



Evaluation des effets sonores associés aux travaux d'aménagement

VERSION FINALISEE V2

Destinataire :
HAROPA PORT LE HAVRE



Décembre 2022





DESTINATAIRE : HAROPA PORT LE HAVRE

COORDONNÉES	Terre-plein de la Barre BP 1413 76067 LE HAVRE cedex
INTERLOCUTEUR	Pierre BEAUDOUIN Tél. 02 32 74 74 00 / 06 75 68 64 80 Email : pierre.beaudouin@haropaport.com

REDACTEUR : NEREIS Environnement

COORDONNÉES	Résidence CAP WEST 5, allée de Maubreuil Tél. : 09 81 36 23 80 E-mail : contact@nereisenvironnement.com
INTERLOCUTEUR	Loïc HELLOCO Responsable des études acoustiques Tél. : 06 68 67 83 83 E-mail : l.helloco@nereisenvironnement.com

RAPPORT

TITRE	Evaluation des effets sonores associés aux travaux d'aménagement
VERSION	V2
DATE	12/12/2022
NB DE PAGES + ANNEXE(S)	181 pages
REDACTION	Loïc HELLOCO Cécile PERSOHN Pauline LEVASSOR

La diffusion du document est réservée exclusivement au destinataire mentionné.



- **Table des matières**

1. Introduction	14
2. Matériel utilisé	15
2.1. L'ENREGISTREUR AUTONOME OSEAN	15
2.2. CHAINE D'ACQUISITION PORTABLE MARANTZ/TASCAM.....	17
2.3. SONDE MULTIPARAMETRES CTDDO	18
3. Méthodologie de l'étude	19
3.1. DEFINITION DU PERIMETRE DE LA ZONE D'ETUDE	19
3.2. ACQUISITION DES DONNEES	21
3.2.1. Protocole d'acquisition des données acoustiques <i>in situ</i>	21
3.2.1.1. Position de l'enregistreur OSEAN	21
3.2.1.2. Réalisation des radiales acoustiques	22
3.2.1.3. Calendrier et durée des enregistrements	24
3.2.2. Acquisition des métadonnées.....	24
3.2.2.1. Métadonnées contextuelles : analyse du trafic maritime.....	24
3.2.2.2. Métadonnées environnementales collectées et intégrées au modèle acoustique	25
3.3. TRAITEMENT ET ANALYSE DES DONNEES.....	26
3.3.1. Choix des indicateurs et conformité avec les normes acoustiques en vigueur	26
3.3.2. Logiciels utilisés pour le traitement des données acoustiques	28
3.3.3. Evaluation de la contribution des différentes composantes du bruit ambiant ..	29
3.3.3.1. Contribution de la géophonie	29
3.3.3.2. Contribution de la biophonie.....	29
3.3.3.3. Contribution de l'anthropophonie.....	29
3.3.4. Modélisation de la propagation des ondes sonores	30
3.4. SYNTHÈSE DE LA METHODOLOGIE APPLIQUEE A L'ETUDE	31
4. Résultats	33
4.1. METADONNEES ENVIRONNEMENTALES	33
4.1.1. Variation de la hauteur d'eau.....	33
4.1.2. Bathycélérimétrie.....	34
4.1.3. Pertes acoustiques observées sur la zone d'étude	36



4.2. SUIVI ACOUSTIQUE PAR RADIALES	39
4.3. SUIVI ACOUSTIQUE AU POINT FIXE OSEAN	55
4.4. CARACTERISATION DES COMPOSANTES DU BRUIT AMBIANT	58
4.4.1. Contribution de la géophonie.....	58
4.4.2. Contribution de la biophonie.....	64
4.4.3. Contribution de l'anthropophonie.....	64
4.4.3.1. Navires en transit	68
4.4.3.2. Navire en opération.....	72
4.4.3.3. Navire à quai.....	73
4.5. CARTOGRAPHIE DU BRUIT AMBIANT SOUS-MARIN / MODELISATION ACOUSTIQUE AVANT TRAVAUX	73
5. Incidence sonore du bruit sur la faune marine	98
5.1. L'AUDITION DES ESPECES MARINES	98
5.1.1. Les mammifères marins	98
5.1.2. Les poissons et invertébrés marins	99
5.2. ESPECES MARINES PRESENTES EN BAIE DE SEINE	101
5.2.1. Les mammifères marins	101
5.2.1.1. Sources de données	101
5.2.1.2. Les mammifères marins observés en baie de Seine	102
5.2.2. Les poissons et invertébrés marins	103
5.2.2.1. Sources de données	103
5.2.2.2. Poissons et invertébrés présents en baie de Seine	104
5.3. SENSIBILITE AUDITIVE DES ESPECES PRESENTES ET SEUILS DE TOLERANCE AU BRUIT	105
5.3.1. Sensibilité auditive et seuils de tolérance des mammifères marins présents en baie de Seine	105
5.3.2. Sensibilité auditive et seuils de tolérance des poissons et invertébrés présents dans la zone d'étude	107
5.3.3. Evaluation de la sensibilité des espèces présentes au bruit généré par les travaux d'aménagement.....	111
5.3.3.1. Mammifères marins.....	111
5.3.3.2. Poissons et invertébrés marins	113
6. Evaluation des effets sonores associées aux futurs travaux d'aménagement de HAROPA Port Le Havre	118



6.1. DETERMINATION DE SCENARIOS ACOUSTIQUES REPRESENTATIFS DES DIFFERENTS TRAVAUX A REALISER.....	118
6.2. MISE EN EVIDENCE DES SOURCES SONORES ASSOCIEES AUX DIFFERENTS TRAVAUX..	119
6.2.1. Scénario acoustique 1 : Travaux de détection et de dégagement pyrotechnique.....	120
6.2.2. Scénario acoustique 2 : Réalisation du soubassement de la future digue Chatière.....	121
6.2.3. Scénario acoustique 3 : Dragage dans le port historique et construction de la digue provisoire.....	124
6.2.4. Scénario 4 : Construction de la digue de la Chatière avec 2 fronts d'avancement.....	126
6.2.5. Scénarios 5 et 5bis : Ouverture des digues existantes et raccordements ..	127
6.2.6. Scénario 6 : Démontage de la digue provisoire et dragage du chenal	132
6.3. DETERMINATION DES EFFETS SONORES ASSOCIES AUX TRAVAUX D'AMENAGEMENT ...	134
7. Evaluation des impacts acoustiques associés aux différents travaux	169
8. Mesures de mitigation / recommandations.....	173
9. Conclusion	174
Bibliographie	178

Liste des Figures

Figure 1. Zone d'étude HAROPA Port Le Havre (source : CCP HAROPA Port Le Havre).....	14
Figure 2. Mouillage de l'enregistreur acoustique positionné sur un corps mort de 40 kg.	17
Figure 3. Périmètre du suivi AIS.	20
Figure 4. Position de l'enregistreur autonome OSEAN dans le bassin T. DUCROCQ.	21
Figure 5. Navire L'ECLAT affrété par NEREIS Environnement pour la campagne acoustique (source CSLN).....	22
Figure 6. Carte synthétique des radiales acoustiques théoriques.	23
Figure 7. Outil de traitement SEAc développé par NEREIS Environnement.	28
Figure 8. Synthèse de la méthodologie mise en œuvre pour le suivi acoustique de HAROPA Port Le Havre	32
Figure 9. Evolution de la hauteur d'eau au point d'enregistrement au bout du môle central dans le bassin Ducrocq entre le 2 novembre et le 5 novembre 2020.	33



Figure 10. Profils de température et salinité mesurés dans le bassin H. RAOUL-DUVAL le 4 novembre 2020 (à gauche) et profil bathycélérimétrique correspondant (à droite).	35
Figure 11. Profils de température et salinité mesurés dans le bassin T. DUCROCQ le 3 novembre 2020 (à gauche) et profil bathycélérimétrique correspondant (à droite).	35
Figure 12. Dispositif d'émission sonore sous-marine avec le HP Lubell.....	36
Figure 13. Position des points de calibration par sonde acoustique active.....	38
Figure 14. Synthèse des données de la radiale 1.....	41
Figure 15. Synthèse des données de la radiales 2.....	42
Figure 16. Synthèse des données de la radiale 3.....	43
Figure 17. Synthèse des données de la radiale 4 (1).	44
Figure 18. Synthèse des données de la radiale 4 (2).	45
Figure 19. Synthèse des données de la radiale 5.....	46
Figure 20. Synthèse des données de la radiale 6 (1).	47
Figure 21. Synthèse des données de la radiale 6 (2).	48
Figure 22. Synthèse des données de la radiale 7.....	49
Figure 23. Synthèse des données de la radiale 8.....	50
Figure 24. Synthèse des données de la radiale 9.....	51
Figure 25. DSP associées aux radiales R7 et R9.....	52
Figure 26. DSP associées aux radiales R8.	53
Figure 27. DSP associées aux radiales 1(a), 2 (b), 3 (c), 4 (d et e).....	54
Figure 28. DSP associées aux radiales 5(a), 6-1(b), 6-2(c).....	55
Figure 29. Evolution du niveau de bruit global (7 Hz-100 kHz) au point de mesure OSEAN.	56
Figure 30. Synthèse du suivi acoustique au niveau du point fixe OSEAN.	57
Figure 31. Densités spectrales de puissance en fonction des états de mer et de vent, observées durant la campagne de suivi acoustique	61
Figure 32. Contribution des différentes sources sonores au bruit ambiant sous-marin d'après le modèle de Wenz (d'après NRC, 2003).....	63
Figure 33. Carte des mouvements de navires au CPA de l'OSEAN sur l'ensemble de la zone d'étude.	65
Figure 34. Carte des mouvements de navires au CPA de l'OSEAN dans le bassin T. DUCROCQ.....	66
Figure 35. Répartition du passage des navires dans un périmètre de 10 km autour de l'enregistreur OSEAN (à gauche) et uniquement dans le bassin T. DUCROCQ (à droite) en fonction du type de navire au cours de la campagne.	67
Figure 36. Densités spectrales de puissance des différents types de navires en transit enregistrés à proximité de l'enregistreur OSEAN.	69
Figure 37. Densités spectrales de puissance des différents types de navires en transit enregistrés à proximité de l'enregistreur OSEAN.	70
Figure 38. Densités spectrales de puissance des différents types de navires en transit enregistrés à proximité de l'enregistreur OSEAN.	71



Figure 39. Densités spectrales de puissance des différents types de navires en transit enregistrés à proximité de l'enregistreur OSEAN.	72
Figure 40. Densité spectrale de puissance de la Gambe d'Amfard en activité enregistrée dans le bassin avant-port par la chaîne portable (TASCAM) le 04/11/2020.	72
Figure 41. Densité spectrale de puissance de différents types de navire à quai enregistrés par la chaîne portable (TASCAM).	73
Figure 42. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario de printemps / trafic minimum / marnage N0+2.	74
Figure 43. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario de printemps / trafic minimum / marnage N0+8.	75
Figure 44. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario de printemps / trafic moyen / marnage N0+2.	76
Figure 45. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario de printemps / trafic moyen / marnage N0+8.	77
Figure 46. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario de printemps / trafic maximum / marnage N0+2.	78
Figure 47. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario de printemps / trafic maximum / marnage N0+8.	79
Figure 48. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario d'été / trafic minimum / marnage N0+2.	80
Figure 49. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario d'été / trafic minimum / marnage N0+8.	81
Figure 50. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario d'été / trafic moyen / marnage N0+2.	82
Figure 51. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario d'été / trafic moyen / marnage N0+8.	83
Figure 52. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario d'été / trafic maximum / marnage N0+2.	84
Figure 53. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario d'été / trafic maximum / marnage N0+8.	85
Figure 54. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario d'automne / trafic minimum / marnage N0+2.	86
Figure 55. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario d'automne / trafic minimum / marnage N0+8.	87
Figure 56. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario d'automne / trafic moyen / marnage N0+2.	88
Figure 57. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario d'automne / trafic moyen / marnage N0+8.	89
Figure 58. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario d'automne / trafic maximum / marnage N0+2.	90



Figure 59. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario d'automne / trafic maximum / marnage N0+8. 91

Figure 60. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario d'hiver / trafic minimum / marnage N0+2. 92

Figure 61. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario d'hiver / trafic minimum / marnage N0+8. 93

Figure 62. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario d'hiver / trafic moyen / marnage N0+2. 94

Figure 63. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario d'hiver / trafic moyen / marnage N0+8. 95

Figure 64. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario d'hiver / trafic maximum / marnage N0+2. 96

Figure 65. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario d'hiver / trafic maximum / marnage N0+8. 97

Figure 66. Audiogrammes médians des différents groupes de mammifères marins (d'après Southall *et al.*, 2019). 99

Figure 67. Différentes emprises portuaires nécessaires pendant la phase de travaux (source HAROPA Port Le Havre 2022). 118

Figure 68. Principe de détection maritime d'engin pyrotechnique par sonar remorqué (source HAROPA Port Le Havre 2022). 120

Figure 69. Spectre acoustique associé au navire technique Léopard (source NEREIS campagne de mesures acoustique HAROPA Port Le Havre 2020). 120

Figure 70. Schéma d'emprise maritime des travaux d'aménagement – phase 2 (source HAROPA Port Le Havre 2022). 121

Figure 71. Spectres acoustiques associés à la drague mixte Gambe d'Amfard en opération de dragage (source NEREIS campagne de mesures acoustique HAROPA Port Le Havre 2020). 122

Figure 72. Spectres acoustiques associés à la drague TSHD Samuel de Champlain en opération de dragage (source NEREIS 2020). 122

Figure 73. Drague CSD DRAGON en opération de dragage (source NEREIS 2020). 123

Figure 74. Spectres acoustique d'une drague CSD sur barge en fonction de sa configuration de fonctionnement (source NEREIS Environnement). 123

Figure 75. Schéma d'emprise maritime des travaux d'aménagement – phase 3 (source HAROPA Port Le Havre 2022) 124

Figure 76. Spectres acoustiques associés à une opération de dépôt de matériaux graveleux par un engin de chantier terrestre type Tombereau (source NEREIS Environnement 2019-2020). 125

Figure 77. Spectres acoustiques liés aux opérations de terrassement sur le chantier de la digue. Distribution par niveaux minimums, moyens et maximums (à gauche). Niveaux mesurés à 76 mètres du chantier (source NEREIS Environnement 2019). 126



Figure 78. Schéma d'emprise maritime des travaux d'aménagement – phase 4 (source HAROPA Port Le Havre 2022).	127
Figure 79. Schéma d'emprise maritime des travaux d'aménagement – phase 5 (source HAROPA Port Le Havre 2022).	128
Figure 80. Spectres acoustiques liés au déplacement du ponton dipper. Gabarits estimés @1m (à gauche), photo du ponton en phase de déplacement (à droite) (source NEREIS Environnement 2019-2020).	129
Figure 81. Spectres acoustiques liés au déroctage en mer par niveaux minimums, moyens et maximums (à gauche) (source NEREIS Environnement).	130
Figure 82. Spectres acoustiques liés au déroctage à terre par niveaux minimums, moyens et maximums (à gauche) (source NEREIS Environnement).	131
Figure 83. Gabarit moyen estimé associé à une opération de chantier type BRH... ..	132
Figure 84. Schéma d'emprise maritime des travaux d'aménagement – phase 6 (source HAROPA Port Le Havre 2022).	133
Figure 85. Gabarits associés au navire niveleur LE CAUX (source NEREIS campagne de mesures acoustique HAROPA Port Le Havre 2020).	133
Figure 86. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les cétacés HF associés au scénario 1.	137
Figure 87. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les cétacés HF associés au scénario 2.	138
Figure 88. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les cétacés HF associés au scénario 3.	139
Figure 89. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les cétacés HF associés au scénario 4.	140
Figure 90. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les cétacés HF associés au scénario 5.	141
Figure 91. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les cétacés HF associés au scénario 5bis.	142
Figure 92. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les cétacés HF associés au scénario 6.	143
Figure 93. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les cétacés VHF associés au scénario 1.	144
Figure 94. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les cétacés VHF associés au scénario 2.	145
Figure 95. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les cétacés VHF associés au scénario 3.	146
Figure 96. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les cétacés VHF associés au scénario 4.	147
Figure 97. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les cétacés VHF associés au scénario 5.	148
Figure 98. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les cétacés VHF associés au scénario 5bis.	149



Figure 99. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les cétacés VHF associés au scénario 6.....	150
Figure 100. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les phocidés PCW associés au scénario 1.....	151
Figure 101. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les phocidés PCW associés au scénario 2.....	152
Figure 102. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les phocidés PCW associés au scénario 3.....	153
Figure 103. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les phocidés PCW associés au scénario 4.....	154
Figure 104. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les phocidés PCW associés au scénario 5.....	155
Figure 105. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les phocidés PCW associés au scénario 5bis.	156
Figure 106. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les phocidés PCW associés au scénario 6.....	157
Figure 107. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les poissons et invertébrés marins associés au scénario 1.	158
Figure 108. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les poissons et invertébrés marins associés au scénario 2.	159
Figure 109. Carte de modélisation en sous-marine des effets sonores potentiels sur les poissons et invertébrés marins associés au scénario 3.	160
Figure 110. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les poissons et invertébrés marins associés au scénario 4.	161
Figure 111. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les poissons et invertébrés marins associés au scénario 5.	162
Figure 112. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les poissons et invertébrés marins associés au scénario 5bis.	163
Figure 113. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les poissons et invertébrés marins associés au scénario 6.	164

Liste des Tableaux

Tableau 1. Caractéristiques de l'enregistreur autonome OSEAN utilisé pour l'acquisition de données sur le site d'essai en mer.	16
Tableau 2. Caractéristiques de l'hydrophone Neptune D140 couplé à l'enregistreur OSEAN.	16
Tableau 3. Caractéristique de la chaîne acoustique MARANTZ/TASCAM.	18
Tableau 4. Caractéristique principale de l'hydrophone B&K 8106.	18
Tableau 5. Caractéristiques de la sonde multiparamètres NKE MP4.	19



Tableau 6. Coordonnées du mouillage de l'enregistreur OSEAN (en degrés minutes - WGS84).....	22
Tableau 7. Indicateurs acoustiques retenus pour l'étude du bruit ambiant sur la zone d'étude.....	27
Tableau 8. Horaire des marées au port du Havre et hauteur d'eau à l'extrémité du môle central.....	34
Tableau 9. Caractéristiques techniques du HP Lubell.	37
Tableau 10. Chronologie des radiales acoustiques effectuées.....	40
Tableau 11. Synthèse des niveaux de bruit mesurés sur les radiales acoustiques (Lp en dB re 1µPa).	52
Tableau 12. Récapitulatif par créneau horaire des états de mer et de vent.....	59
Tableau 13. Synthèse des conditions météorologiques observées durant le suivi acoustique. Les cases vertes correspondent aux jours où la mer était calme à peu agitée et/ou le vent était inférieur à force 3 ; les cases orange correspondent aux jours où la mer était agitée et/ou le vent était compris entre force 3 et force 6 ; les cases rouges correspondent aux jours où la mer était forte à énorme et/ou le vent était supérieur à force 6. La pluie est représentée par 1 ou 2 goutte(s) d'eau selon l'intensité (pas de goutte : < 1 mm, une goutte : entre 1 et 3 mm, deux gouttes : > 3 mm).	59
Tableau 14. Espèces de poissons (O : ostéichthyens ou poissons osseux, C : chondrichthyens ou poissons cartilagineux) présents sur la zone d'étude (d'après Delpech <i>et al.</i> , 2007 ; Duhamel <i>et al.</i> , 2002 ; Forest, 2001 ; Mahé, 2006 ; Morin, 2010 ; Morin, 2015).	104
Tableau 15. Espèces d'invertébrés présents sur la zone d'étude (d'après Forest, 2001 ; Delpech <i>et al.</i> , 2007 ; Mahé, 2006 ; Morin, 2015).....	105
Tableau 16. Sensibilité auditive des espèces de mammifères marins présentes en baie de Seine (d'après Southall <i>et al.</i> , 2019).....	106
Tableau 17. Seuils de perte temporaire (TTS) et permanente (PTS) d'audition pour chaque groupe de mammifère marin exposé à un bruit impulsionnel. Les niveaux d'exposition sonore cumulés sur 24 heures (SEL _{24h}) sont exprimés en dB re 1 µPa ² .s. Les niveaux de pression sonore (SPL _{pk}) sont exprimés en dB re 1 µPa (d'après Southall <i>et al.</i> , 2019).....	107
Tableau 18. Seuils de perte temporaire (TTS) et permanente (PTS) d'audition pour chaque groupe de mammifère marin exposé à un bruit continu. Les niveaux d'exposition sonore cumulés sur 24 heures (SEL _{24h}) sont exprimés en dB re 1 µPa ² .s (d'après Southall <i>et al.</i> , 2019).....	107
Tableau 19. Sensibilité auditive des espèces de poissons présentes sur l'aire d'étude éloignée (d'après Anderson & Mann, 2011 ; Davenport, 1999 ; Hawkins & Johnstone, 1978 ; Popper & Hawkins, 2019 ; Sand & Enger, 1973).....	108
Tableau 20. Seuils de perte temporaire (TTS) d'audition pour chaque groupe de poissons exposé à un bruit impulsionnel de type décrochage ou à un bruit continu. Les niveaux d'exposition sonore cumulés (SEL _{cum}) sont exprimés en dB re 1 µPa ² s ⁻¹ . Les	

niveaux de pression sonore (SPL _{Lpk} et SPL RMS) sont exprimés en dB re 1 µPa (d'après Popper & Hawkins, 2019).	110
Tableau 21. Sensibilité auditive des invertébrés présents sur l'aire d'étude (d'après Charifi <i>et al.</i> , 2017 ; Kaifu <i>et al.</i> , 2008 ; Edmonds <i>et al.</i> , 2016 ; Mooney <i>et al.</i> , 2012).	111
Tableau 22. Sensibilité des espèces de mammifères marins potentiellement présentes sur l'aire d'étude éloignée.	112
Tableau 23. Sensibilité des espèces de poissons marins potentiellement présents sur l'aire d'étude éloignée.	114
Tableau 24. Sensibilité des espèces d'invertébrés marins potentiellement présents sur l'aire d'étude éloignée.	117
Tableau 25. Synthèse des sources sonores liées aux opérations de déroctage.	126
Tableau 26. Caractéristiques techniques principales du ponton dipper type DRAGAMAR.	128
Tableau 27. Synthèse des sources sonores liées aux opérations de déroctage.	131
Tableau 28. Grille d'évaluation des effets liés aux bruits sous-marins générés par les opérations de travaux d'aménagement.	134
Tableau 29. Synthèse des effets sonores sur les groupes d'audition associés aux mammifères marins en fonction des scénarios acoustiques des travaux d'aménagement de la Chatière.	165
Tableau 30. Synthèse des effets sonores sur les groupes d'audition associés poissons, crustacés et céphalopodes en fonction des scénarios acoustiques des travaux d'aménagement de la Chatière.	167
Tableau 31. Matrice d'évaluation des risques d'impact en fonction de la sensibilité et des effets.	169
Tableau 32. Synthèse des risques d'impact acoustique sur les groupes d'audition associés aux mammifères marins en fonction des scénarios acoustiques des travaux d'aménagement de la Chatière.	170
Tableau 33. Synthèse des risques d'impact acoustique sur les groupes d'audition associés aux poissons et invertébrés marins en fonction des scénarios acoustiques des travaux d'aménagement de la Chatière.	172



1. Introduction

Dans le cadre du développement de la filière offshore, HAROPA Port Le Havre s'apprête à réaliser des travaux de rénovation de ses infrastructures. Divers travaux vont être réalisés dans le bassin Théophile DUCROCQ à flot (notamment la réalisation d'un quai d'installation et d'import par renforcement du quai existant) ainsi qu'au niveau de la zone de la future Chatière avec notamment la création d'une future digue et d'un futur chenal entre l'avant-port historique et l'avant-port Port 2000. Ces travaux sont de nature à introduire dans le milieu marin des sources sonores de type impulsif et continu de forts niveaux. Ces sources sonores sont de nature à modifier le paysage sonore sous-marin pré existant.

HAROPA Port le Havre s'est donc engagé auprès des services de l'Etat à réaliser un état initial de l'acoustique sous-marine avant travaux et un suivi acoustique durant la phase des travaux. Dans ce contexte NEREIS Environnement a été mandaté pour réaliser ce suivi acoustique. Le périmètre géographique associé à cette étude acoustique couvre l'ensemble de l'avant-port et les bassins associés à savoir : bassin de la MANCHE, bassin Théophile DUCROCQ, bassin René COTY, bassin du PACIFIQUE, Canal d'accès à Port 2000 et bassin Hubert RAOUL-DUVAL, comme le montre la figure 1. Ce périmètre défini par HAROPA Port le Havre constitue ainsi la zone d'étude.

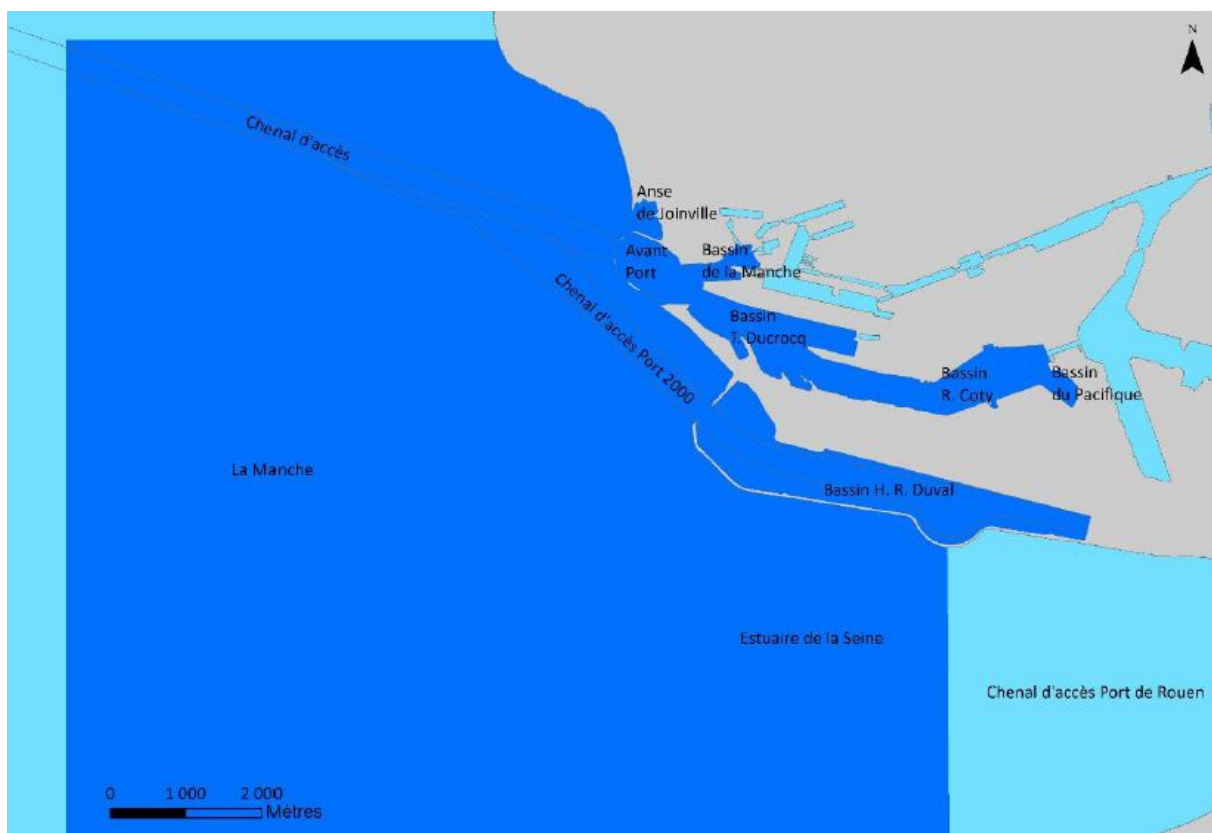


Figure 1. Zone d'étude HAROPA Port Le Havre (source : CCP HAROPA Port Le Havre).



A ce titre une campagne de prise de mesures *in situ* a été réalisée du 2 novembre au 5 novembre 2020. Les mesures réalisées avaient pour objectifs de :

- Réaliser un modèle théorique de propagation des ondes sonores ;
- Réaliser un suivi acoustique avec pour objectif de caractériser et de quantifier l'impact acoustique des travaux maritimes prévus.

De ce fait durant cette première campagne de mesure avant travaux, une série de mesures acoustiques en point fixe et en radiales en dérive sur l'ensemble des bassins constituant le périmètre de l'étude a été réalisée.

En complément de ces mesures, une phase de calibration des pertes acoustiques observées sur le bassin T. DUCROCQ a été effectuée pour ajuster le modèle acoustique généré.

L'ensemble des mesures acoustiques a permis d'établir un modèle acoustique du bruit ambiant sous-marin en fonction de la densité du trafic maritime et de la saisonnalité.

Une synthèse bibliographique des espèces marines présentes dans la zone d'étude a été réalisée afin de recenser les espèces potentiellement présentes dans la zone d'étude. Les sensibilités de ces espèces ont par ailleurs été définies.

Compte tenu de la crise sanitaire liée au COVID, les travaux initialement prévus en 2021 sont décalés d'une année. De ce fait, les scénarios acoustiques associés aux différentes phases de travaux n'ont pas pu être établis notamment du fait d'un manque de visibilité sur le choix des technologies retenues pour les différents chantiers. Ainsi les évaluations des effets sonores et du risque d'impact associé aux travaux d'aménagement du bassin T. DUCROCQ feront l'objet d'une étude complémentaire.

2. Matériel utilisé

2.1. L'enregistreur autonome OSEAN

Pour l'acquisition de données acoustiques *in situ* en point fixe au niveau du bassin T. DUCROCQ, un enregistreur autonome OSEAN a été utilisé. Les caractéristiques de cet enregistreur sont décrites dans le tableau 1 ci-dessous.



Tableau 1. Caractéristiques de l'enregistreur autonome OSEAN utilisé pour l'acquisition de données sur le site d'essai en mer.

Caractéristiques	OSEAN
Bande passante d'acquisition	De 7 Hz à 102 kHz
Dimensions	120 cm de long - 12,5 cm de diamètre
Poids	17 kg dans l'air - 3 kg dans l'eau
Profondeur de déploiement	100 m
Autonomie	28 jours (en continu)
Capacité de stockage	jusqu'à 2 To
Enregistrement	En continu
Gain	Réglable
Fréquence d'échantillonnage max.	250 kHz
Niveau max. mesuré	207 dB re 1 μ Pa
Codage	24 bits



Cet enregistreur était équipé d'un hydrophone Neptune D140 dont les caractéristiques sont décrites dans le tableau 2.

Tableau 2. Caractéristiques de l'hydrophone Neptune D140 couplé à l'enregistreur OSEAN.

Caractéristiques	Hydrophone Neptune D140
Bande passante	De 3 Hz à 125 kHz
Sensibilité	-207,1 dB ref 1V/ μ Pa Réponse plate à +/- 1 dB

L'enregistreur OSEAN a été positionné au bout du môle centrale dans le bassin T. DUCROCQ à l'aide d'un mouillage constitué d'un corps-mort de 40 kg (figure 2). Ce mouillage était matérialisé par 2 bouées en surface.

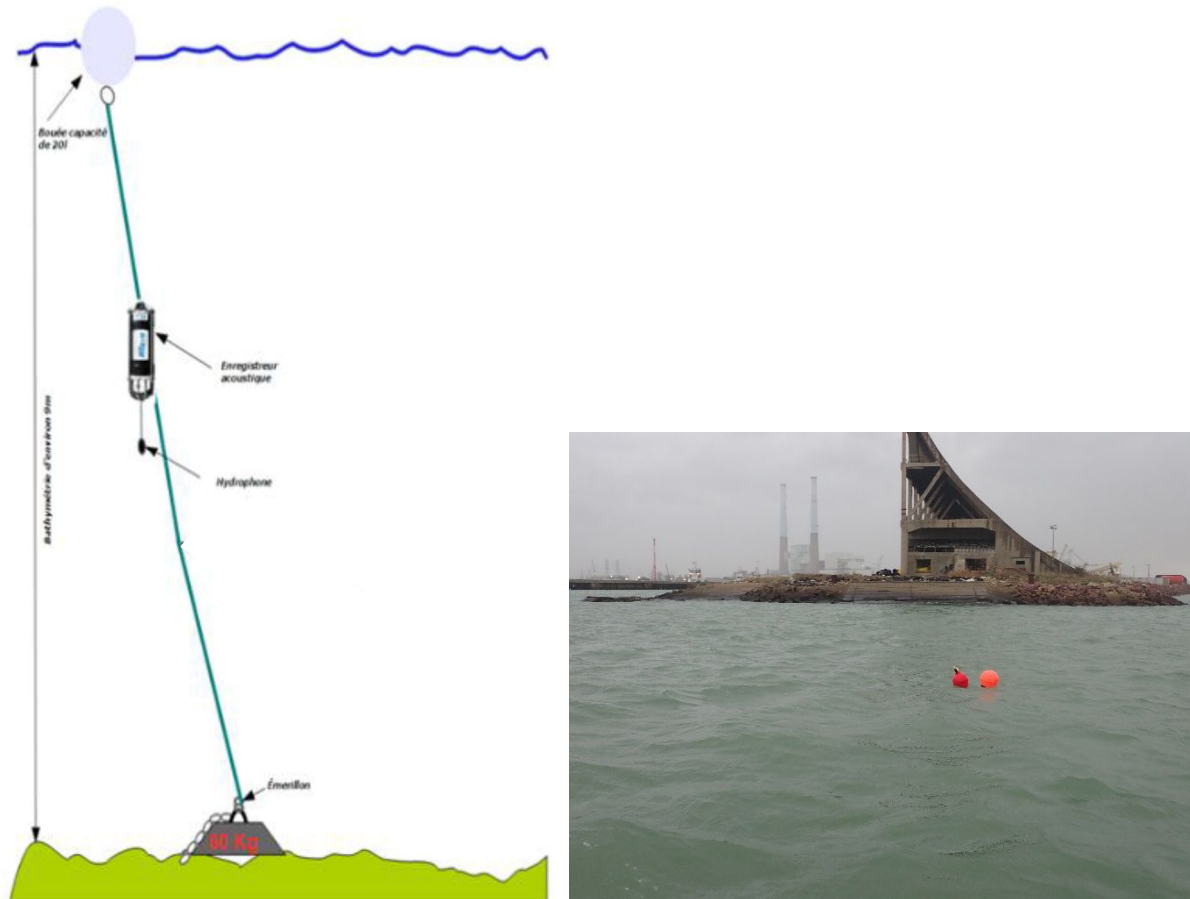


Figure 2. Mouillage de l'enregistreur acoustique positionné sur un corps mort de 40 kg.

2.2. Chaîne d'acquisition portable MARANTZ/TASCAM

Pour compléter les données acoustiques acquises par l'enregistreur OSEAN, des enregistrements complémentaires ont été réalisés à l'aide d'une chaîne d'acquisition portable pour les radiales acoustiques en dérive. Cette chaîne était constituée d'enregistreurs numériques MARANTZ et TASCAM, d'un amplificateur B&K NEXUS et d'un hydrophone B&K type 8106.

Les caractéristiques de cette chaîne portable sont décrites dans le tableau 3 ci-dessous.

Tableau 3. Caractéristique de la chaine acoustique MARANTZ/TASCAM.

Caractéristiques	Chaine acoustique MARANTZ /TASCAN
Bande passante	De 10 Hz à 96 kHz
Capacité de stockage	32 Go (carte SD)
Enregistrement	En continu
Gain	réglable
Fréquence d'échantillonnage max.	192 kHz
Niveau max. mesuré	174 dB re 1 µPa
Codage	24 bits



Cette chaine était équipée d'un hydrophone B&K type 8106 dont les caractéristiques principales sont présentées dans le tableau 4.

Tableau 4. Caractéristique principale de l'hydrophone B&K 8106.

Caractéristiques	Hydrophone B&K 8106
Bande passante	De 10 Hz à 100 kHz
Sensibilité	-174.1 dB ref 1V/µPa Réponse plate à +/- 1 dB

Les enregistrements effectués avec l'enregistreur OSEAN et avec la chaine portable présentent les mêmes caractéristiques fréquentielles et sont donc intégralement comparables.

2.3. Sonde multiparamètres CTDDO

Lors de la pose de l'enregistreur OSEAN, deux profils de température et de salinité en fonction de la profondeur ont été réalisés afin de calculer le profil bathycélérimétrique nécessaire à la calibration du modèle de propagation des ondes sonores. Pour réaliser ces profils, une sonde multiparamètres MP4 CTDDO (NKE) a été utilisée. Les caractéristiques de cette sonde sont détaillées dans le tableau 5 ci-après.

Tableau 5. Caractéristiques de la sonde multiparamètres NKE MP4.

Paramètre (unité)	Gamme de mesure	Précision	Résolution
Profondeur (m)	0 à 30 m	0,06 m	0,006 m
Température (°C)	-5°C à 35°C	< 50 m°C dans la gamme 0-20°C	13 m°C à 10°C
Salinité (‰)	2 à 42 ‰ à 20°C	±0,1 ‰	0,0011 ‰
Saturation en O2 dissous (%)	0 à 120 %	< 5 %	0,01 %



Partie A

3. Méthodologie de l'étude

3.1. Définition du périmètre de la zone d'étude

Les travaux prévus vont se dérouler dans le bassin T. DUCROCQ, sur le quai situé au nord de ce bassin et au niveau de la future Chatière. Ce bassin sera donc une aire d'étude immédiate. Les travaux pouvant engendrer des impacts potentiels sur une zone un peu plus large, une aire d'étude éloignée est également considérée.

L'aire d'étude éloignée correspond ainsi à la limite de collecte des données concernant le trafic maritime dans la zone d'étude (suivi AIS).

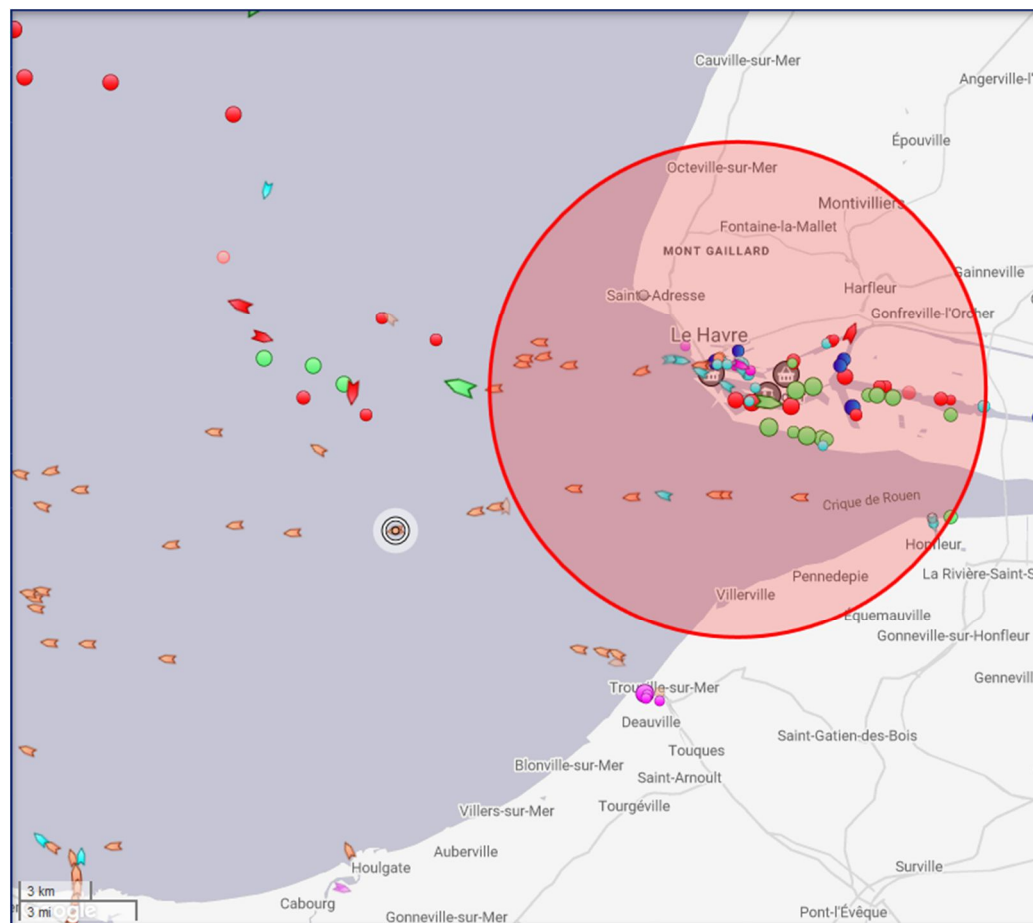


Figure 3. Périmètre du suivi AIS.



3.2. Acquisition des données

3.2.1. Protocole d'acquisition des données acoustiques *in situ*

3.2.1.1. Position de l'enregistreur OSEAN

L'enregistreur autonome OSEAN a été positionné dans le bassin T. DUCROCQ, au bout du môle central (figure 4).

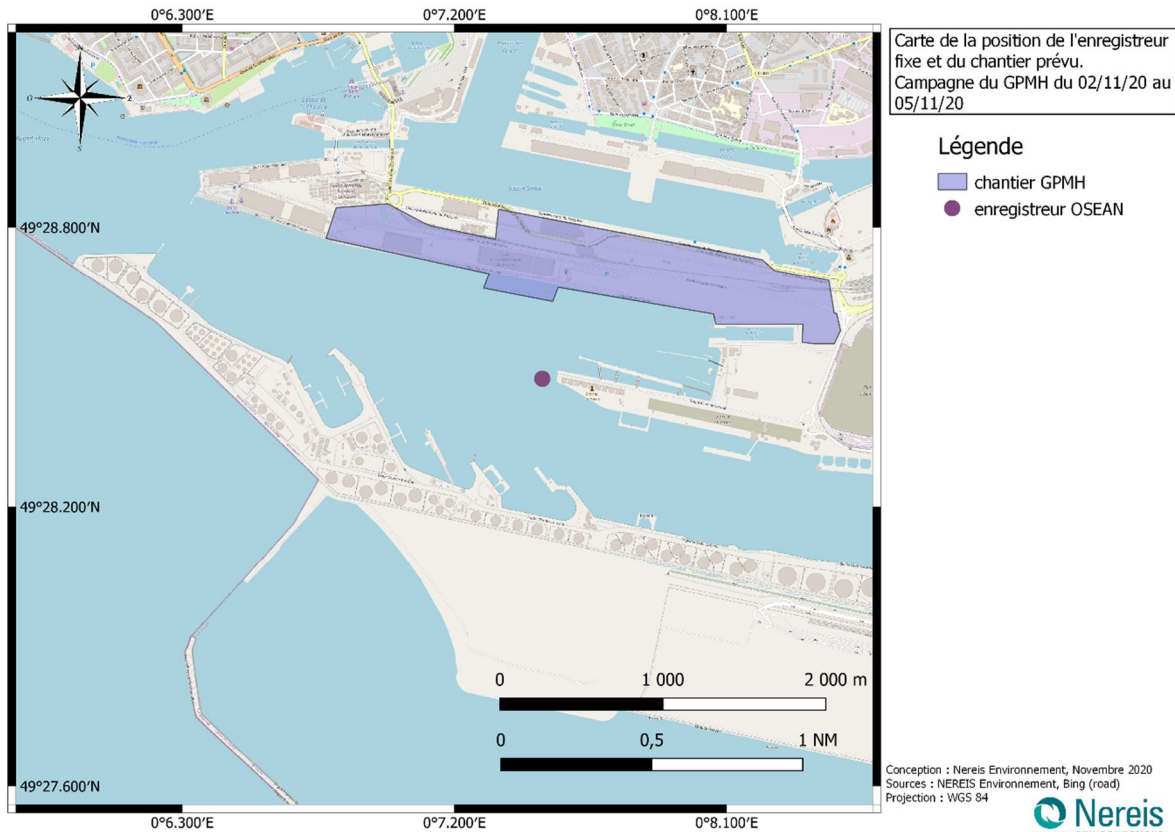


Figure 4. Position de l'enregistreur autonome OSEAN dans le bassin T. DUCROCQ.

Les coordonnées de mouillage de l'enregistreur OSEAN sont présentées dans le tableau 6 ci-dessous.

Tableau 6. Coordonnées du mouillage de l'enregistreur OSEAN (en degrés minutes - WGS84).

	Latitude	Longitude
Enregistreur OSEAN	49°28,4742' N	0°7,4890' W

3.2.1.2. Réalisation des radiales acoustiques

Durant la phase d'acquisition des données acoustiques par l'enregistreur OSEAN, des enregistrements complémentaires ont été réalisés à l'aide d'une chaîne acoustique portable. Ces enregistrements ont été réalisés en dérive à partir du navire L'ECLAT dont le moteur était coupé. Cette barge de travaux sous-marins a été mise à disposition avec un pilote par la CSLN (figure 5).



Figure 5. Navire L'ECLAT affrété par NEREIS Environnement pour la campagne acoustique (source CSLN).

Ces enregistrements acoustiques réalisés par des radiales en dérive viennent augmenter l'échantillonnage spatio-temporel parallèlement réalisé sur la zone d'étude en point fixe avec l'enregistreur OSEAN. Ils permettent de mettre en relation les niveaux de bruit mesurés dans le bassin T. DUCROCQ avec ceux des autres bassins. Ainsi les analyses acoustiques permettront de mettre en évidence les variations de bruit observées et d'associer les différents usages des bassins avec un paysage sonore.

Les radiales acoustiques théoriques sont présentées sur la figure 6.

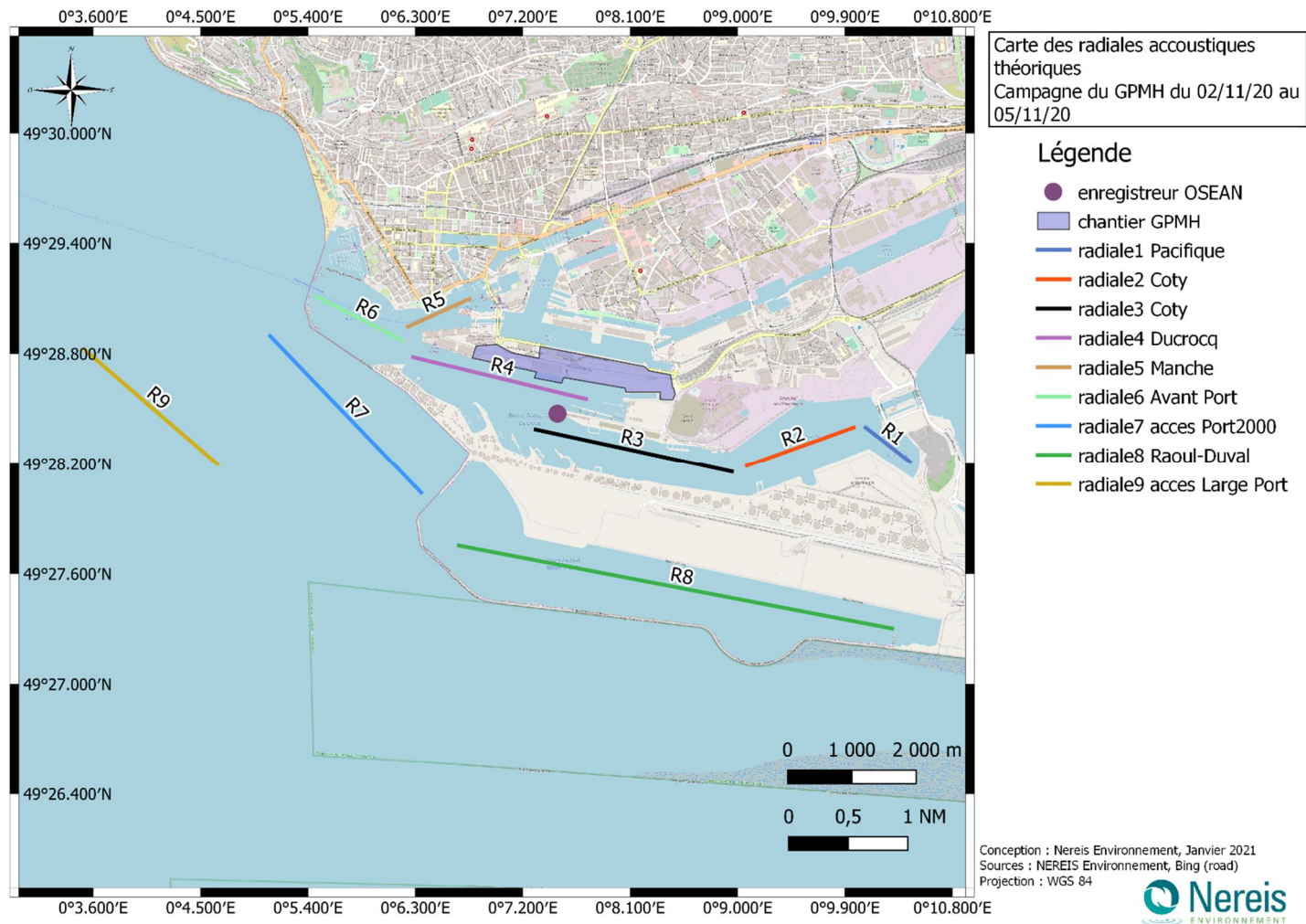


Figure 6. Carte synthétique des radiales acoustiques théoriques.



3.2.1.3. Calendrier et durée des enregistrements

L'enregistreur autonome OSEAN a été déployé à l'extrémité du môle central au niveau du bassin T. DUCROCQ le 2 novembre 2020 matin et relevé le 5 novembre 2020 en matinée.

Pour la réalisation de cette étude, les enregistrements collectés entre le 2 novembre 2020 à 10h00 heure locale (heure de mise à l'eau du capteur) et le 5 novembre à 7h50 heure locale ont été exploités. Cette étude se base donc sur 3 jours d'enregistrement en continu.

3.2.2. Acquisition des métadonnées

Des métadonnées contextuelles et environnementales ont également été collectées au cours de cette étude afin :

- D'évaluer les contributions au bruit ambiant global des composantes liées à la géophonie, la biophonie et l'anthropophonie ;
- D'établir un modèle de propagation des ondes sonores représentatif de la zone d'étude grâce à une phase de calibration par source sonore active.

3.2.2.1. Métadonnées contextuelles : analyse du trafic maritime

L'évaluation de la contribution des activités anthropiques au bruit ambiant, ou anthropophonie, nécessitait d'évaluer également le trafic maritime sur la zone d'étude. De ce fait, un suivi en temps réel des navires équipés d'AIS sur la zone d'étude éloignée a été réalisé, via l'application Marine Traffic (www.marinetraffic.com). Durant toute la période d'enregistrement, l'ensemble des navires entrant ou sortant du cercle de détection délimitant l'aire d'étude éloignée a ainsi été recensé. Les informations concernant la fréquentation de la zone d'étude par les différents types de navires (densité, fréquence de passage, principales routes empruntées) ont été synthétisées et intégrées dans le modèle de propagation des ondes sonores.

Ces données ponctuelles sont complétées par les données annuelles de trafic maritime observées en 2018 qui constituent pour cette étude le support de données statistiques annuelles de référence.

HAROPA Port Le Havre a ainsi fourni une base de données recensant l'ensemble du trafic maritime dans le port au cours de l'année 2018. Tous les mouvements dans le port ont été classés dans une base de données détaillant le nom, le type du navire, la date et l'heure d'accostage et d'appareillage et le quai auquel il s'accoste. Ces données ont permis d'établir des indicateurs de fréquentations de chaque bassin, par saison et par type de navire ainsi que les axes principaux de navigation. Ces données sont prises en compte lors de la modélisation acoustique dans le cas des différents scénarios de densité de trafic et de saisonnalité.



Ainsi une semaine par mois a été considérée comme représentative de l'activité du trafic maritime. Chacune des journées associées à ces périodes a fait l'objet d'une analyse des entrées et sorties et stationnement à quai des navires selon leur type. Sur la semaine une première moyenne a été établie en fonction des différentes rotations. Le maximum a été établi en considérant la journée pour laquelle le nombre de rotation était le plus important. Le minimum a été établi en considérant la journée pour laquelle le nombre de rotation était le plus faible. Enfin l'analyse par saison a été réalisée en reprenant la même méthode.

3.2.2.2. Métadonnées environnementales collectées et intégrées au modèle acoustique

- Influence du vent et de l'état de mer

Un suivi des conditions météorologiques (force et direction du vent, état de mer et hauteur de houle, précipitations) a été réalisé durant toute la période d'enregistrement afin d'estimer la contribution des phénomènes météorologiques au bruit ambiant global de la zone d'étude éloignée et à l'intérieur des bassins portuaires.

- Influence de la marée

La variation de la hauteur d'eau (associée au marnage) au niveau de l'enregistreur OSEAN a également été prise en compte et intégrée dans le modèle de propagation des ondes sonores afin de tenir compte des incidences sur les phénomènes de propagation (notamment de l'évolution sur la fréquence de coupure).

- Influence des variations de température et de stratification de la mer

Des profils de température et salinité en fonction de la profondeur ont été réalisés lors de la pose de l'enregistreur OSEAN afin d'établir de calculer la célérité des ondes sonores sur l'ensemble de la colonne d'eau (profil bathycélérimétrique en fonction de la profondeur). Le profil bathycélérimétrique ainsi établi a été ensuite intégré au modèle.

- Influence de la bathymétrie et de la nature du fond

Les données concernant la bathymétrie et la nature du fond sur la zone d'étude ont été fournies par HAROPA Port Le Havre. Ces données ont été intégrées au modèle afin de prendre en compte le relief du fond et la nature du substrat dans les paramètres



géo acoustiques. Ces paramètres ont en effet une forte influence sur la propagation des ondes sonores.

- Calibration des pertes acoustiques sur le bassin T. DUCROCQ

Une analyse des pertes acoustiques observées sur le bassin T. DUCROCQ a été réalisée avec l'utilisation d'une source sonore calibrée. Les résultats de cette campagne de mesure ont été intégrés au modèle acoustique.

3.3. Traitement et analyse des données

3.3.1. Choix des indicateurs et conformité avec les normes acoustiques en vigueur

Pour évaluer le niveau de bruit ambiant sur la zone d'étude et le niveau de bruit perçu par la faune marine, des indicateurs ont été calculés. Les indicateurs acoustiques retenus, présentés dans le tableau 7, sont conformes aux recommandations du Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire¹ et à la **norme ISO-18405 2017 Acoustique sous-marine - Terminologie.**

¹ MTES, 2020. Préconisations pour limiter les impacts des émissions acoustiques en mer d'origine anthropique sur la faune marine. 209 p.



Tableau 7. Indicateurs acoustiques retenus pour l'étude du bruit ambiant sur la zone d'étude.

Indicateur		Notation ISO	Notation courante	Unité	Utilisation
Bruit émis	Niveau d'émission	L_s	SL	dB re 1 μ Pa @ 1 m	Etablit le niveau d'émission d'une source sonore
	Densité spectrale de puissance	-	DSP (ou PSD)	dB re 1 μ Pa ² /Hz	Etablit le spectre acoustique d'une source de bruit (distribution du niveau de bruit en fonction de la fréquence)
Bruit reçu	Niveau de pression sonore (niveau peak)	$L_{p,pk}$ ou $L_{p,0-pk}$	SPL peak	dB re 1 μ Pa @ X m	Quantifie le niveau de pression reçu par un récepteur à une distance donnée de la source émettrice (différence de pression maximale ou minimale par rapport à la pression de référence)
	Densité spectrale de puissance	-	DSP (ou PSD)	dB re 1 μ Pa/ \sqrt Hz @ X m	Quantifie le niveau de pression reçu par un récepteur à une distance donnée de la source émettrice par bande de fréquence et sur une période donnée.
	Densité spectrale de puissance	-	DSP (ou PSD)	dB re 1 μ Pa ² /Hz	Etablit le spectre acoustique du bruit reçu par un hydrophone (distribution du niveau de bruit en fonction de la fréquence) sans prendre en compte la distance entre l'émetteur et le récepteur
	Niveau équivalent continu	$L_{eq,T}$	Leq	dB re 1 μ Pa	Quantifie le niveau large bande moyenné sur toute la période d'enregistrement
	Niveau d'exposition sonore	$L_{E,p}$	SEL _{ss}	dB re 1 μ Pa ² .s	Evalue la quantité d'énergie reçue lors d'une impulsion sonore en intégrant également sa durée
	Niveau d'exposition sonore cumulée	$L_{E,p}$	SEL _{cum}	dB re 1 μ Pa ² .s	Evalue la quantité d'énergie cumulée reçue lors de plusieurs impulsions en intégrant également leur durée
Bruit perçu	Niveaux d'exposition sonore pondérés	$L_{E,p,HG,24h}^2$	TTS ou PTS SEL	dB re 1 μ Pa ² .s	Définit les niveaux d'exposition sonore à partir desquels les groupes d'espèces considérés sont susceptibles de subir des pertes d'audition temporaires (TTS) ou permanentes (PTS)

² HG pour "Hearing Group" : dépend du groupe d'audition auquel appartient l'animal considéré ; 24h car le niveau est calculé pour une exposition sur 24 heures.



3.3.2. Logiciels utilisés pour le traitement des données acoustiques

Les enregistrements réalisés dans le cadre de cette étude ont été traités et analysés à l'aide de l'outil SEAc (figure 7), développé par NEREIS Environnement. Cet outil intègre plusieurs logiciels de traitement du signal et permet d'analyser les données acoustiques en intégrant 4 phases :

- **L'acquisition des données acoustiques *in situ*.** L'adéquation entre les performances de l'enregistreur et les traitements en analyse spectrale ont été optimisés ;
- **Le traitement et l'analyse des données acoustiques** qui reposent sur des algorithmes de détection semi-automatique et traitements FFT (Fast Fourier Transformation) ;
- La comparaison des données collectées et traitées avec une base de données de référence ;
- **La modélisation en acoustique sous-marine** qui permet de déterminer l'empreinte sonore associée à chaque opération à qualifier et l'impact acoustique potentiel sur les espèces marines, dont les mammifères marins.

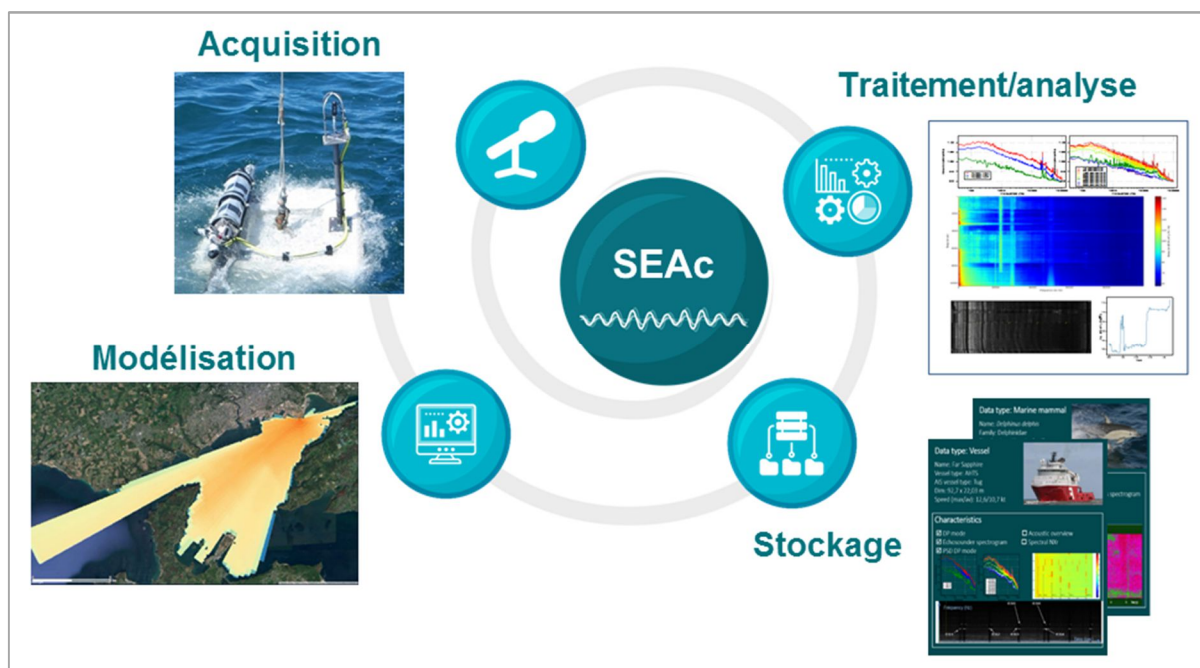


Figure 7. Outil de traitement SEAc développé par NEREIS Environnement.

3.3.3. Evaluation de la contribution des différentes composantes du bruit ambiant

3.3.3.1. Contribution de la géophonie

La géophonie regroupe les bruits d'origine naturelle liés aux phénomènes météorologiques (pluie, vent, *etc.*) et à l'agitation de l'océan, les bruits liés aux courants ainsi que les bruits liés aux phénomènes sismiques et au volcanisme sous-marin.

L'état de mer influe sur la propagation des ondes sonores, notamment par l'agitation de la mer en surface qui perturbe les phénomènes de réflexion des ondes sonores et engendre des pertes d'énergie importantes. L'augmentation de l'état de mer influe sur le bruit ambiant, en particulier en basse et moyenne fréquences.

Dans le cadre de cette étude, un suivi des conditions météorologiques sur la zone d'étude a été réalisé durant toute la durée des enregistrements. Ce suivi consistait à consigner les paramètres d'état de mer (hauteur des vagues, force du vent) ainsi que les phénomènes climatiques ponctuels (pluie, grains, orages) dans une base de données météo, afin de pouvoir corrélérer ces paramètres avec la variation du niveau de bruit mesuré.

Une recherche des bruits d'origine naturelle a également été effectuée dans les enregistrements réalisés *in situ*, à l'aide d'un algorithme de détection automatique intégré dans l'outil SEAc dans un premier temps, puis par l'analyse audio des fichiers sons.

3.3.3.2. Contribution de la biophonie

La biophonie regroupe l'ensemble des sources de bruit d'origine biologique qui contribue au bruit ambiant sur une zone. Deux catégories principales sont ainsi prises en compte : les bruits générés par les crustacés benthiques (tels que les crevettes), et ceux produits par les mammifères marins. Il s'agit des principales espèces capables d'émettre des sons susceptibles d'être interceptées par l'enregistreur ; les autres espèces (mollusques, poissons, *etc.*) ne contribuent pas significativement ou directement au bruit ambiant.

3.3.3.3. Contribution de l'anthropophonie

L'anthropophonie regroupe les sources sonores d'origine anthropique introduites dans le milieu marin. Les activités anthropiques sur la zone d'étude regroupent ainsi les mouvements associés aux navires entrant et sortant du port, aux navires présents à quai, aux opérations de l'ensemble des navires techniques : opérations de dragage et d'entretien des chenaux de navigation, suivi de la bathymétrie sur la zone portuaire par les navires techniques hydrographes, mouvements des bateaux pilotes et des



remorqueurs. Des sources sonores ponctuelles qui caractérisent le bruit ambiant en dehors du trafic des navires ont également été perçues telles que les bruits de chaîne provenant des installations du port.

Pour quantifier le bruit anthropique lié au trafic maritime, un suivi des navires équipés d'AIS (Automatic Identification System) a été réalisé via l'application MarineTraffic³. Cette application permet de visualiser sur une carte en quasi temps réel la position des navires équipés de l'AIS (navire de plus de 12 m). Elle permet également de recevoir une notification lorsqu'un navire entre ou sort d'un périmètre prédéfini. Ainsi, tous les navires équipés d'AIS ayant traversé la zone d'étude éloignée (périmètre de 10 km autour de la position du capteur OSEAN) ont été recensés, classifiés et répertoriés dans une base de données détaillant le type de navire, son nom, la date et l'heure de passage dans la zone d'étude, son cap, sa vitesse, son port de départ et celui de destination. Ces données ont permis :

- D'établir des indicateurs de fréquentation de la zone, par jour et par type de navire ;
- D'établir une liste exhaustive des types de navires fréquentant la zone d'étude ;
- D'isoler le spectre acoustique de chaque type de navire recensé ;
- De définir les principaux axes de navigation des navires autour de la zone d'étude, ainsi que le nombre et le type de navires fréquentant ces axes chaque jour.

3.3.4. Modélisation de la propagation des ondes sonores

Pour modéliser le bruit ambiant sur la zone d'étude, la contribution du trafic maritime au paysage sonore et le bruit perçu par la faune marin, un logiciel de modélisation de la propagation des ondes sonores a été utilisé. Ce modèle répond aux critères définis par le Laboratoire CMST (Centre for Marine Science and Technology) de l'Université de Curtin (Perth, Australie) et décrits par Jensen *et al.* (2011)⁴.

Les algorithmes de modélisation utilisés pour cette étude ont été définis en fonction des caractéristiques géo acoustiques du milieu océanique et des caractéristiques acoustiques des sources sonores (algorithmes adaptés notamment à la hauteur d'eau et à la nature du fond).

Pour calibrer le modèle de propagation des ondes sonores, des données d'entrée fiables et robustes sont indispensables. Pour cette étude, les données d'entrées intégrées au modèle étaient donc :

³ www.marinetraffic.com

⁴ Jensen, F.B., Kuperman, W.A., Porter, M.B. & Schmidt, H., 2011. Computational Ocean Acoustics. Springer, New York, 794 p.

