnée audio récupérée sur la période du 09 février au 24 mai 2023 (cf. IV.2.5.) est actuellement en cours d'analyse.

VII.4.1. Fréquentation du site par les mammifères marins

Sur la période d'étude du 02 mars 2022 au 09 février 2023, parmi tous les quartiles inspectés (jusqu'à 100 quartiles par jours sur l'ensemble des stations, Figure 70), 23% contiennent des détections de mammifères marins. Parmi ces quartiles, six espèces de mammifères marins ont été identifiées avec certitude :

- ✓ Le Marsouin commun (*Phocoena phocoena*), pour 54% des quartiles ;
- ✓ Le Grand dauphin (*Tursiops truncatus*), pour 1% des quartiles ;
- ✓ Le Dauphin commun (*Delphinus delphis*), pour 0.5% des quartiles ;
- ✓ Le Dauphin de Risso (*Grampus griseus*), pour 0.5% des quartiles ;
- ✓ Le Dauphin bleu-et-blanc (*Stenella coeruleoalba*), pour deux quartiles ;
- ✓ Le Globicéphale noir (*Globicephala melas*), pour un quartile.

Les 32% restant des détections de Delphinidés n'ont pas pu être identifiées jusqu'à l'espèce, faute d'informations sur les caractéristiques acoustiques des signaux transitoires (sifflements) détectés.

A noter, une espèce de Delphinidé non identifiée a été observée pour 18% des quartiles. Les vocalisations de cette espèce, quotidiennement observées au niveau de la station R4 entre décembre 2022 et janvier 2023, correspondent à (1) un signal transitoire émis à une fréquence de départ supérieure à 30 kHz avec des harmoniques jusqu'à environ 100 kHz et (2) des trains de clics émis entre 40 et 130 kHz (Figure 71). L'espèce est non-identifiée à ce jour. Dans ce contexte, Biotope et Quiet-Oceans font appel à leurs connaissances en France et à l'étranger afin de pouvoir identifier ces signatures acoustiques.

La proportion des détections entre les différentes espèces de mammifères marin varie en fonction des stations (Figure 72). Au niveau de la station R7, la proportion de détection de Marsouin commun par rapport aux espèces de Delphinidés est significativement plus importante que pour les autres stations (83% en R7 et au maximum 63% en R2). La proportion de quartiles de Marsouins communs est la plus faible (53%) au niveau de la station R3. Quelques quartiles avec des vocalisations émises par le Dauphin de Risso et le Globicéphale noir ont respectivement été identifiés au niveau des stations R4 et R7. Des vocalisations identifiées comme provenant du Grand dauphin et du Dauphin commun ont été détectées au niveau de chaque station.

Suite à ces résultats, il apparaît que la fréquentation des mammifères marins se démarque au niveau de la station R7, station située au large (NE de la zone projet) avec une bathymétrie plus importante.

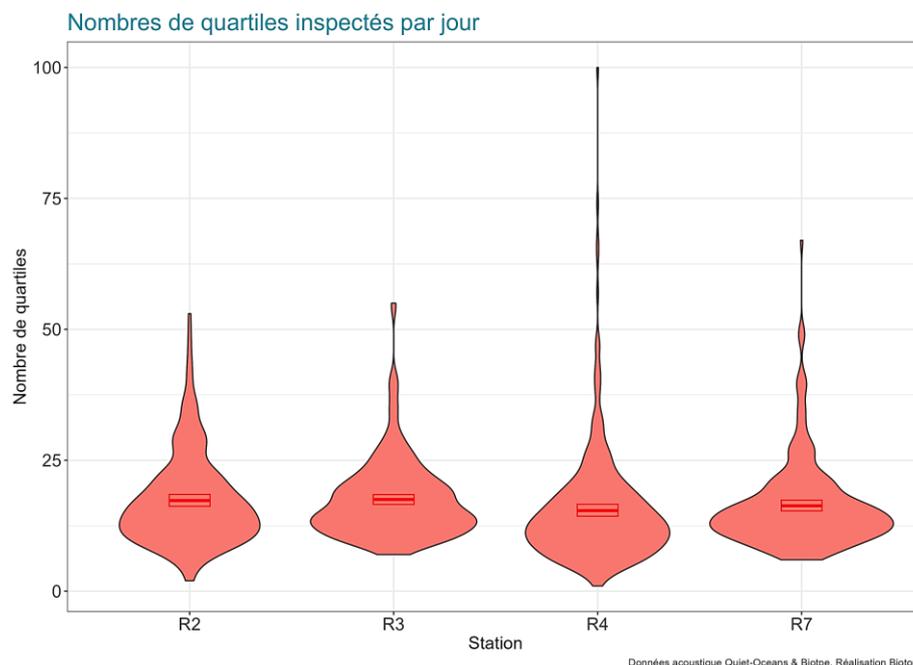


Figure 70: Nombre de quartiles inspectés par jour et par station. Le rectangle rouge au milieu représente la moyenne avec son intervalle de confiance.

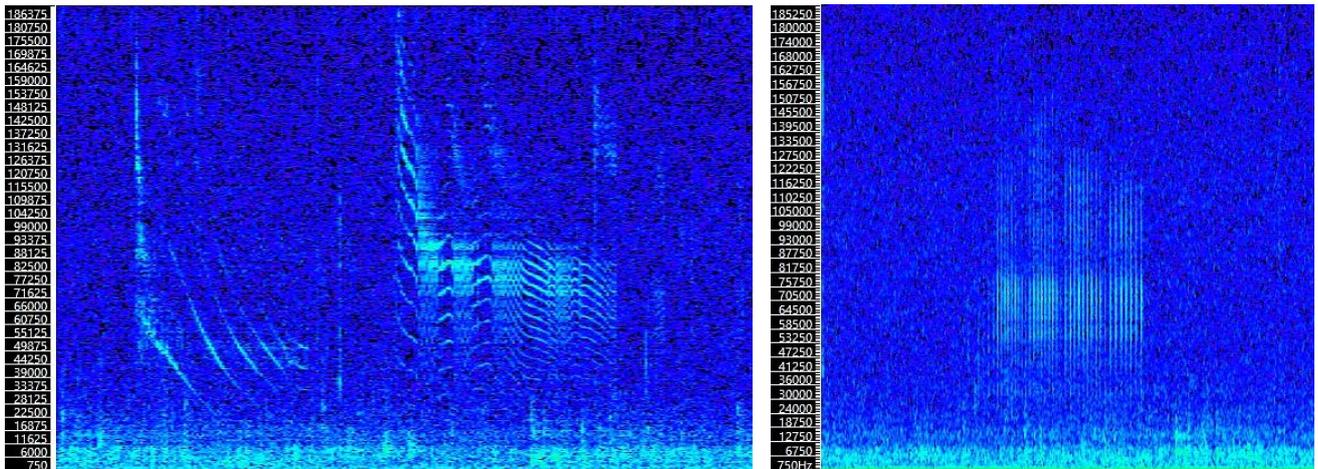
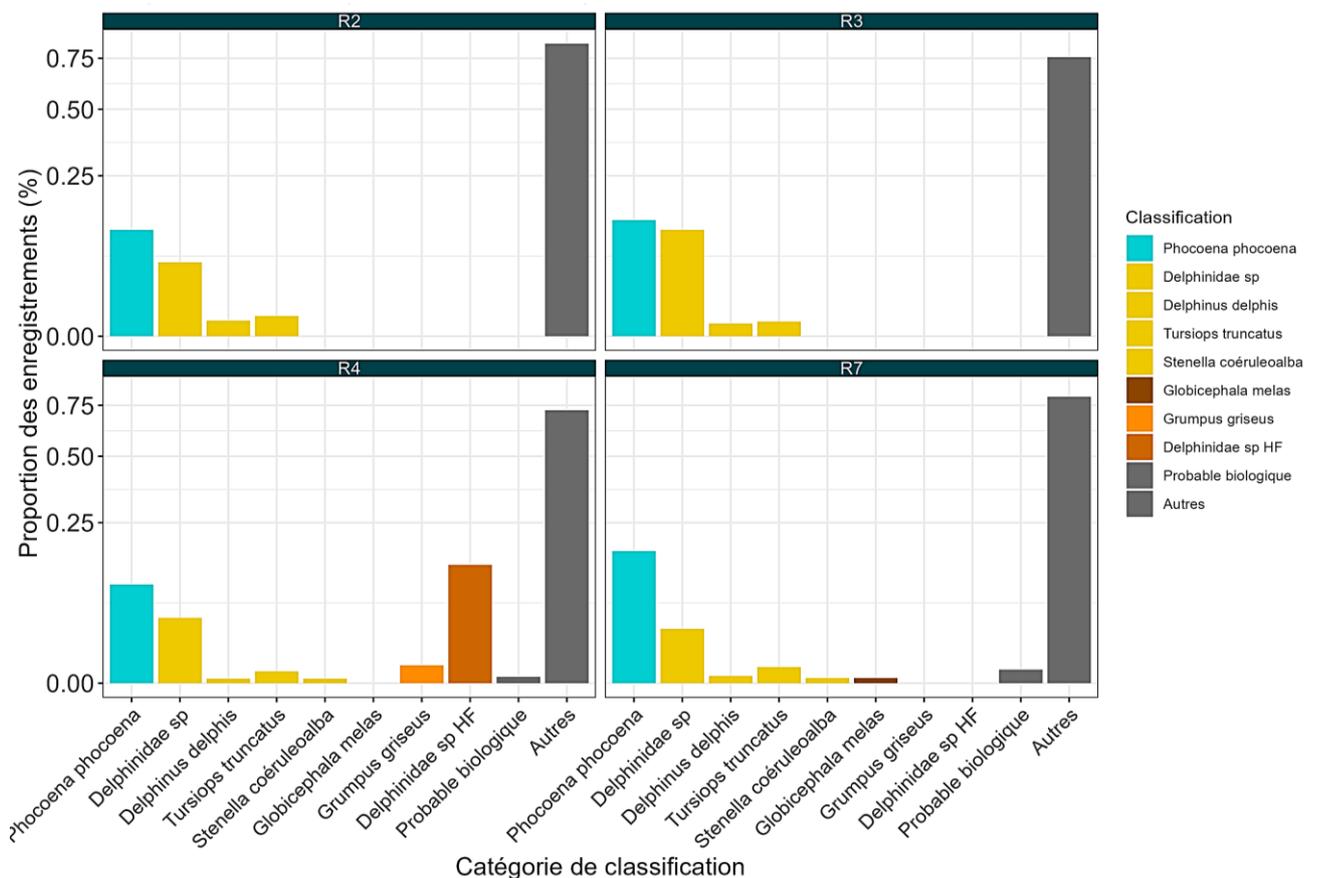


Figure 71 : Exemple de signaux acoustiques émis par une espèce de Delphinidés non-identifiée au niveau de la station R4 en décembre 2022.



Données acoustique QuietOceans & Biotpe. Réalisation Biotope

Figure 72 : Répartition des détections classifiées par espèces ou groupe d'espèce parmi les quartiles validés sur l'ensemble de la période d'étude, du 02 mars au 09 février 2023. Probable biologique (gris foncé) : quartiles pour lesquels un signal acoustique biologique est observé mais non identifié ; Autres (gris clair) : proportion de quartiles sans détections de mammifères marins.

VII.4.1.a. Indice de présence journalière

La distribution temporelle de présence acoustique des mammifères marins a été caractérisée à l'aide d'un ensemble de figures afin de pallier l'absence d'estimation d'une abondance absolue (ou relative) qu'il est difficile d'obtenir à partir des données et connaissances actuelles. Ces figures permettent de visualiser la présence, ou absence le cas échéant, quotidienne des mammifères marins tout au long des campagnes pour chaque système acoustique, enregistrement large bande (Figure 73 et Figure 74) ou POD (Figure 75), et pour chaque station.

Les Figure 73 et Figure 74 représentent respectivement le taux journalier minimum de présence acoustique quotidienne (cf. VII.3.1.c. i) pour les Delphinidés et les Marsouins communs déterminé suite à l'analyse des résultats obtenus via les enregistreurs acoustiques. La présence d'une barre indique qu'il y a eu au moins une détection dans la journée. La hauteur de la barre indique le taux journalier.

La Figure 75 représente les résultats des détections réalisées par les systèmes POD (C-POD ou F-POD), c'est-à-dire les quartiles avec des détections de clics émis soit par les Marsouins communs, soit par les Delphinidés. Ainsi, l'axe des ordonnées représente la proportion des quartiles avec présence de clics émis soit par les Marsouins communs soit par les Delphinidés.

Les Delphinidés, toutes espèces confondues, sont régulièrement présents sur l'ensemble de la période d'analyse et sur l'ensemble des quatre stations étudiées (équipées d'enregistreur et/ou POD) (Figure 73 et Figure 75). Le taux journalier varie significativement, passant d'une absence totale dans une journée à une présence à 100% du temps (Figure 73) pour l'espèce non identifiée au niveau de la station R4. On peut noter une augmentation significative du taux journalier de présence des Delphinidés en hiver, à partir du mois de décembre 2022 au niveau de chacune des stations R2, R3 et R4. Il est également possible de noter un taux journalier plus important en mars 2022.

Les données POD (Figure 75) confirment ces résultats avec des détections de Delphinidés au niveau de chaque station. Une hausse du nombre de détections est également observée en hiver 2023 au niveau des stations R3 et R5, stations pour lesquelles de la donnée a été collectée sur une durée significative.

Concernant les Marsouins communs (Figure 74), une fréquentation régulière est observée sur l'ensemble des stations avec un taux journalier plus important en hiver 2023 au niveau de la station R2, et au printemps 2022 au niveau des stations R3, R4 et R7. Les données POD confirment une présence quasi-quotidienne sur l'ensemble des stations avec un taux journalier plus fort en hiver 2023 au niveau de la station R5 et en été 2022 au niveau de la station R3.

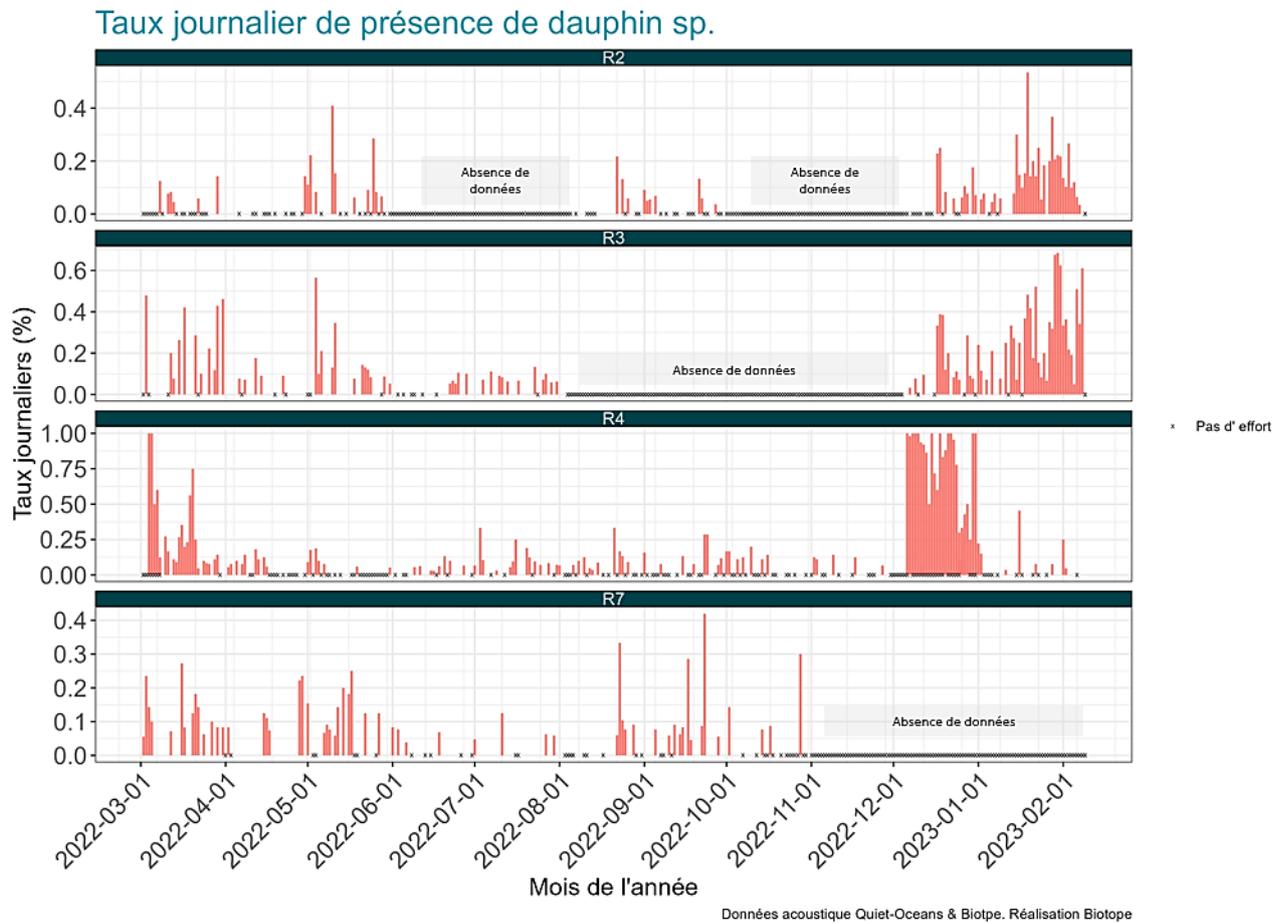


Figure 73 : Distribution du taux journalier de Delphinidés via la donnée des enregistreurs acoustiques au niveau des stations R2, R3, R4 et R7.

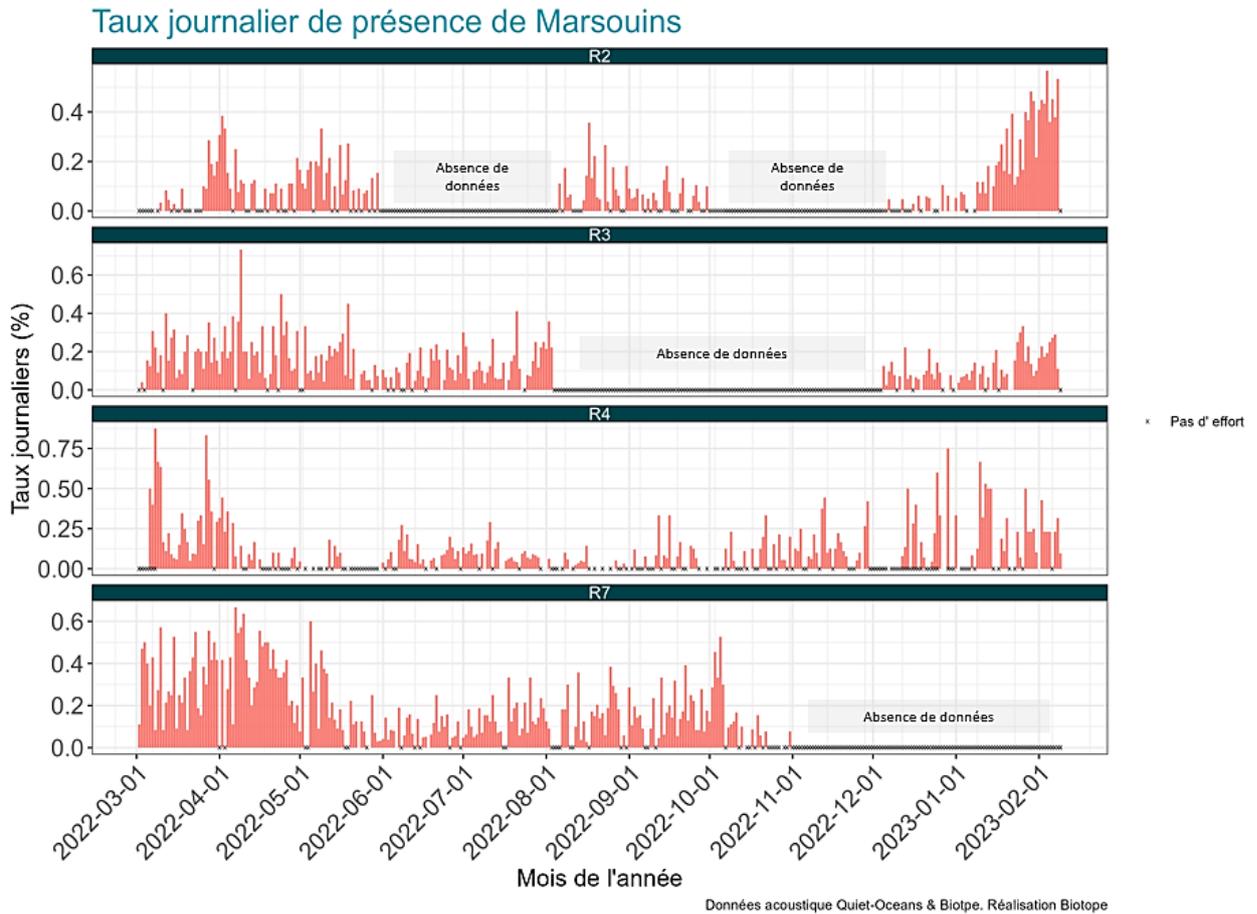


Figure 74 : Distribution du taux journalier de Marsouins communs (*Phocoena phocoena*) via la donnée enregistreurs acoustiques au niveau des stations R2, R3, R4 et R7.

