

ANNEXE L

Évaluation acoustique marine



Évaluation des nuisances sonores de la construction du projet d'amélioration de la navigation à Port aux Basques

Modélisation du bruit acoustique dans l'air et sous-marin

Soumis à :

Lorna Campbell

CBCL

Bon de commande : 001 au titre du contrat de sous-traitance daté du 1^{er} juillet 2020

Auteurs :

Jorge E. Quijano

Zahra Alavizadeh

Mikhaïl M. Zykov

Marie-Noël R. Matthews

16 juin 2021

P001564-001

Document 02176

Version 3.0

JASCO Applied Sciences (Canada) Ité

Bureau 2305, 4464, rue Markham

Victoria (C.-B.) V8Z 7X8 Canada

Tél. : +1-250-483-3300

Télec. : +1-250-483-3301

www.jasco.com



Citation suggérée :

Quijano, J.E., Alavizadeh, Z., Zykov, M.M. et M-N.R. Matthews. 2021. *Évaluation des nuisances sonores de la construction du projet d'amélioration de la navigation à Port aux Basques : Modélisation du bruit acoustique dans l'air et sous-marin* Document 02176, version 3.0. Rapport technique rédigé par JASCO Applied Sciences pour le compte de CBCL.

Avertissement :

Les résultats présentés ici s'inscrivent dans le contexte spécifique décrit dans le présent rapport. Ils pourraient être mal interprétés s'ils n'étaient pas examinés à la lumière de l'ensemble des renseignements contenus dans le présent rapport. Par conséquent, si des informations issues du présent rapport sont utilisées dans des documents destinés au public ou aux autorités de régulation, ces documents doivent clairement citer le rapport original, qui devra être mis à la disposition des destinataires dans son intégralité et sans modification.

Table des matières

Résumé.....	7
1. Introduction	1
2. Critères relatifs aux effets du bruit	3
3. Méthodes	6
3.1. Sources acoustiques.....	6
3.1.1. Bruit lié aux opérations de forage	6
3.1.2. Bruit lié aux opérations de dynamitage du substrat rocheux.....	9
3.1.3. Bruit lié aux opérations de dragage.....	13
3.2. Modèles de propagation du son	15
3.2.1. Modélisation du son dans l'air.....	15
3.2.2. Modélisation des bruits impulsionnels (dynamitage).....	15
3.2.3. Modélisation des bruits continus (dragage et forage)	17
4. Résultats	18
4.1. Site de l'île Vardy.....	18
4.1.1. Dynamitage au-dessus de la ligne de flottaison (scénario 1).....	18
4.1.2. Forage (scénario 2).....	26
4.1.3. Dynamitage sous-marin (scénario 3)	29
4.1.4. Dragage (scénario 4).....	33
4.2. Site de Baldwin Rock	36
4.2.1. Forage (scénario 5).....	36
4.2.2. Dynamitage sous-marin (scénario 6)	39
4.2.3. Dragage (scénario 7).....	43
5. Résumé et conclusions	46
5.1. Modélisation du son dans l'air	46
5.2. Modélisation du son sous-marin	46
Glossaire.....	49
Bibliographie	55
Annexe A. Mesures acoustiques	1
ANNEXE A. MESURES ACOUSTIQUES	A-1
ANNEXE B. CRITÈRES RELATIFS AUX RÉPERCUSSIONS	B-1
ANNEXE C. MÉTHODOLOGIE ET PARAMÈTRES DE MODÉLISATION.....	C-1

Figures

Figure 1. Carte de la zone du projet.....	2
Figure 2. bookmark12 Spectre de niveau de source par bande de décédécade les opérations de forage : Niveau de source (dB par rapport à $1 \mu\text{Pa}\cdot\text{m}^2$) pour la modélisation du champ de niveau de pression acoustique (SPL) (utilisé dans l'évaluation de la perturbation comportementale) et du niveau de la source d'énergie (dB par rapport à $1 \mu\text{Pa}^2\text{m}^2\text{s}$) pour la modélisation du champ $\text{SEL}_{24\text{h}}$ (utilisé pour l'évaluation du déplacement permanent du seuil/déplacement temporaire du seuil [PTS/TTS]).	7
Figure 3. Niveaux de source d'énergie selon la fréquence dans les bandes de fréquences en décédécade, correspondant à une détonation souterraine de (à gauche) de 48 kg QNE et (à droite) de 37 kg QNE	9
Figure 4 Réglage du facteur d'atténuation du logiciel ConWep : Niveau de pression acoustique de crête modélisé (maximum surprofondeur) comparé aux fonctions de régression fournies par Hempen <i>et al.</i> (2007) et Oriard (2002).	10
Figure 5. Modélisation du niveau de source de l'explosion, site de Baldwin Rock : (à gauche) Onde de pression en fonction du temps pour une détonation souterraine de 56 kg de TNT. (À droite) Niveaux de source d'énergie correspondants en fonction de la fréquence dans les bandes de fréquences de 10 décédécades	
Figure 6. Modélisation du niveau de source de l'explosion, site de l'île Vardy : (à gauche) Onde de pression en fonction du temps pour une détonation souterraine de 48 kg de TNT. (À droite) Niveaux de source d'énergie correspondants en fonction de la fréquence dans les bandes de fréquences de 11 décédécades	
Figure 7. bookmark20 Spectre de niveau de source par bande de décédécade les opérations de forage : Niveau de source (dB par rapport à $1 \mu\text{Pa}\cdot\text{m}^2$) pour la modélisation du champ de niveau de pression acoustique (SPL) et du niveau de source d'énergie (dB par rapport à $1 \mu\text{Pa}^2\text{m}^2\text{s}$) pour la modélisation du champ $\text{SEL}_{24\text{h}}$.	12
Figure 8. Scénario 1, carnivores phocidés du groupe d'audition dans l'air : Champ acoustique $\text{SEL}_{24\text{h}}$ résultant de la détonation de 84 charges de 37 kg de TNT, avec les courbes de niveau correspondant au seuil $\text{SEL}_{24\text{h}}$ TTS.	16
Figure 9. Scénario 1, autres carnivores marins du groupe d'audition dans l'air : Champ acoustique $\text{SEL}_{24\text{h}}$ résultant de l'explosion de 84 charges de 37 kg de TNT	17
Figure 10. Scénario 1, carnivores phocidés et autres carnivores marins du groupe d'audition dans l'air : bookmark34 PK du champ acoustique résultant de la détonation d'une charge unique de 48 kg de TNT, avec la courbe du seuil PK de perturbation comportementale.	18
Figure 11. Scénario 1, oiseaux : Champ de pression acoustique (SPL) pondéré A résultant de la détonation d'une charge unique de 48 kg de TNT	19
Figure 12. Scénario 1, pinnipèdes du groupe d'audition dans l'air : Champ acoustique $\text{SEL}_{24\text{h}}$ résultant de la détonation de 84 charges de 37 kg de TNT, avec les courbes du seuil $\text{SEL}_{24\text{h}}$ de perturbation comportementale.	20
Figure 13. (À gauche) Graphique en coupe verticale illustrant la dépendance du SPL pondéré A par rapport à la distance et à l'altitude, résultant de la détonation d'une charge unique de 48 kg de TNT au point le plus élevé de l'île Vardy. (À droite) SPL pondéré A en fonction de l'altitude par rapport au niveau de la mer à l'hôtel St. Christopher	21
Figure 14. Scénario 2, seuils de blessure chez les mammifères marins : Courbes du seuil de niveau d'exposition acoustique pondéré sur 24 h ($\text{SEL}_{w24\text{h}}$) résultant des forages à l'île Vardy.	23
Figure 15. Scénario 2, seuils de blessure chez les poissons et seuil comportemental chez les mammifères marins : Courbes du seuil et du champ de pression acoustique (SPL) résultant des forages à l'île Vardy.	24
Figure 16. Scénario 3, seuils de blessure chez les mammifères marins : Courbes du seuil de niveau d'exposition acoustique pondéré sur 24 h ($\text{SEL}_{w24\text{h}}$) résultant de la détonation de 84 charges à l'île Vardy.	
Figure 17. Scénario 3, seuil comportemental des mammifères marins : Courbes du seuil et du champ de pression acoustique (SPL) résultant de la détonation des charges à l'île Vardy.	27
Figure 18. Scénario 3, seuils de blessure aux poissons et invertébrés : Courbes du seuil zéro à la crête et crête à crête résultant de la détonation de charges à l'île Vardy	28
Figure 19. Scénario 4, seuils de blessure chez les mammifères marins : Courbes du seuil de niveau d'exposition acoustique pondéré sur 24 h ($\text{SEL}_{w24\text{h}}$) résultant du dragage à l'île Vardy.	
Figure 20. Scénario 4, seuil comportemental des mammifères marins : Courbes du seuil et du champ de pression acoustique (SPL) résultant du dragage à l'île Vardy. Les distances par rapport aux seuils de blessure pour les poissons sont trop courtes pour être représentées sur une carte	31
Figure 21. Scénario 5, seuils de blessure chez les mammifères marins : Courbes du seuil de niveau d'exposition acoustique pondéré sur 24 h ($\text{SEL}_{w24\text{h}}$) résultant du forage à Baldwin Rock.	

Figure 22. Scénario 2, seuils de blessure chez les poissons et seuil comportemental chez les mammifères marins : Courbes du seuil et du champ de pression acoustique (SPL) résultant des forages à Baldwin Rock 34

Figure 23. Scénario 6, seuils de blessure chez les mammifères marins : Courbes du seuil de niveau d'exposition acoustique pondéré sur 24 h ($SEL_{w,24h}$) résultant de la détonation de 56 charges à Baldwin Rock.

Figure 24. Scénario 6, seuil comportemental des mammifères marins : Courbes du seuil et du champ de pression acoustique (SPL) résultant de la détonation des charges à Baldwin Rock.

Figure 25. Scénario 6, seuils de blessure aux poissons et invertébrés : Courbes du seuil zéro à la crête et crête à crête résultant de la détonation de chaque charge à Baldwin Rock 38

Figure 26. Scénario 7, seuils de blessure chez les mammifères marins : Courbes du seuil de niveau d'exposition acoustique pondéré sur 24 h ($SEL_{w,24h}$) résultant du dragage à Baldwin Rock 40

Figure 27. Scénario 7, seuil comportemental des mammifères marins : Courbes du seuil et du champ de pression acoustique (SPL) résultant du dragage à Baldwin Rock. Les distances par rapport aux seuils de blessure pour les poissons sont trop courtes pour être représentées sur une carte 41

Figure A-1. Mesures de niveau sonore.A-1

Figure A-2. Bandes de fréquences de décédécade (lignes verticales) représentées sur une échelle de fréquences linéaire et une échelle logarithmique.A-4

Figure A-3. Niveaux de densité spectrale de pression acoustique et niveaux de pression acoustique correspondants par bande de décédécade tirés d'exemples de bruits ambiants, représentés sur une échelle de fréquence logarithmique.A-5

Figure B-1. Fonctions de pondération auditive pour la sensibilité auditive sous l'eau chez les groupes d'audition fonctionnels de mammifères marins conformément aux recommandations de Southall *et al.* (2019).B-2

Figure B-2. Fonctions de pondération auditive pour la sensibilité auditive dans l'air chez les groupes d'audition de pinnipèdes conformément aux recommandations de Southall *et al.* (2019).B-3

Figure C-1. Exemple de graphique radial vertical représentant le niveau sonore reçu en large bande non pondéré dans l'air, issu du modèle de propagation du bruit impulsif (de l'anglais *Impulse Noise Propagation Model* ou INPM), correspondant à la détonation souterraine d'une charge de 6,77 kg de TNT, en utilisant le profil atmosphérique le plus prudent, correspondant au mois d'avril. C-1 Figure C-2. Approche de modélisation N×2-D et maximum sur profondeur utilisée par le MONM. C-2

Figure C-3. Exemple de courbes de pression synthétiques calculées par FWRAM pour le pieu n° 2 à différents décalages de plage. C-4

Figure C-4. Zones d'échantillonnage insonifiées à un niveau acoustique arbitraire avec R_{max} et $R_{95\%}$ indiqués pour deux scénarios différents. C-5

Figure C-5. Altitude du terrain dans la zone modélisée. C-6

Figure C-6. Zones de résistance spécifique à l'écoulement au sein de la zone de modélisation. C-7 Figure C-7. Avril : Profils de pression atmosphérique, de température et d'humidité relative utilisés pour modéliser la propagation du son résultant de la détonation d'explosifs enfouis. C-8

Figure C-8. Carte bathymétrique de la zone de modélisation C-9

Figure C-9. Bathymétrie spécifique aux travaux de dynamitage à Port-aux-Basques. C-11

Figure C-10. Étape de dragage spécifique aux travaux de dynamitage à Port-aux-Basques. C-

11 Figure C-11. Profil mensuel moyen de la vitesse du son dans la colonne d'eau pour tous les mois considérés (à gauche) et profil de la vitesse du son retenu pour la modélisation de la propagation (février; à droite). C-12

Tableaux

Tableau 1. Emplacements et descriptions des scénarios de modélisation acoustique	2
Tableau 2. <i>Détonation d'explosifs, effets dans l'air</i> : Seuils de blessure et de perturbation comportementale chez les carnivores phocidés dans l'air et d'autres carnivores marins dans l'air, pour les bruits impulsifs, d'après Southall <i>et al.</i> bookmark5 (2007, 2019)	4
Tableau 3. <i>Détonation d'explosifs, effets sous-marins</i> : Seuils de déplacement permanent du seuil (PTS), du déplacement temporaire du seuil (TTS) et des perturbations comportementales chez les mammifères marins sous l'eau, d'après Southall <i>et al.</i> (2019) et NOAA Fisheries (2019) pour les sources d'impulsion	4
Tableau 4. <i>Forage et dragage, effets sous-marins</i> : Seuils de déplacement permanent du seuil (PTS), du déplacement temporaire du seuil (TTS) et des perturbations comportementales chez les mammifères marins sous l'eau, d'après Southall <i>et al.</i> (2019) et NOAA Fisheries (2019)	4
Tableau 5. Seuils de blessure pour les poissons, les invertébrés, les œufs et les larves.	5
Tableau 6. Caractéristiques techniques de la charge utilisée pour le dynamitage de roches 8	
Tableau 7. <i>Carnivores marins dans l'air, seuils $SEL_{w,24h}$</i> : Distances par rapport aux seuils pour le déplacement permanent du seuil (PTS) et du déplacement temporaire du seuil (TTS) résultant de la détonation de 84 charges de 37 kg de TNT (Southall <i>et al.</i> 2019).	14
Tableau 8. <i>Carnivores marins dans l'air, seuils PK</i> : Distances par rapport aux seuils pour le déplacement permanent du seuil (PTS) et du déplacement temporaire du seuil (TTS) résultant de la détonation d'un nombre quelconque de charges de 48 kg de TNT (Southall <i>et al.</i> 2019).	15
Tableau 9. <i>Oiseaux</i> : Distances à partir desquelles un déplacement permanent du seuil (PTS) est observé suite à la détonation d'un nombre quelconque de charges de 48 kg de TNT (Dooling et Popper 2016).....	15
Tableau 10. <i>Pinnipèdes dans l'air, seuils pondérés PK et PA</i> : Distances par rapport aux seuils de perturbation comportementale (Southall <i>et al.</i> [2007]) 15	
Tableau 11. <i>Mammifères marins, seuils $SEL_{w,24h}$</i> : Distances par rapport aux seuils pour le déplacement permanent du seuil (PTS), le déplacement temporaire du seuil (TTS), et la perturbation comportementale.	22
Tableau 12. <i>Poisson</i> : Distances par rapport aux seuils pour les lésions réparables et au TTS, d'après Popper <i>et al.</i> 2014)	22
Tableau 13. <i>Mammifères marins, seuils $SEL_{w,24h}$</i> : Distances (m) par rapport aux seuils pour le déplacement permanent du seuil (PTS) et du déplacement temporaire du seuil (TTS) résultant de la détonation de 36 charges 25	
Tableau 14. Distances (m) par rapport au seuil de perturbation comportementale des mammifères marins défini par la NOAA Fisheries (2019) pour le bruit impulsif résultant de la détonation d'une seule charge.	25
Tableau 15. <i>Mammifères marins, seuils PK</i> : Distances (m) par rapport aux seuils de déplacement permanent du seuil (PTS) et de déplacement temporaire du seuil (TTS) basées sur Southall <i>et al.</i> (2019) résultant de la détonation d'une seule charge 25	
Tableau 16. Poissons, invertébrés, œufs et larves : Distances par rapport aux seuils PK et PK-PK pour la mortalité, les blessures potentiellement mortelles et les blessures non mortelles résultant de la détonation d'explosifs 26	
Tableau 17. <i>Mammifères marins, seuils $SEL_{w,24h}$</i> : Distances par rapport aux seuils pour le déplacement permanent du seuil (PTS), le déplacement temporaire du seuil (TTS), et la perturbation comportementale.	29
Tableau 18. <i>Poisson</i> : Distances par rapport aux seuils pour les lésions réparables et au TTS, d'après Popper <i>et al.</i> (2014)	29
Tableau 19. <i>Mammifères marins, seuils $SEL_{w,24h}$</i> : Distances par rapport aux seuils pour le déplacement permanent du seuil (PTS), le déplacement temporaire du seuil (TTS), et la perturbation comportementale.	32
Tableau 20. <i>Poisson</i> : Distances par rapport aux seuils pour les lésions réparables et au TTS, d'après Popper <i>et al.</i> (2014)	32
Tableau 21. <i>Mammifères marins, seuils $SEL_{w,24h}$</i> : Distances (m) par rapport aux seuils pour le déplacement permanent du seuil (PTS) et du déplacement temporaire du seuil (TTS) résultant de la détonation de 36 charges 35	
Tableau 22. Distances (m) par rapport au seuil de perturbation comportementale des mammifères marins défini par la NOAA Fisheries (2019) pour le bruit impulsif résultant de la détonation d'une seule charge.	35

Tableau 23. *Mammifères marins, seuils PK* :Distances (m) par rapport aux seuils de déplacement permanent du seuil (PTS) et de déplacement temporaire du seuil (TTS) basées sur Southall *et al.* (2019) résultant de la détonation d'une seule charge 35

Tableau 24. Poissons, invertébrés, œufs et larves : Distances par rapport aux seuils PK et PK-PK pour la mortalité, les blessures potentiellement mortelles et les blessures non mortelles résultant de la détonation d'explosifs 36

Tableau 25. *Mammifères marins, seuils SEL_{w,24h}* :Distances par rapport aux seuils pour le déplacement permanent du seuil (PTS), le déplacement temporaire du seuil (TTS), et la perturbation comportementale. 39

Tableau 26. *Poisson* :Distances par rapport aux seuils pour les lésions réparables et au TTS, d'après Popper *et al.* (2014) 39

Tableau 27. Tableau récapitulatif des plages de critères doubles correspondant aux seuils d'apparition du PTS et du TTS (Southall *et al.* 2019) pour le dynamitage sous-marin. Les valeurs maximales de R_{max} (m) sont indiquées pour SEL_{w,24 h} et PK à l'île Vardy (84 charges de 48 kg) et Baldwin Rock (56 charges de 56 kg). 43

Tableau A-1. Paramètres acoustiques utilisés dans le présent rapport de modélisation de la propagation du bruit sous-marin, comparés à d'autres publications.

.....A-2

Tableau B-1. Paramètres des fonctions de pondération auditive recommandés par Southall *et al.* (2019).....B-2

Tableau C-1. Valeurs de résistance spécifique à l'écoulement associées aux zones situées à proximité de l'île Vardy.

..... C-7

Tableau C-2. Modèle géoacoustique de Port-aux-Basques C-13

Résumé

La société JASCO Applied Sciences (JASCO) a mené une étude de modélisation des niveaux acoustiques dans l'air et sous l'eau liés aux opérations de construction maritime prévues dans le cadre du projet d'amélioration de la navigation de Port aux Basques, situé à la pointe sud-ouest de Terre-Neuve. La modélisation numérique réalisée dans le cadre de cette évaluation a été menée à partir de données d'entrée sélectionnées de manière à évaluer, de façon prudente, l'étendue de la propagation du bruit généré par le forage sous-marin, les explosions de roche (avec des charges situées au-dessus et en dessous du niveau de l'eau) et les travaux de dragage à l'île Vardy et à Baldwin Rock.

La méthodologie de modélisation a pris en compte :

- L'impact des paramètres environnementaux, comme le profil de la vitesse du son dans l'eau, la bathymétrie, la géoacoustique des fonds marins, les conditions atmosphériques et la résistivité du sol;
- Les caractéristiques et la mise en place des explosifs lors des opérations de minage;
- Les caractéristiques acoustiques des équipements de forage et de dragage;
- L'effet cumulé du bruit des chantiers sur une période de 24 heures.

Des scénarios prévoyant un nombre maximal prudent de détonations par jour (pour le minage de la roche) et une durée maximale d'exploitation par jour (pour le forage et le dragage) ont été simulés afin de calculer l'énergie acoustique cumulative susceptible d'être émise sur une période de 24 heures (désignée par SEL_{24h}). Pour les scénarios de dynamitage, les niveaux acoustiques de crête correspondant à une seule détonation ont également été modélisés.

En ce qui concerne les bruits dans l'air, les distances par rapport aux seuils ont été calculées pour les effets suivants :

- Déplacement temporaire du seuil (TTS de l'anglais *Temporary Threshold Shift*), déplacement permanent du seuil (PTS de l'anglais *Permanent Threshold Shift*) et impact comportemental chez les mammifères marins dans l'air;
- Blessure chez les oiseaux.

En ce qui concerne les bruits sous-marins, les distances par rapport aux seuils ont été calculées pour les effets suivants :

- TTS, PTS et impact comportemental sur les mammifères marins;
- Blessure sur les poissons, les invertébrés, les œufs, les larves et les crustacés.

En effet, en ce qui concerne la propagation dans l'air lors du dynamitage de roches à l'aide de charges placées au-dessus du niveau de l'eau, les distances par rapport aux seuils PTS et TTS pour les mammifères marins étaient inférieures à 10 m du lieu de la détonation dans tous les cas. La distance par rapport au seuil PTS pour les oiseaux était également inférieure à 10 m (tableau 9) par rapport au lieu de la détonation.

En ce qui concerne la propagation du son sous-marin à partir de deux sites, c'est lors des opérations menées à Baldwin Rock que les distances maximales par rapport aux seuils ont été atteintes, car cet emplacement offre une ligne de vue dégagée vers le large. Les distances maximales suivantes par rapport aux seuils ont été estimées :

- Opérations de forage : Pour les mammifères marins, la distance ($R_{95\%}$) par rapport au PTS est de 350 m et par rapport au TTS de 2,9 km pour les cétacés à très haute fréquence (cétacés VHF). Pour les poissons, les distances ($R_{95\%}$) pour les blessures réversibles et les seuils TTS sont respectivement de 61 m et 360 m.
- Opérations de dragage : Pour les mammifères marins, la distance ($R_{95\%}$) par rapport au PTS est de 44 m et par rapport au TTS de 640 m pour les cétacés à basse fréquence (cétacés LF). Pour les poissons, les distances correspondant aux seuils de blessures réversibles et de TTS sont respectivement inférieures à 10 et 15 m.
- Opérations de dynamitage sous-marin sans mesures d'atténuation :
 - Mammifères marins : La distance ($R_{95\%}$) par rapport au PTS est de 3,15 km et par rapport au TTS de 50 km pour les cétacés LF.

- Poisson : La distance ($R_{95\%}$) de mortalité et de blessure potentiellement mortelle est de 190 m.
- Crustacés : La distance ($R_{95\%}$) de la mortalité et des blessures potentiellement mortelles est de 190 m, et celle des blessures non mortelles est de 1 250 m.
- Œufs et larves : La distance de la mortalité et de blessure potentiellement mortelle est de 113 m.

1. Introduction

La société JASCO Applied Sciences (JASCO) a mené une étude de modélisation des niveaux acoustiques dans l'air et sous l'eau liés aux opérations de dynamitage et de dragage prévues dans le cadre du projet d'amélioration de la navigation de Port aux Basques. Le projet est situé dans le sud-ouest de Terre-Neuve. Dans le cadre de ce projet d'amélioration, un chenal de navigation de 150 m de large sera dégagé jusqu'à une profondeur minimale de moins 10,0 m par rapport au zéro des cartes (ZC) et un bassin de manœuvre sera aménagé à l'entrée du port. Ce nouveau tracé du chenal nécessite la suppression totale de l'île Vardy, la suppression partielle de Baldwin Rock, ainsi que l'approfondissement de deux autres zones mineures situées à l'intérieur du bassin de virage proposé (figure 1).