- **La topographie du site et la bathymétrie sur la zone d'étude ;**
- **La nature du fond ;**
- **Les conditions météo-océanographiques moyennes sur la zone d'étude ;**
- **Le trafic maritime sur la zone d'étude, les types de navires présents, leur fréquence d'occurrence et les principales routes de navigation au sein de la zone d'étude ;**
- **Les pertes acoustiques associées à la zone d'étude ;**
- **L'audiogramme des espèces marines potentiellement présentes sur la zone d'étude.**

La modélisation de la propagation des ondes sonores sur la zone d'étude a permis d'établir des cartes du bruit sous-marin sur cette zone, fonction de la saisonnalité et de la densité de trafic maritime.

3.4. Synthèse de la méthodologie appliquée à l'étude

La méthodologie appliquée pour cette étude acoustique est synthétisée sur la figure 8 ci-dessous.



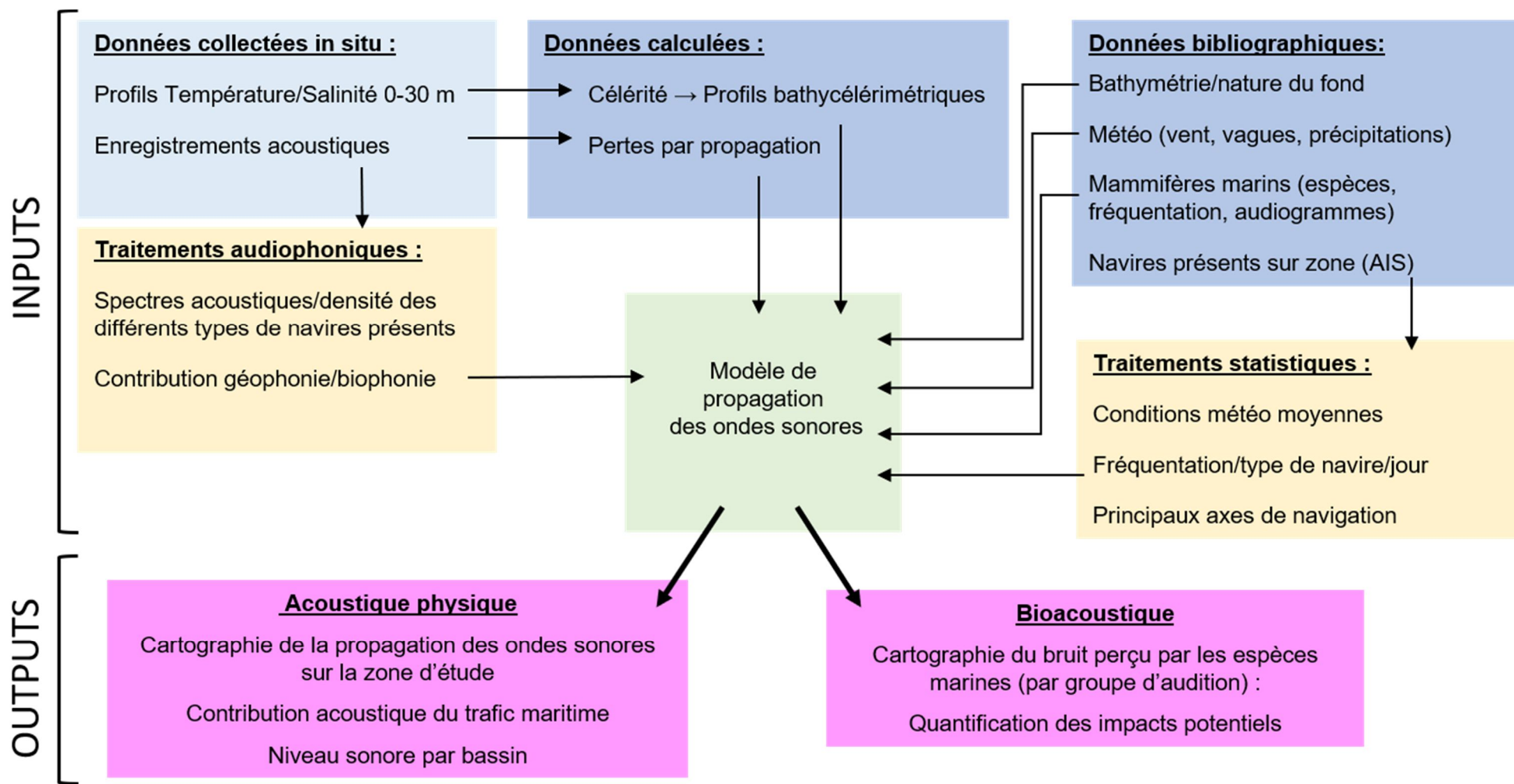


Figure 8. Synthèse de la méthodologie mise en œuvre pour le suivi acoustique de HAROPA Port Le Havre

4. Résultats

4.1. Métadonnées environnementales

4.1.1. Variation de la hauteur d'eau

Les données bathymétriques du SHOM fournies par HAROPA Port Le Havre ont été corrigées en prenant en compte les variations de la hauteur d'eau au niveau de l'enregistreur OSEAN pendant toute la durée des enregistrements. La figure 9 ci-dessous représente la hauteur d'eau corrigée.

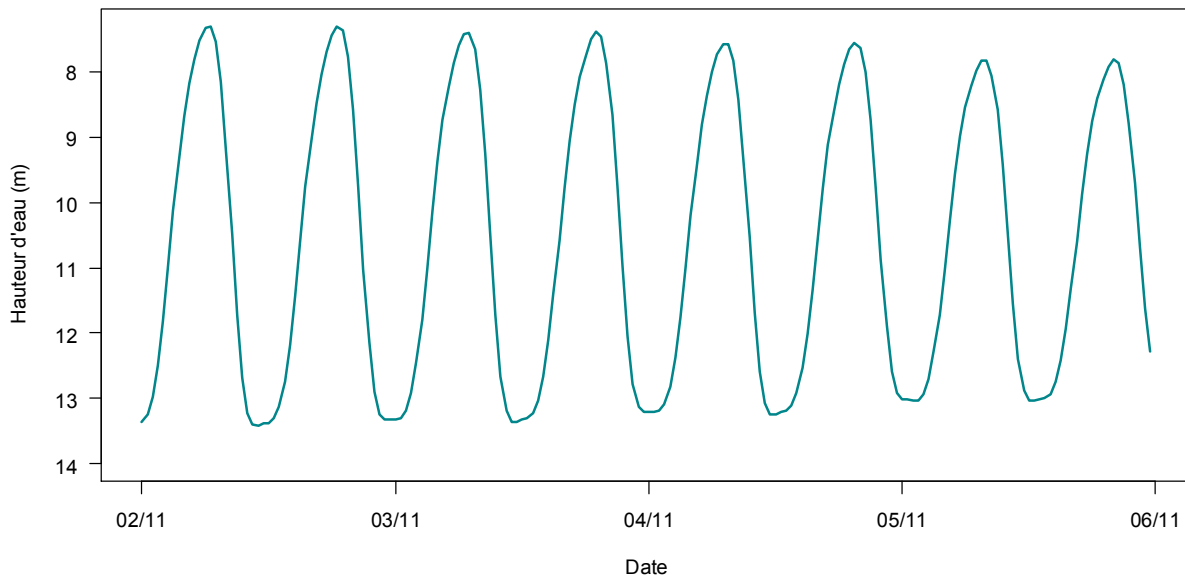


Figure 9. Evolution de la hauteur d'eau au point d'enregistrement au bout du môle central dans le bassin Ducrocq entre le 2 novembre et le 5 novembre 2020.

La hauteur d'eau utilisée dans le modèle de propagation correspond à la moyenne observée sur la zone d'étude entre le 2 novembre et le 5 novembre 2020, à savoir 10,59 m (sd = 2,17 m).

Tableau 8. Horaire des marées au port du Havre et hauteur d'eau à l'extrémité du môle central.

Date	Heure locale	Hauteur d'eau	Coefficients
02/11	06h19	7,28	
	11h28	13,41	84
	18h36	7,29	
	23h46	13,33	82
03/11	06h47	7,38	
	11h56	13,37	80
	19h04	7,38	
04/11	00h50	13,21	78
	07h46	7,55	
	12h59	13,25	75
	20h05	7,55	
05/11	01h28	13,04	71
	08h18	7,80	
	13h37	13,06	67
	20h40	7,81	

4.1.2. Bathycélérimétrie

Des profils de température et salinité en fonction de la profondeur ont été réalisés l'un au niveau du mouillage de l'enregistreur OSEAN le 3 novembre 2020 et l'autre dans le bassin H. RAOUL-DUVAL le 4 novembre 2020. Ces profils ont permis d'évaluer l'évolution de la célérité du son en fonction de la profondeur (figures 11 et 12).

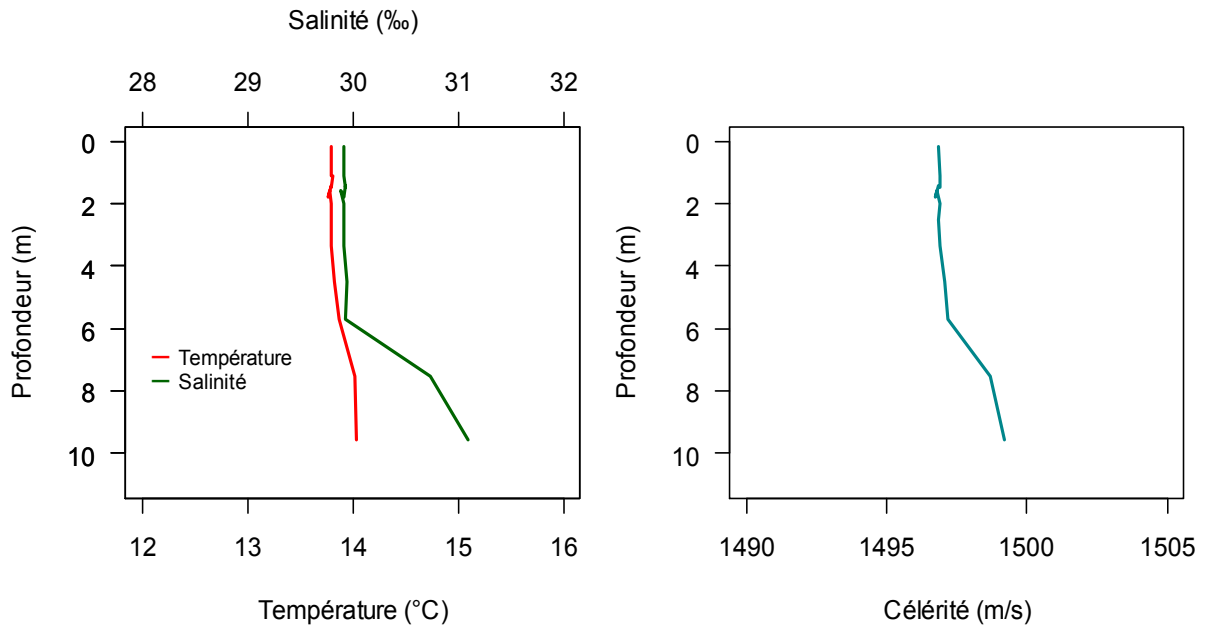


Figure 11. Profils de température et salinité mesurés dans le bassin T. DUCROCQ le 3 novembre 2020 (à gauche) et profil bathycélérimétrique correspondant (à droite).

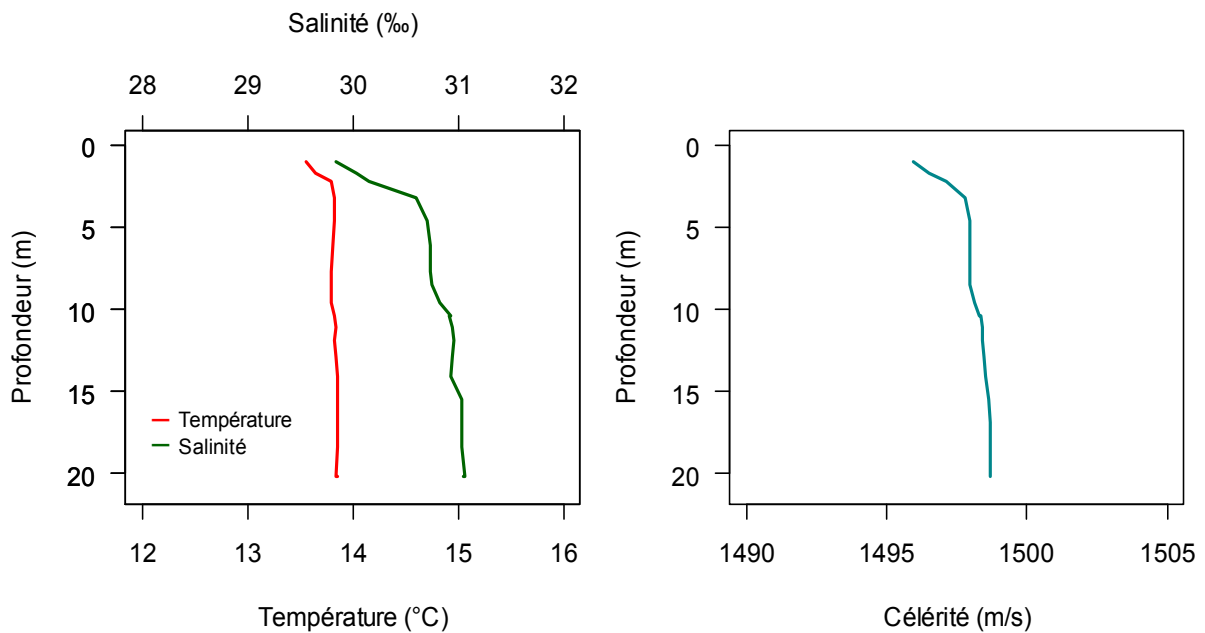


Figure 10. Profils de température et salinité mesurés dans le bassin H. RAOUL-DUVAL le 4 novembre 2020 (à gauche) et profil bathycélérimétrique correspondant (à droite).

Les différences de profils obtenus entre les deux bassins T. DUCROCQ et H. RAOUL-DUVAL s'expliquent par :

- Les variations de conditions météorologiques avec de fortes pluies observées le 3 novembre lors des mesures sur T. DUCROCQ contrairement au 4

novembre avec une absence de précipitation lors des mesures sur le bassin H. RAOUL-DUVAL. L'apport en eau de pluie en surface était donc plus significatif le 3 novembre ;

- La proximité des différents canaux au bassin T. DUCROCQ qui peut expliquer ce gradient de salinité sur les premiers mètres engendré par un fort apport en eau douce des canaux par les écluses.

4.1.3. Pertes acoustiques observées sur la zone d'étude

La calibration acoustique a été axée sur le bassin T. DUCROCQ compte tenu des enjeux acoustiques associé à ce bassin, dans le cadre du suivi des travaux à venir. Ainsi un quadrillage du bassin a été réalisé en effectuant à des points géographiques définis préalablement, une séquence d'émissions sonores calibrées déterminées. Les pertes acoustiques constatées entre le spectre d'émission et celui reçu sur l'enregistreur OSEAN ont permis d'ajuster le modèle avec les modes préconisés en basse fréquence et par petit fond (Jensen et *al.*, 2011).

Un dispositif acoustique constitué d'une chaîne d'émission sonore avec un haut-parleur type Lubell a été donc utilisée. Des trains d'émission sonore calibrés ont ainsi été émis afin d'établir les propriétés géo acoustiques de la zone d'étude.

La figure 12 présente le dispositif utilisé avec le HP Lubell.



Figure 12. Dispositif d'émission sonore sous-marin avec le HP Lubell.

Les caractéristiques acoustiques du HP Lubell sont présentées dans le tableau 9.

Tableau 9. Caractéristiques techniques du HP Lubell.

Caractéristiques	Haut-parleur Lubell®
Type	Drive piston piézoélectrique type Tonpiliz
Réponse en fréquences	200Hz - 20kHz
Niveau de sortie	180dB ref 1µPa @1m à 1kHz
Voltage maximum	20 Vrms / 3A (100% duty cycle)
Profondeur d'immersion	2 à 15 m
Poids	7kg à l'air libre, 1.4 kg dans l'eau
Dimensions	23cm diamètre x 15cm longueur axiale (capteur); 27,30cm x 27,30 x 20cm (cage)

La figure 13 présente la position des points de calibration acoustique réalisés le 2 novembre 2020.

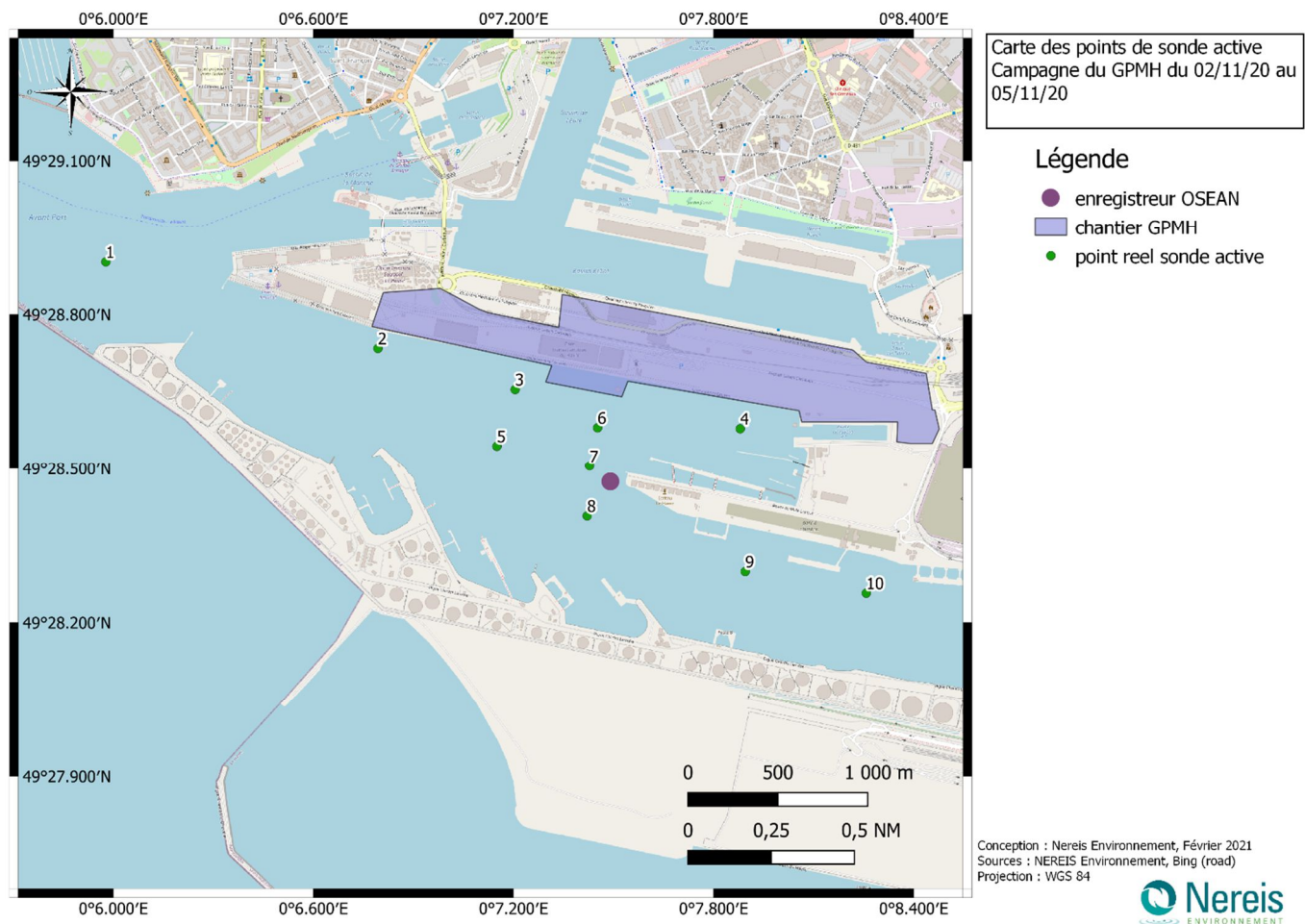


Figure 13. Position des points de calibration par sonde acoustique active.



4.2. Suivi acoustique par radiales

Un suivi par radiale acoustique a été réalisé au cours de la campagne en parallèle des enregistrements réalisés en point fixe par l'enregistreur OSEAN.

Ces radiales ont été réalisées à bord de l'embarcation légère à la dérive L'ECLAT, le moteur et les systèmes électroniques de l'embarcation coupés afin de limiter les bruits du navire support. Les radiales acoustiques permettent d'enregistrer l'ambiance acoustique des bassins autres que le bassin T. DUCROCQ.

Les mesures ont été réalisées par la chaîne portable MARANTZ/TASCAM. Les résultats exploités sont majoritairement ceux du TASCAM en raison de la bande de fréquence d'acquisition semblable à celle de l'enregistreur OSEAN. Le MARANTZ a servi d'enregistreur secours.

Les radiales acoustiques ont permis de collecter l'ambiance sonore des bassins avant-port, MANCHE, PACIFIQUE, T. DUCROCQ, R. COTY, H. RAOUL-DUVAL et également à l'extérieur du port.

Certaines radiales ont été réalisées deux fois, selon deux états de mer distincts (calme et agité) d'établir l'incidence de la météo sur les niveaux acoustiques notamment dans les bassins T. DUCROCQ et avant-port.



Tableau 10. Chronologie des radiales acoustiques effectuées.

Radiale	Date	Heure de début	Heure de fin
R3	02/11/2020	11h28	12h42
R2	02/11/2020	12h47	13h17
R1	02/11/2020	13h21	13h32
R4_1	02/11/2020	14h08	15h02
R6_1	03/11/2020	09h13	09h28
R5	03/11/2020	09h38	10h06
R8	04/11/2020	14h16	16h45
R9	05/11/2020	08h56	10h10
R7	05/11/2020	10h20	12h11
R6_2	05/11/2020	13h42	14h06
R4_2	05/11/2020	14h26	15h30

Les figures 14 à 24 synthétisent les données collectées et traitées au cours des radiales. Ces figures présentent les métadonnées (météo, date/heure, marée) liées à cette radiale, une carte avec la radiale théorique (en trait plein) et la radiale effectuée (en point), les densités spectrales de puissance pour le niveau moyen, minimal et maximal et enfin l'évolution du niveau global enregistré par la chaîne portable (TASCAM ou MARANTZ) ou par l'enregistreur au point fixe (OSEAN).

Une comparaison des niveaux de bruit entre les bassins est ainsi proposée en fonction des radiales réalisées. Les images correspondent aux phénomènes se déroulant dans le bassin où a lieu la radiale, les images acoustiques sont donc bien associées aux spectres mesurés par la chaîne portable TASCAM/MARANTZ.

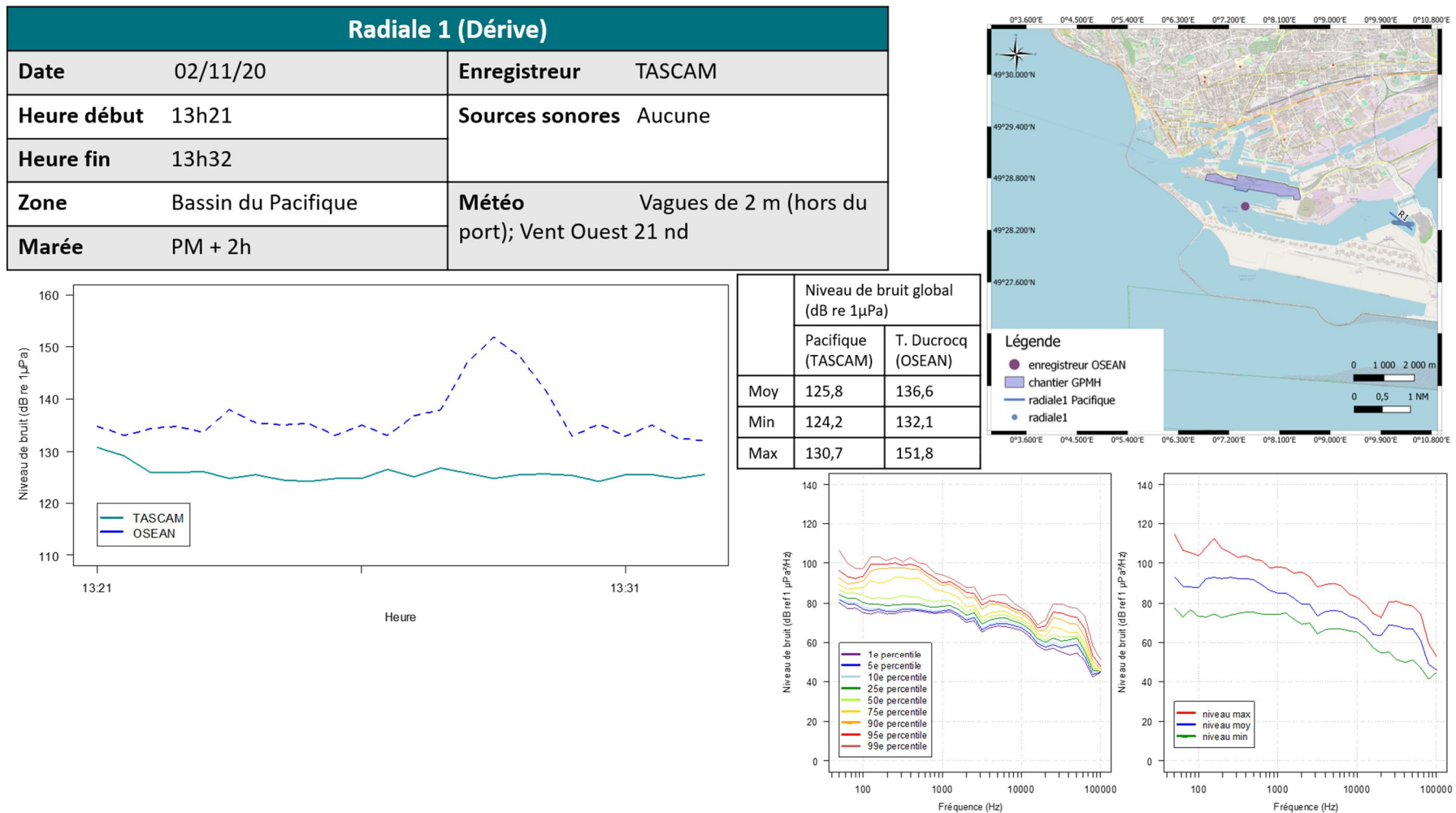
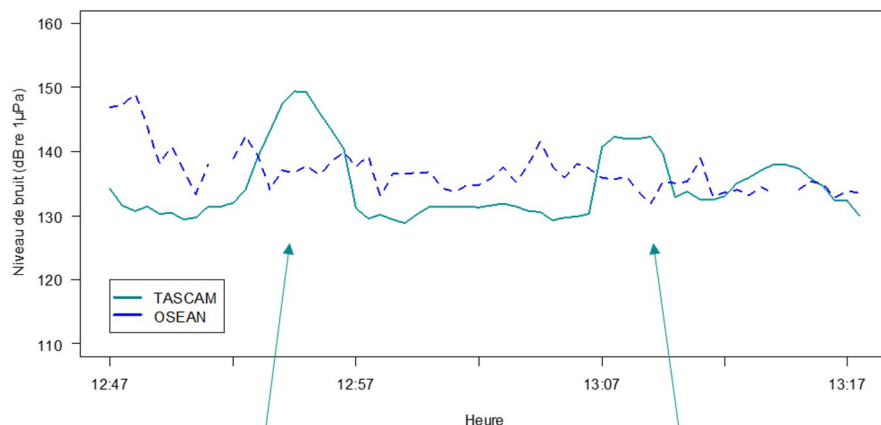
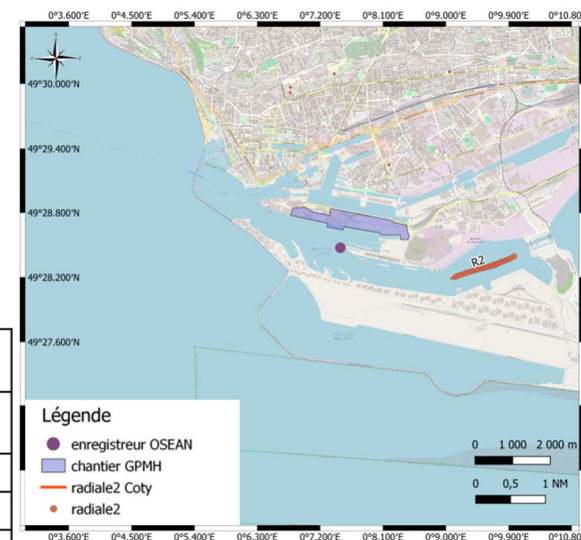


Figure 14. Synthèse des données de la radiale 1.



Radiale 2 (Dérive)			
Date	02/11/20	Enregistreur	TASCAM
Heure début	12h47	Sources sonores	Passage 2 remorqueurs + appareillage 1 porte conteneur
Heure fin	13h17		
Zone	Bassin René Coty	Météo	Vagues de 2 m (hors du port); Vent Ouest 21 nd
Marée	PM + 1h		



	Niveau de bruit global (dB re 1µPa)	
	R. Coty (TASCAM)	T. Ducrocq (OSEAN)
Moy	134,6	136,8
Min	128,9	131,9
Max	149,3	148,8

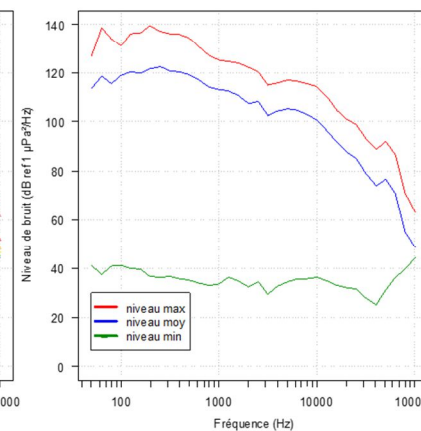
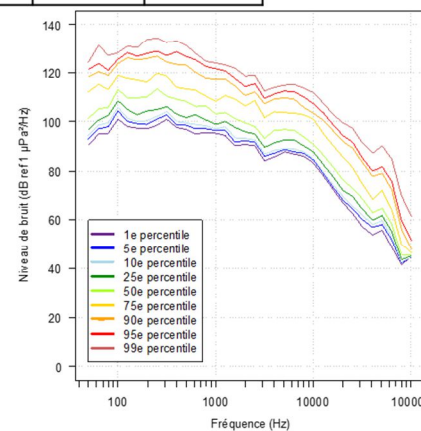
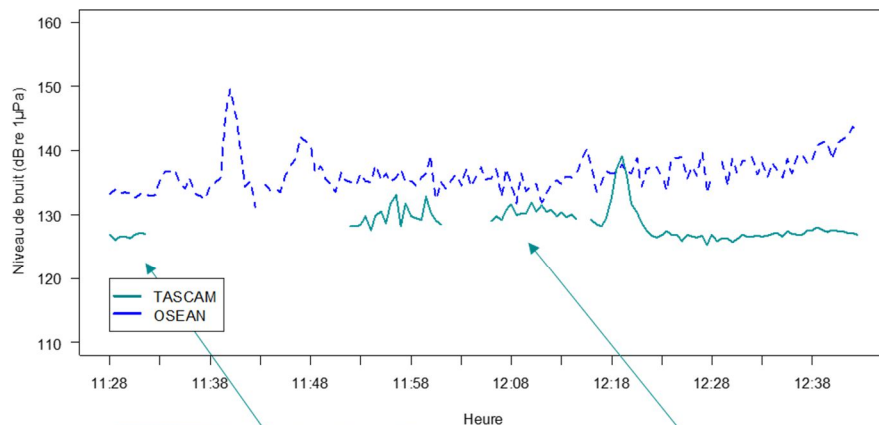
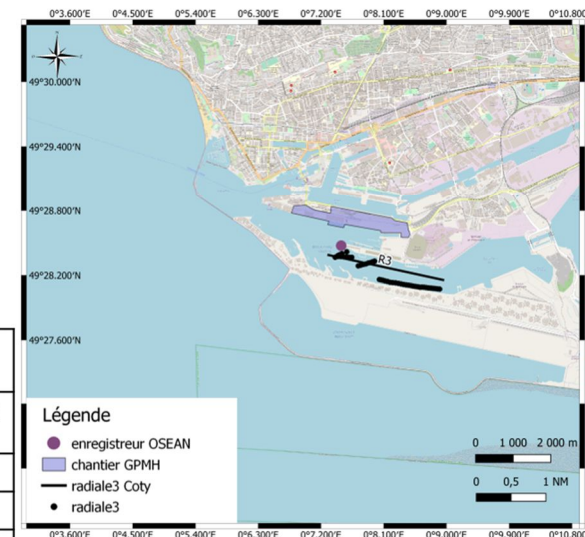


Figure 15. Synthèse des données de la radiales 2.



Radiale 3 (Dérive)			
Date	02/11/20	Enregistreur	TASCAM
Heure début	11h28	Sources sonores	Passage 1 tanker avec 2 remorqueurs + 1 tanker à quai
Heure fin	12h42		
Zone	Bassin René Coty	Météo	Vagues de 2 m (hors du port); Vent Ouest 21 nd
Marée	PM		



	Niveau de bruit global (dB re 1µPa)	
	R. Coty (TASCAM)	T. Ducrocq (OSEAN)
Moy	128,6	136,4
Min	125,3	131,2
Max	139,1	149,4

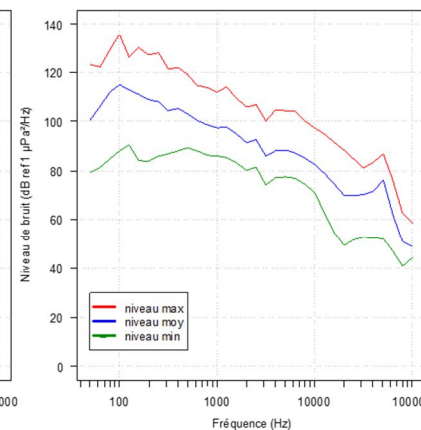
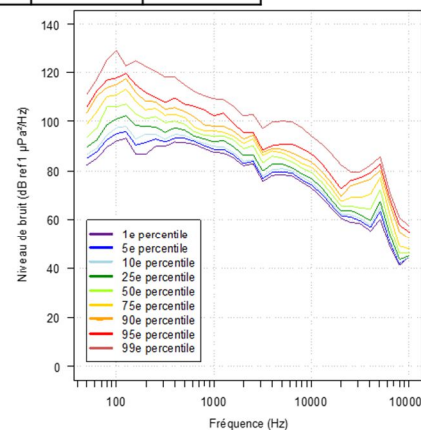
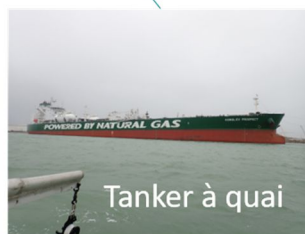
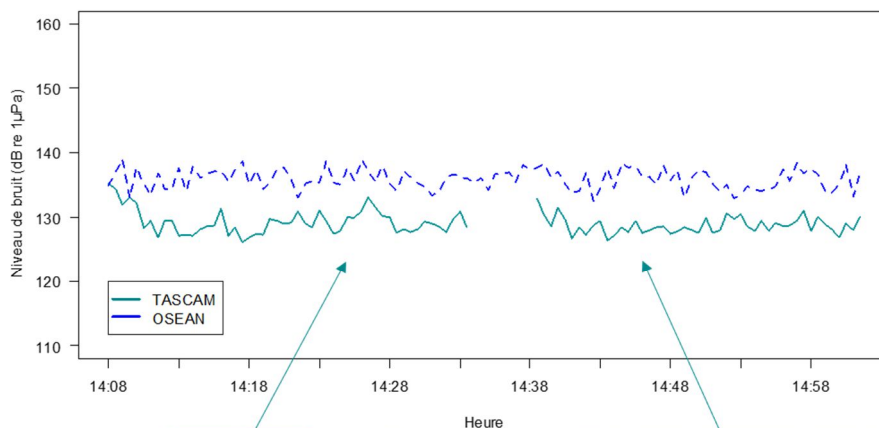
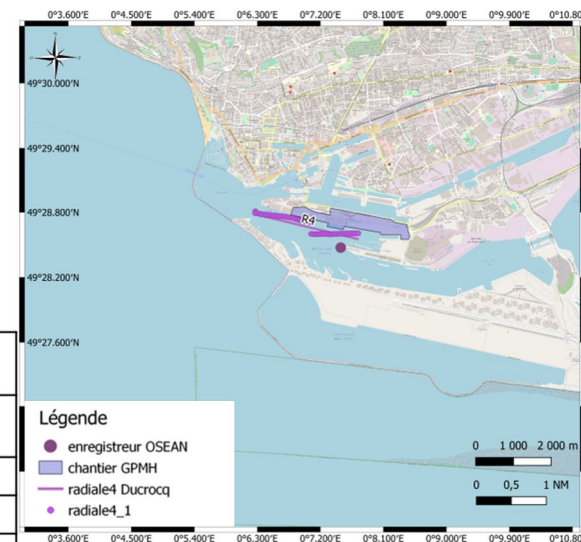


Figure 16. Synthèse des données de la radiale 3.



Radiale 4_1 (Dérive)			
Date	02/11/20	Enregistreur	TASCAM
Heure début	14h08	Sources sonores	Bruit de chaînes + 1 drague à quai
Heure fin	15h02		
Zone	Bassin Théophile Ducrocq	Météo	Vagues de 2 m (hors du port); Vent Ouest 21 nd
Marée	PM + 3h		



	Niveau de bruit global (dB re 1µPa)	
	T. Ducrocq (TASCAM)	T. Ducrocq (OSEAN)
Moy	129	135,9
Min	126,1	132,4
Max	135,2	138,9

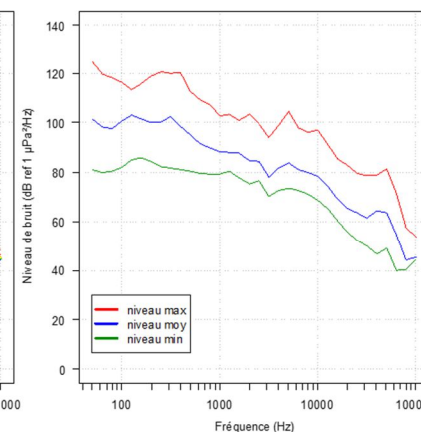
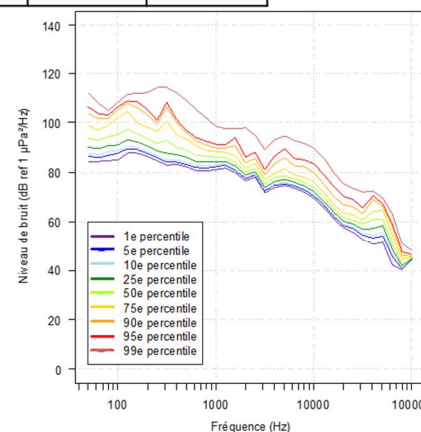


Figure 17. Synthèse des données de la radiale 4 (1).



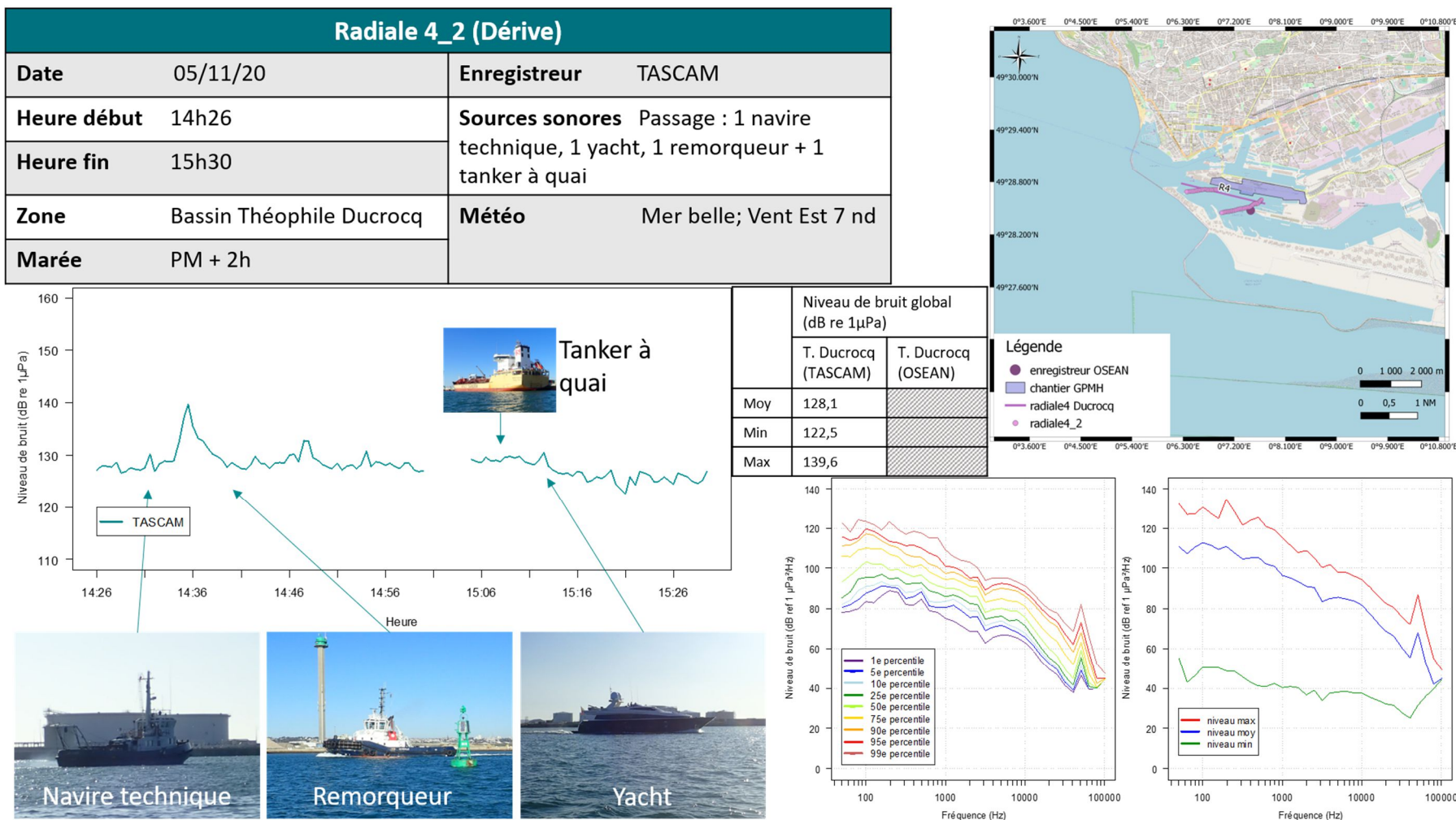


Figure 18. Synthèse des données de la radiale 4 (2).



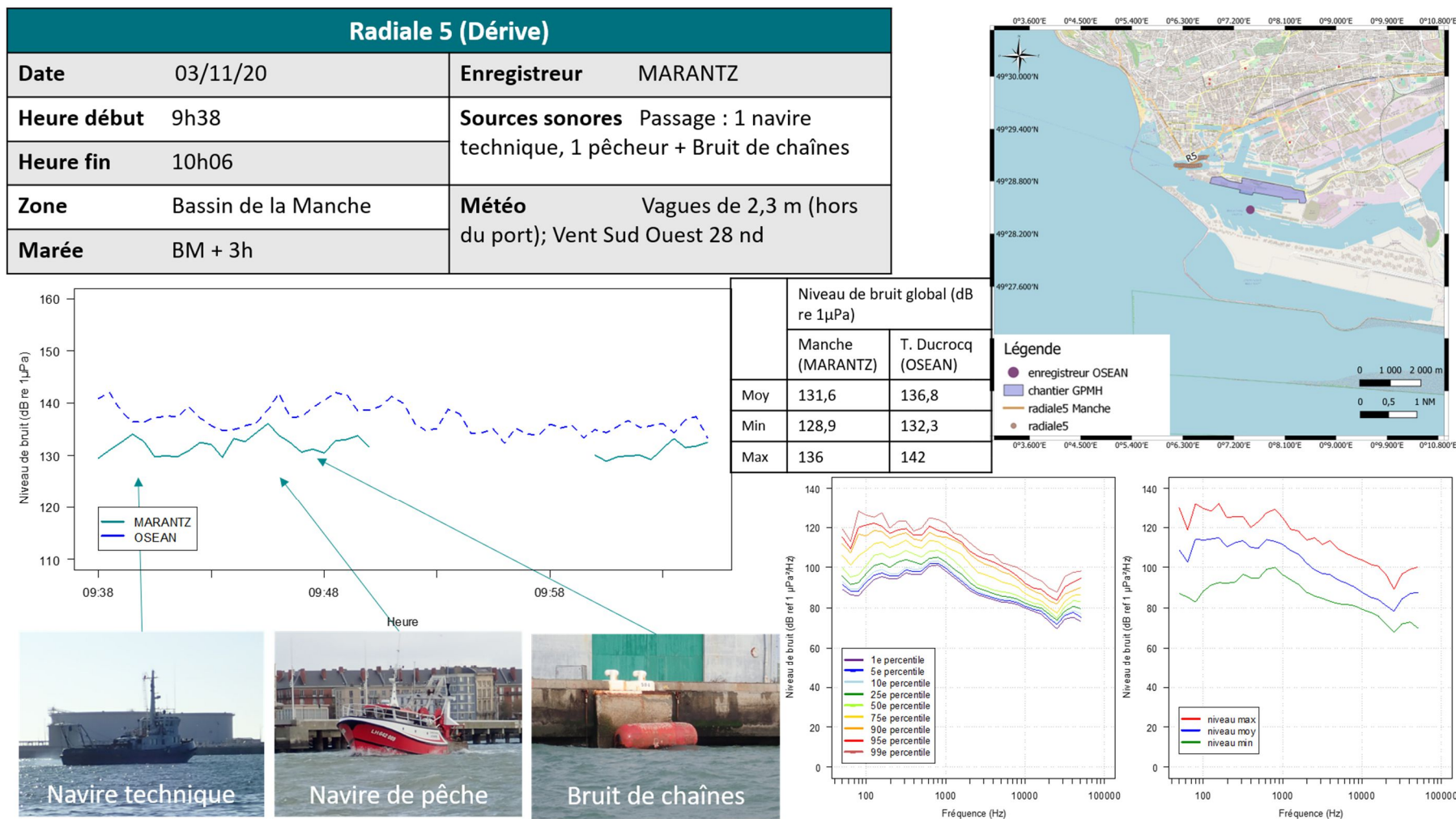


Figure 19. Synthèse des données de la radiale 5.



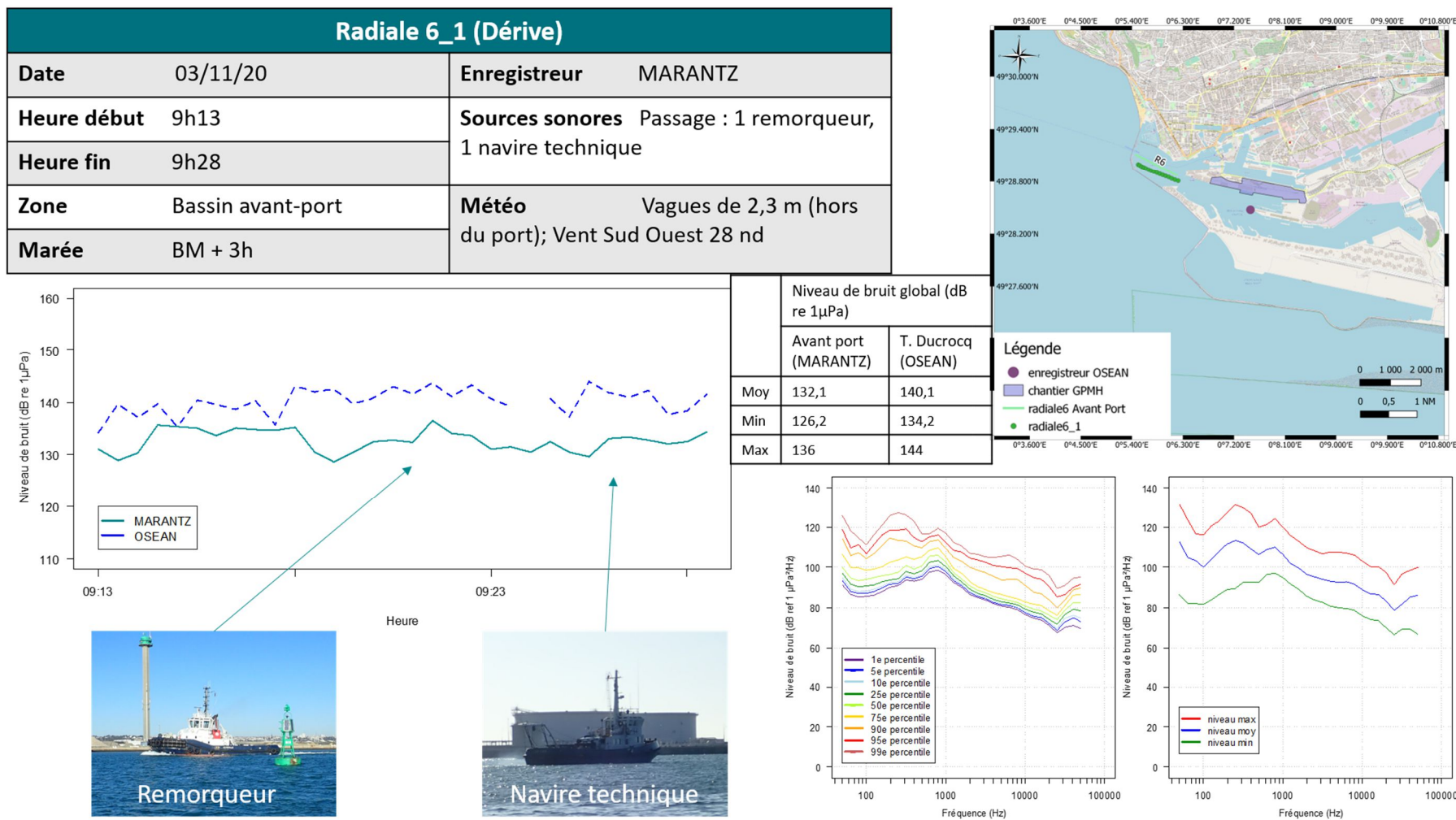
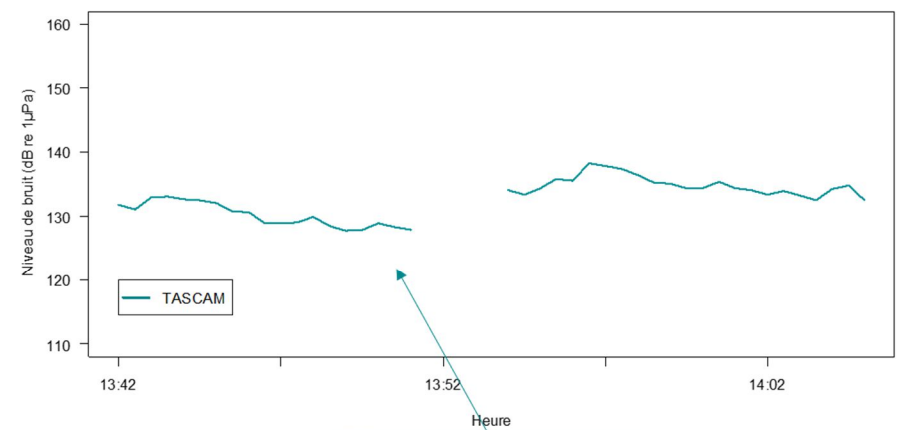
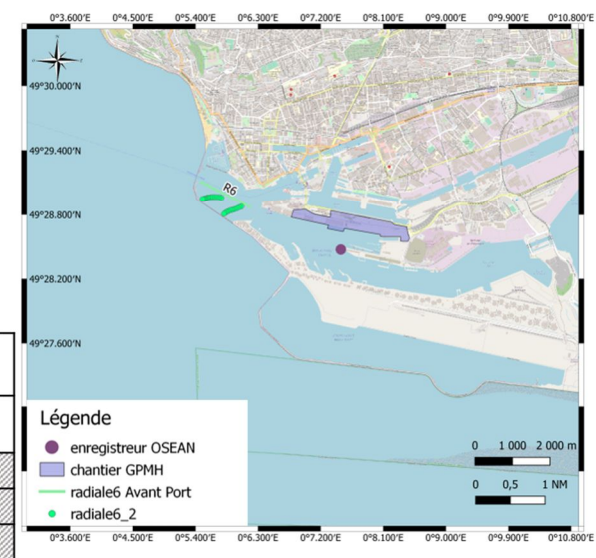


Figure 20. Synthèse des données de la radiale 6 (1).



Radiale 6_2 (Dérive)			
Date	05/11/20	Enregistreur	TASCAM
Heure début	13h42	Sources sonores	Passage 1 pêcheur
Heure fin	14h06		
Zone	Bassin avant-port	Météo	Mer belle; Vent Est 7 nd
Marée	PM + 1h		



	Niveau de bruit global (dB re 1µPa)	
	Avant port (TASCAM)	T. Ducrocq (OSEOAN)
Moy	132,7	
Min	127,7	
Max	138,2	

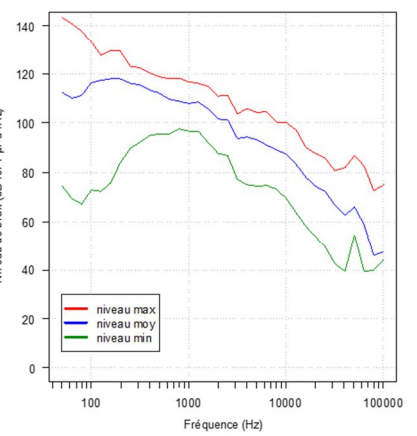
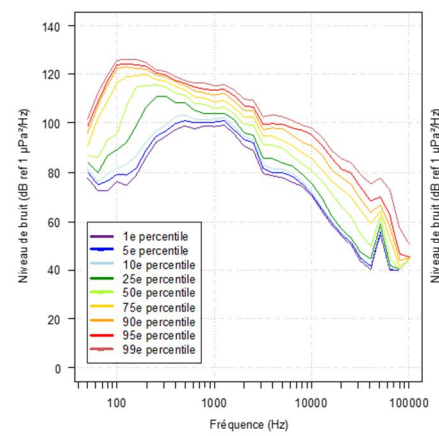


Figure 21. Synthèse des données de la radiale 6 (2).



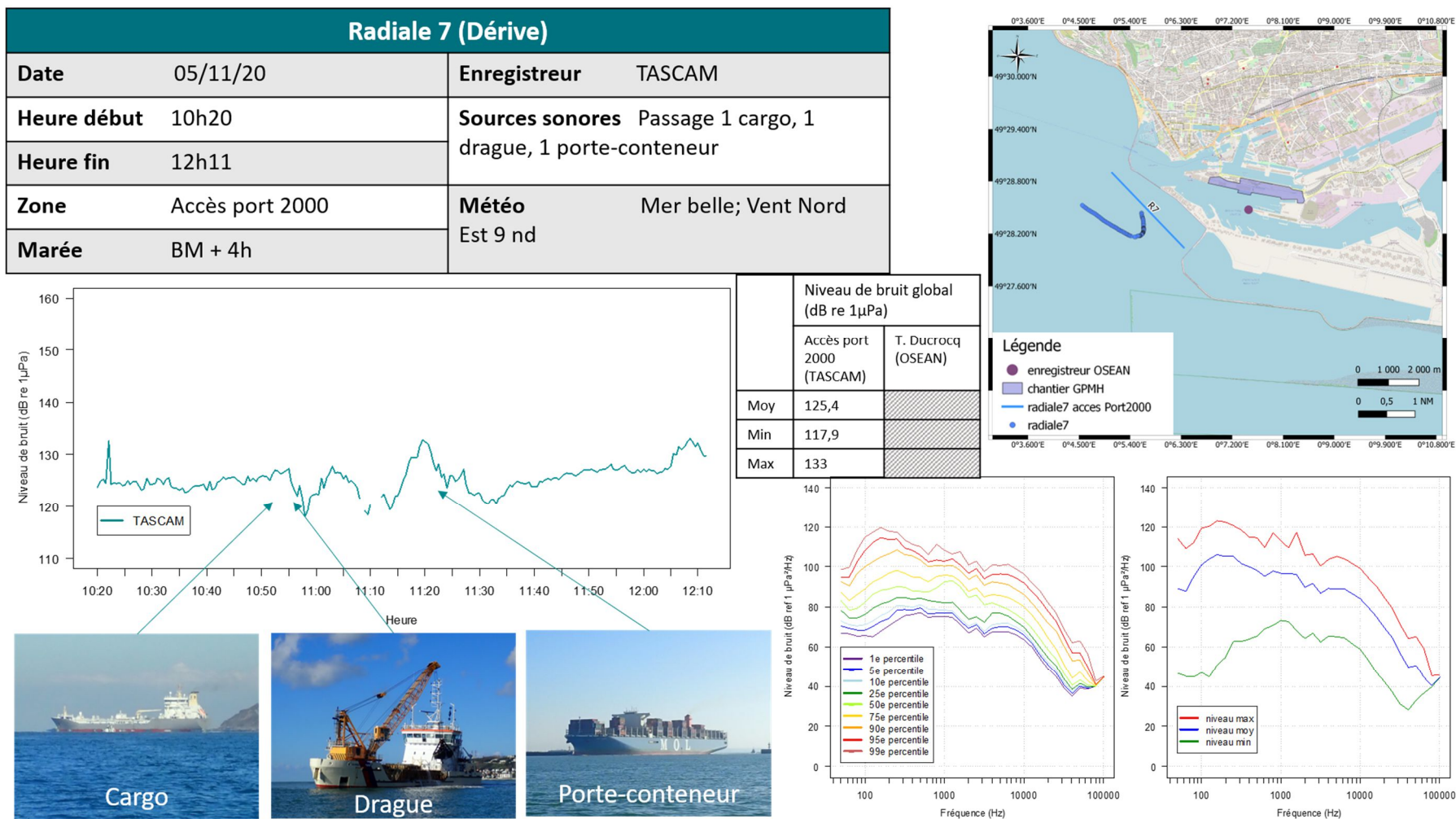
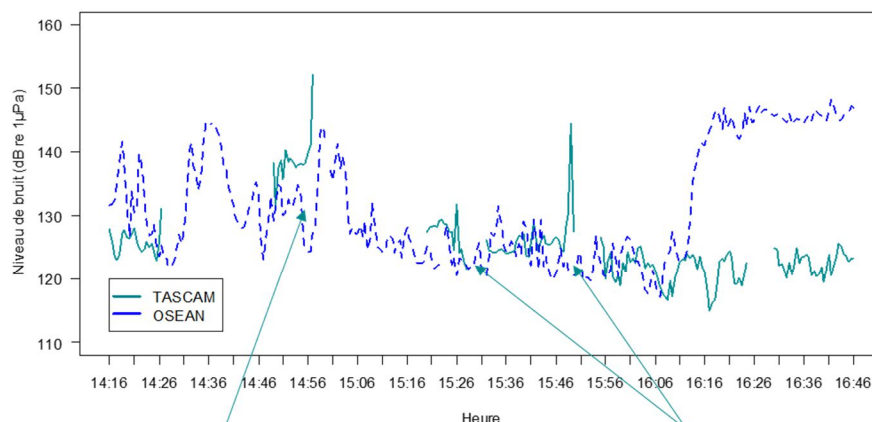
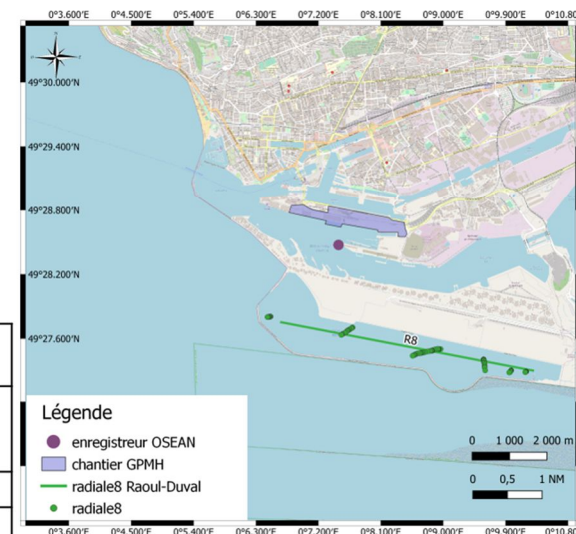


Figure 22. Synthèse des données de la radiale 7.

Radiale 8 (Dérive)			
Date	04/11/20	Enregistreur	TASCAM
Heure début	14h16	Sources sonores	Appareillage 1 porte-conteneur + Passage 2 navires techniques
Heure fin	16h45		
Zone	Bassin Hubert Raoul-Duval	Météo	Vagues de 0,6 m (hors du port); Vent Nord Est 3 nd
Marée	PM + 2h		



	Niveau de bruit global (dB re 1µPa)	
	H. Raoul-Duval (TASCAM)	T. Ducrocq (OSEAN)
Moy	125,2	131,3
Min	114,9	117,1
Max	152	148,1

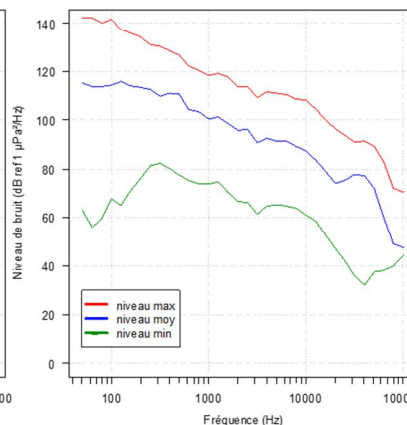
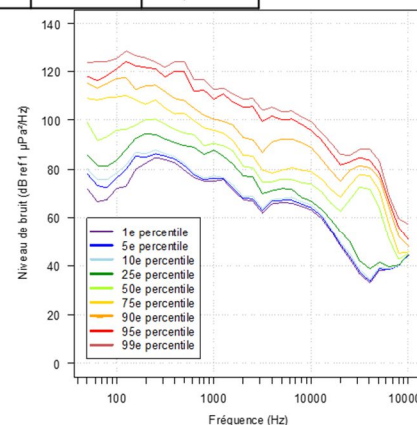
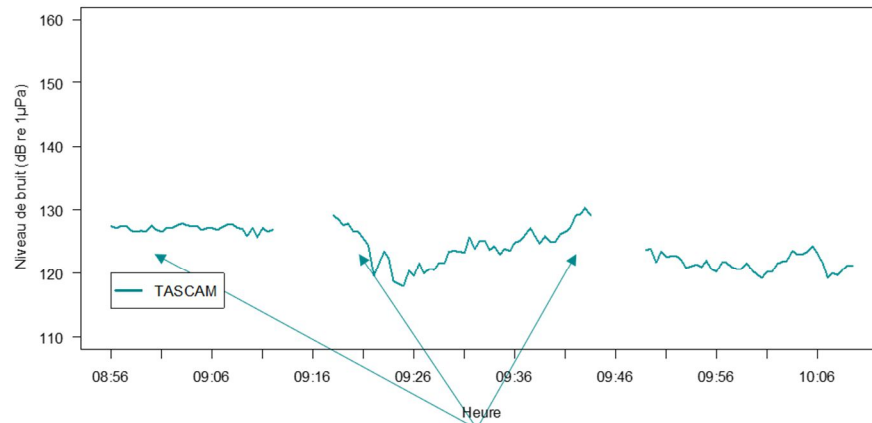
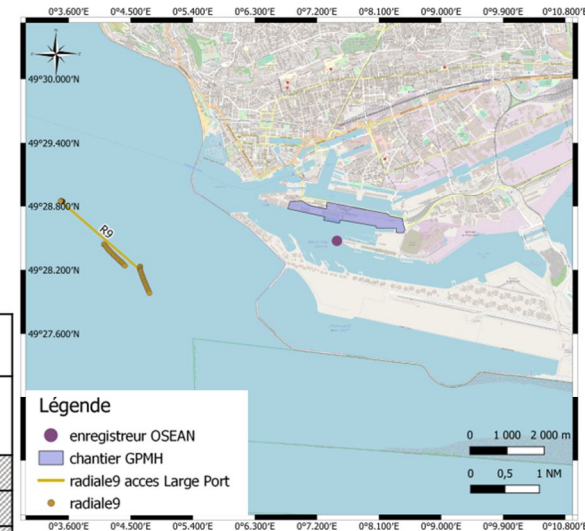


Figure 23. Synthèse des données de la radiale 8.

Radiale 9 (Dérive)			
Date	05/11/20	Enregistreur	TASCAM
Heure début	8h56	Sources sonores	1 drague en opération
Heure fin	10h10		
Zone	Accès Large Port	Météo	Mer belle; Vent Nord Est 9 nd
Marée	BM + 1h		



Niveau de bruit global (dB re 1µPa)		
	Accès large port (TASCAM)	T. Ducrocq (OSEAN)
Moy	124,1	
Min	117,9	
Max	130,3	

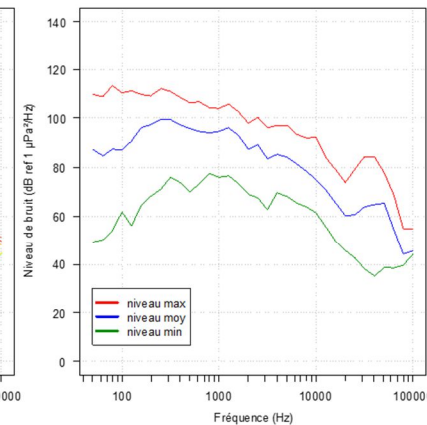
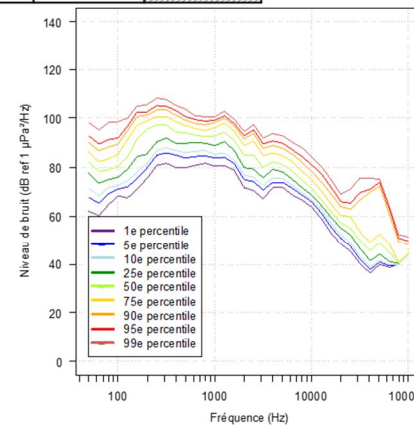


Figure 24. Synthèse des données de la radiale 9.