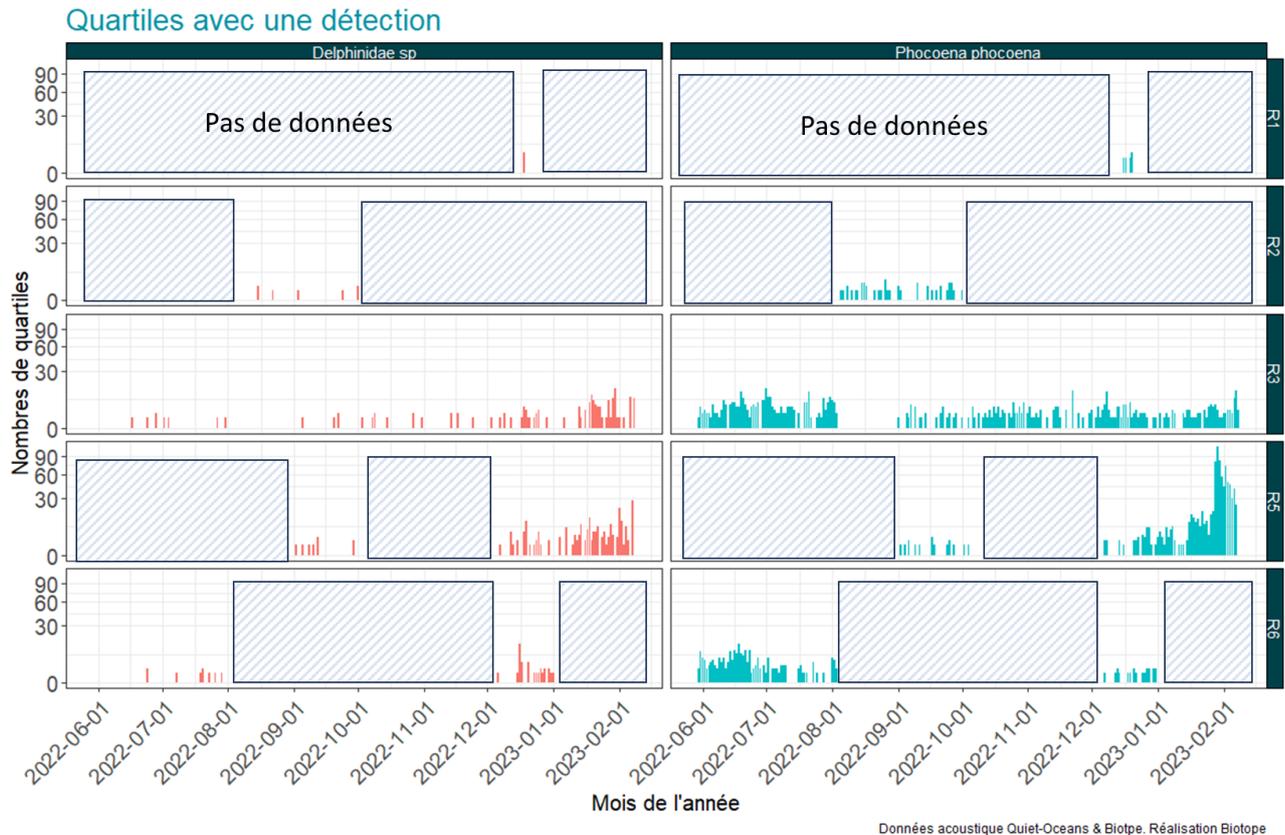


Figure 75 : Répartition des détections réalisées par le système POD (C-POD ou F-POD) sur l'ensemble de la période d'étude, du 02 mars au 08 février 2023. Rouge : Dauphin sp. ; Vert : Marsouin commun.

VII.4.1.b. Indice de présence mensuelle

L'indice de présence mensuel représenté sur les Figure 76 et Figure 77 permet de visualiser la proportion de jours par mois pour laquelle au moins un individu a été acoustiquement détecté, pour chaque station et chaque famille de mammifères marins. Par exemple un indice mensuel de 62% au mois de janvier 2023, indique qu'il y a eu au moins une détection de l'espèce ciblée sur 62% des jours inspectés du mois de janvier. Ces figures synthétisent les observations des graphiques de taux journaliers précédents.

De manière générale, l'indice de présence mensuelle des Delphinidés (Figure 76) qui est au maximum de 47%, est plus varié et plus faible que pour les Phocoenidés, avec des variabilités plus importantes intra- et inter-stations. Un indice plus faible est noté sur l'ensemble de l'année au niveau de la station R7, station la plus éloignée de la zone projet et la plus profonde dans la colonne d'eau. Une présence plus importante en hiver 2023 est observée au niveau des stations R2 et R3, respectivement située dans la zone du futur parc et dans la zone proche du parc. Toutefois, l'absence de données en automne 2022 au niveau de la station R3 ne permet pas de conclure si l'augmentation de fréquence à commencer en automne. La présence de Dauphin de Risso est notée uniquement au niveau de la station côtière R4 à la fin de l'été et en automne 2022. La présence de Grand dauphin semble régulière au cours de l'année sur l'ensemble des stations.

Les Marsouin communs sont présent tous les mois sur l'ensemble des stations (Figure 77). Leur présence au niveau de la station R2 dans la zone du futur parc éolien est plus variable d'un mois à l'autre. C'est au niveau de la station R4, la plus proche de la côte, que l'indice mensuel est le plus bas et le plus variable avec des détections en moyenne 1 jour sur 2 et un indice mensuel de 56%. A l'opposé, c'est au niveau des stations R3 et R7 que les détections de Marsouins communs sont les plus importantes avec un indice mensuel respectif de 85% et 83%. Ces résultats indiquent une présence quasi-quotidienne des Marsouins au niveau de ces stations. Au niveau de

la station R7, l'indice mensuel est très élevé en mars et avril 2022 avec une tendance à diminuer entre mai et août 2022. Au niveau des stations R2 et R4 on note une augmentation de l'indice mensuel du printemps 2022 vers l'hiver 2023. Au niveau des stations R3 et R7, leur distribution au cours de l'année semble homogène.

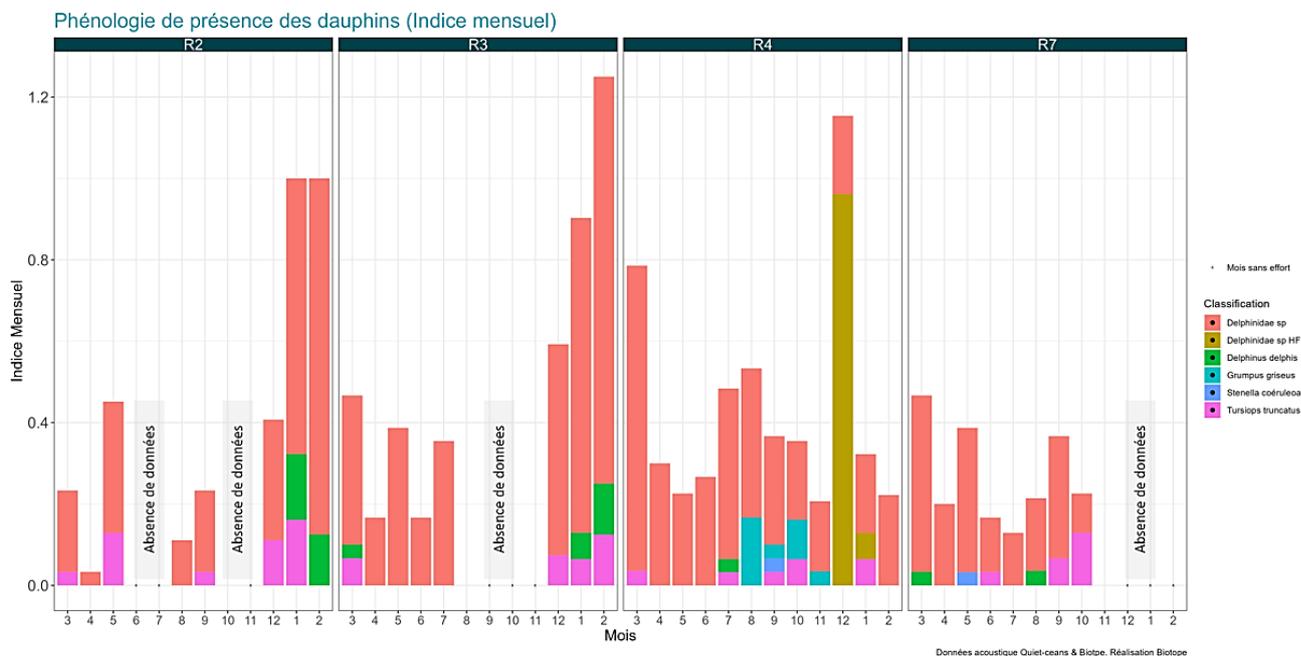


Figure 76 : Indice mensuel de présence des Dauphin *sp.* au niveau de chaque station. Ces résultats incluent uniquement les données des enregistreurs acoustiques.

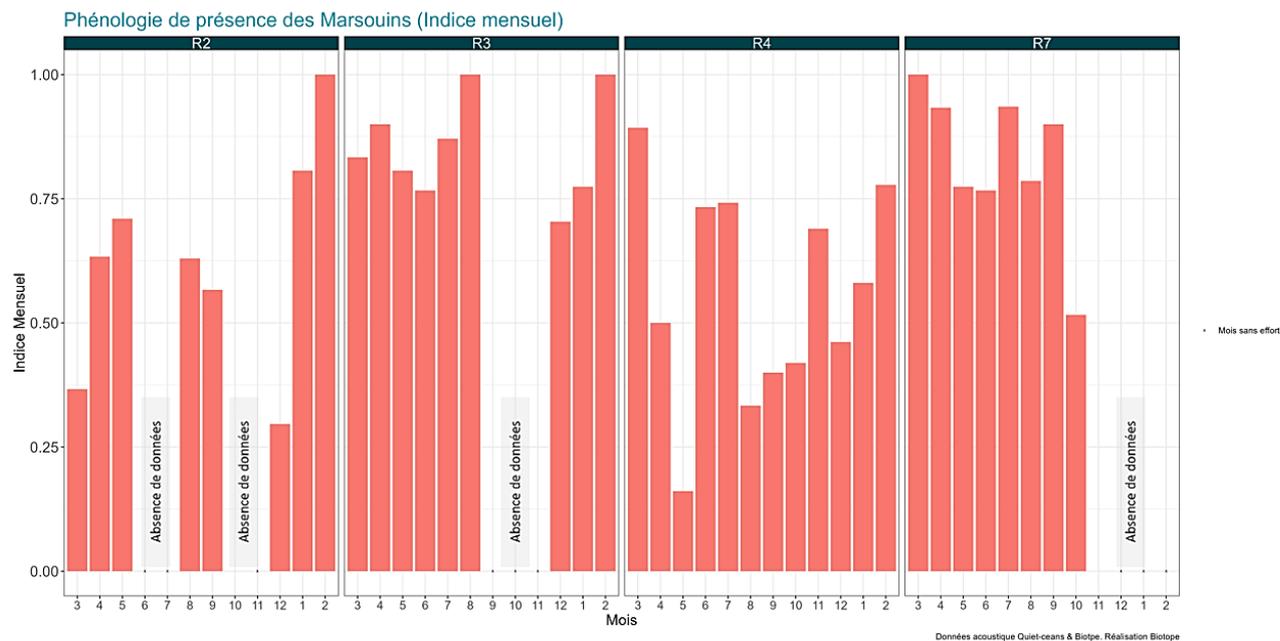


Figure 77 : Indice mensuel de présence des Marsouins communs (*Phocoena phocoena*) au niveau de chaque station. Ces résultats incluent uniquement les données des enregistreurs acoustiques.

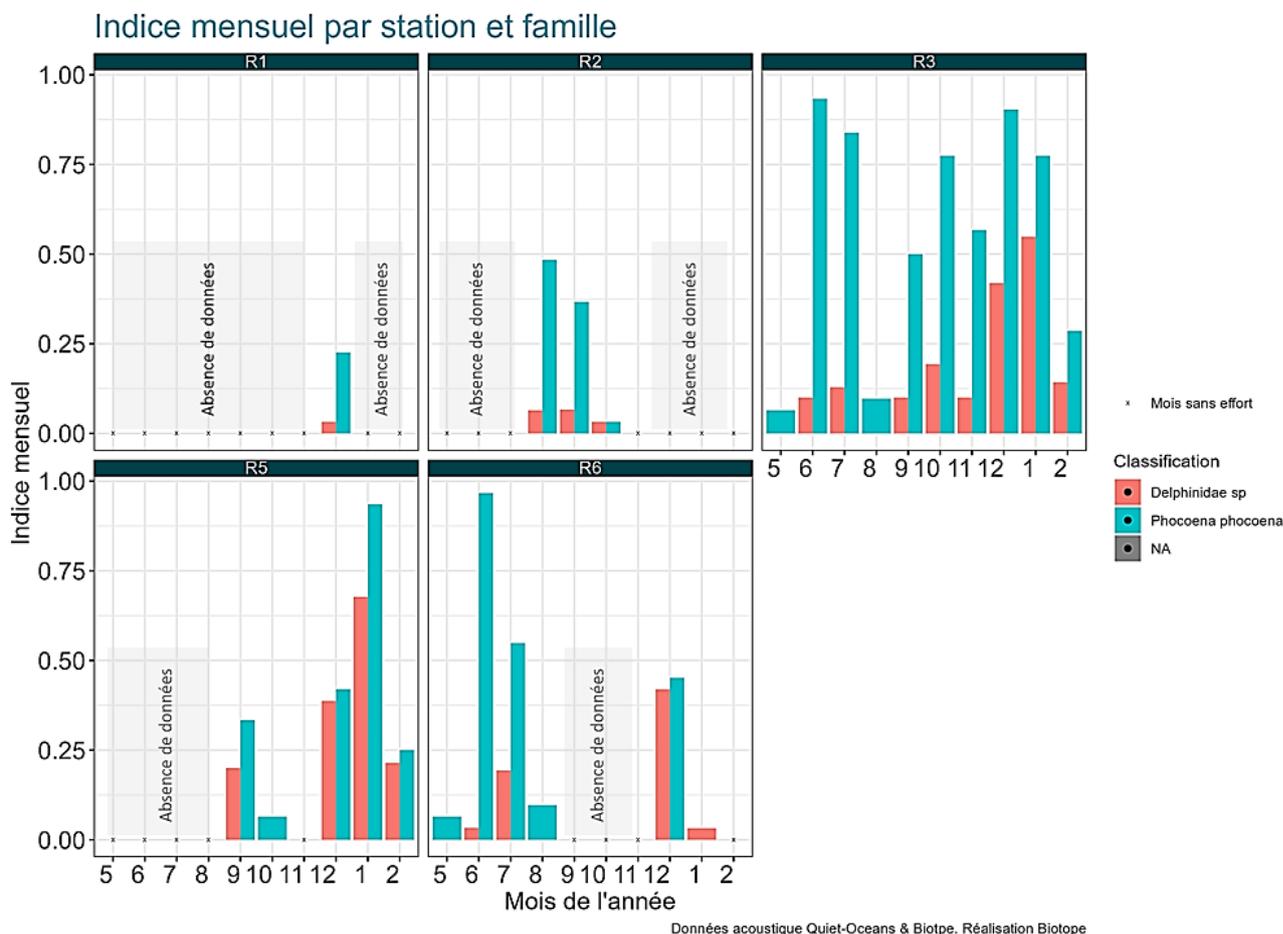


Figure 78 : Indice mensuel de présence des Marsouins communs (*Phocoena phocoena*) et des Delphinidés (*Delphinidae sp.*) au niveau de chaque station. Ces résultats incluent uniquement les données des systèmes PODs.

VII.4.2. Identification des comportements

L'analyse des comportements permet de mieux comprendre comment et pourquoi les espèces utilisent cet habitat. Cette analyse donne des indications sur la présence diurne et/ou nocturne autour de chacune des stations de la zone d'étude. Les conclusions de cette analyse permettront le cas échéant de définir des recommandations en phase de construction par exemple.

Les Delphinidés ont des vocalisations associées à des comportements sociaux en grande majorité au niveau de chaque station (Figure 79). Au niveau de la station R4, il est possible de noter la plus grande variabilité dans la proportion des comportements entre les différentes saisons avec une proportion de vocalisations associées à de l'écholocation plus importante au printemps 2022 et en hiver 2023.

Les Marsouins communs sont présents au niveau de chacune des stations. Il apparaît que les stations R2 et R3 sont plus propice à la chasse surtout du printemps à l'automne 2022. Au niveau des stations R4 et R7, un comportement prédominant d'écholocation été mis en évidence quelle que soit la saison.