L'approfondissement d'un chenal consiste à enlever la roche mère par dynamitage, à l'aide d'explosifs placés dans des trous forés dans la roche. À la suite des détonations, les roches et les débris issus de l'explosion seront évacués par dragage. Les ondes de pression générées par les explosions au cours du projet se propageront dans le milieu marin sous-marin environnant. Dans l'air, les ondes de pression se propagent sous forme de bruit aérien.

Le bruit acoustique peut affecter la faune marine, les oiseaux et les êtres humains de plusieurs façons. Des niveaux acoustiques modérés peuvent entraîner des perturbations comportementales, tandis que des niveaux plus élevés peuvent provoquer un déplacement temporaire du seuil auditif (TTS), voire un déplacement permanent du seuil auditif (PTS). Ici, l'expression « déplacement du seuil auditif » désigne une diminution de la sensibilité auditive chez les animaux exposés. Le PTS est considéré comme une blessure auditive directe, mais le TTS peut également entraîner une blessure permanente s'il se produit à plusieurs reprises chez le même animal. À des niveaux très élevés, les pressions acoustiques peuvent entraîner des blessures physiques graves, voire la mort, par barotraumatisme.

Dans le cadre de cette étude, JASCO a modélisé la propagation du son dans l'air et sous l'eau afin de prévoir les niveaux acoustiques dans les zones environnantes de chaque site d'exploitation. Ces résultats ont été analysés afin de déterminer les distances, à partir des sites d'exploitation, auxquelles les niveaux sonores atteignent plusieurs seuils associés à des effets néfastes sur les animaux marins et les oiseaux. Au total, sept scénarios ont été modélisés (tableau 1) : les niveaux de bruit aérien générés par la détonation d'explosifs ont été modélisés à l'île Vardy, tandis que les niveaux de bruit sous-marin liés au forage de puits, à la détonation d'explosifs et au dragage ont été modélisés à l'île Vardy et à Baldwin Rock.

Les critères permettant d'évaluer les risques de blessure et de perturbation comportementale liés au bruit acoustique sont résumés dans la section 2. Ces critères fournissent une liste des seuils de bruit associés à l'apparition d'effets chez les mammifères marins, les poissons, les invertébrés, les œufs et les larves. La méthodologie utilisée pour évaluer les distances maximales par rapport aux seuils de bruit indiqués est résumée dans la section 3; les détails techniques figurent dans les annexes A, B et C. Les résultats sont présentés dans la section 4 et analysés dans la section 5. Certains termes utilisés dans le présent rapport sont définis dans le glossaire; dans la mesure du possible, nous suivons les définitions et les symboles de l'Organisation internationale de normalisation (ISO) relatifs aux mesures acoustiques (p. ex. ISO 2017).

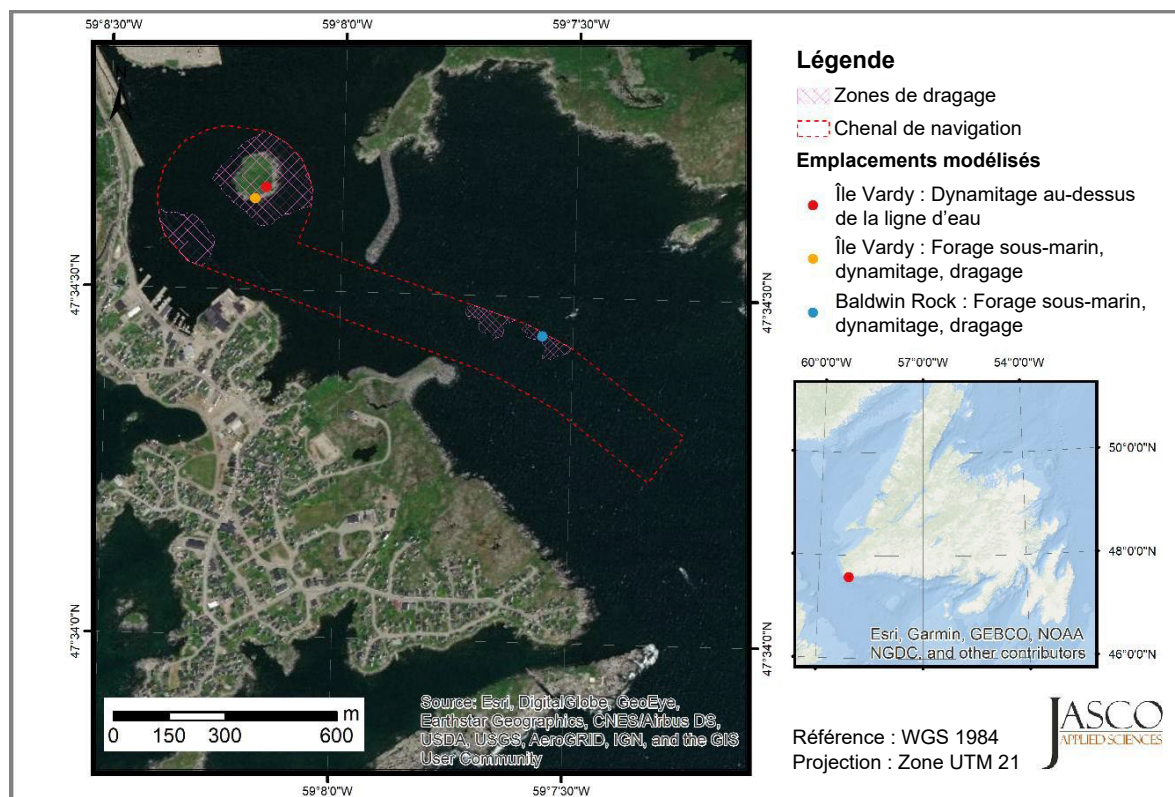


Figure 1. Carte de la zone du projet, indiquant les emplacements d'où provenaient les bruits modélisés liés au forage de la roche, aux détonations d'explosifs et aux opérations de dragage.

Tableau 1. Emplacements et descriptions des scénarios de modélisation acoustique

Scénario	Site	Opération	Latitude (N)	Longitude (O)	Zone UTM 21N		Profondeur de l'eau (m)
					x (m)	y (m)	
1	Île Vardy	Dynamitage au-dessus de la ligne de flottaison	47° 34,651'	59° 08,157'	339 375	5 271 555	S. o.
2		Forage sous-marin	47° 34,630'	59° 08,180'	339 340	5 271 520	7,5
3		Dynamitage sous-marin	47° 34,626'	59° 08,180'	339 345	5 271 510	0,1
4		Dragage	47° 34,630'	59° 08,180'	339 340	5 271 520	12,5
5	Baldwin Rock	Forage sous-marin	47° 34,446'	59° 07,561'	340 110	5 271 150	9,6
6		Dynamitage sous-marin	47° 34,438'	59° 07,534'	340 145	5 271 140	4,6
7		Dragage	47° 34,446'	59° 07,561'	340 110	5 271 150	12,5

2. Critères relatifs aux effets du bruit

Plusieurs mesures de niveau acoustique, comme le niveau de pression de crête (PK), le niveau de pression acoustique (SPL de l'anglais *Sound Pressure Level*) et le niveau d'exposition au bruit (SEL de l'anglais *Sound Exposure Level*), sont couramment utilisées pour évaluer le bruit et ses effets sur les animaux et les humains (voir annexe A), bien que le choix des mesures et des seuils continue d'évoluer à mesure que les recherches dans ce domaine se poursuivent.

Nous avons estimé les distances correspondant aux seuils actuellement admis en matière d'impacts sur les mammifères marins, les poissons, aux œufs et aux larves de poissons, aux oiseaux et aux êtres humains, en nous appuyant sur les ensembles de critères disponibles concernant l'apparition de blessures induites par le bruit (notamment la mortalité [chez les poissons]), le PTS et le TTS, ainsi que les perturbations comportementales. Ces critères, énumérés ci-dessous, sont abordés plus en détail dans l'annexe B; ils comprennent les seuils acceptés par les autorités réglementaires et reflètent l'état actuel des connaissances scientifiques.

En ce qui concerne le bruit aérien dû à la détonation d'explosifs enfouis (c'est-à-dire recouverts), les résultats sont présentés selon les critères suivants :

- Seuils de blessure (apparition du PTS et du TTS; tableau 2) pour les carnivores phocidés dans l'air (PCA de l'anglais *phocid carnivores in air*) et les autres carnivores marins dans l'air (OCA de l'anglais *other marine carnivores in air*), d'après Southall *et al.* (2019).
- Seuil de blessure pour les oiseaux (125 dBA par rapport à 20 µPa), d'après Dooling et Popper (2016).
- Seuils comportementaux des pinnipèdes dans l'air (tableau 2), d'après Southall *et al.* (2007).
- La réglementation relative aux nuisances sonores sur les humains liées aux travaux de construction s'applique conformément au *Channel-Port aux Basques Noise and Nuisance Regulations* (Conseil municipal de Channel-Port aux Basques, 1992), qui exige l'autorisation du conseil municipal pour certaines activités génératrices de bruit, mais ne précise pas de seuils de niveau acoustique.

En ce qui concerne le bruit sous-marin, les résultats sont présentés selon les critères suivants :

- Seuils de blessure (apparition du PTS et du TTS) et de perturbation comportementale (tableau 3) chez les mammifères marins dues au bruit de détonation, d'après Southall *et al.* (2019) et NOAA Fisheries (2019) pour les sources d'impulsion.
- Seuils de blessure (apparition du PTS et du TTS) et de perturbation comportementale (tableau 4) chez les mammifères marins dues au bruit des travaux de dragage et de forage, d'après Southall *et al.* (2019) et NOAA Fisheries (2019) pour les sources sans impulsion.
- Seuils de blessures pour les poissons, les invertébrés, les œufs et larves (tableau 5), d'après Popper *et al.* (2014).
- Seuil de blessure chez les crustacés (tableau 5), d'après Day *et al.* (2016a), Day *et al.* (2016 b), et Day *et al.* (2019).

Le seuil des critères PK est appliqué à la valeur instantanée maximale observée au cours de l'opération. La mesure SEL est la mesure intégrale et le seuil des critères s'applique à l'exposition cumulée sur une période donnée, à savoir une période de 24 heures, ce qui est indiqué par SEL_{24h}. Les seuils de critères sont définis individuellement pour chaque groupe d'audition fonctionnel de mammifères marins et appliqués au niveau d'exposition acoustique pondéré (SEL_{w,24h}) à l'aide de courbes de pondération auditive spécifiques à chaque groupe.

Tableau 2. *Détonation d'explosifs, effets dans l'air* : Seuils de blessure et de perturbation comportementale chez les carnivores phocidés dans l'air et d'autres carnivores marins dans l'air, pour les bruits impulsionnels, d'après Southall *et al.* (2007, 2019). SEL_{24h} : niveau d'exposition acoustique cumulé sur 24 h; PK : niveau de pression acoustique de crête.

Espèce ou groupe d'audition fonctionnel	PTS		TTS		Perturbation comportementale	
	SEL _{w,24h} (dB par rapport à 20 µPa ² ·s)	PK (dB re 20 µPa)	SEL _{w,24h} (dB par rapport à 20 µPa ² ·s)	PK (dB re 20 µPa)	SEL _{w,24h} (dB par rapport à 20 µPa ² ·s)	PK (dB re 20 µPa)
Carnivores phocidés dans l'air	138*	161	123*	155	100‡	109
Autres carnivores marins dans l'air	161†	176	146†	170		

* Les valeurs seuils sont pondérées en fonction de la fréquence, conformément à la courbe relative aux carnivores phocidés dans l'air fournie par Southall *et al.* (2019).

† Les valeurs seuils sont pondérées en fonction de la fréquence, conformément à la courbe relative aux autres carnivores marins dans l'air fournie par Southall *et al.* (2019).

‡ Les valeurs seuils sont pondérées en fonction de la fréquence, conformément à la courbe relative aux pinnipèdes dans l'air fournie par Southall *et al.* (2007).

Tableau 3. *Détonation d'explosifs, effets sous-marins* : Seuils de déplacement permanent du seuil (PTS), du déplacement temporaire du seuil (TTS) et des perturbations comportementales chez les mammifères marins sous l'eau, d'après Southall *et al.* (2019) et NOAA Fisheries (2019) pour les sources d'impulsion. LF : basse fréquence; HF : haute fréquence; VHF : très haute fréquence; SEL_{24h} : niveau d'exposition au bruit cumulé sur 24 h; PK : niveau de pression acoustique de crête.

Espèce ou groupe d'audition fonctionnel	PTS		TTS		Perturbation comportementale
	SEL _{w,24h} * (dB par rapport à 1 µPa ² ·s)	PK (dB par rapport à 1 µPa)	SEL _{w,24h} * (dB par rapport à 1 µPa ² ·s)	PK (dB par rapport à 1 µPa)	SPL (dB par rapport à 1 µPa)
Cétacés LF	183	219	168	213	160
Cétacés HF	185	230	170	224	
Cétacés VHF	155	202	140	196	
Phocidés dans l'eau	185	218	170	212	
Otariidés et mustélidés dans l'eau	203	232	188	226	

* Les valeurs SEL_{w,24h} sont pondérées en fonction de la fréquence de la courbe de chaque groupe d'audition fonctionnel fournie par Southall *et al.* (2019).

Tableau 4. *Forage et dragage, effets sous-marins* : Seuils de déplacement permanent du seuil (PTS), du déplacement temporaire du seuil (TTS) et des perturbations comportementales chez les mammifères marins sous l'eau, d'après Southall *et al.* (2019) et NOAA Fisheries (2019). LF : basse fréquence; HF : haute fréquence; VHF : très haute fréquence; SEL_{24h} : niveau d'exposition au bruit cumulé sur 24 h; SPL : niveau de pression acoustique efficace.

Espèce ou groupe d'audition fonctionnel	PTS	TTS	Perturbation comportementale
	SEL _{w,24h} * (dB par rapport à 1 µPa ² ·s)	SEL _{w,24h} * (dB par rapport à 1 µPa ² ·s)	SPL (dB par rapport à 1 µPa)
Cétacés LF	199	179	120
Cétacés HF	198	178	
Cétacés VHF	173	153	
Carnivores phocidés dans l'eau	201	181	
Autres carnivores dans l'eau	219	199	

* Les valeurs SEL_{w,24h} sont pondérées en fonction de la fréquence de la courbe de chaque groupe d'audition fonctionnel fournie par Southall *et al.* (2019).

Tableau 5. Seuils de blessure pour les poissons, les invertébrés, les œufs et les larves. S.o. : aucun seuil disponible. PK : niveau de pression acoustique de crête; PK-PK : niveau de pression acoustique crête à crête; SPL : niveau de pression acoustique efficace.

Espèce ou groupe	Détonation d'explosifs		Forage et dragage	
	Mortalité et blessure susceptible d'entraîner la mort	Blessure non mortelle	Blessure réversible	Déplacement temporaire du seuil
Absence de vessie natatoire (détection de mouvement de particules)	220 dB par rapport à 1 µPa (PK)*	S. o.	S. o.	S. o.
Aucun rôle de la vessie natatoire dans l'audition (détection de mouvement de particules)		S. o.	S. o.	S. o.
Rôle joué par la vessie natatoire dans l'audition (détection de pression primaire)		S. o.	170 dB par rapport à 1 µPa (SPL)†	158 dB par rapport à 1 µPa (SPL)†
Invertébrés (crustacés)		209 dB par rapport à 1 µPa (PK-PK) ‡	S. o.	S. o.
Œufs et larves	13 mm/s † (vitesse maximale des particules)	S. o.	S. o.	S. o.

* D'après Wright et Hopky (1998).

† D'après Popper *et al.* (2014).

‡ D'après Day *et al.* (2016a), Day *et al.* (2016 b), et Day *et al.* (2019).

3. Méthodes

Les opérations examinées dans la présente étude se dérouleront dans le port de Port-aux-Basques, où la profondeur de l'eau est inférieure à 40 m. Le port ne gelant pas en hiver, les activités pourront s'y dérouler tout au long de l'année. Les propriétés atmosphériques (à savoir la pression, la température, l'humidité relative et le vent en fonction de l'altitude) représentatives du mois d'avril ont été utilisées pour modéliser les conditions conduisant à la plus longue propagation dans l'air (voir l'annexe C.4.1). Les caractéristiques de l'eau (à savoir la température, la salinité et la vitesse du son) représentatives du mois au cours duquel la propagation acoustique sous-marine est la plus longue (février) ont été utilisées pour la modélisation sous-marine (voir annexe C.4.3). Dans la zone du projet, le fond est principalement composé de roche mère affleurante. Le substrat rocheux sera mis à nu sur les sites modélisés à mesure que les travaux de dragage avanceront. Vous trouverez plus de détails à l'annexe C.4.4.

Les étapes suivantes décrivent l'approche générale adoptée dans la présente étude pour modéliser les sons et estimer les distances par rapport aux seuils des critères d'effet (énumérés à la section 2) :

1. Les opérations modélisées sont considérées comme des sources de rayonnement sonore, et les fonctions de pression de ces sources sont estimées en champ proche, généralement dans un rayon de quelques dizaines de mètres. Cette caractérisation s'effectue à l'aide d'un indicateur (spectres au niveau de source dérivés de la mesure d'opérations similaires) ou à l'aide de modèles théoriques (pour plus de détails, voir la section 3.1).
2. La modélisation numérique de la propagation est utilisée pour prédire la manière dont le son se propage depuis les sources sonores dans l'air ou dans la colonne d'eau, en fonction de la distance, de l'élévation ou de la profondeur, et de la direction azimutale. Afin d'optimiser la précision de l'estimation, différents modèles de propagation du son sont utilisés, en fonction des caractéristiques de la source sonore (voir la section 3.2 et les annexes C.1 et C.2).
3. Le champ sonore propagé sert à calculer les niveaux de réception « maximum en profondeur » et « maximum en altitude » (respectivement pour la modélisation du bruit sous-marin et du bruit dans l'air) sur une vaste grille régulière, à partir de laquelle sont calculées les distances par rapport aux seuils des critères d'impact et générées des cartes de courbes de niveau (pour plus de détails, voir l'annexe C.3). Deux distances sont présentées dans ce travail pour chaque seuil : la distance maximale par rapport à la source à laquelle un niveau sonore donné est prévu d'apparaître ($R_{\max}$), ainsi que la distance correspondant à un niveau sonore donné après exclusion des 5 % de points les plus éloignés ($R_{95\%}$) (voir l'annexe C.3).

Les sous-sections suivantes décrivent les méthodes et les paramètres utilisés pour caractériser les sources sonores liées au forage, à la détonation d'explosifs et au dragage, ainsi que les modèles de propagation acoustique, la gamme de fréquences et les périodes d'accumulation prises en compte dans le calcul des champs sonores en termes de SEL_{24h} .

3.1. Sources acoustiques

3.1.1. Bruit lié aux opérations de forage

Les charges seront placées dans des trous forés dans la roche mère (gneiss). Les spectres de niveau de source issus d'enregistrements de forage avec marteau fond du trou (FDT) hydraulique ont été utilisés comme indicateur des opérations de forage envisagées. Le forage par marteau FDT hydraulique est une technique de forage rotatif à percussion adaptée aux formations rocheuses dures. Les niveaux FDT de référence correspondent à un marteau Numa Patriot 180, utilisé pour la mise en place de pieux de 0,6 m de diamètre¹ sur un terminal de traversier à Kodiak, en Alaska, États-Unis (Denes *et al.* 2016). La surveillance acoustique de cette activité a été réalisée à l'aide d'hydrophones placés à une distance de 10 à 30 m du forage. Les niveaux sonores mesurés ont fait l'objet d'une rétropropagation à l'aide d'un modèle de propagation du son et des paramètres environnementaux propres au site, afin de déterminer les spectres de niveau de source dans des bandes de décidécade.

Une analyse statistique des données enregistrées concernant le martelage FDT hydraulique a été réalisée afin de déterminer les valeurs centiles. Un centile est une mesure utilisée en statistique qui indique la valeur en dessous de laquelle se situe un pourcentage donné d'observations au sein d'un ensemble d'observations. Plus précisément, les 95^e et 50^e centiles ont été utilisés dans cette étude. Le 95^e centile est une mesure prudente qui fournit des valeurs proches du maximum détecté. Il a été utilisé comme niveau de source pour le calcul de l'exposition SPL (figure 2), avec un niveau de bande large de 197,2 dB par rapport à 1 $\mu Pa^2 m^2 s$. Le 50^e centile correspond à un niveau moyen sur toute la durée de l'opération et a été utilisé pour calculer le

SEL_{24h} (figure 2) avec un niveau de bande large de 191,6 dB par rapport à 1 $\mu\text{Pa}^2\text{m}^2\text{s}$.

¹ Pour un modèle DTH donné, les niveaux de source ne sont pas influencés par le diamètre du pieu, car il n'y a pas d'interaction entre la foreuse et le pieu lui-même.

Le bruit généré par les opérations de forage provient principalement de la zone proche des fonds marins, mais une partie de ce bruit provient également de sources réparties le long du puits de forage et à travers la coque du navire hébergeant l'équipement. La conception et l'équipement précis des opérations de forage étant inconnus, celles-ci ont été simulées sous la forme d'une source ponctuelle située au milieu de la colonne d'eau, ce qui constitue une hypothèse prudente, mais réaliste pour estimer les distances par rapport aux seuils de niveau sonore.

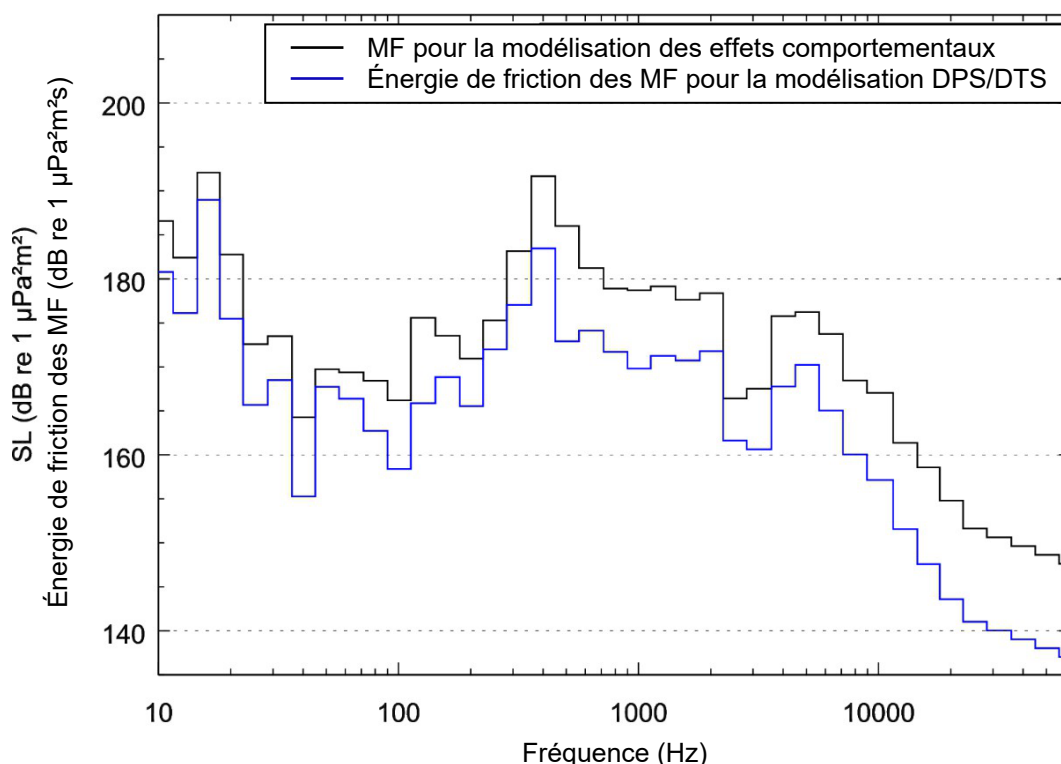


Figure 2. Spectre de niveau de source par bande de décédécade des opérations de forage : Niveau de source (dB par rapport à $1 \mu\text{Pa}^2\text{m}^2$) pour la modélisation du champ de niveau de pression acoustique (SPL) (utilisé dans l'évaluation de la perturbation comportementale) et du niveau de la source d'énergie (dB par rapport à $1 \mu\text{Pa}^2\text{m}^2\text{s}$) pour la modélisation du champ $\text{SEL}_{24\text{h}}$ (utilisé pour l'évaluation du déplacement permanent du seuil/déplacement temporaire du seuil [PTS/TTS]).