Le tableau 11 présente une synthèse des niveaux de bruit mesurés sur les différentes radiales de mesures.

Tableau 11. Synthèse des niveaux de bruit mesurés sur les radiales acoustiques (Lp en dB re 1µPa).

Radiales	R1	R2	R3	R4-1	R4-2	R5	R6-1	R6-2	R7	R8	R9
Lp	125,8	134,6	128,6	129	128,1	131,6	132,1	132,7	125,4	125,2	124,1
Lp min	124,2	128,9	125,3	126,1	122,5	128,9	126,2	127,7	117,9	114,9	117,9
Lp max	130,7	149,3	139,1	139,6	139,6	136	136	138,2	133	152	130,3

Compte tenu de l'échantillonnage spatial et temporel qui met en évidence ce sont 4 paysages sonores qui sont proposés pour caractériser le paysage sonore au niveau de HAROPA Port Le Havre :

- Zone extérieure au port associée aux radiales R7 et R9 ;
- Zone du bassin de port 2000 avec la radiale R8 ;
- Zone des bassins intérieurs de HAROPA Port Le Havre avec les radiales R1 à R4 ;
- Zone des bassins de l'avant-port et de la Manche avec les radiales R5 et R6.

Les figures 25 à 28 présentent les DSP associées à chacun de ces 4 paysages sonores.

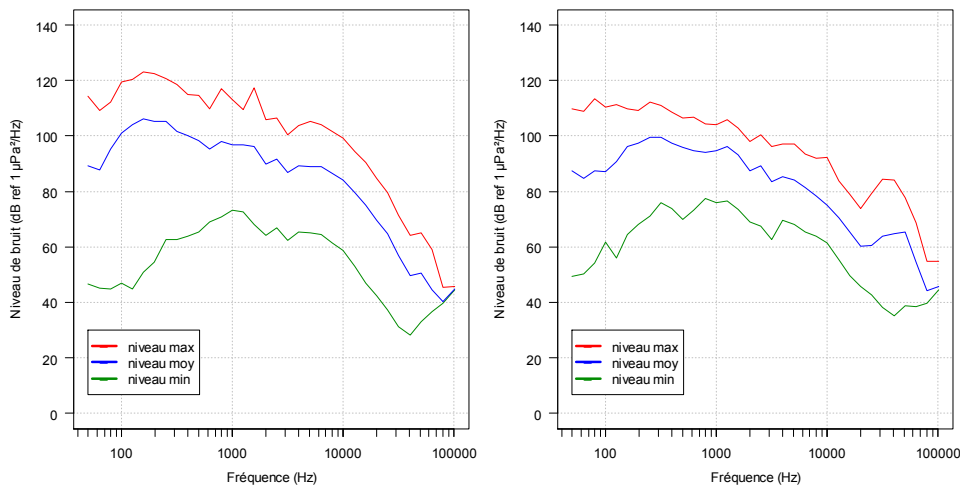


Figure 25. DSP associées aux radiales R7 et R9.

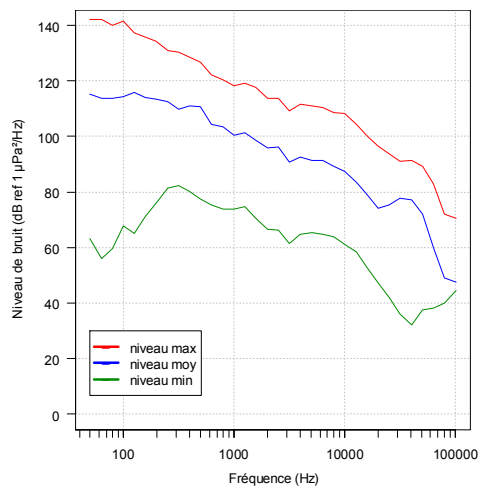


Figure 26. DSP associées aux radiales R8.

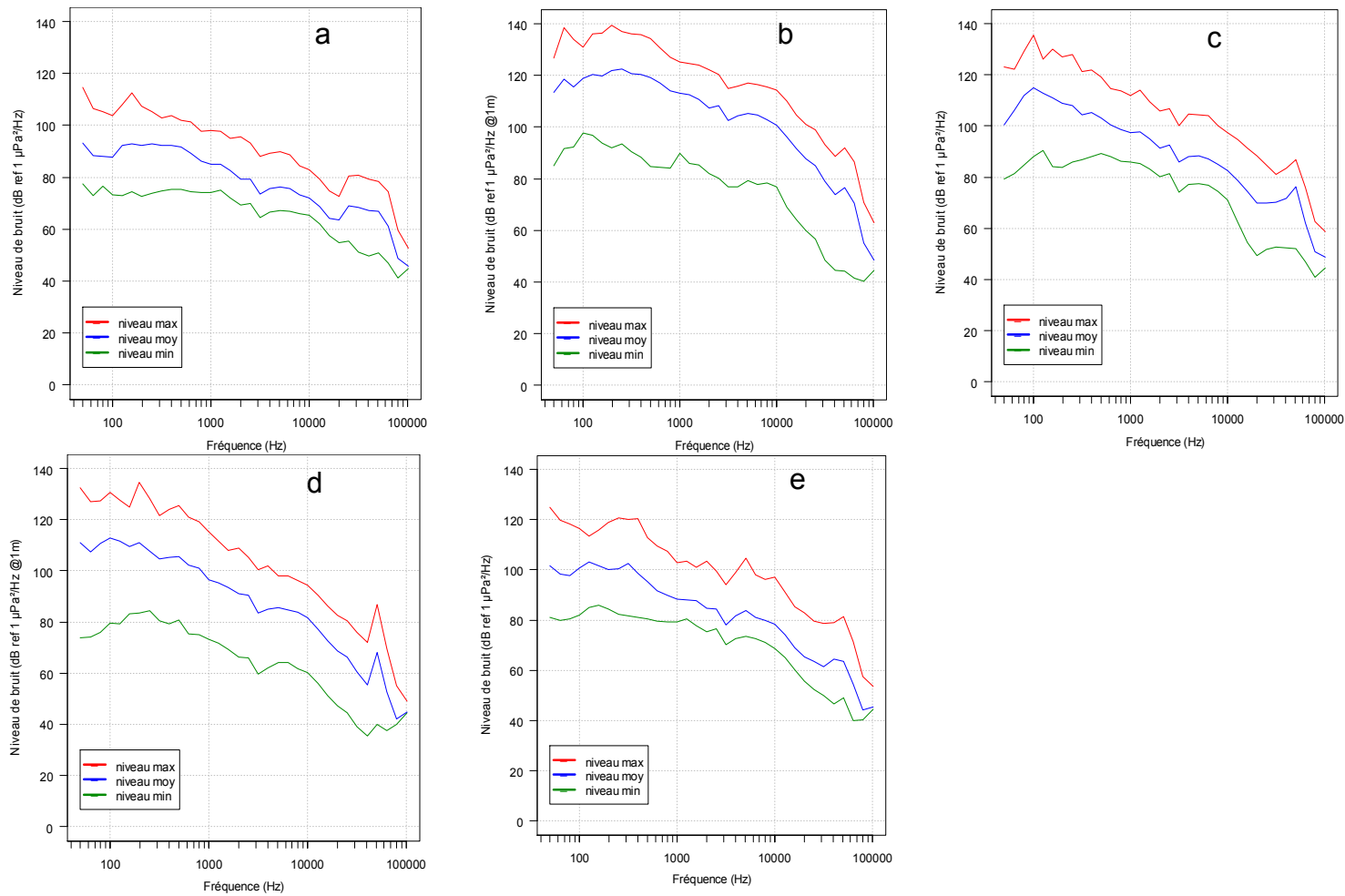


Figure 27. DSP associées aux radiales 1(a), 2 (b), 3 (c), 4 (d et e).



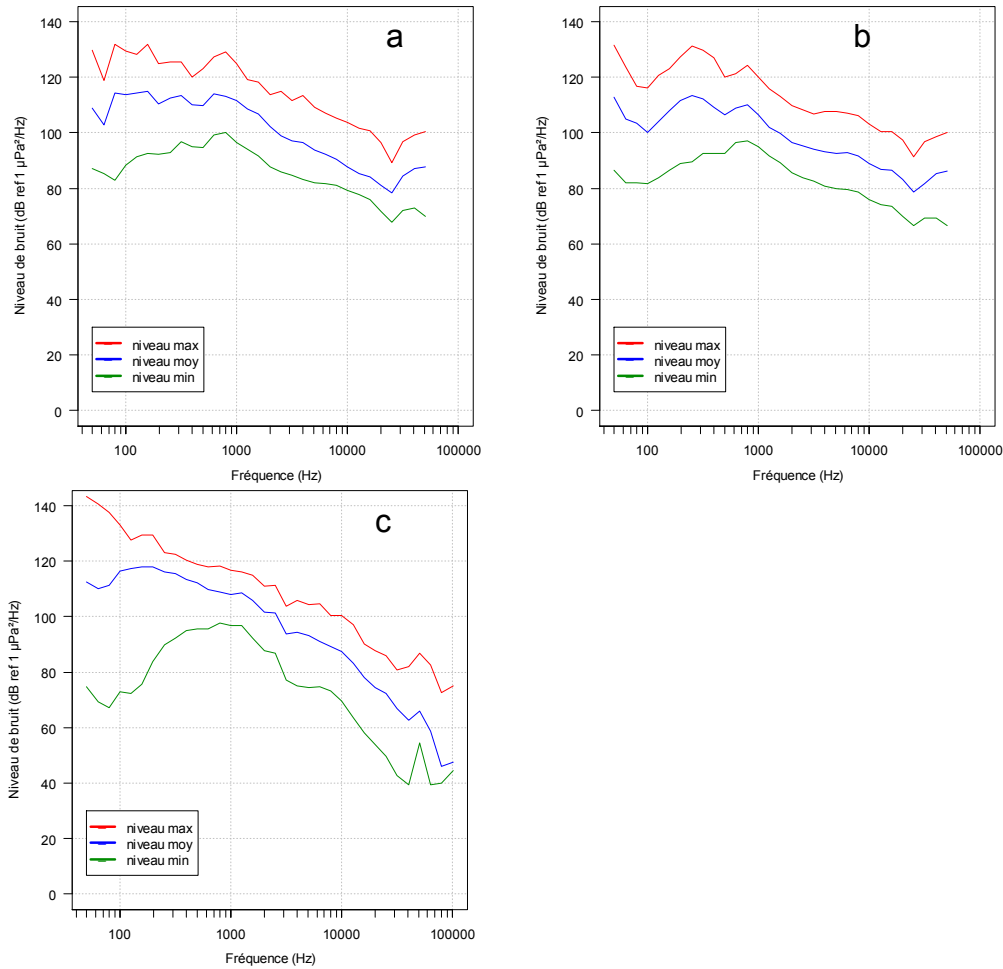
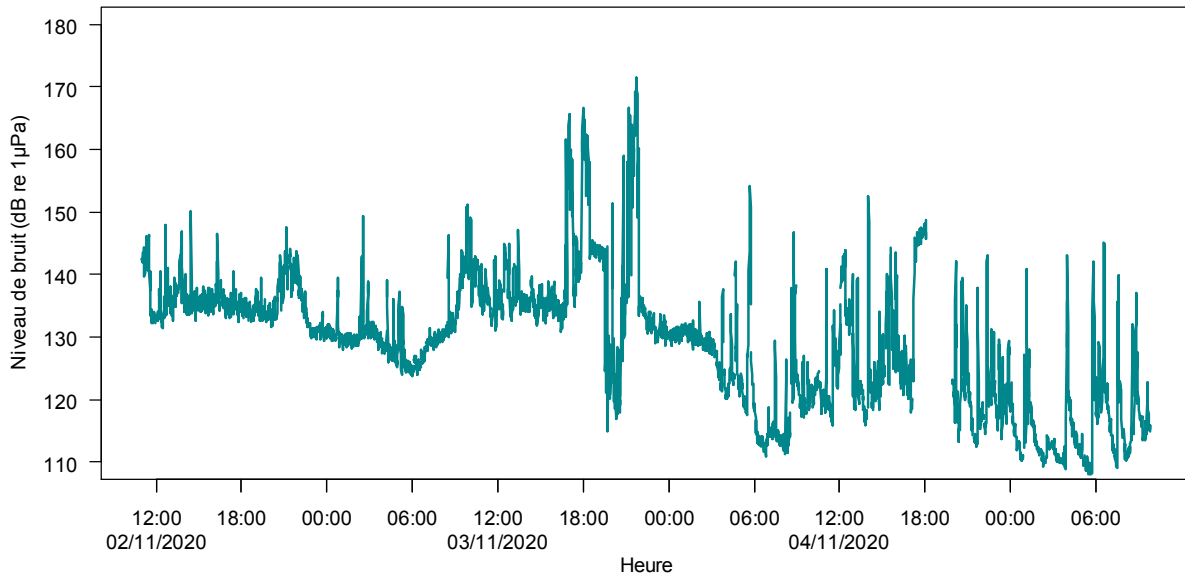


Figure 28. DSP associées aux radiales 5(a), 6-1(b), 6-2(c).

4.3. Suivi acoustique au point fixe OSEAN

Le suivi acoustique au point fixe OSEAN met en évidence entre le 02/11/2020 et 05/11/2020 une évolution du niveau de bruit large bande entre 108,1 et 171,5 dB re 1µPa (figure 29). Le niveau moyen observé entre le 02/11/2020 à 10h00 et le 05/11/2020 à 07h50 est de 129,2 dB re 1µPa. Les évolutions de niveau de bruit sont liées aux passages des navires.



La figure 30 met en évidence à travers l'évolution du niveau de bruit, la classification des sources sonores contributrices de l'élévation du niveau de bruit. L'activité portuaire est la source sonore avec la perception des mouvements de navires dans le bassin T. DUCROCQ.

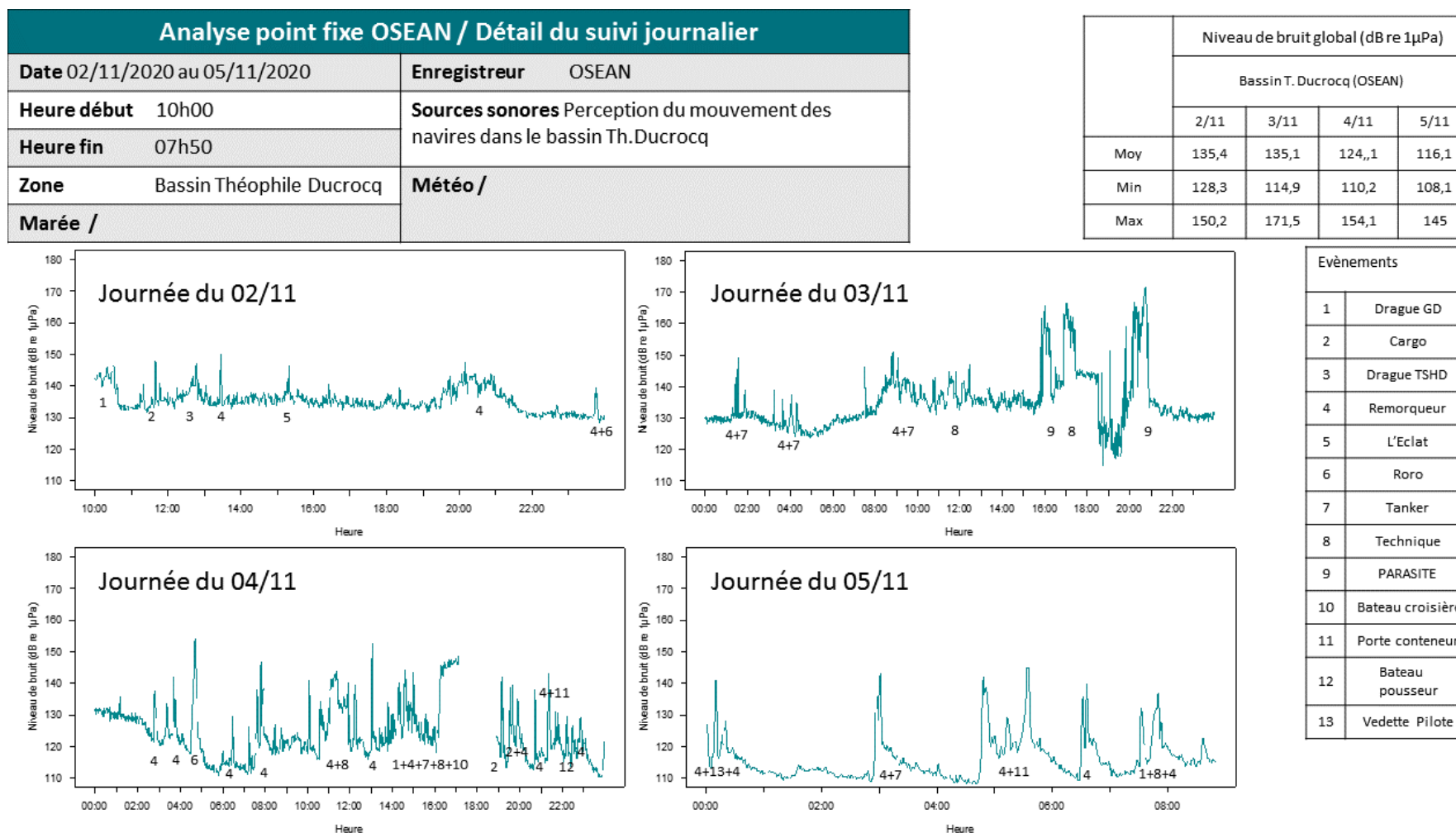


Figure 30. Synthèse du suivi acoustique au niveau du point fixe OSEAN.



L'analyse acoustique couplée avec les données AIS a permis de classer des navires qui ont transité à proximité de l'enregistreur OSEAN.

4.4. Caractérisation des composantes du bruit ambiant

4.4.1. Contribution de la géophonie

La contribution de la géophonie au bruit ambiant a été établie en regroupant les périodes temporelles en fonction des états de mer et de vent définis selon l'échelle de Beaufort (vitesse du vent exprimée en nds) et l'état de mer (hauteur des vagues en mètre).

Ainsi les spectres de bruit ambiant (ou DSP) ont été établis selon les couples état de mer/force du vent observés à l'extérieur du port du Havre durant les phases de mesures acoustiques, selon les plages d'état de mer et de vent suivantes :

- Vent 2 : légère brise (4 à 6 nds) ;
- Vent 3 : petite brise (7 à 10 nds) ;
- Vent 4 : jolie brise (11 à 16 nds) ;
- Vent 5 : bonne brise (17 à 21 nds) ;
- Vent 6 : vent frais (22 à 27 nds) ;
- Mer 2 : mer belle (0,1 à 0,5 mètre) ;
- Mer 3 : mer peu agitée (0,5 à 1,25 mètres) ;
- Mer 4 : mer agitée (1,25 à 2,5 mètres) ;
- Mer 5 : mer forte (2,5 à 4 mètres).

En suivant ces deux échelles de vent et de mer, les conditions météo-océanologiques observées à l'extérieur du port du Havre durant le suivi acoustique sont ainsi regroupées et présentées dans le tableau 12.

Tableau 12. Récapitulatif par créneau horaire des états de mer et de vent

Conditions de mer et de vent	Périodes associées
V1M3	04/11 12h-16h
V2M3	04/11 8h-12h
V3M2	05/11 00h-8h
V3M3	04/11 00h-8h, 16h-20h
V4M3	04/11 20h-00h
V4M4	03/11 00h-8h, 20h-00h
V5M4	02/11 12h-16h, 20h-00h ; 03/11 16h-20h
V6M4	02/11 8h-12h, 16h-20h ; 03/11 8h-16h

Une synthèse du suivi météo-océanologique est présentée dans le tableau 13. Elle détaille les conditions de mer et de vent observées quotidiennement.

Tableau 13. Synthèse des conditions météorologiques observées durant le suivi acoustique. Les cases vertes correspondent aux jours où la mer était calme à peu agitée et/ou le vent était inférieur à force 3 ; les cases orange correspondent aux jours où la mer était agitée et/ou le vent était compris entre force 3 et force 6 ; les cases rouges correspondent aux jours où la mer était forte à énorme et/ou le vent était supérieur à force 6. La pluie est représentée par 1 ou 2 goutte(s) d'eau selon l'intensité (pas de goutte : < 1 mm, une goutte : entre 1 et 3 mm, deux gouttes : > 3 mm).

	02/11/2020	03/11/2020	04/11/2020	05/11/2020
00 :00		V4M4 Vagues : 1.6 m Vent : SO 14 nd	V3M3 Vagues : 1.2 m Vent : OSO 10 nd	V3M2 Mer belle Vent : ENE 7 nd
04 :00		V4M4 Vagues : 1.3 m Vent : SSO 14 nd	V3M3 Vagues : 1 m Vent : O 8 nd	V3M2 Mer belle Vent : NE 7 nd
08 :00	V6M4 Vagues : 1.7 m Vent : SO 22 nd	V6M4 Vagues : 1.5 m Vent : SO 28 nd	V2M3 Vagues : 0.8 m Vent : OSO 4 nd	V3M2 Mer belle Vent : NE 9 nd
12 :00	V5M4 Vagues : 2 m Vent : O 21 nd	V6M4 Vagues : 2.3 m Vent : O 23 nd	V1M3 Vagues : 0.6 m Vent : NE 3 nd	V3M2 Mer belle Vent : E 7 nd
16 :00	V6M4 Vagues : 2.1 m Vent : O 22 nd	V5M4 Vagues : 2 m Vent : O 19 nd	V3M3 Vagues : 0.6 m Vent : NE 7 nd	V3M2 Mer belle Vent : NE 9 nd
20 :00	V5M4 Vagues : 2 m Vent : O 20 nd	V4M4 Vagues : 1.4 m Vent : O 13 nd	V4M3 Vagues : 0.6 m Vent : NE 11 nd	

Les données sur les états de mer et de vent ont été compilées sur Windfinder (www.windfinder.com) et sur Infoclimat (www.infoclimat.fr) à la station Le Havre – Cap de la Hève (station Météo-France). Ceci afin de disposer de données à l'extérieur du port.

La figure 31 présente les différents spectres acoustiques observés en fonction des états de mer et de vent.

En règle générale, la contribution de la géophonie est due principalement à l'état de mer avec le brassage mécanique en surface généré par les vagues et déferlantes ainsi que le vent, la pluie ou les grains. Ces facteurs météorologiques contribuent au renforcement du bruit ambiant sous-marin en basse et moyenne fréquence (de quelques Hz à 15 kHz environ).



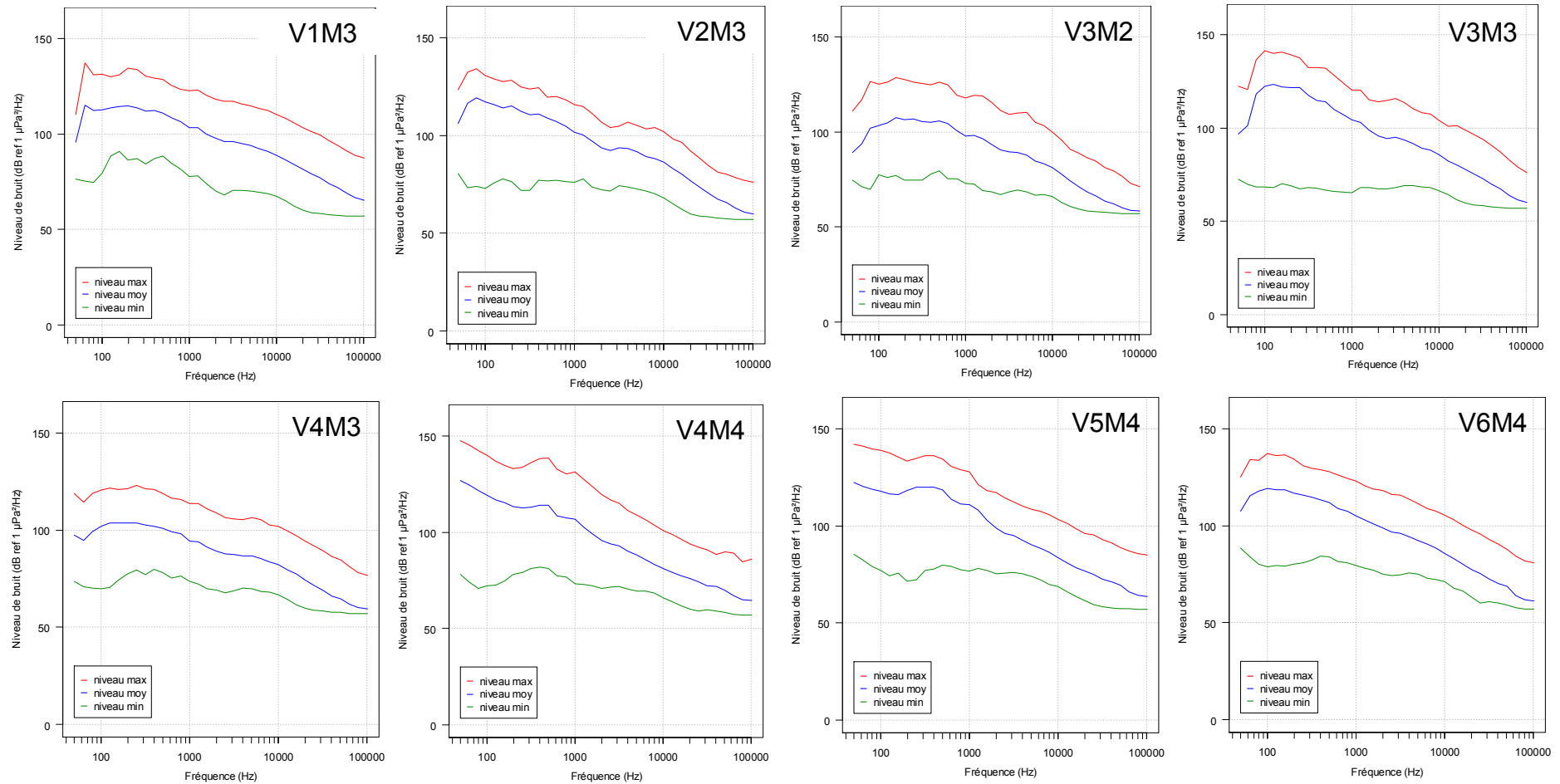


Figure 31. Densités spectrales de puissance en fonction des états de mer et de vent, observées durant la campagne de suivi acoustique



Les spectres acoustiques (ou DSP) associés aux différentes situations météo-océanologiques observées dans le bassin T. DUCROCQ mettent en évidence des niveaux de bruits ambiant supérieurs aux estimations proposées par le modèle de Wenz (1962). Ce modèle de Wenz présenté dans la figure 32 est un spectre acoustique constitué de façon empirique afin de proposer en fonction des états de mer, de mer et de trafic une distribution du niveau de bruit selon les fréquences.

Effectuer une comparaison de ce modèle avec les spectres acoustiques observés sur dans le bassin T. DUCROCQ revient à considérer l'ensemble des variables qui influent sur le niveau de bruit ambiant et sa répartition fréquentielle à savoir :

- Entre 10 Hz et 300 Hz l'influence du trafic maritime au bruit ambiant qui est prédominante ;
- Entre 300 Hz et 5 kHz la contribution du vent qui est considérée comme importante.

Au-delà de 2 kHz une décroissance de 20 dB par décade est observée sur le modèle de Wenz.

Ainsi les dépassements de niveaux pour chacun des gabarits acoustiques établis sur la zone d'étude par rapport au modèle de Wenz peuvent être directement liés au contexte sonore sur la zone portuaire. Il est important de souligner le fait que l'étude est réalisée dans un port, en enceinte quasi fermée, Le transit des navires se fait à proximité immédiate de l'enregistreur, ce qui implique une élévation ponctuelle importante du bruit mesuré.

De plus les variations de niveaux de bruit directement liées aux états de mer et de vent sont moins significatives en particulier à l'intérieur des bassins portuaires qui constituent une enceinte protégée de l'état de mer.

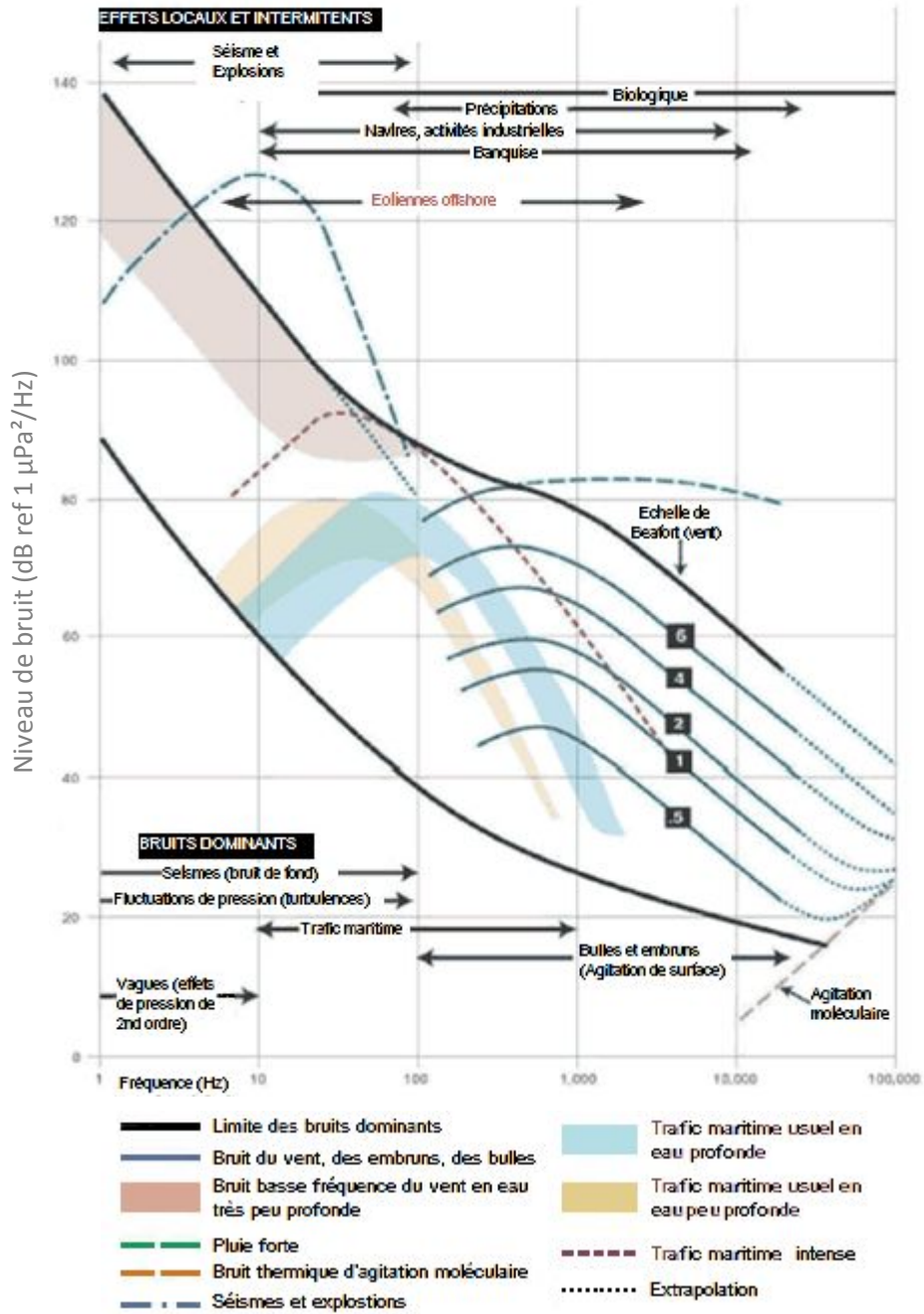


Figure 32. Contribution des différentes sources sonores au bruit ambiant sous-marin d'après le modèle de Wenz (d'après NRC, 2003).

4.4.2. Contribution de la biophonie

Une analyse des ambiances sonores a été réalisée par le traitement acoustique des fichiers sons enregistrés en point fixe et en radiale. Des algorithmes de détection associés aux émissions sonores des mammifères marins et de la faune benthique ont été utilisés afin d'établir d'éventuelles détections de présence et d'activité. Aucune détection de mammifères marins (sifflements et ou trains d'écholocation) n'a été détectée. De même aucune activité associée à la faune benthique n'a été relevée par l'acoustique passive.

4.4.3. Contribution de l'anthropophonie

Il s'agit de la contribution majeure au bruit ambiant mesuré. De par l'activité du port, les radiales acoustiques réalisées ou les mesures en point fixe mettent en évidence une forte contribution des navires au paysage sonore que ce soit sur le transit des navires entre les bassins, sur les opérations d'accostage et d'appareillage que lors des phases à quai.

Ainsi, un suivi du trafic maritime a été effectué tout au long de la campagne acoustique. Les navires observés ont été répartis en 10 catégories correspondant à leur activité, mais également à leurs caractéristiques acoustiques :

- Cargo : cette catégorie regroupe les navires de transport de marchandises (vraquiers, péniches, transports de yachts, etc.) ;
- Dragage : navires d'extraction de granulats marins et d'entretien des chenaux de navigation ;
- Guerre : navires militaires ;
- Pêche ;
- Plaisance ;
- Remorqueur ;
- RORO : navires de transport roll-on-roll-off et porte-conteneurs ;
- Tanker (chimiquier, pétrolier, LNG etc.) ;
- Technique : cette catégorie regroupe les navires d'entretien des ports, les bateaux-pilotes, les navires des phares et balises, de travaux sous-marins, etc. ;
- Transports de passagers : ferries et croisières.

Chacune des détections reportées permet donc d'établir le CPA (Closest Point of Approach ou point de passage le plus proche) par rapport à l'enregistreur OSEAN. Les éléments de Groupe Date Heure (GDH), distance au CPA et classification du navire ont été relevés pour chacune des détections. Des gabarits acoustiques associés à ces détections ont ainsi été déterminés. Ils ont été utilisés pour la modélisation des scénarios acoustiques. Une synthèse du type de navires présents sur la zone d'étude et dans le bassin T. DUCROCQ est présentée dans les figures 33 à 35.



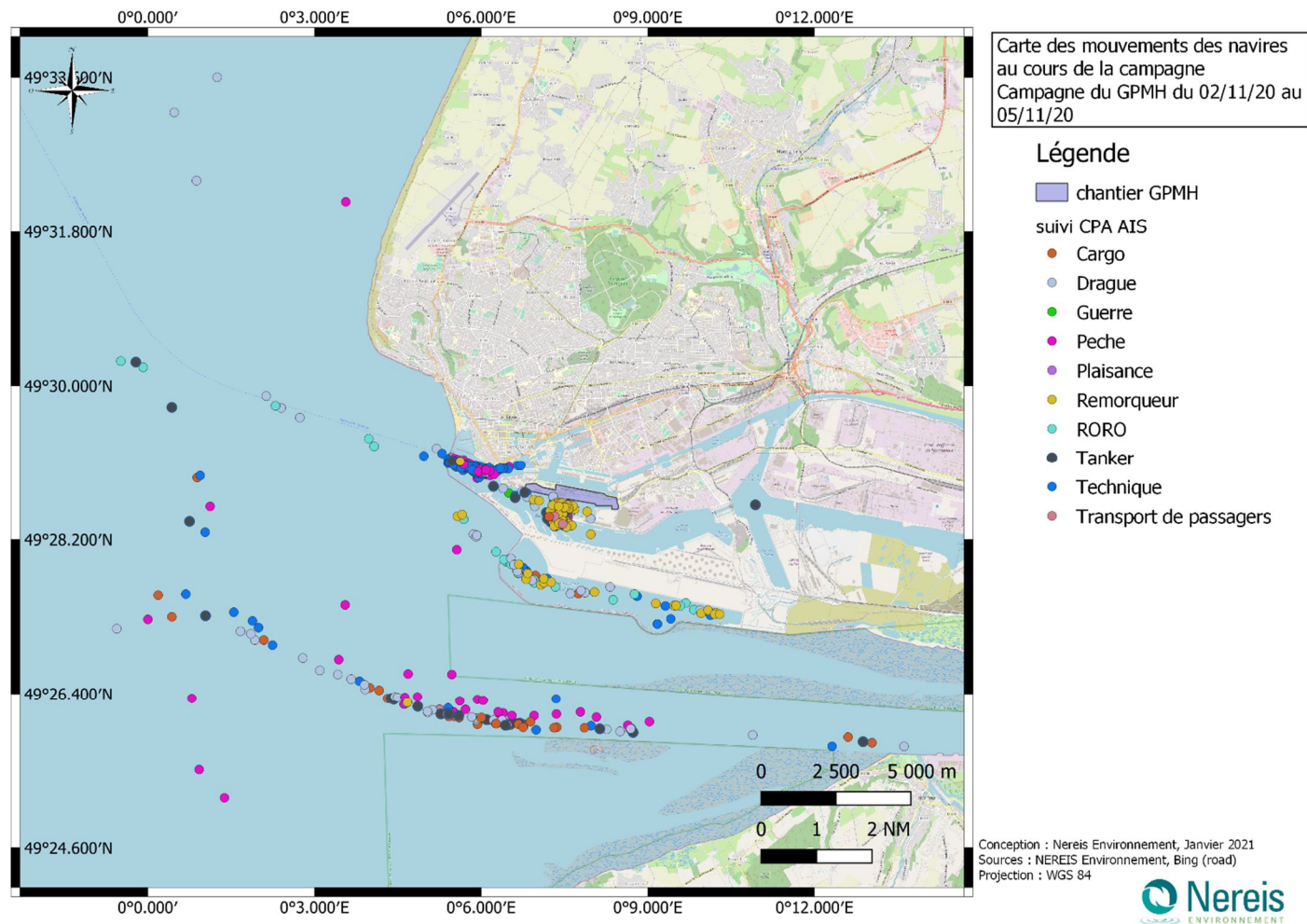


Figure 33. Carte des mouvements de navires au CPA de l'OSEAN sur l'ensemble de la zone d'étude.



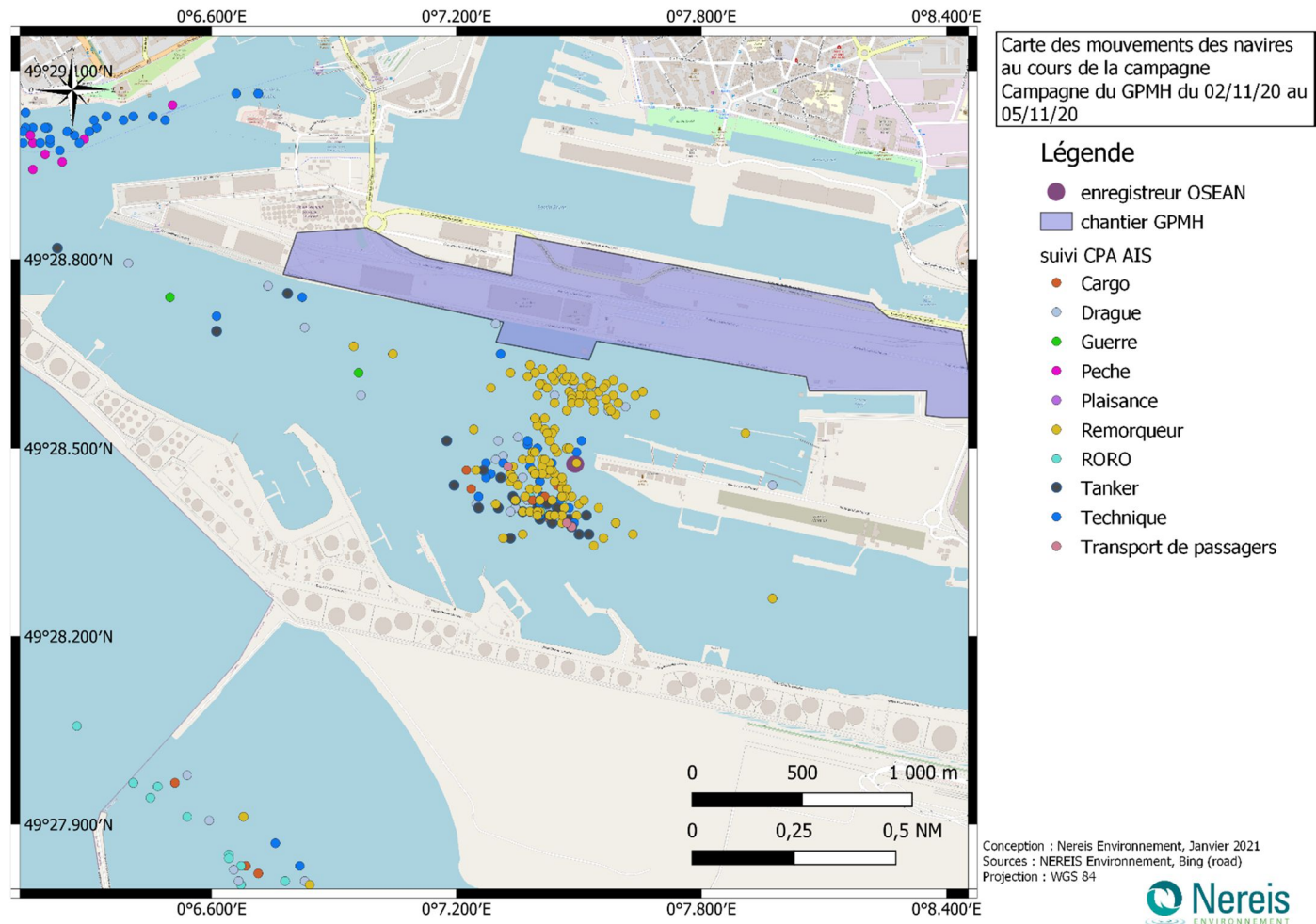


Figure 34. Carte des mouvements de navires au CPA de l'OSEAN dans le bassin T. DUCROCQ.



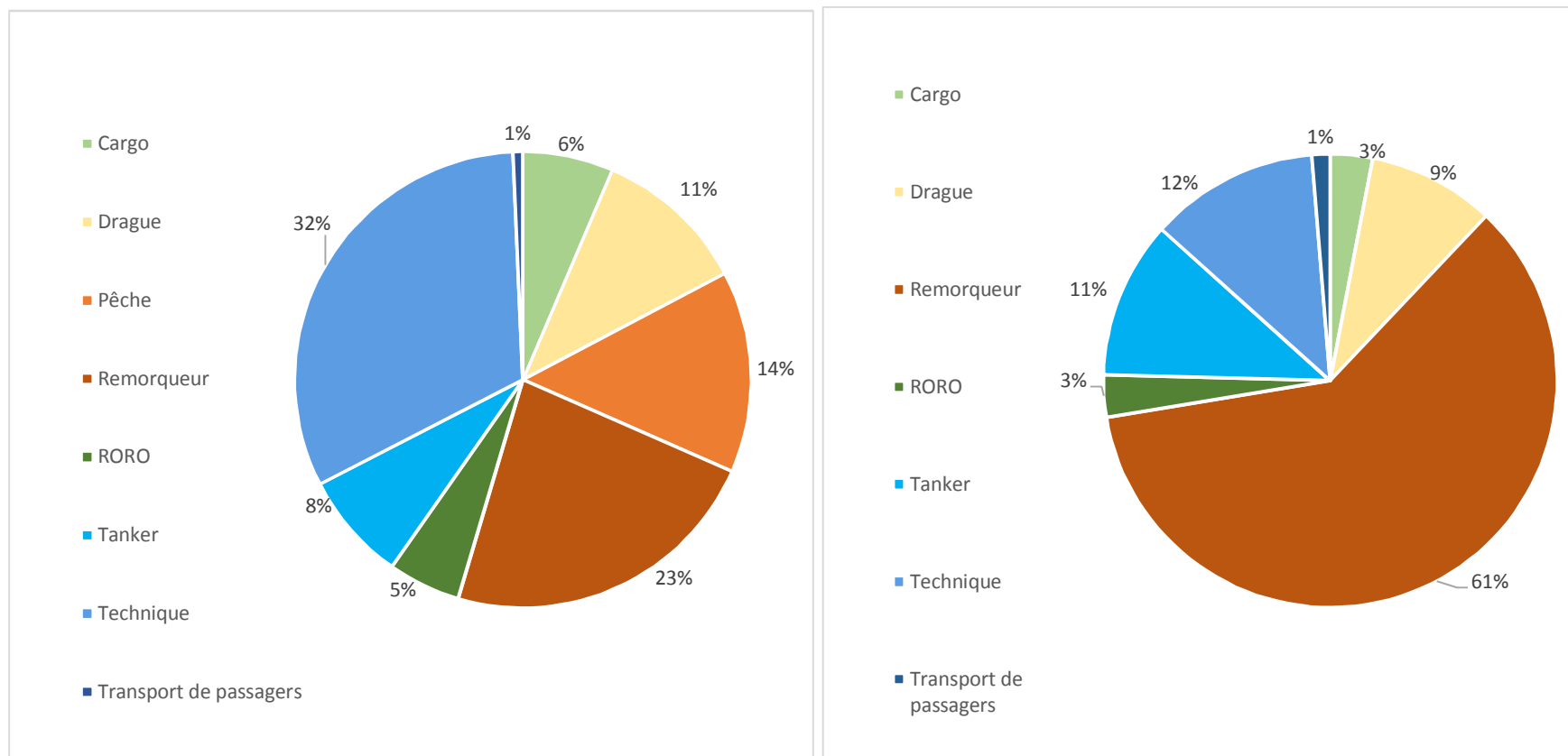


Figure 35. Répartition du passage des navires dans un périmètre de 10 km autour de l'enregistreur OSEAN (à gauche) et uniquement dans le bassin T. DUCROCQ (à droite) en fonction du type de navire au cours de la campagne.

Au total ce sont donc 700 mouvements de navires qui ont été comptabilisés à l'intérieur de la zone d'étude dont 240 dans le bassin T. DUCROCQ. Plus de la moitié de ces mouvements correspondent à des remorqueurs et des navires techniques. Ces navires travaillent sur des bassins et de ce fait contribuent à une élévation du niveau de bruit pendant de longues périodes. Les autres mouvements de navires sont attribués :

- Aux accostages, appareillages des navires commerciaux dans les différents bassins ;
- Aux transits de navires commerciaux entre les bassins ou les canaux en communication avec HAROPA Port Le Havre.

Les variations du niveau de bruit observées correspondent majoritairement à la contribution des sources anthropiques (trafic maritime).

Ainsi dans la continuité du modèle de Wenz décrit précédemment, la contribution du trafic maritime intervient :

- En basse fréquence pour des fréquences inférieures à 1000 Hz (cas de passages de navires lointains pour lesquels seuls des sifflements faibles de l'appareil propulsif sont perçus)
- En moyenne fréquence jusqu'à 6 kHz pour la cavitation des hélices, et jusqu'à 20 kHz au maximum pour la signature de l'appareil propulsif (observée pour des navires dont les CPA étaient inférieurs à 5 km).

4.4.3.1. Navires en transit

Les figures 36 à 39 mettent en évidence les gabarits acoustiques associés aux différents types de navires présents lors des mesures acoustiques. Ces gabarits permettent de considérer des navires en mouvement, avec ou sans remorqueurs, à quai.

Cette typologie de navires enregistrés a ainsi été utilisée pour modéliser le bruit ambiant à l'échelle de l'aire d'étude.

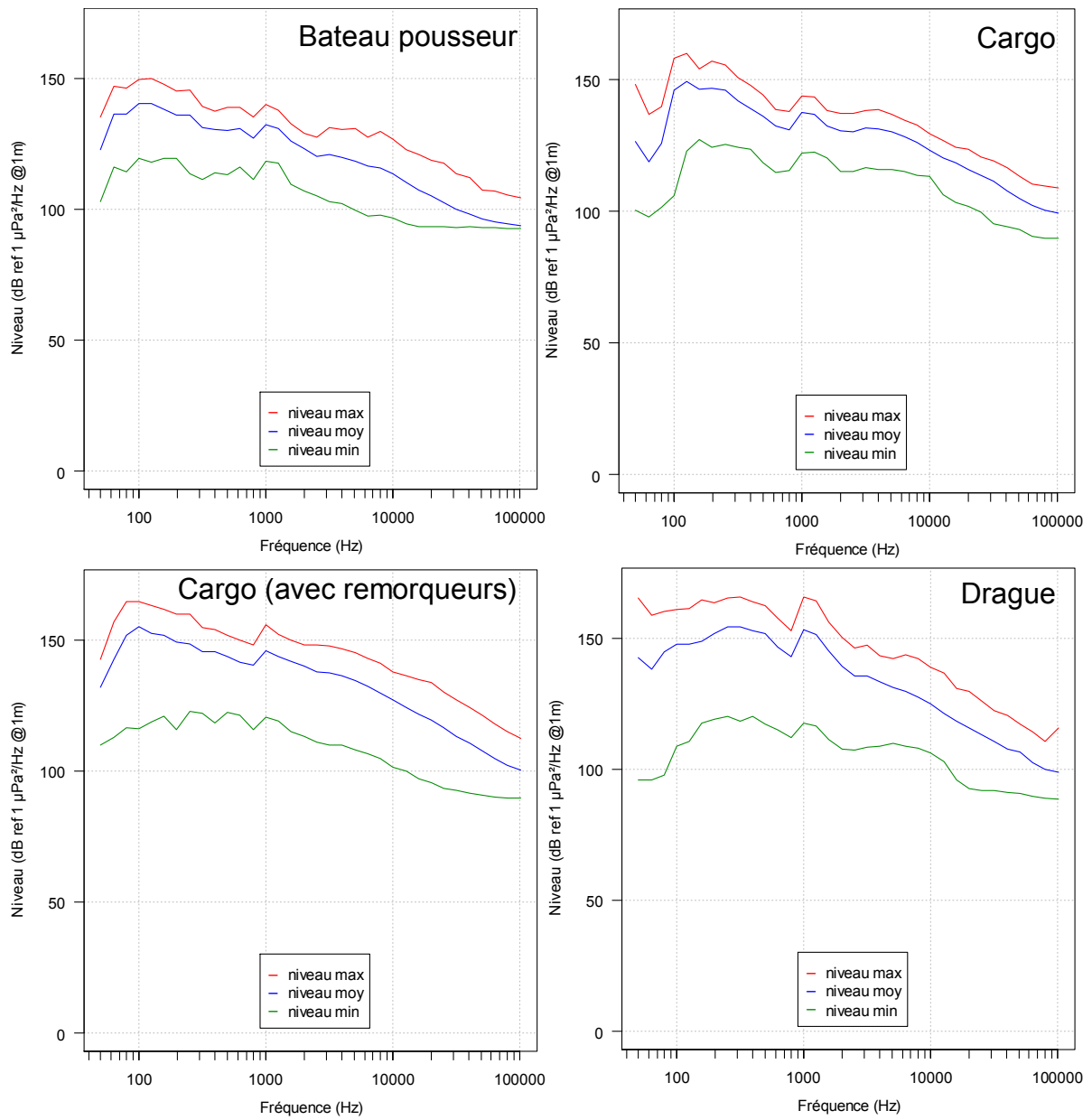


Figure 36. Densités spectrales de puissance des différents types de navires en transit enregistrés à proximité de l'enregistreur OSEAN.

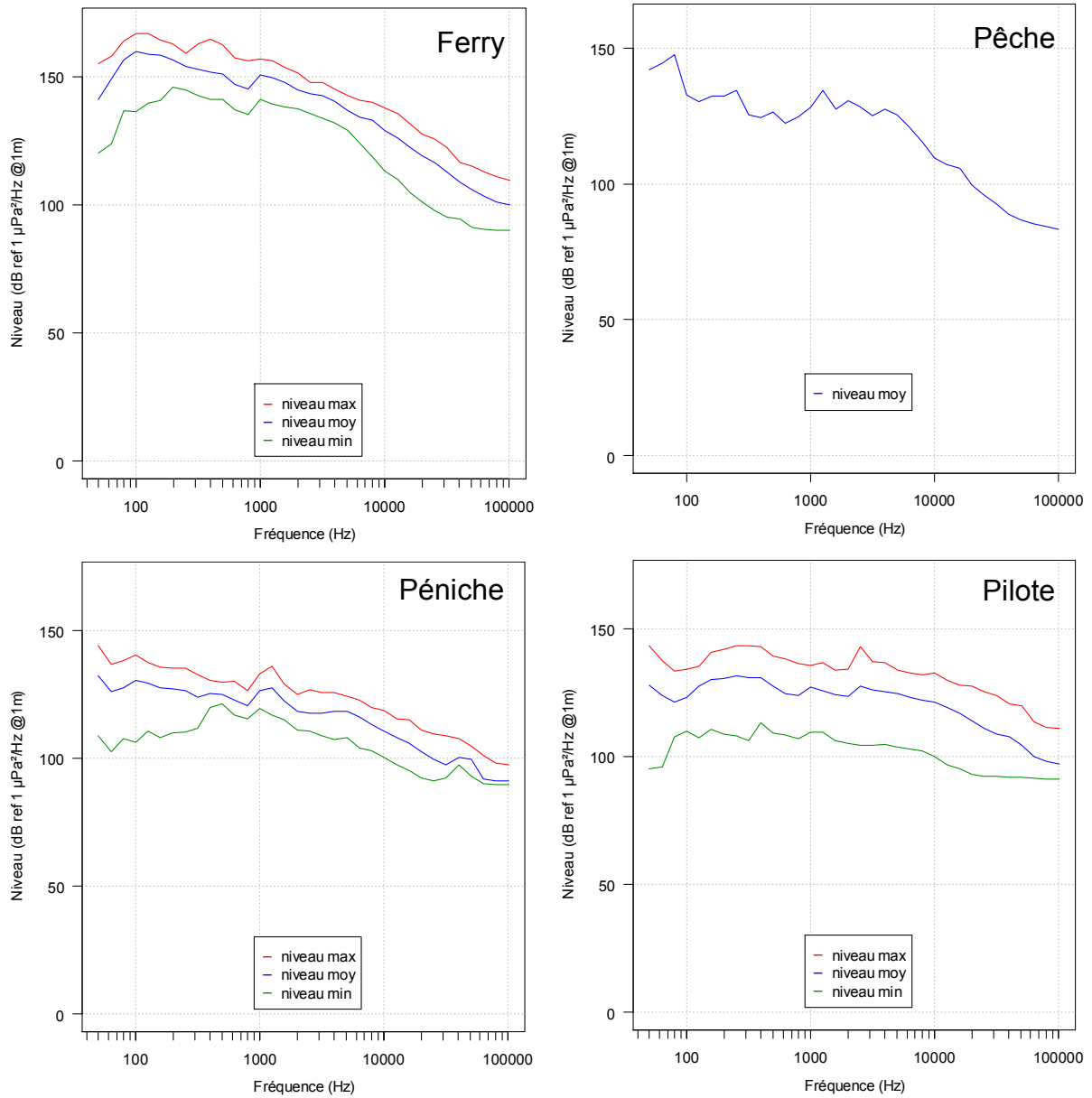


Figure 37. Densités spectrales de puissance des différents types de navires en transit enregistrés à proximité de l'enregistreur OSEAN.

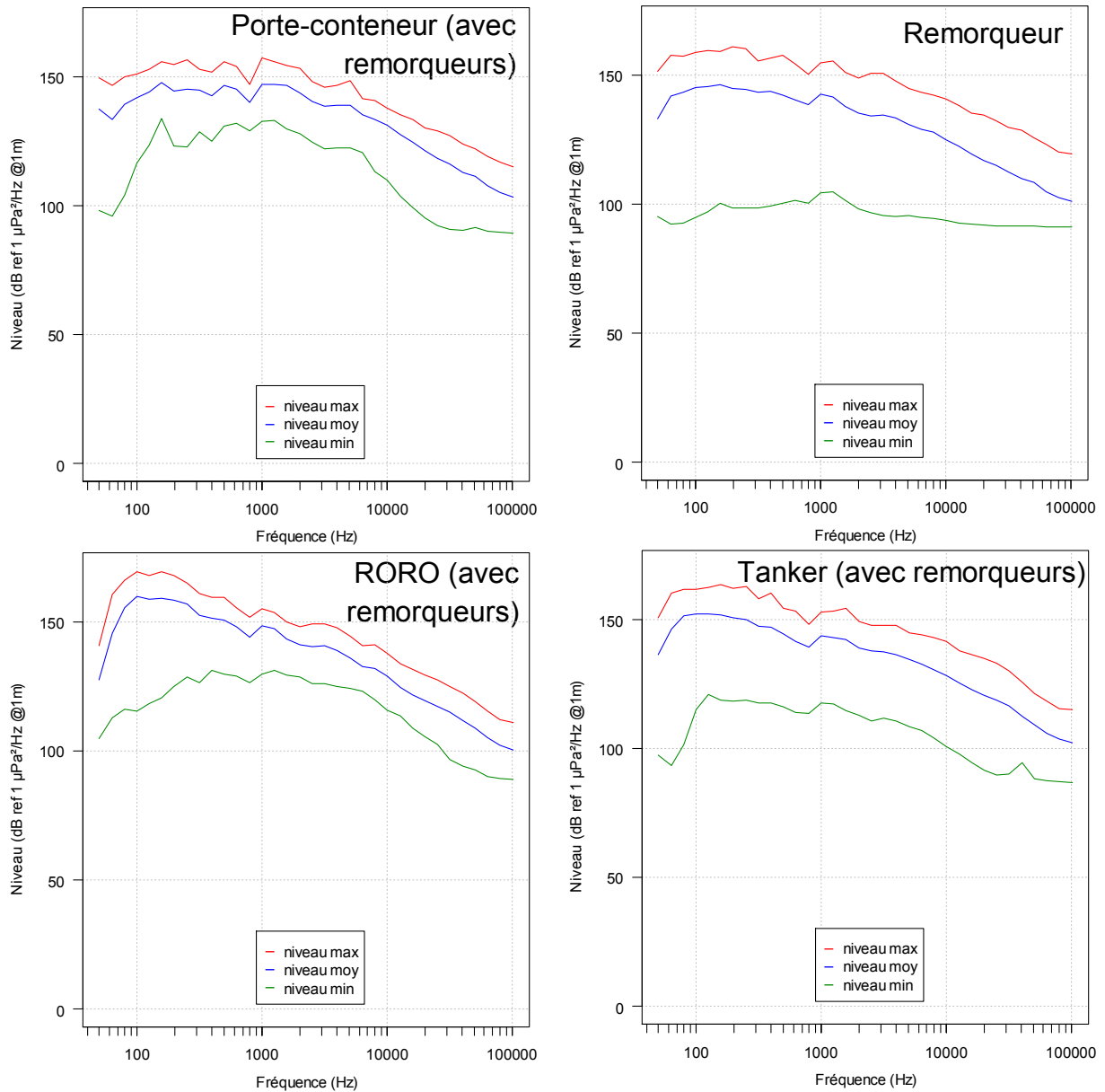


Figure 38. Densités spectrales de puissance des différents types de navires en transit enregistrés à proximité de l'enregistreur OSEAN.

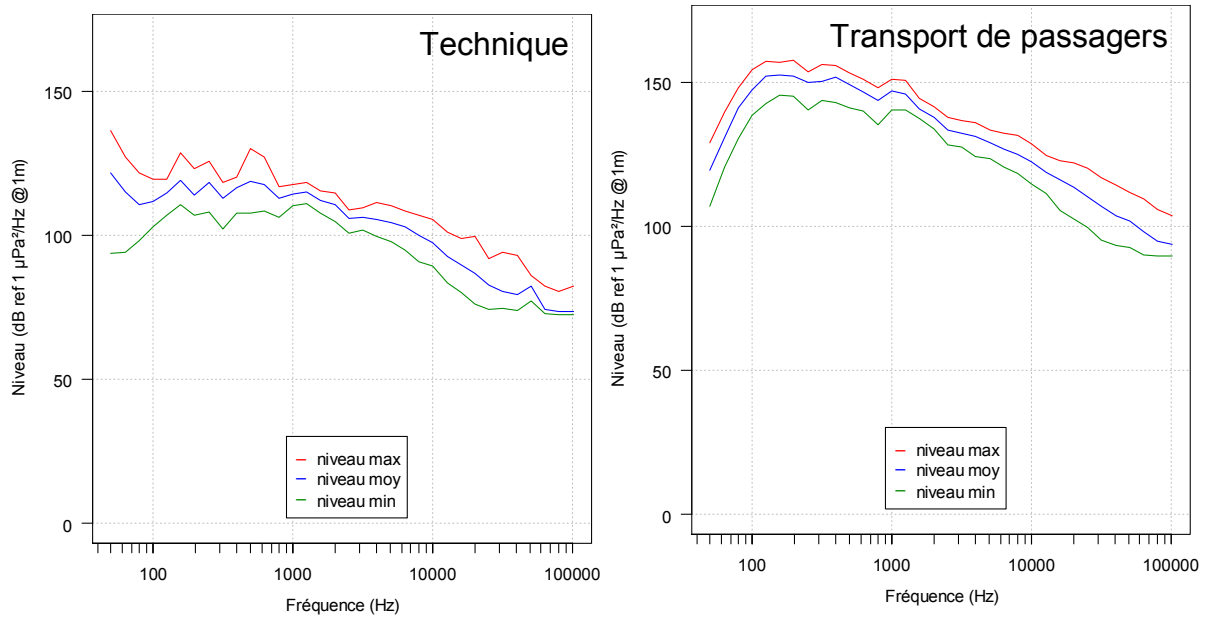


Figure 39. Densités spectrales de puissance des différents types de navires en transit enregistrés à proximité de l'enregistreur OSEAN.

4.4.3.2. Navire en opération

Un focus a été fait sur la drague Gambe d'Amfard compte tenu de son planning d'activité, avec un temps de présence quotidien important au niveau du bassin de l'avant-port dans le cadre des opérations de dragage. Un gabarit acoustique est proposé dans le cadre de son activité de dragage (figure 40).

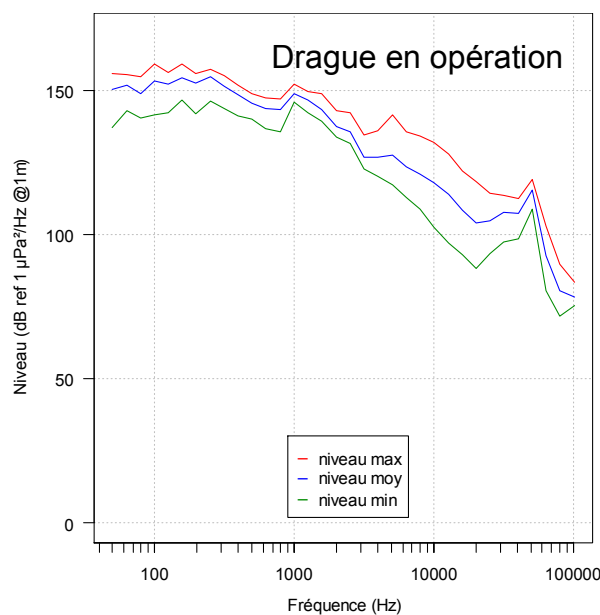


Figure 40. Densité spectrale de puissance de la Gambe d'Amfard en activité enregistrée dans le bassin avant-port par la chaîne portable (TASCAM) le 04/11/2020.

4.4.3.3. Navire à quai

Des gabarits acoustiques de navires à quai ont été établis et sont présentés dans la figure 41.

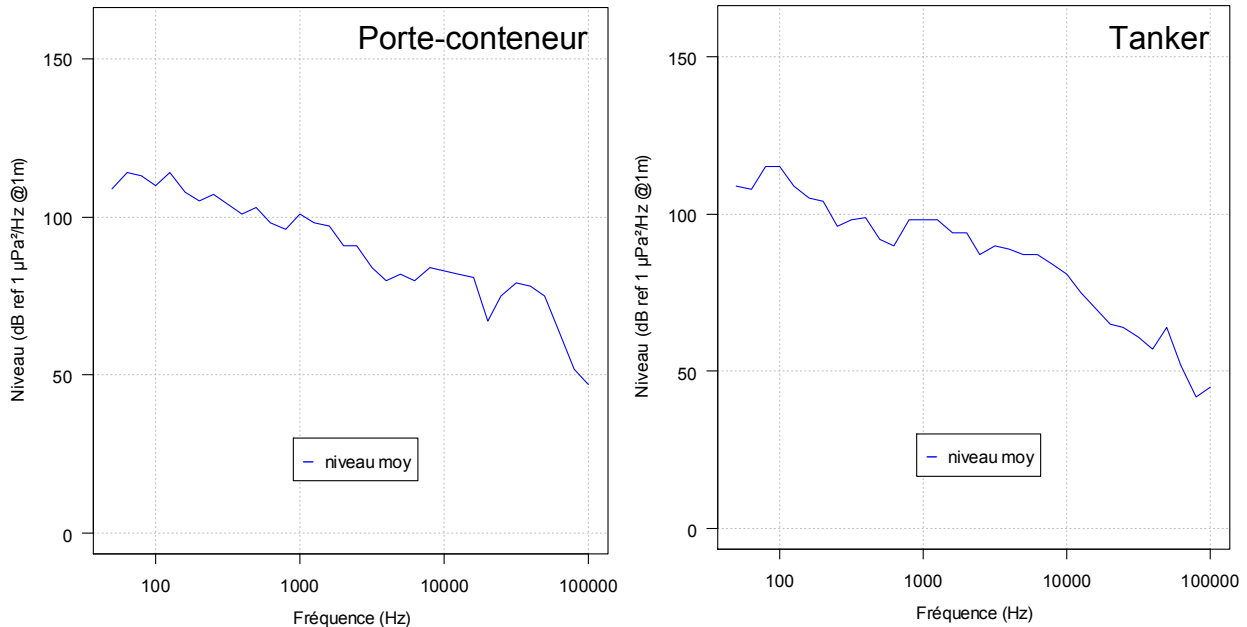


Figure 41. Densité spectrale de puissance de différents types de navire à quai enregistrés par la chaîne portable (TASCAM).

