



# Cahier des expertises

Volet Acoustique sous-marine

Avril 2017 modifié en avril 2018



 <p><b>BRL</b> Ingénierie</p>	<p><b>BRL ingénierie – coordinateur de l'étude d'impact</b> 1105 Av Pierre Mendès-France BP 94001 30001 NIMES CEDEX 5</p>
<p>Sous-traitant</p>  <p><b>Quiet oceans</b> Ocean Noise Forecasting Monitoring &amp; Mitigation</p>	<p><b>QUIET-OCEANS – coordinateur volet acoustique sous-marine</b> <b>65, place Nicolas Copernic</b> 29280 Plouzané</p>



# Sommaire

<b>1</b>	<b>CONTEXTE ET OBJECTIF DE L'ETUDE</b>	<b>1</b>
1.1	Contexte scientifique	3
1.2	Aspect réglementaire	3
1.3	Objectifs de cette étude	4
1.4	Aires d'études	5
<b>2</b>	<b>LE BRUIT SOUS-MARIN</b>	<b>7</b>
2.1	La problématique du bruit sous-marin	9
2.2	Qu'est-ce que le chorus sonore sous-marin	10
2.2.1	La géophonie	12
2.2.2	La biophonie	12
2.2.3	L'anthropophonie	13
2.3	Description du milieu physique influençant la distribution du bruit	13
2.3.1	De quoi dépend la distribution des bruits ?	13
2.3.2	Bathymétrie	15
2.3.3	Environnement météo-océanique	16
<b>3</b>	<b>METHODOLOGIE DE L'EVALUATION DE L'ETAT SONORE INITIAL ET DES IMPACTS</b>	<b>21</b>
3.1	Description générale de la méthode	23
3.2	Modèle pour la caractérisation du bruit ambiant et des empreintes sonores	24
3.2.1	La plateforme de prévision du bruit anthropique Quonops®	24
3.2.2	Une plateforme répondant aux plus hauts standards internationaux	24
3.2.3	Quels paramètres sont pris en compte dans les modélisations ?	25
3.2.4	Cartographie statistique	25
3.2.5	Définition et méthode d'estimation des empreintes sonores	26
3.3	Acquisition et traitement de données acoustiques in situ	26
3.3.1	Protocole de levé terrain	26
3.3.2	Instrumentation acoustique passive mise en œuvre	29
3.3.3	Traitements réalisés sur les données passives	30
3.3.4	Moyens d'acoustique active mis en œuvre	31
3.4	Acquisition des données descriptives des activités maritimes génératrices de bruit dans l'aire d'étude large	31
3.5	Origine des données de fréquentation biologique du site	32
3.5.1	Description des données SAMM	32
3.6	Méthode d'évaluation des risques biologiques	34
3.6.1	Méthode d'estimation du nombre de cétacés affectés	34
3.6.2	Hiérarchisation des risques sonores	35

3.6.3	Classification acoustique des espèces de mammifères marins .....	36
3.6.4	Classification acoustique des poissons et tortues marines .....	36
3.6.5	Critères de dépassement des seuils.....	37
3.7	Limites méthodologiques et lacunes de connaissances .....	39
3.7.1	Mise en œuvre des mesures en mer .....	39
3.7.2	Données AIS .....	39
3.7.3	Approximations de la modélisation sonore .....	39
3.7.4	Incertitudes relatives aux niveaux émis .....	39
3.7.5	Lacunes de connaissance relative aux seuils de tolérance .....	40
3.7.6	Impact des expositions prolongées au bruit .....	40
3.7.7	Impacts sur les populations .....	41
<b>4</b>	<b>CARACTERISATION SONORE INITIALE DE L'AIRE D'ETUDE LARGE .....</b>	<b>43</b>
4.1	Collecte des données .....	45
4.2	Les activités maritimes génératrices de bruit dans l'aire d'étude large .....	46
4.3	Le bruit ambiant mesuré sur le site .....	49
4.3.1	Structure du bruit ambiant existant.....	49
4.3.2	Analyse du bruit ambiant existant par bandes de fréquences .....	52
4.4	Synthèse sur les mesures de bruit ambiant .....	56
<b>5</b>	<b>CARTOGRAPHIE SONORE INITIALE.....</b>	<b>57</b>
5.1	Calibration des cartes sonores .....	59
5.2	Atlas sonore saisonnier.....	60
5.2.1	Niveau sonore dans l'aire d'étude immédiate .....	60
5.2.2	Guide de lecture des cartes de bruit ambiant .....	60
5.2.3	Analyse globale du bruit cartographié.....	61
<b>6</b>	<b>CARACTERISATION DES BRUITS INTRODUIITS PAR LES ACTIVITES DU PROJET .....</b>	<b>71</b>
6.1	Scénarios descriptifs du projet .....	73
6.2	Caractérisation des sources de bruit liées à la construction du parc éolien en mer .....	74
6.2.1	Bruit généré par le dragage.....	74
6.2.2	Bruit généré par le battage de pieu.....	75
6.2.3	Bruit généré par le forage vertical.....	77
6.2.4	Bruit généré par les opérations d'ensouillage des câbles .....	78
6.3	Caractérisation des sources de bruit liées au fonctionnement des éoliennes .....	79
6.4	Bruit généré par les navires lors des travaux ou de la maintenance.....	80
6.5	Bruit généré en phase de démantèlement.....	81
6.6	Variation saisonnière de l'empreinte sonore du projet .....	82
6.7	Niveaux sonores large bande à une distance de référence .....	84
<b>7</b>	<b>CARACTERISATION DES RISQUES SONORES DU PROJET .....</b>	<b>85</b>
7.1	Estimation des effets acoustiques pour les mammifères marins .....	87

7.1.1	Enjeux du site vis-à-vis des mammifères marins .....	87
7.1.2	Effets du bruit sur les cétacés .....	89
7.1.3	Limites géographiques des risques sonores pour le Marsouin commun .....	91
7.1.4	Limites géographiques des risques sonores pour les cétacés basses fréquences .....	97
7.1.5	Limites géographiques des risques sonores pour les cétacés moyennes fréquences .....	103
7.1.6	Limites géographiques des risques sonores des cétacés « hautes fréquences » autre que le Marsouin commun .....	108
7.1.7	Limites géographiques des risques sonores des pinnipèdes .....	112
7.1.8	Estimation du nombre de cétacés impactés .....	119
7.2	Estimation des effets acoustiques pour les poissons.....	123
7.2.1	Enjeux du site vis-à-vis des poissons .....	123
7.2.2	Effets de bruit sur les poissons.....	123
7.2.3	Limites géographiques des poissons sans vessie natatoire .....	125
7.2.4	Limites géographiques des risques sonores pour les poissons avec vessie natatoire sans cils sensitifs .....	130
7.2.5	Limites géographiques des risques sonores pour les poissons avec vessie natatoire avec cils sensitifs.....	137
7.3	Estimation des effets acoustiques pour les tortues marines .....	141
7.3.1	Enjeux du site vis-à-vis des tortues marines .....	141
7.3.2	Limites géographiques des risques sonores pour les tortues marines .....	142
7.4	Effet du bruit sur les invertébrés marins .....	147
7.5	Influence du quantile .....	148
7.6	Effets prolongés du bruit sur les mammifères marins .....	151
7.7	Synthèse des risques .....	154
8	<b>EFFETS CUMULES AVEC D'AUTRES PROJETS EN MER .....</b>	<b>157</b>
8.1	Scénario cumulé avec la construction du parc du Calvados .....	159
8.2	Scénario cumulé avec l'ensouillage du câble de raccordement.....	161
8.3	Scénario cumulé avec désensablement de la plage au sud de Penly .....	161
8.4	Limites géographiques cumulées des empreintes sonores .....	162
8.5	Risques cumulées .....	162
8.6	Avis d'expertise concernant les effets cumulés des différents chantiers de construction en Manche .....	166
9	<b>SYNTHESE DE L'ETUDE.....</b>	<b>167</b>
9.1	Rappel du contexte sonore initial .....	169
9.2	Synthèse des modifications du contexte sonore .....	170
9.2.1	Bruit en phase de construction et de démantèlement .....	171
9.2.2	Bruits en phase d'exploitation et maintenance .....	175
9.3	Synthèse des risques sur les mammifères marins, les poissons et les tortues marines .....	177

9.3.1	Synthèse des risques sur les mammifères marins .....	179
9.3.2	Synthèse des risques sur les poissons.....	184
<b>10</b>	<b>MESURES ERC ET DE SUIVI.....</b>	<b>191</b>
10.1	Panel de solutions de réduction existantes.....	193
10.1.1	Panel de mesures de réduction des niveaux de source de bruit individuels .....	194
10.1.2	Panel de systèmes d'entrave de la propagation du bruit.....	196
10.1.3	Panel de mesures de réduction des niveaux sonores cumulés .....	206
10.2	Panel de mesures qui permettent d'éloigner temporairement les espèces des zones de risque .....	208
10.2.1	Procédure « Ramp-up ».....	208
10.2.2	Procédure « Pavlov » .....	208
10.3	Stratégie recommandée et plan de suivi préconisé.....	209
10.3.1	Recommandations pour les mesures de réduction à la source.....	209
10.3.2	Recommandations pour les mesures de réduction complémentaires .....	216
10.3.3	Recommandations pour le programme de suivi.....	221
<b>11</b>	<b>ANNEXES.....</b>	<b>225</b>
11.1	Empreinte sonore en fonction de l'activité et de la saison.....	227
11.1.1	Saison hivernale .....	228
11.1.2	Saison estivale.....	231
11.2	Effets du changement du référentiel de sensibilité auditive et des seuils de tolérance .....	234
11.2.1	Rappel de la méthodologie d'évaluation des impacts sonores.....	235
11.2.2	Evaluation des distances et surfaces de risque de dommage physiologique pour les cétacés et les pinnipèdes.....	240
11.2.3	Conclusions .....	245
<b>12</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>247</b>

# Table des illustrations

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation des aires d'études retenues pour l'étude d'impact .....	6
Figure 2 : Echelle qualitative des niveaux de bruits sous-marins émis à un mètre dans une bande basse fréquence de quelques kHz.....	9
Figure 3 : Composition du chorus sonore sous-marin. ....	10
Figure 4 : Synthèse des niveaux de bruit typiques en fonction de la fréquence et de la nature de la source de bruit. Ces valeurs peuvent être très dépendantes du site, de la saison, et du contexte.....	11
Figure 5 : Spectrogramme illustratif d'un déplacement de sédiment.....	12
Figure 6 : Spectrogrammes de clics (gauche) et de sifflements (droite) émis par des delphinidés	12
Figure 7: Spectrogramme de la signature acoustique de l'hélice d'un navire.....	13
Figure 8 : Bathymétrie autour de l'aire d'étude large.....	15
Figure 9 : Profils de célérité représentatifs de l'aire d'étude par mois. ....	16
Figure 10 : Loi de distribution des hauteurs d'eau sous l'effet des marées.....	17
Figure 11 : Distribution statistique des hauteurs significatives de vagues au voisinage de l'aire d'étude durant les saisons hivernale et estivale.....	18
Figure 12 : Cartographie de la nature des fonds .....	19
Figure 13 : Méthodologie et moyens mis en œuvre pour l'étude d'impact acoustique (source : Quiet-Oceans). ....	23
Figure 14 : Description schématique de la plateforme opérationnelle de prévision des bruits .....	25
Figure 15 : Positions des enregistreurs acoustiques servant à caractériser le bruit ambiant sur les aires d'étude immédiate et éloignée. ....	28
Figure 16 : Position des enregistreurs (losanges vert/rouge/mauve) et des émissions actives (losanges bleus) ayant servi à la calibration.....	29
Figure 17: Déploiement d'une cage instrumentée. ....	30
Figure 18 : Algorithme de calcul des niveaux sonores.....	30
Figure 19 : Système Pulse© mis en œuvre. ....	31
Figure 20 : Estimation de la densité de population en hiver dans la zone étendue à partir des données SAMM .....	33
Figure 21 : Estimation de la densité de population en été dans la zone étendue à partir des données SAMM .....	34
Figure 22 : Graduation des risques biologiques en fonction de l'éloignement à la ou les sources de bruit anthropique. ....	36
Figure 23 : Densité du trafic (échelle logarithmique) au sein de la Manche orientale et centrale obtenue par traitement des données AIS.....	47
Figure 24 : Gabarit des niveaux de bruit émis par les navires en fonction de la fréquence et de leur catégorie.....	48
Figure 25 : Histogramme des niveaux perçus .....	51
Figure 26 : Niveaux d'énergie (par Hz) mesurés sur les enregistreurs acoustiques pour différents taux de probabilité ou percentiles (1, 10, 50, 90, 99%). ....	52
Figure 27 : Comparaison entre le niveau de bruit résiduel dans le tiers d'octave 50Hz pour l'enregistreur R1 (en bleu) et le profil de hauteur de vagues (exprimé en m, en vert).54	

Figure 28 : Emergences sonores journalières indicatrices des bruits des échosondeurs au 10ième percentile dans la bande autour de 40kHz. ....	55
Figure 29 : Carte statistique du bruit ambiant en été (percentile 10%).....	62
Figure 30 : Carte statistique du bruit ambiant en été (percentile 25%).....	63
Figure 31 : Carte statistique du bruit ambiant en été (percentile 50%).....	64
Figure 32 : Carte statistique du bruit ambiant en été (percentile 75%).....	65
Figure 33 : Carte statistique du bruit ambiant en hiver (percentile 10%) .....	67
Figure 34 : Carte statistique du bruit ambiant en hiver (percentile 25%) .....	68
Figure 35 : Carte statistique du bruit ambiant en hiver (percentile 50%) .....	69
Figure 36 : Carte statistique du bruit ambiant en hiver (percentile 75%) .....	70
Figure 37 : Gabarit de source sonore (en dB ref. 1µPa/vHz @1m) localisée près du fond permettant de modéliser le bruit généré par l’opération de dragage. ....	75
Figure 38 : En bleu, la position géographique servant à l’évaluation des incidences sonores lors d’une opération de dragage.....	75
Figure 39 : Variation du niveau d’exposition sonore maximum par coup à un mètre du pieu en fonction de son diamètre.....	77
Figure 40 : Modèle de niveau d’exposition sonore à un mètre du pieu de diamètre 2.2 ou 3.0m, pour un coup unique, en fonction de la fréquence. ....	77
Figure 41 : Modèle de bruit généré lors d’une opération de forage vertical pour une foreuse de diamètre 2.2 ou 3,0m (en dB réf. 1µPa/vHz @1m). ....	78
Figure 42 : Gabarit de source sonore (en dB ref. 1µPa/vHz @1m) localisée près du fond permettant de modéliser le bruit généré par l’outil tracté d’ensouillage des câbles. ....	79
Figure 43 : Modèle de bruit généré par une éolienne structure « jacket » à 1 m de la structure en fonction de la fréquence.....	80
Figure 44 : Positions géographiques des éoliennes servant à l’évaluation des incidences sonores lors de l’exploitation du parc éolien.....	80
Figure 45 : Gabarit de source sonore (en dB ref. 1µPa/vHz @1m) modélisant un navire de type remorqueur. ....	81
Figure 46 : Comparaison saisonnière de l’émergence d’un même battage de pieu d’une fondation jacket .....	83
Figure 47 : Limites médianes des empreintes sonores pour le Marsouin commun.....	92
Figure 48 : Surfaces des empreintes sonores pour le Marsouin commun .....	92
Figure 49 : Cartographie des zones de perception des bruits du projet pour le Marsouin commun	93
Figure 50 : Limites médianes des zones de risque de modification du comportement pour le Marsouin commun.....	94
Figure 51 : Surface des zones de risque de modification du comportement pour le Marsouin commun .....	94
Figure 52 : Cartographie des zones de risque de modification du comportement pour le Marsouin commun.....	95
Figure 53 : Limites médianes des zones de risque de dommage physiologique temporaire pour le Marsouin commun .....	96
Figure 54 : Limites médianes des empreintes sonores pour les cétacés basses fréquences .....	97
Figure 55 : Surface des empreintes sonores pour les cétacés basses fréquences.....	98
Figure 56 : Cartographie des zones de perception des bruits du projet pour les cétacés basses fréquences .....	99

Figure 57 : Limites médianes des zones de risque de modification du comportement pour les cétacés basses fréquences .....	100
Figure 58 Surface des zones de risque de modification du comportement pour les cétacés basses fréquences .....	101
Figure 59 : Limites médianes des zones de risque de dommage physiologique temporaire (réversible) pour les cétacés basses fréquences .....	102
Figure 60 : Limites médianes des empreintes sonores pour les cétacés moyennes fréquences ....	104
Figure 61 : Surface des empreintes sonores pour les cétacés moyennes fréquences.....	104
Figure 62 : Cartographie des zones de perception des bruits du projet pour les cétacés moyennes fréquences .....	105
Figure 63 : Limites médianes des zones de risque de modification du comportement pour les cétacés moyennes fréquences .....	106
Figure 64 Surface des zones de risque de modification du comportement pour les cétacés moyennes fréquences .....	107
Figure 65 : Limites médianes des empreintes sonores pour les cétacés hautes fréquences .....	109
Figure 66 : Surface des empreintes sonores pour les cétacés hautes fréquences.....	109
Figure 67 : Cartographie des zones de perception des bruits du projet pour les cétacés hautes fréquences .....	110
Figure 68 : Limites médianes des zones de risque de modification du comportement pour les cétacés hautes fréquences .....	111
Figure 69 Surface des zones de risque de modification du comportement pour les cétacés hautes fréquences .....	112
Figure 70 : Limites médianes des empreintes sonores pour les pinnipèdes .....	114
Figure 71 : Surface des empreintes sonores pour les pinnipèdes.....	114
Figure 72 : Cartographie des zones de perception des bruits du projet pour les pinnipèdes .....	115
Figure 73 : Limites médianes des zones de risque de modification du comportement pour les pinnipèdes.....	116
Figure 74 Surface des zones de risque de modification du comportement pour les pinnipèdes ...	117
Figure 75 : Limites médianes des zones de risque de dommage physiologique temporaire pour les pinnipèdes.....	118
Figure 76 : Estimation du nombre d'individus dans l'empreinte sonore (susceptible de percevoir le bruit de l'atelier) de chaque phase du projet durant la saison hiver. ....	120
Figure 77 : Estimation du nombre d'individus dans la zone de dérangement comportemental pour chaque phase du projet durant la saison été.....	120
Figure 78 : Estimation du nombre d'individus dans la zone de dérangement comportemental pour chaque phase du projet durant la saison hiver. ....	121
Figure 79 : Estimation du nombre d'individus dans la zone de dérangement comportemental pour chaque phase du projet durant la saison été.....	122
Figure 80 : Limites médianes des empreintes sonores pour les poissons sans vessie natatoire ...	126
Figure 81 : Surface des empreintes sonores pour les poissons sans vessie natatoire .....	126
Figure 82 : Cartographie des zones de perception des bruits du projet pour les poissons sans vessie natatoire .....	128
Figure 83 : Limites médianes des zones de risque de dommage physiologique temporaire pour les poissons sans vessie natatoire .....	129
Figure 84 : Limites médianes des empreintes sonores pour les poissons avec vessie natatoire sans cils sensitifs.....	131

Figure 85 : Surface des empreintes sonores pour les poissons avec vessie natatoire sans cils sensitifs .....	131
Figure 86 : Cartographie des zones de perception des bruits du projet pour les poissons avec vessie natatoire sans cils sensitifs .....	132
Figure 87 : Limites médianes des zones de risque de modification du comportement pour les poissons avec vessie natatoire sans cils sensitifs .....	134
Figure 88 : Surface des zones de risque de modification du comportement pour les poissons avec vessie natatoire sans cils sensitifs .....	134
Figure 89 : Cartographie des zones de risque de modification du comportement pour les poissons avec vessie natatoire sans cils sensitifs .....	135
Figure 90 : Limites médianes des zones de risque de dommage physiologique temporaire pour les poissons avec vessie natatoire sans cils sensitifs .....	136
Figure 91 : Limites médianes des empreintes sonores pour les poissons avec vessie natatoire avec cils sensitifs .....	138
Figure 92 : Surface des empreintes sonores pour les poissons avec vessie natatoire avec cils sensitifs .....	138
Figure 93 : Cartographie des zones de perception des bruits du projet pour les poissons avec vessie natatoire avec cils sensitifs .....	139
Figure 94 : Limites médianes des zones de risque de dommage physiologique temporaire pour les poissons avec vessie natatoire avec cils sensitifs .....	140
Figure 95 : Limites médianes des empreintes sonores pour les tortues marines .....	142
Figure 96 : Surface des empreintes sonores pour les tortues marines .....	143
Figure 97 : Cartographie des zones de perception des bruits du projet pour les tortues marines .....	144
Figure 98 : Limites médianes des zones de risque de modification du comportement pour les tortues marines .....	145
Figure 99 : Surface des zones de risque de modification du comportement pour les tortues marines .....	145
Figure 100 : Limites médianes des zones de risque de dommage physiologique direct pour les tortues marines .....	146
Figure 101 : Comparaison de la cartographie des risques sonores pour les percentiles 5 et 50% lors d'un même battage de pieu d'une fondation jacket .....	150
Figure 102 : Cartographie des risques en fonction du point de départ d'un cétacé moyenne fréquence en phase de fuite à la vitesse de 20km/h lors d'une séquence de battage de pieu ...	152
Figure 103 : Cartographie des risques en fonction du point de départ d'un pinnipède en phase de fuite à la vitesse de 20km/h lors d'une séquence de battage de pieu .....	153
Figure 104 : Variation du niveau d'exposition sonore maximum par coup à un mètre du pieu en fonction de son diamètre .....	160
Figure 105 : Modèle de niveau d'exposition sonore à un mètre du pieu de diamètre 7m, pour un coup unique, en fonction de la fréquence. ....	160
Figure 106 : Gabarit de source sonore (en dB ref. 1µPa/√Hz @1m) localisée près du fond permettant de modéliser le bruit généré par l'outil tracté d'ensouillage des câbles (d'après (Talisman Energy (UK) Limited 2004), et (Wilson, Carter et Elliott 2009) .....	161
Figure 107 : Gabarit de source sonore (en dB ref. 1µPa/√Hz @1m) localisée près du fond permettant de modéliser le bruit généré par l'opération de dragage. ....	162
Figure 108 : Emplacements des différents projets en mer en Manche orientale objet de l'étude des effets sonores cumulés. ....	163
Figure 109 : Empreinte sonore cumulée d'un atelier de battage de pieu de fondation éolienne avec les ateliers des autres projets .....	164

Figure 110 : Limites médianes des empreintes sonores « large bande » pour les différents scénarios de construction. ....	174
Figure 111 : Surfaces d'influence du projet (empreintes sonores large bande) pour les différents scénarios de construction .....	174
Figure 112 : Graduation des risques biologiques en fonction de l'éloignement à la ou les sources de bruit anthropique .....	178
Figure 113: Limites de perception des bruits des ateliers de construction par les cétacés et les phoques en hiver .....	180
Figure 114: Surfaces de perception des bruits des ateliers de construction par les cétacés et les phoques en hiver .....	181
Figure 115 : Zones de risques de modification du comportement lié aux bruits des ateliers de construction pour les marsouins communs en hiver .....	183
Figure 116: Limite des empreintes sonores perçues par les poissons .....	186
Figure 117: Surface des empreintes sonores perçues par les poissons .....	187
Figure 118: Distances de risque de modification du comportement des opérations de travaux. ...	189
Figure 119 : Panel de solutions de mitigation des risques sonores.....	193
Figure 120 : Martyrs de différents matériaux utilisés lors d'opérations de battage de pieux. ....	195
Figure 121 : Rideau de bulles mis en place en mer du Nord autour d'une plateforme de battage. ....	197
Figure 122: Système IHC-NMS. (a) Réseaux de buses du système déployé (b) Schéma du principe de fonctionnement .....	198
Figure 123: Batardeau de la société Lo-Noise en essai à Aarhus Bight).....	199
Figure 124: Illustration de la technologie Reinhall™ pile .....	200
Figure 125: (a) Mousse à l'intérieur du pieu TNAP ; (b) pieu TNAP à double paroi. ....	201
Figure 126: Système BEKA de la société allemande Weyres-Offshore. (a) Réseaux de buses du système déployé ; (b) ; bloc isolant ouvert (c) Système déployé (second plan) et replié (premier plan). (d) Vue en coupe. ....	202
Figure 127 : Exemples de configurations possibles du système HSD.....	203
Figure 128: Vue du système AdBm .....	204
Figure 129 : Efficacité mesurée in situ de différentes techniques d'entrave à la propagation du bruit (atténuation du niveau SEL en tiers d'octave mesurée à la distance de 750m. ....	205
Figure 130 : Comparaison théorique quant aux effets sonores cumulés d'un départ progressif des travaux durant la 1 <sup>ère</sup> heure du chantier: sans départ progressif (bleu), augmentation progressive de la cadence (en vert) et augmentation progressive de la cadence et de l'énergie des coups (en rouge).....	207
Figure 131 : Réduction sonore en fonction de la fréquence.....	210
Figure 132 : Synthèse des étendues de l'empreinte sonore en fonction de la technique et de l'espèce .....	211
Figure 133 : Synthèse des étendues de modification du comportement en fonction de la technique et de l'espèce .....	212
Figure 134 : Synthèse des étendues des dommages physiologiques temporaires en fonction de la technique et de l'espèce.....	213
Figure 135 : Synthèse des étendues des dommages physiologiques permanents en fonction de la technique et de l'espèce.....	214
Figure 136 : Graduation des risques biologiques en fonction de l'éloignement à la ou les sources de bruit anthropique. ....	236

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Coordonnées géographiques de l'aire d'étude immédiate .....	6
Tableau 2: Effet des conditions physiques du milieu océanique sur la propagation acoustique et sur la génération de bruits propres contribuant à la résultante du bruit ambiant. ....	14
Tableau 3 : Coordonnées et dates de mise à l'eau des instruments d'acoustique passive .....	28
Tableau 4: Synthèse des seuils de perturbation sonore pour les mammifères marins et poissons. 38	
Tableau 5 : Caractéristiques du jeu de données acoustiques collecté dans la période juin à septembre 2015. ....	45
Tableau 6 : Caractéristiques du jeu de données acoustiques collecté dans la période septembre à décembre 2015.....	45
Tableau 7 : Caractéristiques du jeu de données acoustiques collecté dans la période janvier à avril 2016 .....	45
Tableau 8 : Caractéristiques du jeu de données acoustiques collecté dans la période avril à juin 2016 .....	46
Tableau 9 : Niveau sonore reçu dans la bande de fréquence (50Hz-40kHz) par l'enregistreur R3, dans la bande de fréquence (50Hz-160kHz) par les enregistreurs R2 et R5 durant la période juin 2015 à juin 2016. ....	50
Tableau 10: Niveau sonore (dB réf. 1 $\mu$ Pa <sup>2</sup> ) en fonction du point de mesure et de leur occurrence (quantile).....	51
Tableau 11 : Erreur moyenne résiduelle sur l'estimation des bruits anthropiques statistiques après calibration en fonction de la fréquence. ....	59
Tableau 12 : Caractéristiques géo-acoustiques du fond dans l'aire d'étude immédiate, obtenues après inversion des données de calibration active du système Pulse©. ....	59
Tableau 13 : Synthèse statistique des niveaux sonores prédits dans l'aire d'étude immédiate (niveau large bande en dB ref 1 $\mu$ Pa <sup>2</sup> entre 45Hz et 89kHz).....	60
Tableau 14 : Synoptique des ateliers constituant les scénarios du projet. ....	74
Tableau 15 : Niveaux de bruit large bande estimés à la distance de référence de 750m de leur origine. ....	84
Tableau 16 : Fréquentation des espèces dans l'aire d'étude éloignée.....	89
Tableau 17 : Synthèse des enjeux concernant les tortues marines .....	141
Tableau 18 : Comparaison des distances médianes (en mile nautique) en fonction du quantile sélectionné lors du battage de pieu de diamètre 2,2m .....	149
Tableau 19: Synthèse des surfaces d'émergence des bruits cumulés du battage de fondation d'éolienne avec le battage de monopieu au centre du parc du Calvados. ....	165
Tableau 20: Synthèse des surfaces d'émergence des bruits cumulés du battage de fondation d'éolienne avec l'ensouillage du câble de raccordement.....	165
Tableau 21: Synthèse des surfaces d'émergence des bruits cumulés du battage de fondation d'éolienne avec le désensablement de la plage au sud de Penly. ....	165
Tableau 22 : Synthèse des niveaux sonores statistiques prédits dans l'aire d'étude immédiate (niveau large bande entre 45Hz et 89kHz) .....	170
Tableau 23 : Niveaux de bruit large bande estimés au point source et à une distance de référence de 750m de leur origine. ....	173
Tableau 24 : Niveaux de bruit large bande estimés au point source et à une distance de référence de 750m de leur origine. ....	176
Tableau 25: Synthèse des seuils de perturbation sonore pour les mammifères marins et poissons susceptibles d'être présents dans l'aire d'étude large. ....	178

Tableau 26: Récapitulatif des différentes technologies avec leur gain en réduction respectif et leur état de développement. ....	205
Tableau 27 : Exemple de protocole de départ progressif : augmentation de la cadence seule (en haut) et augmentation progressive de la cadence et de l'énergie des coups (en bas). Source : Quiet-Oceans.....	207
Tableau 28 : Synthèse de la mise en œuvre des ateliers.....	218
Tableau 29: Synthèse des seuils de perturbation sonore pour les mammifères marins selon les deux référentiels (Southall 2007) et (NOAA 2016).....	238
Tableau 30 : Fonctions de pondération pour les différentes espèces en fonction du référentiel....	239
Tableau 31 : Surfaces et limites des zones de risque pour les cétacés hautes fréquences à partir du consensus NOAA2016 .....	241
Tableau 32 : Surfaces et limites des zones de risque pour les cétacés hautes fréquences à partir du consensus Southall 2007 & Lucke2009.....	241
Tableau 33 : Surfaces et limites des zones de risque pour les cétacés moyennes fréquences à partir du consensus NOAA2016.....	242
Tableau 34 : Surfaces et limites des zones de risque pour les cétacés moyennes fréquences à partir du consensus Southall 2007 .....	242
Tableau 35 : Surfaces et limites des zones de risque pour les cétacés basses fréquences à partir du consensus NOAA2016 .....	243
Tableau 36 : Surfaces et limites des zones de risque pour les cétacés basses fréquences à partir du consensus Southall 2007.....	243
Tableau 37 : Surfaces et limites des zones de risque pour les pinnipèdes à partir du consensus NOAA2016 .....	244
Tableau 38 : Surfaces et limites des zones de risque pour les pinnipèdes à partir du consensus Southall 2007 .....	244

# Lexique

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 leur identification 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 milles nautiques des côtes en fonction des conditions climatiques.

## Atelier

Technique(s) de construction ou d'exploitation mise en œuvre (exemple : battage, dragage, forage, ...).

## 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 naturels (ou géophonie), les bruits biologiques (ou biophonie) et les bruits d'origine humaine (anthropophonie).

## 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  $\mu$ Pa (micro Pascal).

## 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 $\mu$ Pa<sup>2</sup>.

## 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.

## 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 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 liée 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.

## Modèle Numérique de Terrain (MNT)

Un modèle numérique de terrain est une extrapolation des points de mesures de la bathymétrie par l'intermédiaire de modèles. Il représente la hauteur d'eau, référencé selon les normes internationales de l'Organisation Hydrographique Internationale sur un maillage spatial régulier.

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

## 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 d'octave est une fraction d'octave. La norme américaine American National Standards Institute (ANSI S1.11. 2004) définit les fréquences centrales et les caractéristiques des filtres servant à les distinguer.

## 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 50<sup>ième</sup> 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.

### **Potentiels Evoqués Auditifs (PEA)**

Technique couramment utilisés en clinique pour tester la voie auditive jusqu'au colliculus inférieur. Elle consiste à enregistrer les potentiels évoqués du nerf auditif et du tronc cérébral et ceux des structures auditives supérieures thalamo-corticales (potentiels tardifs).

### **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 (voir définition plus bas), ou en valeur maximale. Elle s'exprime en dB réf.  $1\mu\text{Pa}$  @1m.

### **Pression acoustique reçue**

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

### **Profil de célérité**

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

### **Quantile**

Voir percentile.

### **Raie spectrale**

Une raie spectrale est une fréquence (ou une petite bande de fréquence) à laquelle l'énergie est significativement plus intense que le niveau moyen aux fréquences avoisinantes.

### **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.

### **Stochastique**

Le mot stochastique est synonyme d'aléatoire, en référence au hasard et s'oppose par définition au déterminisme.

### **Thermocline**

La thermocline est la zone de transition thermique rapide entre les eaux superficielles (généralement plus chaudes et oxygénées) et les eaux profondes (généralement plus froides et plus pauvre en oxygène et parfois plus salées).

### **Valeur efficace**

La valeur efficace ou RMS (Root Mean Square en anglais) correspond à la racine carrée de la moyenne des carrés du signal sur une période de temps fixée.



# 1 Contexte et objectif de l'étude





Le projet de parc éolien en mer au large de Dieppe Le Tréport, porté par la société Éoliennes en mer Dieppe – Le Tréport consiste en l'installation et l'exploitation de 62 éoliennes fixées sur le fond marin. Les émissions sonores de ce projet interfèrent avec le milieu marin, entre autres du point de vue de ses émissions sonores sur les espèces de mammifères marins, tortues marines et poissons.

## 1.1 Contexte scientifique

Il n'existe pas d'endroit sans bruit dans l'océan cependant ce bruit est de nature bien différente selon les endroits, les saisons, les conditions climatiques, le jour, la nuit, etc. Ainsi, le bruit sous-marin constitue une composante physique à évaluer dans son contexte géographique et dont les modifications peuvent potentiellement avoir des conséquences sur l'écosystème et certains organismes marins sensibles à la pression.

Depuis les années 1970, la communauté scientifique fait part de ses inquiétudes, quant aux effets préjudiciables potentiels du bruit anthropique sur la vie marine et la recherche dans ce domaine s'est développée dans les années 1980 (Payne & Webb, 1971), (Richardson, Fraker, Wuersig, & Wells, 1985). Ainsi, au cours des dix dernières années un certain nombre d'institutions scientifiques, d'agences gouvernementales et d'organes intergouvernementaux ont étudié ce domaine, en produisant des revues et articles significatifs quant aux effets des sons sur les mammifères marins<sup>1</sup>. Ces études documentent aussi bien la présence que l'absence d'effets physiologiques et de réactions comportementales aux divers signaux acoustiques sur les mammifères marins, les poissons et un certain nombre d'espèces d'invertébrés. Des discussions se sont ouvertes parmi les scientifiques, les différentes parties prenantes et les décideurs politiques sur la manière de traiter les impacts potentiels des bruits sous-marins et ainsi développer des mesures de mitigation significatives dans l'objectif de futures réglementations (Thomsen, et al., 2015).

## 1.2 Aspect réglementaire

Les travaux de recherche des dernières décennies ont clairement démontré que les mammifères marins, mais aussi que de nombreux poissons et invertébrés, sont sensibles à la pression acoustique et répondent au mouvement des particules généré par la pression acoustique, pouvant causer différents degrés de perturbation de la vie sous-marine (Sable & Karlsen (2000) ; Ona et al. (2007) ; Sable et al (2008); Anon (2008); Sigray et Andersson (2011)).

Cette inquiétude gagne aujourd'hui la société civile (International Fund for Animal Welfare, 2008), l'industrie (International Maritime Organisation, 2009) et les instances politiques (Marine Mammal Commission, 2007), (European Parliament, 2004) et s'étend à toutes les espèces animales sous-marines. Une réglementation nationale et internationale à ce sujet se met progressivement en place. En Europe, à ce jour, elle se présente sous la forme de deux directives, la Directive Cadre sur l'Eau (Parlement Européen, 2000) et la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (Commission Européenne, 2010). Plus spécifiquement, en France, la loi Grenelle II (Loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 du code l'environnement) traite des incidences sur la biodiversité et plus spécifiquement les sources sonores sous-marines d'origine anthropique. Celles-ci sont considérées comme pollution « si elles entraînent ou sont susceptibles d'entraîner

<sup>1</sup> (Richardson, Malme, Green, & Thomson, 1995), (Würsig & Richardson, 2002), (Popper & McCauley, 2004), (Hastings & Popper, 2005), (Hildebrand J. A., 2005), (National Research Council, 2003) (National Research Council, 2005), (Wahlberg & Westerberg, 2005); (Thomsen, Lüdemann, Kafemann, & Piper, 2006) (Madsen, Wahlberg, Tougaard, Lucke, & Tyack, 2006); (Southall, et al., 2007) (Nowacek, Thorne, Johnston, & Tyack, 2007)

des effets nuisibles pour les ressources vivantes et les écosystèmes marins, et notamment un appauvrissement de la biodiversité, des risques pour la santé humaine, des obstacles pour les activités maritimes, et notamment la pêche, le tourisme et les loisirs ainsi que les autres utilisations de la mer, une altération de la qualité des eaux du point de vue de leur utilisation, et une réduction de la valeur d'agrément du milieu marin ». Cette problématique est susceptible de constituer un risque projet croissant et est donc à considérer de façon attentive.

Ce risque s'est confirmé très récemment par la publication, dans sa version consolidée du 8 septembre 2011 et rectifiée du 20 août 2011, du décret NOR: DEVL1110724A (Ministère de l'Ecologie, 2011) portant sur l'interdiction de destruction, de mutilation et de perturbation intentionnelle des mammifères marins protégés et de l'interdiction de destruction, altération ou dégradation des lieux de reproduction et de repos de ces espèces dans l'ensemble de la mer territoriale et de la zone économique exclusive (ZEE).

Les paragraphes 1 et 2 de l'Article 6 de la Directive européenne Habitats 92/43/CEE stipulent que l'état de tous les sites Natura 2000 doit être conservé ou amélioré, conformément aux besoins des espèces y vivant. De plus, toutes activités détériorant l'habitat et perturbant les espèces concernées doivent être évitées. C'est pourquoi tout projet susceptible d'affecter un habitat ou ses espèces doit faire l'objet d'une évaluation appropriée (Article 6, paragraphe 3) pour garantir l'absence d'effet néfaste sur le site.

Actuellement, des valeurs réglementaires concernant les niveaux sonores à ne pas dépasser pour les activités de battage de pieux, ont déjà été adoptées par quelques pays européens dont la France ne fait pas partie.

Parmi ces pays, la norme allemande stipule que le niveau d'exposition sonore ne doit pas dépasser 160 dB réf.  $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$  à 750m de l'atelier générateur de bruit et un niveau de pression sonore crête à crête de 190dB réf.  $1\mu\text{Pa}$  à 750m. La distance de 750 m semble avoir été définie pour des raisons pratiques, permettant un contrôle des niveaux acoustiques bien à l'écart des sites d'implantation.

Les normes belges préconisent, quant à elles, de ne pas dépasser un niveau de pression sonore crête à crête de 185 dB réf.  $1\mu\text{Pa}$ . Le seuil d'exposition sonore médian est défini de manière à éviter les niveaux acoustiques qui pourraient entraîner une perte temporaire d'audition. Dans ces pays, si les émissions de bruits dues au battage dépassent ces limites, des mesures de réduction doivent être mises en place.

D'autres pays, tel que le Royaume-Uni, ont décidé de ne pas fixer de seuils réglementaires pour le déploiement obligatoire de mesures de réduction à la source et préfèrent utiliser des répulsifs et un suivi de la zone afin de prévenir les espèces protégées de toutes blessures.

### 1.3 Objectifs de cette étude

Les objectifs de cette étude visent, conformément aux réglementations en vigueur, à caractériser les impacts sonores potentiels du projet de parc éolien en mer de Dieppe - Le Tréport pendant les phases de construction, d'exploitation et de démantèlement en s'appuyant sur :

- ▶ la réalisation de mesures *in situ* (acoustique passive et active) permettant de calibrer le modèle numérique de bruit Quonops®, et d'assurer une bonne représentativité des états sonores initiaux et lors de l'installation puis de l'exploitation du parc éolien;
- ▶ la réalisation de simulations numériques permettant la caractérisation de l'état acoustique de référence nécessaire pour évaluer l'émergence du projet au-dessus des conditions sonores initiales ;

- ▶ la réalisation de simulations numériques permettant la caractérisation de l'état acoustique perturbé nécessaire pour évaluer l'émergence du projet au-dessus des conditions sonores initiales selon le type de fondation défini par le maître d'ouvrage, en condition de construction, d'exploitation et de démantèlement ;
- ▶ la réalisation de simulations d'effets cumulés avec d'autres projets, notamment l'étude des travaux de raccordement électrique du parc éolien à terre sous la maîtrise d'ouvrage du gestionnaire du réseau de transport d'électricité (RTE) ;
- ▶ fournir des éléments quantitatifs et qualitatifs servant l'évaluation des impacts au regard de la sensibilité des espèces concernées tout au long du cycle de vie du projet et de proposer des mesures de gestion appropriées en fonction du niveau de risque estimé.

Les mesures d'acoustique passive effectuées in situ dans le cadre de cette étude permettent également la caractérisation de la fréquentation du site par les mammifères marins qui font l'objet d'une autre étude spécifique (Chompret, Roussel, & Clorennec, 2016).

## 1.4 Aires d'études

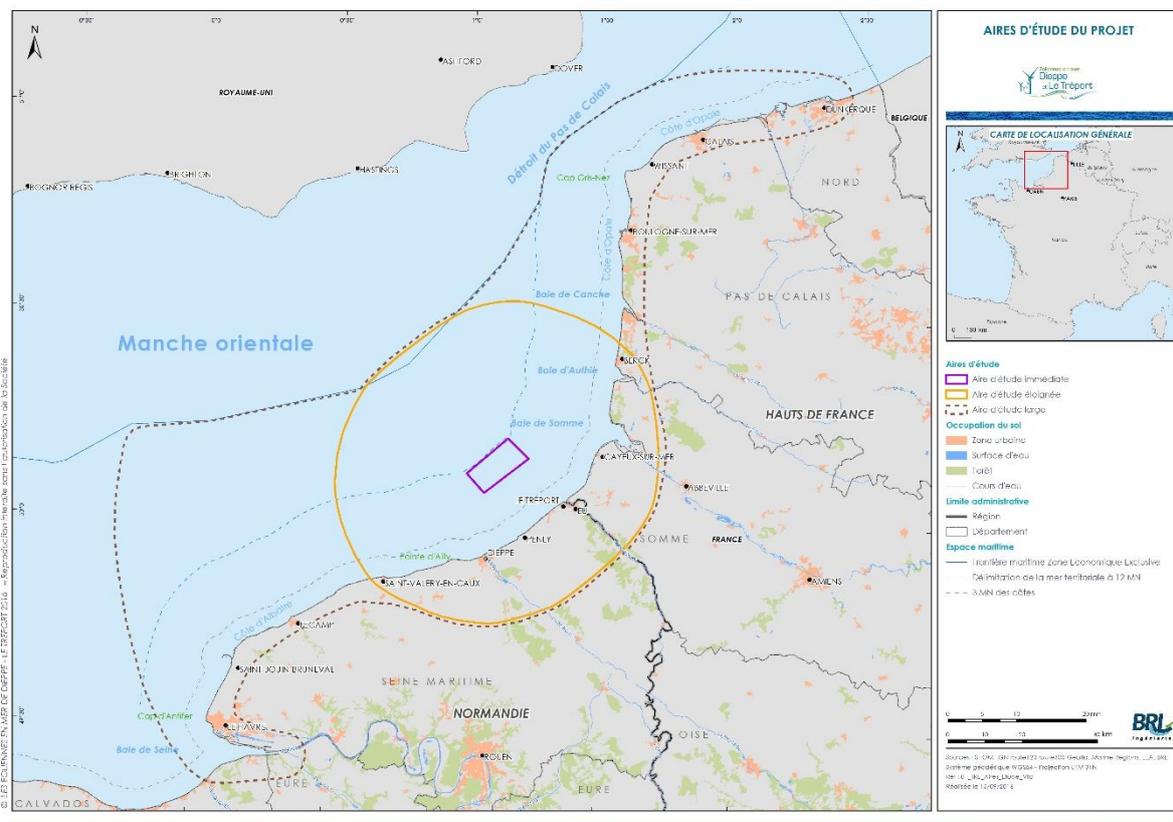
Trois périmètres ont été retenus (Figure 1) :

- ▶ L'**aire d'étude immédiate** (AEI) qui correspond à la zone propice définie dans le cadre du cahier des charges de l'appel d'offres. Elle comprend les éoliennes, le poste électrique en mer, ainsi que le réseau électrique de raccordement interne (les câbles inter-éoliennes et les câbles de raccordement des éoliennes au poste électrique en mer) et le mât de mesures en mer. Sa surface est de 110 km<sup>2</sup> et est délimitée par le rectangle violet (Figure 1). Les coordonnées géographiques des quatre extrémités sont précisées dans le Tableau 1.
- ▶ L'**aire d'étude éloignée** (AEE), qui tient principalement compte de l'influence du parc au niveau paysager et comprend ainsi l'aire de visibilité potentielle (intégration des notions de distance du projet, de rotondité de la Terre, d'angle de perception) telle que définie par la formule de l'ADEME (35 km de rayon pour le présent projet). Elle conduit à délimiter un vaste ensemble qui regroupe tous les sites et promontoires à partir desquels la visibilité est réelle. Cette aire d'étude a été ajustée afin de prendre en compte certaines spécificités de milieu (migration au large de l'avifaune, présence de mammifères marins, sensibilité paysagère majeure des stations touristiques littorales entre Berck et Saint-Valéry-en-Caux). La surface de cette aire est de 5 813 km<sup>2</sup>.
- ▶ L'**aire d'étude large** (AEL) qui se situe au-delà de l'aire d'étude éloignée, à l'échelle de la façade/Sous-Région Marine. La prise en compte des activités de pêche professionnelle et le trafic maritime ont permis de définir cette aire qui intègre à minima les principaux ports et échanges maritimes entre Le Havre et Dunkerque. Au niveau écologique, la richesse avifaunistique du littoral et du rétro-littoral a été prise en compte.

Ainsi, le périmètre englobe à terre et à minima la première commune littorale. En mer, elle prend en compte l'existence du Dispositif de Séparation du Trafic (DST) en s'étendant jusqu'à la limite de la Zone Economique Exclusive (ZEE) française. Sa surface est de 13 670 km<sup>2</sup>.

Etant donné les grandes distances de propagation des ondes sonores sous-marines, l'étude acoustique est menée à l'échelle de la Manche orientale c'est à dire à l'échelle de l'aire d'étude large.

Figure 1 : Localisation des aires d'études retenues pour l'étude d'impact



Source: BRLi

Tableau 1: Coordonnées géographiques de l'aire d'étude immédiate

Points	Longitude	Latitude
<b>A</b>	1° 00 ,43' E	50° 07 ,72' N
<b>B</b>	1° 09 ,58' E	50° 12 ,96' N
<b>C</b>	1° 47 ,28' E	50° 10 ,06' N
<b>D</b>	1° 04 ,42' E	50° 04 ,93' N

Source : EMDT

## 2 Le bruit sous-marin





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.

## 2.1 La problématique du bruit sous-marin

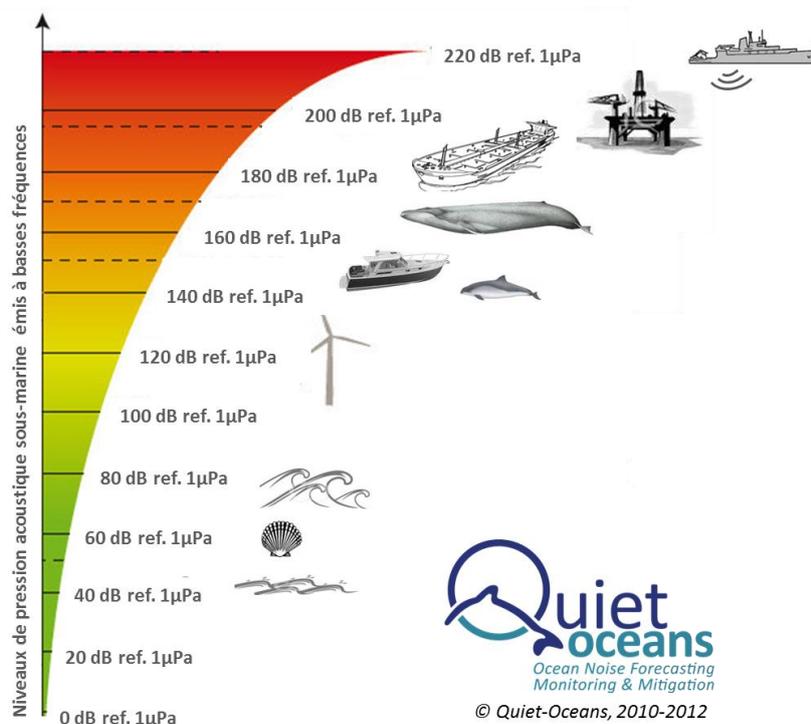
Le monde sous-marin est tout sauf silencieux et est composé d'un chorus sonore regroupant trois familles de bruits: les bruits naturels (vagues, craquements sismiques...), les bruits biologiques (mammifères marins et autre biodiversité marine), et les bruits anthropiques (activités humaines, trafic maritime...).

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

Les niveaux de bruit sous-marins ne sont pas à comparer avec les niveaux de bruit aériens. 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 2 donne, à titre illustratif, une échelle de niveaux sonores émis typiques, soit par les activités humaines, soit par la faune marine, soit par les conditions environnementales.

Figure 2 : Echelle qualitative des niveaux de bruits sous-marins émis à un mètre dans une bande basse fréquence de quelques kHz.



Source : Quiet-Oceans, 2010-2012

## 2.2 Qu'est-ce que le chorus sonore sous-marin

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

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

Tous ces bruits interagissent les uns avec les autres, se dominant les uns par rapport aux autres pour former le contexte sonore d'une aire d'étude (Figure 3). La Figure 4 synthétise les niveaux sonores typiques en dB ref  $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$  en fonction de leur origine (anthropique, environnementale ou biologique) et en fonction de la gamme de fréquence (Dosits.org, 216). L'ensemble des sources sonores contribue au bruit ambiant avec une prédominance très variable en fonction de la fréquence, des conditions environnementales, des activités humaines et du contexte local.

Figure 3 : Composition du chorus sonore sous-marin.

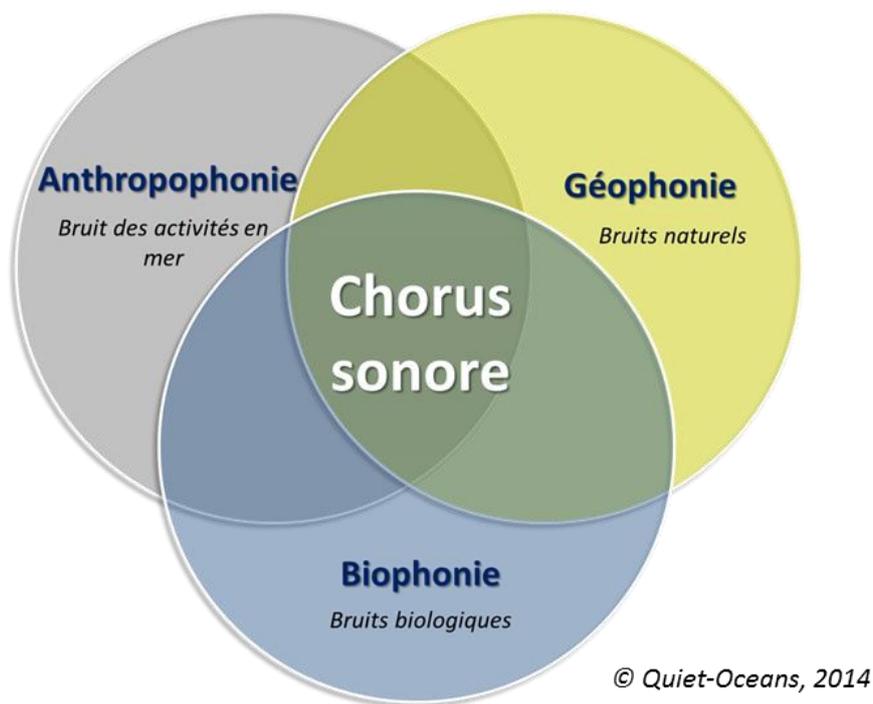
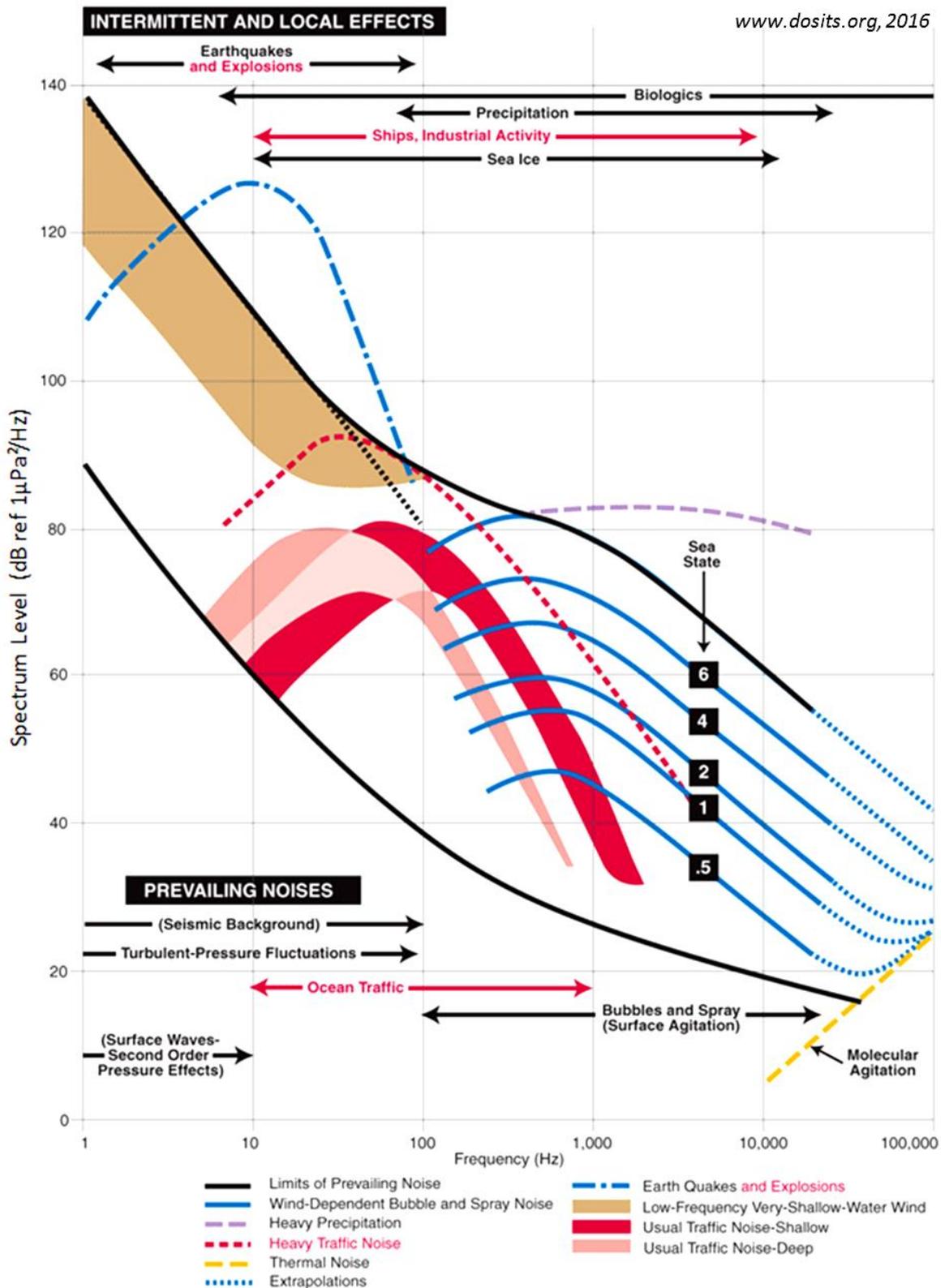


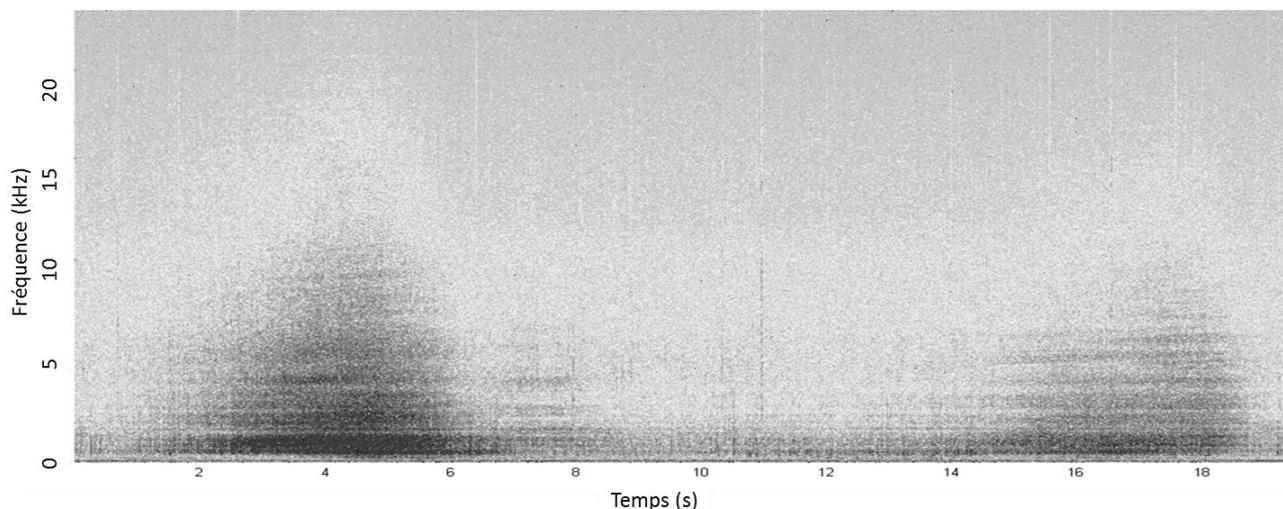
Figure 4 : Synthèse des niveaux de bruit typiques en fonction de la fréquence et de la nature de la source de bruit. Ces valeurs peuvent être très dépendantes du site, de la saison, et du contexte.



## 2.2.1 La géophonie

Les bruits naturels peuvent être de nature diverse : bruits sismiques dans les très basses fréquences (inférieures à quelques dizaines de Hz), les bruits des précipitations, les bruits du transport sédimentaire, les bruits de mer générés par les vagues et le vent, etc. A titre d'illustration, la Figure 5 illustre un spectrogramme associé à un déplacement de sédiment perçu à proximité d'un hydrophone. Ce déplacement de sédiment peut être induit par le courant et/ou par la houle. La signature acoustique se situe dans la bande de fréquence de 0 à 10kHz sur des périodes de quelques secondes à des niveaux très variables en fonction de la nature du sédiment (Figure 5).

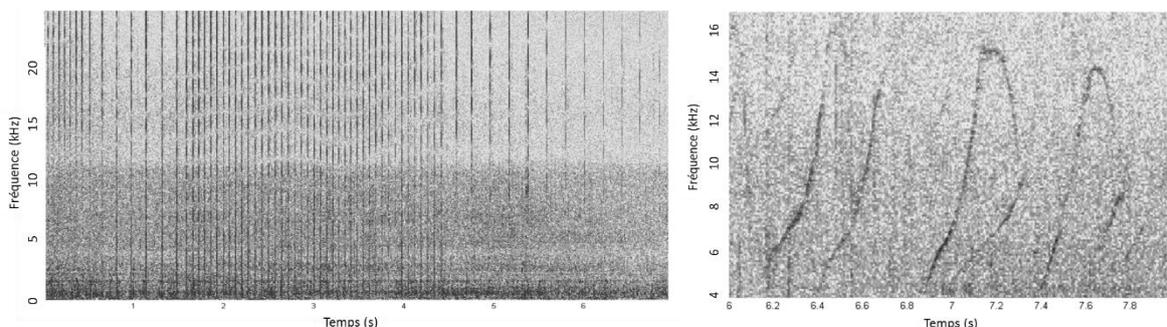
Figure 5 : Spectrogramme illustratif d'un déplacement de sédiment



## 2.2.2 La biophonie

La biophonie correspond aux bruits biologiques engendrés par les organismes vivants sous-marins. Ces bruits sont générés par les mammifères marins, poissons, crustacés, mollusques, etc. Les signaux sonores émis par ces organismes vivants peuvent être impulsions (clics, claquements, ...) ou transitoires (sifflements de cétacés par exemple). Les gammes de fréquences et les niveaux sont très variables et largement dépendants des espèces et du contexte (Figure 6).

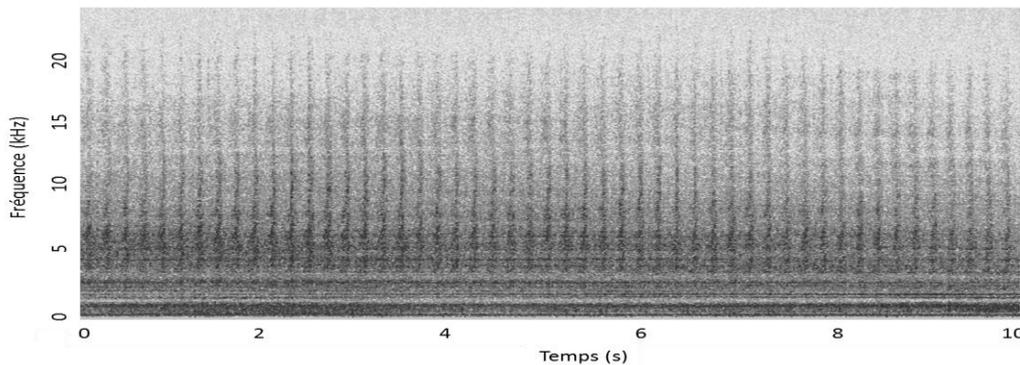
Figure 6 : Spectrogrammes de clics (gauche) et de sifflements (droite) émis par des delphinidés



### 2.2.3 L'anthropophonie

Les bruits dits anthropiques sont générés par les activités humaines en mer telles que le bruit des navires constitutifs du trafic maritime (Figure 7), des embarcations de loisir en mer, les travaux maritimes, les activités de prospections, etc. Ces bruits peuvent être masqués par les bruits naturels ou biologiques, ou au contraire, dominer le chœur sonore (Figure 3, Figure 4).

Figure 7: Spectrogramme de la signature acoustique de l'hélice d'un navire.



## 2.3 Description du milieu physique influençant la distribution du bruit

L'objet de ce paragraphe est de décrire les paramètres qui influencent la distribution du bruit et les données qui servent à l'élaboration des cartes de bruit par modélisation qui sont présentées aux chapitres 5 et 7.

### 2.3.1 De quoi dépend la distribution des bruits ?

La propagation du bruit et les niveaux de bruit ambiant sont principalement conditionnés par (Tableau 2):

- ▶ la bathymétrie ;
- ▶ la nature du fond ;
- ▶ les conditions océanographiques, tels que la température et la salinité, les courants, la marée ;
- ▶ les conditions météorologiques, tels que le vent (et par suite les vagues) ;
- ▶ les activités maritimes.

D'autres paramètres influent sur la propagation et sur le niveau de bruit, mais dans une moindre mesure.

Les pertes de propagation sont d'autant plus importantes que la hauteur d'eau (effet cumulé de la bathymétrie et de la marée) est faible. Cela est lié à l'interaction des ondes sonores avec les interfaces du guide d'onde océanique (surface et fond) (Jensen, et al. 2000). Cependant, plus la hauteur d'eau est faible, plus le déferlement des vagues est favorisé et la contribution du bruit des vagues au bruit ambiant est importante.

Les pertes de propagation sont d'autant plus importantes que les fonds sont meubles et de grains fins (la vase absorbe plus les ondes acoustiques que le gravier par exemple). Cependant, plus le sédiment est dense, plus son caractère réverbérant est important. En effet, les ondes sonores ayant des angles d'incidence sur le sédiment importants sont mieux réfléchies lorsque le sédiment est dense.

Le vent contribue à générer des vagues. Les vagues diffusent et absorbent les ondes acoustiques d'autant mieux par forte mer (Wenz 1962). Cependant, les vagues, par déferlement, génèrent un bruit propre qui a pour effet d'élever le niveau de bruit ambiant. Par fort état de mer, le bruit naturel des vagues augmente lorsque les autres sources de bruit se propagent moins bien.

Sous l'effet du courant et/ou des vagues par petits fonds (une dizaine de mètres), le charriage des sédiments et l'entrechoquement des particules sédimentaires génère du bruit, avec des niveaux d'autant plus importants que les sédiments sont grossiers et que leurs déplacements sont rapides.

La distribution verticale de température et de salinité stratifie la colonne d'eau. Les ondes acoustiques sont fortement sensibles à cette stratification verticale et, dans une moindre mesure, à la stratification horizontale (Guisse et Sabathié 1964). En effet, un gradient vertical négatif de température/salinité aura comme effet de réfracter les ondes vers le fond, rendant l'influence de la nature des sédiments prépondérante. Au contraire, lorsqu'aucune stratification n'est présente (milieu homogène), certains trajets acoustiques peuvent ne pas interagir avec les interfaces (surface et/ou fond) et présenter des portées plus importantes.

Les précipitations ont une influence marginale sur la propagation acoustique sous-marine, mais génèrent du bruit et contribuent à augmenter le niveau de bruit environnemental (géophonie).

La plupart des paramètres du milieu physique ont des effets croisés sur la propagation des bruits et sur leur niveau de contribution au bruit ambiant naturel. Il est donc difficile de disposer de règles de dépendances universelles, justifiant l'usage des modèles.

Il est important de noter que lorsque la propagation des bruits du projet est favorisée, la propagation des autres bruits anthropiques existant est aussi favorisée (bruit du trafic maritime, des activités de plaisance ou de pêche, par exemple), contribuant aussi à augmenter le niveau de bruit ambiant.

Tableau 2: Effet des conditions physiques du milieu océanique sur la propagation acoustique et sur la génération de bruits propres contribuant à la résultante du bruit ambiant.

	Bathymétrie	Nature du fond	Température et salinité	Variation du niveau de la mer (marée)	Courant	Vent/Vague	Précipitation
<b>Conditionne la propagation des bruits</b>	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗
<b>Génère des bruits propres</b>	✗	✓	✗	✗	✓	✓	✓

✓ Indique que l'effet existe, ✗ Indique que l'effet n'existe pas ou reste marginal.

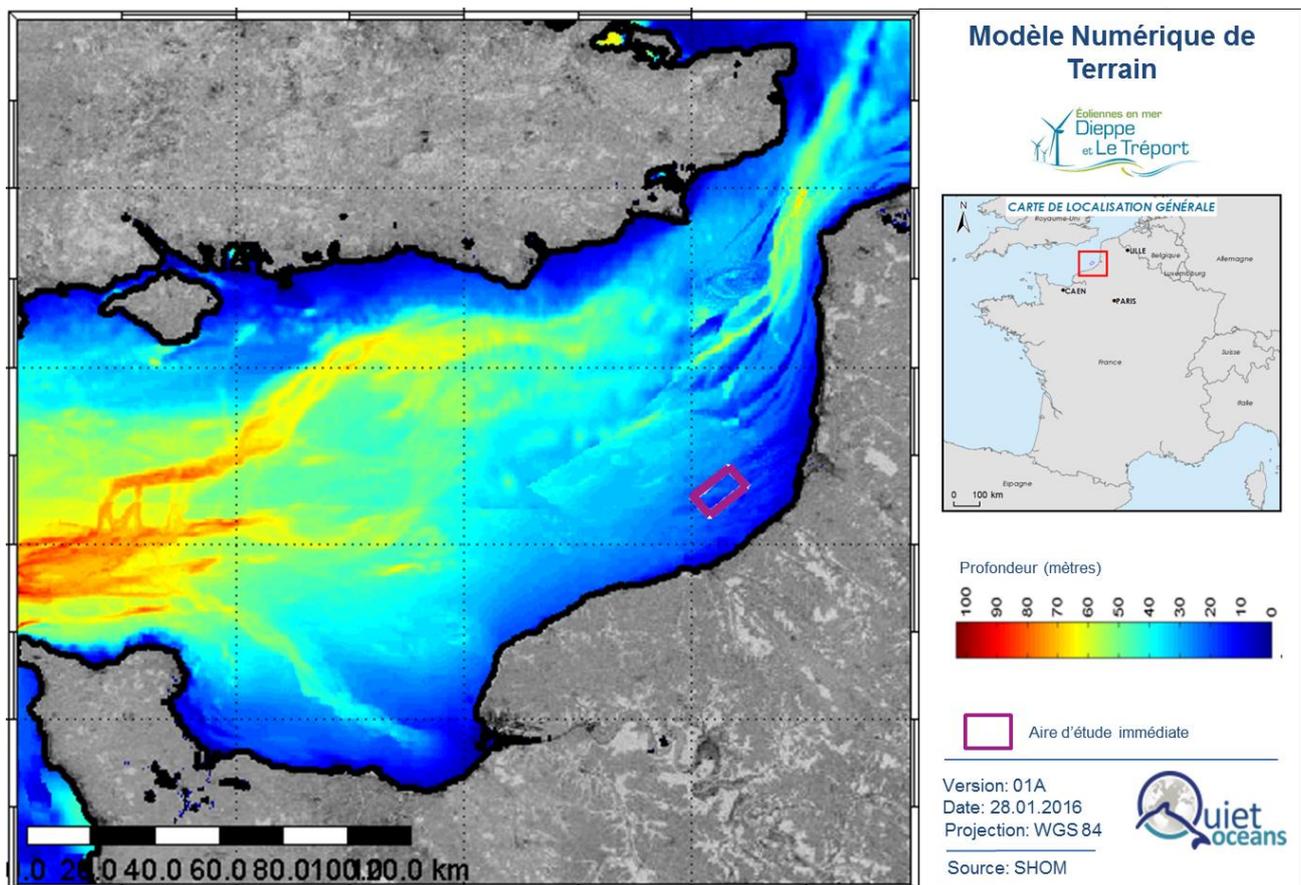
### 2.3.2 Bathymétrie

La propagation du son dans les océans est très largement dépendante de la topographie du fond des océans et de la nature des sédiments (Guisse & Sabathié, 1964). Plus la hauteur d'eau sera faible, moins la propagation du son sera favorable, et plus le fond sera dur, plus le bruit sera réverbéré par le fond. La bathymétrie de la Manche Orientale résulte de la fusion des données issues :

- du Modèle Numérique de Terrain acquis auprès du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM);
- de la donnée bathymétrique mondiale du *General Bathymetric Chart of the Oceans* (GEBCO) fonctionnant sous l'autorité conjointe de la Commission Océanographique Intergouvernementale (COI) de l'UNESCO et de l'Organisation Hydrographique Internationale (OHI).

La carte de bathymétrie résultante (Figure 8) est utilisée pour les modélisations acoustiques et l'élaboration des cartes sonores initiales.

Figure 8 : Bathymétrie autour de l'aire d'étude large



### 2.3.3 Environnement météo-océanique

L'océanographie et les conditions météorologiques conditionnent la propagation acoustique sous-marine. En effet, les variations de hauteur d'eau sous l'effet des marées, les variations d'immersion de la thermocline et les variations du vent génèrent des distributions sonores diverses en fonction de la fréquence acoustique. Toutes ces données sont directement exploitées dans le cadre de cette étude pour l'évaluation de l'état initial et des impacts. Elles sont présentées dans les paragraphes suivants à titre indicatif.

#### 2.3.3.1 Océanographie

La propagation du son dans les océans est largement dépendante des conditions océanographiques locales, en particulier, la température, la profondeur, et, dans une moindre mesure, la salinité. La combinaison de ces trois paramètres physiques permet de déterminer la vitesse du son dans l'océan. Ce sont en particulier les gradients dans le profil vertical de célérité (évolution de la vitesse du son dans la colonne d'eau, Figure 9) qui auront tendance à courber les rayons acoustiques vers la surface en hiver ou vers le fond en été).

Par ailleurs, les ondes sonores dans l'eau se propagent très rapidement (typiquement 1500m/s) et sur des distances pouvant aller de quelques kilomètres à quelques centaines de kilomètres, d'autant plus que les fréquences sont basses et que les fonds sont importants. La distribution du niveau de bruit dans la colonne d'eau est principalement fonction des sources en présence, des conditions de bathymétrie, des conditions de température et de salinité, de la nature du fond et de l'état de mer.

Les données statistiques océanographiques utilisées sont issues de la base de données climatologiques haute résolution de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA, USA) et publiées dans (Boyer, et al., 2004). Un profil de célérité par mois est considéré (Figure 9). Ces profils permettent de décrire la structure statistique de la colonne d'eau de façon représentative avec une résolution mensuelle. En hiver et en automne, la température de l'eau est plus basse en surface, la vitesse du son est alors plus faible en surface qu'en profondeur. De ce fait, les rayons acoustiques auront tendance à être orientés vers la surface. En été, principalement en juillet et août, la température de surface augmente ainsi que la célérité. Le profil de célérité oriente légèrement les ondes acoustiques vers le fond.

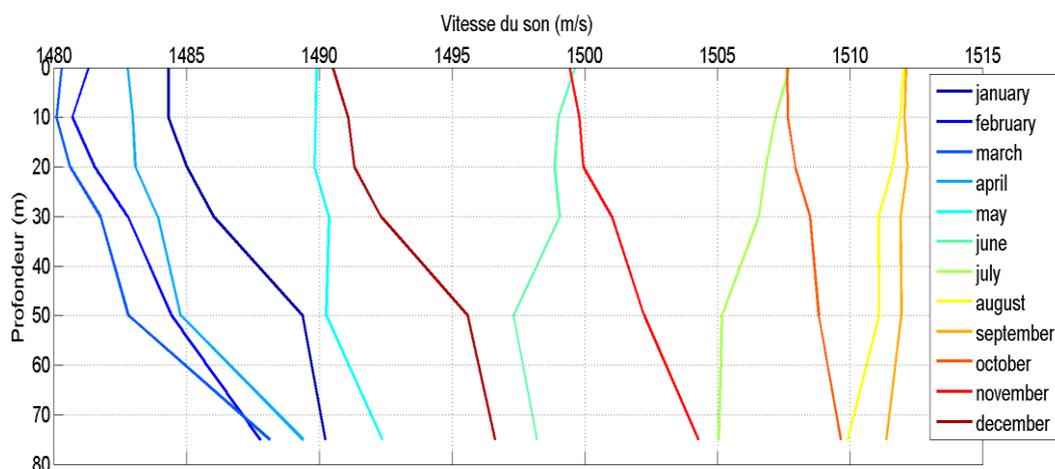


Figure 9 : Profils de célérité représentatifs de l'aire d'étude par mois.

### 2.3.3.2 Marée

Les données de marée sont fournies par le SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine). Le marnage est compris entre 0 et 10m au port du Tréport. Le caractère ondulatoire des ondes de marée impose de choisir la distribution statistique des hauteurs d'eau tel que décrit sur la Figure 10. La marée modifie la hauteur d'eau disponible à la propagation des bruits. Plus celle-ci est importante, plus la propagation des basses fréquences est favorable. Les marnages observés sont susceptibles d'introduire une variabilité très significative dans les niveaux de bruits. Ces données servent à l'élaboration des cartes statistiques de bruits obtenues par modélisation.

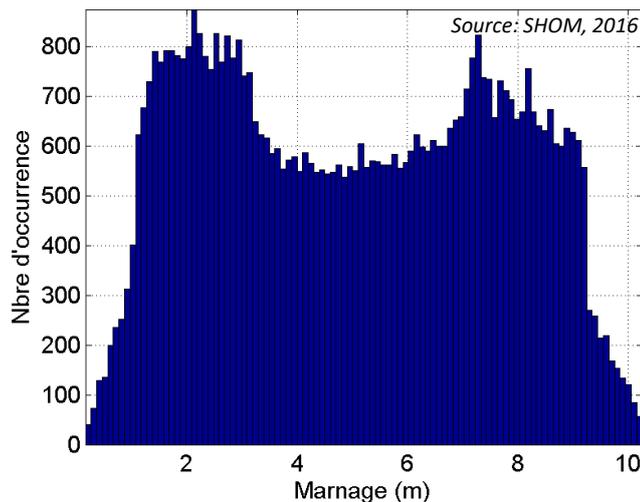


Figure 10 : Loi de distribution des hauteurs d'eau sous l'effet des marées.

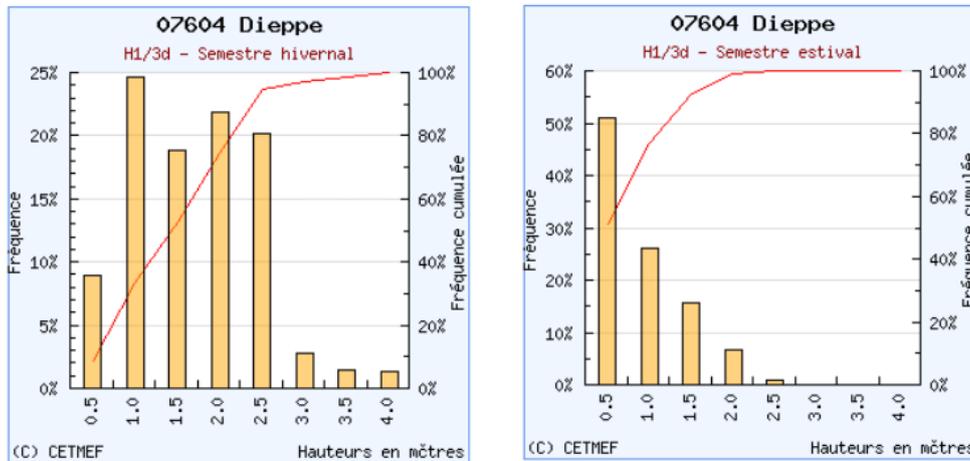
### 2.3.3.3 Vague et houle

Les états de mer sont la conséquence du vent et de son interaction avec la marée et le courant. La rugosité de la surface des océans impacte la propagation des ondes sonores par l'introduction de pertes d'énergie. L'état de mer résultant est lui-même à l'origine d'un bruit sous-marin naturel provoqué par les vagues déferlantes, mais introduit cependant des pertes sur la propagation des bruits notamment anthropiques. Le bruit sous-marin naturel dû au vent augmente de l'ordre de 6dB lorsque la vitesse du vent double.

La statistique semestrielle des hauteurs significatives de vagues à proximité de l'aire d'étude immédiate est illustrée Figure 11 et sert de base à l'étude. Cette donnée statistique est issue des mesures in situ effectuées par la bouée Candhis Dieppe 07604 (source CEREMA<sup>2</sup>). La Figure 11 donne pour chaque semestre, la statistique des hauteurs de vague. 50% du temps la hauteur de vagues est comprise entre 1.5 et 2 m en hiver et voisine de 0.5m en été. Les effets de ces fluctuations de hauteur d'eau et d'état de mer sont susceptibles de modifier significativement la distribution du bruit entre l'été et l'hiver. Ces données sont intégrées dans le modèle de prédiction acoustique Quonops®.

<sup>2</sup> Centre d'étude et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement.

Figure 11 : Distribution statistique des hauteurs significatives de vagues au voisinage de l'aire d'étude durant les saisons hivernale et estivale

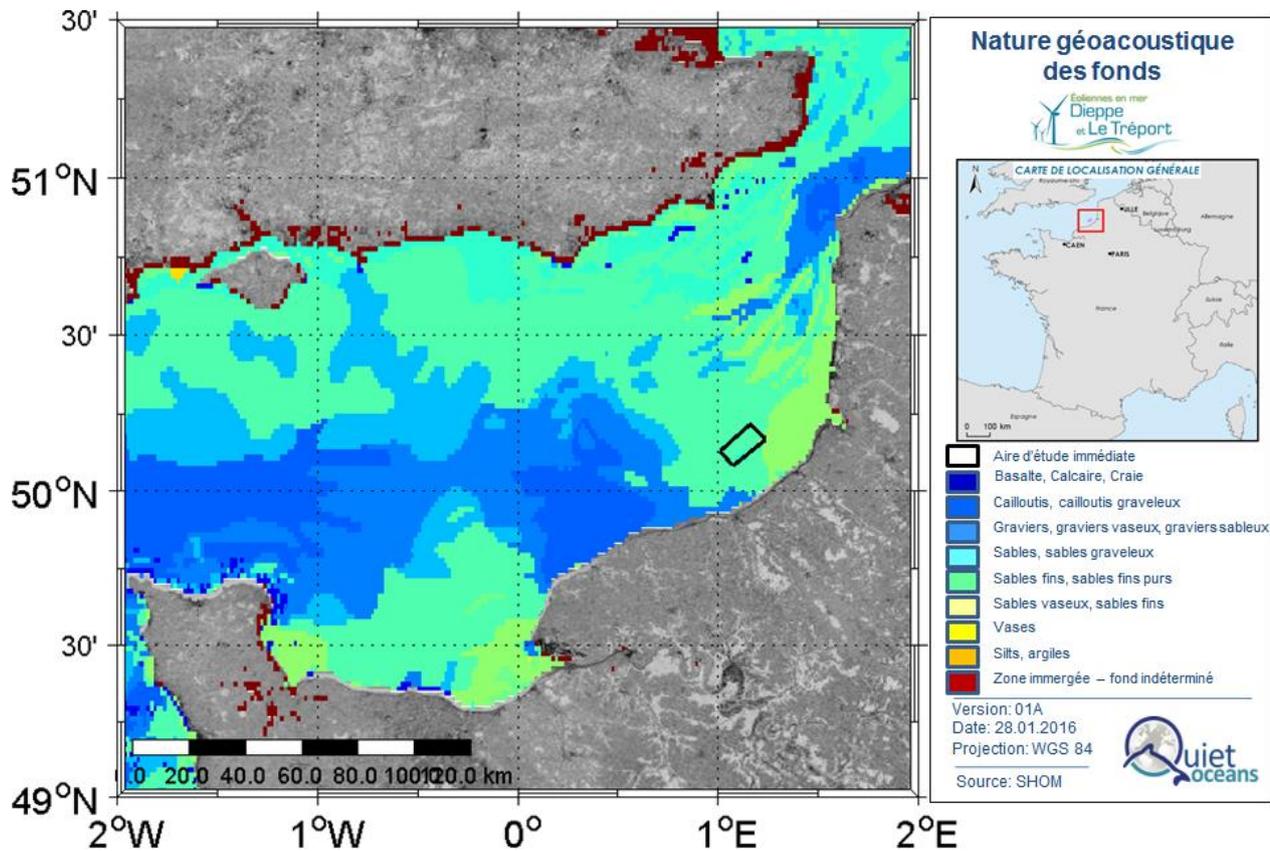


Source: CEREMA, 2016

### 2.3.3.4 Nature des fonds

Les natures des fonds sont fournies par la cartographie mondiale sédimentologique du SHOM et représentées Figure 12. A l'emplacement de l'aire d'étude immédiate, le fond est assimilable à un milieu de type sable fins, milieu ayant pour effet d'absorber l'énergie sonore localement. En dehors de l'aire d'étude immédiate, une zone à l'ouest est composée de cailloutis favorisant la propagation de sons. Dans la majorité de l'aire d'étude étendue, le fond est proche d'un fond de type sableux ou sable-graviers favorable à la propagation sonore par réverbération. Sous l'effet du courant et/ou des vagues par petits fonds (disons une dizaine de mètres), le charriage des sédiments et l'entrechoquement des particules sédimentaires génère du bruit, avec des niveaux d'autant plus importants que les sédiments sont grossiers et que leurs déplacements sont rapides. Ces données sont intégrées dans Quonops®.

Figure 12 : Cartographie de la nature des fonds



### 2.3.3.5 Précipitations

Les précipitations ont une influence marginale sur la propagation acoustique sous-marine, mais génèrent un bruit et contribuent à augmenter le niveau de bruit ambiant.



# 3 Méthodologie de l'évaluation de l'état sonore initial et des impacts





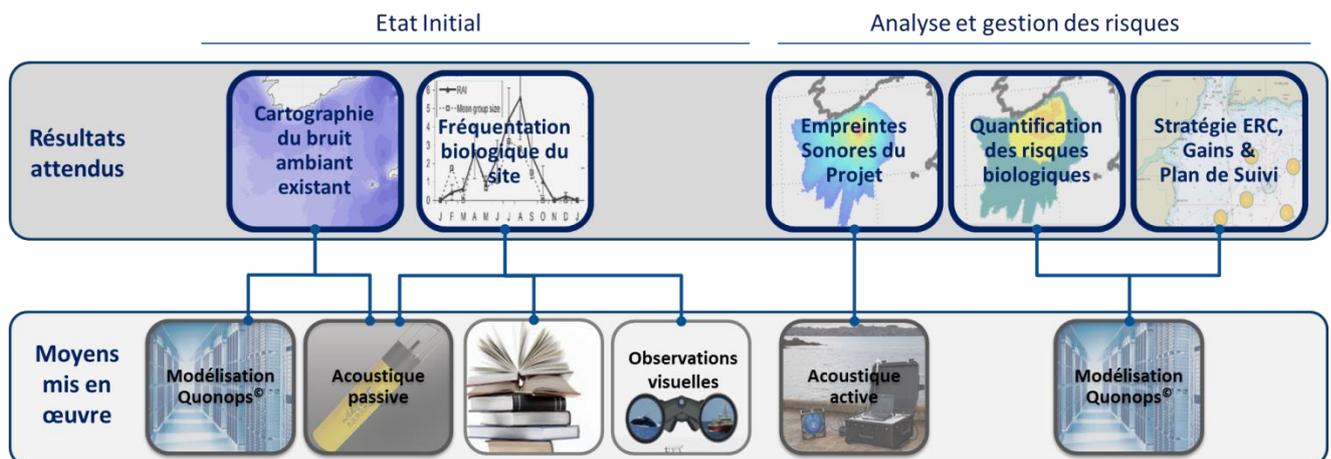
### 3.1 Description générale de la méthode

La Figure 13 décrit la méthodologie de réalisation de l'étude d'incidence acoustique sous-marine (Boyd, 2008). A partir du recueil des données initiales (biologique, activités maritimes, données socio-économiques, etc.) et des scénarios spatio-temporels descriptifs (scénario des activités maritimes déjà existantes, scénario météo-océaniques, etc.), la cartographie de l'état sonore initial et des états sonores relatifs aux différentes phases du projet permettent de déterminer l'empreinte sonore du projet (émergence par rapport au bruit existant) et d'en dériver le nombre d'espèces affectées et les niveaux de risque biologique.

Le résultat de cette évaluation est un ensemble d'informations intermédiaires bâties spécifiquement au cours de l'étude (Figure 13) que sont :

- ▶ l'état sonore initial statistique ;
- ▶ des modèles d'émission de bruit des activités maritimes et des activités du projet ;
- ▶ des modélisations de la propagation acoustique permettant de cartographier l'émergence sonore des bruits du projet ; ces modélisations prennent en compte la variabilité météo-océanique de l'aire d'étude ;
- ▶ les résultats des études de fréquentation biologiques ;
- ▶ l'estimation des empreintes sonores du projet ;
- ▶ des seuils d'effet biologique connus pour les mammifères marins, les larves, les poissons et les tortues marines ;
- ▶ de la cartographie des zones de risque.

Figure 13 : Méthodologie et moyens mis en œuvre pour l'étude d'impact acoustique (source : Quiet-Oceans).



Source: Quiet-Oceans, 2015

## 3.2 Modèle pour la caractérisation du bruit ambiant et des empreintes sonores

L'estimation des champs sonores se fait par simulation numérique impliquant l'usage de modèles prenant en compte l'ensemble de des paramètres précédemment évoqués (bathymétrie, profil de célérité, données météo-océaniques, sources de bruit, sédimentologie, données de mesure in situ...). La Figure 14 décrit de manière schématique les données d'entrée servant à la production de la cartographie de l'état sonore initial statistique.

Quiet-Oceans propose une modélisation par équations paraboliques et par rayons à distribution énergétique Gaussienne (Jensen, et al. 2000), qui traduit fidèlement la distribution géométrique du bruit dans la colonne d'eau, tout en offrant des performances de calcul intéressantes pour une analyse statistique. 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.

### 3.2.1 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. 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 (Folegot 2010), 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 et 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.

### 3.2.2 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 de l'état de l'art international.

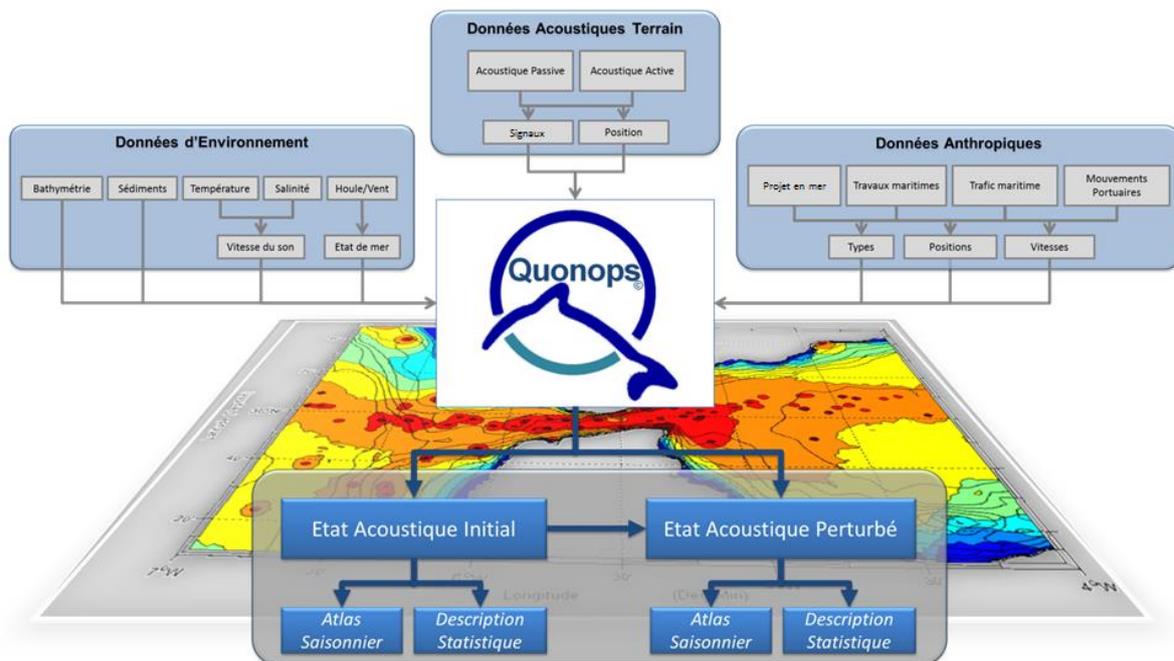
### 3.2.3 Quels paramètres sont pris en compte dans les modélisations ?

La plateforme de modélisation Quonops® prend en compte l'essentiel des données qui conditionnent la propagation des bruits dans le milieu marin (Figure 14) :

- ▮ les données environnementales, à savoir la bathymétrie, la nature des fonds, la température et la salinité de l'eau, 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 acoustiques mesurées sur le terrain, qu'elles soient de nature active ou passive.

Ainsi, 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 14 : Description schématique de la plateforme opérationnelle de prévision des bruits



Source: Quiet-Oceans, 2015

### 3.2.4 Cartographie statistique

Afin de prendre en compte la nature stochastique du bruit ambiant, les cartes sonores produites par 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 Carlo<sup>3</sup> (Folegot et al. 2015) permet ensuite de cartographier les statistiques saisonnières des champs sonores, et de décrire l'état sonore de l'aire d'étude large en termes de probabilité de niveau acoustique et de distribution spatiale.

<sup>3</sup> 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.

### 3.2.5 Définition et méthode d'estimation des empreintes sonores

L'empreinte sonore est définie pour chaque étape du projet et pour chaque atelier mis en œuvre. L'empreinte sonore correspond à la zone géographique pour laquelle le bruit généré par une opération spécifique du projet est au-dessus du niveau de bruit actuel. Elle représente l'émergence du bruit au-dessus du bruit initial, et constitue donc naturellement une comparaison avec les niveaux existant. Un point géographique de la zone est considéré comme faisant partie de l'empreinte sonore si, en ce point, le bruit médian du projet (ou percentile 50%) est supérieur à la médiane saisonnière du bruit ambiant.

Aussi, par définition, les limites de l'empreinte sonore sont établies à partir :

- ▮ d'une part, des cartes statistiques de bruit engendrées par le projet pendant une seconde ;
- ▮ et d'autre part, des cartes statistiques du bruit ambiant.

Pour chaque saison et pour chaque scénario, le périmètre de l'empreinte sonore est établi à partir des données statistiques des champs acoustiques perturbés en comparaison des données statistiques des champs acoustiques du bruit ambiant. Ces cartes sont établies après intégration sur les fréquences de sensibilité et intégration des différentes situations océanographiques (marée et rugosité de surface). Les empreintes sonores du projet :

- ▮ sont estimées pour une seconde d'activité ;
- ▮ intègrent toute l'énergie sonore sur la bande de perception de chaque espèce ;
- ▮ sont exprimées en dB réf.  $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$  au-dessus de la médiane saisonnière du bruit ambiant existant.

L'intérêt du concept d'empreinte sonore est qu'elle délimite aussi l'accumulation du bruit perçu. En effet, elle représente la distance maximale d'exposition aux bruits du projet, aussi bien pour un événement sonore que pour une répétition successive du même événement sonore, comme cela a été montré par des recherches réalisées par Quiet-Oceans dans le cadre du projet MaRVEN (Thomsen, et al., 2015).

## 3.3 Acquisition et traitement de données acoustiques in situ

Les mesures acoustiques in situ sont de deux types :

- ▮ les mesures passives qui consistent à écouter le bruit dans un périmètre autour d'un hydrophone. Ces mesures permettent d'une part de décrire l'activité sonore de l'état initial in situ (bruit anthropique, bruit de géophonie et bruits des mammifères marins) et d'autre part de calibrer le modèle numérique de cartographie,
- ▮ les mesures actives qui consistent en l'émission de signaux synthétiques calibrés servant après traitement à l'établissement des propriétés géoacoustiques du fond.

### 3.3.1 Protocole de levé terrain

Le protocole relatif à l'élaboration de l'état sonore initial et à l'étude d'impact ont été mutualisés. Ils consistent en une série de mesures d'acoustique active, et au déploiement d'instruments d'acoustique passive sur les aires d'étude immédiate et éloignée (Figure 15).

Chaque instrument de mesure d'acoustique passive permet d'accéder à un type d'information spécifique, parmi lesquelles la calibration des cartes sonores, la fréquentation du site par les

mammifères marins. En effet, les résultats attendus sont les suivants pour par chaque point de mesure fixe (Figure 15) :

- ▶ L'hydrophone déployé en R1 dans l'aire d'étude immédiate est déployé de façon continue sur 12 mois pour fournir une caractérisation du bruit ambiant existant au sein de l'aire d'étude immédiate ainsi que des éléments de caractérisation de la fréquentation des mammifères marins dans cette aire d'étude, complémentaires aux suivis d'autres types mis en œuvre par ailleurs (observations par bateau et avion) ;
- ▶ L'hydrophone déployé en R2 est utile à la calibration de l'empreinte sonore de l'aire d'étude immédiate vers le large et contribue de façon complémentaire à la caractérisation de la fréquentation des mammifères marins au nord de l'aire d'étude immédiate sur deux périodes de trois mois environ;
- ▶ L'hydrophone déployé en R3 entre l'aire d'étude immédiate et la zone d'habitat permanent de la colonie de phoques permet de caractériser de façon accrue les empreintes sonores vers la colonie et de contribuer à la caractérisation de la fréquentation de ce passage par les mammifères marins sur deux périodes de trois mois environ;
- ▶ L'hydrophone déployé en R5, dans le passage entre l'aire d'étude immédiate et la côte, sur deux périodes de trois mois environ, permet de caractériser de façon accrue les empreintes sonores de l'aire d'étude dans ce passage et de contribuer à la caractérisation de sa fréquentation par les mammifères marins. Ce point de mesure vise à caractériser un éventuel effet de barrière sonore du futur parc éolien.

La calibration active permet de disposer de signaux de référence nécessaires à la calibration des modélisations sonores.

Ce rapport couvre des données recueillies pendant une période entre juin 2015 et juin 2016. Ces mesures permettent de fournir une caractérisation du bruit ambiant existant dans les aires d'étude immédiate et éloignée pour une grande variabilité de conditions météocéaniques. Elles servent à la calibration des cartes de bruit ambiant. Le Tableau 3 liste les différentes campagnes de mesures effectuées en chaque point de mesure défini par le protocole.

A noter que les mesures du chorus sonore effectuées in situ dans le cadre de cette étude permettent également la caractérisation de la fréquentation de l'aire d'étude par les mammifères marins qui font l'objet d'une autre étude spécifique (Chompret, Roussel, & Clorennec, 2016).