Dans cette étude, nous avons modélisé trois foreuses fonctionnant simultanément. On a supposé que chaque foreuse fonctionnait pendant 766 minutes au cours d'une période de 24 heures, ce qui correspond à une durée totale de forage par jour de 2 298 minutes (soit 137 880 secondes). Les seuils SEL s'appliquent généralement sur chaque période de 24 heures. Le SEL est un indicateur de type « dose » calculé à partir du produit de la pression moyenne au carré et du temps en secondes. En décibels, cela revient à additionner le SPL de l'opération et sa durée en décibels. La durée en décibels est calculée en multipliant par dix le logarithme du nombre total de secondes pendant lesquelles l'opération a lieu au cours d'une journée ($N_{24\text{h}}$). Comme indiqué ci-dessus, $N_{24\text{h}} = 137\,880$ s. Par conséquent, le SEL de l'opération de forage a été calculé en ajoutant $10 \log(N_{24\text{h}}) = 51,4$ dB par rapport au SPL prévu du forage en dB par rapport à $1 \mu\text{Pa}^2$ (voir l'équation A-10, annexe A).

3.1.2. Bruit lié aux opérations de dynamitage du substrat rocheux

Les ondes de compression post-détonation résultant de la détonation souterraine de charges explosives (sous l'eau ou dans l'air) sont susceptibles de causer des blessures physiques et/ou des perturbations comportementales chez les mammifères marins, les poissons, les oiseaux et les êtres humains. Ce type d'opération génère une série d'événements acoustiques de très forte amplitude, mais de courte durée. Il existe une zone située à proximité immédiate de l'explosion (généralement dans un rayon de quelques dizaines de mètres) où prédominent la déformation non élastique, la fracture et le transport de matière en vrac au sein du milieu (la zone d'onde de choc). En dehors de cette zone, l'énergie vibratoire se transforme rapidement en signaux acoustiques linéaires pouvant être modélisés à l'aide de modèles classiques de propagation du son dans l'air et sous l'eau.

Dans cette étude, le bruit généré par la détonation d'explosifs placés dans des trous de forage creusés dans la roche a été modélisé à l'aide du logiciel ConWep (Hyde 1988, Hyde 1992). ConWep génère des courbes de pression de la détonation en fonction du temps et tient compte des paramètres d'entrée propres à chaque scénario, comme le type et la taille de l'explosif, la profondeur de la charge sous le sol et les caractéristiques du matériau de remblayage. La modélisation du dynamitage a été réalisée en se basant sur les tailles de charges suivantes :

- **Sablage à l'air comprimé** : Les distances par rapport aux seuils PK et SPL ont été déterminées pour des charges de 48 kg QNE (c'est-à-dire les charges les plus importantes devant être installées dans les trous de forage du niveau supérieur). Distances par rapport à SEL_{24h}. Les seuils ont été obtenus pour une charge moyenne de 37 kg QNE sur le palier supérieur, pour un maximum de 84 trous de forage dans le palier supérieur détonés par jour sur l'île Vardy.
- **Dynamitage sous-marin** : Des charges de 48 kg QNE par trou de forage du palier inférieur et un maximum de 84 trous de forage du palier inférieur détonés par jour à l'île Vardy, et une charge de 56 kg QNE par trou de forage et un maximum de 56 trous de forage détonés par jour à Baldwin Rock (Tableau 6).

Tableau 6. Caractéristiques techniques de la charge utilisée pour le dynamitage de roches. Les masses de charge sont exprimées en « quantité nette d'explosifs » (QNE), 1 QNE équivalant à 1 kg de TNT.

Paramètre	Valeur
Explosif	Explosif en émulsion conditionné Blastex® TX
Masse explosive	• Charge de 48 kg QNE l'île Vardy. Pour la modélisation dans l'air relative aux mesures SEL_{24h}, on a utilisé à la place une taille moyenne de charge de 37 kg QNE. • Charge de 56 kg QNE à Baldwin Rock.
Profondeur de déploiement	Modélisation acoustique dans l'air : • Charges placées à une altitude comprise entre 0 et 7,4 m au-dessus du niveau de l'eau • Signature de la source modélisée pour des charges enfouies à une profondeur de 1,1 m Modélisation acoustique sous-marine : • Charges placées à 8,5 m de profondeur sous le fond marin, près de l'île Vardy. • Charge placée à 6 m de profondeur sous le fond marin, au niveau de Baldwin Rock.
Matériau de remblayage	Gravier anguleux dont la granulométrie correspond à environ 1/12e du diamètre du trou de forage
Épaisseur du remblai	0,6 m pour les forages submergés; 1,5 m pour les forages sur l'île Vardy

Pour la modélisation SEL dans l'air du bruit de détonation, le module Shockwave du logiciel ConWep a été utilisé afin d'obtenir l'onde de pression qui serait mesurée dans le substrat rocheux à une distance de 6 m du point de détonation (c'est-à-dire la profondeur d'enfouissement de la charge la plus importante située en surface). Cette onde de pression correspond à l'énergie de l'explosion dans la roche mère; il faut donc appliquer un facteur de couplage roche mère-air pour la modélisation en milieu aérien. La description mathématique de ce facteur est complexe et nécessite une connaissance précise du milieu entourant l'explosif et de son comportement dynamique lors de l'explosion. Pour remédier à cette complexité, la présente étude utilise un facteur de couplage (mise à l'échelle) fondé sur des mesures effectuées sur le terrain lors de travaux de dynamitage dans des carrières (Siskind *et al.* 1980), ce qui a

permis d'obtenir les niveaux de source indiqués dans la figure 3 pour la modélisation du SEL dans l'air.

Le SPL dans l'air a été modélisé pour la charge maximale de 48 kg QNE, en augmentant le SEL équivalent pour une seule détonation (figure 3, à gauche) de 9 dB, ce qui correspond à un temps d'intégration de 0,125 s. Le SEL dans l'air sur 24 h a été calculé en appliquant un décalage de $10 \log(N_{24h})$ décibels au SEL à détonation unique (figure 3, à droite), où $N_{24h} = 84$ correspond au nombre total de détonations qui se produiraient au-dessus de la ligne de flottaison en une seule journée. L'altitude du terrain sur l'île Vardy varie entre 0 et 7,4 m, de sorte que la longueur d'un forage du palier supérieur (ainsi que la quantité d'explosifs qu'il contient) varie : les zones les plus élevées nécessitent des forages plus longs et davantage d'explosifs. Aux fins de la modélisation SEL_{24h}, JASCO a utilisé une taille moyenne de charge de 37 kg QNE, en se basant sur des paramètres préliminaires de conception de l'explosion.

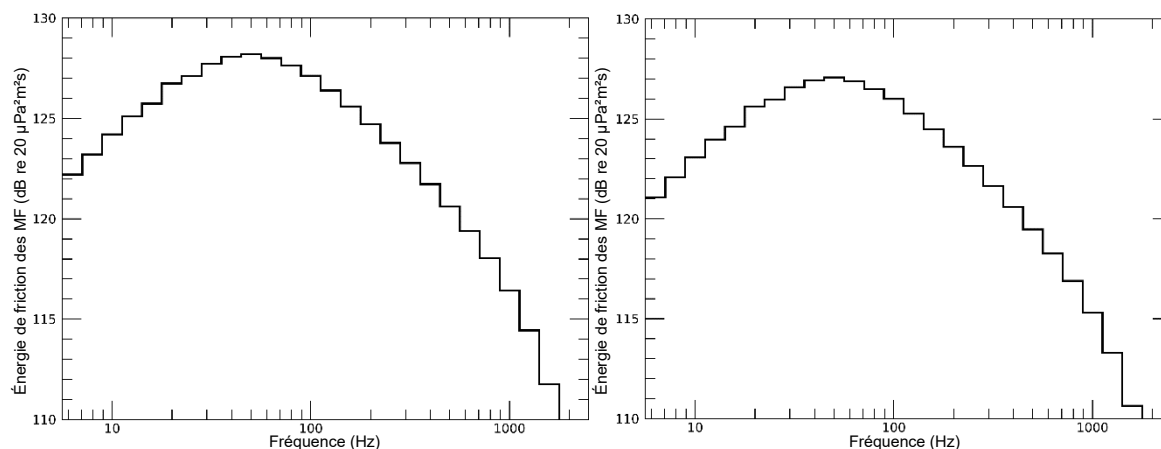


Figure 3. Niveaux de source d'énergie selon la fréquence dans les bandes de fréquences en décadécade, correspondant à une détonation souterraine de (à gauche) de 48 kg QNE et (à droite) de 37 kg QNE. Ces spectres ont été utilisés pour modéliser le SEL et le SPL dans l'air.

Pour modéliser les niveaux PK, cette étude utilise le modèle fondé sur des mesures proposé par Siskind *et al.* (1980), qui estime les niveaux PK dans l'air à une distance proportionnelle de la détonation comme suit :

$$P_{Siskind} = 1117,0 \left(\frac{3,28R}{(2,2W)^{1/3}} \right)^{-0,794} \quad (1)$$

où $P_{Siskind}$ est la pression PK en Pa, R est la distance en m par rapport à la détonation, W est le poids de la charge en kg de TNT.

Pour la modélisation sous-marine du bruit de détonation, le module Shockwave du logiciel ConWep a été utilisé afin d'obtenir l'onde de pression qui serait mesurée dans le sol à une distance de 18 m du point de détonation. Cette distance a été choisie, car elle est suffisante pour que l'onde de pression de l'explosion ait atteint un régime de propagation linéaire; à des distances très courtes, la forme de l'onde de pression évolue en fonction de la distance en raison d'effets non linéaires qui ne sont pas correctement pris en compte par les modèles de propagation linéaire. L'onde de pression du logiciel ConWep à 18 m a fait l'objet d'une rétropropagation en supposant une diffusion sphérique linéaire afin d'obtenir une source ponctuelle équivalente, adaptée à la modélisation d'une propagation linéaire. Le modèle de propagation linéaire traite de la propagation souterraine de la roche vers l'eau et tient compte de la transmission de la roche vers l'eau (annexe C.2.2). ConWep prend en compte les propriétés physiques de la roche et/ou des sédiments qui entourent la charge. Dans le modèle, ce matériau est caractérisé par sa densité, sa vitesse du son en compression et son coefficient d'absorption (ou d'atténuation). Le modèle a été affiné en ajustant le facteur d'atténuation de manière à ce que les niveaux de pression de crête enregistrés à moins de 300 m se situent entre les lignes de régression fournies par Hempen *et al.* (2007) et Oriard (2002). Les droites de régression de Hempen *et al.* (2007) et d'Oriard (2002) ont été établies à partir de mesures de suivi réalisées lors d'opérations de dynamitage du fond rocheux. La valeur d'atténuation qui a permis d'obtenir la meilleure correspondance était de 2,035 (voir figure 4). Cette approche permet de conserver la forme de l'onde de pression prévue par le logiciel ConWep tout en garantissant que les pressions de crête sont conformes aux modèles empiriques de pression de crête en cas d'explosion.

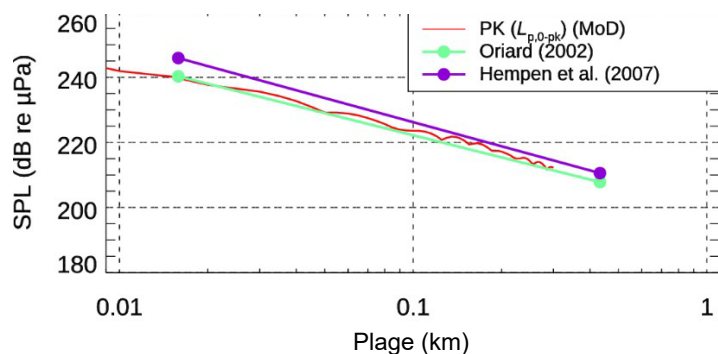


Figure 4 Réglage du facteur d'atténuation du logiciel ConWep : Niveau de pression acoustique de crête modélisé (maximum surprofondeur) comparé aux fonctions de régression fournies par Hempen *et al.* (2007) et Oriard (2002). La valeur du facteur d'atténuation est de 2,035.

Les courbes de pression de la source et les niveaux d'énergie correspondants, exprimés en décidécades, pour des explosions de 56 kg et 48 kg de charge sont présentés sur les figures 5 et 6.

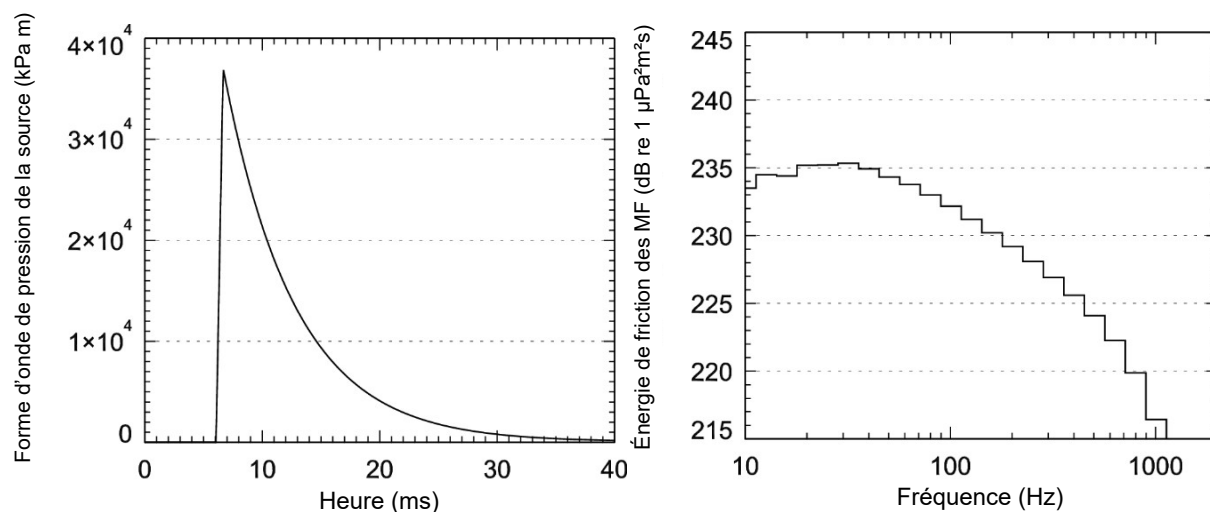


Figure 5. Modélisation du niveau de source de l'explosion, site de Baldwin Rock : (à gauche) Onde de pression en fonction du temps pour une détonation souterraine de 56 kg de TNT. (À droite) Niveaux de source d'énergie correspondants en fonction de la fréquence dans les bandes de fréquences.

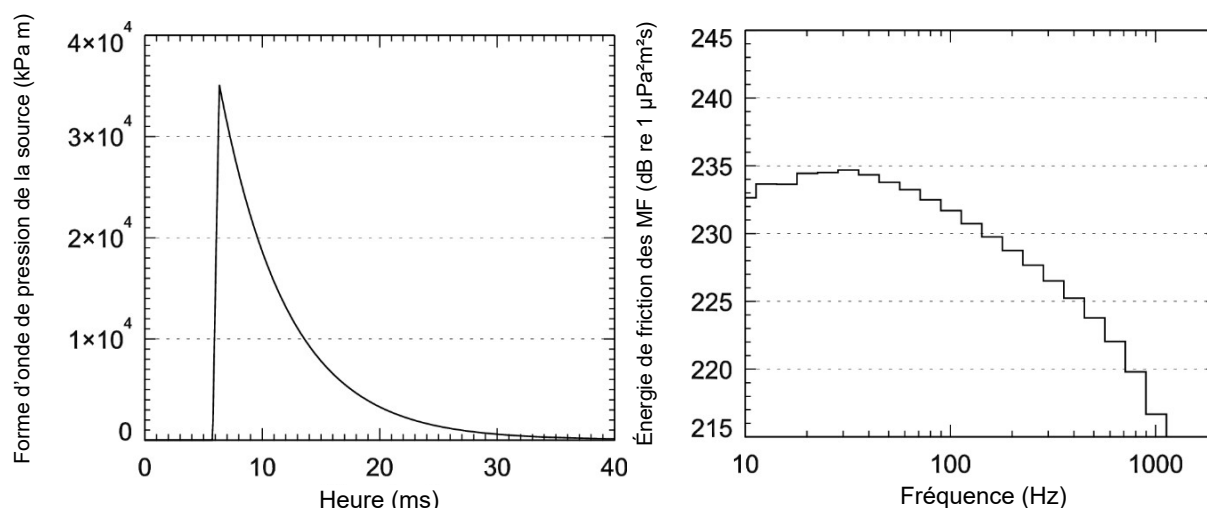


Figure 6. Modélisation du niveau de source de l'explosion, site de l'île Vardy : (à gauche) Onde de pression en fonction du temps pour une détonation souterraine de 48 kg de TNT. (À droite) Niveaux de source d'énergie correspondants en fonction de la fréquence dans les bandes de fréquences.

Le SEL sous-marin sur 24 h pour la détonation de charges multiples a été calculé en appliquant un ajustement de $10 \log(N_{24h})$ décibels, où N_{24h} correspond au nombre total de détonations qui auraient lieu sous la ligne de flottaison au cours de cette période. Cette approche repose sur la simple somme de l'énergie acoustique de toutes les détonations effectuées au cours de la journée.

Selon le plan de construction, le nombre maximal de chargements sur une période de 24 heures est de 84 pour le site de l'île Vardy et de 56 pour celui de Baldwin Rock. Par conséquent, l'ajustement permettant de calculer le SEL_{24h} des opérations de dynamitage, calculé à partir de la valeur SEL par charge, s'élevait à 19,2 dB pour l'île Vardy et à 17,5 dB pour Baldwin Rock.

3.1.3. Bruit lié aux opérations de dragage

Une drague mécanique devrait être utilisée pour retirer les sédiments du chenal de navigation. Le type exact de drague mécanique étant inconnu au moment de cette étude, une drague à benne preneuse a été utilisée à titre de référence. Ce type de drague est efficace en eaux peu profondes (< 50 m).

Dans cette étude, deux spectres mesurés disponibles ont été analysés : ceux des dragues à benne *Viking*, rapportés par Dickerson *et al.* (2001), et *Argilopotes*, rapportés par Miles *et al.* (1987). Le spectre de la drague *Viking* a été établi à partir d'enregistrements des opérations de dragage menées dans le Cook Inlet (Alaska), à une distance de 158 m, où la profondeur moyenne de l'eau était de 10 m. Les niveaux de réception relevés ont été rétropropagés jusqu'à l'emplacement de la source en supposant une propagation sphérique sur les 20 premiers mètres à partir de la source, puis une propagation cylindrique au-delà. Le spectre de l'*Argilopotes* a été établi à partir de niveaux publiés, mesurés à une distance de 1 km, puis extrapolés à l'aide d'une modélisation des pertes de transmission en fonction de l'environnement.

Dans le cadre de cette étude, le spectre final a été estimé à partir des niveaux maximaux des bandes de fréquences de décade issus des spectres obtenus par dragage des dragues *Viking* et *Argilopotes*. La plage de fréquences des spectres mesurés allait de 31,5 à 31 500 Hz. L'extrapolation pour les basses fréquences (jusqu'à 10 Hz) a été réalisée en conservant constante la valeur de la dernière bande disponible. L'extrapolation pour les fréquences les plus élevées (jusqu'à 63 000 Hz) a été réalisée en utilisant une pente de 10 dB par décade (1 dB par bande de décade). Le spectre de niveau de source de la bande de décade, utilisé pour modéliser le champ acoustique généré par l'opération de dragage, est présenté dans la figure 7.

Dans le cas des dragues à godets, la principale source de bruit est constituée par les machines installées sur la barge. Aux fins de la modélisation, la source ponctuelle a été placée à une profondeur équivalente au tirant d'eau de la barge de dragage : 3 m.

Le SEL sur 24 h pour les opérations de dragage a été calculé en appliquant un décalage de $10 \log(N)$ décibels aux estimations du SEL sur 1 s, ce qui correspond à la durée totale des opérations sur un site donné, sur une période de 24 h (N_{24h} , en secondes; équation A-10, annexe A). La drague se déplacerait relativement peu au cours d'une période de 24 heures. Afin de fournir des estimations prudentes des distances nécessaires pour atteindre les seuils d'impact, on a supposé que la drague était à l'arrêt et

fonctionnait en continu pendant 24 heures; ici, $N_{24h} = 86\,400$ s.

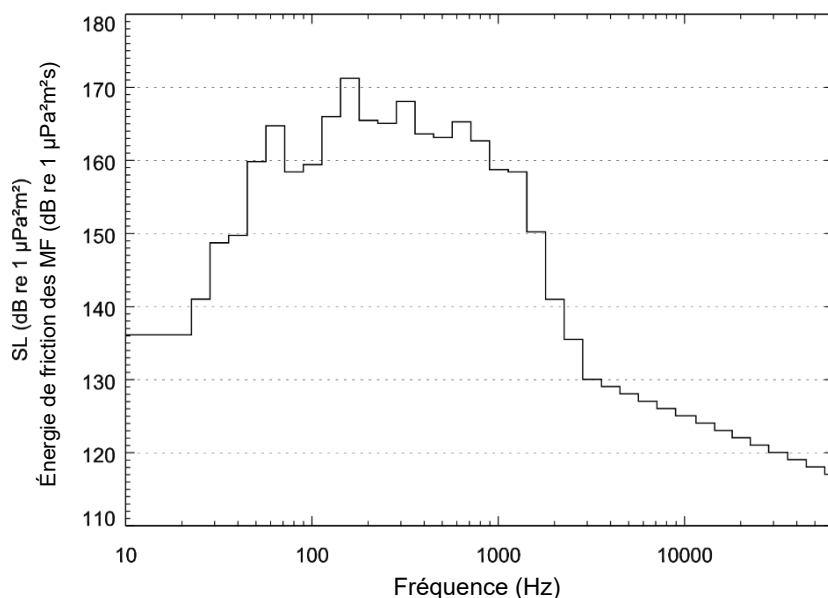


Figure 7. Spectre de niveau de source par bande de décédécade des opérations de forage : Niveau de source (dB par rapport à $1 \mu\text{Pa}^2 \text{m}^2$) pour la modélisation du champ de niveau de pression acoustique (SPL) et du niveau de la source d'énergie (dB par rapport à $1 \mu\text{Pa}^2 \text{m}^2 \text{s}$) pour la modélisation du champ $\text{SEL}_{24\text{h}}$. Pour les sources de bruit continu, le SPL et le SEL ont une valeur équivalente.

3.2. Modèles de propagation du son

3.2.1. Modélisation du son dans l'air

En ce qui concerne la propagation du son dans l'air, la perte de niveau acoustique dépend de la vitesse du son, qui varie en fonction de l'altitude par rapport au sol et à la surface de l'eau, et qui est déterminée par les conditions atmosphériques. Les canaux acoustiques qui se forment dans l'atmosphère peuvent piéger le son, ce qui entraîne sa propagation sur de longues distances à partir de la source. Afin d'estimer les distances par rapport aux seuils SEL et SPL, le modèle de propagation du bruit d'impulsion (INPM) de JASCO a été utilisé avec les niveaux de source indiqués dans la figure 3 afin de déterminer les niveaux sonores qui seraient perçus par les mammifères marins et les oiseaux ayant la tête au-dessus de l'eau ou de la surface terrestre (voir l'annexe C.1). Nous avons supposé que les oreilles d'un animal se trouvaient à une hauteur comprise entre 0 et 15 cm au-dessus de l'eau ou de la terre ferme, et nous avons extrait les niveaux sonores modélisés pour un récepteur situé à cette hauteur. Une modélisation prudente a été mise en œuvre en sélectionnant les paramètres d'entrée saisonniers (à savoir les profils atmosphériques) qui donnaient lieu à la plus longue propagation du son dans l'air.