4.5. Cartographie du bruit ambiant sous-marin / modélisation acoustique avant travaux

Les résultats des suivis acoustiques en position fixe et en radiale, complétés par une analyse statistique des mouvements portuaires en 2018, ont permis de dégager des densités de navires à quai et en mouvements (appareillage et accostage) par bassin et par saison.

Les mouvements des navires reflètent ainsi les usages propres à chaque bassin et sont traduits dans la modélisation acoustique par la prise en compte des gabarits acoustiques en fonction des types de navires.

Ainsi des scénarios acoustiques associés à la densité de trafic (minimale, moyenne et maximale) ont été établis avec la prise en compte du marnage et de la saisonnalité.

Les modèles acoustiques ont été ajustés grâce aux mesures acoustiques réalisées en point fixe et en radiale dans chacun des bassins. Les figures 42 à 65 présentent les cartes de bruit ambiant sous-marin en fonction de la densité de navires, de la saisonnalité et de la hauteur d'eau associée au marnage.

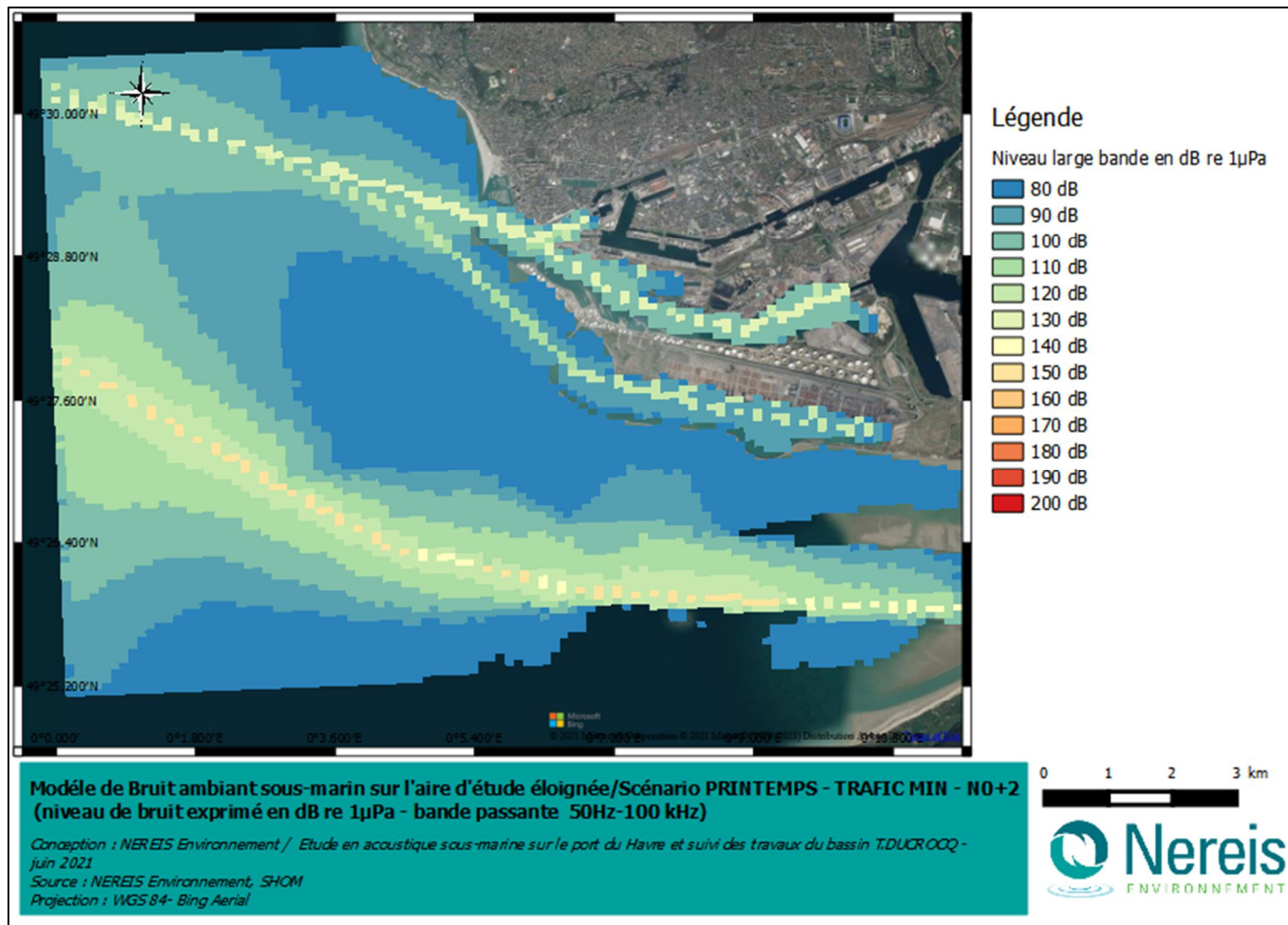


Figure 42. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario de printemps / trafic minimum / marnage N0+2.



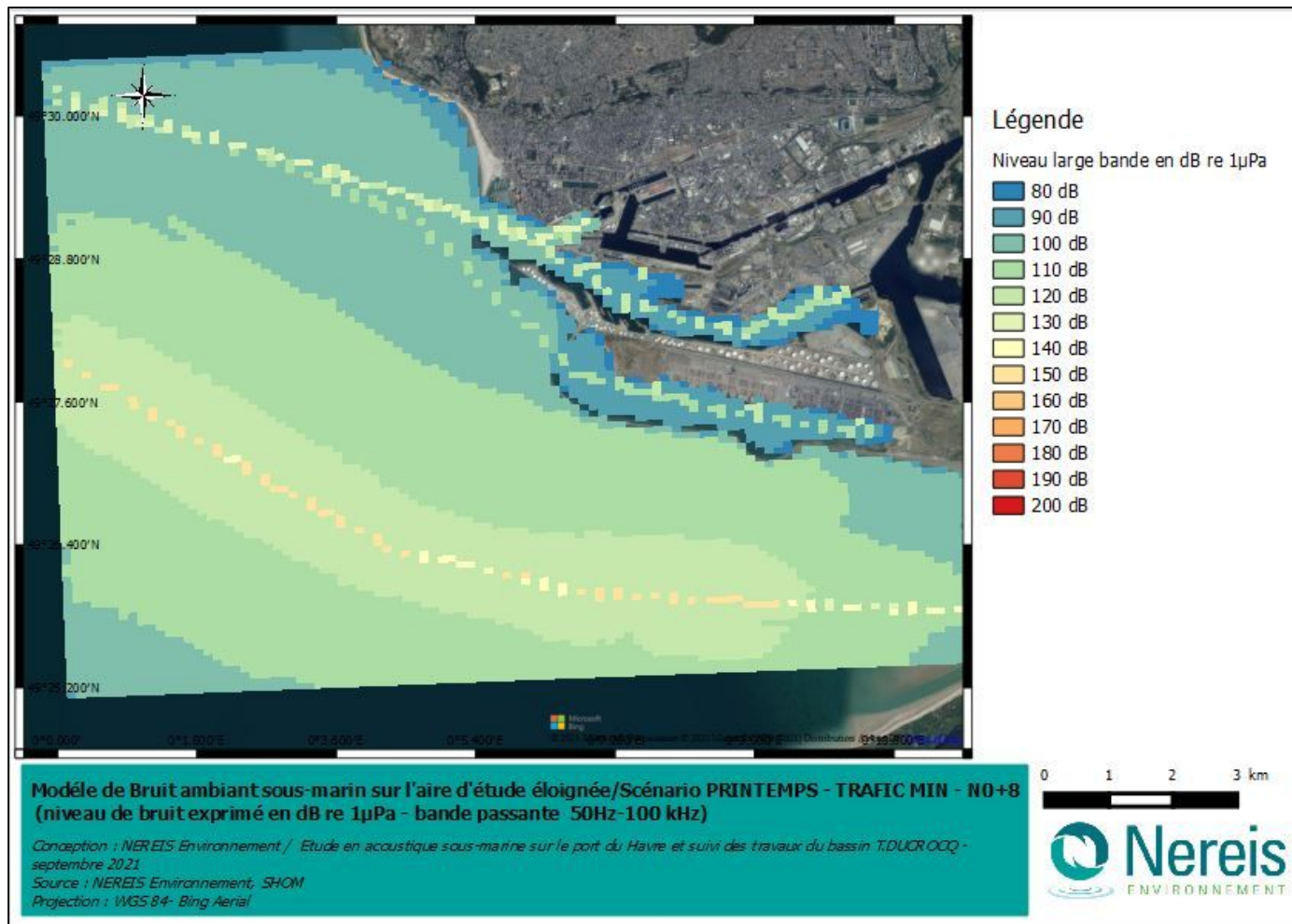


Figure 43. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario de printemps / trafic minimum / marnage N0+8.



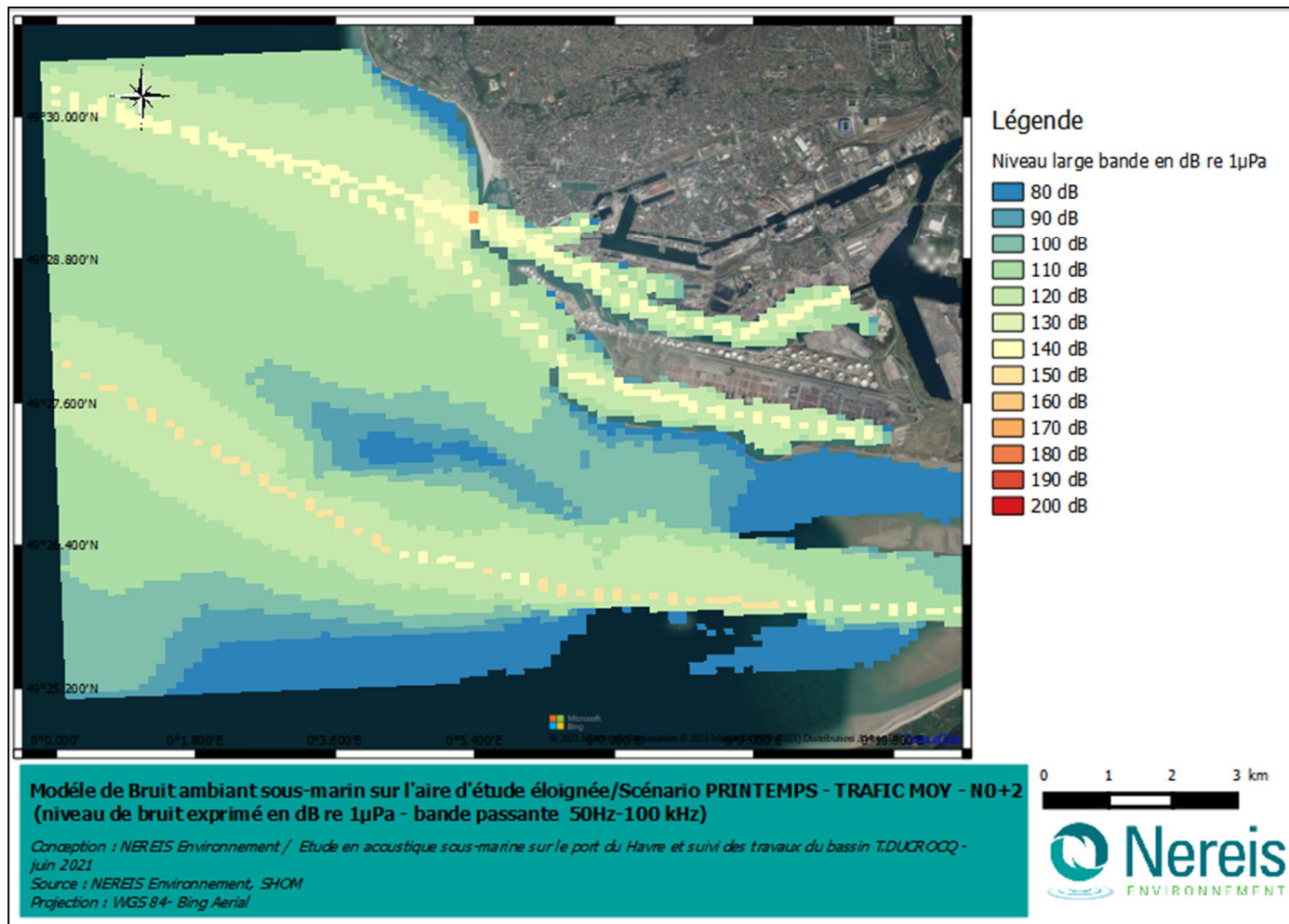


Figure 44. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario de printemps / trafic moyen / marnage N0+2.



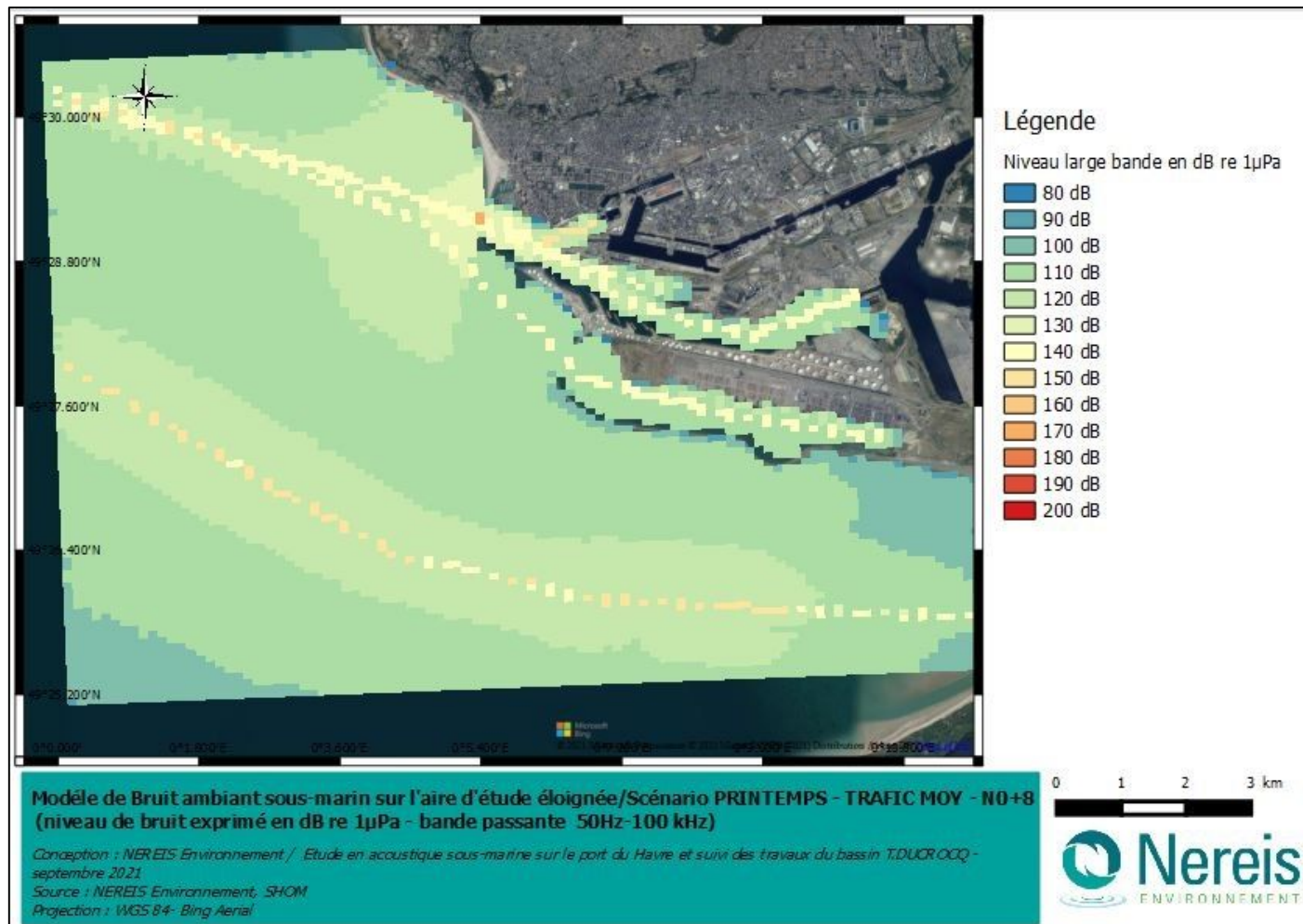


Figure 45. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario de printemps / trafic moyen / marnage N0+8.



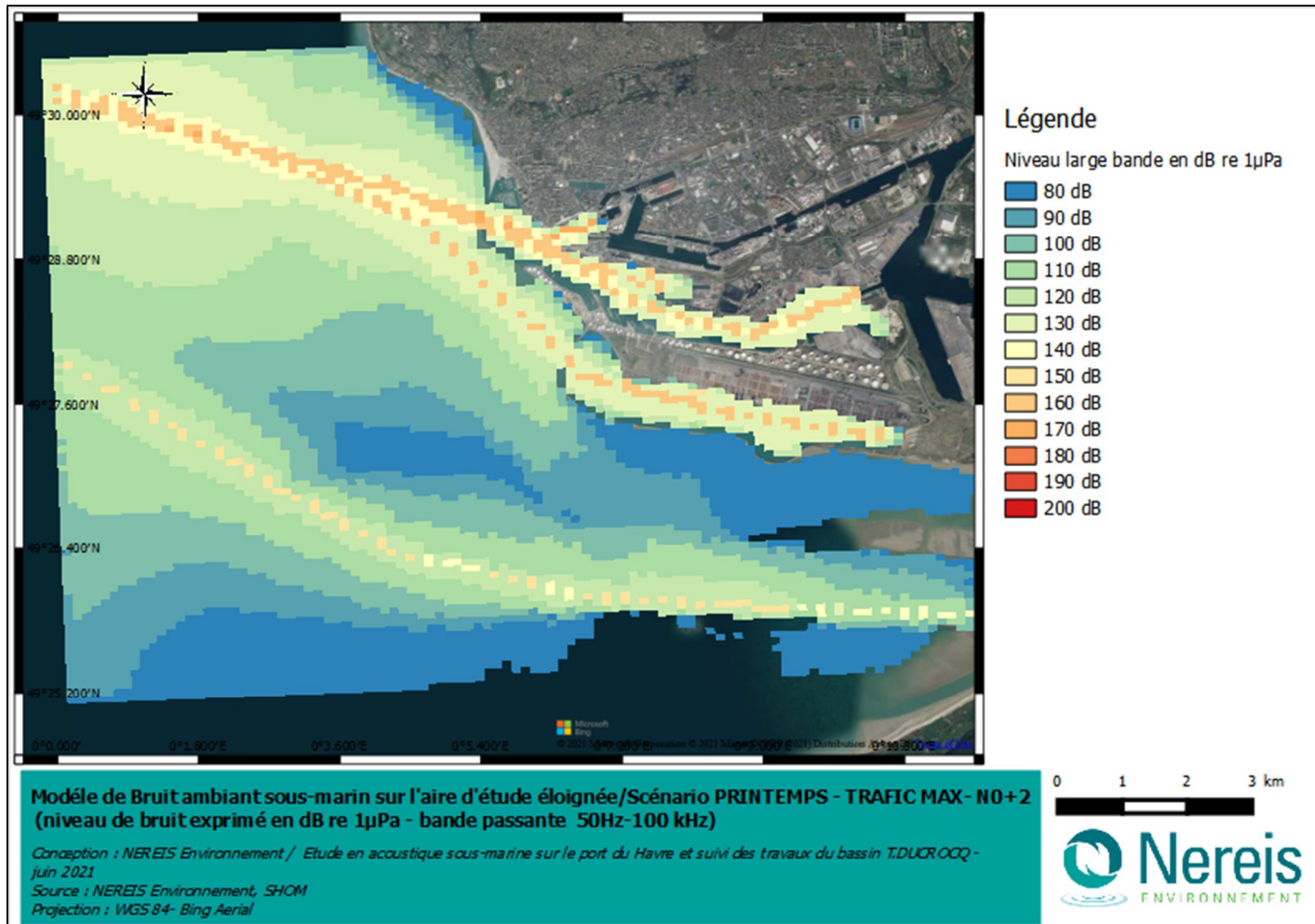


Figure 46. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario de printemps / trafic maximum / marnage N0+2.



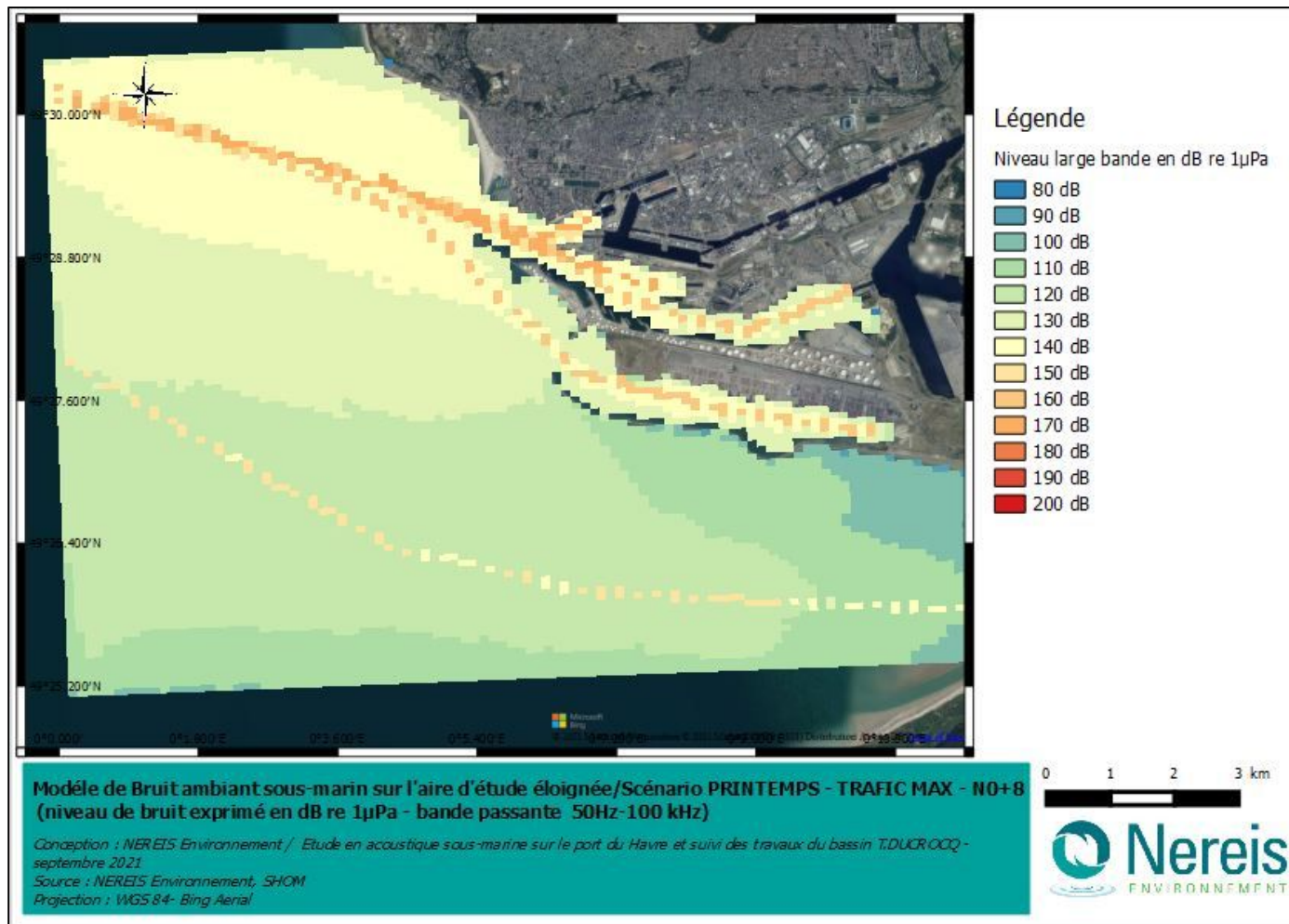


Figure 47. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario de printemps / trafic maximum / marnage N0+8.



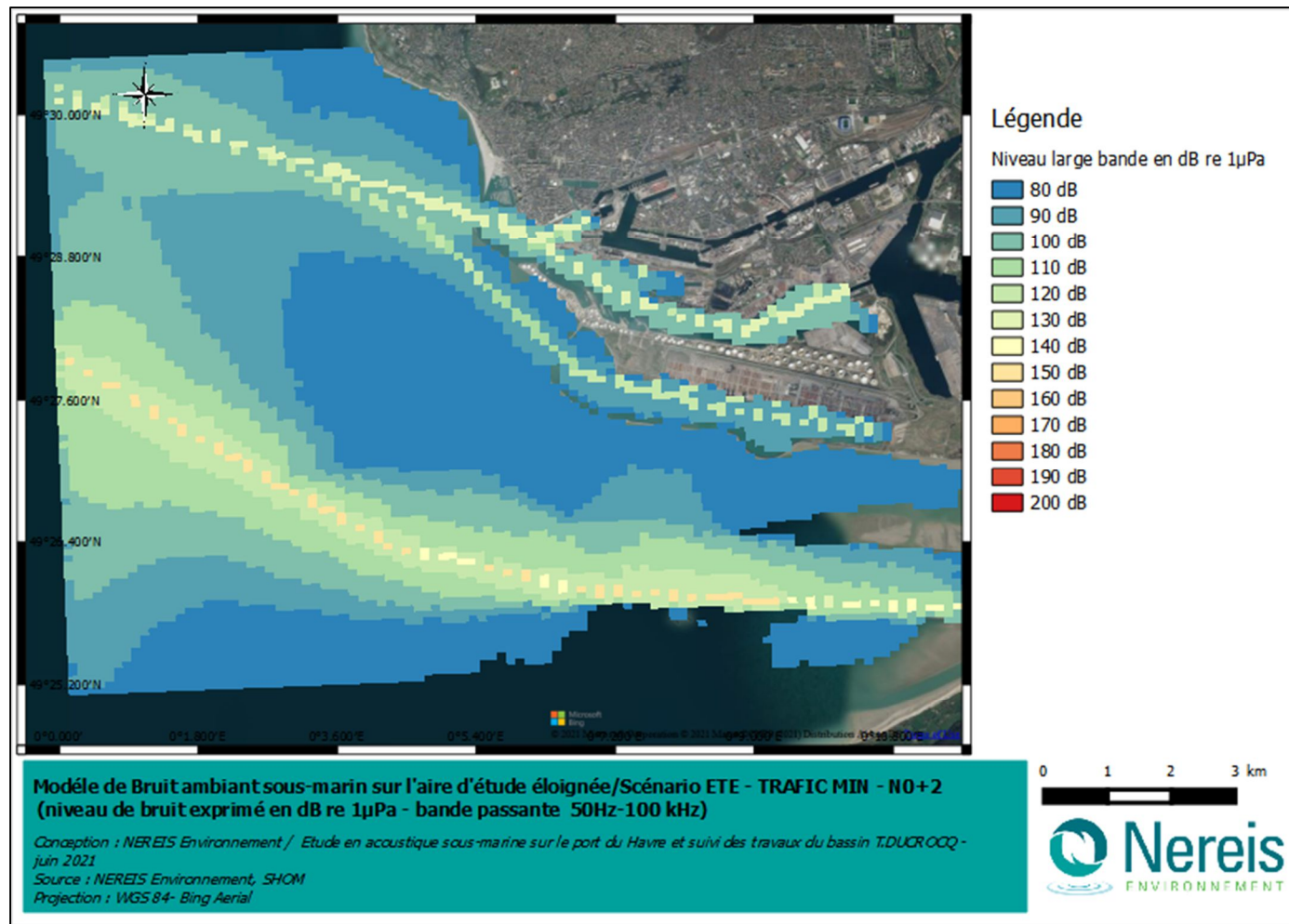


Figure 48. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario d'été / trafic minimum / marnage N0+2.



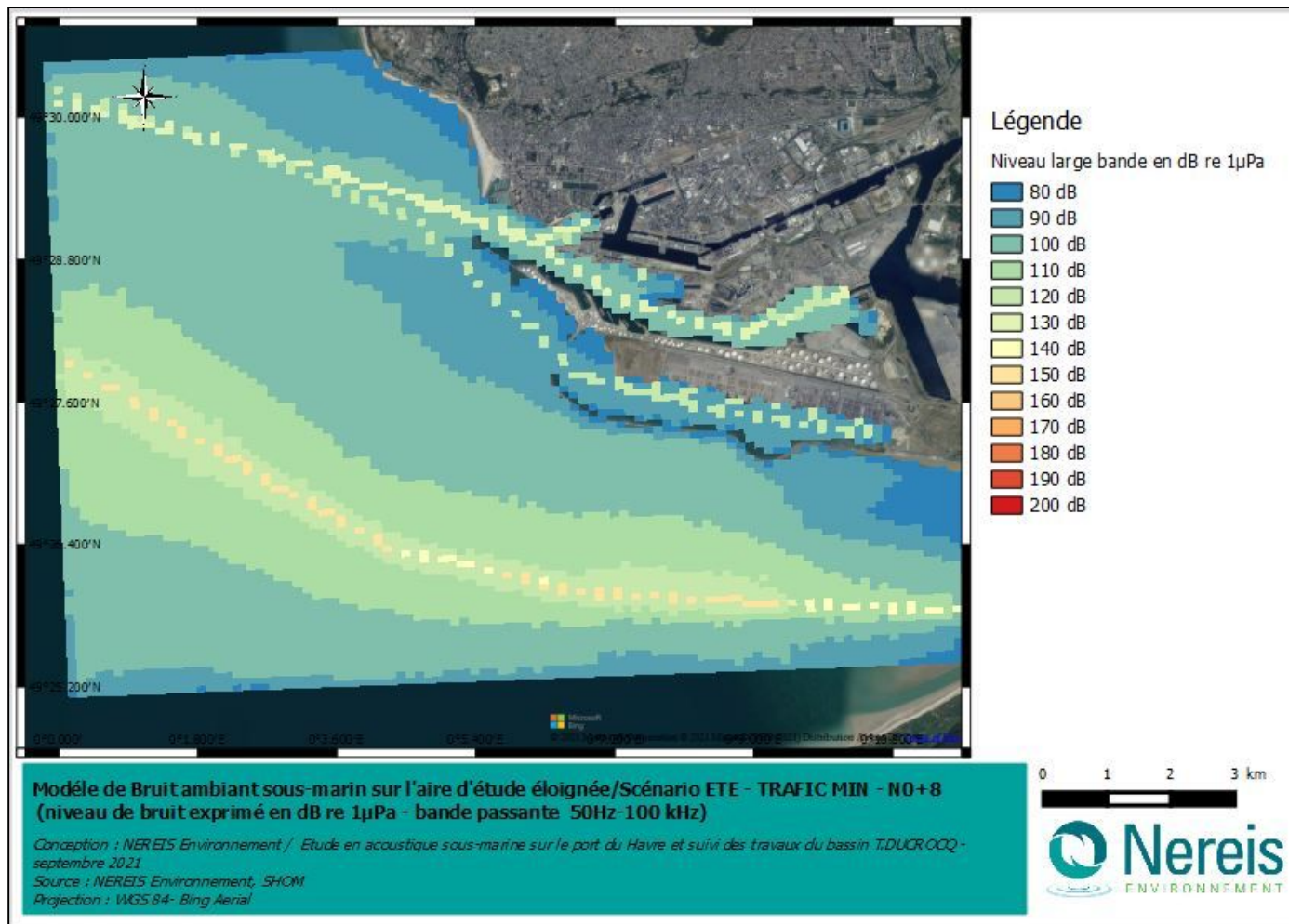


Figure 49. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario d'été / trafic minimum / marnage N0+8.



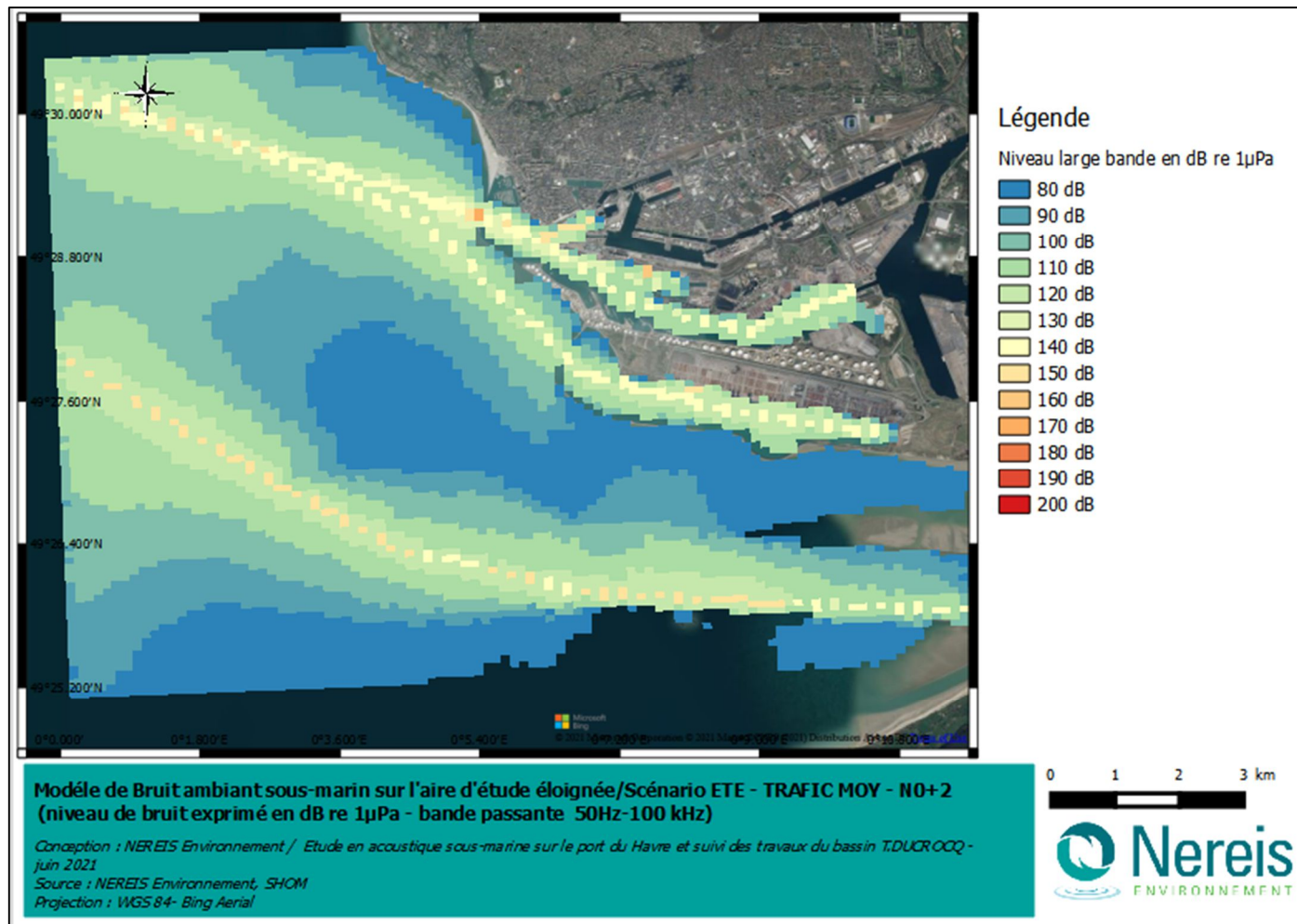


Figure 50. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario d'été / trafic moyen / marnage N0+2.



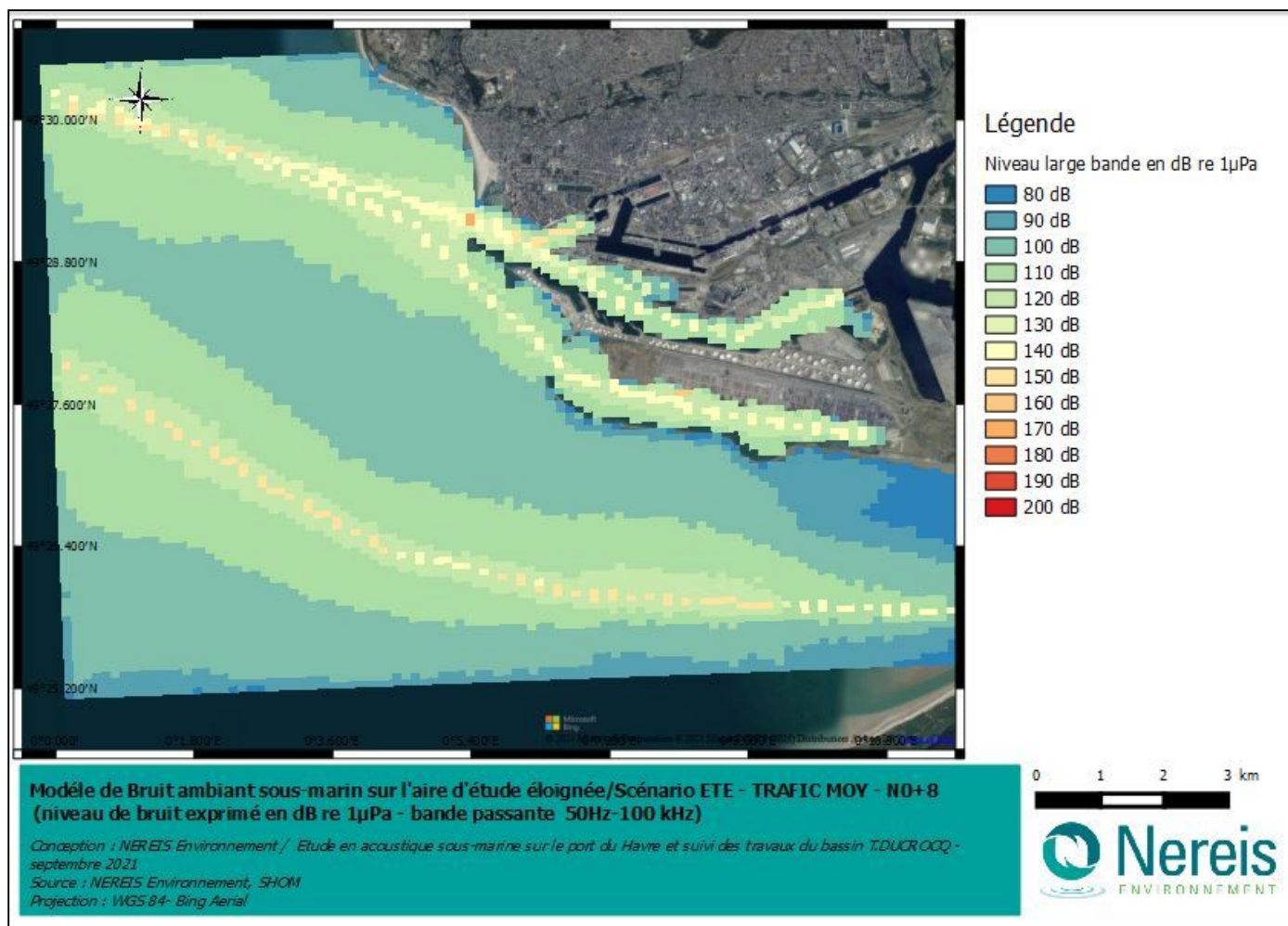


Figure 51. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario d'été / trafic moyen / marnage N0+8.



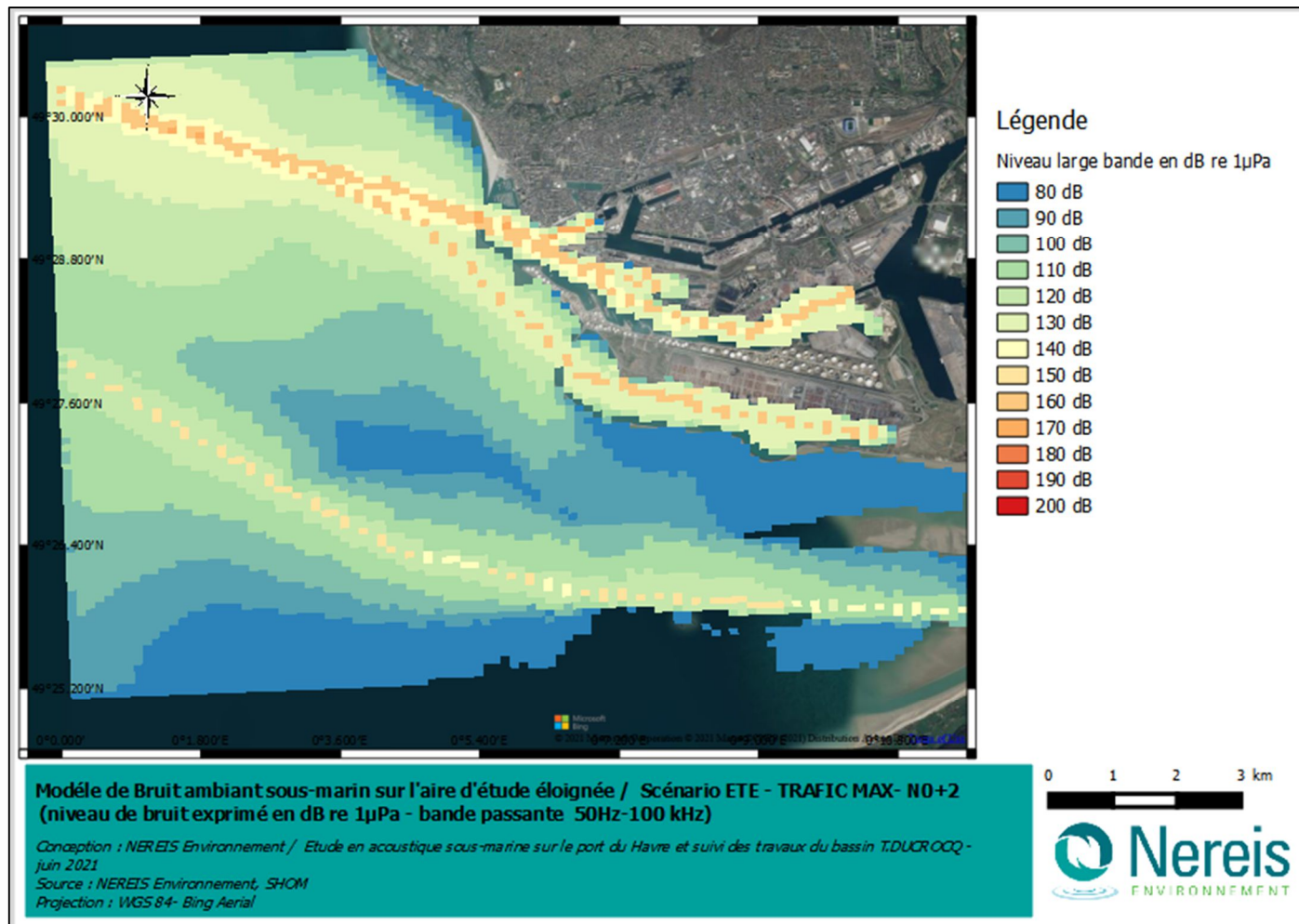


Figure 52. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario d'été / trafic maximum / marnage N0+2.



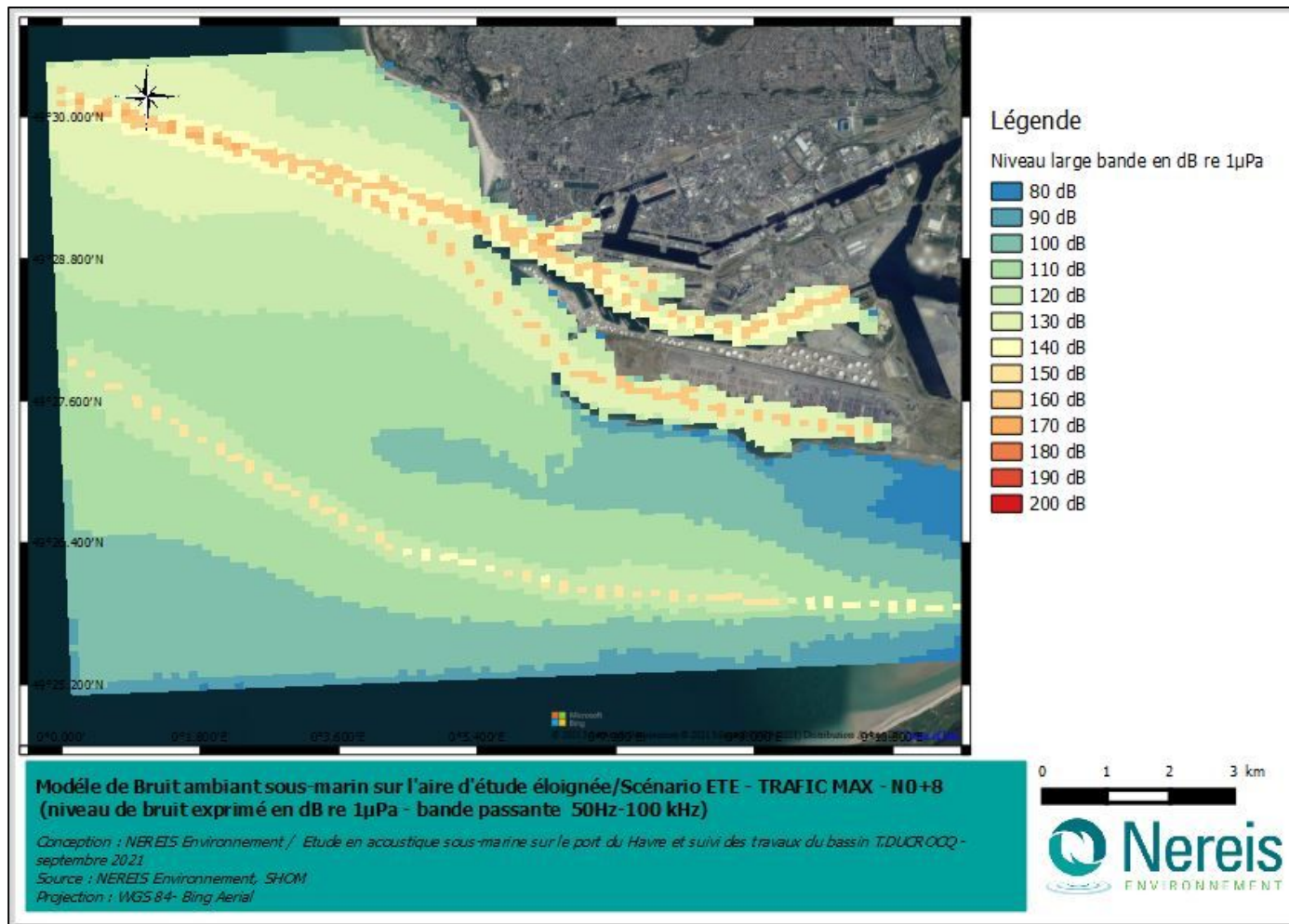


Figure 53. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario d'été / trafic maximum / marnage N0+8.



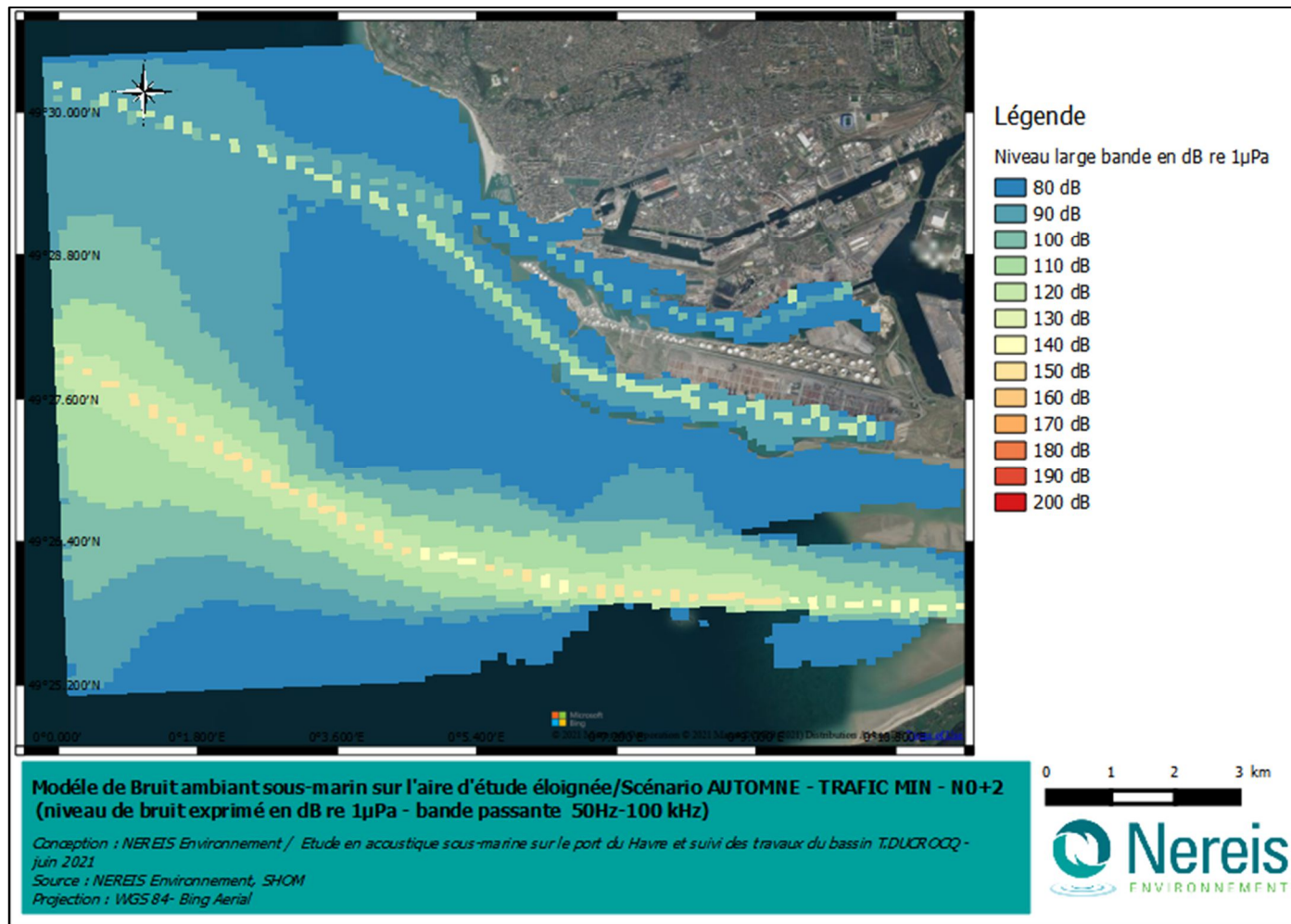


Figure 54. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario d'automne / trafic minimum / marnage N0+2.



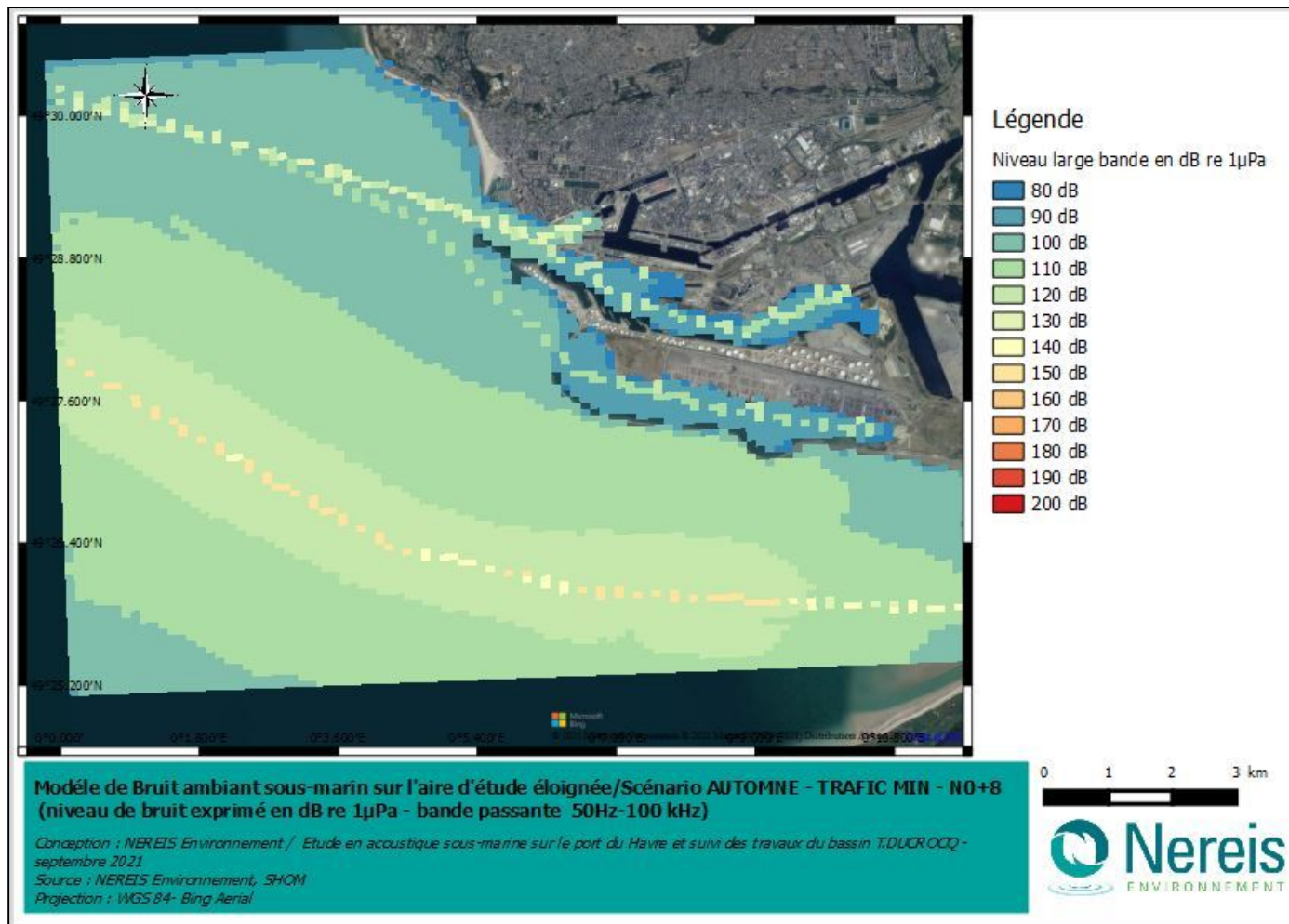


Figure 55. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario d'automne / trafic minimum / marnage N0+8.



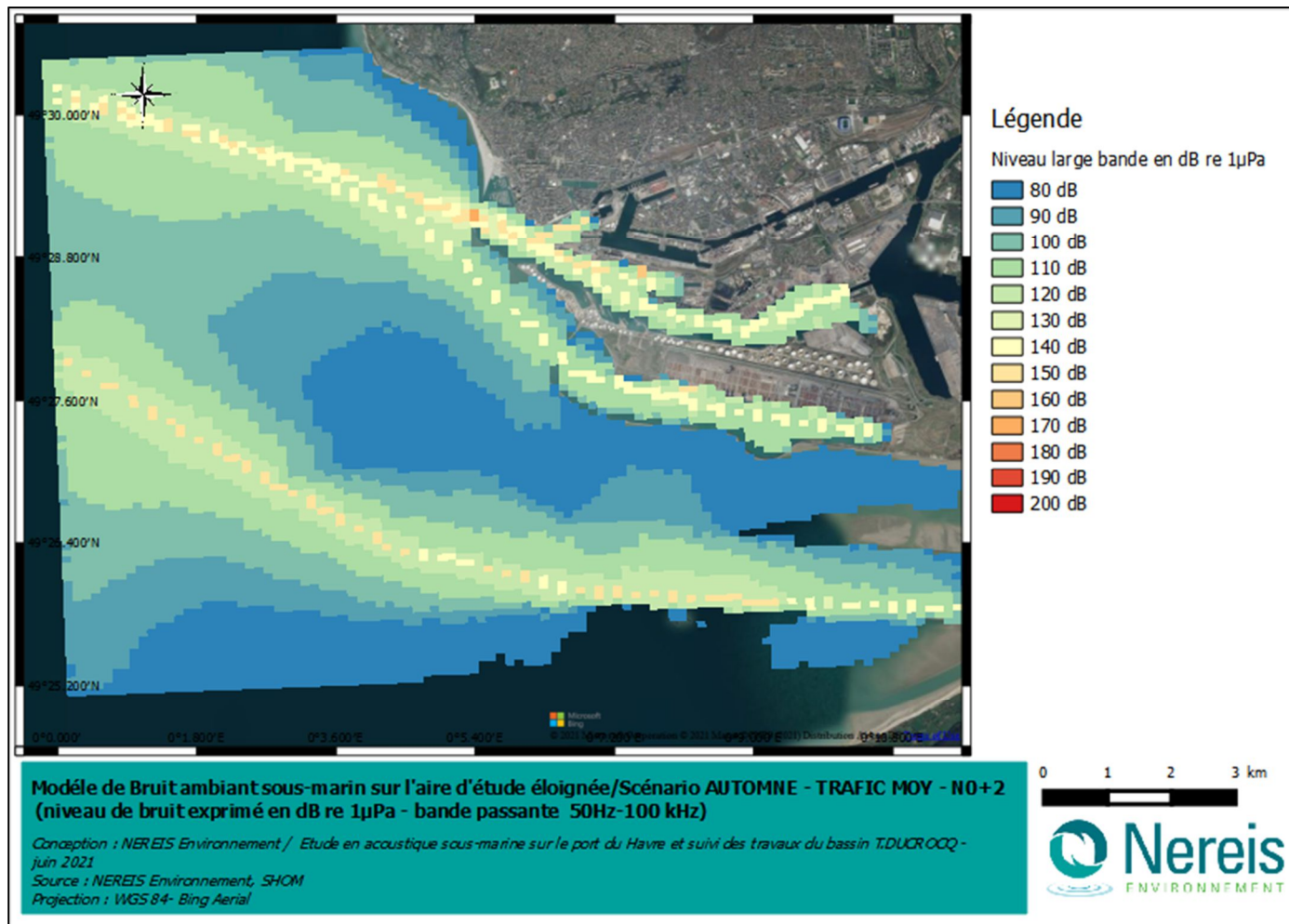


Figure 56. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario d'automne / trafic moyen / marnage N0+2.



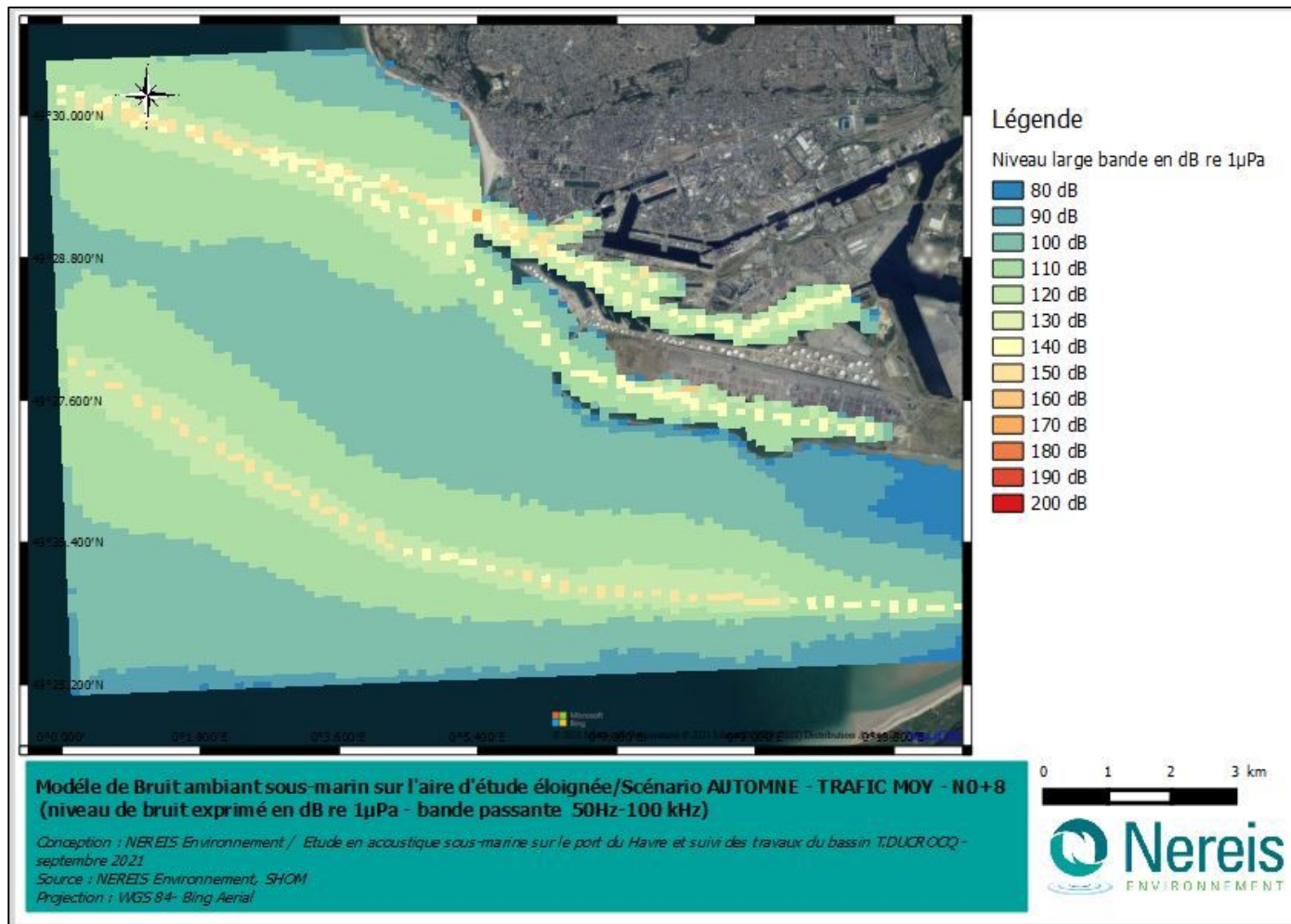


Figure 57. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario d'automne / trafic moyen / marnage N0+8.



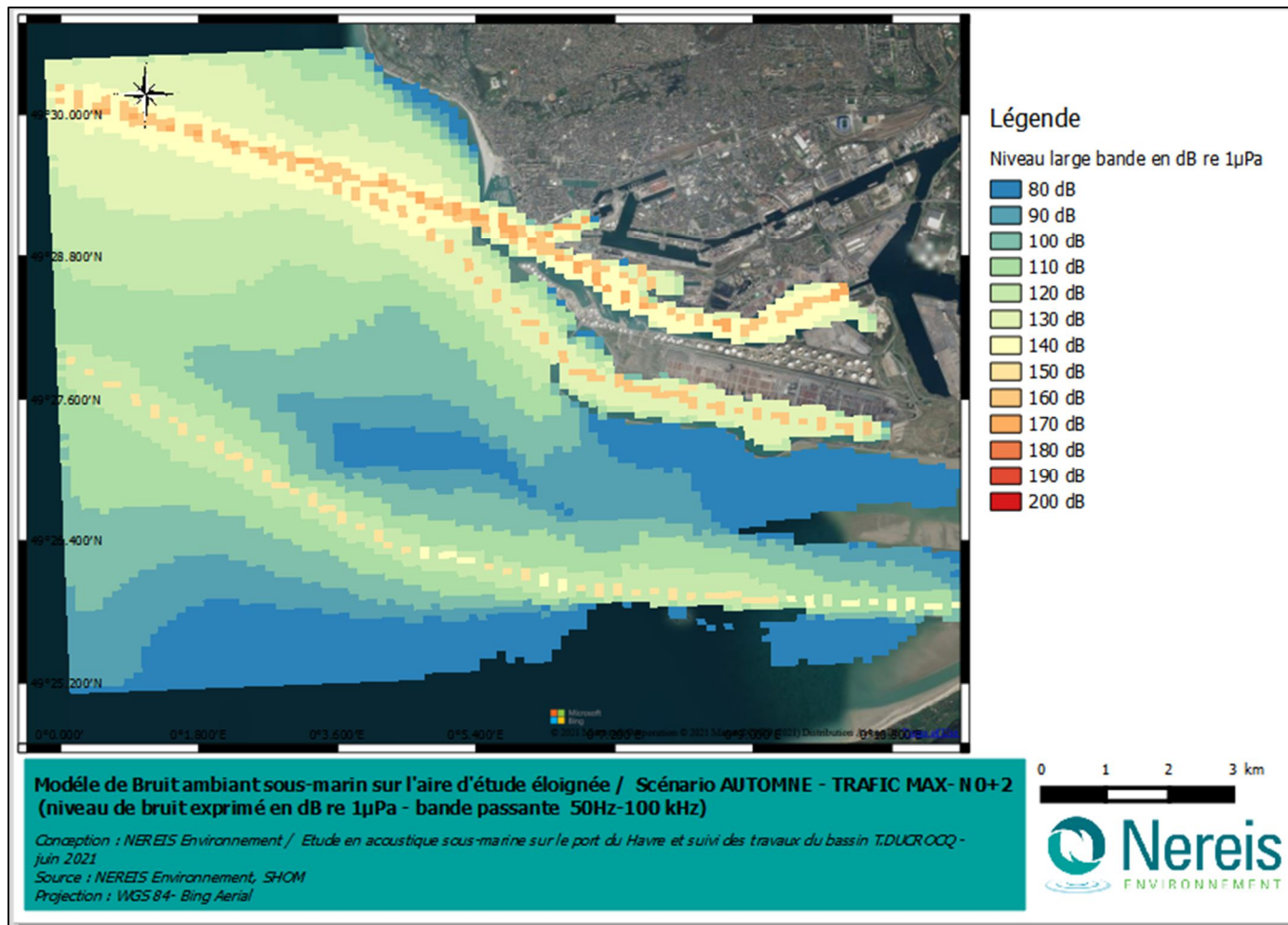


Figure 58. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario d'automne / trafic maximum / marnage N0+2.