Figure 15 : Positions des enregistreurs acoustiques servant à caractériser le bruit ambiant sur les aires d'étude immédiate et éloignée.

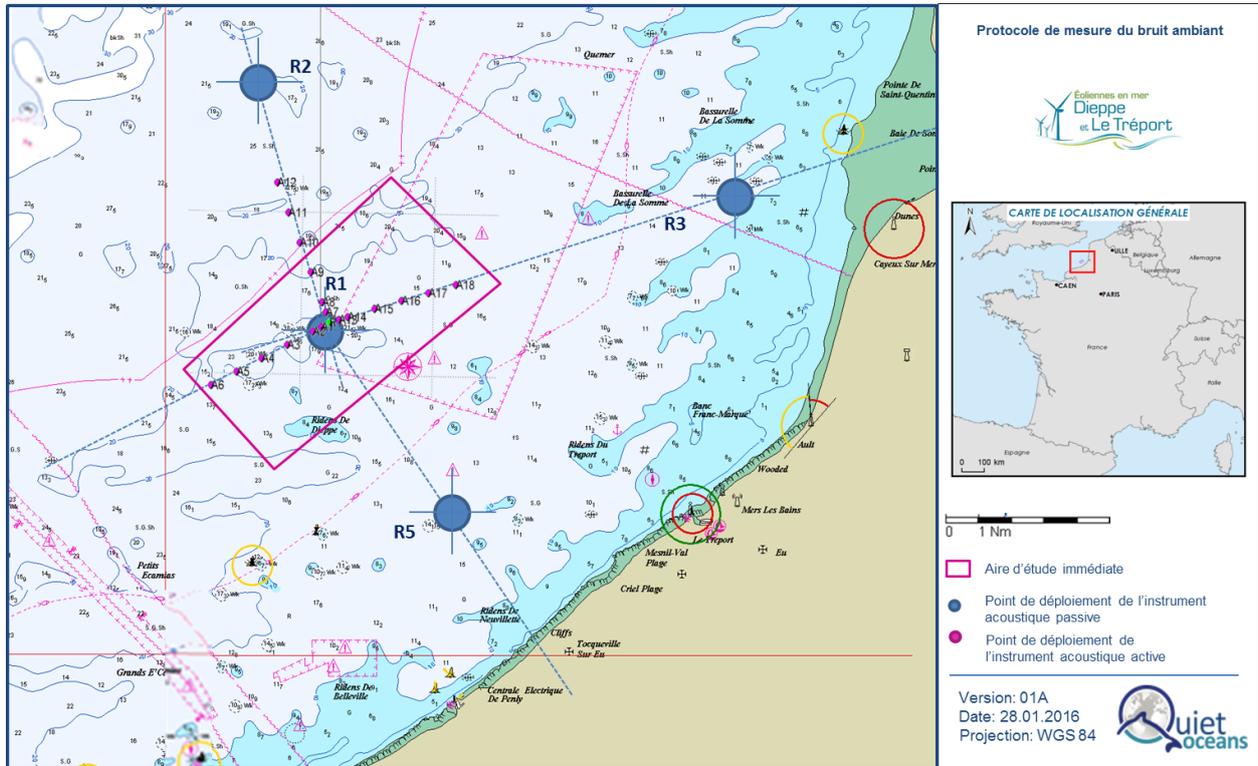


Tableau 3 : Coordonnées et dates de mise à l'eau des instruments d'acoustique passive

Coordonnées de mise à l'eau				
Enregistreur	Date de mise à l'eau	Date de relevage	Latitude (WGS 84)	Longitude (WGS 84)
<b>R1 (aire d'étude immédiate)</b>	25/06/2015	Dispositif chaluté et perdu	50°09,297'N	001°07,322'E
	25/09/2015	16/01/2015	50°09,296'N	001°07,317'E
	16/01/2016	12/04/2016	50°09,296'N	001°07,317'E
	12/04/2015	04/06/2016	50°09,296'N	001°07,317'E
<b>R2 (aire d'étude éloignée)</b>	25/06/2015	25/09/2015	50°15,515'N	001°03,121'E
	12/04/2015	04/06/2016	50°15,515'N	001°03,121'E
<b>R3 (aire d'étude éloignée)</b>	25/06/2015	25/09/2015	50°12,528'N	001°24,066'E
	12/04/2015	04/06/2016	50°12,528'N	001°24,066'E
<b>R5 (aire d'étude éloignée)</b>	25/06/2015	25/09/2015	50°03,875'N	001°12,370'E
	12/04/2015	04/06/2016	50°03,875'N	001°12,370'E

Un système d'acoustique active est déployé successivement sur un nombre important de positions dans l'aire d'étude éloignée (Figure 15), afin de mesurer les pertes de propagation

acoustique<sup>4</sup> entre ces positions (losanges bleus) et les hydrophones R2, R3 et R5 (losanges rouge, vert et mauve respectivement).

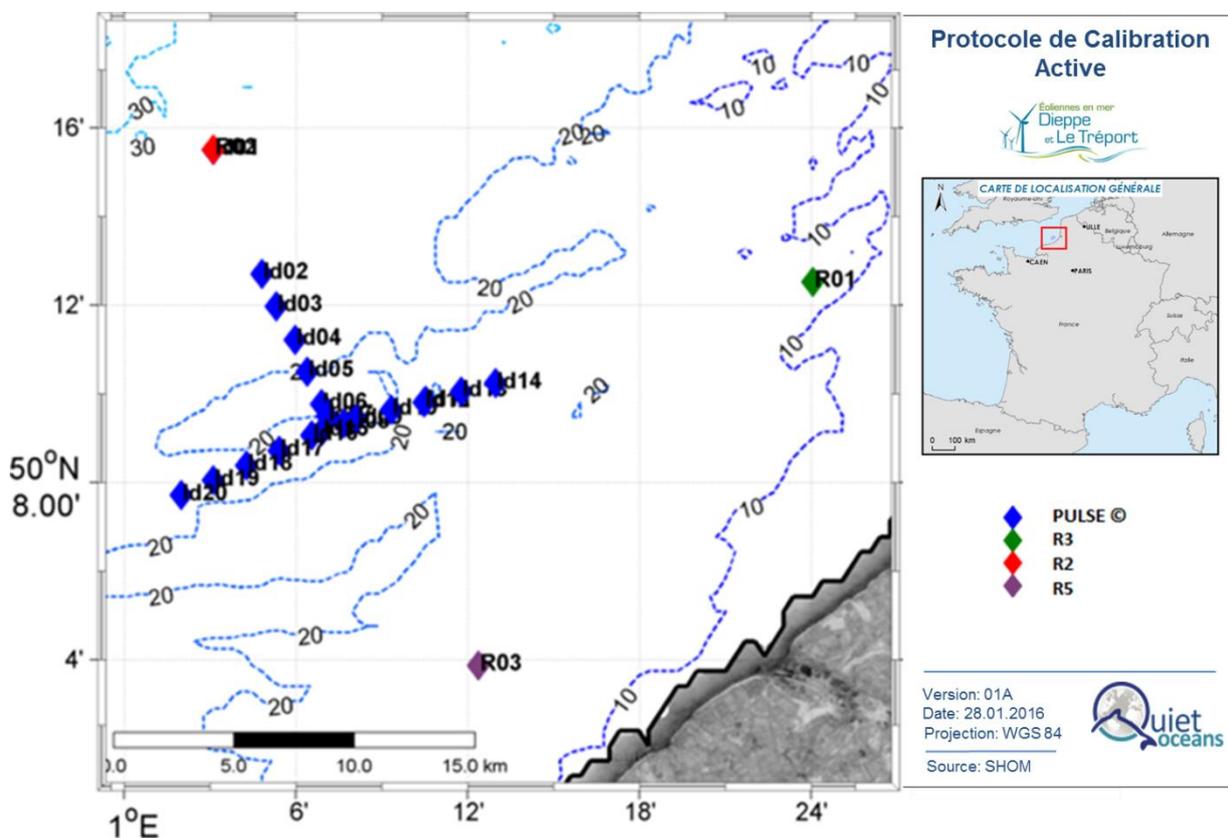
Trois radiales étant suffisantes afin de calibrer les cartes acoustiques des bruits émis par le projet depuis le parc, il a été décidé de réaliser :

- ✓ une radiale vers le large (en direction de R2);
- ✓ une radiale vers la Baie de Somme (en direction de R3) ;
- ✓ par symétrie, une radiale vers le Sud-Ouest

Les mesures directes ont été comparées aux prévisions réalisées par Quonops® pour un ensemble de natures du fond. L'objectif de cette campagne de mesure est de calibrer le modèle Quonops® en estimant le milieu équivalent acoustique dans l'aire d'étude immédiate.

Après comparaison des prédictions et des traitements de la mesure, le milieu équivalent est défini et introduit dans le modèle Quonops® au titre de la calibration active du site.

Figure 16 : Position des enregistreurs (losanges vert/rouge/mauve) et des émissions actives (losanges bleus) ayant servi à la calibration



### 3.3.2 Instrumentation acoustique passive mise en œuvre

L'instrument d'acoustique passive mis en œuvre est tantôt un SM2M tantôt un SM3M (Song Meter deeper water) produits par la société Wildlife Acoustics dont les spécificités techniques sont adaptées à la caractérisation du bruit ambiant. L'appareil SM2M permet de mesurer des bruits

<sup>4</sup> Les pertes de propagation acoustique correspondent à l'atténuation en fonction de la distance à la source des ondes dans leur milieu de propagation.

dans la bande de fréquence 5Hz à 48kHz tandis que l'appareil SM3M permet de mesurer dans la bande 5Hz à 196kHz.

Figure 17: Déploiement d'une cage instrumentée.



Source : Quiet-Oceans

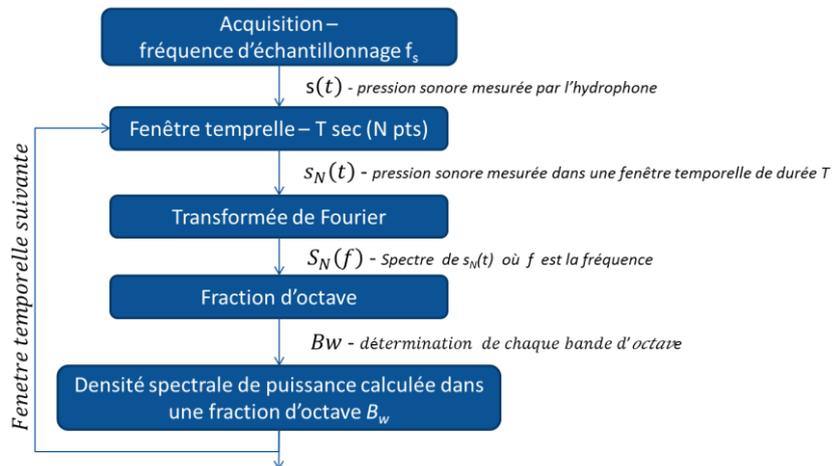
### 3.3.3 Traitements réalisés sur les données passives

Les traitements réalisés sur le jeu de données acoustiques sont mis en œuvre afin d'en extraire :

- ▶ les niveaux et la variabilité du bruit ambiant ;
- ▶ la portée de détection de l'hydrophone ;
- ▶ les évènements sonores (passages de navire à proximité immédiate).

Les traitements effectués sur le signal acoustique mesuré, permettant de quantifier les niveaux sonores et leur variabilité, sont présentés dans la Figure 18.

Figure 18 : Algorithme de calcul des niveaux sonores.



Source : Quiet-Oceans

### 3.3.4 Moyens d'acoustique active mis en œuvre

Le système d'acoustique actif PULSE®, développé spécifiquement par Quiet-Oceans permet, par des transmissions acoustiques de signaux contrôlés, de quantifier les pertes de transmission entre :

- ▶ Un hydrophone mouillé ;
- ▶ Différents points à différentes positions, à portée acoustique de l'hydrophone.

Le système PULSE® utilisé répond aux spécifications suivantes :

- ▶ Niveau d'émission : 180 dB réf. 1µPa sur la bande ;
- ▶ Bande passante : 30Hz-20kHz ;
- ▶ Datation absolue : +/- 2 s sur 10 jours ;
- ▶ Signaux large bande.

Figure 19 : Système Pulse® mis en œuvre.



©Quiet-Oceans

## 3.4 Acquisition des données descriptives des activités maritimes génératrices de bruit dans l'aire d'étude large

Les activités maritimes sont source de bruit. La méthodologie exploite les données descriptives issues de :

- ▶ L'acquisition des données *Automated Identification System* (AIS),
- ▶ Des informations techniques descriptives préliminaires des activités du projet fournies par le Maître d'Ouvrage.

L'AIS est un système à bord des navires qui transmet à un réseau d'observation leur identification et leurs localisations en quasi temps-réel (paragraphe 3.7.2). 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 milles nautiques des côtes en fonction des conditions climatiques.

Les navires non équipés d'un système d'identification et de localisation AIS ne sont pas pris en compte dans cette étude. Les navires réalisant des extractions de granulats marins sont

généralement équipés du système AIS et leurs bruits propres (De Jong, 2010) donc inclus dans l'étude.

Les bruits générés dépendent du type de navire, de leur vitesse instantanée et de leur longueur. Le modèle de cartographie du bruit Quonops® mis en œuvre dans cette étude prend en compte ces caractéristiques qui sont mis à disposition grâce aux données AIS acquises. En effet, un gabarit de bruit de navire est associé à chaque catégorie d'activité maritime. Ce gabarit est issu du modèle de bruit de navire et adapté à partir des informations issues des travaux de la « Scripps Oceanographic Institution » (Hildebrand 2009).

### 3.5 Origine des données de fréquentation biologique du site

Les données de fréquentation biologique du site proviennent, pour les mammifères marins, de deux sources :

- ▶ Les données SAMP (Suivi Aérien de la Mégafaune Marine issues du programme d'acquisition des connaissances sur les oiseaux et mammifères marins (PACOMM) dans les eaux métropolitaines françaises) (Pettex, 2014) ;
- ▶ Les résultats de l'expertise mammifères marins réalisée par Biotope, 2016) présentés dans le rapport d'expertise correspondant.

#### 3.5.1 Description des données SAMP

Les données utilisées pour caractériser la distribution et l'abondance des mammifères marins dans la Manche orientale proviennent des deux campagnes de recensement aérien conduites pendant l'hiver 2011/2012 et l'été 2012 dans les eaux métropolitaines françaises (campagnes de Suivi Aérien de la Mégafaune Marine - SAMP 1 et 2 ; voir Pettex et al., 2014 pour la méthode de collecte des données).

Afin de caractériser la distribution des espèces en Manche orientale, nous avons utilisé des cartes de prédiction de densité (en nombre d'individus/km<sup>2</sup>), obtenues par la modélisation d'habitats pour les deux saisons de SAMP (Lambert et al., *submitted 2016*). Cette méthode a pour principe de déterminer les relations qui unissent les espèces à leur environnement et d'identifier leurs habitats préférentiels, ce qui permet ensuite de prédire les densités de l'espèce considérée sur une zone dont les caractéristiques environnementales sont connues. Dans le cas des modélisations d'habitats réalisées sur les données de SAMP, plusieurs variables environnementales ont été utilisées pour caractériser les habitats : bathymétrie, pente, température de surface moyenne (sur une période de 7 ou 28 jours précédant le jour échantillonné), variance et gradient de température de surface, hauteur d'eau moyenne et écart-type, vitesse maximale du courant, etc. La relation entre la distribution observée (observations collectées) et les variables environnementales a été déterminée à l'aide de Modèles Additifs Généralisés.

Les données d'observations et d'effort du SAMM ont été utilisées pour calculer l'estimation d'abondance en Manche orientale. Elles sont représentées pour illustration Figure 20 pour les données représentatives de l'hiver, et Figure 21 pour l'été. Les prédictions de modèles d'habitat peuvent produire des estimations d'abondances, puisqu'elles expriment des densités en nombre d'individus par km<sup>2</sup>, mais elles sont peu fiables en comparaison des méthodes d'estimation d'abondance classiques. Nous avons donc utilisé les modèles d'habitat pour décrire la distribution dans l'aire d'étude large et calculer les estimations d'abondance séparément. Ces données sont uniquement disponibles pour les sous-groupes :

- ▶ Phocoenidae (Marsouin),
- ▶ Globicephaline (Globicephale noir et Dauphin de Risso),
- ▶ Delphininae (Grands delphinines : Grand Dauphin),
- ▶ Delphininae (petits delphinines : Dauphin commun et Dauphin bleu et blanc)

Figure 20 : Estimation de la densité de population en hiver dans la zone étendue à partir des données SAMM

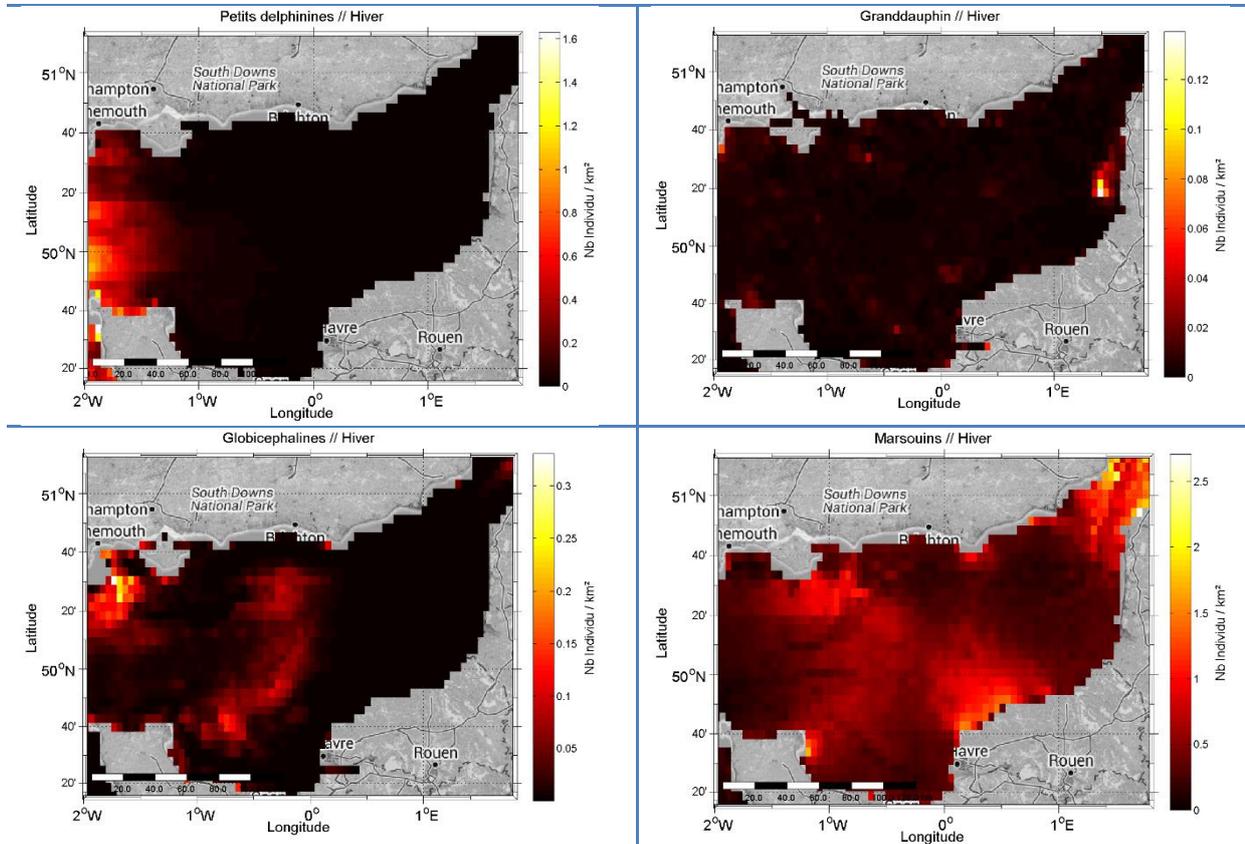
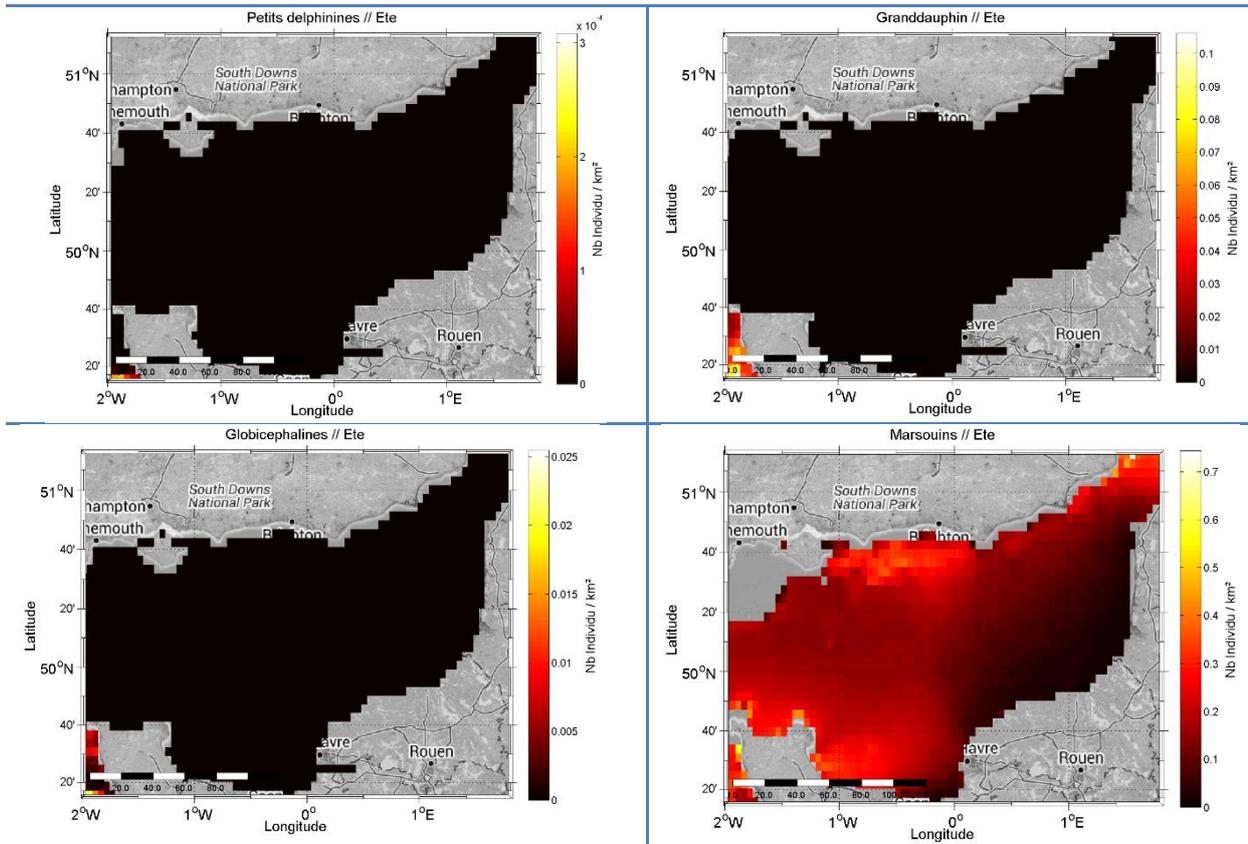


Figure 21 : Estimation de la densité de population en été dans la zone étendue à partir des données SAMM



Sources Agence des Aires Marines Protégées (AAMP), 2012

### 3.6 Méthode d'évaluation des risques biologiques

La méthode d'évaluation des risques biologiques repose sur un cadre réglementaire national et international, et des considérations scientifiques issus des efforts récents pour caractériser les risques et les impacts. L'estimation des risques inclue :

- ▶ une estimation du nombre de mammifères marins affectés ;
- ▶ une estimation des risques selon une hiérarchisation des effets par classes d'espèces pour les mammifères marins, les poissons et les tortues marines.

#### 3.6.1 Méthode d'estimation du nombre de cétacés affectés

L'estimation du nombre de cétacés affectés est réalisée à partir des données SAMM du PACOMM (Pettex, 2014), seules données globales compatibles avec la dimension des empreintes sonores du projet, en particulier celles issues du battage de pieux.

Le projet de recherche SAMM permet également de connaître une répartition à l'échelle de la Manche et de l'Atlantique de la densité de population exprimée en nombre d'individu par km<sup>2</sup> pour certaines espèces de mammifère marin et pour les saisons caractéristiques de l'été et de l'hiver (Figure 20 et Figure 21). Ces données sont exploitées afin d'estimer le nombre d'individus affectés par les bruits générés et propagés par le projet.

La méthode de quantification du nombre d'individus affectés a été élaborée dans le cadre du projet de recherche RESPECT (Pettex.E, 2016) et est appliquée au cas du projet de Dieppe -Le Tréport. La disponibilité des données d'habitat limite toutefois le nombre d'espèces pour lesquelles cette quantification est réalisable. Aussi, la quantification du nombre d'individus susceptibles d'être dérangés ou impactés par les différentes phases est établie uniquement pour :

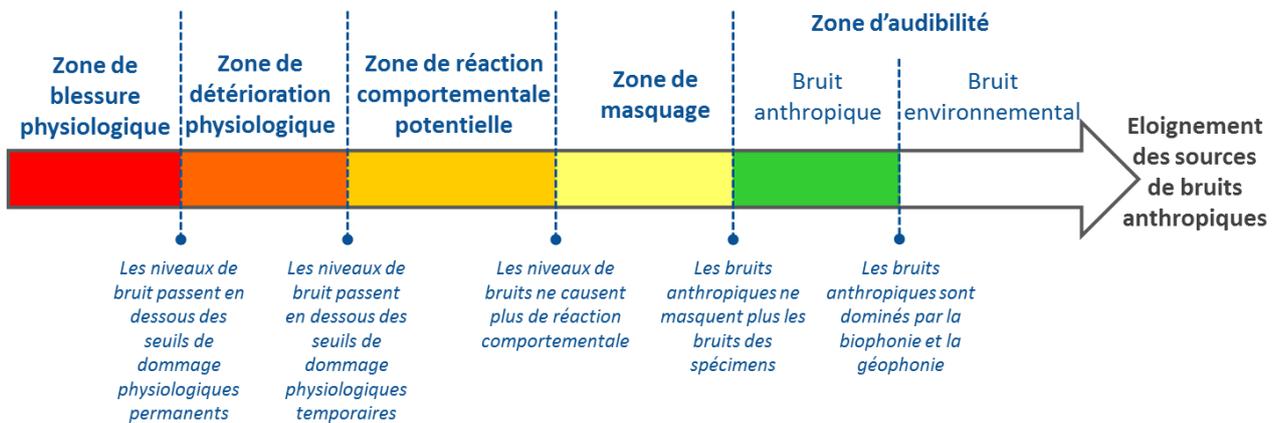
- ▶ l'empreinte sonore et les différents seuils de tolérance ;
- ▶ les différents ateliers mis en œuvre ;
- ▶ les différentes familles d'animaux marins dont les données sont disponibles.

### 3.6.2 Hiérarchisation des risques sonores

Les risques potentiels sont d'autant plus importants que les individus se trouvent à proximité d'une ou plusieurs sources de bruit et sont exposés à un bruit intense. Une hiérarchisation des risques sur un axe de niveau de bruit décroissant a été établie à partir de la littérature et des capacités scientifiques et techniques actuelles à quantifier les distances de risques (Figure 22). Au fur et à mesure que les niveaux de bruit se réduisent, les zones de risques changent de natures. Le passage d'une zone de risque à l'autre correspond au franchissement d'un seuil biologique fournit, le cas échéant, par la recherche et par la littérature (Dooling & Blumenrath, 2013), bien que ces seuils de tolérances et d'effet du bruit qui ne sont pas nécessairement connus pour toutes les espèces :

- ▶ une zone de blessure physiologique qui correspond à une zone dans laquelle les niveaux de bruit dépassent les seuils de dommage physiologiques permanents (en anglais PTS, Permanent Threshold Shift) provoquant des lésions irréversibles;
- ▶ une zone de détérioration physiologique qui correspond à une zone dans laquelle les niveaux de bruit sont susceptibles de provoquer des dommages physiologiques temporaires (en anglais TTS, Temporary Threshold Shift) provoquant des lésions réversibles. Les cellules constitutives retrouvent leur état initial après un certain temps hors d'une exposition importante au bruit;
- ▶ une zone de réaction comportementale (en anglais BDT, Behaviour Disturbance Threshold) qui correspond à une zone dans laquelle les niveaux de bruit sont susceptibles de provoquer une gêne suffisante pour que les individus interrompent leur activité normale pour fuir la zone. Les conséquences ne sont pas directes, mais peuvent provoquer une augmentation de la consommation d'énergie individuelle, d'autant plus critique que l'individu est jeune, une interruption dans leurs activités de chasse ou de socialisation ou bien encore un changement forcé d'habitat. In fine, les impacts peuvent se faire ressentir à l'échelle des individus et de la population;
- ▶ une zone de masquage qui correspond à une zone dans laquelle les sons émis et reçus par les spécimens lors de leurs activités de chasse, de socialisation ou d'évitement des prédateurs, sont couverts par les bruits anthropiques. Ce type d'effet est pertinent pour les bruits continus. Dans cette zone, le rayon d'interaction des spécimens est réduit, ce qui conduit à des impacts potentiels à l'échelle des individus et de la population;
- ▶ une zone d'audibilité, zone sans risque, qui correspond à une zone dans laquelle les bruits anthropiques, biologiques et naturels sont perçus par les individus, sans pour autant causer d'effet particulier connu.

Figure 22 : Graduation des risques biologiques en fonction de l'éloignement à la ou les sources de bruit anthropique.



Source : Andersson, Persson, Lucke, Folegot, & André, 2015

### 3.6.3 Classification acoustique des espèces de mammifères marins

Les cétacés et les pinnipèdes peuvent être répertoriés en 4 classes en fonction de leur sensibilité auditive et de différents paramètres liés à la qualité de l'écoute (milieu de propagation, morphologie, ...) (Southall, et al., 2007). Chaque espèce d'une même classe présente :

- une gamme de fréquence d'audition et de sensibilité similaire ;
- des seuils de dommages temporaires et permanents identiques.

Les quatre classes de mammifères marins sont (tableau 4) :

- Cétacés hautes fréquences;
- Cétacés moyennes fréquences;
- Cétacés basses fréquences;
- Pinnipèdes.

### 3.6.4 Classification acoustique des poissons et tortues marines

Les poissons et tortues marines perçoivent les sons sous-marins de différentes manières, nous amenant ainsi à utiliser la classification suivante (Popper, et al., 2014) :

- les espèces n'ayant pas vessie natatoire, sensibles au déplacement des particules telles que, par exemple, la Seiche ou la Limande (poissons plats) ;
- les espèces ayant une vessie natatoire, sensibles au déplacement des particules et potentiellement à la pression acoustique telles que, par exemple, le Rouget Barbet, les Salmonidés, le Thon ;
- les espèces ayant une vessie natatoire et des cils sensitifs permettant de percevoir leur environnement, sensibles au déplacement des particules et à la pression acoustique comme la Carpe et le Silure;
- les tortues marines ;
- les œufs et larves des poissons.

### 3.6.5 Critères de dépassement des seuils

La méthode retenue repose sur une analyse absolue des niveaux d'exposition sonore et consiste à comparer les empreintes sonores de chaque atelier du projet à des valeurs absolues de seuil biologique définis pour chaque classe d'espèce. Ces seuils sont listés dans les recommandations de Southall, *et al.*, 2007, (Lucke, Siebert, Lepper, & Blanchet, June 2009), et Popper, *et al.*, 2014 qui constituent des consensus internationaux.

Concernant le seuil de modification du comportement ou de dérangement, Southall *et al.*, 2007 classent les réactions comportementales suivant un indice variant de 1 à 9 (1 : pas de réaction, 9 : panique, échouage), le niveau de 120 dB choisi dans cette étude est susceptible de provoquer des réactions d'indices variant de 2 à 4 (alerte individuelle, changement mineur et modéré de la vitesse, de la direction de nage, du rythme de respiration et du profil de plongée, mais pas de réaction d'évitement de la source sonore). Ce seuil est appliqué pour les cétacés et les pinnipèdes.

Les seuils pour les mammifères marins, repris et amendés par des études scientifiques récentes menées en 2013 par l'administration américaine (NOAA), sont synthétisés dans le tableau 4.

Ils ne sont pas applicables pour une exposition prolongée aux bruits (paragraphe 3.7.6). Les seuils pour les poissons et tortues marines sont récents. Ils sont valables pour une exposition prolongée aux bruits. Les seuils pour les invertébrés ne sont pas connus à ce jour.

La publication (Southall, *et al.*, 2007) est un consensus international de la communauté scientifique qui se fonde sur la littérature scientifique disponible sur une période de temps significative. Il est fortement déconseillé de ne se fonder que sur des études particulières, en l'occurrence si elles n'ont pas fait l'objet de validation par les pairs.

L'étude d'impact réalisée pour le projet reprend les seuils de (Southall, 2007). Ils sont plus exigeants que l'étude au Danemark. L'utilisation des seuils de (Southall, 2007), telle que réalisée dans l'étude d'impact, offre la possibilité de comparer les résultats des études réalisées pour les projets éoliens posés en Manche et sur la façade Atlantique.

Il est essentiel de comprendre que le Guide édité par la NOAA en Juillet (NOAA, 2016), outre son caractère très récent, modifie non seulement les seuils, mais de façon plus fondamentale, la manière de quantifier l'énergie sonore perçue par chaque type d'espèce. Les effets de ces modifications ne sont pas établis à ce jour, les seuils ayant été réduits, mais la quantité d'énergie sonore perçue ayant aussi été limitée. La combinaison des deux facteurs n'est pas prédictible sans un développement informatique conséquent et une étude paramétrique dédiée qu'il s'agit encore de réaliser. Il est intéressant de noter que le risque comportemental n'est pas adressé dans (NOAA, 2016).

Au stade actuel des connaissances, il est ainsi raisonnable de conserver l'évaluation des impacts au moyen des seuils (Southall, 2007), complétés, comme proposé au sein de l'étude d'impact par des approches sur les seuils comportementaux. Ceux-ci sont pleinement validés par la communauté scientifique, des moyens de calcul adaptés existent et ces seuils ont été utilisés pour la majorité des projets français et constituent en ce sens une base de travail acceptable. Toutefois une étude comparative a été menée afin d'évaluer les différences des deux approches (Southall, 2007) et (NOAA, 2016) sur le cas précis de ce projet. Cette étude est disponible dans l'annexe 11.2. Les conclusions de cette étude comparative démontrent, pour ce projet, que le référentiel Southall 2007 est plus conservateur pour les espèces de mammifères marins hormis les cétacés de la catégorie basse fréquence, rare dans la zone d'étude. Aussi, les résultats présentés dans cette étude se basent sur le consensus Southall 2007.

Tableau 4: Synthèse des seuils de perturbation sonore pour les mammifères marins et poissons.

Types d'espèces	Gamme de Fréquences de perception	Bruits impulsifs			Bruits continus		
		Exprimés en Niveau d'Exposition Sonore			Exprimés en Niveau de Pression Sonore		
		Unité dB réf. 1µPa*s			Unité dB réf. 1µPa		
		Seuil de réaction	Seuil de dommage temporaire	Seuil de dommage permanent	Seuil de réaction	Seuil de dommage temporaire	Seuil de dommage permanent
<b>Marsouin Commun</b>	200Hz-180kHz	145	164	179	NC	224	230
<b>Cétacés Hautes Fréquences</b>	200Hz-180kHz	120	183	198	NC	224	230
<b>Cétacés Moyennes Fréquences</b>	150Hz-160kHz	120	183	198	NC	224	230
<b>Cétacés Basses Fréquences</b>	7Hz-22kHz	120	183	198	NC	224	230
<b>Pinnipèdes dans l'eau</b>	75Hz-75kHz	120	171	186	NC	212	218
<b>Tortues marines</b>	< 0,9kHz	166	175	210	NC	NC	NC
<b>Poissons sans vessie natatoire</b>	< 1kHz	NC	186	219	NC	NC	NC
<b>Poissons ayant une vessie natatoire sans cils sensitifs</b>	< 4kHz	140	186	207	NC	158	NC
<b>Poissons ayant une vessie natatoire avec cils sensitifs</b>	< 1kHz	NC	186	210	NC	NC	NC
<b>Œufs et larves de poissons</b>	< 1kHz	NC	NC	210	NC	NC	NC
<b>Invertébrés</b>	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC

Source : Southall, et al., 2007, Lucke, et al., 2009, Popper, et al., 2014

NC : non connu à ce jour

## 3.7 Limites méthodologiques et lacunes de connaissances

### 3.7.1 Mise en œuvre des mesures en mer

La mise en œuvre des instruments en mer est sujette à de nombreux aléas liés en particulier:

- ▮ aux activités existantes, principalement de pêche, qui peuvent dégrader les instruments, les détruire ou causer leur perte ;
- ▮ aux conditions météorologiques qui ne permettent pas toujours de conduire les opérations en mer dans des conditions suffisantes de sécurité des personnels et des matériels ;
- ▮ aux pannes électroniques ou informatiques des systèmes de mesure.

### 3.7.2 Données AIS

Les données AIS ont été utilisées pour appréhender l'importance du trafic maritime sur l'aire d'étude large. A noter toutefois que l'usage de l'AIS n'est obligatoire que pour les navires de plus de 300 tonneaux et préconisé pour les navires de taille inférieure (navires de commerce, pêche et plaisance). Même si l'installation des systèmes AIS semble se généraliser à quasiment toute la flotte, les données AIS ne traduisent pas de façon totalement exhaustive le trafic au sein et à proximité de l'aire d'étude immédiate, mais couvrent néanmoins une très grande majorité des activités. L'opération spécifique d'extraction de granulats n'est pas indiquée dans les messages AIS. Toutefois, le navire support indique sa position et peut être considéré comme étant la source sonore significative de cette activité (De Jong, 2010).

### 3.7.3 Approximations de la modélisation sonore

Les sources acoustiques sont représentées par des sources ponctuelles ou par des ensembles de sources ponctuelles en fonction du type d'activité considérée. Cela est une simplification vis-à-vis des sources sonores qui sont dans la plupart des cas étendues. Cela peut introduire un biais très localement à la position de la source de bruit.

Dans le cas du battage de pieu, le projet de recherche RESPECT (Réduction des Empreintes Sonores des Parcs Éoliens en mer: Comprendre pour de nouvelles Technologies) permettra de disposer d'un modèle de source de bruit étendu le long de la hauteur d'eau et de prendre en compte la directivité verticale du bruit généré par la vibration du pieu (Van de Loock, et al., 2016).

### 3.7.4 Incertitudes relatives aux niveaux émis

Les caractéristiques sonores utilisées pour décrire les bruits du projet sont dérivées de mesures réalisées sur différents projets et présentées dans la littérature technique et scientifique. Elles ne prennent pas en compte les caractéristiques détaillées des techniques mises en œuvre. La dispersion des valeurs de bruit reportée est toutefois relativement faible. On peut donc en conclure que les gabarits utilisés sont représentatifs et que, en l'état actuel des connaissances, les incertitudes sur le type de machine-outil exploité dans les ateliers et les conditions de substrat, bien qu'existantes, restent probablement marginales.

Les niveaux émis par les opérations de battage et de forage dépendent de la nature du fond. Une opération de battage ou de forage dans un fond dense est susceptible de générer plus de

bruit que dans un fond moins dense. Les retours d'expériences des projets menés en Europe du Nord fournissent des données de source de bruit pour un certain type de fond, mais pour toute la diversité des fonds existants. Une incertitude est donc liée à cette lacune de connaissance. Le projet RESPECT cherche à combler par des techniques de modélisation très poussées cette lacune.

Ce projet de recherche s'intéresse à caractériser les niveaux sonores d'un atelier de battage en fonction du diamètre du pieu, du type de substrat et de l'enfoncement dans le contexte du projet de construction du parc éolien de Dieppe- Le Tréport. Il a permis de démontrer que le niveau sonore à une distance caractéristique (200m) est moins élevé en présence de craie déstructurée qu'en présence de sable moyennement dense malgré l'augmentation de l'énergie déposée en tête de pieu. Dans le cas de la craie, étant donné l'inclinaison du front sonore engendré au niveau du pieu, l'énergie sonore est plus favorablement transmise dans le substrat (Van de Loock J. d., 2015), (Van de Loock J. L., 2016)

### 3.7.5 Lacunes de connaissance relative aux seuils de tolérance

Les seuils de tolérances ne sont pas connus pour toutes les espèces à ce jour. Cela est particulièrement vrai pour les seuils de modification du comportement. De plus, les seuils sont souvent obtenus à partir d'un faible nombre de mesures et d'expérimentations.

### 3.7.6 Impact des expositions prolongées au bruit

Les émissions sonores peuvent s'étaler sur des durées pouvant atteindre quelques heures à quelques jours suivant les techniques utilisées.

Du point de vue physique, le calcul de l'exposition sonore cumulée consiste à intégrer l'énergie sonore perçue sur la durée d'exposition. L'accumulation du bruit perçu est confinée uniquement dans l'empreinte sonore de chaque atelier qui définit la distance maximale d'exposition aux bruits du projet, aussi bien pour un événement sonore que pour une répétition successive du même événement sonore (Thomsen, et al., 2015).

L'étude des effets induits sur les capacités auditives par des expositions prolongées à des émissions de longue durée (typiquement plusieurs heures) des mammifères marins reste du domaine de la recherche, en particulier en milieu naturel. Des expérimentations se sont intéressées à des expositions sonores s'étalant entre 1 minute et 240 minutes (Popov, 2011); (Kastelein, 2012), n'atteignant cependant pas les durées de travaux d'installation des projets et réalisées dans des bassins clos, de dimensions limitées. Hors, la différence majeure entre une exposition prolongée en bassin et une exposition prolongée en milieu naturel est que l'individu exposé est libre de se déplacer sur des distances importantes et selon des schémas qui peuvent être extrêmement complexes et variables.

L'exposition prolongée est aussi très dépendante du laps de temps entre deux battages (ou deux événements sonores anthropiques), puisqu'il est connu que ce laps de temps permet la récupération totale ou partielle des facultés auditives de l'animal, sans pour autant disposer à ce jour de connaissances chiffrées permettant ni une évaluation quantitative, ni une modélisation représentative.

L'exposition sonore prolongée est donc susceptible de très grandes variations et de très grandes fluctuations en fonction de la distance entre l'individu et la source de bruit le long de son parcours, et ce, de façon totalement imprédictible en l'état actuel des connaissances.

Il est à noter que la mise à jour du Guide (NOAA, 2016) ne considère plus le risque d'exposition cumulée, par manque de connaissance scientifique.

Devant ces incertitudes, nous avons considéré vraisemblable qu'un spécimen exposé dans la zone de risque physiologique instantané s'éloigne de la source de bruit, réduisant ainsi son exposition. C'est pourquoi, lorsque la zone de risque instantané existe, la stratégie adoptée consiste en :

- ▮ des mesures de contrôle de non-présence dans cette zone de risque instantanée par acoustique passive temps-réelle (SmartPAM) et par observation (Thermmo) avant le démarrage des opérations. L'objectif est de s'assurer qu'aucun individu n'est exposé à un risque de dommage physiologique direct ;
- ▮ une mesure de démarrage progressif (procédure soft-start et/ou ramp-up) ayant pour effet d'éloigner les individus significativement au-delà de la zone d'un risque direct, et par conséquent de réduire l'exposition cumulée, ou tout du moins, d'exposer les individus de façon prolongée à des niveaux significativement plus faibles. (Southall, et al., 2007) estime à des niveaux SEL de 150dB re 1 $\mu$ Pa<sup>2</sup>.s comme le seuil pour lequel aucune accumulation n'est détectée («silence efficace»). Cela signifie qu'il n'est pas nécessaire de prendre en compte les effets cumulatifs à de faibles niveaux sonores.

Afin d'adresser les effets d'exposition prolongée, la recherche scientifique s'oriente désormais vers des modèles d'effets populationnels. Une première tentative d'implémentation d'un modèle populationnel est réalisée dans le programme de recherche RESPECT financé par la société des Éoliennes en Mer de Dieppe et du Tréport (Pettex, 2016) (Pettex.E, 2016), qui voit le développement expérimental du modèle Interim-PCod (Harwood, 2014) à l'échelle de la Manche. L'avancement de la recherche à ce sujet est préliminaire et ne peut raisonnablement pas être appliqué dans une étude d'impact en l'état.

### 3.7.7 Impacts sur les populations

L'évaluation de l'impact d'une activité humaine sur la vie marine peut s'effectuer sur un continuum de niveaux (National Research Council, 2005) allant du niveau individuel jusqu'au niveau des populations. Le National Research Council pointe clairement le manque de connaissance et l'ampleur nécessaire des études au niveau de la population.

Des modèles qui cherchent à prédire les effets du bruit anthropique sur les populations de mammifères marins commencent à voir le jour tel que l'IPCOD (Interim Population Consequences of Disturbance) développé par le SMRU Marine en 2014 (Harwood, 2014) (King, 2015). Ce modèle permet de quantifier les effets potentiels de la construction d'un site éolien sur une population de mammifères marins. Il établit des liens quantitatifs entre le nombre de jours de dérangement et les paramètres vitaux des individus qui composent la population, pour en déduire in fine, l'impact démographique potentiel sur cette population. Un second modèle DEPONS (Disturbance Effects on the Harbour Porpoise Population in the North Sea), actuellement en développement, s'intéresse spécifiquement aux populations de Marsouin commun en mer du Nord lors de travaux en mer par battage. Une publication commune permet de faire une comparaison et une expertise de ces deux modèles (Nabe-Nielsen, 2016).

Compte tenu de la difficulté d'équiper des animaux vivants in situ, la connaissance de l'audition des mammifères marins et de l'impact des émissions sonores sur cette audition a été majoritairement acquise sur un faible nombre d'individus et d'espèces, ceci plutôt en bassin (grands dauphins, béluga, marsouin, orque) ou pour des espèces potentiellement accessibles de la côte (phoques). Aujourd'hui, l'audiogramme ou à minima la sensibilité auditive à certaines fréquences de 32 espèces de mammifères marins ont été mesurés (Simard & Leblanc, 2010).



# 4 Caractérisation sonore initiale de l'aire d'étude large





## 4.1 Collecte des données

Afin d'obtenir un échantillon représentatif à l'échelle d'une année, le bruit a été enregistré pendant les 18 premières minutes de chaque heure, soit un cycle utile de 30%. Cette durée unitaire correspond à l'enregistrement maximal possible pour une durée de campagne de trois mois et est tout à fait suffisante pour un échantillonnage de qualité (Sutton, Clorennec, Jessop, & Folegot, 2013).

Les caractéristiques du jeu de données acoustiques collectées pour la période juin 2015 à juin 2016 sont présentées dans les tableaux ci-dessous pour chaque campagne de mesure. L'enregistreur déployé en R1 ayant été chaluté et perdu, aucune donnée n'est disponible en ce point pour la période juin à septembre 2015. L'enregistreur placé en R2 d'avril à juin 2016 ayant subi une dégradation de l'hydrophone en début de cette campagne de mesure, très peu de données sont disponibles à cette période.

Tableau 5 : Caractéristiques du jeu de données acoustiques collecté dans la période juin à septembre 2015.

	Enregistreur R1	Enregistreur R2	Enregistreur R3	Enregistreur R5
<b>Date de début</b>	25/06/2015	25/06/2015	25/06/2015	25/06/2015
<b>Date de fin</b>	N/A	01/09/2015	15/08/2015	23/09/2015
<b>Durée enregistrement (jour)</b>	N/A	21,0	18,0	27,7
<b>Nb de fichiers</b>	N/A	1656	1243	2198
<b>Go données (FLAC format)</b>	N/A	725	123	979

Tableau 6 : Caractéristiques du jeu de données acoustiques collecté dans la période septembre à décembre 2015.

Enregistreur R1	
<b>Date de début</b>	24/09/2015
<b>Date de fin</b>	26/12/2015
<b>Durée enregistrement (jour)</b>	27,8
<b>Nb de fichiers</b>	2229
<b>Go données (FLAC format)</b>	1027

Tableau 7 : Caractéristiques du jeu de données acoustiques collecté dans la période janvier à avril 2016

Enregistreur R1	
<b>Date de début</b>	17.01/2016
<b>Date de fin</b>	12/04/2016
<b>Durée enregistrement (jour)</b>	24,4
<b>Nb de fichiers</b>	2063
<b>Go données (FLAC format)</b>	910,5

Tableau 8 : Caractéristiques du jeu de données acoustiques collecté dans la période avril à juin 2016

	Enregistreur R1	Enregistreur R2	Enregistreur R3	Enregistreur R5
<b>Date de début</b>	12/04/2016	12/04/2016	12/04/2016	12/04/2016
<b>Date de fin</b>	04/06/2016	13/04/2016	04/06/2016	04/06/2016
<b>Durée enregistrement (jour)</b>	16,0	0,27	17,7	15,9
<b>Nb de fichiers</b>	1283	22	1280	1281
<b>Go données (FLAC format)</b>	582,4	8,5	123,8	594,4

## 4.2 Les activités maritimes génératrices de bruit dans l'aire d'étude large

Les activités maritimes sont source de bruit. La Figure 23 illustre la densité de trafic maritime, sans distinction de la nature de l'activité, issue du traitement des données AIS acquises du 25 juin au 03 août 2015 sur l'aire d'étude large. Ces données sont directement exploitées dans l'élaboration des cartes de bruit initial. Elles sont présentées dans les paragraphes suivants afin de documenter précisément les données sous-jacentes aux résultats de l'étude d'impact.

Cette carte met en évidence la prédominance des rails de circulation DST Casquets et DST Pas-de-Calais au nord de l'aire d'étude large et des échanges réguliers entre les principaux ports commerciaux (Le Havre, Cherbourg, Calais, Portsmouth, Southampton). A proximité de l'aire d'étude immédiate, l'activité de pêche est importante (Figure 23).

Les gabarits sonores moyens (en dB réf.  $1\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$  @1m) pour chaque catégorie de navires sont précis avec un écart-type de 3 dB et sont illustrés en Figure 24. En pratique dans la modélisation mise en œuvre selon un procédé breveté (Folegot, 2009), un niveau sonore moyen en fonction de la fréquence est associé à chaque navire présent sur zone (Breeding 1996) (Wagstaff 1973), corrigé en fonction des caractéristiques propres aux navires (longueur et vitesse). L'écart-type de 3dB sur le gabarit permet de traduire la variabilité des navires pour une même catégorie. Ces trafics correspondent au passage :

- ▶ de tanker et de cargo pour le trafic commercial ;
- ▶ de navires de passagers ;
- ▶ de navires de plaisance et pêche ;
- ▶ de navires effectuant des travaux maritimes (opérations de dragage, remorquage, etc.).

Figure 23 : Densité du trafic (échelle logarithmique) au sein de la Manche orientale et centrale obtenue par traitement des données AIS.

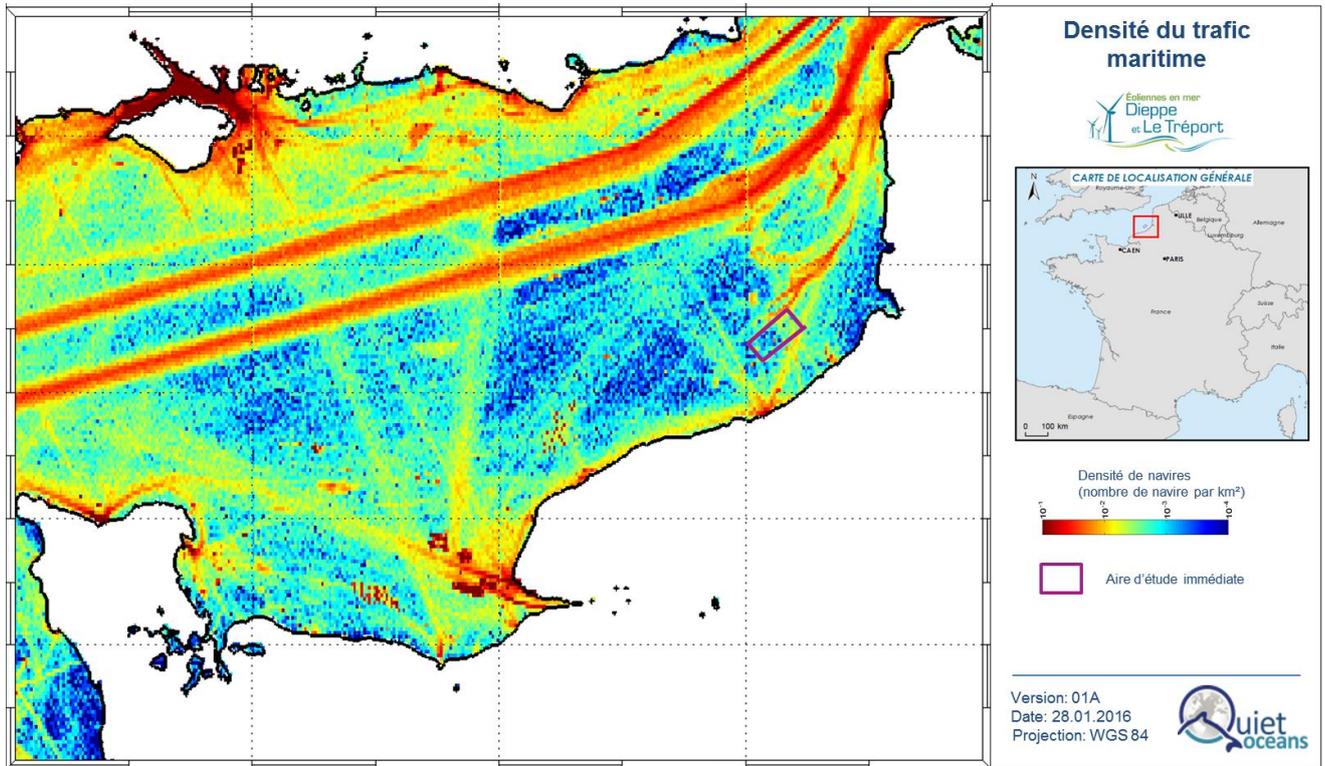
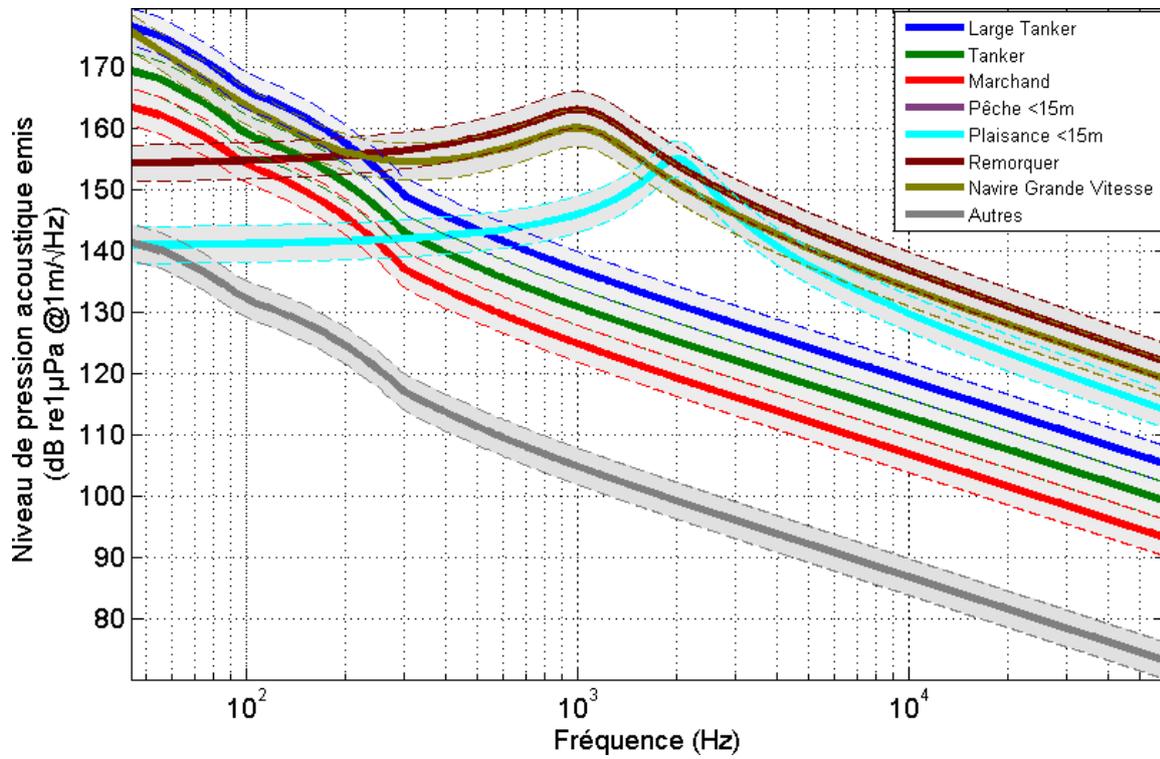


Figure 24 : Gabarit des niveaux de bruit émis par les navires en fonction de la fréquence et de leur catégorie.



Source : Quiet-Oceans

## 4.3 Le bruit ambiant mesuré sur le site

### 4.3.1 Structure du bruit ambiant existant

Le niveau sonore large bande mesuré par les quatre enregistreurs pendant la période juin 2015 à juin 2016 (Tableau 9, courbes bleues) montre la superposition :

- ▶ d'un bruit « permanent » (ou pied de bruit, courbe rouge Tableau 9) présentant une variabilité d'environ 15dB en R3 et R5, environ 12dB en R1, et environ 10dB en R2 (Figure 25). Le niveau de bruit large bande « permanent » est globalement compris entre 100 et 110dB aux points R1, R2 et R5, plus fort d'environ 9dB que le bruit mesuré au point R3.
- ▶ de bruits forts comportant une élévation de l'ordre de 30dB au-dessus du bruit permanent pendant des durées de l'ordre de 10 à 15 minutes, représentatif du passage de navires à proximité de l'hydrophone. L'anthropisation locale du bruit ambiant est très significativement plus élevée en R3 et R5, c'est-à-dire le nombre de passage de navires à proximité immédiate des hydrophones situés en R3 et R5 est significativement plus important que le nombre de passages à proximité immédiate des hydrophones placé en R1 et R2.

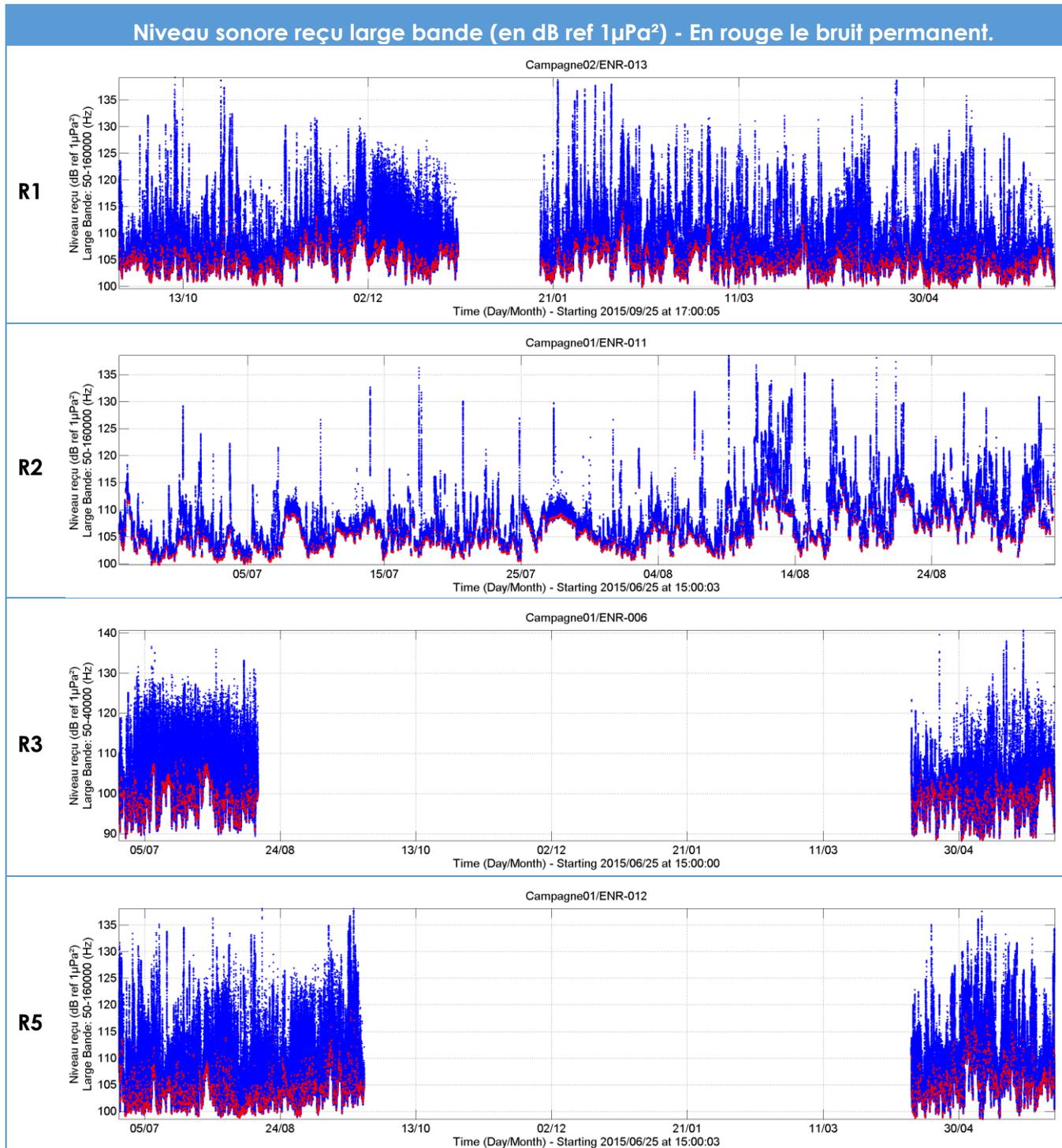
Les niveaux médians mesurés sur les hydrophones R1, R2 et R5 sont équivalents, et plus silencieux de 4 dB en R3 (Tableau 10, colonne 50%). De la même manière, les niveaux sonores engendrés par les passages des navires (Tableau 10, colonnes 10% et 1%) à proximité des hydrophones R1, R2 et R5 sont quasi-similaires, alors qu'ils sont inférieurs d'environ 4,5dB en R3. La Figure 25 donne également la distribution temporelle des niveaux sonores perçus large bande mais sous forme d'histogramme. Cette représentation met en évidence d'une part la répartition suivant une loi de Poisson des valeurs et d'autre part la faible variation statistique des niveaux perçus entre les points R1, R2 et R5 ( $\pm 2$ dB d'écart type). Le point R3, plus silencieux, offre une variabilité deux fois plus importante.

Pour chaque hydrophone, à partir des courbes du Tableau 9, le nombre moyen d'événements sonores anthropiques significatifs par jour c'est-à-dire ayant une émergence de 15 dB au-dessus du bruit permanent est très différent :

- ▶ 7 évènements par jour en R1 ;
- ▶ 3 évènements par jour en R2 ;
- ▶ 18 évènements par jour en R3 ;
- ▶ 12 évènements par jour en R5.

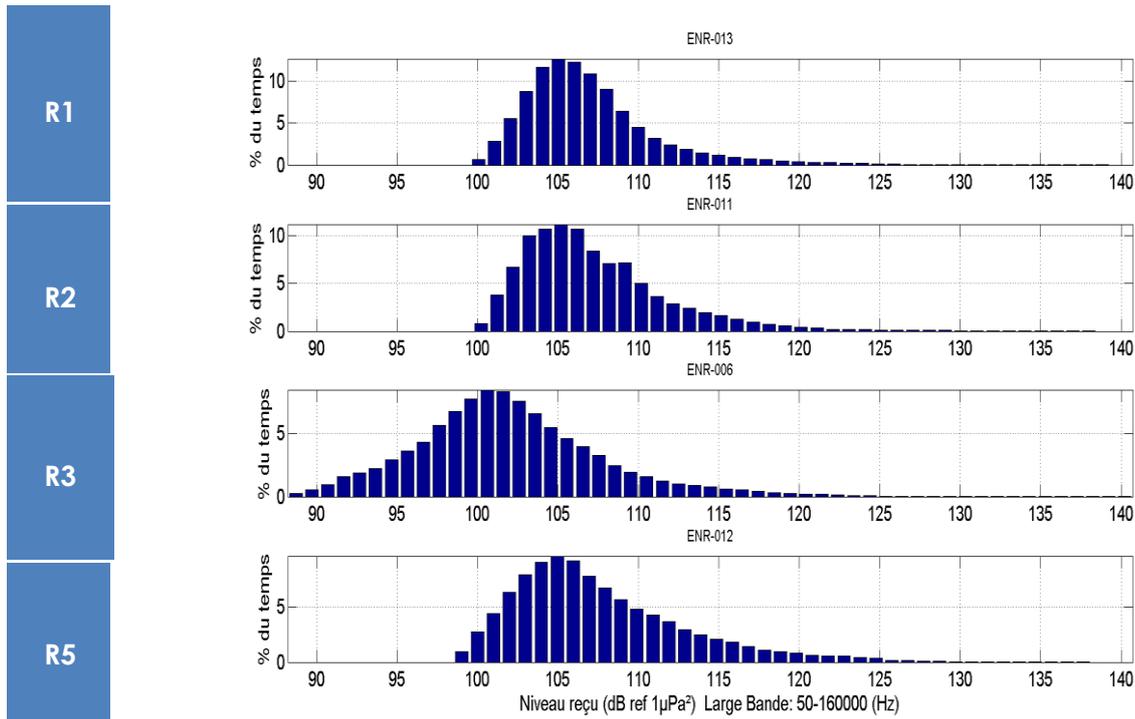
L'origine de ces bruits et évènements est analysée en partie suivante.

Tableau 9 : Niveau sonore reçu dans la bande de fréquence (50Hz-40kHz) par l'enregistreur R3, dans la bande de fréquence (50Hz-160kHz) par les enregistreurs R2 et R5 durant la période juin 2015 à juin 2016.



Source : Quiet-Oceans 2016

Figure 25 : Histogramme des niveaux perçus



Source : Quiet-Oceans 2016

Tableau 10: Niveau sonore (dB réf. 1µPa²) en fonction du point de mesure et de leur occurrence (quantile).

Point de mesure	Quantile						
	99%	90%	75%	50%	25%	10%	1%
<b>R1</b>	100,75	102,68	104,18	106,16	108,62	112,14	121,94
<b>R2</b>	100,80	102,55	104,06	106,32	109,43	113,39	123,88
<b>R3</b>	90,48	95,02	98,27	101,44	105,04	109,29	119,47
<b>R5</b>	99,54	101,81	103,77	106,42	110,37	115,04	124,52

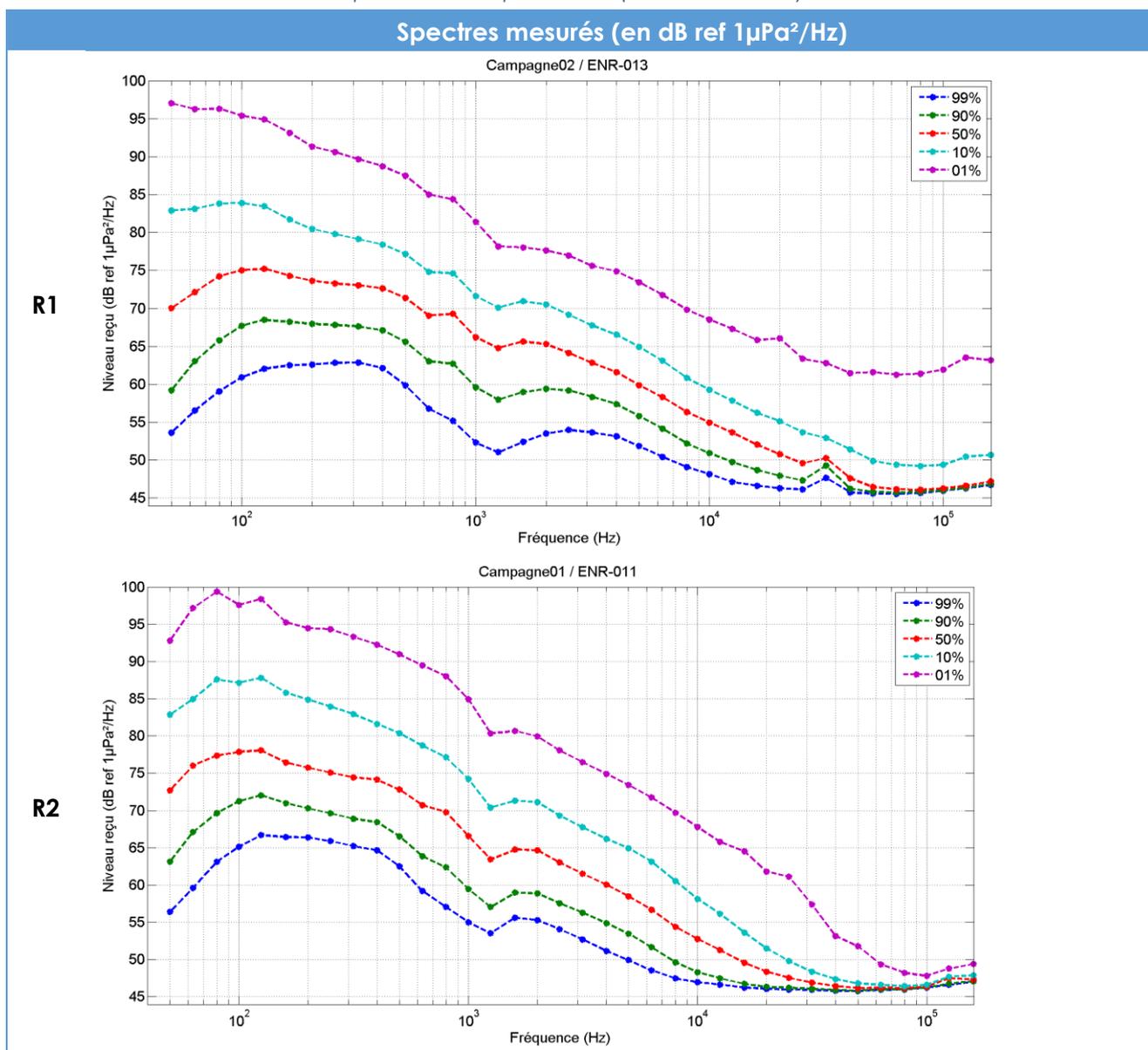
### 4.3.2 Analyse du bruit ambiant existant par bandes de fréquences

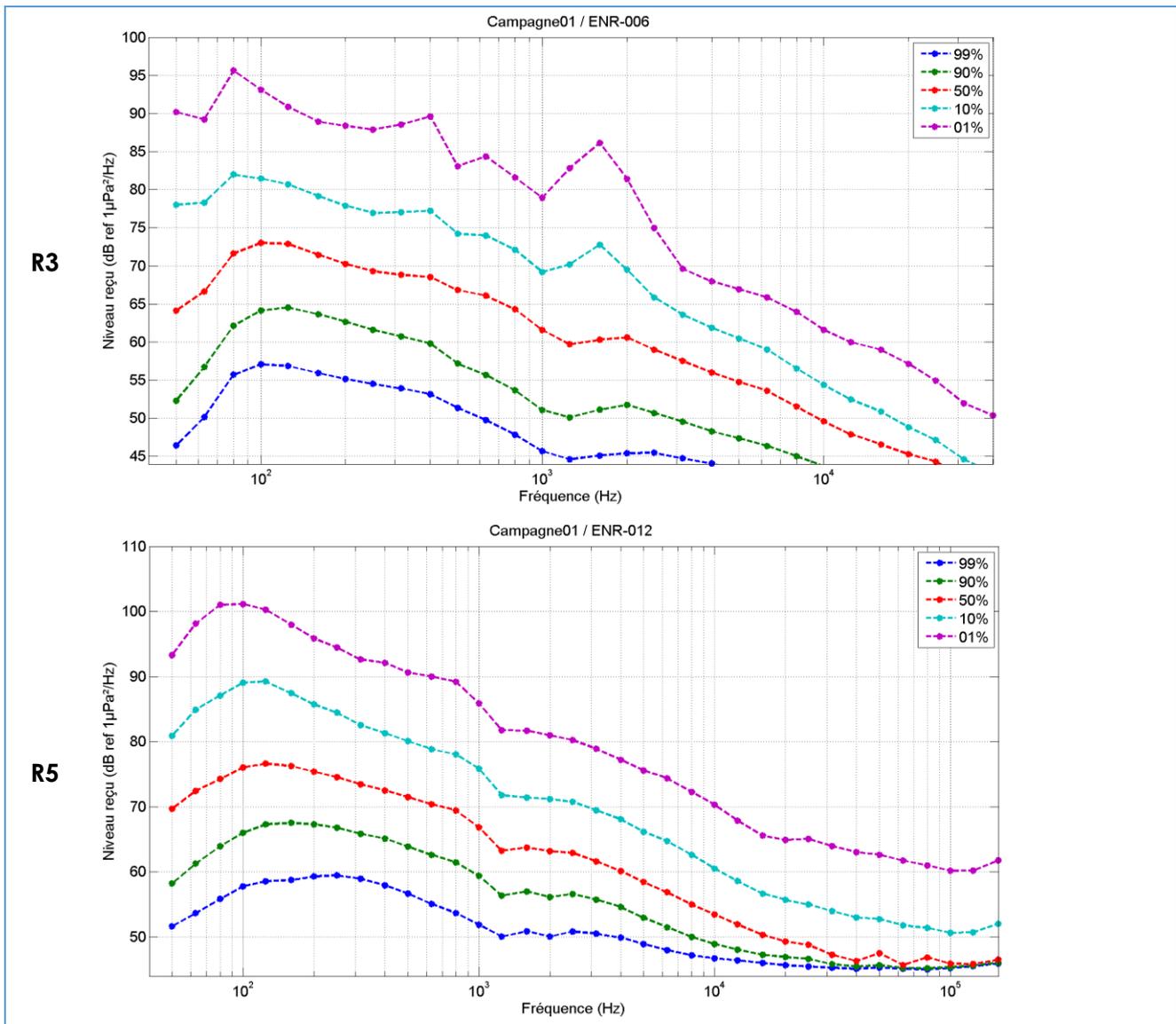
La distribution statistique du bruit mesuré en fonction de la fréquence (densité spectrale de puissance dB réf.  $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ ) est représentée sous la forme de percentiles sur la Figure 26 et est interprétée dans les paragraphes suivants. Les spectres mesurés sont globalement compatibles avec le modèle de Wenz (Wenz, 1962) tant du point de vue des niveaux que de la dépendance en fréquence. On distingue trois types de bruit ayant des propriétés acoustiques différentes :

- ▶ Bruits naturels ;
- ▶ Bruits de propulsion des navires ;
- ▶ Bruits des sondeurs installés à bord des navires.

La contribution au bruit ambiant des bruits générés par les organismes biologiques n'est toutefois pas identifiable dans cette mesure. A l'échelle de la campagne de mesure, ces signaux biologiques impulsionnels ou transitoires sont faibles en intensité et en nombre.

Figure 26 : Niveaux d'énergie (par Hz) mesurés sur les enregistreurs acoustiques pour différents taux de probabilité ou percentiles (1, 10, 50, 90, 99%).





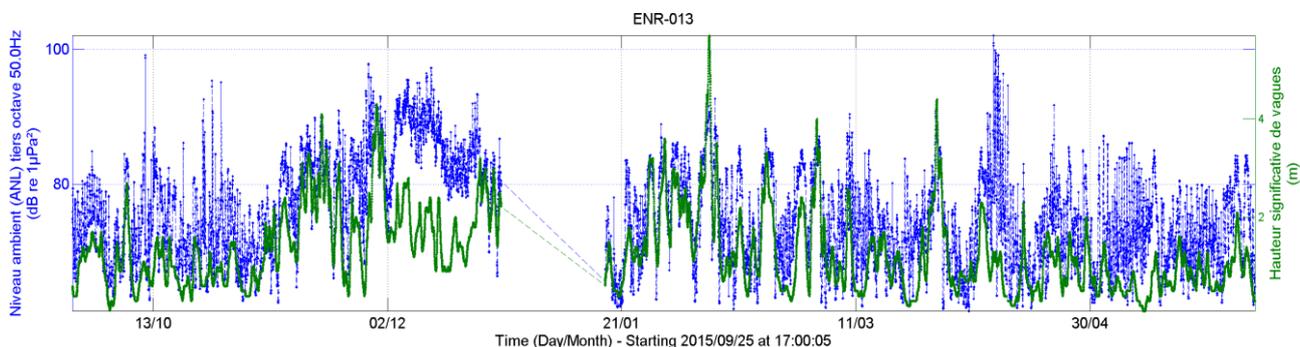
Source : Quiet Oceans

#### 4.3.2.1 Bruits naturels

Les bruits naturels sont généralement décrits par les percentiles supérieurs à 50% et de façon prédominante dans la bande de fréquence inférieure à 1kHz. C'est le cas pour les enregistreurs R3 et R5 (Figure 26). A titre d'illustration, le bruit mesuré en R1 dans la bande dans le tiers d'octave autour de 50Hz est corrélé aux fluctuations de la hauteur significative de vagues renseignées au port de Dieppe (modèle NOAA WaveWatch III) (Figure 27). Le bruit prédominant dans cette bande de fréquence est donc d'origine naturelle engendré par les vagues par conséquence au déplacement sédimentaire.

Sur l'hydrophone R5, il existe une corrélation entre l'intensité des courants de marée et le bruit mesuré introduisant des différences significatives de l'ordre de 10 dB. L'augmentation du bruit est majoritairement observée lors des phases montante et descendante. Les courants induits par le marnage induisent probablement un déplacement de sédiment (charriage) forte à proximité de l'hydrophone et ainsi engendre par frottement un bruit supplémentaire.

Figure 27 : Comparaison entre le niveau de bruit résiduel dans le tiers d'octave 50Hz pour l'enregistreur R1 (en bleu) et le profil de hauteur de vagues (exprimé en m, en vert).



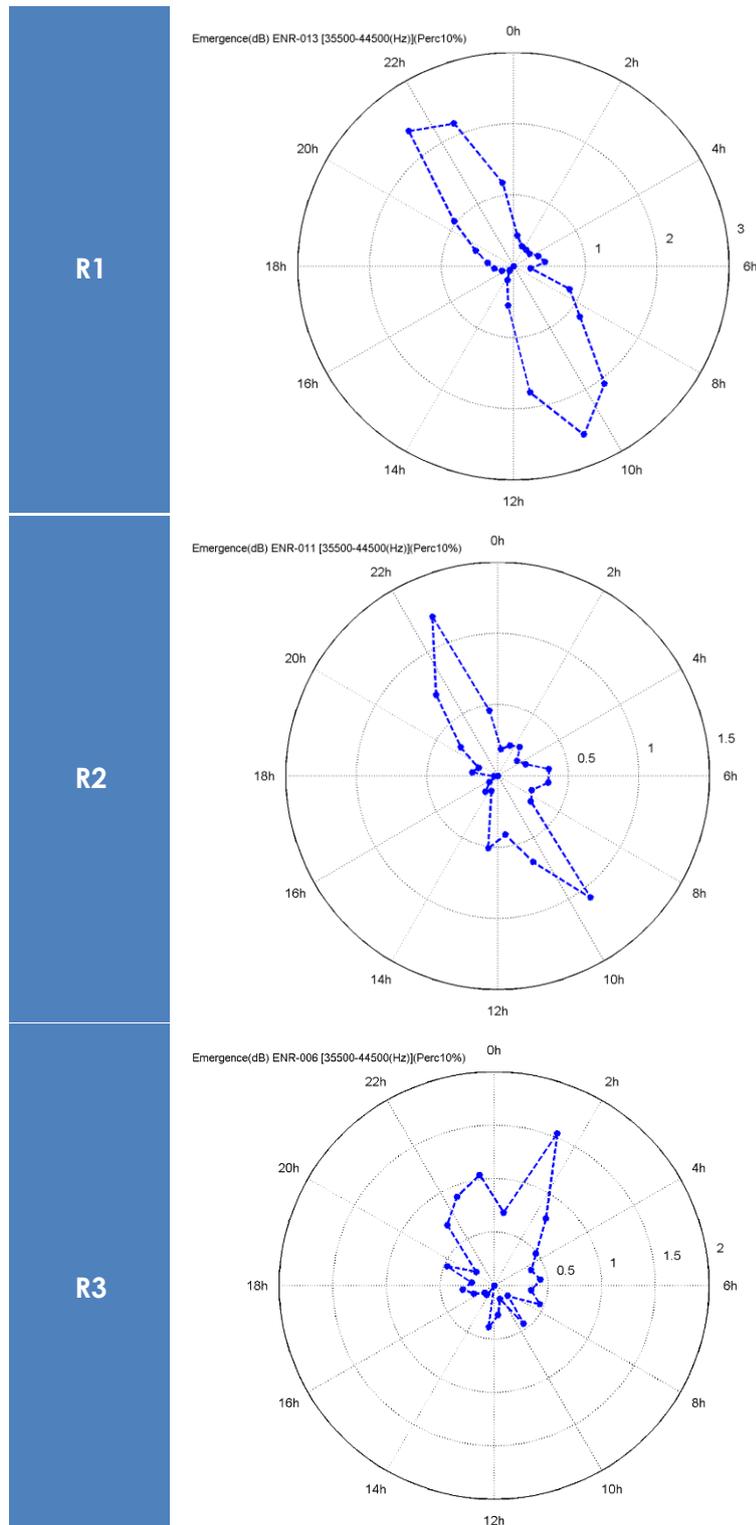
#### 4.3.2.2 Bruits de propulsion des navires

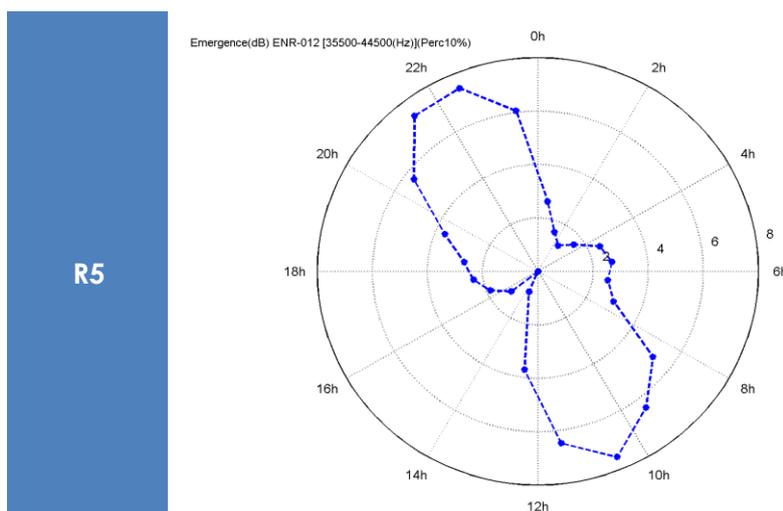
En R2, les niveaux de bruit permanents (percentiles inférieurs à 50%) dans la bande de fréquence entre 70Hz et 1kHz sont plus importants d'environ 9dB et 5dB respectivement par rapport à R5 et R1 (Figure 26). Cela est la signature d'un bruit de fond anthropique provenant vraisemblablement du rail de trafic maritime situé au nord et décroissant en se rapprochant de la côte. Les bruits générés par les navires passant à proximité de l'enregistreur (percentiles inférieurs à 75%) sont similaires dans cette même bande de fréquence.

#### 4.3.2.3 Bruits des sondeurs installés à bord des navires

L'analyse des bruits dans la bande de fréquence autour de 40kHz montre des variations significatives en fonction de l'heure de la journée sur les quatre enregistreurs, et de façon encore plus prononcée en R5 où les augmentations peuvent atteindre 7dB 10% du temps. Ces bruits sont les bruits des sondeurs installés à bord des navires. L'analyse temporelle illustrée Figure 28 montre que cette intensification se concentre dans des créneaux horaires réguliers autour de 10:00 UTC et 22:00 UTC sur les hydrophones en R1, R2 et R5. Cette élévation peut correspondre aux heures préférentielles d'une activité de pêche sur ces sites. En R3, l'émergence est plus faible (~1dB) et se situe dans le créneau 22:00 à 02:00 h UTC.

Figure 28 : Emergences sonores journalières indicatrices des bruits des échosondeurs au 10ième percentile dans la bande autour de 40kHz.





R5

## 4.4 Synthèse sur les mesures de bruit ambiant

A partir de l'ensemble de ces données acoustiques collectées in situ dans les aires d'étude immédiate et éloignée, à savoir 3616 heures de données cumulées, nous pouvons établir que :

- ▶ le bruit ambiant à une valeur médiane comprise entre 101 et 106 dB ref  $1\mu\text{Pa}^2$ , valeur homogène à l'échelle de l'aire d'étude éloignée (incluant l'aire d'étude immédiate) ;
- ▶ 1% du temps, le bruit ambiant à une valeur supérieure ou égale à 119 (en R3) et 125 dB ref  $1\mu\text{Pa}^2$  (en R5),
- ▶ Les écarts maximums du bruit ambiant peuvent atteindre jusqu'à 35 dB en fonction de l'instant et du point de mesure ;
- ▶ le bruit ambiant montre une prédominance des fréquences inférieures à 200 Hz dues au bruit engendré par le trafic maritime ;
- ▶ le rail de circulation (DST) engendre une élévation de l'ordre de 9 dB du bruit permanent dans la bande de fréquence de 70 Hz à 1 kHz au nord de l'aire d'étude éloignée ;
- ▶ une émergence pouvant aller jusqu'à 8 dB d'une activité de pêche régulière en R5 est observable à des heures préférentielles ;
- ▶ le bruit permanent est fortement proportionnel à la hauteur de vagues dans les fréquences inférieures à 1 kHz ;
- ▶ le bruit augmente sensiblement (environ 10 dB) pendant les phases montante et descendante de la marée en R5, témoin vraisemblable de déplacement de sédiment sous l'effet des courants.

# 5 Cartographie sonore initiale





## 5.1 Calibration des cartes sonores

Les mesures d'acoustique passive réalisées ne sont représentatives que de l'endroit et de l'immersion du capteur. Afin d'établir une cartographie du bruit ambiant, ces mesures sont assimilées dans le système de prévision sonore Quonops® qui permet de prendre en compte :

- ▶ le trafic maritime réel dans la l'aire d'étude large ;
- ▶ et les effets environnementaux sur la propagation sonore sous-marine.

A partir des données AIS recueillies pendant la période du 26/06/2015 au 26/07/2015, des données océanographiques récoltées, des données d'acoustique passive mesurées aux points de mesure R2, R3 et R5, une modélisation synchrone a permis de calibrer les prévisions de bruit réalisées par Quonops®. Une prédiction est réalisée pour ces instants caractéristiques et pour la fréquence centrale de chaque octave. Pour chaque octave, les courbes statistiques des niveaux mesurés et prédits permettent d'en déduire l'écart en dB, ces valeurs sont reportées dans le Tableau 11. Les écarts n'ont pas été évalués pour les octaves supérieures à 2 000 Hz.

Tableau 11 : Erreur moyenne résiduelle sur l'estimation des bruits anthropiques statistiques après calibration en fonction de la fréquence.

Fréquence centrale de l'octave (Hz)	63	125	250	500	1000	2000
<b>Erreur résiduelle moyenne (dB)</b>	3,25	3,60	4,05	3,40	3,80	3,95

Les mesures d'acoustique active ont été comparées aux prévisions réalisées par Quonops® pour un ensemble de natures du fond. L'objectif de cette campagne de mesure est de calibrer le modèle Quonops® en estimant le milieu équivalent acoustique dans l'aire d'étude immédiate. Après comparaison des prédictions et des traitements de la mesure, le milieu équivalent est défini et introduit dans le modèle Quonops® au titre de la calibration active du site. Les caractéristiques les plus proches obtenues sont reportées dans le Tableau 12. Ces caractéristiques géo-acoustiques correspondent à un milieu acoustiquement équivalent à des fonds de type « sable fin, sable graveleux » et sont en adéquation avec les observations in situ et la description fournie par le SHOM (Figure 4).

Tableau 12 : Caractéristiques géo-acoustiques du fond dans l'aire d'étude immédiate, obtenues après inversion des données de calibration active du système Pulse®.

Aire d'étude	Localisation	Paramètres géo-acoustiques du sédiment		
		Densité (tonne/m <sup>3</sup> )	Vitesse de compression (m/s)	Atténuation de compression (dB/λ <sup>5</sup> )
<b>R2, R3, R5</b>	Aire d'étude éloignée	1,8	1750	0,7

<sup>5</sup> λ est la longueur d'onde acoustique exprimée en mètre

## 5.2 Atlas sonore saisonnier

Une représentation cartographique des niveaux de bruit ambiant est proposée dans les paragraphes suivants. Toutefois, seules les saisons estivale et hivernale sont représentées car d'une part, elles mettent en évidence les situations extrêmes à l'échelle de l'année et d'autre part, les différences entre les saisons extrêmes ne sont pas extrêmement marquées. L'atlas saisonnier est composé des éléments suivants :

- ▶ un tableau de synthèse des niveaux sonores statistiques saisonniers dans l'aire d'étude immédiate ;
- ▶ un ensemble de cartes couvrant l'aire d'étude large des niveaux sonores statistiques en été ;
- ▶ un ensemble de cartes couvrant l'aire d'étude large des niveaux sonores statistiques en hiver.

### 5.2.1 Niveau sonore dans l'aire d'étude immédiate

Le Tableau 13 donne, pour chaque saison, la statistique des niveaux sonores prédits par modélisation dans l'aire d'étude immédiate après calibration des cartes de l'état initial par les mesures in situ disponibles dans les aires d'étude immédiate et éloignée. On observe une légère diminution du bruit en été en comparaison des trois autres saisons qui peut s'expliquer par les conditions océanographiques moins favorables à la propagation du son sous-marin.

Tableau 13 : Synthèse statistique des niveaux sonores prédits dans l'aire d'étude immédiate (niveau large bande en dB ref  $1\mu\text{Pa}^2$  entre 45Hz et 89kHz)

Saison	Couche d'eau	Percentile (%)								
		100	99	90	75	50	25	10	1	0
		<i>Niveaux planchers</i>			<i>Niveaux médians</i>			<i>Niveaux les plus exceptionnels</i>		
Hiver	Toute la colonne	94,9	99,0	103,6	106,8	109,5	112,0	114,3	119,7	135,3
Printemps	Toute la colonne	95,8	99,5	104,5	107,3	110,1	112,7	115,0	119,2	126,7
Été	Toute la colonne	95,4	99,3	103,1	105,5	107,9	110,4	112,9	116,5	120,1
Automne	Toute la colonne	95,8	98,9	103,4	105,9	108,3	110,6	112,7	117,1	120,9

### 5.2.2 Guide de lecture des cartes de bruit ambiant

L'atlas sonore est détaillé dans les paragraphes suivants. Les cartes de bruit large bande (63 Hz à 63 kHz) sont établies et représentées par percentile. Aussi, une carte de bruit pour un percentile N représente les zones géographiques pour lesquelles la probabilité d'obtenir un niveau sonore supérieur au niveau donné par le code de couleur est de N%. L'atlas sonore saisonnier est établi pour les percentiles 75%, 50%, 25%, 10% et 1%. Plus le percentile est élevé, plus il représente un niveau sonore fréquent. A titre d'exemple, le percentile X% donne la probabilité ou la proportion du temps et/ou de l'espace d'obtenir un niveau sonore supérieur ou égal à un niveau sonore donné.

### 5.2.3 Analyse globale du bruit cartographié

Les bruits large bande générés par le trafic maritime international dans l'axe de la Manche diffusent du bruit anthropique vers l'aire d'étude immédiate de façon quasi-permanente pour des valeurs généralement comprises entre 105,5 et 112,7 dB ref  $1\mu\text{Pa}^2$  pour les percentiles entre 75 et 25%. Ce bruit est toutefois atténué par les conditions environnementales notamment à l'approche du littoral lorsque la profondeur diminue. L'aire d'étude éloignée offre des niveaux significativement moins intenses en comparaison des niveaux susceptibles d'être mesurés sur l'ensemble de l'aire d'étude large.

Les cartes statistiques de bruit démontrent que les bruits permanents sont globalement plus faibles vers le sud-est de l'aire d'étude immédiate. Des effets environnementaux (principalement la bathymétrie) limitent la propagation des bruits anthropiques importants qui sont générés par le trafic maritime au nord de cette aire.

L'émergence sonore du trafic maritime de et vers le port de Dieppe est perceptible environ 10% du temps et est limitée à l'axe d'accès qui passe au sud-ouest de l'aire d'étude immédiate.

Les cartes obtenues et détaillées ci-après serviront de base à l'estimation des empreintes sonores du parc éolien, c'est-à-dire à estimer les volumes dans lesquels le bruit des activités du projet dépasse les niveaux médians obtenus par l'étude de l'état initial et ainsi l'exposition des espèces.

#### 5.2.3.1 Cartographie statistique du bruit ambiant en été

Les cartes de bruit ambiant statistique large bande en été sont présentées dans les pages suivantes. Elles traduisent la quantité totale d'énergie sonore présente dans le milieu marin, sans considération des espèces susceptibles de percevoir une fraction de cette énergie. Elles représentent dans l'ordre les percentiles 10%, 25%, 50% (niveaux médians), 75% sur la période allant du 21 juin au 20 septembre 2015. Les niveaux de bruit en été sont significativement moins élevés (de 1,6 à 3 dB en fonction du percentile) que pour les autres saisons, mais la distribution spatiale générale du bruit dans l'aire d'étude large est globalement similaire quelle que soit la saison.

L'aire d'étude immédiate est située dans une zone notablement moins bruyante que le reste du bassin Manche orientale. Cela peut s'expliquer par la réduction de bathymétrie et par l'absence de port de commerce générateur de trafic acoustiquement significatif, absent de la carte au percentile 10% qui traduit les émergences sonores les plus importantes. A contrario, les émergences sonores liées au trafic entrant et sortant des ports du Havre et Southampton sont notables plus de 50% du temps puisque identifiables sur les cartes de percentiles 10%, 25% et 50%. Le bruit lié au trafic d'accès au port de Dieppe émerge environ 10% du temps en été. Le trafic principal au centre de la Manche domine de façon quasi-permanente le bruit autour des axes de circulation montants et descendants.