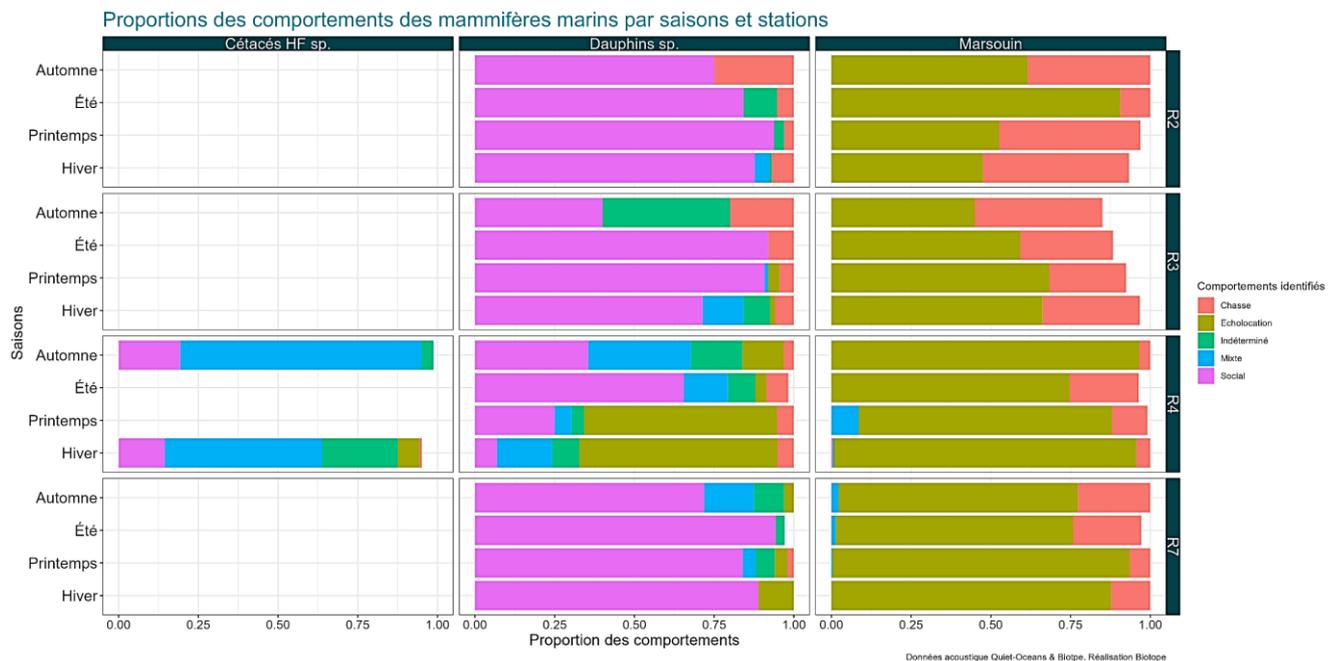


Figure 79 : Répartition des différents comportements observés par famille et par station à partir des données des enregistreurs acoustiques.

VII.4.3. Inter-comparaison des systèmes acoustiques

Dans l'objectif de qualifier les résultats du système C-POD, un enregistreur acoustique est déployé simultanément à proximité immédiate dans la colonne d'eau et sur la même période de temps au niveau de certaines stations. Initialement, cette qualification par inter-comparaison est prévue pour les stations R1 (proche) et R3 (intermédiaire). Toutefois, l'enregistreur acoustique déployé au niveau de la station R1 (proche) n'a pas pu être récupéré (cf. IV.2.). En l'absence de données, aucune inter-comparaison n'a donc pu être réalisée pour cette station. Dans ce contexte, un changement temporaire de protocole entre août et novembre 2022 a été mis en place avec le déploiement simultanée d'un enregistreur acoustique et d'un C-POD au niveau de la station R2 (proche). Ce déploiement permet de pallier à l'absence d'inter-comparaison dans la zone proche du projet.

Les résultats de cette qualification par inter-comparaison entre le système C-POD et l'enregistreur acoustique pour chaque période d'étude au niveau des stations R2 (proche) et R3 (intermédiaire) sont présentés dans le Tableau 49.

Au niveau de la station R3 (intermédiaire), sur la période hiver/printemps 2022 (mars à mai), il apparaît que le système C-POD permet une détection de bonne qualité pour les signaux impulsifs d'origine biologique que ce soit pour les Delphinidés et les Marsouins communs avec des pourcentage respectifs de quartiles « vrais-positifs » estimés à 100% et 94.3%. Toutefois, il est important de noter que le nombre total de quartiles « vrais-positifs » est plus important au niveau de l'enregistreur acoustique. En effet, ce dernier a permis la validation de 27 quartiles « vrais-positifs » c'est-à-dire contenant la présence de clics de Delphinidés, contre 6 pour le système C-POD, dont 5 quartiles sont communs à ceux de l'enregistreur acoustique. Sur la même plage temporelle, ces résultats montrent que l'enregistreur acoustique a réalisé des détections additionnelles à celle du système C-POD.

Les résultats de l'inter-comparaison pour la période printemps/été 2022 (mai à août) sont similaires aux résultats de la période hiver/printemps 2022 (mars à mai) :

- ✓ Le pourcentage de quartiles « vrais-positifs » du système C-POD permet de noter une détection qualitative des clics émis par les Delphinidés et les Marsouins communs avec respectivement 75% et 95.2% ;
- ✓ Le nombre de quartiles « vrais-positifs » du système C-POD est inférieur à celui de l'enregistreur acoustique pour les Marsouins communs avec 100 quartiles « vrais-positifs » contre 125 pour l'enregistreur acoustique. Sur l'ensemble de ces quartiles « vrais-positifs », 55 sont communs aux deux systèmes. Toutefois, il est possible de noter que le nombre de quartiles « vrais-positifs » est similaire pour les deux systèmes concernant les clics de Delphinidés.

L'ensemble de ces résultats est confirmé par l'inter-comparaison réalisée au niveau de cette même station, R3, durant la période hivernale 2023 (décembre à février 2023).

Au niveau de la station R2 (proche), le faible nombre de détections de clics de Delphinidés rend difficile l'analyse de la qualité du système C-POD. Toutefois, il est possible de noter une baisse de la qualité de détection concernant les clics de Marsouins communs avec un pourcentage de quartiles « vrais-positifs » de 95.5% en moyenne au niveau de la station R3 et ce, quelle que soit la saison, contre 10.5% au niveau de la station R2. De plus, sur la même plage temporelle, l'enregistreur acoustique a réalisé des détections additionnelles à celle du système C-POD avec 75 quartiles « vrais-positifs » contre 2 pour le système C-POD, dont 1 quartile commun à ceux de l'enregistreur acoustique.

A noter, lors de la validation manuelle réalisée pour l'inter-comparaison des systèmes acoustiques au niveau de la station R2, la présence significative d'un bruit ambiant intense a été mise en évidence. Ce bruit, significativement plus intense que celui présent au niveau de la station R3, gêne probablement la détection automatique des signaux impulsifs.

De manière générale, il apparaît que :

- ✓ Dans un contexte environnemental relativement calme (absence de bruit benthique et/ou anthropique intense), le système C-POD permet une bonne détection des signaux impulsifs biologiques ;
- ✓ Dans un contexte environnemental relativement calme, le nombre de quartiles « vrais-positifs » de l'enregistreur acoustique et du C-POD est comparable sur chacune des périodes d'études et pour chaque famille de mammifères marins ;
- ✓ Dans un contexte environnemental relativement bruyant, le système C-POD apparaît gêné par la présence de bruit anthropique et ne permet pas une bonne détection des signaux impulsifs biologiques avec une baisse significative du pourcentage de quartiles « vrais-positifs ».
- ✓ Quel que soit le contexte environnemental, l'enregistreur acoustique a permis de démontrer une perte quantitative des contacts acoustiques détectés par le C-POD, ce qui altère significativement l'estimation de fréquentation du site. Cette perte de contacts acoustiques pourra être approfondie via une analyse détaillée des instants pour lesquels le C-POD n'a pas réalisé de détections.

Tableau 49 : Synthèse de l'inter-comparaison entre les résultats du système C-POD et de l'enregistreur acoustique au niveau des stations R2 et R3 pour l'ensemble des saisons 2022 et l'hiver 2023. Cette inter-comparaison a été réalisée (1) sur la base des détections avec un indice de confiance élevé à modéré pour le C-POD et (2) sur des périodes d'acquisition similaire aux deux systèmes, soit 30% du temps.

Période	Station	Famille	Système C-POD				Enregistreur acoustique		Nombre de quartiles « vrais-positifs » communs
			Nombre de quartiles avec détection de signaux impulsifs (indice de confiance élevé à modéré)				Nombre de quartiles avec détections de signaux impulsifs		
			Total Non validés	Vrais-positifs	Faux-positifs	Pourcentage de vrais-positifs	Vrais-positifs		
Mars à mai 2022 (hiver/printemps)	R3 (intermédiaire)	Delphinidés	6	6	0	100%	27		5
		Phocoenidés	158	149	9	94.3%	193		74
Delphinidés		4	3	1	75%	2		1	
Phocoenidés		105	100	5	95.2%	125		55	
Mai à août 2022 (printemps/été)	R2 (proche)	Delphinidés	1	0	1	0%	0		N/A
Phocoenidés		19	2	17	10.5%	75		1	
Août à novembre 2022 (été/automne)	R3 (intermédiaire)	Delphinidés	51	51	0	100%	110		25
		Phocoenidés	66	64	2	97%	146		51

VII.4.4. Analyse et interprétation biologique

Avec presque un an de données réparties sur l'ensemble de la zone d'étude, il apparaît que des mammifères marins sont présents tout au long de l'année et de manière plus ou moins fréquente en fonction des espèces et probablement des stations. Les comportements observés via la donnée des enregistreurs acoustiques permettent d'approfondir la compréhension de l'utilisation des différentes zones prospectées. Ainsi, il est possible de comparer et identifier les régions utilisées par les mammifères marins pour s'alimenter par rapport aux régions utilisées à d'autres fins. A noter, l'absence de données sur certaines périodes et certaines stations ne permet pas de faire une analyse spatio-temporelle comparative précise.

Il apparaît clairement que les Marsouins communs sont présents sur toute les stations de manière plus régulière que d'autres espèces de cétacés. Leur présence est quasi-quotidienne annuellement entre la future zone du parc et la côte (station R3) et au niveau de la station la plus au large (R7). L'absence de données au niveau de la station R7 entre novembre 2022 et février 2023 et au niveau de la station R3 en automne 2022, ne permet pas d'identifier s'il y a une différence de taux de présence en automne 2022 et en hiver 2023 par rapport aux autres

saisons. Cependant, à la vue des résultats dans leur ensemble et des détections réalisées au niveau de la station R3 via le système POD, une différence significative de leur taux de présence pendant ces périodes sans données n'est pas attendue. Concernant l'activité de chasse à l'échelle d'une année, la zone au large (station R7) semble être moins utilisée (à savoir 10% du temps) que les zones plus proches de la future zone du parc (stations R2 et R3) (à savoir 25% du temps). En revanche, la présence côtière des Marsouins communs (station R4) et dans la future zone du parc éolien (station R2) apparaît plus irrégulière quotidiennement et mensuellement, avec un pic de présence en février (pour R2) et mars (pour R3). Près des côtes, c'est un comportement acoustique prédominant d'écholocation (<90%) qui a été identifié.

Pour les Delphinidés, toutes espèces confondues, leur présence est annuelle mais occasionnelle pendant le mois avec des indices mensuels variant entre 10% et 40%. Cependant, une fréquentation plus importante est notée lors des mois d'hiver (décembre 2022 à février 2023) au niveau des stations R2, R3 et R4. La difficulté d'identification à l'espèce ne permet pas de savoir s'il y aurait une présence saisonnière de certaines espèces par rapport à d'autres. C'est au niveau de la station la plus profonde et la plus au large (R7) que leur présence est la plus faible. Cela indique peut-être que la majorité des détections sur les autres stations seraient des espèces plus côtières. La zone d'étude dans son ensemble ne semble pas être une zone importante de nourrissage à la vue des taux de comportements sociaux (80% des comportements). A l'exception peut-être de la station R4 où la proportion de comportements sociaux est beaucoup plus faible (<30%), indiquant que cette zone côtière serait plus propice à la chasse.

La disponibilité décousue de données avec les systèmes PODs (C-POD ou F-POD) associée à la forte sensibilité de ces systèmes au bruit ambiant ne permet pas d'être confiant sur leur analyse indépendamment des données issues des enregistreurs. Au niveau de la station R3 sur laquelle un C-POD et un enregistreur acoustique ont été simultanément déployés, il est possible de noter une différence importante de la phénologie, avec une irrégularité de l'indice mensuel entre les mois sur les données PODs non observée sur les données provenant des enregistreurs acoustiques. En particulier il y a un très faible indice mensuel en mai et en août 2022, non observé sur les données des enregistreurs. Pour les détections de Delphinidés via les systèmes PODs, il est possible de noter un indice mensuel en hausse pour les mois de décembre 2022 et de janvier 2023 comme sur les enregistreurs acoustiques, mais une diminution importante en février 2023 non observée sur l'enregistreur.

Finalement, la présence d'une espèce non identifiée à l'heure actuelle (cf. Figure 71) mais quotidiennement observée entre décembre 2022 et janvier 2023 au niveau de la station R4 démontre l'intérêt d'avoir l'accès à une donnée brute (issue uniquement des enregistreurs acoustiques et non des C-POD) pour comprendre au-delà d'un simple indice de présence de mammifère marin quelles espèces, ou type d'espèce, utilisent la zone d'étude.

VII.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.

VII.5.1. Fiabilité des systèmes de mesure

Le choix du système de mesure pour l'analyse bioacoustique d'un site est déterminant pour la qualité des résultats. Dans le cadre de cette étude, deux types de systèmes de mesure ont été déployés : le système autonome POD et l'enregistreur acoustique. Le tableau synthétise les avantages et inconvénients pour chacun de ces deux systèmes de mesure.

Tableau 50 : Synthèse des avantages/inconvénients des systèmes de mesure.

	Système autonome POD	Enregistreur acoustique
Coût	+++	++
Autonomie	+++	++
Signaux détectés	Signaux impulsifs (clics)	Tous types de signaux biologiques via logiciels de détection/classification en post-traitement
Accès aux données brutes	Non	Oui
Algorithme de détection automatique embarqué	Oui	Non
Fiabilité	Aucun moyen de vérification des détections automatiques. Dans le cadre d'un chorus bruyant le nombre de détections automatiques surestimé et signaux anthropiques considérés comme des signaux biologiques	+++

VII.5.2. 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 suite à la présence d'un fort bruit ambiant dans la donnée, une solution alternative consiste à recourir à la validation humaine des échantillons.

De manière générale, lorsque des algorithmes de détections automatiques sont utilisés pour le traitement de données audio, un post-traitement (à base de filtre) et un effort de validation humaine sont requis afin de pouvoir confirmer les résultats obtenus. Toutefois, pour certains algorithmes de détections automatiques, tels que ceux des systèmes autonomes PODs, il est impossible de réaliser cette validation humaine des échantillons car la donnée acoustique n'est pas conservée par le système.

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 et bruit induit par le courant). Un post-traitement et une validation des détections automatiques provenant des enregistreurs ont donc été réalisés afin de pouvoir confirmer les résultats obtenus.

VII.5.3. Représentativité de la mesure

VII.5.3.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 (VII.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*) occasionnellement présent au large de la Normandie. 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.

VII.5.3.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, considérés comme erratiques au large de la Normandie, cf. VII.1.2.), 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.

VII.5.4. Algorithme de détection automatique

De manière générale, les algorithmes (PAMGuard, C-POD, F-POD ...) 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 qui ont été observés dans les enregistrements de cette étude, peut donner lieu à des faux positifs c'est-à-dire à la détection de 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. Toutefois, cette alternative n'est réalisable que lorsque la donnée acoustique brute est disponible. Ce qui n'est pas le cas du système POD.

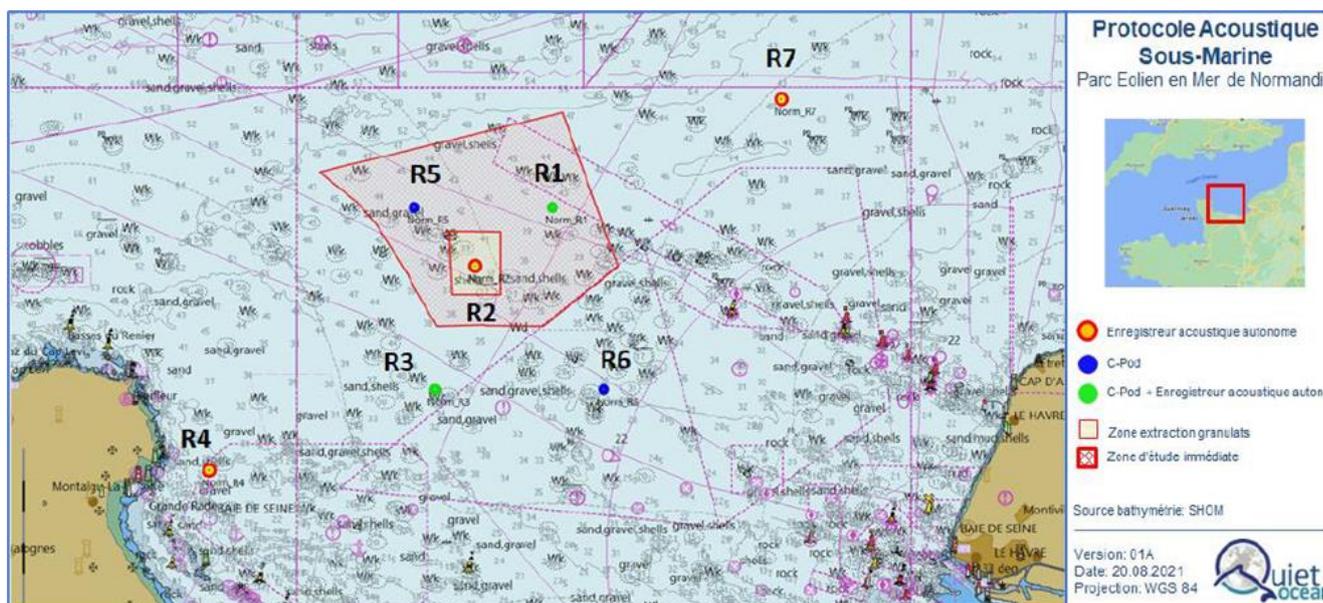
Chapitre VIII. Conclusions

Dans le cadre du projet de parc éolien en mer de Normandie, Quiet-Oceans a été mandaté par le ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires pour la réalisation de l'état de référence acoustique et le suivi de la fréquentation des mammifères marins par acoustique passive sur la zone des futurs parcs éoliens en mer.

Les objectifs de cette étude sont de mettre en œuvre un suivi acoustique passif à l'aide de systèmes autonomes et de dresser un état de référence acoustique et bioacoustique du site sur des durées respectives d'un an et deux ans.

Pour atteindre ces objectifs, sept stations de mesure nommées de R1 à R7 ont été nominalement équipées d'enregistreur acoustique autonome et/ ou de système POD. Pour la première année de suivi acoustique, ces équipements sont positionnés soit dans la colonne d'eau via un mouillage subsurface, soit à proximité immédiate du fond (via une cage lestée) en fonction des contraintes opérationnelles.

A ce jour, les mesures sont disponibles entre le 03 mars 2022 et le 24 mai 2023. Ce document propose une analyse des niveaux sonores et de la fréquentation de la zone par les mammifères marins pour la période du 03 mars 2022 au 09 février 2023. La donnée récupérée sur la période du 09 février au 24 mai 2023 est actuellement en cours d'analyse.



VIII.1. Analyse du bruit physique

L'analyse du bruit physique du 03 Mars 2022 au 21 Mars 2023 (selon la disponibilité de mesure par station) montre la superposition :

- ✓ D'un bruit permanent variant de 98 à 120dB ref $1\mu\text{Pa}^2$, et dépendant majoritairement des effets météorologiques, à savoir principalement du vent ;
- ✓ Par des émergences anthropiques courtes, résultant à des niveaux allant jusqu'à 155dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ causées par les passages de navires. Leur intensité dépend de la distance hydrophone/navire.

La composante benthique (organismes vivants sur le fond marin) est responsable d'une élévation du niveau de bruit permanent allant de 1 à 2 dB dans la bande de fréquence [4 kHz 20 kHz], le long d'une tranche horaire répartie entre 18h et 8h UTC, avec une légère augmentation lors de l'été 2022.