3.2.2. Modélisation des bruits impulsionnels (dynamitage)

Le modèle FWRAM (de l'anglais *Full Waveform Range-dependent Model*; annexe C.2.2) a été utilisé pour modéliser la propagation du son sous-marin à partir de la détonation d'explosifs, le long de multiples plans verticaux s'étendant radialement à partir du site de l'explosion et pouvant aller jusqu'à 50 km de celui-ci, ou s'arrêtant au niveau des côtes. Au total, 86 plans radiaux verticaux ont été définis à partir du site de l'île Vardy, avec des pas azimutaux variables compris entre 2° et 5° , afin d'assurer une densité homogène et une couverture adéquate de la zone étroite menant aux eaux libres. De même, 72 plans radiaux ont été définis à partir du site de Baldwin Rock, avec un pas azimutal constant de 5° . Le pas de modélisation horizontal (radial) était de 10 m et les profondeurs des récepteurs (échantillonnage) couvraient l'ensemble de la colonne d'eau observée le long des radiaux modélisés (jusqu'à 440 m de profondeur), le pas augmentant avec la profondeur. La plage de fréquences de modélisation s'étendait de 9 à 1 122 Hz (limite inférieure de la bande des 10 Hz et limite supérieure de la bande des 1 000 Hz). Les niveaux de source SEL compris entre 1 200 et 25 000 Hz ont été obtenus en ajustant le niveau de la bande de fréquences décédécade de 1 000 Hz par -2 dB par décédécade. Cette approche a conduit à ce que le SEL de la bande décédécade 10 000 Hz soit inférieure de 20 dB à celle de la bande de 1 000 Hz. Pour les hautes fréquences extrapolées, les pertes de propagation dues à l'absorption volumétrique et à

la rugosité de la surface de la mer ont été prises en compte à l'aide de fonctions dépendantes de la distance, dérivées pour chaque fréquence. La rugosité de la surface correspondait à des vitesses de vent de 10 nœuds.

3.2.3. Modélisation des bruits continus (dragage et forage)

Le modèle de bruit des opérations maritimes (MONM) de JASCO (décrit à l'annexe C.2.1), qui combine des modèles de propagation basés sur l'équation parabolique et le lancer de rayons, a été utilisé pour modéliser le champ sonore des opérations de forage et de dragage dans une gamme de fréquences comprise entre 10 Hz et 25 kHz. La modélisation a été réalisée le long d'un éventail de plans radiaux, par incréments de 1° et 2° respectivement sur les sites 1 et 2. Les profils s'étendaient depuis la source soit jusqu'au littoral, soit jusqu'à une distance maximale de 50 km en direction des eaux profondes. Les profondeurs des points de prélèvement ont été choisies de manière à couvrir l'ensemble de la colonne d'eau sur la zone modélisée (jusqu'à une profondeur maximale de 440 m), avec des intervalles croissants en fonction de la profondeur. Pour les hautes fréquences, les pertes de propagation dues à l'absorption volumétrique et à la rugosité de la surface de la mer ont été prises en compte. La rugosité de la surface correspondait à des vitesses de vent de 10 nœuds.

4. Résultats

Les résultats de la modélisation de la propagation du son, obtenus à partir des paramètres d'entrée les plus prudents, sont présentés sous les formats suivants :

- Propagation du son dans l'air :
 - Pour les carnivores phocidés dans l'air (PCA) et les autres carnivores marins dans l'air (OCA), nous fournissons des tableaux indiquant les distances par rapport à la $SEL_{w,24h}$ ainsi que les seuils PK pour le PTS et le TTS.
 - Pour les pinnipèdes dans l'air (PA), nous fournissons des tableaux indiquant les distances par rapport à la $SEL_{w,24h}$ et les seuils PK de perturbation comportementale.
 - Pour les oiseaux, un tableau indiquant les distances correspondant au seuil de blessure est fourni.
 - Les niveaux SPL pondérés A et PK à l'angle nord-est de l'hôtel St. Christopher.
- Propagation du son sous l'eau :
 - Pour les mammifères marins sous l'eau, nous fournissons des tableaux indiquant les distances correspondant aux seuils $SEL_{w,24h}$ et PK pour les PTS et TTS, ainsi que des tableaux indiquant les distances correspondant aux seuils SPL pour les perturbations comportementales dues au bruit de détonation.
 - Nous fournissons des tableaux indiquant les distances par rapport au SEL_{24h} ainsi que des tableaux indiquant les distances par rapport aux PTS et TTS, et des tableaux indiquant les distances par rapport aux seuils de SPL correspondant aux perturbations comportementales des mammifères marins sous l'eau dues aux bruits de dragage et de forage.
 - Pour les poissons, les invertébrés, les œufs et les larves, nous fournissons des tableaux indiquant les distances correspondant à la mortalité, aux blessures potentiellement mortelles et aux blessures non mortelles.

Cette section présente des cartes de contours illustrant la propagation du son dans l'air et sous l'eau, indiquant les seuils correspondants à ces critères.

4.1. Site de l'île Vardy

4.1.1. Dynamitage au-dessus de la ligne de flottaison (scénario 1)

4.1.1.1. Distances par rapport aux seuils dans l'air et cartes

Dans cette section, R_{max} et $R_{95\%}$ par rapport aux critères applicables aux mammifères marins dans l'air sont présentées sous forme de tableaux, suivis de cartes indiquant la directivité et la distance par rapport à divers niveaux sonores dans l'air.

Tableau 7. *Carnivores marins dans l'air, seuils $SEL_{w,24h}$: Distances par rapport aux seuils pour le déplacement permanent du seuil (PTS) et du déplacement temporaire du seuil (TTS) résultant de la détonation de 84 charges de 37 kg de TNT (Southall *et al.* 2019).*

Espèce ou groupe d'audition fonctionnel	PTS			TTS		
	Seuil $SEL_{w,24h}$ ($L_{E,24h}$; dB par rapport à 20 $\mu Pa^2 s$)	R_{max} (m)	$R_{95\%}$ (m)	Seuil $SEL_{w,24h}$ ($L_{E,24h}$; dB par rapport à 20 $\mu Pa^2 s$)	R_{max} (m)	$R_{95\%}$ (m)
Carnivores phocidés dans l'air	138	<10	<10	123	<10	<10
Autres carnivores marins dans l'air	161	<1	<1	146	<1	<1

Tableau 8. *Carnivores marins dans l'air, seuils PK* : Distances par rapport aux seuils pour le déplacement permanent du seuil (PTS) et du déplacement temporaire du seuil (TTS) résultant de la détonation d'un nombre quelconque de charges de 48 kg de TNT (Southall *et al.* 2019).

Espèce ou groupe d'audition fonctionnel	PTS		TTS	
	Seuil PK (L_{pk} ; dB par rapport à 20 μ Pa)	R_{max} (m)	Seuil PK (L_{pk} ; dB par rapport à 20 μ Pa)	R_{max} (m)
Carnivores phocidés dans l'air	161	–	155	–
Autres carnivores marins dans l'air	176	–	170	–

Un tiret indique que le seuil n'a pas été atteint à une distance supérieure à 2 m de la source.

Tableau 9. *Oiseaux* : Distances à partir desquelles un déplacement permanent du seuil (PTS) est observé suite à la détonation d'un nombre quelconque de charges de 48 kg de TNT (Dooling et Popper 2016).

PTS SPL (dBA par rapport à 20 μ Pa)	R_{max} (m)	$R_{95\%}$ (m)	Superficie (m ²)
125	<10	<10	<314

Tableau 10. *Pinnipèdes dans l'air, seuils pondérés PK et PA* : Distances par rapport aux seuils de perturbation comportementale (Southall *et al.* (2007)).

Seuil	R_{max} (m)	$R_{95\%}$ (m)
SEL _{PA,24h} : 100 dB par rapport à 20 μ Pa ² s*	472	424
PK : 109 dB par rapport à 20 μ Pa	1127	Non estimé

* Les valeurs seuils sont pondérées en fonction de la fréquence, conformément à la courbe relative aux pinnipèdes dans l'air (PA) fournie par Southall *et al.* (2007).

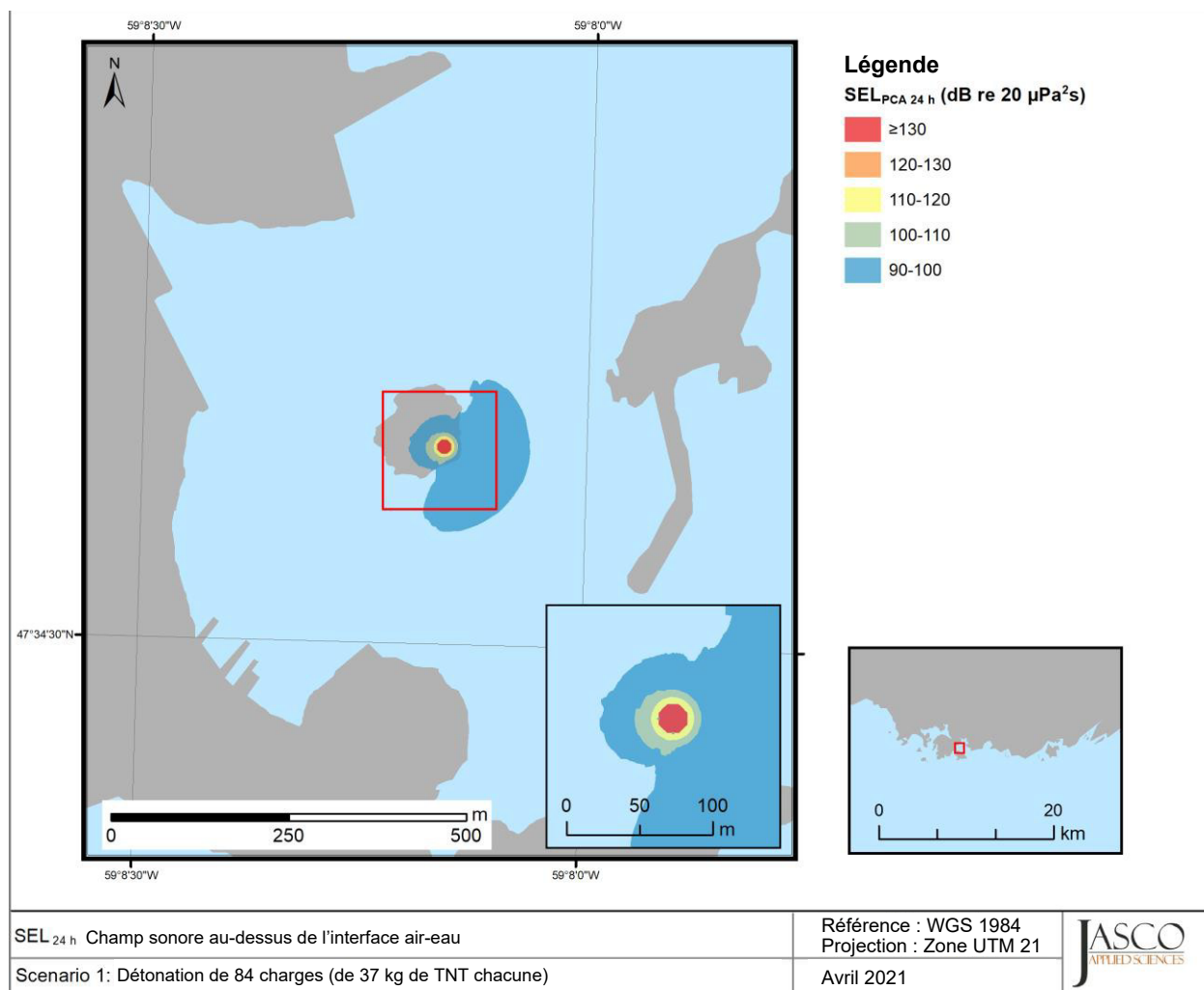


Figure 8. Scénario 1, carnivores phocidés du groupe d'audition dans l'air : Champ acoustique SEL_{24h} résultant de la détonation de 84 charges de 37 kg de TNT, avec les courbes de niveau correspondant au seuil SEL_{24h} TTS.

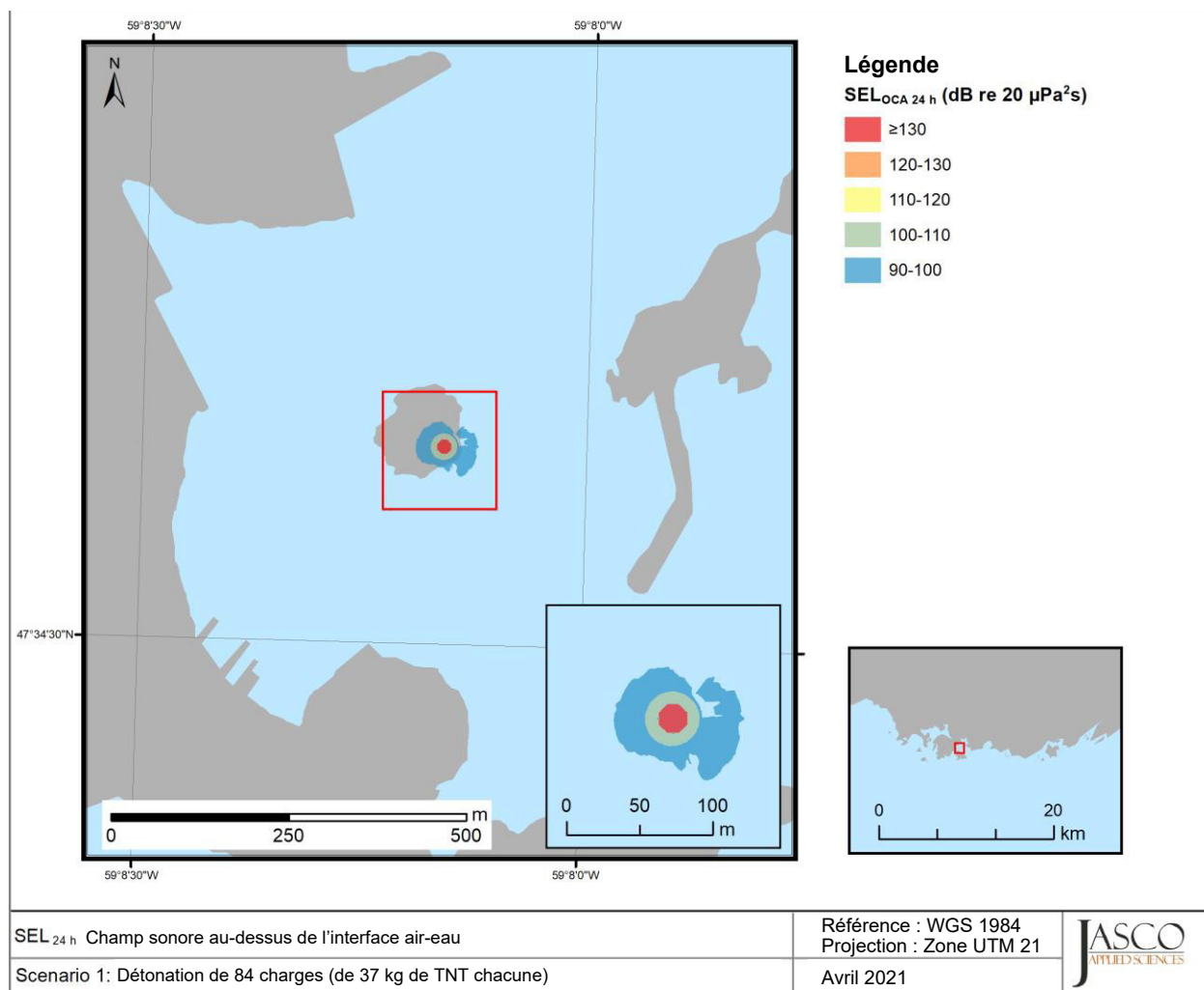


Figure 9. Scénario 1, autres carnivores marins du groupe d'audition dans l'air : Champ acoustique SEL_{24h} résultant de l'explosion de 84 charges de 37 kg de TNT. Les seuils SEL_{24h} PTS et TTS n'ont pas été atteints pour les portées supérieures à 10 m.

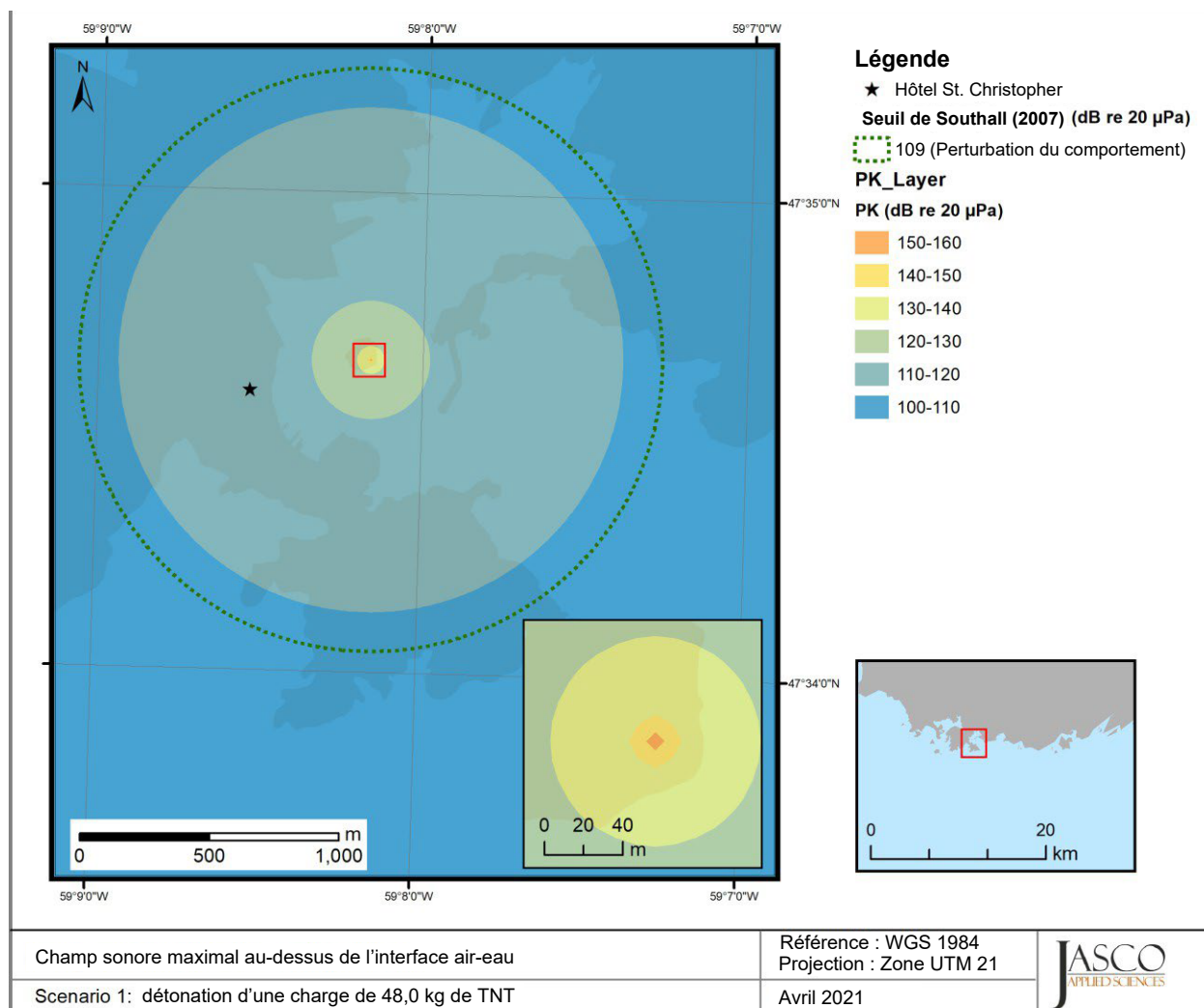


Figure 10. Scénario 1, carnivores phocidés et autres carnivores marins du groupe d'audition dans l'air : PK du champ acoustique résultant de la détonation d'une charge unique de 48 kg de TNT, avec la courbe du seuil PK de perturbation comportementale. Les seuils correspondant aux seuils PK PTS et TTS n'ont pas été atteints pour les portées supérieures à 10 m et ne sont donc pas indiqués.

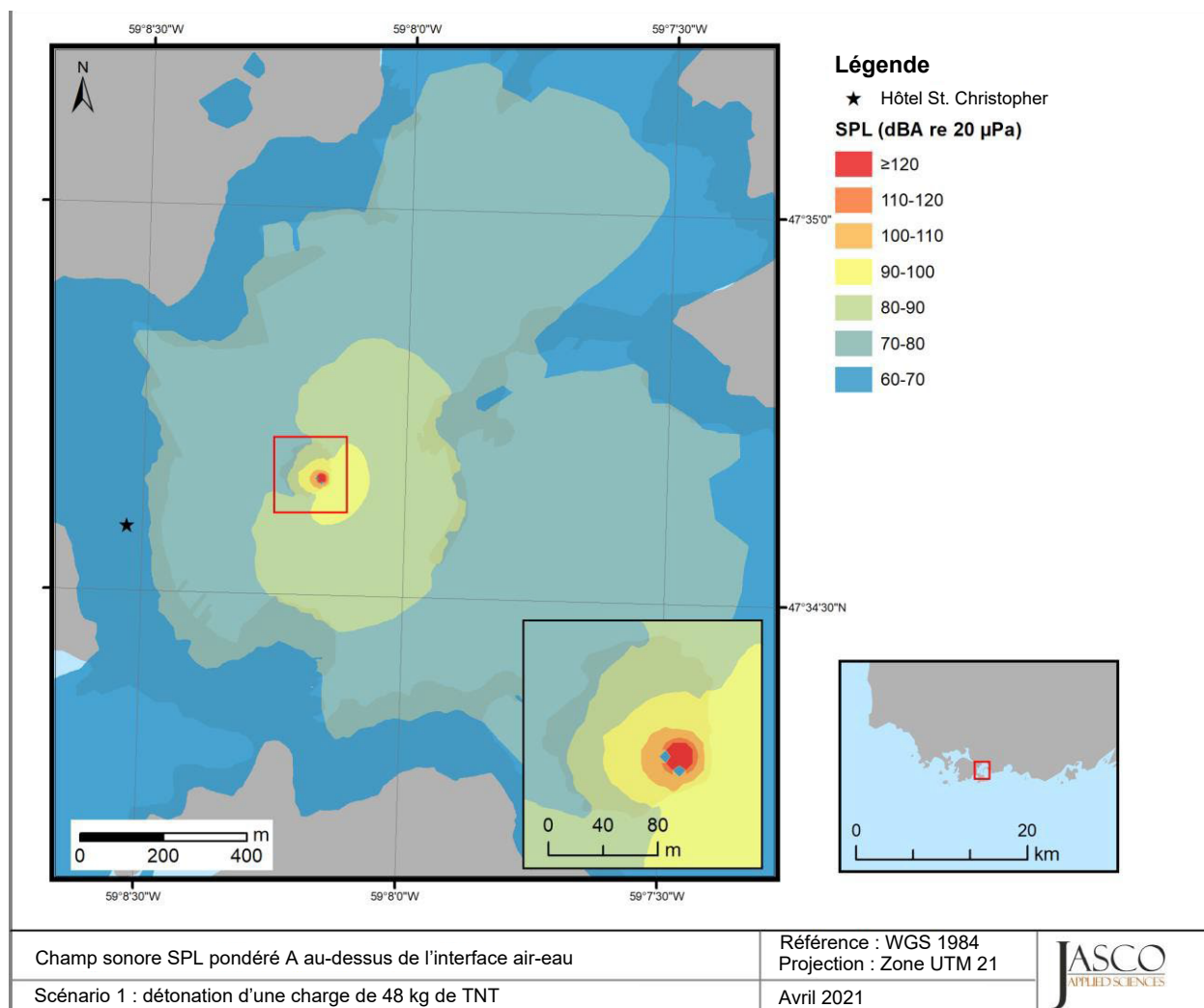


Figure 11. Scénario 1, oiseaux : Champ de pression acoustique (SPL) pondéré A résultant de la détonation d'une charge unique de 48 kg de TNT. Le seuil PTS n'a pas été atteint pour les distances supérieures à 10 m.