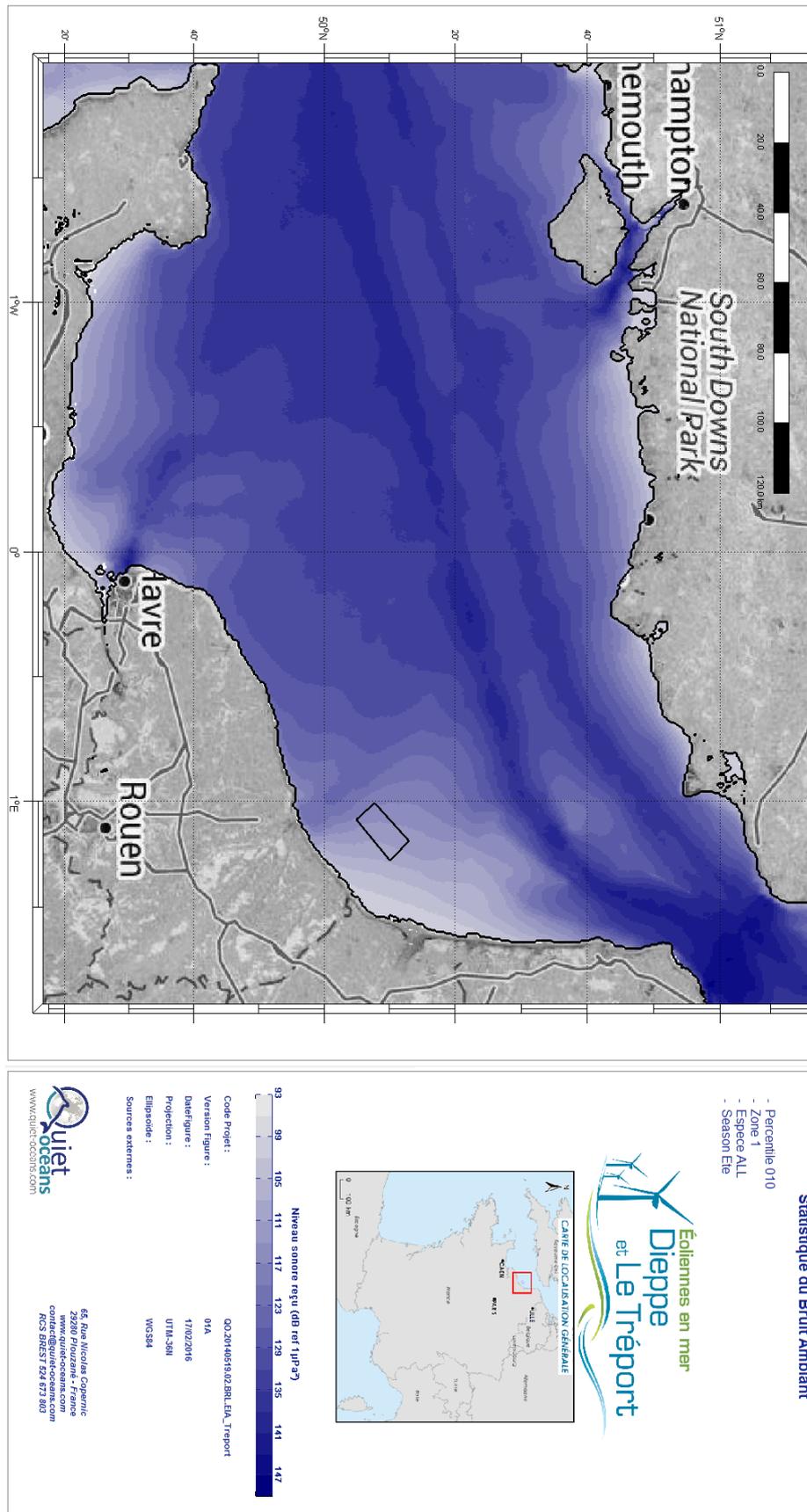


Figure 29 : Carte statistique du bruit ambiant en été (percentile 10%)

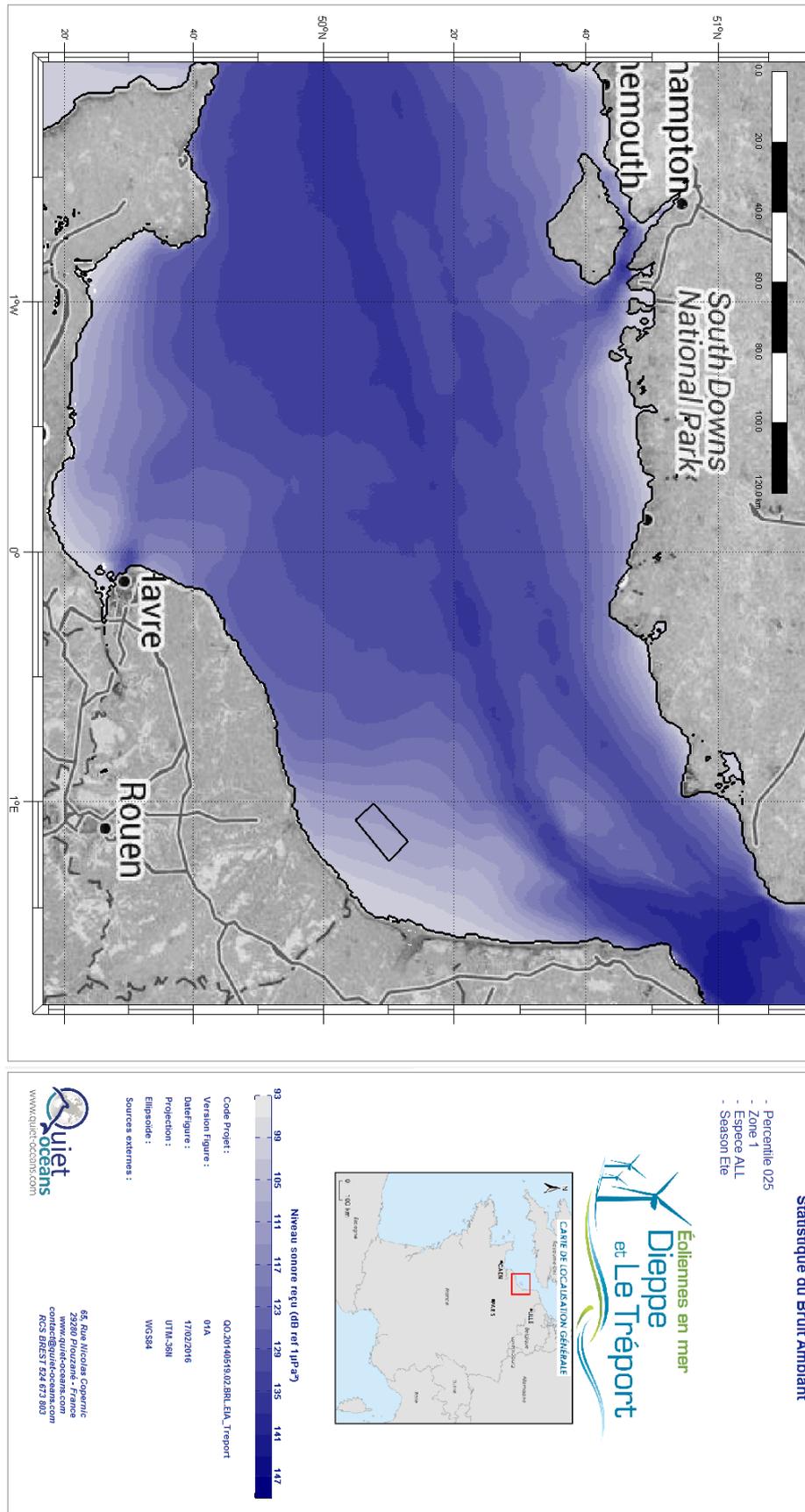


Figure 30 : Carte statistique du bruit ambiant en été (percentile 25%)

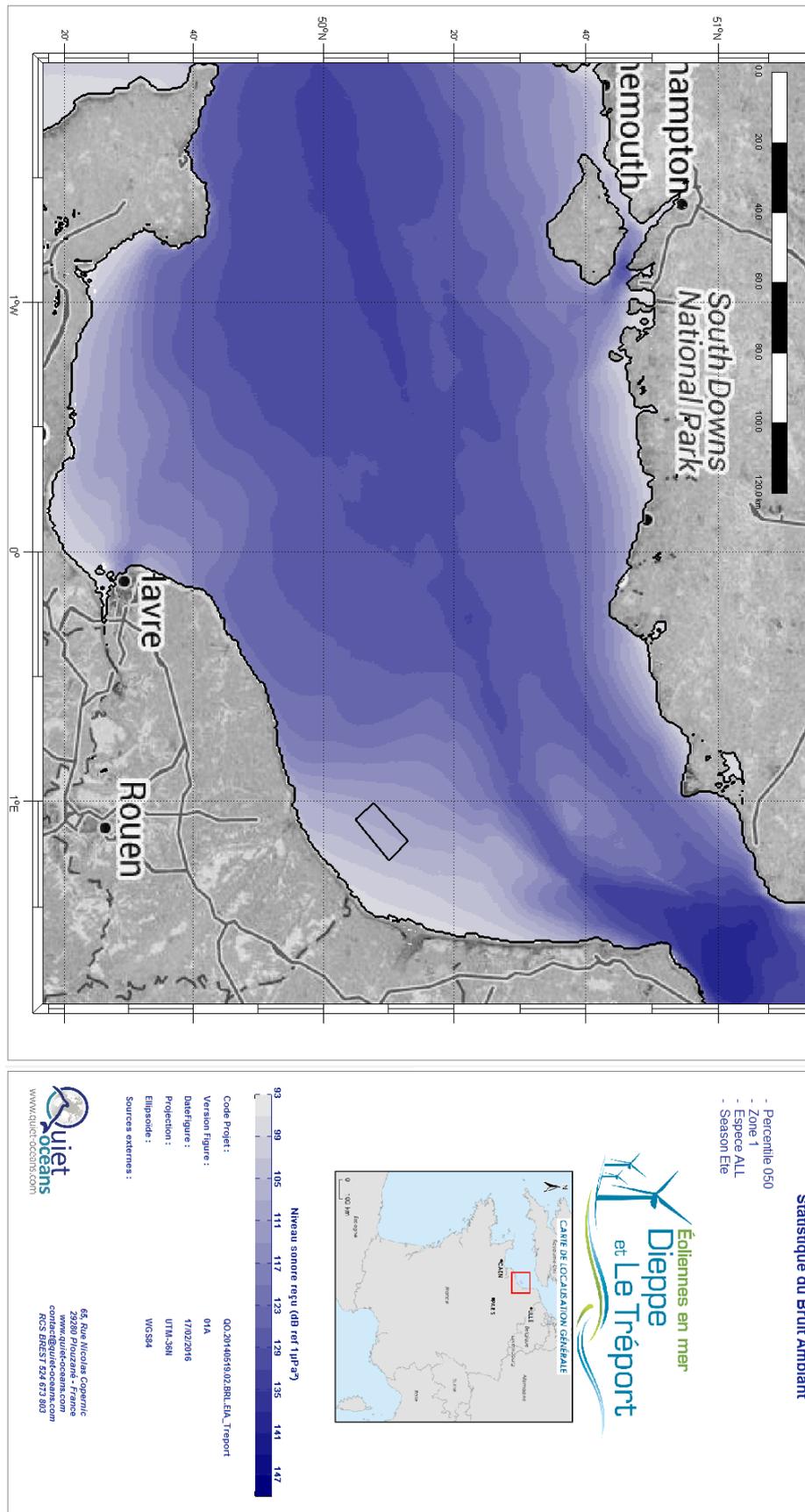


Figure 31 : Carte statistique du bruit ambiant en été (percentile 50%)

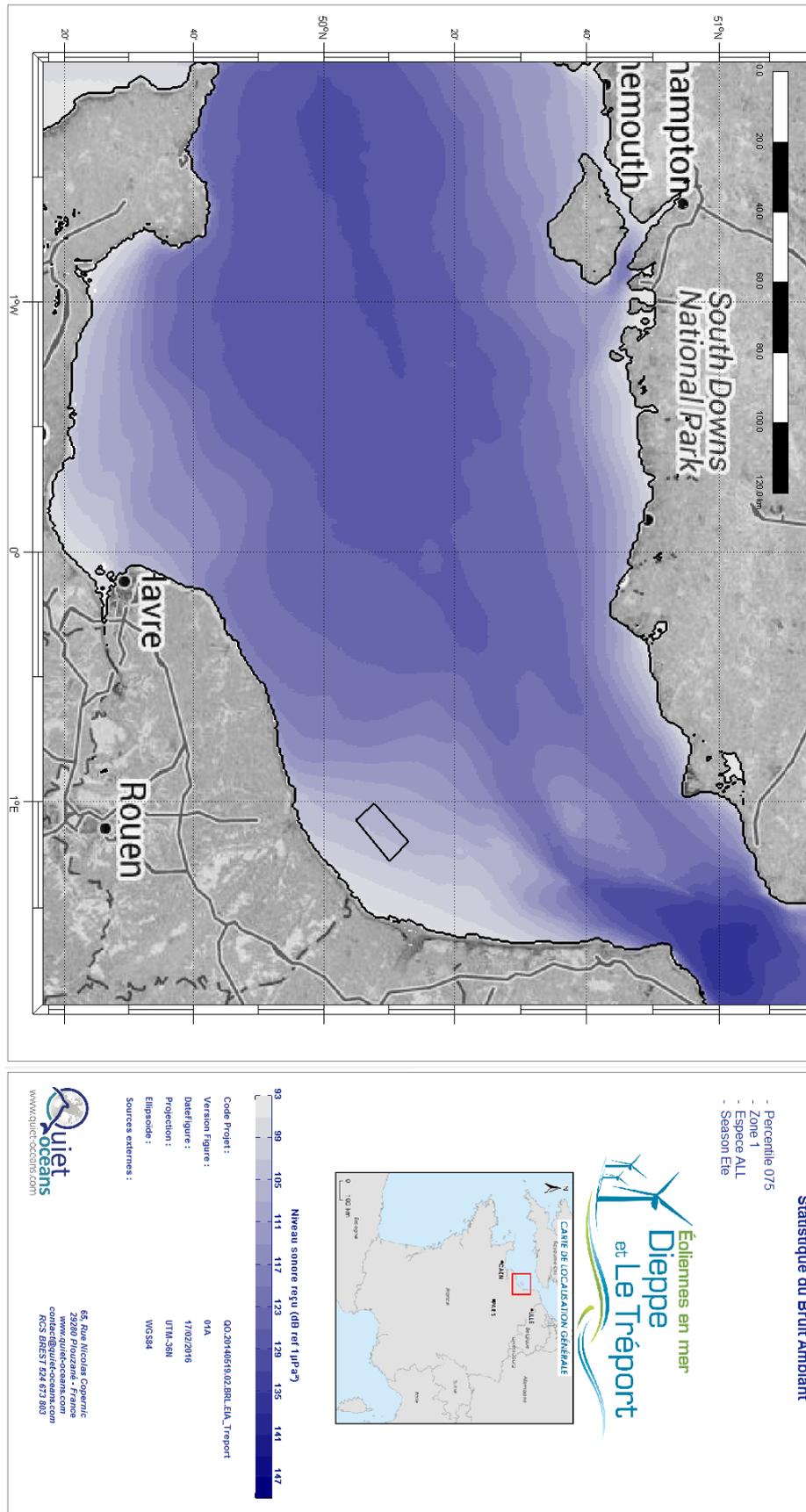


Figure 32 : Carte statistique du bruit ambiant en été (percentile 75%)

### 5.2.3.2 Cartographie statistique du bruit ambiant en hiver

Les cartes de bruit ambiant statistique large bande en hiver sont présentées dans les pages suivantes. Elles traduisent la quantité totale d'énergie sonore présente dans le milieu marin, sans considération des espèces susceptibles de percevoir une fraction de cette énergie. Elles représentent dans l'ordre les percentiles 10%, 25%, 50% (niveaux médians), 75% sur la période allant du 21 décembre 2015 au 21 mars 2016. Les niveaux de bruit en hiver sont significativement plus élevés (de 1,6 à 3 dB en fonction du percentile) que pour les autres saisons, mais la distribution spatiale générale du bruit dans l'aire d'étude large est globalement similaire quelle que soit la saison.

Le trafic d'accès aux ports principaux du Havre et de Southampton émergent moins de 50% du temps car sa signature sonore est visible sur les cartes du 10<sup>ième</sup> et 25<sup>ième</sup> percentile. Le bruit lié au trafic d'accès au port de Dieppe émerge environ 10% du temps en hiver. Le trafic principal au centre du bassin de la Manche domine uniquement 75% du temps le bruit autour des axes de circulation montants et descendants.

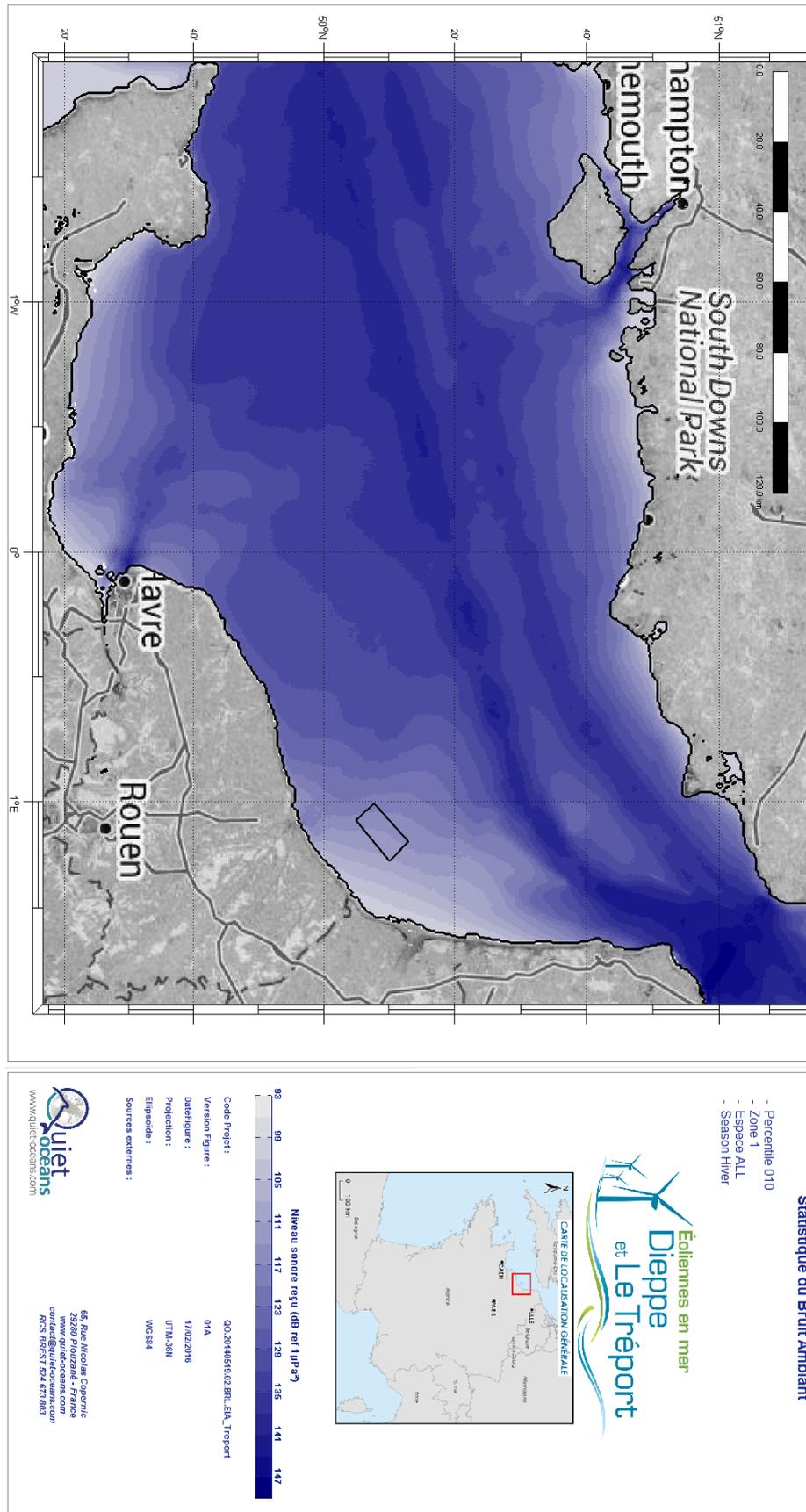


Figure 33 : Carte statistique du bruit ambiant en hiver (percentile 10%)

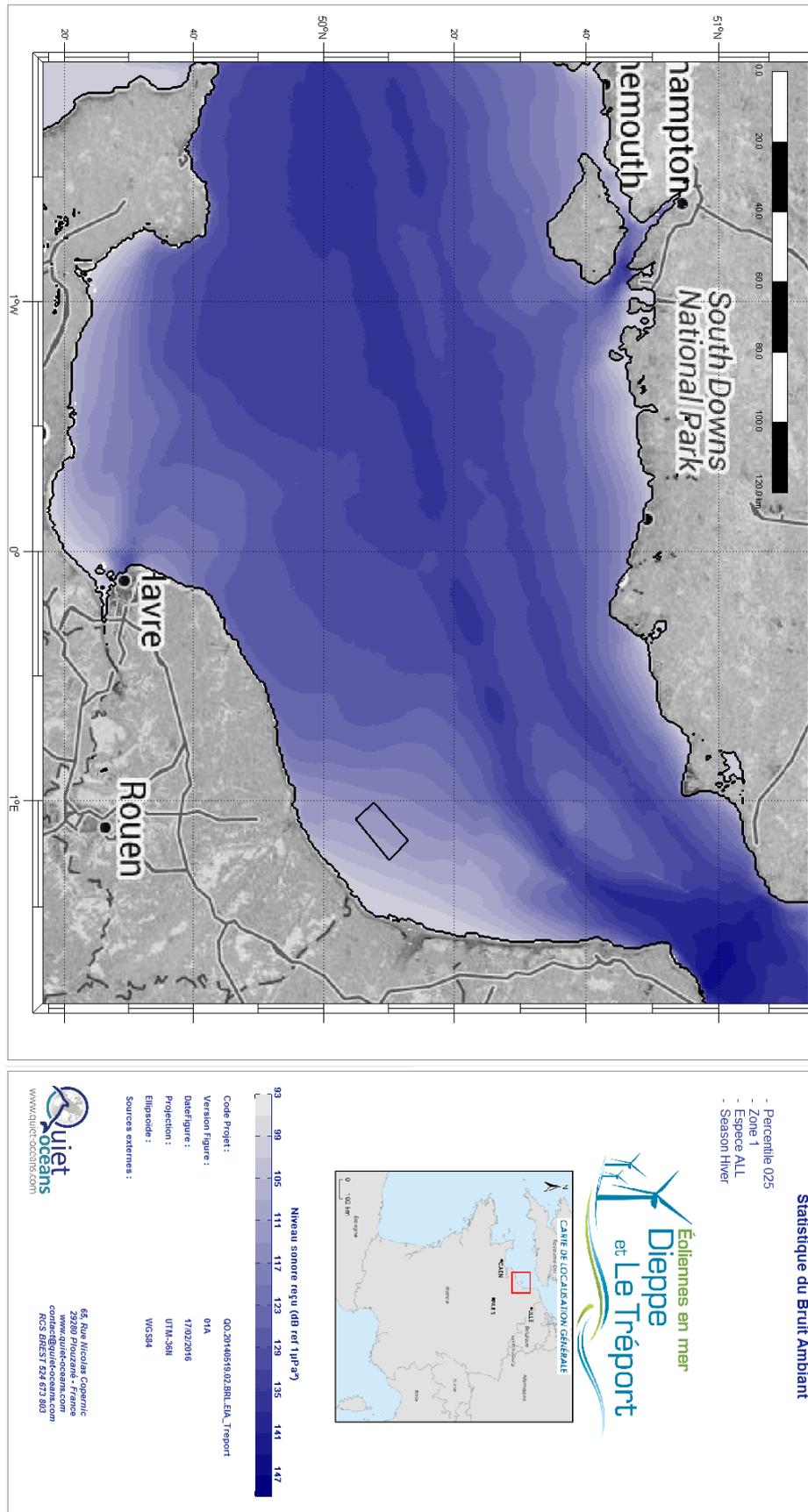


Figure 34 : Carte statistique du bruit ambiant en hiver (percentile 25%)

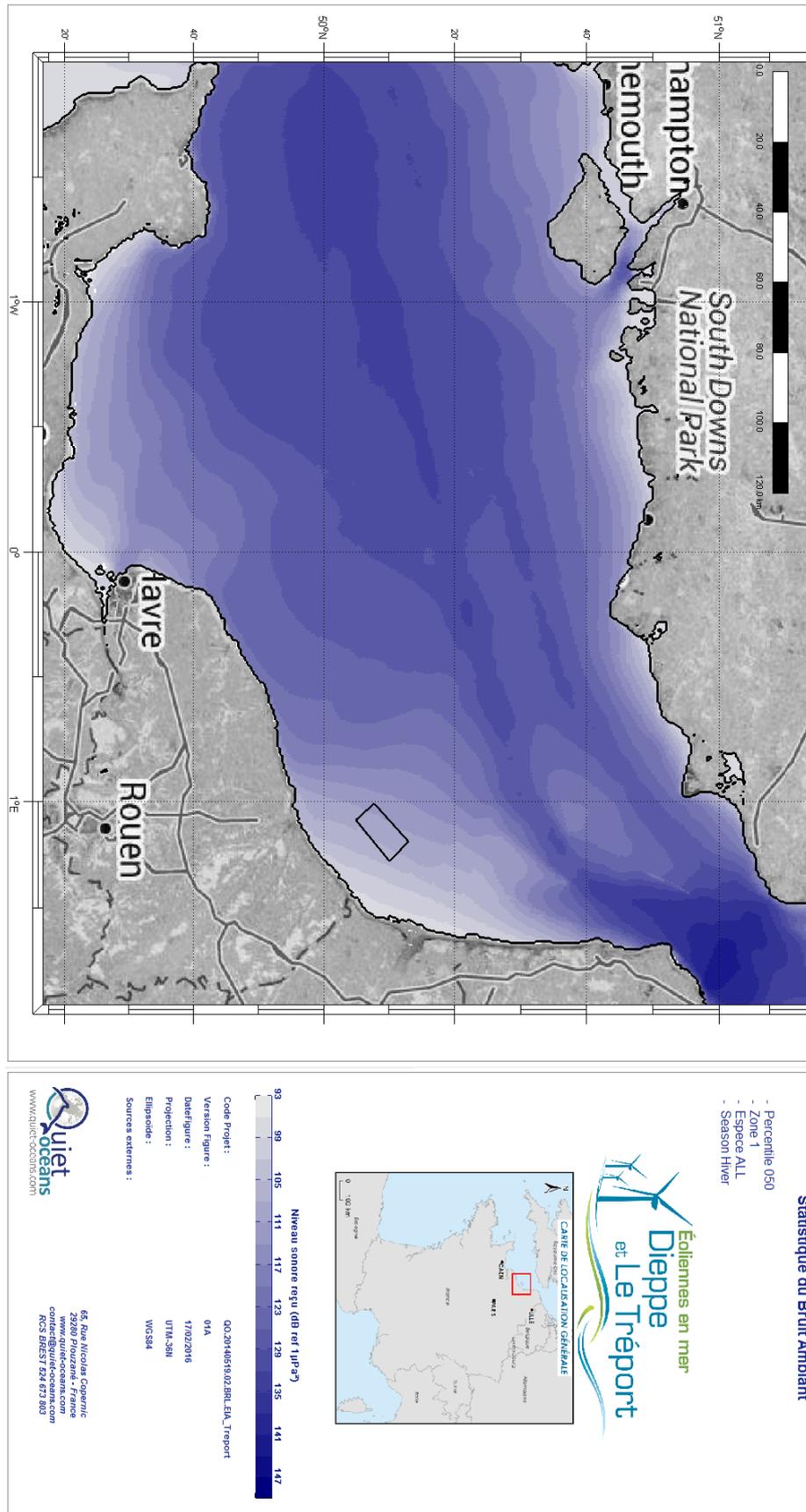


Figure 35 : Carte statistique du bruit ambiant en hiver (percentile 50%)

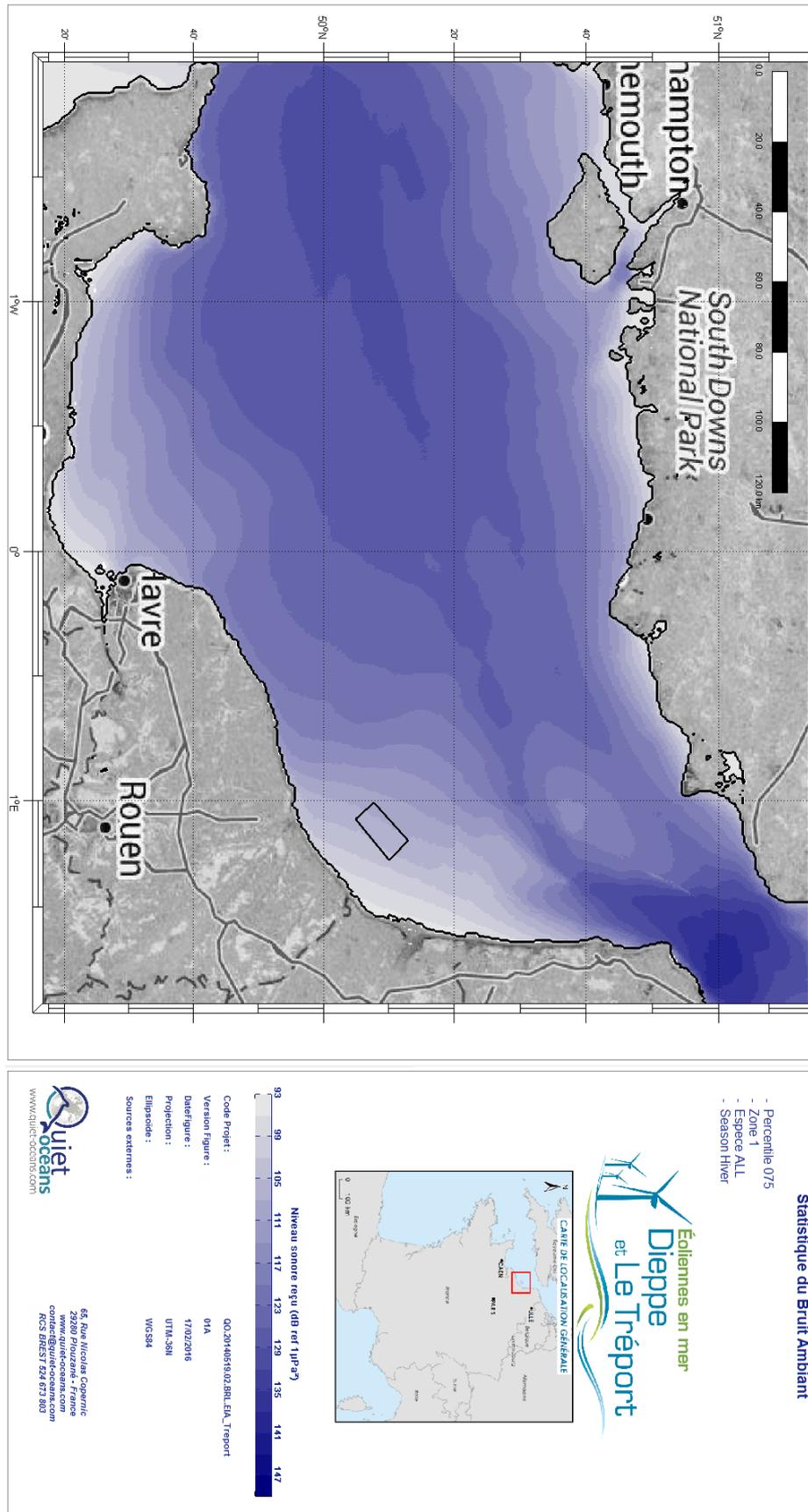


Figure 36 : Carte statistique du bruit ambiant en hiver (percentile 75%)

# 6 Caractérisation des bruits introduits par les activités du projet





Au bruit initial calibré, caractérisé dans l'état initial, se rajoutent les bruits liés spécifiquement aux travaux de construction, d'exploitation et de démantèlement du parc éolien en mer. Ces bruits, générés par les différentes techniques mises en œuvre, sont de nature impulsionnelle ou continue. Le cumul des bruits initiaux et des bruits liés au projet forme une série d'états sonores perturbés.

L'objectif de ce chapitre est de fournir une caractérisation des bruits introduits par les activités du projet. Aussi, ce chapitre regroupe :

- une description des techniques des différentes phases des travaux d'extension, appelés scénarios ;
- la caractérisation acoustique des niveaux à la source de chaque technique individuellement, telle qu'elle est prise en compte par Quonops© pour les prévisions.

## 6.1 Scénarios descriptifs du projet

Le maître d'ouvrage prévoit l'installation d'un parc éolien constitué de 62 éoliennes au large de Dieppe et du Tréport en vue de son exploitation. Différentes phases peuvent être décrites :

- les opérations de construction ;
- l'exploitation du parc éolien en mer ;
- la maintenance à partir du port de Dieppe ;
- Le démantèlement.

Les scénarios traités sont les suivants (tableau suivant):

- La préparation du sol à l'emplacement des éoliennes (par simplification, il a été considéré ici la technique de dragage) ;
- le forage des pieux d'une fondation jacket pour chaque éolienne ;
- le battage des pieux d'une fondation jacket pour chaque éolienne ;
- le forage des pieux de la fondation jacket du poste électrique en mer;
- le battage des pieux de la fondation jacket du poste électrique en mer;
- l'ensouillage des câbles sur l'ensemble du parc éolien ;
- le trafic induit par l'ensemble des travaux au sein ou à proximité du parc ;
- le fonctionnement des 62 éoliennes ;
- le trafic induit par la circulation des bateaux de maintenance du parc éolien ;
- le démantèlement<sup>6</sup>.

Il n'existe pas de retour d'expérience sur le démantèlement de fondation Jacket de parc éolien. Le premier parc démantelé l'a été dans le courant de l'année 2016 et il n'y a pas encore eu à notre connaissance de publication. Il s'agit d'un parc de 2 MW constitué de 4 éoliennes installées sur des fondations monopieu sur le site de Lely à IJsselmeer au Pays-Bas. Dès lors, il est probable que les opérations de démantèlement (découpe des pieux) soit plus bruyante que la phase d'exploitation du parc. Néanmoins, les émissions sonores seront bien moins bruyantes que la phase de construction et notamment des opérations de battage.

<sup>6</sup> Non traité dans cette étude par manque de données descriptives des activités

Tableau 14 : Synoptique des ateliers constituant les scénarios du projet.

Phase	Atelier	Caractéristiques	Opération	Commentaire
Construction - Travaux	Préparation	Aplanissement	Dragage	
	Fondations des éoliennes	Jacket avec pieux de 2,2m de diamètre	Forage Battage	
	Fondation du poste électrique en mer	Jacket avec pieux de 3,0m de diamètre	Forage Battage	
	Support logistique à la mise en place des fondations		Navires	
Exploitation	Câblage interne	-	Ensouillage	
	Fonctionnement du parc	62 éoliennes	Rotation des éoliennes	
	Trafic lié aux opérations de maintenance		Navires	Scénario similaire au support logistique à la mise en place des fondations

## 6.2 Caractérisation des sources de bruit liées à la construction du parc éolien en mer

En l'absence de calibration in situ des sources de bruit du projet, l'objectif de cette analyse acoustique est de fournir les ordres de grandeur liés au choix des techniques mises en œuvre pour la construction du parc éolien de Dieppe - Le Tréport. Chaque technique utilisée présente un mode opératoire spécifique (technique, niveaux de bruit introduit dans le milieu marin, durée, etc.). Ces spécificités sont prises en compte dans la modélisation des sources de bruits réalisées dans le cadre de cette étude. Il est important de réaliser que les hypothèses de niveaux de bruit émis utilisées dans le cadre de cette étude sont issues de la littérature disponible.

### 6.2.1 Bruit généré par le dragage

Il n'existe pas de retour d'expérience sur les niveaux de bruit émis par des travaux d'aplanissement des fonds marins. C'est pourquoi, cette opération est assimilée à une opération de dragage qui s'effectue à partir d'un navire spécifique et d'une drague aspiratrice en position quasi-stationnaire. Les opérations ont lieu en continu, et le bruit généré est donc de même nature.

Le modèle de bruit de dragage correspond à la superposition du bruit d'un navire en station et du bruit d'un engin sous-marin sur le fond. Le gabarit de source sonore à 1m choisi (Figure 37) est dérivé de la littérature (Parvin, 2008), (Robinson, 2011).

La Figure 38 montre la position représentative choisie pour la modélisation d'une opération de dragage effectuée au centre du site d'implantation du futur champ éolien. Cette position représentative est valide pour l'ensemble des positions envisageables dans l'enceinte de l'aire d'étude immédiate étant donné la faible variation d'hauteur d'eau sur l'ensemble cette zone (entre 14 et 24m sans tenir compte du marnage). Ce point représentatif étant situé sur une hauteur d'eau de 20m. De plus, les très faibles variations de substrat attendues dans cette aire d'étude immédiate permettent également de conclure à la représentativité sédimentologique de ce point d'évaluation.

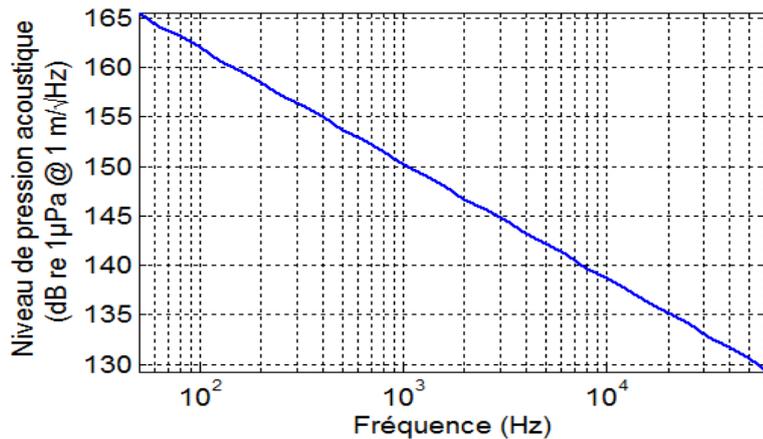


Figure 37 : Gabarit de source sonore (en dB ref. 1µPa/√Hz @1m) localisée près du fond permettant de modéliser le bruit généré par l'opération de dragage.

Source: Quiet-Oceans, d'après (Parvin, 2008), (Robinson, 2011)

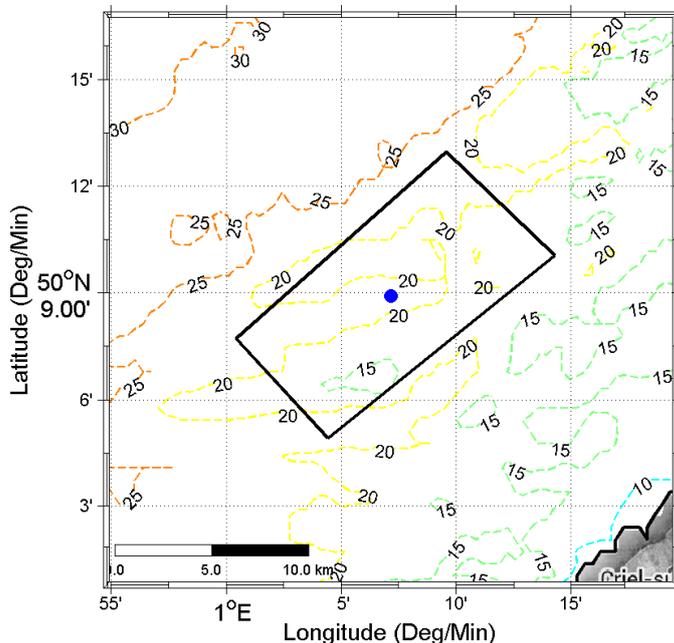


Figure 38 : En bleu, la position géographique servant à l'évaluation des incidences sonores lors d'une opération de dragage.

### 6.2.2 Bruit généré par le battage de pieu

Dans ces scénarios, la pose des fondations jacket de chaque éolienne sera effectuée partiellement ou en totalité par un atelier de battage. La fixation au sol se fait par l'intermédiaire de quatre pieux de 2,2 m de diamètre pour chaque éolienne et un diamètre de 3m pour la fondation jacket du poste électrique en mer (OSS). Chaque pieu est battu indépendamment.

L'hypothèse d'un double atelier de battage n'est pas retenue par le maître d'ouvrage.

L'hypothèse retenue dans cette étude consiste à battre le pieu par un marteau hydraulique situé au-dessus du niveau de la mer. Une phase de battage sous-marin est également possible mais à ce jour il n'existe pas d'estimation des niveaux sonores engendrés par cette méthode de battage. Lors d'une phase de battage, les bruits générés sont, par nature, impulsifs. Afin de traduire les impacts potentiels de façon plus juste, la communauté scientifique (Southall, et al., 2007) s'accorde aujourd'hui à intégrer cette notion au travers du niveau d'exposition sonore (Sound Exposure Level, SEL, exprimé en dB réf. 1µPa².s). L'énergie d'exposition sonore correspond à l'énergie acoustique reçue en un point, intégrée sur toute la bande de fréquence

et sur la durée significative de l'impulsion sonore ( $T_i$ ). Dans le cadre de cette étude,  $T_i$  est choisi égal à 100 ms, conformément à la littérature, (De Jong, et al. 2008) par exemple.

Le programme de recherche RESPECT, financé par le maître d'ouvrage, a permis de mettre au point un modèle expérimental de battage de pieu à petite échelle (1/400ème) en cuve et une étude numérique approfondie d'un battage de pieu de 8m de diamètre (Van de Loock, et al., 2016), (Van de Loock J. L., 2016). Ces travaux ont démontré une inclinaison du faisceau sonore (cône de Mach) en sortie de pieu d'un angle de 17° avec la verticale et en direction du fond. A faible distance, l'énergie transmise dans l'eau est maximale dans la partie inférieure de la colonne d'eau. L'énergie rayonnée dans le sédiment (cas du sable) via le tube est aussi importante que celle rayonnée dans la colonne d'eau. Pour un pieu de ce diamètre, seules les fréquences inférieures à 200 Hz contribuent fortement à l'énergie sonore transmise dans la colonne d'eau.

En fonction du type de substrat (sable, craie, bicouche sable/craie), l'énergie sonore dans la colonne d'eau varie de l'ordre de 3 à 4 dB. Toutefois, l'énergie nécessaire à l'enfoncement du pieu est susceptible de varier en fonction du type de sol. Le sable étant le sédiment entraînant le niveau d'exposition sonore le plus élevé dans la colonne d'eau, pouvant ainsi influencer le niveau de bruit total. Les modélisations ont permis de mettre en évidence que, dans le cas d'un substrat constitué de craie, une partie importante de l'énergie est convertie en une onde (dite de Scholte) se propageant à l'interface entre le sédiment et l'eau. Cette onde de surface est susceptible d'interagir avec les espèces benthiques.

Les retours d'expérience et les modélisations menées dans le cadre du projet de recherche RESPECT (J. L. Van de Loock 2016) ont démontré que le niveau d'exposition sonore dans l'eau croît de manière logarithmique en fonction du diamètre du pieu (Figure 39), ce qui permet d'extrapoler avec confiance les mesures effectuées sur des pieux de plus petits diamètres sur les sites de mer Q7, FINO 1, 2 et 3, Alpha Ventus, Utgrunden, Sky 2000, Amrumbank West, Horns Rev II, North Hoyle, et Barrow (Betke, 2008), (De Jong, et al., 2008), (Talisman Energy (UK) Limited, 2004), (Nedwell, et al., 2004) et (ITAP, 2008).

Dans cette étude, un point de simulation est choisi au centre de l'aire d'étude immédiate et est considéré comme représentatif de l'ensemble des ateliers de battage (emplacement de chaque éolienne). La Figure 38 montre la position représentative choisie pour la modélisation d'une opération de battage effectuée au centre du site d'implantation du futur champ éolien.

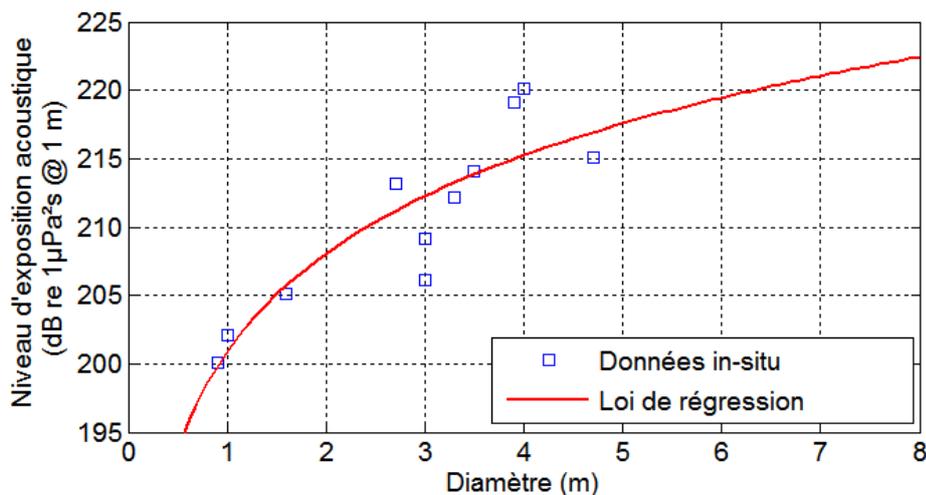


Figure 39 : Variation du niveau d'exposition sonore maximum par coup à un mètre du pieu en fonction de son diamètre.

Source : (Van de Loock, et al., 2016) et données mesurées lors des opérations de constructions portuaires en Allemagne, et des parcs éoliens en mer Q7, FINO 1, 2 et 3, Alpha Ventus, Utgrunden, Sky 2000, Amrumbank West, Horns Rev II, North Hoyle, et Barrow.

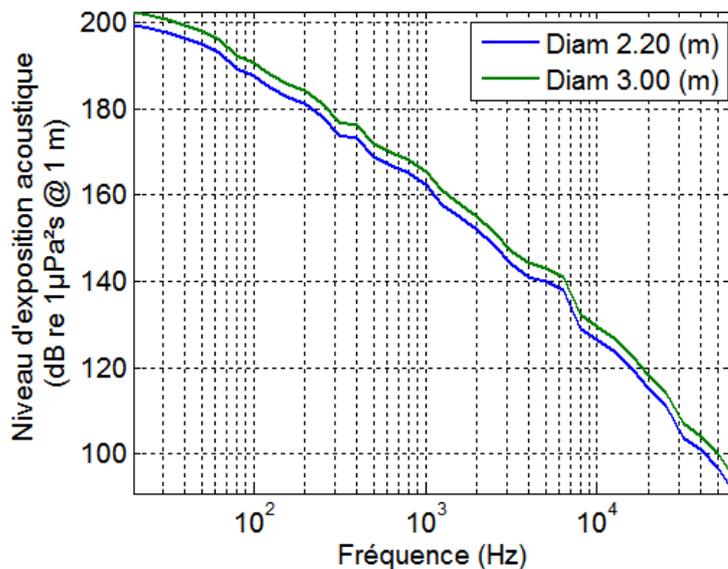


Figure 40 : Modèle de niveau d'exposition sonore à un mètre du pieu de diamètre 2.2 ou 3.0m, pour un coup unique, en fonction de la fréquence.

Source: Quiet-Oceans

### 6.2.3 Bruit généré par le forage vertical

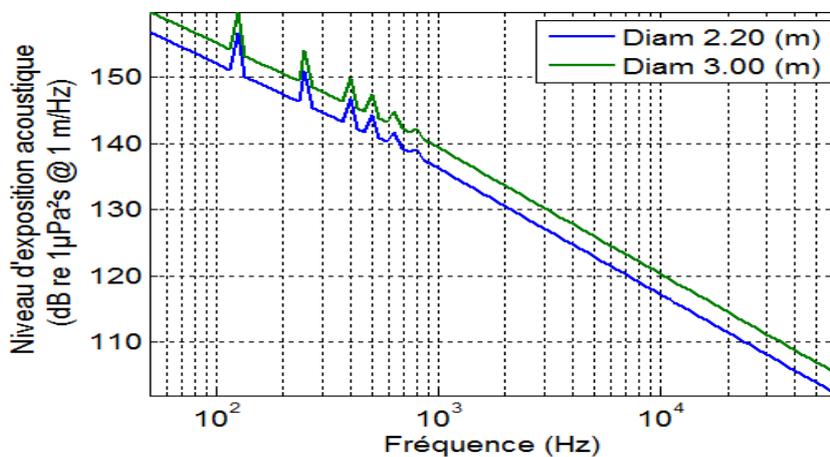
Le gabarit de bruit de forage vertical est dérivé de la littérature (Beharie & Side, 2011), (Nedwell, 2008), (Nedwell, 2003) qui reporte des mesures réalisées sur des substrats rocheux lors de l'installation de la fondation monopieu en Ecosse, et en zone côtière à proximité de Strangford (Royaume-Uni) en présence d'une foreuse Seacore / Wirth B5 en position verticale à une vitesse maximale de rotation de 37 tours/min et un diamètre de forage maximum de 1,3m. Le poids du dispositif est de 15 tonnes, la puissance développée est de 80 kW. Une incertitude importante subsiste toutefois sur la variabilité du niveau de bruit émis en fonction de la nature du substrat rocheux et l'enfoncement de la tête de forage. Les données bibliographiques ne permettent pas, à ce jour, de lever cette incertitude, ni même de la quantifier.

Dans ce scénario, un navire de type « remorqueur » est positionné à proximité de la position du forage. Pour prendre en compte le diamètre de la foreuse, nous avons utilisé dans une première approximation le coefficient directeur de la courbe de régression linéaire défini dans le cadre du battage de pieu afin d'estimer un gabarit de forage (Figure 41) en fonction du diamètre et

de la fréquence. Il s'avère que cette approximation est confirmée par les mesures réalisées à l'European Marine Energy Centre (EMEC) (Beharie & Side, 2011). La figure montre un bruit large bande auquel se superpose des composantes en bande étroite de plus forte énergie liées aux vibrations propres du système de forage et à la vitesse de rotation.

La distribution du bruit source est modélisée par trois sources ponctuelles : une source située à proximité de la surface représentant 25% de l'énergie totale, une source au niveau de la tête de la foreuse qui représente 25% de l'énergie (1/3 inférieur de la colonne d'eau) et une source au niveau du fond qui représente 50% de l'énergie totale (forage propre).

La Figure 38 montre la position représentative d'une opération de forage vertical simulée au centre de l'aire d'étude immédiate.



Source : Quiet-Oceans d'après (Beharie & Side, 2011)

Figure 41 : Modèle de bruit généré lors d'une opération de forage vertical pour une foreuse de diamètre 2.2 ou 3,0m (en dB réf. 1μPa²/vHz @1m).

### 6.2.4 Bruit généré par les opérations d'ensouillage des câbles

L'opération d'ensouillage des câbles est réalisée par un navire de surface et un outil spécialisé, le plus souvent tracté sur le fond. Les opérations ont lieu en continu, et le bruit généré est donc de même nature.

Le scénario technico-opérationnel représentatif de l'ensouillage des câbles est composé par la superposition d'un navire générant un bruit propre et d'un engin sous-marin sur le fond de type charrue générant un bruit propre, peu documenté (Nedwell & Howell, 2004). Le gabarit de source sonore à 1m choisi (Figure 42) est dérivé des mesures effectuées sur le parc éolien en mer Beatrice (Talisman Energy (UK) Limited, 2004) et de mesures réalisées en Ecosse (Wilson, Carter, & Elliott, 2009). L'ensouillage est modélisé par un point de simulation au centre de l'aire d'étude immédiate.

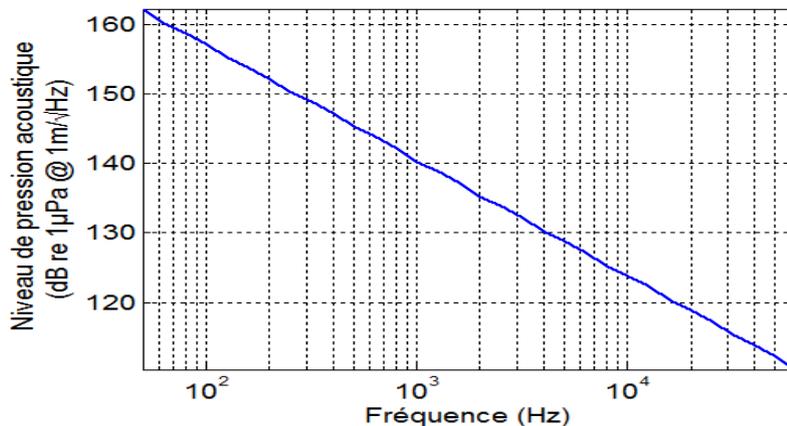


Figure 42 : Gabarit de source sonore (en dB ref. 1µPa/vHz @1m) localisée près du fond permettant de modéliser le bruit généré par l'outil tracté d'ensouillage des câbles.

Source: Quiet-Oceans d'après (Talisman Energy (UK) Limited, 2004) et (Wilson, Carter, & Elliott, 2009)

### 6.3 Caractérisation des sources de bruit liées au fonctionnement des éoliennes

Des mesures de bruit transmis dans la colonne d'eau par une structure éolienne « monopieu » de 4,9m de diamètre réalisées sur le site de Horns Rev II (situé en mer du Nord dans les eaux territoriales danoises) mettent en évidence un bruit rayonné de fond très large bande, auquel vient se rajouter des raies spectrales<sup>7</sup> en basse fréquence (Betke K. , 2006). Il semblerait que ces raies spectrales s'expliquent par l'existence de modes de propagation sur les fondations. Ainsi, la raie spectrale la plus énergétique correspond à un mode de vibration de la structure de l'éolienne localisé à basse fréquence, autour d'une centaine de Hz. D'autres raies spectrales sont aussi présentes à plus haute fréquence. Le niveau des raies spectrales peut varier en fonction de la rotation des pales et donc la force du vent.

A partir de cette analyse, un gabarit de bruit rayonné par une éolienne à 1 m basée sur une structure « jacket » a été élaboré (Figure 43). Le bruit rayonné par les vibrations le long de la structure est modélisé par une répartition uniforme de sources sur toute la hauteur d'eau. La courbe bleue correspond au rayonnement pour un fonctionnement par un vent moyen de 4m/s, de 8m/s, et de 12m/s.

La Figure 44 illustre les positions représentatives des 62 éoliennes situées dans l'aire d'étude immédiate utilisées pour la modélisation de l'empreinte sonore du parc en exploitation.

<sup>7</sup> Une raie spectrale est une fréquence à laquelle l'énergie est significativement plus intense que le niveau moyen aux fréquences avoisinantes

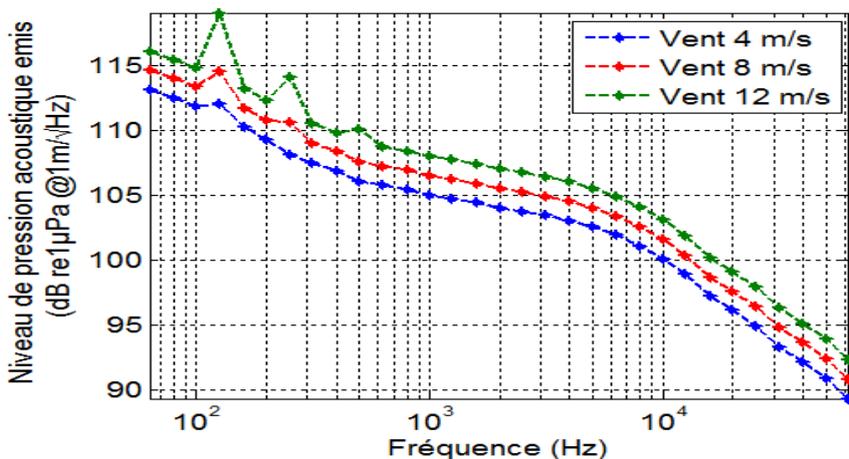
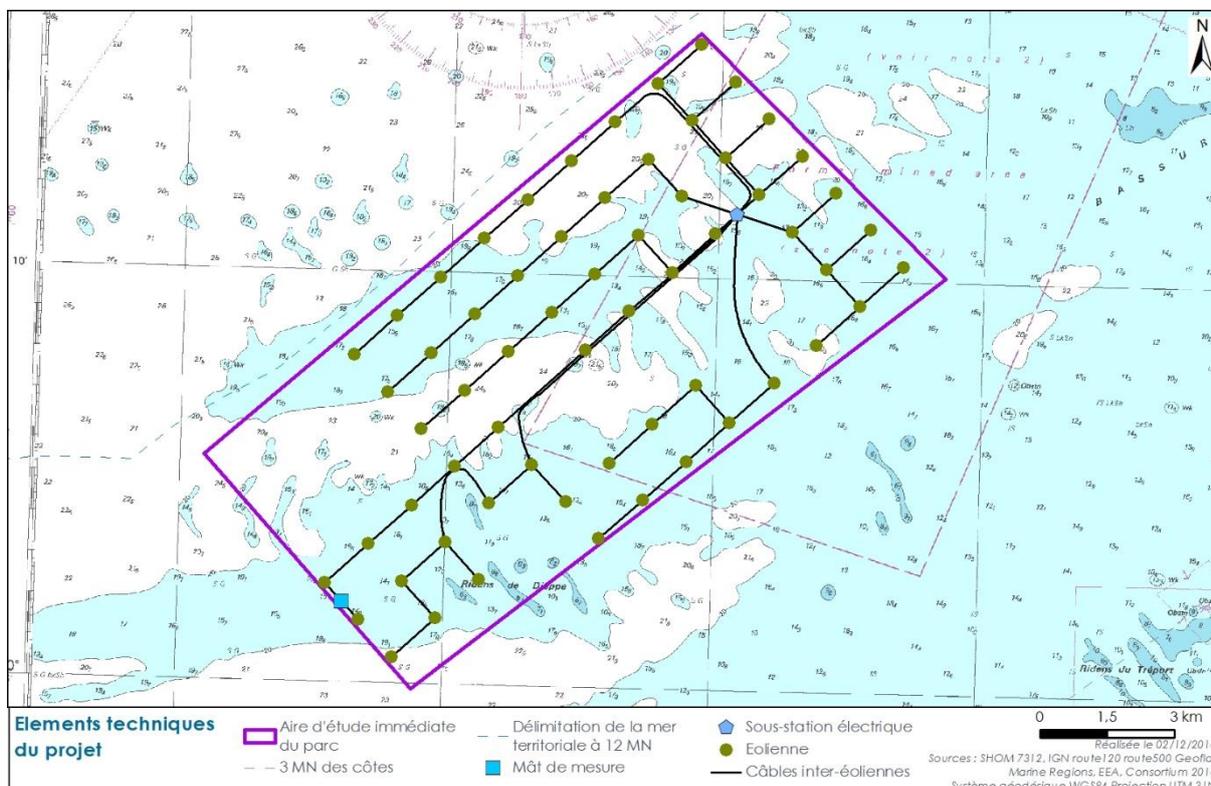


Figure 43 : Modèle de bruit généré par une éolienne structure « jacket » à 1 m de la structure en fonction de la fréquence.

Source: Quiet-Oceans d'après (Betke K., 2006)

Figure 44 : Positions géographiques des éoliennes servant à l'évaluation des incidences sonores lors de l'exploitation du parc éolien



## 6.4 Bruit généré par les navires lors des travaux ou de la maintenance

Afin d'acheminer les outils, les personnels ou les matériaux sur le parc éolien lors de la construction ou de la maintenance du site de production, des navires spécifiques de type catamaran circuleront dans ou à proximité de l'aire d'étude immédiate à partir des ports de Dieppe et du Tréport. En moyenne, sur une journée de maintenance, 3 navires au maximum seront en activité dans ou à proximité du parc éolien et dans le couloir de circulation Dieppe/parc éolien simultanément. Un ensemble de scénarios statiquement représentatifs des différentes situations permet d'établir une carte médiane des niveaux sonores. Le gabarit de

source sonore utilisé est issu du modèle de bruit de navire de type remorqueur (Wales and Heitmeyer 2002) et adapté à partir des informations issues des travaux de la « Scripps Oceanographic Institution » (Hildebrand 2009). La Figure 45 montre le niveau de pression acoustique à 1m en fonction de la fréquence.

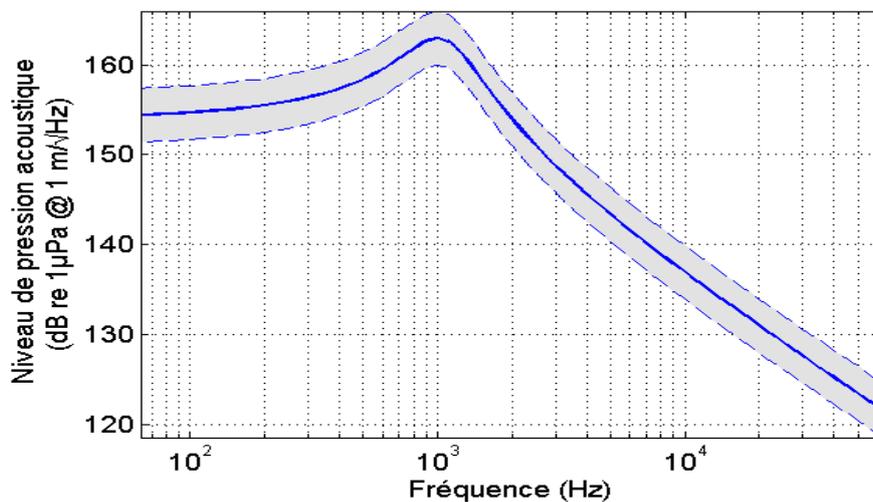


Figure 45 : Gabarit de source sonore (en dB ref. 1µPa/√Hz @ 1m) modélisant un navire de type remorqueur.

## 6.5 Bruit généré en phase de démantèlement

A ce jour, il existe peu de littérature sur les opérations de démantèlement en mer et en particulier aucune publication concernant le démantèlement des parcs éoliens en mer. Le premier parc éolien à avoir été démantelé est celui de Vattenfall en Suède en 2016 pour des raisons de mise à jour de la turbine. Des mesures de bruit ont été faites mais aucune publication ne se réfère actuellement au bruit engendré par ce démantèlement. Les pieux (monopieux de 3,7 m de diamètre) ont été extraits à l'aide d'un marteau vibreur (PVE 500 M).

En général, lors du démantèlement de structure offshore, les pieux sont sectionnés à la base et les câbles sont retirés. Pour effectuer ces travaux, différentes techniques sont mises en œuvre en fonction de l'atelier. Concernant le pieu, le découpage de la section à la base du pieu peut se faire soit par explosif, soit par une méthode de « cutter jetting », soit par tranchage à l'aide d'un plongeur ou d'un robot. L'extraction des câbles se fait à partir de navires spécifiques.

Pendant la totalité de la phase de démantèlement, des navires spécifiques au transport des moyens humains et matériels circulent sur zone à vitesse très réduite et également entre le site et un port d'attache (Cherbourg dans le cadre de ce projet).

Du point de vue sonore, le démantèlement fera appel majoritairement à des navires de charge et du découpage de pieu, mais ni du battage, ni du forage ni de l'explosif ne seront utilisés lors de cette phase. La principale source de bruit sera probablement la phase de découpage des pieux de fondation jacket des éoliennes et du poste électrique. Mais à ce jour aucune littérature n'est disponible quant au niveau sonore engendré par ce type d'atelier. La grande majorité des études actuelles, en l'absence de connaissance sur les méthodes utilisées lors de cette phase, considèrent que l'impact sera au maximum égal à ceux obtenus lors de la phase d'installation. Toutefois, une mise à jour de l'étude d'impact devra nécessairement être faite deux ans avant le début de cette phase de démantèlement en accord avec la réglementation qui sera alors en vigueur et des évolutions technologiques qui auront eu lieu d'ici là.

## 6.6 Variation saisonnière de l’empreinte sonore du projet

L'évaluation de l'empreinte sonore du projet repose sur l'ensemble des données décrites ci-avant et consiste à quantifier la zone pour laquelle les activités du projet dépassent les niveaux médians du bruit initial.

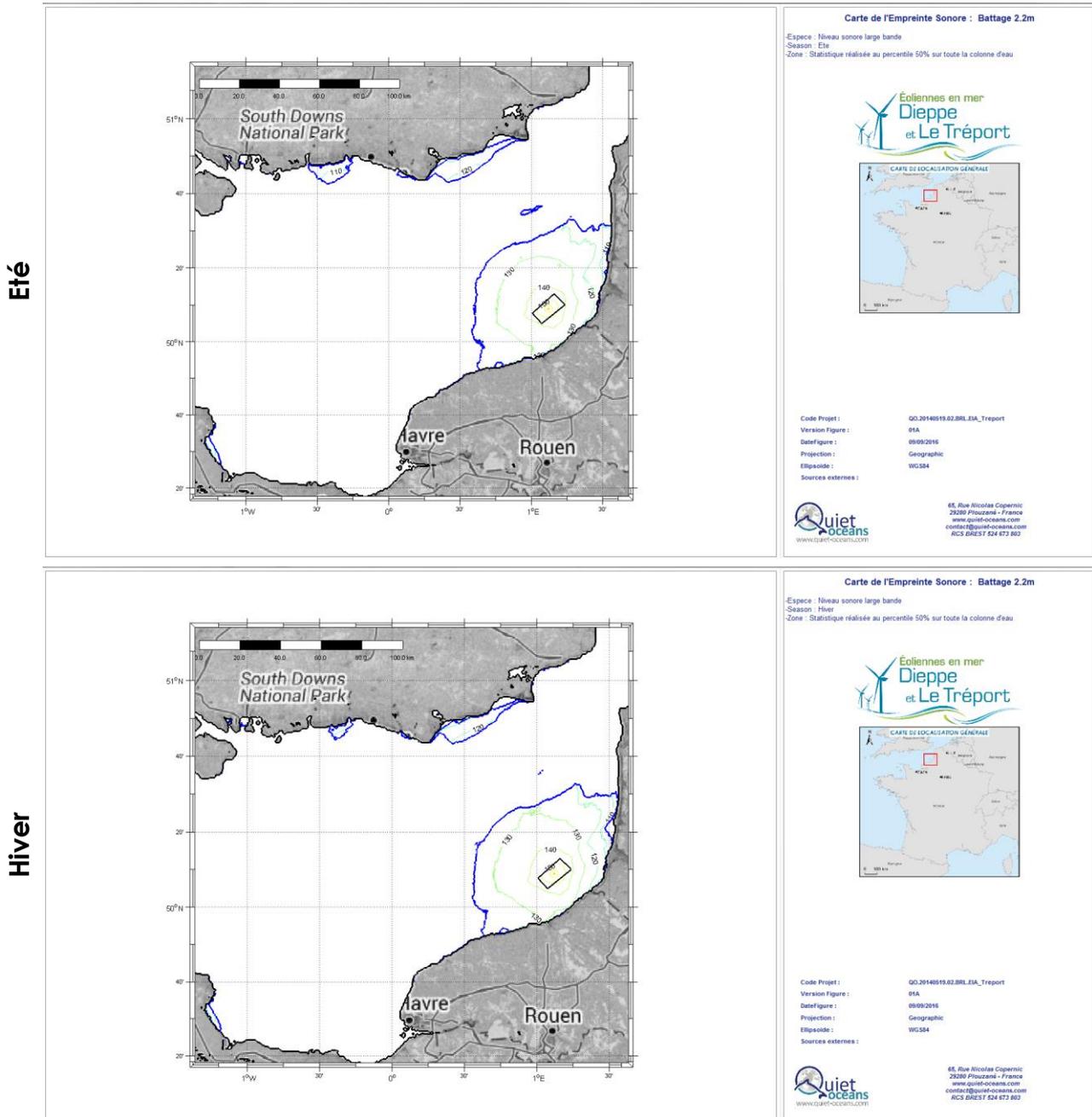
Le bruit émergeant du bruit initial médian s'étend sur une surface légèrement plus grande durant la saison hiver probablement en raison du refroidissement de la couche de surface qui oriente préférentiellement les rayons acoustiques vers la surface. De ce fait les rayons sont moins atténués par le fond et les bruits du projet se propagent plus loin. Cela est particulièrement vrai pour les activités à forte introduction d'énergie sonore, à savoir les opérations de battage de pieu.

La Figure 46 illustre dans le cas d'un atelier de battage de pieu de 2,2 m de diamètre l'empreinte sonore de cette activité en fonction de la saison. Chaque trait donne la courbe isosonique d'exposition sonore (en dB réf.  $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$ ). Le trait épais bleu donne la limite d'audibilité de cette activité. Au-delà de cette limite (vers le large), le bruit ambiant médian de l'état initial est supérieur au bruit engendré par cet atelier donc le bruit engendré par cet atelier n'est pas perçu. A proximité des côtes anglaises et normandes, le bruit induit par cette activité peut être perçu localement. En effet, entre l'empreinte principale située autour de l'aire d'étude immédiate et les zones de perception lointaines, le bruit médian du projet est masqué par les bruits existants, en particulier par le bruit du trafic maritime (paragraphe 5.2)

A l'intérieur de cette empreinte, les courbes bleu clair donnent les contours pour des valeurs caractéristiques par pas de 10dB. La forme de ces isosoniques est principalement influencée par la nature des fonds et par la bathymétrie. La représentation de l'empreinte sonore étant l'émergence du bruit du projet au-dessus de l'état sonore médian initial, ces cartes permettent de visualiser et quantifier l'apport du projet au chorus sonore total.

Les empreintes sonores des autres ateliers de construction sont regroupées en annexe (chapitre 11).

Figure 46 : Comparaison saisonnière de l'émergence d'un même battage de pieu d'une fondation jacket



## 6.7 Niveaux sonores large bande à une distance de référence

De plus en plus, la distance de 750m sert de référence aux contrôles des niveaux de bruits propagés dans le milieu marin. Cette distance de référence voit son origine dans la réglementation allemande concernant l'activité spécifique de battage de pieu (Recommandation Federal Environmental Agency Umweltbundesamt, UBA).

Le Tableau 15 compile une estimation des niveaux sonores large bande pour chaque atelier considéré. Ces seuils ne sont pas à comparer avec les seuils de sensibilité des espèces marines, car ces niveaux de bruit intègrent une très large bande. Les espèces sont sensibles à des bandes de fréquences plus restreintes et perçoivent donc ces bruits avec une intensité moins forte. Ces niveaux perçus par les différentes espèces sont aussi estimés et servent à l'évaluation des risques biologiques présentés dans les paragraphes suivants.

Toutefois, ces niveaux peuvent être comparés, à titre illustratifs et en dehors de tout cadre réglementaire français, à des réglementations en vigueur dans d'autres pays européens qui utilisent comme indicateur le niveau large bande, par exemple en Allemagne. Selon cette analyse, seules les opérations de battage pieu dépasseraient les seuils de 160 dB ref.  $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$  (Recommandation Federal Environmental Agency Umweltbundesamt, UBA).

Tableau 15 : Niveaux de bruit large bande estimés à la distance de référence de 750m de leur origine.

Atelier	Caractéristique	Positions des ateliers	Niveaux de bruit introduits dans le milieu A 1m dans la bande 50Hz – 67kHz	Niveaux de bruit large bande prédits à la distance de 750m des ateliers		
				Min	Moyenne	Max
				(dB ref $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$ )		
Dragage		Aire immédiate	188 dB réf. $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$ @1m	140.6	140.9	141.2
Battage de pieu	Jacket diam 2,2m	Aire immédiate	211 dB réf. $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$ @1m	165.9	166.1	166.3
	Jacket diam 3m		214 dB réf. $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$ @1m	168.9	169.2	169.4
Forage	jacket 2,2m	Aire immédiate	177 dB réf. $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$ @1m	129.4	129.5	129.7
	Jacket diam 3m		180 dB réf. $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$ @1m	132.4	132.6	132.8
Ensuillage des câbles		Aire immédiate	181 dB réf. $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$ @1m	134.3	134.5	135.0
Maintenance	Navires mobiles	Aire immédiate et large	3 sources mobiles de 190 dB réf. $1\mu\text{Pa}$ @1m	NA	NA	NA
Fonctionnement des éoliennes	Jackets	Aire immédiate	de 145 à 149 dB réf. $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$ @1m <sup>8</sup>	113,0	114,7	116,6

<sup>8</sup> En fonction de la vitesse du vent (de 4 à 12 nœuds)

# 7 Caractérisation des risques sonores du projet





Ce chapitre quantifie les risques potentiels vis-à-vis des mammifères marins, des poissons, des larves, des tortues marines et des invertébrés marins. La quantification pour les invertébrés n'étant pas possible par méconnaissance des seuils de tolérance sonore. Il s'inscrit dans la suite logique du chapitre précédant traitant des empreintes sonores estimées du projet. En effet, les risques biologiques sont définis par le dépassement éventuel des seuils de dommages auditifs temporaires ou permanents tels que définis dans le Tableau 4.

Ils sont directement évalués à partir des niveaux et distributions sonores saisonnières des scénarios descriptifs du projet de construction, d'exploitation et de démantèlement du parc éolien en mer de Dieppe - Le Tréport. A partir des résultats obtenus, des recommandations sont proposées.

L'estimation des effets acoustiques consiste à caractériser, lorsque cela est possible :

- ▶ la cartographie des zones de risque ;
- ▶ les distances minimum, maximum et médianes des zones de risque sonore autour des ateliers ;
- ▶ les surfaces des empreintes sonores ;
- ▶ l'estimation du nombre d'individus susceptibles d'être affecté aux différents risques sonores.

## 7.1 Estimation des effets acoustiques pour les mammifères marins

### 7.1.1 Enjeux du site vis-à-vis des mammifères marins

Les enjeux du site vis-à-vis des mammifères marins sont étudiés dans l'expertise correspondante réalisée par Biotope, 2016 dans le cadre du projet éolien en mer de Dieppe Le Tréport. Les principales conclusions sont reprises ci-après.

Le Marsouin commun est le cétacé le plus régulier sur les aires d'étude immédiate et éloignée. Les expertises de terrain acquises dans le cadre de l'étude montrent des taux de rencontre dépassant les 60 ind./1000 km (valeur confirmée par la campagne SAMM). L'espèce est présente toute l'année avec des effectifs plus importants entre mars et avril. Ces dernières années, les effectifs semblent en augmentation localement (augmentation des contacts lors des 3 dernières campagnes parallèlement aux résultats d'échouages). L'espèce semble éviter les plus faibles profondeurs (0-10m).

Le Grand Dauphin semble être le dauphin le plus représenté dans l'aire d'étude éloignée. Il s'agit de la seule espèce contactée lors de toutes les campagnes (avion et bateau) et dont quelques observations opportunistes ont été recueillies. Il s'agit souvent d'observations de petits groupes (3-5 individus) surtout présents durant l'été. Des témoignages d'utilisateurs de l'aire d'étude éloignée confirment cette présence estivale et irrégulière d'un petit groupe de Grand Dauphin.

Le Dauphin commun, le Dauphin bleu et blanc et le Dauphin de Risso n'ont fourni que quelques données ponctuelles. Les taux de rencontre sont d'ailleurs extrêmement faibles pour ces espèces. Celles-ci n'ont d'ailleurs pas fait l'objet d'observations durant la campagne SAMM et dans l'aire d'étude associée. Leur présence peut être considérée comme occasionnelle dans cette partie de la Manche.

Les autres espèces de cétacés (Globicéphale, Rorquals, Mésoplodon, Baleine à bosses) n'ont pas fait l'objet d'observations durant les campagnes d'inventaires et ne figurent pas dans les observations opportunistes. Seules les données d'échouages ou les données récentes obtenues en Manche témoignent de leur présence occasionnelle dans cette zone.

Le Phoque veau-marin est l'espèce phare de la baie de Somme. Elle s'y regroupe en effectif important (maximum de 473 en 2015) mais également s'y reproduit (88 naissances en 2015). Un suivi télémétrique a montré que le Phoque veau-marin est assez casanier et se déplace peu hors de l'estuaire et de la frange côtière. Il n'est donc pas étonnant que l'espèce n'ait pas été observée sur l'aire d'étude immédiate et de façon plus générale au-delà du premier kilomètre depuis la plage.

Le Phoque gris est probablement présent toute l'année sur l'aire d'étude éloignée. La présence de regroupements importants en baie de Somme y participe. Sur ce site les effectifs s'accroissent régulièrement et ont atteint en 2015 un maximum de 151 individus les cas de reproduction n'y sont pour l'instant que ponctuelle mais de plus en plus réguliers (1 à 2 cas par an). Les suivis télémétriques et les expertises avion-bateau ont montré que l'espèce est capable d'importants déplacements et fréquente régulièrement des zones situées au large au contraire du Phoque veau-marin. L'espèce fréquente donc l'aire d'étude immédiate probablement en effectif réduit (les premiers résultats de suivi télémétriques montreraient une répartition des zones de chasse).

Un statut de fréquentation de l'aire d'étude par chacune des espèces a pu être établi à partir des études menées sur les aires d'étude immédiate et éloignée par Biotope. Le Tableau 16 présente toutes les espèces de mammifères marins pouvant être observées sur la façade de la Manche. 21 espèces y sont citées dont 11 espèces permanentes, 6 occasionnelles, 4 espèces erratiques. Les espèces ont été classées par régularité dans l'aire d'étude large. La classification des espèces au sens acoustique (Southall, et al., 2007) est indiquée dans la dernière colonne en fonction des spécificités de leurs audiogrammes (tableau 4) :

- ▶ HF : espèce « haute fréquence » dont la gamme de perception est comprise entre 200Hz et 180kHz (cas du Marsouin commun) ;
- ▶ MF : espèce « moyenne fréquence » dont la gamme de perception est comprise entre 150Hz et 160kHz (cas du Grand Dauphin) ;
- ▶ LF : espèce « basse fréquence » dont la gamme de perception est comprise entre 7Hz-22kHz (cas du Rorqual ou de la Baleine à bosse) ;
- ▶ P : pinnipèdes dans l'eau dont la gamme de perception est comprise entre 75Hz et 75kHz (cas des phoques gris et veaux-marins).

Tableau 16 : Fréquentation des espèces dans l'aire d'étude éloignée

Espèce		Classe acoustique	Fréquentation de l'aire d'étude large	Niveau d'enjeu
Nom Usuel	Nom Latin			
Marsouin commun	<i>Phocoena phocoena</i>	HF	Permanent	Fort
Phoque veau marin	<i>Phoca vitulina</i>	P	Permanent	Fort
Phoque gris	<i>Halichoerus grypus</i>	P	Permanent	Fort
Grand dauphin	<i>Tursiops truncatus</i>	MF	Permanent	Moyen
Dauphin bleu et blanc	<i>Stenella coeruleoalba</i>	MF	Permanent	Faible
Lagénorhynque à bec blanc	<i>Lagenorhynchus albirostris</i>	MF	Permanent	Faible
Dauphin de Risso	<i>Grampus griseus</i>	MF	Permanent	Faible
Globicéphale noir	<i>Globicephala melas</i>	MF	Permanent	Faible
Petit rorqual	<i>Balaenoptera acutorostrata</i>	LF	Permanent	Faible
Rorqual commun	<i>Balaenoptera physalus</i>	LF	Permanent	Faible
Mésoplodon de Sowerby	<i>Mesoplodon bidens</i>	MF	Occasionnel	Faible
Baleine à bosse	<i>Megaptera novaeangliae</i>	LF	Occasionnel	Négligeable
Phoque capuchon	<i>Cystophora cristata</i>	P	Occasionnel	Négligeable
Phoque annelé	<i>Pusa hispida</i>	P	Erratique	Négligeable
Phoque barbu	<i>Erignathus barbatus</i>	P	Erratique	Négligeable

## 7.1.2 Effets du bruit sur les cétacés

Les cétacés sont un groupe taxonomique particulièrement dépendant de l'acoustique puisqu'ils utilisent le son dans tous les aspects de leur vie : lors de la reproduction, pour chasser, s'alimenter, éviter les prédateurs, communiquer ou s'orienter. En milieu marin, la vue n'est utile que jusqu'à quelques dizaines de mètres alors que le son peut se propager sur des centaines voire milliers de kilomètres (Weilgart, 2007). Les mysticètes comme la baleine bleue peuvent ainsi communiquer entre eux alors que les individus sont séparés de plusieurs centaines de kilomètres (Tyack, 2008).

Les effets induits sont classifiés en quatre catégories :

- ▶ le dérangement ou changement de comportement, pouvant induire un évitement de la zone malgré son intérêt écologique pour l'individu ou l'espèce, l'affaiblissement par la surconsommation d'énergie consacré à un déplacement relativement long, en particulier pour les jeunes, etc. ;
- ▶ le masquage des informations de l'environnement qui peut empêcher l'accomplissement de fonctions vitales, telles que la chasse ou la socialisation ;
- ▶ l'apparition de lésions physiologiques entraînant une perte temporaire d'audition (*Temporary Threshold Shift* ou TTS) pouvant empêcher temporairement l'accomplissement de fonctions vitales telles que la chasse ou la socialisation ;
- ▶ l'apparition de lésions physiologiques entraînant une perte permanente d'audition (*Permanent Threshold Shift* ou PTS) ou touchant d'autres organes et pouvant empêcher l'accomplissement de fonctions vitales ou même être létales en cas d'émissions très puissantes.

Ces réponses comportementales témoignent d'un effet immédiat du bruit sous-marin lié à l'exposition aux bruits, mais elles peuvent être à l'origine de conséquences à plus long terme pour l'individu ou la population. Pour tous les niveaux d'effet, l'impossibilité d'accéder à une zone fonctionnelle comme une zone d'alimentation ou de reproduction peut affecter les réserves énergétiques d'un animal et par conséquent sa survie ou sa fertilité (New et al., 2014).

L'évaluation des conséquences du dérangement acoustique pour les populations de mammifères marins représente un enjeu de recherche important et difficile. En 2014, Harwood et al. ont développé un modèle appelé *Interim Population Consequences of Disturbance* (IPCoD), permettant de quantifier l'impact démographique d'un chantier éolien à long terme. Le projet de recherche RESPECT adresse cet aspect dans le cas du projet de Dieppe Le Tréport pour les mammifères marins (Pettex et al. 2016). A ce jour, les résultats non consolidés du travail de recherche des effets sur les populations ne peuvent toutefois pas être versés à cette étude sans une phase de validation, objet de la deuxième phase du projet RESPECT, actuellement en cours.

On peut distinguer deux principales sources d'interrogations concernant les impacts physiologiques et comportementaux des émissions sonores sur les individus et les populations :

- ▶ l'impact d'émission à court terme et de forte intensité (par exemple la construction de parc éolien) ;
- ▶ l'impact d'émission à long terme mais d'intensité faible (par exemple le fonctionnement du parc).

Même si à l'heure actuelle, les conséquences biologiques de l'augmentation des émissions sonores sont encore peu documentées, plusieurs études suggèrent qu'elles peuvent affecter les mammifères marins, notamment par des processus de masquage acoustique, réduisant le rayon de perception acoustique de l'environnement (Clark et al., 2009; Richardson et al., 1995).

Les analyses suivantes représentent, pour chaque espèce susceptible de fréquenter l'aire d'étude large :

- ▶ les limites des zones d'audibilité ;
- ▶ les limites des zones de risques d'une modification du comportement ;
- ▶ les limites des zones de risques de dommage physiologique direct temporaire ;
- ▶ les limites des zones de risques de dommage physiologique direct permanent.

Les cartes sont présentées pour la saison hivernale car elles majorent légèrement les étendues. Le découpage est proposé par espèce, les cartes superposant toutes les techniques étudiées afin de permettre leur comparaison.

### 7.1.3 Limites géographiques des risques sonores pour le Marsouin commun

#### 7.1.3.1 Zones d'exposition sonore du Marsouin commun

Les empreintes sonores relatives à l'audibilité des bruits du projet par le Marsouin commun présentent :

- ▶ peu de variabilité entre les saisons ;
- ▶ de grandes disparités en fonction des ateliers mis en œuvre.

En effet, comme le montre les Figure 47 et Figure 49, les Marsouins communs sont susceptibles de percevoir les bruits de battage de la fondation jacket sur des distances médianes atteignant respectivement 21 à 25 milles nautiques en fonction du diamètre du pieu de la structure jacket (2,2 ou 3m). Les empreintes sonores ont des géométries spatiales variables en fonction de la direction de propagation des bruits autour du point de génération. Cette variabilité s'explique par la combinaison de la bathymétrie, des conditions météo-océanographiques, des natures du fond, et du bruit ambiant existant. On remarquera en particulier que ces bruits peuvent être perceptibles dans des zones le long des côtes anglaises et dans la baie de Saint-Vaast-La Hougue, lorsque le bruit ambiant se réduit suffisamment pour ne plus masquer les bruits du battage. Les bruits de battage des fondations jacket sont perceptibles sur des surfaces modélisées de 5680 et 8190 km<sup>2</sup> pour les éoliennes et l'OSS respectivement.

Ces distances de perception sont significativement plus grandes que celles obtenues lors des phases de forge, de dragage et d'ensouillage des câbles (compris entre 3,2 et 9,2 milles nautiques, soit 110 et 915 km<sup>2</sup>). Les empreintes sont plus étendues selon un axe sud-ouest nord-est car le bruit du trafic maritime concentré en centre Manche domine les bruits du chantier qui se propagent perpendiculairement à cet axe.

Figure 47 : Limites médianes des empreintes sonores pour le Marsouin commun

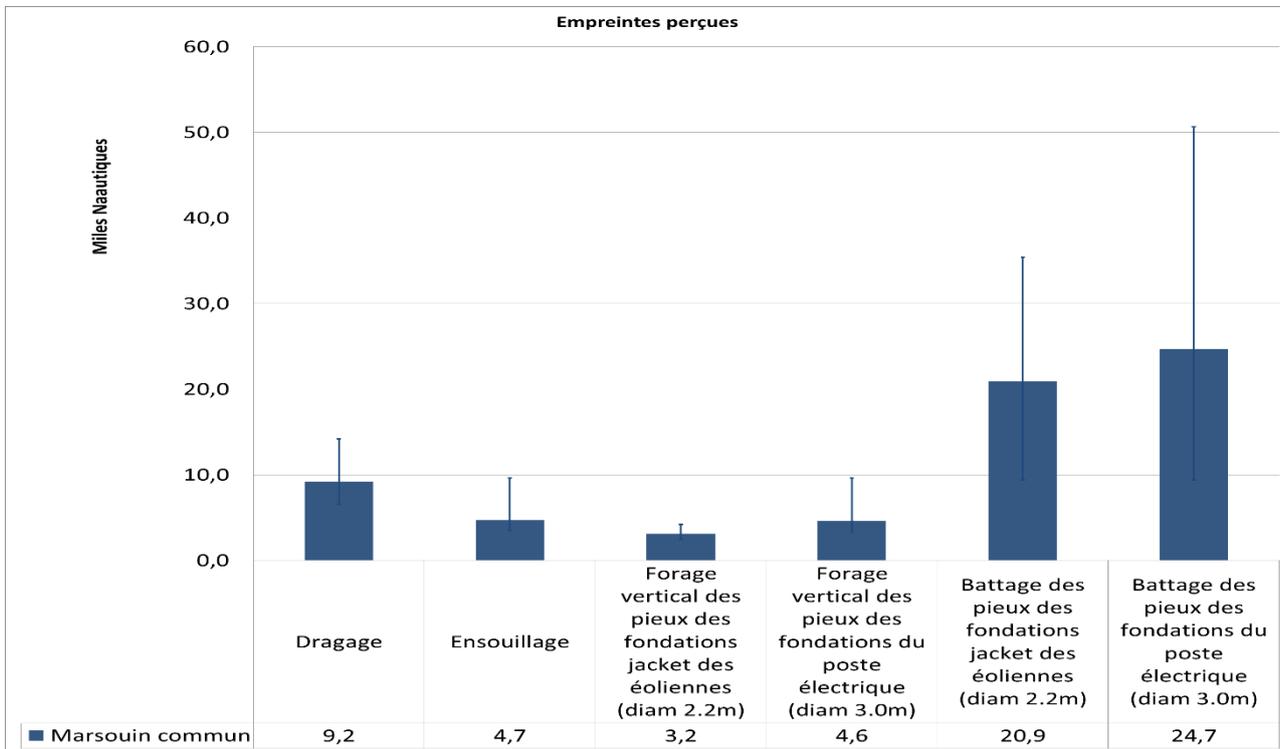


Figure 48 : Surfaces des empreintes sonores pour le Marsouin commun

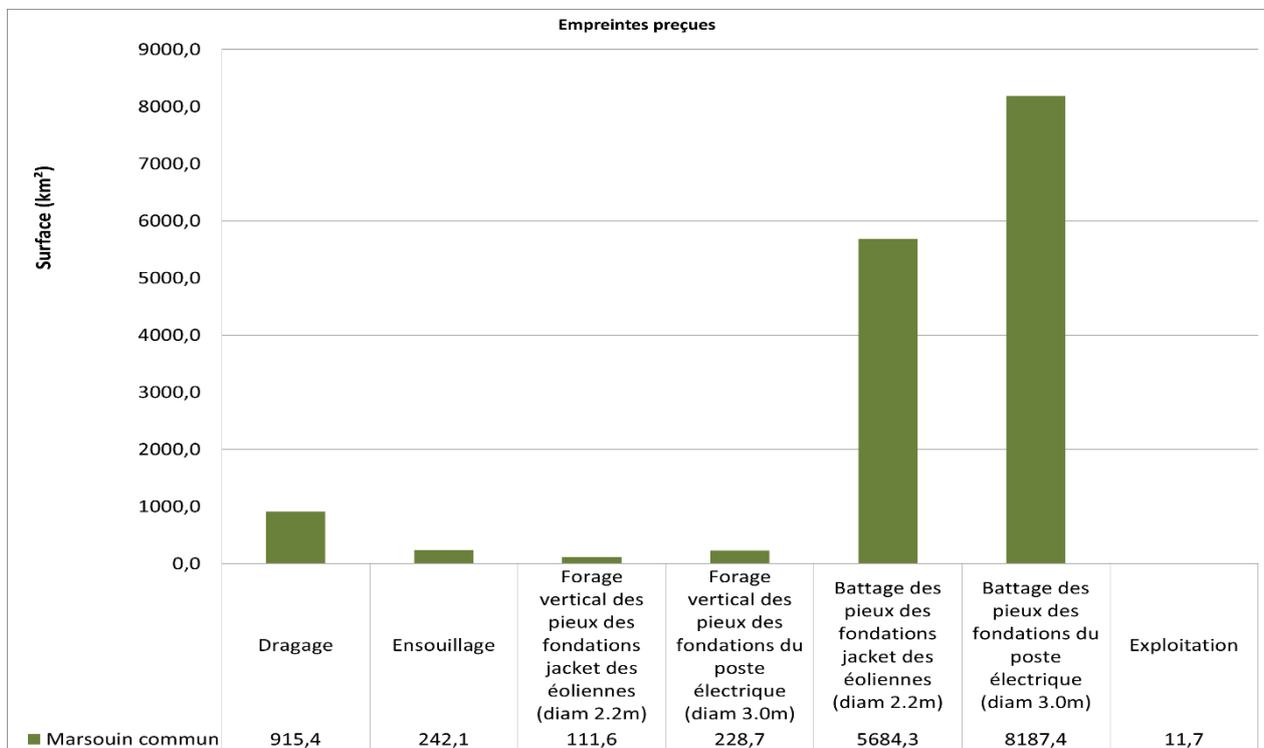
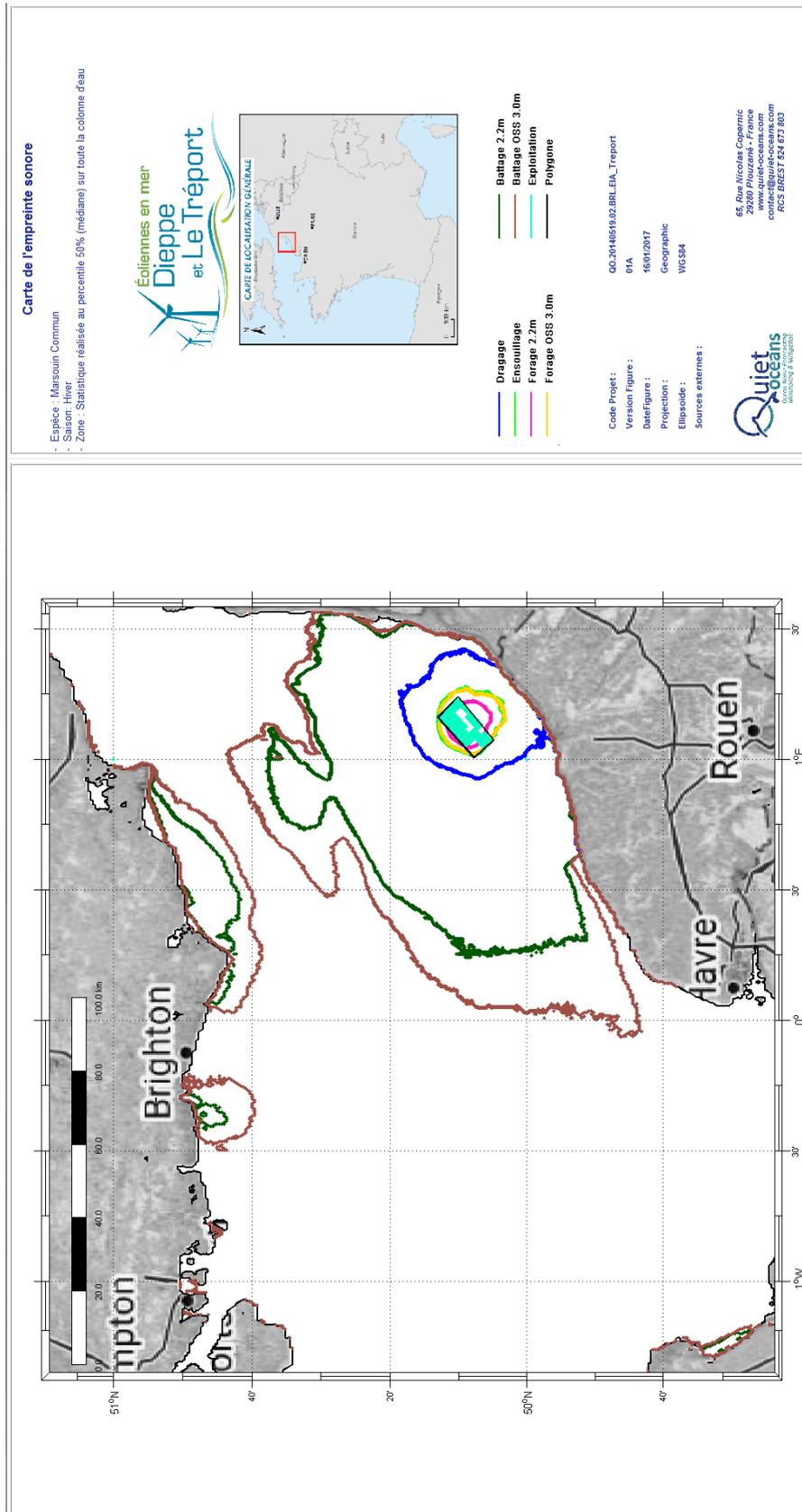


Figure 49 : Cartographie des zones de perception des bruits du projet pour le Marsouin commun



### 7.1.3.2 Zones de dérangement du Marsouin commun

Les zones de dérangement du Marsouin commun sont bien évidemment plus limitées que les zones de perception, avec une forte disparité entre les différents ateliers de construction (Figure 50). Les opérations de battage de l'éolienne et de la fondation de l'OSS présentent un risque de modification du comportement dans des rayons médians de 1,8 et 2,5 milles nautiques, soit respectivement des surfaces de 35 et 70 km<sup>2</sup>. La géométrie de cette zone de dérangement (Figure 52) est quasiment uniforme en fonction de la direction de propagation.

Les autres activités présentent des zones de risque de dérangement inférieures à un mille nautique (dragage et ensouillage). Le forage vertical entraîne un rayon médian faible de l'ordre de 0,03 à 0,07 mille nautique en fonction du diamètre.