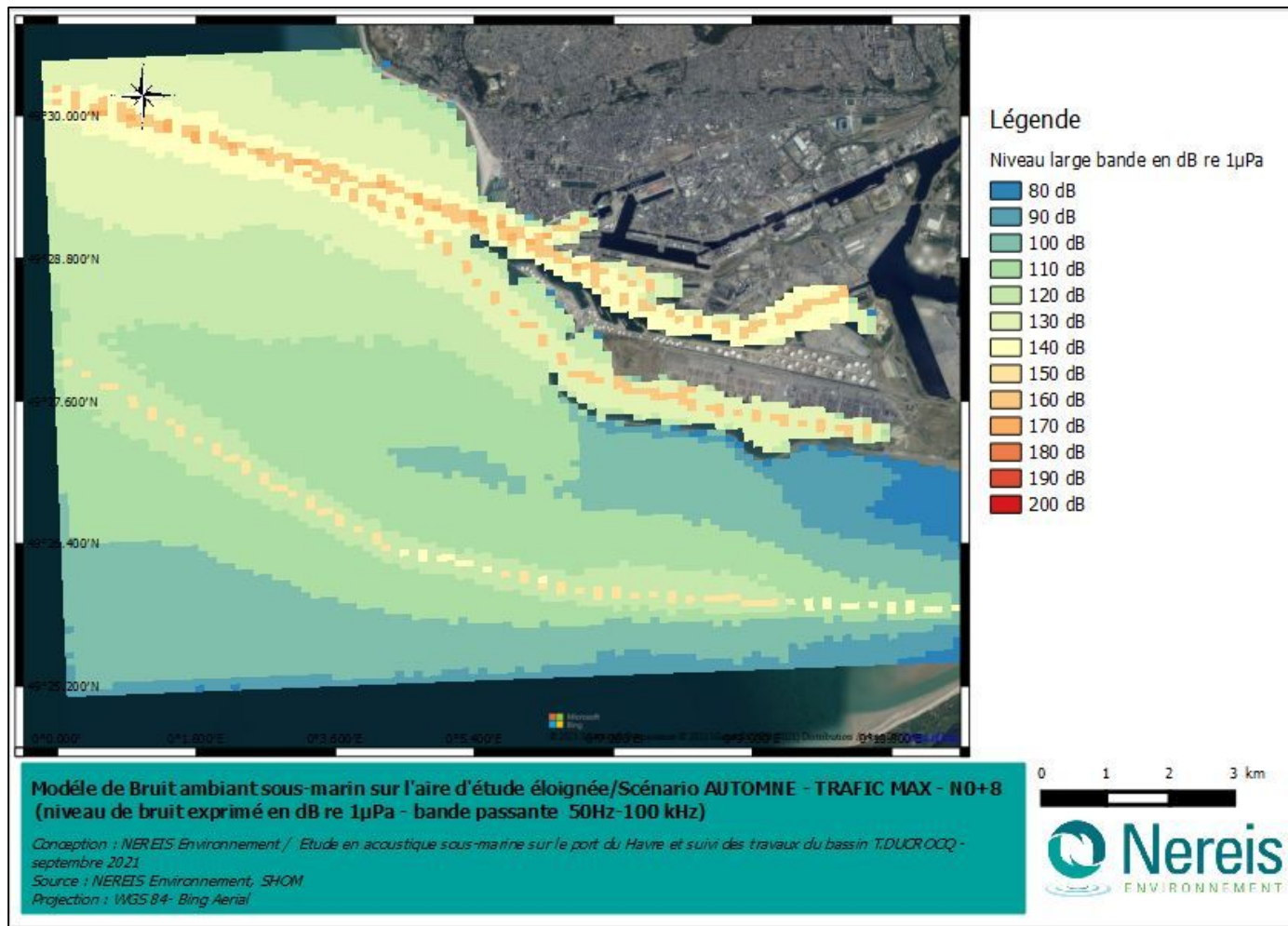


Figure 59. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario d'automne / trafic maximum / marnage N0+8.



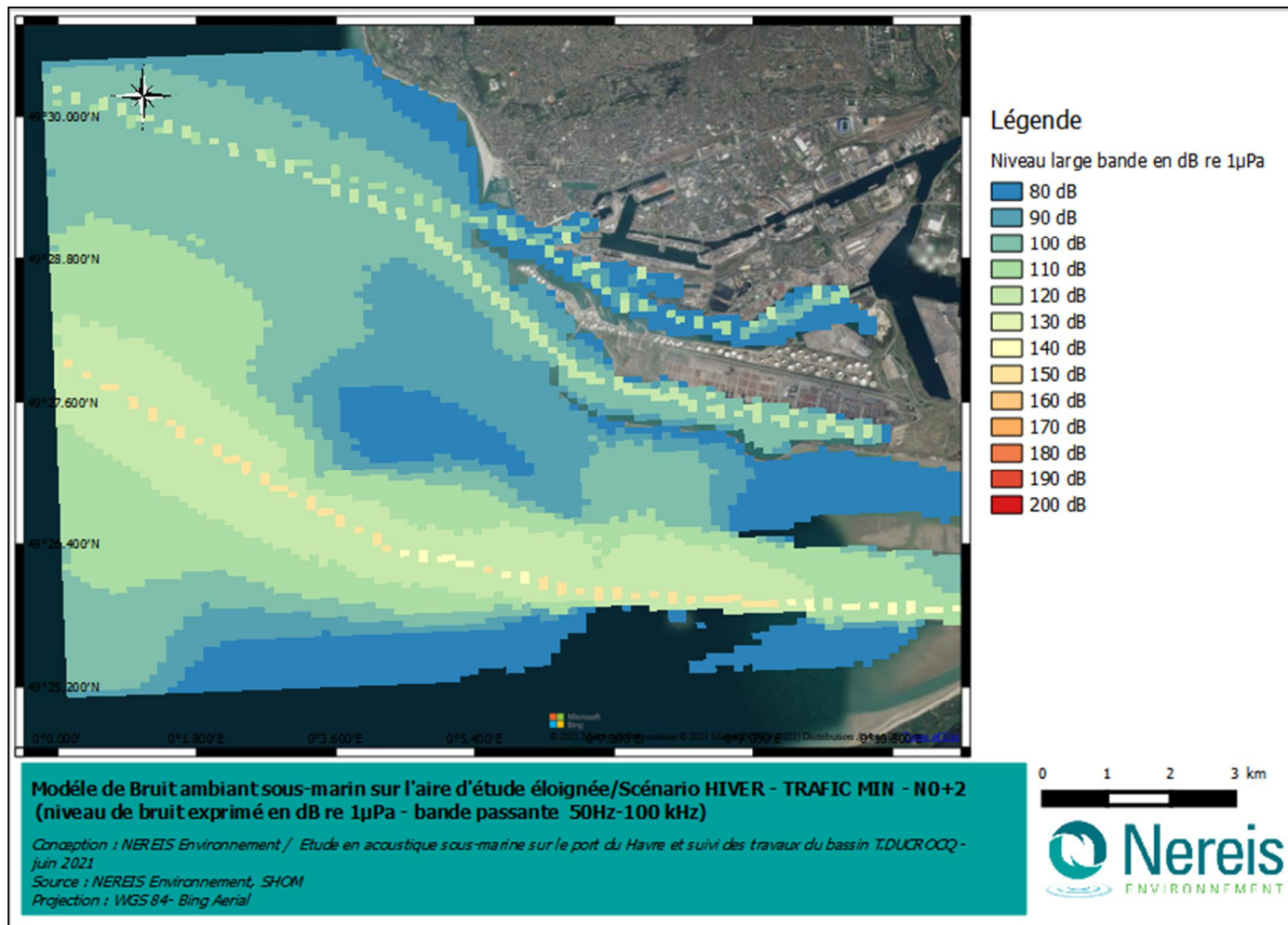


Figure 60. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario d'hiver / trafic minimum / marnage N0+2.



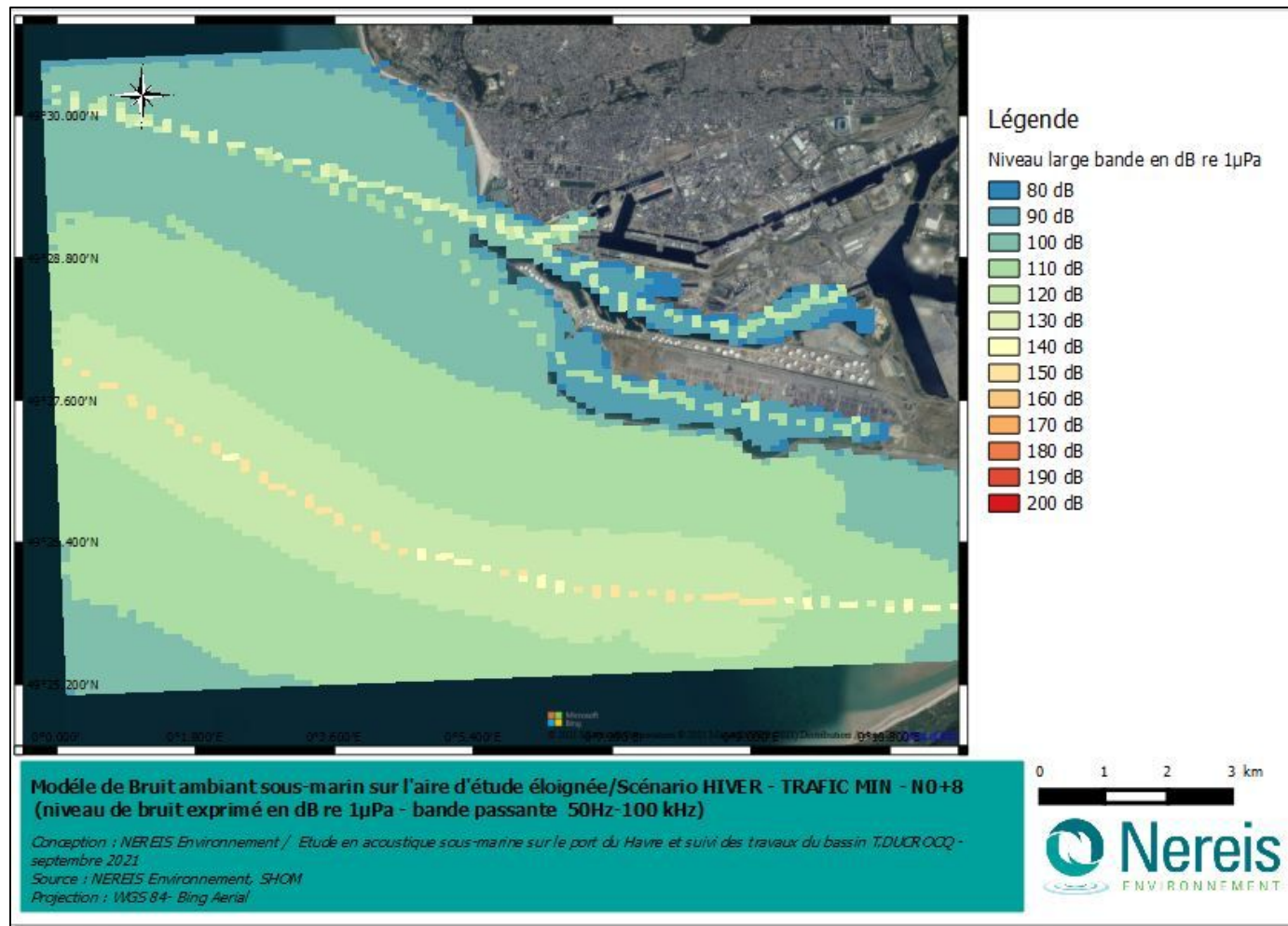


Figure 61. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario d'hiver / trafic minimum / marnage N0+8.



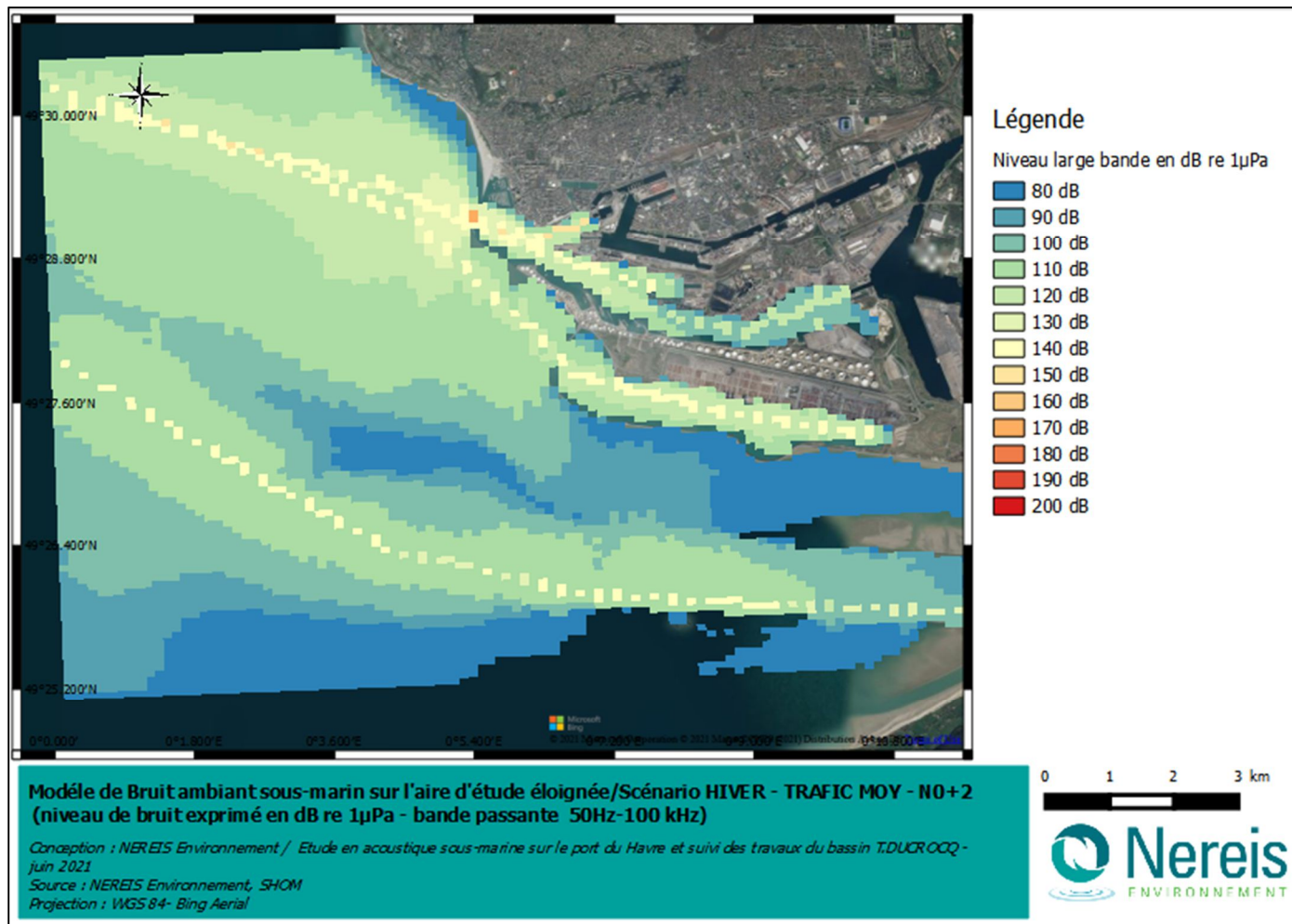


Figure 62. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario d'hiver / trafic moyen / marnage N0+2.



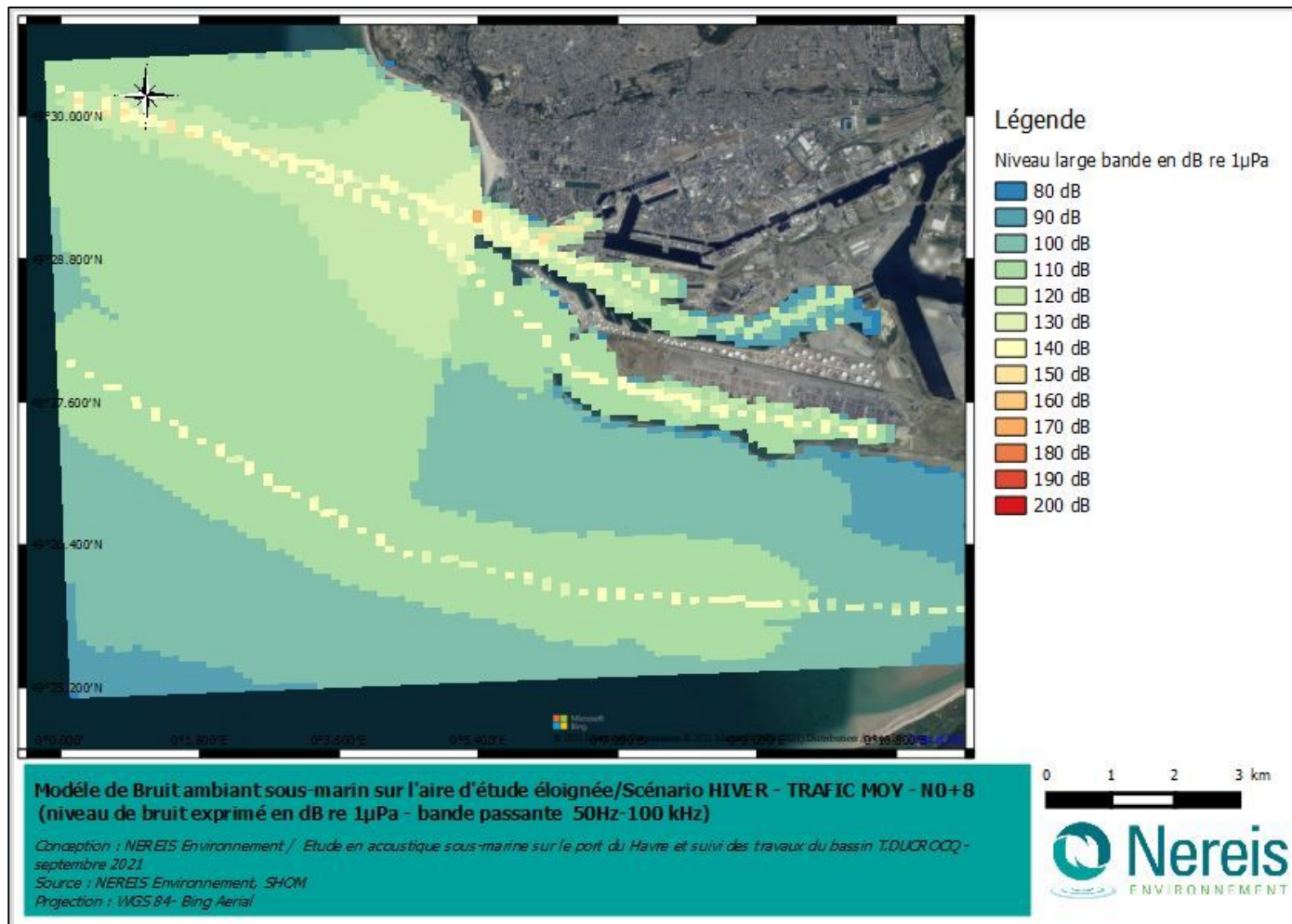


Figure 63. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario d'hiver / trafic moyen / marnage N0+8.



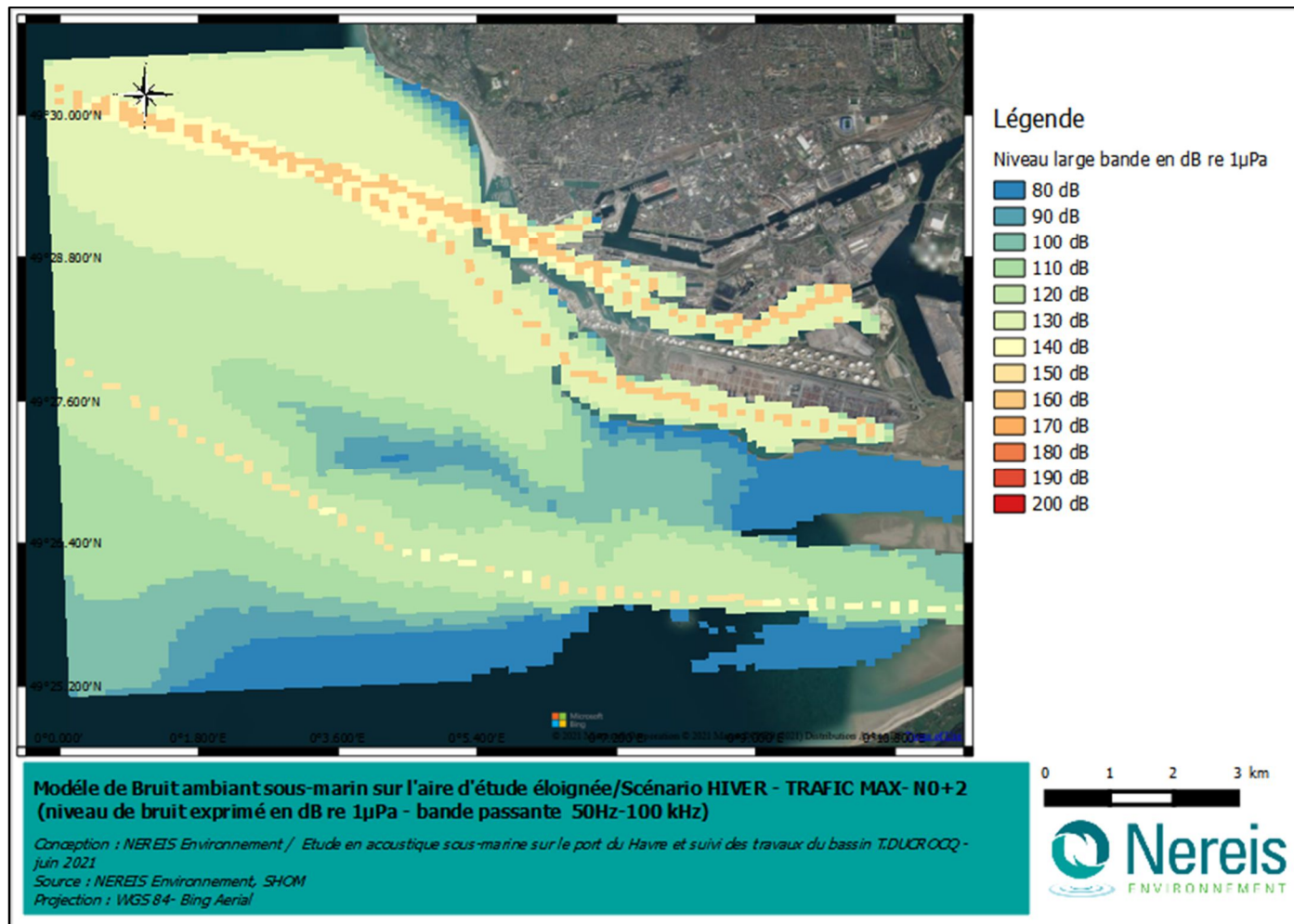


Figure 64. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario d'hiver / trafic maximum / marnage N0+2.



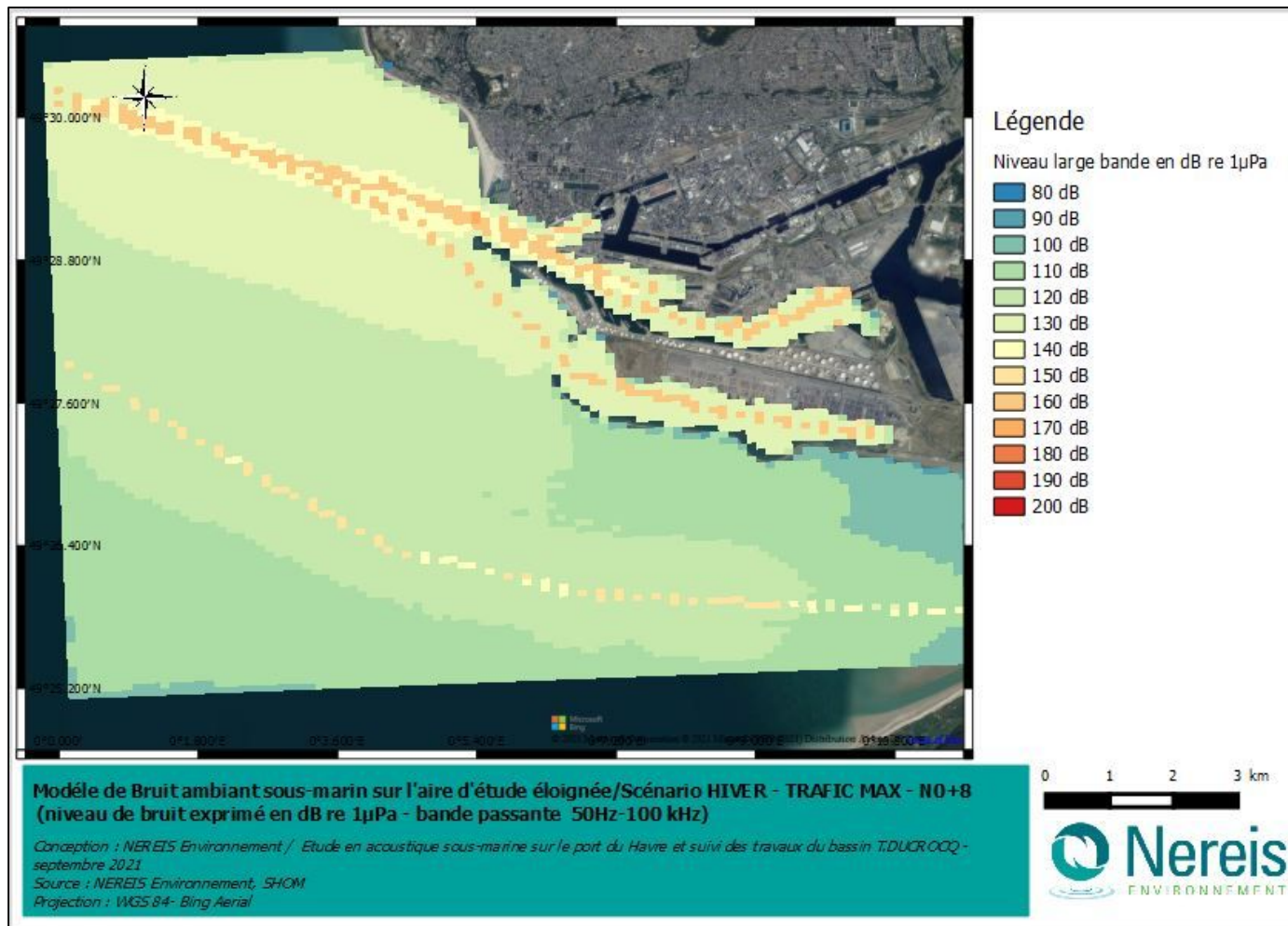


Figure 65. Carte du bruit ambiant sous-marin associé au scénario d'hiver / trafic maximum / marnage N0+8.



5. Incidence sonore du bruit sur la faune marine

5.1. L'audition des espèces marines

5.1.1. Les mammifères marins

Les mammifères marins utilisent le son pour se nourrir, se reproduire, communiquer et s'orienter. Leur audition est donc particulièrement bien développée et adaptée au milieu marin. Dans l'eau, les mammifères marins sont capables de percevoir les sons sur une très large plage de fréquences allant de 10 Hz à 200 kHz. Cependant, tous les mammifères marins n'ont pas la même sensibilité auditive et il est possible de distinguer six « groupes d'audition » (Southall *et al.*, 2019 ; figure 66) :

- **Les cétacés basse fréquence**, qui comprennent les baleines à fanons (ou mysticètes). Les espèces de ce groupe perçoivent les sons entre 10 Hz à 30 kHz avec une sensibilité maximale entre 1000 et 8000 Hz. Dans cette plage de sensibilité maximale, leur seuil d'audition est d'environ 60 dB re 1 μ Pa ;
- **Les cétacés haute fréquence**, qui regroupent la plupart des delphinidés (dauphins, globicéphales et orques), les ziphiidés (baleines à bec), les monodontidés (béluga et narval) et le grand cachalot. Ces espèces perçoivent les sons entre 100 Hz et 180 kHz avec une sensibilité maximale entre 10 et 100 kHz. A l'intérieur de cette plage de sensibilité maximale leur seuil d'audition est inférieur à 60 dB re 1 μ Pa ;
- **Les cétacés très haute fréquence**, qui incluent les phocoenidés (marsouins), quelques petits delphinidés, les dauphins d'eau douce et les kogiidés (cachalots nain et pygmée). Comme les cétacés haute fréquence, ils sont capables de percevoir les sons de 100 Hz à 180 kHz, mais ils sont plus sensibles aux très hautes fréquences, avec des seuils d'audition minimum inférieurs à 50 dB re 1 μ Pa autour de 100 kHz ;
- **Les siréniens**, lamantins et dugong, perçoivent les sons entre 250 Hz et 60 kHz avec une sensibilité maximale entre 10 et 20 kHz. Dans cette plage plus restreinte leur seuil d'audition maximale se situe autour de 60 dB re 1 μ Pa ;
- **Les phocidés**, qui comprennent les phoques et les éléphants de mer. Ces espèces, dépourvues d'oreille externe, sont capables de percevoir les sons aussi bien sous l'eau que dans l'air. Dans l'eau, elles perçoivent les sons entre 100 Hz et 100 kHz. Leur seuil d'audition est inférieur à 60 dB re 1 μ Pa dans leur plage de sensibilité maximale, comprise entre 2 et 30 kHz ;
- **Les autres carnivores**, qui regroupent les otaries, les lions de mer, le morse, les loutres et l'ours polaire. Contrairement aux phocidés, ces espèces possèdent une oreille externe (à l'exception du morse) et leur seuil d'audition est plus élevé (environ 70 dB re 1 μ Pa au minimum). Dans l'eau, elles

perçoivent les sons entre 100 Hz et 60 kHz et leur sensibilité maximale se situe autour de 10 kHz.

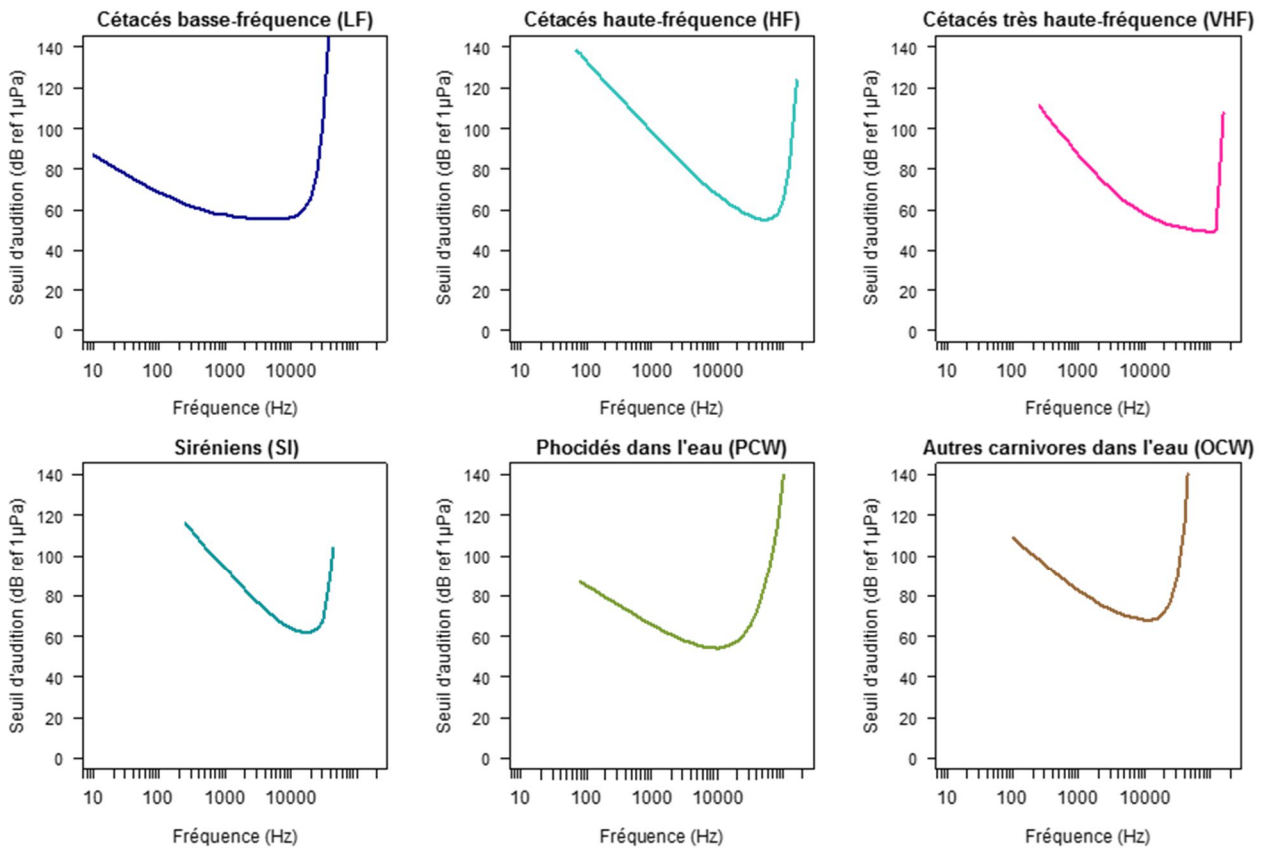


Figure 66. Audiogrammes médians des différents groupes de mammifères marins (d'après Southall *et al.*, 2019).

5.1.2. Les poissons et invertébrés marins

Les poissons sont capables de percevoir les ondes sonores via différents récepteurs : les otolithes (pièces calcaires situées au niveau de l'oreille interne) et les otoconies (cristaux calcaires qui remplacent les otolithes chez les raies, les requins et les lamproies), la ligne latérale et les cavités gazeuses (vessie natatoire notamment). De ce fait, il est possible de distinguer 4 catégories de poissons en fonction de leur anatomie (Popper & Hawkins, 2019) :

- **Les espèces ne possédant pas de vessie natatoire.** Ces poissons sont moins sensibles aux ondes sonores car ils ne perçoivent pas les variations de pression induites par les ondes sonores. Leur perception du son est limitée à une bande de fréquence relativement étroite (10-200 Hz) et ils ne risquent pas de barotraumatisme en cas d'exposition à des sons de forte intensité. Cette

catégorie inclut notamment les poissons plats et les poissons cartilagineux (raies et requins) ;

- **Les espèces qui possèdent une vessie natatoire située loin de l'oreille interne.** Chez ces espèces, la vessie natatoire ne semble pas jouer un rôle direct dans la perception du son et elles ne sont capables de percevoir les sons que sur une étroite bande de fréquence également (10-300 Hz). Cette catégorie inclut par exemple les Salmonidés (saumons, truites, etc.) ;
- **Les poissons qui possèdent une vessie natatoire située contre ou à proximité de l'oreille interne.** Chez ces espèces, la vessie natatoire va percevoir les variations de pression induites par les ondes sonores et ces variations de pressions vont être transmises aux organes otolithiques. Les espèces appartenant à cette catégorie possède un seuil d'audition plus bas et sont capables de percevoir les sons sur une gamme de fréquences plus large, allant jusqu'à 500 Hz. Les Gadidés (morues, merlans, tacauds, etc.) appartiennent à cette catégorie ;
- **Les poissons possédant une vessie natatoire connectée mécaniquement à l'oreille interne par des pièces osseuses spécifiques (appareil de Webber) ou d'autres cavités gazeuses (bulles).** Ces espèces sont les plus sensibles aux sons ; la gamme de fréquences qu'ils perçoivent est plus large (jusqu'à plusieurs milliers de Hz) et leur seuil d'audition est plus bas que chez les autres espèces. Cette catégorie comprend une majorité de poissons d'eau douce (Ostariophysaires) ainsi que certains Clupéidés (aloses, harengs, sardines notamment) et Holocentridés (poissons-soldats).

La grande majorité des poissons est cependant capable de percevoir des sons compris entre 50 et 300 Hz. Chez les poissons possédant une vessie natatoire connectée à l'oreille interne, cette plage de fréquence peut toutefois s'étendre à plusieurs kHz, voire plus de 100 kHz chez certaines espèces comme les aloses (Ladich & Schulz-Mirbach, 2016 ; Popper & Hawkins, 2019).

Chez les poissons osseux, la perception du son par les larves serait équivalente à celles des adultes. En effet, chez certaines espèces la vessie natatoire apparaît dès les premiers stades larvaires, et permettrait donc la perception des variations de pression comme chez les adultes (Weilgart, 2018).

Il existe très peu d'études disponibles faisant état de la capacité des invertébrés marins à percevoir et à réagir aux émissions sonores. Il est néanmoins admis que certains crustacés possèdent des organes et cellules sensoriels équivalents aux otolithes chez les poissons (Edmonds *et al.*, 2016). Certains mollusques possèdent également des récepteurs sensoriels épidermiques comparables à la ligne latérale des poissons (Mooney *et al.*, 2012). Cependant, ils ne possèdent pas de cavité gazeuse et ne perçoivent donc pas les variations de pression induite par les ondes sonores.



D'une façon générale, les invertébrés marins semblent capables de percevoir les sons basses fréquences, inférieurs à 3 kHz, mais seulement lorsque ces sons atteignent des niveaux supérieurs à 100 dB re 1 μ Pa.

5.2. Espèces marines présentes en baie de Seine

5.2.1. Les mammifères marins

5.2.1.1. Sources de données

Les mammifères marins sont des espèces très mobiles. Ils peuvent en effet parcourir plusieurs centaines de kilomètres en une journée. De ce fait, étudier leur distribution à une échelle cohérente pour l'espèce peut s'avérer difficile. Dans le cadre de cette étude, afin de lister les espèces potentiellement présentes à proximité de HAROPA Port Le Havre, nous nous sommes donc attachés à inventorier les espèces présentes à l'échelle de l'ensemble de la baie de Seine.

Pour réaliser cet inventaire, quatre principaux types de données ont été consultés : les données bibliographiques, les données d'échouages, les observations standardisées (par bateau ou avion) et les observations opportunistes. Les données consultées ont ainsi incluses :

Données bibliographiques :

- Recueil des données disponibles dans la littérature : publications scientifiques, monographies, cahiers d'habitats Natura 2000, ouvrages naturalistes, plan de gestion du Parc Naturel Marin des Estuaires Picards et de la Mer d'Opale, *etc.*

Données d'échouages :

- Données du Réseau National d'Echouage (RNE) ;
- Rapports et données disponibles sur le site de l'Observatoire PELAGIS (<http://www.observatoire-pelagis.cnrs.fr/>) ;

Données des observations standardisées (suivis aériens et par bateau) :

- Campagnes SAMM (Laran *et al.*, 2017) ;
- Campagnes SCANS I (Hammond *et al.*, 2002), SCANS II (Hammond *et al.*, 2013), et SCANS III (Hammond *et al.*, 2017) ;

Données des observations opportunistes :

- Données OBIS-SEAMAP (<http://seamap.env.duke.edu>) ;
- Données issues de la plateforme ObsenMER (<https://www.obsenmer.org/>) ;
- Données des observations réalisées à bord des ferries (MacLeod *et al.*, 2009).



5.2.1.2. Les mammifères marins observés en baie de Seine

Les espèces de mammifères marins les plus susceptibles d'être observées dans la zone d'étude sont le **marsouin commun (*Phocoena phocoena*)**, le **phoque gris (*Halicoerus grypus*)** et le **phoque veau marin (*Phoca vitulina*)**.

Le marsouin commun est de plus en plus présent en Manche depuis la fin des années 1990. Ceci serait dû à un glissement de l'aire de répartition de l'espèce de la mer du Nord vers la Manche, probablement lié à un déplacement de ses proies vers le Sud (Hammond *et al.*, 2017 ; MacLeod *et al.*, 2009). Cette espèce tend par ailleurs à être plus côtière en hiver (Laran *et al.*, 2017).

Le phoque gris et le phoque veau marin sont présents sur tout le littoral de la Manche, et notamment en Manche orientale. La baie de Somme abrite en effet la plus importante colonie de phoques veau marin de France, ainsi qu'une colonie de phoques gris d'une centaine à plus de 200 individus en fonction de la saison. Les populations de phoques sont en augmentation en France ces dernières années (Vincent *et al.*, 2017).

Ces trois mammifères marins sont recensés parmi les espèces présentes au sein du Parc Naturel Marin des Estuaires Picard et de la Mer d'Opale, qui représente un lieu de repos, de nourrissage et de reproduction.

Outre ces trois espèces bien présentes autour de la zone d'étude, le **dauphin commun (*Delphinus delphis*)** et le **grand dauphin (*Tursiops truncatus*)** sont également susceptibles d'être observées à proximité de HAROPA Port Le Havre. En effet, si les suivis standardisés à grande échelle n'ont pas permis d'observer ces cétacés en baie de Seine, des observations opportunistes ainsi que les données d'échouage témoignent de la présence de ces espèces dans la zone d'étude. Le nombre d'échouages de dauphin commun en baie de Seine est en augmentation depuis 2015. Le grand dauphin est peu présent dans les échouages, mais il est très régulièrement observé en baie de Seine. Il est également cité parmi les espèces présentes sur le Site d'Importance Communautaire (SIC) Natura 2000 « Baie de Seine orientale ».

Le dauphin commun est le delphinidé le plus répandu sur le globe. Cette espèce grégaire est aussi bien observée en milieu hauturier qu'au niveau de la bande côtière, en passant par le talus et le plateau continental. Chez le grand dauphin, il existe un écotype « côtier », plus migrateur, fréquentant les eaux du plateau continental, les baies et les estuaires sur des fonds inférieurs à 20 m, et un écotype « océanique », plus sédentaire, vivant au-delà du plateau, sur des fonds supérieurs à 100 m. Ces deux delphinidés vivent en groupe de plusieurs dizaines d'individus, voire davantage au large.

Deux autres espèces de delphinidés sont également présentes, dans une moindre mesure, dans les rapports d'observation et d'échouage en baie de Seine : le **dauphin bleu et blanc (*Stenella coeruleoalba*)** et le **globicéphale noir (*Globicephala melas*)**.



Le dauphin bleu et blanc est un petit delphinidé grégaire principalement observé au large dans les eaux profondes (> 200 m). Il est rare en Manche mais des échouages d'individus de cette espèce sont régulièrement recensés sur les côtes normandes.

Le globicéphale noir est une espèce plutôt océanique, mais qui se rapproche volontiers des côtes en été et en automne. Cette espèce vit en groupes de plusieurs dizaines d'individus. Peu représenté dans les données d'échouage, le globicéphale est toutefois régulièrement observé en baie de Seine entre mai et septembre.

D'autres espèces de cétacés ont été ponctuellement observées en baie de Seine, comme le cachalot (*Physeter macrocephalus*), le rorqual commun (*Balaenoptera physalus*), le petit rorqual (*Balaenoptera acutorostrata*) et plus récemment l'orque (*Orcinus orca*) et le béluga (*Delphinapterus leucas*). Il s'agit cependant de cas de fréquentation accidentelle, et la probabilité de présence de ces espèces à proximité de HAROPA Port Le Havre étant quasiment nulle, elles n'ont pas été intégrées dans l'étude.

5.2.2. Les poissons et invertébrés marins

5.2.2.1. Sources de données

Dans une moindre mesure par rapport aux mammifères marins, les poissons, les mollusques et les crustacés sont des espèces relativement mobiles. Certaines espèces peuvent en effet parcourir des distances importantes à l'échelle saisonnière dans le cadre de la migration et de la reproduction. Dans le cadre de cette étude, afin de lister les espèces potentiellement présentes à proximité de HAROPA Port Le Havre, le périmètre considéré porte sur les espèces présentes à l'échelle de la baie de Seine orientale.

Pour réaliser cet inventaire, les principaux types de données consultées sont des données bibliographiques et rapports d'études tels que :

- Les campagnes scientifiques de l'IFREMER et du GIP Seine Aval⁵ ;
- Les suivis de la Cellule de Suivi du Littoral Haut-Normand et de l'Université de La Rochelle (Seine Aval 1 et 2) ;
- Document d'objectifs des sites Natura 2000 « Estuaire de la Seine », « Baie de Seine Orientale » ;
- Les captures et débarquements des navires de pêche professionnelle⁶.

Ces différentes sources ont permis de lister les espèces susceptibles d'être présentes dans la zone d'étude. Ces espèces sont présentées dans les tableaux 14 et 15 ci-dessous.

⁵ Campagnes d'évaluation de la ressource halieutique.

⁶ Données du Système d'Information Halieutique (SIH) de l'IFREMER : <http://sih.ifremer.fr/>.

5.2.2.2. Poissons et invertébrés présents en baie de Seine

Tableau 14. Espèces de poissons (O : ostéichthyens ou poissons osseux, C : chondrichthyens ou poissons cartilagineux) présents sur la zone d'étude (d'après Delpech *et al.*, 2007 ; Duhamel *et al.*, 2002 ; Forest, 2001 ; Mahé, 2006 ; Morin, 2010 ; Morin, 2015).

Gpe	Famille	Nom vernaculaire	Nom latin	Abondance sur la zone
Poissons	ESPECES MARINES			
	Moronidés (O)	Bar européen	<i>Dicentrarchus labrax</i>	Forte
	Callionymidés (O)	Dragonnet lyre	<i>Callionymus lyra</i>	Forte
	Pleuronectidés (O)	Limande commune	<i>Limanda limanda</i>	Forte
	Gadidés (O)	Merlan	<i>Merlangius merlangus</i>	Forte
	Pleuronectidés (O)	Plie d'Europe	<i>Pleuronectes platessa</i>	Forte
	Gadidés (O)	Tacaud commun	<i>Trisopterus luscus</i>	Forte
	Soléidés (O)	Petite sole jaune	<i>Buglossidium luteum</i>	Forte
	Soléidés (O)	Sole commune	<i>Solea solea</i>	Forte
	Scophthalmidés (O)	Barbue	<i>Scophthalmus rhombus</i>	Moyenne
	Sparidés (O)	Dorade grise	<i>Spondyliosoma cantharus</i>	Moyenne
	Triglidés (O)	Grondin perlon	<i>Chelidonichthys lucerna</i>	Moyenne
	Clupéidés (O)	Hareng	<i>Clupea harengus</i>	Moyenne
	Scombridés (O)	Maquereau commun	<i>Scomber scombrus</i>	Moyenne
	Gadidés (O)	Motelle à 5 barbillons	<i>Ciliata mustela</i>	Moyenne
	Scyliorhinidés (C)	Petite roussette	<i>Scyliorhinus canicula</i>	Moyenne
	Rajidés (C)	Raie bouclée	<i>Raja clavata</i>	Moyenne
	Clupéidés (O)	Sprat	<i>Sprattus sprattus</i>	Moyenne
	Scophthalmidés (O)	Turbot	<i>Scophthalmus maximus</i>	Moyenne
	Bothidés (O)	Arnoglosse lanterne	<i>Arnoglossus laterna</i>	Faible
	Atherinidés (O)	Athérine	<i>Atherina boyeri</i>	Faible
	Gadidés (O)	Cabillaud (Morue)	<i>Gadus morhua</i>	Faible
	Gadidés (O)	Petit tacaud	<i>Trisopterus minutus</i>	Faible
	Trachinidés (O)	Petite vive	<i>Trachinus draco</i>	Faible
	Carangidés (O)	Chinchard	<i>Trachurus trachurus</i>	Anecdotique
	Mullidés (O)	Rouget barbet	<i>Mullus surmuletus</i>	Anecdotique
	ESPECES ESTUARIENNES			
	Gobiidés (O)	Gobies	/	Forte
	Gastérosteidés (O)	Epinoche	<i>Gasterosteus aculeatus</i>	Moyenne
	Agonidés (O)	Souris de mer	<i>Agonus cataphractus</i>	Faible
	Syngnathidés (O)	Syngnathe aiguille	<i>Syngnathus acus</i>	Faible
		Syngnathe de Duméril	<i>Syngnathus rostellatus</i>	Faible
	Ammodytidés (O)	Lançon équille	<i>Ammodytes tobianus</i>	Anecdotique
	ESPECES AMPHIALINES			
	Osméridés (O)	Eperlan	<i>Osmerus eperlanus</i>	Moyenne
	Pleuronectidés (O)	Flet d'Europe	<i>Platichthys flesus</i>	Moyenne
	Mugilidés (O)	Mulet porc	<i>Chelon ramada</i>	Moyenne
	Anguillidés (O)	Anguille d'Europe	<i>Anguilla anguilla</i>	Faible
	Pétromyzonidés (O)	Lamproie fluviatile	<i>Lampetra fluviatilis</i>	Faible
	Acipenséridés (O)	Esturgeon (élevage)	<i>Acipenser sturio</i>	Anecdotique
	Clupéidés (O)	Grande alose	<i>Alosa alosa</i>	Faible
		Alose feinte	<i>Alosa fallax</i>	Anecdotique
Pétromyzonidés (O)	Lamproie marine	<i>Petromyzon marinus</i>	Anecdotique	
Salmonidés (O)	Saumon Atlantique	<i>Salmo salar</i>	Anecdotique	
	Truite de mer	<i>Salmo trutta trutta</i>	Anecdotique	



Tableau 15. Espèces d'invertébrés présents sur la zone d'étude (d'après Forest, 2001 ; Delpech *et al.*, 2007 ; Mahé, 2006 ; Morin, 2015).

Gpe	Famille	Nom vernaculaire	Nom latin	Abondance sur la zone
Céphalopodes	Sépiidés	Seiche commune	<i>Sepia officinalis</i>	Forte
	Loliginidés	Encornet commun	<i>Loligo vulgaris</i>	Moyenne
	Loliginidés	Petit calmar	<i>Alloteuthis spp</i>	Moyenne
	Sépiolidés	Sépioles	<i>Sepiola spp</i>	Anecdotique
Bivalves	Pectinidés	Coquille S ^t -Jacques	<i>Pecten maximus</i>	Forte
Crustacés	Crangonidés	Crevette grise	<i>Crangon crangon</i>	Forte
	Polybiidés	Etrilles	/	Moyenne
	Majidés	Araignée de mer	<i>Maja brachydactyla</i>	Anecdotique

5.3. Sensibilité auditive des espèces présentes et seuils de tolérance au bruit

La sensibilité auditive peut être divisée en deux composantes :

- L'acuité auditive, qui correspond à la plage de fréquences (ou bande passante) perceptibles par l'espèce considérée (en Hz) ;
- Le seuil d'audition, qui correspond au plus bas niveau sonore audible pour une fréquence donnée (en dB).

5.3.1. Sensibilité auditive et seuils de tolérance des mammifères marins présents en baie de Seine

Comme décrit précédemment, les mammifères marins peuvent être catégorisés en « groupes d'audition » en fonction de leur sensibilité auditive. Le tableau 16 ci-dessous synthétise les différentes sensibilités auditives des espèces de mammifères marins potentiellement présentes sur l'aire d'étude et indique à quel groupe d'audition elles appartiennent.

Les espèces de mammifères marins potentiellement présentes en baie de Seine sont capables de percevoir les sons entre 100 Hz et 180 kHz. Leur sensibilité maximum se situe entre 2 et 100 kHz. Parmi ces espèces, le marsouin présente la plus grande sensibilité auditive, puisqu'il est capable de percevoir des sons inférieurs à 50 dB re 1 µPa.

Tableau 16. Sensibilité auditive des espèces de mammifères marins présentes en baie de Seine (d'après Southall *et al.*, 2019).

Espèce	Groupe d'audition	Plage d'audition	Sensibilité maximum
Phoque gris	Phocidés dans l'eau (PCW)	100 Hz-100 kHz	<60 dB re 1 μ Pa entre 2 et 30 kHz
Phoque veau marin			
Marsouin commun	Cétacés très haute fréquence (VHF)	100 Hz-180 kHz	<50 dB re 1 μ Pa autour de 100 kHz
Dauphin commun	Cétacés haute fréquence (HF)	100 Hz-180 kHz	~60 dB re 1 μ Pa entre 10 et 100 kHz
Grand dauphin			
Dauphin bleu et blanc			
Globicéphale noir			

Pour chaque groupe d'audition précédemment cité, des seuils de tolérance au bruit ont été définis en 2007 (Southall *et al.*, 2007) et ont récemment été mis à jour (NMFS, 2018 et Southall *et al.*, 2019). Ces seuils intègrent les dernières connaissances scientifiques en matière de bioacoustique et sont considérés aujourd'hui comme les plus robustes pour évaluer l'effet du bruit sur les mammifères marins. Ce sont donc ces seuils qui ont été retenus ici.

Ces seuils permettent d'établir à partir de quel niveau de bruit un mammifère marin, en fonction de sa sensibilité auditive, est susceptible de subir une perte d'audition temporaire (TTS) ou permanente (PTS). Ils sont déclinés selon le type de bruit considéré : impulsionnel ou continu (tableaux 17 et 18). En effet, dans le cas d'une exposition à un son continu, il est important de prendre en compte la durée d'émission de ce son. De ce fait, les indicateurs TTS et PTS pour un son continu sont exprimés en SEL cumulé sur 24 heures (SEL_{24h}). Ces indicateurs sont pondérés (leurs calculs intègrent la fonction de pondération du groupe d'espèce considéré) afin de prendre en compte la sensibilité auditive des mammifères marins. Les indicateurs TTS et PTS définis pour les sons de nature impulsionnelle sont exprimés en SEL_{24h} pondéré, mais également en SPL_{pk} (Sound Pressure Level zero to peak) non pondéré, ce qui correspond au niveau de bruit reçu par l'animal, indépendamment de sa capacité auditive ; ce niveau est donc différent de celui qui sera effectivement perçu par l'animal.

Tableau 17. Seuils de perte temporaire (TTS) et permanente (PTS) d'audition pour chaque groupe de mammifère marin exposé à un bruit impulsionnel. Les niveaux d'exposition sonore cumulés sur 24 heures (SEL_{24h}) sont exprimés en dB re 1 µPa².s. Les niveaux de pression sonore (SPL_{pk}) sont exprimés en dB re 1 µPa (d'après Southall *et al.*, 2019).

Son impulsionnel	TTS		PTS	
	SEL _{24h} (pondéré)	SPL _{pk} (non pondéré)	SEL _{24h} (pondéré)	SPL _{pk} (non pondéré)
Cétacés haute fréquence (HF)	170	224	185	230
Cétacés très haute fréquence (VHF)	140	196	155	202
Phocidés dans l'eau (PW)	170	212	185	218

Tableau 18. Seuils de perte temporaire (TTS) et permanente (PTS) d'audition pour chaque groupe de mammifère marin exposé à un bruit continu. Les niveaux d'exposition sonore cumulés sur 24 heures (SEL_{24h}) sont exprimés en dB re 1 µPa².s (d'après Southall *et al.*, 2019).

Son continu	TTS	PTS
	SEL _{24h} (pondéré)	SEL _{24h} (pondéré)
Cétacés haute fréquence (HF)	178	198
Cétacés très haute fréquence (VHF)	153	173
Phocidés dans l'eau (PW)	181	201

5.3.2. Sensibilité auditive et seuils de tolérance des poissons et invertébrés présents dans la zone d'étude

Le tableau 19 ci-dessous synthétise les informations disponibles concernant la sensibilité auditive des espèces de poissons présente sur l'aire d'étude.

Parmi les espèces de poissons présentes, certaines sont moins susceptibles d'être sensibles aux ondes sonores. C'est le cas notamment des lamproies, du maquereau, des gobies ou des poissons plats (arnoglosse, barbue, flet, sole, petite sole jaune, plie, limande et turbot) qui ne possèdent pas de vessie natatoire et ne sont donc pas capables de percevoir les variations de pression générées par les ondes sonores. Les poissons cartilagineux (raies et requins) sont également dépourvus de vessie natatoire et réputés moins sensibles au son.

Les autres espèces présentes sur l'aire d'étude possèdent une vessie natatoire, mais, pour certaines d'entre elles, il a été établi que cet organe n'est pas connecté à l'oreille interne et ne joue aucun rôle dans l'audition. C'est le cas pour l'esturgeon d'Europe, et les salmonidés (saumons et truites) notamment.

Tableau 19. Sensibilité auditive des espèces de poissons présentes sur l'aire d'étude éloignée (d'après Anderson & Mann, 2011 ; Davenport, 1999 ; Hawkins & Johnstone, 1978 ; Popper & Hawkins, 2019 ; Sand & Enger, 1973).

Espèce/groupe d'espèces	Groupe d'audition	Plage d'audition	Sensibilité maximum
Arnoglosse lanterne	Poissons dépourvus de vessie natatoire	10-200 Hz	90 dB re 1 µPa entre 100 et 200 Hz
Barbue			
Dragonnet lyre			
Flet d'Europe			
Gobies			
Lamproie fluviatile			
Lamproie marine			
Lançon équille			
Limande			
Maquereau commun			
Plie			
Petite roussette			
Petite vive			
Petite sole jaune			
Raie bouclée			
Sole commune			
Souris de mer			
Turbot			
Bar européen	Poissons avec vessie natatoire non-impliquée dans l'audition	10-300 Hz	100 dB re 1 µPa entre 100 et 200 Hz
Chinchard commun			
Esturgeon d'Europe			
Syngnathe aiguille			
Syngnathe de Duméril			
Saumon Atlantique			
Truite de mer			
Anguille d'Europe	Poissons avec vessie natatoire impliquée dans l'audition	10-500 Hz	70 dB re 1 µPa entre 50 et 400 Hz
Athérine			
Cabillaud			
Dorade grise			
Eperlan			
Epinoche			
Grondin perlon			
Merlan			
Motelle à 5 barbillons			
Mulet porc			
Petit tacaud			
Rouget barbet			
Tacaud commun			
Alose feinte	Poissons avec vessie natatoire connectée à l'oreille interne	10-5000 Hz	< 80 dB re 1 µPa entre 10 et 1000 Hz
Grande alose			
Hareng			
Sprat			

Chez d'autres espèces, la vessie natatoire est située à proximité de l'oreille interne et celle-ci va donc jouer un rôle dans l'audition. C'est le cas par exemple chez les Gadidés (cabillaud, merlan, motelle à 5 barbillons et tacauds). Ces espèces sont de fait plus sensibles aux ondes sonores.

Les Triglidés (grondins) possèdent une vessie natatoire très développée qui leur permet notamment de produire des sons caractéristiques. Il est probable que cette vessie joue également un rôle dans l'audition de ces espèces.

Enfin, parmi les espèces présentes sur l'aire d'étude, certaines possèdent des adaptations morphologiques (os, bulles de gaz) qui leur permettent d'utiliser leur vessie natatoire comme un organe auditif. C'est le cas par exemple pour les Clupéidés, sprat, hareng et aloses, présents sur la zone d'étude. Pour ces dernières, les individus seraient capables de percevoir les sons jusqu'à 180 kHz (Mann *et al.*, 2001).

Pour un certain nombre d'espèces de poissons présentes sur la zone d'étude, il n'existe pas à l'heure actuelle suffisamment d'informations permettant de connaître leur sensibilité auditive et de les catégoriser (athérine, éperlan, épinoche, rouget notamment). Par principe de précaution, nous considérons que ces espèces pourvues de vessie natatoire mais ne présentant *a priori* aucune adaptation morphologique particulière (os ou bulle de gaz) appartiennent au groupe des poissons dont la vessie natatoire joue un rôle dans l'audition.

Des seuils de tolérance au bruit (seuils TTS) ont été proposés ces dernières années pour les poissons (tableau 20). Cependant, ces seuils sont à prendre avec précaution dans la mesure où ils se basent sur des études menées en laboratoire et/ou en milieu confiné et dont les résultats ne reflètent pas forcément la réalité (Popper & Hawkins, 2019). En l'absence de données plus adaptées, ces seuils ont été retenus pour la présente étude.

Aucun cas de PTS n'a, à l'heure actuelle, été rapporté chez les poissons et aucun seuil PTS n'a été proposé pour le moment. Le tableau 20 présente également, à titre indicatif, des seuils de mortalité ou de blessure potentiellement mortelle.

Tableau 20. Seuils de perte temporaire (TTS) d'audition pour chaque groupe de poissons exposé à un bruit impulsionnel de type déroctage ou à un bruit continu. Les niveaux d'exposition sonore cumulés (SEL_{cum}) sont exprimés en dB re 1 µPa²s⁻¹. Les niveaux de pression sonore (SPL_{pk} et SPL RMS) sont exprimés en dB re 1 µPa (d'après Popper & Hawkins, 2019).

Groupe d'audition	Bruit impulsionnel (Type déroctage)		Bruit continu (Type dragage)	
	TTS	Mortalité/ Blessure mortelle	TTS	Mortalité/ Blessure mortelle
Poissons dépourvus de vessie natatoire	>>186 dB SEL _{cum}	>219 dB SEL _{cum} >213 dB SPL _{pk}	Risque faible à modéré	Risque faible
Poissons avec vessie natatoire non-impliquée dans l'audition	>186 dB SEL _{cum}	210 dB SEL _{cum} >207 dB SPL _{pk}	Risque faible à modéré	Risque faible
Poissons avec vessie natatoire impliquée dans l'audition	186 dB SEL _{cum}	207 dB SEL _{cum} >207 dB SPL _{pk}	158 dB SPL RMS pour 12 h	Risque faible
Poissons avec vessie natatoire connectée à l'oreille interne	186 dB SEL _{cum}	>219 dB SEL _{cum} >213 dB SPL _{pk}	158 dB SPL RMS pour 12 h	Risque faible

Il existe très peu d'information concernant la sensibilité auditive des invertébrés. Les mollusques bivalves seraient capables de percevoir les sons basse fréquence (<1 kHz) de l'ordre de 120 dB re 1 µPa (Charifi *et al.*, 2017), mais ces résultats demandent à être étayés par d'autres études.

L'audition des céphalopodes est plus documentée. Ces mollusques sont capables de percevoir les sons basse fréquence (50-1500 Hz) à des niveaux de l'ordre de 120-130 dB re 1 µPa également (Kaifu *et al.*, 2008 ; Mooney *et al.*, 2012).

La sensibilité auditive des crustacés est comparable à celle des céphalopodes. Certaines espèces de crevettes seraient toutefois capables de percevoir les sons jusqu'à 3000 Hz (Edmonds *et al.*, 2016).

La sensibilité auditive des invertébrés présents sur l'aire d'étude est résumée dans le tableau 21 ci-dessous.

Tableau 21. Sensibilité auditive des invertébrés présents sur l'aire d'étude (d'après Charifi *et al.*, 2017 ; Kaifu *et al.*, 2008 ; Edmonds *et al.*, 2016 ; Mooney *et al.*, 2012).

	Espèce/groupe d'espèces	Plage d'audition	Sensibilité maximum
Céphalopodes	Encornet commun	50-1500 Hz	125-130 dB re 1 µPa autour de 600 Hz
	Petit calmar		
	Seiche commune		
	Sépioles		
Bivalves	Coquille Saint-Jacques	10-1000 Hz	~120 dB re 1 µPa pour les fréquences < 200 Hz
Crustacés	Araignée de mer	50-3000 Hz	< 110 dB re 1 µPa entre 100 et 300 Hz
	Crevette grise		
	Étrille nca		

Il n'existe pas de seuil de tolérance au bruit établis pour les invertébrés marins à l'heure actuelle. Pour cette étude, considérant leur affinité pour les basses fréquences et l'absence de cavité gazeuse chez ces espèces, nous avons appliqués aux invertébrés les seuils de tolérance définis **pour les poissons dépourvus de vessie natatoire**.

5.3.3. Evaluation de la sensibilité des espèces présentes au bruit généré par les travaux d'aménagement

5.3.3.1. Mammifères marins

La sensibilité des espèces de mammifères marins présentes en baie de Seine est évaluée selon plusieurs critères :

- La présence de l'espèce sur la zone d'étude (permanente, saisonnière, occasionnelle ou rare) ;
- L'importance de la zone d'étude pour l'espèce considérée (zone de frayère ou nourricerie, zone de passage, *etc.*) ;
- La sensibilité auditive de l'espèce ;
- Son statut de conservation (état des populations et valeur patrimoniale).

Les résultats sont présentés dans le tableau 22 ci-dessous.

Tableau 22. Sensibilité des espèces de mammifères marins potentiellement présentes sur l'aire d'étude éloignée.