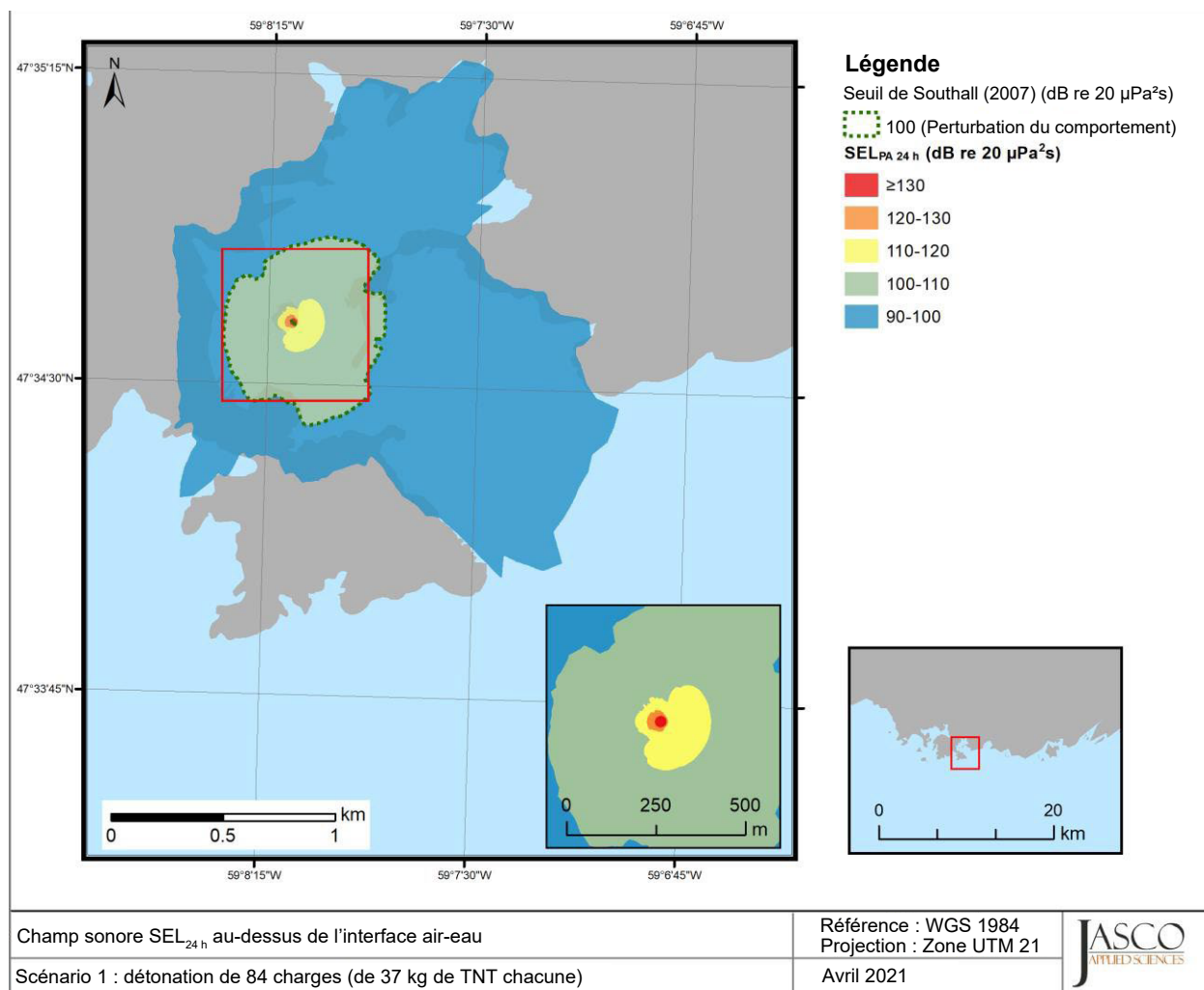


Figure 2. Scénario 1, pinnipèdes du groupe d'audition dans l'air : Champ acoustique SEL_{24h} résultant de la détonation de 84 charges de 37 kg de TNT, avec les courbes du seuil SEL_{24h} de perturbation comportementale.

4.1.1.2. Niveaux sonores à l'hôtel St. Christopher's

Les niveaux sonores dans l'air à l'angle nord-est de l'hôtel St. Christopher's (latitude 47° 34,584' N / longitude 59° 8,525' O) ont été modélisés. Ces niveaux sonores ont été générés par la détonation d'une charge de 48 kg de TNT au point le plus élevé de l'île Vardy. L'hôtel est situé à 480 m du lieu de l'explosion, à une altitude de 13 m au-dessus du niveau de la mer. Le SPL pondéré A est représenté sur la figure 13 (à gauche) sous la forme d'un graphique en coupe selon la distance et l'élévation. La dépendance vis-à-vis de l'altitude du SPL pondéré A à l'hôtel est illustrée à la figure 13 (à droite) : les niveaux varient entre 67 et 76,6 dBA par rapport à 20 μ Pa pour des altitudes comprises respectivement entre 13 et 100 m. Les niveaux de crête ont atteint 114,9 dB par rapport à 20 μ Pa. À titre de référence, les niveaux de crête d'une onde de choc de 110 à 117 dB par rapport à 20 μ Pa peuvent faire vibrer les vitres et les cloisons, tandis que des niveaux de crête de 140 dB par rapport à 20 μ Pa peuvent provoquer la rupture de certaines grandes fenêtres (OSMRE 2008).

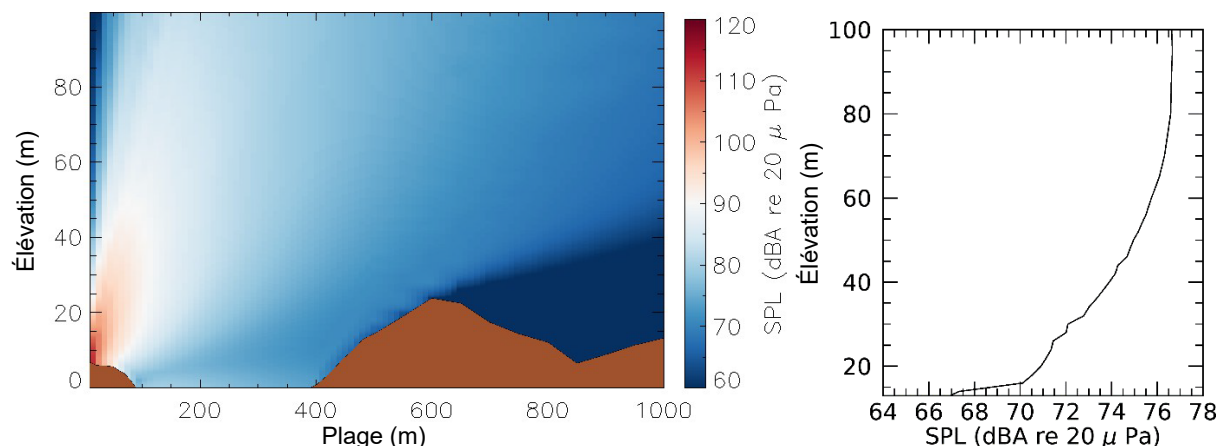


Figure 13. (À gauche) Graphique en coupe verticale illustrant la dépendance du SPL pondéré A à la distance et à l'altitude, résultant de la détonation d'une charge unique de 48 kg de TNT au point le plus élevé de l'île Vardy. (À droite) SPL pondéré A en fonction de l'altitude au-dessus du niveau de la mer à l'hôtel St. Christopher's, situé à une distance de 480 m et à une altitude de 13 m au-dessus du niveau de la mer.

4.1.2. Forage (scénario 2)

Tableau 11. *Mammifères marins, seuils $SEL_{w,24h}$* : Distances par rapport aux seuils pour le déplacement permanent du seuil (PTS), le déplacement temporaire du seuil (TTS), et la perturbation comportementale. LF : basse fréquence; HF : haute fréquence; VHF : très haute fréquence.

Espèce ou groupe d'audition fonctionnel	PTS*			TTS*			Comportementale†		
	Seuil $SEL_{w,24h}$ ($L_{E,24h}$; dB par rapport à $1 \mu Pa^2 s$)	R_{max} (m)	$R_{95\%}$ (m)	Seuil $SEL_{w,24h}$ ($L_{E,24h}$; dB par rapport à $1 \mu Pa^2 s$)	R_{max} (m)	$R_{95\%}$ (m)	Seuil SPL (L_p ; dB par rapport à $1 \mu Pa$)	R_{max} (m)	$R_{95\%}$ (m)
Cétacés LF	199	602	399	179	3 049	2 280	120	21 700	16 200
Cétacés LF	198	15	15	178	375	279			
Cétacés VHF	173	375	280	153	2 918	2 497			
Carnivores phocidés dans l'eau	201	103	94	181	1 155	912			
Autres carnivores dans l'eau	219	<10	<10	199	145	135			

* Seuils, groupe d'audition fonctionnel et filtres de fréquences selon Southall *et al.* (2019).

† Seuil selon NOAA Fisheries (2019), aucun filtre de fréquence appliqué.

Tableau 12. *Poisson* : Distances par rapport aux seuils pour les lésions réparables et au TTS, d'après Popper *et al.* (2014).

Espèce ou groupe d'audition fonctionnel	Blessure réversible			TTS		
	Seuil SPL (L_p ; dB par rapport à $1 \mu Pa$)	R_{max} (m)	$R_{95\%}$ (m)	Seuil SPL (L_p ; dB par rapport à $1 \mu Pa$)	R_{max} (m)	$R_{95\%}$ (m)
Poissons – La vessie natatoire joue un rôle dans l'audition	170	91	89	158	530	340

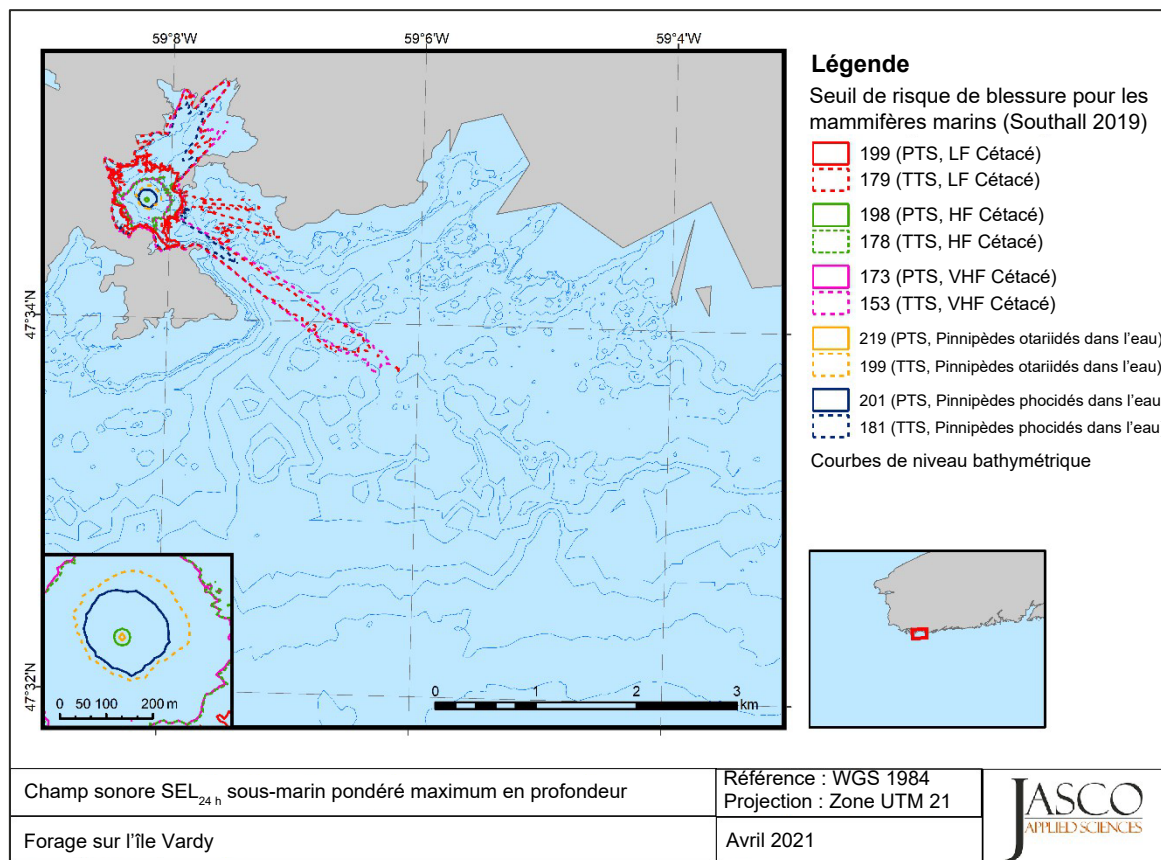


Figure 14. Scénario 2, seuils de blessure chez les mammifères marins : Courbes du seuil de niveau d'exposition acoustique pondéré sur 24 h ($SEL_{w,24h}$) résultant du forage à l'île Vardy.

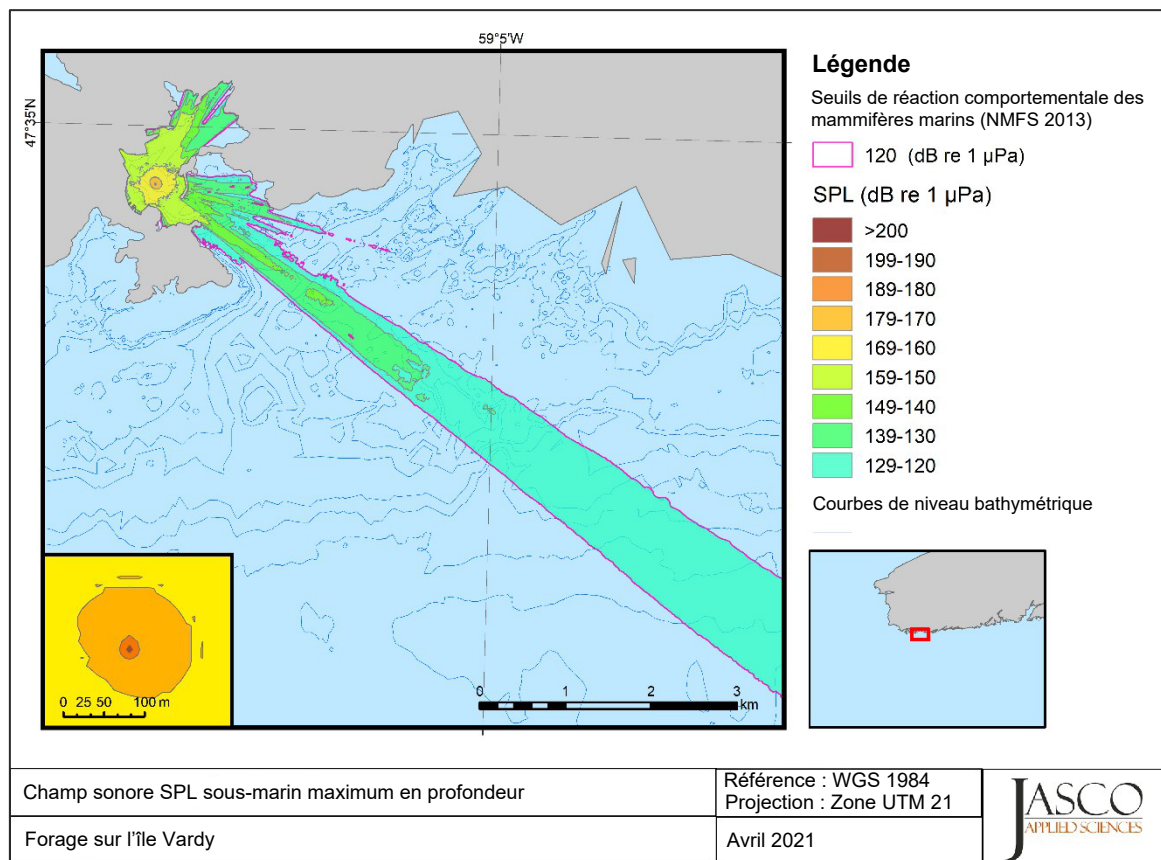


Figure 15. Scénario 2, seuils de blessure chez les poissons et seuil comportemental chez les mammifères marins : Courbes du seuil et du champ de pression acoustique (SPL) résultant des forages à l'île Vardy.

4.1.3. Dynamitage sous-marin (scénario 3)

Tableau 13. *Mammifères marins, seuils $SEL_{w,24h}$* : Distances (m) par rapport aux seuils pour le déplacement permanent du seuil (PTS) et du déplacement temporaire du seuil (TTS) résultant de la détonation de 84 charges. LF : basse fréquence; HF : haute fréquence; VHF : très haute fréquence.

Espèce ou groupe d'audition fonctionnel	PTS*			TTS*		
	Seuil $SEL_{w,24h}$ ($L_{E,24h}$; dB par rapport à $1 \mu Pa^2 s$)	R_{max} (m)	$R_{95\%}$ (m)	Seuil $SEL_{w,24h}$ ($L_{E,24h}$; dB par rapport à $1 \mu Pa^2 s$)	R_{max} (m)	$R_{95\%}$ (m)
Cétacés LF	183	2 500	2 240	168	6 160	5 120
Cétacés HF	185	<10	<10	170	72	72
Cétacés VHF	155	227	177	140	753	572
Phocidés dans l'eau	185	620	493	170	2 470	1 530
Otariidés et mustélidés dans l'eau	203	34	31	188	262	239

* Seuils, groupe d'audition fonctionnel et filtres de fréquences selon Southall *et al.* (2019).

Tableau 14. Distances (m) par rapport au seuil de perturbation comportementale des mammifères marins défini par la NOAA Fisheries (2019) pour le bruit impulsionnel résultant de la détonation d'une seule charge.

Seuil SPL (L_p ; dB par rapport à $1 \mu Pa$)	R_{max} (m)	$R_{95\%}$ (m)
160	6 300	5 270

Tableau 15. *Mammifères marins, seuils PK* : Distances (m) par rapport aux seuils de déplacement permanent du seuil (PTS) et de déplacement temporaire du seuil (TTS) basées sur Southall *et al.* (2019) résultant de la détonation d'une seule charge. LF : basse fréquence; HF : haute fréquence; VHF : très haute fréquence.

Espèce ou groupe d'audition fonctionnel	PTS			TTS		
	Seuil PK ($L_{p,pk}$; dB par rapport à $1 \mu Pa$)	R_{max} (m)	$R_{95\%}$ (m)	Seuil PK ($L_{p,pk}$; dB par rapport à $1 \mu Pa$)	R_{max} (m)	$R_{95\%}$ (m)
Cétacés LF	219	290	244	213	600	395
Cétacés HF	230	66	66	224	169	150
Cétacés VHF	202	921	596	196	2 180	909
Phocidés dans l'eau	218	331	258	212	613	455
Otariidés et mustélidés dans l'eau	232	52	52	226	123	116

Tableau 16. Poissons, invertébrés, œufs et larves : Distances par rapport aux seuils PK et PK-PK pour la mortalité, les blessures potentiellement mortelles et les blessures non mortelles résultant de la détonation d'explosifs.

Espèce ou groupe d'audition fonctionnel	Mortalité et blessure susceptible d'entraîner la mort			Blessure non mortelle		
	Seuil PK ($L_{p,pk}$; dB par rapport à 1 μ Pa)	R_{max} (m)	$R_{95\%}$ (m)	Seuil PK-PK ($L_{p,pk-pk}$; dB par rapport à 1 μ Pa)	R_{max} (m)	$R_{95\%}$ (m)
Poissons – toute espèce	220*	253	231	S. o.	S. o.	S. o.
Invertébrés (crustacés)	220*	253	231	209‡	771	587
Œufs et larves	13 mm/s (vitesse maximale des particules)*†	105*	S. o.	S. o.	S. o.	S. o.

* D'après Wright et Hopky (1998).

† D'après Popper *et al.* (2014).

‡ D'après Day *et al.* (2016a), Day *et al.* (2016 b), et Day *et al.* (2019).

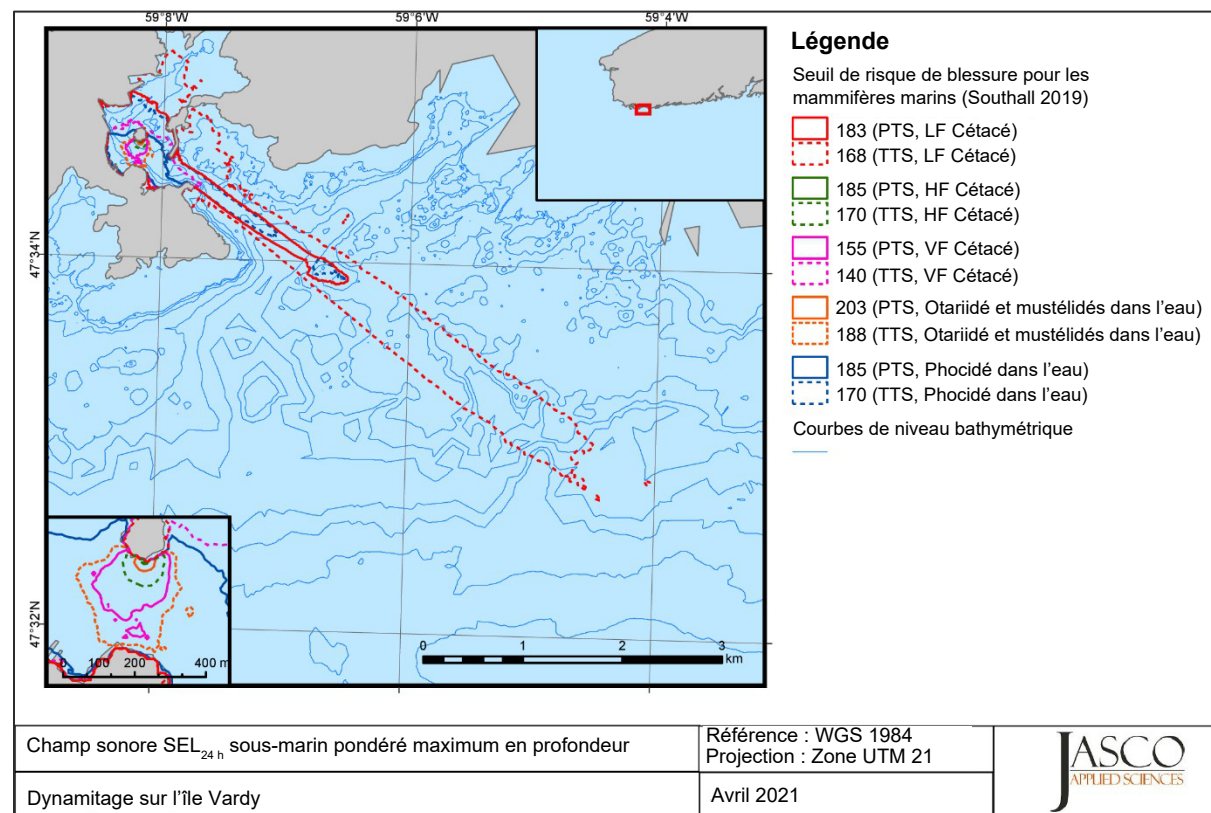


Figure 16. Scénario 3, seuils de blessure des mammifères marins : Courbes du seuil de niveau d'exposition acoustique pondéré sur 24 h ($SEL_{w,24h}$) résultant de la détonation de 84 charges à l'île Vardy.

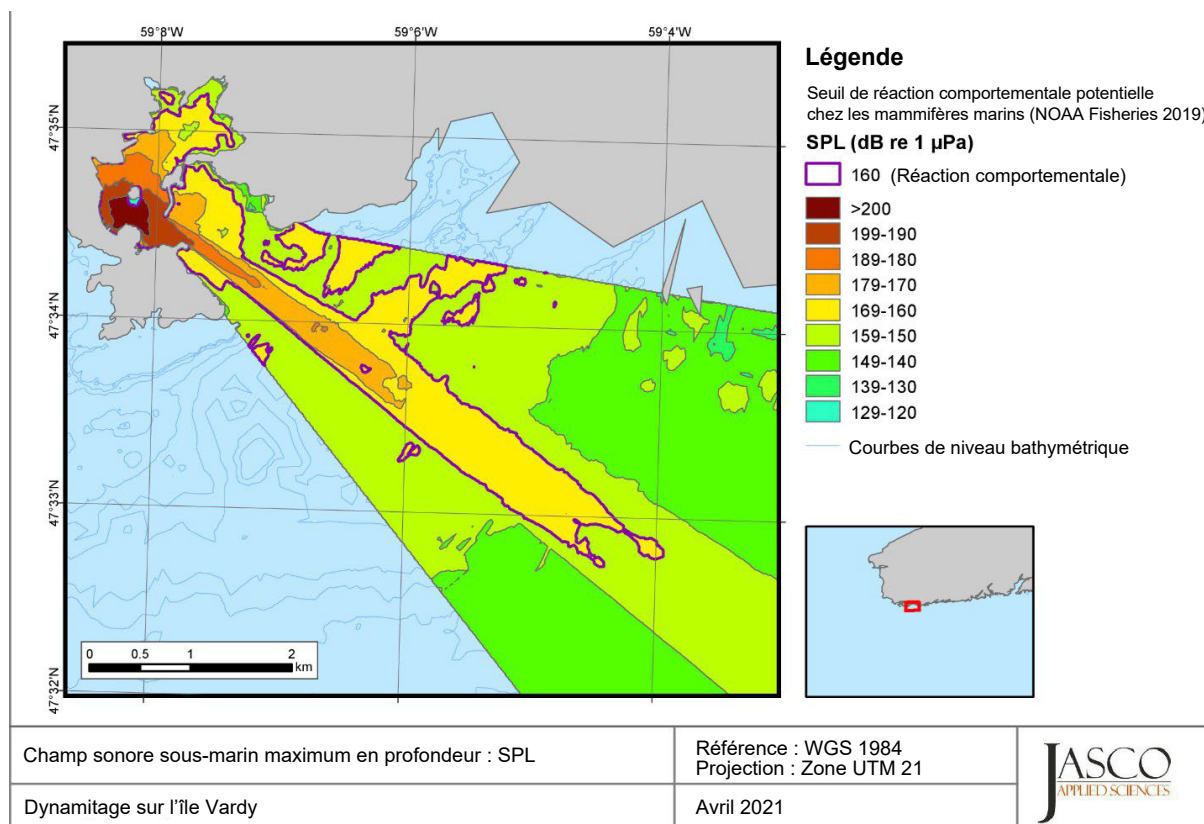


Figure 17. Scénario 3, seuil comportemental des mammifères marins : Courbes du seuil et du champ de pression acoustique (SPL) résultant de la détonation des charges à l'île Vardy.