Figure 50 : Limites médianes des zones de risque de modification du comportement pour le Marsouin commun

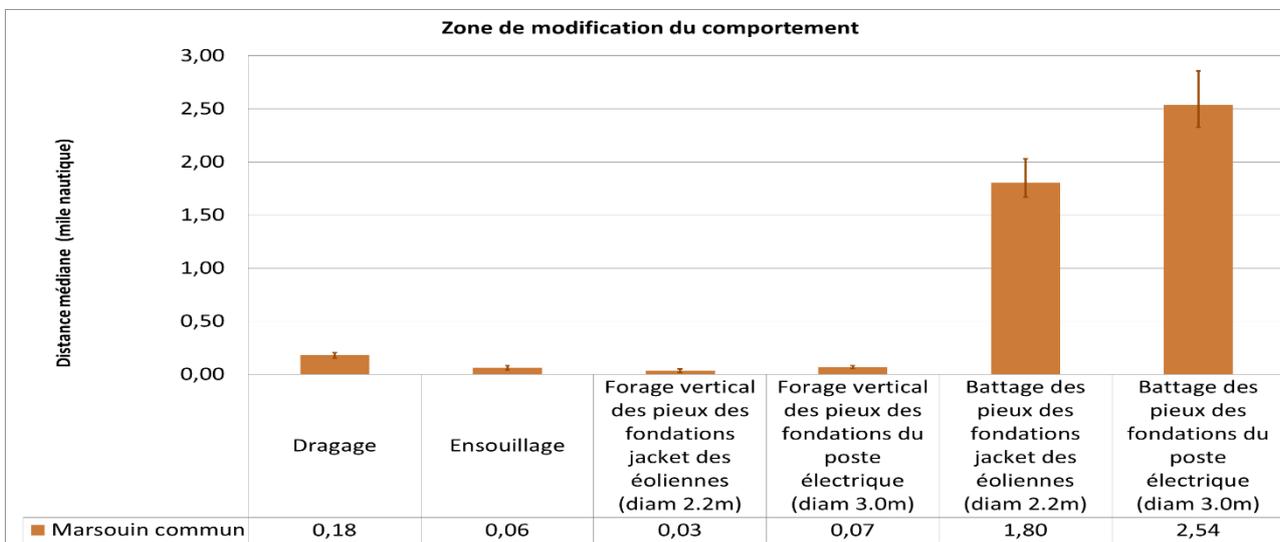


Figure 51 : Surface des zones de risque de modification du comportement pour le Marsouin commun

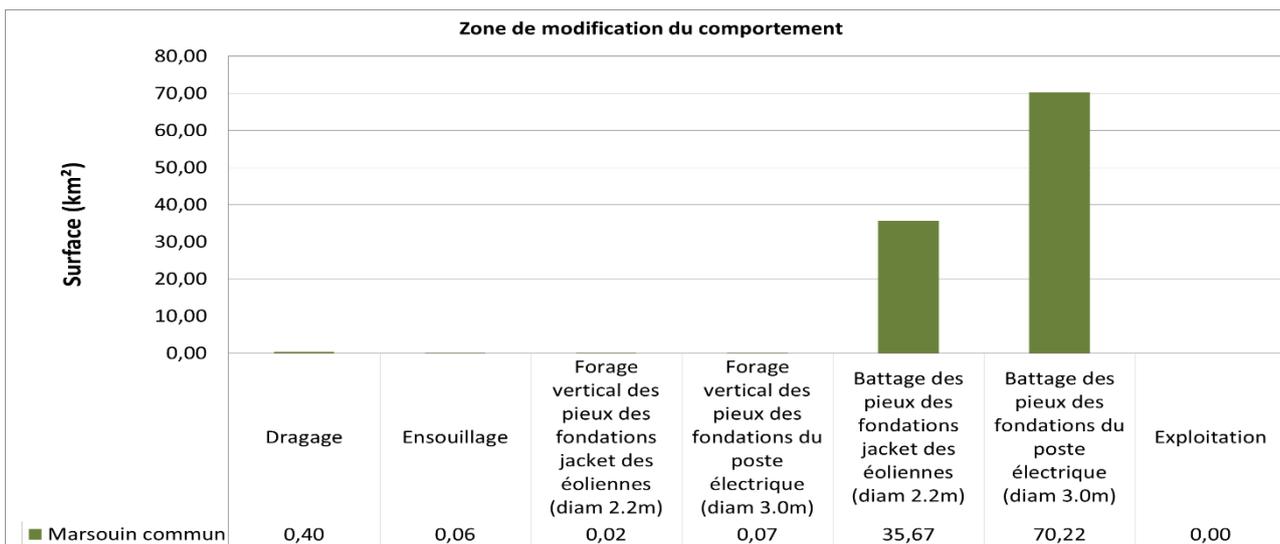
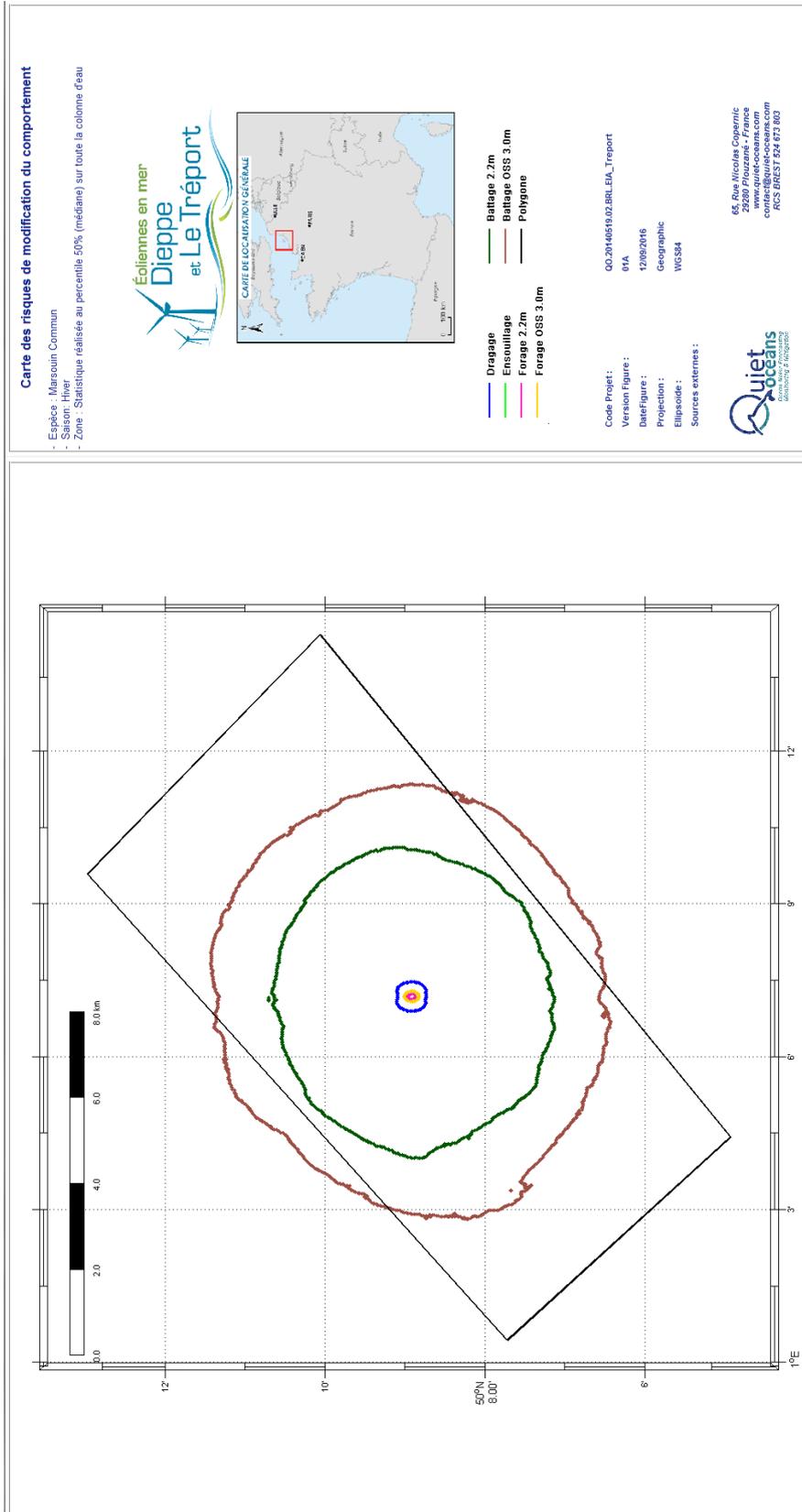


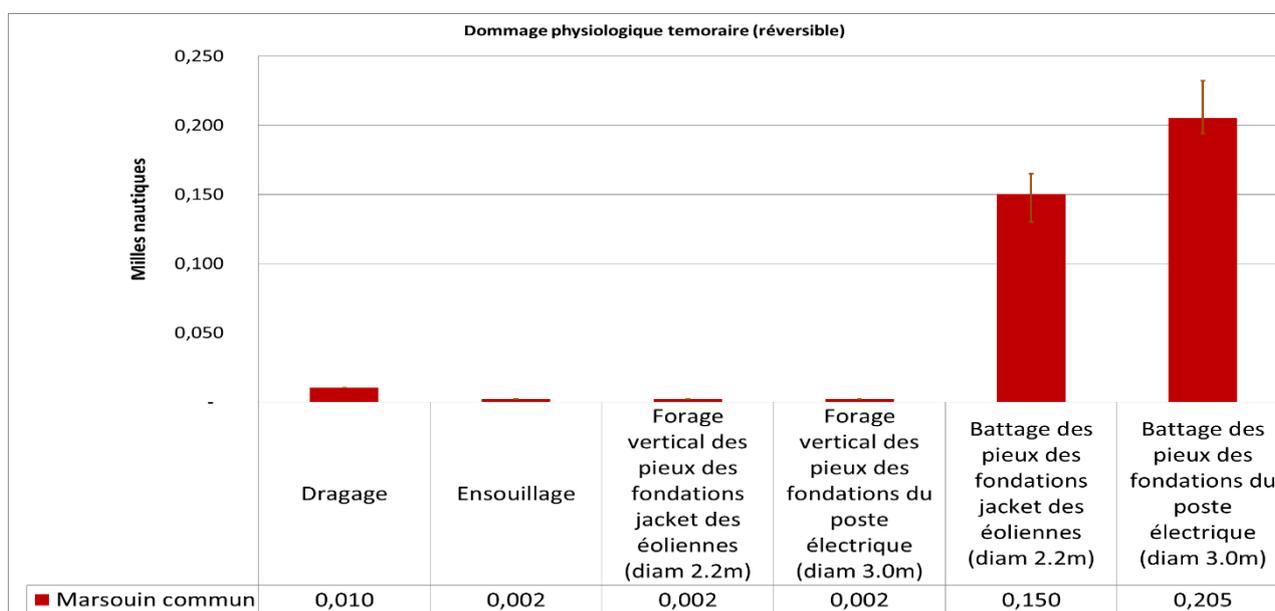
Figure 52 : Cartographie des zones de risque de modification du comportement pour le Marsouin commun



### 7.1.3.3 Zones de dommage physiologique temporaire du Marsouin commun

Les distances de risque de dommage physiologique temporaire (réversible) sont les plus importantes pour les ateliers de battage, pouvant atteindre jusqu'à 0,2 mille nautique (Figure 53). Pour les ateliers d'ensouillage et de forage, les zones de risques sont négligeables, un calcul théorique donnant un rayon de 4 à 6 mètres qui n'a pas de signification physique en comparaison des dimensions physiques de la source de bruit. L'atelier de dragage, approximation des opérations d'aplanissement, donnent un risque de dommage temporaire dans un rayon de 15 à 20 mètres du pieu, sans grande signification lorsqu'il est comparé à la dimension physique du pieu. La maintenance et le fonctionnement des éoliennes ne présentent pas de risque de dommage physiologique temporaire.

Figure 53 : Limites médianes des zones de risque de dommage physiologique temporaire pour le Marsouin commun



Source : Quiet-Oceans, 2016

### 7.1.3.4 Zones de dommage physiologique permanent du Marsouin commun

Un calcul théorique donne potentiellement une atteinte du seuil de dommage physiologique permanent sur une distance de 0,024 mille nautique pour le battage de l'OSS et 0,008 milles nautiques pour le battage des éoliennes, distances à la limite de validité du modèle étant donné les dimensions physiques de la source. En ce qui concerne les autres activités du projet, ni le modèle, ni les calculs théoriques ne font ressortir de dépassement du seuil de dommage physiologique permanent pour le Marsouin commun.

## 7.1.4 Limites géographiques des risques sonores pour les cétacés basses fréquences

### 7.1.4.1 Zones d'exposition sonore des cétacés basses fréquences

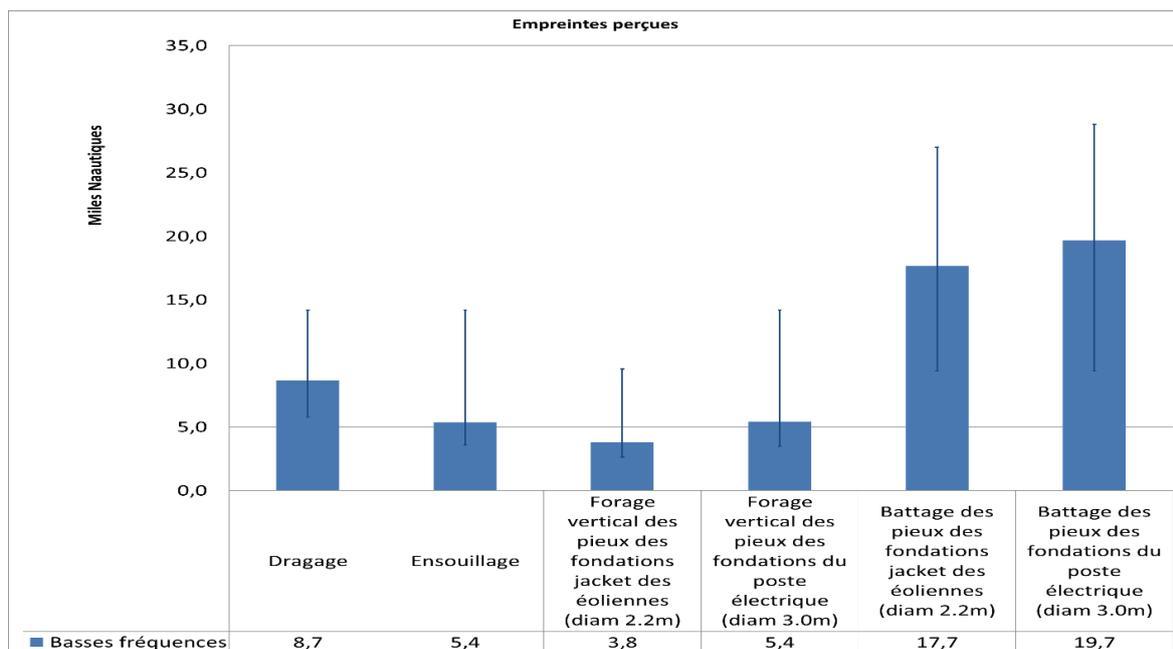
Les empreintes sonores relatives à l'audibilité des bruits du projet pour les cétacés basses fréquences présentent :

- ▮ peu de variabilité entre les saisons ;
- ▮ de grandes disparités en fonction des ateliers mis en œuvre.

En effet, comme le montre les Figure 54, Figure 55 et Figure 56, les cétacés basses fréquences sont susceptibles de percevoir les bruits de battage de la fondation jacket sur des distances médianes atteignant respectivement 17,7 à 19,7 milles nautiques en fonction du diamètre du pieu des structures jacket (2,2 ou 3m respectivement), soit sur des surfaces de 4050 et 5160 km<sup>2</sup>. Les empreintes sonores ont des géométries spatiales très variables en fonction de la direction de propagation des bruits autour du point de génération comme le montre la cartographie des empreintes sonores (Figure 56). Cette variabilité s'explique par la combinaison de la bathymétrie, des conditions météo-océanographiques, des natures du fond, et pour beaucoup du bruit ambiant existant. On remarquera en particulier que ces bruits peuvent être perceptibles dans des zones le long des côtes anglaises et dans la baie de Saint-Vaast-La Hougue, lorsque le bruit ambiant se réduit suffisamment pour ne plus masquer les bruits du battage. Ces distances de perception sont plus grandes que celles obtenues lors des phases de dragage, d'ensouillage des câbles et du forage qui s'étalent sur des surfaces de 800, 280 et 150 km<sup>2</sup> (Figure 55).

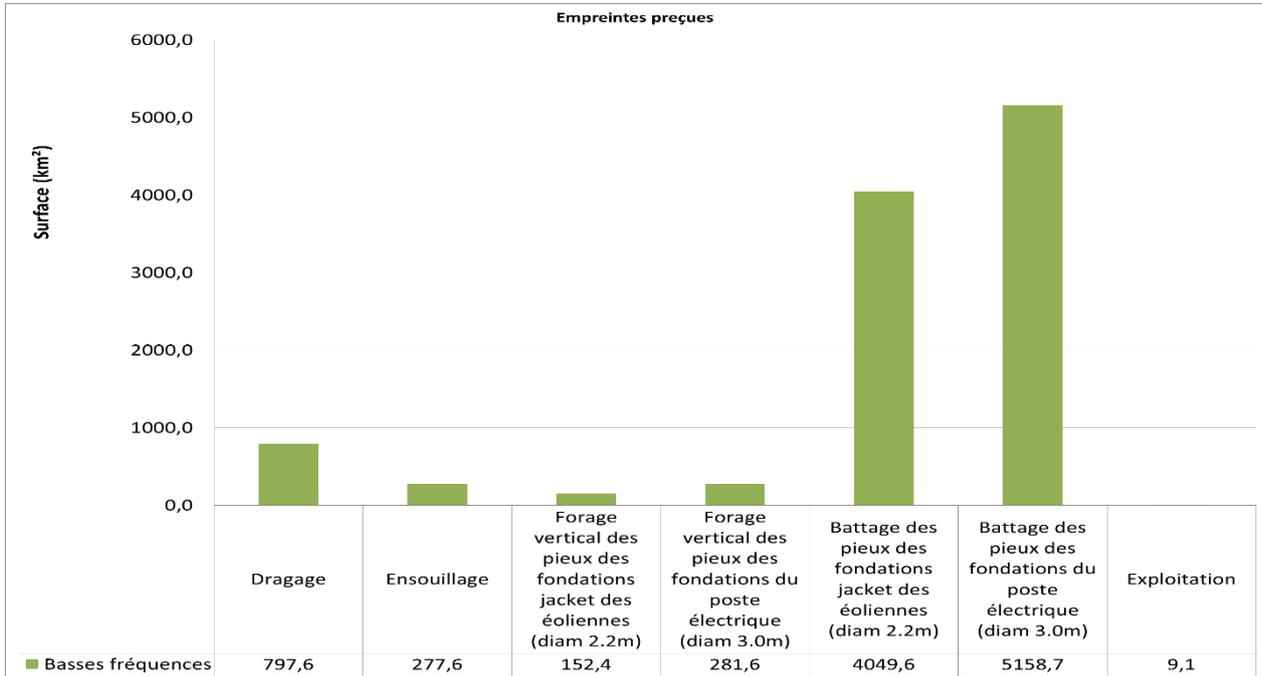
Les autres bruits sont perceptibles sur des zones plus confinées autour des ateliers, allant de quelques milles nautiques (forage vertical, exploitation du parc et maintenance). Les empreintes sont plus étendues selon un axe sud-ouest nord-est car le bruit du trafic maritime concentré en centre Manche domine les bruits du chantier qui se propagent perpendiculairement à cet axe.

Figure 54 : Limites médianes des empreintes sonores pour les cétacés basses fréquences



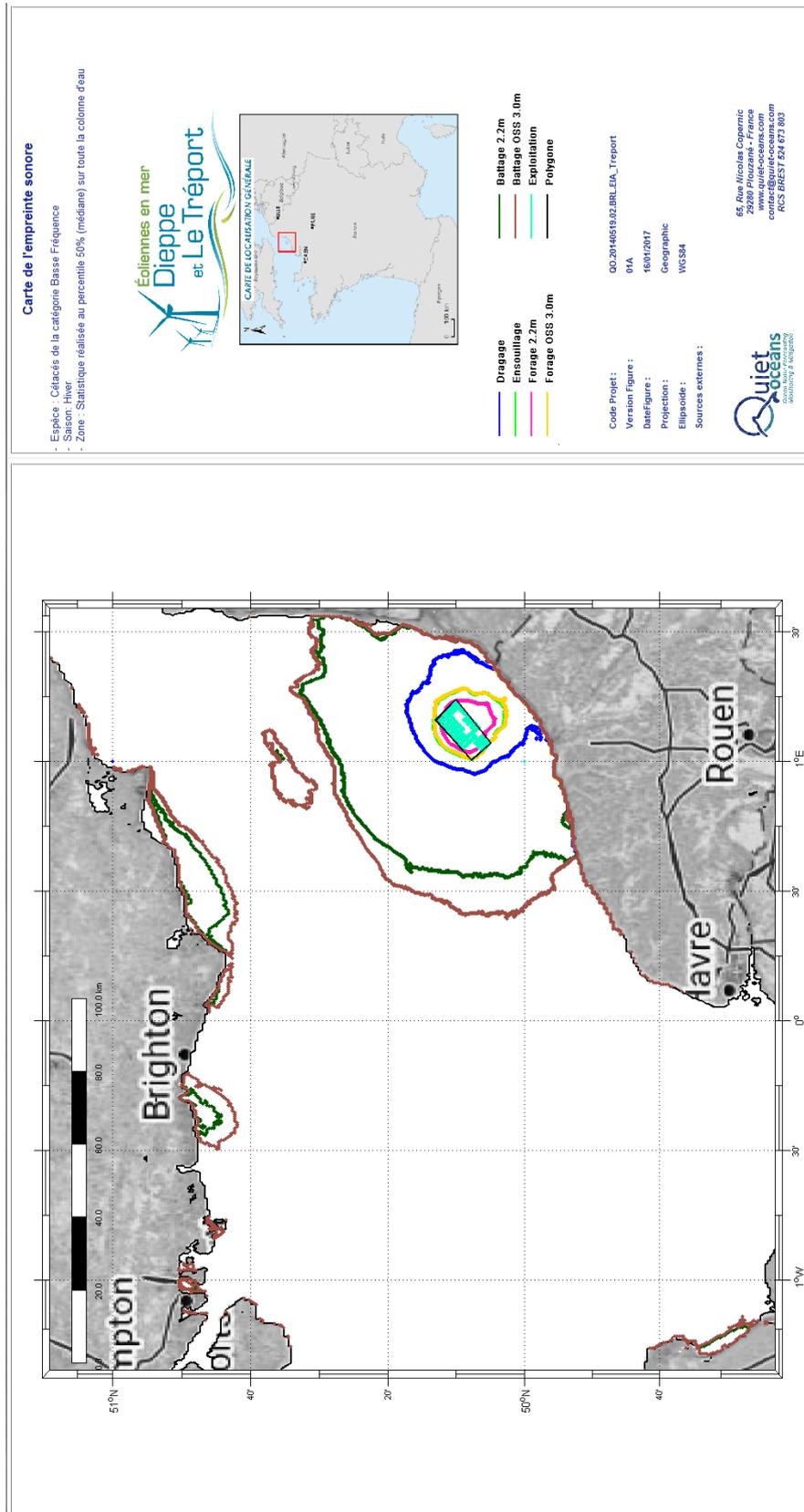
Source : Quiet-Oceans, 2016

Figure 55 : Surface des empreintes sonores pour les cétacés basses fréquences



Source : Quiet-Oceans, 2016

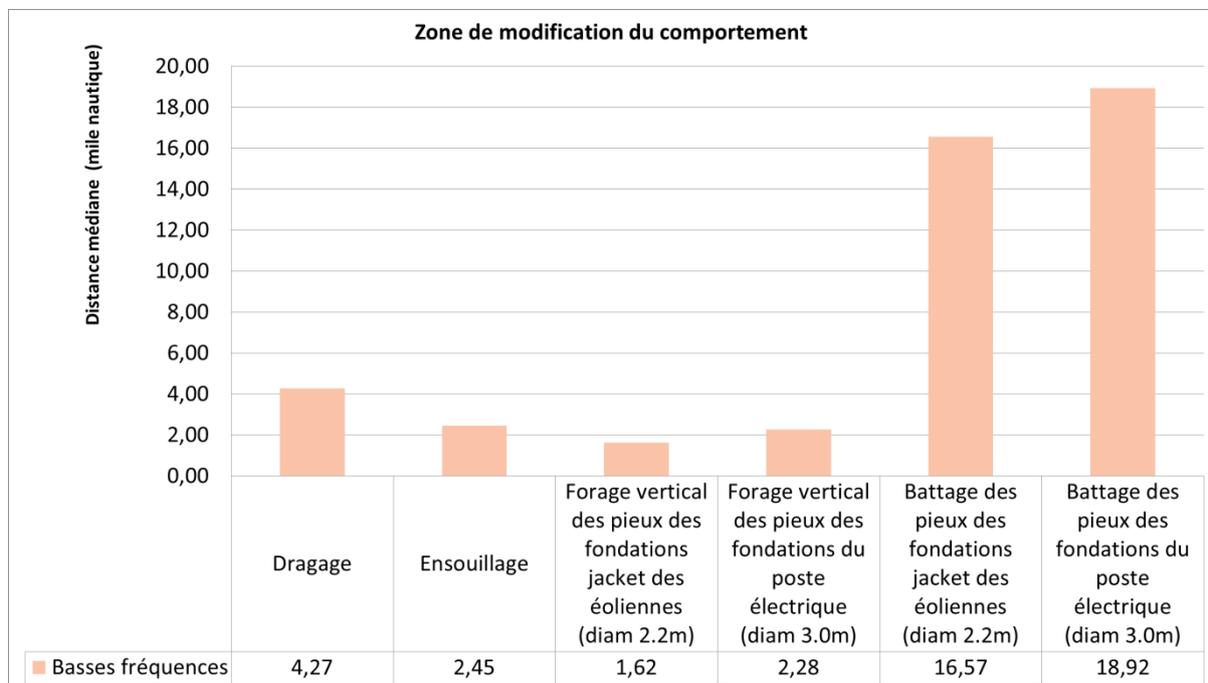
Figure 56 : Cartographie des zones de perception des bruits du projet pour les cétacés basses fréquences



### 7.1.4.2 Zones de dérangement des cétacés basses fréquences

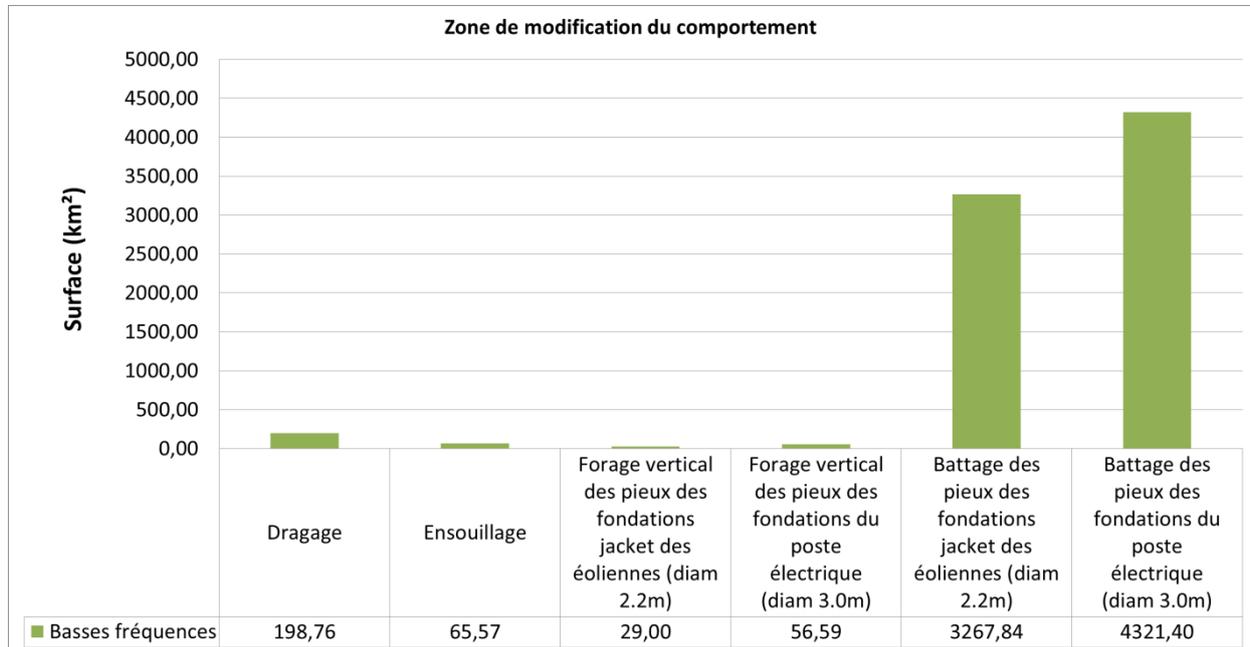
Les zones de dérangement pour les cétacés basses fréquences ne sont pas systématiquement très différentes des limites de l'empreinte sonore en raison du seuil de tolérance choisi (120 dB, valeur conservatrice). Une forte disparité existe entre les différents ateliers de construction (Figure 57). Les opérations de battage des pieux de la fondation de l'éolienne et ceux de la fondation du poste électrique en mer présentent un risque de modification du comportement dans des rayons médians de 16,5 et 18,9 milles nautiques, soit respectivement des surfaces de 3200 et 4300 km<sup>2</sup>. Les autres activités présentent des zones de risque de dérangement très inférieures (respectivement de 4 et 2 milles nautiques pour le dragage et l'ensouillage). Le forage vertical entraîne un rayon médian faible de l'ordre de 2 milles nautiques en fonction du diamètre.

Figure 57 : Limites médianes des zones de risque de modification du comportement pour les cétacés basses fréquences



Source : Quiet-Oceans, 2018

Figure 58 Surface des zones de risque de modification du comportement pour les cétacés basses fréquences



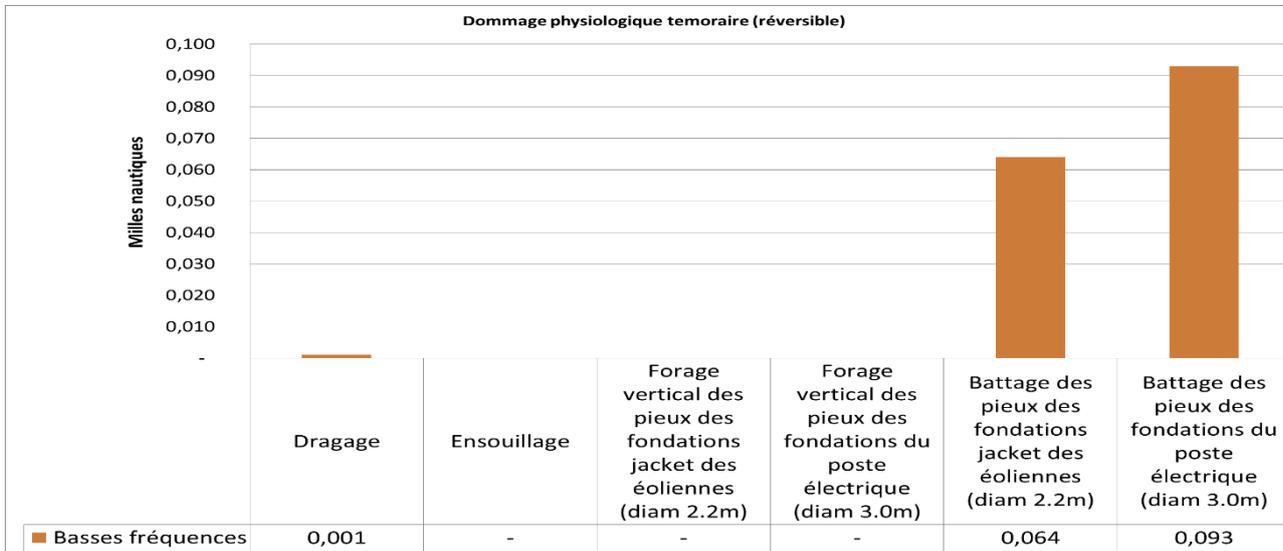
Source : Quiet-Oceans, 2018

#### 7.1.4.3 Zone de dommage physiologique temporaire des cétacés basses fréquences

La Figure 59 montre que seules les opérations de battage de pieu sont susceptibles d'engendrer des dommages physiologiques temporaires (réversibles) jusqu'à 0,09 mille nautique.

Un calcul théorique de la distance de risque de dommage physiologique temporaire pour les opérations de dragage donne une distance de 2 m qui n'a pas véritablement de réalité physique étant donné les dimensions physiques des sources de bruit. Les autres opérations ne présentent pas de risque de dommage physiologique temporaire.

Figure 59 : Limites médianes des zones de risque de dommage physiologique temporaire (réversible) pour les cétacés basses fréquences



Source : Quiet-Oceans, 2016

#### 7.1.4.4 Zone de dommage physiologique permanent des cétacés basses fréquences

Une distance théorique de dommage physiologique permanent de 2 m a été obtenue pour le battage de l'OSS, distance qui, étant donné les diamètres des pieux, n'a pas de réalité physique.

Les autres opérations ne présentent pas de risque de dommage physiologique permanent.

## 7.1.5 Limites géographiques des risques sonores pour les cétacés moyennes fréquences

### 7.1.5.1 Zones d'exposition sonore des cétacés « moyennes fréquences »

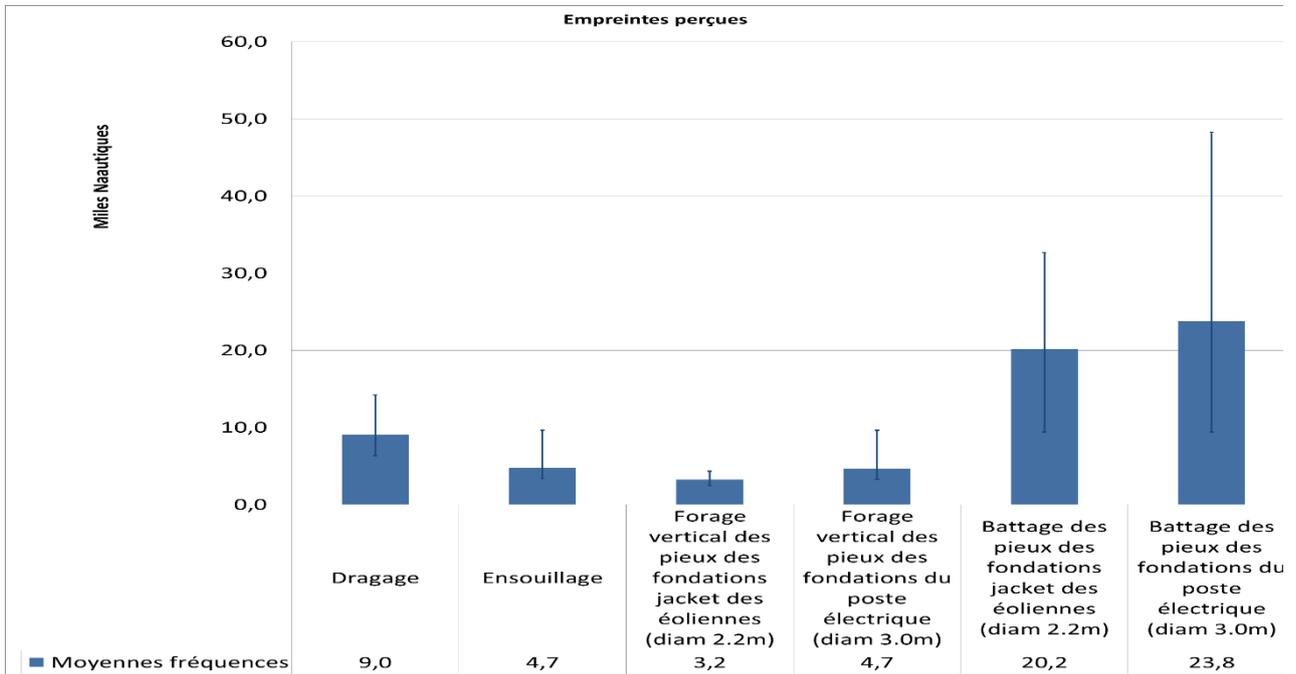
Les empreintes sonores relatives à l'audibilité des bruits du projet pour les cétacés moyennes fréquences présentent :

- peu de variabilité entre les saisons ;
- de grandes disparités en fonction des ateliers mis en œuvre.

En effet, comme le montre les Figure 60, Figure 61 et Figure 62, les cétacés moyennes fréquences sont susceptibles de percevoir les bruits de battage de la fondation jacket sur des distances médianes atteignant respectivement 20 et 24 milles nautiques respectivement en fonction du diamètre du pieu de la structure jacket (2,2 ou 3m). Les empreintes sonores ont des géométries spatiales très variables en fonction de la direction de propagation des bruits autour du point de génération (Figure 62) et couvrent respectivement 5380 et 7670 km<sup>2</sup>. Cette variabilité s'explique par la combinaison de la bathymétrie, des conditions météo-océanographiques, des natures du fond, et en grande partie du bruit ambiant existant. On remarquera en particulier que ces bruits peuvent être perceptibles dans des zones le long des côtes anglaises et dans la baie de Saint-Vaast-La Hougue, lorsque le bruit ambiant se réduit suffisamment pour ne plus masquer les bruits du battage. Ces distances de perception plus grandes que celles obtenues lors des phases de dragage et d'ensouillage des câbles.

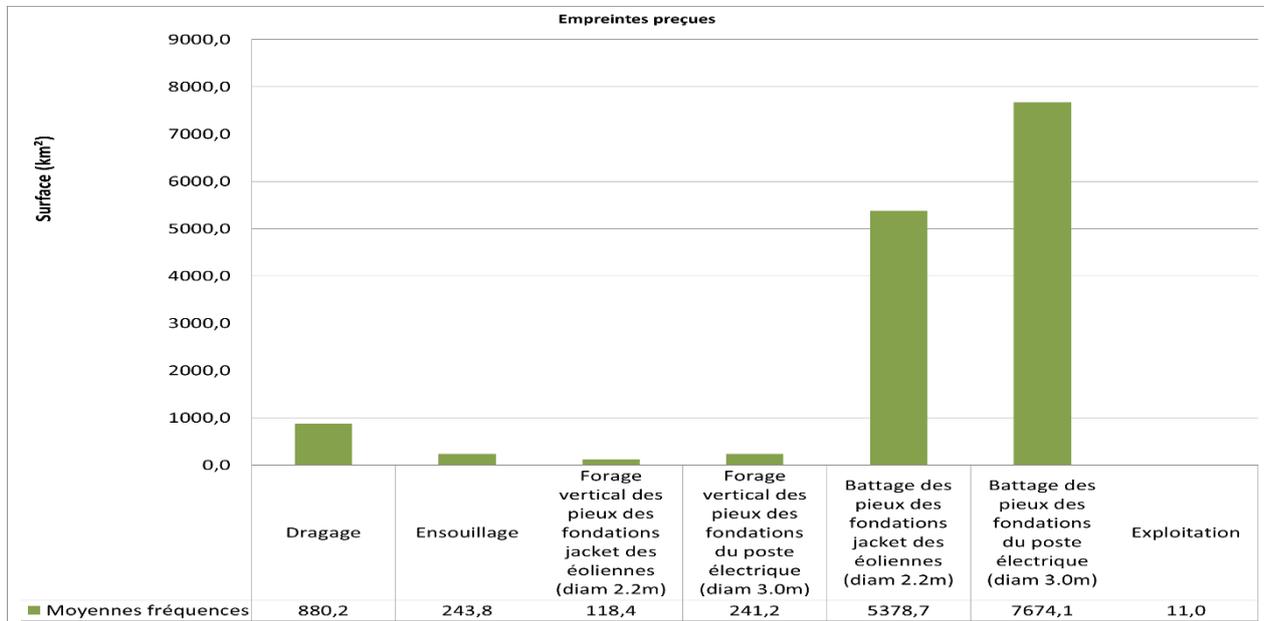
Les autres bruits sont perceptibles sur des zones plus confinées autour des ateliers, allant de quelques milles nautiques (120 à 240 km<sup>2</sup>) pour le forage vertical à moins d'une dizaine de milles nautiques pour le dragage (880 km<sup>2</sup>). Les empreintes sont plus étendues selon un axe sud-ouest nord-est car le bruit du trafic maritime concentré en centre Manche domine les bruits du chantier qui se propagent perpendiculairement à cet axe.

Figure 60 : Limites médianes des empreintes sonores pour les cétacés moyennes fréquences



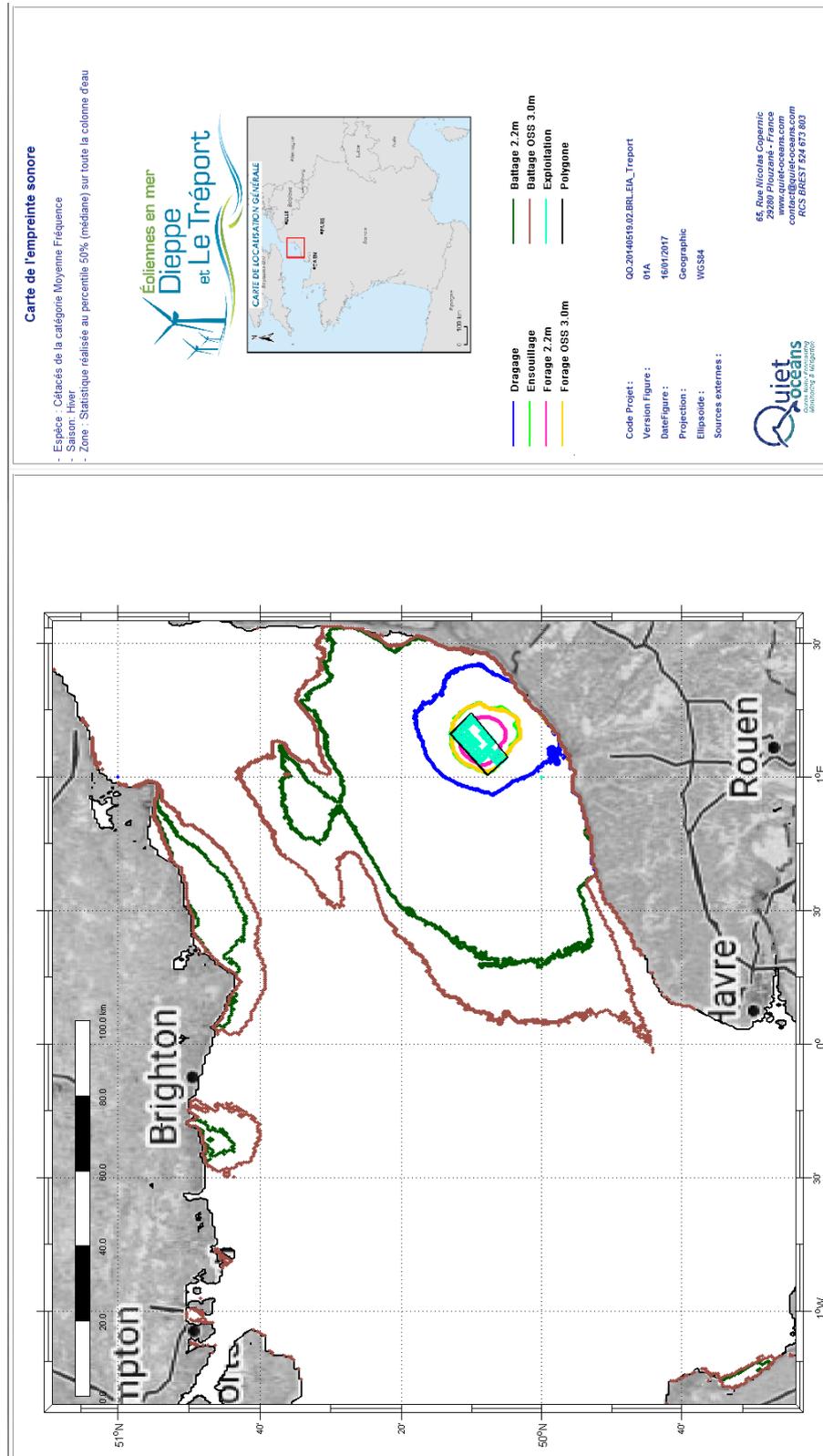
Source : Quiet-Oceans, 2016

Figure 61 : Surface des empreintes sonores pour les cétacés moyennes fréquences



Source : Quiet-Oceans, 2016

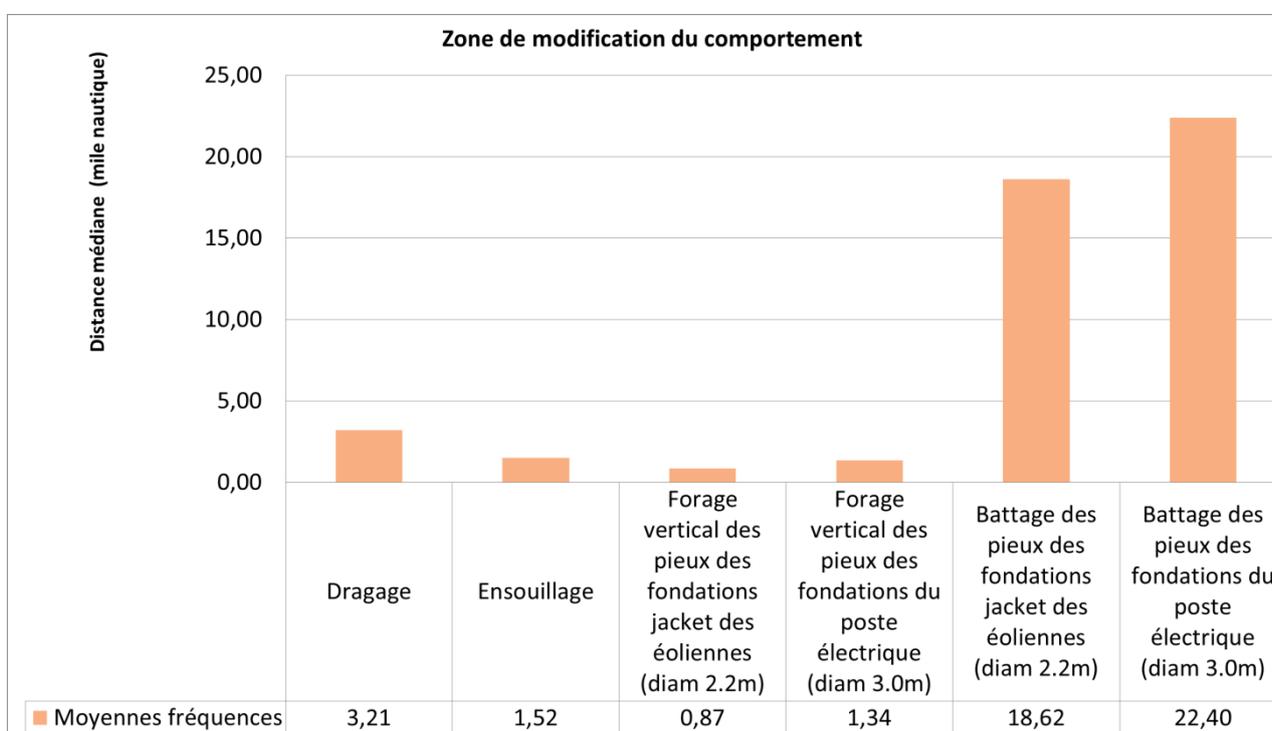
Figure 62 : Cartographie des zones de perception des bruits du projet pour les cétacés moyennes fréquences



### 7.1.5.2 Zones de dérangement des cétacés moyennes fréquences

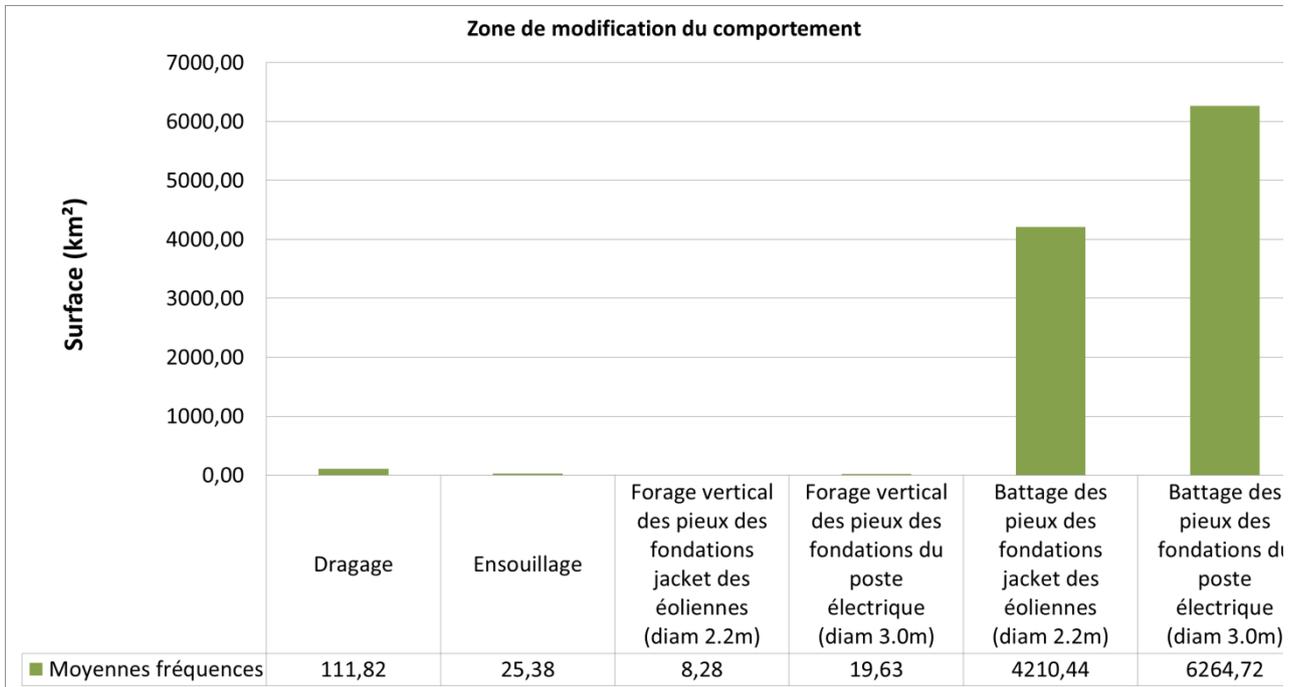
Les zones de dérangement pour les cétacés moyennes fréquences ne sont pas systématiquement très différentes des limites de l'empreinte sonore en raison du seuil de tolérance choisi (120 dB, valeur conservatrice). Une forte disparité existe entre les différents ateliers de construction (Figure 63). Les opérations de battage des pieux de la fondation de l'éolienne et ceux de la fondation du poste électrique en mer présentent un risque de modification du comportement dans des rayons médians de 18,6 et 22,4 milles nautiques, soit respectivement des surfaces de 4200 et 6200 km<sup>2</sup>. Les autres activités présentent des zones de risque de dérangement très inférieures (respectivement de 3,2 et 1,5 milles nautiques pour le dragage et l'ensouillage). Le forage vertical entraîne un rayon médian faible inférieur 1,4 milles nautiques en fonction du diamètre.

Figure 63 : Limites médianes des zones de risque de modification du comportement pour les cétacés moyennes fréquences



Source : Quiet-Oceans, 2018

Figure 64 Surface des zones de risque de modification du comportement pour les cétacés moyennes fréquences



Source : Quiet-Oceans, 2018

### 7.1.5.3 Zone de dommage physiologique temporaire des cétacés « moyennes fréquences »

Les résultats des simulations montrent qu'il n'existe pas de dommage physiologique temporaire pour ces espèces. En effet, des distances théoriques de 10 à 15 mètres pour des dommages temporaires ont bien été obtenues pour les battages, mais qui n'ont que peu de signification physique étant donné les dimensions physiques des sources de bruits. Les seuils temporaires pour les autres ateliers ne sont pas atteints.

### 7.1.5.4 Zone de dommage physiologique permanent des cétacés « moyennes fréquences »

Les résultats des simulations montrent qu'il n'existe pas de dommage physiologique permanent pour ces espèces. En effet, des distances théoriques de 2 mètres pour des dommages permanents ont bien été obtenues, mais qui n'ont aucune réalité étant donné les diamètres des pieux. Les seuils permanents pour les autres ateliers ne sont pas atteints.

## 7.1.6 Limites géographiques des risques sonores des cétacés « hautes fréquences » autre que le Marsouin commun

### 7.1.6.1 Zones d'exposition sonore des cétacés « hautes fréquences »

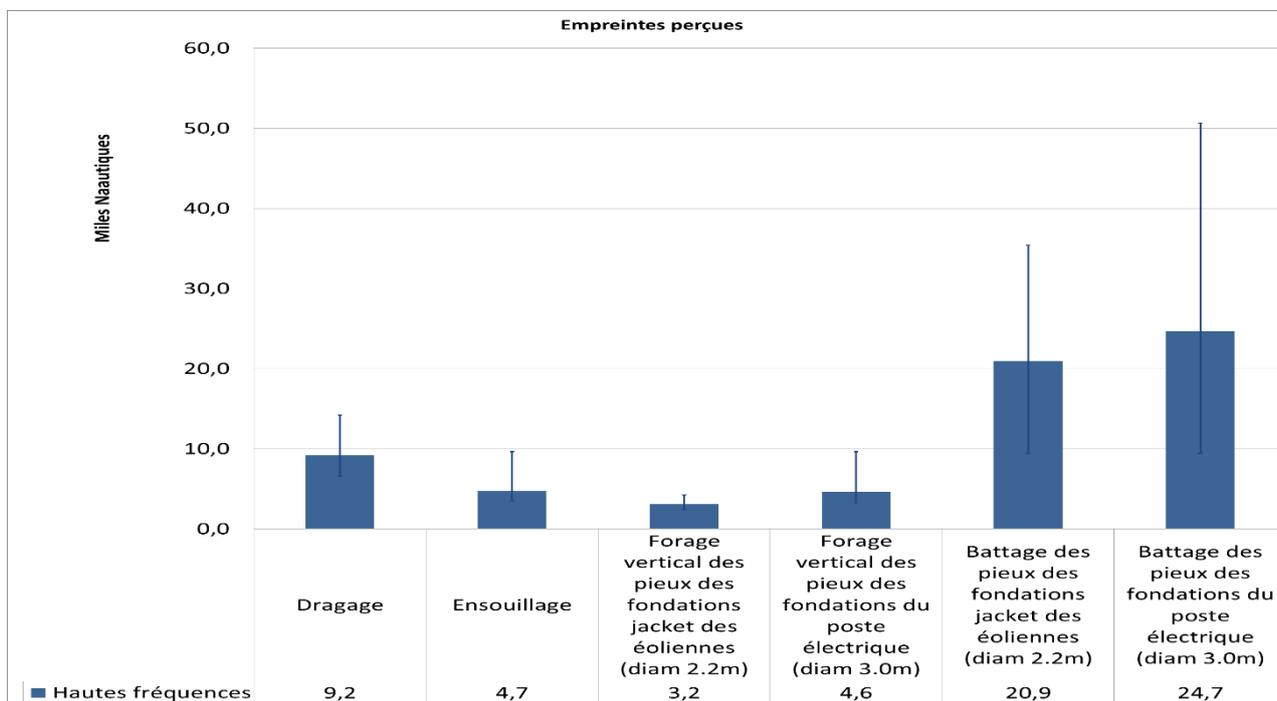
Les empreintes sonores relatives à l'audibilité des bruits du projet pour les cétacés hautes fréquences présentent :

- ▶ peu de variabilité entre les saisons ;
- ▶ de grandes disparités en fonction des ateliers mis en œuvre.

En effet, comme le montre les Figure 65 et Figure 67, les cétacés hautes fréquences sont susceptibles de percevoir les bruits de battage de la fondation jacket sur de très grandes distances, dont les portées médianes atteignent respectivement 21 à 25 milles nautiques respectivement en fonction du diamètre du pieu de la structure jacket (2,2 ou 3m), représentant des surfaces de 5680 et 8190 km<sup>2</sup> (Figure 66). Les empreintes sonores ont des géométries spatiales très variables en fonction de la direction de propagation des bruits autour du point de génération (Figure 67), d'autant plus que les empreintes sont étendues. Cette variabilité s'explique par la combinaison de la bathymétrie, des conditions météo-océanographiques, des natures du fond, et du bruit ambiant existant. On remarquera en particulier que ces bruits peuvent être perceptibles dans des zones le long des côtes anglaises et dans la baie de Saint-Vaast-La Hougue, lorsque le bruit ambiant se réduit suffisamment pour ne plus masquer les bruits du battage. Ces distances de perception sont plus grandes que celles obtenues lors des phases de dragage et d'ensouillage des câbles.

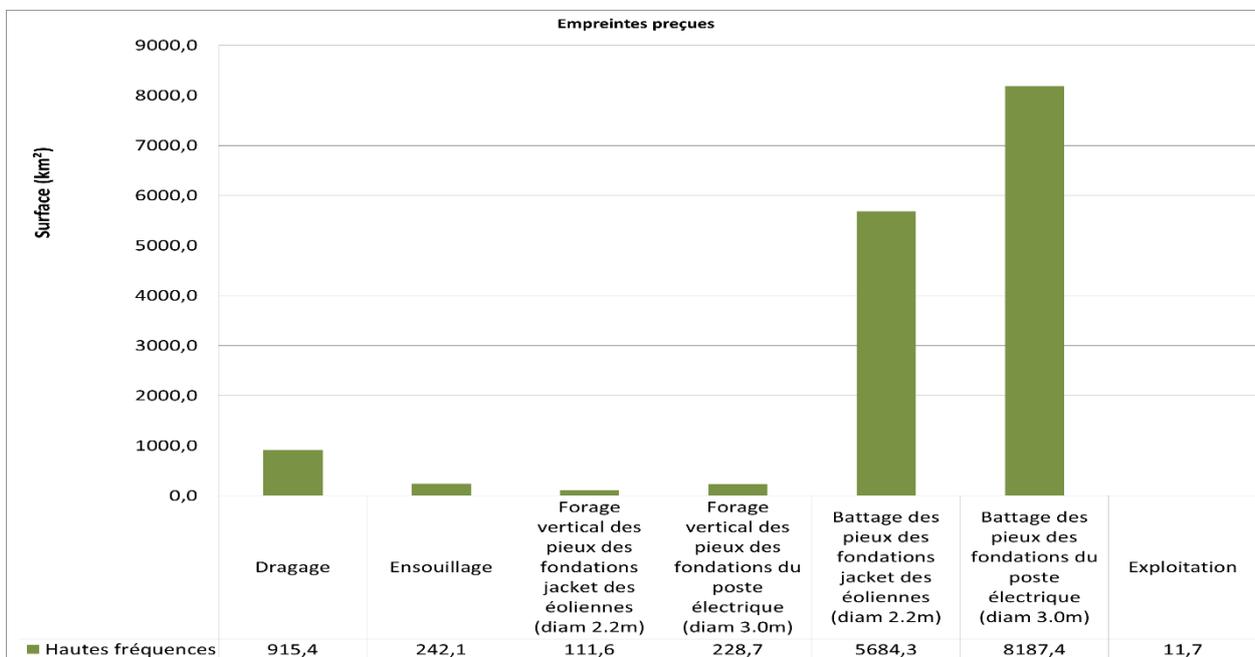
Les autres bruits sont perceptibles sur des zones plus confinées autour des ateliers, allant de quelques milles nautiques pour le forage vertical à moins d'une dizaine pour le dragage (Figure 65). Pour ces activités aussi, les empreintes sont plus étendues selon un axe sud-ouest nord-est car le bruit du trafic maritime concentré en centre Manche domine les bruits du chantier qui se propagent perpendiculairement à cet axe (Figure 67).

Figure 65 : Limites médianes des empreintes sonores pour les cétacés hautes fréquences



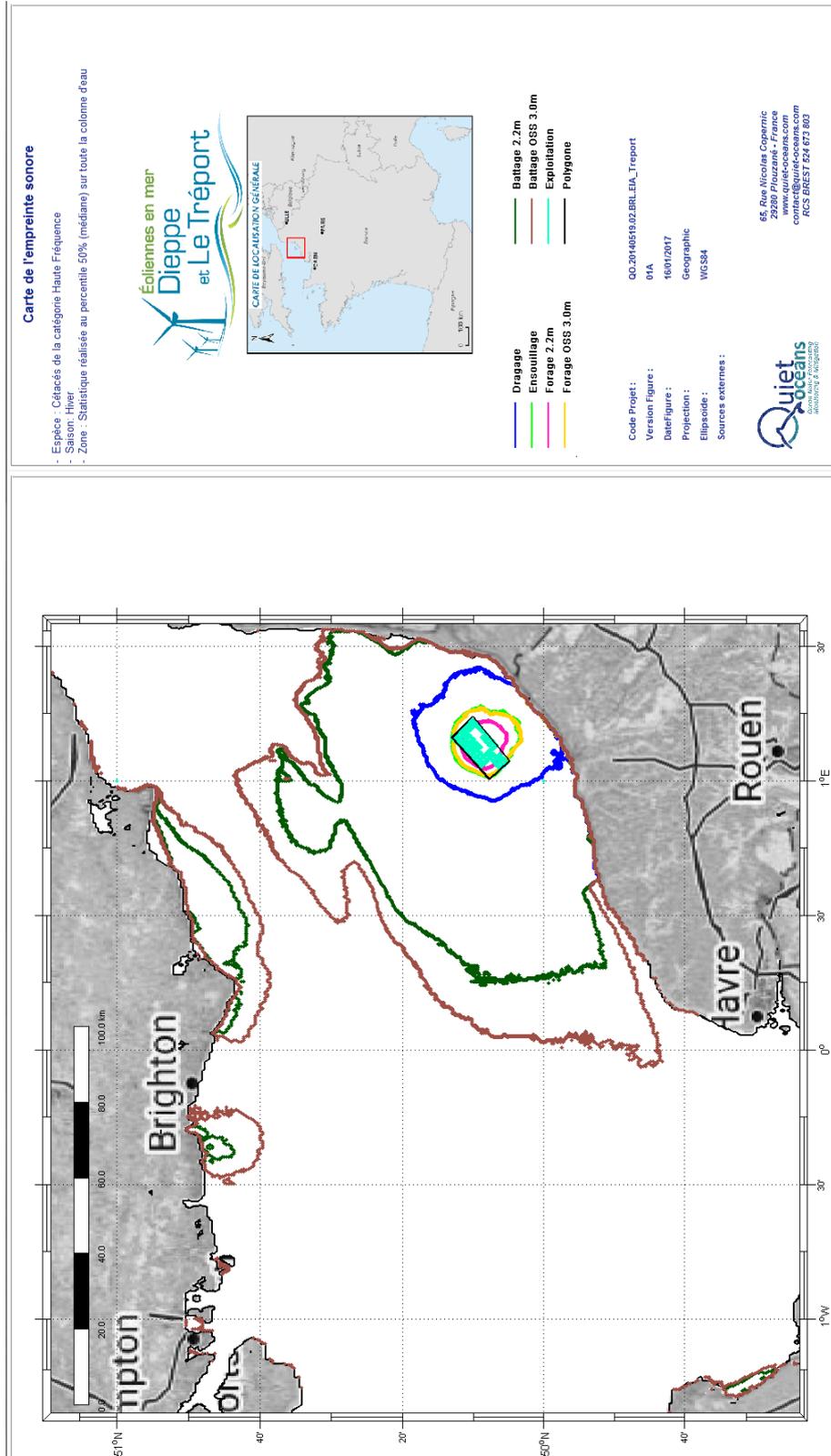
Source : Quiet-Oceans, 2016

Figure 66 : Surface des empreintes sonores pour les cétacés hautes fréquences



Source : Quiet-Oceans, 2016

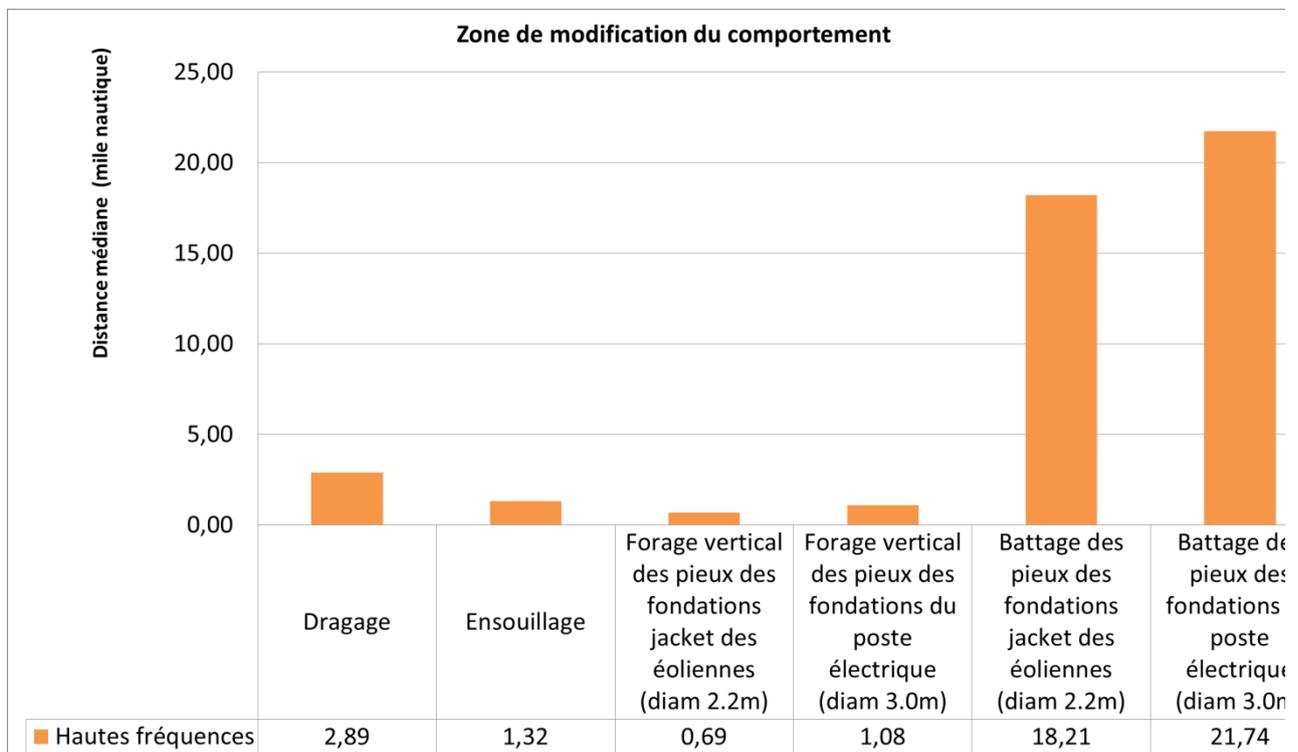
Figure 67 : Cartographie des zones de perception des bruits du projet pour les cétacés hautes fréquences



### 7.1.6.2 Zones de dérangement des cétacés hautes fréquences

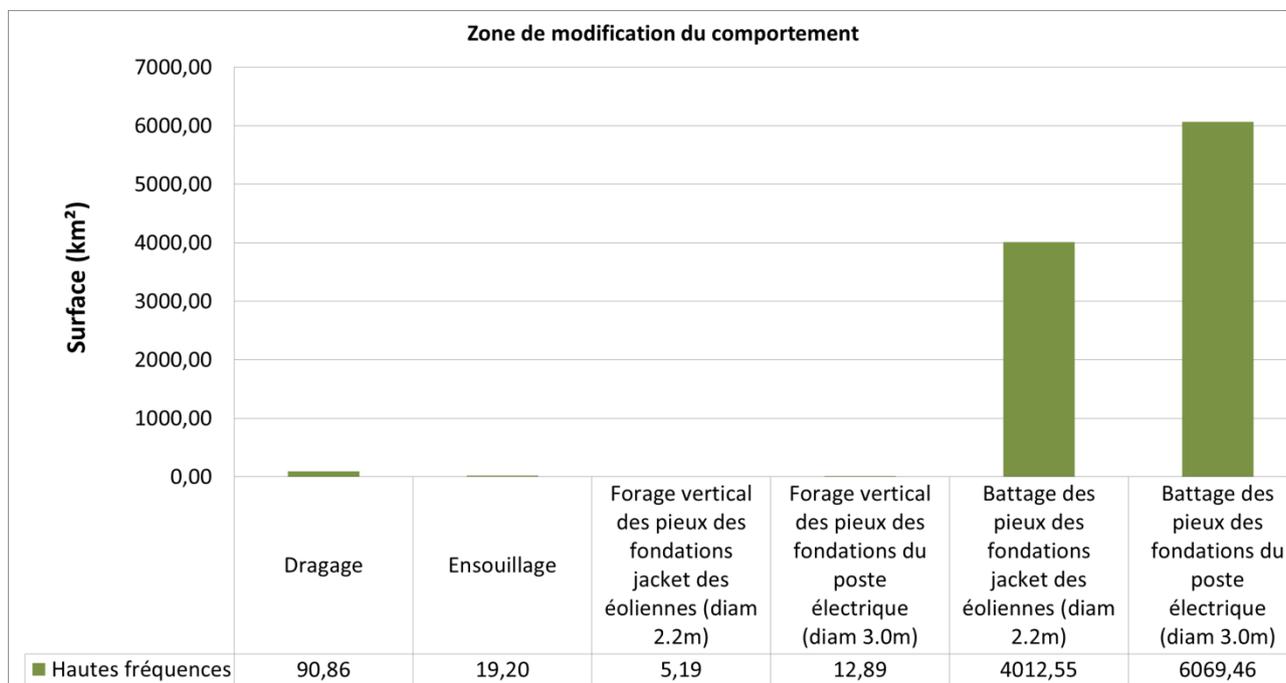
Les zones de dérangement pour les cétacés hautes fréquences ne sont pas systématiquement très différentes des limites de l'empreinte sonore en raison du seuil de tolérance choisi (120 dB, valeur conservatrice). Une forte disparité existe entre les différents ateliers de construction (Figure 68). Les opérations de battage des pieux de la fondation de l'éolienne et ceux de la fondation du poste électrique en mer présentent un risque de modification du comportement dans des rayons médians de 18,2 et 21,7 milles nautiques, soit respectivement des surfaces de 4000 et 6000 km<sup>2</sup>. Les autres activités présentent des zones de risque de dérangement très inférieures (respectivement de 2,9 et 1,3 milles nautiques pour le dragage et l'ensouillage). Le forage vertical entraîne un rayon médian faible de l'ordre de 1 mille nautique au maximum en fonction du diamètre.

Figure 68 : Limites médianes des zones de risque de modification du comportement pour les cétacés hautes fréquences



Source : Quiet-Oceans, 2016

Figure 69 Surface des zones de risque de modification du comportement pour les cétacés hautes fréquences



Source : Quiet-Oceans, 2016

### 7.1.6.3 Zone de dommage physiologique temporaire des cétacés « hautes fréquences »

Les résultats des simulations montrent qu'il n'existe pas de dommage physiologique temporaire pour ces espèces. En effet, des distances théoriques inférieures à 12 mètres pour des dommages temporaires ont bien été obtenues pour les battages, mais n'ont que peu de signification physique étant donné les dimensions physiques des sources de bruits. Les seuils temporaires pour les autres ateliers ne sont pas atteints, ni par modèle, ni par calcul théorique.

### 7.1.6.4 Zone de dommage physiologique permanent des cétacés « hautes fréquences »

Les résultats des simulations montrent qu'il n'existe pas de dommage physiologique permanent pour ces espèces. En effet, des distances théoriques de moins de 2 mètres pour des dommages permanents ont bien été obtenues, mais n'ont aucune réalité étant donné les diamètres des pieux. Les seuils temporaires pour les autres ateliers ne sont pas atteints, ni par modèle, ni par calcul théorique.

## 7.1.7 Limites géographiques des risques sonores des pinnipèdes

### 7.1.7.1 Zones d'exposition sonore des pinnipèdes

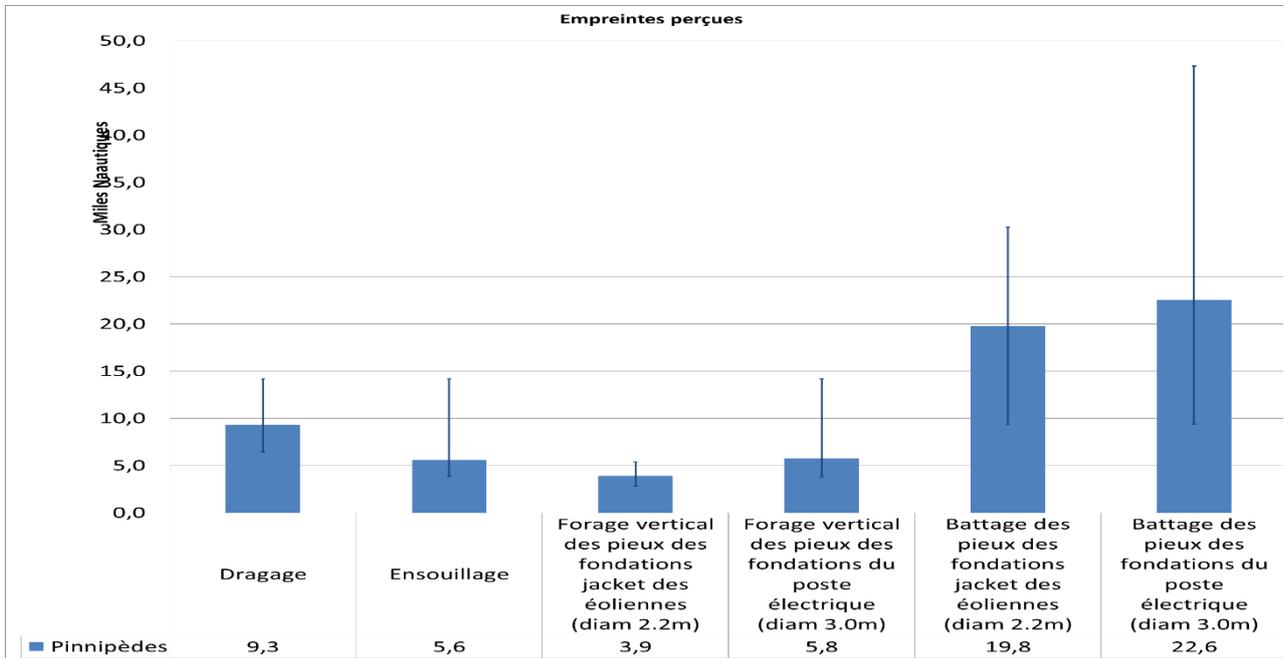
Les empreintes sonores relatives à l'audibilité des bruits du projet pour les pinnipèdes présentent :

- ▮ peu de variabilité entre les saisons ;
- ▮ de grandes disparités en fonction des ateliers mis en œuvre.

En effet, comme le montre les Figure 70, Figure 71 et Figure 72, les pinnipèdes sont susceptibles de percevoir les bruits de battage de la fondation jacket sur des distances médianes atteignant 19 à 22 milles nautiques respectivement en fonction du diamètre du pieu de la structure jacket (2,2 ou 3 m), soit respectivement 5 070 et 6 900 km<sup>2</sup>. Les empreintes sonores ont des géométries spatiales très variables en fonction de la direction de propagation des bruits autour du point de génération. Cette variabilité s'explique par la combinaison de la bathymétrie, des conditions météo-océanographiques, des natures du fond, et en grande partie du bruit ambiant existant. On remarquera en particulier que ces bruits peuvent être perceptibles dans des zones le long des côtes anglaises et dans la baie de Saint-Vaast-La Hougue, lorsque le bruit ambiant se réduit suffisamment pour ne plus masquer les bruits du battage. Ces distances de perception sont plus grandes que celles obtenues lors des phases de dragage et d'ensouillage des câbles qui atteignent quelques milles nautiques pour les opérations de forage à moins d'une dizaine pour le dragage (Figure 70).

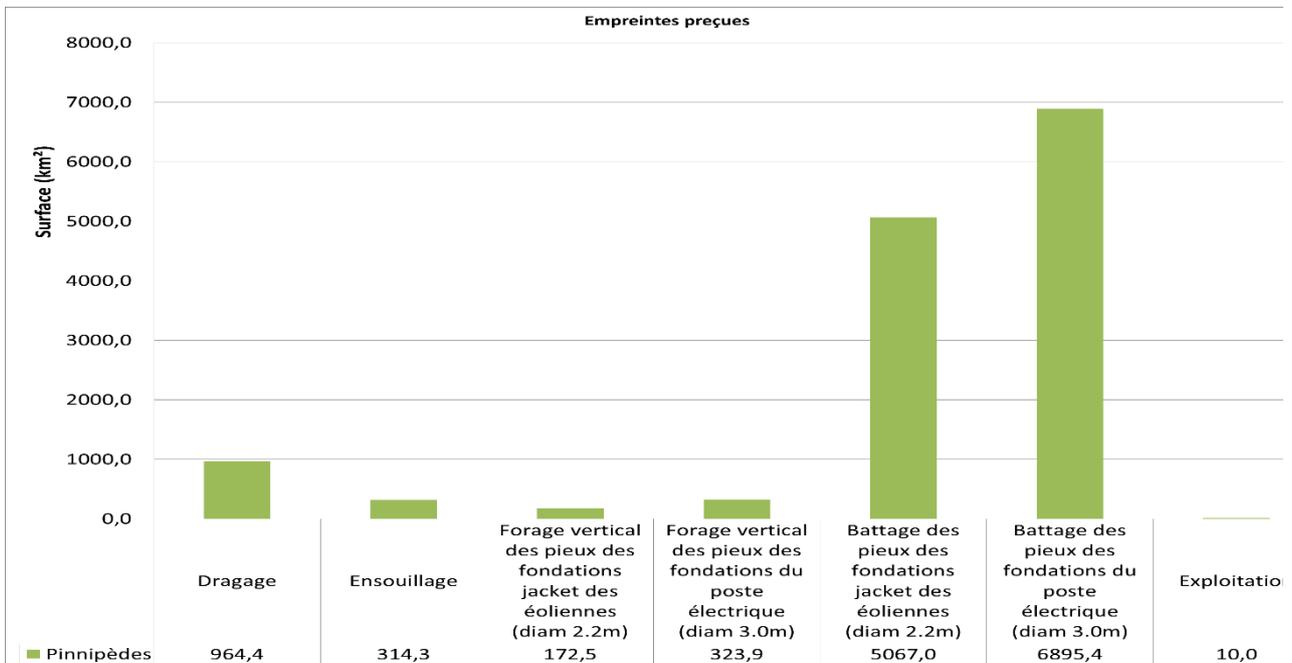
Les empreintes sont plus étendues selon un axe sud-ouest nord-est (Figure 72) car le bruit du trafic maritime concentré en centre Manche domine les bruits du chantier qui se propagent perpendiculairement à cet axe.

Figure 70 : Limites médianes des empreintes sonores pour les pinnipèdes



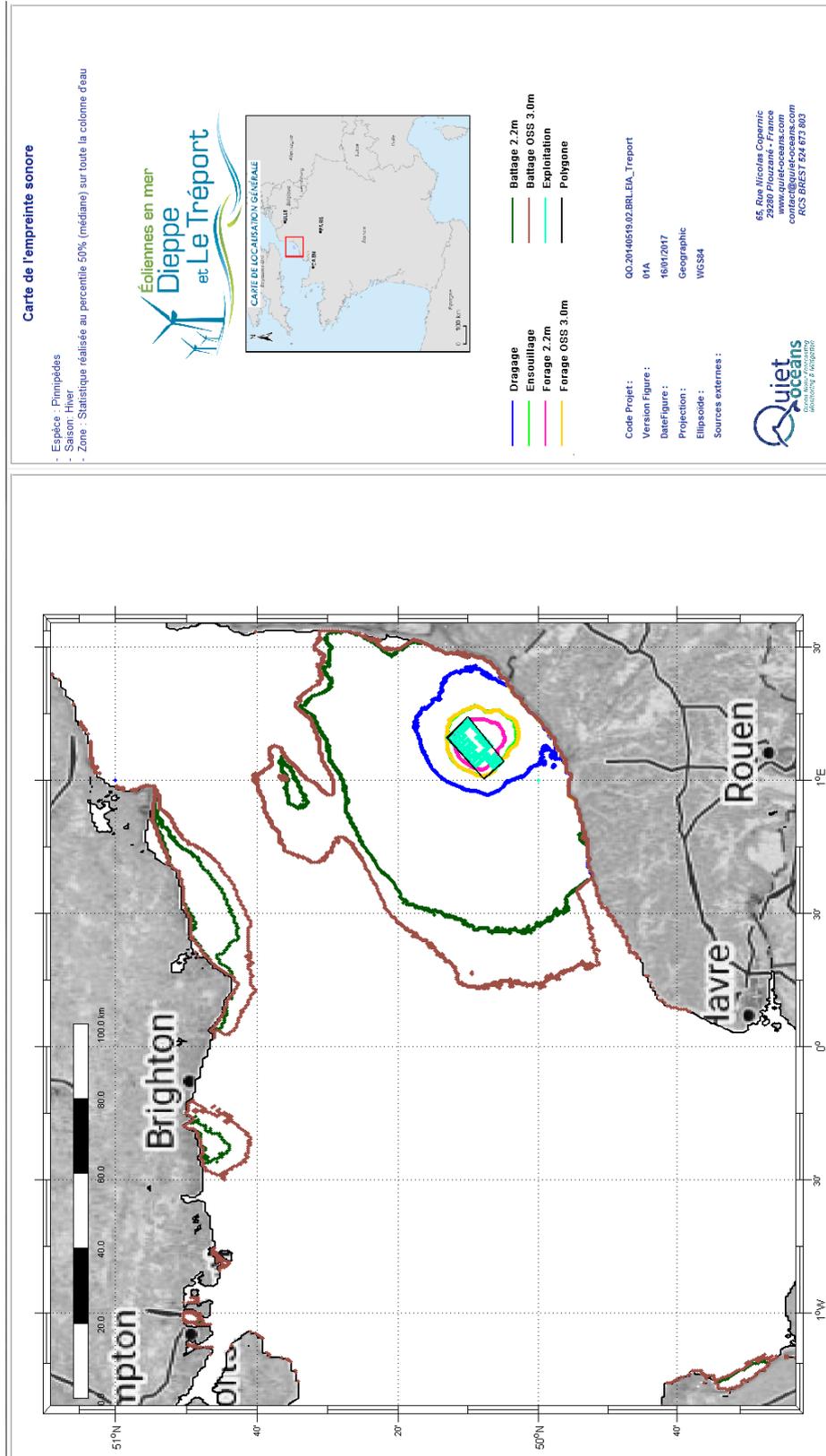
Source : Quiet-Oceans, 2016

Figure 71 : Surface des empreintes sonores pour les pinnipèdes



Source : Quiet-Oceans, 2016

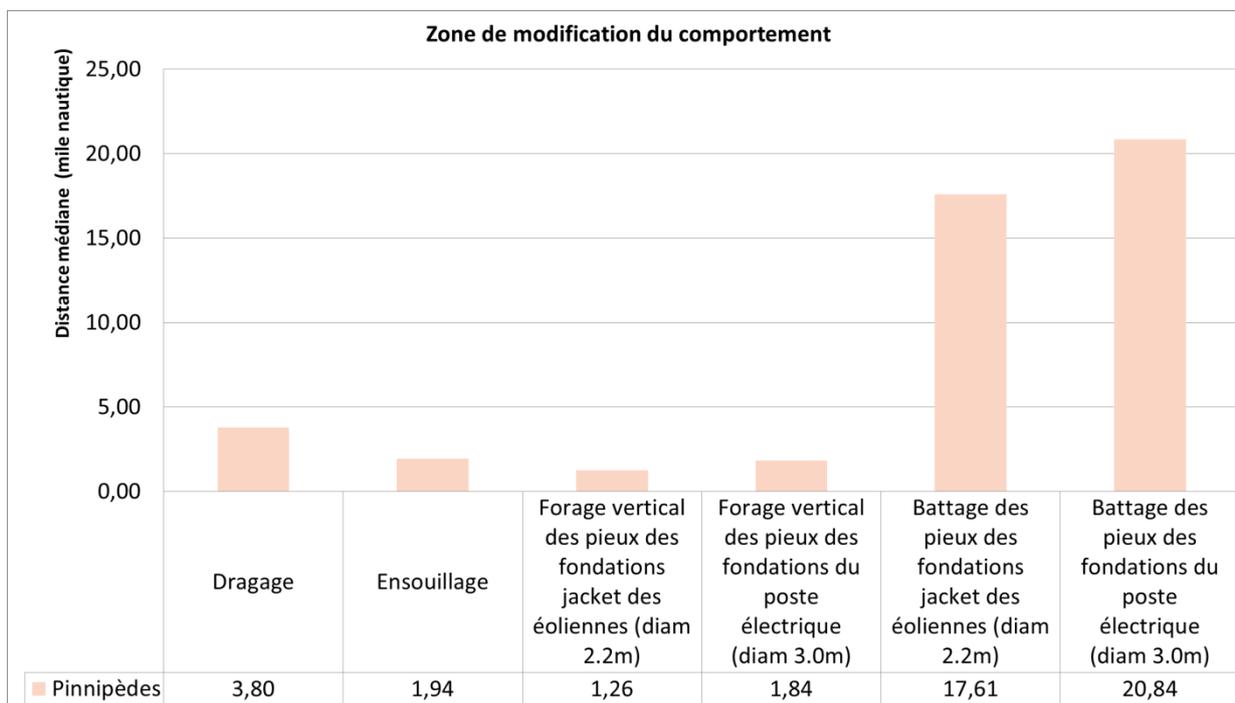
Figure 72 : Cartographie des zones de perception des bruits du projet pour les pinnipèdes



### 7.1.7.2 Zones de dérangement des pinnipèdes

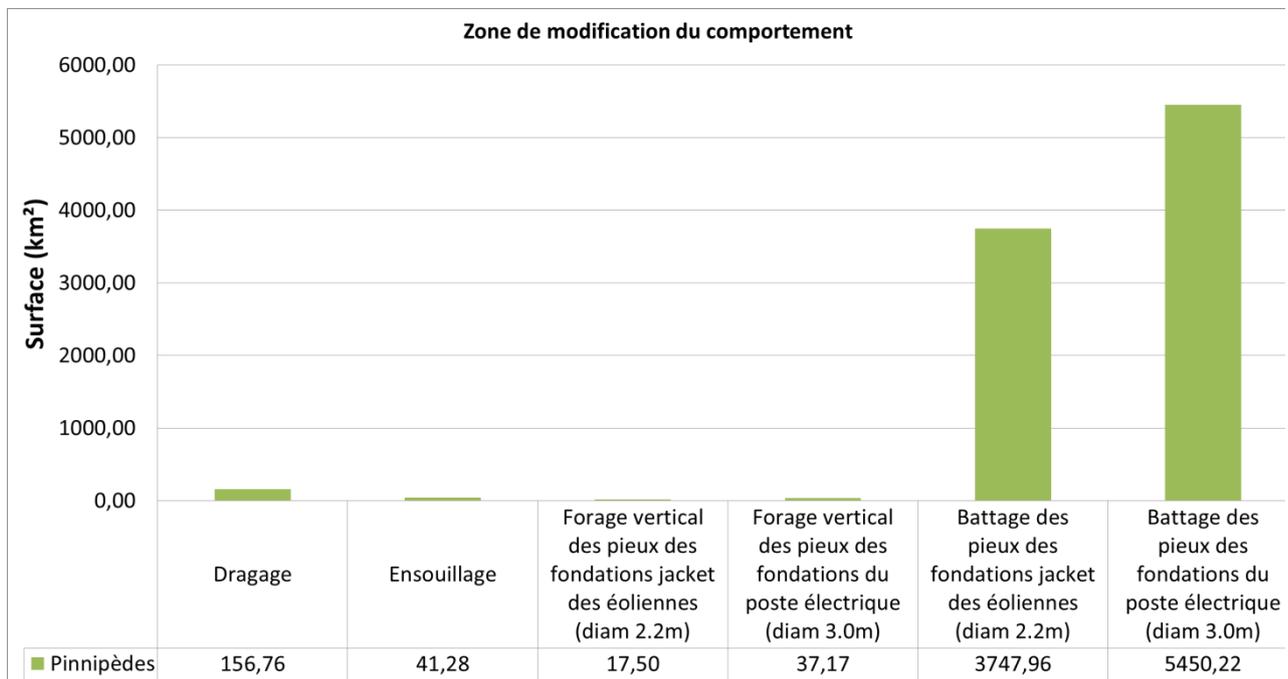
Les zones de dérangement pour les pinnipèdes ne sont pas systématiquement très différentes des limites de l'empreinte sonore en raison du seuil de tolérance choisi (120 dB, valeur conservatrice). Une forte disparité existe entre les différents ateliers de construction (Figure 73). Les opérations de battage de l'éolienne et de la fondation de l'OSS présentent un risque de modification du comportement dans des rayons médians de 17,6 et 20,8 milles nautiques, soit respectivement des surfaces de 3700 et 5400 km<sup>2</sup>. Les autres activités présentent des zones de risque de dérangement très inférieures (respectivement de 3,8 et 2 milles nautiques pour le dragage et l'ensouillage). Le forage vertical entraîne un rayon médian inférieur à 2 milles nautiques en fonction du diamètre.

Figure 73 : Limites médianes des zones de risque de modification du comportement pour les pinnipèdes



Source : Quiet-Oceans, 2016

Figure 74 Surface des zones de risque de modification du comportement pour les pinnipèdes



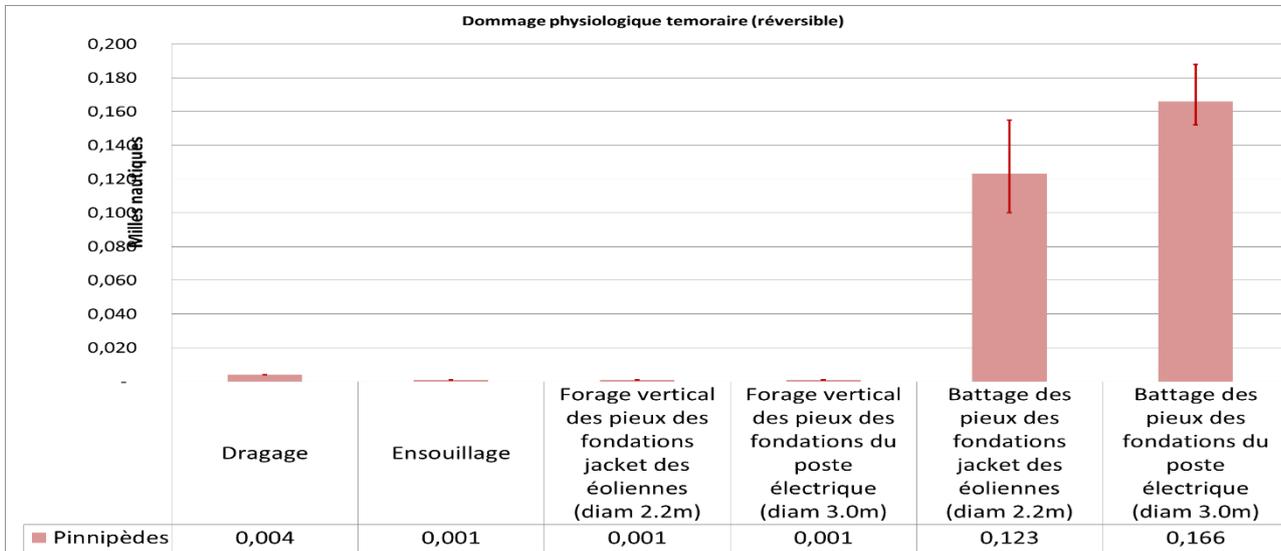
Source : Quiet-Oceans, 2016

### 7.1.7.3 Zone de dommage physiologique temporaire des pinnipèdes

La Figure 75 montre que seules les opérations de battage de pieux sont susceptibles d'engendrer des dommages physiologiques temporaires (réversibles) jusqu'à 0,17 mille nautique en fonction du diamètre de pieu battu.

Les résultats des simulations montrent qu'il n'existe pas de dommage physiologique permanent pour les pinnipèdes pour les autres activités du projet. En effet, des distances théoriques inférieures à 9 mètres pour des dommages temporaires ont été obtenues, mais qui n'ont que peu de signification physique étant donné les dimensions physiques des sources de bruits.

Figure 75 : Limites médianes des zones de risque de dommage physiologique temporaire pour les pinnipèdes



Source : Quiet-Oceans, 2016

#### 7.1.7.4 Zone de dommage physiologique permanent des pinnipèdes

Une distance théorique pouvant atteindre 6 à 12 mètres a été obtenue pour des dommages permanents lié au battage, mais sans véritablement être d'une grande signification physique étant donné les dimensions physiques des sources de bruit. Une distance inférieure à 2 m a été obtenue de façon théorique pour le dragage, sans aucune réalité lorsque l'on considère les dimensions physiques de la source de bruit. Les seuils de dommage physiologique permanent ne sont pas atteints pour les autres ateliers.

## 7.1.8 Estimation du nombre de cétacés impactés

### 7.1.8.1 Cétacées susceptibles de percevoir les bruits du projet

Le nombre de Marsouin commun, globicéphales, Grands Dauphins et petits delphinidés susceptibles de percevoir les bruits du projet émergent du bruit existant, sans pour autant nécessairement provoquer un quelconque effet, est très variable selon les espèces et les ateliers, comme le montre la Figure 76 et la Figure 77. Les étendues des empreintes sonores étant importantes pour certains ateliers de construction, le nombre est très dépendant de la distribution spatiale des espèces, de la densité de fréquentation, de la saison et de la nature des ateliers. Ces estimations ne prennent pas en compte d'éventuels changements de comportement (fuite notamment) liés à une exposition qui pourrait être prolongée.

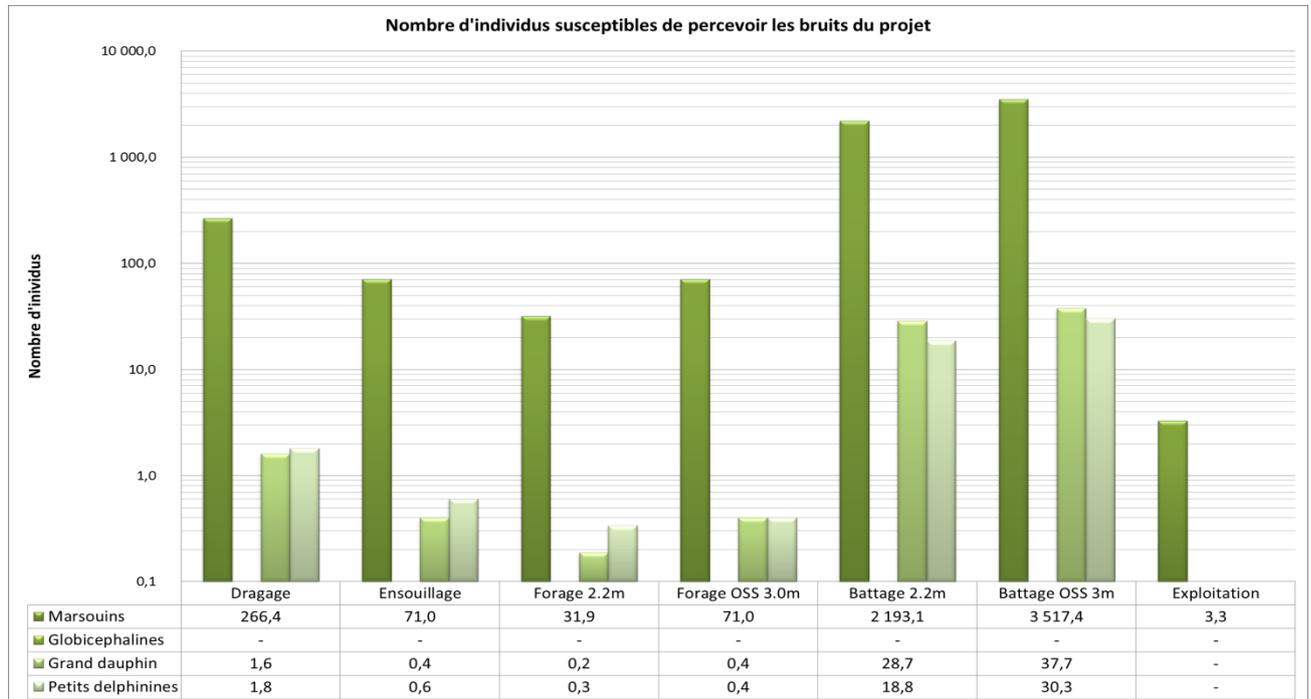
Les Marsouins sont globalement les plus exposés aux bruits, le nombre d'individus dans l'empreinte sonore pouvant atteindre 3500 pour l'atelier ayant l'empreinte sonore la plus étendue, à savoir le battage de pieu. A même diamètre, Le forage expose 65 fois moins de Marsouins en comparaison d'un battage de pieu. Le forage de fondation jacket expose quelques dizaines à une centaine de Marsouin en fonction du diamètre. Une dizaine de Marsouins communs sont susceptibles d'être exposés aux bruits continus de fonctionnement du parc éolien, cette estimation ne prenant pas en compte d'éventuels effets attractifs ou répulsifs liés à la présence permanente du parc.

Le même type de variation en fonction des ateliers est prédit pour les autres espèces, celles-ci concernant globalement significativement moins d'individus que les Marsouins communs. Aussi, ce sont plusieurs dizaines d'individus qui sont susceptibles de percevoir les bruits du battage et seulement un nombre inférieur à 10 lors du forage.

En été, comme le montre la Figure 77, le nombre d'individus susceptibles de percevoir les bruits du projet sont significativement réduits, passant par exemple de 3600 à 600 pour le battage de pieu de l'OSS et respectivement de 31 à 3 lors du forage vertical d'un pieu de diamètre 2,2m. Les empreintes sonores étant faiblement variable avec la saison, ce phénomène est lié aux fortes variations dans les estimations des densités de population de la campagne SAMM.

A partir de ces résultats, le projet de recherche RESPECT, a permis de mettre en évidence l'effet de la construction du parc éolien sur l'évolution de la population des marsouins communs en Manche et en particulier dans le cas d'un battage de pieu de 8,5m de diamètre (Pettex.E, 2016). En croisant les données des campagnes SAMM, les données acoustiques et le modèle d'habitat IPCOD, l'étude démontre la possibilité d'estimer la probabilité de décroissance de la population pendant et après les travaux, en fonction de la saison et du planning des opérations. La première phase du projet a permis de mettre en place le modèle et de le fusionner au modèle de prédiction acoustique. La deuxième phase du projet permettra de valider le modèle et de l'appliquer au contexte cumulé de la Manche.