Espèce	Présence	Importance de la zone d'étude	Sensibilité auditive	Statut de conservation	Sensibilité
Phoque gris	Permanente	Forte	Moyenne	IUCN France : quasi-menacé Protection nationale, européenne (Annexes II et V DHFF) et internationale	Forte
Phoque veau marin	Permanente	Forte	Moyenne	IUCN France : quasi-menacé Protection nationale, européenne (Annexes II et V DHFF) et internationale	Forte
Marsouin commun	Permanente	Forte	Importante : Large bande et seuil d'audition très bas	IUCN France : quasi-menacé Protection nationale, européenne (Annexes II et IV DHFF, Annexe A CITES) et internationale	Forte
Dauphin commun	Occasionnelle	Faible	Moyenne	IUCN France : peu préoccupant Protection nationale, européenne (Annexe IV DHFF, Annexe A CITES) et internationale	Faible
Grand dauphin	Occasionnelle	Faible	Importante : Large bande et seuil d'audition bas	IUCN France : quasi-menacé Protection nationale, européenne (Annexes II et IV DHFF, Annexe A CITES) et internationale	Faible
Dauphin bleu et blanc	Occasionnelle	Faible	Importante : Large bande et seuil d'audition bas	IUCN France : peu préoccupant Protection nationale, européenne (Annexe IV DHFF) et internationale	Faible
Globicéphale noir	Occasionnelle et saisonnière	Faible	Moyenne	IUCN France : peu préoccupant Protection nationale, européenne (Annexe IV DHFF) et internationale	Faible



5.3.3.2. Poissons et invertébrés marins

Pour les poissons et les invertébrés, les critères suivants ont été pris en compte :

- L'abondance potentielle de l'espèce sur l'aire d'étude éloignée (importante, moyenne, faible, nulle ou négligeable), en fonction des débarquements dans les ports alentours ;
- L'importance de la zone d'étude pour l'espèce (frayère, nourricerie, voie de migration ou zone de transit) ;
- La valeur économique de l'espèce (importante, moyenne, faible, nulle) ;
- La sensibilité auditive de l'espèce (importante, moyenne, faible ou très faible) ;
- Le statut de conservation (état des populations et éventuel statut de protection).

La sensibilité est relativement difficile à évaluer pour ces espèces dans la mesure où il est difficile d'évaluer précisément leur abondance sur l'aire d'étude, la fréquentation et l'importance de l'aire d'étude pour ces espèces. Les informations liées à la pêche ou aux suivis halieutiques ne permettent pas de savoir précisément où l'espèce a été pêchée. Les critères choisis sont donc différents de ceux définis pour les mammifères marins et les tortues, dont les observations sont assez précisément cartographiées et quantitativement évaluées. De fait, les critères définis pour les poissons et invertébrés marins sont plus subjectifs et ont pour objectif de quantifier de façon relative la présence d'une espèce dans l'aire d'étude et son importance économique.

Les résultats sont présentés dans les tableaux 23 et 24 ci-dessous, uniquement pour les espèces à enjeux (espèces d'intérêt commercial, espèces abondantes sur la zone d'étude et espèces présentant une sensibilité auditive élevée).

Tableau 23. Sensibilité des espèces de poissons marins potentiellement présents sur l'aire d'étude éloignée.

Espèce	Abondance	Importance de la zone	Valeur économique	Sensibilité auditive	Statut de conservation	Sensibilité
ESPECES MARINES						
Bar européen	Forte	Forte	Forte	Moyenne	IUCN Europe : peu préoccupant Espèce non réglementée	Moyenne
Hareng	Moyenne	Forte	Moyenne	Forte	IUCN Europe : peu préoccupant Espèce non réglementée	Moyenne
Merlan	Forte	Forte	Faible	Moyenne	IUCN Europe : peu préoccupant Espèce non réglementée	Faible
Plie d'Europe	Forte	Forte	Forte	Très faible	IUCN Europe : peu préoccupant Espèce non réglementée	Faible
Tacaud commun	Forte	Forte	Faible	Moyenne	IUCN Europe : peu préoccupant Espèce non réglementée	Faible
Sole commune	Forte	Forte	Forte	Très faible	IUCN Europe : peu préoccupant Espèce non réglementée	Faible
Grondin perlon	Moyenne	Forte	Moyenne	Moyenne	IUCN Europe : peu préoccupant Espèce non réglementée	Faible
Raie bouclée	Moyenne	Forte	Moyenne	Très faible	IUCN France : vulnérable Réglementation internationale	Faible
Sprat	Moyenne	Forte	Faible	Forte	IUCN Europe : peu préoccupant Espèce non réglementée	Faible
Turbot	Moyenne	Forte	Moyenne	Très faible	IUCN Europe : vulnérable Espèce non réglementée	Faible



Espèce	Abondance	Importance de la zone	Valeur économique	Sensibilité auditive	Statut de conservation	Sensibilité
Dragonnet lyre	Forte	Forte	Nulle	Très faible	IUCN Europe : peu préoccupant Espèce non réglementée	Faible
Limande commune	Forte	Forte	Moyenne	Très faible	IUCN Europe : peu préoccupant Espèce non réglementée	Faible
Petite sole jaune	Forte	Forte	Faible	Très faible	IUCN Europe : peu préoccupant Espèce non réglementée	Faible
Barbue	Moyenne	Forte	Faible	Très faible	IUCN Europe : peu préoccupant Espèce non réglementée	Faible
Dorade grise	Moyenne	Forte	Moyenne	Moyenne	IUCN Europe : peu préoccupant Espèce non réglementée	Faible
Maquereau commun	Moyenne	Faible	Moyenne	Très faible	IUCN Europe : peu préoccupant Espèce non réglementée	Faible
Motelle à 5 barbillons	Moyenne	Forte	Nulle	Moyenne	IUCN Europe : peu préoccupant Espèce non réglementée	Faible
Petite roussette	Moyenne	Faible	Faible	Très faible	IUCN France : peu préoccupant Espèce non réglementée	Négligeable
ESPECES ESTUARIENNES						
Gobies	Forte	Forte	Nulle	Faible	IUCN France : données insuffisantes Réglementation internationale (en fonction des espèces)	Faible
Epinoche	Moyenne	Forte	Nulle	Moyenne	IUCN Région Haute-Normandie : données insuffisantes Espèce non réglementée	Faible



Espèce	Abondance	Importance de la zone	Valeur économique	Sensibilité auditive	Statut de conservation	Sensibilité
ESPECES AMPHIHALINES						
Grande alose	Faible	Moyenne	Faible	Forte	IUCN Région Haute-Normandie : en danger Espèce réglementée	Moyenne
Alose feinte	Anecdotique	Moyenne	Faible	Forte	IUCN Région Haute-Normandie : en danger critique Espèce réglementée	Moyenne
Flet d'Europe	Moyenne	Forte	Moyenne	Faible	IUCN Région Haute-Normandie : quasi menacée Espèce non règlementée	Faible
Eperlan	Moyenne	Faible	Faible	Moyenne	IUCN Région Haute-Normandie : données insuffisantes Espèce non règlementée	Faible
Mulet porc	Moyenne	Faible	Faible	Moyenne	UCN Région Haute-Normandie : données insuffisantes Espèce non règlementée	Faible



Tableau 24. Sensibilité des espèces d'invertébrés marins potentiellement présents sur l'aire d'étude éloignée.

Espèce	Abondance	Importance de la zone	Valeur économique	Sensibilité auditive	Statut de conservation	Sensibilité
CEPHALOPODES						
Seiche commune	Forte	Forte	Forte	Très faible	IUCN Monde : préoccupation mineure Espèce non réglementée	Faible
Encornet commun	Moyenne	Faible	Faible	Très faible	IUCN Monde : données insuffisantes Espèce non réglementée	Faible
Petit calmar	Moyenne	Faible	Faible	Très faible	IUCN Monde : données insuffisantes Espèce non réglementée	Faible
BIVALVES						
Coquille Saint-Jacques	Forte	Forte	Forte	Très faible	Absence de statut de protection Espèce non réglementée	Faible
CRUSTACES						
Crevette grise	Forte	Forte	Forte	Très faible	Absence de statut de protection Espèce non réglementée	Faible
Etrilles nca	Moyenne	Faible	Faible	Très faible	Absence de statut de protection Espèce non réglementée	Faible



PARTIE B

6. Evaluation des effets sonores associées aux futurs travaux d'aménagement de HAROPA Port Le Havre

6.1. Détermination de scénarios acoustiques représentatifs des différents travaux à réaliser

L'étude proposée est axée sur les travaux de la zone de la future Chatière (figure 67).



Figure 67. Différentes emprises portuaires nécessaires pendant la phase de travaux (source HAROPA Port Le Havre 2022).

Les différentes emprises portuaires référencées de A et F sont définies comme suit (source HAROPA Port Le Havre 2022) :

- **A** : L'ensemble de la zone de la future Chatière, à savoir les emprises de la future digue, du futur chenal, des futures passes d'entrée côté avant-port historique et côté avant-port Port 2000, ainsi que la zone comprise entre le chenal de la Chatière et la digue de la CIM ;
- **B** : Une bande d'accès pour les engins terrestres au chantier (camions...) dans la prolongation ouest des dessertes routières des postes 11 et 12 de Port 2000 (en construction en 2021 lors du dépôt de la présente étude d'impact) ;
- **C** : La surlargeur de Port 2000 d'où des matériaux graveleux seront extraits par dragages et réutilisés pour le soubassement de la Chatière sur la zone A ;
- **D** : La zone Sud D1 d'où des matériaux graveleux mis à terre pendant les différentes phases de Port 2000 pourront être extraits si nécessaire au mouvement de terre global ;

- **E** : La zone pour la base-vie de l'entreprise (utilisation uniquement de la zone déjà imperméabilisée pour de précédents chantiers) ;
- **F** : L'ancien bassin aux pétroles qui sera utilisé pour valoriser les matériaux de dragage non immergeables sur le site d'Octeville ;
- **Site de clapage d'Octeville** : le site de clapage au large d'Octeville, utilisé pour les dragages d'entretien de HAROPA Port Le Havre, sera utilisé pour l'immersion en mer des matériaux de dragage non valorisables du chantier.

Dans ce contexte, NEREIS Environnement a suivi le phasage présenté par HAROPA Port Le Havre associé aux différents travaux. La chronologie est de ce fait proposée en suivant les différentes étapes de travaux d'aménagement :

- La phase 1 du projet repose sur la détection et le dégagement d'engins pyrotechniques type bombes ou munitions diverses de la seconde guerre mondiale notamment. En ce sens un navire type vedette de plaisance adaptée sera en charge de tracter un sonar pour réaliser des transects afin de localiser d'éventuelles cibles. Cette phase 1 du projet constitue le scénario acoustique 1 des travaux ;
- La phase 2 du projet consiste à la réalisation du soubassement d'aménagement de la Chatière par des opérations de dragage. Cette phase 2 du projet constitue le scénario acoustique 2 des travaux ;
- La phase 3 du projet consiste au dragage dans le port historique et à la construction de la digue primaire. Cette phase 3 du projet constitue le scénario acoustique 3 des travaux ;
- La phase 4 du projet consiste à la construction de la digue de la Chatière avec 2 fronts d'avancement. Cette phase 4 du projet constitue le scénario acoustique 4 des travaux ;
- La phase 5 du projet consiste à l'ouverture des digues existantes et aux différents raccordements maritimes. Cette phase 5 du projet constitue le scénario acoustique 5 des travaux ;
- La phase 6 du projet consiste au démontage de la digue provisoire et au dragage du nouveau chenal constitué de la Chatière. Cette phase 6 du projet constitue le scénario acoustique 6 des travaux.

6.2. Mise en évidence des sources sonores associées aux différents travaux

Pour chacun des scénarios acoustiques établis, des gabarits acoustiques associés aux différents travaux référencés ont été déterminés. La modélisation acoustique qui découle de ces scénarios prend donc en considération les gabarits acoustiques des



différents ateliers, le temps de fonctionnement associé et la cinématique (déplacement) dans le cas d'un atelier mobile.

6.2.1. Scénario acoustique 1 : Travaux de détection et de dégagement pyrotechnique

Préalablement aux travaux une campagne maritime de détection et de localisation d'engins pyrotechnique datant de la seconde guerre mondiale sera réalisée. A ce titre un navire effectuera des transects en tractant un sonar afin de cartographier le fond marin sur la zone d'étude et positionner toute détection d'anomalies magnétiques (figure 68).

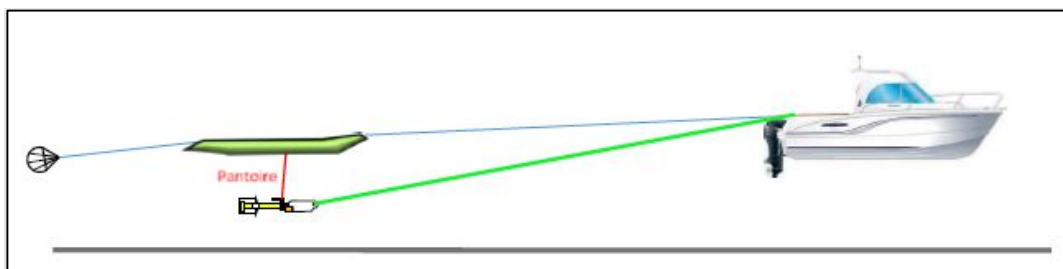


Figure 68. Principe de détection maritime d'engin pyrotechnique par sonar remorqué (source HAROPA Port Le Havre 2022).

Le gabarit acoustique associé à ces travaux est un navire type Hyphos ou Léopard (figure 69).

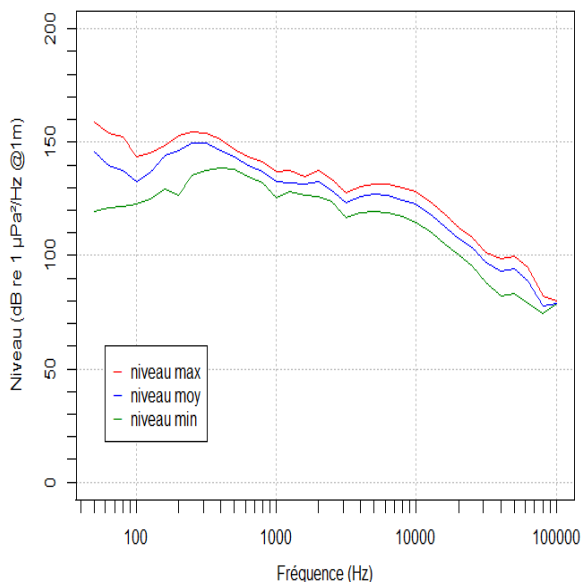


Figure 69. Spectre acoustique associé au navire technique Léopard (source NEREIS campagne de mesures acoustique HAROPA Port Le Havre 2020).

6.2.2. Scénario acoustique 2 : Réalisation du soubassement de la future digue Chatière

La réalisation d'un soubassement (figure 70) sera effectuée par des moyens nautiques en utilisant au maximum les ressources disponibles sur les sites des futurs sites (enceinte zone A, surlargeur nord de Port 2000, surlargeur de Port 2000 – zone C et zone D par moyens terrestres.

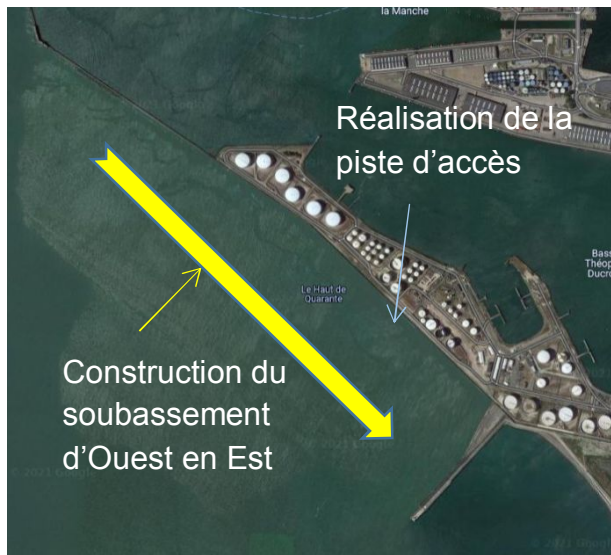


Figure 70. Schéma d'emprise maritime des travaux d'aménagement – phase 2 (source HAROPA Port Le Havre 2022).

Les moyens nautiques retenus pour la partie maritime sont des dragues aspiratrices, des barges, des dragues à godets et des chalands. Trois types d'engins peuvent être utilisés pour exécuter ces travaux (source HAROPA Port Le Havre 2022) :

- Des dragues aspiratrices stationnaires refoulant généralement les mixtures dans des enceintes closes, avec retour des eaux au milieu (bassins portuaires) voire dans des chalands ;
- Des dragues aspiratrices en marche utilisées, soit pour effectuer également des refoulements de mixtures dans des enceintes closes, soit pour immerger les matériaux en mer ;
- Des dragues mécaniques de type "dipper" chargeant les matériaux dans des chalands, les chalands déversant ensuite les matériaux pour la constitution du soubassement de digue par exemple.

Dans ce contexte les gabarits acoustiques retenus pour la modélisation sont pour la partie maritime associés à :

- Une drague mixte type Gambe d'Amfard qui a été enregistrée précédemment en opération à la sortie de l'avant-port de HAROPA Port Le Havre (figure 71) ;

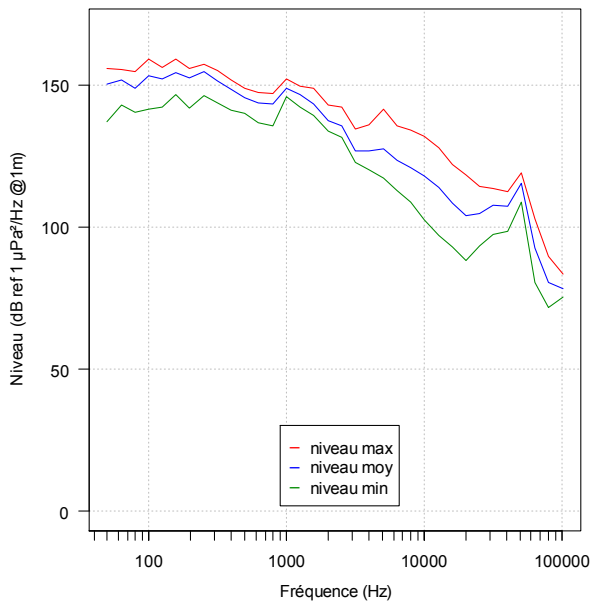


Figure 71. Spectres acoustiques associés à la drague mixte Gambe d'Amfard en opération de dragage (source NEREIS campagne de mesures acoustique HAROPA Port Le Havre 2020).

- Une drague type drague aspiratrice en marche type Samuel de Champlain (figure 72) ;

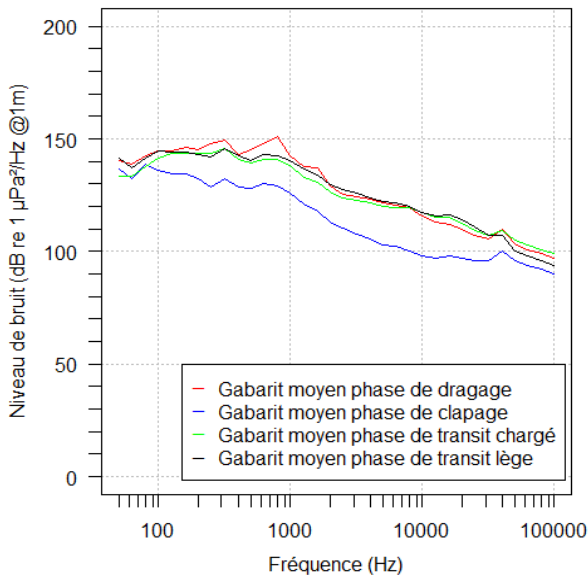


Figure 72. Spectres acoustiques associés à la drague TSHD Samuel de Champlain en opération de dragage (source NEREIS 2020).

- Une drague type CSD Dragon sur ponton (figure 73).



Figure 73. Drague CSD DRAGON en opération de dragage (source NEREIS 2020).

La drague DRAGON est une drague de type CSD (Cutter Suction Dredger) stationnaire car le dispositif de pompage du sable par désagrégation est positionné sur un ponton équipé de deux pieux qui s'enfichent dans le substrat. A l'instar d'un ponton dipper pour le déroctage, le déplacement du ponton s'effectue par « papillonnage ».

Deux situations de fonctionnement de la drague DRAGON ont été observées : le dragage et le rinçage. Le rinçage consiste notamment en une mise en pression de la canalisation de refoulement du mélange eau de mer et sédiment. Cette canalisation est fixée à l'extrémité arrière de la drague. Cette phase de rinçage débute par une montée en régime de fonctionnement du dispositif de pompage.

La figure 74 présente une synthèse des gabarits acoustiques associés à cette drague, en fonction des situations d'exploitation.

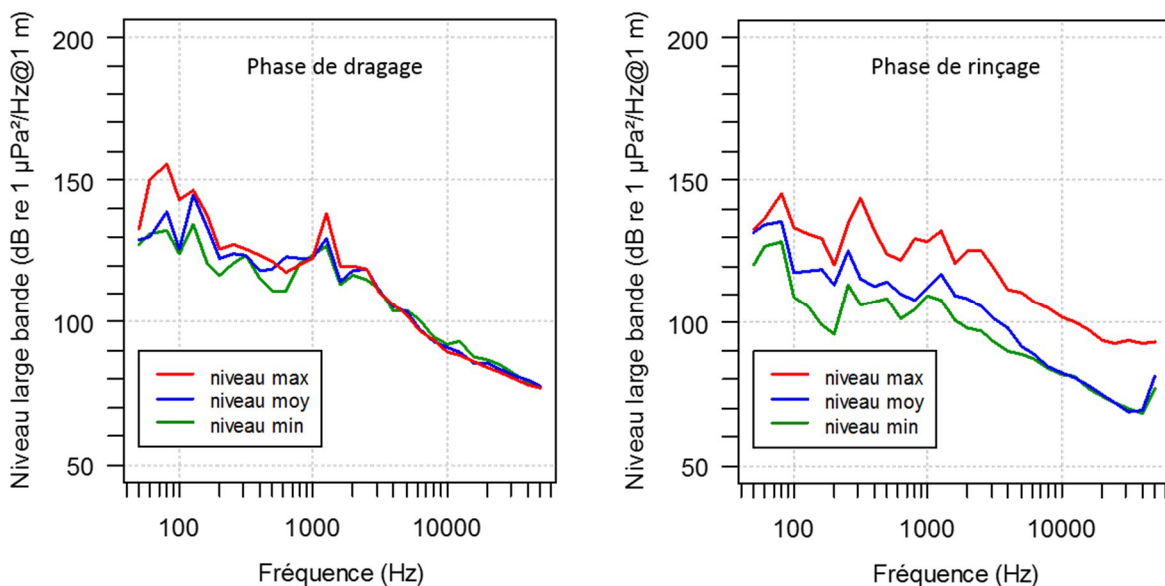


Figure 74. Spectres acoustique d'une drague CSD sur barge en fonction de sa configuration de fonctionnement (source NEREIS Environnement).

6.2.3. Scénario acoustique 3 : Dragage dans le port historique et construction de la digue provisoire

Une phase de dragage sera réalisée dans le port historique avant la phase d'ouverture de la digue. En parallèle une digue provisoire sera construite à l'abri du soubassement (figure 75).

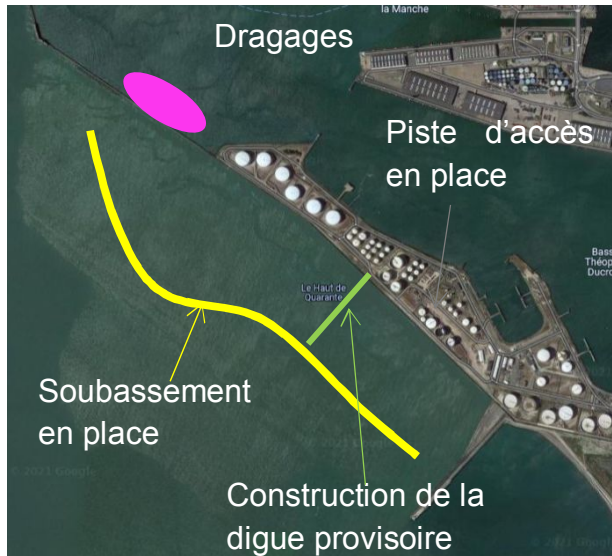


Figure 75. Schéma d'emprise maritime des travaux d'aménagement – phase 3 (source HAROPA Port Le Havre 2022)

Suite à la réalisation d'un soubassement par les moyens nautiques décrits dans le scénario 2, la construction de la digue provisoire sera réalisée par voie terrestre avec des camions bennes et des pelles mécaniques. Des blocs d'enrochements naturels et artificiels seront déposés toujours par moyens terrestres au fur et à mesure de l'avancement des travaux.

Des gabarits associés à ces opérations sont proposés suite à des enregistrements réalisés par NEREIS lors de suivis acoustiques de chantiers maritimes et terrestres (figure 76).

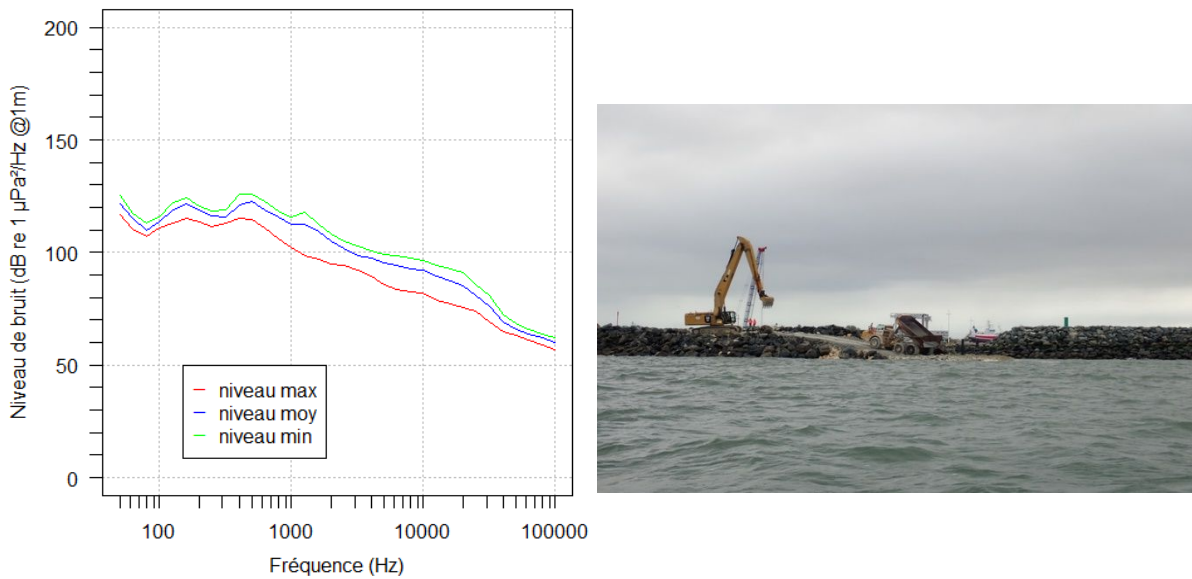
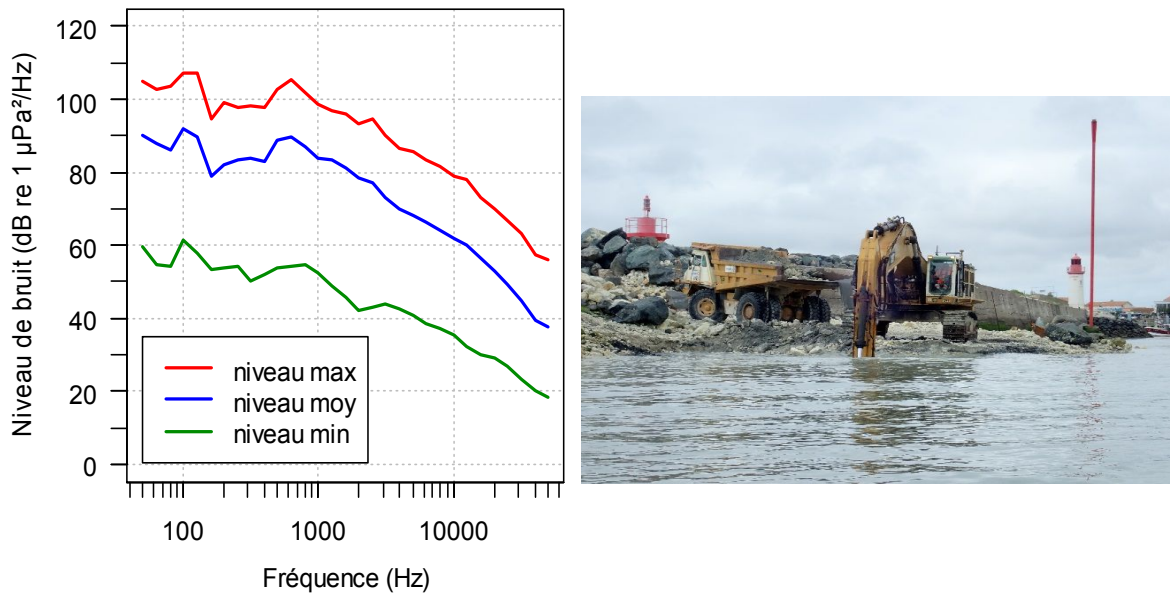


Figure 76. Spectres acoustiques associés à une opération de dépôt de matériaux graveleux par un engin de chantier terrestre type Tombereau (source NEREIS Environnement 2019-2020).

Le chantier de terrassement de la digue provisoire est situé en bordure directe du chenal d'accès au port. Des mesures en acoustique sous-marine sur un chantier de terrassement d'une digue portuaire ont été réalisées par NEREIS Environnement (2019-2020) à une distance de 76 mètres au plus près du chantier (avec un niveau mesuré au maximum à 129,8 dB peak re 1µPa). Le niveau d'émission maximal associé à cette opération est estimé à 161,7 dB peak re 1µPa @1m (figure 77).



Le tableau 25 suivant présente une synthèse spectrale des opérations de terrassement observées sur un chantier portuaire (source NEREIS Environnement 2019).

Tableau 25. Synthèse des sources sonores liées aux opérations de déroctage.

Source	Plage de fréquence	Fréquences prédominantes	Durée d'impulsion observée	Niveau d'émission max large bande
Terrassement de la digue (NEREIS Environnement 2019)	50 Hz et 2000 Hz	300 Hz	Variable 1,3 s et 4 s	161,7 dB re 1µPa@1m

6.2.4. Scénario 4 : Construction de la digue de la Chatière avec 2 fronts d'avancement

Ce scénario met en œuvre la phase de construction de la digue de la Chatière sur 2 fronts via des engins terrestres (figure 78).

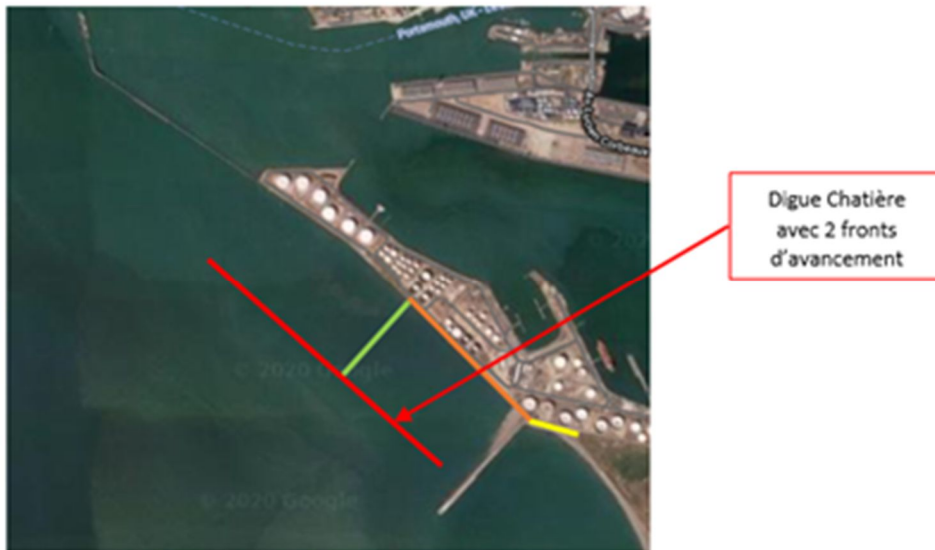


Figure 78. Schéma d'emprise maritime des travaux d'aménagement – phase 4 (source HAROPA Port Le Havre 2022).

Ces opérations de construction mettent en œuvre des moyens techniques de construction terrestre proches de ceux du scénario 3. Le soubassement a été créé lors de la phase 2 (scénario acoustique 2). Le noyau est mis en place par voie terrestre avec le dépôt de matériaux graveleux disponibles sur le site et potentiellement de matériau de carrière. Des blocs d'enrochements naturels ou artificiels seront déposés par moyens terrestre au fur et à mesure de l'avancement du corps de la digue. Les gabarits acoustiques proposés associés aux travaux sont ceux utilisés dans les scénarios 3. Ces travaux sont considérés d'un point de vue acoustique comme proches.

6.2.5. Scénarios 5 et 5bis : Ouverture des digues existantes et raccordements

L'ouverture de la digue sud du port historique sera réalisée essentiellement par moyens nautiques (pelles et engins mécanique sur barge). Les travaux consisteront en une démolition séquentielle des superstructures en maçonnerie puis à une dépose des blocs béton et des matériaux constituant la structure de la digue (figure 79). Les produits seront évacués par moyens nautiques et déchargés à terre au droit des zones mises à disposition. L'ouverture de la digue nord de Port 2000 sera réalisée par moyens nautiques et terrestres (les pelles et engins mécaniques éventuellement sur barge).

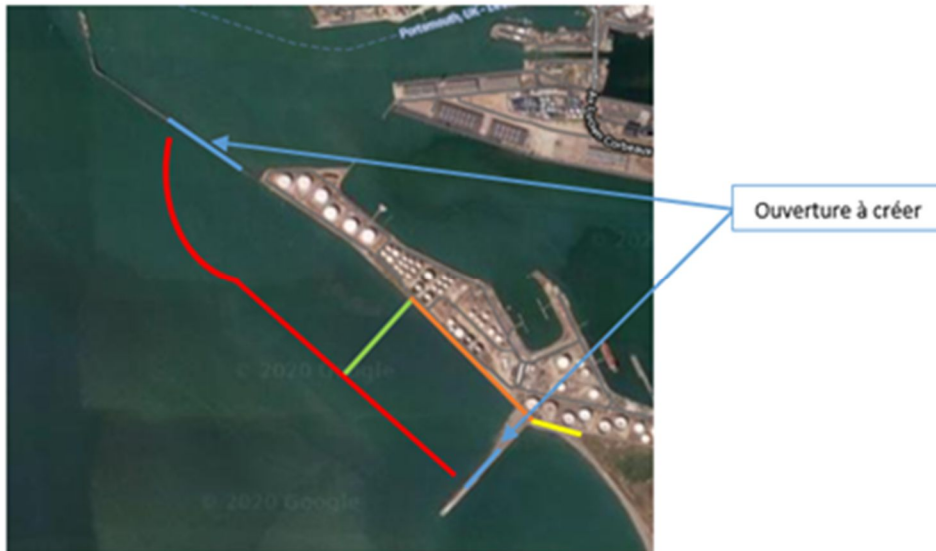


Figure 79. Schéma d'emprise maritime des travaux d'aménagement – phase 5 (source HAROPA Port Le Havre 2022).

Des mesures en dérive ont été réalisées par NEREIS Environnement sur un chantier portuaire lors d'opérations de déroctage terrestre et maritime. Ces mesures ont permis d'identifier la contribution au bruit ambiant sous-marin de ces ateliers.

La particularité du chantier maritime est l'utilisation d'un ponton dipper type DRAGAMAR. Le positionnement du ponton est optimisé par 3 pieux qui garantissent la stabilité du ponton lors des opérations de déroctage

Les caractéristiques techniques de ce ponton sont présentées dans le tableau 26:

Tableau 26. Caractéristiques techniques principales du ponton dipper type DRAGAMAR.

Longueur totale	39,76 mètres
Largeur	11,50 mètres
Tirant d'eau	2,80 mètres
Outils de déroctage	Liebherr P9150 de 120 tonnes - 565 KW – flèche de 14 mètres
Profondeur maximale d'intervention	Entre 14 et 17 mètres

Les opérations de déroctage maritime ont été réalisées par une pelleteuse embarquée sur le ponton dipper et équipée d'une dent de déroctage

Deux signatures acoustiques sont observées en phase de déroctage. Celles-ci sont liées :

- Au contact de la dent de déroctage avec le substrat rocheux ;
- Aux manœuvres de déplacement du ponton dipper qui engendrent une remontée des 3 pieux du ponton.

Le déplacement du ponton dipper oblige la barge à relever les 3 pieux puis à se positionner en utilisant la dent de déroctage. Une fois que la barge a atteint la position requise, celle-ci repose les 3 pieux sur le fond. Cette opération génère un bruit large bande lié aux auxiliaires et treuils utilisés pour les opérations de relevage et dépose des pieux. L'analyse spectrale met en évidence des niveaux de bruit estimés à 1 m à 128,2 dB re $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ et à 132 dB re $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ dans les bandes de tiers d'octave centrées à 630 Hz et 1250 Hz (figure 80).

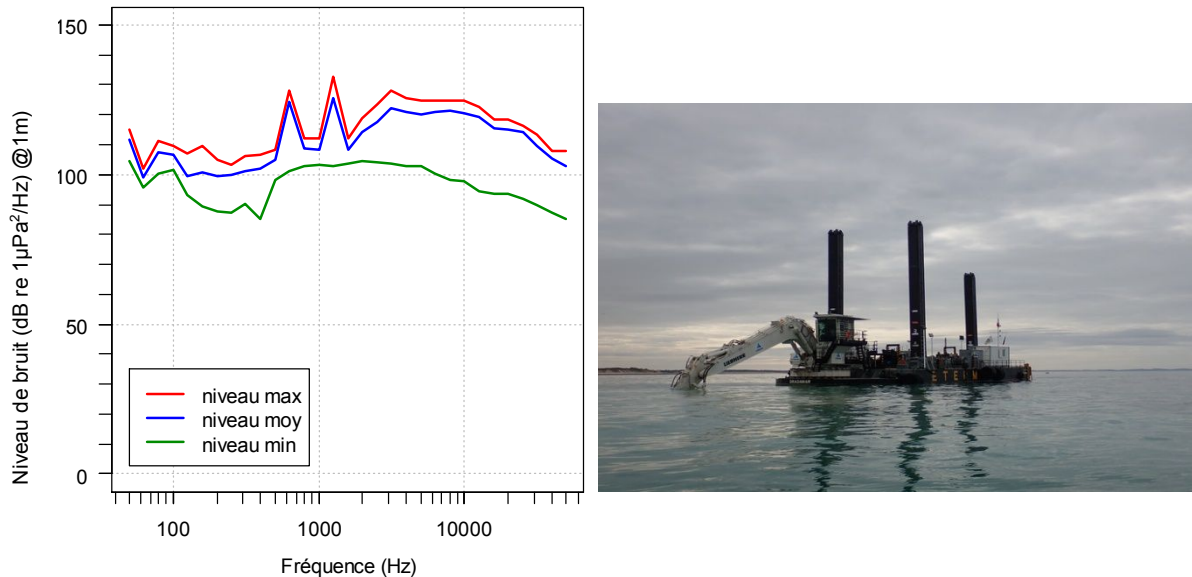


Figure 80. Spectres acoustiques liés au déplacement du ponton dipper. Gabarits estimés @1m (à gauche), photo du ponton en phase de déplacement (à droite) (source NEREIS Environnement 2019-2020).

Le niveau d'émission lié à l'opération de déplacement avec le ponton dipper est estimé au maximum à 154,2 dB re $1\mu\text{Pa}$ @1m.

Le niveau maximum mesuré pour une opération de déroctage en mer est de 147,7 dB re $1\mu\text{Pa}$, à une distance de 76 mètres du ponton. Nous avons choisi de retenir ce spectre compte tenu de la faible distance entre l'enregistreur et la source de bruit (émergences acoustique et spectrale favorables). Le niveau d'émission maximal estimé pour les opérations de déroctage en mer est de 170,3 dB re $1\mu\text{Pa}$ @1m (figure 81). Les durées d'émission liées aux opérations de déroctage sont très variables, entre 235 ms et 938 ms, et très couramment observées en série d'émissions successives.

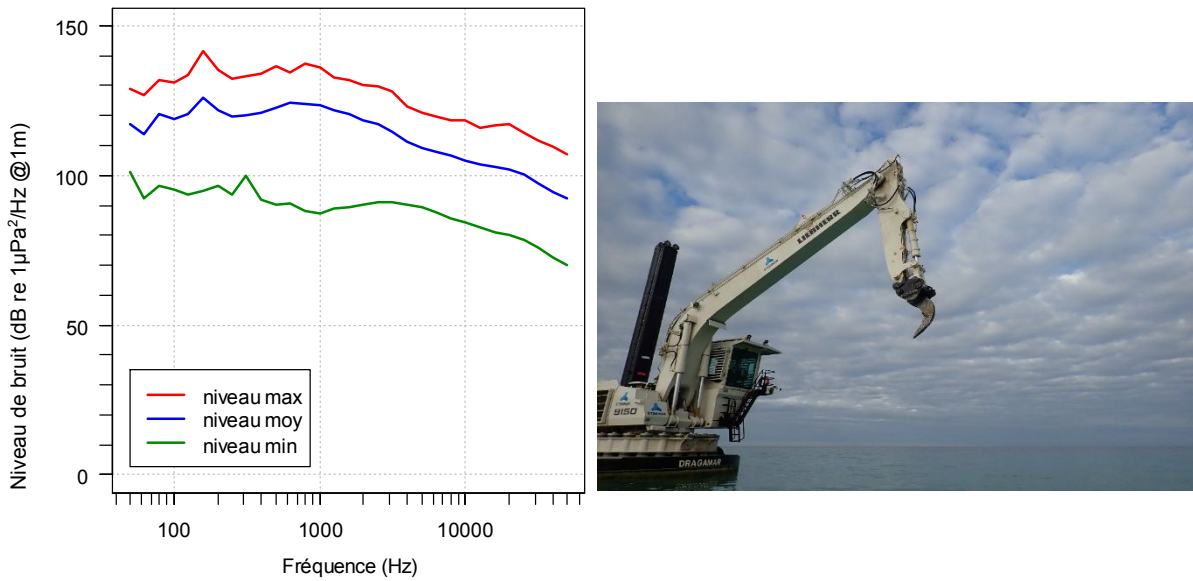


Figure 81. Spectres acoustiques liés au déroctage en mer par niveaux minimums, moyens et maximums (à gauche) (source NEREIS Environnement).

Les opérations de déroctage terrestre ont été monitorées en mer au droit des pelleteuses et dents de déroctage en opération (figure 82).

Les chocs générés par la dent sur la roche génèrent un niveau mesuré au maximum à 132,9 dB peak re 1 µPa à une distance de 100 mètres du chantier. Ramené à 1 m, une estimation du niveau d'émission maximal lié à cette opération est de 165,2 dB peak re 1 µPa @1m (tableau 27).

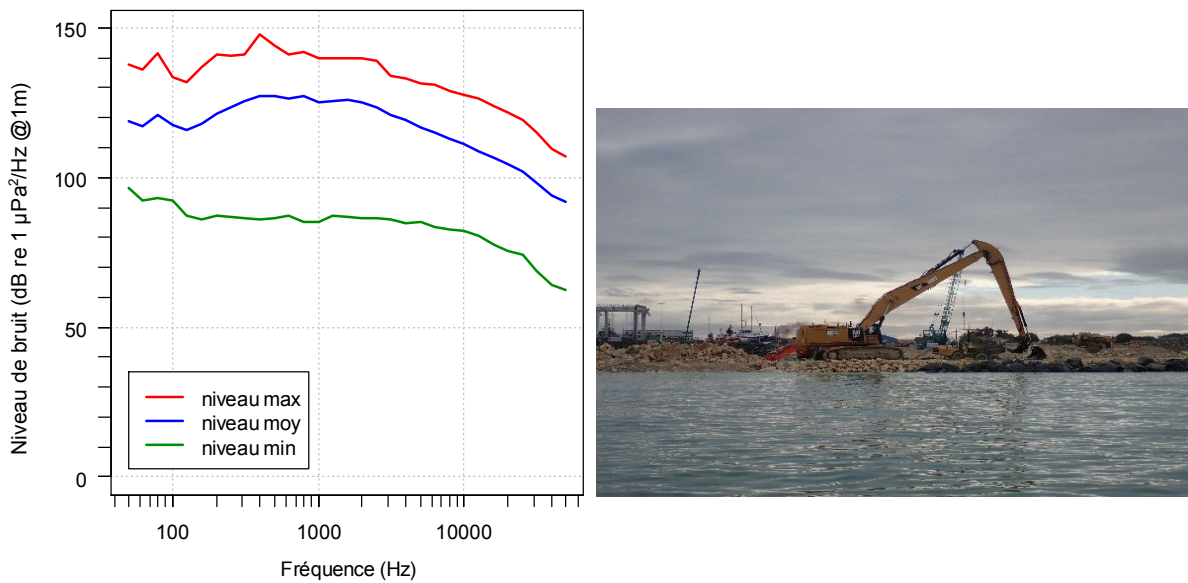


Figure 82. Spectres acoustiques liés au déroctage à terre par niveaux minimums, moyens et maximums (à gauche) (source NEREIS Environnement).

Tableau 27. Synthèse des sources sonores liées aux opérations de déroctage.

Source	Plage de fréquence (en Hz)	Fréquences prédominantes	Durée d'impulsion observée (en s)	Niveau d'émission max large bande
Déroctage en mer	100 Hz - 5200 Hz	100 Hz - 1100 Hz	Variables observées entre à 0,235 s et 1,350 s	170,3 dB re 1µPa@1m
Déroctage terrestre	50 Hz - 1850 Hz	400 Hz	Variables entre 0,4 s et 0,9 s	165,2 dB re 1µPa@1m
Déplacement de la barge	690 Hz - 20,7 kHz ou 1160 Hz - 46,4 kHz	690 Hz - 7590 Hz ou 1160 Hz - 22,04 kHz	Variables, jusqu'à 13 s	154,2 dB re 1µPa@1m

L'utilisation potentielle de BRH (Brise Roche Hydraulique) est considérée dans ce paragraphe avec la proposition d'un gabarit acoustique associé (figure 83).

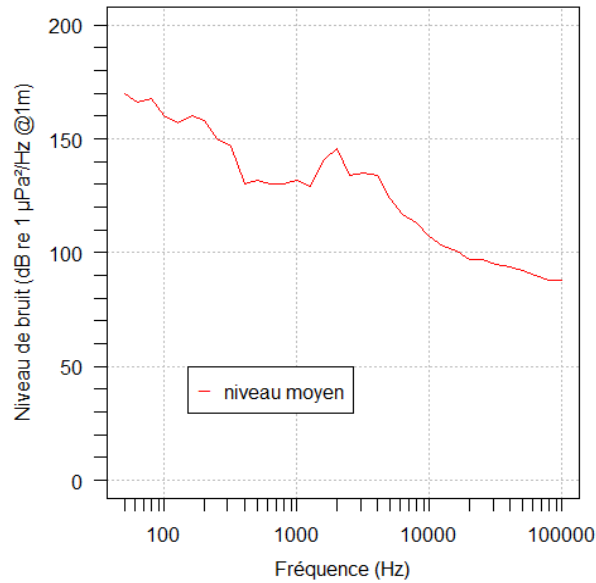


Figure 83. Gabarit moyen estimé associé à une opération de chantier type BRH.

À l'heure actuelle, le niveau de bruit généré par le déroctage par brise-roche hydraulique n'a fait l'objet d'aucune étude publiée. Cependant, ce niveau de bruit serait similaire à celui généré par le battage d'un pieu de petit diamètre (environ 50 cm) par marteau hydraulique, dans la mesure où l'énergie fournie et la cadence de battage des deux types d'engin sont quasiment identiques. Ce niveau serait donc de l'ordre de 200 dB re 1 µPa @ 1 m. Le scénario 5bis proposé est associé à l'usage du BRH.

6.2.6. Scénario 6 : Démontage de la digue provisoire et dragage du chenal

Les infrastructures de renforcement de la digue seront réalisées avant la dépose de la digue provisoire (figure 84). A l'issue les engins de dragage effectueront des opérations de nivellement du chenal. Ce scénario met en œuvre les chantiers terrestres et maritimes décrits dans les paragraphes précédents pour les ateliers de déroctage terrestre et maritime (scénario 5) et les opérations de dragage (scénario 2).



Figure 84. Schéma d'emprise maritime des travaux d'aménagement – phase 6 (source HAROPA Port Le Havre 2022).

Le navire niveleur LE CAUX est proposé en plus dans cette modélisation avec le gabarit acoustique associé suivant (figure 85).

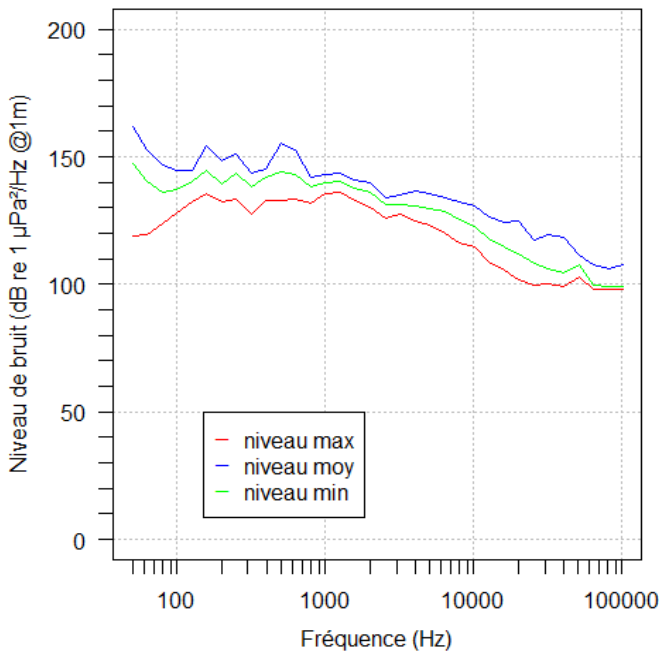


Figure 85. Gabarits associés au navire niveleur LE CAUX (source NEREIS campagne de mesures acoustique HAROPA Port Le Havre 2020).

6.3. Détermination des effets sonores associés aux travaux d'aménagement

L'effet se définit comme la conséquence objective d'un projet ou d'une activité sur son environnement (MEEDM, 2010). Cet effet peut être positif ou négatif, direct ou indirect, temporaire ou permanent, à court, moyen ou long terme. Ici, l'objectif est d'évaluer l'effet des travaux d'aménagement du port sur les espèces marines.

Le degré d'effet varie selon l'espèce considérée et le type d'activité : ces effets pourront être nuls ou négligeables, faibles, moyens ou forts.

Pour évaluer l'effet du bruit sur les espèces d'intérêt halieutique, nous avons considéré l'étendue du périmètre à l'intérieur duquel un individu est susceptible de subir un dommage physiologique (TTS ou PTS, risque de mortalité pour les poissons) afin d'évaluer le niveau d'effet selon la grille présentée dans le tableau 28 ci-dessous. Ce périmètre est défini par la valeur du rayon en mètre qui détermine cette zone à risque auditive autour de la source émettrice.

L'étude est axée sur l'évaluation des effets sonores associés aux travaux d'aménagement portuaire et de ce fait cette étude ne considère pas les effets cumulés associés

Tableau 28. Grille d'évaluation des effets liés aux bruits sous-marins générés par les opérations de travaux d'aménagement.

Effet	Absence de TTS	TTS uniquement	PTS ≤ 500 m ou risque de mortalité ≤ 100 m	PTS > 500m ou risque de mortalité > 100 m
Niveau d'effet	Négligeable	Faible	Moyen	Fort

Cette méthode d'évaluation se base uniquement sur le risque de dommage physiologique encouru. Elle ne prend pas en compte les éventuelles réactions comportementales (fuite, plongée, arrêt des activités, panique, etc.) qui pourraient être liées aux émissions sonores. Des seuils de bruit susceptibles d'engendrer des réactions comportementales ont déjà été proposés dans la littérature (NMFS, 2018 ; Nedwell *et al.*, 2007 ; David, 2011 par exemple), mais ces seuils sont fortement remis en question aujourd'hui (Southall *et al.*, 2019) . Il est en effet très difficile de relier une réaction comportementale à une cause en particulier et une forte variabilité interindividuelle existe (Nowacek *et al.*, 2007). A l'inverse, les pertes d'audition consécutives à une exposition au bruit ont fait l'objet de mesures directes sur plusieurs espèces et les seuils disponibles aujourd'hui dans la littérature font consensus au sein de la communauté scientifique.

La modélisation a été réalisée afin d'estimer, en fonction des données acoustiques disponibles, le bruit perçu en dB SEL pondéré (donc après correction en fonction de

la sensibilité auditive du groupe considéré) ou non pondéré pour chaque espèce précédemment identifiée regroupée par groupe d'audition.

Les cartes acoustiques réalisées présentent donc le niveau de bruit ou d'exposition sonore effectivement perçu en fonction des groupes d'audition des espèces marines (figures 86 à 113). Ces cartes acoustiques sont établies en considérant à tous les points de mesure le niveau maximum quel que soit l'immersion.

La modélisation proposée met en évidence des empreintes sonores maximales étant entendu que les paramètres de modélisation prennent en compte des conditions optimales de propagation acoustique. Ainsi les paramètres environnementaux pris en compte dans les modélisations sont associés à une hauteur d'eau moyenne de l'étalement de pleine mer, en période hivernale avec un état de mer 2. De même les gabarits acoustiques associés aux différents ateliers ainsi que les durées effectives des travaux sont maximums.

Les effets sonores associés aux différents ateliers sont donc maximisés en considérant que les mammifères marins, poissons ou invertébrés marins ciblés restent à proximité immédiate du chantier durant la période effective d'évaluation, ce qui est peu probable du fait d'un comportement non prévisible pour une espèce sauvage.

Les tableaux 29 et 30 présentent une synthèse des effets sonores sur les différentes espèces ciblées. Chacune des espèces ciblées est regroupée par groupe d'audition considéré.

Le scénario 1 est lié aux opérations de dégagement pyrotechnique qui consistent en une recherche et une localisation d'engins pyrotechniques. L'empreinte sonore associée à cette phase de travaux est localisée sur la zone des futurs travaux de terrassement à l'extérieur du port au droit de la construction de la future digue.

Le scénario 2 met en évidence deux ateliers de dragage, à l'intérieur du port historique et à l'extérieur de l'enceinte portuaire, au droit de la future digue. Les empreintes sonores des deux activités de dragage sont distinctes avec la Gambe d'Amfard à l'intérieur du port historique et la Samuel de Champlain à l'extérieur. Le niveau d'émission associé aux opérations de dragage de la Gambe d'Amfard est supérieur à celui de la Samuel de Champlain. De plus, la surface à draguer est plus réduite sur le chantier intérieur par rapport au chantier extérieur, l'énergie acoustique émise est donc concentrée sur une zone plus réduite contrairement à la partie extérieure où celle-ci est répartie sur une plus large zone. Enfin le temps de travail associé aux deux ateliers étant identique, l'empreinte sonore est de ce fait plus importante à l'intérieure d'où un effet sonore potentiellement plus important à l'intérieur qu'à l'extérieur.

Le scénario 3 modélise l'empreinte sonore associée aux opérations de dragage à l'extérieur du port au droit de la future digue de la Chatière. Il s'agit de la Gambe d'Amfard en opération de dragage.

Le scénario 4 est associé à deux chantiers de terrassement de niveau d'émission et de durée d'émission identiques. Les empreintes sonores diffèrent par le fait que l'atelier le plus à l'ouest est dans une zone semi-fermée d'un point de vue géographique et dans une zone de très petits fonds d'où une empreinte sonore plus réduite. A l'opposé le second atelier opère sur une zone plus ouverte d'où une propagation favorisée.

Le scénario 5 met en œuvre deux ateliers de déroctage qui ont pour objectifs d'ouvrir les extrémités du futur chenal de liaison entre l'avant-port historique et l'avant-port Port 2000. Les gabarits acoustiques et les durées d'émission estimés des deux ateliers sont identiques. Les travaux sont situés dans les enceintes portuaires. De ce fait compte tenu de la position des ateliers, l'empreinte sonore associée à l'atelier positionné au sud-est est limitée à l'intérieur de l'enceinte portuaire, contrairement à celle de l'atelier positionné au nord-ouest. L'ouverture du port historique avec son chenal d'accès engendre une directivité de l'empreinte sonore de l'atelier vers l'extérieur du port.

Le scénario 5bis met en évidence les empreintes sonores associées à deux ateliers de BRH. Ce scénario est très proche du scénario 5, seuls les gabarits associés aux ateliers d'ouverture des deux digues diffèrent de par les techniques utilisées. Les empreintes sonores sont plus importantes par comparaison avec celles du scénario 5 compte tenu d'un niveau d'émission supérieur associé au BRH. Les périmètres maximums sont observés sur l'atelier positionné au nord-ouest (atelier d'ouverture de la digue du port historique).

Le scénario 6 traduit d'un point de vue acoustique la phase de dragage finale du futur canal reliant l'avant-port historique et l'avant-port Port 2000. Ce scénario met en évidence la drague Samuel de Champlain en opération de dragage. L'empreinte sonore associée au dragage est focalisée à l'intérieur du chenal. Ce scénario ne considère que les phases de dragage.

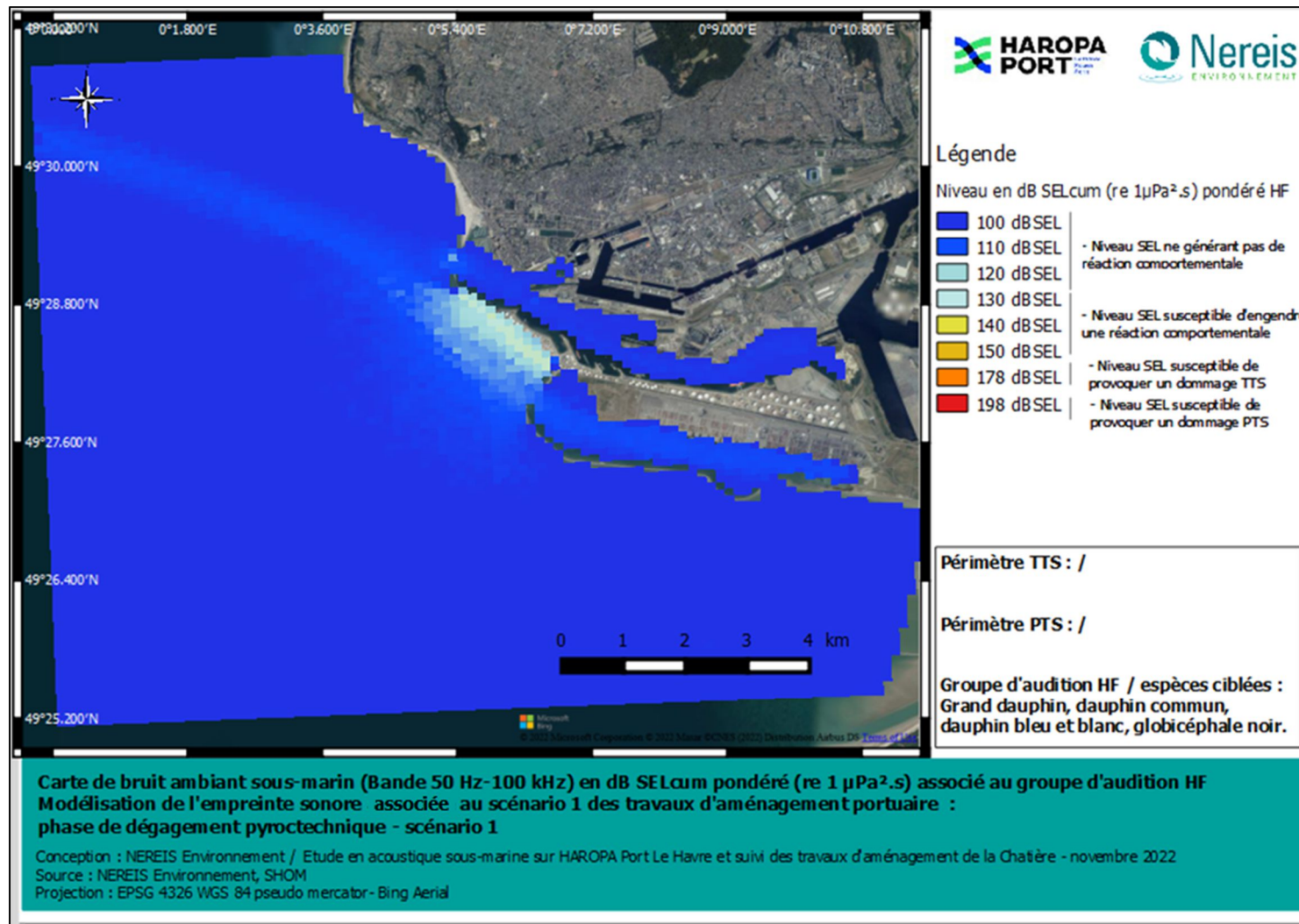


Figure 86. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les cétacés HF associés au scénario 1.



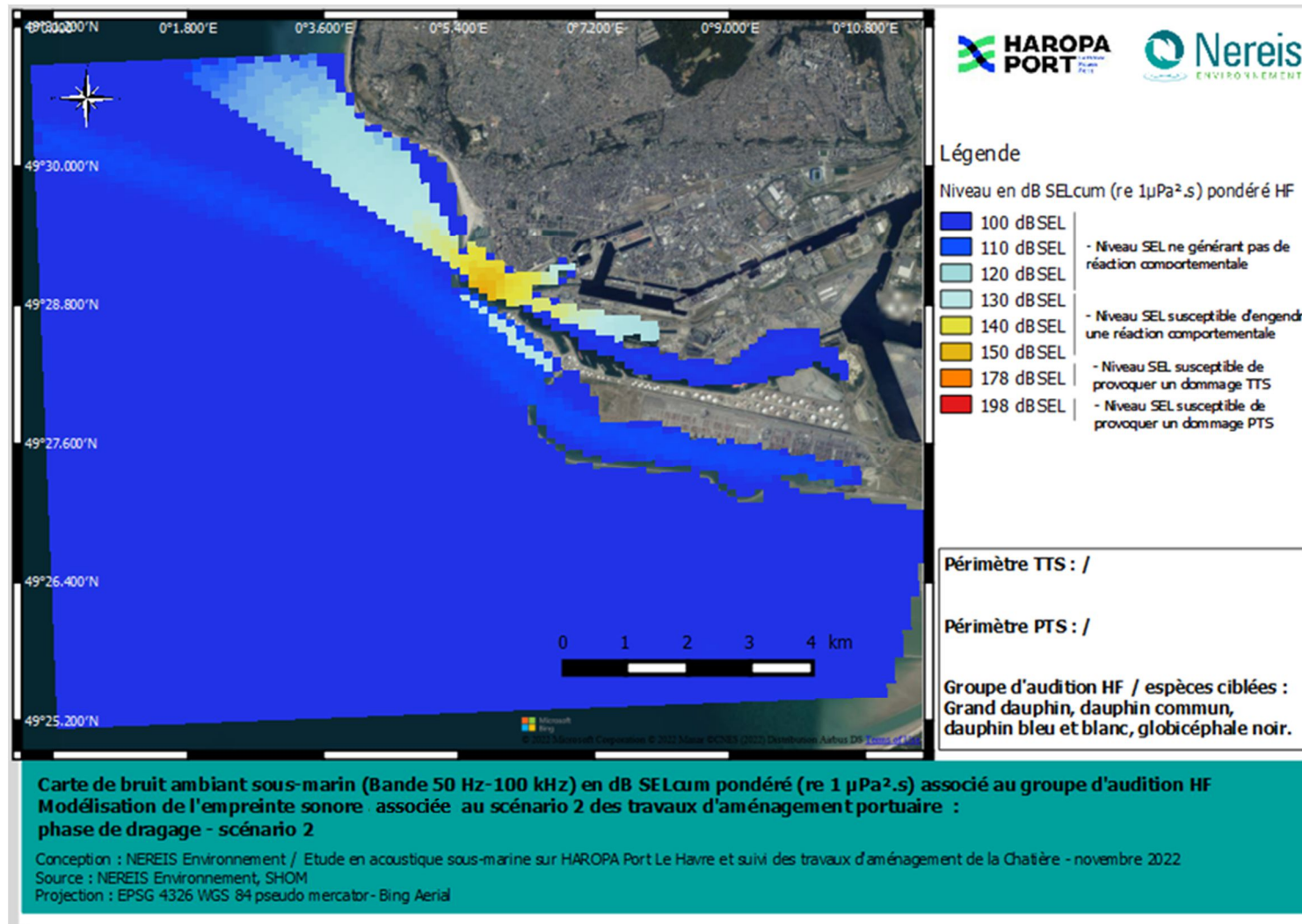


Figure 87. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les cétacés HF associés au scénario 2.