- ✓ Les niveaux de bruit médians -exprimés entre 50Hz et 40kHz- relevés varient de 103.3 (R4) à 113.6 (R2) dB ref $1\mu\text{Pa}^2$. Lors de l'été, ces niveaux sont en baisse (-3dB) à la station R3, et en légère augmentation (+2.4dB) à la station côtière R4.
- ✓ Les niveaux de bruit maximums (1%) relevés varient de 116.9 (R4) à 128.9 (R3) dB ref $1\mu\text{Pa}^2$. Lors de l'été, ces niveaux sont en baisse (-4.5 et -6.3dB) aux stations R2 et R3, probablement en raison d'une baisse de la fréquentation immédiate par les navires de pêche. Au contraire, l'augmentation du trafic côtier lors de l'été induit une augmentation (+5dB) à la station R4. Ces niveaux reviennent à des valeurs proches du printemps et de l'hiver 2022 lors des suivis automne 2022 et hiver 2023.

Les données mesurées ont été utilisées afin de réaliser la cartographie calibrée du bruit existant sur zone, en fonction de la saison, via la plateforme Quonops®.

Les cartographies au percentile 10% mettent en évidence la continuité du trafic commercial avec des concentrations de bruit en sortie du port du Havre et sur les axes de transit dans la Manche. La saison hivernale 2023 semble davantage impactée par la navigation des navires de pêche. Au percentile médian, les cartes traduisent la relative homogénéité du bruit en fonction de la saison.

VIII.2. Analyse des signaux biologiques

Suite à l'analyse préliminaire de la répartition spatio-temporelle des détections de mammifères marins par les enregistreurs et les systèmes PODs entre le 02 mars et 08 février 2023, il apparaît que :

- ✓ Chaque station acoustique représente une zone fréquentée régulièrement par les Delphinidés et quotidiennement par les Marsouins communs (*Phocoena phocoena*) ;
- ✓ Le Grand dauphin (*Tursiops truncatus*), Dauphin commun (*Delphinus delphis*), Dauphin de Risso (*Grampus griseus*), Dauphin bleu-et-blanc (*Stenella coeruleoalba*) et Globicéphale noir (*Globicephala melas*) ont été identifiés au moins une fois dans la donnée analysée ;
- ✓ Les stations R3, et R7 représentent des habitats propices à la présence du Marsouin commun avec une présence acoustique quasi-quotidienne sur l'ensemble de la période d'étude ;
- ✓ Les mammifères marins détectés utilisent différemment les habitats autour de chacune des stations. Les Marsouins communs ont des comportements de chasse principalement autour des stations R2 et R3. Les Delphinidés ont en grande majorité des comportements de socialisation/communication sur l'ensemble des stations.

A ce stade de l'étude, aucun signal acoustique n'a permis de détecter la présence de Phoques aux alentours des zones d'études. Etant donné les distances à la côte, ce résultat est conforme aux attentes.

Chapitre IX. Annexes

IX.1. Mémoire sur le protocole de mouillage

Dans le cadre du projet de parc éolien en mer Centre Manche AO4-AO8, ce mémoire permet de rappeler le protocole de mesure du suivi acoustique des mammifères marins et de la mégafaune marine, de présenter les types de mouillage exploitables et exploités en justifiant le choix des solutions retenues.

Cette note synthétise et met en perspective les problèmes rencontrés sur le matériel utilisé pour permettre une analyse et des propositions d'amélioration.

IX.1.1. Protocole des mesures

Le suivi par acoustique passive prévoit le déploiement en 7 points (R1 à R7) d'enregistreurs acoustiques et/ou de systèmes CPOD durant une année. L'enregistreur acoustique fait l'acquisition de données audio brutes permettant d'une part l'évaluation des niveaux sonores existants et d'autre part la recherche des signatures bioacoustiques afin d'estimer la fréquentation du site par les mammifères marins. Le système acquiert en mode duty-cycle 30%, soit 3 minutes ON et 7min OFF, afin de trouver un compromis entre la fréquence des déploiements/relevages (2,5 mois) et la quantité représentative de données collectées. Le système CPOD équipé d'un système embarqué délivre les détections automatiques des clics des Delphinidés et des marsouins sur l'ensemble de la campagne (duty-cycle 100%).

Le suivi a démarré le 01/03/2022 pour une durée totale d'une année afin de couvrir les quatre saisons et d'évaluer la fréquentation annuelle du site par les espèces ainsi que les variations saisonnières. Les données de bruit existant vont servir à la calibration des cartes de bruit modélisées.

Ces points de mesure (Tableau 51) ont été définis dans l'objectif de couvrir différentes zones de connaissance (proche, intermédiaire et éloignée) en regard de la connaissance existante et des conditions de sécurité des instruments (donnée AIS 2020/2021).

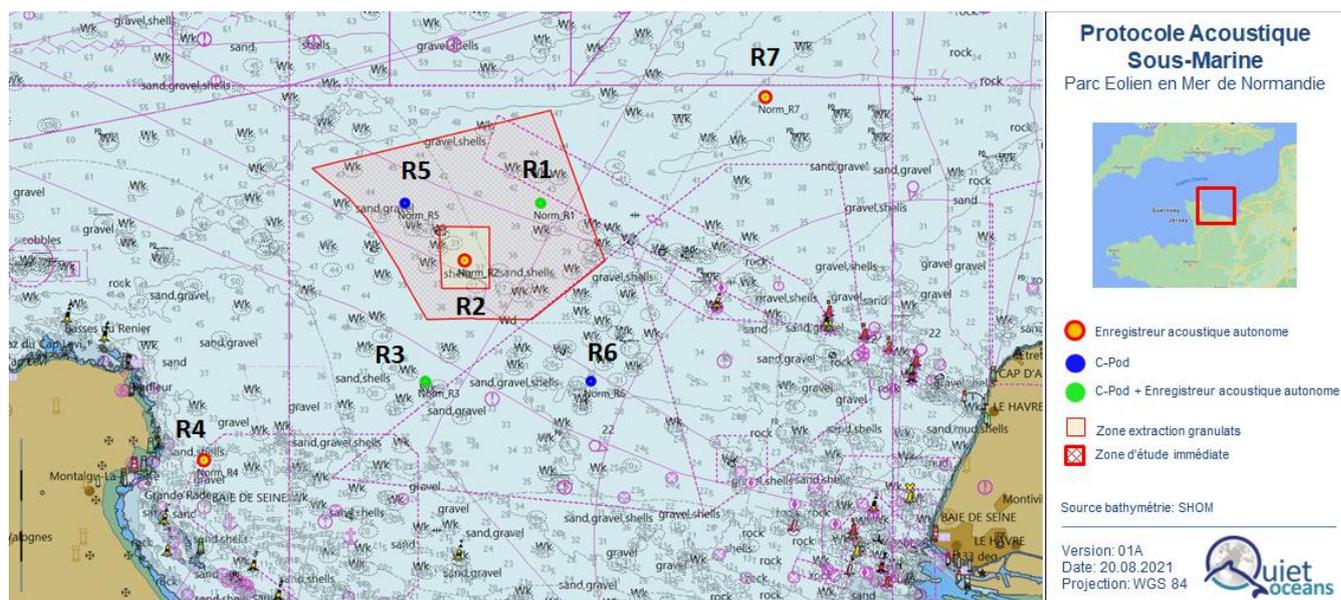


Figure 80 : Protocole géographique des mesures acoustiques

Point	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
Zone projet	Proche	Proche	Intermédiaire	Eloignée	Proche	Intermédiaire	Eloignée
Type d'instrument	Enregistreur + CPOD	Enregistreur	Enregistreur + CPOD	Enregistreur	C-Pod	C-Pod	Enregistreur
Objectifs	Fréquentation Bruit ambiant	Fréquentation Bruit ambiant	Fréquentation Bruit ambiant	Fréquentation Bruit ambiant	Fréquentation	Fréquentation	Fréquentation Bruit ambiant
Coordonnées géographiques (WGS84)	49°52.5' N 000°35.0' W	49° 48.792'N 000°42.561'W	49°41.0' N 000°46.5' W	49°35.9' N 001°08.5' W	49° 52.5'N 000°48.5' W	49°41.0' N 000°30.0' W	49° 59.3' N 000° 12.6' W
Type de ligne de mouillage	Ligne de mouillage	Ligne de mouillage	Ligne de mouillage	Cage de fond	Ligne de mouillage	Ligne de mouillage	Ligne de mouillage
Immersion /fond (m)	7	7	7	0.5	7	7	7
Hauteur d'eau (Mesurée LEG1)	47m	41m	51m	30m	47m	38m	48m

Tableau 51 : Descriptif des points de mesure

IX.1.2. Choix de mouillage

IX.1.2.a. Justification du choix

Dans le cadre d'un suivi acoustique longue durée (campagne supérieure à 1 mois), trois types de mouillage peuvent être utilisés (Figure 81) :

- ✓ Une cage de fond développé par Quiet-Oceans – Choix favorisé sur des fonds de 10 à 35m ;
- ✓ Une ligne de subsurface développé par Quiet-Oceans – Choix favorisé au-delà de 35m ;
- ✓ Une ligne de surface équipé un flotteur de surface (Peu utilisé par Quiet-Oceans).

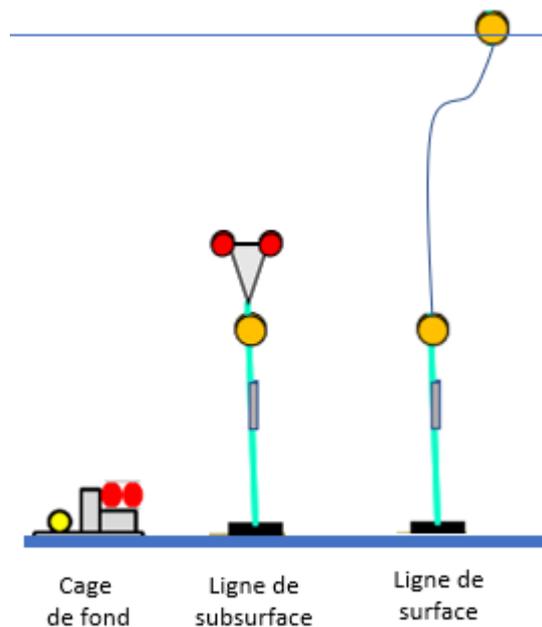


Figure 81 : Type de mouillage pour le suivi acoustique long terme

En fonction du contexte du projet, plusieurs critères de choix rentrent en ligne de compte pour déterminer la solution adéquate. Ces critères peuvent varier et évoluer en fonction des caractéristiques de la zone de travail.

Dans le cas de la zone du projet Centre Manche AO4-AO8 en confrontant les informations de hauteur d'eau des points de mouillages présentées dans le Tableau 51 et les critères de choix considérés dans le Tableau 52, le choix :

- ✓ D'une cage pour R4 est justifié par une hauteur d'eau limitée permettant d'intervenir en cas de défaillance, une qualité de mesure recherchée et un risque limité d'interaction avec les activités de pêche,
- ✓ D'une ligne de subsurface pour les autres points (R1, R2, R3, R5, R6 et R7) est justifié par :
 - Une limitation du risque d'interaction avec les activités de pêche au même titre que la cage.
 - (*) En effet, les hypothèses de départ considéraient que les mouillages étaient placés dans des zones peu fréquentées par la pêche suite à une étude géographique des activités de pêche en utilisant les données AIS disponibles ;
 - Contrairement à la cage, une capacité conservée d'intervenir en cas de problèmes techniques ;
 - Une qualité de mesure recherchée.

Type de mouillage	Critères retenus pour définir le type de mouillage			
	Exposition au vandalisme volontaire	Exposition aux techniques de pêche	Récupération (ROV ou Plongée) en cas de problèmes	Influence des mouvements mouillage sur la mesure
Cage de fond	Très Modérée* Pas de marqueur en surface	Très modérée* Empreinte au sol limitée, hauteur réduite	Impossible sur fond >35m - Fort courant (stabilisation du navire difficile pour ROV) - Hauteur d'eau importante sauf R4	Inexistante Pas de pièces mobiles
Ligne de subsurface	Très modérée* Pas de marqueur en surface	Modérée* Entrave d'une partie de la colonne d'eau	Possible par plongée à 20m due à la position du panier	Modérée Influence du courant sur une partie de la colonne d'eau
Ligne de surface	Avérée* En coupant la ligne	Modérée* Entrave de la colonne d'eau	Possible car ligne accessible en surface par flotteur	Importante - Transmission des mouvements de houle en surface - Influence du courant sur la toute la colonne d'eau

Tableau 52 : Présentation critères de choix en fonction type de mouillage sur la zone Centre Manche

2 types de mouillages sont utilisés pour le projet Centre Manche AO4-AO8 :

- ✓ La cage de fond (développée par Quiet-Oceans) ;
- ✓ La ligne de subsurface (développée par Quiet-Oceans).

IX.1.2.b. Présentation de la cage de fond

Le mouillage support de l'enregistreur acoustique sur le point de mesure R4 est une cage instrumentée posée sur le fond. Il s'agit d'une structure en acier inoxydable présentée en Figure 82. Cette solution compacte, propre à Quiet-Oceans, est déposée sur le fond où elle occupe un espace très limité dans la colonne d'eau et de ce fait limite la probabilité d'interaction avec les activités de pêche. Lestée à 150 kg, elle est équipée d'un système de dépose et de récupération automatique. La phase de récupération de la cage se base sur l'activation d'un largueur acoustique qui libère une flottabilité remontant à la surface afin de créer un lien physique permettant la remontée de la structure sur le pont du navire support. Cette solution permet de s'affranchir de l'assistance systématique de plongeurs.

Lors de la phase de mesures, l'absence de lien de subsurface permet d'éviter la transmission de vibrations parasites à la structure.



Figure 82 : Illustration de la cage R4 avant déploiement

IX.1.2.c. Présentation de la ligne de subsurface

Le porteur de l'enregistreur acoustique sur les points de mesure R1, R2, R3, R5, R6 et R7 est une ligne de subsurface présentée en Figure 83.

Cette ligne est composée de :

- ✓ Un panier largable flottant en subsurface (4 flotteurs Nokalons). Ce panier retient en son sein une réserve de cordage équipée d'un flotteur de surface pour permettre lors d'un largage de disposer d'un point de relevage. Ce panier a pour rôle de décaler le point de largage du système de récupération en subsurface (sur le fond pour la cage) et ainsi autoriser en cas de problème technique une intervention par plongeurs. De plus, ce panier est conçu pour pouvoir être détaché de la ligne de mouillage à la récupération afin de ne pas entraver la remontée complète de la ligne depuis un portique ou un cabestan. Le système de largage de la ligne de récupération est activé par un largueur acoustique (similaire à la cage) présenté en Figure 84,
- ✓ Une ligne de mouillage en cordage movline 100m,
- ✓ Un flotteur de subsurface (Nokalon),
- ✓ Un enregistreur compact attaché directement sur la ligne de mouillage pour pouvoir être amovible à la remontée afin de ne pas entraver la remontée de la fin de la ligne de mouillage jusqu'aux lests depuis un portique avec poulie ou un cabestan,
- ✓ Deux lests de 60 kg.

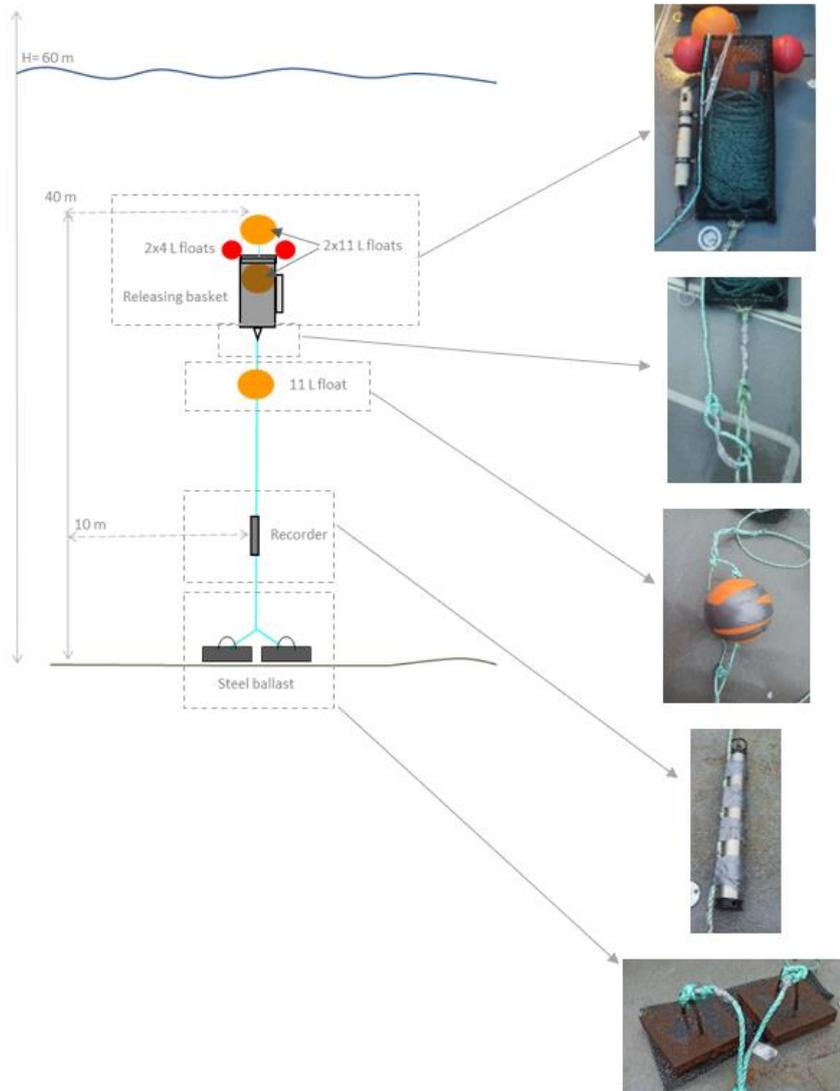


Figure 83 : Ligne de mouillage de subsurface

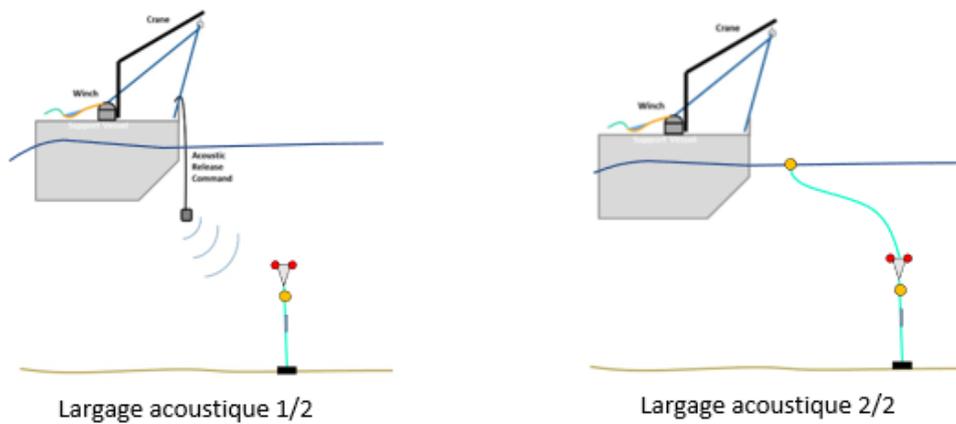


Figure 84 : Principe de récupération de la ligne de subsurface

IX.1.3. Définition des problèmes rencontrés

Le Tableau 53 classe et identifie les problèmes de récupération des systèmes et présente pour chaque cas les conséquences sur le projet Centre Manche AO4.