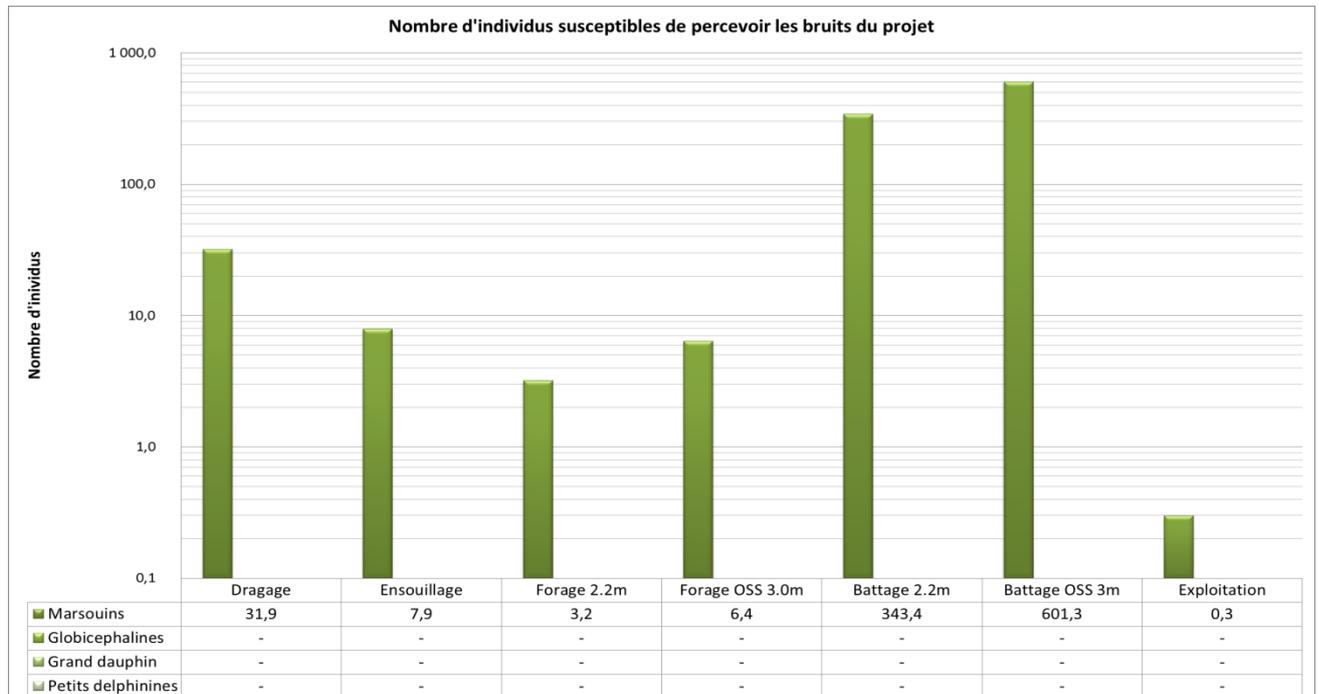
Figure 76 : Estimation du nombre d'individus dans l'empreinte sonore (susceptible de percevoir le bruit de l'atelier) de chaque phase du projet durant la saison hiver.



OSS= Poste électrique en mer

Source : Quiet-Oceans, 2016

Figure 77 : Estimation du nombre d'individus dans la zone de dérangement comportemental pour chaque phase du projet durant la saison été.



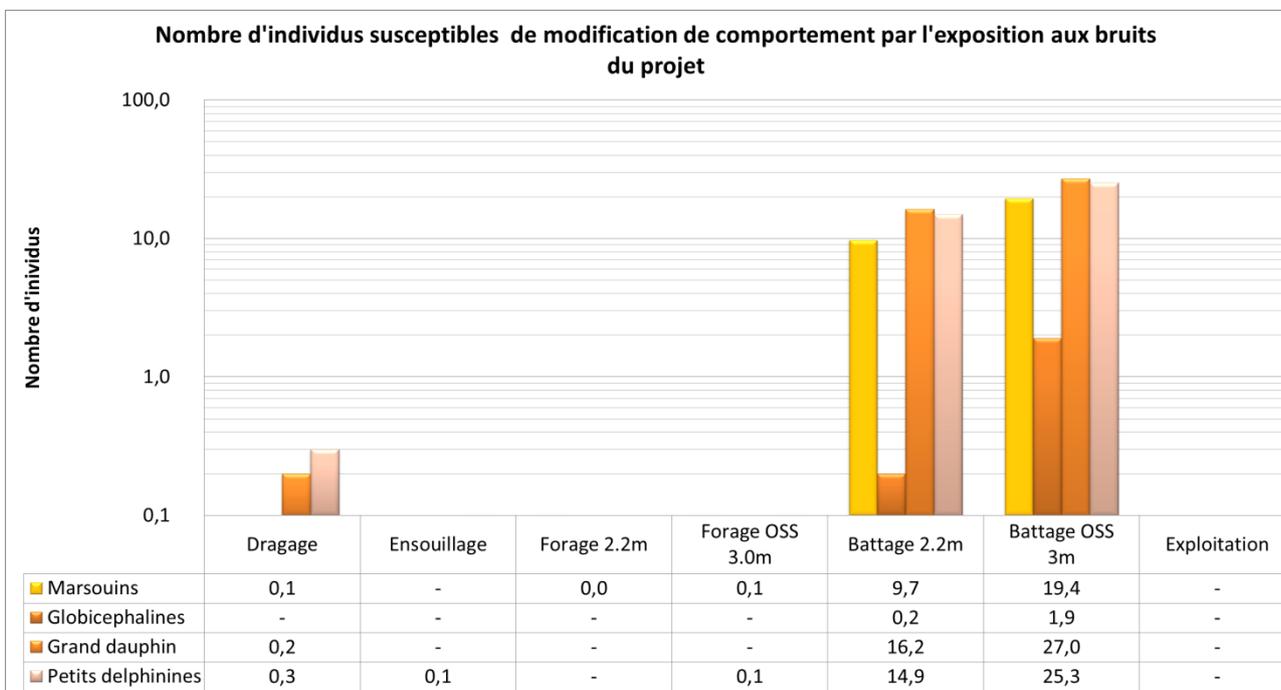
OSS= Poste électrique en mer

Source : Quiet-Oceans, 2016

### 7.1.8.2 Cétacés susceptibles d'être dérangés par les bruits du projet

Le nombre de Marsouin commun susceptible d'être dérangé en hiver est singulièrement plus important qu'en été, par le simple effet des différences de distribution et d'abondance entre l'hiver et l'été (environ 10 fois plus d'individu affecté en hiver). Le battage de pieu est l'activité qui perturbe le plus les Marsouins communs avec un nombre estimé en hiver de 20 individus, contre deux individus en été. Les activités de dragage, d'ensouillage et de forage vertical ne devraient déranger qu'un nombre très faible d'individu aussi bien en été qu'en hiver. Concernant les autres espèces, moins présente sur le site en terme d'abondance, le nombre d'individus susceptibles d'être dérangés est plus élevé en raison d'une surface affectée significativement plus étendue en ayant considéré un seuil de tolérance conservateur. En été, le nombre d'individu affecté est négligeable.

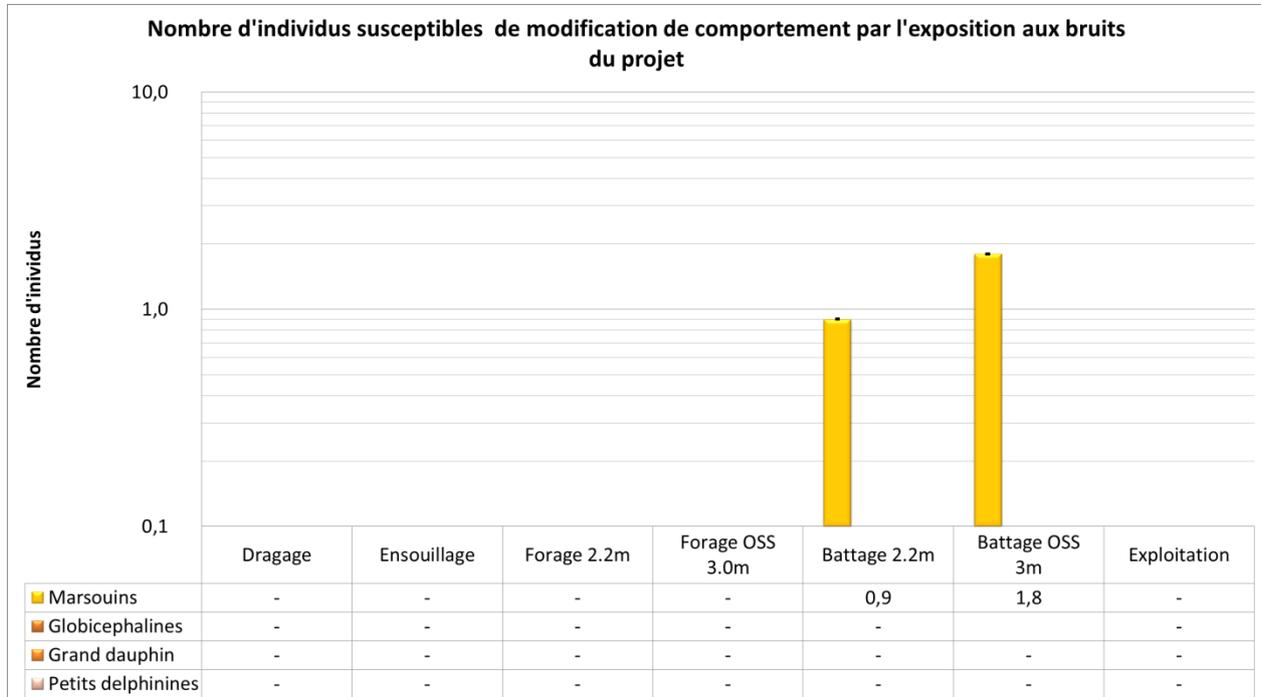
Figure 78 : Estimation du nombre d'individus dans la zone de dérangement comportemental pour chaque phase du projet durant la saison hiver.



OSS= Poste électrique en mer

Source : Quiet-Oceans, 2016

Figure 79 : Estimation du nombre d'individus dans la zone de dérangement comportemental pour chaque phase du projet durant la saison été.



OSS= Poste électrique en mer

Source : Quiet-Oceans, 2016

### 7.1.8.3 Cétacés susceptibles de subir des dommages physiologiques temporaires ou permanents par les bruits du projet

Le modèle estime que le nombre de Marsouin commun susceptibles de subir des dommages physiologiques temporaires lors de l'exposition aux bruits des battages des éoliennes et de l'OSS est inférieur à un individu quelle que soit la saison, ce qui est très en dessous des incertitudes du modèle. Aucune autre espèce de delphinidés référencée par le programme SAMM n'est exposé à un risque de dommage physiologique temporaire.

Aucune espèce référencée par le programme SAMM (Marsouin commun et delphininés) n'est susceptible d'être exposé à un risque de dommage physiologique permanent quelle que soit l'activité du projet et la saison.

## 7.2 Estimation des effets acoustiques pour les poissons

### 7.2.1 Enjeux du site vis-à-vis des poissons

De nombreuses espèces de poissons sont présentes sur l'aire d'étude immédiate et ses alentours : espèces pélagiques, espèces benthodémersales. Sur les 46 espèces recensées durant les pêches scientifiques menées dans le cadre de la l'étude d'impact du projet de parc éolien en mer (CSLN, 2015-2016), 19 possèdent une vessie natatoire :

- ▶ toutes les espèces pélagiques (anchois, hareng, chinchard, mullet doré...), à l'exception du maquereau ;
- ▶ les poissons démersaux (grondins, rouget, morue, tacaud, daurades, bars...).

En revanche, les poissons plats (sole, plie, flet, limande, turbot,...) et les raies n'en possèdent pas.

La Raie bouclée (*Raja clavata*) représente en particulier un enjeu car elle figure sur la liste des espèces menacées à l'échelle européenne (OPSAR, IUCN) et internationale (IUCN).

La présence de poissons migrateurs amphihalins (lamproie, anguille, saumon de l'Atlantique...), protégés au niveau national, pourrait également constituer un enjeu. Néanmoins, aucune de ces espèces n'a été recensée à ce jour dans les campagnes en mer et aucune n'a été observée sur l'aire d'étude immédiate et à 5 milles nautiques autour de celle-ci.

### 7.2.2 Effets de bruit sur les poissons

En comparaison aux connaissances accumulées par la recherche sur les effets du bruit sur les mammifères marins, la connaissance sur les effets du bruit sur les poissons est à un stade d'émergence (Popper & Hastings, 2009) (Slabbekorn, Bouton, van Opzeeland, Coers, ten Cate, & Popper, 2010). Toutefois, il est reconnu que les poissons marins présentent une graduation de sensibilité comparable à celle des mammifères marins, même si les principes de l'audition diffèrent quelque peu entre les deux groupes. Ces différences influencent la façon dont les évaluations d'impact de bruit doivent être effectuées. Autant les effets relatifs à un traumatisme physique et au comportement ont été étudiés en détail, autant il n'y a presque pas de données disponibles pour les effets du bruit ambiant sur le comportement des poissons. Pour les poissons, il est également important de considérer les effets du bruit sur les œufs et les larves.

#### 7.2.2.1 Dommages physiologiques sur les poissons

La plupart des études portant sur la perte d'audition chez les poissons ont été réalisées en laboratoire en utilisant différents types de sons et des durées d'exposition variables. Il n'y a que peu d'études cherchant à évaluer les effets du bruit sur le terrain impliquant des sources sonores anthropiques réelles. Les travaux de laboratoire sur deux espèces d'eau douce ont montré que la perte temporaire de l'audition peut se produire à des niveaux de pression acoustique de 140 à 170 dB réf. 1µPa avec une récupération d'au moins deux semaines après l'exposition (Leis, Siebeck, & Dixon). Cependant, une étude terrain de la perte auditive chez quatre espèces de poissons de récifs coralliens au cours d'une exploration sismique n'a mis en évidence aucune perte d'audition jusqu'à une exposition sonore de 193 dB réf. 1µPa (Hastings, Reid, Grebe, Hearn, & Colman, 2008).

### 7.2.2.1.1 Espèces à vessies natatoires

La vessie natatoire<sup>9</sup> du poisson est une cavité remplie de gaz qui est susceptible d'être endommagée par une exposition sonore. En effet, les oscillations du gaz induites par les ondes acoustiques de forte amplitude peuvent causer, à l'extrême, jusqu'à la déchirure de la paroi de la vessie natatoire (Popper & Hastings, 2009). Les sonars opérant en basses fréquences peuvent endommager la vessie natatoire ou les tissus adjacents lorsque la fréquence émise correspond à la fréquence de résonance du poisson. Les fréquences de résonance de la plupart des poissons sont comprises entre 100 et 500 Hz (OSPAR Commission, 2009).

### 7.2.2.1.2 Espèces ayant des cellules ciliées

La possibilité de dommages aux cellules ciliées<sup>10</sup> sensorielles de l'oreille interne des poissons exposés a été rapportée dans quelques études (McCauley, Fewtrell, & Popper, 2003) (Hastings, Popper, Finneran, & Lanford, 1996), mais pas dans d'autres (Song, Mann, Cott, Hanna, & Popper, 2008).

### 7.2.2.1.3 Œufs et larves de poissons

Les études sur l'effet des sons impulsifs (en particulier ceux des canons à air utilisés lors des levés sismiques) sur les œufs et les larves de poissons marins ont permis de mettre en évidence une diminution de la viabilité des œufs, une augmentation de la mortalité embryonnaire, et un ralentissement de la croissance des larves lorsqu'elles sont exposées à des niveaux sonores de 120 dB réf. 1µPa (Kostyuchenko, 1973). Il a aussi été observé des dommages aux cellules du cerveau et aux neuromastes<sup>11</sup> de larves de Turbot. Les neuromastes sont supposés jouer un rôle important dans les réactions d'échappement pour beaucoup de larves de poissons, et conditionnent donc leur capacité à éviter les prédateurs (Blaxter & Hoss, 1981). Sous l'effet de canons à air, des blessures et une mortalité accrue ont été observées à des distances inférieures à 5 m de la source sonore. Les blessures les plus fréquentes et les plus graves se produisent à moins de 1,5 m et pour les premiers stades de la vie lorsque les larves sont les plus vulnérables (Booman, Dalen, Leivestad, Levsen, van der Meeren, & Toklum, 1996). Les juvéniles et les alevins ont une résistance inertielle plus faible au passage d'une onde sonore, et sont donc potentiellement plus susceptibles de subir des dommages aux tissus non-auditif que les poissons adultes (Popper & Hastings, 2009).

Par analogie, compte tenu du faible retour sur expérience, et indépendamment de la probabilité de présence, le risque de dommage ou de mortalité des œufs et larves de poissons devrait se situer dans un rayon de quelques mètres des ateliers de battage de pieu.

## 7.2.2.2 Modification du comportement des poissons exposés au bruit

A ce jour, il y a peu d'études sur les effets du bruit anthropique sur le comportement des poissons marins et peu de choses sont connues sur les effets à long terme de l'exposition aux ondes sonores ou sur les effets d'une exposition cumulée.

<sup>9</sup> La vessie natatoire est un organe des poissons osseux, elle détermine la profondeur à laquelle le poisson flotte dans l'eau et lui permet ainsi de se mouvoir à la profondeur qu'il veut en ajustant sa densité à celle de l'eau dans laquelle il vit.

<sup>10</sup> Les cellules ciliées sont des récepteurs qui provoquent une impulsion nerveuse au niveau des cellules sensorielles. Elles envoient un message au cerveau, via le nerf vestibulaire, qui interprète l'information et renseigne le corps sur sa position dans l'espace.

<sup>11</sup> Les neuromastes sont des cellules épidermiques faisant partie du système mécano-sensoriel superficiel ou système latéral, sensible aux mouvements de l'eau. Ils comprennent des cellules sensorielles ciliées, des cellules de soutien et des cellules basales de remplacement.

Un comportement d'évitement des navires, verticalement ou horizontalement dans la colonne d'eau, a été rapporté pour la morue et le hareng, et a été attribué au bruit des navires (Vabø, 2002) (Handegard, 2003). L'activité du navire est également susceptible de modifier le comportement d'un banc de poissons et la vitesse de nage des poissons, comme observé en Méditerranée pour le thon rouge (Sara, 2007). Des changements de vitesse de nage ou de fuite chez la morue et chez la sole ont aussi été observés à des niveaux relativement faibles d'exposition au bruit de battage émis de façon artificielle (Mueller-Blenkle, et al., 2010). Le comportement d'évitement à grande échelle a été déduit de l'étude des effets des levés sismiques sur les taux de capture dans les pêcheries à la palangre et au chalut. Des baisses importantes dans les captures de cabillaud et de l'églefin ont été enregistrées jusqu'à 25 milles nautiques de la source de bruit, qui était la distance maximale d'étude. Les taux de capture ne sont pas revenus à la normale jusqu'à cinq jours après la fin des émissions sismiques, ce qui était le temps maximum observé (Engås, et al. 1996) (Engås & Løkkeborg, 2002).

Des comportements de plongée vers des profondeurs plus importantes d'espèces pélagiques comme le merlan bleu et des augmentations d'abondance dans des zones distantes de 16 à 27 milles nautiques des émissions sismiques ont été observés, suggérant que les poissons migrateurs éviteraient de pénétrer dans l'empreinte sonore d'un levé sismique (Slotte, Kansen, Dalen, & Ona, 2004). A l'inverse, une étude par observation vidéo directe a montré que des poissons de récif tempéré non seulement sont restés proches de leur territoire même sous l'effet d'une exposition sonore à des canons à air, mais n'ont pas présenté de réaction comportementale significative (Wardle, et al., 2001).

## 7.2.3 Limites géographiques des poissons sans vessie nataoire

### 7.2.3.1 Zones d'exposition sonore

Les empreintes sonores relatives à la perception des bruits du projet pour les poissons sans vessie nataoire (requins, raies, poissons plats) présentent :

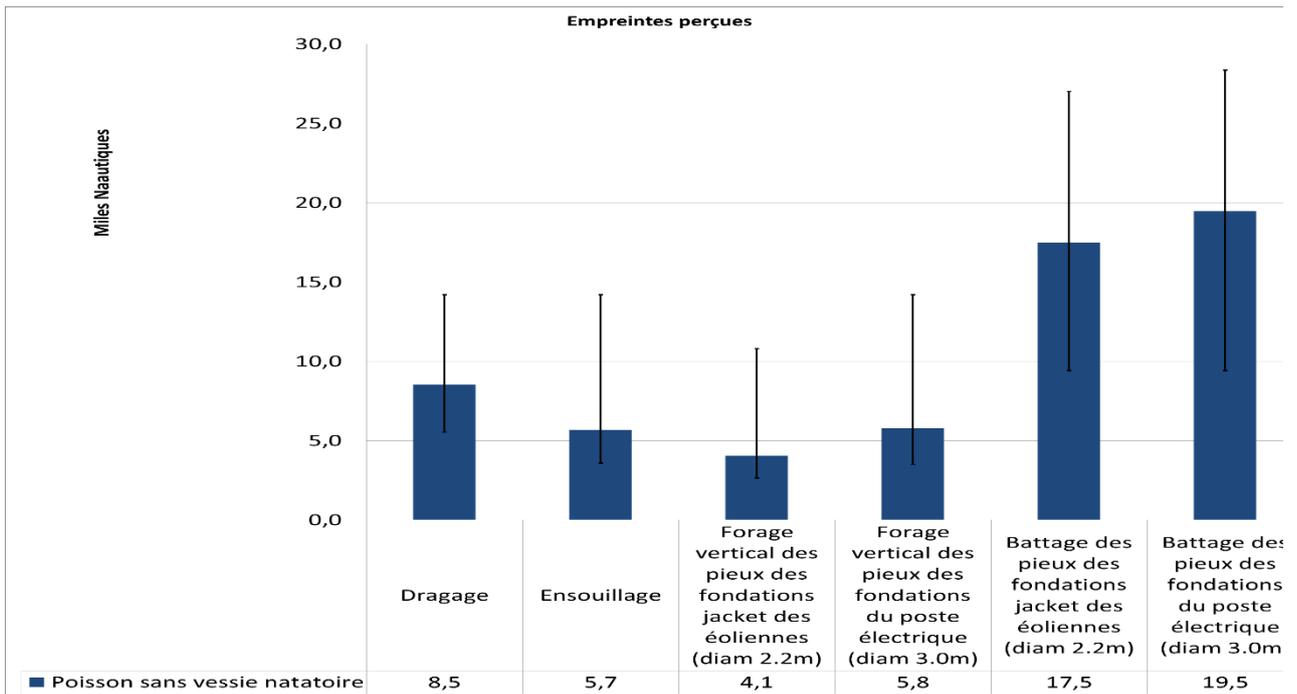
- ▶ peu de variabilité entre les saisons ;
- ▶ de grandes disparités en fonction des ateliers mis en œuvre.

En effet, comme le montre les Figure 80, Figure 81 et Figure 82, les poissons sans vessie nataoire sont susceptibles de percevoir les bruits de battage de la fondation jacket sur de très grandes distances, dont les portées médianes atteignent respectivement 17,5 à 19,5 milles nautiques respectivement en fonction du diamètre du pieu de la structure jacket (2,2 ou 3m), soit 4040 et 5070 km<sup>2</sup> respectivement. Les empreintes sonores ont des géométries spatiales très variables en fonction de la direction de propagation des bruits autour du point de génération. Cette variabilité s'explique par la combinaison de la bathymétrie, des conditions météo-océanographiques, des natures du fond, et du bruit ambiant existant. On remarquera en particulier que ces bruits peuvent être perceptibles dans des zones le long des côtes anglaises et dans la baie de Saint-Vaast-La Hougue, lorsque le bruit ambiant se réduit suffisamment pour ne plus masquer les bruits du battage. Ces distances de perception sont plus grandes que celles obtenues lors des phases de dragage et d'ensouillage des câbles.

Les autres bruits sont perceptibles sur des zones plus confinées autour des ateliers, allant de quelques milles nautiques (forage vertical, exploitation du parc et maintenance). Les empreintes sont plus étendues selon un axe sud-ouest nord-est car le bruit du trafic maritime concentré en centre Manche domine les bruits du chantier qui se propagent perpendiculairement à cet axe.

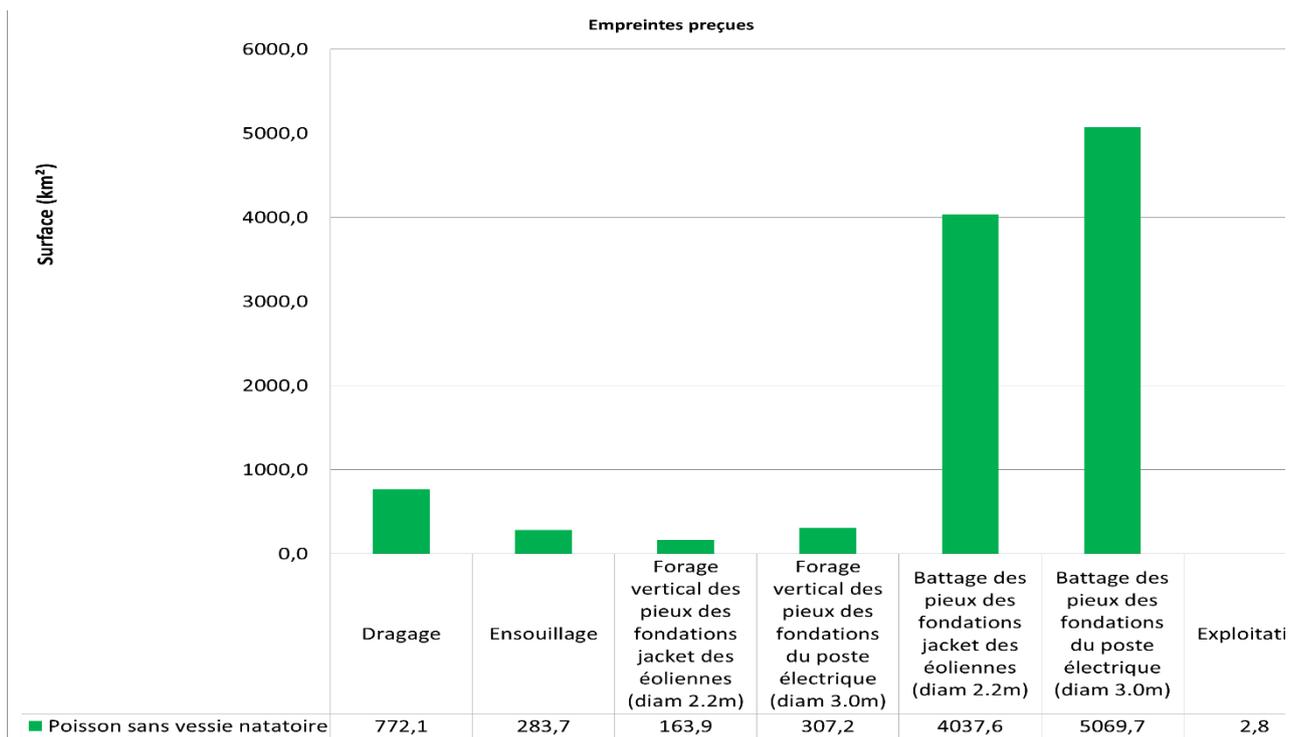
En fonctionnement, la géométrie des empreintes sonores perçues par les poissons avec vessie natatoire sans cils sensitifs englobent l’empreinte physique du parc en la débordant au plus de 0,7 milles nautiques lors de l’exploitation des éoliennes. Autrement dit, le bruit des éoliennes en fonctionnement domine le bruit ambiant perçu dans l’ensemble du périmètre du parc et s’étale au plus jusque 0,7 milles nautiques au droit des éoliennes périphériques.

Figure 80 : Limites médianes des empreintes sonores pour les poissons sans vessie natatoire



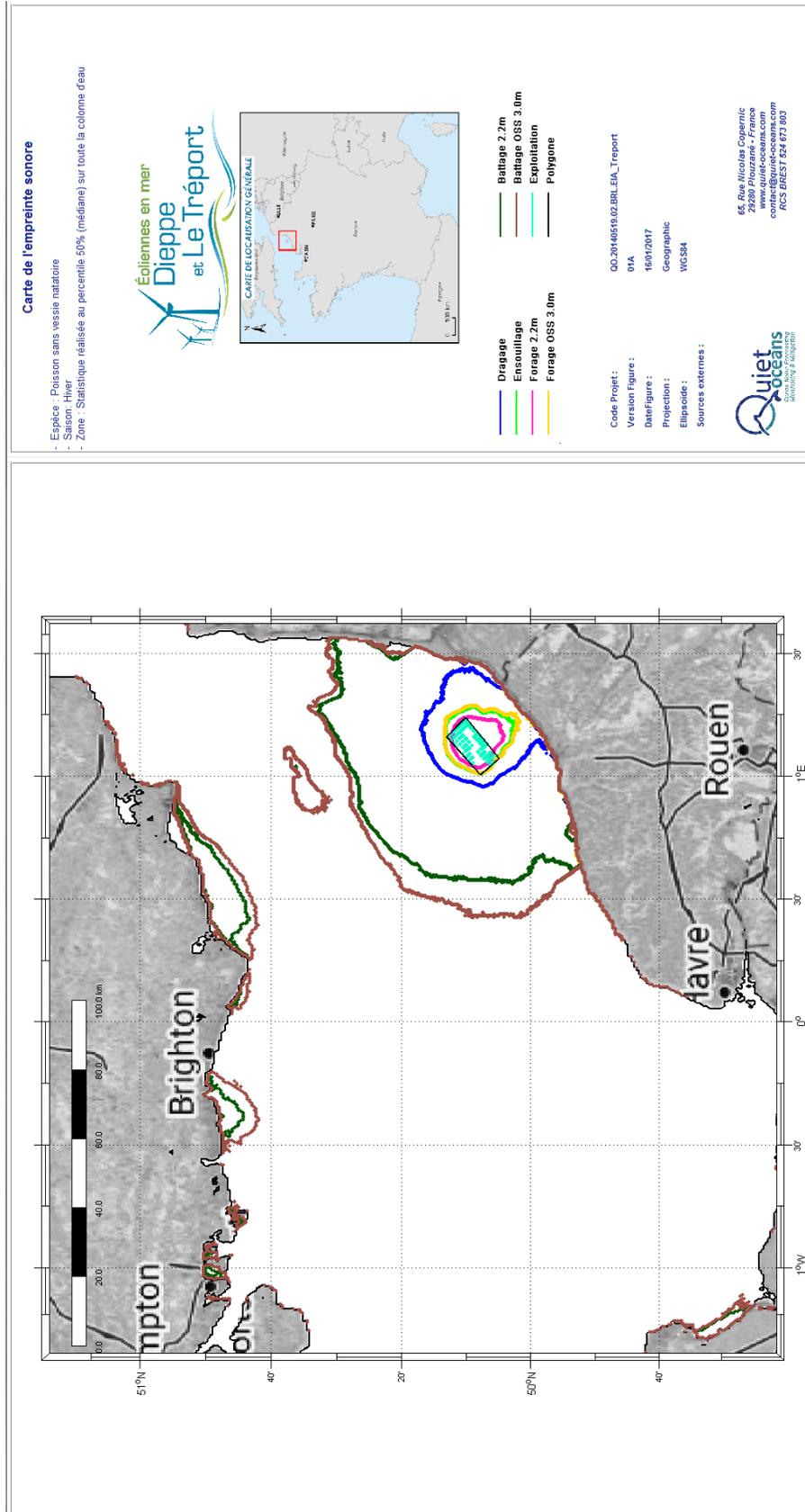
Source : Quiet-Oceans, 2016

Figure 81 : Surface des empreintes sonores pour les poissons sans vessie natatoire



Source : Quiet-Oceans, 2016

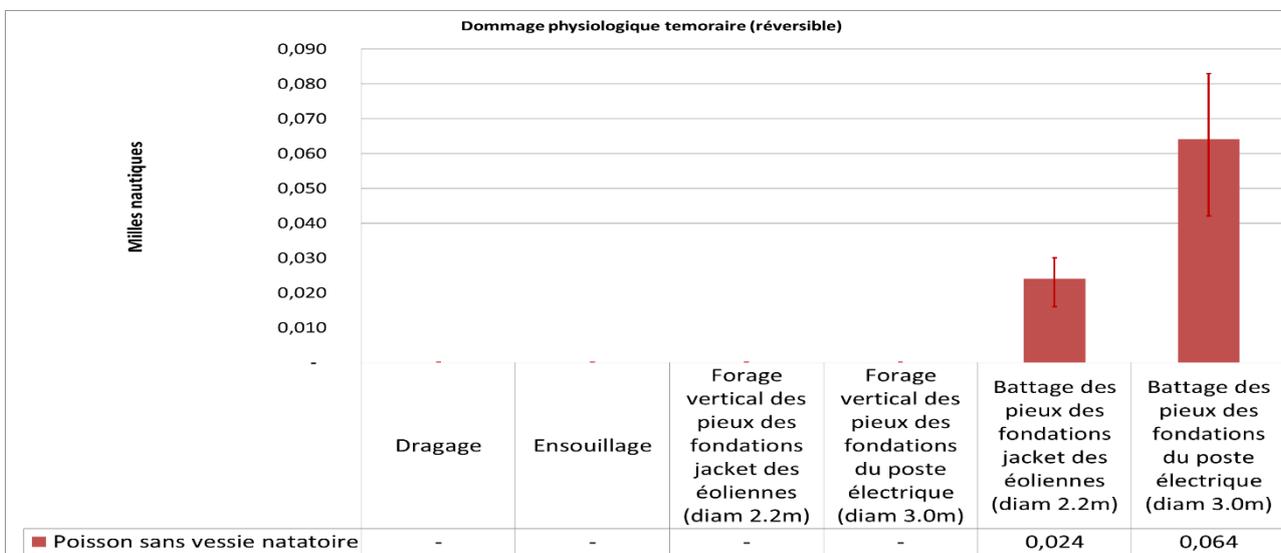
Figure 82 : Cartographie des zones de perception des bruits du projet pour les poissons sans vessie natatoire



### 7.2.3.2 Zone de dommage physiologique temporaire

La Figure 83 montre que seules les opérations de battage de pieu sont susceptibles d'engendrer des dommages physiologiques temporaires jusqu'à 0,060 mille nautique pour la fondation de l'OSS, contre 0,024 pour le battage des pieux de 2,2m des éoliennes. Les seuils de dommage physiologique temporaire ne sont pas atteints pour les autres ateliers.

Figure 83 : Limites médianes des zones de risque de dommage physiologique temporaire pour les poissons sans vessie natatoire



### 7.2.3.3 Zone de dommage physiologique permanent

Les seuils de dommage physiologique permanent des poissons sans vessie natatoire ne sont atteints par aucun atelier du projet.

## 7.2.4 Limites géographiques des risques sonores pour les poissons avec vessie natatoire sans cils sensitifs

### 7.2.4.1 Zones d'exposition sonore

Les empreintes sonores relatives à la perception des bruits du projet pour les poissons avec vessie natatoire sans cils sensitifs (Rouget Barbet par exemple) présentent :

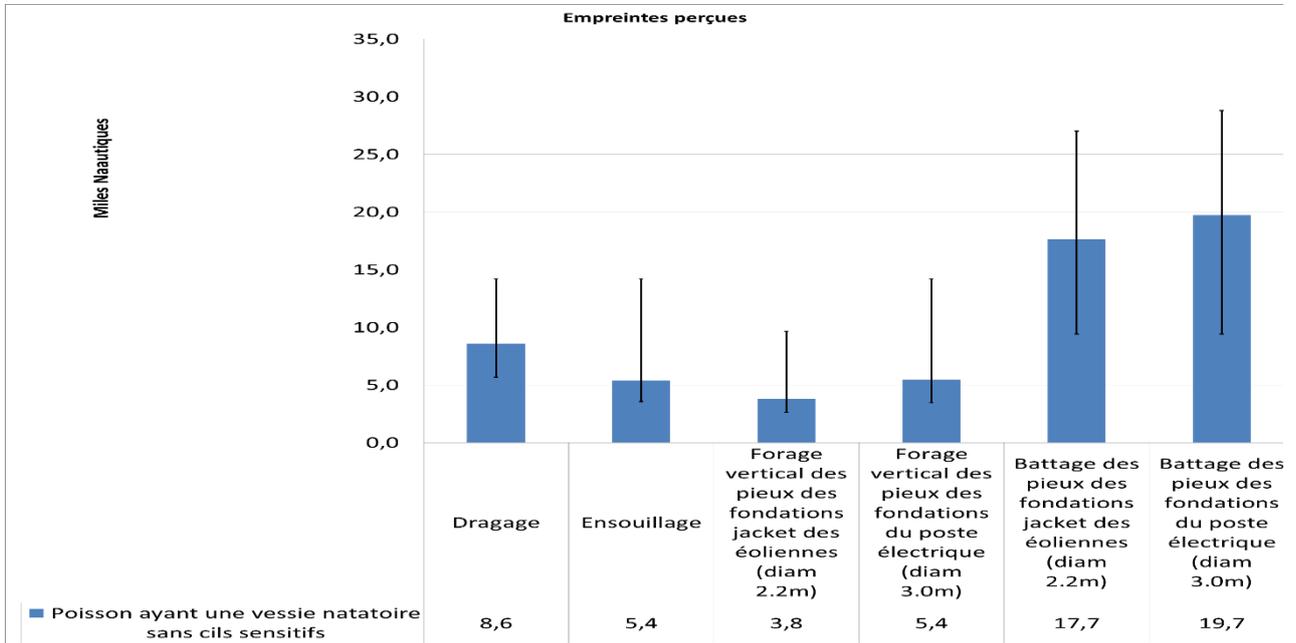
- ▶ peu de variabilité entre les saisons ;
- ▶ de grandes disparités en fonction des ateliers mis en œuvre.

En effet, comme le montre les Figure 84, Figure 85 et Figure 86, les poissons avec vessie natatoire sans cils sensitifs sont susceptibles de percevoir les bruits de battage de la fondation jacket sur de très grandes distances, dont les portées médianes atteignent respectivement 17,7 à 19,7 milles nautiques respectivement en fonction du diamètre du pieu de la structure jacket (2,2 ou 3m) soit 4075 et 5190 km<sup>2</sup> respectivement. Les empreintes sonores ont des géométries spatiales très variables en fonction de la direction de propagation des bruits autour du point de génération. Cette variabilité s'explique par la combinaison de la bathymétrie, des conditions météo-océanographiques, des natures du fond, et en grande partie du bruit ambiant existant. On remarquera en particulier que ces bruits peuvent être perceptibles dans des zones le long des côtes anglaises et dans la baie de Saint-Vaast-La Hougue, lorsque le bruit ambiant se réduit suffisamment pour ne plus masquer les bruits du battage. Ces distances de perception sont plus grandes que celles obtenues lors des phases de dragage et d'ensouillage des câbles.

Les bruits des ateliers de forage vertical sont perceptibles par les poissons avec vessie natatoire sans cils sensitifs sur 4 à 5,5 milles nautiques de l'atelier, contre 5,5 à 8,5 milles nautiques pour les opérations d'ensouillage et de dragage (Figure 84). Les empreintes sont plus étendues selon un axe sud-ouest nord-est car le bruit du trafic maritime concentré en centre Manche domine les bruits du chantier qui se propagent perpendiculairement à cet axe.

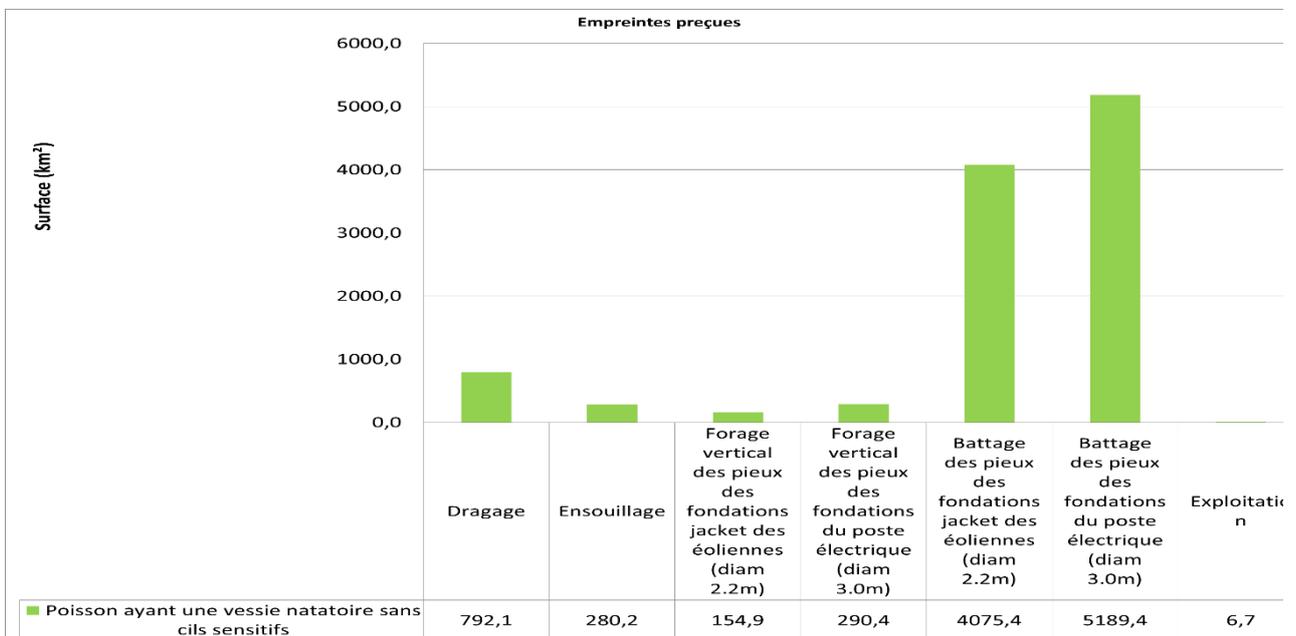
En fonctionnement, la géométrie des empreintes sonores perçues par les poissons avec vessie natatoire sans cils sensitifs englobent l'empreinte physique du parc en la débordant au plus de 0,7 à 1,3 milles nautiques lors de l'exploitation des éoliennes en fonction de la physiologie des poissons. Autrement dit, le bruit des éoliennes en fonctionnement domine le bruit ambiant perçu dans l'ensemble du périmètre du parc et s'étale au plus jusque 0,7 à 1,3 milles nautiques au droit des éoliennes périphériques.

Figure 84 : Limites médianes des empreintes sonores pour les poissons avec vessie natatoire sans cils sensitifs



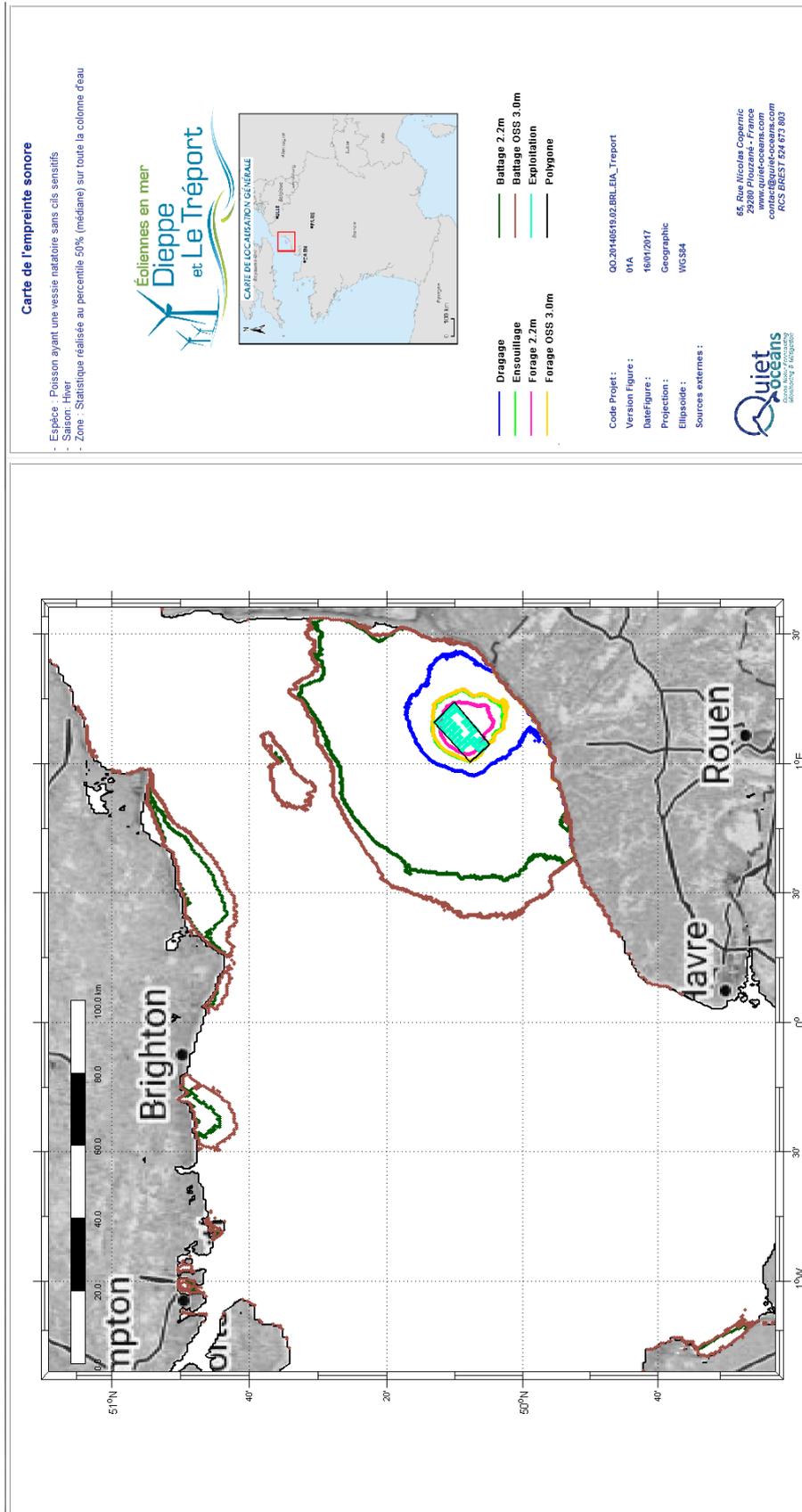
Source : Quiet-Oceans, 2016

Figure 85 : Surface des empreintes sonores pour les poissons avec vessie natatoire sans cils sensitifs



Source : Quiet-Oceans, 2016

Figure 86 : Cartographie des zones de perception des bruits du projet pour les poissons avec vessie natatoire sans cils sensitifs



### 7.2.4.2 Zones de modification du comportement

La Figure 87 montre que les opérations de battage de pieu sont susceptibles d'engendrer des comportements de fuite ou de stress accru compris entre 5,8 et 7,3 milles nautiques (phase de battage) et jusqu'à 0,43 mille nautique lors de la phase de dragage. La géométrie de ces zones de risques représentées Figure 89 est clairement dissymétrique pour l'atelier de battage, contrairement aux autres ateliers (forage et ensouillage) qui présentent des risques symétriquement répartis autour des ateliers jusqu'à une distance de 0,19 mille nautique.

Figure 87 : Limites médianes des zones de risque de modification du comportement pour les poissons avec vessie nataoire sans cils sensitifs

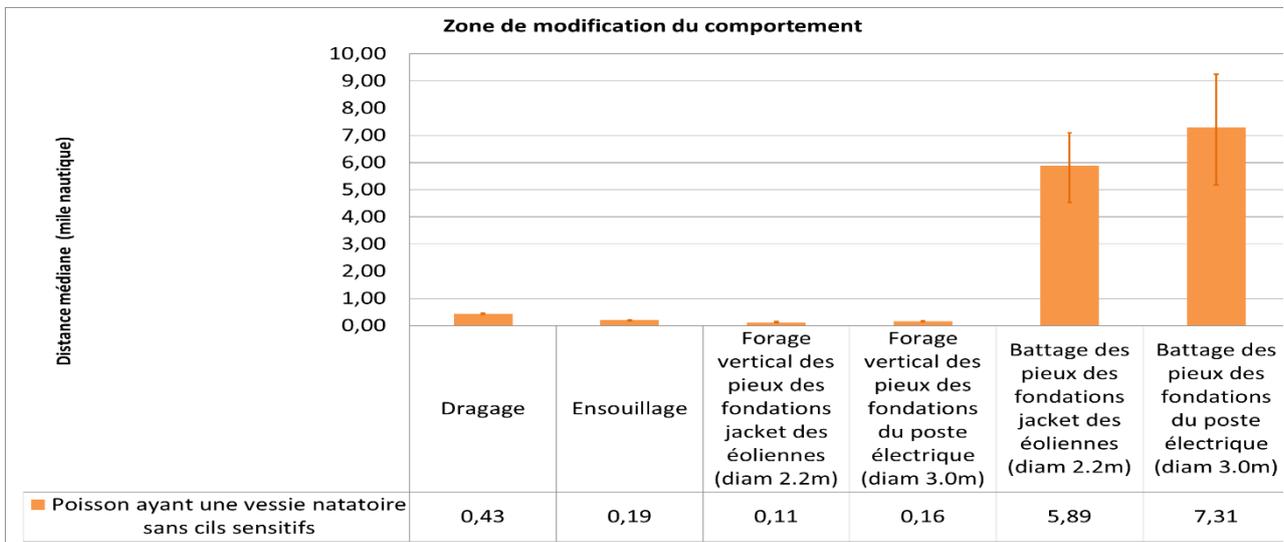


Figure 88 : Surface des zones de risque de modification du comportement pour les poissons avec vessie nataoire sans cils sensitifs

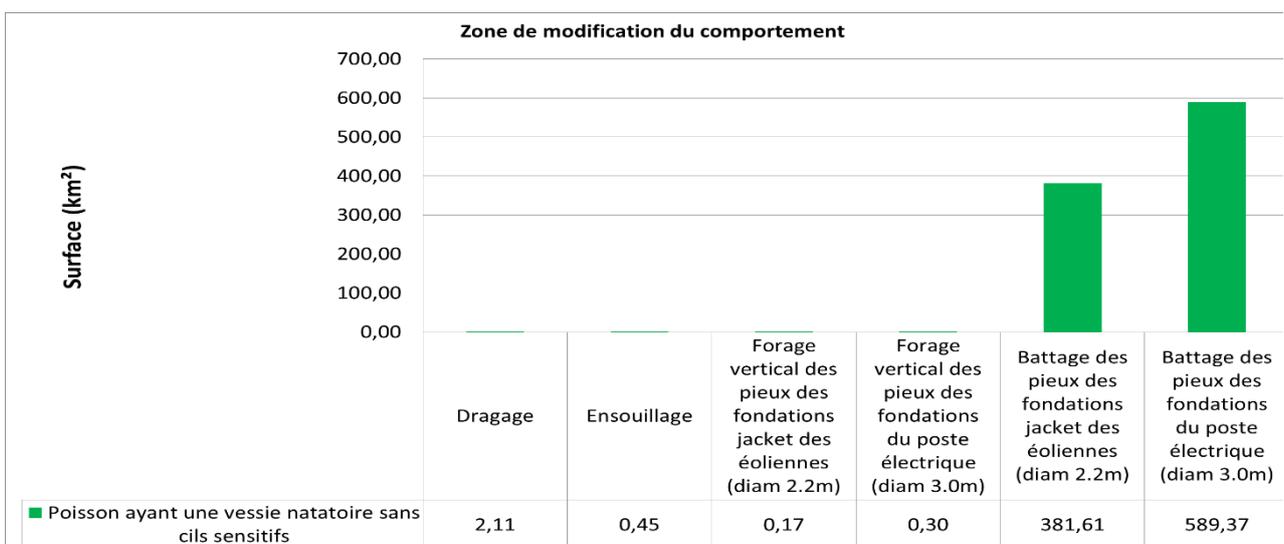
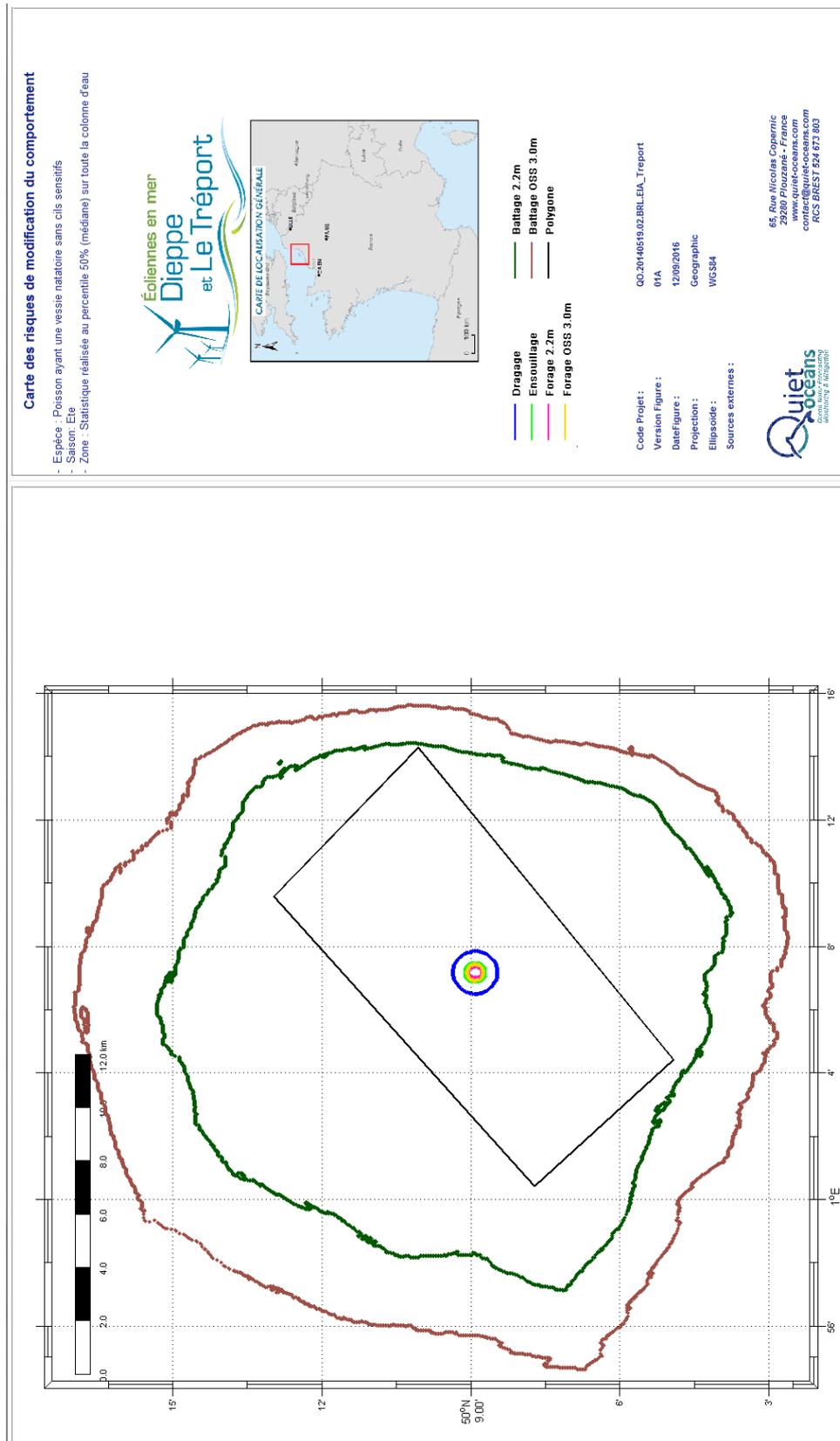


Figure 89 : Cartographie des zones de risque de modification du comportement pour les poissons avec vessie nataoire sans cils sensitifs

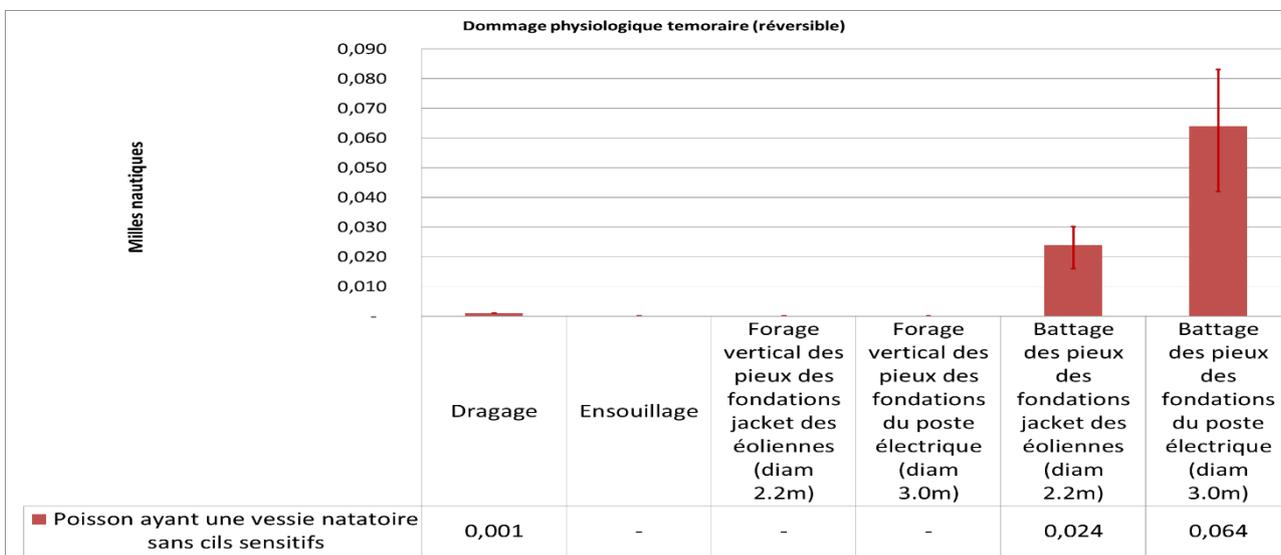


### 7.2.4.3 Zones de dommage physiologique temporaire

Les opérations de battage de pieu sont susceptibles d'engendrer des dommages physiologiques temporaires de 0,024 et 0,06 mille nautique pour des pieux de 2,2 m et 3,0 m respectivement (Figure 90). Le dragage présente bien un risque théorique de dommage physiologique temporaire sur une distance de moins de 2m, distance qui n'a aucun sens physique étant donné les dimensions de la source de bruit.

Les autres activités du projet ne présentent pas de risque physiologique temporaire pour les poissons avec vessie natatoire sans cils sensitifs.

Figure 90 : Limites médianes des zones de risque de dommage physiologique temporaire pour les poissons avec vessie natatoire sans cils sensitifs



### 7.2.4.4 Zones de dommage physiologique permanent

Un calcul théorique donne un dépassement du seuil de dommage physiologique permanent pour les opérations de battage de 2m, valeur qui n'a aucune réalité étant donné les diamètres des pieux. Les seuils de dommage physiologique permanent pour les poissons avec vessie natatoire sans cils sensitifs ne sont atteints pour aucun des autres ateliers.

## 7.2.5 Limites géographiques des risques sonores pour les poissons avec vessie natatoire avec cils sensitifs

### 7.2.5.1 Zone d'exposition sonore

Les empreintes sonores relatives à la perception des bruits du projet pour les poissons avec vessie natatoire avec cils sensitifs présentent :

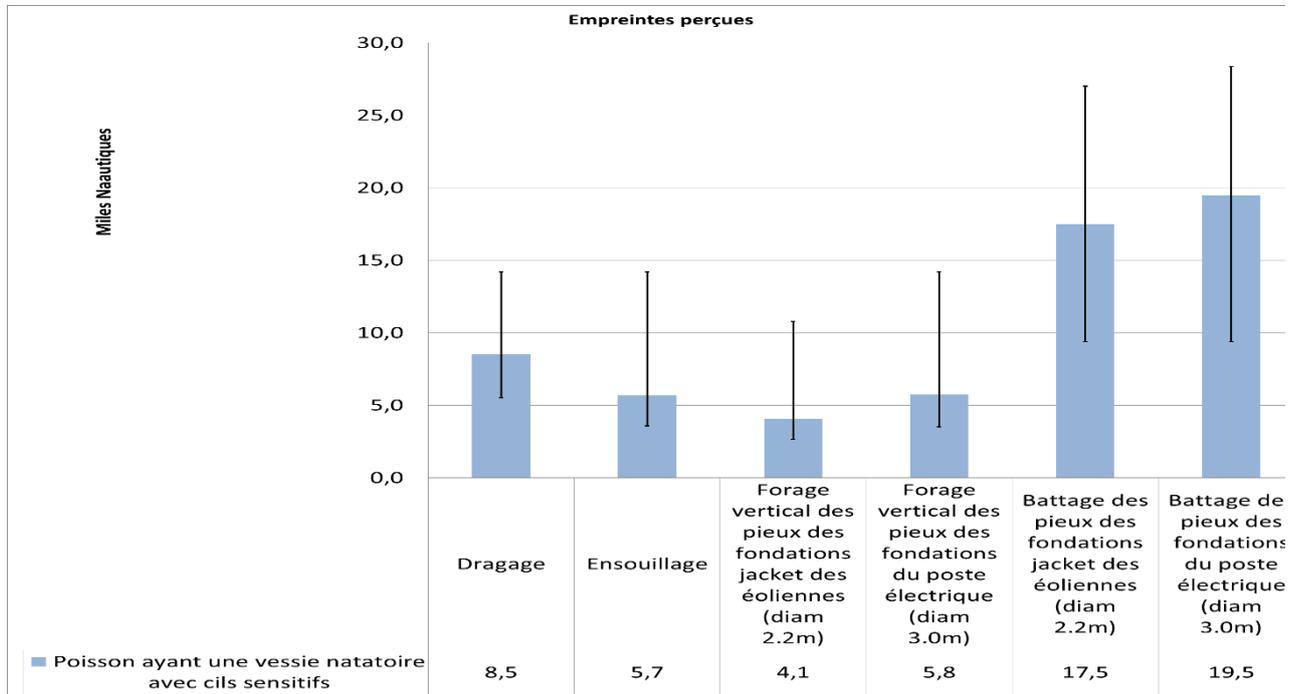
- ▶ peu de variabilité entre les saisons ;
- ▶ de grandes disparités en fonction des ateliers mis en œuvre.

En effet, comme le montre les Figure 91, Figure 92 et Figure 93, les poissons avec vessie natatoire avec cils sensitifs sont susceptibles de percevoir les bruits de battage de la fondation jacket sur de très grandes distances, dont les portées médianes atteignent respectivement 17,5 à 19,5 milles nautiques respectivement en fonction du diamètre du pieu de la structure jacket (2,2 ou 3m). Cela correspond à des surfaces de perception de 4040 et 5070 km<sup>2</sup>. Les empreintes sonores ont des géométries spatiales très variables en fonction de la direction de propagation des bruits autour du point de génération. Cette variabilité s'explique par la combinaison de la bathymétrie, des conditions météo-océanographiques, des natures du fond, et en grande partie du bruit ambiant existant. On remarquera en particulier que ces bruits peuvent être perceptibles dans des zones le long des côtes anglaises et dans la baie de Saint-Vaast-La Hougue, lorsque le bruit ambiant se réduit suffisamment pour ne plus masquer les bruits du battage. Ces distances de perception sont plus grandes que celles obtenues lors des phases de dragage et d'ensouillage des câbles.

Les autres bruits sont perceptibles sur des zones plus confinées autour des ateliers, allant de 4,1 à 5,8 milles nautiques pour les opérations de forage vertical et de 5,7 à 8,5 milles nautiques pour l'ensouillage et le dragage respectivement (Figure 91). Les empreintes sont plus étendues selon un axe sud-ouest nord-est car le bruit du trafic maritime concentré en centre Manche domine les bruits du chantier qui se propagent perpendiculairement à cet axe.

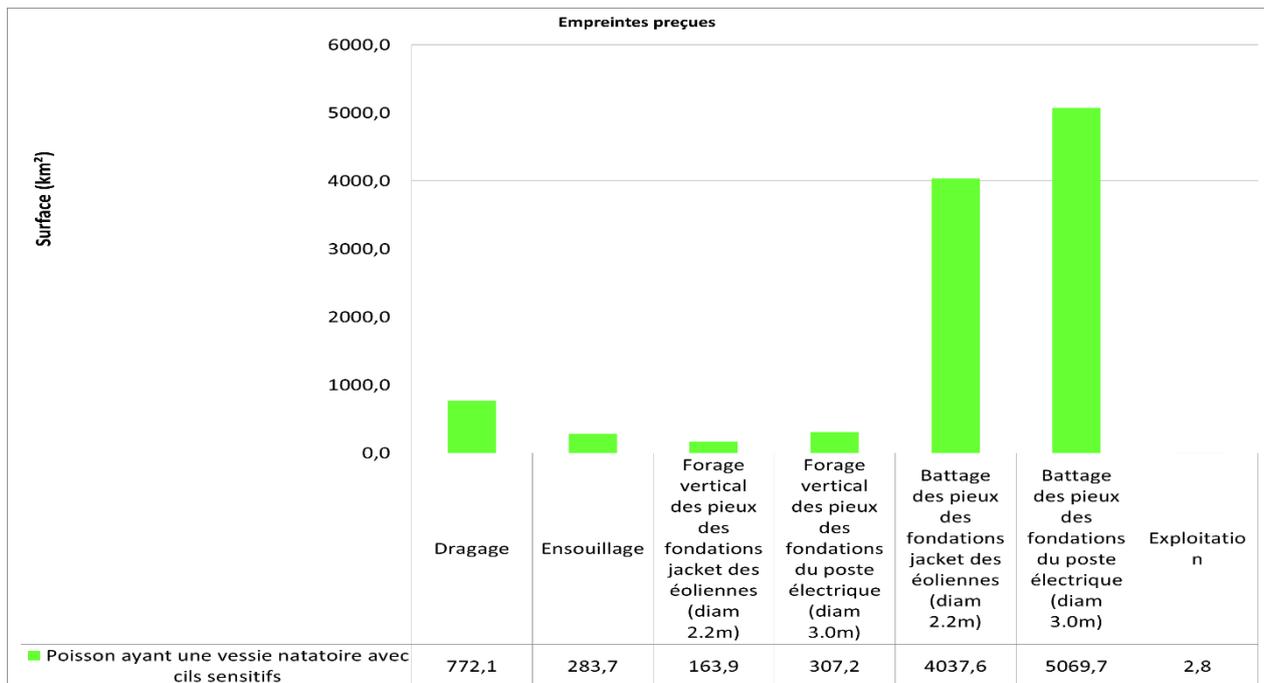
En fonctionnement, la géométrie des empreintes sonores perçues par les poissons avec vessie natatoire sans cils sensitifs englobent l'empreinte physique du parc en la débordant au plus de 0,7 milles nautiques lors de l'exploitation des éoliennes. Autrement dit, le bruit des éoliennes en fonctionnement domine le bruit ambiant perçu dans l'ensemble du périmètre du parc et s'étale au plus jusque 0,7 nautiques au droit des éoliennes périphériques.

Figure 91 : Limites médianes des empreintes sonores pour les poissons avec vessie natatoire avec cils sensitifs



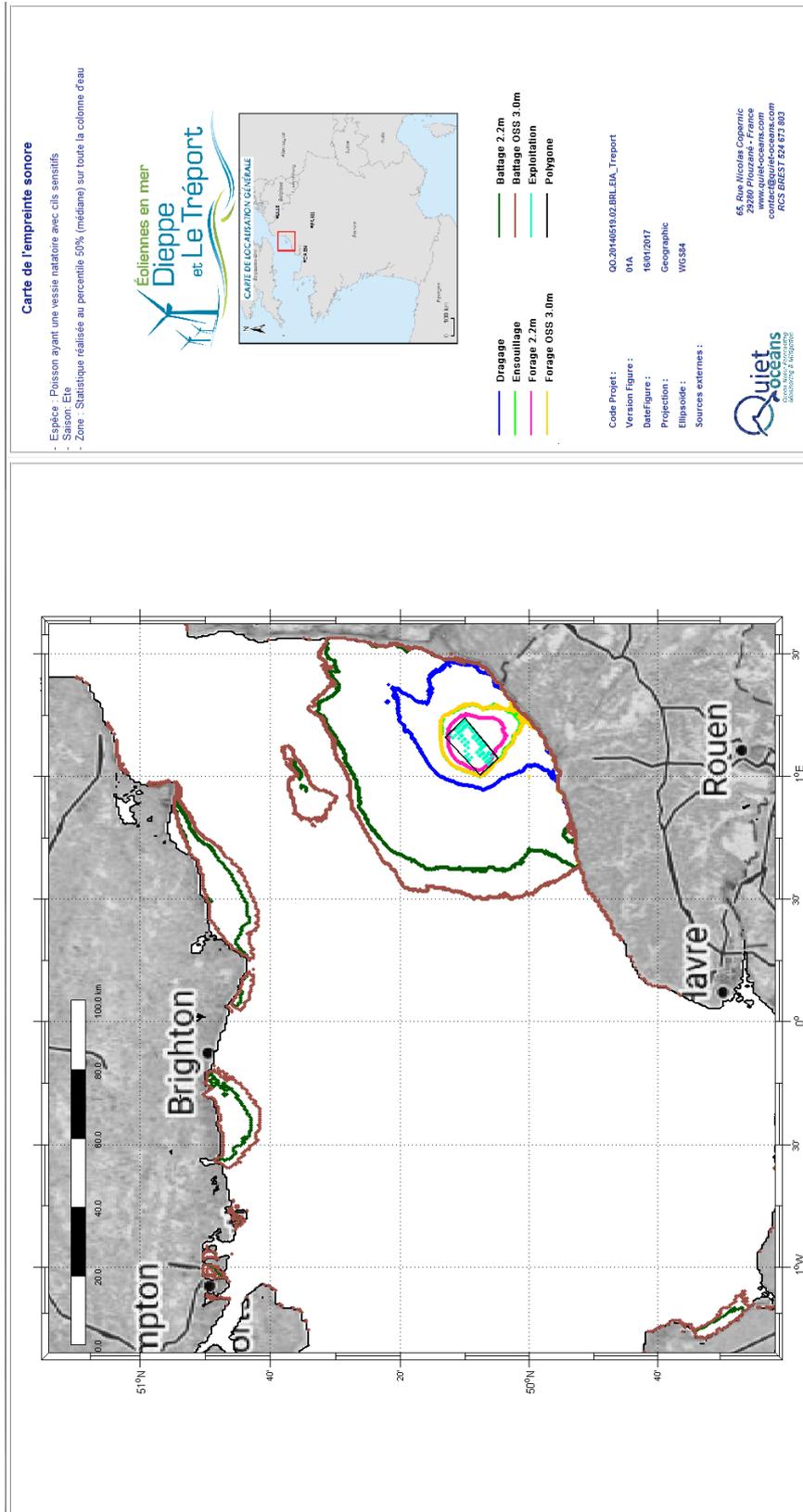
Source : Quiet-Oceans, 2016

Figure 92 : Surface des empreintes sonores pour les poissons avec vessie natatoire avec cils sensitifs



Source : Quiet-Oceans, 2016

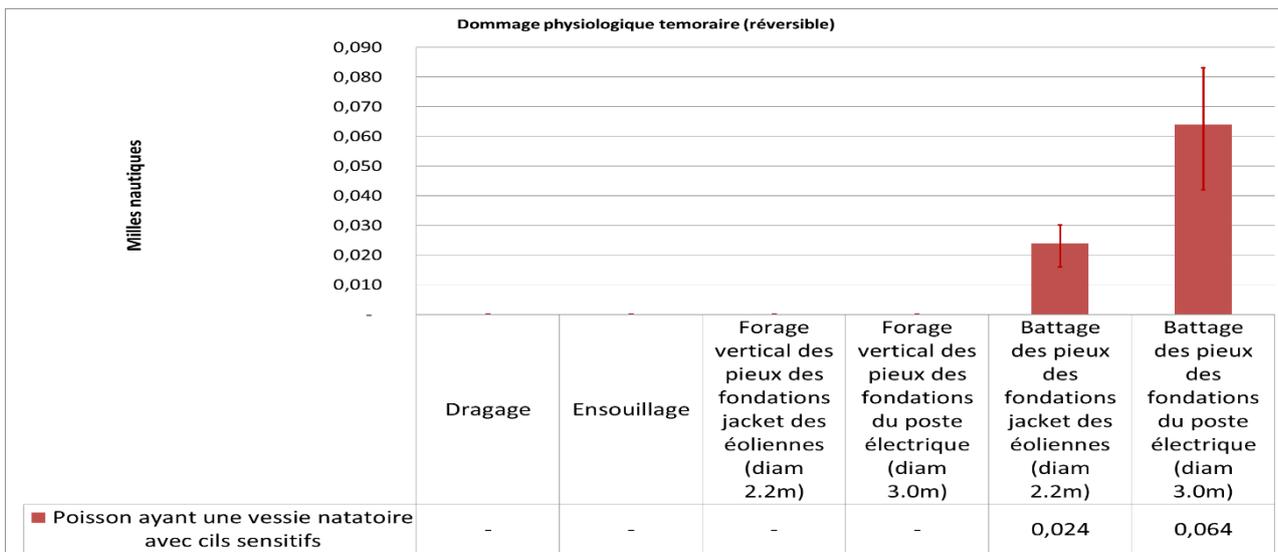
Figure 93 : Cartographie des zones de perception des bruits du projet pour les poissons avec vessie natatoire avec cils sensitifs



### 7.2.5.2 Zone de dommage physiologique temporaire

La Figure 94 montre que seules les opérations de battage de pieu sont susceptibles d'engendrer des dommages physiologiques temporaires de 0,02 et 0,06 mille nautique (en fonction du diamètre) sur les poissons avec vessie natatoire et avec cils sensitifs. Les seuils de dommage physiologique temporaire ne sont pas atteints pour les autres activités du projet.

Figure 94 : Limites médianes des zones de risque de dommage physiologique temporaire pour les poissons avec vessie natatoire avec cils sensitifs



### 7.2.5.3 Zone de dommage physiologique permanent

Les calculs théoriques donnent une distance de dommage physiologique permanent inférieure à 2m pour les opérations de battage, valeur sans réalité physique étant donné les diamètres des pieux. Les seuils de dommage physiologique permanent ne sont pas atteints pour les autres activités du projet.

## 7.3 Estimation des effets acoustiques pour les tortues marines

### 7.3.1 Enjeux du site vis-à-vis des tortues marines

Ces éléments d'informations sont issus de l'étude Biotope (2016).

Aucune observation de tortues marines n'a été faite dans le cadre des inventaires avion et bateau réalisés sur l'aire d'étude éloignée dans le cadre de l'étude d'impact.

Les données d'échouages et d'observations opportunistes sont de même peu nombreuses dans la zone d'étude large sur la période 1988-2014. La présence de tortues marines dans cette zone semble davantage le fait d'individus dérivant depuis la façade atlantique à l'intérieur de la Manche.

Entre 1988 et 2014, 5 échouages (dont 4 en 2012) et 1 observation opportuniste ont été recensés sur l'aire d'étude large. Ils concernent trois des quatre espèces de tortues marines présentes sur l'ensemble de la façade Manche-Atlantique :

- ▶ 2 échouages de Tortue de Kemp dans la moitié Nord de l'aire d'étude large ;
- ▶ 2 échouages de Tortue luth dans la moitié Nord de l'aire d'étude large et 1 observation opportuniste en limite Sud de l'aire d'étude large ;
- ▶ 1 échouage de Tortue caouanne dans la moitié Sud de l'aire d'étude large.

Alors que la Tortue luth vient spécifiquement s'alimenter sur la façade Manche-Atlantique, les tortues caouannes et de Kemp sont des individus juvéniles projetés sur la façade atlantique par les courants et des épisodes de fortes tempêtes.

Aucune observation de tortue n'a été réalisée dans l'aire d'étude large lors de la campagne SAMM.

La présence des tortues marines sur la zone d'étude large est par conséquent rare voire occasionnelle pour la Tortue luth. Les niveaux d'enjeux associés à ces espèces sont présentés dans le Tableau 17 suivant.

Tableau 17 : Synthèse des enjeux concernant les tortues marines

Nom vernaculaire	Caractéristiques ayant conduit à l'évaluation des enjeux	Niveau d'enjeu
Tortue luth	Présence occasionnelle dans l'aire d'étude éloignée Menacée à l'échelle mondiale	Faible
Tortue caouanne	Présence rare/exceptionnelle dans l'aire d'étude éloignée Menacée à l'échelle mondiale	Négligeable
Tortue de Kemp	Présence rare/exceptionnelle dans l'aire d'étude éloignée Menacée à l'échelle mondiale	Négligeable

Source : Biotope, 2016

## 7.3.2 Limites géographiques des risques sonores pour les tortues marines

### 7.3.2.1 Zone d'exposition sonore

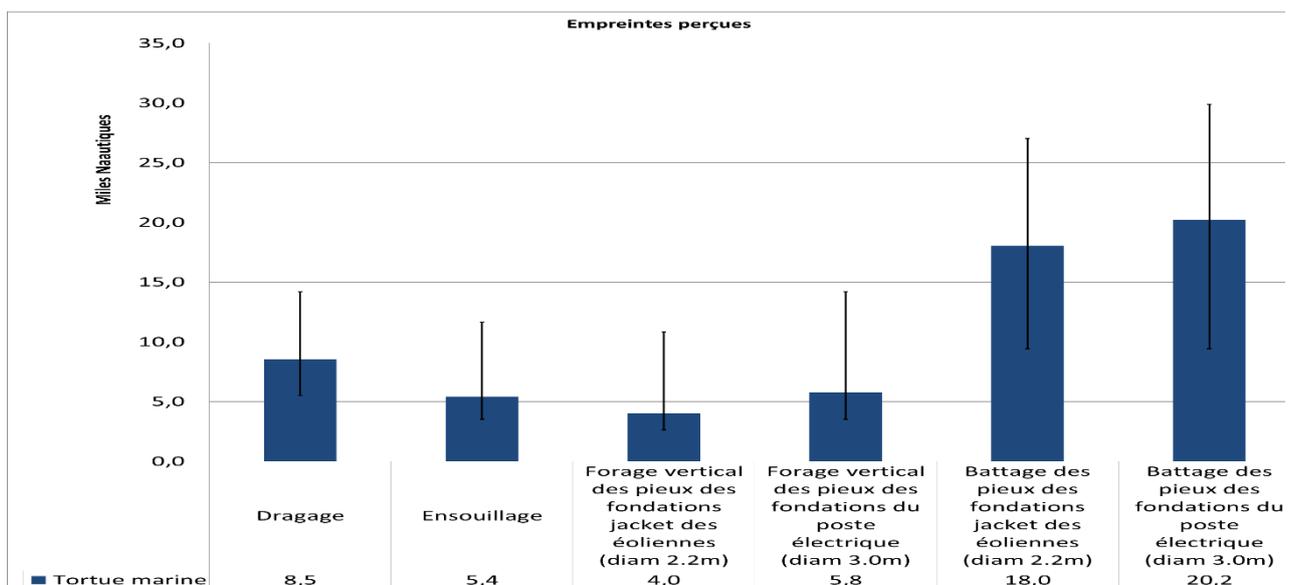
Les empreintes sonores relatives à la perception des bruits du projet pour les tortues marines présentent :

- ▶ peu de variabilité entre les saisons ;
- ▶ de grandes disparités en fonction des ateliers mis en œuvre.

En effet, comme le montre les Figure 95, Figure 96 et Figure 97 , les tortues marines sont susceptibles de percevoir les bruits de battage de la fondation jacket sur de très grandes distances, dont les portées médianes atteignent respectivement 18 à 20,2 milles nautiques respectivement en fonction du diamètre du pieu de la structure jacket (2,2 ou 3m). Les empreintes sonores ont des géométries spatiales très variables en fonction de la direction de propagation des bruits autour du point de génération. Cette variabilité s'explique par la combinaison de la bathymétrie, des conditions météo-océanographiques, des natures du fond, et du bruit ambiant existant. On remarquera en particulier que ces bruits peuvent être perceptibles dans des zones le long des côtes anglaises et dans la baie de Saint-Vaast-La Hougue, lorsque le bruit ambiant se réduit suffisamment pour ne plus masquer les bruits du battage. Ces distances de perception sont plus grandes que celles obtenues lors des phases de dragage et d'ensouillage des câbles.

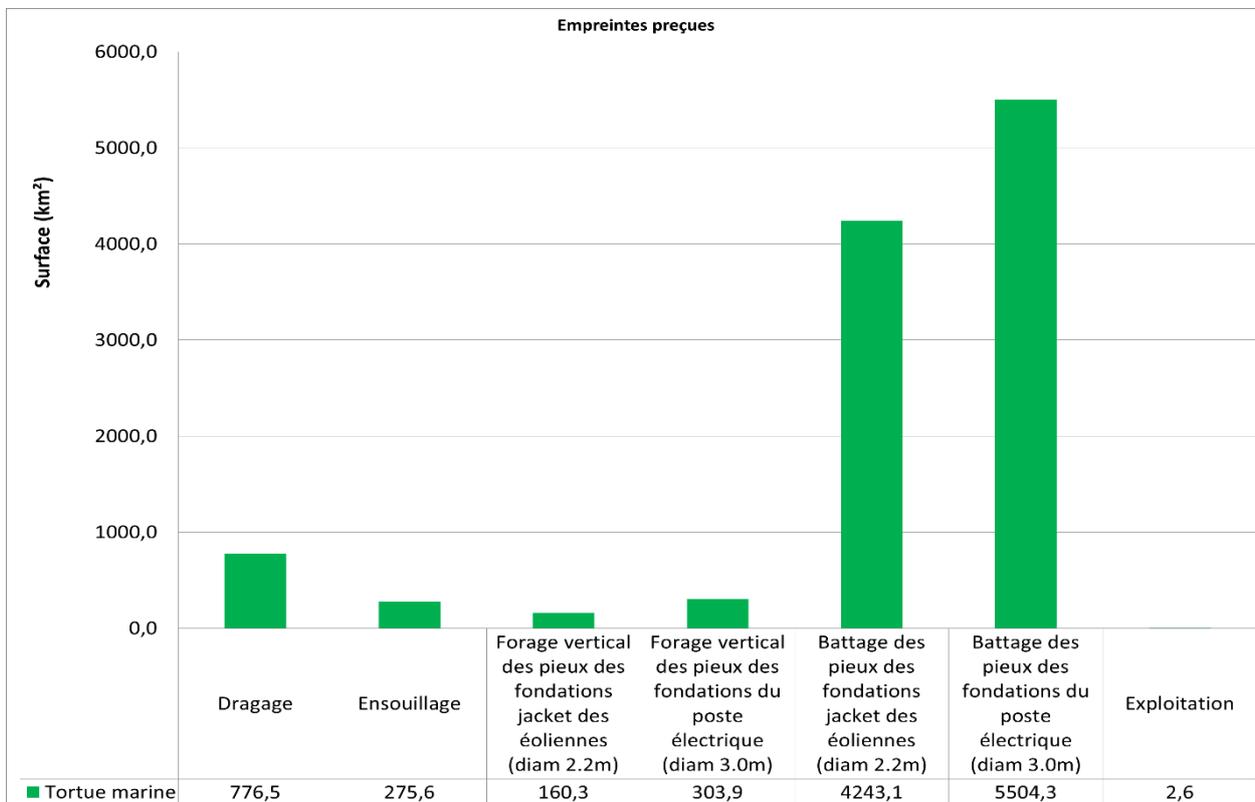
Les autres bruits sont perceptibles par les tortues marines sur des distances médianes de 4 à 5,8 milles nautiques pour les opérations de forage vertical, et 5,4 et 8,5 milles nautiques pour l'ensouillage et le dragage. Les empreintes sont plus étendues selon un axe sud-ouest nord-est car le bruit du trafic maritime concentré en centre Manche domine les bruits du chantier qui se propagent perpendiculairement à cet axe.

Figure 95 : Limites médianes des empreintes sonores pour les tortues marines



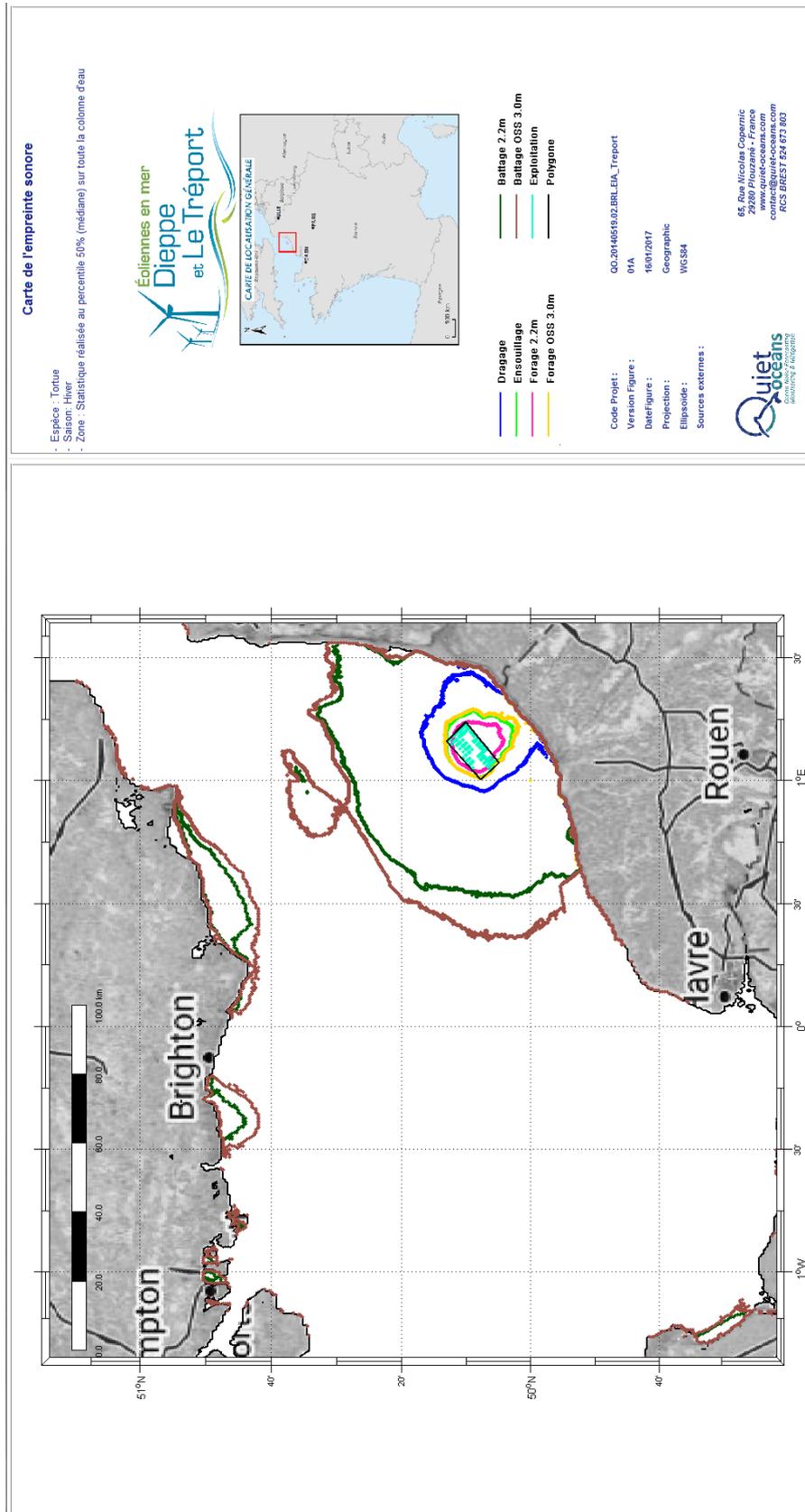
Source : Quiet-Oceans, 2016

Figure 96 : Surface des empreintes sonores pour les tortues marines



Source : Quiet-Oceans, 2016

Figure 97 : Cartographie des zones de perception des bruits du projet pour les tortues marines



### 7.3.2.2 Zone de modification du comportement

La Figure 87 montre que seules les opérations de battage de pieu sont susceptibles d'engendrer des comportements de fuite ou de stress accru respectivement de 0,28 et 0,48 milles nautiques en fonction du diamètre. La géométrie de ces zones de risques est symétrique autour du pieu forage. Les seuils de modification du comportement pour les bruits continus du forage, de l'ensouillage, le dragage, la maintenance et l'exploitation ne sont pas connus.

Figure 98 : Limites médianes des zones de risque de modification du comportement pour les tortues marines

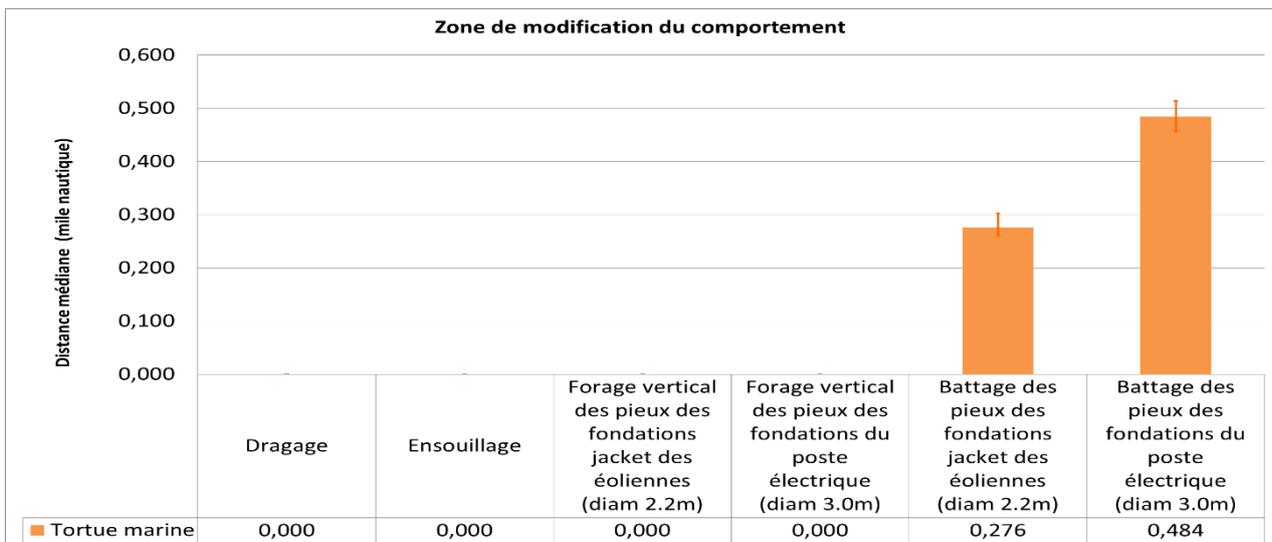
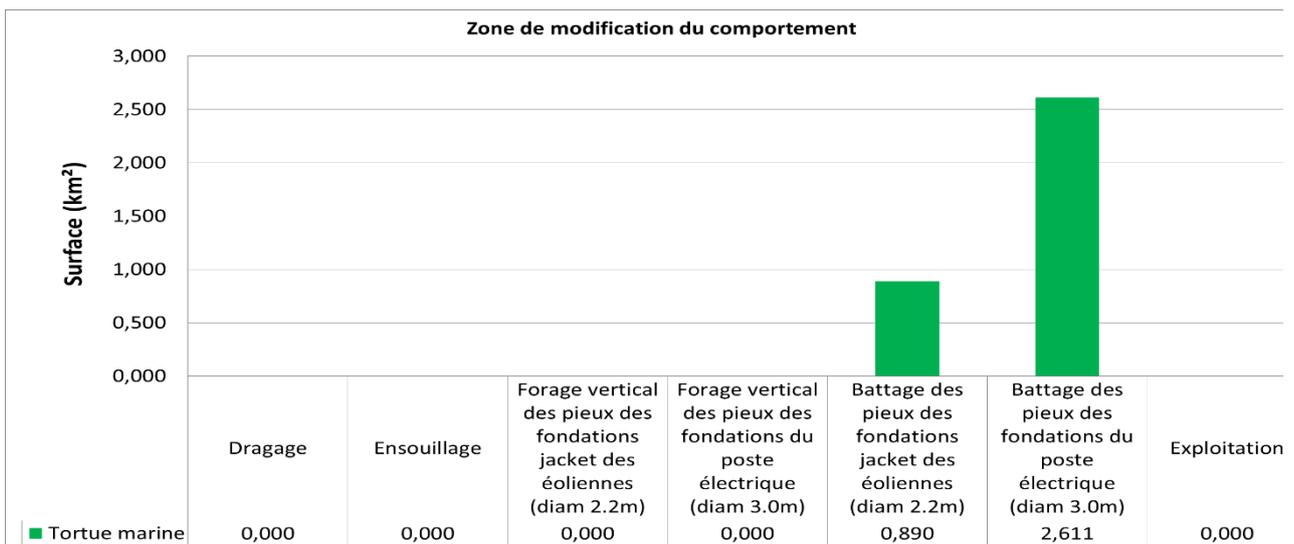


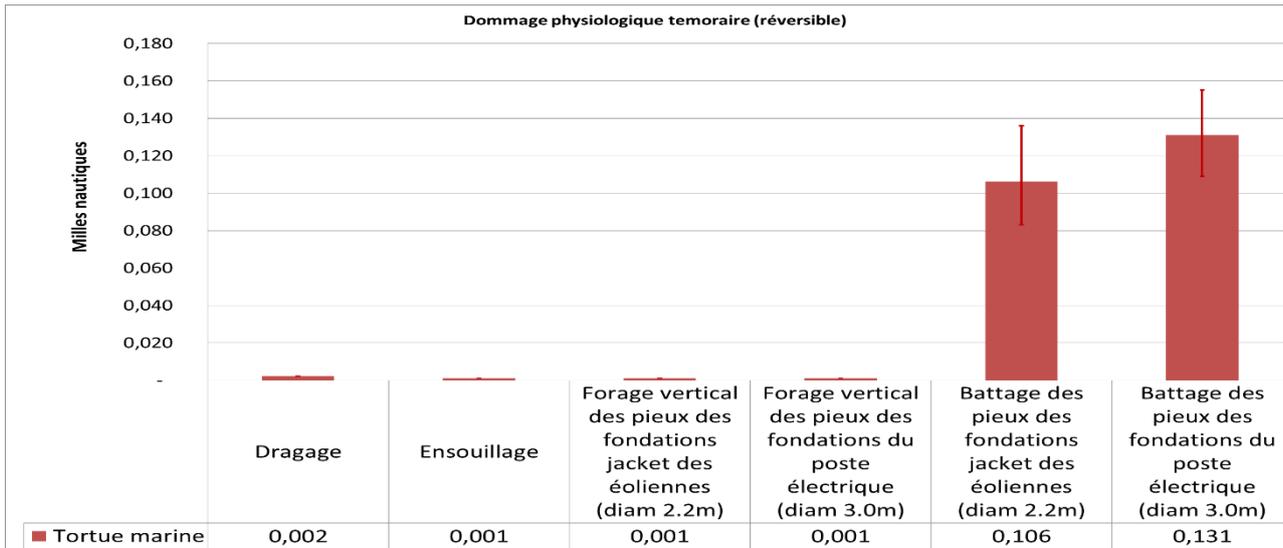
Figure 99 : Surface des zones de risque de modification du comportement pour les tortues marines



### 7.3.2.3 Zone de dommage physiologique temporaire

La Figure 100 montre que seules les opérations de battage sont susceptibles d'engendrer des dommages physiologiques temporaires jusqu'à 0,13 mille nautique en fonction du diamètre.

Figure 100 : Limites médianes des zones de risque de dommage physiologique direct pour les tortues marines



### 7.3.2.4 Zone de dommage physiologique permanent

Les calculs théoriques indiquent un dommage physiologique permanent à moins de 2m du battage de l'OSS, ce qui n'a pas de sens physique étant donné le diamètre du pieu. Les autres ateliers n'atteignent pas les seuils de dommage physiologique permanent

## 7.4 Effet du bruit sur les invertébrés marins

Si l'impact sur les mammifères marins ou les poissons est plutôt bien étudié dans la littérature, il l'est nettement moins sur les autres groupes d'espèces et notamment sur les biocénoses benthiques et les invertébrés marins, notamment par la difficulté liée au nombre d'espèces important à étudier.

La plupart des invertébrés marins (mollusques, crustacés, cnidaire, échinoderme...) sont sensibles aux mouvements des particules d'eau sous l'effet du champ sonore à basses fréquences. Les crustacés semblent être les plus sensibles aux fréquences inférieures à 1 kHz (Budelmann, 1992). Certaines espèces sont cependant capables de détecter des bruits jusqu'à 3 kHz (Lovell, et al. 2005).

Les céphalopodes (calamar, seiche, poulpe...) sont sensibles aux stimuli de mouvement de l'eau dans un intervalle comprise entre quelques dizaines de Hz et 1 500 Hz (Packard et al., 1990) (Hu et al. 2009). Par exemple, certains mollusques tels que les ormeaux se montrent très sensibles aux bruits aigus tandis que les huîtres sont plus tolérantes (Moriyasu et al., 2004 in Wilhemson et al. 2010, in MEDDE 2012).

En plus d'être réceptifs aux ondes sonores, de nombreux invertébrés tels que les espèces de bernaches, les amphipodes, les crevettes, les crabes, les homards, les crevettes mantes, les oursins et les calmars sont également capables de produire des sons (Au & Banks, 1998) (Iversen et al. 1963) (Radford et al. 2008) (Staaterman et al. 2011). Chez certaines espèces d'invertébrés les sons émis sont considérés comme écologiquement important en termes de communication acoustique entre individus d'une même espèce. Il a été suggéré que la communication acoustique et la perception des sons chez les invertébrés peuvent être aussi essentielles que chez les vertébrés marins (Richardson et al. 1995). Des effets de masquages des communications sont susceptibles de se produire dans l'empreinte sonore du projet.