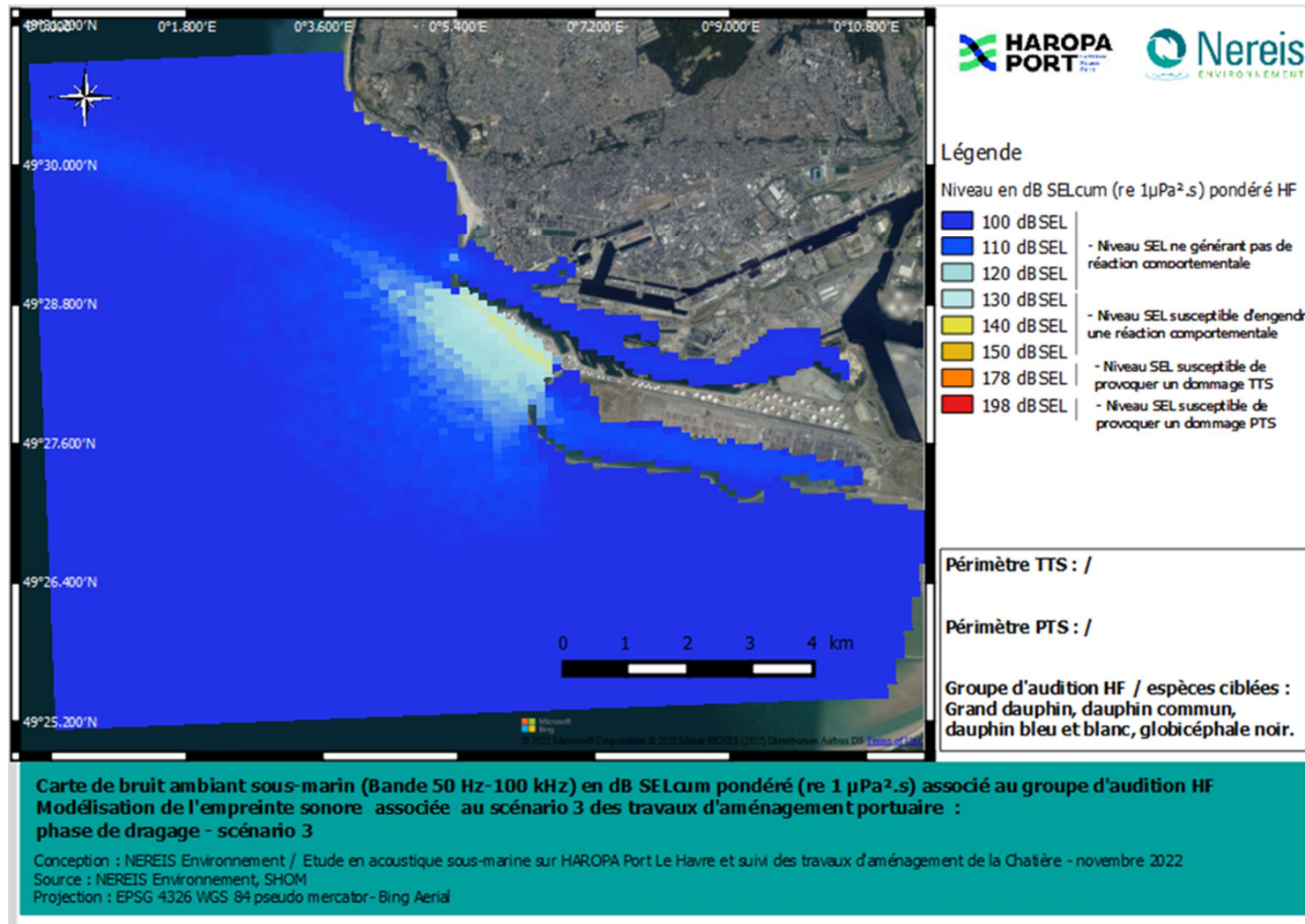


Figure 88. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les cétacés HF associés au scénario 3.



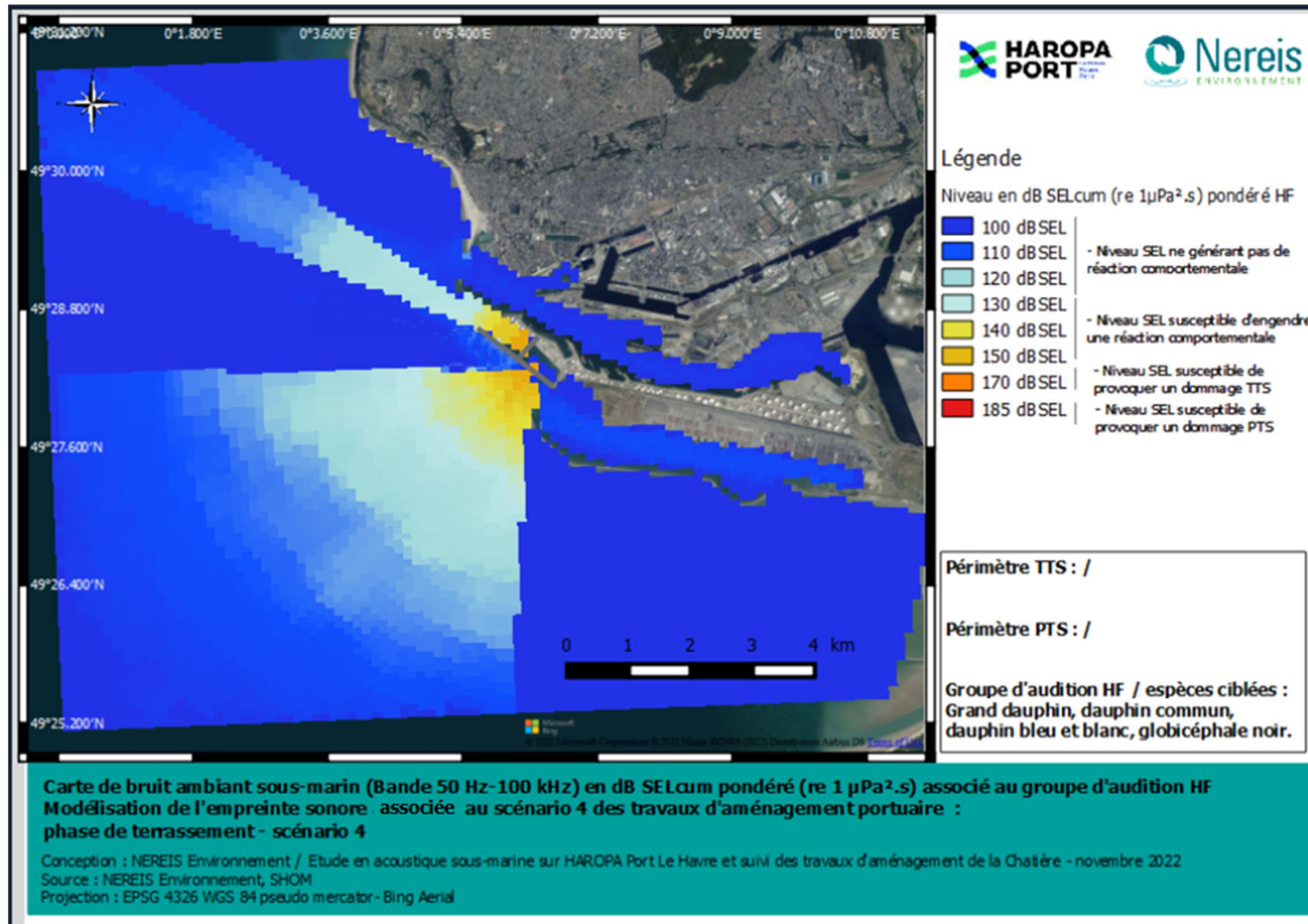


Figure 89. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les cétacés HF associés au scénario 4.



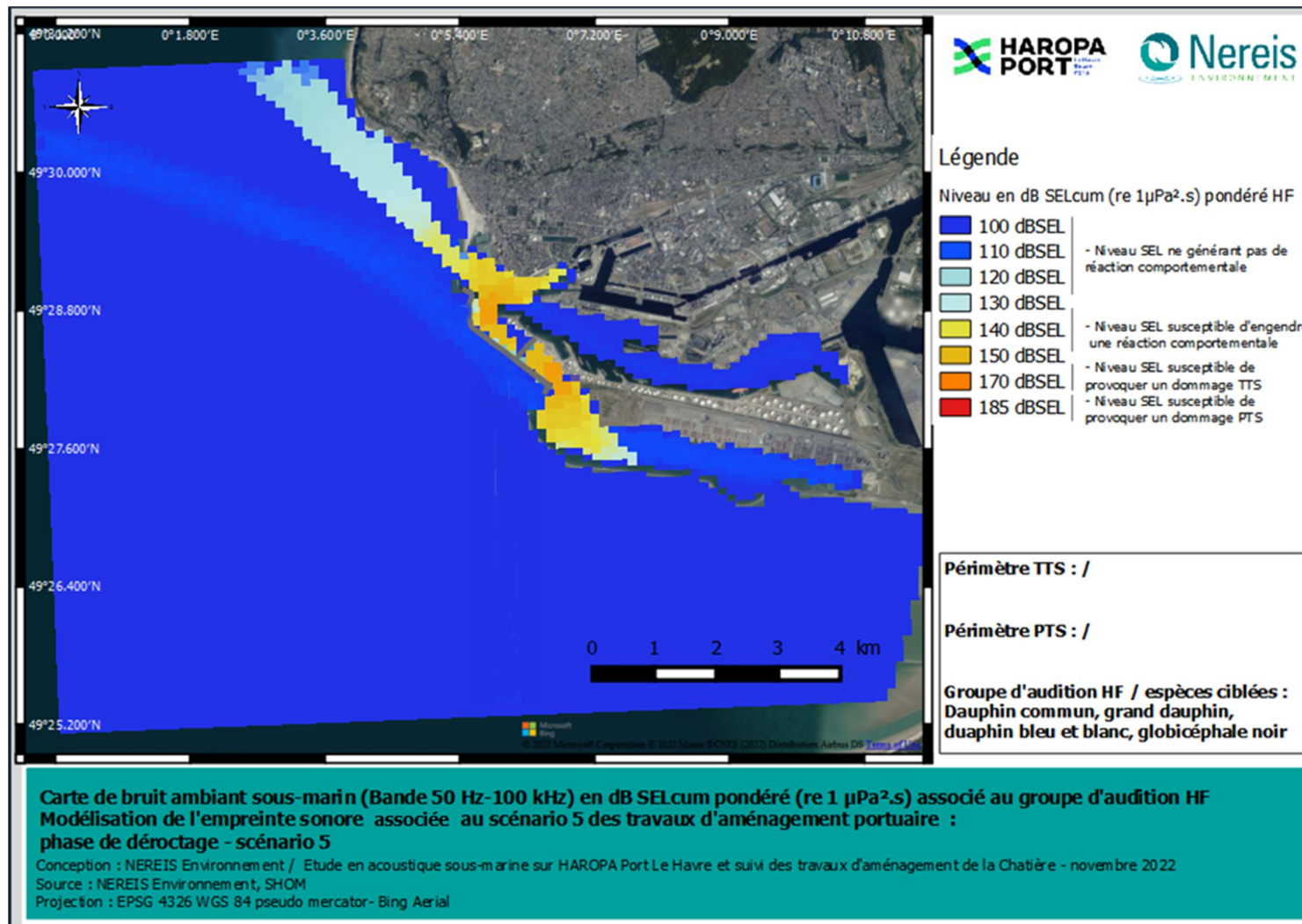


Figure 90. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les cétacés HF associés au scénario 5.



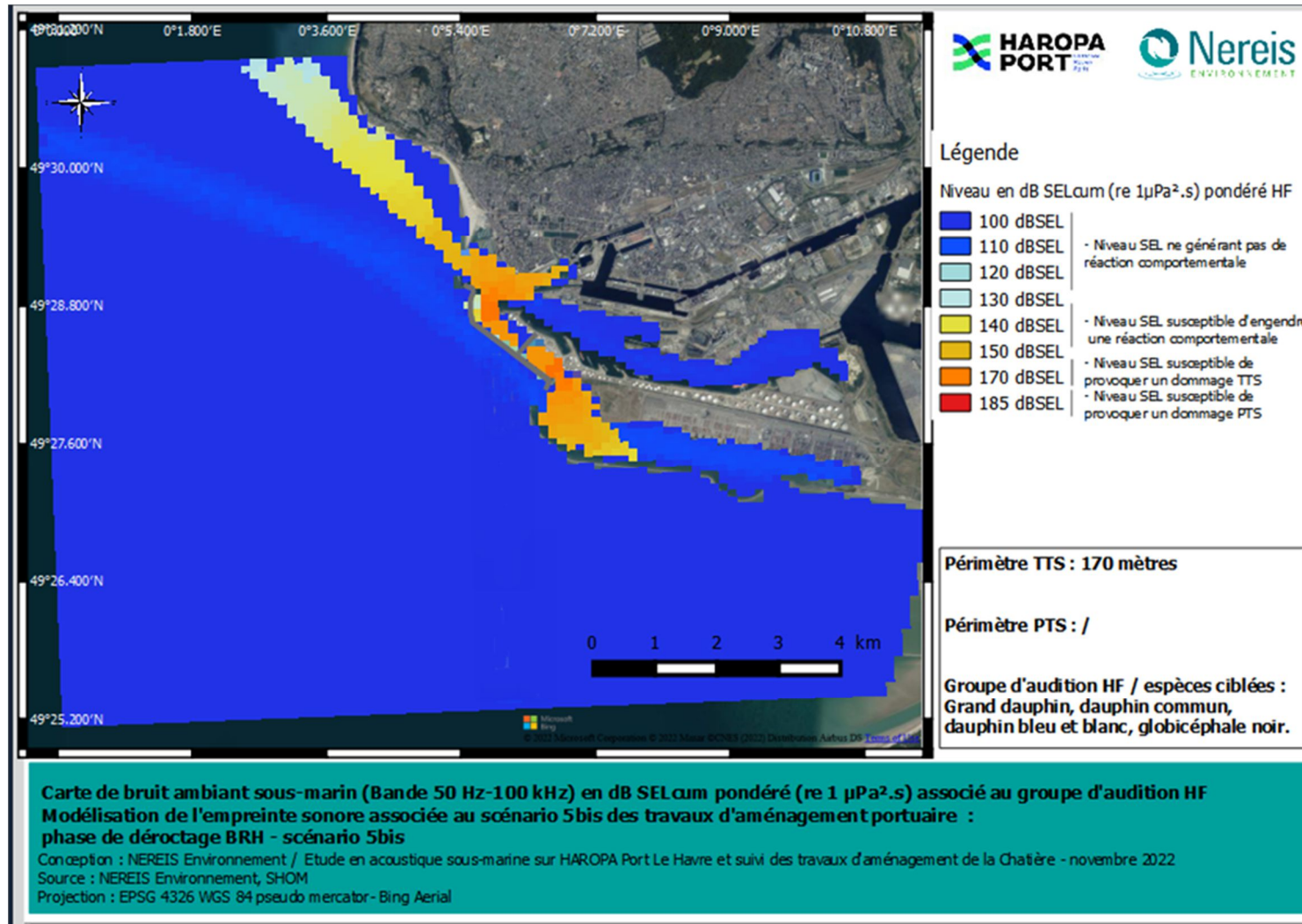


Figure 91. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les cétacés HF associés au scénario 5bis.



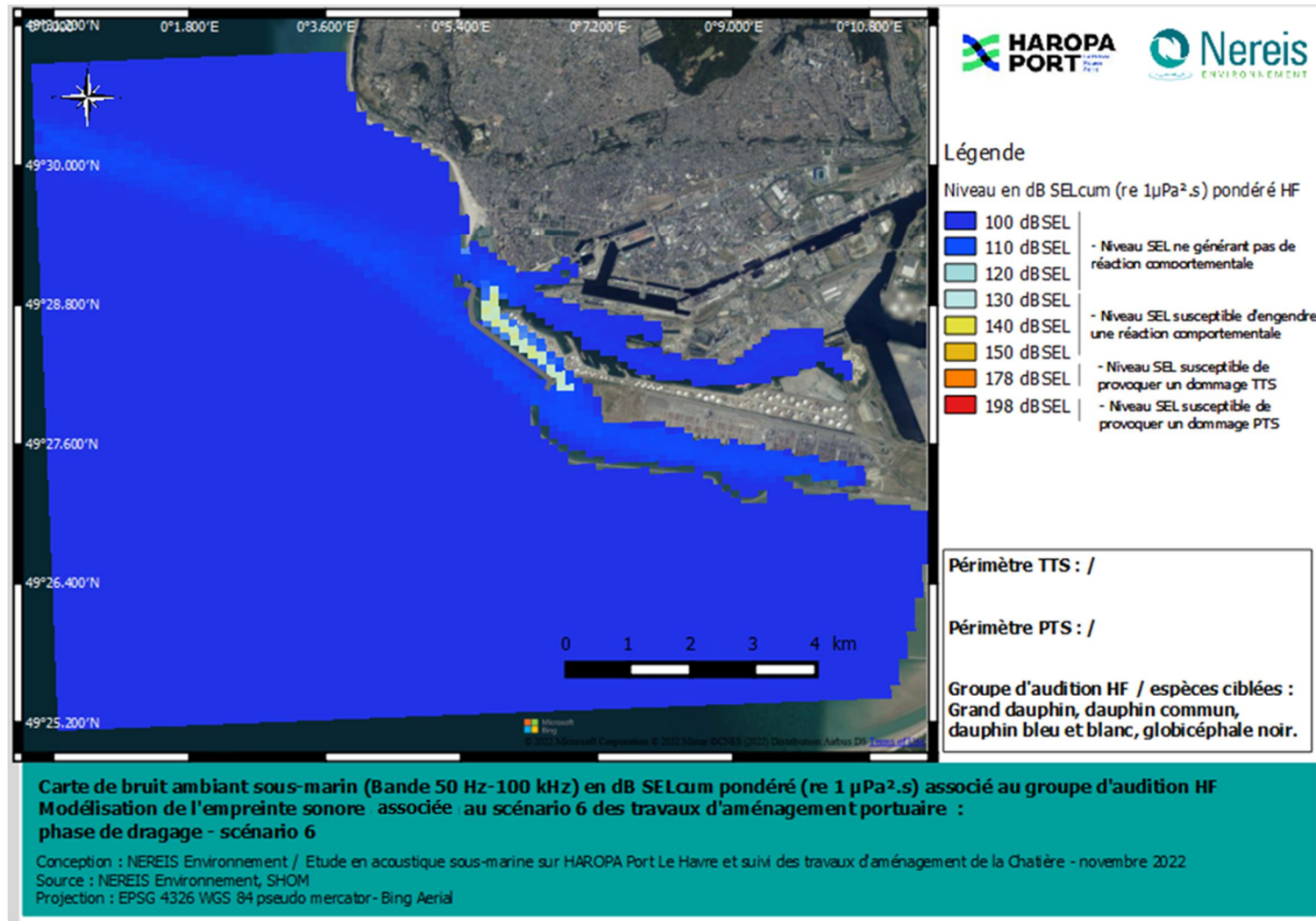


Figure 92. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les cétacés HF associés au scénario 6.



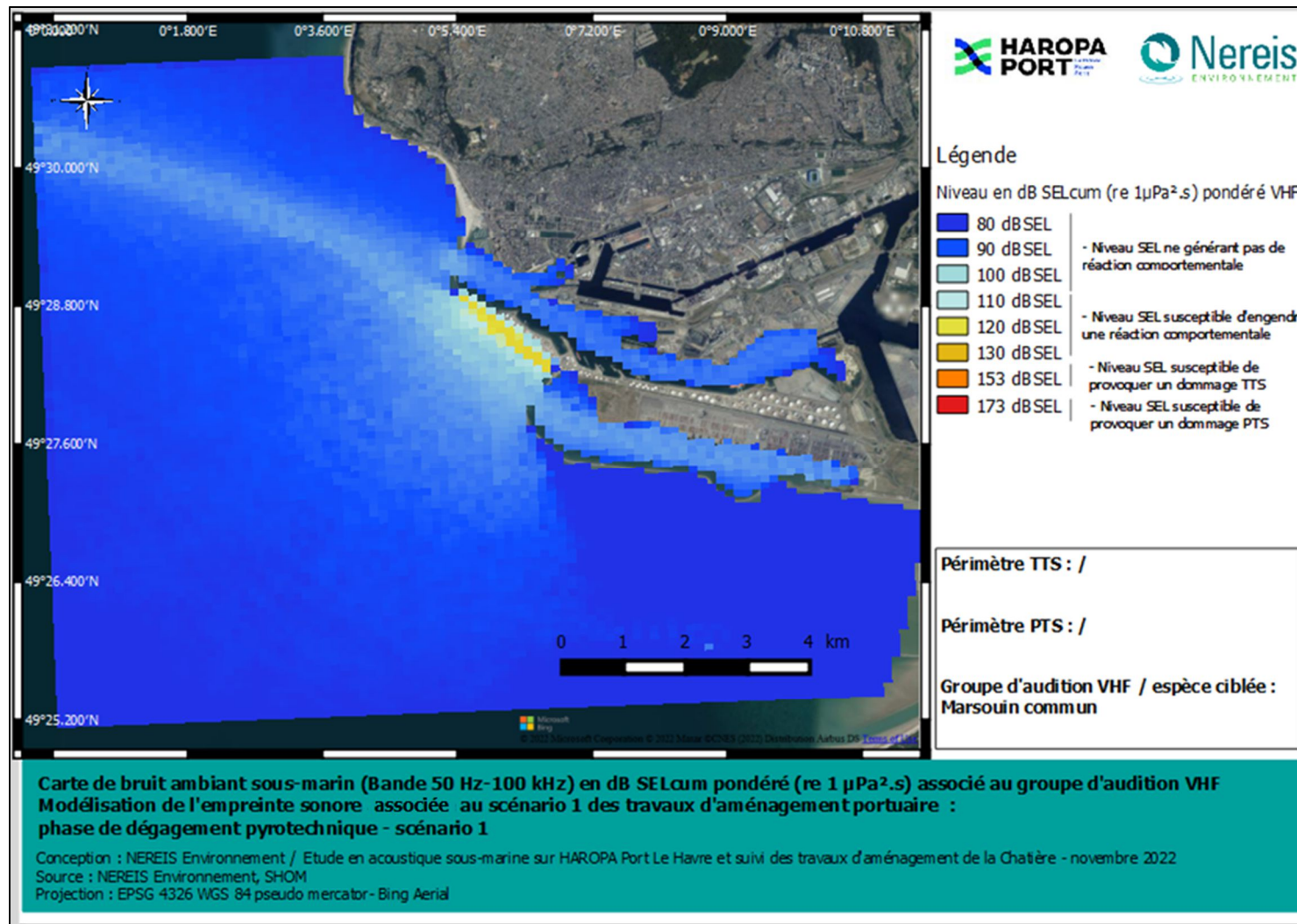


Figure 93. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les cétacés VHF associés au scénario 1.



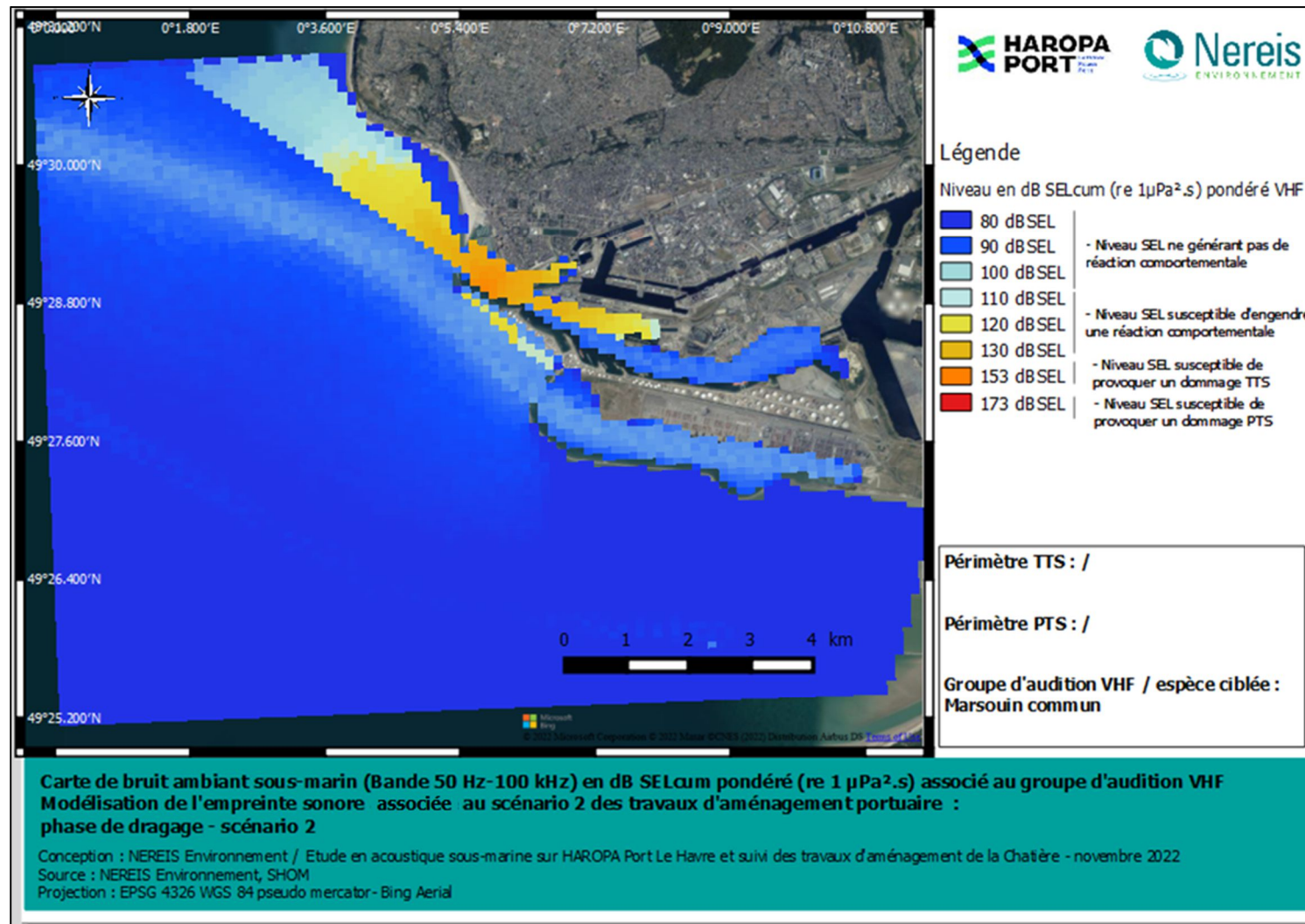


Figure 94. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les cétacés VHF associés au scénario 2.



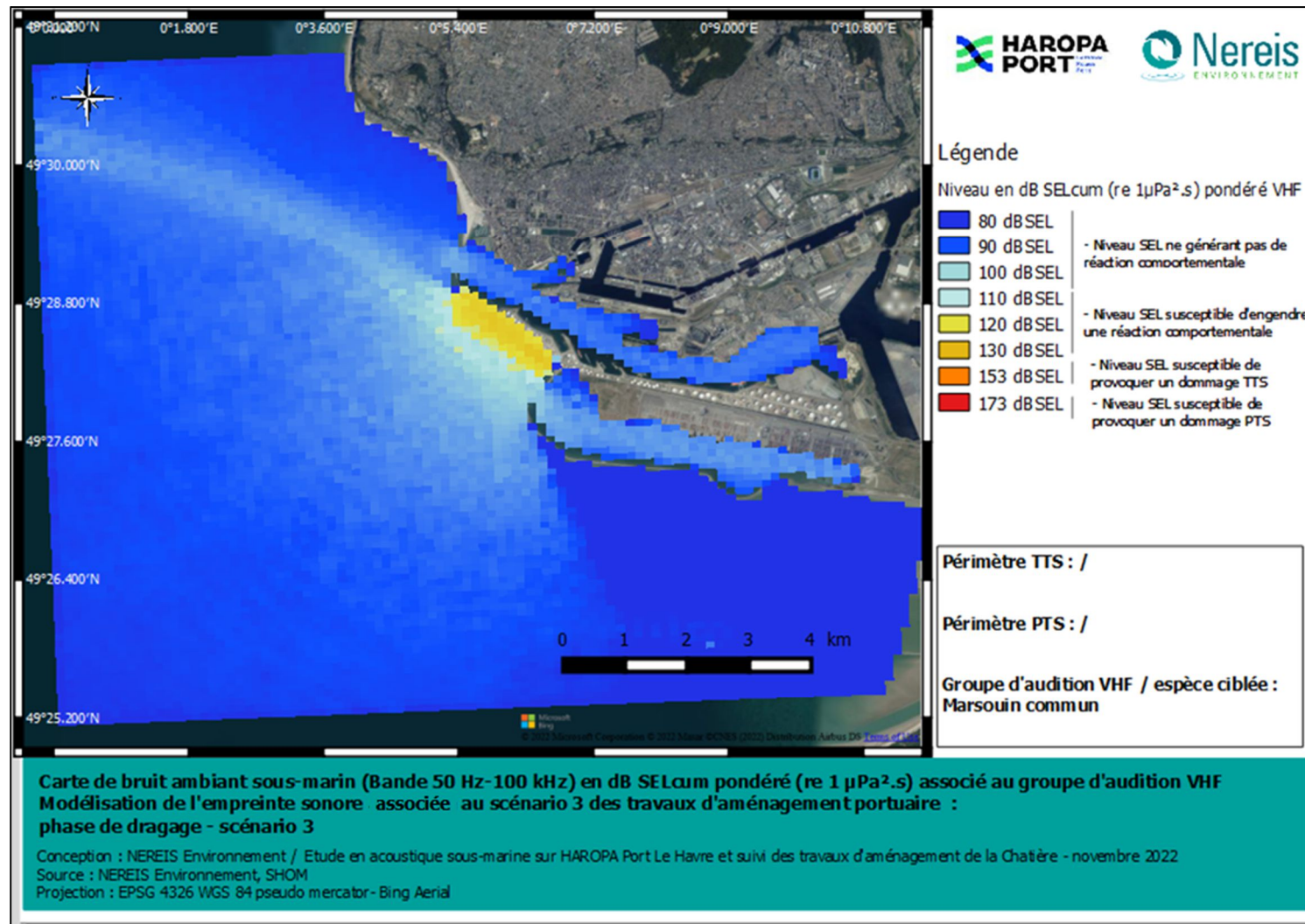


Figure 95. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les cétacés VHF associés au scénario 3.



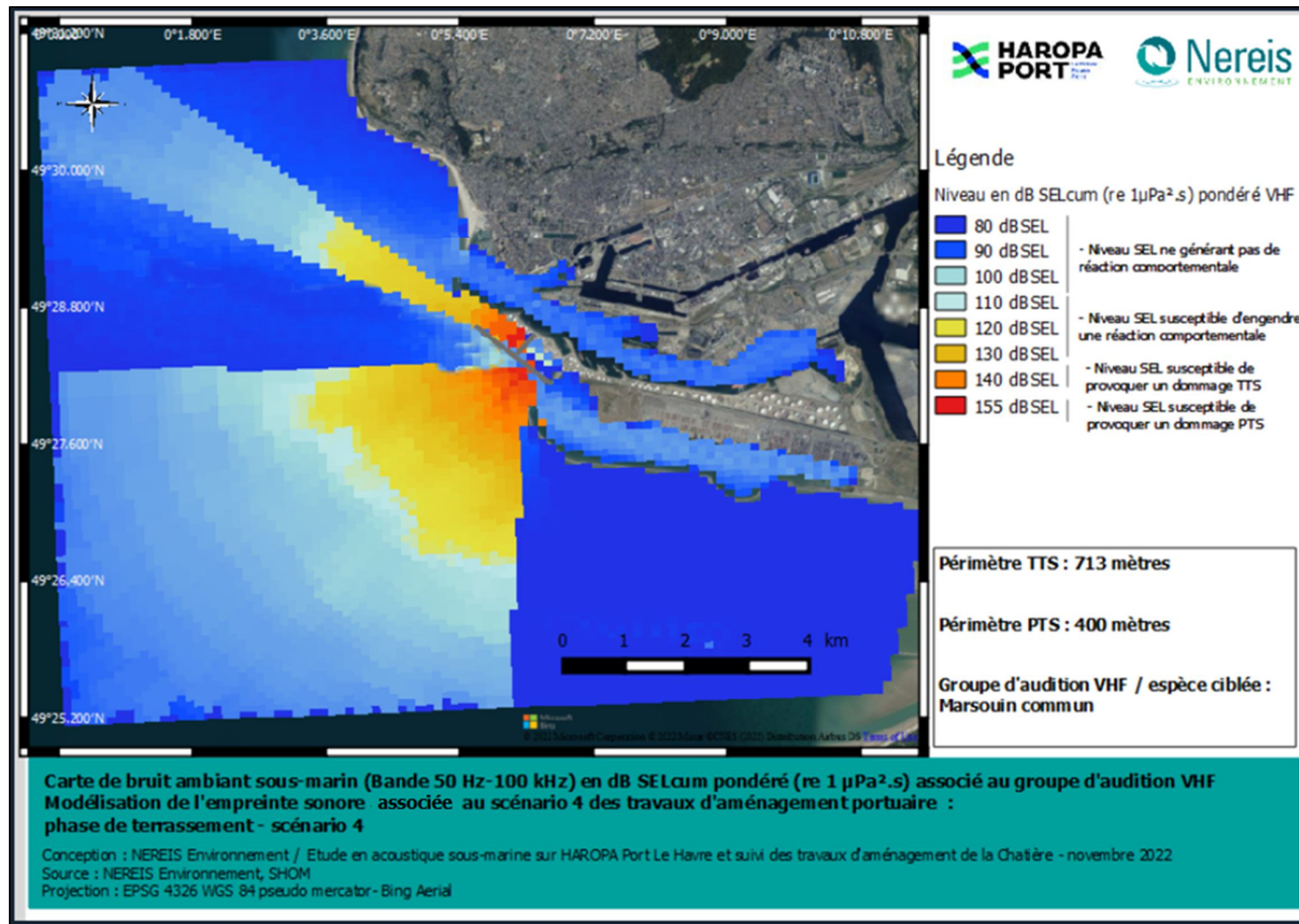


Figure 96. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les cétacés VHF associés au scénario 4.



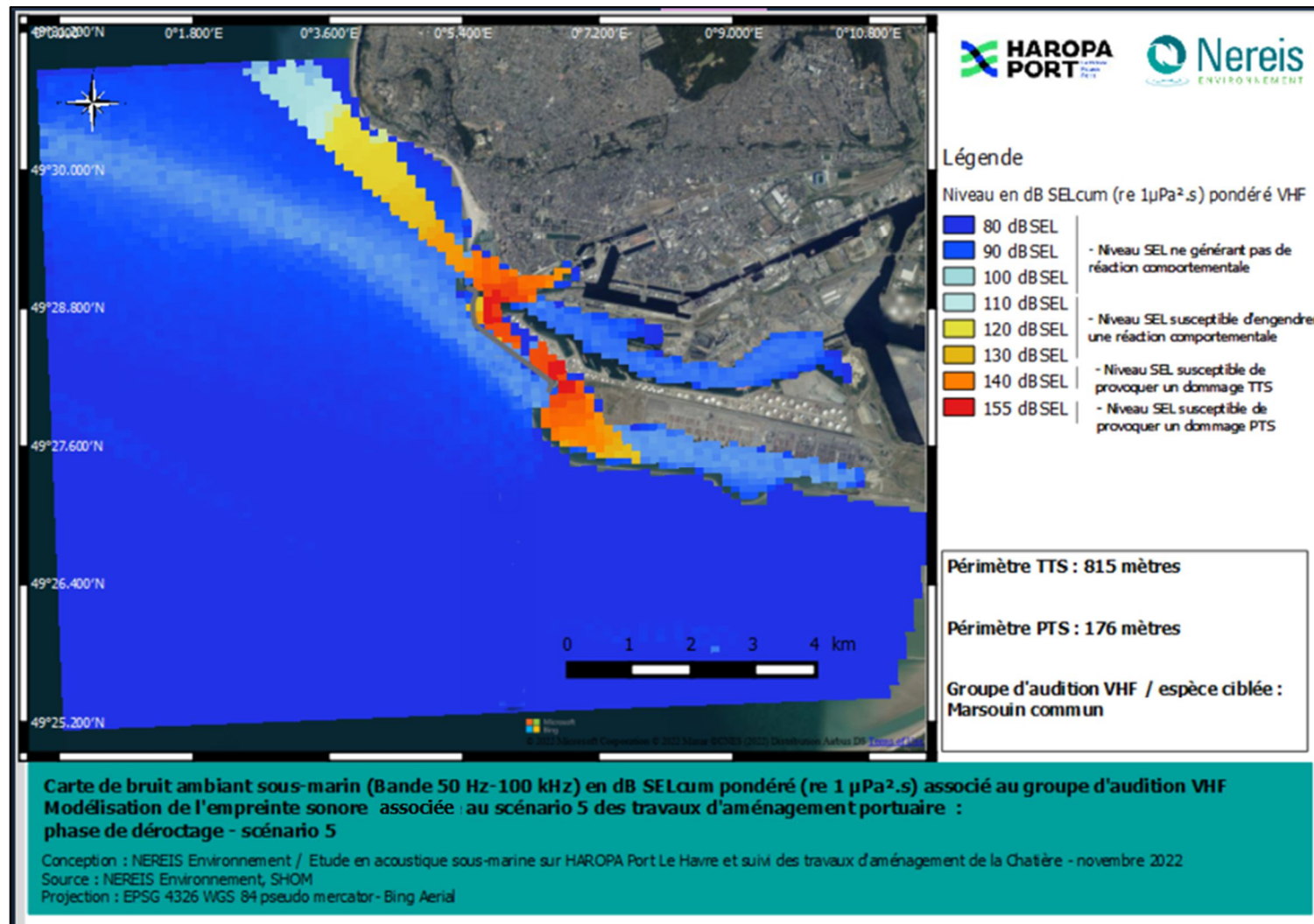


Figure 97. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les cétacés VHF associés au scénario 5.



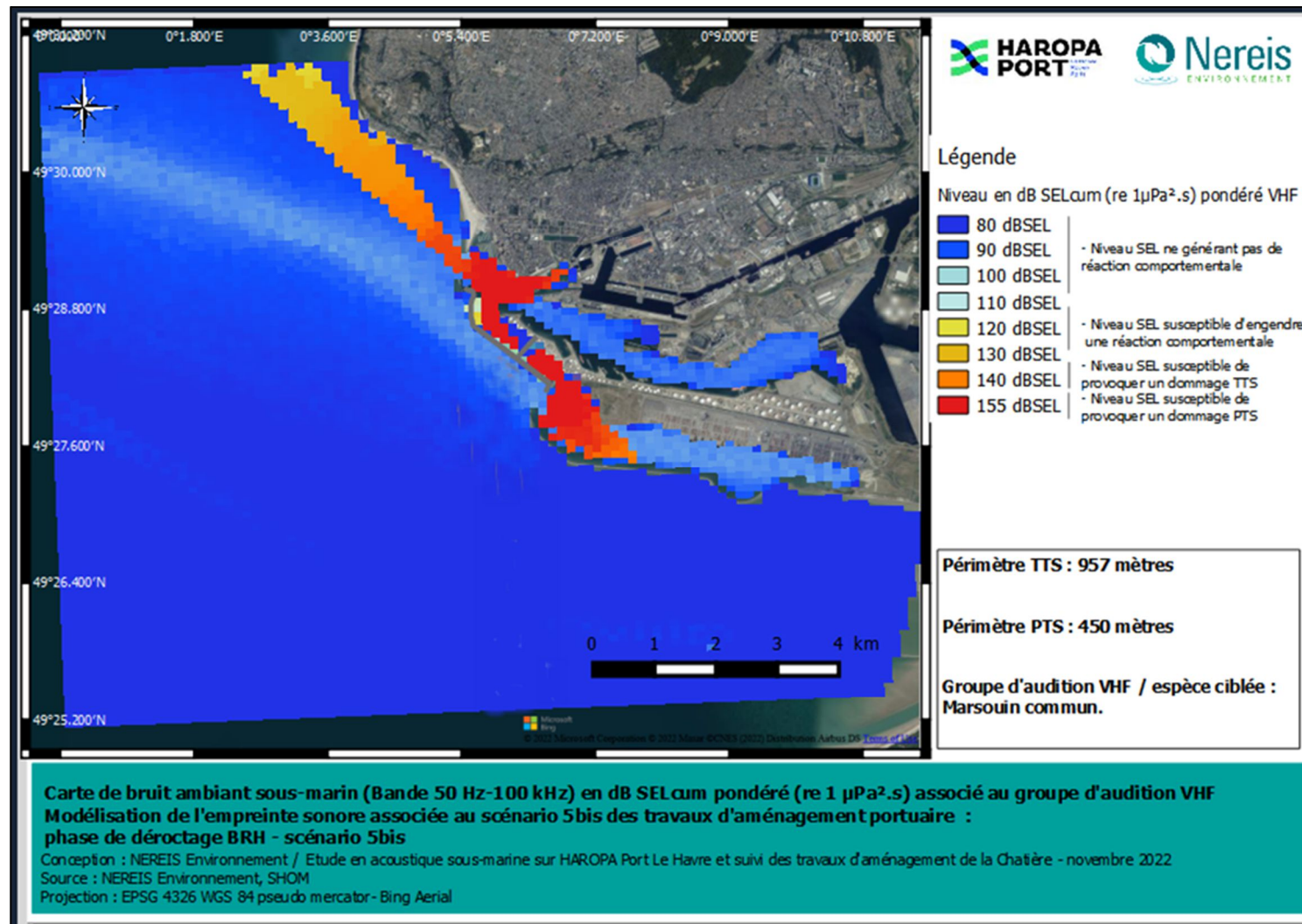


Figure 98. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les cétacés VHF associés au scénario 5bis.



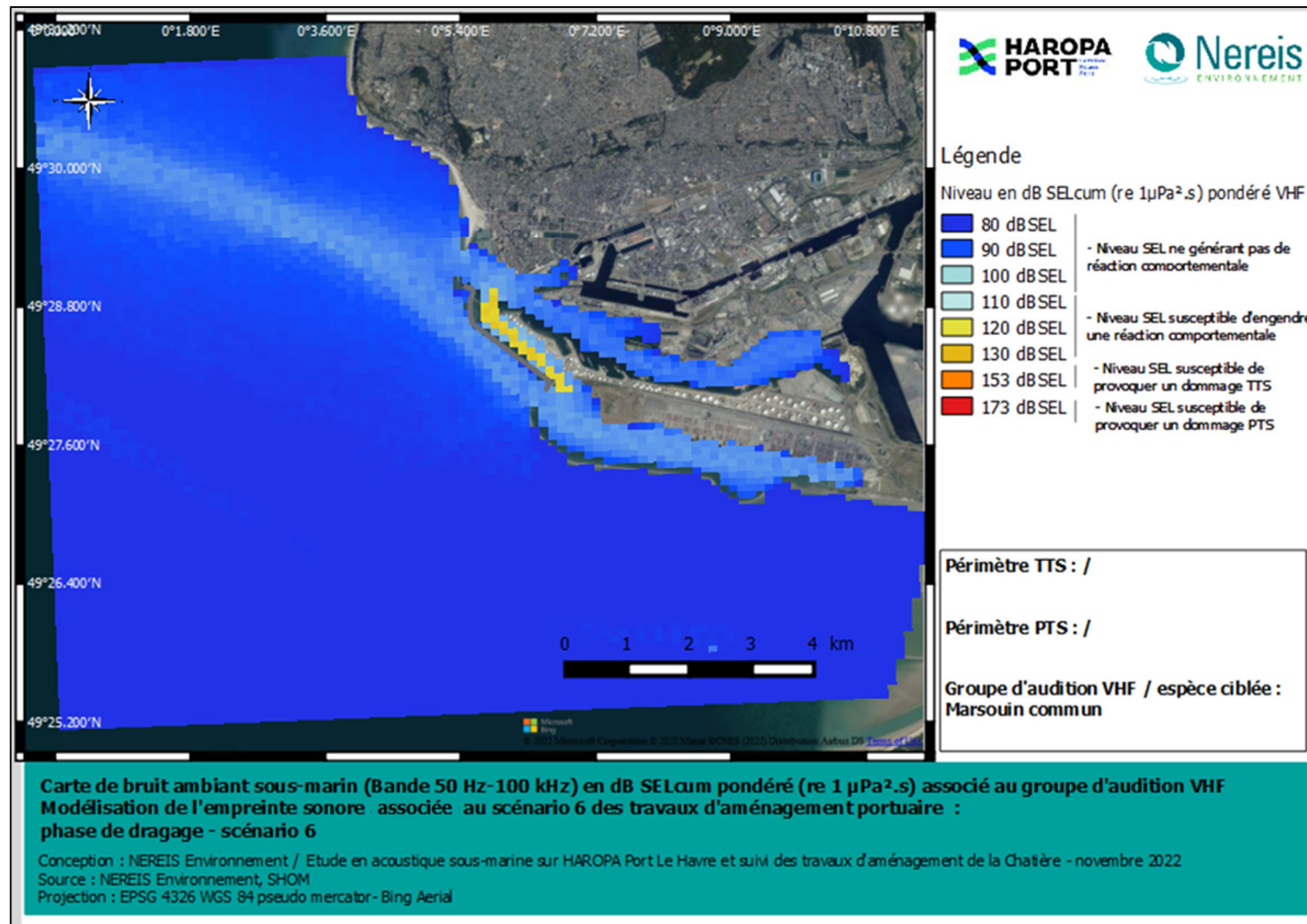


Figure 99. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les cétacés VHF associés au scénario 6.



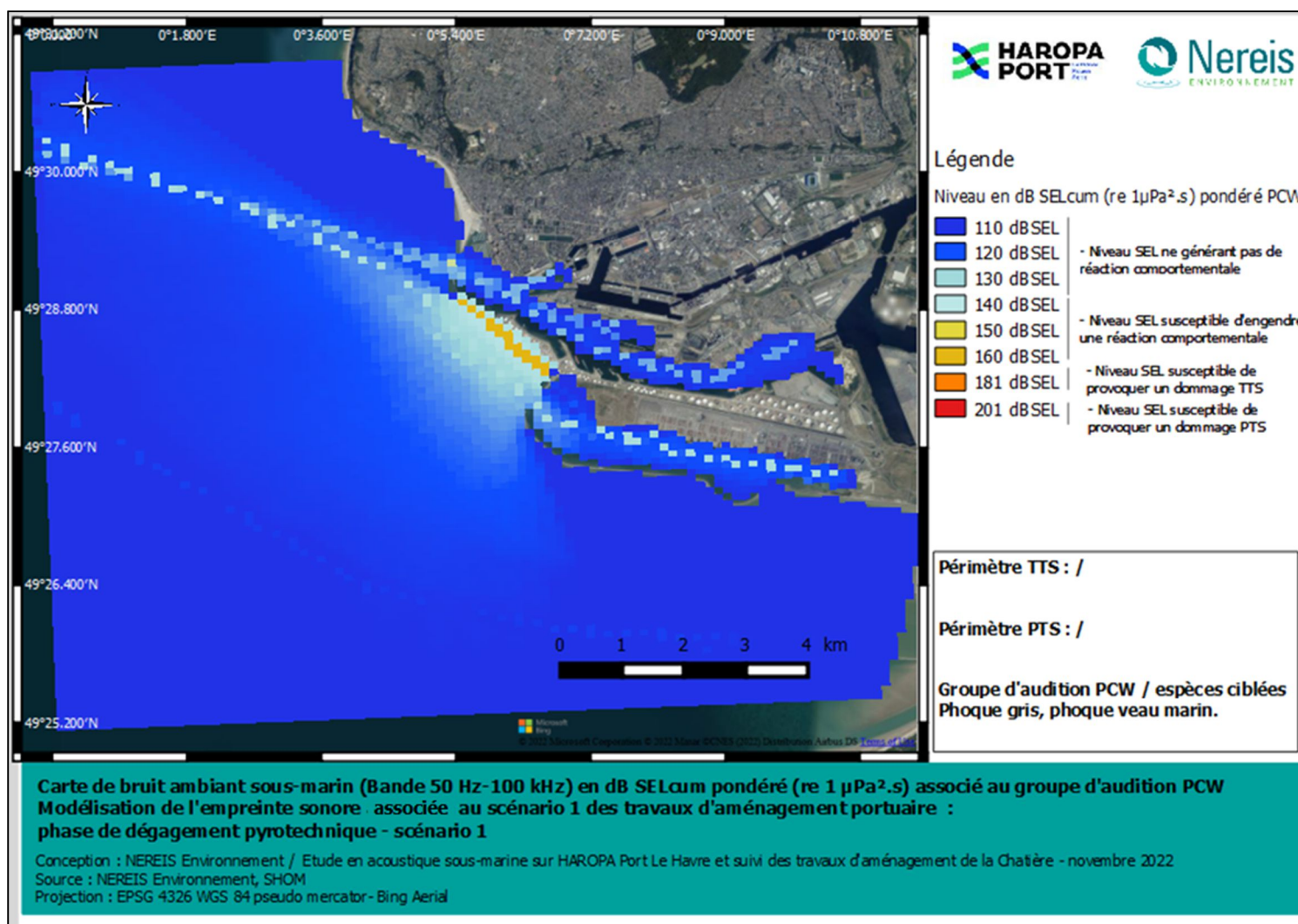


Figure 100. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les phocidés PCW associés au scénario 1.



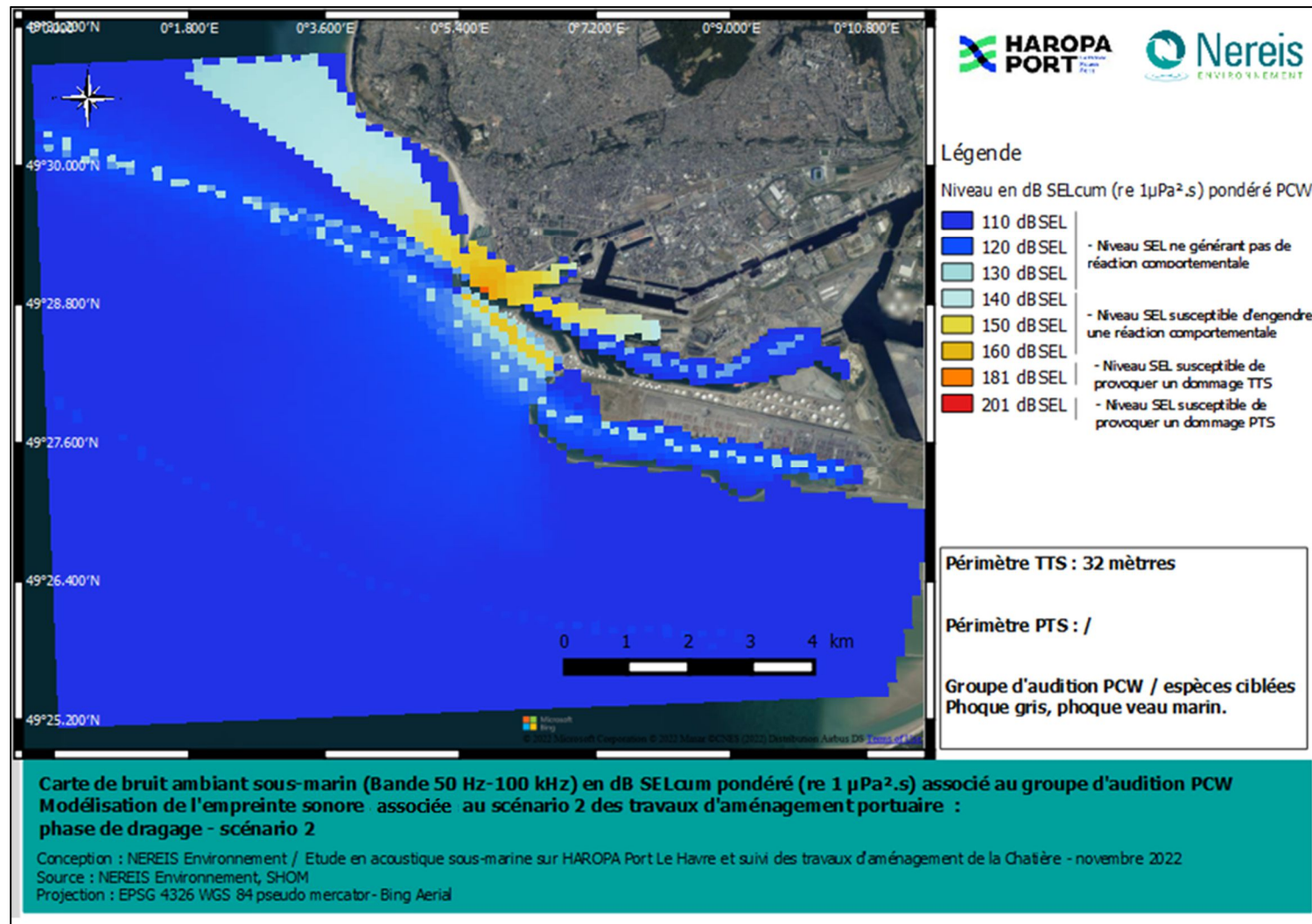


Figure 101. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les phocidés PCW associés au scénario 2.



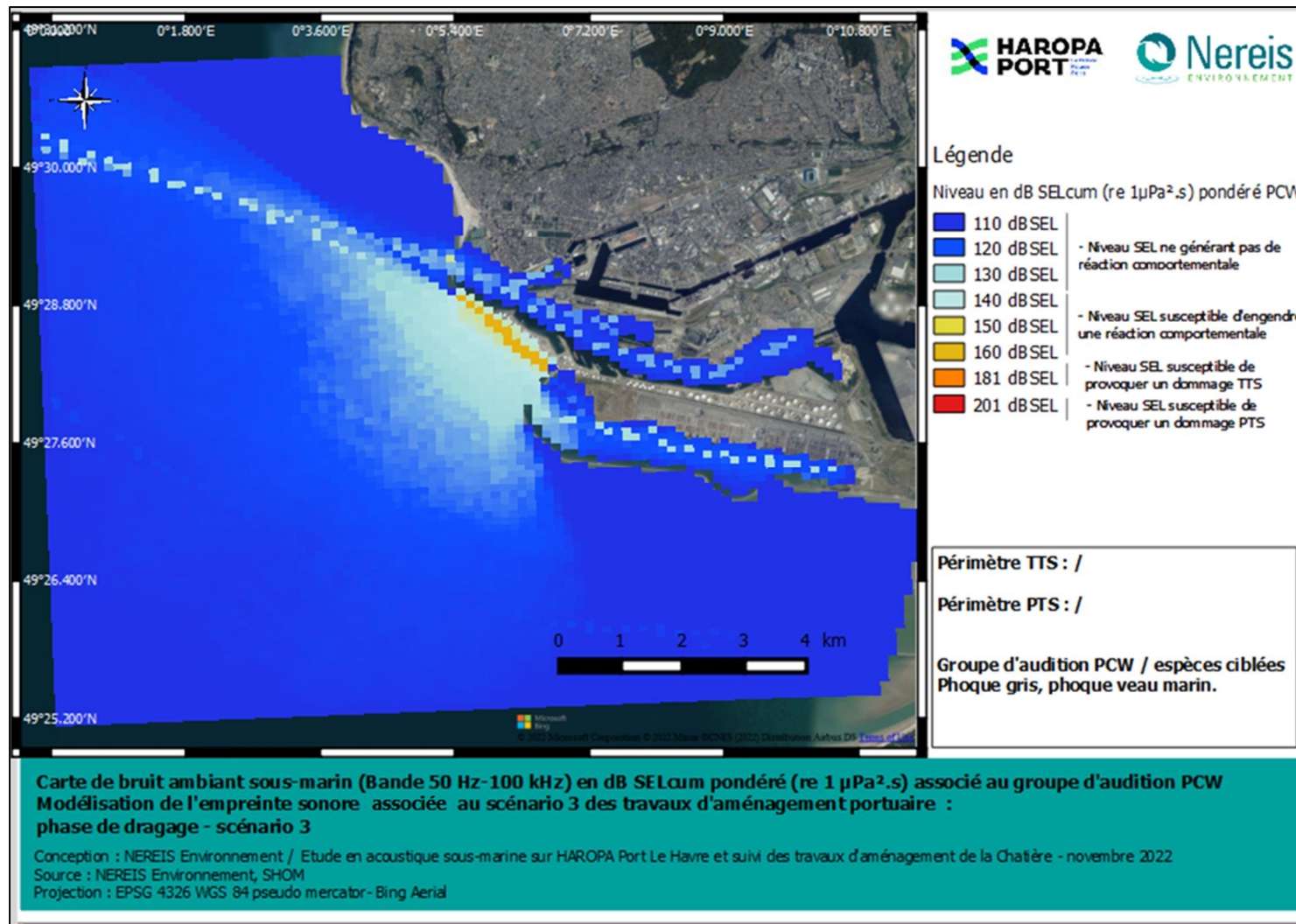


Figure 102. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les phocidés PCW associés au scénario 3.



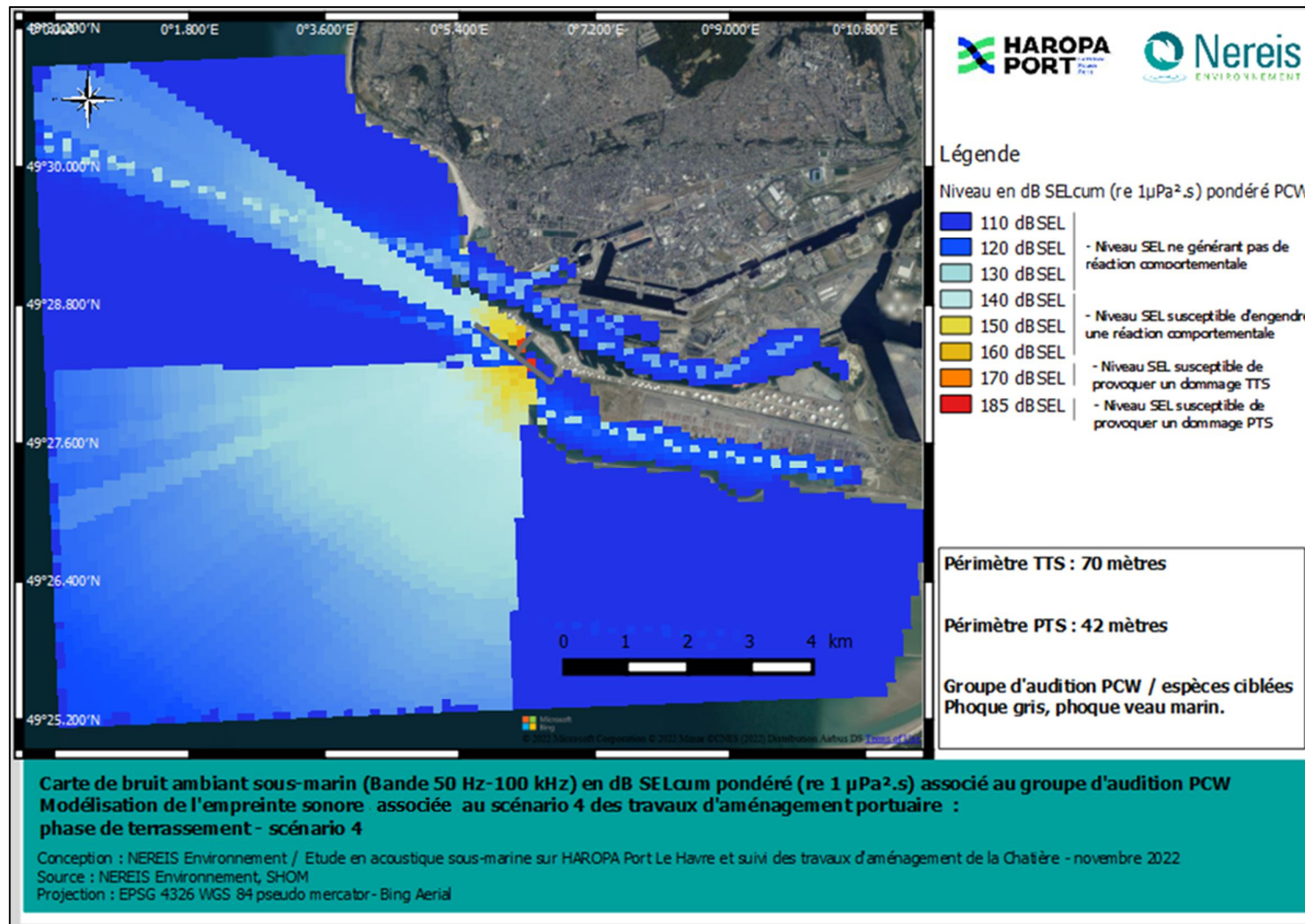


Figure 103. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les phocidés PCW associés au scénario 4.



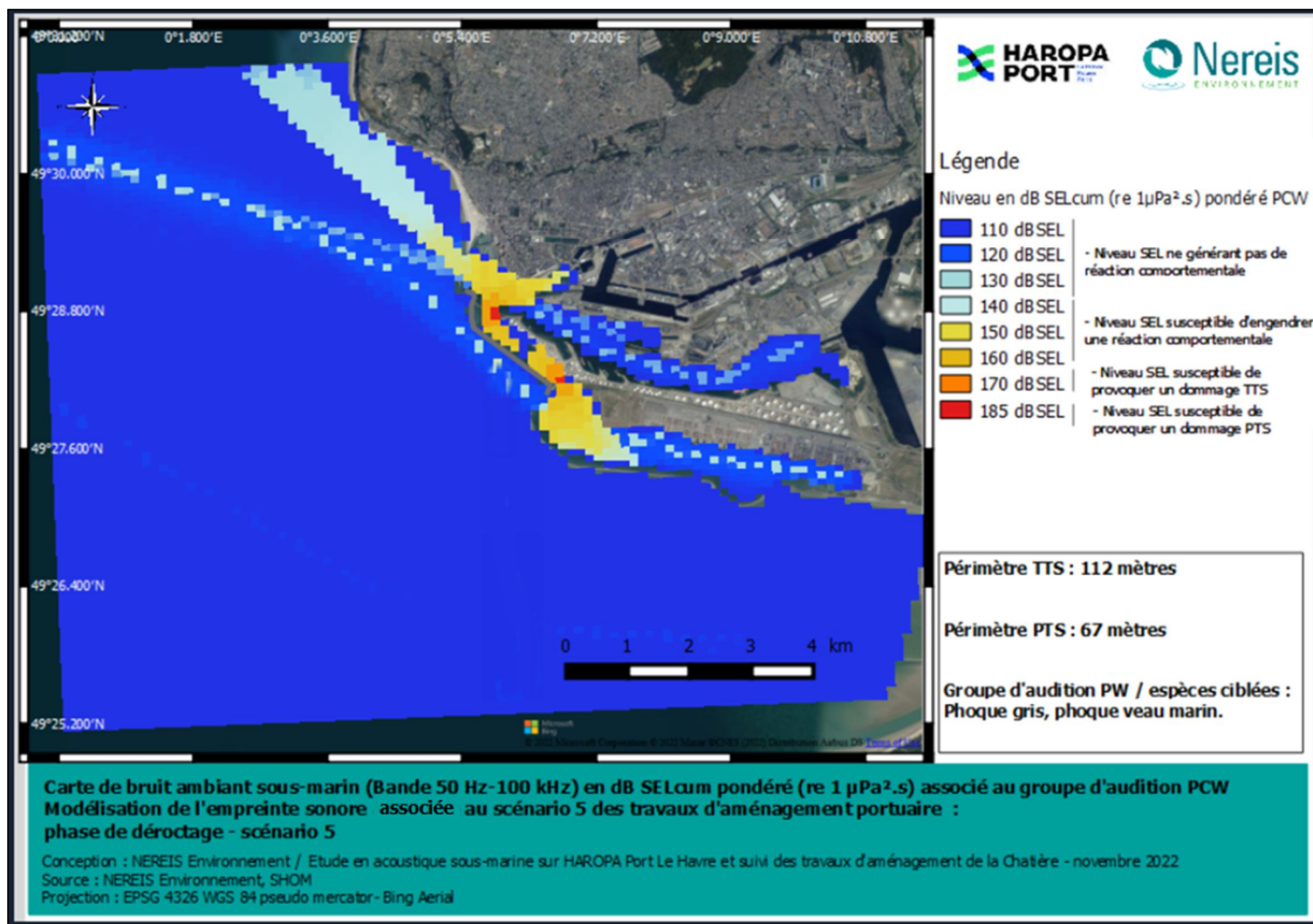


Figure 104. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les phocidés PCW associés au scénario 5.