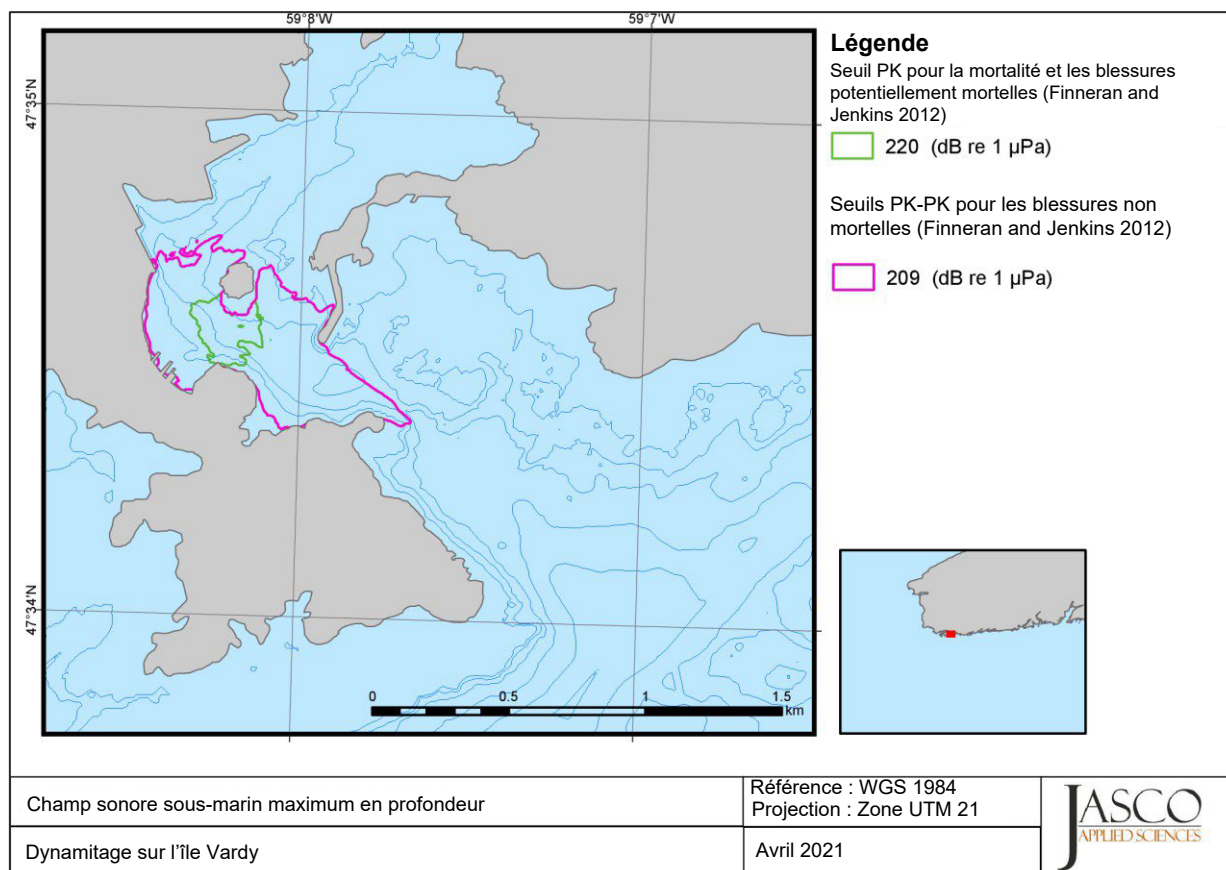


Figure 18. Scénario 3, seuils de blessure aux poissons et invertébrés : Courbes du seuil zéro à la crête et crête à crête résultant de la détonation de charges à l'île Vardy.

4.1.4. Dragage (scénario 4)

Tableau 17. *Mammifères marins, seuils $SEL_{w,24h}$* : Distances par rapport aux seuils pour le déplacement permanent du seuil (PTS), le déplacement temporaire du seuil (TTS), et la perturbation comportementale. LF : basse fréquence; HF : haute fréquence; VHF : très haute fréquence.

Espèce ou groupe d'audition fonctionnel	PTS*			TTS*			Comportementale†		
	Seuil $SEL_{w,24h}$ ($L_{E,24h}$; dB par rapport à $1 \mu Pa^2 s$)	R_{max} (m)	$R_{95\%}$ (m)	Seuil $SEL_{w,24h}$ ($L_{E,24h}$; dB par rapport à $1 \mu Pa^2 s$)	R_{max} (m)	$R_{95\%}$ (m)	Seuil SPL ($L_{p,1}$; dB par rapport à $1 \mu Pa$)	R_{max} (m)	$R_{95\%}$ (m)
Cétacés LF	199	46	45	179	781	585	120	2 493	2 121
Cétacés HF	198	<10	<10	178	<10	<10			
Cétacés VHF	173	<10	<10	153	131	113			
Carnivores phocidés dans l'eau	201	<10	<10	181	160	134			
Autres carnivores dans l'eau	219	<10	<10	199	<10	<10			

* Seuils, groupe d'audition fonctionnel et filtres de fréquences selon Southall *et al.* (2019).

† Seuil selon NOAA Fisheries (2019), aucun filtre de fréquence appliqué.

Tableau 18. *Poisson* : Distances par rapport aux seuils pour les lésions réparables et au TTS, d'après Popper *et al.* (2014).

Espèce ou groupe d'audition fonctionnel	Blessure réversible			TTS		
	Seuil SPL ($L_{p,1}$; dB par rapport à $1 \mu Pa$)	R_{max} (m)	$R_{95\%}$ (m)	Seuil SPL ($L_{p,1}$; dB par rapport à $1 \mu Pa$)	R_{max} (m)	$R_{95\%}$ (m)
Poissons – La vessie natatoire joue un rôle dans l'audition	170	<10	<10	158	19	19

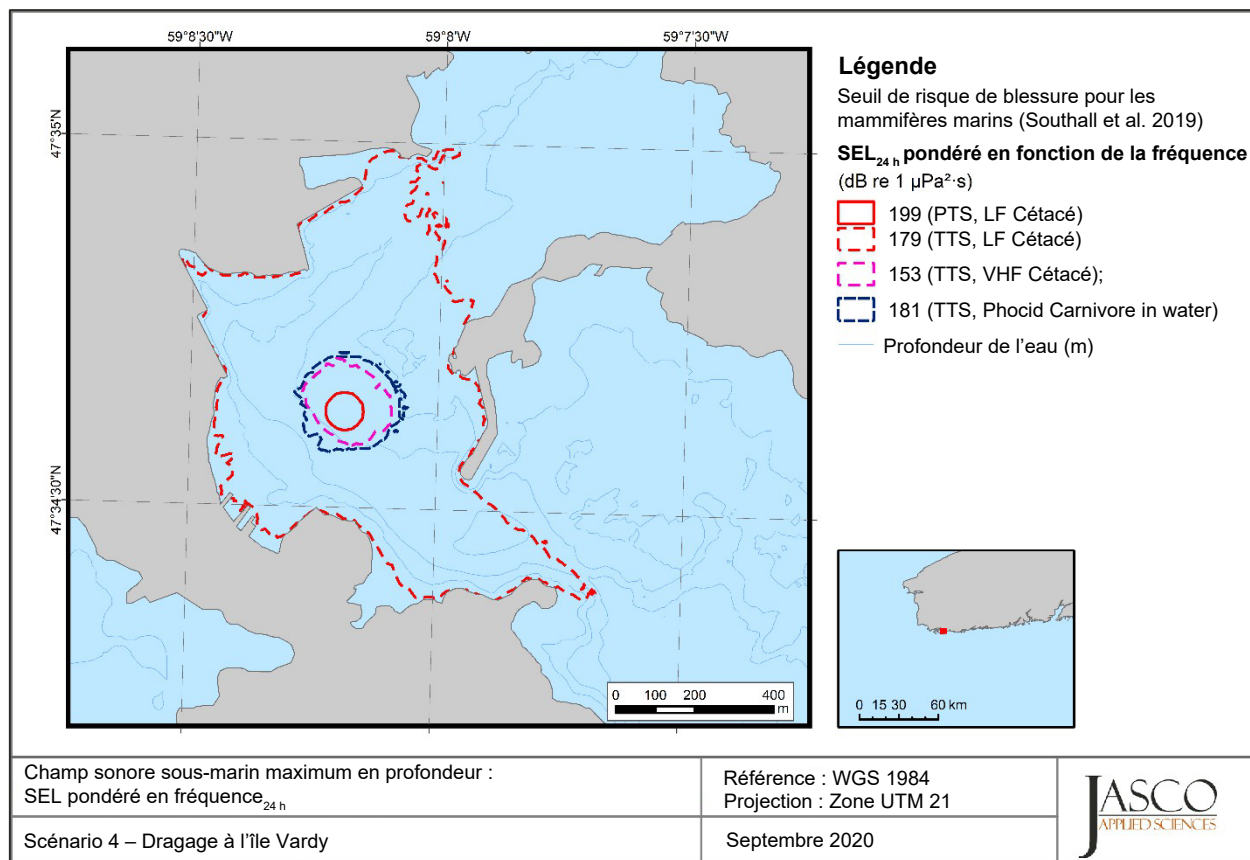


Figure 19. Scénario 4, seuils de blessure des mammifères marins : Courbes du seuil de niveau d'exposition acoustique pondéré sur 24 h ($\text{SEL}_{w,24h}$) résultant du dragage à l'île Vardy.

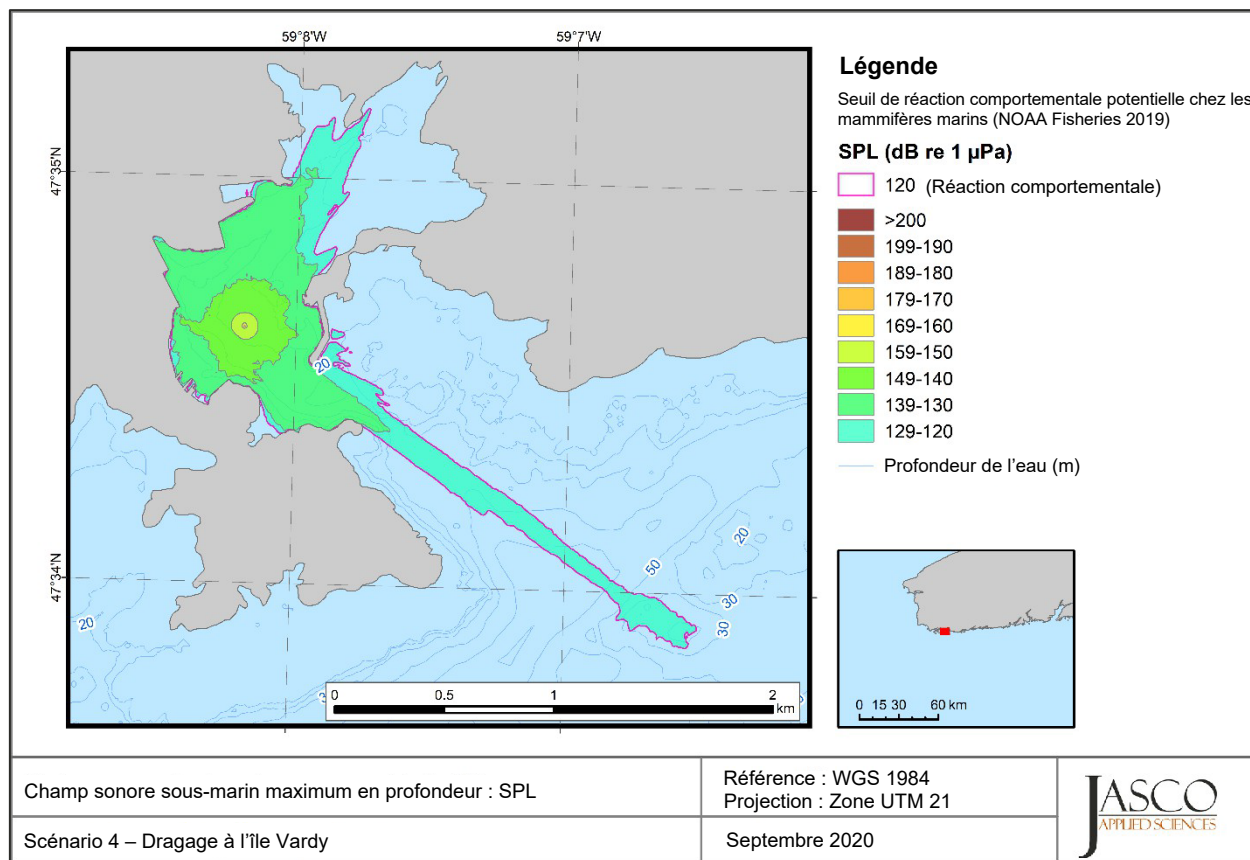


Figure 20. Scénario 4, seuil comportemental des mammifères marins : Courbes du seuil et du champ de pression acoustique (SPL) résultant du dragage à l'île Vardy. Les distances par rapport aux seuils de blessure pour les poissons sont trop courtes pour être représentées sur une carte.

4.2. Site de Baldwin Rock

4.2.1. Forage (scénario 5)

Tableau 19. *Mammifères marins, seuils $SEL_{w,24h}$* : Distances par rapport aux seuils pour le déplacement permanent du seuil (PTS), le déplacement temporaire du seuil (TTS), et la perturbation comportementale. LF : basse fréquence; HF : haute fréquence; VHF : très haute fréquence.

Espèce ou groupe d'audition fonctionnel	PTS*			TTS*			Comportementale†		
	Seuil $SEL_{w,24h}$ ($L_{E,24h}$; dB par rapport à $1 \mu Pa^2 s$)	R_{max} (m)	$R_{95\%}$ (m)	Seuil $SEL_{w,24h}$ ($L_{E,24h}$; dB par rapport à $1 \mu Pa^2 s$)	R_{max} (m)	$R_{95\%}$ (m)	Seuil SPL (L_p ; dB par rapport à $1 \mu Pa$)	R_{max} (m)	$R_{95\%}$ (m)
Cétacés LF	199	630	474	179	8 400	7 000	120	> 50 000	–
Cétacés HF	198	15	15	178	433	333			
Cétacés VHF	173	430	350	153	3 250	2 900			
Carnivores phocidés dans l'eau	201	94	80	181	1 680	1 065			
Autres carnivores dans l'eau	219	<10	<10	199	133	133			

* Seuils, groupe d'audition fonctionnel et filtres de fréquences selon Southall *et al.* (2019).

† Seuil selon NOAA Fisheries (2019), aucun filtre de fréquence appliqué.

Tableau 20. *Poisson* : Distances par rapport aux seuils pour les lésions réparables et au TTS, d'après Popper *et al.* (2014).

Espèce ou groupe d'audition fonctionnel	Blessure réversible			TTS		
	Seuil SPL (L_p ; dB par rapport à $1 \mu Pa$)	R_{max} (m)	$R_{95\%}$ (m)	Seuil SPL (L_p ; dB par rapport à $1 \mu Pa$)	R_{max} (m)	$R_{95\%}$ (m)
Poissons – La vessie natatoire joue un rôle dans l'audition	170	64	61	158	590	357

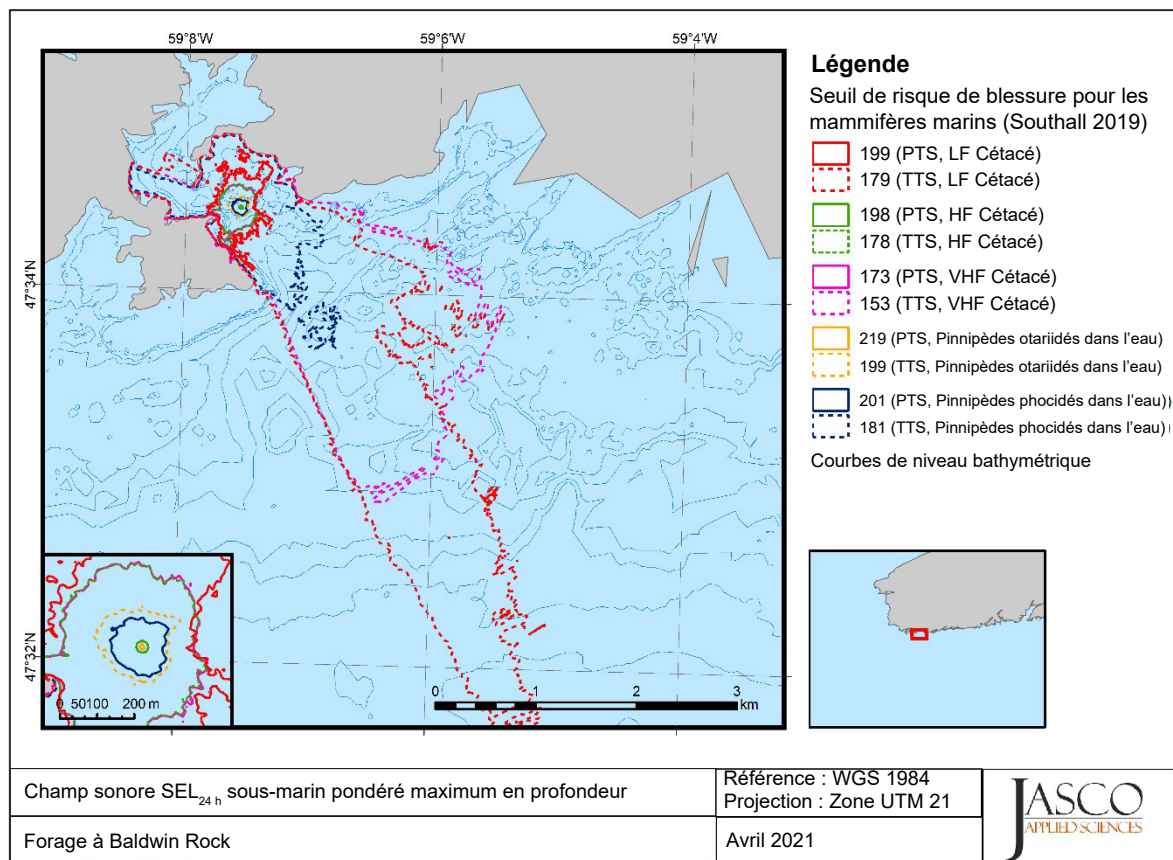


Figure 21. Scénario 5, seuils de blessure des mammifères marins : Courbes du seuil de niveau d'exposition acoustique pondéré sur 24 h ($SEL_{w,24h}$) résultant du forage à Baldwin Rock.

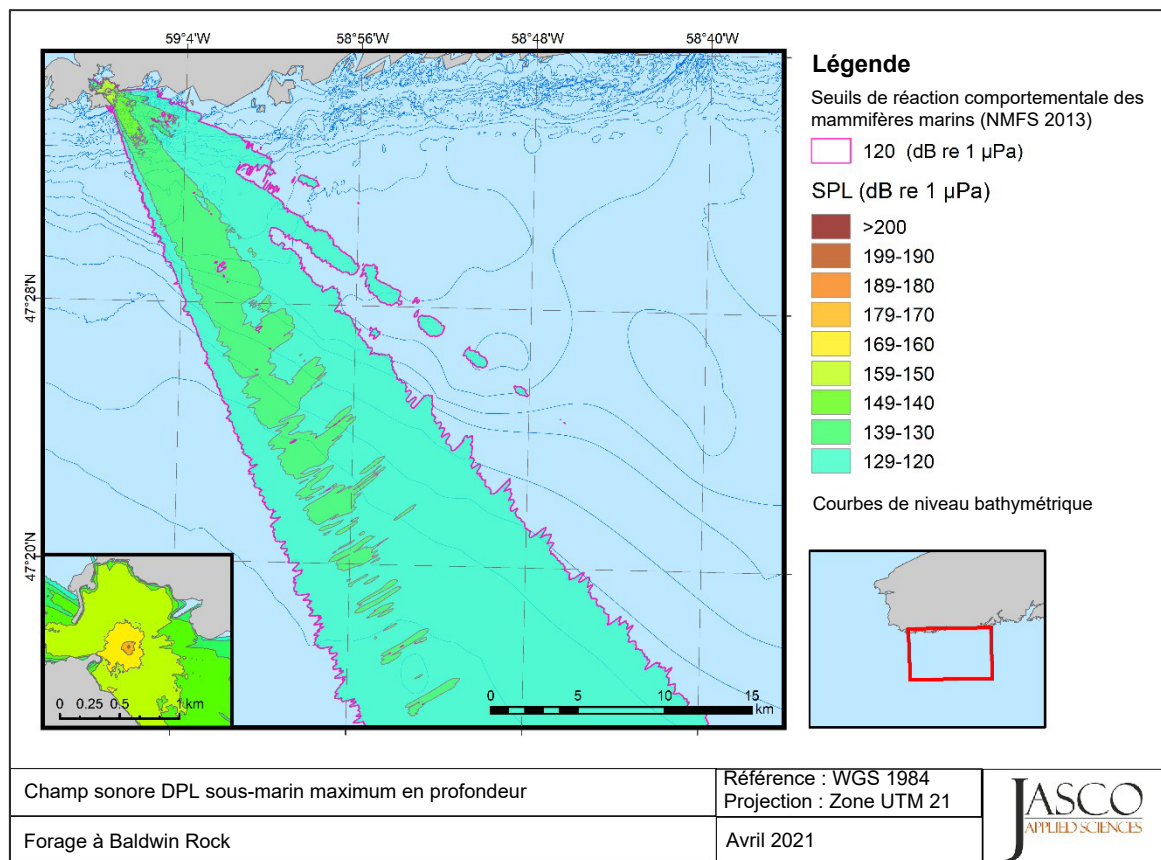


Figure 22. Scénario 5, seuils de blessure chez les poissons et seuil comportemental chez les mammifères marins : Courbes du seuil et du champ de pression acoustique (SPL) résultant des forages à Baldwin Rock.

4.2.2. Dynamitage sous-marin (scénario 6)

Tableau 21. *Mammifères marins, seuils $SEL_{w,24h}$* : Distances (m) par rapport aux seuils pour le déplacement permanent du seuil (PTS) et du déplacement temporaire du seuil (TTS) résultant de la détonation de 84 charges. LF : basse fréquence; HF : haute fréquence; VHF : très haute fréquence.

Espèce ou groupe d'audition fonctionnel	PTS*			TTS*		
	Seuil $SEL_{w,24h}$ (LE_{24h} , dB par rapport à $1 \mu Pa^2 s$)	R_{max} (m)	$R_{95\%}$ (m)	Seuil $SEL_{w,24h}$ (LE_{24h} , dB par rapport à $1 \mu Pa^2 s$)	R_{max} (m)	$R_{95\%}$ (m)
Cétacés LF	183	3 542	3 146	168	>50 000†	>50 000
Cétacés HF	185	<10	<10	170	66	66
Cétacés VHF	155	114	98	140	817	593
Phocidés dans l'eau	185	572	400	170	2 700	2 350
Otariidés et mustélidés dans l'eau	203	24	23	188	154	130

* Seuils, groupe d'audition fonctionnel et filtres de fréquences selon Southall *et al.* (2019).