A notre connaissance, il n'y a pour l'instant pas d'étude scientifique cherchant à déterminer les effets de sources de bruit d'origine anthropique tels que le battage de pieux, les activités maritimes ou les sonars sur les invertébrés marins. Bien qu'il soit reconnu que les invertébrés sont sensibles aux ondes basses fréquences, il semblerait cependant qu'il n'y ait pas encore de données fiables à ce jour sur les dommages physiologiques chez les invertébrés exposés à des bruits anthropiques (OSPAR Commission, 2009). Toutefois, une augmentation significative des échouages de calmars géants en Espagne entre 2001 et 2003 coïncide avec la proximité des navires de levés sismiques mettant en œuvre des antennes de canons à air (Guerra et al. 2004). L'analyse pathologique des calmars bruns a montré la présence de lésions dans les tissus et dans les organes suggérant qu'ils ont été causés par une exposition excessive aux ondes émises par des canons à air. De plus, une étude expérimentale récente a montré que des expositions modérément intenses à des ondes sonores basses fréquences sont susceptibles de causer des traumatismes graves pouvant entraîner la mort chez quatre espèces de céphalopodes (André et al. 2011).

Une étude récente de Solan et al (2016) portée sur la palourde japonaise *Ruditapes philippinarum* et la langoustine *Nephrops norvegicus* qui ont été exposées à différentes sources de bruit en conditions de laboratoire expérimentales. Dans le cas de la langoustine, le bruit entraîne une réduction de sa capacité de locomotion notamment sa capacité d'enfouissement. Pour la palourde, le bruit entraîne une réaction de stress qui consiste à remonter à l'interface eau-sédiment et à fermer leurs valves, empêchant l'activité suspensivore. L'étude ne mentionne pas le comportement des espèces à l'arrêt des expositions au bruit, ce qui reste une question de première importance. L'effet est probablement temporaire mais l'étude ne le précise pas.

En outre, d'autres espèces de bivalves (ex : moules *Mytilus edulis* et bigorneau *Littorina* spp) exposées à un canon à air utilisé dans les cadre d'études sismiques (très fortes émissions sonores)

à une distance de 0,5 m n'ont montré aucun effets après exposition (Kosheleva, 1992) mais des études complémentaires sont attendues pour confirmer ou infirmer ces résultats. Une étude sur l'impact des sonars sismiques sur des calamars ont démontré leur sensibilité aux bruits impulsifs qui se traduit notamment par une augmentation de la vitesse de nage dès des niveaux perçus de 156-161 dB ref. 1 $\mu$ Pa, et de fortes réactions de sursaut à partir de 174 dB ref. 1 $\mu$ Pa (McCauley et al. 2003).

L'influence du bruit de battage de pieu sur la physiologie de l'alimentation de la moule commune (*Mytilus edulis*) a été étudiée dans une expérience sur le terrain semi-ouvert (Spiga et al., 2016) au cours de laquelle les moules avaient la possibilité de se nourrir de *Tetraselmis suecica*. Les résultats suggèrent que les moules exposées au battage augmentent leur métabolisme afin de compenser le stress initial causé par battage. Le passage d'un stade « normal » à un stade de métabolisme accru n'est toutefois possible que si la nourriture est présente en suffisance.

Selon Degreear, et al (2013), si les intensités maximales détectées sous l'eau pendant l'installation des fondations peuvent atteindre des valeurs importantes, et bien que les ondes surfaciques comme celles de la colonne d'eau soient perçues par le benthos, le bruit constitue avant tout une préoccupation majeure pour les poissons, les céphalopodes et les mammifères marins. La sensibilité à cet effet est donc considérée faible pour le benthos, notamment par son caractère temporaire.

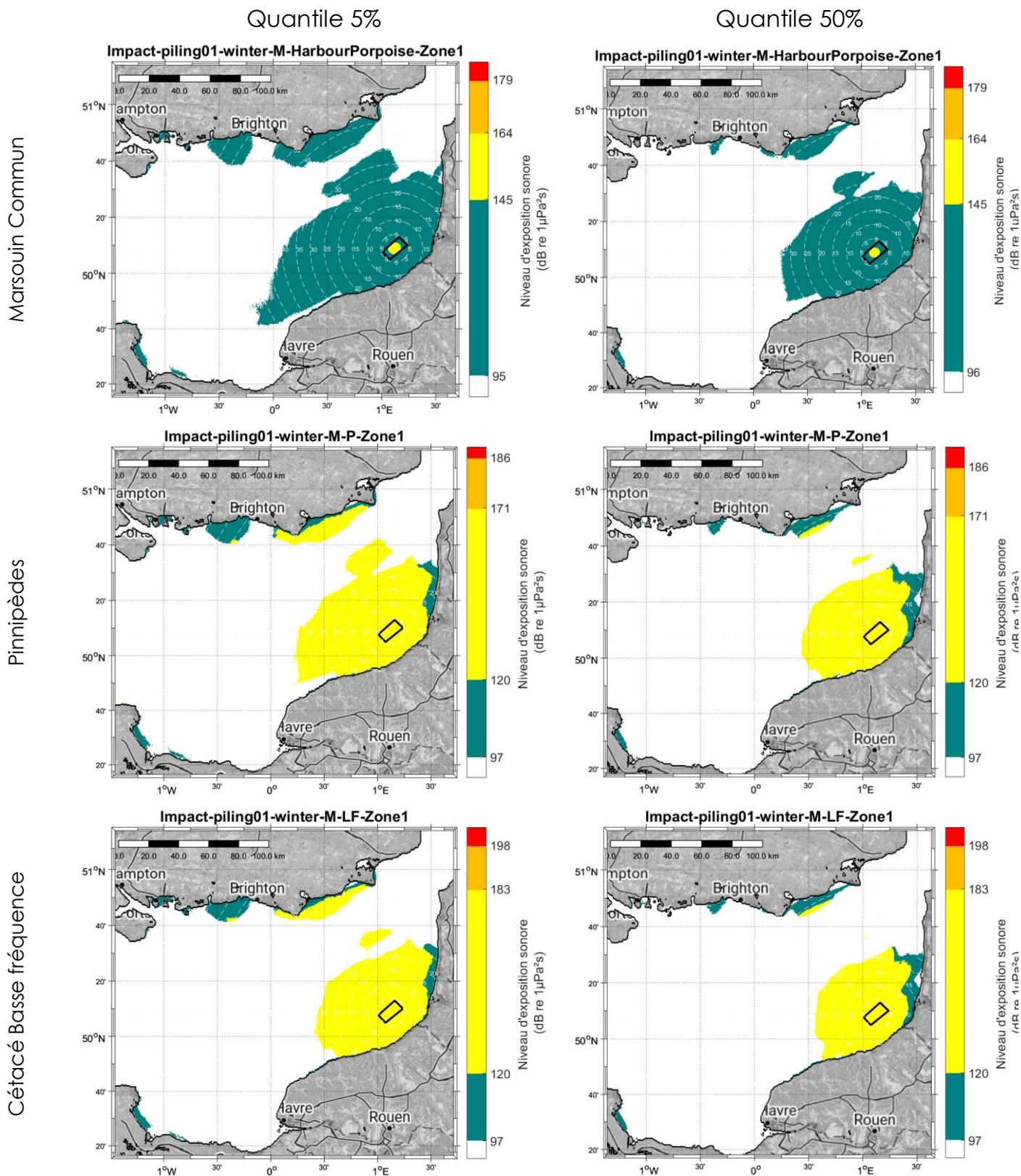
## 7.5 Influence du quantile

Les modélisations des empreintes sonores et des risques ont été établies par défaut pour le percentile médian (50%). Une analyse spécifique a été effectuée pour d'autres percentiles caractéristiques afin d'obtenir des distance conservatrices (5, 10, 25 %). Dans ce contexte sans variation significative de la hauteur d'eau dans cette zone, les résultats montrent que les distances augmentent d'environ 15 à 20% lors du passage du quantile 50 à 5%. Le Tableau 18 synthétise dans le cas d'un battage de pieu de diamètre 2,2m, les variations des distances médianes pour chaque compartiment (empreinte, modification du comportement, TTS et PTS) en fonction du quantile (5 ou 50%) et de l'espèce. La Figure 101 illustre les variations géographiques de l'empreinte sonore et des risques biologiques dans le cas d'un coup de battage de pieu perçu par différentes espèces (marsouin commun, pinnipède et cétacé basse fréquence). Ces cartographies mettent en évidence un accroissement global de chaque zone sans direction privilégiée.

Tableau 18 : Comparaison des distances médianes (en mile nautique) en fonction du quantile sélectionné lors du battage de pieu de diamètre 2,2m

Quantile	Empreinte sonore		Modification du comportement		Dommmage physiologique temporaire (TTS)		Dommmage physiologique permanent (PTS)	
	5%	50%	5%	50%	5%	50%	5%	50%
<b>Marsouin commun</b>	25,6	20,9	2,06	1,80	0,17	0,15	0,008	0,061
<b>Moyennes fréquences</b>	25,2	20,2	23,53	18,62	0,04	0,01	0,001	0,001
<b>Basses fréquences</b>	20,1	17,7	19,39	16,57	0,10	0,06	0,003	0,003
<b>Pinnipèdes</b>	22,2	18,8	21,42	17,61	0,15	0,12	0,051	0,007

Figure 101 : Comparaison de la cartographie des risques sonores pour les percentiles 5 et 50% lors d'un même battage de pieu d'une fondation jacket



## 7.6 Effets prolongés du bruit sur les mammifères marins

Afin de prendre en considération la durée des opérations de construction, une modélisation spatiale prend en compte d'une part une séquence de battage d'un pieu et d'autre part la fuite d'un mammifère marin dans la direction opposée à l'emplacement de l'atelier. Dans cette modélisation dynamique, l'animal est supposé se déplacer à la vitesse moyenne de 20km/h. L'atelier de battage d'un diamètre de 2,2m prévoit une cadence 30 coups par minute pendant une durée totale de deux heures et sans interruption. L'énergie acoustique accumulée pendant la fuite de l'animal est comparée aux seuils de tolérance (Tableau 4). Dès que l'animal sort de l'empreinte sonore, la contribution acoustique est alors considérée comme nulle. Cette modélisation a été effectuée pour les cétacés de la catégorie moyenne fréquence et pour les pinnipèdes. Chaque point de la cartographie représente le point de départ de l'animal lors du premier coup de battage.

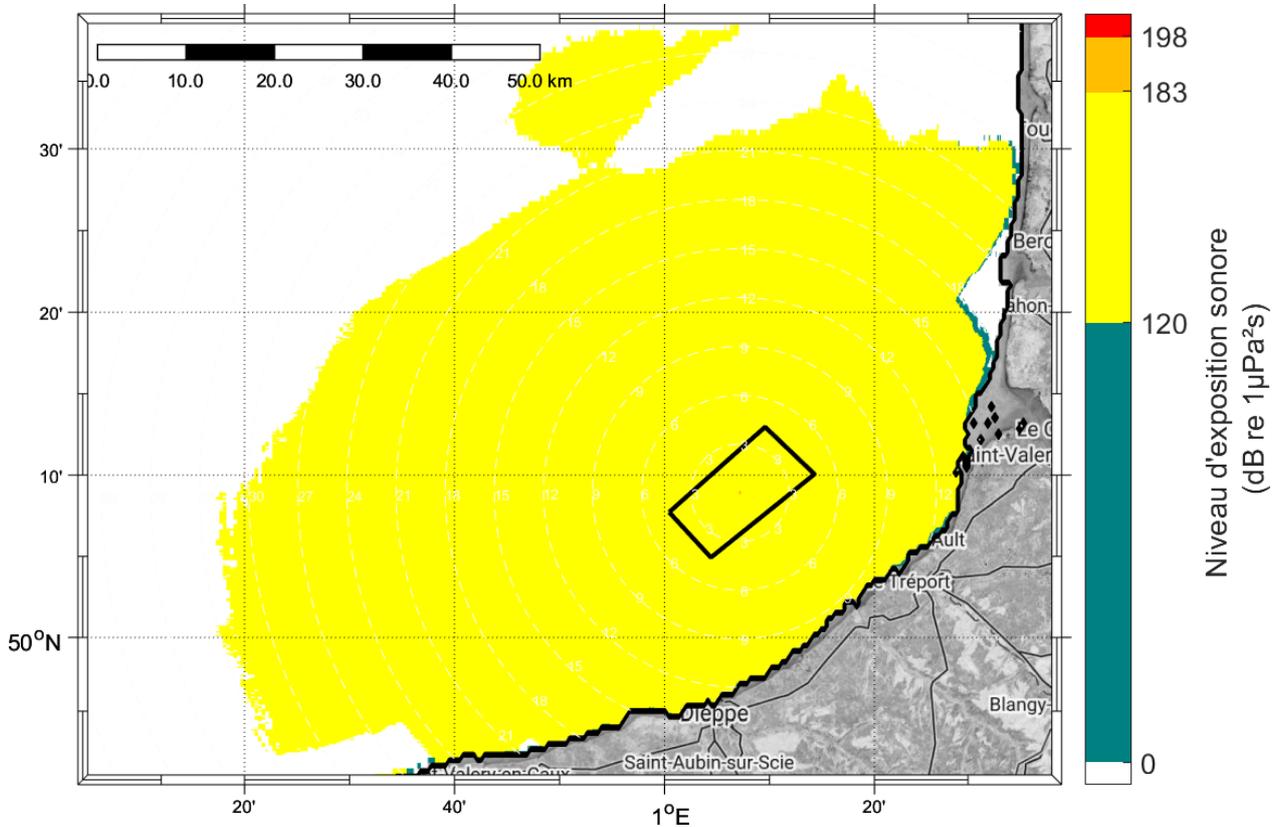
Les seuils de tolérance choisis pour cette évaluation des effets prolongés sur un animal en fuite, sont identiques aux seuils établis une exposition d'une seconde. Cette hypothèse est issue du consensus Southall 2007. A ce jour, aucun consensus n'est établi quant à l'évolution des seuils de tolérance en fonction du temps cumulé de l'atelier de construction. L'analyse menée dans cette étude est donc très conservatrice d'une part par les seuils de tolérance choisis (principalement le seuil de modification du comportement) et d'autre part par la constance de ces seuils au cours du temps cumulé (id de l'énergie sonore cumulée par l'animal).

Ces simulations ne prennent pas en compte le fait que l'espèce doit reprendre régulièrement sa respiration (surtout dans la cadre d'une fuite) et donc sortir partiellement de l'eau. Si cette phase s'avère courte chez les cétacés qui ne doivent pas sortir la tête complète de l'eau, elle peut représenter, pour les pinnipèdes, une façon efficace d'échapper à cette accumulation sonore.

La Figure 102 donne la position initiale du cétacé moyenne fréquence. La couleur jaune signifie que durant les deux heures cumulées de fuite (identiquement les deux heures de battage); l'animal va subir une accumulation d'énergie sonore dépassant le seuil de modification du comportement. Cette carte ne permet pas de quantifier à partir de quelle durée de la phase de battage ce dépassement est atteint. Ce seuil de modification du comportement est atteint quel que soit la position de l'animal dans l'empreinte sonore de cet atelier. De la même manière, la couleur orange indique le dépassement du dommage physiologique temporaire (TTS). Ce dépassement est atteint si le cétacé de la catégorie moyenne fréquence se situe, au démarrage, dans un rayon maximal de 208m depuis le centre de l'atelier. Le seuil de dommage physiologique permanent n'est pas atteint sauf si le cétacé de la catégorie moyenne fréquence se situe à proximité immédiate de l'atelier (<10m).

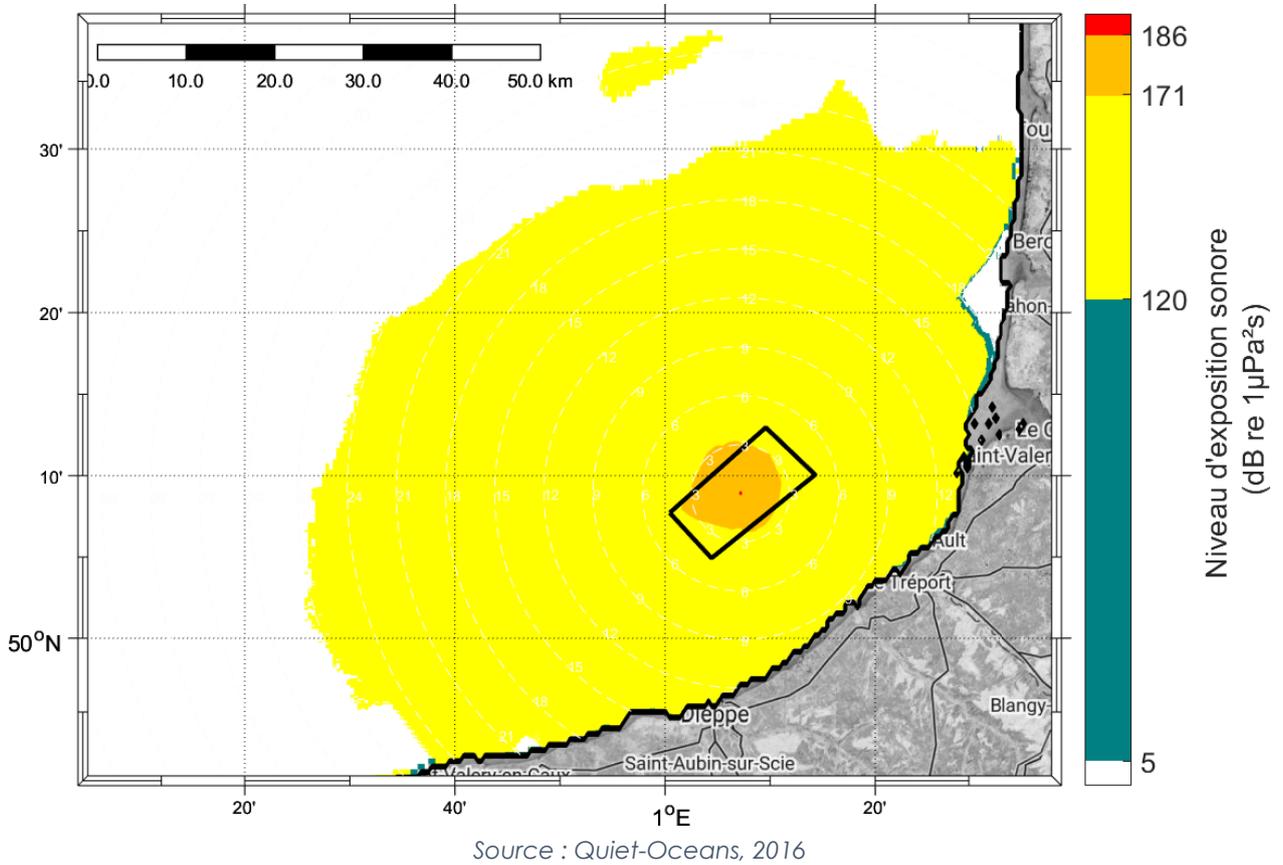
De manière similaire, la Figure 104 illustre les risques vis-à-vis d'un pinnipède en déplacement lors d'une phase de battage de pieu. Si l'animal se situe dans l'empreinte sonore au moment du démarrage, il subira un dépassement du seuil de modification comportementale quelle que soit sa position par accumulation de l'énergie sonore lors de son parcours de fuite. Le dépassement du seuil de dommage physiologique temporaire interviendra si l'animal se situe au démarrage dans un rayon maximum de 6,9 km autour de l'atelier de battage (valeur moyenne de 5,1km). Cette distance de risque d'un dommage temporaire est légèrement plus étendue dans les directions ouest et nord-ouest. Le risque d'un dépassement du seuil d'un dommage physiologique permanent est atteint si l'animal se situe au démarrage dans un rayon maximal de 241 m autour de l'atelier (valeur moyenne de 184m).

Figure 102 : Cartographie des risques en fonction du point de départ d'un cétacé moyenne fréquence en phase de fuite à la vitesse de 20km/h lors d'une séquence de battage de pieu



Source : Quiet-Oceans, 2016

Figure 103 : Cartographie des risques en fonction du point de départ d'un pinnipède en phase de fuite à la vitesse de 20km/h lors d'une séquence de battage de pieu



## 7.7 Synthèse des risques

Pour chaque atelier et pour chaque espèce, les distances représentatives des zones de dépassement des seuils sonores ont été établies :

- la zone de perception de chaque atelier;
- la zone de modification comportementale;
- la zone de dommage physiologique temporaire ;
- la zone de dommage physiologique permanent.

Chaque zone est dimensionnée pour tous les azimuts autour de chaque atelier de construction, d'exploitation et de maintenance. La forme des zones d'impact n'est jamais un cercle car elles dépendent de l'océanographie, de la bathymétrie et en grande partie du bruit existant qui domine les bruits du projet en centre Manche. Cela est d'autant plus vrai que les distances sont grandes.

Les travaux de construction entraînent une empreinte sonore légèrement plus étendue en hiver principalement pour les ateliers dont l'empreinte occupe une surface légèrement plus grande. Géographiquement, l'empreinte sonore est plus étendue dans la direction ouest et nord-ouest en raison d'un accroissement progressif de la bathymétrie favorable à la propagation des ondes basses fréquences.

L'évaluation du dépassement des seuils de tolérances pour les mammifères marins, poissons et les tortues marines a permis de quantifier les zones de risques de gêne ou de dommage physiologique en fonction des saisons et des scénarios du projet. L'étude indique :

- le non-dépassement du seuil de dommage physiologique permanent quelle que soit la technique et quelle que soit la saison. Les calculs théoriques simplifiés à la limite de la validité physique, indiquent toutefois une zone de dommage de 45m autour des pieux pour le battage de l'OSS ;
- les ateliers de battage de pieu des fondations entraînent des dépassements de seuil de dommages physiologiques temporaires (réversibles) jusqu'à une distance variable comprise entre 100 et 360m en fonction de l'espèce et du diamètre. Un diamètre de pieu de 3,0m entraîne les distances de dépassement les plus grandes (380 m pour le Marsouin et 300m pour les pinnipèdes). L'atteinte des seuils de dommages physiologiques temporaires concernant l'atelier de dragage atteint 100 m pour le Marsouin commun. L'atelier d'ensouillage du câble devrait dépasser le seuil jusqu'à une distance de 60m pour le Marsouin commun. Le forage vertical devrait entraîner un dépassement du seuil de dommage physiologique temporaire jusqu'à 10m ;
- l'atteinte des seuils connus de dérangement ou de gêne comportementale concerne le Marsouin commun, les tortues marines et les poissons ayant une vessie natatoire sans cils sensitifs pour les ateliers de battage (diamètre 2,2, et 3), de forage vertical de diamètre 2,2 et 3m, d'ensouillage et de dragage. Depuis l'atelier, les distances de dépassement sont très variables en fonction du type d'atelier et de l'espèce (maximum de 13,5 km pour les poissons lors du battage de diamètre 3m, minimum de 200m lors du forage de jacket de diamètre 2,2m). Pour le Marsouin commun, cette distance passe de 4,7km à 3,3km si le diamètre du pieu battu passe respectivement de 3m (fondation OSS) à 2,2m et de 129 à 62m si le diamètre du forage vertical passe de 3 à 2,2m ;

A partir des données de fréquentation saisonnière de certaines espèces de cétacés (campagne SAMM), il est possible d'estimer le nombre d'individus susceptibles de percevoir ou subir le bruit de chaque atelier. Outre le marsouin commun, d'une manière générale, les globicephales, le grand dauphin, et les petits delphininés ne devraient pas percevoir les bruits des différents ateliers durant la saison estivale car ces espèces sont quasiment absentes de la zone à cette période. Pour le marsouin commun, espèce la plus fréquente sur cette zone, la

saison hivernale augmente d'un facteur 7 environ le nombre d'individus susceptibles de percevoir le bruit de chaque atelier (passage de 343 à 2193 lors du battage de la fondation jacket de diamètre 2,2m).

De la même manière, le nombre de marsouin commun susceptible d'avoir une modification comportementale est estimé entre 9 et 1 individu(s), respectivement en hiver et en été, dans le cas du battage de pieu (diamètre 2,2m), faible lors des différents ateliers de dragage et très faible lors des ateliers d'ensouillage et de forage.

La perception des bruits de fonctionnement des éoliennes est globalement limitée au périmètre du parc, et au-delà à des distances de 0,7 à 1,9 milles nautiques des éoliennes périphériques en fonction de la vitesse de rotation et des espèces. L'exploitation du parc éolien et la maintenance ne devraient entraîner aucune modification de comportement.

Concernant les individus susceptibles de subir un risque physiologique temporaire, les nombres estimés sont très faibles et très inférieurs à un individu pour tous les ateliers.



# 8 Effets cumulés avec d'autres projets en mer





Dans le cas éventuel d'une concomitance des travaux de construction du parc éolien de Dieppe le Tréport avec d'autres projets de construction en Manche, plusieurs scénarios cumulatifs sont analysés dans cette étude.

En fonction du planning de construction, les constructions du site éolien en mer de Saint-Brieuc et du site hydrolien du Raz Blanchard peuvent se dérouler simultanément à la construction du parc de Dieppe Le Tréport. De la même manière, des travaux de désensablement sur la plage au sud de Penly sont susceptibles d'être effectués en concomitance avec les travaux du parc. Enfin, une situation de travaux de pose du câble de raccordement entre le parc et la zone d'atterrage située au nord de Penly est étudiée du point de vue des effets cumulés. Enfin, un dernier scénario cumulatif prend en compte une situation de battage dans le parc éolien de Courseulles-sur-Mer pouvant se synchroniser à la pose gravitaire au sein du parc de Fécamp. A titre conservateur, la phase de battage de 2,2m de diamètre est choisie comme situation de travaux de référence au sein du parc éolien car cette activité concerne les émissions les plus importantes et concerne toutes les fondations sauf celle de l'OSS.

En outre-Manche, le projet éolien en mer de Rampion au large de Brighton sera très probablement en exploitation au moment des travaux au sein du parc éolien de Dieppe Le Tréport. Le bruit induit par ce parc en exploitation ne justifie pas l'étude spécifique du cumul avec les travaux de construction de Dieppe Le Tréport. Le projet éolien en mer Navitus Bay au large de Bournemouth, pour sa part, est annulé.

Ce chapitre analyse donc les effets cumulés lors de la construction du parc éolien et en particulier lors d'une séquence de battage de la fondation de jacket d'une éolienne (diamètre 2,2m) concomitante à (Figure 108) :

- ▶ soit un atelier de battage d'une fondation monopieu de 7 m de diamètre au centre du parc éolien en mer du Calvados au large de Courseulles-sur-Mer ;
- ▶ soit un atelier d'ensouillage du câble de raccordement entre le parc et la zone d'atterrage (nord de Penly) ;
- ▶ soit un atelier de dragage correspondant au désensablement de la plage au sud de Penly.

## 8.1 Scénario cumulé avec la construction du parc du Calvados

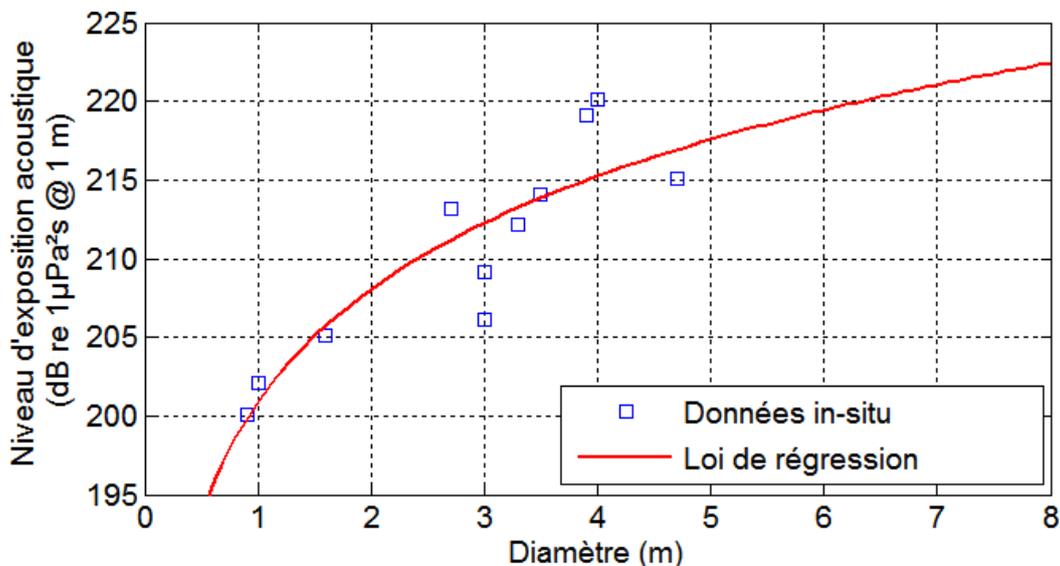
Dans le cas d'une simultanéité des travaux de construction avec le parc du Calvados au large de Courseulles-sur-Mer, un scénario cumulé prend en compte le battage d'un monopieu de 7m de diamètre situé au centre du parc du Calvados. Chaque pieu est battu indépendamment. Ces travaux de battage se superposent aux travaux de forage des fondations éoliennes sur le site de Dieppe et du Tréport.

L'hypothèse retenue dans cette étude consiste à battre le pieu par un marteau hydraulique situé au-dessus du niveau de la mer. Lors d'une phase de battage, les bruits générés sont, par nature, impulsionnels.

Les retours d'expérience et les modélisations menées dans le cadre du projet de recherche RESPECT (J. L. Van de Loock 2016) ont démontré que le niveau d'exposition sonore dans l'eau croît de manière logarithmique en fonction du diamètre du pieu (Figure 104), ce qui permet d'extrapoler avec confiance les mesures effectuées sur des pieux de plus petits diamètres sur les sites de mer Q7, FINO 1, 2 et 3, Alpha Ventus, Utgrunden, Sky 2000, Amrumbank West, Horns Rev II, North Hoyle, et Barrow (Betke, 2008), (De Jong, et al., 2008), (Talisman Energy (UK) Limited, 2004), (Nedwell, et al., 2004) et (ITAP, 2008).

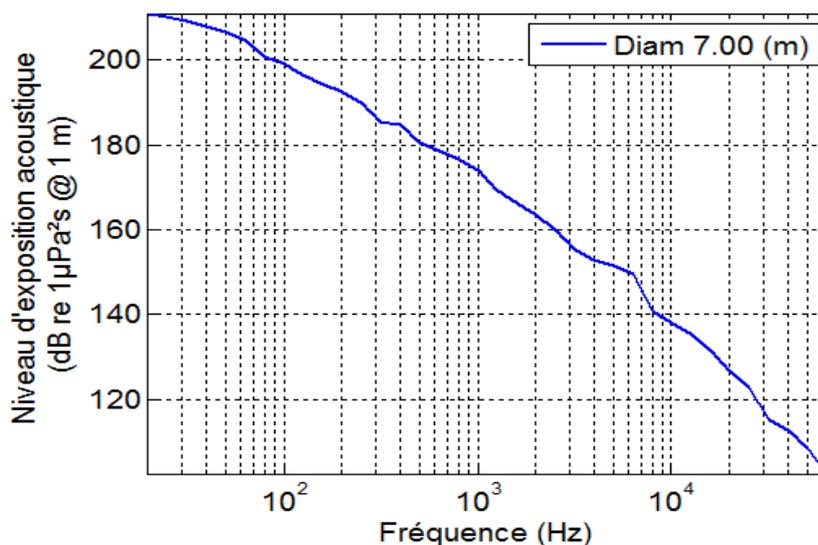
Un point de simulation est choisi au centre du parc du Calvados (au sud-ouest de l'aire d'étude immédiate) et est considéré comme représentatif de l'ensemble des ateliers de battage sur ce site (Figure 108).

Figure 104 : Variation du niveau d'exposition sonore maximum par coup à un mètre du pieu en fonction de son diamètre.



Source : Quiet-Oceans (Van de Loock, et al., 2016) et données mesurées lors des opérations de constructions portuaires en Allemagne, et des parcs éoliens en mer Q7, FINO 1, 2 et 3, Alpha Ventus, Utgrunden, Sky 2000, Amrumbank West, Horns Rev II, North Hoyle, et Barrow.

Figure 105 : Modèle de niveau d'exposition sonore à un mètre du pieu de diamètre 7m, pour un coup unique, en fonction de la fréquence.



Source: Quiet-Oceans

## 8.2 Scénario cumulé avec l'ensouillage du câble de raccordement

Dans le cas d'une simultanéité des travaux de construction avec la mise en place de câble de liaison avec le parc éolien, un scénario cumulé prend en compte un atelier d'ensouillage du câble de raccordement et une opération de battage d'un pieu de fondation d'éolienne du parc de Dieppe et du Tréport d'un diamètre de 2,2 m.

L'ensouillage du câble de raccordement est réalisé par un navire de surface et un outil spécialisé, le plus souvent tracté sur le fond. Les opérations ont lieu en continu, et le bruit généré est donc de même nature. Le scénario technico-opérationnel représentatif de l'ensouillage des câbles correspond donc à la superposition d'un navire générant un bruit propre et d'un engin sous-marin sur le fond générant un bruit propre, très peu documenté (Nedwell and Howell 2004). Le gabarit de source sonore à 1m choisi ( ) est dérivé des mesures effectuées sur le site éolien offshore Beatrice (Talisman Energy (UK) Limited 2004) et de mesures réalisées en Ecosse (Wilson, Carter et Elliott 2009).

Un point de simulation est choisi à mi-parcours du raccordement (au sud de l'aire d'étude immédiate) et est considéré comme représentatif des opérations d'ensouillage (Figure 108).

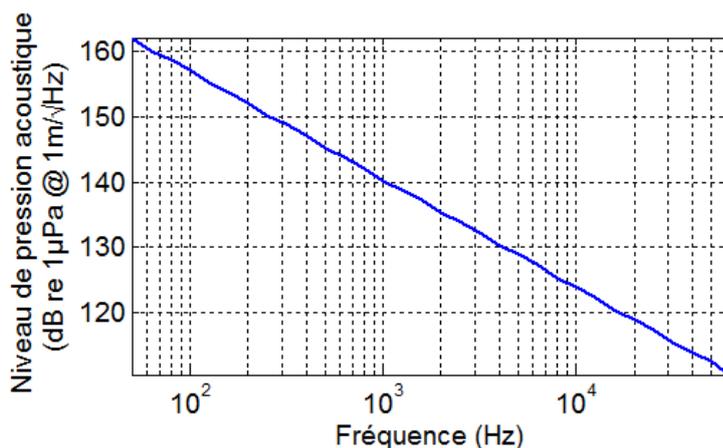


Figure 106 : Gabarit de source sonore (en dB ref. 1µPa/√Hz @1m) localisée près du fond permettant de modéliser le bruit généré par l'outil tracté d'ensouillage des câbles (d'après (Talisman Energy (UK) Limited 2004), et (Wilson, Carter et Elliott 2009))

## 8.3 Scénario cumulé avec désensablement de la plage au sud de Penly

Les opérations de dragage au sud de la plage de Penly sont effectuées, par hypothèse, à partir d'un navire spécifique (dragage aspiratrice en marche ou stationnaire). Les opérations ont lieu en continu, et le bruit généré est donc de même nature.

Le modèle de bruit de dragage correspond à la superposition du bruit d'un navire et du bruit d'un engin sous-marin sur le fond. Le gabarit de source sonore à 1m choisi (Figure 107Figure 37) est dérivé de la littérature (Parvin, 2008), (Robinson, 2011).

Un point de simulation est choisi sur la plage de Penly (au sud de l'aire d'étude immédiate) et est considéré comme représentatif des opérations de désensablement de la plage sud de Penly (Figure 108).

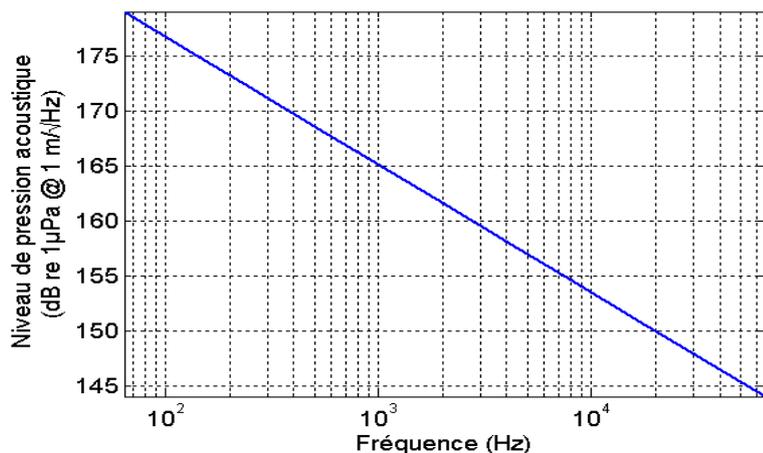


Figure 107 : Gabarit de source sonore (en dB ref.  $1\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 1m) localisée près du fond permettant de modéliser le bruit généré par l'opération de dragage.

## 8.4 Limites géographiques cumulées des empreintes sonores

La Figure 109 compare les empreintes sonores des ateliers cumulés au battage d'un pieu de fondation d'éolienne effectué au centre du parc éolien en mer de Dieppe et du Tréport. Il en ressort que :

- ▶ le bruit du battage des fondations monopieu de 7m de diamètre effectué sur le parc éolien en mer du Calvados engendre une très large empreinte sonore couvrant toute la zone d'étude acoustique et englobe ainsi les bruits induits par l'atelier de battage du projet éolien de Dieppe Le Tréport (Tableau 19) ;
- ▶ quelle que soit l'espèce, le bruit de l'atelier de battage de la fondation jacket domine le bruit induit par l'atelier d'ensouillage (Tableau 20) ;
- ▶ quelle que soit l'espèce, le bruit de l'atelier de battage de la fondation jacket domine le bruit induit par l'atelier de dragage sur la plage de Penly (Tableau 21).

## 8.5 Risques cumulés

Les distances de risque de modification du comportement, de dommage physiologique temporaire ou permanent du projet sont sur des rayons significativement inférieurs aux distances qui séparent le projet des autres projets. Aussi, même lorsque les empreintes sonores se superposent, les distances de risques du projet et des autres projets restent inchangées.

Figure 108 : Emplacements des différents projets en mer en Manche orientale objet de l'étude des effets sonores cumulés.

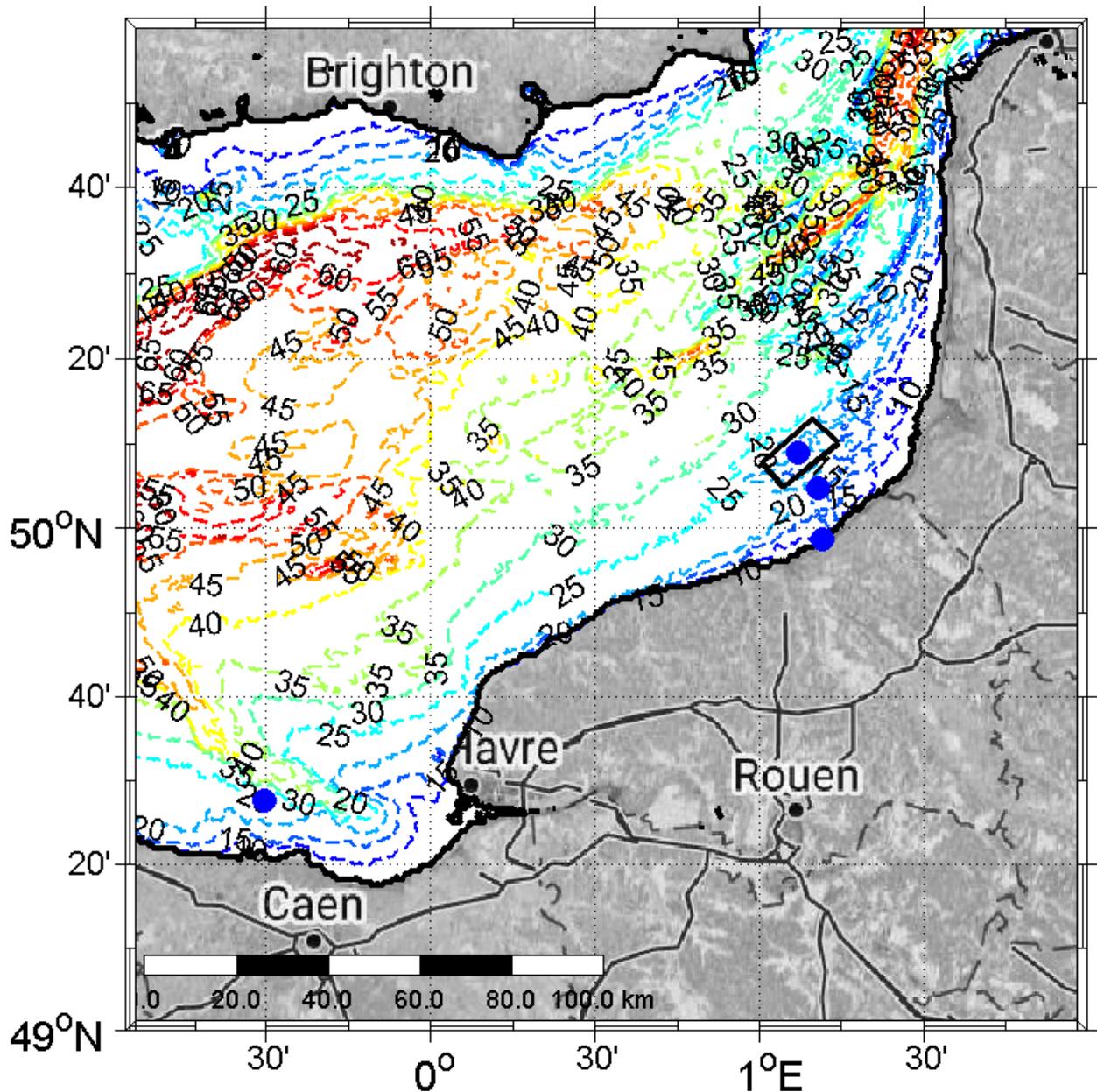


Figure 109 : Empreinte sonore cumulée d'un atelier de battage de pieu de fondation éolienne avec les ateliers des autres projets

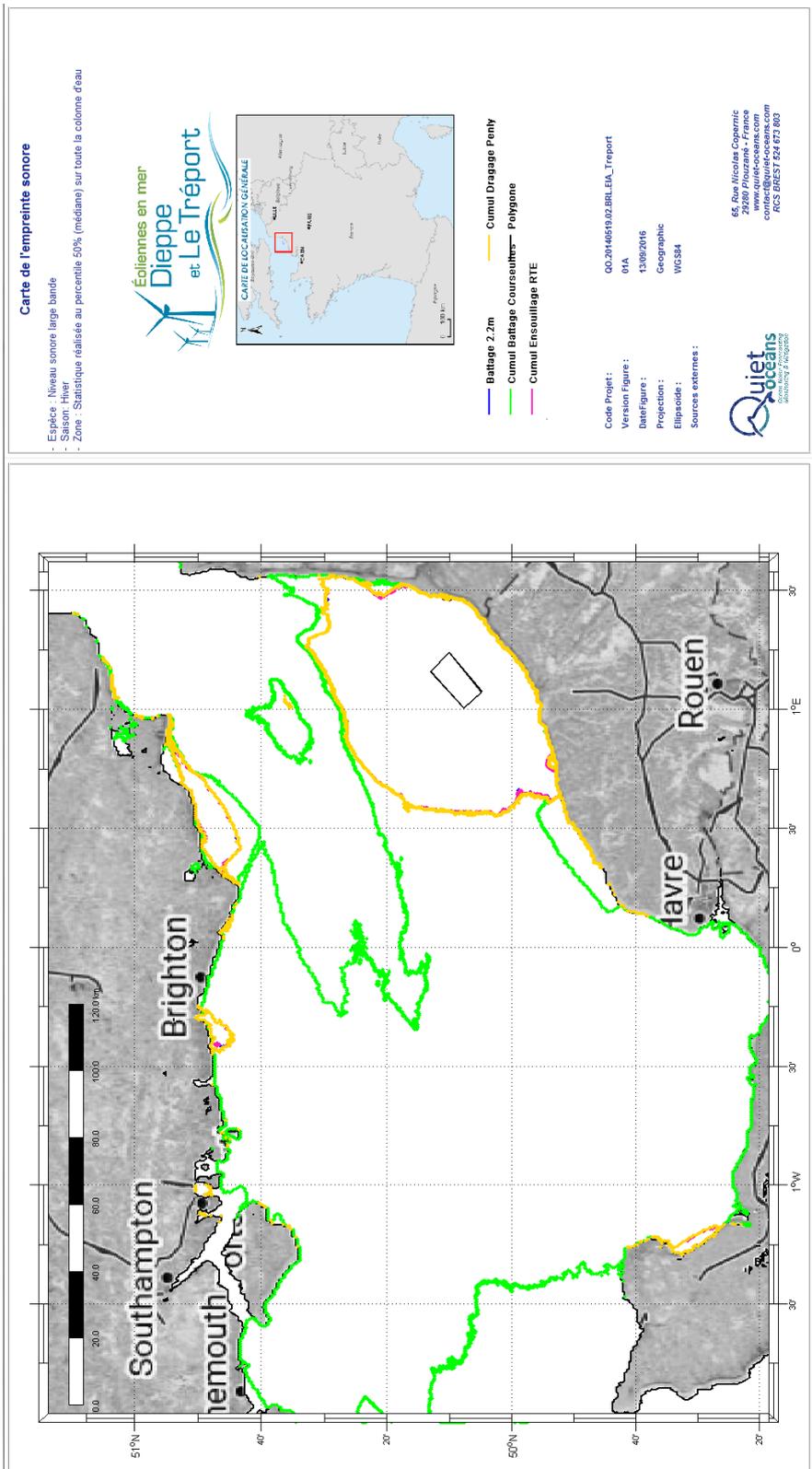


Tableau 19: Synthèse des surfaces d'émergence des bruits cumulés du battage de fondation d'éolienne avec le battage de monopieu au centre du parc du Calvados.

		Niveaux de bruit introduits dans le milieu	Surfaces d'émergence des bruits large bande
Scénario	Typologie	A 1 m dans la bande 50Hz – 67kHz	Km <sup>2</sup>
Battage de Jacket d'éolienne (2.2m) au centre du parc	Source de bruit fixe et continue dont l'énergie émise est majoritairement proche du fond	211 dB réf. 1µPa <sup>2</sup> s @1m	5 684
Battage de Monopieu d'éolienne (7,0m) au centre du parc du Calvados	Source de bruit fixe et continue dont l'énergie émise est majoritairement proche du fond	222 dB réf. 1µPa <sup>2</sup> s @1m	27 440
Cumul des opérations de battage			29 287

Tableau 20: Synthèse des surfaces d'émergence des bruits cumulés du battage de fondation d'éolienne avec l'ensouillage du câble de raccordement.

		Niveaux de bruit introduits dans le milieu	Surfaces d'émergence des bruits large bande
Scénario	Typologie	A 1 m dans la bande 50Hz – 67kHz	Km <sup>2</sup>
Battage de Jacket d'éolienne (2.2m) au centre du parc	Source de bruit fixe et continue dont l'énergie émise est majoritairement proche du fond	211 dB réf. 1µPa <sup>2</sup> s @1m	5 684
Ensouillage du câble de raccordement	Source de bruit lentement mobile et continues dont l'énergie émise est proche de la surface et proche du fond	181 dB réf. 1µPa <sup>2</sup> s @1m	389
Cumul du battage et de l'ensouillage			5 692

Tableau 21: Synthèse des surfaces d'émergence des bruits cumulés du battage de fondation d'éolienne avec le désensablement de la plage au sud de Penly.

		Niveaux de bruit introduits dans le milieu	Surfaces d'émergence des bruits large bande
Scénario	Typologie	A 1 m dans la bande 50Hz-67kHz	Km <sup>2</sup>
Battage de Jacket d'éolienne (2.2m) au centre du parc	Source de bruit fixe et continue dont l'énergie émise est majoritairement proche du fond	211 dB réf. 1µPa <sup>2</sup> s @1m	5 684
Dragage de la plage au Sud de Penly	Source de bruit lentement mobile et continues dont l'énergie émise est proche de la surface et proche du fond	188 dB réf. 1µPa <sup>2</sup> s @1m	1 005
Cumul du battage et du dragage			5 781

## 8.6 Avis d'expertise concernant les effets cumulés des différents chantiers de construction en Manche.

A ce jour, de manière non-exhaustive, différents travaux de construction sont envisagés sur l'ensemble de la Manche :

- ▶ Construction du parc éolien en mer à Dieppe- le Tréport
- ▶ Construction du parc éolien en mer à Courseulles
- ▶ Construction du parc éolien en mer au large de Fécamp
- ▶ Construction du parc éolien en mer au large de Saint-Brieuc
- ▶ Travaux d'ensouillage du câble de raccordement avec les parcs éoliens en mer
- ▶ Travaux de désensablement de la plage au sud de Penly

Il existe une littérature importante sur les effets estimés ou mesurés des impacts acoustiques sur une population de mammifère marin dans le cas de la construction d'un seul parc éolien (Carstensen J. , 2006), (Brandt, 2011) (Carstensen J. T., 2012). Concernant les effets cumulés dans le temps et dans l'espace de constructions de parcs éoliens, une modélisation très récente de l'équipe du SMRU (Cormac Booth, 2017) s'intéresse au cas de dix parcs éoliens en construction à l'est de l'Angleterre sur la démographie d'une population de marsouins communs. A l'aide du modèle prédictif IPCOD (*Interim Population Consequences of Disturbance Framework*), les données de dommage et de dérangement induites par le bruit sont intégrées en tenant compte du planning des différents chantiers en mer dans cette zone. Dans le cas le plus conservateur, après douze années de construction, le modèle prédit entre 1 chance sur 16 et 1 chance sur 333, en fonction des plannings définis par les constructeurs, une décroissance de la population de marsouins communs de 1% à l'échelle de la zone. Ces résultats de simulation préliminaires sont très novateurs mais restent à nuancer car ce modèle est très sensible à la définition des plannings, aux effets potentiels de la perturbation sur la survie et la reproduction du marsouin commun.

Des travaux similaires sont actuellement en cours dans le cadre du projet de recherche RESPECT, en tenant compte des plannings prédictifs des ateliers de battage à Dieppe-Le Tréport, Courseulles et Saint-Brieuc. L'objectif de ce programme de recherche est d'évaluer d'une part l'impact populationnel de la construction du parc éolien de Dieppe-Le Tréport et d'autre part de quantifier la différence induite par la multiplicité des chantiers de battage en Manche. A ce jour, les résultats ne sont pas disponibles.

A l'échelle de la Manche, la multiplication des travaux en mer, simultanés ou non, devraient entraîner une augmentation des surfaces impactées. En conséquence, cette augmentation devrait donc engendrer une fragmentation de l'habitat, une limitation probable des zones de refuge et un accroissement du coût énergétique des mammifères marins pour les activités de chasse et de reproduction.

L'ensemble de ces hypothèses doit être vérifié par des mesures de suivi mutualisées entre les différents chantiers.

# 9 Synthèse de l'étude





Ce chapitre synthétise les résultats de l'étude et de l'analyse des risques sonores du projet. Cette synthèse est organisée en quatre parties :

- ▶ une première partie qui résume la description de l'état initial, nécessaire à l'analyse des effets ;
- ▶ une deuxième partie qui synthétise les modifications du contexte sonore attendues par les activités du projet ;
- ▶ une troisième partie qui synthétise les risques estimés sur les mammifères marins ;
- ▶ et enfin, une quatrième partie qui synthétise les risques sur les poissons, les tortues marines.

## 9.1 Rappel du contexte sonore initial

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. Très schématiquement, à partir d'une année de mesures sur 4 hydrophones disposés dans les aires d'étude immédiate et éloignée d'une part, et la modélisation réalisée, il est possible de distinguer :

- ▶ la part des sons de basses fréquences (de 70 Hz à 1 kHz et en particulier les fréquences inférieures à 200Hz) qui est essentiellement imputable aux sources anthropiques (trafic maritime, pêche professionnelle, ondes acoustiques émises par l'exploration sismique). Les niveaux de bruit permanents dans la bande de fréquence entre 70Hz et 1kHz trouvent leur origine d'une part dans le rail de trafic maritime au nord de l'aire d'étude large et d'autre part dans les activités de pêche en fonction des heures de la journée. La caractérisation de l'état sonore initial a conclu que les bruits anthropiques dans l'aire d'étude immédiate sont principalement induits par ce trafic, auquel se superpose des bruits moins fréquents générés par les passages de navires depuis le port de Dieppe. D'une manière générale, les bruits permanents sont globalement plus faibles vers le sud-est de l'aire d'étude immédiate en raison d'un contexte bathymétrique peu favorable à la propagation des ondes de basses fréquences issues du trafic maritime au nord de cette aire ;
- ▶ les bruits des sondeurs installés à bord des navires, dans la bande de fréquence autour de 40kHz (hautes fréquences). Ces bruits montrent des variations significatives en fonction de l'heure de la journée sur l'enregistreur situé au sud entre l'aire d'étude immédiate et la côte. En ce point, cette augmentation peut atteindre jusqu'à 7 dB 10% du temps. L'analyse temporelle montre que cette intensification se concentre dans des créneaux horaires réguliers entre 20:00 et 00:00 UTC et entre 08 :00 et 12 :00 UTC. Cette élévation peut correspondre aux heures préférentielles d'une activité de pêche sur ces sites. Aux autres emplacements de la mesure, les plages horaires des heures préférentielles sont similaires mais avec une émergence moindre de l'ordre de 1,5 à 2,5 dB ;
- ▶ les sons de moyennes fréquences (200 Hz à 25 kHz) qui sont majoritairement naturels et créés par l'agitation de surface. En effet, il a été démontré que ces bruits sont corrélés aux fluctuations de la hauteur de vagues. Le bruit prédominant dans cette bande de fréquences est donc de nature environnementale généré par les vagues. Sur ce site et principalement au sud de l'aire d'étude immédiate, le courant de marée induit une variation significative de l'ordre de 10dB sur le niveau de bruit permanent. L'augmentation du bruit est majoritairement observée lors des phases montante et descendante. Les courants induits par le marnage induisent probablement un déplacement de sédiment (charriage) fort à proximité de l'hydrophone et ainsi engendre par frottement un bruit supplémentaire. Certains sonars et navires contribuent toutefois en partie aussi à ce bruit ;

- ▮ les sons de hautes fréquences (> 25 kHz) sont essentiellement générés par le déplacement des molécules d'eau et limités à un espace réduit à proximité immédiate de la source. Une partie du spectre sonore généré par les sources anthropiques s'étend aussi dans ce domaine des hautes fréquences.

Les cartes statistiques du bruit initial établies dans cette étude montrent que les bruits permanents sont légèrement plus faibles dans l'axe perpendiculaire à l'axe de circulation du trafic maritime commercial en Manche Orientale. Les niveaux de bruit en été sont légèrement moins élevés (d'environ 1,4 dB) dans l'aire d'étude immédiate, mais la distribution générale du bruit dans cette zone est globalement similaire à la distribution hivernale.

Tableau 22 : Synthèse des niveaux sonores statistiques prédits dans l'aire d'étude immédiate (niveau large bande entre 45Hz et 89kHz)

Niveaux planchers (quantiles > 90%)	Niveaux médians (quantiles entre 75% et 25%)	Niveaux les plus rares (quantiles >10%)
< 104,5 dB réf. 1µPa <sup>2</sup>	105,5 à 112,7 dB réf. 1µPa <sup>2</sup>	> 116,5 dB réf. 1µPa <sup>2</sup>

## 9.2 Synthèse des modifications du contexte sonore

L'effet du bruit sur le milieu physique décrit l'augmentation de la contribution des bruits générés par les activités du projet au chorus sonore existant. Le chorus sonore est composé de trois composantes principales :

- ▮ 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 ;

Ces bruits interagissent les uns avec les autres, se dominent les uns par rapport aux autres en fonction du temps et de l'espace pour former le contexte sonore. L'effet sur le milieu physique correspond à une modification de la répartition de ces trois composantes à la faveur des bruits anthropiques du projet.

La notion d'empreinte sonore est utilisée comme outil à l'analyse, et sa définition est rappelée ici. L'empreinte sonore est définie pour chaque étape du projet et pour chaque atelier mis en œuvre. L'empreinte sonore correspond à la zone géographique pour laquelle le bruit généré par une opération spécifique du projet est au-dessus du niveau de bruit actuel. Elle représente l'émergence du bruit au-dessus du bruit initial, et constitue donc naturellement une comparaison avec les niveaux existants. Un point géographique de la zone est considéré comme faisant partie de l'empreinte sonore si, en ce point, le bruit médian du projet (ou percentile 50%) est supérieur à la médiane saisonnière du bruit actuel.

Aussi, par définition, les limites de l'empreinte sonore sont établies à partir :

- ▮ d'une part de la caractérisation des bruits engendrés par le projet et propagés dans le milieu marin ;
- ▮ et d'autre part, des cartes statistiques du bruit ambiant initial.

## 9.2.1 Bruit en phase de construction et de démantèlement

### 9.2.1.1 Energie sonore introduite dans le milieu marin par la construction

Les scénarios étudiés sont représentatifs des opérations planifiées pour la construction du parc dont les scénarios sont les suivants (Tableau 23) :

- ▶ le battage des pieux de la fondation jacket pour chacune des éoliennes installées, dont le niveau d'exposition sonore large bande émis par l'atelier est estimé à 211 dB réf.  $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$  @1m dans la bande 50Hz-67kHz pour un pieu de 2,2 m de diamètre. Il est estimé à 214 dB réf.  $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$  @1m pour un pieu de 3,0 m pour la fondation de l'OSS. Ces niveaux sont estimés à partir des données disponibles dans la littérature. En effet, les retours d'expérience et les modélisations menées dans le cadre du projet de recherche RESPECT (J. L. Van de Look 2016) ont démontré que le niveau d'exposition sonore dans l'eau croît de manière logarithmique en fonction du diamètre du pieu, ce qui permet d'interpoler avec confiance les mesures effectuées sur des pieux de plus petits diamètres sur les sites de mer Q7, FINO 1, 2 et 3, Alpha Ventus, Utgrunden, Sky 2000, Amrumbank West, Horns Rev II, North Hoyle, et Barrow (Betke, 2008), (De Jong, et al., 2008), (Talisman Energy (UK) Limited, 2004), (Nedwell, et al., 2004) et (ITAP, 2008) ;
- ▶ le forage des pieux de la fondation jacket pour chacune des éoliennes installées, dont le niveau d'exposition sonore large bande émis par l'atelier est estimé à 177 dB réf.  $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$  @1m dans la bande 50Hz-67kHz pour un pieu de 2,2 m de diamètre à partir de la littérature. Il est estimé à 180 dB réf.  $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$  @1m pour un pieu de 3,0m de diamètre de la fondation de l'OSS. Ces niveaux de bruit sont dérivés de mesures réalisées sur des opérations de forage vertical (Beharie & Side, 2011), (Nedwell, 2008), (Nedwell, 2003) et adaptées pour le diamètre de ce scénario. Le bruit généré est distribué sur la colonne d'eau mais le rayonnement se fait principalement proche du fond au contact de la fraise. Le diamètre relativement limité des pieux, inhérent au choix de fondation jackets explique que le niveau émis large bande puisse être relativement limité ;
- ▶ le trafic induit par l'ensemble des travaux par une flotte de 3 navires spécialisés de gros tonnage naviguant et manœuvrant entre l'aire d'étude immédiate et les ports de Dieppe et du Tréport. Le niveau d'exposition sonore large bande émis individuellement est estimé à 190 dB réf.  $1\mu\text{Pa}$  lors de leurs déplacements ou de leurs manœuvres qui souvent mettent en jeu des propulsions d'étrave génératrices de bruit. Cette estimation se base sur les mesures et modèles établis par (Wales and Heitmeyer 2002) et est adapté à partir des informations issues des travaux de la Scripps Oceanographic Institution (Hildebrand 2009).

Il est à noter que les impacts de la phase de démantèlement sont considérés ici bien moins bruyants que ceux de la phase de construction. En effet, les bruits générés par les dispositifs de démantèlement sous-marins sont mal connus à ce jour, la dépose intervenant dans plusieurs dizaines d'années, les équipements disponibles à cette échéance sont encore inconnus. Le scénario envisagé repose sur du cisaillement des structures métalliques. Aucun retour d'expérience sur le bruit de ces opérations n'est disponible à ce jour puisque le démantèlement de parc éolien en mer débute tout juste. Ainsi, il apparaît opportun de prévoir une évaluation de l'impact environnemental des opérations de démantèlement au terme de l'exploitation afin d'envisager les opérations et mesures les plus adéquates.

### 9.2.1.2 Emergence des bruits au-dessus du bruit initial

Les empreintes sonores (ou émergences sonores) en phase travaux ont été estimées par une modélisation physique de la propagation acoustique sous-marine qui prend en compte les conditions océanographiques, bathymétriques, sédimentologiques et météorologiques des aires d'étude immédiate et large. Ces cartes ont été calibrées par une campagne de mesure dite d'acoustique active qui permet de mesurer directement dans l'aire d'étude immédiate les pertes de propagation acoustique. L'émergence dépend par nature des niveaux de bruit existant sur la zone qui jouent dans le cas du projet un rôle important lié aux niveaux relativement important en particulier en centre Manche, siège d'un trafic important de navires de commerce en particulier. Ainsi, les empreintes sont plus étendues selon un axe sud-ouest nord-est.

Les bruits du projet qui émergent du bruit initial médian s'étendent sur une surface plus grande en hiver qu'en été, en raison du réchauffement de la couche de surface en été qui oriente préférentiellement les rayons acoustiques vers le fond. De ce fait les rayons sont plus atténués par le fond et les bruits du projet se propagent moins loin. Cela est d'autant plus vrai lorsque les activités introduisent une forte quantité d'énergie sonore dans le milieu marin qui interagit avec le fond marin sur de grandes distances.

De plus en plus, la distance de 750m sert de référence aux contrôles des niveaux de bruits propagés dans le milieu marin, même si cette distance reste très arbitraire. Cette distance de référence voit son origine dans la réglementation allemande. Aussi, le Tableau 23 compile les estimations des niveaux sonores large bande pour chaque atelier considéré qui correspond à une source de bruit immobile. Les niveaux d'exposition sonore prédits sont compris entre 129,4 et 169,4 dB réf.  $1\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$  à 750m du pieu en fonction des scénarios, ce qui correspond à une dynamique importante. Ces niveaux de bruit intègrent une très large bande de fréquences et ne correspondent pas à un niveau perçu par les espèces marines qui ne sont sensibles qu'à une fraction des fréquences émises. Ils indiquent la quantité totale d'énergie qui se propage dans le milieu marin du point de vue strictement physique.

La géométrie des empreintes sonores large bande est très variable selon les azimuts du fait des conditions de propagation d'une part, de la présence de la côte et fortement du bruit existant, en particulier au centre de la Manche. Aussi, la distance médiane de l'empreinte sonore du bruit induit par le battage des pieux de 2,2m de diamètre pour les fondations jacket des éoliennes est de 20,9 milles nautiques et de 24,7 milles nautiques pour les fondations de l'OSS (Figure 110). Cela correspond à une surface d'influence sur le contexte sonore de 5680 et 8190  $\text{km}^2$  respectivement (Figure 111).

Le forage vertical des pieux de 2,2m de diamètre pour les fondations jacket est de 4,1 milles nautiques, fortement limité par les niveaux de bruit du trafic maritime en centre Manche (Figure 110). Cela correspond à une surface d'influence sur le contexte sonore de 170  $\text{km}^2$ . Dans le cas du forage de la fondation de l'OSS, les limites médianes des empreintes sonores augmentent d'environ 5,8 milles nautiques, correspondant à une surface de 325  $\text{km}^2$  (Figure 111).

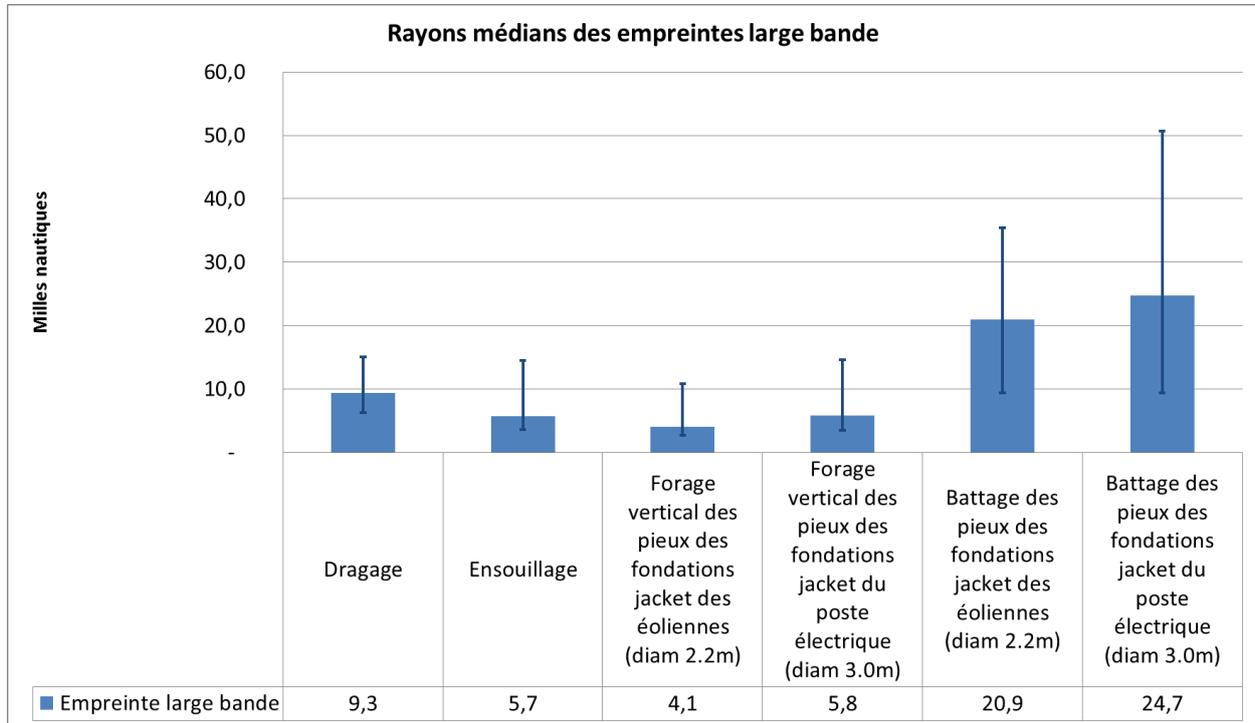
Enfin, les opérations d'ensouillage et de préparation des fonds ont des empreintes large bande de 5,7 et 9,3 milles nautiques respectivement, correspondant à des surfaces de 315 et 965  $\text{km}^2$ .

Tableau 23 : Niveaux de bruit large bande estimés au point source et à une distance de référence de 750m de leur origine.

Scénario	Typologie	Niveaux de bruit introduits dans le milieu A 1m dans la bande 50Hz – 67kHz	Niveaux de bruit large bande prédits à 750m des ateliers			Distances médianes d'émergence des bruits du projet large bande Milles nautiques
			Min	Médiane	Max	
			(dB réf. 1µPa²s)			
Forage de Jacket d'éolienne (pieu de 2.2m de diamètre)	Source de bruit fixe et quasi-continue dont l'énergie émise est majoritairement proche du fond	177 dB réf. 1µPa²s @1m	129.4	129.5	129.7	4,1
Battage de Jacket d'éolienne (pieu de 2.2m de diamètre)	Source de bruit fixe et impulsionnelle dont l'énergie est distribuée sur la colonne d'eau	211 dB réf. 1µPa²s @1m	165.9	166.1	166.3	20,9
Forage de Jacket du poste électrique (pieu de 3.0m de diamètre)	Source de bruit fixe et quasi-continue dont l'énergie émise est majoritairement proche du fond	180 dB réf. 1µPa²s @1m	132.4	132.6	132.8	5,8
Battage de Jacket du poste électrique (pieu de 3.0m de diamètre)	Source de bruit fixe et impulsionnelle dont l'énergie est distribuée sur la colonne d'eau	214 dB réf. 1µPa²s @1m	168.9	169.2	169.4	24,7
Dragage	Source de bruit lentement mobile et quasi-continue dont l'énergie émise est à la fois proche de la surface et proche du fond	188 dB réf. 1µPa²s @1m	140.6	140.9	141.2	9,3
Ensoiillage des câbles	Source de bruit lentement mobile et quasi-continue dont l'énergie émise est à la fois proche de la surface et proche du fond	181 dB réf. 1µPa²s @1m	134.3	134.5	135.0	5,7
Trafic induit par les navires effectuant les travaux et l'assistance constitué de 2 navires du type Jackup-rig et d'une barge offshore de travail	Sources de bruit en manœuvre sur la zone du projet ou mobiles entre la zone du projet et les ports, et situées à quelques mètres de la surface	3 sources mobiles de 190 dB réf. 1µPa @1m	Non applicable car sources mobiles sur de grandes distances.			

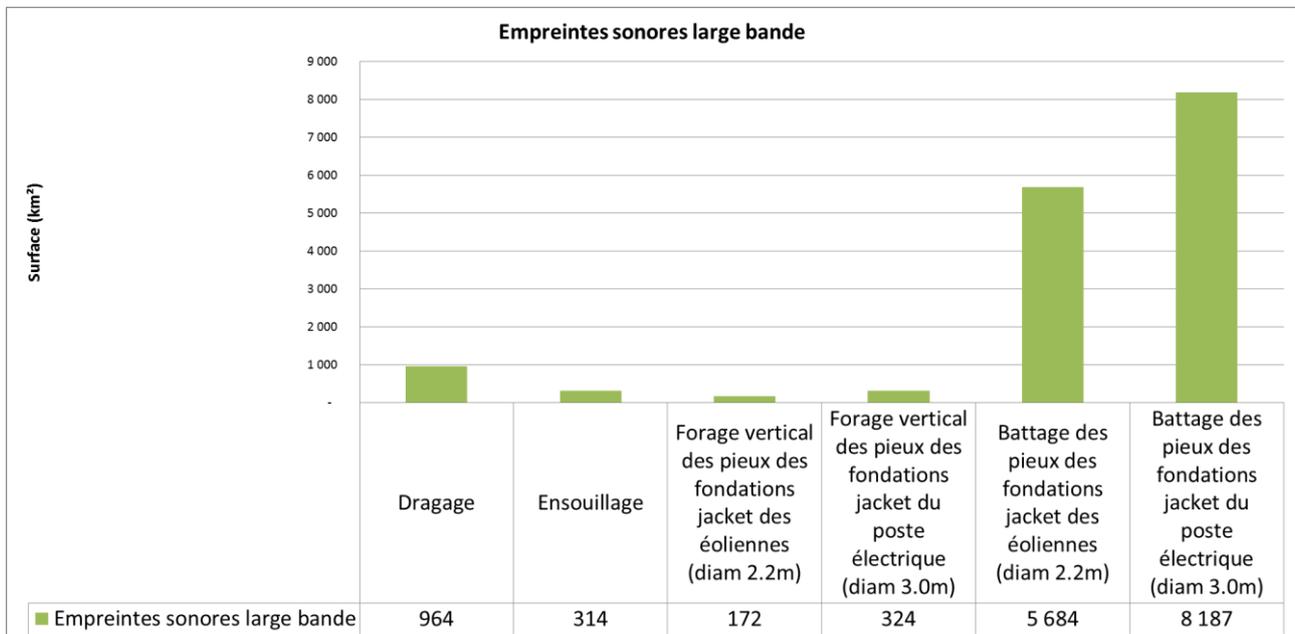
Source : Quiet-Oceans, 2016

Figure 110 : Limites médianes des empreintes sonores « large bande » pour les différents scénarios de construction.



Source : Quiet-Oceans, 2016

Figure 111 : Surfaces d'influence du projet (empreintes sonores large bande) pour les différents scénarios de construction



Source : Quiet-Oceans, 2016

### 9.2.1.3 Effet des bruits des travaux sur le contexte sonore existant

Le chorus sonore est modifié sur les volumes d'eau correspondant aux dimensions des empreintes sonores. La proportion des bruits anthropiques augmente pour dominer les autres composantes naturelles et biologiques pendant le temps effectif d'émission des bruits des opérations de forage, de battage, de dragage et d'ensouillage.

L'empreinte sonore liée au trafic induit par les travaux s'étale naturellement le long de la route de circulation entre le parc et les ports de Dieppe et du Tréport, ports de base principaux. La domination des bruits liés à ce trafic dépend de la fréquence des allers-retours, la vitesse de navigation des navires et du temps passé sur l'aire d'étude immédiate. On peut estimer que la proportion du temps de domination de ces bruits sur le bruit ambiant passe de 10% actuellement à environ 20% dans la zone entre le parc et les ports de base.

## 9.2.2 Bruits en phase d'exploitation et maintenance

### 9.2.2.1 Energie sonore introduite dans le milieu marin par l'exploitation et la maintenance

Les empreintes sonores en phase d'exploitation ont été estimées en suivant la même méthodologie que pour les bruits de travaux. Les scénarios étudiés sont représentatifs de l'exploitation du parc dont les caractéristiques sont les suivantes :

- ▮ le fonctionnement simultané des 62 éoliennes sous l'effet du vent, dont le niveau d'exposition sonore large bande émis par chaque fondation est estimé entre 145 et 149 dB réf.  $1\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$  @1m dans la bande de 50Hz à 67kHz pour une puissance unitaire de 8MW, des vents compris entre 4 et 12 m/s et une fondation jacket. Ces estimations sont dérivées de mesures réalisées sur le site de Horns Rev II en mer du Nord (Betke K. , 2006) et transposées à une fondation jacket. Le bruit lié au fonctionnement des éoliennes est transmis dans la colonne d'eau depuis la nacelle au travers du mat par la partie immergée de la fondation. Ce bruit est composé de raies spectrales qui s'expliquent par l'existence de modes de propagation sur les fondations. En d'autres termes, certaines fréquences ou bandes de fréquences rayonnent de façon plus favorable en fonction du design de la fondation. Le design de ce type de fondation devrait réduire le bruit rayonné dans le milieu marin par rapport à une fondation monopieu ;
- ▮ la maintenance du parc éolien par une flotte de navires spécialisés dont le niveau d'exposition sonore large bande émis individuellement est estimé à 190 dB réf.  $1\mu\text{Pa}$  car en transit rapide vers le parc ou vers les ports d'attache. En effet, afin d'acheminer les personnels, outils et les matériaux sur le parc éolien pour les opérations de maintenance, des navires spécifiques circuleront dans ou à proximité de la zone de construction et à partir des ports de Dieppe et du Tréport. En moyenne, sur la durée totale de la vie du parc, entre 1 et 3 navires seront simultanément en activité dans le parc éolien et dans le couloir de circulation des ports de base/parc éolien simultanément, avec une fréquence de rotation moyenne de 1 à 2 allers-retours par jour.

Tableau 24 : Niveaux de bruit large bande estimés au point source et à une distance de référence de 750m de leur origine.

Scénario	Typologie	Niveaux de bruit introduits dans le milieu A 1m dans la bande 50Hz – 67kHz	Niveaux de bruit large bande prédits à 750m des ateliers			Distances médianes d'émergence des bruits du projet large bande
			Min	Médiane	Max	
			(dB réf. 1µPa²s)			Milles nautiques
Fonctionnement des éoliennes	62 sources de bruit simultanées correspondant à la rotation des éoliennes	145 à 149 dB réf. 1µPa².s @1m	113,0	114,7	116,6	0,16 à 1,9
Trafic induit par les navires effectuant la maintenance courante	Sources de bruit en manœuvre sur l'aire d'étude immédiate ou mobiles entre l'aire d'étude immédiate et Dieppe et Le Tréport, et situées à quelques mètres de la surface	2 sources mobiles de 190 dB réf. 1µPa @1m	Non applicable car sources mobiles sur de grandes distances.			

### 9.2.2.2 Emergence des bruits de fonctionnement et de maintenance au-dessus du bruit initial

La géométrie des empreintes sonores large bandes englobent à la fois l'empreinte physique du parc en la débordant de 0,16 à 1,9 milles nautiques pour l'exploitation des éoliennes en fonction du vent et du bruit ambiant. Autrement dit, le bruit des éoliennes en fonctionnement domine le bruit ambiant existant dans l'ensemble du périmètre du parc et s'étale au plus jusque 1,9 milles nautiques au droit des éoliennes périphériques. Ces résultats issus de modélisations sont en accord avec des mesures réalisés sur plusieurs parc au Danemark et en Suède (Tougaard et al. 2009) qui rendent compte de niveaux compris entre 109-127 dB réf. 1µPa².s à des distances de 14 à 20m des fondations et qui estime (sans modèle) des distances d'empreinte de l'ordre de quelques kilomètres, pour des puissances unitaires de turbine comprises entre 450kW et 2 MW mais pour des fondations monopieu. Dans le même ordre de grandeur, des niveaux de 122 à 147 dB réf. 1µPa ont été mesurés à des distances entre 15 et 275m d'une fondation monopieu dans le parc de Scorby Sands en Angleterre (Nedwell et al., 2007).

L'empreinte sonore liée au trafic de maintenance s'étale naturellement le long de la route de circulation entre le parc et les ports de Dieppe et du Tréport, port de base principal, de la même manière que pour le trafic induit par les travaux.

## 9.3 Synthèse des risques sur les mammifères marins, les poissons et les tortues marines

Les poissons, larves, œufs et les tortues marines ne sont sensibles qu'à une portion de l'ensemble des fréquences émises par les activités du projet. On parle de niveau de bruit perçu. Ne représentant qu'une portion, le niveau de bruit perçu est moins important que le bruit large bande décrit dans le paragraphe suivant. Le bruit perçu dépend de la physiologie des espèces.

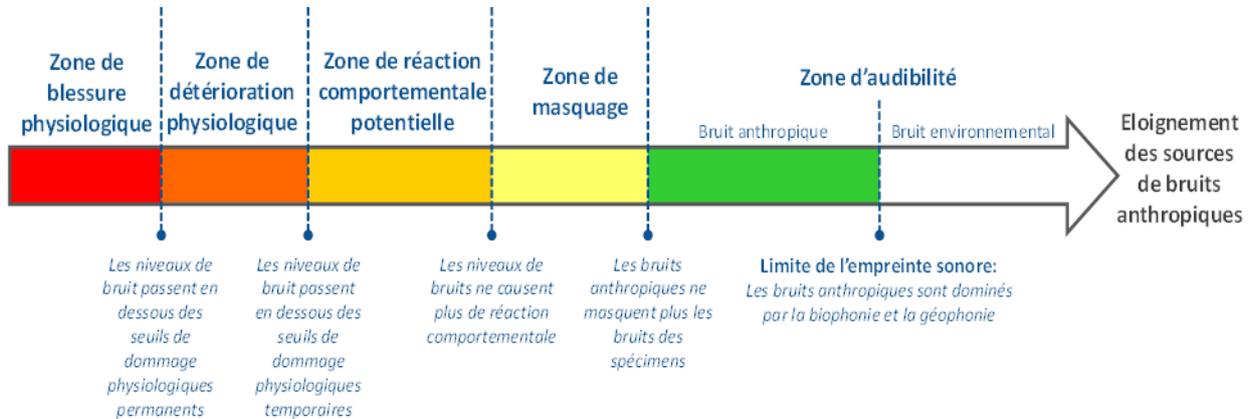
Les risques potentiels sont d'autant plus importants que les individus se trouvent à proximité d'une ou plusieurs sources de bruit et sont exposés à un bruit intense. Une hiérarchisation des risques sur un axe de niveau de bruit décroissant a été établie (Andersson, et al. 2015) à partir de la littérature et des capacités scientifiques et techniques actuelles à quantifier les distances de risques (Figure 112). Au fur et à mesure que les niveaux de bruit se réduisent, les zones de risques changent de natures. Le passage d'une zone de risque à l'autre correspond au franchissement d'un seuil biologique fournit, le cas échéant, par la recherche et par la littérature (Dooling & Blumenrath, 2013), bien que ces seuils de tolérances et d'effet du bruit qui ne sont pas nécessairement connus pour toutes les espèces :

- ▶ une zone de blessure physiologique qui correspond à une zone dans laquelle les niveaux de bruit dépassent les seuils de dommages physiologiques permanents (en anglais PTS - Permanent Threshold Shift), provoquant des lésions irréversibles ;
- ▶ une zone de détérioration physiologique qui correspond à une zone dans laquelle les niveaux de bruit sont susceptibles de provoquer des dommages physiologiques temporaires (en anglais TTS - Temporary Threshold Shift) provoquant des lésions réversibles. Les cellules constitutives du système auditif retrouvent leur état initial après un certain temps hors d'une exposition importante au bruit ;
- ▶ une zone de réaction comportementale qui correspond à une zone dans laquelle les niveaux de bruit sont susceptibles de provoquer une gêne suffisante pour que les individus interrompent leur activité normale pour fuir la zone. Les conséquences ne sont pas directes, mais peuvent provoquer une augmentation de la consommation d'énergie individuelle, d'autant plus critique que l'individu est jeune, une interruption dans leurs activités de chasse ou de socialisation, un changement forcé d'habitat. In fine, les impacts peuvent se faire ressentir à l'échelle des individus et de la population ;
- ▶ une zone de masquage qui correspond à une zone dans laquelle les sons émis et reçus par les spécimens, utiles dans leurs activités de chasse, de socialisation ou d'évitement des prédateurs, sont couverts par les bruits anthropiques. Ce type d'effet est pertinent pour les bruits continus. Dans cette zone, le rayon d'interaction des spécimens est réduit, ce qui conduit à des impacts potentiels à l'échelle des individus et de la population ;
- ▶ une zone d'audibilité, zone sans risque particulier pour les espèces, qui correspond à une zone dans laquelle les bruits anthropiques, biologiques et naturels sont perçus par les individus, sans pour autant causer d'effet particulier connu. Cette zone se décompose d'une part la dominance des sources anthropiques et d'autre part des bruits issus d'autres sources sonores d'origine environnementale. La limite entre les deux est précisément la limite de l'empreinte sonore.

Les seuils pour les mammifères marins, repris et amendés par des études scientifiques récentes menées en 2013 par l'administration américaine (NOAA), sont synthétisés dans le Tableau 4.

Ils ne sont pas applicables pour une exposition prolongée aux bruits. Les seuils pour les poissons et les tortues marines sont récents (Popper, 2015). Au contraire des mammifères marins, les seuils pour les poissons sont valables pour une exposition prolongée aux bruits. Les seuils pour les invertébrés ne sont pas connus à ce jour.

Figure 112 : Graduation des risques biologiques en fonction de l'éloignement à la ou les sources de bruit anthropique



Source : Quiet Oceans, 2016

Tableau 25: Synthèse des seuils de perturbation sonore pour les mammifères marins et poissons susceptibles d'être présents dans l'aire d'étude large.

Types d'espèces	Gamme de Fréquences de perception	Bruits impulsifs Exprimés en Niveau d'Exposition Sonore Unité dB réf. 1µPa²s			Bruits continus Exprimés en Niveau de Pression Sonore Unité dB réf. 1µPa		
		Seuil de réaction	Seuil de dommage temporaire	Seuil de dommage permanent	Seuil de réaction	Seuil de dommage temporaire	Seuil de dommage permanent
Marsouin Commun	200Hz-180kHz	145	164	179	NC	224	230
Cétacés Hautes Fréquences	200Hz-180kHz	120	183	198	NC	224	230
Cétacés Moyennes Fréquences	150Hz-160kHz	120	183	198	NC	224	230
Cétacés Basses Fréquences	7Hz-22kHz	120	183	198	NC	224	230
Pinnipèdes dans l'eau	75Hz-75kHz	120	171	186	NC	212	218
Tortues marines	< 0.9kHz	166	175	210	NC	NC	NC
Poissons sans vessie natatoire	< 1kHz	NC	186	219	NC	NC	NC
Poissons ayant une vessie natatoire sans cils sensitifs	< 4kHz	140	186	207	NC	158	NC
Poissons ayant une vessie natatoire avec cils sensitifs	< 1kHz	NC	186	210	NC	NC	NC
Œufs et larves de poissons	< 1kHz	NC	NC	210	NC	NC	NC
Invertébrés	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC

Source : Southall, et al., 2007, Popper, et al., 2014

NC : non connu à ce jour

### 9.3.1 Synthèse des risques sur les mammifères marins

Les cétacés sont un groupe taxonomique particulièrement dépendant de l'acoustique puisqu'ils utilisent le son dans tous les aspects de leur vie : lors de la reproduction, pour chasser, s'alimenter, éviter les prédateurs, communiquer ou s'orienter. En milieu marin, la vue n'est utile que jusqu'à quelques dizaines de mètres alors que le son peut se propager sur des centaines voire milliers de kilomètres (Weilgart, 2007). Les mysticètes comme la baleine bleue peuvent ainsi communiquer entre eux alors que les individus sont séparés de plusieurs centaines de kilomètres (Tyack, 2008).

#### 9.3.1.1 Perception des bruits du projet par les mammifères marins

Les cétacés et les pinnipèdes peuvent être répertoriés en 4 classes en fonction de leur sensibilité auditive et de différents paramètres liés à la qualité de l'écoute (milieu de propagation, morphologie, ...). Chaque espèce d'une même classe présente :

- ▶ une gamme de fréquence d'audition et de sensibilité similaire ;
- ▶ des seuils de dommages temporaires et permanents identiques ;

Les quatre classes de mammifères marins ont été déterminées par la communauté scientifique internationale (Southall et al., 2007) :

- ▶ Cétacés hautes fréquences ;
- ▶ Cétacés moyennes fréquences ;
- ▶ Cétacés basses fréquences ;
- ▶ Pinnipèdes.

##### 9.3.1.1.1 En phase travaux

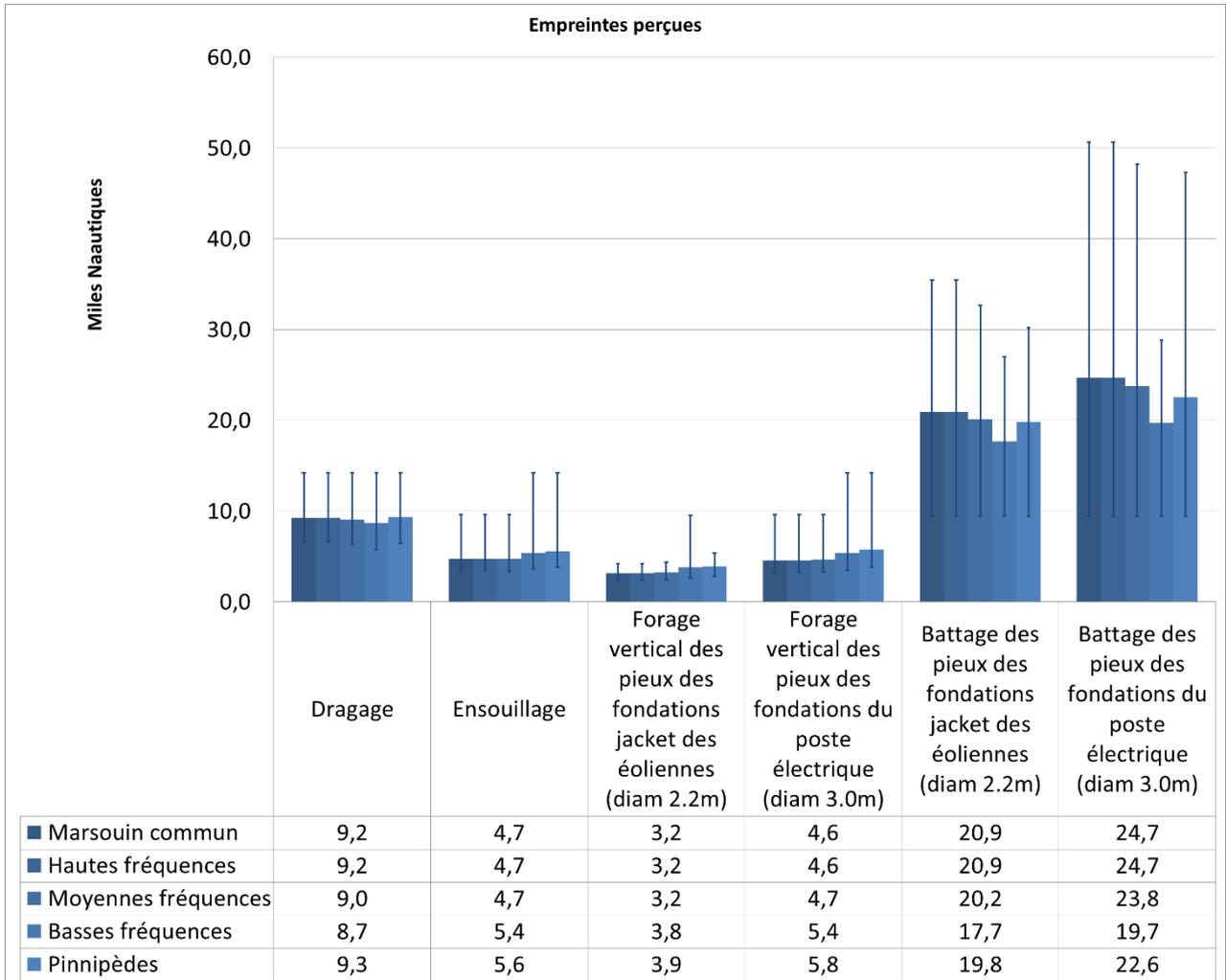
Les empreintes sonores relatives à l'audibilité (ou la perception) des bruits du projet présentent relativement peu de variabilité entre les saisons. Les résultats des modélisations sont synthétisés dans la Figure 113 pour les différents groupes de cétacés et les différents ateliers de travaux durant la saison hivernale. La perception des bruits du chantier est d'autant meilleure que les espèces sont sensibles aux basses fréquences. Cela est lié au fait que les bruits des travaux sont particulièrement énergétiques dans les basses fréquences.

Le bruit induit par le battage des fondations des éoliennes engendre les zones de perception les plus étendues jusqu'à une distance de 17,7 à 20,2 milles nautiques en fonction des gammes d'audition. Dans le cas d'un forage vertical des fondations des éoliennes, les distances de perception sont significativement plus restreintes de 3,2 à 3,9 milles nautiques en fonction des espèces. Le dragage et l'ensouillage des câbles entraînent des distances de perception respectivement jusqu'à 9 et 5 milles nautiques.

Les géométries des zones de perception sont très variables en fonction de l'azimut, de la bathymétrie, de la nature des sédiments, de la géomorphologie, et en grande partie du bruit ambiant existant, avec un étalement privilégié dans l'axe sud-ouest / nord-ouest. Dans le couloir de circulation du trafic commercial en Manche, les bruits des navires masquent les bruits du projet. A proximité des côtes anglaises (Hastings, Eastbourne, Brighton), des résurgences sont susceptibles d'être perçus lors des phases de battage.

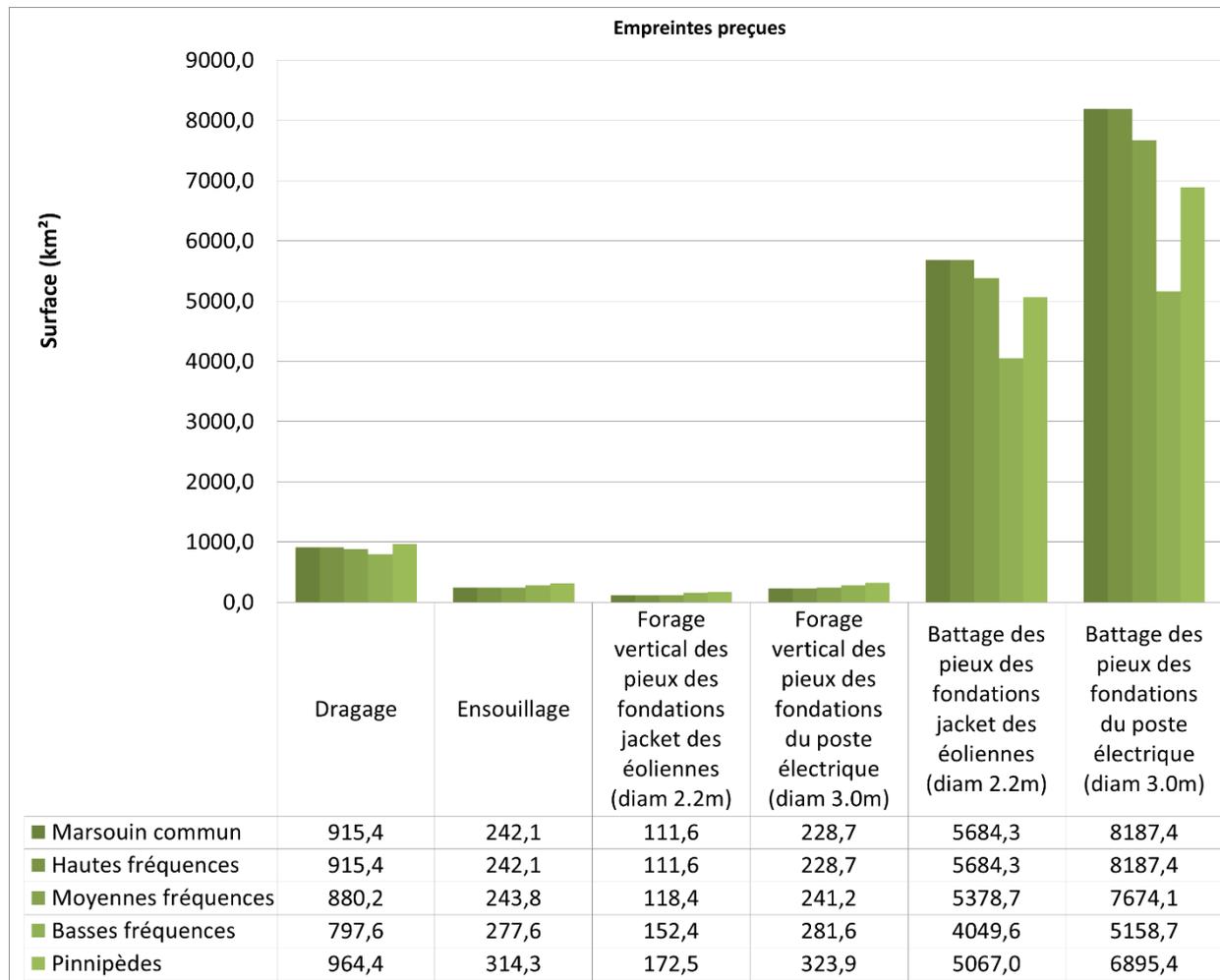
L'empreinte sonore perçue liée au trafic induit s'étale naturellement le long de la route de circulation entre le parc et Dieppe ou Le Tréport, ports de base principaux.

Figure 113: Limites de perception des bruits des ateliers de construction par les cétacés et les phoques en hiver



Source: Quiet-Oceans 2016

Figure 114: Surfaces de perception des bruits des ateliers de construction par les cétacés et les phoques en hiver



Source: Quiet-Oceans 2016

### 9.3.1.1.2 En phase d'exploitation

En phase d'exploitation, la perception des bruits est limitée à l'empreinte physique du parc augmentée de 1,2 à 1,7 milles nautiques en fonction des espèces, des conditions de vent et de bruit ambiant. Autrement dit, le bruit des éoliennes en fonctionnement domine le bruit ambiant existant dans l'ensemble du périmètre du parc et s'étale au plus jusque 1,7 milles nautiques au droit des éoliennes périphériques. Ces résultats issus de modélisations sont en accord avec des mesures réalisés sur plusieurs parc au Danemark et en Suède (Tougaard et al. 2009) qui rendent compte de niveaux compris entre 109-127 dB réf.  $1\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$  à des distances de 14 à 20m des fondations et qui estime (sans modèle) des distances d'empreinte de l'ordre de quelques kilomètres, mais pour des puissances unitaires de turbine comprises entre 450kW et 2 MW et pour des fondations monopieu. Des niveaux de 122 à 147 dB réf.  $1\mu\text{Pa}$  mesurés à des distances entre 15 et 275m d'une fondation monopieu (Nedwell et al., 2007). Ces résultats sont aussi en accord avec (Kikuchi et al., 2010) qui a estimé que les bruits d'exploitation devrait pouvoir être détectable à des distances comprises entre 1 et 4km selon les espèces.

L'empreinte sonore perçue liée au trafic de maintenance s'étale naturellement le long de la route de circulation entre le parc et les ports de Dieppe et du Tréport, ports de base principaux.

### 9.3.1.2 Effet des bruits perçus sur les cétacés et les phoques

#### 9.3.1.2.1 En phase travaux

La description des effets est présentée par ordre décroissant d'effet pour tous les différents groupes de mammifères marins. Elle débute par les effets physiologiques permanents (irréversibles) pour finir par les effets de masquage.