Classe de problèmes		Identification du problème		ID	Conséquences
1	Interaction avec les pêcheurs	1.1	Chalutage probable	CHALU	- Perte du matériel
		1.2	Remontée de la ligne suite a emmêlement avec filière de casiers Découpe de la ligne au-dessus du flotteur	PECHE	- Perte de la donnée mesurée - Coût de réapprovisionnement, au-delà du rechange, nécessité de remplacer le matériel perdu avec une contrainte de délai d'approvisionnement
2	Problème technique : Pas de remontée en surface du flotteur	2.1	Problème de largeur acoustique	EQUIP	- Nécessité d'organiser une campagne spécifique de récupération
		2.2	Système de déclenchement rendu inopérant perte du point de rappel suit à une possible corrosion sur une attache d'anneau (renvoi mécanique) (Hypothèse à valider après mission de récupération)	COROS	- Pas de perte de données/matériel - Augmentation du risque de perte matériel et données suivant la réactivité

Tableau 53 : Identification et classification des problèmes rencontrés

IX.1.4. Bilan actuel des problèmes rencontrés et évaluation du matériel utilisé

Les problèmes identifiés sur le projet pour l'ensemble des campagnes réalisées et des opérations en mer (LEG) sont présentés dans la Figure 85 et peuvent être répartis comme suit :

- ✓ 7 interactions avec les activités de pêche
 - 2 relevages (R1, R5),
 - 1 accroche avec déplacement de mouillage sans conséquences (R6),
 - 4 chalutages supposés (R1, R2, R5),
- ✓ 3 problèmes techniques sur le mouillage
 - 2 sur lignes de mouillage,
 - 1 sur la cage

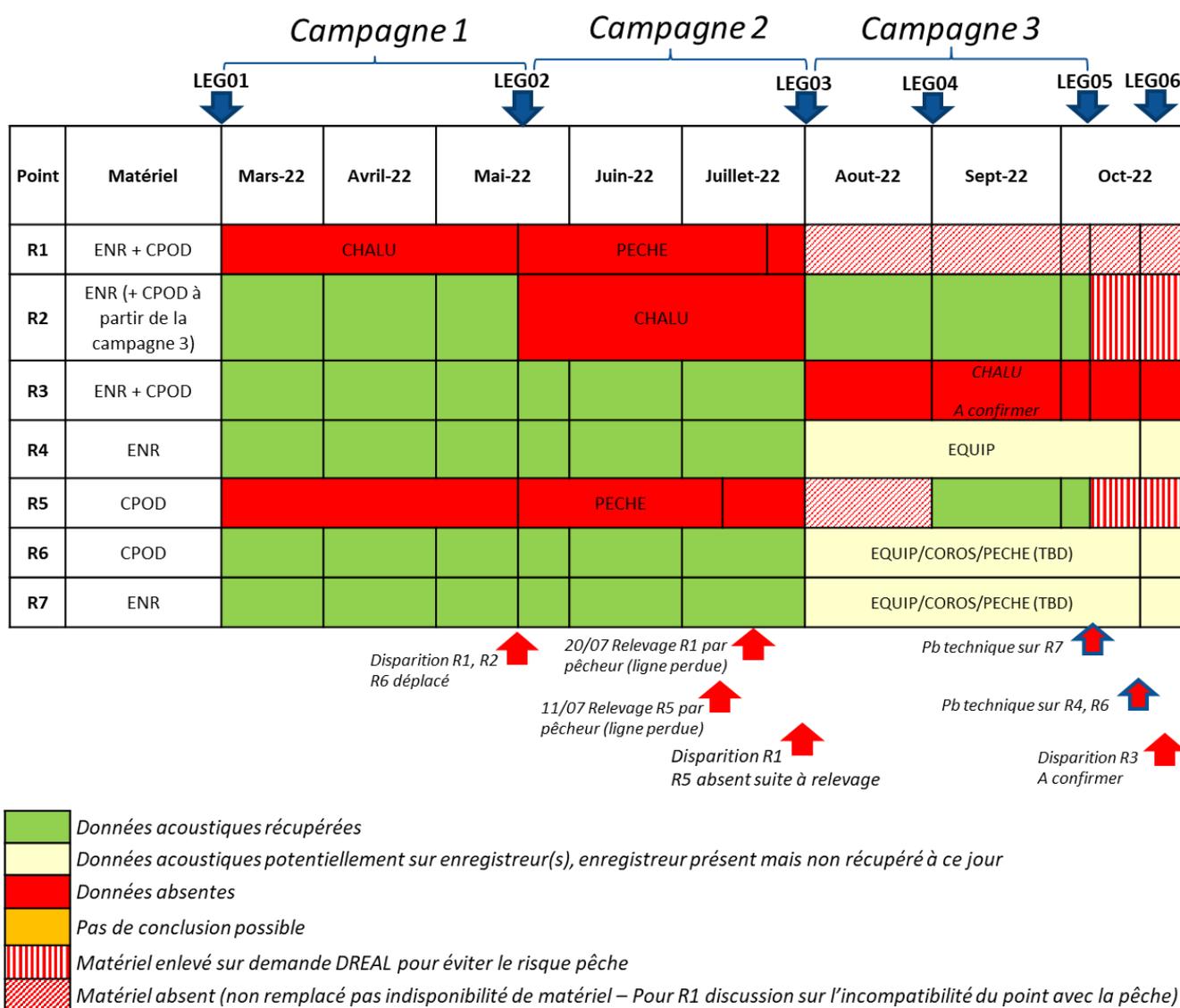


Figure 85 : Bilan chronologique des événements du projet Centre Manche AO4

Sur la base des opérations en mer réalisées, un indicateur de la fiabilité du fonctionnement du système de récupération des lignes de mouillage est présenté dans le Tableau 54. On peut constater une dégradation des performances dans le temps.

LEG	LEG1	LEG2	LEG3	LEG4	LEG5	LEG6	Bilan
Largage des lignes en place	-	5	4	-	3	1	13
Largage réussi	-	5	4	-	2	0	11
Résultat	-	100 %	100 %	-	67 %	0 %	85 %

Tableau 54 : Statistique de réussite sur les opérations de relevage des lignes de mouillage (R1, R2, R3, R5, R6, R7)

Sur la base des opérations en mer réalisées, les statistiques de fiabilité des relevages sur la cage, sont présentées dans le Tableau 55. Il est difficile de dégager un constat avec ces chiffres.

LEG	LEG1	LEG2	LEG3	LEG4	LEG5	LEG6	Bilan
Largage de la cage	-	1	1	-	-	1	3
Largage Réussi	-	1	1	-	-	0	2
Résultat	-	100 %	100 %	-	-	0 %	67 %

Tableau 55 : Statistique de réussite sur les opérations de relevage de la cage en R4

IX.1.5. Analyse des causes et propositions

IX.1.5.a. Interaction avec la pêche

Les problèmes relatifs à l'interaction avec les activités de pêche ne peuvent pas rentrer en ligne de cause dans la rubrique problème technique. Les pistes d'amélioration sur ce thème peuvent porter sur :

- ✓ Une actualisation des positions en fonction des activités réelles de la pêche sur zone. Le constat d'une modification géographique des activités de pêche et des techniques employées à l'issue des périodes de confinement (COVID-19) et du Brexit a rendu obsolète le travail de définition du protocole pour ce projet, notamment le positionnement des points de mesures vis-à-vis du risque de coactivité. Cette évolution peut expliquer le nombre important d'incidents dus à la pêche.
- ✓ La mise en place de bulles de surveillance autour des points de mesure, mises en œuvre par la chaîne sémaphorique.

L'incident survenu sur la ligne R5 en juillet 2022 a mis en avant un problème solvable. Lors de la remontée de la ligne R5 (Figure 83), les pêcheurs ont décidé de couper en-dessous du flotteur de subsurface (11L Float). De cette manière, ils ont enlevé l'ensemble des éléments flottants de la ligne entraînant le reste de ligne équipée de l'enregistreur sur le fond. Dans cette position, l'enregistreur est jugé perdu. Pour répondre à ce cas de figure particulier et difficilement anticipable, une action correctrice est de rendre l'enregistreur suffisamment flottant pour que :

- ✓ En cas de coupure, la reste de ligne de mouillage se stabilise en subsurface et soit récupérable par plongeurs,
- ✓ En cas d'arrachement de l'enregistreur, celui-ci revienne en surface et puisse dériver jusqu'à la côte.

Ce nouvel ensemble sera composé d'une structure métallique légère équipée de flotteurs résistants (type Nokalon) pour assurer la flottabilité nécessaire, une information aux usagers de la mer sur le système sera ajoutée directement sur l'enregistreur (Autocollant). L'ensemble sera conçu pour être détachable de la ligne mouillage pour ne pas entraver la remontée de la ligne de mouillage depuis un portique ou un cabestan.

IX.1.5.b. Problème technique

i. Cage de fond

L'incident sur le point R4 peut correspondre à une défaillance technique du largueur acoustique (électrique ou mécanique), une pièce mécanique abîmée à la dépose par un enrochement empêchant le largage de la ligne de récupération et sa flottabilité. Un diagnostic sera posé à la récupération. En fonction des résultats du diagnostic, des évolutions pourront être envisagées si besoin.

ii. Ligne de mouillage de subsurface

Deux problèmes ont été relevés sur les mouillages de subsurface R6 et R7 qui ne sont pas remontées à la surface lors de leur largage sur les deux derniers LEG.

Au regard des résultats présentés dans le Tableau 52, un constat se dégage : les statistiques de réussite pour ce système sont bonnes mais se dégradent lors des deux derniers legs. Un problème de vieillissement prématuré dans le temps peut expliquer cette dégradation récente.

Ceci dit, un problème dû à une interaction avec les pêcheurs n'est pas complètement écarté car, pour mémoire, la ligne de mouillage au point R6 a déjà été déplacée de plus de 200m en début de projet sans conséquence sur la récupération. Cependant cette hypothèse est peu probable car les lignes de mouillage R6 et R7 ont conservé leur position.



iii. Proposition de correction

Sur les bases du premier constat, notre position est donc de conserver ce type de mouillage pour l'ensemble des points excepté R4 car il répond à un ensemble de critères essentiels sous réserve de corriger le problème de largage acoustique.

Après une investigation technique sur la structure du panier de la ligne de subsurface, la piste d'une probable corrosion sur une pièce de renvoi mécanique du lien élastique permettant le largage de la flottabilité du panier est envisageable. Cette pièce est vissée dans la structure. Les deux actions pour corriger ce problème seraient d'une part de rajouter une plaque supportant une anode adaptée limitant très fortement les phénomènes de corrosion pour l'ensemble de la structure métallique du panier (inox A4) et d'autre part d'ajouter une graisse technique sur les pièces mobiles et les emplacements de fixation (filetage dans la structure) empêchant l'accès à l'eau et par la même la corrosion sur et autour de ces zones plus sensibles.

IX.2. Mémoire sur la prolongation de suivi

Dans le cadre du suivi acoustique des mammifères marins et de la mégafaune marine, ce mémoire analyse les données collectées et absentes à ce jour. Cette note doit permettre de statuer sur la prolongation du suivi acoustique au-delà de la première année de suivi initialement prévue.

Le CCTP prévoit la mise en place d'hydrophones à large bande et d'enregistreurs acoustiques afin de mutualiser la caractérisation du bruit ambiant et la fréquentation du site par les mammifères marins. Ces instruments pourront être complétés par des détecteurs automatiques de clics d'écholocation si l'intérêt en est justifié. Le cahier des charges prévoit une durée des suivis par acoustique passive d'une année et une éventuelle reconduction sur une durée d'une année en fonction des résultats obtenus la première année.

IX.2.1. Protocole des mesures

Suite aux réunions de concertation des parties prenantes, le suivi par acoustique passive prévoit le déploiement en 7 stations (nommées de R1 à R7) d'enregistreurs acoustiques passifs et/ou de systèmes CPOD durant une année (Figure 86). L'enregistreur acoustique effectue l'acquisition de données audio brutes permettant d'une part l'évaluation des niveaux sonores existants et d'autre part la recherche des signatures bioacoustiques (émissions sonores des animaux marins) afin d'estimer la fréquentation du site par les mammifères marins. Le système acquiert en mode rapport cyclique (duty-cycle) d'une valeur de 30%, soit 3 minutes ON et 7min OFF, afin de trouver un compromis entre la fréquence des déploiements/relevages (théoriquement tous les 2,5 mois) et la quantité représentative de données collectées. Le système CPOD équipé d'un algorithme embarqué délivre les détections automatiques des clics des Delphinidés et des Marsouins sur l'ensemble de la campagne d'acquisition (soit un duty-cycle 100%).

Le suivi a démarré le 01/03/2022 pour une durée totale d'une année afin de couvrir les quatre saisons et d'évaluer la fréquentation annuelle du site par les espèces ainsi que les variations saisonnières, mensuelles, hebdomadaires et journalières. Les données mesurées de bruit servent à la calibration de la cartographie du bruit existant à l'échelle de la zone éloignée. Cette modélisation prend en compte les contributions anthropiques et environnementales.

Ces points de mesure (Tableau 56) ont été définis dans l'objectif de couvrir différentes zones (proche, intermédiaire et éloignée) en regard de la connaissance existante et des conditions de sécurité des instruments (activité de pêche, courant, nature des fonds, hauteur d'eau) (donnée AIS 2020/2021).

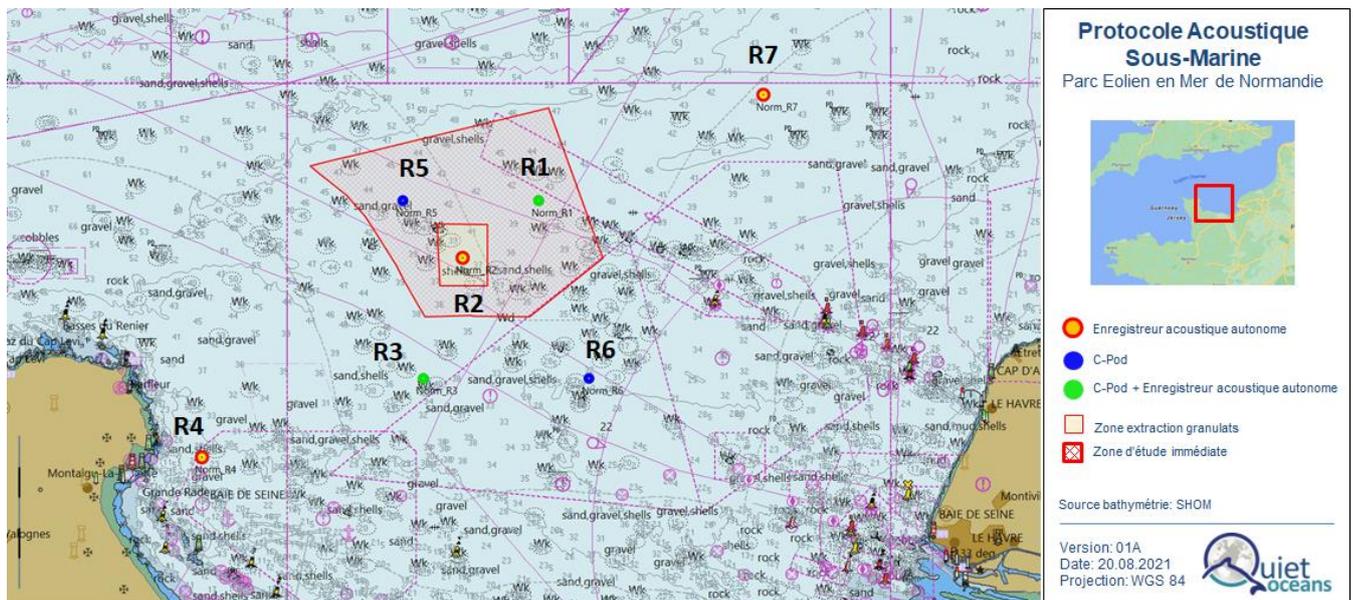


Figure 86 : Protocole géographique des mesures acoustiques

Tableau 56 : Descriptif des points de mesure

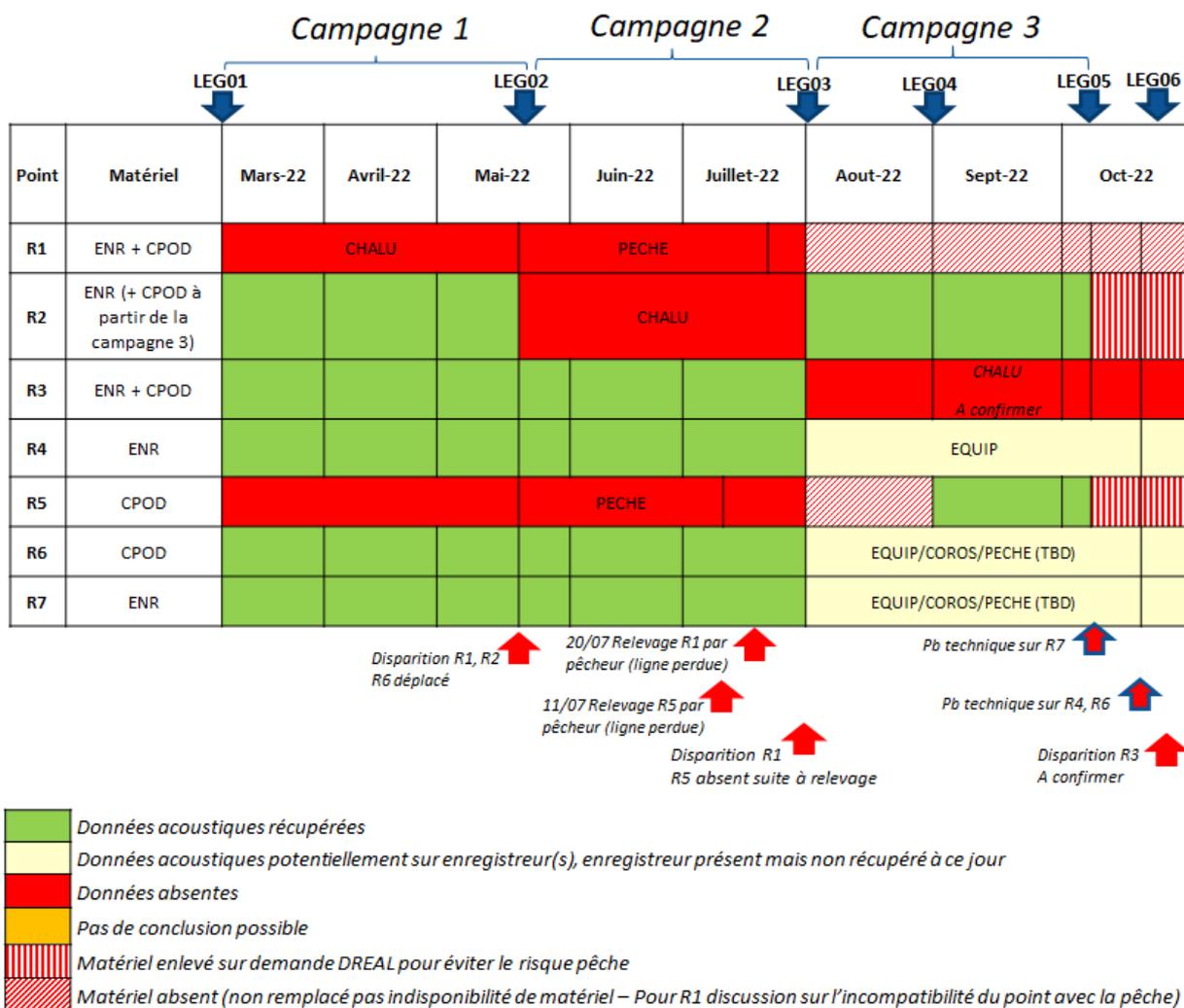
Point	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
Zone projet	Proche	Proche	Intermédiaire	Eloignée	Proche	Intermédiaire	Eloignée
Type d'instrument	Enregistreur + CPOD	Enregistreur	Enregistreur + CPOD	Enregistreur	C-POD	C-POD	Enregistreur
Objectifs	Fréquentation Bruit ambiant	Fréquentation Bruit ambiant	Fréquentation Bruit ambiant	Fréquentation Bruit ambiant	Fréquentation	Fréquentation	Fréquentation Bruit ambiant
Coordonnées géographiques (WGS84)	49°52.5' N 000°35.0' W	49° 48.792'N 000°42.561'W	49°41.0' N 000°46.5' W	49°35.9' N 001°08.5' W	49° 52.5'N 000°48.5' W	49°41.0' N 000°30.0' W	49° 59.3' N 000° 12.6' W
Immersion /fond (m)	3.5	4	3.5	0.5	3	3	3
Hauteur d'eau (LAT)	40m	37m	45m	22m	45m	33m	40m

IX.2.2. Bilan des données collectées

A ce jour, trois campagnes de mesure ont été réalisées (printemps, été et automne 2022), la 4ème campagne est en attente de déploiement en fonction des risques vis-à-vis des activités de pêche.