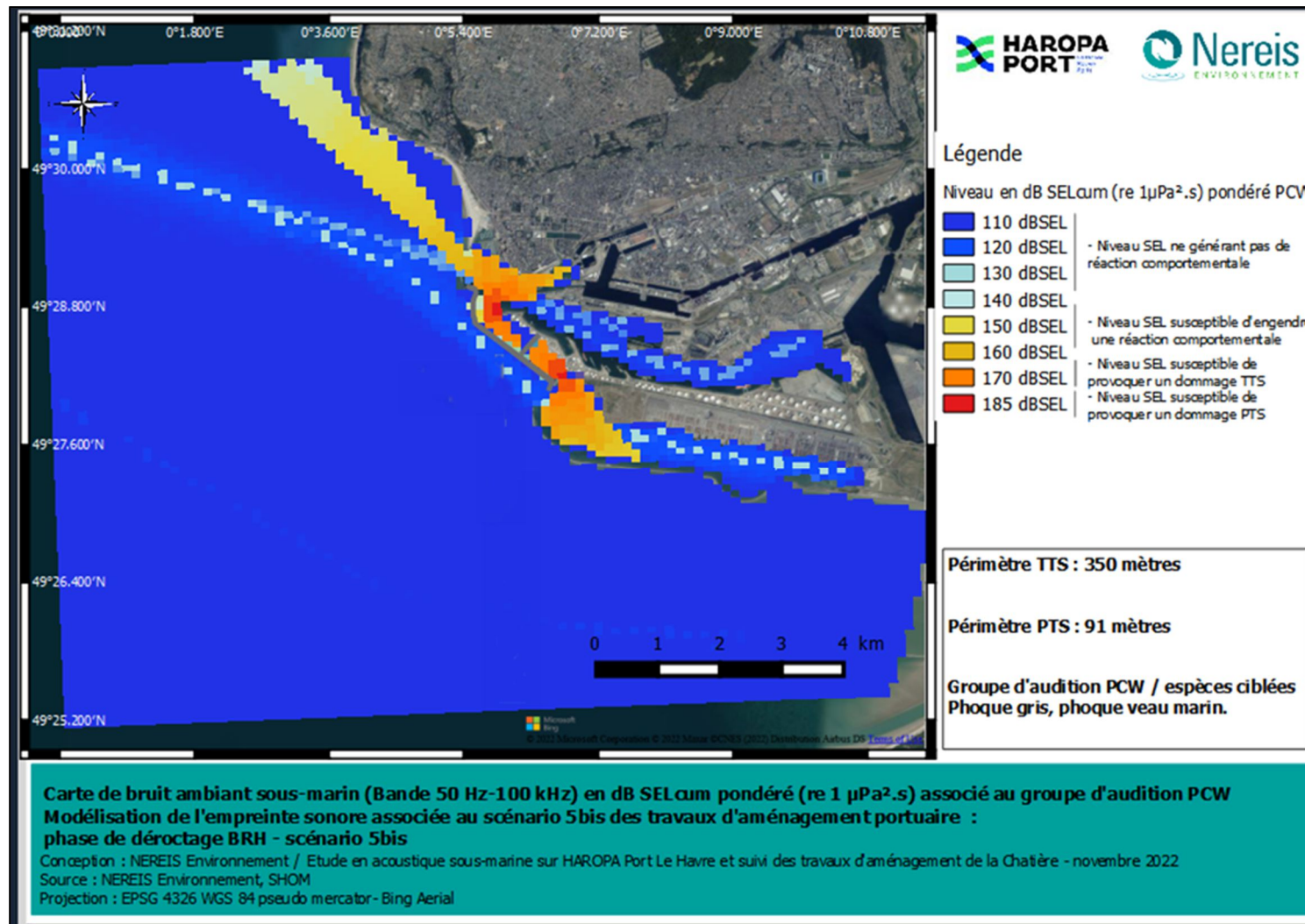


Figure 105. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les phocidés PCW associés au scénario 5bis.



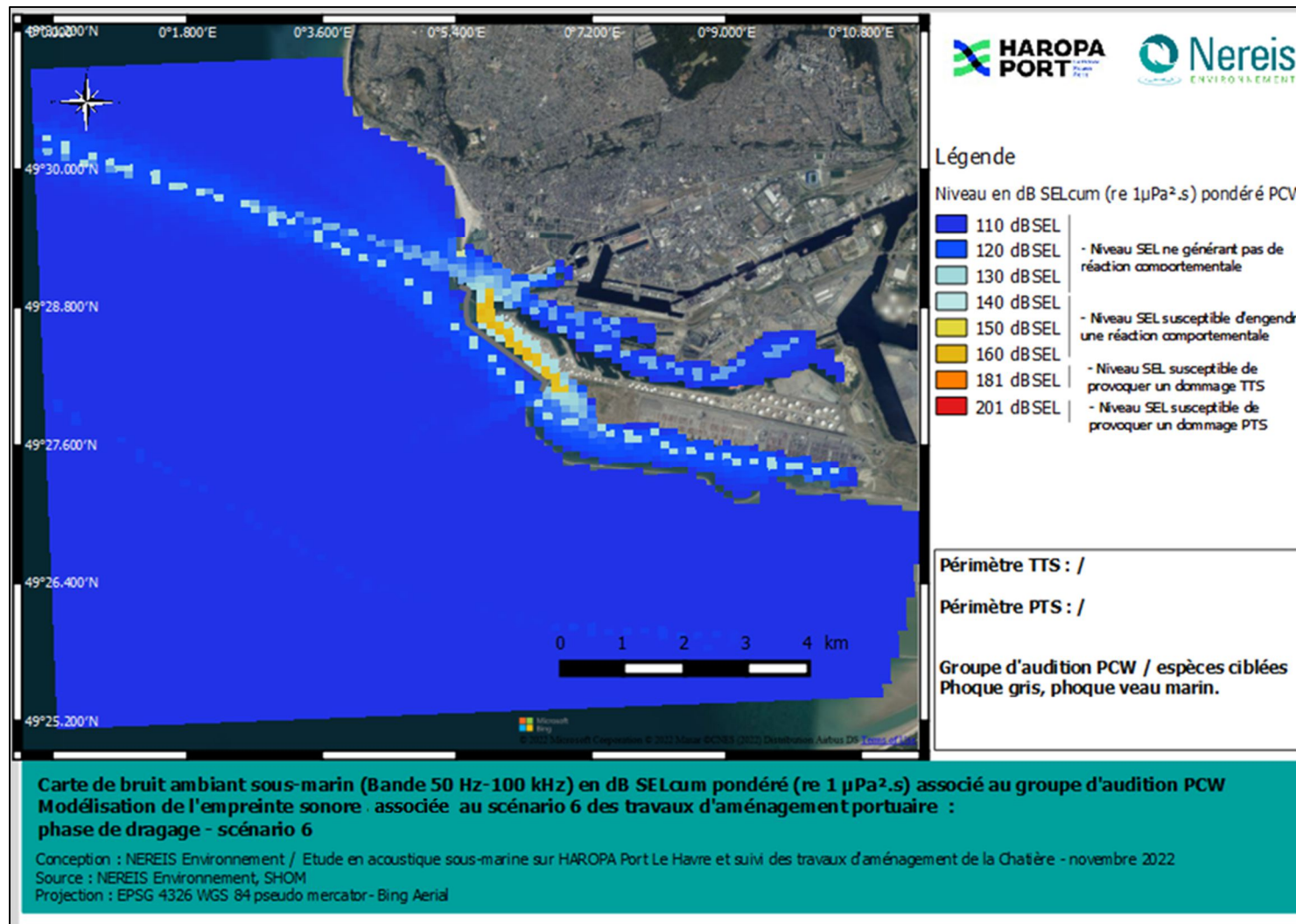


Figure 106. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les phocidés PCW associés au scénario 6.



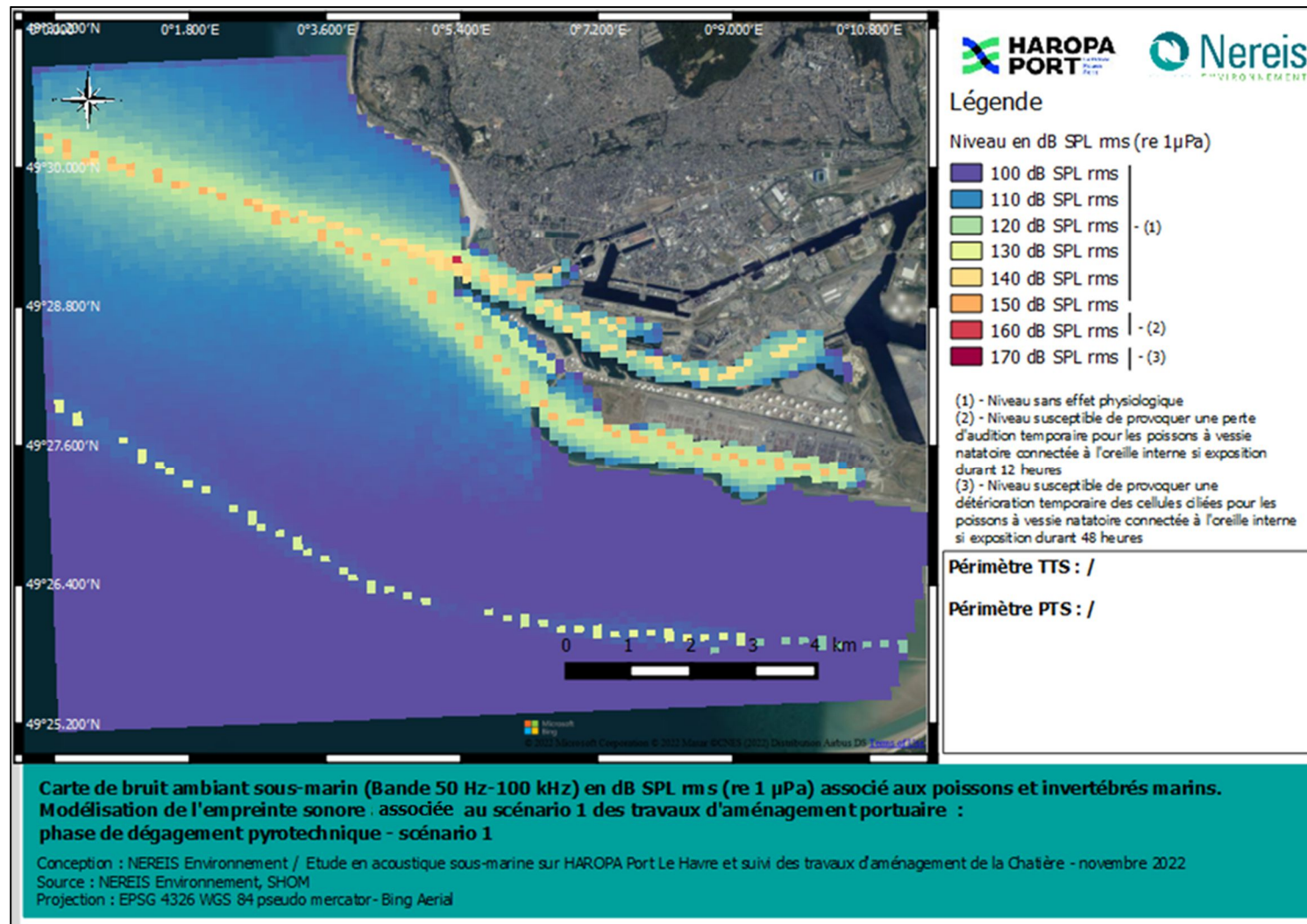


Figure 107. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les poissons et invertébrés marins associés au scénario 1.



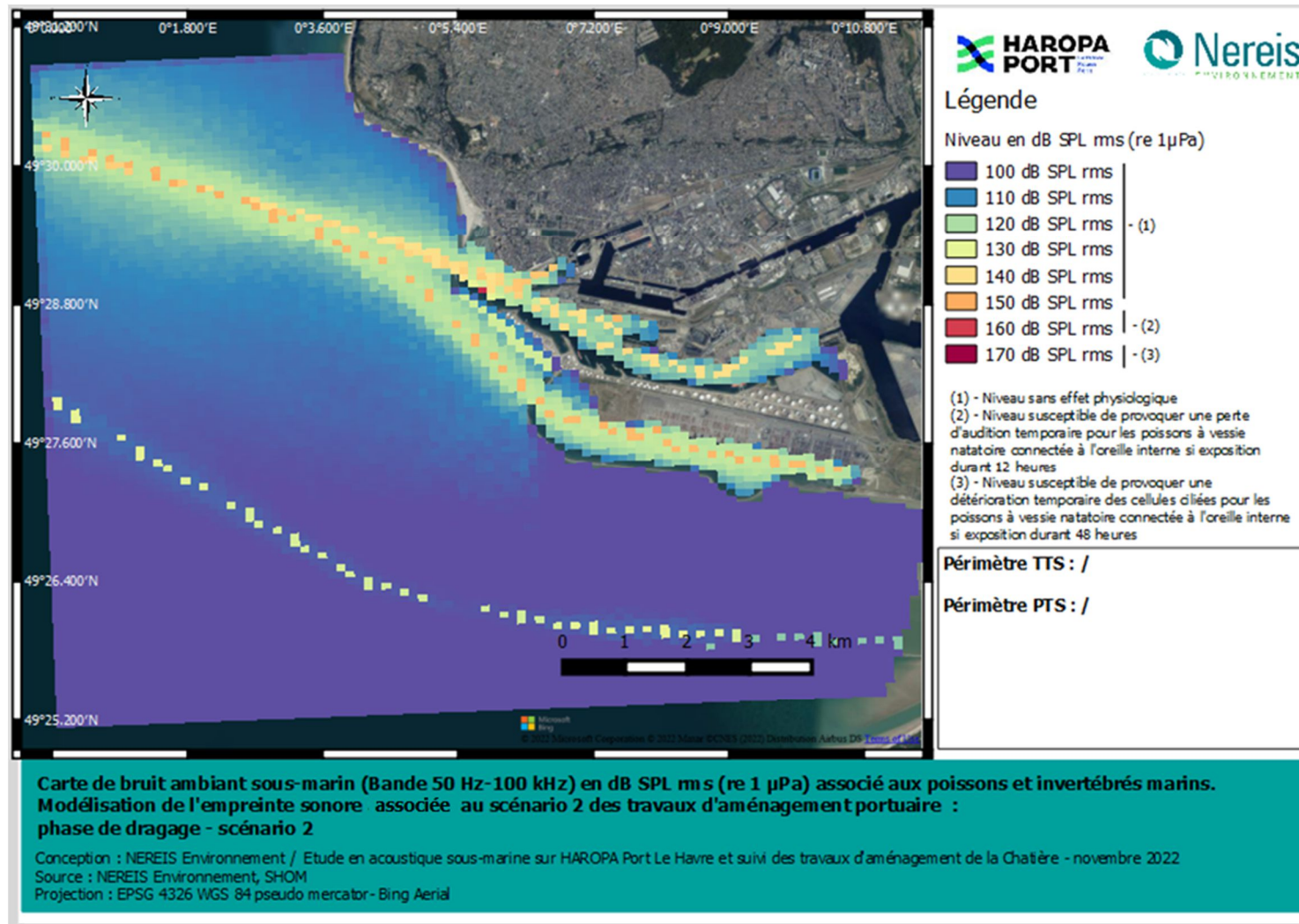


Figure 108. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les poissons et invertébrés marins associés au scénario 2.



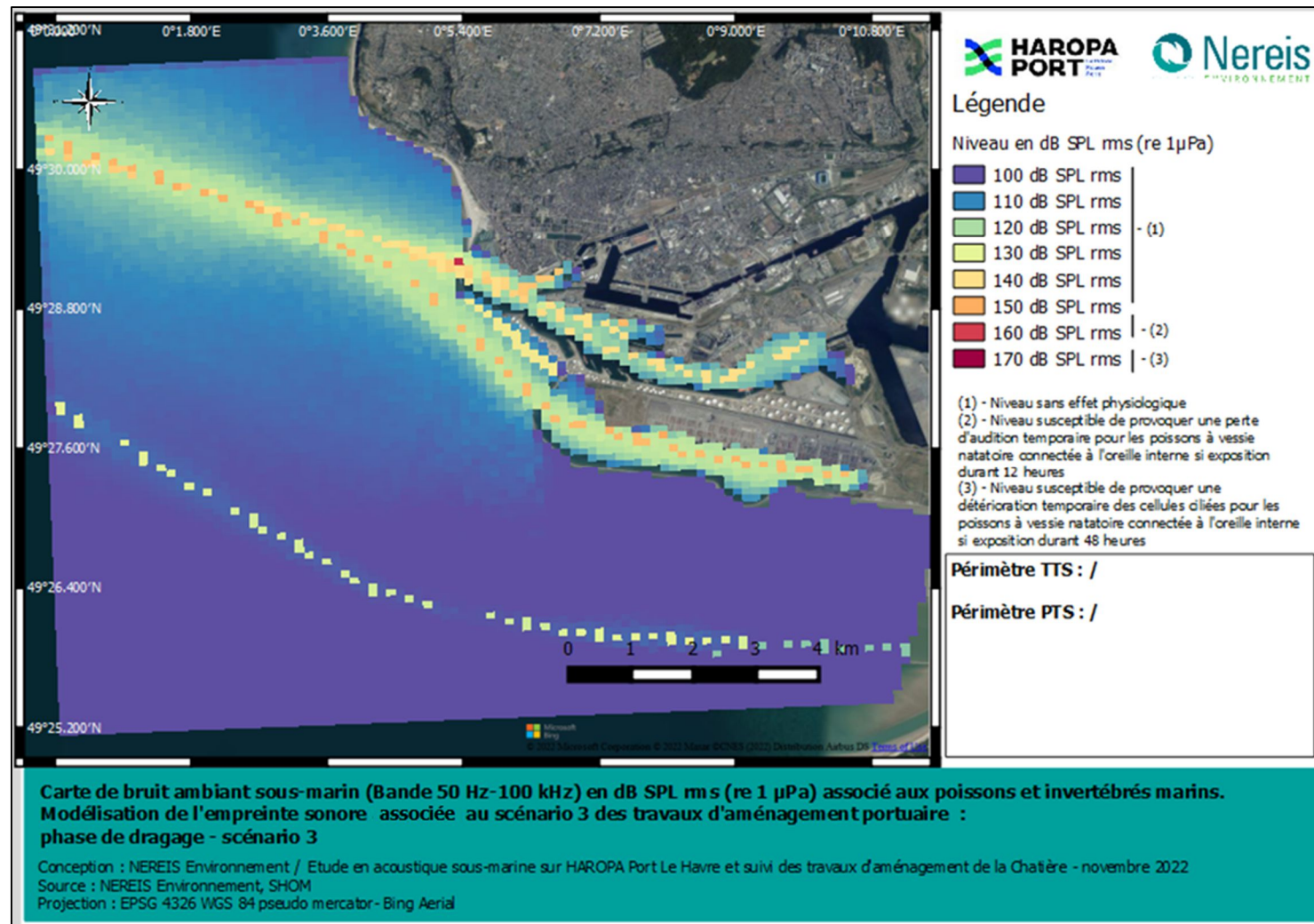


Figure 109. Carte de modélisation en sous-marine des effets sonores potentiels sur les poissons et invertébrés marins associés au scénario 3.



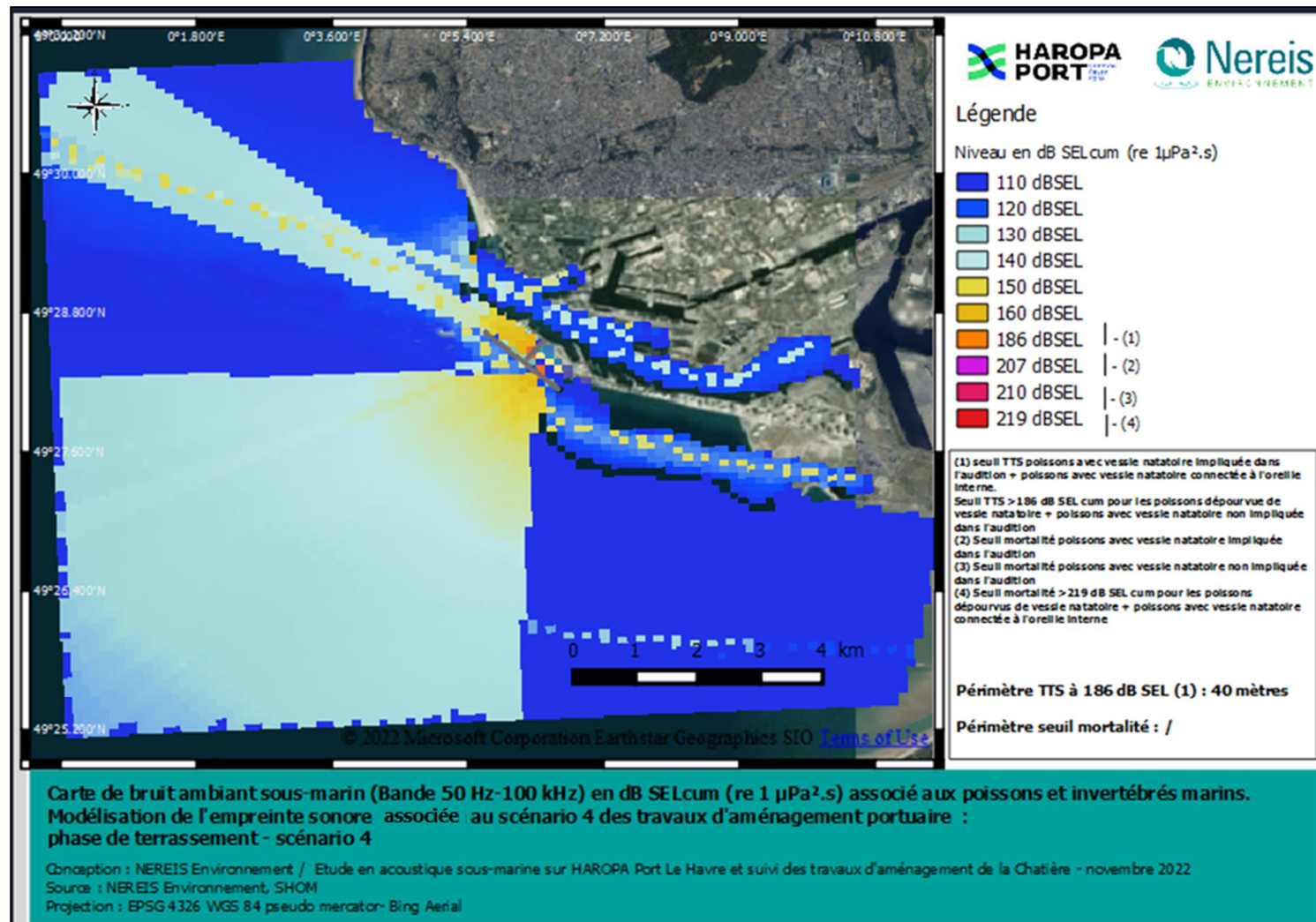


Figure 110. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les poissons et invertébrés marins associés au scénario 4.



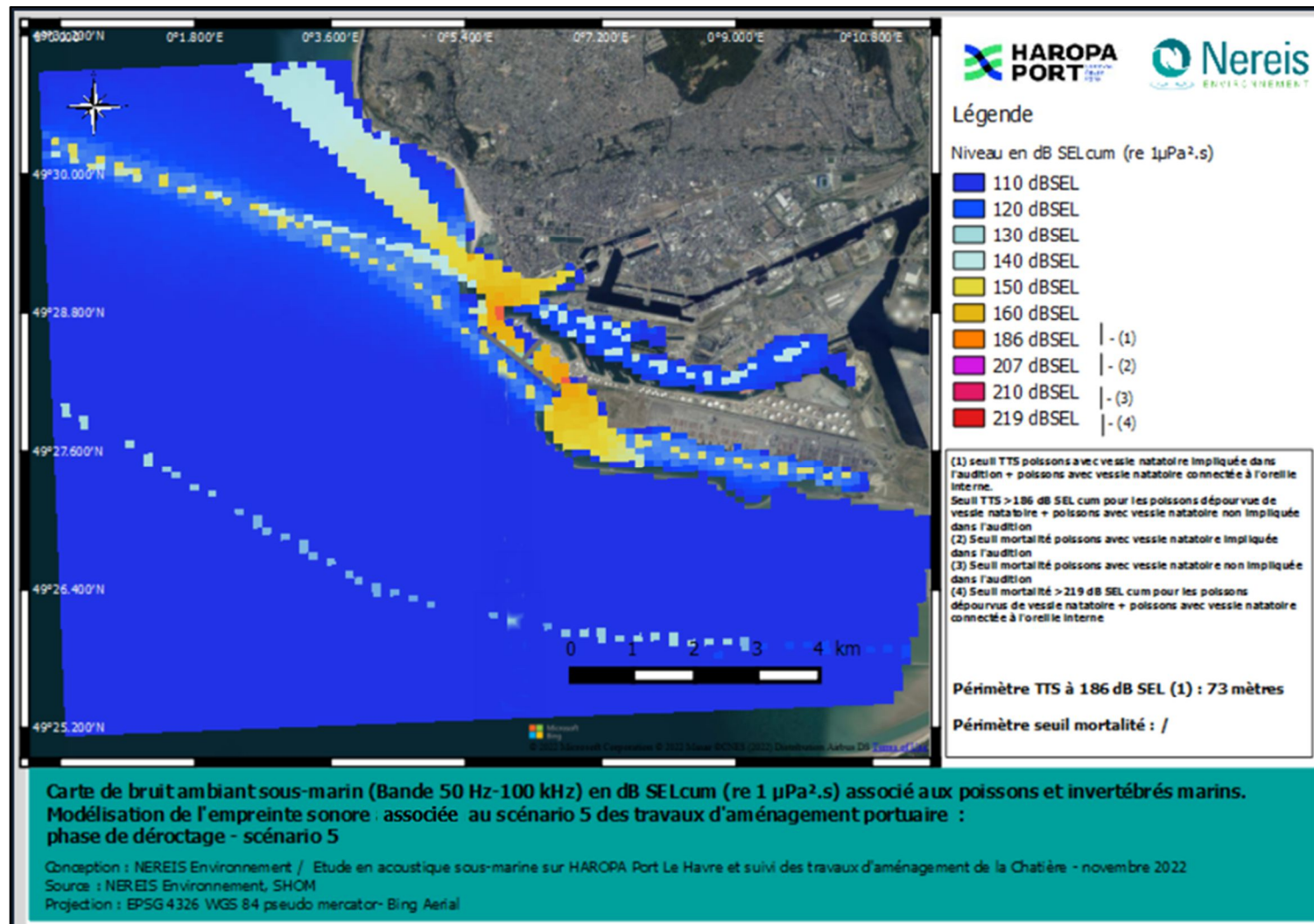


Figure 111. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les poissons et invertébrés marins associés au scénario 5.



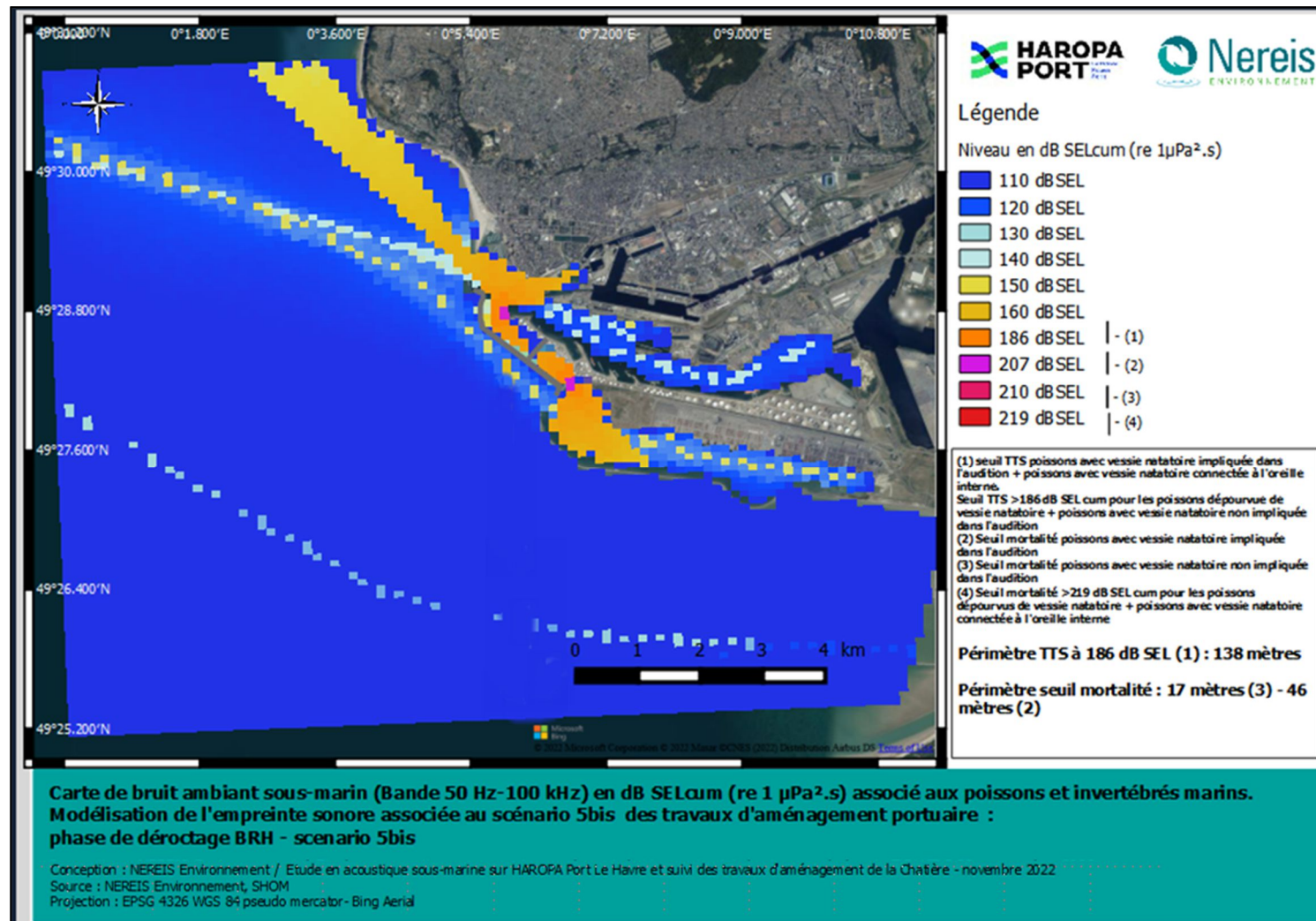


Figure 112. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les poissons et invertébrés marins associés au scénario 5bis.



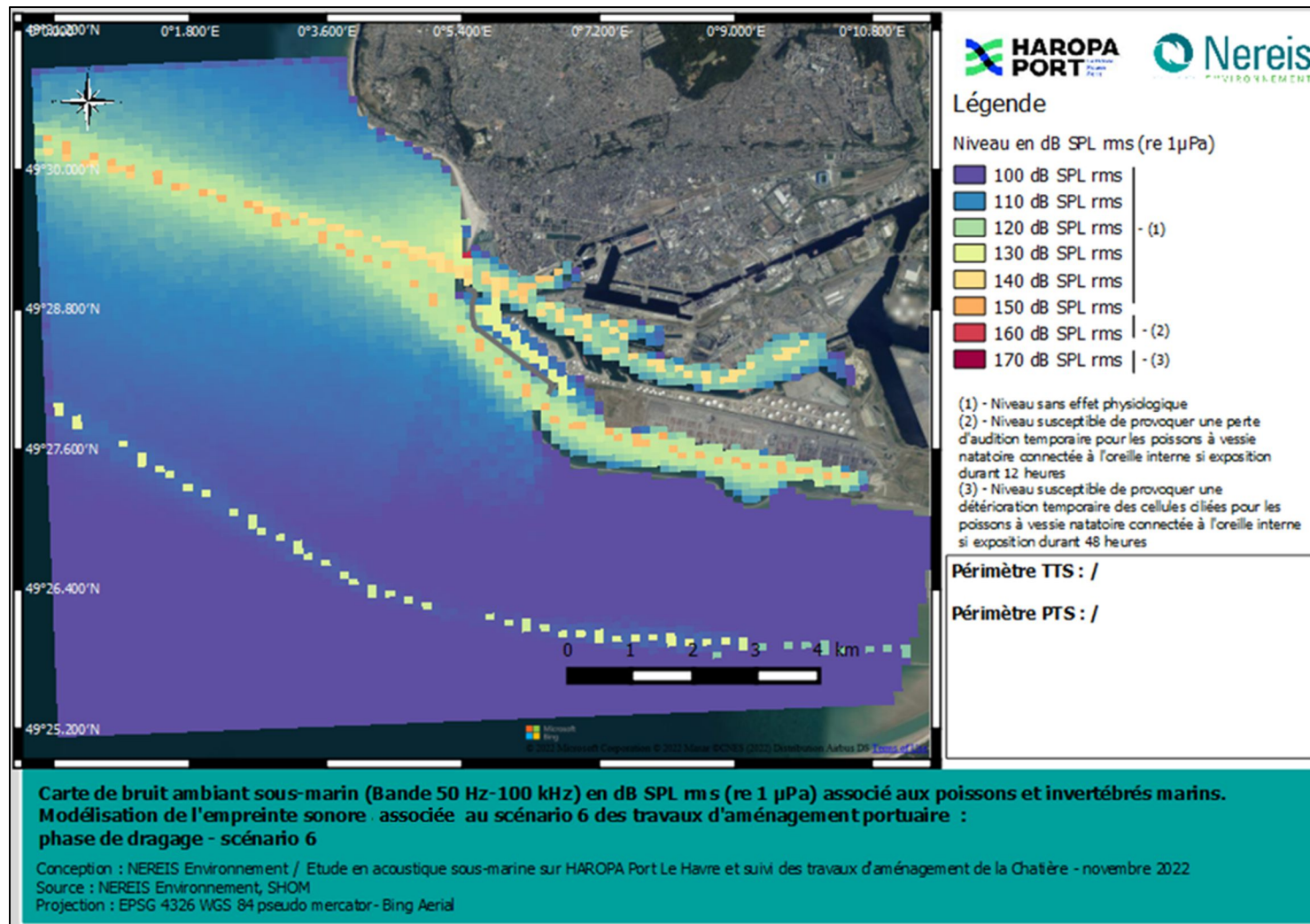


Figure 113. Carte de modélisation en acoustique sous-marine des effets sonores potentiels sur les poissons et invertébrés marins associés au scénario 6.



Tableau 29. Synthèse des effets sonores sur les groupes d'audition associés aux mammifères marins en fonction des scénarios acoustiques des travaux d'aménagement de la Chatière.

Groupes d'audition	Cétacés HF (Grand dauphin / dauphin commun / dauphin bleu et blanc / globicéphale noir)		Cétacés VHF (Marsouin commun)		Phocidés PCW (Phoque gris / phoque veau marin)	
	TTS	PTS	TTS	PTS	TTS	PTS
Scénario 1 campagne UXO (navire type Hyphos et sonar remorqué)	/	/	/	/	/	/
Scénario 2 (phase de dragage extérieur + port historique avec la Gambe d'Amfard et la Samuel de Champlain)	/	/	/	/	32 mètres	/
Scénario 3 (phase de dragage avec Gambe d'Amfard)	/	/	/	/	/	/
Scénario 4 (phase de terrassement) 2 chantiers principaux	/	/	713 mètres	400 mètres	70 mètres	42 mètres
Scénario 5 (phase de déroctage) 2 chantiers principaux	/	/	815 mètres	176 mètres	112 mètres	67 mètres
Scénario 5bis (phase de déroctage) 2 chantiers principaux avec BRH	170 mètres	/	957 mètres	450 mètres	350 mètres	91 mètres
Scénario 6 (phase de dragage avec la Samuel de Champlain)	/	/	/	/	/	/

Dans le cas des mammifères marins les scénarios 1,3 et 6 ne mettent pas en évidence de périmètres associés à des risques physiologiques TTS ou PTS pour l'ensemble des groupes d'audition considérés. Ces scénarios acoustiques modélisent l'empreinte sonore associée à des sources sonores de type continu. Le scénario 1 modélise l'empreinte sonore du navire de recherche, le sonar remorqué n'est pas considéré dans notre modélisation car ses caractéristiques d'émission estimées sont supérieures à 100 kHz et 400 kHz avec une durée d'impulsion et un site d'émission très faible. **Pour ces 3 scénarios les effets sonores estimés sur les groupes d'audition cétacés HF, VHF et les phocidés PCW sont considérés comme négligeables.**



Le scénario 2 qui modélise 2 opérations de dragage à l'intérieur du port historique et à l'extérieur au niveau des travaux de la Chatière met en évidence un périmètre TTS (au maximum de 32 mètres) uniquement dans le cas des phocidés PCW. Les effets sonores associés à ce scénario acoustique sont considérés comme faibles pour le groupe d'audition PCW.

Les scénarios acoustiques 4, 5 et 5bis modélisent les empreintes sonores associées à des sources sonores impulsionnelles (liées aux ateliers de déroctage et de terrassement). Des périmètres TTS et PTS sont mis en évidence dans le cas des cétacés VHF et des phocidés PCW. Pour les cétacés VHF les périmètres TTS varient entre 713 mètres au minimum (scénario 4) et 957 mètres au maximum (scénario 5bis) et sont directement liés aux niveaux d'émission des chantiers. Les périmètres PTS varient entre 176 mètres (scénario 5) et 450 mètres (scénario 5bis). Les ateliers de terrassement sont modélisés dans un milieu ouvert alors que les ateliers de déroctage sont modélisés dans les enceintes portuaires qui ont été construites. De même pour les phocidés PCW les périmètres TTS varient entre 70 mètres (scénario 4) à 350 mètres (scénario 5bis), et les périmètres PTS entre 42 mètres (scénario 4) et 91 mètres (scénario 5bis). **Les effets sonores sont considérés comme moyens pour les cétacés VHF et phocidés PCW dans le cas des scénarios 4, 5 et 5bis.**

Pour les cétacés HF seul un périmètre TTS de 170 mètres est observé dans le cas du scénario 5bis (modélisation de 2 ateliers de déroctage avec BRH). Dans ce cas les effets sont considérés comme faibles.

Tableau 30. Synthèse des effets sonores sur les groupes d'audition associés poissons, crustacés et céphalopodes en fonction des scénarios acoustiques des travaux d'aménagement de la Chatière.

Groupes d'audition	Barbue / Dragonnet lyre / Gobies / Limande / Maquereau commun / Plie / Petite roussette / Petite sole jaune / Raie bouclée / Sole commune / Turbot		Bar européen		Dorade grise / Epinoche / Grondin perlon / Merlan / Motelle à 5 barbillons / Tacaud commun		Aloses / Hareng / Sprat		Encornet commun / Petit calmar / Seiche commune / Coquille Saint-Jacques / Crevette grise / Etrille nca	
	Poissons dépourvus de vessie natatoire		Poissons avec vessie natatoire non-impliquée dans l'audition		Poissons avec vessie natatoire impliquée dans l'audition		Poissons avec vessie natatoire connectée à l'oreille interne		Céphalopodes / crustacés	
	TTS	PTS / Mortalité	TTS	PTS / Mortalité	TTS	PTS / Mortalité	TTS	PTS / Mortalité	TTS	PTS / Mortalité
Scénario 1 campagne UXO (navire type hyphos et sonar remorqué)*	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Scénario 2 (phase de dragage extérieur + port historique avec la Gambe d'Amfard et la Samuel de Champlain (SDC))*	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Scénario 3 (phase de dragage avec Gambe d'Amfard)*	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Scénario 4 (phase de terrassement) 2 chantiers principaux	<<40 mètres	/	<40 mètres	/	40 mètres	/	40 mètres	/	<<40 mètres	/
Scénario 5 (phase de déroctage) 2 chantiers principaux	<<73 mètres	/	<73 mètres	/	73 mètres	/	73 mètres	/	<<73 mètres	/
Scénario 5bis (phase de déroctage) 2 chantiers principaux avec BRH	<<138 mètres	/	<138 mètres	17 mètres	138 mètres	46 mètres	138 mètres	/	<<138 mètres	/
Scénario 6 (phase de dragage avec la SDC)*	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/



* L'évaluation des effets sonores associés aux scénarios 1,2 ,3 et 6 pour les poissons et invertébrés marins est établie en l'absence de seuils numériques TTS et PTS clairement définis mais selon les travaux de recherche issus de la littérature scientifique. Ainsi les effets sonores associés aux scénarios 1, 2, 3 et 6 sont considérés comme négligeables (ateliers associés à des sources sonores de type continu).

Des seuils acoustiques associés à des risques physiologiques de pertes d'audition temporaire TTS et de risque de mortalité ont été proposés pour les poissons et invertébrés marins dans le cas d'une exposition à une source sonore impulsionnelle (Popper & Hawkins, 2019), ce qui est le cas des ateliers associés aux scénarios 4, 5 et 5bis. Dans le cas de ces 3 ateliers, des périmètres TTS sont observés pour chacun des groupes d'audition associés aux poissons et invertébrés marins à 138 mètres au maximum (lié à un seuil TTS de 186 dB SELcum). **Seuls deux groupes d'audition de poisson présentent un périmètre associé à un risque de mortalité uniquement dans le cas du scénario 5bis à 17 mètres (pour les poissons avec vessie natatoire non impliquée dans l'audition) et à 46 mètres (pour les poissons avec vessie natatoire impliquée dans l'audition).**



7. Evaluation des impacts acoustiques associés aux différents travaux

L'impact se définit comme la transposition de l'effet sur une échelle de valeur (MEEDM, 2010). Il s'évalue en croisant l'effet et la sensibilité. Ainsi, le croisement des sensibilités, précédemment définies pour chaque espèce, avec les effets déterminés pour chacune des phases de travaux a permis d'évaluer les risques d'impact du bruit généré par les cycles de fonctionnement de la drague sur les mammifères marins potentiellement présents sur la zone d'étude. Pour cela, la matrice suivante a été appliquée (tableau 31) :

Tableau 31. Matrice d'évaluation des risques d'impact en fonction de la sensibilité et des effets.

Sensibilité \ Effet	Nulle ou négligeable		Faible		Moyenne		Forte	
	Nul ou négligeable	Nul	Négligeable	Nul	Négligeable	Nul	Négligeable	Nul
Faible	Nul	Négligeable	Faible		Faible		Moyen	
Moyen	Nul	Négligeable	Faible		Moyen		Fort	
Fort	Nul	Négligeable	Moyen		Moyen		Fort	

Les résultats du croisement des sensibilités et des effets pour les espèces potentiellement présentes sur la zone d'étude et pour chaque phase de travaux d'aménagement sont présentés dans les tableaux 32 et 33 ci-dessous.

Tableau 32. Synthèse des risques d'impact acoustique sur les groupes d'audition associés aux mammifères marins en fonction des scénarios acoustiques des travaux d'aménagement de la Chatière.

Groupes d'audition	Cétacés HF (Grand dauphin / dauphin commun / dauphin bleu et blanc / globicéphale noir)	Cétacés VHF (Marsouin commun)	Phocidés PCW (Phoque gris / phoque veau marin)
Scénario 1 campagne UXO (navire type Hyphos et sonar remorqué)	Négligeable	Négligeable	Négligeable
Scénario 2 (phase de dragage extérieur + port historique avec la Gambe d'Amfard et la Samuel de Champlain)	Négligeable	Négligeable	Moyen
Scénario 3 (phase de dragage avec Gambe d'Amfard)	Négligeable	Négligeable	Négligeable
Scénario 4 (phase de terrassement) 2 chantiers principaux	Négligeable	Fort	Fort
Scénario 5 (phase de déroctage) 2 chantiers principaux	Négligeable	Fort	Fort
Scénario 5bis (phase de déroctage) 2 chantiers principaux avec BRH	Faible	Fort	Fort
Scénario 6 (phase de dragage avec la Samuel de Champlain)	Négligeable	Négligeable	Négligeable



Dans le cas des mammifères marins, le risque d'impact acoustique est négligeable suite aux scénarios 1, 3 et 6 pour l'ensemble des groupes d'audition considérés.

Pour les cétacés HF le risque d'impact est considéré comme faible dans le cas du scénario 5bis et négligeable dans tous les autres scénarios. Ce risque d'impact faible pour les cétacés HF est directement lié à l'effet sonore faible combiné avec une sensibilité faible.

Pour les cétacés VHF le risque d'impact est négligeable pour les scénarios 1, 2, 3 et 6. Le risque d'impact est fort pour les scénarios 4, 5 et 5bis compte tenu de la sensibilité du marsouin commun qui est forte combinée avec les effets sonores moyens de ces 3 scénarios.

Pour les phocidés PCW, le risque d'impact est négligeable pour les scénarios 1, 3 et 6. Le risque d'impact est moyen dans le cas du scénario 2 compte tenu d'un périmètre TTS mis en évidence combiné avec une sensibilité forte pour ce groupe d'audition. Associé aux scénarios 4, 5 et 5bis le risque d'impact est fort (combinaison d'un effet sonore moyen avec une sensibilité forte).



Tableau 33. Synthèse des risques d'impact acoustique sur les groupes d'audition associés aux poissons et invertébrés marins en fonction des scénarios acoustiques des travaux d'aménagement de la Chatière.

Groupes d'audition	Barbue / Dragonnet lyre / Gobies / Limande / Maquereau commun / Plie / Petite roussette / Petite sole jaune / Raie bouclée / Sole commune / Turbot	Bar européen	Dorade grise / Epinoche / Grondin perlon / Merlan / Motelle à 5 barbillons / Tacaud commun	Aloses / Hareng / Sprat	Encornet commun / Petit calmar / Seiche commune / Coquille Saint-Jacques / Crevette grise / Etrille nca
	Poissons dépourvus de vessie natatoire	Poissons avec vessie natatoire non impliquée dans l'audition	Poissons avec vessie natatoire impliquée dans l'audition	Poissons avec vessie natatoire connectée à l'oreille interne	Céphalopodes / crustacés
Scénario 1 campagne UXO (navire type Hyphos et sonar remorqué)	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable
Scénario 2 (phase de dragage extérieur + port historique avec la Gambe d'Amfard et la Samuel de Champlain)	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable
Scénario 3 (phase de dragage avec Gambe d'Amfard)	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable
Scénario 4 (phase de terrassement) 2 chantiers principaux	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible
Scénario 5 (phase de déroctage) 2 chantiers principaux	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible
Scénario 5bis (phase de déroctage) 2 chantiers principaux avec BRH	Faible	Moyen	Faible	Faible	Faible
Scénario 6 (phase de dragage avec la Samuel de Champlain)	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable



Dans le cas des poissons et invertébrés marins, le risque d'impact acoustique est négligeable pour l'ensemble des groupes d'audition dans le cas des scénarios 1, 2, 3 et 6.

Dans le cas des scénarios 4, 5 et 5bis les risques d'impact sont faibles pour l'ensemble des groupes d'audition (liés à la présence d'un périmètre TTS au minimum) sauf dans le cas du scénario 5bis pour le groupe d'audition associé aux poissons avec vessie natatoire non connectée à l'oreille interne avec un risque d'impact moyen (combinaison d'un effet sonore moyen avec une sensibilité moyenne).

8. Mesures de mitigation / recommandations

Les mesures de mitigation visent dans notre cas d'étude en acoustique sous-marine à réduire l'empreinte sonore associée aux travaux et donc à limiter les effets sonores potentiel sur la faune marine.

Ces mesures ont donc pour objectifs d'être adaptées aux travaux et de proposer des ajustements techniques pour limiter les effets sonores et, ou des stratégies de surveillance afin de détecter la présence de mammifères marins dans un périmètre proche du chantier.

Dans le cadre des futurs travaux de la Chatière les mesures proposées sont les suivantes :

- Surveillance du plan d'eau et en particulier d'un périmètre prédéterminé autour du chantier par du personnel qualifié type MMO (Marine Mammal Observer) ;
- Sensibilisation du personnel du chantier aux enjeux acoustiques associés aux travaux en cours ;
- Mise en place d'une stratégie adaptée en cas de présence d'un mammifère marin dans le périmètre de surveillance. A ce titre des fiches de réactions ou fiches de bonnes pratiques seraient à établir afin de proposer une stratégie acoustique adaptée ;
- Définition d'un protocole de gestion progressive de l'empreinte sonore émise associée aux travaux de type déroctage par ramp-up ou soft-start ;
- Mise en place de barrières acoustiques type rideaux de bulles afin de limiter l'empreinte sonore associée aux travaux potentiellement les plus impactants (en particulier sur les scénarios 4, 5 et 5bis) ;
- Etablissement d'un planning des travaux en particulier pour les ateliers générant les empreintes sonores maximales (scénarios 4, 5 et 5bis) en privilégiant les périodes de travaux adaptées aux cycles biologiques des espèces marines ;
- Contrôle acoustique des niveaux de bruit émis dans le cadre des différents ateliers afin de vérifier l'empreinte sonore estimée des différents travaux. Cette

stratégie permet d'ajuster le cas échéant la modélisation acoustique réalisée et donc d'adapter les mesures de mitigation.

9. Conclusion

L'étude en acoustique sous-marine réalisée constitue la première phase dans le suivi acoustique associé aux travaux d'aménagement du bassin T. DUCROCQ et des travaux d'aménagement de la Chatière, avec notamment la création d'une future digue et d'un futur chenal entre l'avant-port historique et l'avant-port Port 2000. Ces travaux sont de nature à introduire dans le milieu marin des sources sonores de type impulsionnel et continu de forts niveaux.

Compte tenu de la crise sanitaire liée au COVID, les travaux d'aménagement de ce bassin ont été décalés.

- Définition d'un état initial acoustique

L'étude réalisée a permis d'établir un état initial du bruit ambiant sous-marin avant les travaux d'aménagement. Ainsi des mesures acoustiques *in situ* ont été réalisées entre les 2 et 5 novembre 2020 en associant des mesures en point fixe (avec un enregistreur acoustique large bande OSEAN immergé dans le bassin T. DUCROCQ) avec des radiales acoustiques en dérive (depuis le navire L'ECLAT en déployant l'hydrophone de la chaîne acoustique MARANTZ/TASCAM sur l'avant-port et les bassins associés à savoir : bassin de la MANCHE, bassin Théophile DUCROCQ, bassin René COTY, bassin du PACIFIQUE, Chenal d'accès à Port 2000, bassin Hubert RAOUL-DUVAL. Cette stratégie d'acquisition de données acoustiques a permis d'augmenter l'échantillonnage spatio-temporel d'une part et d'établir l'hétérogénéité entre les points de mesure (donc entre les bassins portuaires) d'autre part. L'ensemble des mesures réalisées met ainsi en évidence la contribution significative du trafic maritime à l'échelle du port.

Au total ce sont donc 700 mouvements de navires qui ont été comptabilisés à l'intérieur de la zone d'étude dont 240 dans le bassin T. DUCROCQ. Plus de la moitié de ces mouvements correspondent à des remorqueurs et des navires techniques. Ces navires travaillent sur des bassins et de ce fait contribuent à une élévation du niveau de bruit pendant de longues périodes. Les autres mouvements de navires sont attribués :

- Aux accostages, appareillages des navires commerciaux dans les différents bassins ;
- Aux transits de navires commerciaux entre les bassins ou les canaux en communication avec HAROPA Port Le Havre.

Le suivi acoustique au point fixe OSEAN met ainsi en évidence entre le 02/11/2020 et le 05/11/2020 une évolution du niveau de bruit large bande entre 108,1 et 171,5 dB re 1µPa. Le niveau moyen observé entre le 02/11/2020 à 10h00 et le



05/11/2020 à 07h50 est de 129,2 dB re 1µPa. Les évolutions de niveau de bruit sont liées exclusivement aux passages des navires.

Une phase d'évaluation des pertes acoustiques à l'échelle du bassin T. DUCROCQ a été réalisée pour ajuster le modèle acoustique dédié.

L'analyse des données de trafic maritime à l'échelle de HAROPA Port Le Havre pour l'année 2018 a permis d'établir en fonction de la saisonnalité des statistiques de trafic minimum, moyen et maximum. Des gabarits acoustiques ont été définis selon le type de navire. Ils sont issus des mesures acoustiques, et sont intégrés dans la modélisation des cartes de bruit ambiant sous-marin représentatives de scénarios en fonction de la saisonnalité et de la densité du trafic de navire.

Enfin une synthèse bibliographique a été établie pour définir la faune marine (mammifères marins, poissons et invertébrés marins) présente à l'échelle de l'aire d'étude éloignée d'une part et selon la sensibilité auditive d'autre part.

- **Modélisation de l'empreinte sonore associée aux futurs travaux d'aménagement de la Chatière**

Chacune des principales phases de travaux d'aménagement de la Chatière a fait l'objet d'une modélisation acoustique. 7 scénarios acoustiques ont ainsi été modélisés. Les empreintes sonores associées à chaque scénario sont considérées comme maximales car les conditions de propagation retenues ainsi que les gabarits acoustiques associés aux ateliers modélisés sont maximums. De plus les paramètres géo acoustiques retenus sont favorables à la propagation des ondes sonores.

- **Evaluation des effets sonores associés aux futurs travaux d'aménagement de la Chatière**

L'analyse des effets sonores associés aux futurs travaux d'aménagement de la Chatière a permis d'établir les différents périmètres de risques physiologiques de perte d'audition temporaire (TTS) ou permanente (PTS) selon des scénarios acoustiques.

Ces scénarios acoustiques reflètent les empreintes sonores associées aux différents ateliers du chantier d'aménagement portuaire. Les 7 scénarios acoustiques mettent en œuvre des sources sonores de type continu ou impulsionnel. Les résultats associés à ces modèles peuvent être considérés comme maximalistes car ils supposent que l'espèce marine ciblée reste à proximité immédiate des travaux durant la durée effective des travaux modélisés ce qui est peu probable pour des espèces sauvages. Les modélisations ne mettent pas en évidence de périmètres associés à des risques physiologiques TTS et PTS dans le cas des scénarios 1, 3 et 6 pour l'ensemble des groupes d'audition associés aux mammifères marins.

Dans le cas des cétacés HF seuls des effets faibles sont attendus pour le scénario 5bis avec l'utilisation de BRH dans les deux ateliers modélisés (un périmètre TTS de 170 mètres est attendu autour des ateliers).



Dans le cas des cétacés VHF des effets sonores moyens sont attendus pour les scénarios 4, 5 et 5bis avec des périmètres TTS entre 713 et 957 mètres, et des périmètres PTS entre 176 mètres et 450 mètres.

Pour les phocidés PCW les scénarios acoustiques modélisés mettent en évidence des effets sonores faibles dans le cas du scénario 2 (périmètre TTS de 32 mètres) et moyens dans le cas des scénarios 4, 5 et 5bis avec des périmètres TTS entre 70 mètres et 350 mètres, et des périmètres PTS entre 42 mètres et 91 mètres.

Dans le cas des poissons et invertébrés marins les effets sonores sont négligeables pour l'ensemble des groupes d'audition dans le cas des scénarios 1, 2, 3 et 6.

Dans le cas des scénarios 4, 5 et 5bis, des périmètres TTS sont observés pour chacun des groupes d'audition associés aux poissons et invertébrés marins à 138 mètres au maximum (lié à un seuil TTS de 186 dB SELcum). Seuls deux groupes d'audition de poisson présentent un périmètre associé à un risque de mortalité uniquement dans le cas du scénario 5bis à 17 mètres (pour les poissons avec vessie natatoire non impliquée dans l'audition) et à 46 mètres (pour les poissons avec vessie natatoire impliquée dans l'audition).

- **Evaluation du risque d'impact acoustique associé aux travaux d'aménagement**

Dans le cas des mammifères marins, le risque d'impact acoustique est négligeable suite aux scénarios 1, 3 et 6 pour l'ensemble des groupes d'audition considéré.

Pour les cétacés HF le risque d'impact est considéré comme faible dans le cas du scénario 5bis et négligeable dans tous les autres scénarios. Ce risque d'impact faible pour les cétacés HF est directement lié à l'effet faible.

Pour les cétacés VHF le risque d'impact est négligeable pour les scénarios 1, 2, 3 et 6. Le risque d'impact est fort pour les scénarios 4, 5 et 5bis compte tenu de la sensibilité du marsouin commun qui est forte combinée avec les effets sonores moyens de ces 3 scénarios.

Pour les phocidés PCW, le risque d'impact est négligeable pour les scénarios 1, 3 et 6. Le risque d'impact est moyen dans le cas du scénario 2 compte tenu d'un périmètre TTS mis en évidence combiné avec une sensibilité forte pour ce groupe d'audition. Associé aux scénarios 4, 5 et 5bis le risque d'impact est fort (combinaison d'un effet moyen avec une sensibilité forte).

Pour les poissons et invertébrés marins, le risque d'impact acoustique est négligeable pour l'ensemble des groupes d'audition dans le cas des scénarios 1, 2, 3 et 6. Pour les scénarios 4, 5 et 5bis les risques d'impact sont faibles pour l'ensemble des groupes d'audition (liés à la présence d'un périmètre TTS au minimum) sauf dans le cas du scénario 5bis pour le groupe d'audition associé aux poissons avec vessie natatoire non impliquée dans l'audition avec un risque d'impact moyen (combinaison d'un effet moyen avec une sensibilité moyenne).

- Proposition de mesures de mitigation

Une série de mesures de mitigation est proposée afin de réduire les effets sonores potentiels des différents travaux d'aménagement de la Chatière sur les différentes espèces marines (mammifères marins, poissons et invertébrés marins). Ces mesures sont recommandées en particulier pour les scénarios qui mettent en œuvre des ateliers avec des sources sonores de type impulsionnel (cas des ateliers de terrassement et de déroctage). Ces mesures passent par des stratégies de ramp up ou de soft start, de mise en place de rideaux de bulles, des stratégies de surveillance visuelle du plan d'eau et de contrôle acoustique des empreintes sonores des travaux notamment.



Bibliographie

- Anderson, P. A. & Mann, D. A., 2011. Evoked potential audiogram of the lined seahorse, *Hippocampus erectus* (Perry), in terms of sound pressure and particle acceleration. *Environmental Biology of Fishes* 91(3), 251-259.
- Charifi, M., Sow, M., Ciret, P., Benomar, S. & Massabuau, J.-C., 2017. The sense of hearing in the Pacific oyster, *Magallana gigas*. *PLoS ONE* 12(10), e0185353.
- Davenport, J., 1999. Swimbladder volume and body density in an armoured benthic fish, the streaked gurnard. *Journal of Fish Biology* 55, 527-534.
- David, A., 2011. Underwater environmental impact assessments on marine mammals and fish by high power anthropogenic radiated sound. *Proceedings of Acoustics 2011, The 2011 Conference of the Australian Acoustical Society, Gold Coast*.
- Delpech, J.-P., Mahe, K., Mehault, S., Rostiaux, E., Biais, G., Coppin, F. & Vaz, S., 2007. Evaluation des ressources halieutiques par les campagnes scientifiques françaises - Façade "Manche est" et façade "Loire-Gironde". IFREMER, 149 p.
- Duhamel, S., de Roton, G., Lefrançois, T., Mayot, S., Potel, B., Gouneau, N. & Feunteun, E., 2002. Etat actuel de la ressource halieutique - Rapport final. Cellule de Suivi du Littoral Haut-Normand & Université de La Rochelle, 46 p.
- Edmonds, N. J., Firmin, C. J., Goldsmith, D., Faulkner, R. C. & Wood, D. T., 2016. A review of crustacean sensitivity to high amplitude underwater noise: Data needs for effective risk assessment in relation to UK commercial species. *Marine Pollution Bulletin* 108(1), 5-11.
- Forest, A., 2001. Ressources halieutiques hors quotas du Nord Est Atlantique : bilan des connaissances et analyse de scénarios d'évolution de la gestion. IFREMER, Contrat Ifremer/MAPA – Réf. 99-I1-03-01, Vol. 1 & 2.
- Hammond, P. S., Berggren, P., Benke, H., Borchers, D. L., Collet, A., Heide-Jørgensen, M. P., Heimlich, S., Hiby, A. R., Leopold, M. F. & Øien, N., 2002. Abundance of harbour porpoise and other cetaceans in the North Sea and adjacent waters. *Journal of Applied Ecology* 39(2), 361-376.
- Hammond, P. S., Lacey, C., Gilles, A., Viquerat, S., Börjesson, P., Herr, H., Macleod, K., Ridoux, V., Santos, M. B., Scheidat, M., Teilmann, J., Vingada, J. & Øien, N., 2017. Estimates of cetacean abundance in European Atlantic waters in summer 2016 from the SCANS-III aerial and shipboard surveys. 39 p.



Hammond, P. S., Macleod, K., Berggren, P., Borchers, D. L., Burt, L., Cañadas, A., Desportes, G., Donovan, G. P., Gilles, A., Gillespie, D., Gordon, J., Hiby, L., Kuklik, I., Leaper, R., Lehnert, K., Leopold, M., Lovell, P., Øien, N., Paxton, C. G. M., Ridoux, V., Rogan, E., Samarra, F., Scheidat, M., Sequeira, M., Siebert, U., Skov, H., Swift, R., Tasker, M. L., Teilmann, J., Van Canneyt, O. & Vázquez, J. A., 2013. Cetacean abundance and distribution in European Atlantic shelf waters to inform conservation and management. *Biological Conservation* **164**, 107-122.

Hawkins, A. D. & Johnstone, A. D. F., 1978. The hearing of the Atlantic Salmon, *Salmo salar*. *Journal of Fish Biology* **13**(6), 655-673.

Ifremer. Système d'Informations Halieutiques, 2020. Quartier maritime Le Havre - 2019. Activité des navires de pêche. Ifremer, 12 p.

Jensen, F.B., Kuperman, W.A., Porter, M.B. & Schmidt, H., 2011. *Computational Ocean Acoustics*. Springer, New York, 794 p.

Kaifu, K., Akamatsu, T. & Segawa, S., 2008. Underwater sound detection by cephalopod statocyst. *Fisheries Science* **74**(4), 781-786.

Ladich, F. & Schulz-Mirbach, T., 2016. Diversity in Fish Auditory Systems: One of the Riddles of Sensory Biology. *Frontiers in Ecology and Evolution* **4**, 28.

Laran, S., Authier, M., Blanck, A., Doremus, G., Falchetto, H., Monestiez, P., Pettex, E., Stephan, E., Van Canneyt, O. & Ridoux, V., 2017. Seasonal distribution and abundance of cetaceans within French waters- Part II: The Bay of Biscay and the English Channel. *Deep Sea Research Part II* **141**, 31-40.

MacLeod, C. D., Brereton, T. & Martin, C., 2009. Changes in the occurrence of common dolphins, striped dolphins and harbour porpoises in the English Channel and Bay of Biscay. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* **89**(5), 1059-1065.

Mahe, K., Delpech, J.-P., Coppin, F. & Carpentier, A., 2006. Les débarquements internationaux en Manche orientale de 2000 à 2004. IFREMER, 31 p.

Mann, D. A., Higgs, D. M., Tavalga, W. N., Souza, M. J. & Popper, A. N., 2001. Ultrasound detection by clupeiform fishes. *The Journal of the Acoustical Society of America* **109**(6), 3048-3054.

MEEDDM, 2010. Guide d'évaluation des incidences des projets d'extraction de matériaux en mer sur les sites Natura 2000 - 2. Guide méthodologique. Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer, 198 p.



Mooney, T. A., Hanlon, R., Madsen, P. T., Christensen-Dalsgaard, J., Ketten, D. R. & Nachtigall, P. E., 2012. Potential for Sound Sensitivity in Cephalopods. *In: The Effects of Noise on Aquatic Life*. A. N. Popper & A. Hawkins (Eds). Springer, New York, pp 125-128.

Morin, J., Duhamel, S. & De Roton, G., 2010. Poissons, habitats et ressources halieutiques : cas de l'estuaire de la Seine. GIP Seine-Aval, Fascicules Seine-Aval 2.5, 76 p.

Morin, J., Brind'Amour, A., Fisson, C., Bacq, N., Boulet, M., Guillerme, D., Berthel , O. & Martin, J., 2015. Peuplements halieutiques en estuaire de Seine et baie de Seine orientale – Distribution et évolution des abondances des principales espèces captur es au chalut à perche lors des campagnes scientifiques r alis es par l'Ifremer entre 1995 et 2010. GIP Seine-Aval-IFREMER, 74 p.

MTE, 2020. Préconisations pour limiter les impacts des émissions acoustiques en mer d'origine anthropique sur la faune marine. 209 p.

National Research Council, 2003. Ocean noise and marine mammals. *The National Academic Press*, Washington, 192 p.

Nedwell, J. R., Turnpenny, A. W. H., Lovell, J., Parvin, S. J., Workman, R., Spinks, J. A. L. & Howell, D., 2007. A validation of the dB_{nt} as a measure of the behavioural and auditory effects of underwater noise. Subacoustech Ltd., Subacoustech Report No. 534R1231, 74 p.

NMFS, 2018. 2018 Revisions to: Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing (Version 2.0): Underwater Thresholds for Onset of Permanent and Temporary Threshold Shifts. U.S. Department of Commerce, NOAA, NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-59, 167 p.

Nowacek, D. P., Thorne, L. H., Johnston, D. W. & Tyack, P. L., 2007. Responses of cetaceans to anthropogenic noise. *Mammal Review* **37** (2), 81-115.

Popper, A. N. & Hawkins, A. D., 2019. An overview of fish bioacoustics and the impacts of anthropogenic sounds on fishes. *Journal of Fish Biology* **94**(5), 692-713.

Sand, O. & Enger, P. S., 1973. Evidence For an Auditory Function of the Swimbladder in the Cod. *Journal of Experimental Biology* **59**(2), 405.

Southall, B. L., Bowles, A. E., Ellison, W. T., Finneran, J. J., Gentry, R. L., Greene, C. R., Kastak, D., Ketten, D. R., Miller, J. H., Nachtigall, P. E., Richardson, W. J., Thomas,



J. A. & Tyack, P. L., 2007. Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Initial Scientific Recommendations. *Aquatic Mammals* **33**(4), 411-521.

Southall, B. L., Finneran, J. J., Reichmuth, C., Nachtigall, P. E., Ketten, D. R., Bowles, A. E., Ellison, W. T., Nowacek, D. P. & Tyack, P. L., 2019. Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Updated Scientific Recommendations for Residual Hearing Effects. *Aquatic Mammals* **45**(2), 125-232.

Vincent, C., Huon, M., Caurant, F., Dabin, W., Deniau, A., Dixneuf, S., Dupuis, L., Elder, J.-F., Fremau, M.-H., Hassani, S., Hemon, A., Karpouzopoulos, J., Lefeuvre, C., McConnell, B. J., Moss, S. E. W., Provost, P., Spitz, J., Turpin, Y. & Ridoux, V., 2017. Grey and harbour seals in France: Distribution at sea, connectivity and trends in abundance at haulout sites. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* **141**, 294-305.

Wenz, G. M., 1962. Acoustic Ambient Noise in the Ocean: Spectra and Sources. *The Journal of the Acoustical Society of America* **34** (12), 1936-1956.





www.nereisenvironnement.com