L'atteinte des seuils de dommages physiologiques permanents, et donc irréversibles, devrait affecter certaines espèces dont le marsouin commun jusqu'à la distance 0,024 mille nautique lors du battage des fondations des éoliennes ou de l'OSS avec des variations possibles relatives aux incertitudes et aux différents diamètres. Dans le cas des pinnipèdes, la distance de risque est de 0,007 mille nautique autour de cet atelier de battage, valeur théorique peu significative comparée aux dimensions de la source de bruit. Pour les autres espèces, la distance de risque est estimée à 2m au maximum indiquant que le niveau de bruit émis est à la limite du seuil. Pour les autres ateliers de construction, le risque de dommages physiologiques permanents est très faible.

L'atteinte des seuils de dommages physiologiques temporaires (donc réversibles) devrait affecter toutes espèces lors des phases de battage et seulement le Marsouin Commun et les pinnipèdes pour les autres ateliers de construction. La distance maximale est de 0,2 mille nautique lors du battage de la fondation de l'OSS dans le cas du Marsouin Commun ; cette distance est réduite à 0,15 mille nautique lors du battage de la fondation des éoliennes. Pour les pinnipèdes et cet atelier de construction, ces distances de risque sont réduites de 20%. La phase de dragage devrait entraîner un risque pour le Marsouin Commun jusqu'à la distance de 0,01 mille nautique. Pour les autres espèces et les autres ateliers associés, la distance de risque est estimée de façon théorique à 2m au maximum, ce qui est peu réaliste en pratique étant donné les dimensions physique de la source de bruit.

En l'état actuel des connaissances, seul le seuil de dérangement ou de gêne comportementale du Marsouin Commun est connu. Cette zone s'étend dans un rayon maximal de 1,8 à 2,54 milles nautiques autour des ateliers de battage de pieux des éoliennes et de l'OSS. Le forage vertical et le dragage entraînent une distance maximale de risque respectivement jusqu'à 0,07 et 0,18 mille nautique du centre de l'atelier.

Les seuils de dérangement pour les autres cétacés et pinnipèdes n'étant pas connus pour des bruits de nature continue d'une part, et ces autres espèces pouvant être moins sensibles à la lumière des seuils connus pour les bruits impulsifs d'autre part, par mesure de précaution, la zone de risque de dérangement des marsouins est applicable aux autres cétacés et aux pinnipèdes. Cela est à confirmer par un programme de suivi adapté.

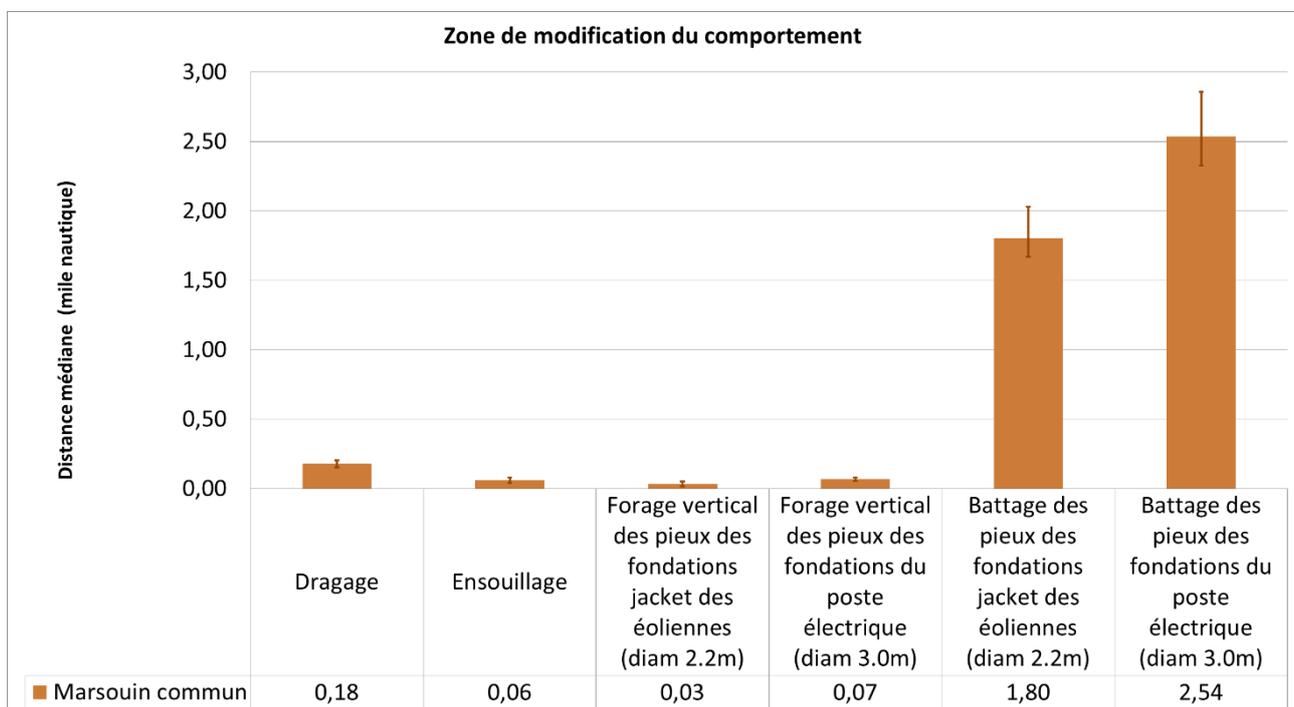
Dans le cas d'un atelier de forage, les emprises de risque de blessure et de modification du comportement en phase travaux peuvent paraître relativement faibles comparés aux parcs déjà existant ou en projet, en France ou à l'étranger. En effet, à ce jour, une écrasante majorité des modes opératoires des parcs éoliens en mer sont mis en œuvre par des opérations de battage de monopieu ou, dans une moindre mesure, de jacket, pour lesquelles les énergies introduites sont significativement plus importantes que pour le forage. La prise en compte des retours d'expérience reste donc délicate de ce point de vue. Il est donc essentiel de mettre en œuvre un programme de suivi adapté permettant de documenter ces effets.

En principe, les effets induits par le trafic maritime nécessaire à la construction du parc sont moins marquée car (1) les sources sont mobiles réduisant très significativement la durée d'exposition à risque à quelques dizaines de secondes, (2) la source de bruit est localisée à proximité de la surface ce qui est très défavorable à sa propagation (de fortes pertes sont induites par la présence de la surface du milieu marin).

Au final, le principal risque devrait résider dans des effets de masquage qui peuvent se produire au sein des zones de perception et réduire la capacité temporaire des individus à communiquer entre eux, et contribuer à créer une réduction du préavis dans la détection des prédateurs ou des difficultés accrues pour détecter les proies.

Une comparaison des suivis réalisées sur les parcs éoliens en mer de Nysted, Horn Rev I et II et Egmond aan Zee a toutefois montré qu'une durée allongée des travaux avec empreintes sonores plus réduites, telles que celles induites par l'atelier de forage, pouvait avoir engendrer un effet négatif plus important sur la désertion du site pendant les travaux et sur le temps de latence du retour des Marsouins Communs après la construction, même si l'énergie en jeu est plus faible.

Figure 115 : Zones de risques de modification du comportement lié aux bruits des ateliers de construction pour les marsouins communs en hiver



### 9.3.1.2.2 En phase d'exploitation

La géométrie des empreintes sonores perçues par les poissons englobent à la fois l'empreinte physique du parc en la débordant au plus de 1,2 à 1,7 milles nautiques lors de l'exploitation des éoliennes en fonction des gammes d'audibilité des mammifères marins. Autrement dit, le bruit des éoliennes en fonctionnement domine le bruit ambiant existant dans l'ensemble du périmètre du parc et s'étale au plus jusque 1,2 à 1,7 milles nautiques au droit des éoliennes périphériques. Ces résultats issus de modélisations sont en accord avec des mesures réalisés sur plusieurs parc au Danemark et en Suède (Tougaard et al. 2009) qui rendent compte de niveaux compris entre 109-127 dB réf.  $1\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$  à des distances de 14 à 20m des fondations et qui estime (sans modèle) des distances d'empreinte de l'ordre de quelques kilomètres, mais pour des puissances unitaires de turbine comprises entre 450kW et 2 MW et pour des fondations monopieu. Des niveaux de 122 à 147 dB réf.  $1\mu\text{Pa}$  mesurés à des distances entre 15 et 275m d'une fondation monopieu (Nedwell et al., 2007). Ces résultats sont aussi en accord avec (Kikuchi et al., 2010) qui a estimé que les bruits d'exploitation devrait pouvoir être détectable à des distances comprises entre 1 et 4km selon les espèces.

L'empreinte sonore perçue par les mammifères marins liée au trafic de maintenance s'étale naturellement le long de la route de circulation entre le parc et les ports de Dieppe et du Tréport, ports de base principaux.

### 9.3.2 Synthèse des risques sur les poissons

Par comparaison aux connaissances accumulées par la recherche sur les effets du bruit sur les mammifères marins, la connaissance sur les effets du bruit sur les poissons est à un stade d'émergence (Popper & Hastings, 2009) (Slabbekorn et al., 2010). Toutefois, il est reconnu que les poissons marins présentent une graduation de sensibilité comparable à celle des mammifères marins, même si les principes de l'audition diffèrent quelque peu entre ces deux groupes. Ces différences influencent la façon dont les évaluations d'impact du bruit doivent être effectuées. Autant les effets relatifs à un traumatisme physique et au comportement ont été étudiés en détail, autant il n'y a presque pas de données disponibles pour les effets du bruit ambiant sur le comportement des poissons.

La plupart des études portant sur la perte d'audition chez les poissons ont été réalisées en laboratoire en utilisant différents types de sons et des durées d'exposition variables. Il n'y a que peu d'études cherchant à évaluer les effets du bruit sur le terrain impliquant des sources sonores anthropiques réelles. Une étude terrain de la perte auditive chez quatre espèces de poissons de récifs coralliens au cours d'une exploration sismique n'a mis en évidence aucune perte d'audition jusqu'à une exposition sonore de 193 dB réf. 1µPa (Hastings et al., 2008).

Pour les espèces possédant une vessie natatoire, les oscillations du gaz induites par les ondes acoustiques de forte amplitude peuvent causer, à l'extrême, jusqu'à la déchirure de la vessie natatoire (Popper & Hastings, 2009). Les sonars de basses fréquences peuvent endommager la vessie natatoire ou les tissus adjacents lorsque la fréquence émise correspond à la fréquence de résonance du poisson ou des céphalopodes. Les fréquences de résonance de la plupart des poissons sont comprises entre 100 et 500 Hz (OSPAR Commission, 2009). Tous les bruits des opérations de construction introduisent du bruit dans cette bande de fréquences. Les hauteurs d'eau dans le parc et au voisinage du parc sont telles que ces fréquences sont susceptibles de se propager sur de grandes distances, et d'autant plus vers le large. De même que pour les vessies natatoires, les cellules ciliées que possèdent certaines espèces participent à la perception des bruits et peuvent être endommagées. Ces impacts doivent également être nuancés par la capacité à fuir des poissons ou des céphalopodes face à une gêne ou une perturbation. Les individus à grande mobilité (pélagiques ou démersaux) et de plus grande taille pourront fuir plus aisément que les autres.

#### 9.3.2.1 Perception des bruits par les poissons

La quantification des risques de dommage physiologique directs temporaires (réversibles) ou permanents (irréversibles) et des risques de modification du comportement est réalisée à partir du guide méthodologique sur l'exposition sonore des poissons publié par la Société Américaine d'Acoustique (Popper et al. 2015) issu d'un consensus international. Ils sont valables sur les poissons pour une exposition prolongée aux bruits alors que les seuils pour les invertébrés ne sont pas connus à ce jour.

Les poissons perçoivent les sons sous-marins de différentes manières, nous amenant ainsi à utiliser la classification suivante (Popper, et al., 2015) :

- ▮ les espèces n'ayant pas vessie natatoire, sensibles au déplacement des particules telles que les requins et les poissons plats, par exemple, la Seiche ou la Limande ;

- ▮ les espèces ayant une vessie natatoire, sensibles au déplacement des particules et potentiellement à la pression acoustique telles que le Rouget Barbet ;
- ▮ les espèces ayant une vessie natatoire et des cils sensitifs permettant de percevoir leur environnement, sensibles au déplacement des particules et à la pression acoustique ;

Les poissons possédant une vessie natatoire sont plus sensibles aux ondes de pression car cette dernière risque d'être endommagée par une exposition sonore. Les poissons possédant des cils sensitifs sont sensibles aux mouvements de l'eau (ou vitesses des particules).

Les espèces présentent des différences de perception de fréquence (hautes fréquences) en fonction de leur physiologie (espèce avec ou sans vessie natatoire, espèce avec ou sans cellules ciliées).

#### 9.3.2.1.1 En phase de travaux

Les modélisations<sup>12</sup> menées sur les scénarios en phase de construction montrent peu de différence d'effet entre ces catégories de poissons. Ceci peut s'expliquer par la nature des activités du projet pour lesquelles l'essentiel de l'énergie propagée est contenu dans les basses fréquences.

Les zones de perception du bruit (Figure 116) ont été estimées par modélisation. La variabilité des distances et des surfaces est essentiellement due aux différents ateliers susceptibles d'être mis en œuvre. L'atelier de battage entraîne l'empreinte sonore la plus étendue entre 17,5 et 19,7 milles nautiques. L'atelier de forage entraîne une empreinte jusqu'à une distance entre 3,8 et 5,8 milles nautiques, significativement moindre que l'atelier de battage (facteur de réduction de 5 en distance et 24 en surface).

La géométrie de perception est très variable en raison de la bathymétrie, nature des sédiments, géomorphologie et en grande partie du bruit ambiant existant.

L'empreinte sonore perçue liée au trafic induit par les travaux s'étale naturellement le long de la route de circulation entre le parc et Dieppe et/ou Le Tréport, ports de base principaux.

---

<sup>12</sup> Les modélisations sont limitées à la pression acoustique et ne considèrent pas la vitesse des particules.

Figure 116: Limite des empreintes sonores perçues par les poissons

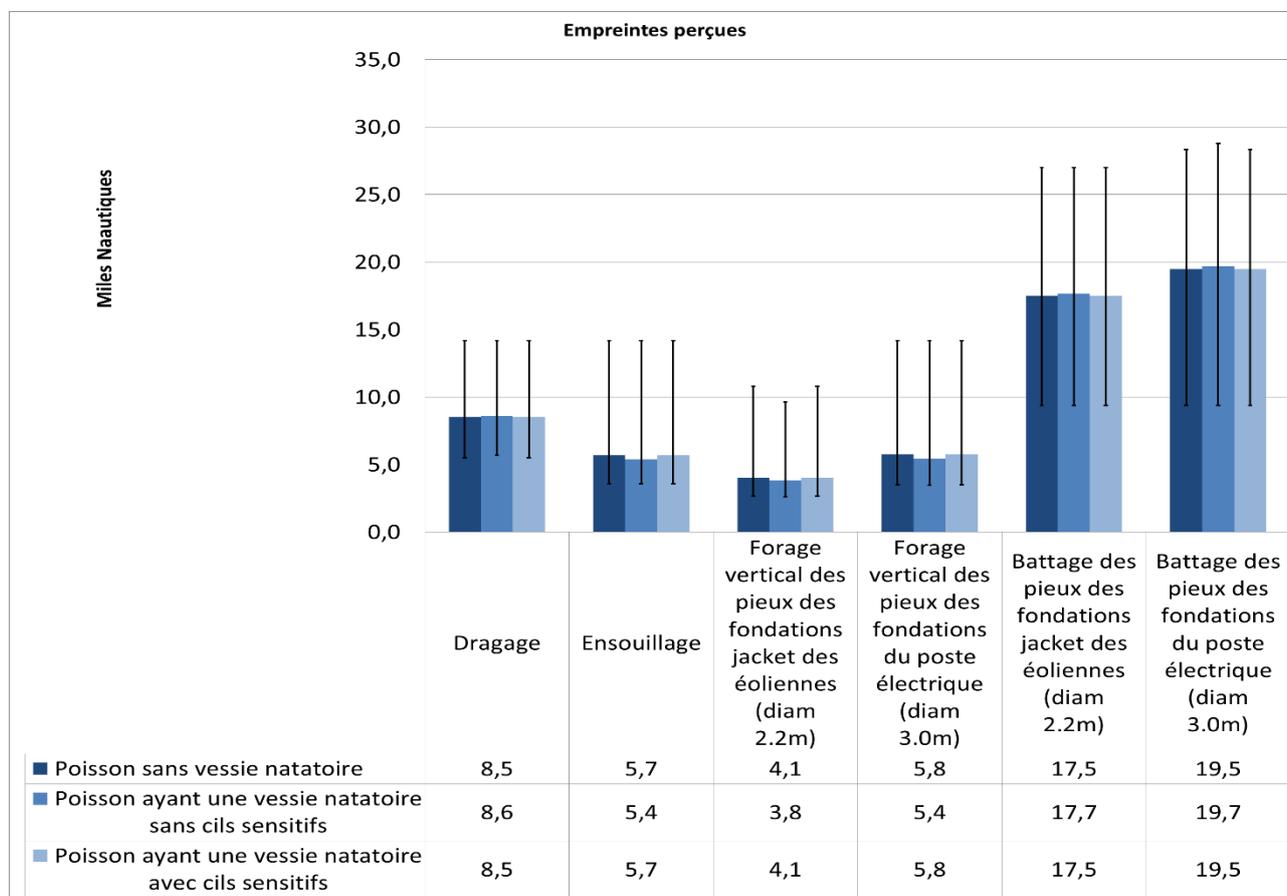
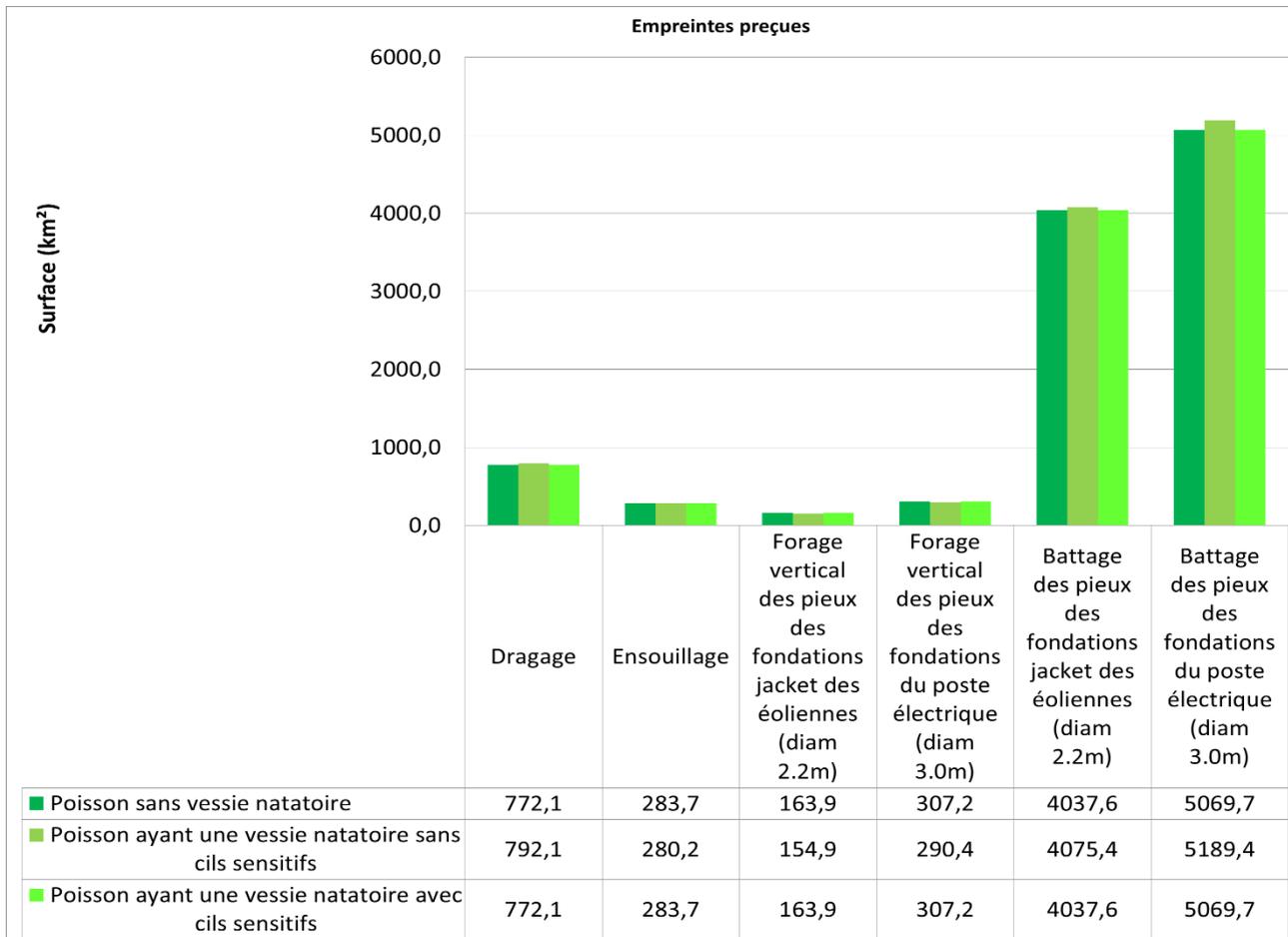


Figure 117: Surface des empreintes sonores perçues par les poissons



### 9.3.2.1.2 En phase d'exploitation

La géométrie des empreintes sonores perçues par les poissons englobent à la fois l'empreinte physique du parc en la débordant au plus de 0,7 à 1,3 milles nautiques lors de l'exploitation des éoliennes en fonction de la physiologie des poissons. Autrement dit, le bruit des éoliennes en fonctionnement domine le bruit ambiant existant dans l'ensemble du périmètre du parc et s'étale au plus jusque 0,7 à 1,3 milles nautiques au droit des éoliennes périphériques. Ces résultats issus de modélisations sont en accord avec des mesures réalisés sur plusieurs parc au Danemark et en Suède (Tougaard et al., 2009) qui rendent compte de niveaux compris entre 109-127 dB réf.  $1\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$  à des distances de 14 à 20m des fondations et qui estime (sans modèle) des distances d'empreinte de l'ordre de quelques kilomètres, mais pour des puissances unitaires de turbine comprises entre 450kW et 2 MW et pour des fondations monopieu. Des niveaux de 122 à 147 dB réf.  $1\mu\text{Pa}$  mesurés à des distances entre 15 et 275m d'une fondation monopieu (Nedwell et al., 2007). Ces résultats sont aussi en accord avec (Kikuchi et al., 2010) qui a estimé que les bruits d'exploitation devrait pouvoir être détectable à des distances comprises entre 1 et 4km selon les espèces.

L'empreinte sonore perçue liée au trafic de maintenance s'étale naturellement le long de la route de circulation entre le parc et les ports de Dieppe et du Tréport, ports de base principaux.

### 9.3.2.2 Effet des bruits perçus sur les poissons

#### 9.3.2.2.1 En phase de travaux

La description des effets est présentée par ordre décroissant d'effet sur les poissons à vessie natatoire sans cils sensitifs, les seuils pour les autres espèces de poissons n'étant pas connus. Elle débute par les effets physiologiques permanents (irréversibles) pour finir par les effets de masquage.

Il existe un risque de dommage permanent (irréversible) sur les poissons jusqu'à la distance de 2m de l'atelier de battage indépendamment du diamètre, peu significative comparée aux dimensions physiques de la source de bruit. Pour les autres ateliers, les niveaux de bruit introduits dans le milieu sont significativement inférieurs aux seuils de dommage connus.

Les résultats des modélisations obtenus montrent qu'il existe un risque de dommage physiologique direct temporaire (réversible) lors des phases de battage de pieu jusqu'à la distance de 0,064 mille nautique de l'atelier. Cette distance est réduite à 2m dans le cas du dragage ce qui est peu représentatif considérant les dimensions de la source bruit. Le risque de dommage temporaire devrait être nul dans le cas du forage.

Les résultats donnent un risque de modification du comportement sur des distances de l'ordre de 5,9 à 7,31 milles nautiques dans le cas du battage des fondations des éoliennes et du poste électrique en mer. Les phases de dragage et d'ensouillage des câbles entraînent des distances respectives de 0,43 et 0,19 mille nautique autour de chaque atelier. Le forage engendre des distances de 0,11 à 0,16 mille nautique, significativement plus faible que celles engendrées par le battage.

Dans ces zones de risque, le changement de comportement peut se traduire de multiples façons (Popper et al. 2016) : des changements de vitesse ou de direction de nage, des réactions d'effarouchement ou de fuite pour s'éloigner de la source de bruit (Hassel et al. 2004), des changements de distribution ou de disposition des bancs (Pearson et al. 1992), par exemple les distributions horizontales ou verticales des poissons pélagiques et démersaux (observé toutefois pour des bruits intenses de canons à air (Løkkeborg et al. 2012).

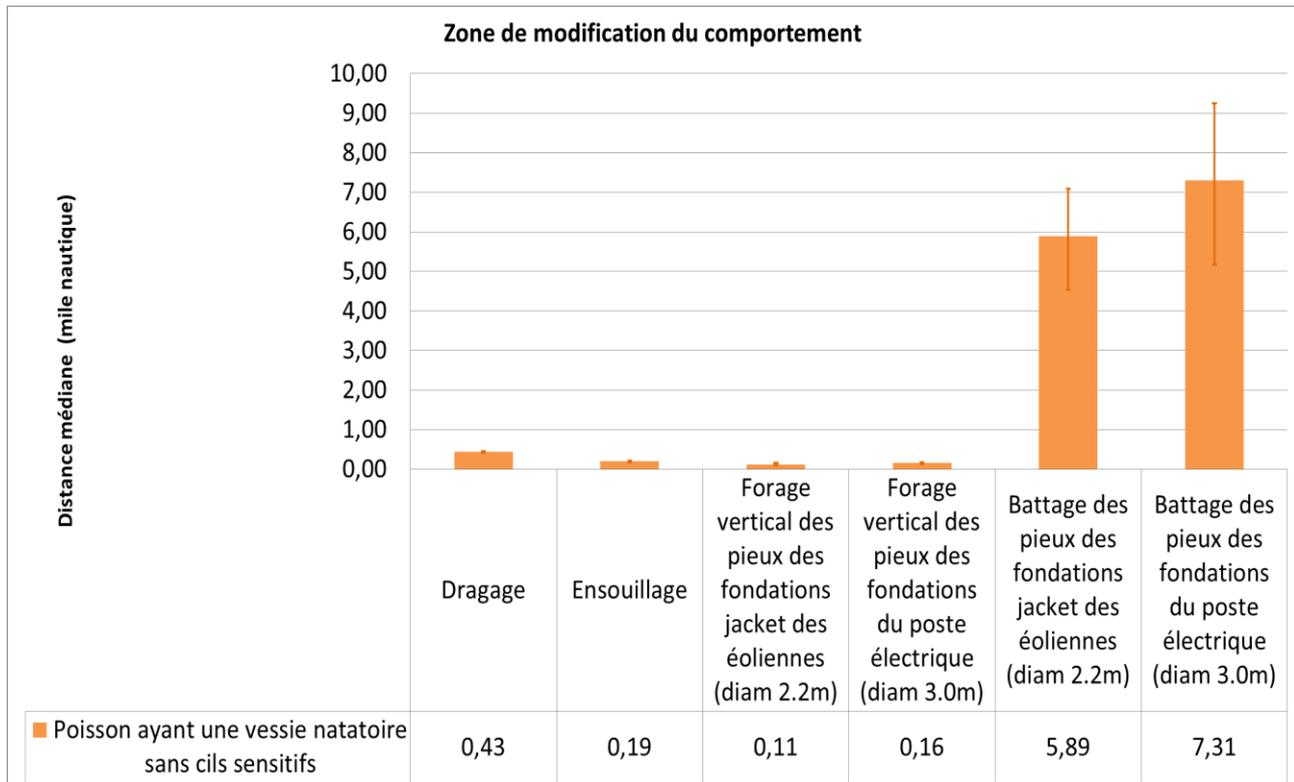
Des effets de masquage peuvent également se produire au sein des zones de perception et influencer la capacité des poissons à communiquer entre eux, mais aussi contribuer à créer une réduction du préavis dans la détection des prédateurs ou des difficultés accrues pour détecter les proies (Popper and Fay 2010).

En principe, les effets induits par le trafic maritime nécessaire aux travaux peuvent intervenir mais de façon largement moins marquée car :

- ▮ les sources de bruit des navires sont mobiles réduisant très significativement la durée d'exposition à risque à quelques dizaines de secondes mêmes si l'affichage de l'empreinte sonore géographique est importante en raison justement de cette mobilité des navires par rapport à une source fixe telle qu'une station de forage ou de battage la source de bruit est localisée à proximité de la surface ce qui est très défavorable à sa propagation (de fortes pertes sont induites par la présence de la surface du milieu marin), l'addition des émissions sonores avec les navires habituellement présents sur la zone sera limitée du fait de l'interdiction d'accès aux zones de chantiers et de leur déviation de la zone des travaux par les autorités maritimes.
- ▮ bien que les seuils pour les autres espèces de poissons ne soient pas connus, il conviendrait de considérer a minima des distances de risque au moins aussi grande pour les autres catégories de poissons, les larves, les œufs et les invertébrés.

Un comportement d'évitement des navires, verticalement ou horizontalement dans la colonne d'eau, a été toutefois rapporté pour la morue et le hareng, et a été attribué au bruit des navires (Vabø, 2002) (Handegard, 2003) mais on constate surtout des phénomènes d'accoutumance aux bruits continus (Wardle, et al., 2001 ; DECC, 2008).

Figure 118: Distances de risque de modification du comportement des opérations de travaux.



### 9.3.2.2.2 En phase d'exploitation

Les résultats des modélisations obtenus montrent que la probabilité d'un risque de dommage physiologique direct (réversible ou non) pour ces espèces sont marginales pour l'ensemble des scénarios d'exploitation.

Un risque de modification du comportement est aussi marginal car les niveaux de bruit rayonnés par chaque éolienne est vraisemblablement en dessous des seuils connus, même si ceux-ci ne sont connus pour les bruits impulsifs.

Enfin, des effets de masquage peuvent se produire au sein de l'empreinte sonore et influencer la capacité des poissons à communiquer entre eux, une réduction du préavis dans la détection des prédateurs ou des difficultés accrues pour détecter les proies (Popper and Fay 2010). Un phénomène d'accoutumance est possible car les niveaux de bruit dans l'empreinte sonore de l'exploitation des éoliennes sont limités et permanents.

En principe, les effets induits par le trafic maritime nécessaire à la maintenance du parc peuvent intervenir de la même façon que pour les opérations de forage, mais de façon largement moins marquée car (1) les sources sont mobiles réduisant très significativement la durée d'exposition à risque à quelques dizaines de secondes, (2) la source de bruit est localisée à proximité de la surface ce qui est très défavorable à sa propagation (de fortes pertes sont induites par la présence de la surface du milieu marin).

Une synthèse des effets écologiques de courts termes du parc éolien en mer de Egmond aan Zee (OWEZ) aux Pays Bas, sur la base de deux années de suivi post-construction comme d'autres études en Angleterre ont démontré :

- ▮ des effets mineurs sur les assemblages de poisson, spécialement près des turbines ; le rapport suggère que des espèces comme les morues trouvent refuge au sein du site (Lindeboom *et al.*, 2011). D'autres études confirment qu'il n'y a pas de phénomène d'évitement (Winter *et al.*, 2010) et que les poissons autour des monopieux (chinchard, morues) montrent des comportements relativement stationnaires en groupe épars plutôt qu'en bancs denses (Couperus *et al.*, 2010)
- ▮ le résultat des programmes de suivi entrepris dans les parcs éoliens en mer au Royaume-Uni ne suggère pas de changements majeurs dans la composition, distribution, et abondance des espèces de poissons. Certaines espèces ont montré une variabilité qui était également constatée dans les zones adjacentes. Les espèces les plus abondantes étant la limande, le merlan et la petite roussette (Cefas, 2009).

Aucun effet négatif de long terme sur les espèces halieutiques n'est identifié comme en témoignent les fortes colonisations de crustacés des embases des éoliennes (enrochements anti-affoulement) mesurées sur la majorité des parcs. Les études sur les espèces inféodées aux milieux sableux tels que les poissons plats et les lançons (Stenberg *et al.*, 2011 ; Linley *et al.*, (2007)) confirment également l'absence de changements significatifs ou d'effets négatifs de la présence des mats d'éoliennes.

### 9.3.2.3 Effets des bruits perçus sur les larves et œufs

Concernant les œufs et les larves, les études portent principalement sur l'effet des sons impulsifs (en particulier ceux des canons à air utilisés lors des levés sismiques) sur les œufs et les larves de poissons marins, ce qui est transposable pour les opérations de battage, mais peu transposable aux opérations de forage, d'ensouillage et de dragage car leurs bruits sont de nature continue et les niveaux en jeu sont très inférieurs à ceux des opérations sismiques.

Toutefois, ces études montrent que les juvéniles et les alevins ont une résistance plus faible au passage d'une onde sonore, et sont donc potentiellement plus susceptibles de subir des dommages aux tissus auditifs que les poissons adultes (Popper & Hastings, 2009). Des expériences cherchant à évaluer les effets du bruit acoustique régulière et aléatoire de bruits de navires sur la croissance et le développement de larves de morue de l'Atlantique (*Gadus morhua*) ont été menées (Banner and Hyatt 1973). Le bruit à court terme a causé des réponses d'effarouchement aux poissons nouvellement éclos. Deux jours d'exposition régulières et aléatoires aux bruits a réduit la croissance, alors que l'exposition régulière au bruit à accélérer l'utilisation du sac vitellin. Après 16 jours, la croissance dans les différents traitements sonores a convergé, bien que les poissons exposés au bruit régulier aient des rapports largeur-longueur plus faibles. Ces résultats suggèrent que le calendrier des perturbations acoustiques peut avoir un impact des mesures liées à la survie-cours du développement.

# 10 Mesures ERC et de suivi





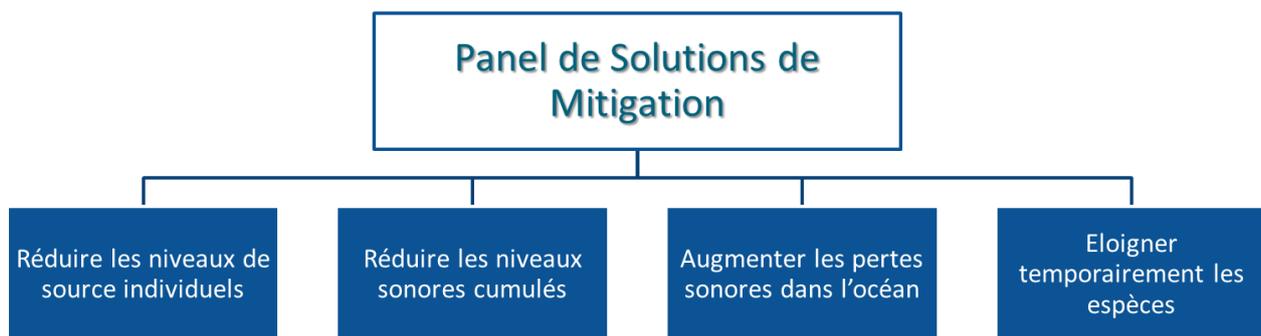
Lorsque les enjeux et les risques identifiés le nécessitent, des mesures de gestion ou de réduction du bruit adapté au niveau d'enjeu peuvent être mises en place. Du fait du risque sonore plus élevé, ce chapitre concerne seulement les opérations de battage et de forage de pieux. Il liste et analyse dans un premier temps les différentes solutions existantes qui permettent de réduire ou d'éviter les impacts sonores vis-à-vis des mammifères marins, des poissons, des larves, des tortues marines et des invertébrés marins.

## 10.1 Panel de solutions de réduction existantes

La méthode de réduction des risques peut se réaliser selon quatre leviers principaux (Figure 119) :

- ▶ mettre en place des mesures de réduction des niveaux de source de bruit individuel ;
- ▶ mettre en place des mesures de réduction des niveaux sonores cumulés ;
- ▶ mettre en place des systèmes qui entravent la propagation du bruit dans le milieu marin ;
- ▶ mettre en place des mesures qui permettent d'éloigner temporairement les espèces des zones de risque.

Figure 119 : Panel de solutions de mitigation des risques sonores.



## 10.1.1 Panel de mesures de réduction des niveaux de source de bruit individuels

Les mesures de réduction des niveaux sonores de bruit individuels consistent à sélectionner des techniques de construction alternatives dont les niveaux sonores émis sont moindres que ceux pressentis à ce jour et dont l'usage reste compatible avec les contraintes techniques, géotechnique et logistiques du projet.

### 10.1.1.1 Alternatives au battage

Parmi les techniques de construction permettant la construction de fondations offshore en remplacement du battage de pieux, on trouve :

- Le forage vertical ;
- Le vibro-fonçage ;
- Les pieux à succion ([www.suctionpile.com](http://www.suctionpile.com));
- Les pieux à pression ([www.giken.com](http://www.giken.com)).

#### 10.1.1.1.1 Technique de forage vertical

Les techniques de forage vertical constituent des solutions qui réduisent le bruit émis comparativement aux techniques de battage. C'est pourquoi elles sont présentées ici en tant que mesure de réduction. Néanmoins, cette technique n'est pas adaptée à tous les sites et types de sous-sol marin.

#### 10.1.1.1.2 Technique de vibro-fonçage

L'intérêt principal des techniques de vibro-fonçage est qu'elle remplace l'impact du marteau sur le pieu par une vibration continue moins énergétique dont le maximum d'énergie sonore est centré sur la fréquence de vibration. Le gain sonore peut atteindre jusqu'à 15dB, mais avec une dispersion temporelle plus grande (WSDOT, 2005). Adaptés aux petits fonds (quelques dizaines de mètres), la mise en œuvre de ces techniques est cependant limitée lorsque le fond est trop dense.

#### 10.1.1.1.3 Succion des pieux

Cette technique est utilisée dans l'industrie pétrolière offshore (société SPT Offshore, société Saipem ENI). Il n'existe pas à ce jour de niveaux mesurés du bruit généré, mais, comme pour le vibro-fonçage, aucun bruit impact ne subsiste et les niveaux de bruits devraient être significativement réduits comparativement au battage. La mise en œuvre de ces techniques est cependant limitée lorsque les fonds sont trop denses.

#### 10.1.1.1.4 Pieux à pression

Cette technique utilise les points d'appuis d'une première pile afin d'exercer une force verticale sur la nouvelle pile à enfoncer (Goh, 2005). La technique, fournie par exemple par la société Giken, nécessite donc que les piles soient relativement rapprochées. Il n'existe pas à ce jour de niveaux mesurés du bruit généré, mais, comme pour le vibro-fonçage, aucun bruit impact ne subsiste et les niveaux de bruits devraient être significativement réduits comparativement au battage. La mise en œuvre de ces techniques est cependant limitée par la nature du sol.

#### 10.1.1.1.5 Éléments de conclusion

Compte tenu de la nature géologique des sols en présence, il n'y a pas d'alternative au battage ou au forage.

### 10.1.1.2 Techniques de limitation à la source des niveaux de bruit de battage

#### 10.1.1.2.1 Optimisation des martyrs

Un martyr est un plateau (ou cale) fait d'un matériau assez tendre placé entre le marteau et le pieu destiné à supporter les chocs et protéger le pieu. (Laughlin, 2006) reporte que l'utilisation de martyrs peut significativement réduire les niveaux de pression acoustique sous-marine générés par le battage. Un martyr est un plateau ou cale fait d'un matériau assez tendre placé entre le marteau et le pieu destiné à supporter les chocs et protéger le pieu. Parmi les quatre matériaux testés dans (Laughlin, 2006) le bois et le Micarta<sup>13</sup> semblent être les plus efficaces à réduire les niveaux de bruits maximum instantanés jusqu'à une dizaine de dB. Le Micarta pourrait être préféré au bois pour sa meilleure résistance aux impacts du marteau. Bien que peu couteuse et simple à mettre en œuvre, la principale limitation induite par l'usage des martyrs est une baisse potentielle de l'efficacité du battage et un allongement du temps de battage. Peu de retour d'expérience existent sur des pieux de très large diamètre comme ceux envisagés dans ce projet.

Figure 120 : Martyrs de différents matériaux utilisés lors d'opérations de battage de pieux.



Source : Noise Control Engineering, Inc.

#### 10.1.1.2.2 Optimisation du temps de contact du marteau

En prolongeant mécaniquement le temps de contact entre le marteau et le pilier, l'impulsion sonore subit une dispersion temporelle et une estimation d'un gain de l'ordre de 10 à 15dB a été envisagée par Elmer(2007). A ce jour, cette valeur n'a pas été confirmée par des mesures expérimentales.

<sup>13</sup> Le Micarta est un matériau composite à base de papier ou de coton mélangé avec de la résine phénolique. Ce matériau est considéré comme dur, dense et utilisé de manière régulière pour des sollicitations aux fortes pressions et températures élevées.

## 10.1.2 Panel de systèmes d'entrave de la propagation du bruit

Le principe des systèmes d'entrave à la propagation du bruit consiste à perturber localement et physiquement le milieu océanique de propagation afin d'augmenter les pertes de propagation sonore généré par la source de bruit. Afin de perturber la propagation, les mécanismes physiques mis en jeu sont la dispersion, la diffusion et l'absorption des ondes acoustiques. Les techniques possibles sont :

- les rideaux de bulles simples ou multiples ;
- les parois de matériaux synthétiques;
- les rideaux de bulles fixes ;
- les techniques de confinement.

Plusieurs travaux ont permis de caractériser l'efficacité de ces systèmes. Ces travaux sont de nature théorique et expérimentale (Betke, 2012), (Dähne, 2012), (Lee, 2012), (Diederichs, 2012), (Rustemeier, 2012), (Arrigoni, 2011), (Grandjean, 2011). Ces techniques sont adaptées à des travaux localisés (battage, forage, minage – pour certaines), mais nécessitent, a priori, d'être installées et démontées à chaque déplacement d'atelier.

Les travaux de recherche menés dans le cadre du projet RESPECT (Pettex, 2016) ont permis d'estimer, en fonction des différentes solutions de réduction disponibles, le bénéfice sur la démographie du Marsouin commun en Manche pendant et après les travaux de battage de pieu. Un système de type Grand Rideau de Bulles permet ainsi de réduire significativement la probabilité d'augmentation de déclin pour être par exemple de 1% seulement dans le cas d'un battage de pieu de 8,5m en Manche dans la cas d'une utilisation optimale de la solution.

### 10.1.2.1 Rideaux de bulles simples ou multiples

Les bulles créent une rupture d'impédance dans le milieu liquide qui entrave la propagation des ondes acoustiques. Les résultats disponibles à ce jour permettent de tirer les conclusions suivantes :

- L'efficacité des rideaux de bulles repose non seulement sur la taille des bulles mais aussi sur la densité de bulles, l'immersion (ou la pression statique ambiante) et sur l'épaisseur du rideau, d'où le concept de rideau de bulles multiples qui va en ce sens ;
- L'efficacité globale d'un rideau de bulles croît avec la taille des bulles et avec la densité du rideau (nombre de bulles par unité de volume) ;
- L'efficacité globale d'un rideau de bulles semble diminuer lorsque la taille des bulles se réduit, tout autre paramètre restant identique par ailleurs. Cependant, lorsque la densité augmente grâce à la réduction de la taille de bulles, l'efficacité globale de la barrière semble pouvoir augmenter (Ros, 2011) ;
- L'efficacité d'un rideau de bulles semble décroître avec l'augmentation de la pression statique (profondeur). L'ensemble des expériences menées à ce jour ont été réalisées par petits fonds (une dizaine de mètres) ;
- Les rideaux de bulles sont les dispositifs les plus matures ;
- Des expériences menées sur les sites éoliens en mer du Nord montrent une très nette diminution de l'efficacité d'un tel dispositif en présence de courant (>2 nœuds) car la vitesse de remontée des bulles est de l'ordre de 0,5 nœud (Matuschek, 2009) donc la verticalité du rideau de bulles n'est plus assurée.

Du point de vue logistique, le développement rapide des solutions du type rideaux de bulles rend les systèmes de plus en plus opérationnels avec une interférence sur les autres opérations du projet de plus en plus faible. A titre d'exemple, sur le site d'Alpha Ventus en Allemagne, des rideaux de bulles ont été déployés selon un processus indépendant et synchronisé des ateliers de battage de pieu afin de minimiser l'impact sur la durée d'installation d'un pieu. La procédure était la suivante :

- To : Arrivée du navire support du rideau de bulle sur site (navire dédié) ;
- To+1h : Déploiement du rideau de bulle en cercle sur le fond autour du point de battage ;
- To+2h : Arrivée de la barge support aux opérations de battage au centre du cercle ;
- Tf : Fin des opérations de battage et départ de la barge support au battage ;
- Ft+1h : Récupération du rideau de bulles ;
- Ft+2h : fin des opérations.

Le coût de cette opération reporté pour le site d'Alpha Ventus en Allemagne est d'environ 100k€ par fondation. Ce coût intègre, selon nos informations, la mobilisation du navire porteur du rideau de bulles, le système de rideau de bulles et le personnel.

Figure 121 : Rideau de bulles mis en place en mer du Nord autour d'une plateforme de battage



Source : [www.offshorewind.biz](http://www.offshorewind.biz)

### 10.1.2.2 Les techniques de confinement

Afin de pallier aux effets du courant qui peuvent déstructurer totalement ou partiellement le rideau de bulles et ainsi altérer ses performances, des solutions de confinement des bulles existent. Ces systèmes permettent de canaliser les bulles autour du pieu. Ce confinement est réalisé par des parois ou guides en métal, en matériaux plastiques (société Gunderboom ou Menck par exemple). Le retour d'expérience reporte une efficacité acoustique similaire aux rideaux de bulles libres sans courant pour des opérations de battage de pieu (MacGillivray, 2005). Les incertitudes liées à leur efficacité pour des bruits liés au forage et les temps d'installation peuvent cependant être rédhibitoires comparé au temps des opérations de forage.

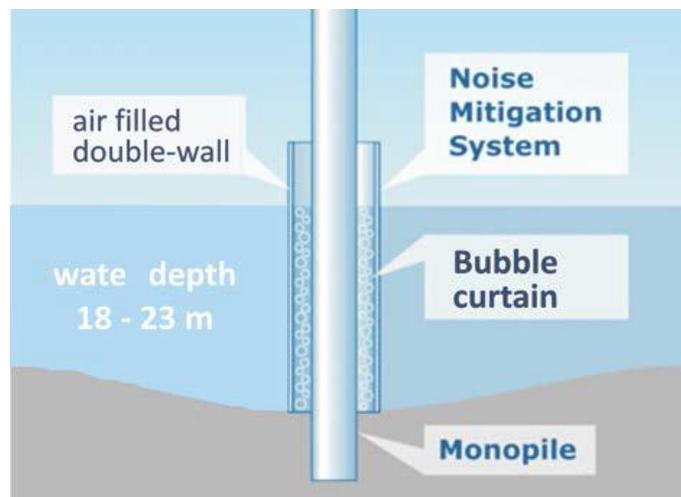
#### 10.1.2.2.1 IHC Noise Mitigation System (NMS)

La technologie vient de la compagnie néerlandaise IHC qui commercialise aussi des marteaux pour le battage de pieu et de façon plus large des solutions pour les chantiers marins (extraction de granulats, navires, etc.) Un manchon en acier à doubles parois vient se placer sur le pieu. De l'air est emprisonné dans les doubles parois. Entre le pieu et le batardeau, un rideau de bulles confinés permet une réduction supplémentaire (Figure 122). La réduction moyenne est de 19 dB (SEL). L'apport supplémentaire du rideau de bulles est surtout notable à partir de 500 Hz. Cette technique est commercialisée (Koschinski et Lüdemann 2013) et est adaptable à plusieurs diamètres et type de pieu : monopieu, jacket, tripode, etc.

Figure 122: Système IHC-NMS. (a) Réseaux de buses du système déployé (b) Schéma du principe de fonctionnement



(a)



(b)

Source: (Koschinski et Lüdemann 2013)

#### 10.1.2.2.2 Batardeaux simple

Un batardeau permet de créer un espace sans eau autour du pieu. Le pieu est placé à l'intérieur d'une autre coque en acier d'un diamètre supérieur. Des pompes retirent l'eau entre les 2 structures créant l'isolation. Le pieu rayonne alors comme s'il était dans l'air. Les ondes réfléchies par les fortes ruptures d'impédance, restent confinées dans les structures et finissent pas s'atténuer après de multiples réflexions. La Figure 123 présente la solution développée par la société germano-danoise Lo-noise. Selon la société, cette technologie permet d'atteindre

une réduction de 20 dB à 750 m du pieu. Cette technologie a fait l'objet de plusieurs essais à Riffgat en mer du Nord et sur le site d'Aarhus Bight. D'autres essais dans des parcs éoliens sont attendus.

Figure 123: Batardeau de la société Lo-Noise en essai à Aarhus Bight).



Source: (Koschinski et Lüdemann 2013)

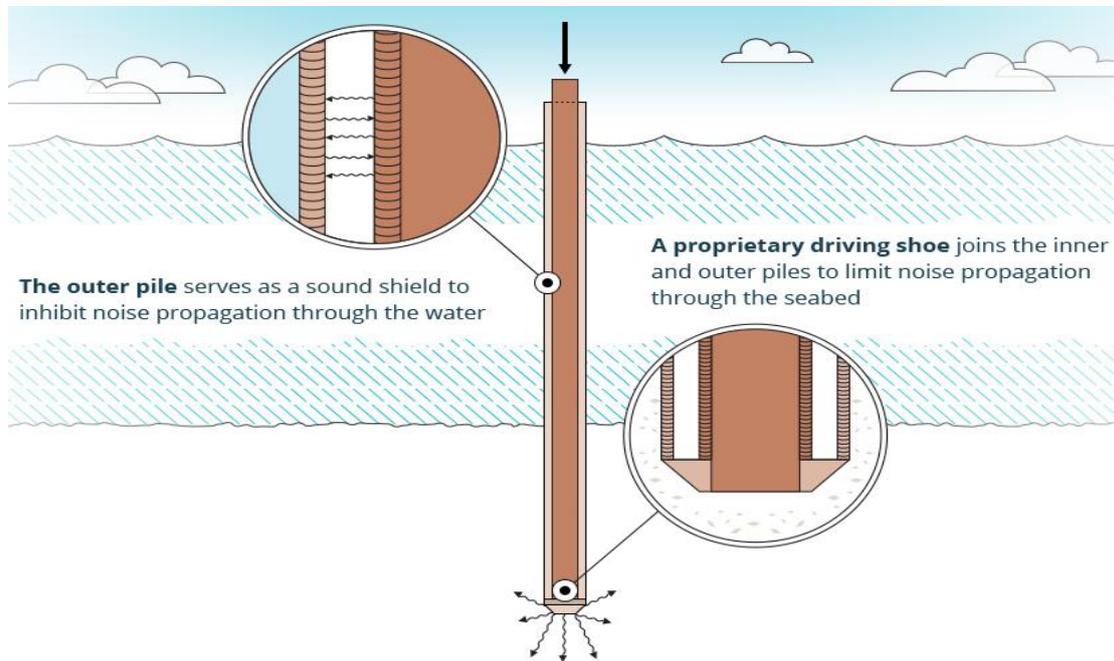
#### 10.1.2.2.3 Double pieu : pieu Reinhall™ de Marine Construction Technologies

Contrairement à la solution précédente (Lo-Noise ApS), c'est le pieu lui-même qui joue le rôle de batardeau. Un pieu de plus faible diamètre est inséré au sein du premier pieu jusqu'à son extrémité basse où un sabot maintient les 2 pieux et les isole de l'eau (Figure 124). L'intervalle entre les 2 pieux est donc constitué d'air. Le marteau agit sur le pieu central qui entraîne via le sabot le pieu extérieur avec lui. La connexion en bout entre les 2 pieux est flexible de manière à réduire la propagation de l'onde de compression du pieu interne vers le pieu externe (Reinhall et Dardis 2014). Le rayonnement reste encore important au niveau du sabot, mais il est atténué au niveau des flancs du pieu. C'est la seule technologie qui permet, actuellement, une réduction de l'émission acoustique dans la partie sédiment. Le pieu central peut être retiré et réutilisé ou bien laissé en place selon l'utilisation voulue. Comme le pieu n'est pas battu directement, cette solution pourrait aussi être classée comme une technique de type amont.

Des essais sur des pieux de 76 cm de diamètre et 1.9 cm d'épaisseur ont montré une réduction du bruit de 21 dB (L<sub>peak</sub>) et 17 dB (SEL) à une distance de 8 m du pieu. La réduction est apportée sur la bande [100 – 10 000] kHz avec un maximum d'efficacité autour de 800 Hz. La

technologie n'a pas encore été adaptée pour des fondations d'éoliennes offshore mais selon les inventeurs, elle pourra être utilisée pour des pieux de plus grand diamètres (5 m).

Figure 124: Illustration de la technologie Reinhall™ pile



(a)



(b)

Source: (Reinhal et al. 2015)

#### 10.1.2.2.4 Pieu TNAP (Temporary Noise Attenuation Pile)

Le pieu original est entouré par un pieu temporaire de plus grand diamètre traité avec une couche de mousse à l'intérieur (Figure 125 (a)). Dans un second modèle, la couche d'absorbant est renfermée entre 2 pieux concentriques en acier (Figure 125 (b)). Dans ce cas, l'absorbant peut aussi être remplacé par de l'air.

Lors de battage de pieux de 90 cm de diamètre, l'installation de pieux TNAP de diamètre 1.4 m (épaisseur de mousse de 5 cm) a permis une réduction de 21.4 dB ( $L_{peak}$ ) à 10 m et 6.8 dB à 100 m (MacGillivray et al. 2007). Stokes et al. (2010) obtiennent une réduction de 10 dB. Reinhal et Dahl (2011) montrent qu'avec ce type de pieu il est difficile d'atteindre une réduction

supérieure à 10 dB ( $L_{peak}$ ). Cette technologie a été l'une des premières utilisée dans sa catégorie. Elle n'a pas fait l'objet d'informations depuis 2011.

Figure 125: (a) Mousse à l'intérieur du pieu TNAP ; (b) pieu TNAP à double paroi.



(a)

(b)

Source: MacGillivray et al. 2007

#### 10.1.2.2.5 BEKA-Shells

La technologie provient de la société Weyres Offshore. La Figure 126 présente plusieurs vues du système. La structure referme de multiples couches d'acier, deux couches de matériaux composites et deux rideaux de bulles (Figure 126). Les différentes couches d'acier favorisent les réflexions et accentuent l'atténuation des ondes. Ce système apporte une réduction de 8 dB (SEL) (Koschinski et Lüdemann 2013). Les multiples épaisseurs du bloc isolant en font un système prometteur. Il est testé actuellement dans plusieurs parcs offshore.

Figure 126: Système BEKA de la société allemande Weyres-Offshore. (a) Réseaux de buses du système déployé ; (b) ; bloc isolant ouvert (c) Système déployé (second plan) et replié (premier plan). (d) Vue en coupe.



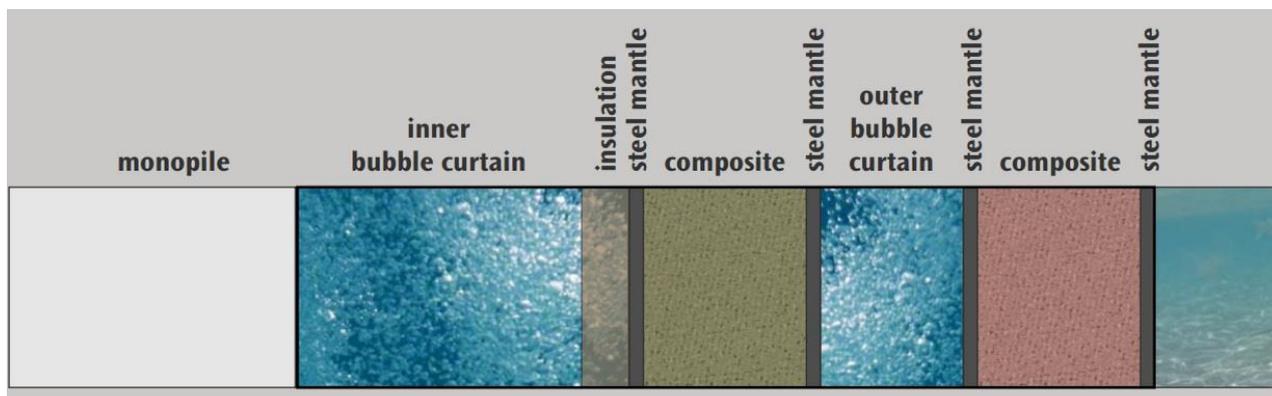
(a)



(b)



(c)



(d)

Source: <http://www.weyres-offshore.de>

### 10.1.2.3 Hydro Sound Damper (HSD)

Le système HSD a été conçu afin de s'affranchir des inconvénients des rideaux de bulles, en particulier (Ros, 2011) :

- le manque de contrôle de la géométrie et de la densité des bulles ;
- la perte d'efficacité en présence de vagues ou de houle ;
- la perte d'efficacité en présence de courants ;
- le bruit propre généré par la génération des bulles ;
- la consommation d'énergie.

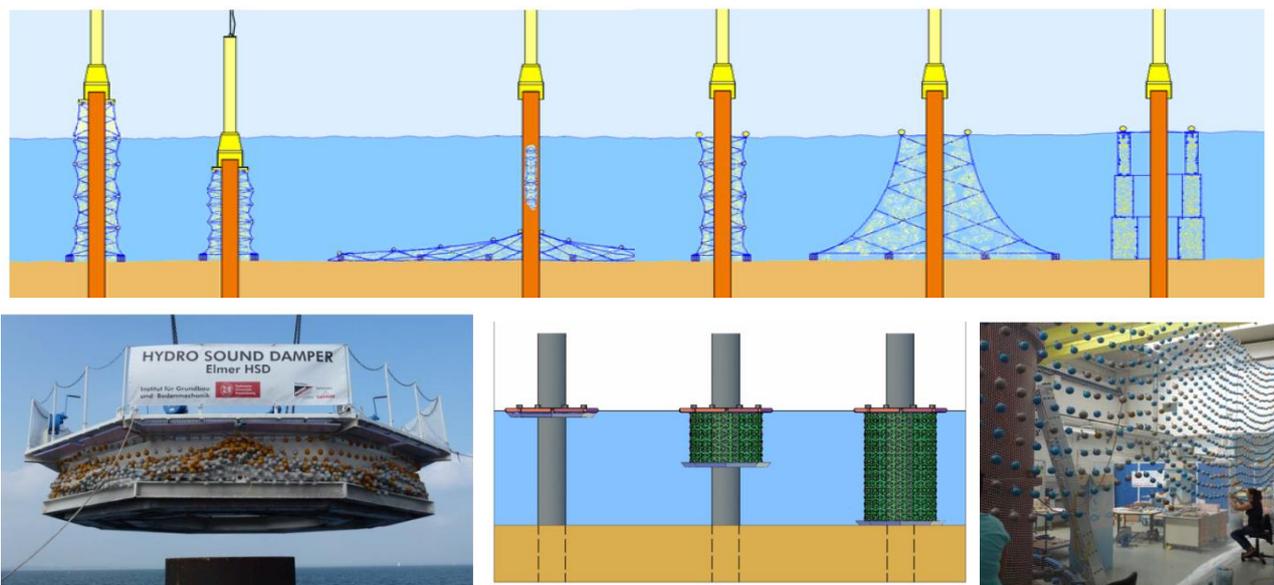
L'idée de base repose sur un rideau de bulle qui serait « figé » dans l'espace et dans le temps (Elmer et al., 2011). Le système utilise des mousses ou des sphères remplies de gaz d'amortisseurs

d'ondes sonores, au lieu des bulles d'air libres. La taille des mousses ou des sphères, la gamme de fréquence effective, le taux d'amortissement, le nombre et la répartition sphères ou des mousses et la pression hydrostatique peuvent être configurés. Des taux d'environ 1 à 2% de mousses ou sphères semblent cependant suffisants pour obtenir des résultats. À ces taux de volume de flottabilité, les forces verticales et horizontales induites par les courants ou par la houle ont l'avantage d'être encore suffisamment limitées pour ne pas induire de complications dans la mise en œuvre. plusieurs façons de monter le système sont envisageables (Elmer et al. 2011) :

- souple sur un filet ;
- rigide sur un cadre vertical ;
- en un ou plusieurs « anneaux » ou « enceintes ».

La diffusion des ondes acoustiques est obtenue par des effets de résonance de l'air contenu dans les sphères en latex conduisant à une réduction de l'énergie à l'extérieur du système. La fréquence de résonance des sphères peut être ajustée en jouant sur le diamètre des sphères, sur la rigidité du matériau de l'enveloppe des sphères et sur la pression du gaz dans la sphère.

Figure 127 : Exemples de configurations possibles du système HSD.



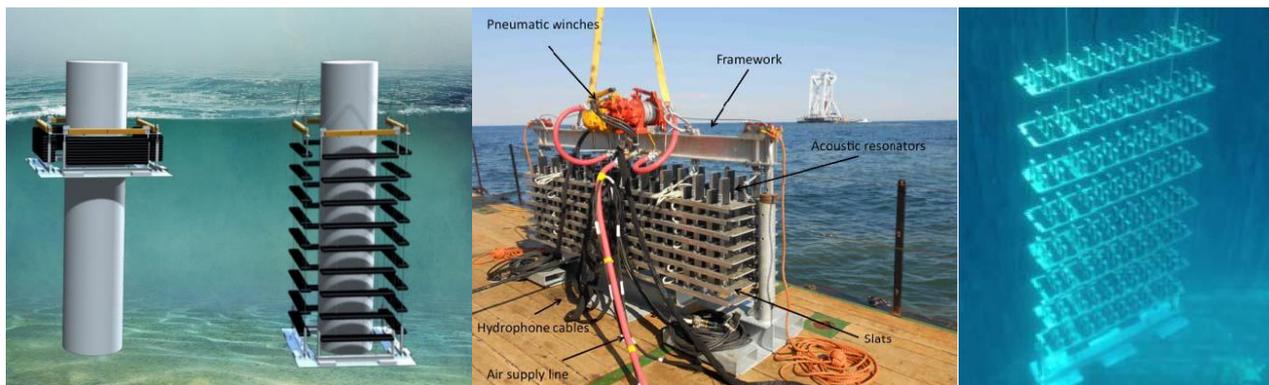
Source : Technische Universität Braunschweig / Dr. Elmer.

#### 10.1.2.4 Résonateurs acoustiques : AdBm Noise Abatement System

Le système est constitué d'une suite de panneaux escamotables contenant des résonateurs acoustiques, dimensionnés pour absorber les fréquences désirées (Figure 128). Ce système s'appuie sur le principe des résonateurs d'Helmholtz. Le résonateur consiste en une cavité rectangulaire possédant une ouverture. La cavité est remplie d'air alors que le col du résonateur est rempli d'eau. Le pic d'absorption se situe au niveau de la fréquence fondamentale du résonateur, ici 110 Hz. Cette fréquence dépend de plusieurs facteurs : volume d'air, longueur du col, surface d'ouverture. Le comportement acoustique de ce système peut être alors facilement prédit à l'avance, ce qui est beaucoup vrai pour le rideau de bulles (Wochner et al. 2014).

Des essais ont eu lieu durant l'été 2014 avec le déploiement d'un modèle de démonstration (un seul panneau du système) dans le parc allemand Butendiek pendant des battages de pieux. La structure est composée de 8 étages, chacun hébergeant 30 résonateurs. Le panneau fait 1.5 m replié et 7 m de long une fois déployé (Figure 128). Le système a été déployé à une distance de 285 m du pieu. Des mesures de bruit ont alors été réalisées avec et sans le système AdBm. Le gain en réduction maximum à 285 m est de 37 dB et est obtenu à la fréquence 100 Hz. Le niveau de bruit pour les fréquences en dessous de 50 Hz a par contre été amplifié par les résonateurs. Un modèle grandeur nature a été testé durant la seconde moitié de l'année 2015.

Figure 128: Vue du système AdBm



Source: <http://adbmtech.com/technology/>.

### 10.1.2.5 Les parois de matériaux synthétiques

Utilisés pour confiner un rideau de bulles ou sous la forme de « champ d'algues artificielles », ils permettent de perturber le champ de propagation acoustique à condition de couvrir toute la hauteur d'eau. A ce jour, ces solutions sont au stade pré-expérimental.

### 10.1.2.6 Synthèse des performances des systèmes de réduction par entrave à la propagation

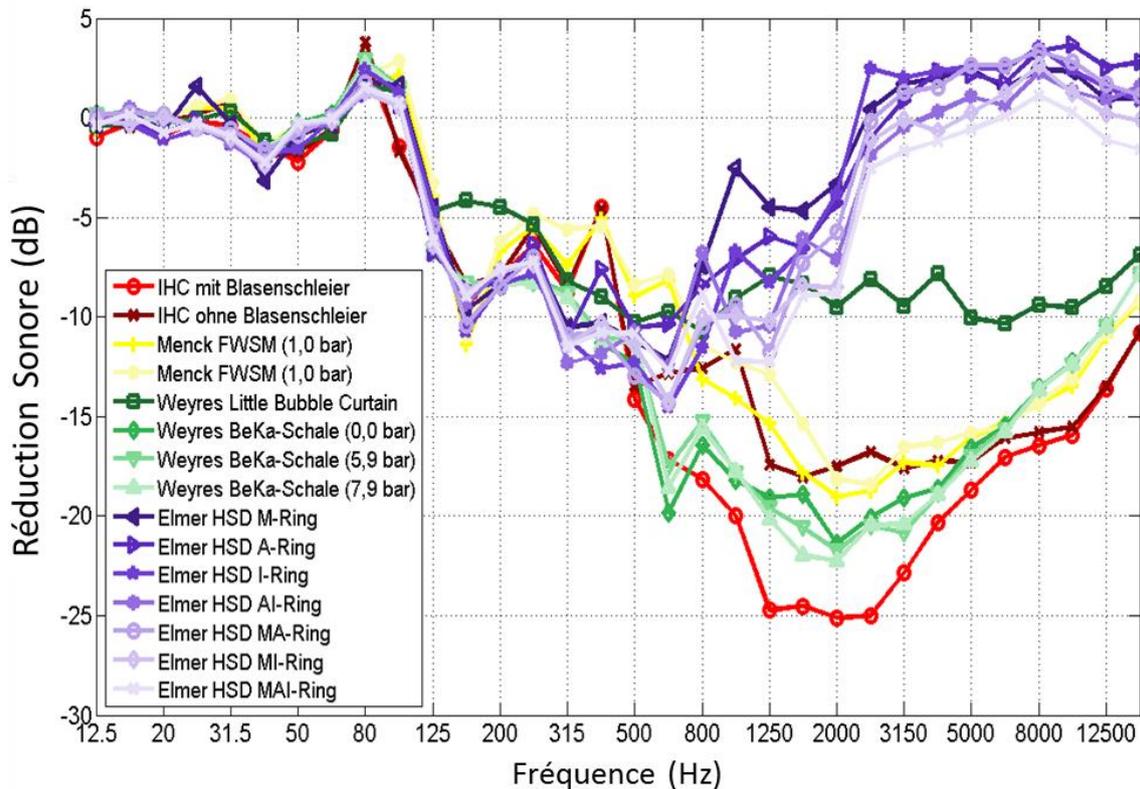
Les performances des systèmes de réduction sont largement dépendantes de la fréquence des sons émis. D'une manière générale, l'atténuation est effective dans une bande de fréquence comprise entre une centaine de Hz jusqu'à quelques kHz.

Différentes techniques d'entrave à la propagation du bruit ont été testées au large de Brodten en mer Baltique, par une hauteur d'eau de 8,5m, sur un pieu de 2,2m de diamètre et de 50mm d'épaisseur, et déjà enfoncé dans le substrat de 65m. Le pieu est battu avec un marteau hydraulique Menck MHU 270 T de 300 kJ (Wilke et al., 2012). Les mesures de bruit sont réalisées à quatre positions entre 350 et 750 m de distance en champ dit « lointain », c'est-à-dire que la mesure est représentative de la composante rayonnante de l'onde. L'onde mesurée subit donc les déformations liées à sa propagation dans le milieu marin local. Les différentes techniques utilisées sont :

- ▶ coffre rigide de confinement rempli d'air comprimé (IHC ou Noise Mitigation Screen) ;
- ▶ système comprenant deux gaines remplies d'air comprimé (FWSM) ;
- ▶ rideau de bulles simple (LBC) ;
- ▶ rideaux de bulles multiples ;
- ▶ Hydro Sound Damper™ (HSD).

Les résultats montrent une efficacité diverse en fonction du système utilisé et en fonction de la gamme de fréquence. Toutefois, d'une manière générale, les différents systèmes montrent un gain à partir de la fréquence 125Hz. La bande passante où l'efficacité est maximale diffère suivant les systèmes et est largement dépendante des conditions de construction (épaisseur de la paroi, diamètre du coffre, taille des bulles, densité des bulles, ...) et d'utilisation du système.

Figure 129 : Efficacité mesurée in situ de différentes techniques d'entrave à la propagation du bruit (atténuation du niveau SEL en tiers d'octave mesurée à la distance de 750m.



Source: Wilke et al., 2012

Tableau 26: Récapitulatif des différentes technologies avec leur gain en réduction respectif et leur état de développement.

Famille	Système de réduction	Réduction en dB (SEL)	Etat de développement
Rideaux de bulles	Grand rideau	10 ≤ 13 ≤ 15 14 ≤ 17 ≤ 18	Solution commercialisée
	Petit rideau	~ 14 dB	Technologie prouvée
Bloc isolant	TNAP	~10 dB	N'est probablement plus développé sous cette forme
	BEKA-Shells	6 à 8 dB	Tests en cours dans plusieurs parcs offshore
	IHC NMS	10≤12≤14 (sans rideau) 17≤10≤23 (avec)	Solution commercialisée
Batardeau	Lo-Noise	< 10 dB (si joint endommagé) 20 dB (selon la société)	Technologie prouvée, d'autres tests dans des parcs à venir

Famille	Système de réduction	Réduction en dB (SEL)	Etat de développement
	Pieu Reinhall	17 dB	Phase expérimentale : Test sur des pieux de 76 cm de diamètre concluant
Autres	Bulles encapsulées : HSD	$8 \leq 10 \leq 13$	Solution commercialisée bien que toujours testée
	Résonateurs : AdBm NAS	37 dB pour la fréquence de 100 Hz	Phase expérimentale : Test à l'échelle réduite concluant. Test grandeur nature en cours.

### 10.1.3 Panel de mesures de réduction des niveaux sonores cumulés

La multiplicité des sources sonores sur le chantier et leur durée dans le temps ont un effet direct sur les niveaux sonores cumulés. Il existe trois axes permettant de gérer cette accumulation :

- la gestion du cadencement des bruits impulsionnels ;
- le masquage du bruit.

#### 10.1.3.1 Le masquage du bruit

Les bruits intenses masquent les bruits plus faibles. Cela s'explique par la nature logarithmique du bruit. Aussi, il peut être opportun, à proximité d'une source de bruit particulièrement intense, de mettre en œuvre simultanément d'autres techniques moins bruyantes afin d'une part de les masquer dans le champ sonore intense, et d'autre part éviter d'avoir à les mettre en œuvre dans une période silencieuse plus tardive. Ce temps de masquage permet de gagner un temps significatif sur les activités moins bruyantes et d'accroître ou préserver les périodes de silence. Cette solution peut avoir un impact sur le planning des opérations et peut s'avérer coûteuse et complexe à mettre en œuvre.

#### 10.1.3.2 Démarrage progressif ou « Soft-start »

##### 10.1.3.2.1 Description du principe

Les niveaux sonores cumulés augmentent avec la durée d'exposition. L'élévation des niveaux d'exposition sonore cumulés est rapide au début des opérations (première heure), et d'autant plus lente que l'opération se poursuit. Une gestion du cadencement au démarrage des opérations permet de contenir l'augmentation rapide des niveaux d'exposition sonore cumulés et par conséquent, de contrôler la vitesse de progression des zones de risques dont les niveaux sont supérieurs aux seuils de dommages physiologiques. L'objectif est encore de permettre aux espèces potentiellement en présence de s'éloigner des zones à risques dans des conditions de déplacement acceptables (c'est-à-dire supportable par les capacités physique et d'endurance de l'animal – vitesse de déplacement et durée).

Aussi, l'aménagement des périodes de pause permet :

- de limiter la progression rapide de la zone de dépassement des seuils de dommages physiologiques ;
- de limiter le niveau de perte partielle d'audition s'il existe en limitant le cumul de l'énergie sonore ;
- aux animaux de retrouver partiellement sinon totalement leur performance auditive.

### 10.1.3.2.2 Exemple illustratif

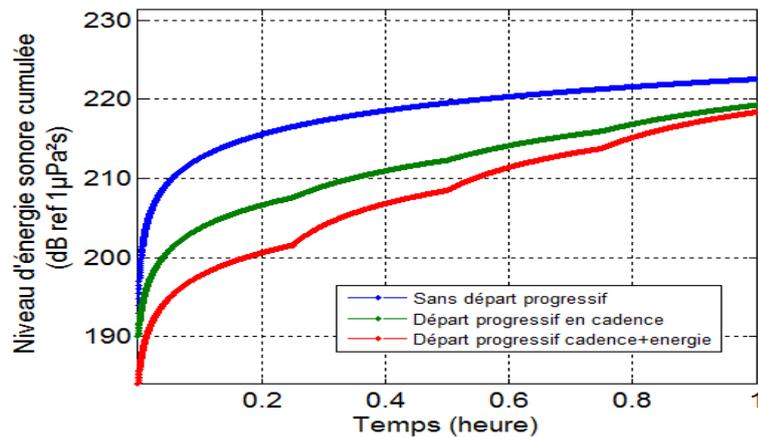
Le Tableau 27 illustre deux procédures de départ progressif qui s'étendent sur 45 minutes, l'une étant uniquement une accélération progressive de la cadence de battage, l'autre combinant à la fois une accélération progressive et une augmentation progressive de la puissance du marteau. Les effets de ces deux soft-start sur l'énergie cumulée du battage en fonction du temps est représentée Figure 130. La vitesse d'augmentation du bruit cumulé est ralentie de manière très significative par la mesure de soft-start, qui joue ainsi pleinement son rôle d'effaroucheur.

Tableau 27 : Exemple de protocole de départ progressif : augmentation de la cadence seule (en haut) et augmentation progressive de la cadence et de l'énergie des coups (en bas). Source : Quiet-Oceans.

	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Nominale
Cadence (coups/minute)	4	7	15	30
Durée (min)	15	15	15	-
% de l'énergie nominale	100%	100%	100%	100%

	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Nominale
Cadence (coups/minute)	4	7	15	30
Durée (min)	15 (min)	15	15	-
% de l'énergie nominale	25%	50%	75%	100%

Figure 130 : Comparaison théorique quant aux effets sonores cumulés d'un départ progressif des travaux durant la 1<sup>ère</sup> heure du chantier: sans départ progressif (bleu), augmentation progressive de la cadence (en vert) et augmentation progressive de la cadence et de l'énergie des coups (en rouge).



## 10.2 Panel de mesures qui permettent d'éloigner temporairement les espèces des zones de risque

La philosophie des mesures d'éloignement, appelé communément effarouchement, consiste à faire en sorte que les spécimens présents dans les zones de risques physiologiques puissent s'éloigner en toute sécurité avant l'émission des bruits à pleine puissance.

Deux stratégies sont possibles:

- ▶ La procédure « ramp-up » : augmenter progressivement les niveaux de bruit afin de faire fuir les espèces potentiellement présentes par l'effet d'une gêne sonore croissante. Cette mesure concerne les espèces suffisamment mobiles pour pouvoir s'éloigner des sources de bruit intenses sans mettre en péril leur survie. La vitesse de progression des zones de risques peut ainsi être contrôlée afin d'offrir une échappatoire raisonnable aux espèces qui peuvent fuir vers le large ou le long de la côte.
- ▶ Procédure Pavlov: émettre un signal sonore de faible intensité servant d'alerte aux spécimens potentiellement présents permettant de générer un comportement de fuite et/ou un comportement de protection des facultés auditives. Cette mesure, encore au stade expérimental, s'adresse aux mammifères marins qui ont démontré leur sensibilité au réflexe de Pavlov.

### 10.2.1 Procédure « Ramp-up »

La procédure du « Ramp-up » est appliquée de façon quasi-systématique à ce jour (NATO Undersea Research Centre, 2004). Elle consiste à générer, à partir d'une ou plusieurs sources sonores dont les niveaux et les formes de signaux sont contrôlés par une électronique, des niveaux de bruit perçus par les espèces potentiellement en présence de plus en plus forts. L'objectif recherché est d'alerter les espèces en présence et de provoquer leur éloignement temporaire. Cette procédure est réalisée préalablement au démarrage des opérations de construction lorsque qu'une période de calme sonore aura été significativement longue pour que les espèces aient eu la possibilité de revenir dans le voisinage des opérations. Sans interférence directe avec la conduite même des opérations en mer, cette procédure est relativement simple à adopter.

La procédure de « Ramp-up » s'effectue à proximité de la zone des travaux à chaque démarrage d'une phase de construction. Lorsque cela est possible, les signaux émis par le transducteur doivent atteindre progressivement les niveaux acoustiques engendrés par les futurs travaux de construction. La durée d'une procédure doit permettre aux mammifères marins susceptibles d'être présents de quitter la zone de risque du projet. Dans le cadre de cette étude et à titre conservateur, il est recommandé de mettre en œuvre la procédure « Ramp-Up » au démarrage de chaque point de battage et de forage.

Il faut associer une veille acoustique passive et visuelle à la procédure de « Ramp-Up » afin de documenter l'efficacité de la procédure. Dans la négative, celle-ci pourrait être remise en cause.

### 10.2.2 Procédure « Pavlov »

(Nachtigall, Ya Supin et Pacini 2016) ont très récemment mesuré les Potentiels Evoqués Auditifs (PEA) de trois espèces de mammifères marins (Fausse orque (*Pseudorca crassidens*), Grand dauphin (*Tursiops truncatus*) et Beluga (*Delphinapterus leucas*)) soumis à un stimuli sonore suivi d'un bruit "fort". Ces mesures ont permis de démontrer que ces spécimens étaient capables de

réduire leur sensibilité auditive de 12 à 15 dB par rapport à leur sensibilité normale (non exposée au bruit). Plus encore, cette réduction a été observée lorsque soumis aux stimuli même lorsque ceux-ci n'était pas suivi du bruit "fort". Ces mesures suggèrent donc que ces mammifères ont développé très rapidement un conditionnement classique (dit de Pavlov) leur permettant d'anticiper l'exposition à un bruit pouvant avoir un effet.

Ces résultats expérimentaux sont importants et nouveaux. Ils démontrent que certains mammifères marins sont susceptibles de s'auto-protéger à des expositions importantes au bruit. De plus, leur capacité d'apprentissage rapide, permettent, en particulier, d'envisager de solutions de nouvelle génération permettant d'éloigner ou a minima de réduire le risque vis-à-vis des mammifères marins.

Le principe consisterait à ajouter un son de faible intensité mais audible par les spécimens de mammifères marins qui seraient présents à minima dans une zone géographique qui couvre les zones de risques physiologiques dans la procédure de « ramp-up ».

### 10.3 Stratégie recommandée et plan de suivi préconisé

Ce paragraphe propose une stratégie Eviter, Réduire, Compenser (ERC) et un plan de suivi en relation directe avec les niveaux de risque identifiés par les mesures acoustiques et les modélisations mises en œuvre.

Il n'existe, à ce jour, aucune mesure d'évitement probante.

#### 10.3.1 Recommandations pour les mesures de réduction à la source

##### 10.3.1.1 Description de la mesure MR5

Dans le cadre de ce projet, le maître d'œuvre propose la mesure de réduction MR5 consistant à réduire le niveau sonore à la source de 7dB afin de minimiser les distances et les surfaces de risque. A ce jour, les systèmes de réduction de type BBC (« Big Bubble Curtain ») ou manchon en acier à doubles parois (système IHC) sont capables d'obtenir une telle performance de réduction de bruit. Toutefois, étant donné l'évolution rapide des techniques de réduction à la source, il est possible que de nouvelles solutions techniques performantes de réduction soient en mesure d'atteindre cette exigence d'efficacité de réduction.

D'après les techniques existantes décrites dans de la littérature disponible (Nehls, 2016) (Wilke, 2012), la réduction sonore typique en fonction de la fréquence a été établi afin d'obtenir une réduction large bande de 7dB conformément à la recommandation du maître d'ouvrage. Ce gabarit est significativement plus efficace entre 500 et 10 kHz donc pour les espèces de la classe « hautes fréquences » tel que le Marsouin Commun. Pour cette espèce, une cartographie de l'empreinte sonore et des risques est disponible en annexe..

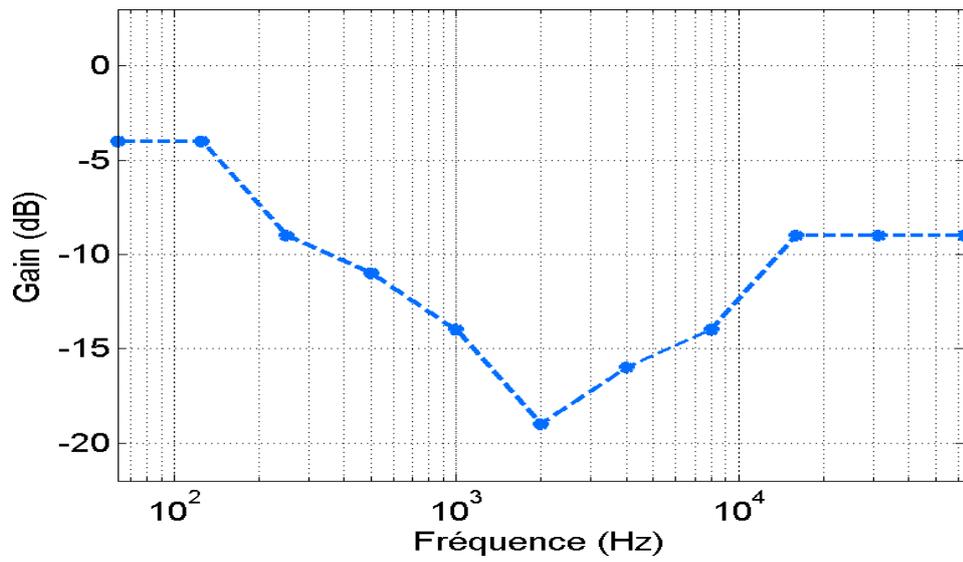


Figure 131 :  
Réduction sonore  
en fonction de la  
fréquence

Source: (Quiet-Oceans)

### 10.3.1.2 Gain de la mesure MR5 sur la réduction des empreintes sonores

Le Figure 132 synthétise les distances médianes et les surfaces de perception du bruit des ateliers de battage des fondations Jacket des éoliennes et du poste électrique en mer en fonction de l'espèce en comparant l'effet de la mesure de réduction envisagée par le maître d'ouvrage. Les distances médianes de perception sont réduites de l'ordre de 30% et la surface de l'ordre de 60%. Seules les espèces Basse Fréquence montrent une diminution plus faible des distances et surface de perception respectivement de 20% et 45%. En effet, le gabarit de réduction choisi dans cette étude est significativement plus efficace au-delà de 500 Hz.

Figure 132 : Synthèse des étendues de l'empreinte sonore en fonction de la technique et de l'espèce

Espèce	Battage de pieu de diamètre 3m				Battage de pieu de diamètre 2,2m			
	Sans		Avec mesure de réduction (MR5)		Sans		Avec mesure de réduction (MR5)	
	Distance médiane (km)	Surface (km <sup>2</sup> )	Distance médiane (km)	Surface (km <sup>2</sup> )	Distance médiane (km)	Surface (km <sup>2</sup> )	Distance médiane (km)	Surface (km <sup>2</sup> )
Marsouin commun	45	8187	31	3284	38	5684	28	2586
Cétacé Haute Fréquence	45	8187	31	3284	38	5684	28	2586
Cétacé Moyenne Fréquence	44	7674	31	3237	37	5378	28	2573
Cétacé Basse Fréquence	36,49	5158	29	2837	32	4049	27	2376
Pinnipèdes	40	6411	30	3063	34	4625	27	2509
Poissons sans vessie natatoire	36	5069	29	2881	32	4037	27	2414
Poissons avec vessie natatoire sans cils sensitifs	36	5189	29	2858	32	4075	27	2393
Poissons avec vessie natatoire avec cils sensitifs	36	5069	29	2881	32	4037	27	2414
Tortues marines	37	5504	30	2974	33	4243	27	2477

### 10.3.1.3 Gain de la mesure MR5 sur la réduction du risque de modification du comportement

Le Figure 133 synthétise les distances médianes et les surfaces de modification du comportement induites par le bruit de l'atelier de battage en fonction de l'espèce en comparant l'effet de la solution de réduction envisagée par le maître d'œuvre. A ce jour, seulement trois classes acoustiques possèdent ce seuil de tolérance.

Les distances médianes de modification du comportement sont réduites de l'ordre de 60% et la surface de l'ordre de 80% dans le cas du Marsouin Commun. Cette diminution est moins significative (30%) pour les poissons ayant une vessie natatoire sans cils sensitifs en raison de leur sensibilité plus élevée aux basses fréquences.

Figure 133 : Synthèse des étendues de modification du comportement en fonction de la technique et de l'espèce

Espèce	Battage 3m		Battage 3m avec mesure de réduction (MR5)		Battage 2,2m		Battage 2,2m avec mesure de réduction (MR5)	
	Distance médiane (km)	Surface (km <sup>2</sup> )	Distance médiane (km)	Surface (km <sup>2</sup> )	Distance médiane (km)	Surface (km <sup>2</sup> )	Distance médiane (km)	Surface (km <sup>2</sup> )
<b>Marsouin commun</b>	4,7	70	2,1	14	3,3	36	1,3	6
<b>Poissons avec vessie natatoire sans cils sensitifs</b>	13,5	589	9,4	281	11	381	7,7	189
<b>Tortues marines</b>	0,9	2,6	0,4	0,6	0,5	0,9	0,3	0,3

### 10.3.1.4 Gain de la mesure MR5 sur la réduction du risque de dommage physiologique temporaire

Le Figure 134 synthétise les distances médianes et les surfaces de dommages physiologiques temporaires (réversibles) induites par le bruit de l'atelier de battage en fonction de l'espèce en comparant l'effet de la solution de réduction envisagée par le maître d'œuvre.

En mettant en œuvre la solution de réduction, la distance médiane est réduite de l'ordre de 50% pour la majorité des classes d'espèce, de 40% pour les pinnipèdes et de 25% pour les tortues marines.

Figure 134 : Synthèse des étendues des dommages physiologiques temporaires en fonction de la technique et de l'espèce

Espèce	Battage 3m	Battage 3m avec mesure de réduction (MR5)	Battage 2,2m	Battage 2,2m avec mesure de réduction (MR5)
	Distance médiane (m)	Distance médiane (m)	Distance médiane (m)	Distance médiane (m)
Marsouin commun	380	193	278	154
Cétacé Haute Fréquence	13	7	9	6
Cétacé Moyenne Fréquence	17	9	11	6
Cétacé Basse Fréquence	172	91	119	19
Pinnipèdes	307	194	228	167
Poissons sans vessie natatoire	119	19	44	13
Poissons avec vessie natatoire sans cils sensitifs	119	19	44	13
Poissons avec vessie natatoire avec cils sensitifs	119	19	44	13
Tortues marines	243	183	196	146

### 10.3.1.5 Gain de la mesure MR5 sur la réduction du risque de dommage physiologique permanent

Le Figure 135 synthétise les distances médianes et les surfaces de dommages physiologiques permanents (irréversibles) induites par le bruit de l'atelier de battage en fonction de l'espèce en comparant l'effet de la solution de réduction envisagée par le maître d'œuvre. On notera que la mesure de réduction MR5 réduit le risque de dommage physiologique permanent à un niveau marginal ou non significatif au vu des dimensions physiques des sources de bruit.

Figure 135 : Synthèse des étendues des dommages physiologiques permanents en fonction de la technique et de l'espèce

Espèce	Battage 3m	Battage 3m avec solution de réduction	Battage 2,2m	Battage 2,2m avec solution de réduction
	Distance médiane (m)	Distance médiane (m)	Distance médiane (m)	Distance médiane (m)
Marsouin commun	44	11	15	7
Cétacé Haute Fréquence	2	2	2	0
Cétacé Moyenne Fréquence	2	2	2	0
Cétacé Basse Fréquence	7	4	6	2
Pinnipèdes	7	11	13	7
Poissons sans vessie natatoire	0	0	0	0
Poissons avec vessie natatoire sans cils sensitifs	2	1	2	0
Poissons avec vessie natatoire avec cils sensitifs	2	0	2	0
Tortues marines	2	0	0	0

### 10.3.1.6 Gain de la mesure MR5 sur le nombre d'individus potentiellement affectés

En appliquant la mesure de réduction spécifiée par le maître d'ouvrage, en hiver (saison la plus impactante), le nombre d'individus susceptible de percevoir le bruit de l'atelier passe de :

- ▶ 3517 à 1108 dans le cas du Marsouin Commun lors du battage du pieu de diamètre 3m ;
- ▶ 30 à 9 dans le cas des petits delphininés lors du battage du pieu de diamètre 3m ;
- ▶ 2193 à 813 dans le cas du Marsouin Commun lors du battage du pieu de diamètre 2,2m ;
- ▶ 19 à 6 dans le cas des petits delphininés lors du battage du pieu de diamètre 2,2m ;

En appliquant la mesure de réduction spécifiée par le maître d'œuvre, en hiver, le nombre d'individus susceptible de subir une modification du comportement passe de :

- ▶ 20 à 4 dans le cas du marsouin commun lors du battage du pieu de diamètre 3m ;
- ▶ 10 à 2 dans le cas du marsouin commun lors du battage du pieu de diamètre 2,2m ;

Pour rappel, sans mettre en œuvre de mesure de réduction, aucune espèce référencée par le programme SAMM (Marsouin Commun et delphininés) n'est susceptible d'être exposé à un risque de dommage physiologique permanent quelle que soit l'activité du projet et la saison.

### 10.3.1.7 Contrôle de la mesure MR5

Plusieurs solutions techniques permettent de mettre en œuvre la mesure MR5. Certaines solutions étant sensibles aux conditions environnementales locales, la performance de la solution mise en œuvre doit être évaluée sur site. Le contrôle doit permettre de vérifier que l'atténuation de 7dB est atteinte sur le niveau large bande.

Le critère de conformité de la solution de réduction est établi par une mesure de bruit à la distance de référence de 750 m de l'atelier de battage. Cette distance est choisie afin de contrôler les niveaux sonores absolus tout en n'interférant pas physiquement avec la mise en œuvre de cet atelier. Le niveau sonore large bande attendu en utilisant une technique de réduction adaptée est de :

- ▶  $164 \pm 1$  dB ref  $1 \mu\text{Pa}^2\text{s}$  dans le cas du battage des pieux des fondations du poste électrique de 3m de diamètre ;
- ▶  $161 \pm 1$  dB ref  $1 \mu\text{Pa}^2\text{s}$  dans le cas du battage des pieux des fondations jacket des éoliennes de 2,2m de diamètre.

On pourra admettre qu'un maximum de 5% des coups de battage dépassent ces niveaux afin de permettre les réglages des systèmes lorsque cela est nécessaire.

### 10.3.2 Recommandations pour les mesures de réduction complémentaires

Au vu des résultats des estimations des risques sur la base des scénarios étudiés, le risque de dommage physiologique temporaire est prédit, mesures de réduction comprises, dans un rayon maximum de 193m et les espèces potentiellement en présence n'étant pas résidente, il est recommandé de mettre en place :

- ▶ Des mesures de contrôle au cours des phases de construction mettant en jeu des techniques bruyantes (dragage, ensouillage, battage) qui consistent à minimiser la probabilité de présence d'un mammifère marin et des tortues marines dans les zones de risques de dommages physiologiques directs ;
- ▶ Des mesures de suivi qui consisteraient à suivre et documenter l'évolution des niveaux sonores tout au long du cycle de vie du projet.

Le

Tableau 28 synthétise les distances de risques biologiques pour chaque atelier du projet et pour chaque classe d'espèce. Le risque de dommage physiologique étant confiné dans un rayon maximum de 360m obtenu pour le battage des fondations jacket, et les espèces potentiellement en présence n'étant pas résidente, il est recommandé de mettre en place des mesures de réduction. Ces mesures de réduction sont à implémenter au cours des phases de construction mettant en jeu du dragage, de l'ensouillage, du forage ou du battage.

Les mesures de réduction concernent :

- ▶ les cétacés ;
- ▶ les pinnipèdes ;
- ▶ les tortues marines.

Il n'existe à ce jour aucune mesure de réduction pour les poissons.

Un plan de réduction du « bruit » consiste à faire en sorte de minimiser la probabilité de présence d'un spécimen ou d'un groupe d'individus dans un rayon donné (exprimé en mètre) au voisinage des ateliers. Cette zone est définie par les dimensions des zones de risque de dommage physiologique estimées par modélisation. Le plan de réduction pourrait consister en la mise en œuvre de trois techniques complémentaires d'effarouchement :

- ▶ L'observation visuelle ;
- ▶ L'observation par acoustique passive ;
- ▶ Une procédure de ramp-up combiné à une procédure "Pavlov".

Tableau 28 : Synthèse de la mise en œuvre des ateliers

Plan de réduction								
Atelier	Marsouin	Hautes Fréquences	Moyennes fréquences	Basses fréquences	Pinnipèdes	Tortues	Poissons et invertébrés	Distance d'éloignement recommandée
<b>Dragage</b>	✓				✓		NA	195 m
<b>Ensouillage</b>	✓						NA	105 m
<b>Forage vertical jacket</b>	✓						NA	50 m
Battage jacket fondation éolienne avec mesure de réduction	✓			✓	✓	✓	NA	154 m
Battage jacket du poste électrique avec mesure de réduction	✓			✓	✓	✓	NA	193 m
<b>Maintenance</b>							NA	NA
<b>Exploitation</b>							NA	NA

### 10.3.2.1 Réduction par observation visuelle

L'observation visuelle consiste à identifier la présence de spécimens en surface. Elle peut être mise en œuvre par des observateurs humains ou des technologies alternatives (caméra visuelle, caméra thermique, etc.). L'analyse des données recueillies doit être réalisée en temps-réel pour permettre une évaluation immédiate de la présence ou suspicion de présence d'un ou plusieurs mammifères marins dans la zone de réduction.

Les mesures de réduction par observations visuelles concernent les cétacés, les pinnipèdes et potentiellement les tortues marines.

### 10.3.2.2 Réduction par acoustique passive

L'observation par acoustique passive consiste à identifier la présence de spécimens en immersion. Elle est mise en œuvre par des hydrophones capables de percevoir les vocalises des mammifères marins identifiés dans le plan de réduction. L'analyse des données recueillies doit être réalisée en temps-réel pour permettre une évaluation immédiate de la présence ou suspicion de présence d'un ou plusieurs mammifères marins dans la zone de réduction.

Les traitements d'acoustique passive permettant une bonne mise en œuvre de la réduction sont :

- ▶ La détection temps-réel des événements sonores, non seulement biologiques mais aussi anthropiques et naturels ;
- ▶ L'identification temps-réel des événements sonores biologiques avec les espèces de cétacés afin de confirmer les contacts acoustiques ;
- ▶ L'estimation temps-réel de la distance des émissions sonores des cétacés à l'hydrophone afin d'évaluer la présence de l'animal dans la zone de risque ;
- ▶ L'estimation temps-réel des performances de détection des événements sonores des cétacés afin de s'assurer que les capteurs couvrent a minima toute la zone de risque.

Les mesures de réduction par acoustique passive concernent les cétacés.

### 10.3.2.3 Durée du contrôle

Les moyens de contrôle visuels et acoustiques doivent démarrer 30 minutes avant le début des opérations et se tenir jusque 30 minutes après la fin des opérations. Les objectifs des contrôles sont différents en fonction des phases de mise en œuvre :

- ▶ avant le début des opérations, l'objectif est de minimiser la probabilité de présence d'un spécimen ou d'un groupe de spécimens dans la zone de risque ;
- ▶ pendant les opérations, l'objectif est de vérifier qu'aucun spécimen ou groupe de spécimens n'entre dans la zone de risque sous l'effet d'une attraction (recherche de proies faciles qui auraient été affectées par exemple) ;
- ▶ après les opérations, l'objectif est de s'assurer qu'aucun spécimen ou groupe de spécimen ne présente de signe particulier anormal qui serait synonyme d'un effet.

### 10.3.2.4 Interruption des opérations

Si les opérations devaient être interrompues pendant plus d'une heure, la procédure de réduction doit être reprise en totalité, c'est-à-dire que le redémarrage des opérations doit être précédé de 30 minutes de contrôle.