Les systèmes de mesure localisés en dehors de la zone du futur parc (zones intermédiaire et éloignée) ont permis systématiquement de collecter la donnée, comme attendu dans le protocole. En revanche, dans la zone proche du projet, les points de mesure R1, R2 et R5 ont subi des aléas induisant la perte quasi-systématique du matériel. Ce matériel déployé, occupant une fraction de la colonne d'eau, a très probablement subi des interactions avec les activités régulières de pêche sur zone. A ce jour, La zone proche ne contient qu'une information acoustique très réduite au niveau de R2 durant la saison printanière. Dans cette zone proche, la saison estivale ne fournit aucune information sachant que le point R1 n'a pas fait l'objet d'un redéploiement en raison des trop forts risques de perte du matériel.

Tableau 57 : Bilan des campagnes et des données par point de mesure



IX.2.3. Suivis complémentaires par observation visuelle

Des suivis visuels par avion (depuis Octobre 2021) dans la zone éloignée et par bateau (depuis septembre 2021) dans la zone proche sont en cours respectivement à la fréquence de 1 fois par mois et 1 fois toutes les 6 semaines. Ces mesures sont réalisées par la société Biotope.

La Figure 87 illustre les transects par bateau et par avion, les stations de mesure acoustique et l'ensemble des détections visuelles faites à ce jour.

Les stations de mesure acoustique dans les zones proche (stations R1, R2, R5) et intermédiaires (stations R3, R6) se situent au maximum à quelques centaines de mètres du passage des transects. Les détections visuelles très ponctuelles spatialement et temporellement autour de ces stations permettent d'établir un statut de fréquentation global, mais ne permettent pas d'obtenir des informations fines sur les variations journalières, mensuelles et saisonnières, ainsi que l'usage de la zone par ces mammifères marins (communication, alimentation, socialisation).

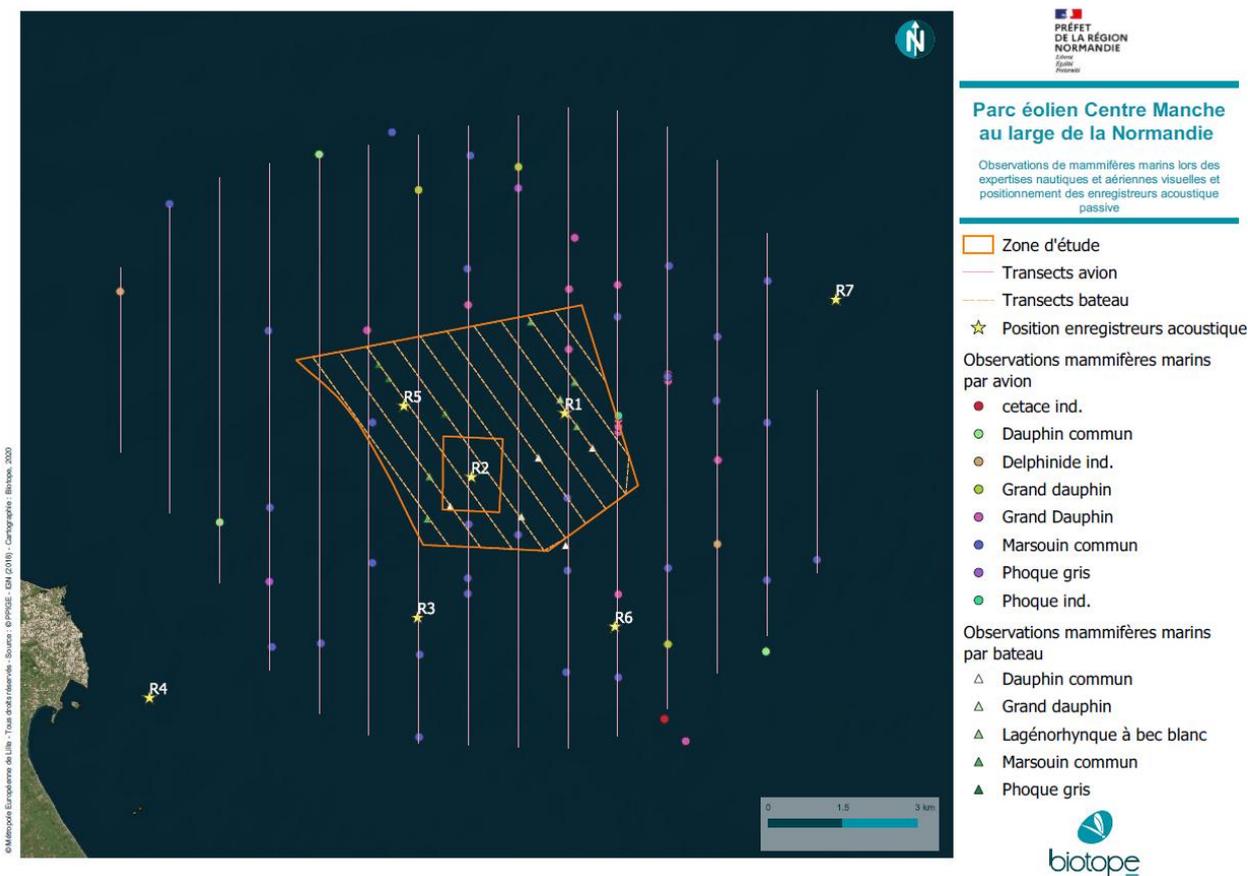


Figure 87 : Détections visuelles sur la période 2022 (avion et bateau) (source Biotope)

IX.2.4. Analyse, conclusions et recommandations

Les données acquises durant les saisons printemps et été 2022 permettront de caractériser le bruit ambiant et la fréquentation par les mammifères marins dans les zones intermédiaire (stations R3 et R6) et éloignée (stations R4 et R7). Dans la zone proche (stations R1, R2 et R5), suite aux interactions avec les activités de pêche, les instruments acoustiques n'ont pu être retrouvés à ce jour et la donnée associée est donc considérée comme absente. Seule la donnée de l'enregistreur situé à la station R2 permet d'apporter une information à la fois sur les niveaux sonores et sur la connaissance fine quant à l'usage des mammifères marins dans cette zone proche durant la saison printanière. Le Tableau 58 synthétise les données disponibles pour chaque saison afin d'établir d'une part la fréquentation du site par les mammifères marins et d'autre part la cartographie acoustique calibrée de la zone d'étude.

Les suivis visuels (aérien et par bateau) ont pour objectif d'apporter une information spatiale quant à l'usage de des zones proche et éloignée sans notion fine de la distribution temporelle. Le suivi par acoustique passive permet de déterminer, dans un rayon de quelques kilomètres autour de chaque station de mesure, la distribution temporelle des espèces et de connaître leur usage (communication, alimentation, socialisation) ainsi que les cycles de fréquentation (nycthéméral, hebdomadaire, mensuel, saisonnier). Ces deux suivis apparaissent fortement complémentaires et la dégradation d'une information dans un suivi ne peut être compensée par les informations collectées par l'autre suivi. Ces données précises permettront le cas échéant d'apporter des restrictions lors de la phase de construction (par exemple contrainte saisonnière ou contrainte jour/nuit en fonction des espèces).

Concernant la cartographie du bruit ambiant, le plan d'échantillonnage initial prévoit l'utilisation de 5 stations réparties dans les 3 zones d'intérêt pour la phase de calibration de la modélisation. Cette quantité de stations de calibration n'étant pas importante, toute perte de donnée pour chaque zone et chaque saison fragilise la validité de la cartographie de l'état de référence. A minima, indépendamment de l'année, l'objectif de la collecte des mesures est d'acquérir de la donnée dans chaque zone et à chaque saison afin de garantir une cartographie de qualité. De la même manière, concernant la fréquentation et l'usage de chaque zone par les mammifères marins, le plan initial prévoit l'utilisation des 7 stations pour établir les évaluations par zone. Le Tableau 58, ci-dessous, synthétise l'ensemble des données disponibles ou absentes à ce jour en fonction du besoin de l'état de référence (cartographie du bruit ambiant et fréquentation biologique).

De plus, dans l'objectif de qualifier les résultats du système C-POD, une première inter-comparaison a été réalisée entre la donnée du C-POD et de l'enregistreur acoustique au niveau de la station R3 (zone intermédiaire). Dans le contexte de la zone d'étude, les premiers résultats de cette inter-comparaison montrent que l'enregistreur acoustique permet une évaluation qualitative de la fréquentation des mammifères marins et fournit significativement plus d'informations comportementales. En effet, le nombre de détections confirmées de clics de Delphinidés et Marsouins via l'enregistreur acoustique est respectivement de 27 et 193 pour la saison printanière contre 6 et 149 via le système C-POD. Cette qualification a permis de démontrer que l'enregistreur acoustique est plus performant que le système automatique C-POD. Un remplacement des enregistreurs par des systèmes C-POD devrait donc entraîner une altération significative l'estimation de la fréquentation du site. Ces premiers résultats d'inter-comparaison doivent être confirmés par les mesures à venir.

Suite à ces premiers résultats en 2022, sur la période mars 2023 à février 2024, nous recommandons à minima une prolongation du suivi sur les saisons et les stations dont les données sont absentes suite aux aléas. Les déploiements maintiendront les dispositifs initialement prévus (répartition des enregistreurs et CPOD). En effet, cette prolongation ciblée du suivi permettra de compenser les périodes sans acquisition de donnée suite aux aléas et de connaître en sus les fluctuations inter-annuelles et saisonnières. En fonction des analyses du CEREMA sur les interactions potentielles entre activité de pêche et les stations acoustiques de mesure, le positionnement des stations pourra être ajusté afin de garantir une minimisation des risques vis-à-vis du matériel et une augmentation de la donnée collectée.

Tableau 58 : synthèse des données disponibles pour la cartographie du bruit ambiant et l'évaluation de la fréquentation des mammifères marins.

Zone	station	Printemps		Eté		Automne		Hiver	
		Cartographie bruit ambiant	Fréquentation biologique						
Proche	R1								
	R2					NA			
	R5	NA		NA		NA			
Intermédiaire	R3								
	R6	NA		NA		NA			
Eloignée	R4								
	R7								

	Données exploitables
	Données manquantes
	Données en attente de récupération
	Données récupérées en cours de validation
NA	Système de mesure non adapté

IX.3. Mémoire sur l'enregistreur acoustique

Dans le cadre du projet Centre Manche AO4, ce mémoire permet de rappeler le protocole de mesure du suivi acoustique des mammifères marins et de la mégafaune marine et de présenter l'enregistreur exploité dans ce cadre.

Cette note est un justificatif de la compatibilité de l'enregistreur acoustique SOUNDTRAP HF600 avec les besoins en mesure sur la zone du parc Centre Manche en comparaison du Wildlife Acoustics modèle SM3M initialement proposé dans l'offre technique de Quiet-Oceans.

IX.3.1. Rappel sur le protocole des mesures et le matériel utilisé

Le suivi par acoustique passive prévoit le déploiement en 7 points (R1 à R7) d'enregistreurs acoustiques et/ou de systèmes CPOD durant une année. L'enregistreur acoustique fait l'acquisition de données audio brutes permettant d'une part l'évaluation des niveaux sonores existants et d'autre part la recherche des signatures bioacoustiques afin d'estimer la fréquentation du site par les mammifères marins. Le système acquiert en mode duty-cycle 30% soit 3 minutes ON et 7min OFF afin de trouver un compromis entre la fréquence des déploiements/relevages (2,5 mois) et la quantité représentative de données collectées. Le système CPOD équipé d'un système embarqué délivre les détections automatiques des clics des Delphinidés et des marsouins sur l'ensemble de la campagne (duty-cycle 100%).

Le suivi a démarré le 01/03/2022 pour une durée totale d'une année afin de couvrir les quatre saisons et d'évaluer la fréquentation annuelle du site par les espèces ainsi que les variations saisonnières. Les données de bruit existant vont servir à la calibration des cartes de bruit modélisées.

Ces points de mesure (Tableau 59) ont été définis dans l'objectif de couvrir différentes zones de connaissance (proche, intermédiaire et éloignée) en regard de la connaissance existante et des conditions de sécurité des instruments (donnée AIS 2020/2021).

Tableau 59 : Descriptif des points de mesure.

Point	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
Zone projet	Proche	Proche	Intermédiaire	Eloignée	Proche	Intermédiaire	Eloignée
Type d'instrument	Enregistreur + CPOD	Enregistreur	Enregistreur + CPOD	Enregistreur	C-POD	C-POD	Enregistreur
Objectifs	Fréquentation Bruit ambiant	Fréquentation Bruit ambiant	Fréquentation Bruit ambiant	Fréquentation Bruit ambiant	Fréquentation	Fréquentation	Fréquentation Bruit ambiant
Coordonnées géographiques (WGS84)	49°52.5' N 000°35.0' W	49° 48.792'N 000°42.561'W	49°41.0' N 000°46.5' W	49°35.9' N 001°08.5' W	49° 52.5'N 000°48.5' W	49°41.0' N 000°30.0' W	49° 59.3' N 000° 12.6' W
Type de ligne de mouillage	Ligne de mouillage	Ligne de mouillage	Ligne de mouillage	Cage de fond	Ligne de mouillage	Ligne de mouillage	Ligne de mouillage
Immersion /fond (m)	7	7	7	0.5	7	7	7
Hauteur d'eau (Mesurée LEG1)	47m	41m	51m	30m	47m	38m	48m

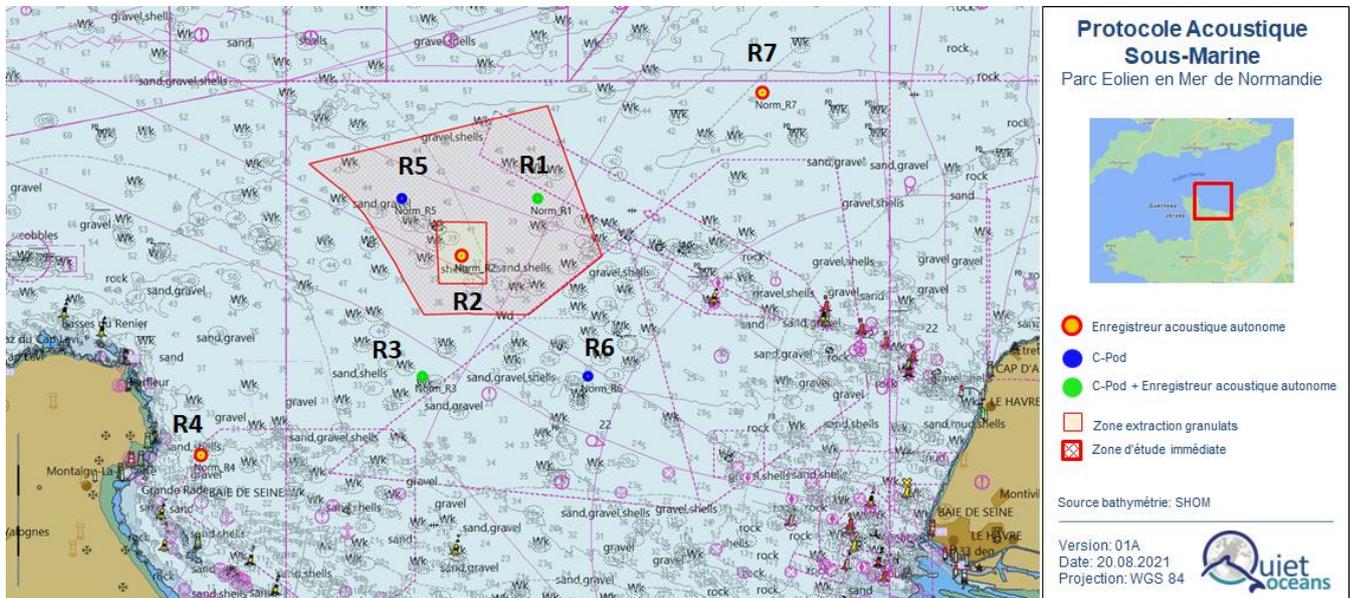


Figure 88 : Protocole géographique des mesures acoustiques.

IX.3.2. Justification du choix technique

La proposition technique (Avril 2021) intégrait la mutualisation de la mesure de bruit ambiant et l'étude de fréquentation par les cétacés en utilisant des enregistreurs acoustiques SM3M produit la société Wildlife Acoustics. Quiet-Oceans a été informé de leur décision de ne plus produire ces enregistreurs suite à une demande de devis émise en juin 2021. Quiet-Oceans a donc été contraint de remplacer cet équipement par un enregistreur produit par la société OceanInstruments le SoundTRAP HF600. Ce chapitre rappelle les contraintes techniques prises en compte dans le choix de l'enregistreur, présente une étude comparative des deux équipements et justifie techniquement sa capacité de mesure adaptée au projet.

IX.3.2.a. Contrainte technique des enregistreurs

Les gammes d'émission des espèces à enregistrer imposent des mesures acoustiques qui couvrent une gamme de fréquences allant jusqu'à 180kHz (clics des delphinidés), donc des enregistreurs ayant une fréquence d'échantillonnage supérieure à 360kHz (selon le théorème de Shannon).

IX.3.2.b. Etude comparative des enregistreurs

Le Tableau 60 de cette note permet d'établir une comparaison entre les deux instruments. L'enregistreur SOUNDTRAP est équivalent point à point avec l'enregistreur SM3M Wildlife. Seule, la sensibilité à l'écoute est inférieure à celle du SM3M mais néanmoins demeure compatible avec les objectifs de mesurer la variabilité du bruit ambiant et de détecter les signatures bioacoustiques des mammifères marins.

Tableau 60 : Tableau comparatif des enregistreurs.

Hydrophone & Recorder	SM3M	SOUNDTRAP HF 600
Bande de fréquence constructeur	5Hz-125kHz	20Hz-150kHz
Bande d'écoute possible	20Hz-192kHz	20Hz-192kHz
Nombre de voie	2	1
Résolution	16 bits	16 bits
Fréquence d'échantillonnage	384 kHz	384 kHz
Sensibilité à la réception	-165 dB re: 1V/ μ Pa	-176 dB re: 1V/ μ Pa
Format	WAC (compressé sans pertes)	SUD (compressé sans pertes)
Endurance (Rapport Cyclique 30%)	92 Jours (1 channel)	120 jours
Capacité disque	2 To (SD cards)	2 To (microSD cards)
Dimensions	580 x 165 mm	530 x 60 mm
Poids (dans l'air)	13.5 kg (with 32 D-Cells)	2.6 kg
Profondeur	150 m	200 m
Température	-10°C to 50°C	-10°C to 50°C
Photo		

IX.3.2.c. Perception acoustique du SOUNDTRAP

Ce chapitre traite de la capacité à mesurer et écouter les signaux des mammifères marins :

- ✓ En premier lieu, une courbe de calibration présente la courbe de sensibilité à la réception en fonction des fréquences,
- ✓ En second lieu, des preuves de mesures à haute fréquence par ces équipements sur la zone du projet sont fournies.

i. Calibration du SOUNDTRAP

Quiet-Oceans a réalisé une calibration du SOUNDTRAP HF600 (SN 6740) [DR1] par une méthode de comparaison avec un hydrophone de référence calibré. Les résultats mettent en lumière une sensibilité quasi-plate dans la bande de fréquences comprise entre 100 Hz jusque 160 kHz. Ces résultats corroborent les données du constructeur autour de la sensibilité moyenne de l'hydrophone fournie.