† Les prévisions à grande échelle ne sont pas fiables en raison de facteurs environnementaux (comme la diffusion complexe et les hétérogénéités de surface et océaniques) dont le modèle ne tient pas compte. Ces facteurs peuvent augmenter considérablement les pertes de propagation sur de longues distances et réduire la portée jusqu'au seuil.

Tableau 22. Distances (m) par rapport au seuil de perturbation comportementale des mammifères marins défini par la NOAA Fisheries (2019) pour le bruit impulsionnel résultant de la détonation d'une seule charge.

Seuil SPL (L_p ; dB par rapport à $1 \mu Pa$)	R_{max} (m)	$R_{95\%}$ (m)
160	>50 000†	>50 000

† Les prévisions à grande échelle ne sont pas fiables en raison de facteurs environnementaux (comme la diffusion complexe et les hétérogénéités de surface et océaniques) dont le modèle ne tient pas compte. Ces facteurs peuvent augmenter considérablement les pertes de propagation sur de longues distances et réduire la portée jusqu'au seuil.

Tableau 23. *Mammifères marins, seuils PK* : Distances (m) par rapport aux seuils de déplacement permanent du seuil (PTS) et de déplacement temporaire du seuil (TTS) basées sur Southall *et al.* (2019) résultant de la détonation d'une seule charge. LF : basse fréquence; HF : haute fréquence; VHF : très haute fréquence.

Espèce ou groupe d'audition fonctionnel	PTS			TTS		
	Seuil PK ($L_{p,pk}$: dB par rapport à $1 \mu Pa$)	R_{max} (m)	$R_{95\%}$ (m)	Seuil PK ($L_{p,pk}$: dB par rapport à $1 \mu Pa$)	R_{max} (m)	$R_{95\%}$ (m)
Cétacés LF	219	287	210	213	647	511
Cétacés HF	230	64	64	224	155	123
Cétacés VHF	202	1 693	1 422	196	3 020	2 324
Phocidés dans l'eau	218	294	244	212	681	541
Otariidés et mustélidés dans l'eau	232	10	10	226	123	100

Tableau 24. Poissons, invertébrés, œufs et larves : Distances par rapport aux seuils PK et PK-PK pour la mortalité, les blessures potentiellement mortelles et les blessures non mortelles résultant de la détonation d'explosifs.

Espèce ou groupe d'audition fonctionnel	Mortalité et blessure susceptible d'entraîner la mort			Blessure non mortelle		
	Seuil PK ($L_{p,pk}$; dB par rapport à 1 μ Pa)	R_{max} (m)	$R_{95\%}$ (m)	Seuil PK-PK ($L_{p,pk-pk}$; dB par rapport à 1 μ Pa)	R_{max} (m)	$R_{95\%}$ (m)
Poissons – toute espèce	220*	280	187	S. o.	S. o.	S. o.
Invertébrés (crustacés)	220*	280	187	209‡	1 524	1 248
Œufs et larves	13 mm/s (vitesse maximale des particules)*†	113*	S. o.	S. o.	S. o.	S. o.

* D'après Wright et Hopky (1998).

† D'après Popper *et al.* (2014).

‡ D'après Day *et al.* (2016a), Day *et al.* (2016 b), et Day *et al.* (2019).

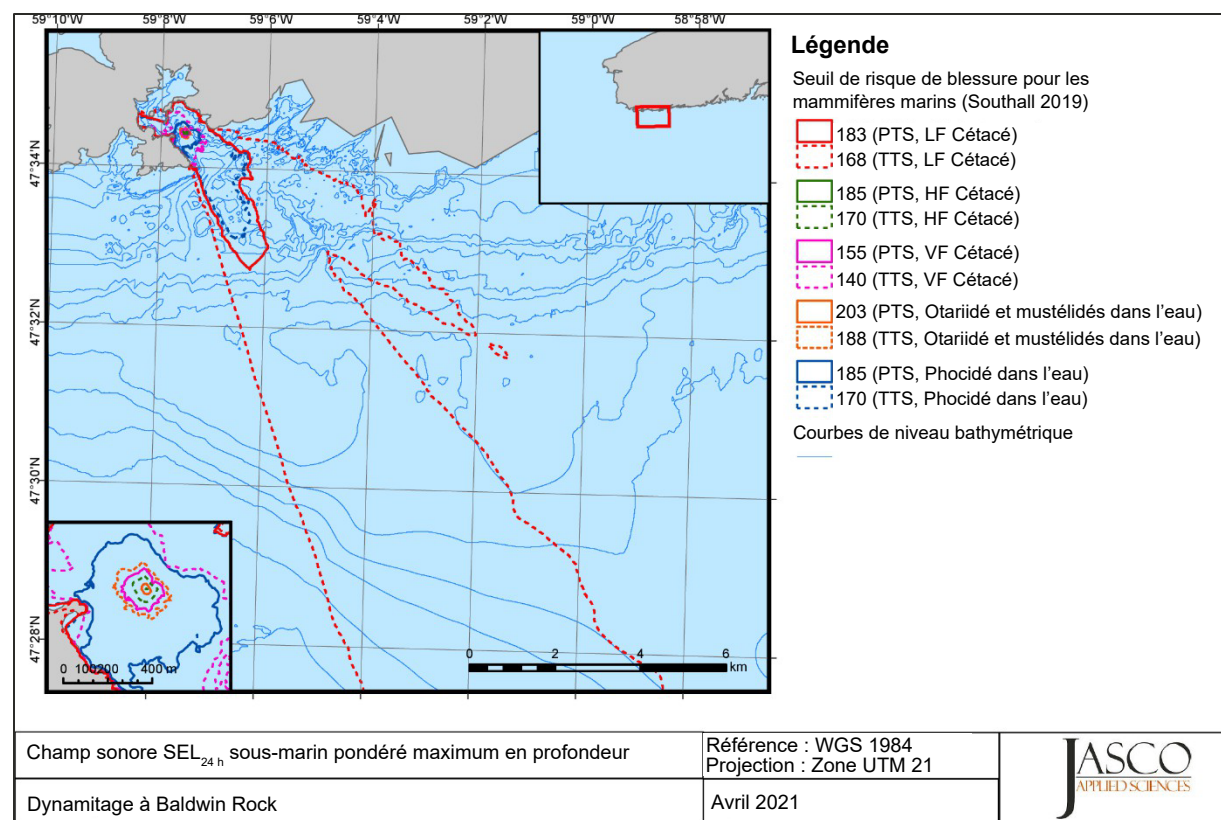


Figure 23. Scénario 6, seuils de blessure des mammifères marins : Courbes du seuil de niveau d'exposition acoustique pondéré sur 24 h ($SEL_{w,24h}$) résultant de la détonation de 56 charges à Baldwin Rock.

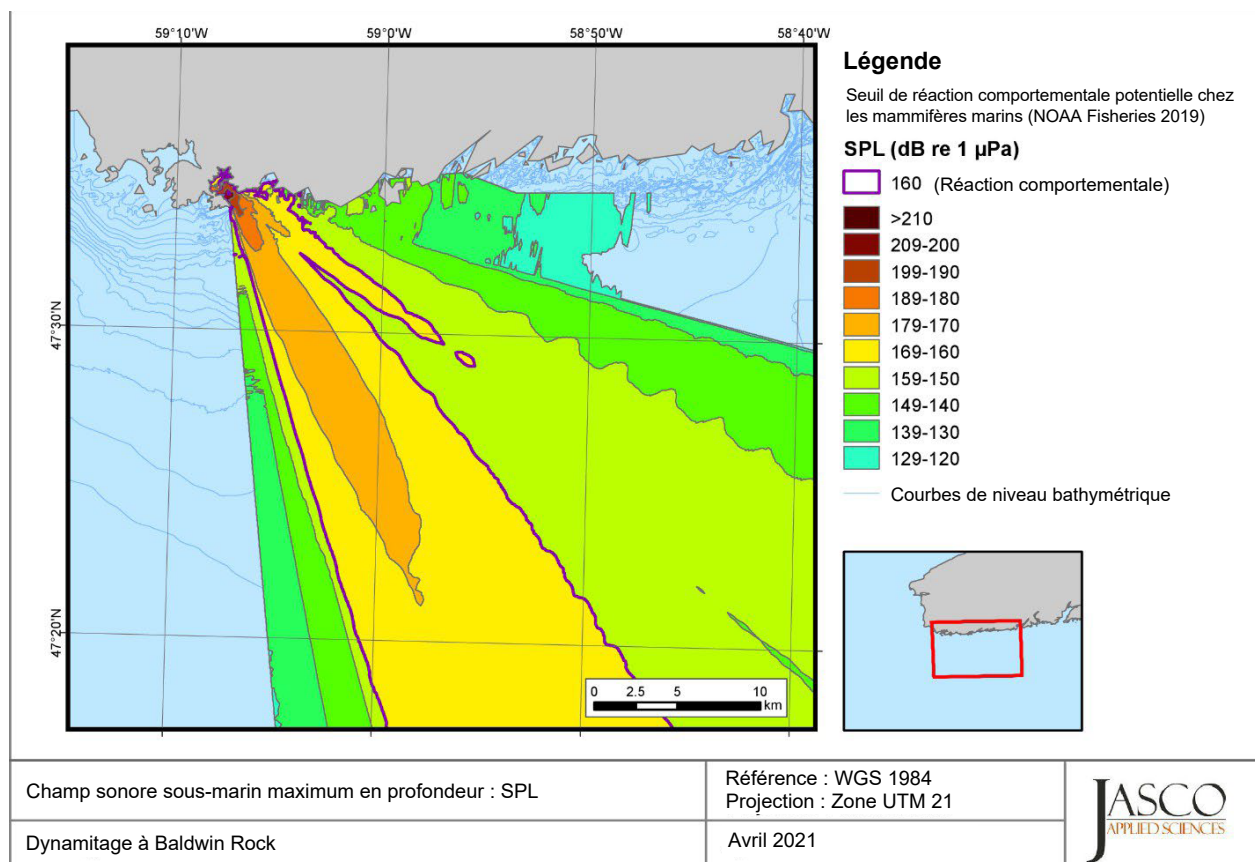


Figure 24. Scénario 6, seuil comportemental des mammifères marins : Courbes du seuil et du champ de pression acoustique (SPL) résultant de la détonation des charges à Baldwin Rock.

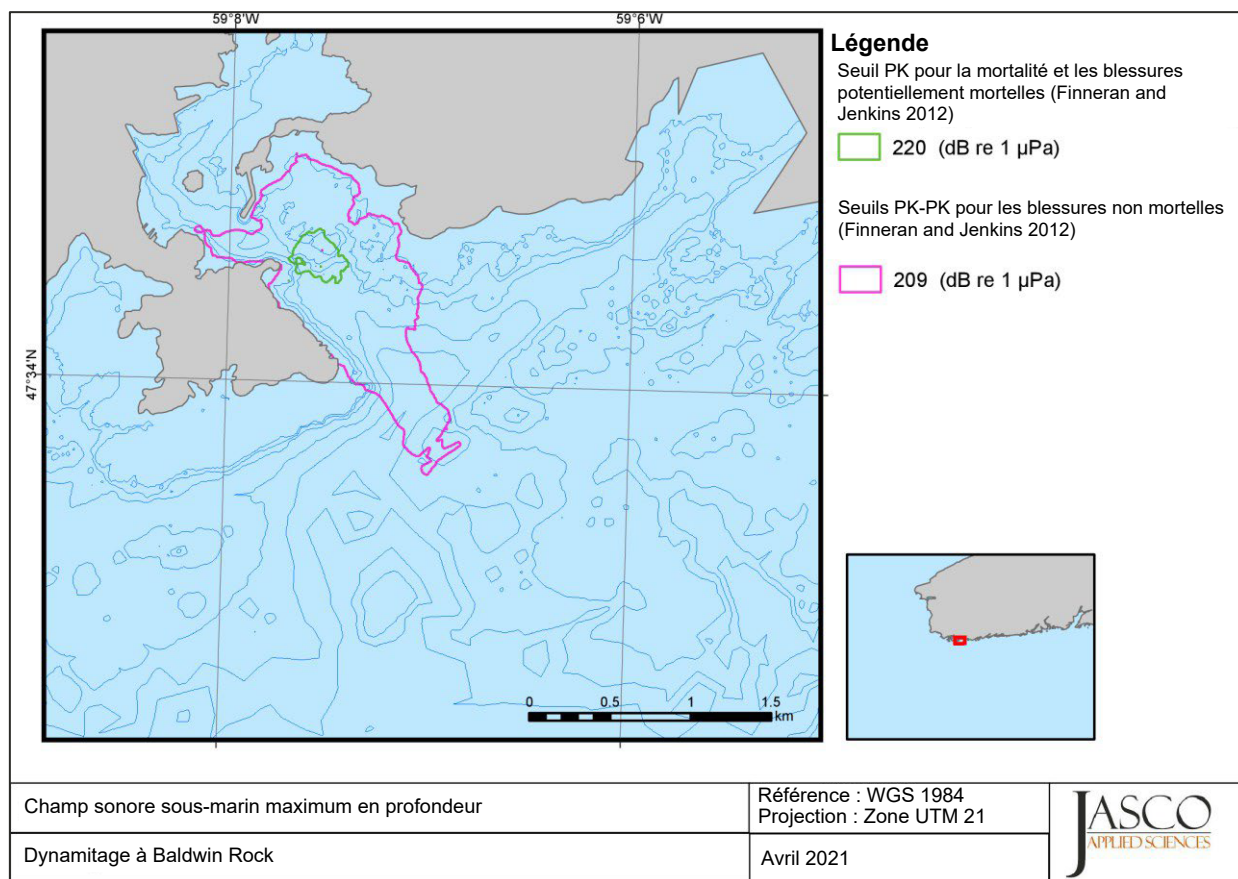


Figure 25. Scénario 6, seuils de blessure aux poissons et invertébrés : Courbes du seuil zéro à la crête et crête à crête résultant de la détonation de chaque charge à Baldwin Rock.

4.2.3. Dragage (scénario 7)

Tableau 25. *Mammifères marins, seuils $SEL_{w,24h}$* : Distances par rapport aux seuils pour le déplacement permanent du seuil (PTS), le déplacement temporaire du seuil (TTS), et la perturbation comportementale. LF : basse fréquence; HF : haute fréquence; VHF : très haute fréquence.

Espèce ou groupe d'audition fonctionnel	PTS*			TTS*			Comportementale†		
	Seuil $SEL_{w,24h}$ ($L_{E,24h}$; dB par rapport à $1 \mu Pa^2 s$)	R_{max} (m)	$R_{95\%}$ (m)	Seuil $SEL_{w,24h}$ ($L_{E,24h}$; dB par rapport à $1 \mu Pa^2 s$)	R_{max} (m)	$R_{95\%}$ (m)	Seuil SPL (L_p ; dB par rapport à $1 \mu Pa$)	R_{max} (m)	$R_{95\%}$ (m)
Cétacés LF	199	51	44	179	945	642	120	3 700	3 075
Cétacés HF	198	<10	<10	178	<10	<10			
Cétacés VHF	173	<10	<10	153	121	104			
Carnivores phocidés dans l'eau	201	<10	<10	181	158	121			
Autres carnivores dans l'eau	219	<10	<10	199	<10	<10			

* Seuils, groupe d'audition fonctionnel et filtres de fréquences selon Southall *et al.* (2019).

† Seuil selon NOAA Fisheries (2019), aucun filtre de fréquence appliqué.

Tableau 26. *Poisson* : Distances par rapport aux seuils pour les lésions réparables et au TTS, d'après Popper *et al.* (2014).

Espèce ou groupe d'audition fonctionnel	Blessure réversible			TTS		
	Seuil SPL (L_p ; dB par rapport à $1 \mu Pa$)	R_{max} (m)	$R_{95\%}$ (m)	Seuil SPL (L_p ; dB par rapport à $1 \mu Pa$)	R_{max} (m)	$R_{95\%}$ (m)
Poissons – La vessie natatoire joue un rôle dans l'audition	170	<10	<10	158	15	15

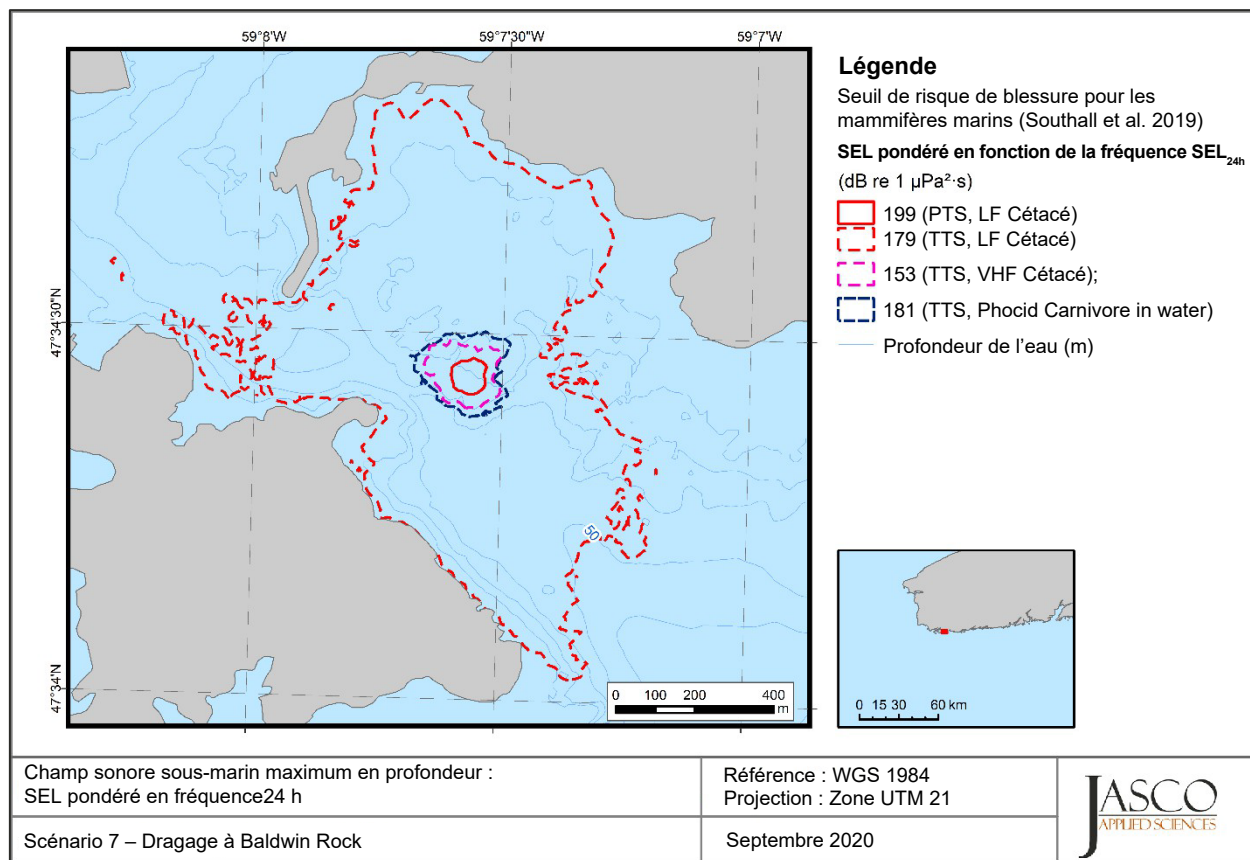


Figure 26. Scénario 7, seuils de blessure des mammifères marins : Courbes du seuil de niveau d'exposition acoustique pondéré sur 24 h ($SEL_{w,24h}$) résultant du forage à Baldwin Rock.

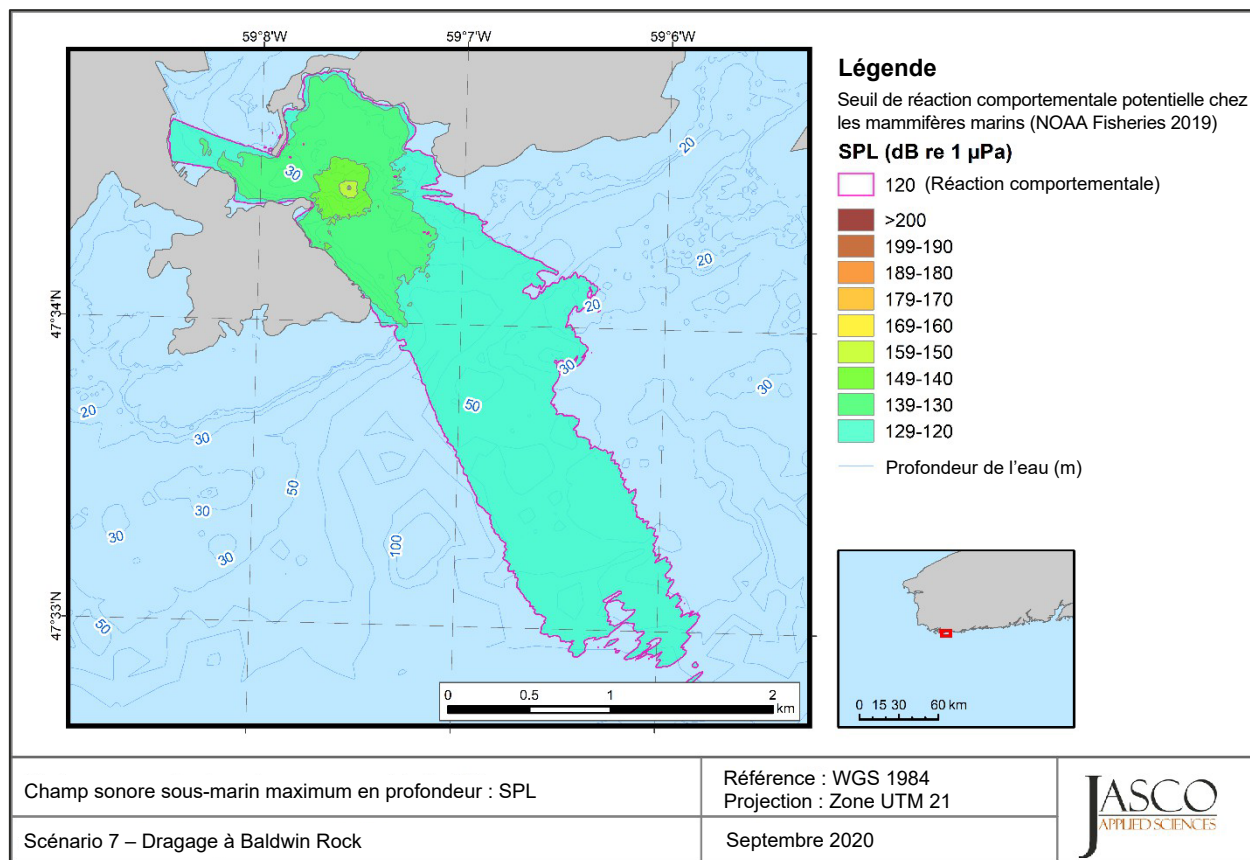


Figure 27. Scénario 7, seuil comportemental des mammifères marins : Courbes du seuil et du champ de pression acoustique (SPL) résultant du dragage à Baldwin Rock. Les distances par rapport aux seuils de blessure pour les poissons sont trop courtes pour être représentées sur une carte.

5. Résumé et conclusions

JASCO a réalisé une modélisation acoustique pour les travaux de construction liés au projet d'aménagement de Port aux Basques, à Terre-Neuve-et-Labrador. Les travaux de construction modélisés comprenaient des opérations de dynamitage de roche au-dessus du niveau de l'eau, des forages sous-marins, des opérations de dynamitage et des travaux de dragage. La modélisation a été réalisée sur deux sites : dans les limites de l'île Vardy (qui doit être entièrement supprimée) et à Baldwin Rock. L'île Vardy est située derrière le brise-lames qui limite la propagation du son sous-marin vers le large. Baldwin Rock se trouve à l'extérieur du port abrité, où la propagation du son sous l'eau est moins entravée par la terre.