### 10.3.2.5 Conduite à tenir

La conduite à tenir en fonction des résultats conjoints des observations visuelles et acoustiques est :

- ▶ En cas de non présence avérée, les opérations peuvent démarrer ;
- ▶ En cas de présence avérée ou suspicieuse de cétacé ou de pinnipède dans la zone d'évitement, une procédure de ramp-up sera mise en œuvre dans le but d'effaroucher les individus ou groupes d'individus présents et de les voir quitter la zone de risque. En cas de succès, les opérations peuvent démarrer. Dans le cas contraire, en cas de présence persistante de mammifères marins dans la zone d'évitement, les opérations peuvent démarrer à la condition de la poursuite de la surveillance visuelle de ces espèces est poursuivie de façon particulièrement attentive pendant toute la durée de présence des individus dans la zone de risque. Un stand-by des opérations doit cependant pouvoir intervenir à tout moment en cas de comportement atypique.

Par ailleurs, il est recommandé de mettre en place des mesures de suivi qui consisteraient à suivre et documenter l'évolution des niveaux sonores tout au long du cycle de vie du projet.

### 10.3.3 Recommandations pour le programme de suivi

#### 10.3.3.1 Choix de la stratégie de suivi

La plupart des études d'impacts se basent sur un protocole de type BACI (Before After Control Impact) (Stewart-Oaten, Bence et Osenberg 1992). Ce type de protocole nécessite de suivre deux sites en parallèle : le site concerné par le projet et un site témoin, peu importe la technique de suivi utilisée. Les deux sites doivent être en tout point comparables afin de permettre la détection de tout changement (spécifique, abondance...) à court ou à long terme. En pratique, la sélection d'un site témoin est compliquée car l'étendue des empreintes sonores est telle que celui-ci est susceptible d'être très distant et donc peu représentatif.

Un autre type de design peut être utilisé, dit « gradient sampling ». Il consiste à suivre sur un seul site l'impact des nuisances en fonction de la distance à la source. Particulièrement adapté aux suivis par acoustique passive, ce type de protocole permet d'estimer les différentes réactions des mammifères marins en fonction de la distance à la source de bruit. C'est ce type de design qui est retenu dans le cadre du programme de suivi acoustique proposé ci-après.

#### 10.3.3.2 Objectifs du programme de suivi

Le programme de suivi a plusieurs objectifs :

- ▶ de suivre l'évolution du bruit en phase de construction et d'exploitation ;
- ▶ d'évaluer les modifications par rapport à l'état de référence de la fréquentation des populations de cétacés, de pinnipèdes et de tortues marines dans la zone d'influence du projet. Ces évaluations ont lieu lors des phases de travaux, d'exploitation et de démantèlement.

#### 10.3.3.3 Protocole géographique

Nous recommandons de dupliquer le protocole géographique mis en œuvre pour les suivis acoustiques.

Toutefois, il peut être envisagé de compléter le maillage par des appareils autonomes du type C-Pod qui toutefois pourront couvrir uniquement l'enjeu du marsouin commun.

Il convient de compléter ces mesures par des observations visuelles par des observateurs humains ou par des technologies alternatives (caméra visuelle, caméra thermique, etc.). Ces observations visuelles sont réalisées selon des transects rectilignes qui couvrent les empreintes sonores du projet.

### 10.3.3.4 Durée des suivis

En plus de l'établissement de l'état de référence, les suivis doivent être mis en œuvre pendant toute la durée des travaux, puis pendant des périodes de référence. Ces périodes annuelles de suivi sont référencées par rapport à l'année N de mise en service du parc éolien. Il est recommandé de procéder à ces années de suivi aux périodes suivantes :

- ▶ année N afin d'évaluer les effets dans l'année qui suit la fin des travaux et sur la première année d'exploitation du parc ;
- ▶ année N+1 afin d'évaluer les effets après un an de fonctionnement du parc ;
- ▶ puis de façon périodique avec un espacement croissant aux années N+3, N+5, N+10, N+15, N+20;
- ▶ enfin lors du démantèlement et une année après le démantèlement.

### 10.3.3.5 Outils mis en œuvre

Les suivis sont mis en œuvre grâce aux outils suivants :

- ▶ des enregistreurs acoustiques permettant de recueillir les signaux acoustiques bruts en vue de leurs traitements pour l'identification de la fréquentation par toutes les espèces de cétacés ;
- ▶ le cas échéant, des appareils à traitements intégrés et spécialisés ne permettant d'identifier la fréquentation que pour une espèce (C-Pod par exemple pour le marsouin commun) ;
- ▶ des observateurs humains ou des observations par des technologies alternatives (caméra visuelle, caméra thermique, etc.).

### 10.3.3.6 Résultats attendus des suivis

#### 10.3.3.6.1 En phase travaux

Certains des traitements des données et la mise en œuvre des modélisations sont réalisés en temps réel afin de fournir les résultats suivants :

- ▶ la prévention de tout dépassement de seuils de dommage physiologique ;
- ▶ l'ajustement, le cas échéant, des dimensions des zones à risque.

Les autres traitements sont réalisés en temps différés afin de fournir les résultats suivants :

- ▶ l'estimation des évolutions des niveaux sonores en tout point de la zone géographique considérée ;
- ▶ de cartographier l'état sonore statistique sur l'aire d'étude immédiate et éloignée ;
- ▶ contribuer à la DCSMM pour le suivi des indicateurs 11.1 et 11.2.

#### 10.3.3.6.2 Pour les périodes de suivi suivantes

Le traitement des données et la mise en œuvre des modélisations sont réalisés en temps différé. Les résultats attendus sont:

- ▶ la cartographie de l'état sonore statistique sur l'aire d'étude immédiate et éloignée ;
- ▶ l'estimation de l'empreinte sonore statistique du parc en exploitation ;
- ▶ l'estimation de la fréquentation des mammifères marins dans la zone ;
- ▶ contribuer à la DCSMM pour le suivi des indicateurs 11.1 et 11.2.



# 11 Annexes





## 11.1 Empreinte sonore en fonction de l'activité et de la saison

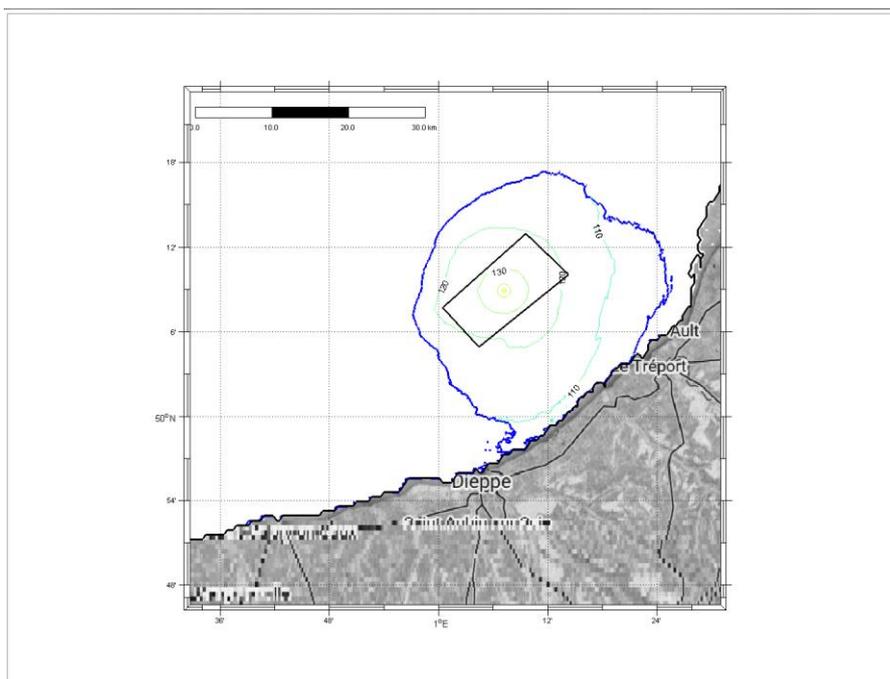
Pour chaque atelier et pour les saisons estivale et hivernale, chaque figure donne l'empreinte sonore de cette activité. Chaque trait donne la courbe isosonique d'exposition sonore (en dB ref  $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$ ). Le trait épais bleu donne la limite d'audibilité de cette activité.

Au-delà de cette limite (vers le large), le bruit ambiant médian de l'état initial est supérieur au bruit engendré par cet atelier donc le bruit engendré par cet atelier n'est pas perçu.

A l'intérieur de cette empreinte, les courbes bleu clair donnent les contours pour des valeurs caractéristiques par pas de 10dB. La forme de ces isosoniques est principalement influencée par la nature des fonds et par la bathymétrie.

La représentation de l'empreinte sonore étant l'émergence du bruit du projet au-dessus de l'état sonore médian initial, ces cartes permettent de visualiser et quantifier l'apport du projet au chorus sonore total.

### 11.1.1 Saison hivernale



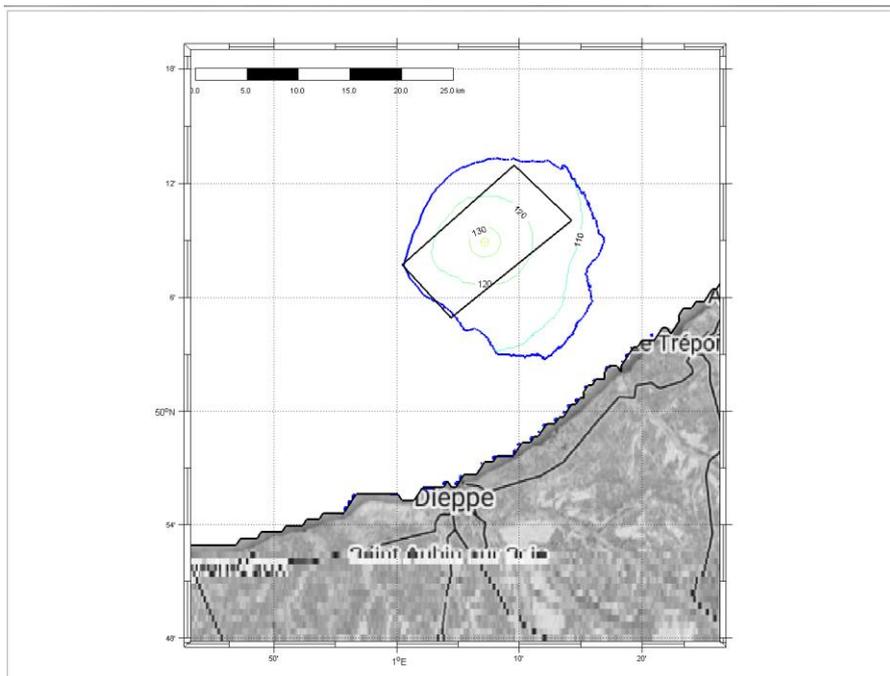
**Carte de l'Empreinte Sonore : Dragage**

Espec: Niveau sonore large bande  
 Saison: Hiver  
 Zone: Statistique réalisée au percentile 50% sur toute la colonne d'eau

Code Projet : QO-20140519-02.BRLEA\_Treport  
 Version Figure : 01A  
 Date Figure : 12/09/2016  
 Projection : Geographic  
 Ellipsoïde : WGS84  
 Sources externes :

**Quiet oceans**  
 www.quiet-oceans.com

65, Rue Nicolas Copernic  
 29200 Plouzané - France  
 www.quiet-oceans.com  
 contact@quiet-oceans.com  
 RCS BREEST 514 673 803



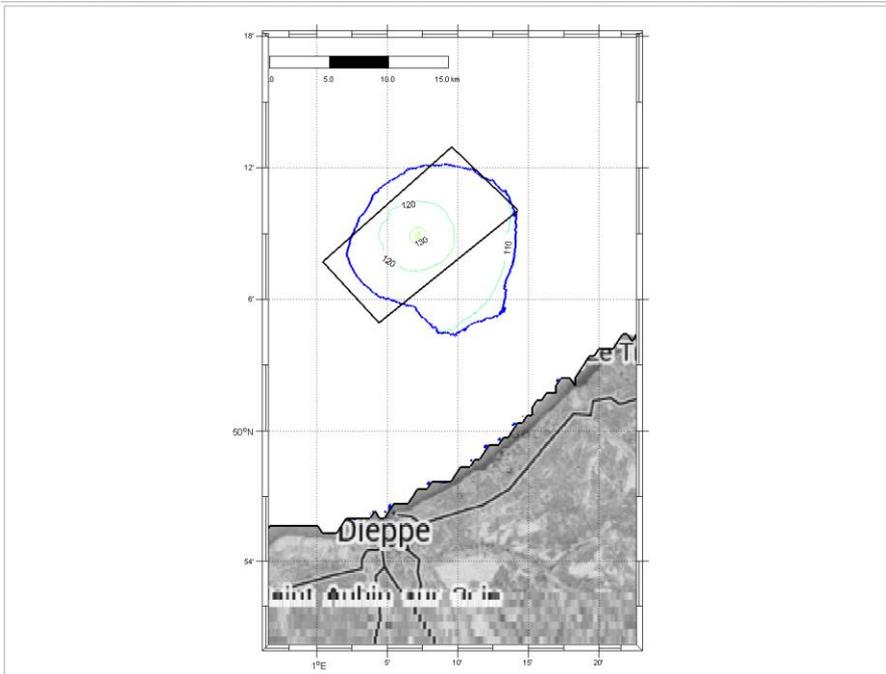
**Carte de l'Empreinte Sonore : Ensuellage**

Espec: Niveau sonore large bande  
 Saison: Hiver  
 Zone: Statistique réalisée au percentile 50% sur toute la colonne d'eau

Code Projet : QO-20140519-02.BRLEA\_Treport  
 Version Figure : 01A  
 Date Figure : 12/09/2016  
 Projection : Geographic  
 Ellipsoïde : WGS84  
 Sources externes :

**Quiet oceans**  
 www.quiet-oceans.com

65, Rue Nicolas Copernic  
 29200 Plouzané - France  
 www.quiet-oceans.com  
 contact@quiet-oceans.com  
 RCS BREEST 514 673 803



**Carte de l'Empreinte Sonore : Forage 2.2m**

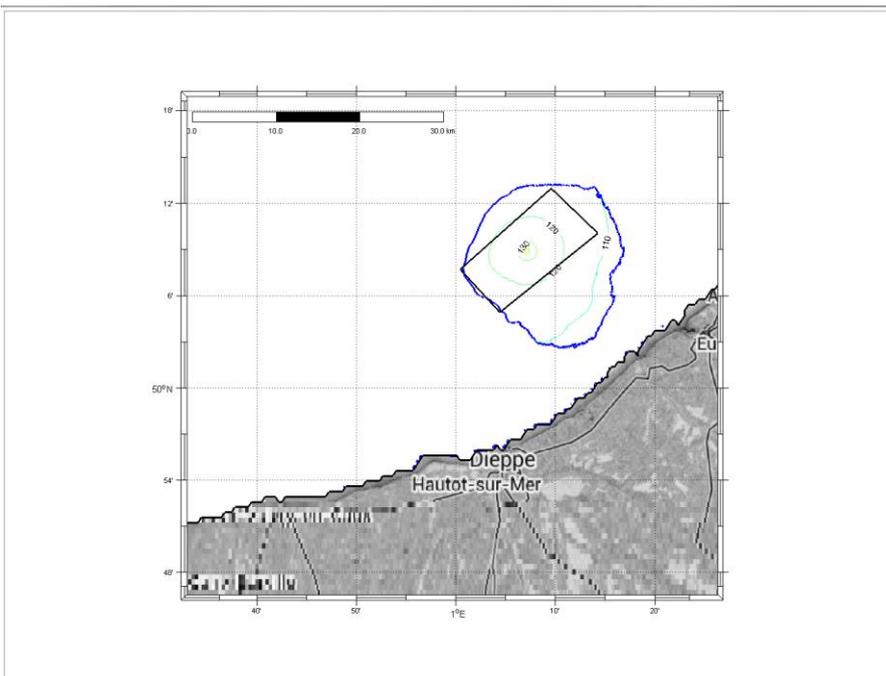
Especie : Niveau sonore large bande  
 Saison : Hiver  
 Zone : Statistique réalisée au percentile 50% sur toute la colonne d'eau




Code Projet : GO-20140519-02.BRL.EIA\_Treport  
 Version Figure : 01A  
 Date/Figure : 12/09/2016  
 Projection : Geographic  
 Ellipsoïde : WGS84  
 Sources externes :



45, Rue Nicolas Copernic  
 29200 Plouzané - France  
[www.quiet-oceans.com](http://www.quiet-oceans.com)  
[contact@quiet-oceans.com](mailto:contact@quiet-oceans.com)  
 RCS BREST 834 673 803



**Carte de l'Empreinte Sonore : Forage OSS 3.0m**

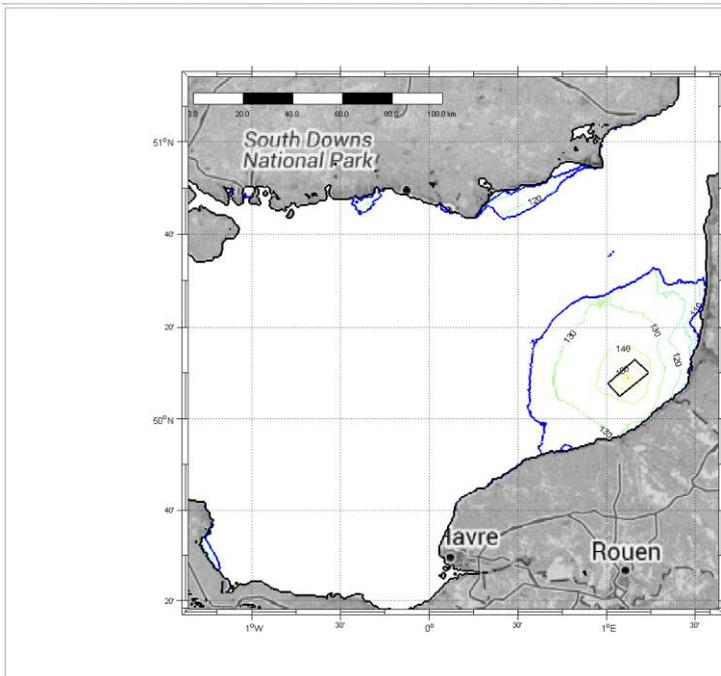
Especie : Niveau sonore large bande  
 Saison : Hiver  
 Zone : Statistique réalisée au percentile 50% sur toute la colonne d'eau




Code Projet : GO-20140519-02.BRL.EIA\_Treport  
 Version Figure : 01A  
 Date/Figure : 12/09/2016  
 Projection : Geographic  
 Ellipsoïde : WGS84  
 Sources externes :



45, Rue Nicolas Copernic  
 29200 Plouzané - France  
[www.quiet-oceans.com](http://www.quiet-oceans.com)  
[contact@quiet-oceans.com](mailto:contact@quiet-oceans.com)  
 RCS BREST 834 673 803

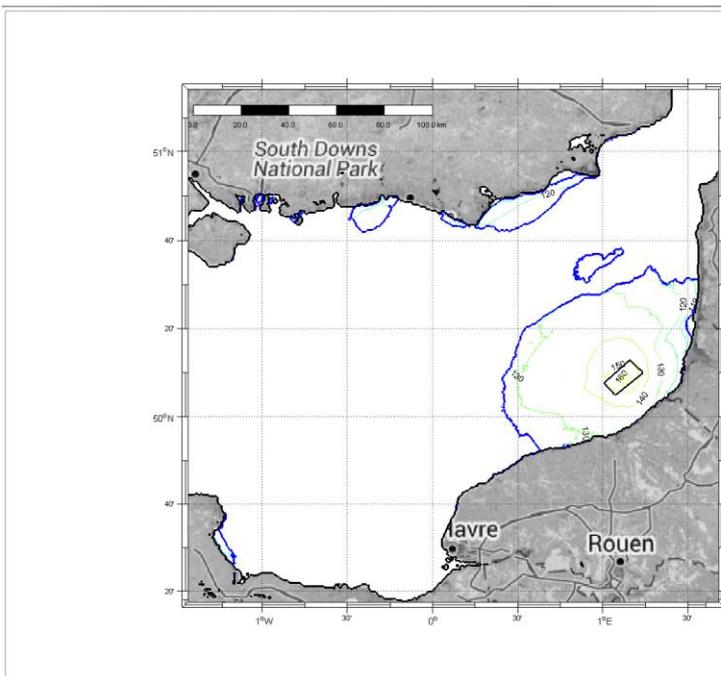


**Carte de l'Empreinte Sonore : Battage 2.2m**

Espec : Niveau sonore large bande  
 Saison : Hiver  
 Zone : Statistique réalisée au percentile 50% sur toute la colonne d'eau

Code Projet : GO.20140519.02.BRL.EIA\_Treport  
 Version Figure : 01A  
 Date/Figure : 12/09/2016  
 Projection : Geographic  
 Ellipsoïde : WGS84  
 Sources externes :

65, Rue Nicolas Copernic  
 29200 Plouzané - France  
[www.quiet-oceans.com](http://www.quiet-oceans.com)  
[contact@quiet-oceans.com](mailto:contact@quiet-oceans.com)  
 RCS BREST 824 673 803



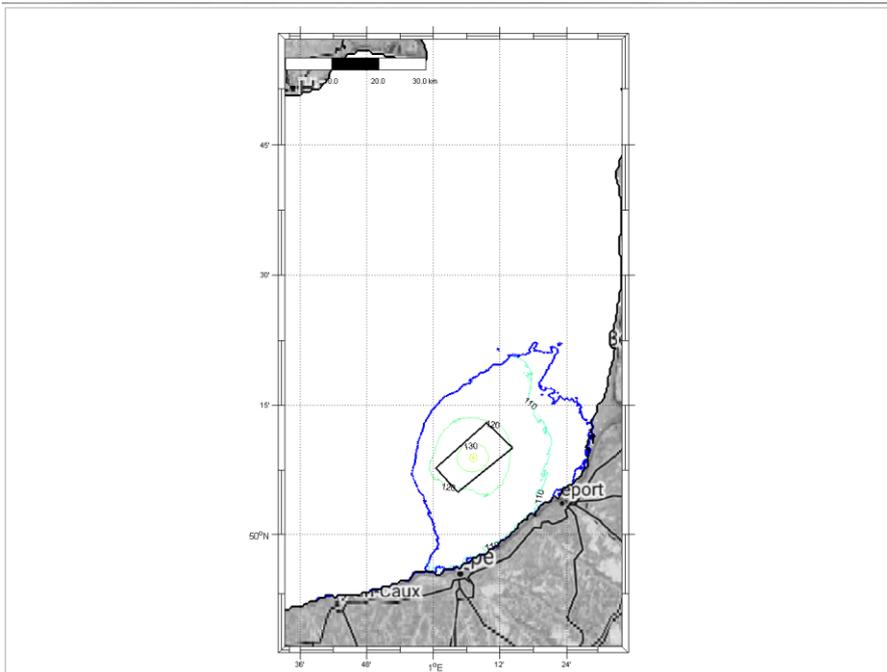
**Carte de l'Empreinte Sonore : Battage OSS 3.0m**

Espec : Niveau sonore large bande  
 Saison : Hiver  
 Zone : Statistique réalisée au percentile 50% sur toute la colonne d'eau

Code Projet : GO.20140519.02.BRL.EIA\_Treport  
 Version Figure : 01A  
 Date/Figure : 12/09/2016  
 Projection : Geographic  
 Ellipsoïde : WGS84  
 Sources externes :

65, Rue Nicolas Copernic  
 29200 Plouzané - France  
[www.quiet-oceans.com](http://www.quiet-oceans.com)  
[contact@quiet-oceans.com](mailto:contact@quiet-oceans.com)  
 RCS BREST 824 673 803

## 11.1.2 Saison estivale

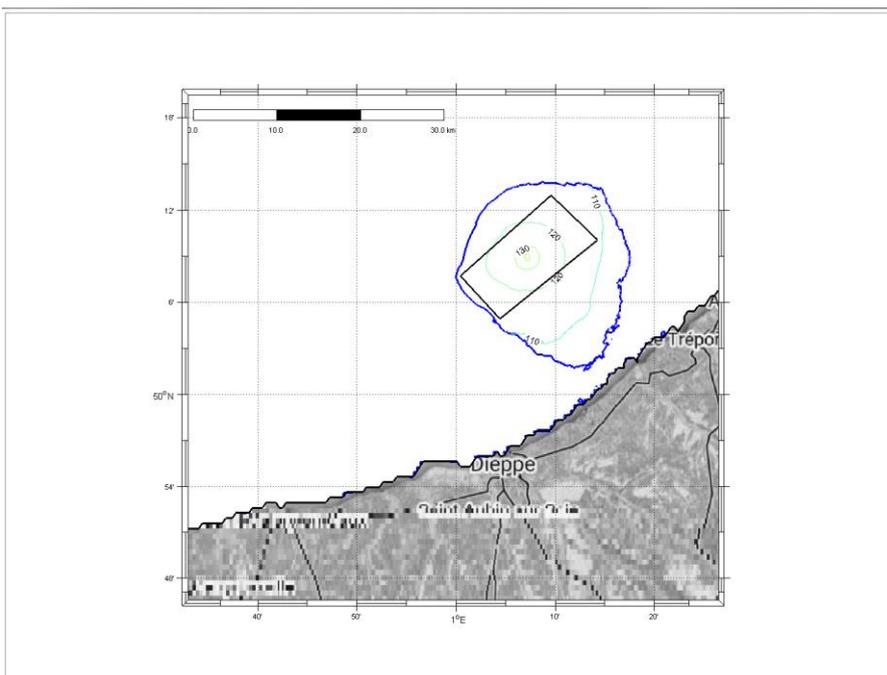


**Carte de l'Empreinte Sonore : Dragage**

Especie : Niveau sonore large bande  
 Saison : Eté  
 Zone : Statistique réalisée au percentile 50% sur toute la colonne d'eau

Code Projet : QO.20140519.02.BRL.EIA\_Treport  
 Version Figure : 01A  
 DateFigure : 12/09/2016  
 Projection : Geographic  
 Ellipsoïde : WGS84  
 Sources externes :

65, Rue Nicolas Copernic  
 29200 Plouzané - France  
[www.quiet-oceans.com](http://www.quiet-oceans.com)  
[contact@quiet-oceans.com](mailto:contact@quiet-oceans.com)  
 RCS BRETAGNE 524 873 803

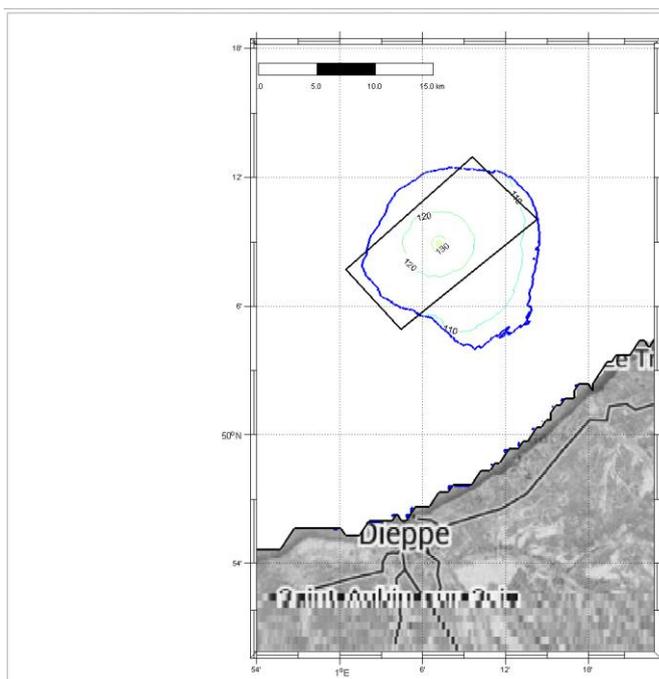


**Carte de l'Empreinte Sonore : Ensuillage**

Especie : Niveau sonore large bande  
 Saison : Eté  
 Zone : Statistique réalisée au percentile 50% sur toute la colonne d'eau

Code Projet : QO.20140519.02.BRL.EIA\_Treport  
 Version Figure : 01A  
 DateFigure : 12/09/2016  
 Projection : Geographic  
 Ellipsoïde : WGS84  
 Sources externes :

65, Rue Nicolas Copernic  
 29200 Plouzané - France  
[www.quiet-oceans.com](http://www.quiet-oceans.com)  
[contact@quiet-oceans.com](mailto:contact@quiet-oceans.com)  
 RCS BRETAGNE 524 873 803



Carte de l'Empreinte Sonore : Forage 2.2m

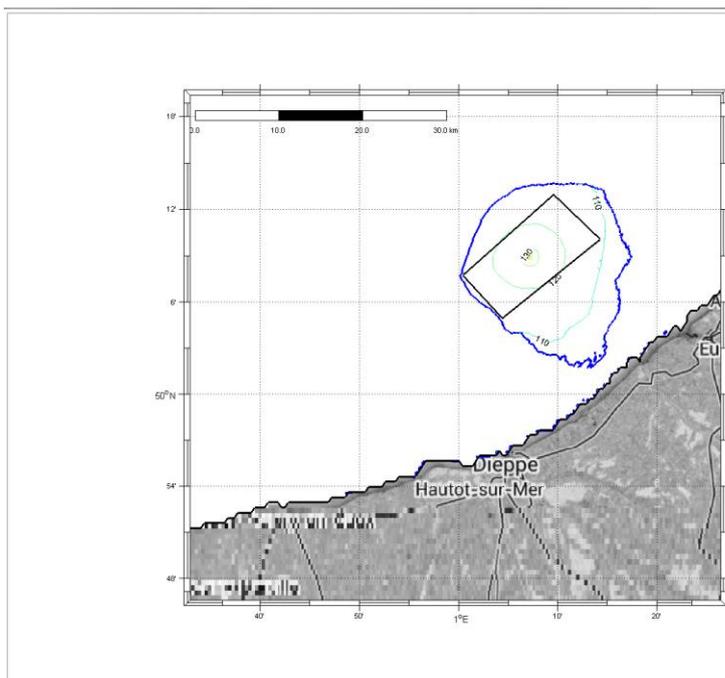
Especie : Niveau sonore large bande  
 Saison : Eté  
 Zone : Statistique réalisée au percentile 50% sur toute la colonne d'eau



Code Projet : QO.20140519.02.BRLEA\_Treport  
 Version Figure : 01A  
 Date/Figure : 12/09/2016  
 Projection : Geographic  
 Ellipsoïde : WGS84  
 Sources externes :



65, Rue Nicolas Copernic  
 29200 Plouzané - France  
[www.quiet-oceans.com](http://www.quiet-oceans.com)  
[contact@quiet-oceans.com](mailto:contact@quiet-oceans.com)  
 RCS BREST 824 873 803



Carte de l'Empreinte Sonore : Forage OSS 3.0m

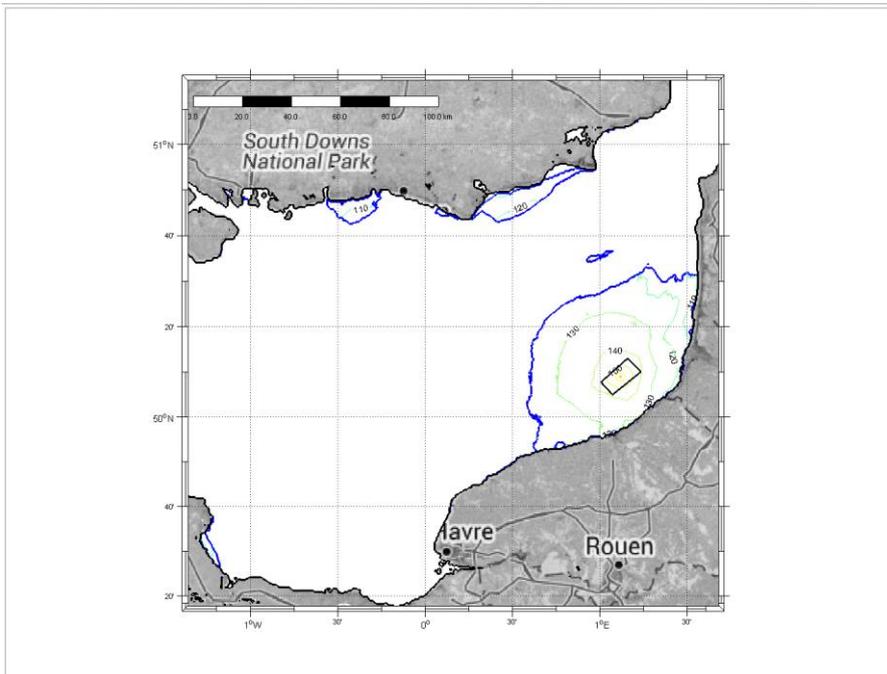
Especie : Niveau sonore large bande  
 Saison : Eté  
 Zone : Statistique réalisée au percentile 50% sur toute la colonne d'eau



Code Projet : QO.20140519.02.BRLEA\_Treport  
 Version Figure : 01A  
 Date/Figure : 12/09/2016  
 Projection : Geographic  
 Ellipsoïde : WGS84  
 Sources externes :



65, Rue Nicolas Copernic  
 29200 Plouzané - France  
[www.quiet-oceans.com](http://www.quiet-oceans.com)  
[contact@quiet-oceans.com](mailto:contact@quiet-oceans.com)  
 RCS BREST 824 873 803

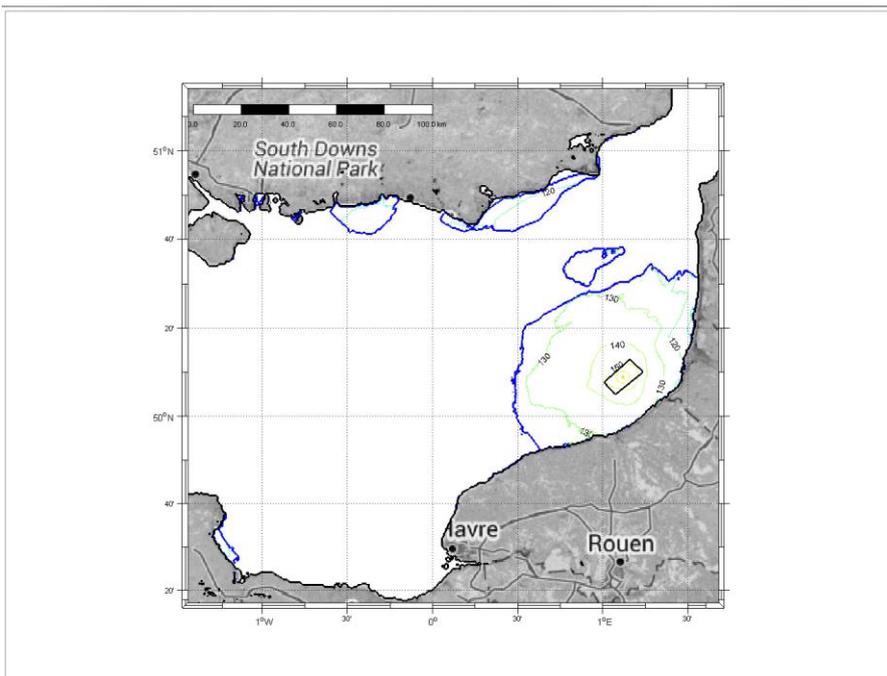


**Carte de l'Empreinte Sonore : Battage 2.2m**

Especie : Niveau sonore large bande  
 Saison : Eté  
 Zone : Statistique réalisée au percentile 50% sur toute la colonne d'eau

Code Projet : GO-20140519.02.BRL.EIA\_Treport  
 Version Figure : 01A  
 Date/Figure : 12/09/2016  
 Projection : Geographic  
 Ellipsoïde : WGS84  
 Sources externes :

65, Rue Nicolas Copernic  
 29200 Plouzané - France  
[www.quiet-oceans.com](http://www.quiet-oceans.com)  
[contact@quiet-oceans.com](mailto:contact@quiet-oceans.com)  
 RCS BREST 824 673 803



**Carte de l'Empreinte Sonore : Battage OSS 3.0m**

Especie : Niveau sonore large bande  
 Saison : Eté  
 Zone : Statistique réalisée au percentile 50% sur toute la colonne d'eau

Code Projet : GO-20140519.02.BRL.EIA\_Treport  
 Version Figure : 01A  
 Date/Figure : 12/09/2016  
 Projection : Geographic  
 Ellipsoïde : WGS84  
 Sources externes :

65, Rue Nicolas Copernic  
 29200 Plouzané - France  
[www.quiet-oceans.com](http://www.quiet-oceans.com)  
[contact@quiet-oceans.com](mailto:contact@quiet-oceans.com)  
 RCS BREST 824 673 803

## 11.2 Effets du changement du référentiel de sensibilité auditive et des seuils de tolérance

Jusqu'en 2016, le cadre international pour l'évaluation des risques sonores sur les mammifères marins repose sur le guide Southall 2007. En 2016, alors que l'étude d'impact bruit sous-marin du projet des Éoliennes en Mer de Dieppe et Le Tréport était finalisée, une mise à jour de ce guide a été publiée.

Cette annexe a pour objectif de quantifier les changements induits par la mise à jour du référentiel, tout élément de l'étude restant égal par ailleurs. Ainsi, pour chaque classe d'espèce et pour chaque atelier du projet, une évaluation des distances et surfaces de dommages physiologiques est proposée en tenant compte du nouveau consensus sur les seuils de tolérance acoustique parus en 2016 (NOAA, 2016). A titre de comparaison, les distances et surfaces obtenues par le consensus Southall 2007 sont aussi rappelées.

Dans ce nouveau consensus, aucune modification n'est apportée quant aux seuils de tolérance pour les poissons et les tortues marines car ce nouveau consensus ne s'intéresse qu'aux cétacés, pinnipèdes et siréniens.

Cette annexe est organisée de la façon suivante : la méthodologie générale d'évaluation des risques sonores mise en œuvre dans l'étude d'impact est rappelée dans une première partie ainsi que les nouveaux seuils selon (NOAA, 2016). Le second paragraphe rapporte les distances de risques pour les deux référentiels (Southall et al. 2007) et (NOAA, 2016) pour les quatre catégories de mammifères marins concernées :

- ▶ les cétacés « hautes fréquences »,
- ▶ les cétacés « moyennes fréquences »,
- ▶ les cétacés « basses fréquences »,
- ▶ et les pinnipèdes.

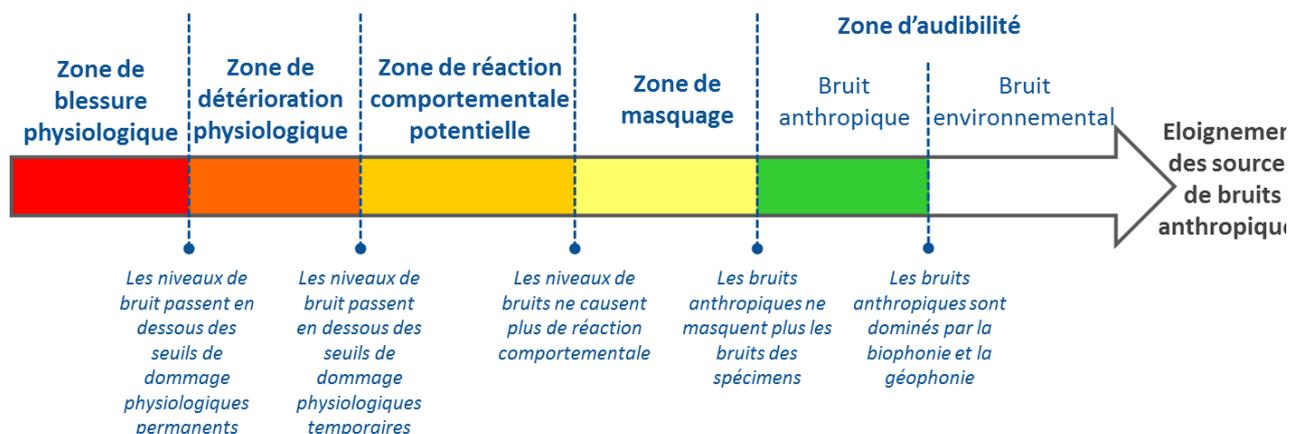
## 11.2.1 Rappel de la méthodologie d'évaluation des impacts sonores

### 11.2.1.1 Hiérarchisation des risques sonores

Les risques potentiels sont d'autant plus importants que les individus se trouvent à proximité d'une ou plusieurs sources de bruit et sont exposés à un bruit intense. Une hiérarchisation des risques sur un axe de niveau de bruit décroissant a été établie à partir de la littérature et des capacités scientifiques et techniques actuelles à quantifier les distances de risques (Figure 22). Au fur et à mesure que les niveaux de bruit se réduisent, les zones de risques changent de natures. Le passage d'une zone de risque à l'autre correspond au franchissement d'un seuil biologique fournit, le cas échéant, par la recherche et par la littérature (Dooling & Blumenrath, 2013), bien que ces seuils de tolérances et d'effet du bruit qui ne sont pas nécessairement connus pour toutes les espèces:

- ▶ une zone de blessure physiologique qui correspond à une zone dans laquelle les niveaux de bruit dépassent les seuils de dommage physiologiques permanents (en anglais PTS, Permanent Threshold Shift) provoquant des lésions irréversibles;
- ▶ une zone de détérioration physiologique qui correspond à une zone dans laquelle les niveaux de bruit sont susceptibles de provoquer des dommages physiologiques temporaires (en anglais TTS, Temporary Threshold Shift) provoquant des lésions réversibles. Les cellules constitutives retrouvent leur état initial après un certain temps hors d'une exposition importante au bruit;
- ▶ une zone de réaction comportementale (en anglais BDT, Behaviour Disturbance Threshold) qui correspond à une zone dans laquelle les niveaux de bruit sont susceptibles de provoquer une gêne suffisante pour que les individus interrompent leur activité normale pour fuir la zone. Les conséquences ne sont pas directes, mais peuvent provoquer une augmentation de la consommation d'énergie individuelle, d'autant plus critique que l'individu est jeune, une interruption dans leurs activités de chasse ou de socialisation ou bien encore un changement forcé d'habitat. In fine, les impacts peuvent se faire ressentir à l'échelle des individus et de la population;
- ▶ une zone de masquage qui correspond à une zone dans laquelle les sons émis et reçus par les spécimens lors de leurs activités de chasse, de socialisation ou d'évitement des prédateurs, sont couverts par les bruits anthropiques. Ce type d'effet est pertinent pour les bruits continus. Dans cette zone, le rayon d'interaction des spécimens est réduit, ce qui conduit à des impacts potentiels à l'échelle des individus et de la population;
- ▶ une zone d'audibilité, zone sans risque, qui correspond à une zone dans laquelle les bruits anthropiques, biologiques et naturels sont perçus par les individus, sans pour autant causer d'effet particulier connu.

Figure 136 : Graduation des risques biologiques en fonction de l'éloignement à la ou les sources de bruit anthropique.



Source (Andersson, Persson, Lucke, Folegot, & André, 2015)

### 11.2.1.2 Classification acoustique des espèces de mammifères marins

Les cétacés et les pinnipèdes peuvent être répertoriés en 4 classes en fonction de leur sensibilité auditive et de différents paramètres liés à la qualité de l'écoute (milieu de propagation, morphologie, ...) (Southall, et al., 2007). Chaque espèce d'une même classe présente :

- ▶ une gamme de fréquence d'audition et de sensibilité similaire ;
- ▶ des seuils de dommages temporaires et permanents identiques.

Les quatre classes de mammifères marins sont (

La publication (Southall, et al., 2007) est un consensus international de la communauté scientifique qui se fonde sur la littérature scientifique disponible sur une période de temps significative. Il est fortement déconseillé de ne se fonder que sur des études particulières, en l'occurrence si elles n'ont pas fait l'objet de validation par les pairs.

L'étude d'impact réalisée pour le projet reprend les seuils de (Southall, 2007). Ils sont plus exigeants que l'étude au Danemark. L'utilisation des seuils de (Southall, 2007), telle que réalisée dans l'étude d'impact, offre la possibilité de comparer les résultats des études réalisées pour les projets éoliens posés en Manche et sur la façade Atlantique.

Il est essentiel de comprendre que le Guide édité par la NOAA en Juillet (NOAA, 2016), outre son caractère très récent, modifie non seulement les seuils, mais de façon plus fondamentale, la manière de quantifier l'énergie sonore perçue par chaque type d'espèce. Les effets de ces modifications ne sont pas établis à ce jour, les seuils ayant été réduits, mais la quantité d'énergie sonore perçue ayant aussi été limitée. La combinaison des deux facteurs n'est pas prédictible sans un développement informatique conséquent et une étude paramétrique dédiée qu'il s'agit encore de réaliser. Il est intéressant de noter que le risque comportemental n'est pas adressé dans (NOAA, 2016).

Au stade actuel des connaissances, il est ainsi raisonnable de conserver l'évaluation des impacts au moyen des seuils (Southall, 2007), complétés, comme proposé au sein de l'étude d'impact par des approches sur les seuils comportementaux. Ceux-ci sont pleinement validés par la communauté scientifique, des moyens de calcul adaptés existent et ces seuils ont été utilisés pour la majorité des projets français et constituent en ce sens une base de travail

acceptable. Toutefois une étude comparative a été menée afin d'évaluer les différences des deux approches (Southall, 2007) et (NOAA, 2016) sur le cas précis de ce projet. Cette étude est disponible dans l'annexe 11.2. Les conclusions de cette étude comparative démontrent, pour ce projet, que le référentiel Southall 2007 est plus conservateur pour les espèces de mammifères marins hormis les cétacés de la catégorie basse fréquence, rare dans la zone d'étude. Aussi, les résultats présentés dans cette étude se basent sur le consensus Southall 2007.

Tableau 4):

- ▶ Cétacés hautes fréquences;
- ▶ Cétacés moyennes fréquences;
- ▶ Cétacés basses fréquences;
- ▶ Pinnipèdes.

### 11.2.1.3 Nouveaux critères de dépassement des seuils

La méthode retenue repose sur une analyse absolue des niveaux d'exposition sonore et consiste à comparer les empreintes sonores de chaque atelier du projet à des valeurs absolues de seuil biologique définis pour chaque classe d'espèce.

Historiquement en 2007, Southall et al ont proposé une première version des seuils de dommages physiologiques temporaires et permanents en fonction de la classe d'espèce. Ces seuils constituent des consensus internationaux. En 2009, Lucke a proposé des seuils spécifiques pour le marsouin commun ainsi qu'un seuil de modification du comportement (Tableau 29). Les fonctions de sensibilité auditive sont adossées à chaque classe d'espèce (Tableau 30).

Ces seuils, uniquement pour les mammifères marins, repris et amendés par des études scientifiques récentes menées en 2013 par l'administration américaine (NOAA) a débouché sur un nouveau consensus publié en 2016 par la NOAA (Tableau 29). Dans cette nouvelle version, les changements concernent (Tableau 30) :

- ▶ les niveaux acoustiques de sensibilité pouvant engendrer des dommages physiologiques qui sont globalement abaissés ;
- ▶ et les bandes d'audition qui sont significativement plus étroites ce qui a comme conséquence de réduire les niveaux acoustiques perçus.

Par manque de connaissance, le seuil de réaction comportementale n'est pas spécifié dans ce consensus et n'est donc pas traité dans cette annexe.

Les conclusions de cette étude comparative démontrent, pour ce projet, que le référentiel Southall 2007 est plus conservateur pour les espèces de mammifères marins hormis les cétacés de la catégorie basse fréquence, rare dans la zone d'étude. Aussi, les résultats présentés dans cette étude se basent sur le consensus Southall 2007.

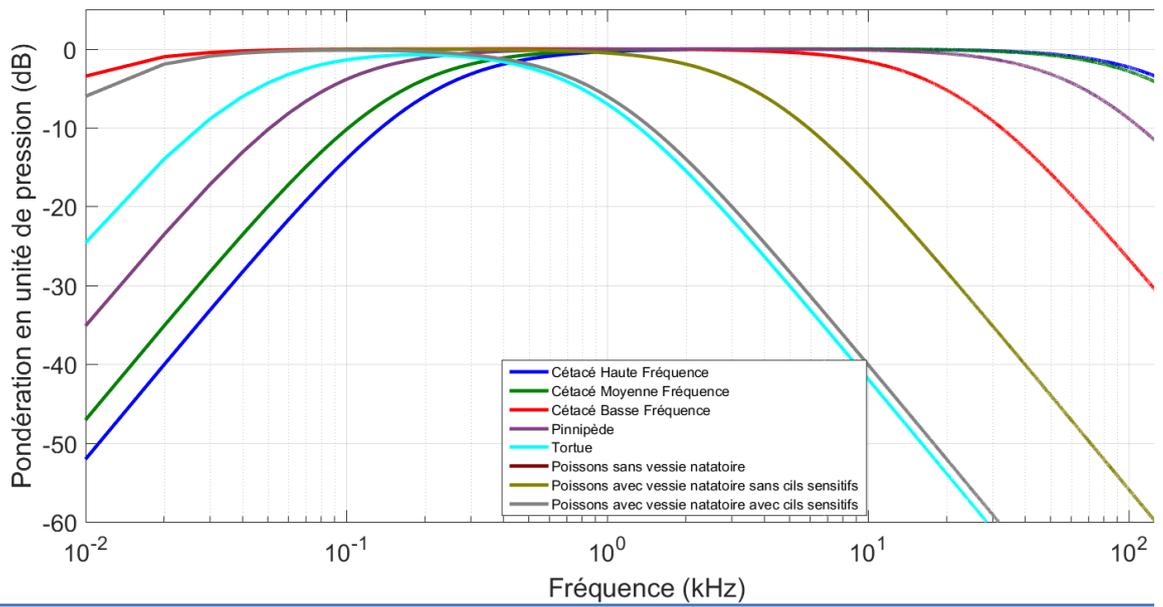
Tableau 29: Synthèse des seuils de perturbation sonore pour les mammifères marins selon les deux référentiels (Southall 2007) et (NOAA 2016).

Types d'espèces	Reference	Gamme de Fréquences de perception	Bruits impulsifs Exprimés en Niveau d'Exposition Sonore Unité dB réf. 1µPa²s			Bruits continus Exprimés en Niveau de Pression Sonore Unité dB réf. 1µPa		
			Seuil de réaction	Seuil de dommage temporaire	Seuil de dommage permanent	Seuil de réaction	Seuil de dommage temporaire	Seuil de dommage permanent
<b>Marsouin Commun</b>	<i>Lucke 2009 &amp; Southall 2007</i>	200Hz-180kHz	145	164	179	NC	224	230
	<i>NOAA 2016</i>	12kHz-140kHz	NA	NA	NA	NA	NA	NA
<b>Cétacés Hautes Fréquences</b>	<i>Southall 2007</i>	200Hz-180kHz	NC	183	198	NC	224	230
	<i>NOAA 2016</i>	12kHz-140kHz	NC	140	155	NC	153	173
<b>Cétacés Moyennes Fréquences</b>	<i>Southall 2007</i>	150Hz-160kHz	NC	183	198	NC	224	230
	<i>NOAA 2016</i>	8.8kHz -10kHz	NC	170	185	NC	178	198
<b>Cétacés Basses Fréquences</b>	<i>Southall 2007</i>	7Hz-22kHz	NC	183	198	NC	224	230
	<i>NOAA 2016</i>	200 Hz-19kHz	NC	168	183	NC	179	199
<b>Pinnipèdes dans l'eau</b>	<i>Southall 2007</i>	75Hz-75kHz	NC	171	186	NC	212	218
	<i>NOAA 2016</i>	1.9kHz -30kHz	NC	170	185	NC	181	201

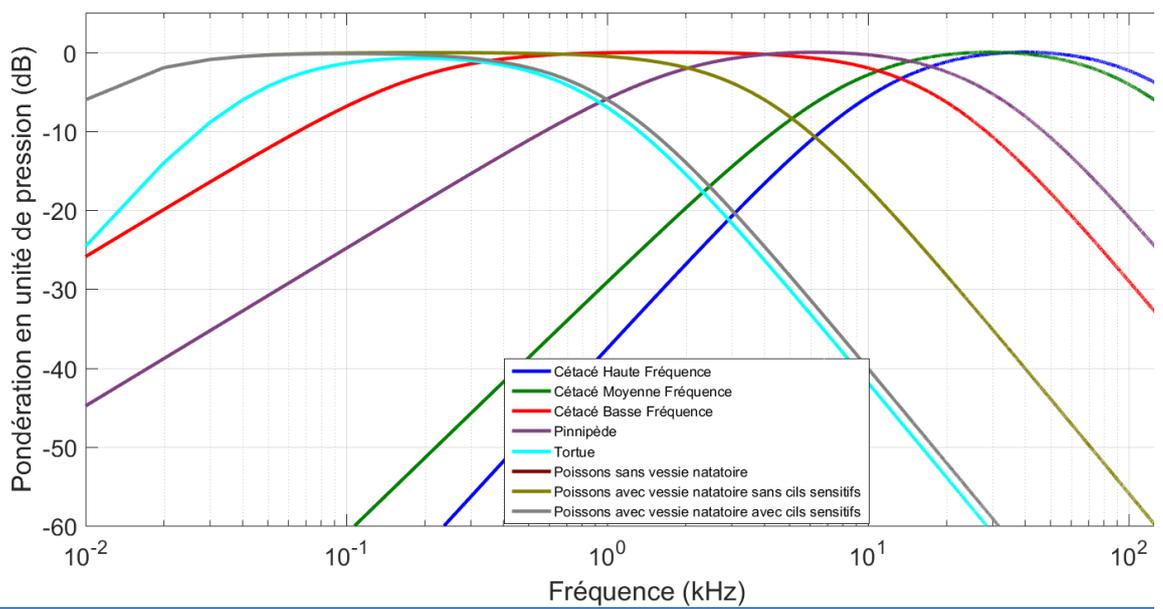
NA : Non applicable - NC : non connu à ce jour

Tableau 30 : Fonctions de pondération pour les différentes espèces en fonction du référentiel

Southall 2007



NOAA 2016



## 11.2.2 Evaluation des distances et surfaces de risque de dommage physiologique pour les cétacés et les pinnipèdes

Suite au changement de référentiel relatif à l'estimation des risques physiologiques directs survenu en 2016, Ce chapitre détaille les distances et surfaces de risque, en mètre et en km<sup>2</sup> respectivement, obtenues en fonction :

- ✓ De la classe d'espèce
- ✓ Du référentiel Southall 2007 ou NOAA 2016
- ✓ De l'atelier de construction ou d'exploitation
- ✓ Du dommage physiologique temporaire ou permanent

Les colonnes « min » et « max » expriment la variabilité azimutale des distances autour de chaque atelier.

Les résultats des modélisations démontrent que les effets du passage du référentiel (Southall, 2007) au référentiel (NOAA, 2016) sont différents selon les ateliers et selon les espèces.

### 11.2.2.1 Limites géographiques des risques sonores pour les cétacés « hautes fréquences »

Les Tableau 31 et Tableau 32 reportent les distances de risques pour tous les ateliers du projet pour les cétacés de la catégorie « haute fréquence », respectivement pour le nouveau référentiel (NOAA 2016) et pour le référentiel (Southall 2007).

Les distances de risques physiologiques directs vis-à-vis des cétacés « hautes fréquences », qu'ils soient temporaires ou permanents, augmentent pour les ateliers de dragage et d'ensouillage. Elles diminuent pour les opérations de battage, réduites à quelques dizaines de mètres autour du pieu lorsque la mesure de réduction MR5 est mise en œuvre. Elles restent relativement inchangées pour les ateliers de forage, tandis qu'elles restent non significatives pour les opérations de maintenance et pour l'exploitation du parc.

Tableau 31 : Surfaces et limites des zones de risque pour les cétacés hautes fréquences à partir du consensus NOAA2016

	Consensus NOAA2016							
	Zone de dommage physiologique temporaire				Zone de dommage physiologique permanent			
	Surface	Distance (m)			Surface	Distance (m)		
	km <sup>2</sup>	min	moyenne	max	km <sup>2</sup>	min	moyenne	max
Dragage	0,2	177	219	287	0	76	102	144
Ensouillage	0,0	30	66	98	-	3	3	3
Forage Ø2.2m	-	8	8	8	-	1	1	1
Forage OSS Ø3.0m	-	12	12	12	-	2	2	2
Battage Ø2.2m	0,1	120	145	197	-	4	4	4
Battage Ø2.2m avec MR5	-	14	14	14	-	2	2	2
Battage OSS Ø3.0m	0,1	130	175	236	-	6	6	6
Battage OSS Ø3.0m avec MR5	-	21	21	21	-	3	3	3
Maintenance	-	-	-	-	-	-	-	-
Exploitation	-	1	1	1	-	-	-	-
Battage Ø2.2m/Battage Courseulles Ø7m	0,3	120	145	197	0	17	17	17
Battage Ø2.2m avec MR5/Battage Courseulles Ø7m	-	14	14	14	-	2	2	2

Tableau 32 : Surfaces et limites des zones de risque pour les cétacés hautes fréquences à partir du consensus Southall 2007 & Lucke2009

	Consensus Southall 2007/Lucke 2009							
	Zone de dommage physiologique temporaire				Zone de dommage physiologique permanent			
	Surface	Distance (m)			Surface	Distance (m)		
	km <sup>2</sup>	min	moyenne	max	km <sup>2</sup>	min	moyenne	max
Dragage	-	18	18	18	-	3	3	3
Ensouillage	-	5	5	5	-	-	-	-
Forage Ø2.2m	-	3	3	3	-	-	-	-
Forage OSS Ø3.0m	-	5	5	5	-	-	-	-
Battage Ø2.2m	0,3	242	278	305	0	15	15	15
Battage Ø2.2m avec MR5	0,1	120	153	197	-	8	8	8
Battage OSS Ø3.0m	0,5	360	379	430	0	30	44	56
Battage OSS Ø3.0m avec MR5	0,1	153	192	241	-	12	12	12
Maintenance	-	-	-	-	-	-	-	-
Exploitation	-	-	-	-	-	-	-	-
Battage Ø2.2m/Battage Courseulles Ø7m	4,8	625	970	1 371	0	66	66	66
Battage Ø2.2m avec MR5/Battage Courseulles Ø7m	4,6	625	970	1 371	-	8	8	8

### 11.2.2.2 Limites géographiques des risques sonores pour les cétacés « moyennes fréquences »

Les Tableau 33 et Tableau 34 reportent les distances de risques pour tous les ateliers du projet pour les cétacés de la catégorie « moyenne fréquence », respectivement pour le nouveau référentiel (NOAA 2016) et pour le référentiel (Southall 2007).

Les risques, limités à quelques dizaines de mètres dans le référentiel (Southall 2007), sont réduits à moins de dix mètres dans le référentiel (NOAA 2016) pour les cétacés « moyennes fréquences ».

Tableau 33 : Surfaces et limites des zones de risque pour les cétacés moyennes fréquences à partir du consensus NOAA2016

	Consensus NOAA2016							
	Zone de dommage physiologique temporaire				Zone de dommage physiologique permanent			
	Surface	Distance (m)			Surface	Distance (m)		
	km <sup>2</sup>	min	moyenne	max	km <sup>2</sup>	min	moyenne	max
Dragage	-	4	4	4	-	-	-	-
Ensouillage	-	-	-	-	-	-	-	-
Forage Ø2.2m	-	-	-	-	-	-	-	-
Forage OSS Ø3.0m	-	-	-	-	-	-	-	-
Battage Ø2.2m	-	1	1	1	-	-	-	-
Battage Ø2.2m avec MR5	-	-	-	-	-	-	-	-
Battage OSS Ø3.0m	-	2	2	2	-	-	-	-
Battage OSS Ø3.0m avec MR5	-	-	-	-	-	-	-	-
Maintenance	-	-	-	-	-	-	-	-
Exploitation	-	-	-	-	-	-	-	-
Battage Ø2.2m/Battage Courseulles Ø7m	-	5	5	5	-	-	-	-
Battage Ø2.2m avec MR5 /Battage Courseulles Ø7m	-	-	-	-	-	-	-	-

Tableau 34 : Surfaces et limites des zones de risque pour les cétacés moyennes fréquences à partir du consensus Southall 2007

	Consensus Southall 2007							
	Zone de dommage physiologique temporaire				Zone de dommage physiologique permanent			
	Surface	Distance (m)			Surface	Distance (m)		
	km <sup>2</sup>	min	moyenne	max	km <sup>2</sup>	min	moyenne	max
Dragage	-	2	2	2	-	-	-	-
Ensouillage	-	-	-	-	-	-	-	-
Forage Ø2.2m	-	-	-	-	-	-	-	-
Forage OSS Ø3.0m	-	-	-	-	-	-	-	-
Battage Ø2.2m	-	12	12	12	-	2	2	2
Battage Ø2.2m avec MR5	-	6	6	6	-	-	-	-
Battage OSS Ø3.0m	-	17	17	17	-	3	3	3
Battage OSS Ø3.0m avec MR5	-	9	9	9	-	1	1	1
Maintenance	-	-	-	-	-	-	-	-
Exploitation	-	-	-	-	-	-	-	-
Battage Ø2.2m/Battage Courseulles Ø7m	0,0	51	51	51	-	7	7	7
Battage Ø2.2m avec MR5 /Battage Courseulles Ø7m	-	6	6	6	-	-	-	-

### 11.2.2.3 Limites géographiques des risques sonores pour les cétacés « basses fréquences »

Les Tableaux 35 et Tableau 36 reportent les distances de risques pour tous les ateliers du projet pour les cétacés de la catégorie « basse fréquence », respectivement pour le nouveau référentiel (NOAA 2016) et pour le référentiel (Southall 2007).

Les distances d'un risque de dommage physiologique direct, temporaire ou permanent, augmentent d'environ un facteur proche de 2 quels que soient les ateliers du projet.

Tableau 35 : Surfaces et limites des zones de risque pour les cétacés basses fréquences à partir du consensus NOAA2016

	Consensus NOAA2016							
	Zone de dommage physiologique temporaire				Zone de dommage physiologique permanent			
	Surface km <sup>2</sup>	Distance (m)			Surface km <sup>2</sup>	Distance (m)		
	min	moyenne	max		min	moyenne	max	
Dragage	-	10	10	10	-	2	2	2
Ensouillage	-	3	3	3	-	-	-	-
Forage Ø2.2m	-	2	2	2	-	-	-	-
Forage OSS Ø3.0m	-	3	3	3	-	-	-	-
Battage Ø2.2m	0,2	223	255	287	0,0	15	15	15
Battage Ø2.2m avec MR5	0,1	150	179	236	-	8	8	8
Battage OSS Ø3.0m	0,5	328	361	404	0,0	30	44	56
Battage OSS Ø3.0m avec MR5	0,2	177	205	251	-	12	12	12
Maintenance	-	24	24	24	-	4	4	4
Exploitation	-	-	-	-	-	-	-	-
Battage Ø2.2m/Battage Courseulles Ø7m	4,7	625	970	1 371	0,0	66	66	66
Battage Ø2.2m avec MR5 /Battage Courseulles Ø7m	4,6	625	970	1 371	-	8	8	8

Tableau 36 : Surfaces et limites des zones de risque pour les cétacés basses fréquences à partir du consensus Southall 2007

	Consensus Southall 2007							
	Zone de dommage physiologique temporaire				Zone de dommage physiologique permanent			
	Surface km <sup>2</sup>	Distance (m)			Surface km <sup>2</sup>	Distance (m)		
	min	moyenne	max		min	moyenne	max	
Dragage	-	2	2	2	-	-	-	-
Ensouillage	-	-	-	-	-	-	-	-
Forage Ø2.2m	-	-	-	-	-	-	-	-
Forage OSS Ø3.0m	-	-	-	-	-	-	-	-
Battage Ø2.2m	0,1	76	118	153	-	5	5	5
Battage Ø2.2m avec MR5	-	19	19	19	-	3	3	3
Battage OSS Ø3.0m	0,1	130	173	234	-	8	8	8
Battage OSS Ø3.0m avec MR5	0,0	56	90	140	-	4	4	4
Maintenance	-	-	-	-	-	-	-	-
Exploitation	-	-	-	-	-	-	-	-
Battage Ø2.2m/Battage Courseulles Ø7m	0,6	76	118	153	0,0	23	23	23
Battage Ø2.2m avec MR5 /Battage Courseulles Ø7m	0,5	-	121	407	-	3	3	3

### 11.2.2.4 Limites géographiques des risques sonores pour les pinnipèdes

Les Tableaux 37 et Tableau 38 reportent les distances de risques pour tous les ateliers du projet pour les cétacés de la catégorie « moyenne fréquence », respectivement pour le nouveau référentiel (NOAA 2016) et pour le référentiel (Southall 2007).

Les distances de risque d'un dommage physiologique pour les pinnipèdes sont réduites dans le nouveau référentiel (NOAA 2016) pour tous les ateliers par rapport au référentiel (Southall 2007).

Tableau 37 : Surfaces et limites des zones de risque pour les pinnipèdes à partir du consensus NOAA2016

	Consensus NOAA2016							
	Zone de dommage physiologique temporaire				Zone de dommage physiologique permanent			
	Surface	Distance (m)			Surface	Distance (m)		
	km <sup>2</sup>	min	moyenne	max	km <sup>2</sup>	min	moyenne	max
Dragage	-	6	6	6	-	-	-	-
Ensuillage	-	1	1	1	-	-	-	-
Forage Ø2.2m	-	-	-	-	-	-	-	-
Forage OSS Ø3.0m	-	-	-	-	-	-	-	-
Battage Ø2.2m	-	14	14	14	-	2	2	2
Battage Ø2.2m avec MR5	-	7	7	7	-	1	1	1
Battage OSS Ø3.0m	0,0	30	58	93	-	3	3	3
Battage OSS Ø3.0m avec MR5	-	11	11	11	-	2	2	2
Maintenance	-	11	11	11	-	2	2	2
Exploitation	-	-	-	-	-	-	-	-
Battage Ø2.2m/Battage Courseulles Ø7m	0,0	61	61	61	-	9	9	9
Battage Ø2.2m avec MR5 /Battage Courseulles Ø7m	-	7	7	7	-	1	1	1

Tableau 38 : Surfaces et limites des zones de risque pour les pinnipèdes à partir du consensus Southall 2007

	Consensus Southall 2007							
	Zone de dommage physiologique temporaire				Zone de dommage physiologique permanent			
	Surface	Distance (m)			Surface	Distance (m)		
	km <sup>2</sup>	min	moyenne	max	km <sup>2</sup>	min	moyenne	max
Dragage	-	8	8	8	-	1	1	1
Ensuillage	-	3	3	3	-	-	-	-
Forage Ø2.2m	-	2	2	2	-	-	-	-
Forage OSS Ø3.0m	-	3	3	3	-	-	-	-
Battage Ø2.2m	0,2	185	228	287	0	13	13	13
Battage Ø2.2m avec MR5	0,1	120	166	208	-	7	7	7
Battage OSS Ø3.0m	0,4	281	307	349	0	-	8	47
Battage OSS Ø3.0m avec MR5	0,1	150	194	251	-	10	10	10
Maintenance	-	-	-	-	-	-	-	-
Exploitation	-	-	-	-	-	-	-	-
Battage Ø2.2m/Battage Courseulles Ø7m	3,7	624	831	1 221	0	58	58	58
Battage Ø2.2m avec MR5 /Battage Courseulles Ø7m	3,6	624	831	1 221	-	7	7	7

### 11.2.3 Conclusions

Jusqu'en 2016, le cadre international pour l'évaluation des risques sonores sur les mammifères marins reposait sur le guide Southall 2007. Durant l'année 2016, alors que l'étude d'impact bruit sous-marin du projet des Eoliennes en Mer de Dieppe et Le Tréport était finalisée, une mise à jour de ce guide a été publiée.

Ces seuils, uniquement pour les mammifères marins, repris et amendés par des études scientifiques menées en 2013 par l'administration américaine (NOAA) a débouché sur un nouveau consensus publié en 2016. Dans cette nouvelle version, les changements concernent:

- ▶ les niveaux acoustiques de sensibilité pouvant engendrer des dommages physiologiques qui sont globalement abaissés ;
- ▶ et les bandes d'audition qui sont significativement plus étroites ce qui a comme conséquence de réduire les niveaux acoustiques perçus.

Seules des modélisations permettent d'évaluer les effets de ce changement référentiel. Les résultats des modélisations comparatives pour les deux référentiels (Southall 2007) et (NOAA 2016) pour tous les ateliers du projet démontrent que les effets de ce changement sont différents selon les espèces et selon les ateliers, à la hausse comme à la baisse.



# 12 Bibliographie





- Applied Physics Laboratory. APL-UW High Frequency Ocean Environmental Models HandBook. Handbook, Washington DC, USA: University of Washington, October 1994.
- Arrigoni. (2011). Atténuation des nuisances sonores sous l'eau. *Protection de l'environnement sous-marin face aux nuisances sonores, Saferseas, Brest.*
- Amante, C. and B. W. Eakins. ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24, 19 pp, NOAA, 2009.
- Andersson, Mathias H., Leif K.G. Persson, Klaus Lucke, Thomas Folegot, et Michel André. Criteria for bioacoustic sensitivity in maritime areas. Scientific report, European Commission, 2015, 25.
- André M, Solé M, Lenoir M, Durfort M, Quero C, Mas A, Lombarte A, van der Schaar M, López-Bejar M, Morell M, Zaugg S, Houégnigan L (2011) Low-frequency sounds induce acoustic trauma in cephalopods. *Front Ecol Evol* 9:489–493
- Au WWL, Banks K (1998) The acoustics of the snapping shrimp *Synalpheus parneomeris* in Kaneohe Bay. *J Acoust Soc Am* 103:41– 47
- Beharie, R., et J. Side. Acoustic Environmental Monitoring - Foundation drilling operations for the Voith tidal turbine. A report commissioned by Aquatera Limited., International Centre for Island Technology, 2011.
- Betke. «Acoustical properties of an operational pile driving noise mitigation system.» 11th european conference on underwater acoustics (Edinburgh), 2012.
- Betke. «Measurement of wind turbine construction noise at Horns Rev II.» ITAP Report no.: 1256-08-a-KB, 2008.
- Betke, Klaus. Measurement of underwater noise emitted by an offshore wind turbine at Horns Rev. ITAP – Institut für technische und angewandte Physik GmbH, 2006.
- Blaxter, J.H.S. and Hoss, D.E. 1981. Startle response in herring: The effect of sound stimulus frequency, size of fish og selective interference with the acoustic-Lateralis system. *J. Mar. Biol. Assoc. UK* 61: 871-879.
- Booman, C., Dalen, J., Leivestad, H., Levsen, A., van der Meeren, T. og Toklum, K. 1996. Effekter av luftkanonskyting på egg, larver og yngel. Undersøkelser ved Havforskningsinstituttet og Zoologisk Laboratorium,UiB. (Engelsk sammendrag og figurtekster). Havforskningsinstituttet, Bergen. *Fisken og Havet*, nr. 3 (1996). 83 sBowen, W. D. «Role of marine mammals in aquatic ecosystems.» *Ecology Progress*, 1997: Series 158:267-274.
- Boyd, I. B. (2008). *The effects of anthropogenic sound on marine mammals - a draft research strategy*. European Science Foundation and Marine Board.
- Boyer, T., Levitus S., Garcia H., R. Locarnini, C. Stephens, et J. Antonov. «Objective Analyses of Annual, Seasonal, and Monthly Temperature and Salinity for the World Ocean on a 1/4degree Grid.» *International Journal of Climatology*, 25, , 2004: 931-945.
- Breeding. Research Ambient Noise Directionality (RANDI) 3.1 Physics Description. Naval Research laboratory, 1996.
- Budelmann B.U. (1992) Hearing in crustacea. In: Webster DB, Fay RR, Popper AN (eds) *The evolutionary biology of hearing*. Springer, New York
- Budelmann B.U. (1992) Hearing in non-arthropod invertebrates. In: Webster DB, Fay RR, Popper A.N. (eds) *The evolutionary biology of hearing*. Springer, New York
- Caiti, Andrea, Jean-Pierre Hermand, Sergio M. Jesus, et Mike B. Porter. *Experimental acoustic inversion methods for exploration of th shallow water environment*. The Netherlands: Kluwer Academic Publisher, 2000.

- CEFAS (2009), Strategic review of offshore wind farm monitoring data associated with FEPA licence conditions, Annex 2 Fish, Contract ME1117, Lowestoft.
- Chompret, Justine, Erwan Roussel, Dominique Clorennec, Guillaume Le Provost, et Manon Condet. Etude de la fréquentation par les mammifères marins du site de Dieppe et du Tréport par acoustique passive. Rapport technique, Plouzané, France: Quiet-Oceans, 2016.
- Collin, M., Ainslie, M. A., Binnerts, B., de Jong, C. A., Clorennec, D., Sertlek, H. Ö., . . . and Folegot, T. (2015). Definition and results of test cases for shipping sound maps. *Proceeding of the IEEE Oceans Conference*. Genova.
- Comittee, Join Nature Conservation. «Statutory nature conservation agency protocol for minimising the risk of injury to marine mammals from piling noise.» August 2010 .
- Commission Européenne. «Decision relative aux critères et aux normes méthodologiques concernant le bon état écologique des eaux marines.» Journal officiel de l'Union européenne, 2010: 2010/477/UE.
- Couperus, B., Winter, E., van Keeken, O., van Kooten, T., Tribuhl, S. & Burggraaf, D. (2010), Use of high resolution sonar for near-turbine fish observations, (DIDSON) – We@Sea 2007-02, Report number C138/10, IMARES Wageningen UR.
- Dähne. (2012). Attenuating sound underwater with air bubble curtains: practicality and and attenuation efficiency. *11th european conference on underwater acoustics (Edinburgh)*.
- De Jong, Christ, Michael Ainslie, Alexander Benda-Beckman, et Gerrit Blacquiére. Pile driving noise and acoustic measurement. The Netherland: TNO, 2008.
- Dekeling, René , Mark Tasker, Thomas Folegot, et et al. «The European Marine Strategy: Noise Monitoring in European Marine Waters from 2014.» *Advances in Experimental Medicine and Biology* 875:205-2015 (2015).
- Diederichs. (2012). Reducing the effects of pile driving noise on harbour porpoises - do big bubble curtains work? *11th european conference on underwater acoustics (Edinburgh)*.
- Dooling, R. J., et S. H. Blumenrath. «Masking Experiments in Humans and Birds Using Anthropogenic Noises.» 3rd International Conference on the Effects of Noise On Aquatic Life. Budapest, Hungary, 2013.
- Talisman. «Potential Impacts of Underwater Noise, Projet Beatrice.» 2005.
- Elmer. (2007). Noise Emissions during pile driving of offshore foundations,. *2nd Scientific Confrence on the Use of OWE, BMU*. Berlin.
- Engås, A., Løkkeborg, S., Ona, E., and Soldal, A. V. (1996). Effects of seismic shooting on local abundance and catch rates of cod (*Gadus morhua*) and haddock (*Melanogrammus aeglefinus*), *Can. J. Fish Aquat. Sci.* 53, 2238–2249.
- Engås, A., and Løkkeborg, S. (2002). Effects of seismic shooting and vessel-generated noise on fish behaviour and catch rates, *Il Bioacoustics* 12, 313–315
- European Parliament. Resolution on the environmental effects of high-intensity active Naval sonar. Reference P6\_TA(2004)0047, Brussels: European Parliament, 2004.
- Fallon. «Dynamic response of naval structures to the application to predict underwater explosions.» 1984.
- Folegot, T. «Ship traffic noise distribution in the Strait of Gibraltar: an exemplary case for monitoring global ocean noise.» *The Effect of Noise on Aquatic Life*. Cork, Ireland: Springer, 2010c.

- Folegot, T. «The most intense ocean noise pollution around the Strait of Gibraltar concentrates into bubbles located at cetacean prey hunting depths.» Annual Congress of the European Cetacean Society. Strahlsund, Germany, 2010b.
- Folegot, T. «Vers la prévision du bruit anthropique.» Surveillance, étude et reconnaissance de l'environnement par acoustique discrète. Brest, 2010a.
- Folegot, Thomas. «Ship traffic noise distribution in the Strait of Gibraltar: an exemplary case for monitoring global ocean noise.» Conference on the effect of noise on aquatic life. Cork, Ireland: Springer, 2010.
- Folegot, Thomas, Dominique Clorennec, Yann Stephan, Cédric Gervaise, et Bazile Kinda. «Now-casting ambient noise in high anthropogenic pressure areas.» European Conference on Underwater Acoustics. Edinburgh, Scotland, 2012.
- Folegot, Thomas, et al. «Monitoring Long Term Ocean Noise in European.» Genva: IEEE OCEANS, 2015.
- Folegot, Thomas, et Dominique Clorennec. «From footprint prediction to risk assessment and focused mitigation.» Édité par 22nd ASCOBANS Advisory Committee Meeting. Workshop on Noise and Environmental Impact Assessments. Liège, Belgium, 2015. 91-94.
- Goh, T. H. (2005). The Use of Environmental Friendly Press-In Piling Technology in the Construction of Transportation Infrastructures. *Journal of the Institution of Engineers, Singapore*. , 45(2): 29-49.
- Grandjean. (2011). Atténuation des ondes de souffle sous l'eau. *Protection de l'environnement sous-marin face aux nuisances sonores, Saferseas, Brest*.
- Guerra A, González AF, and Rocha F. 2004. A review of records of giant squid in the northeastern Atlantic and severe injuries in *Architeuthis dux* stranded after acoustic exploration. ICES CM 2004/CC: 29.
- Guiesse, L., et P. Sabathié. Acoustique Sous-Marine. Paris: Dunod, 1964.
- Handegard N.O., Michalsen K., Tjøstheim D., Avoidance behaviour in cod (*Gadus morhua*) to a bottom-trawling vessel. *Aquatic Living Resources* 2003;16:265-270.
- Harwood, J., King, S., Scientific, Q.A., Quick, N., « The Sensitivity of UK Marine Mammal Populations to Marine Renewables Developments. » Report SMRUL-NER-2012-027 prepared by SMRU Ltd for the Natural Environment Research Council, 2014.
- Hassel, A., Knutsen, T., Dalen, J., Skaar, K., Løkkeborg, S., Misund, O.A., Østensen, Ø., Fonn, M., and Haugland, E.K. 2004. Influence of seismic shooting on the lesser sandeel (*Ammodytes marinus*). *ICES J. Mar. Sci.* 61: 1165-1173
- Hastings, M. C., et A. N. Popper. Effects of sound on fish. Report to Jones and Stokes for California Department of Transportation, 2005.
- Hastings, M. C., Popper, A. N., Finneran, J. J. and Lanford, P. (1996). Effects of low frequency sound on hair cells of the inner ear and lateral line of the teleost fish, *Astronotus ocellatus*. *J. Acoust. Soc. Am.* 99, 1759-1766.
- Hildebrand. «Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean.» *Marine Ecology Progress Series*, 2009: Vol. 395:5-20.
- Hildebrand, J. A. «Impacts of anthropogenic sound.» Dans *Marine mammal research: conservation beyond crisis*, de J.E. et al. Reynolds, 101-124. Baltimore, Maryland: The Johns Hopkins University Press, 2005.

- Hu M.Y., Yan H.Y., Chung W.S., Shiao J.C., Hwang P.P. (2009) Acoustically evoked potentials in two cephalopods inferred using the auditory brainstem response (ABR) approach. *Comp Biochem Physiol A* 153:278–283
- International Fund for Animal Welfare. Ocean Noise: turn it down, a report on ocean noise pollution. Yarmouth Port, Massachusetts, USA: IFAW International headquarters, 2008.
- International Maritime Organisation. Noise from commercial shipping and its adverse effects on marine life. Report of the Correspondence Group, Marine Environment Protection Committee, 2009.
- ITAP. «Measurement of wind turbine construction noise at Horns Rev II.» ITAP Report no.: 1256-08- $\alpha$ -KB, 2008.
- Iversen, R.T.B., Perkins, P.J., Dionne, R.D., 1963, An indication of underwater sound production by squid. *Nature* 199, 250–251.
- Jensen, Finn B, William A. Kuperman, Michael B. Porter, et Henrik Schmidt. Computational Ocean Acoustics. Vol. AIP Series in Modern Acoustics and Signal Processing. Springer, 2000.
- Jones, A.D., Sendt J., Duncan A. J., et Clarke P.A. «Modelling the acoustic reflection loss at the rough ocean surface.» *Proceeding of Acoustics 2009*. Adelaide, Australia: Australian Acoustical Society, 2009.
- Kastelein. «Hearing threshold shifts and recovery in harbor seals (*Phoca vitulina*) after octave-band noise exposure at 4 kHz.» *J. Acoust. Soc. Am.* 132 (4), 2012.
- Kikuchi, R. (2010). II Risk formulation for the sonic effects of offshore wind farms on fish in the EU region, *Mar. Pollut. Bull.* 60, 172–177.
- Kostyuchenko, L.P. 1973. Effects of elastic waves generated in marine seismic prospecting of fish eggs in the Black Sea. *Hydrobiol. Jour.* 9 (5): 45-48.
- Laboratory, Applied Physics. «APL-UW High Frequency Ocean Environmental Models Handbook.» APL-UW TR 9407 AEAS 9501, University of Washington, October 1994.
- Laughlin, J. (2006). *Underwater Sound Levels Associated with Pile Driving at the Cape Disappointment Boat Launch Facility, Wave Barrier Project. Report for Washington State Parks Cape Disappointment Wave Barrier Project.*
- Lee. (2012). Mitigation of low-frequency underwater anthropogenic noise using stationary encapsulated gas bubbles. *11th european conference on underwater acoustics (Edinburgh)*.
- Lindeboom H. J, Kouwenhoven H. J, Bergman M. J. N, Bouma S, Brasseur S, Daan R, Fijn R. C, Haan D, Dirksen S, Van Hal R, Hille Ris Lambers R, Ter Hofstede R, Krijgsveld K. L, Leopold M, and Scheidat M. 2011. Short-term ecological effects of an offshore wind farm in the Dutch coastal zone; A compilation. *Environ.Res.Lett.* 6.
- Løkkeborg, S. and Soldal A.V. 1993. The influence of seismic exploration with air guns on cod (*Gadus morhua*) behaviour og catch rates. *ICES Mar. Sci. Symp.*, 196: 62-67
- Lovell JM, Findlay MM, Nedwell JR, Pegg MA. 2006 The hearing abilities of the silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) and bighead carp (*Aristichthys nobilis*). *Comparative Biochemistry and Physiology A-Molecular & Integrative Physiology.* 143, 286-291.
- Lucke. «Temporary shift in masked hearing thresholds in a harbor porpoise after exposure to seismic airgun stimul.» *J. Acoust. Soc. Am.* 125, 2009: 4060.
- Lucke, Klaus, Siebert U., Lepper Paul A., et Blanchet Marie-Anne. «Temporary shift in masked hearing thresholds in a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) after exposure to seismicairgun stimuli.» *J. Acoust. Soc. Am.* , June 2009: 125 (6) .

Lucke, Klaus, Ursula Siebert, Paul A. Lepper, et Marie-Anne Blanchet. «Temporary shift in masked hearing thresholds in a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) after exposure to seismic airgun stimuli.» *J. Acoust. Soc. Am.*, June 2009: 125 (6).

Lurton. *Analyse des risques pour les mammifères marins liés à l'emploi des méthodes acoustiques en océanographie*. Ifremer, 2007.

Madsen, P.T., M. Wahlberg, J. Tougaard, K. Lucke, et P. Tyack. «Wind turbine underwater noise and marine mammals: implications of current knowledge and data needs.» *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 2006: Vol. 309: 279–295.

Marine Mammal Commission. *The Marine Mammal Protection Act of 1972 as amended 2007*. Silver Spring, MD, USA: NOAA's National Marine Fisheries Service, 2007.

Matuschek. «Measurements of Construction Noise During Pile Driving of Offshore.» NAG/DAGA. Rotterdam, 2009.

Matuschek R., Betke K. «Measurements of Construction Noise During Pile Driving of Offshore.» NAG/DAGA Rotterdam, 2009: p.262.

McCauley, R. D., Fewtrell, J., and Popper, A. N. (2003), High intensity anthropogenic sound damages fish ears, *J. Acoust. Soc. Am.* 113, 638–642.

MacGillivray. (2005). *Sound Pressure and Particle Velocity Measurements from Marine Pile Driving at Eagle Harbor Maintenance Facility, Bainbridge Island WA*. Report prepared for Washington State Department of Transportation.

Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie. «Cahier des charges de l'appel d'offres portant sur des installations éoliennes de production d'électricité en mer en France métropolitaine.» 2013.

Ministère de l'Écologie. «Décret fixant la liste des mammifères marins protégés sur le territoire national et les modalités de leur protection.» 1 Juillet 2011.

Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer. *Guide de l'étude d'impact sur l'environnement des parcs éoliens*. Fiche technique n° 7, Paris, France: Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer, 2010.

Mueller-Blenkle, C., McGregor, P. K., Gill, A. B., Andersson, M. H., Metcalfe, J., Bendall, V., Sigray, P., Wood, D. T., and Thomsen, F. (2010). —Effects of pile driving noise on the behaviour of marine fish. COWRIE Ref: Fish 06-08, Technical Report 31st March 2010.

MyOcean. Ocean monitoring and forecasting. 2011-2012. <http://www.myocean.eu.org>.

National Oceanographic and Atmospheric Administration. «Joint Workshop report: Predicting sound fields - Global soundscape modelling to inform management of cetaceans and anthropogenic noise.» Leiden: National Oceanographic and Atmospheric Administration, 2014.

National Research Council. (2003). *Ocean Noise and Marine Mammals*. The National Academies Press.

National Research Council. (2005). *Marine Mammal Populations and Ocean Noise: Determining When Noise Causes Biologically Significant Effects*. Washington DC: The National Academies Press.

NATO Undersea Research Centre. *NURC diver and marine mammal risk mitigation rules*. Staff Instruction 77, La Spezia, Italy: NURC, 2004.

Naval Submarine Medical Research Laboratory. *Recreational Diver Responses to 600-2500 Hz Waterborne Sound*. Report No. 1223, Naval Submarine Medical Research Laboratory, 2002.

- NCE. (2007). *Treatments for Reducing Underwater Sounds from Oil and Gas Industry Activities*.
- Nedwell. «Assessment of sub-sea acoustic noise and vibration from offshore wind turbines and its impact on marine wildlife; initial measurements of underwater noise during construction of offshore windfarms, and comparison with background noise.» 2003.
- Nedwell. «Measurement and assessment of background underwater noise and its comparison with noise from pin pile drilling operations during installation of the SeaGen tidal turbine device, Strangford lough.» 2008.
- Nedwell, J., et D. Howell. A review of offshore windfarm related underwater noise sources. Report No. 544 R 0308, Collaborative Offshore Wind Research Into The Environment, 2004.
- Nedwell, Jeremy, Joh Langworthy, et Daren Howell. «Underwater noise and offshore windfarms and construction.» BWEA Conference. 2004.
- Nowacek, D. P., L. H. Thorne, D. W. Johnston, et P. L. Tyack. «Responses of cetaceans to anthropogenic noise.» *Mammal Rev*, 2007: 37: 81-115.
- Parlement Européen. Cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. Directive 2000/60/CE, Brussel: Parlement Europeen, 2000.
- OSPAR (2009). Overview of the impacts of anthropogenic underwater sound in the marine environment, OSPAR Convention for the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic.
- Packard A., Karlsen H.E., Sand O. (1990), Low frequency hearing in cephalopods. *J Comp Physiol A* 166:501–505
- Parvin. «Assessment of underwater noise from dredging operations on the Hastings shingle bank.» 2008.
- Parvin S J, Cudahy E A and Fothergill D M. «Guidance for diver exposure to underwater sound in the frequency range from 500 to 2500 Hz.» Proceedings of Undersea Defence Technology. La Spezia, Italy, 2002.
- Payne, R., et D. Webb. «Orientation by means of long range acoustic signaling in baleen whales.» *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1971: 188:110-141.
- Pearson, W.H., Skalski, J.R. and Malme, C.I. 1992. Effects of sounds from a geophysical survey device on behavior of captive rockfish (*Sebastes* spp). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 49(7): 1343-1356.
- Pettex, Martinez, Clorennec, Folegot. Réduction de l'impact du bruit de battage sur la population de Marsouins commun en Manche. projet RESPECT, 2016.
- Pettex, E, Martinez, L, Clorennec, D, Folegot, T., Développement d'un modèle de quantification des effets du bruit sur les populations de mammifères marins. projet RESPECT, 2016.
- Polglaze, URS Australia Pty Ltd. «Potential effects of underwater blasting, piledriving and dredging on sensitive marine fauna in Darwin harbour.» 2011.
- Popov. «Noise-induced temporary threshold shift and recovery in Yangtze finless porpoises *Neophocaena phocaenoides asiaeorientalis*.» *J. Acoust. Soc. Am.* 130 (1), 2011.
- Popper, A. N., and Fay, R. R. (2010), Rethinking sound detection by fishes, *Hearing. Res.* doi:10.1016/j.heares.2009.12.023.
- Popper, A.N., Fewtrell, J., Smith, M.E., et R.D. McCauley. «Anthropogenic sound: Effects on the behavior and physiology of fishes.» *Marine Technology Soc. J.*, 2004: 37(4). 35-40.
- Popper, A. N. and Hastings, M. C. (2009). Effects of anthropogenic sources of sound on fishes. *J. Fish Biol.* 75:455-498

- Popper, Arthur N., et al. Sound Exposure Guidelines for Fishes and Sea Turtles: a technical report prepared by ANSI-Accredited Standards Committee S3/SC1. New-York: Springer Briefs in Oceanography, 2014.
- Radford C, Jeffs A, Tindle C, Montgomery JC (2008) Resonating sea urchin skeletons create coastal choruses. *Mar Ecol Prog Ser* 362:37– 43
- Richardson, W.J., C.I. Malme, C.R. Green, et D.H. Thomson. Marine Mammals and Noise. San Diego, CA: Academic Press, 1995.
- Richardson, W.J., M.A. Fraker, B. Wuersig, et R.S. Wells. «Behaviour of bowhead whales, *Balaena mysticetus* summering in the Beaufort sea: Reactions to industrial activities.» *Biological Conservation*, 1985: 32: 195-230.
- Robinson. «Measurement of noise arising from marine aggregate dredging operations.» 2011.
- Richardson, W., Fraker, M., Wuersig, B., & Wells, R. (1985). Behaviour of bowhead whales, *Balaena mysticetus* summering in the Beaufort sea: Reactions to industrial activities. *Biological Conservation*, 32: 195-230.
- Richardson, W.J., Malme, C.I., Green, C.R.jr. and D.H. Thomson (1995). Marine Mammals and Noise. Academic Press, San Diego, CA 576 pp.
- Robinson, Allan R., et Ding Lee. Oceanography and acoustics: prediction and propagation models. New-York, USA: American Institute of Physics, 1994.
- Rustemeier. (2012). Underwater sound mitigation of bubble curtains with different bubble size distributions. *11th european conference on underwater acoustics (Edinburgh)*.
- Sara, G., Dean, J. M., Amato, D. D., Buscaino, G., Oliveri, A., Genovese, S., Ferro, S., Buffa, G., Lo Martire, M., & Mazzola, S. 2007. Effect of boat noise on the behaviour of bluefin tuna *Thunnus thynnus* in the Mediterranean Sea. *Marine Ecology Progress Series* : 331, 243-253
- Slotte, A., Hansen, K., Dalen, J., and Ona, E. 2004, Acoustic mapping of pelagic fish distribution og abundance in relation to a seismic shooting area off the Norwegian west coast. *Fisheries Research* 67 (2004): 143–150.
- Spiga I., Caldwell G.S., Brintjes S., 2016, Influence of Pile Driving on the Feeding Physiology of the Common Mussel *Mytilus edulis* (L.), proceedings of the International Conference on the Effect of Noise on Aquatic Life, Dublin, Ireland.
- Song, J., Mann, D. A., Cott, P. A., Hanna, B. W. and Popper, A. N. (2008). The inner ears of Northern Canadian freshwater fishes following exposure to seismic air gun sounds. *J. Acoust. Soc. Am.* 124, 1360-1366.
- Southall, B.L., et al. «Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Initial Scientific Recommendations.» *Aquatic Mammals*, 2007: 33: 411-521.
- Staaterman E.R., Claverie T., Patek S.N. (2010) Disentangling defense: the function of spiny lobster sounds. *Behaviour* 147:235–258
- Stewart-Oaten, A., J. R. Bence, et C. W. Osenberg. «Assessing effects of unreplicated perturbations: no simple solutions.» *Ecology* 73 (1992): 1396–1404.
- Shutton, G., Clorennec, D., Jesshop, M., & Folegot, T. (2013). *Mapping the spatio-temporal distribution of underwater noise in Irish Waters*. Environmental Protection Agency, Dublin.
- Talisman Energy (UK) Limited. «Beatrice Wind Farm Demonstrator Project - Environmental Statement.» 2004.
- Thomsen, F., K. Lüdemann, R. Kafemann, et W. Piper. Effects of offshore wind farm noise on marine mammals and fish. Newbury, U.K.: COWRIE Ltd, 2006.

- Thomsen, Frank, et al. MaRVEN – Environmental Impacts of Noise, Vibrations and Electromagnetic Emissions from Marine Renewable Energy. Brussels: European Commission, 2015.
- Tougaard J., 2008, Radial distance sampling with passive acoustics: the prospect of estimating absolute densities of cetaceans from static acoustic datalogger data J. Acoust. Soc. Am. 123 3100
- Tougaard J, Carstensen J, Teilmann J, Skov H and Rasmussen P, 2009, Pile Driving Zone of responsiveness extends beyond 20 km for Harbour Porpoises (*Phocoena phocoena*, (L.)) J. Acoust. Soc. Am. 126 11–4
- URL Valor Pelagis. Contributions thématiques concernant l'état écologique des populations de mammifères marins dans les sous-régions marines Golfe de Gascogne, Mers Celtiques, Manche-Mer du Nord et Méditerranée Occidentale dans le cadre de la DCSMM. Rapport CRMM pour Ifremer - Agence des Aires Marines Protégées - Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable, 2011.
- Vabø R., Olsen K., Huse I., The effect of vessel avoidance of wintering Norwegian spring-spawning herring. Fisheries Research 2002;58:59-77.
- Van de Loock, J. Laurent, J., de Rosny, J., Prada, C., F. Léon, F. Chati, D. Décultot, I. Haghghi, D. Cathie, Clorennec, D., and Folegot, T. Etudes paramétriques sur le bruit de battage. projet RESPECT, rapport QO.20150701.01, Quiet-Oceans, Brest, 2016.
- Van de Loock, J., de Rosny, J., Prada, C., Cathie, D., Clorennec, D., & Folegot, T. Conception des expérimentations à échelle réduite. projet RESPECT (No. QO.20150701.01). Brest, France: Quiet-Oceans., 2015.
- Van de Loock, J., Laurent, J., de Rosny, J., Prada, C., Décultot, D., Cathie, D., ... Folegot, T. Expérimentations à échelle réduite et Modélisation, . projet RESPECT (No. QO.20150701.01). Brest, France: Quiet-Oceans., 2016.
- Van de Loock, Julien, et al. Expérimentations à échelle réduite et Modélisation,. projet RESPECT (No. QO.20150701.01). Brest, France: Quiet-Oceans., 2016.
- Wagstaff. «RANDI :Research Ambient Noise Directionality Model.» Naval Undersea Center, Tech. Pub. 349 pp, 1973.
- Wahlberg, M., et H. Westerberg. «Hearing in fish and their reactions to sound from offshore wind farms.» Mar. Ecol. Prog. Ser., 2005: 288, 295-309.
- Wales, Stephen C., et Richard M. Heitmeyer. «An ensemble source spectra model for merchant ship-radiated noise.» J. Acoust. Soc. Am., 2002: 111 (3).
- Wardle, C.S., Carter, T.J., Urquhart, G.G., Johnstone, A.D.F., Ziolkowski, A.M., Hampson, G. og Mackie, D. 2001. Effects of seismic air guns on marine fish. Cont. Shelf Res.0:1-23.
- Wenz, G.M. «Acoustic Ambient Noise in the Ocean: Spectra and Sources.» J. Acoust. Soc. Am., 1962: 34:1936-1956.
- Wilson, Ben, Caroline Carter, et Jim Elliott. A baseline acoustic survey of the Fall of Warness tidal test site and assessment of the acoustic output of the vessel CS Sovereign during ROV & Cable laying operations. Oban, PA371QA, UK: Scottish Association for Marine Science, 2009.
- Würsig, B., et W.J. Richardson. «Effects of Noise.» Dans The Encyclopedia of Marine Mammals, de W.F. Perrin, B. Würsig et J.G.M. Thewissen, 794-802. New-York: Academic Press, 2002.
- Würsig, B., Greene, C.R., Jefferson T.A. «Development of an air bubble curtain to reduce\_underwater noise of percussive piling.» Marine Environmental Research, 2000: 79-93.