SoundTrap 6740

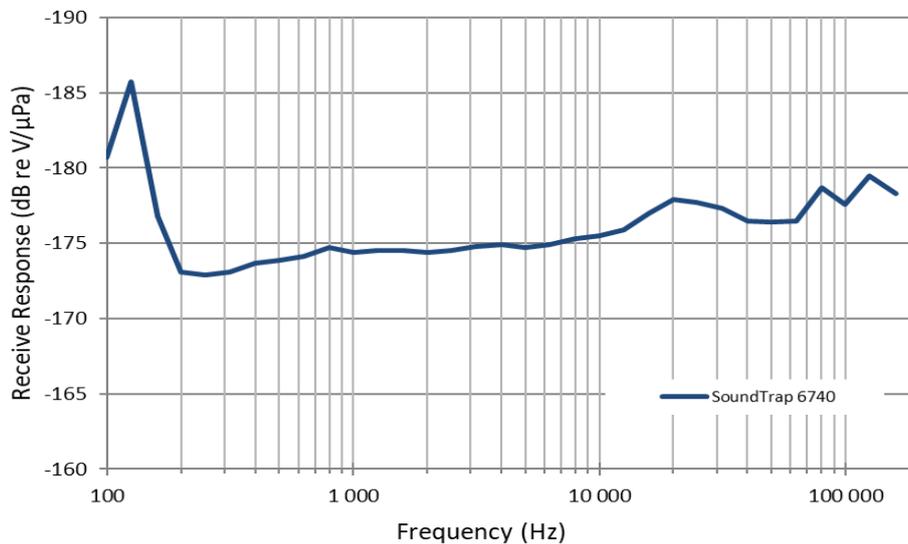


Figure 89 : Courbe de calibration de l'enregistreur SOUNDTRAP HF600 (S/N 6740).

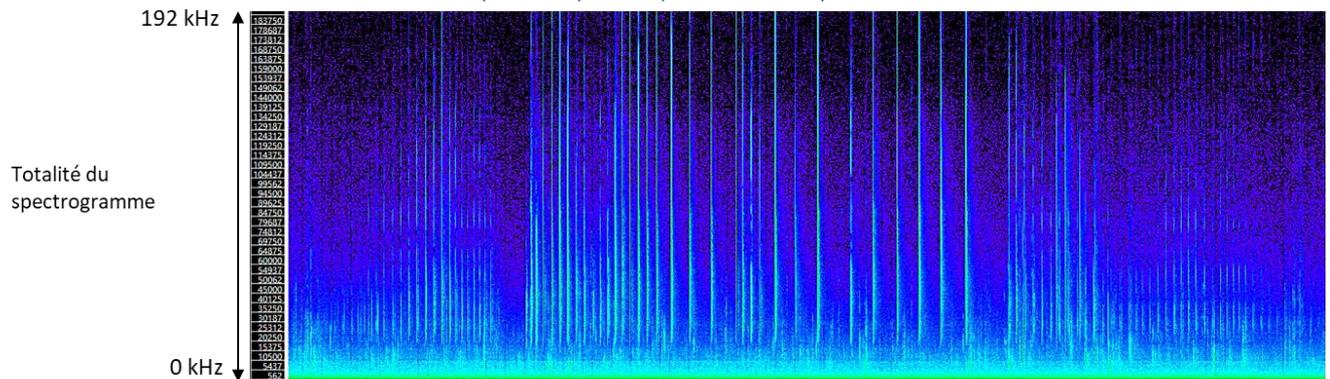
ii. Justification par spectrogramme

La Figure 90 illustre deux spectrogrammes :

- ✓ Des clics d'écholocation émis par des delphinidés dans la bande de fréquence entre 15 kHz et 192 kHz. Cette mesure a été réalisée sur le point R2 par l'enregistreur SoundTRAP HF600 n°6723 lors de la campagne de mesure n°1 sur le parc Centre Manche.
- ✓ Des clics émis par des phocoenidae dans la bande de fréquence entre 110 kHz et 150 kHz. Cette mesure a été réalisée sur le point R3 par l'enregistreur SoundTRAP HF600 n°6724 lors de la campagne de mesure n°1 sur le parc Centre Manche.

Dans les deux cas, la capacité de l'enregistreur à capter des signaux hautes fréquences au-delà de la fréquence indiquée par le constructeur de 150 kHz est mise en évidence.

Campagne 01 // ENR-066 // Enregistrement 6723-20220312_042000
 Clics d'écholocation émis par les Delphinidés (15 kHz à 192 kHz)



Campagne 01 // ENR-067 // Enregistrement 6724-20220308_085000
 Clics émis par les Phocoenidés (110 kHz à 150 kHz – forte intensité jusqu'à 192 kHz)

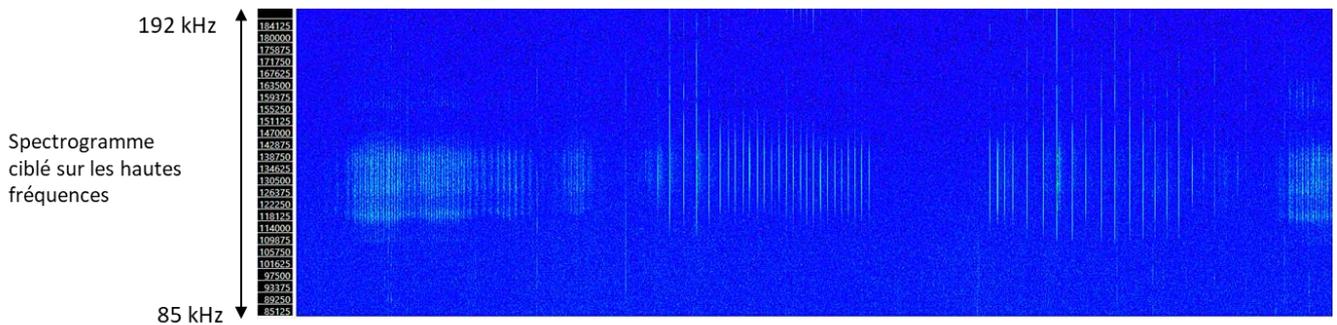


Figure 90 : Spectrogramme justifiant d'une écoute possible au-delà de la fréquence de 150 kHz
 (en haut : clics de Delphinidés ; en bas clics de Marsouins)

IX.3.3. Conclusion

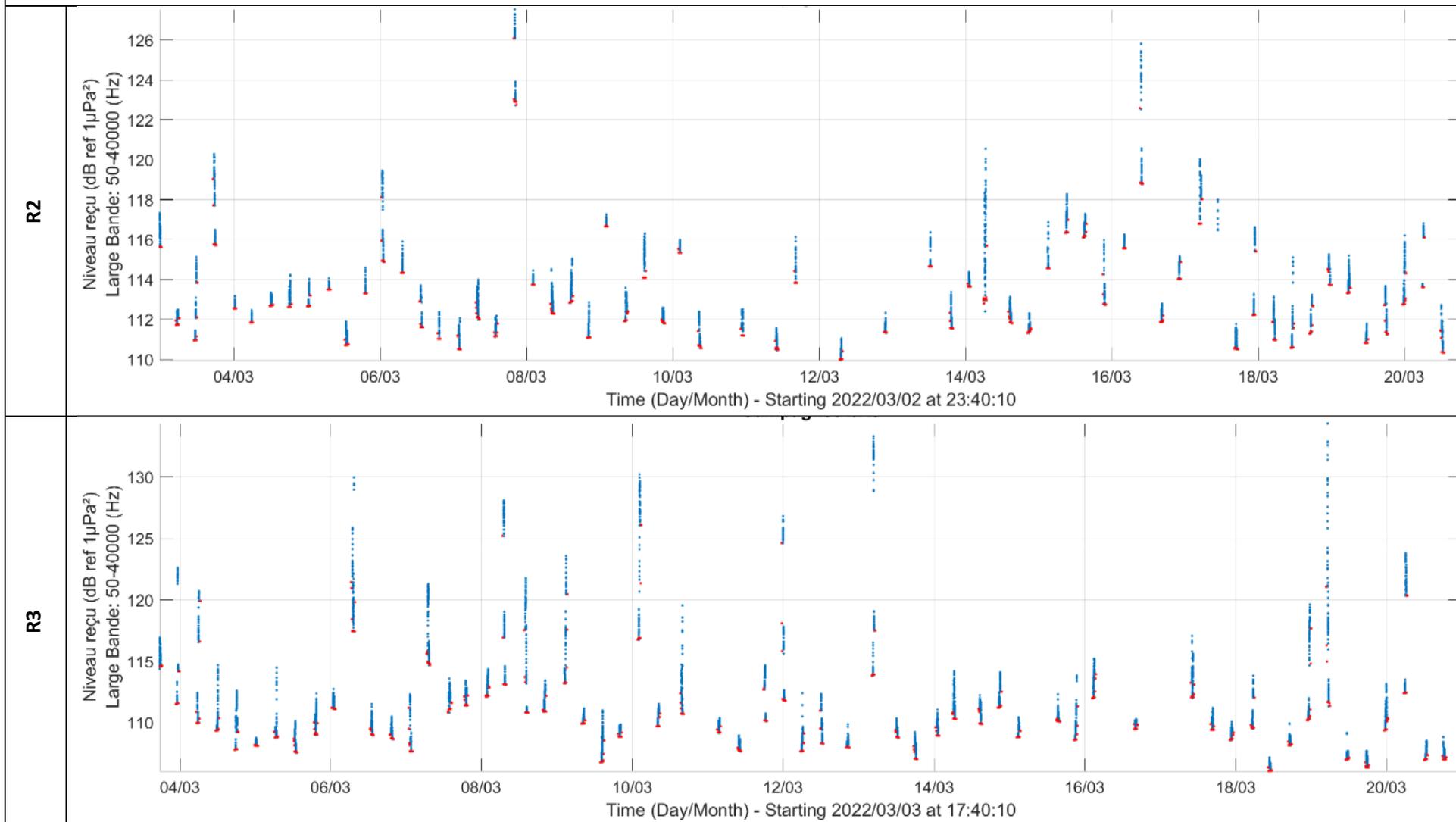
En substitut de l'enregistreur SM3M dorénavant obsolète, L'ensemble des informations présentées dans ce document justifie que l'enregistreur SOUNDTRAP HF600 est adapté pour mesurer la variabilité du bruit ambiant et capturer la variabilité spectrale des signatures bioacoustiques. Les performances de cet équipement répondent aux impératifs de mesure du projet Centre Manche.

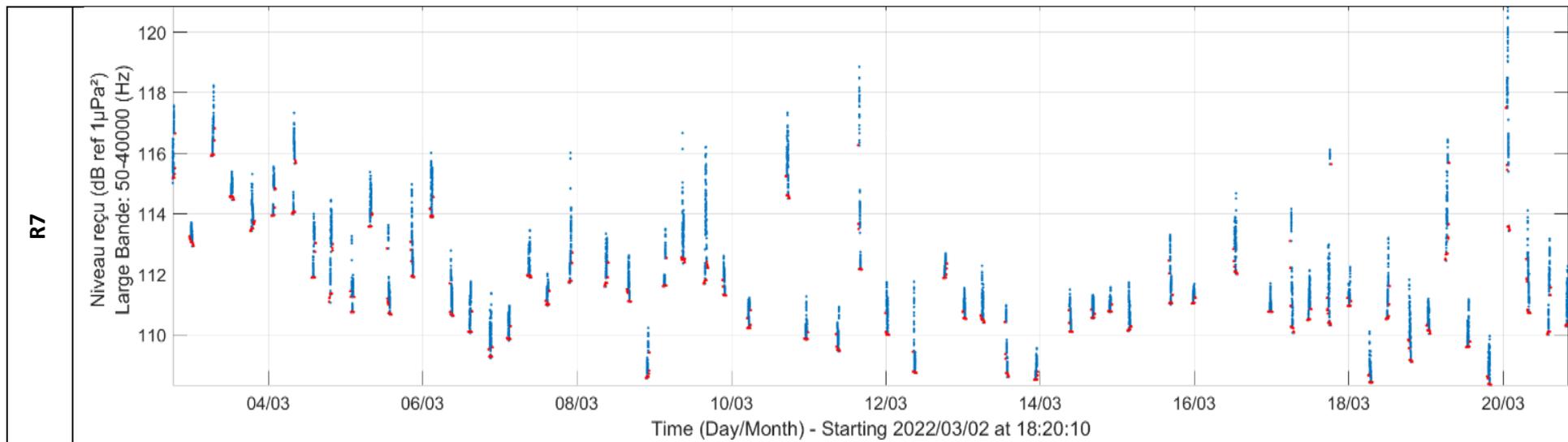


IX.4. Courbes d'évolution temporelle du bruit dans la bande filtrée [50Hz-40kHz]

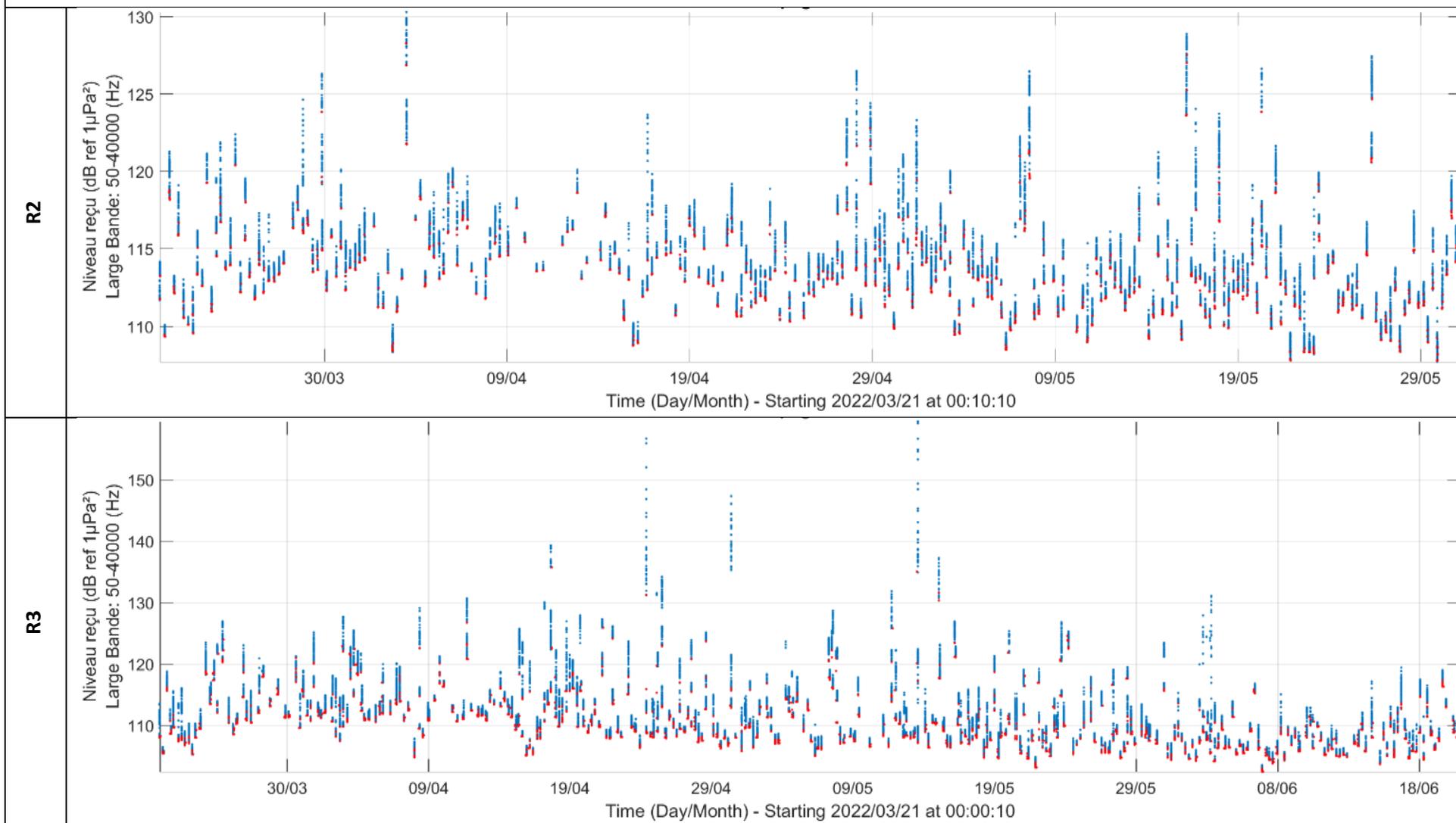
Cette annexe présente les courbes temporelles d'évolution du bruit dans la bande filtrée [50Hz-40kHz] (dans la bande de fréquence de 50 Hz à 40 kHz) après le filtrage spécifique appliqué aux enregistreurs sub-surface. Les données filtrées permettent une étude statistique, mais n'ont pas pu être utilisées pour les études par pas de temps fin (répartition horaire des niveaux sonores, détection des évènements anthropiques).

Hiver 2022





Printemps 2022

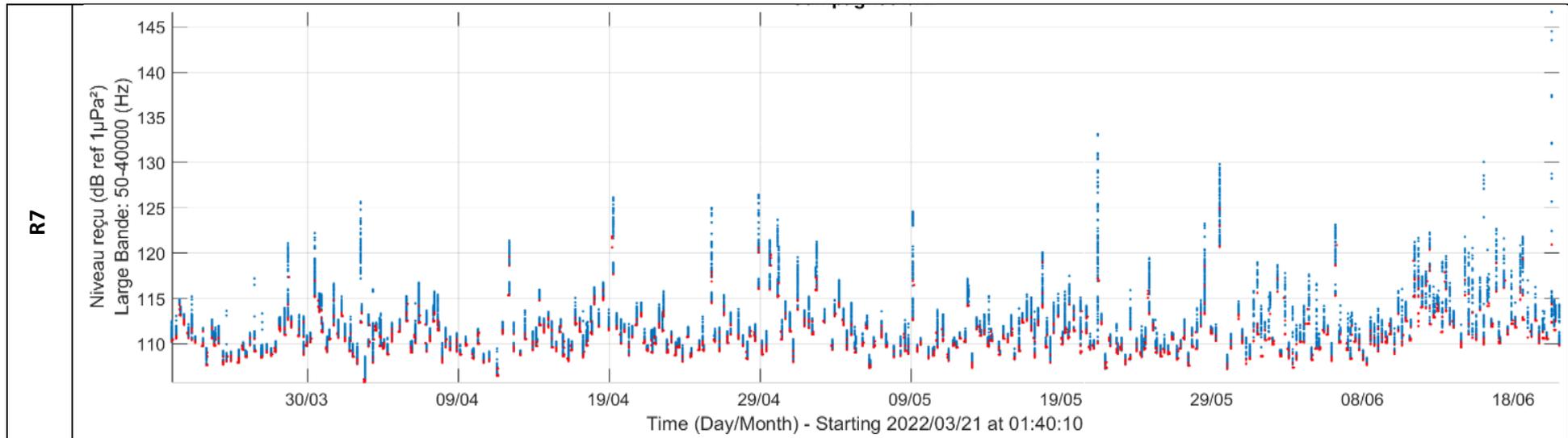




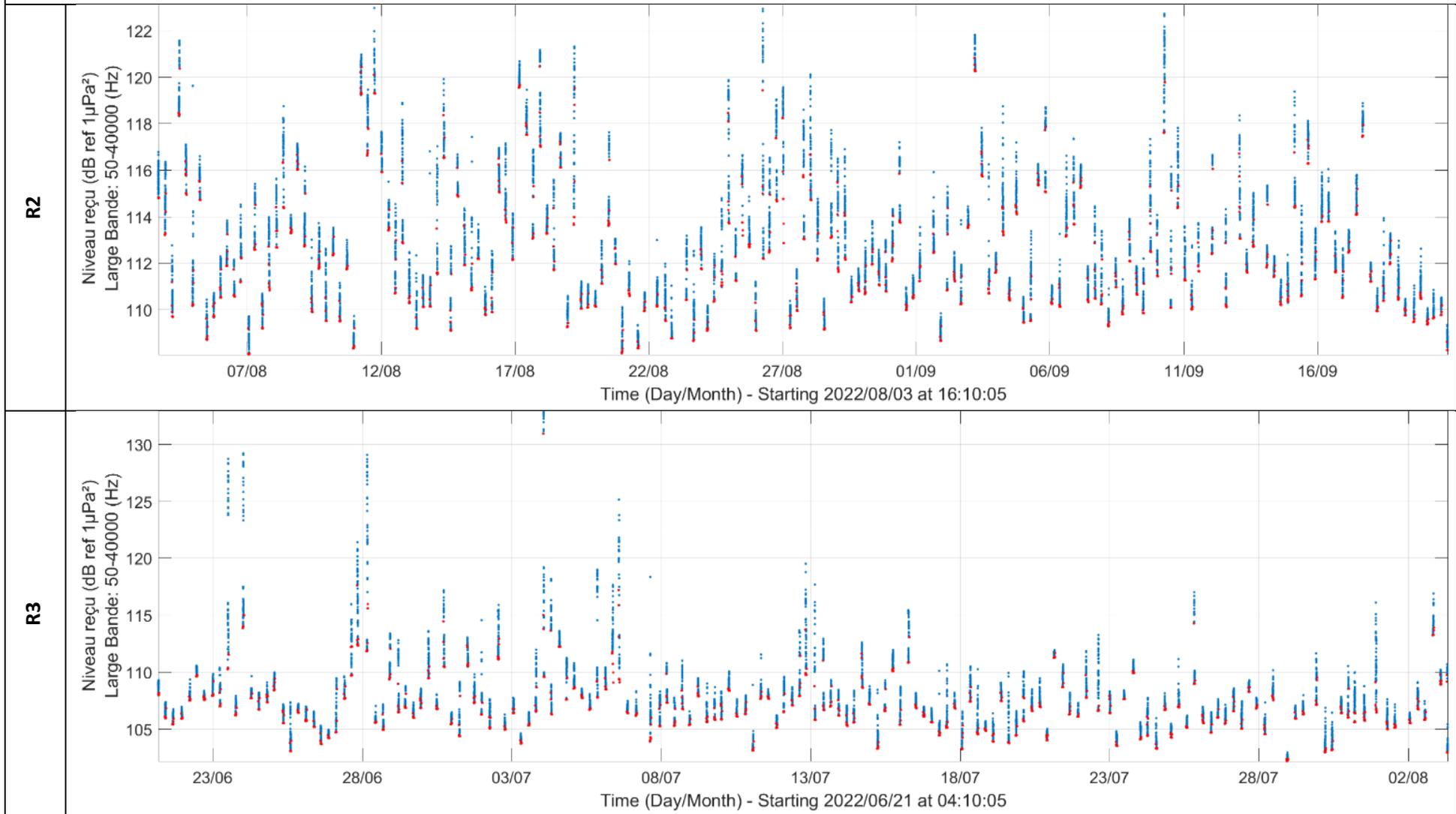
Suivi par acoustique passive du bruit ambiant et de la
fréquentation des mammifères marins dans le cadre du parc
éolien en mer de Normandie

Etat de référence

Référence : QO.20210225.10.RAP.001.05A



Été 2022

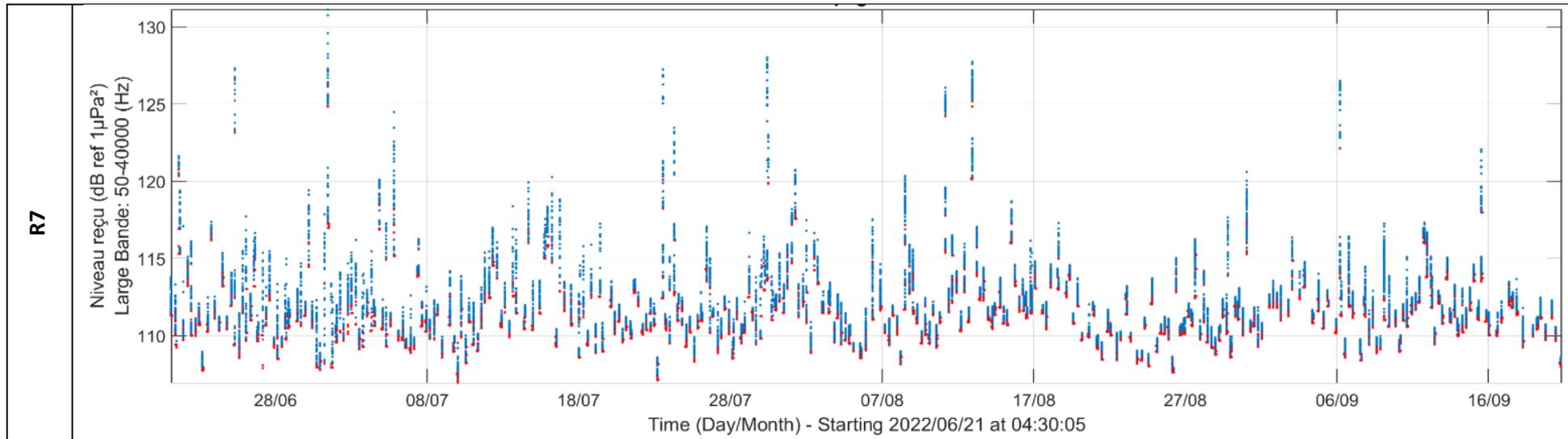




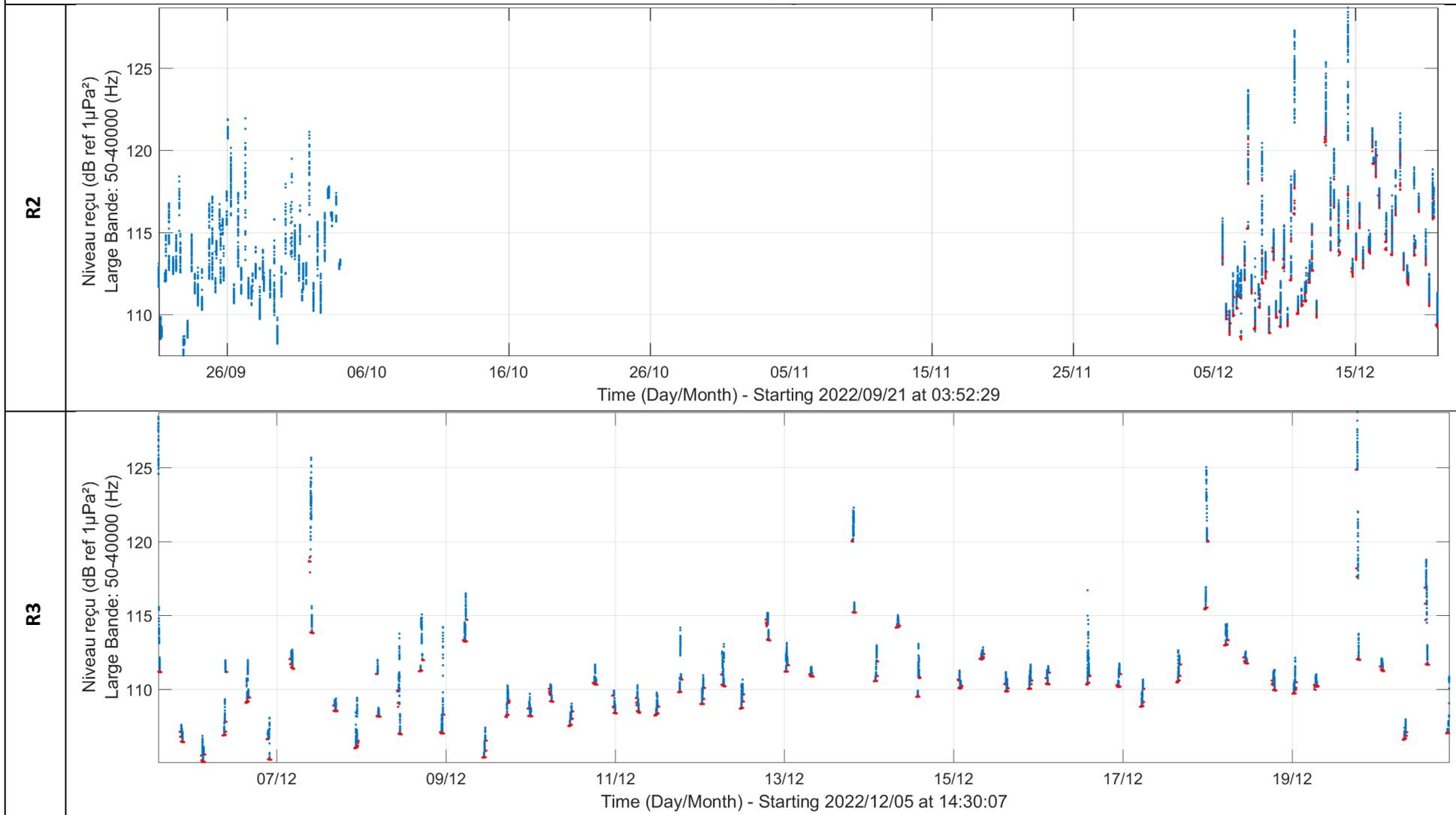
Suivi par acoustique passive du bruit ambiant et de la fréquentation des mammifères marins dans le cadre du parc éolien en mer de Normandie

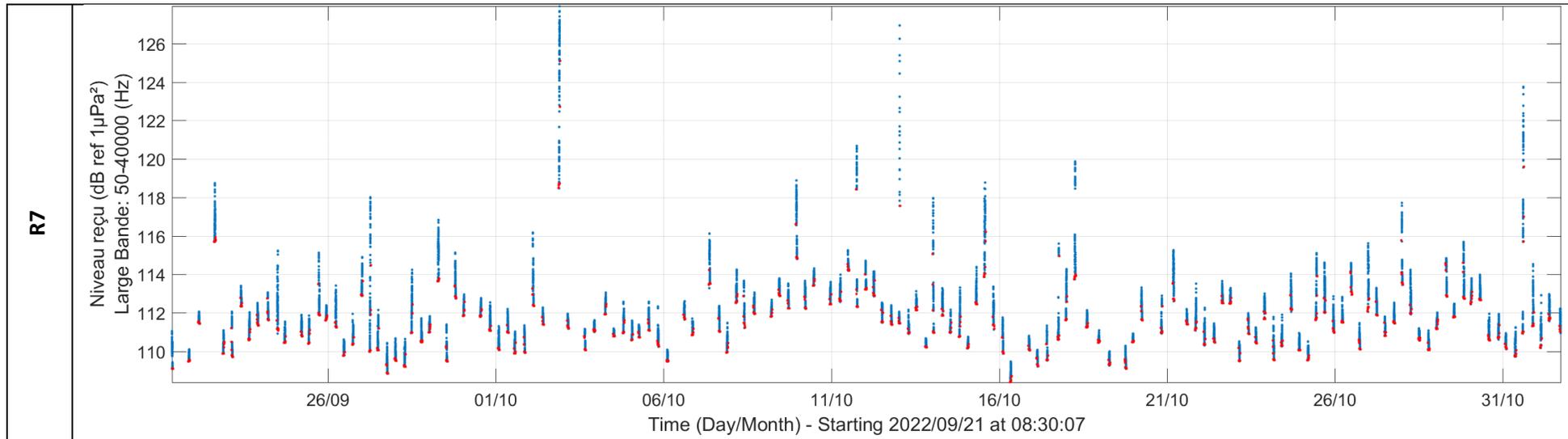
Etat de référence

Référence : QO.20210225.10.RAP.001.05A



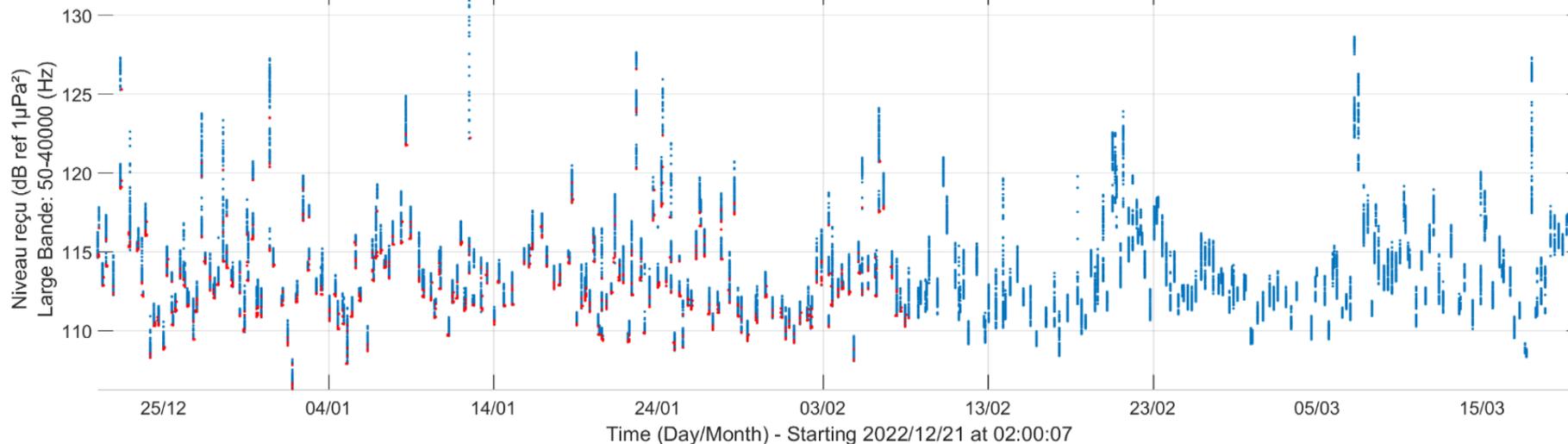
Automne 2022



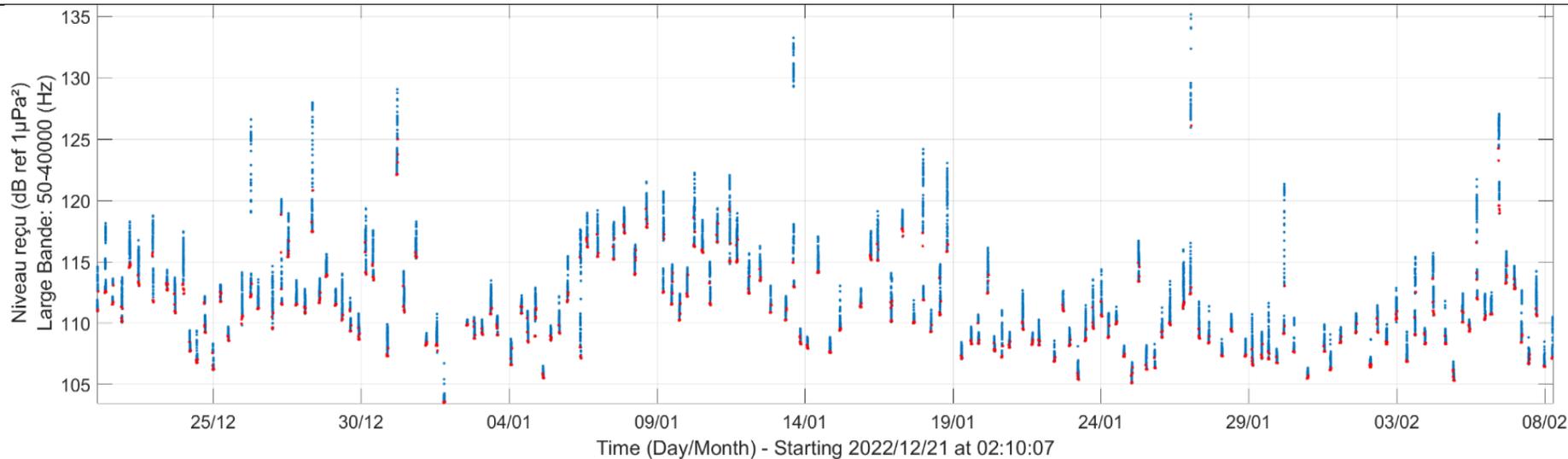


Hiver 2023

R2



R3



Bibliographie

- Ainslie, M. (2010). Principles of Sonar Performance Modelling. In *Principles of Sonar Performance Modelling*. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-87662-5>
- Asselin, S., Hammill, M. O., & Barrette, C. (1993). Underwater vocalizations of ice breeding grey seals. *Canadian Journal of Zoology*. <https://doi.org/10.1139/z93-310>
- Aumüller, R., Bach, L., Baier, H., Behm, H., Beiersdorf, A., Bellmann, M., Betke, K., Blew, J., Binder, A., Blasche, K., Boethling, M., Böttcher, U., Braasch, A., Coppack, T., Dähne, M., Damian, H.-P., Dannheim, J., Diederichs, A., Dittmann, T., ... Zerbs, C. (2013). *Standard Investigation of the Impacts of Offshore Wind Turbines on the Marine Environment (StUK4)* (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) (ed.)). www.bsh.de
- Bailey, H., Clay, G., Coates, E. A., Lusseau, D., Senior, B., & Thompson, P. M. (2010). Using T-PODs to assess variations in the occurrence of coastal bottlenose dolphins and harbour porpoises. *Annales Zoologici Fennici*, 20(Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystem), 150–158. <https://doi.org/10.1002/aqc.1060>
- McCulloch, S. (1999). the Vocal Behaviour of the Grey Seal (*Halichoerus Grypus*). *University of St Andrews*, 150. <http://research-repository.st-andrews.ac.uk/%0Ahttps://core.ac.uk/download/pdf/83960103.pdf>
- Prawirasasra, M. S., Mustonen, M., & Klauson, A. (2021). The underwater soundscape at gulf of riga marine-protected areas. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(8). <https://doi.org/10.3390/jmse9080915>
- 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>
- Ross. (1976). *Mechanics of Underwater Noise*. In *Pergamon, New York*.
- Samaran, F., Corman, D., Spitz, J., & Ridoux, V. (2015). *Mise en place d'un suivi par acoustique passive des marsouins communs le long des côtes Françaises. Rapport de synthèse de l'étude*. 1–184.
- Schusterman, R. J., Balliet, R. F., & St. John, S. (1970). Vocal displays under water by the gray seal, the harbor seal, and the stellar sea lion. *Psychonomic Science*. <https://doi.org/10.3758/BF03331839>
- Southall, E. 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.
- Tougaard, J., Poulsen, L. R., Amundin, M., Larsen, F., Hansen, J. R., & Teilmann, J. (2006). Detection function of T-PODs and estimation of porpoise densities. In *Proceedings of the Workshop: Static Acoustic Monitoring of Cetaceans*, 7–14. https://www.europeancetaceansociety.eu/system/files/ECS_Special_Publication_Series/ECS2006_News46_Static_Acoustic_Monitoring_printing_version.pdf
- Wenz, G. M. (1962). Acoustic Ambient Noise in the Ocean: Spectra and Sources. *The Journal of the Acoustical Society of America*. <https://doi.org/10.1121/1.1909155>