5.1. Modélisation du son dans l'air

La propagation du son dans l'air n'a été modélisée qu'au niveau du site de l'île Vardy. Un modèle altimétrique maillé a été créé et des propriétés environnementales représentatives du mois d'avril ont été utilisées pour une modélisation prudente, car elles permettaient d'obtenir les distances de propagation dans l'air les plus longues. La modélisation visant à estimer les distances par rapport aux seuils $SEL_{w,24h}$ a été réalisée en supposant la détonation de 84 charges (37 kg de TNT par charge) placées dans des trous de forage réalisés sur l'île selon une grille de 2,5 x 2,5 m. La modélisation visant à estimer les distances selon les paramètres PK et SPL a été réalisée en partant de l'hypothèse de la détonation d'une seule charge de 48 kg de TNT. Les niveaux de source nécessaires à la détonation d'une charge dans l'air ont été estimés à l'aide du logiciel ConWep et de mesures de détonations dans l'air. Les distances par rapport aux seuils PTS et TTS pour les carnivores phocidés dans l'air (PCA) et les autres carnivores dans l'air (OCA), ainsi que les distances par rapport au seuil PTS pour les oiseaux, d'après (Dooling et Popper, 2016) ont été estimées à moins de 10 m (tableau 9) du site de détonation.

5.2. Modélisation du son sous-marin

Pour la modélisation de la propagation du son sous l'eau, une grille bathymétrique précise et à haute résolution a été créée à partir de plusieurs sources de données : des données bathymétriques multifaisceaux fournies par le client, des données issues de cartes marines et la grille bathymétrique à mailles de 3 secondes de la NOAA. Deux variantes de la grille ont été créées afin de refléter l'état du relief du fond à différentes étapes du projet de construction (annexe C.4.2). Les travaux de construction se dérouleront tout au long de l'année; c'est pourquoi le mois présentant les conditions de propagation du bruit les plus favorables (février) a été retenu pour la modélisation.

Les niveaux de source pour les opérations de forage et de dragage ont été établis à partir de mesures effectuées lors d'activités similaires. La signature de source d'une détonation de charge TNT sous la ligne de flottaison a été modélisée à l'aide du logiciel ConWep, avec un étalonnage par rapport à des courbes de régression empiriques.

L'évaluation de l'exposition a été réalisée en fonction de fourchettes correspondant à des seuils de niveau sonore spécifiques. Le champ sonore généré par les opérations de dragage et de forage a été évalué à l'aide des critères PTS/TTS de Southall *et al.* (2019) applicables aux bruits non impulsifs. Le champ sonore sous-marin résultant d'opérations de dynamitage sous-marines a été évalué à l'aide des deux critères définis par Southall *et al.* (2019) pour les bruits impulsifs.

Les scénarios de Baldwin Rock ont donné lieu à des plages de seuils plus larges que celles des opérations correspondantes menées à l'île Vardy. En effet, Baldwin Rock est situé plus près du large et dans des eaux plus profondes. Il convient également de noter qu'il est peu probable qu'un mammifère marin reste dans la partie relativement étroite du champ SEL de 24 heures qui s'échappe du port intérieur dans le cas des scénarios de l'île Vardy (p. ex. figure 14 – TTS pour les cétacés VHF).

Pour les scénarios de forage, nous avons modélisé un total de 38,3 heures de forage sur une période de 24 heures, réparties entre trois foreuses, pour les calculs SEL_{24h} . Les distances maximales par rapport aux seuils PTS et TTS pour les mammifères marins sont respectivement de 630 m et 8,4 km, ce qui correspond au groupe d'audition des cétacés à basse fréquence (LF). Pour les poissons, les distances correspondant aux seuils de blessures réversibles et de TTS sont respectivement inférieures à 64 et 590 m.

La modélisation du dragage a été réalisée en se basant sur une période de 24 heures par jour afin de simuler un fonctionnement en continu. Les résultats de la modélisation ont montré que le dragage est l'activité de construction la moins bruyante parmi les trois activités modélisées. Parmi tous les groupes de mammifères

marins étudiés, c'est le groupe des cétacés LF qui présentait la plus grande portée pour le PTS (51 m) et le TTS (945 m). Pour les poissons, les distances correspondant aux seuils de blessures réversibles et de TTS sont respectivement inférieures à <10 et 15 m.

L'opération de dynamitage a été modélisée à partir de 84 forages contenant 48 kg d'explosifs équivalents au TNT sur le site de l'île Vardy et de 56 forages contenant 56 kg d'explosifs équivalents au TNT sur le site de Baldwin Rock, tous détonés au cours d'une période de 24 heures. Les explosions sous-marines de roches ont généré l'impact acoustique le plus important en raison des propriétés de la source (amplitude élevée, avec un niveau de source PK de 271,3 dB par rapport à 1 μPa m et un niveau de source d'énergie de 246,5 dB par rapport à 1 $\mu\text{Pa}^2 \text{m}^2 \text{s}$ pour une charge équivalente à 56 kg de TNT), ainsi qu'à un trajet de propagation du son sous-marin favorable, caractérisé par un fond hautement réfléchissant et la présence d'un fort chenal de surface pendant les mois d'hiver.

Un résumé des fourchettes correspondant à des seuils spécifiques de PTS et de TTS, établi sur la base des deux critères de Southall *et al.* (2019), est présenté dans le tableau 27. Les fourchettes indiquées dans ce résumé correspondent aux valeurs maximales des critères $\text{SEL}_{w,24\text{h}}$ et PK pour chaque groupe.

Les distances maximales (R_{max}) à partir desquelles un PTS peut se produire concernent les cétacés de faible taille : 3,5 km pour les explosions à Baldwin Rock, et à 2,5 km à l'île Vardy (critères basés sur $\text{SEL}_{w,24\text{h}}$). Les cétacés VHF pourraient subir un PTS à des distances de 1,7 km du site de l'explosion à Baldwin Rock et de 920 m à l'île Vardy (critères basés sur le PK). Pour les pinnipèdes phocidés, la zone PTS s'étend sur 570 m à partir de Baldwin Rock et sur 620 m à partir de l'île Vardy (critères basés sur $\text{SEL}_{w,24\text{h}}$). La distance par rapport au seuil PTS pour les cétacés HF et les otariidés était inférieure à 65 m sur les deux sites (critères basés sur $\text{SEL}_{w,24\text{h}}$).

Tableau 27. Tableau récapitulatif des plages de critères doubles correspondant aux seuils d'apparition du PTS et du TTS (Southall *et al.* 2019) pour le dynamitage sous-marin. Les valeurs maximales de R_{max} (m) sont indiquées pour $\text{SEL}_{w,24\text{h}}$ et PK à l'île Vardy (84 charges de 48 kg) et Baldwin Rock (56 charges de 56 kg).

Espèce ou groupe d'audition fonctionnel	PTS	TTS
Île Vardy (scénario 3)		
Cétacés LF	2 500*	6 160*
Cétacés HF	66†	169†
Cétacés VHF	921†	2 180†
Phocidés dans l'eau	620*	2 470*
Otariidés et mustélidés dans l'eau	52†	262*
Baldwin Rock (scénario 6)		
Cétacés LF	3 542*	>50 000*‡
Cétacés HF	64†	155†
Cétacés VHF	1 693†	3 020†
Phocidés dans l'eau	570*	2 700*
Otariidés et mustélidés dans l'eau	24*	154*

* Cette fourchette est basée sur les critères $\text{SEL}_{w,24\text{h}}$.

† Cette fourchette repose sur de PK.

‡ Les prévisions à grande échelle ne sont pas fiables en raison de facteurs environnementaux (comme la diffusion complexe et les hétérogénéités de surface et océaniques) dont le modèle ne tient pas compte. Ces facteurs peuvent augmenter considérablement les pertes de propagation sur de longues distances et réduire la portée jusqu'au seuil.

Glossaire

1/3 d'octave

Un tiers d'octave. Remarque : Un tiers d'octave équivaut approximativement à une décidécade ($1/3 \text{ oct} \approx 1,003 \text{ ddec}$; ISO 2017).

bande 1/3 d'octave

Bande de fréquences dont la bande passante est d'un tiers d'octave. Remarque : La bande passante d'une bande d'un tiers d'octave augmente à mesure que la fréquence centrale augmente.

fenêtre temporelle à 90 % d'énergie

Intervalle de temps pendant lequel l'énergie cumulée passe de 5 à 95 % de l'énergie totale de l'impulsion. Cet intervalle contient 90 % de l'énergie totale de l'impulsion. Symbole : T_{90} .

niveau de pression acoustique à 90 % (SPL 90 %)

Les niveaux de pression acoustique efficaces, calculés sur la fenêtre temporelle représentant 90 % de l'énergie d'une impulsion. À utiliser uniquement pour les sons pulsés.

pondération A

Pondération sélective en fréquence pour l'audition humaine dans l'air, dérivée de l'inverse de la fonction d'audition d'isotonie de 40 phons sur l'ensemble des fréquences.

absorption

La diminution de l'amplitude de la pression acoustique due à la conversion en chaleur de l'énergie cinétique des particules du milieu de propagation.

impédance acoustique

Rapport entre la pression acoustique dans un milieu et le débit alternatif de ce milieu à travers une surface donnée, sous l'effet de l'onde sonore.

bruit ambiant

Ensemble des sons perçus en un lieu donné, généralement constitué d'un mélange de sons provenant de nombreuses sources proches et lointaines (ANSI S1.1-1994 (R2004)); p. ex. les navires, l'activité sismique, les précipitations, le mouvement de la banquise, l'action des vagues et l'activité biologique.

atténuation

La perte progressive d'énergie acoustique due à l'absorption et à la diffusion lorsque le son se propage dans un milieu.

audiogramme

Graphique représentant le seuil d'audibilité (niveaux de pression acoustique) en fonction de la fréquence, qui décrit la sensibilité auditive d'un animal sur toute sa gamme auditive.

pondération audiométrique

Processus consistant à mettre en correspondance l'audiogramme d'un animal avec les niveaux de pression acoustique afin de déterminer le niveau sonore par rapport au seuil d'audition (HT) de cet animal. Unité : dB par rapport à HT.

pondération des fréquences auditives (fonction de pondération auditive, fonction de pondération des fréquences)

Procédé de filtrage passe-bande des sons visant à réduire l'importance des fréquences inaudibles ou moins audibles pour certaines espèces ou certains groupes d'espèces de mammifères aquatiques (ISO 2017). On peut citer, à titre d'exemple, la pondération M introduite par Southall *et al.* (2007) pour décrire ce que l'on peut appeler des pondérations de fréquence généralisées pour divers groupes fonctionnels d'audition chez les mammifères marins qui tiennent compte de leurs bandes passantes fonctionnelles et qui permettent donc de caractériser les effets auditifs des sons puissants.

azimut

Angle horizontal par rapport à une direction de référence, qui correspond souvent au nord magnétique ou à la direction de déplacement. En navigation, on parle également de « relèvement ».

bruit de fond

Ensemble des sources d'interférences présentes dans un système utilisé pour la production, la détection, la mesure ou l'enregistrement d'un signal, indépendamment de la présence de ce signal (ANSI S1.1-1994 (R2004)). Le bruit ambiant détecté, mesuré ou enregistré avec un signal fait partie du bruit de fond.

bande passante

La gamme de fréquences sur laquelle un son se produit. On parle de « large bande » pour désigner une source qui produit des sons sur une large gamme de fréquences (p. ex. les canons à air comprimé sismiques, les navires), tandis que les sources à « bande étroite » produisent des sons sur une gamme de fréquences étroite (p. ex. les sonars) (ANSI/ASA S1.13-2005 (R2010)).

bar

Unité de pression égale à 100 kPa, ce qui correspond approximativement à la pression atmosphérique au niveau de la mer sur Terre. 1 bar équivaut à 10^5 Pa ou à 10^{11} μ Pa.

lissage par moyenne glissante

Technique de lissage de signal qui renvoie les moyennes de segments consécutifs d'une largeur spécifiée.

niveau sonore à large bande

Le niveau de pression acoustique total mesuré sur une plage de fréquences donnée. Si la plage de fréquences n'est pas précisée, elle fait référence à l'ensemble de la plage de fréquences mesurée.

cétacé

Tout animal appartenant à l'ordre des cétacés. Il s'agit de mammifères aquatiques, principalement marins, parmi lesquels on trouve les baleines, les dauphins et les marsouins.

onde de compression

Onde de vibration mécanique dans laquelle la direction du mouvement des particules est parallèle à la direction de propagation. Également appelée « onde primaire » ou « onde P ».

explosifs confinés

Explosifs qui détonent au sein d'un substrat, y compris la glace, par opposition aux explosifs non confinés qui détonent en eau libre, et non au sein d'un substrat.

bruit continu

Un bruit dont le niveau de pression acoustique reste supérieur au bruit ambiant pendant la période d'observation (ANSI/ASA S1.13-2005 (R2010)). Un bruit dont l'intensité varie progressivement au fil du temps, par exemple le bruit émis par un navire.

décade

Intervalle de fréquence logarithmique dont la limite supérieure est dix fois plus grande que sa limite inférieure (ISO 2006).

décidécade

Un dixième de décade (ISO 2017). Remarque : Le « dixième de décade » est un autre nom donné à la décidécade (symbole : ddec). Une « décidécade » équivaut approximativement à un tiers d'octave ($1 \text{ ddec} \approx 0,3322 \text{ oct}$); c'est pourquoi on l'appelle parfois « tiers d'octave ».

bande de décidécade

Bande de fréquences dont la bande passante est d'une décidécade. Remarque : La bande passante d'une bande de décidécade augmente à mesure que la fréquence centrale augmente.

décibel (dB)

Un dixième de bel. Unité de niveau lorsque la base du logarithme est la racine dixième de dix, et que les grandeurs concernées sont proportionnelles à une puissance ([ANSI] American National Standards Institute S1.1-1994 [R2004]).

delphinidé

Famille des dauphins océaniques, ou *Delphinidae*, qui comprend une trentaine d'espèces actuelles, parmi lesquelles les dauphins, les marsouins et les orques.

insonifié

Exposition au bruit.

courbe d'isosonie

Une ou plusieurs courbes représentant, en fonction de la fréquence, le niveau de pression acoustique nécessaire pour produire une intensité sonore donnée chez un auditeur ayant une audition normale, écoutant un type de son spécifié d'une manière spécifiée (ANSI S1.1-1994 (R2004)).

champ lointain

Zone dans laquelle, pour un observateur, le son provenant d'un ensemble de sources (ou d'une source répartie dans l'espace) semble émaner d'un point unique. La distance jusqu'au champ lointain acoustique augmente avec la fréquence.

niveau de pression acoustique à pondération temporelle rapide

Les niveaux de pression acoustique pondérés dans le temps, calculés sur la durée d'une impulsion (p. ex. une fenêtre temporelle couvrant 90 % de l'énergie), à l'aide de l'intégrateur temporel à fuite de Plomp et Bouman (1959) et d'une constante de temps de 125 ms. Habituellement utilisé pour les sons pulsés.

transformée de Fourier rapide (TFR)

Un algorithme efficace sur le plan informatique pour calculer la transformée de Fourier discrète.

fréquence

La fréquence d'oscillation d'une fonction périodique, exprimée en cycles par unité de temps. L'inverse de la période. Unité : hertz (Hz). Symbole : *f*. 1 Hz équivaut à 1 cycle par seconde.

groupe d'audition

Groupes d'espèces de mammifères marins présentant des plages auditives similaires. Les groupes d'audition fonctionnels couramment définis comprennent les cétacés à fréquences basses, à fréquences moyennes et à hautes fréquence, les pinnipèdes dans l'eau et les pinnipèdes dans l'air.

géoacoustique

Concernant les propriétés acoustiques des fonds marins.

seuil d'audition

Niveau de pression acoustique correspondant à toute fréquence de la gamme d'audition qui est à peine perceptible pour un individu donné, en l'absence de bruit de fond significatif, pendant un pourcentage spécifique d'essais expérimentaux.

hertz (Hz)

Unité de fréquence définie comme un cycle par seconde.

Bruit impulsionnel

Bruit généralement bref et intermittent, caractérisé par un temps de montée rapide (en quelques secondes) et un retour rapide aux niveaux ambiants (NOAA 2013, ANSI S12.7-1986 (R2006)). Par exemple, les canons à air comprimé utilisés pour les études sismiques et le battage de pieux par impact.

masquage

Masquage des bruits d'intérêt par des bruits de fréquences similaires.

densité spectrale de pression acoustique quadratique moyenne

Distribution en fonction de la fréquence de la pression acoustique quadratique moyenne par unité de bande passante (généralement 1 Hz) d'un son présentant un spectre continu (ANSI S1.1-1994 (R2004)). Unité : $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$.

médiane

Le 50^e centile d'une distribution statistique.

mysticètes

Les mysticètes, un sous-ordre de cétacés, utilisent leurs fanons, et non leurs dents, pour filtrer leur nourriture dans l'eau. On ne sait pas s'ils utilisent l'écholocation, mais ils se servent des sons pour communiquer. Ce groupe comprend notamment les rorquals (*Balaenopteridae*), les baleines franches (*Balaenidae*) et les baleines grises (*Eschrichtius robustus*).

bruit non impulsionnel

Son à bande passante, à bande étroite ou tonale, bref ou prolongé, continu ou intermittent, et qui ne présente généralement pas de pic de pression élevé avec un temps de montée rapide (généralement seules de faibles fluctuations du niveau en décibels), comme c'est le cas pour les signaux impulsionnels (ANSI/ASA [ANSI] American National Standards Institute et [ASA] Acoustical Society of America S3.20-1995 [R2008]). Par exemple, les navires, les aéronefs, les machines, le secteur du bâtiment et le battage de pieux par vibration (NIOSH 1998, NOAA 2015).

octave

L'intervalle entre un son et un autre son dont la fréquence est le double ou la moitié de celle du premier. Par exemple, une octave au-dessus de 200 Hz correspond à 400 Hz, et une octave en dessous de 200 Hz correspond à 100 Hz.

odontocètes

Ces baleines se caractérisent par la présence de dents, et non de fanons. Les odontocètes constituent un sous-ordre des cétacés, un groupe comprenant les baleines, les dauphins et les marsouins. Les crânes des cétacés à dents sont pour la plupart asymétriques, ce qui constitue une adaptation liée à leur écholocation. Ce groupe comprend les cachalots, les orques, les bélugas, les narvals, les dauphins et les marsouins.

otariidés

Terme couramment utilisé pour désigner les membres de la famille des otariidés, les phoques à oreilles, communément appelés otaries et otaries à fourrure. Les otariidés sont adaptés à un mode de vie semi-aquatique; ils utilisent leurs grandes nageoires avant pour se propulser. Ce sont leurs oreilles qui les distinguent des phocidés. Les otariidés constituent l'un des trois principaux groupes de la superfamille des pinnipèdes; les deux autres groupes sont les phocidés et les morses.

méthode des équations paraboliques

Une solution efficace sur le plan informatique de l'équation d'onde acoustique, utilisée pour modéliser les pertes de transmission. L'approximation par l'équation parabolique ne tient pas compte des effets du son dispersé, ce qui simplifie le calcul de la perte de transmission. L'effet du son dispersé est négligeable pour la plupart des problèmes liés à la propagation acoustique en milieu marin.

niveau de pression de crête (PK)

Le niveau de pression acoustique instantané maximal, dans une bande de fréquences donnée, sur une période donnée. Également appelé « niveau de pression zéro la crête ». Unité : décibel (dB).

niveau de pression crête à crête (PK-PK)

La différence entre les niveaux de pression instantanés maximal et minimal. Unité : décibel (dB).

déplacement permanent du seuil (PTS)

Une perte permanente de la sensibilité auditive due à une exposition excessive au bruit. Le PTS est considéré comme une lésion auditive.

phocidés

Terme générique utilisé pour désigner l'ensemble des membres de la famille des phocidés. Ces phoques véritables (sans oreilles) sont mieux adaptés à la vie aquatique que les otariidés, qui présentent davantage d'adaptations terrestres. Les phocidés utilisent leurs nageoires postérieures pour se propulser. Les phocidés constituent l'un des trois principaux groupes de la superfamille des pinnipèdes; les deux autres groupes sont les otariidés et les morses.

pinnipèdes

Terme couramment utilisé pour désigner les trois groupes qui composent la superfamille des pinnipèdes : les phocidés (les phoques ou phoques sans oreilles), les otariidés (les phoques à oreilles, les otaries et les lions de mer) et les morses.

source ponctuelle

Source qui émet un son comme s'il provenait d'un point unique (ANSI S1.1-1994 (R2004)).

densité du spectre de puissance

Terme générique, défini formellement comme la puissance en W/Hz, mais parfois utilisé de manière imprécise pour désigner la densité spectrale d'autres paramètres, comme la pression au carré ou la pression au carré intégrée dans le temps.

pression acoustique

La variation par rapport à la pression hydrostatique ambiante provoquée par une onde sonore. Également appelée surpression. Unité : pascal (Pa). Symbole : p .

pression hydrostatique

Pression à une profondeur donnée dans un liquide au repos, résultant du poids du liquide agissant sur une surface unitaire à cette profondeur, auquel s'ajoute toute pression agissant sur la surface du liquide. Unité : pascal (Pa).

niveau de réception (RL)

Le niveau sonore mesuré (ou qui serait mesuré) en un endroit donné.

eff

Valeur quadratique moyenne.

onde de cisaillement

Onde de vibration mécanique dans laquelle la direction du mouvement des particules est perpendiculaire à la direction de propagation. Également appelée « onde secondaire » ou « onde S ». Les ondes de cisaillement ne se propagent que dans les milieux solides, comme les sédiments ou la roche. Les ondes de cisaillement présentes dans le fond marin peuvent être converties en ondes de compression dans l'eau au niveau de l'interface eau-fond marin.

signature

Signal de pression généré par une source.

sain

Perturbation de pression variable dans le temps générée par des ondes de vibrations mécaniques se propageant dans un milieu fluide comme l'air ou l'eau.

exposition au bruit

Intégrale temporelle de la pression acoustique au carré, pondérée en fonction de la fréquence instantanée, sur un intervalle de temps ou un événement donné. Unité : pascal au carré seconde ($\text{Pa}^2 \text{ s}$) (ANSI S1.1-1994 (R2004)).

niveau d'exposition au bruit (SEL)

Grandeur cumulative liée à l'énergie sonore contenue dans une ou plusieurs impulsions. Unité : dB par rapport à $1 \mu\text{Pa}^2 \text{ s}$ Le SEL est exprimé sur la période de cumul (p. ex. SEL par impulsion [pour les canons à air comprimé], SEL par coup [pour les marteaux-piqueurs], SEL sur 24 heures).

densité du spectre d'exposition au bruit

Distribution en fonction de la fréquence de l'intégrale temporelle du carré de la pression acoustique par unité de bande passante (généralement 1 Hz) d'un son présentant un spectre continu (ANSI S1.1-1994 (R2004)). Unité : $\mu\text{Pa}^2 \text{ s}/\text{Hz}$.

Champ acoustique

Région contenant des ondes sonores (ANSI S1.1-1994 (R2004)).

intensité acoustique

Énergie sonore traversant une surface unitaire perpendiculairement à la direction de propagation par unité de temps.

niveau de pression acoustique (SPL)

Rapport en décibels entre la pression acoustique carré moyenne dans une bande de fréquences donnée et le carré de la pression acoustique de référence (ANSI S1.1-1994 (R2004)).

Pour le son dans l'eau, la pression acoustique de référence est de un micropascal ($p_0 = 1 \mu\text{Pa}$) et l'unité du SPL est le dB par rapport à $1 \mu\text{Pa}^2$:

$$L_p = 10 \log_{10}(p^2/p_0^2) = 20 \log_{10}(p/p_0)$$

Sauf indication contraire, SPL désigne le niveau de pression efficace (rms). Voir également « niveau de pression acoustique à 90 % » et « niveau de pression acoustique à pondération temporelle rapide ». Des fonctions de fenêtre temporelle non rectangulaires peuvent être utilisées lors du calcul de la valeur efficace; dans ce cas, l'unité de SPL doit préciser le type de fenêtre.

profil de vitesse du son

La vitesse du son dans la colonne d'eau en fonction de la profondeur sous la surface de l'eau.

niveau de source (SL)

Le niveau sonore mesuré en champ lointain et ramené à une distance de référence standard de 1 mètre par rapport au centre acoustique de la source. Unité : dB par rapport à $1 \mu\text{Pa m}$ (niveau de pression) ou dB par rapport à $1 \mu\text{Pa}^2 \text{ s m}^2$ (niveau d'exposition).

niveau de densité spectrale

Le niveau en décibels ($10 \cdot \log_{10}$) de la densité spectrale d'un paramètre donné, comme le SPL ou le SEL, dont les unités sont respectivement le dB par rapport à $1 \mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ et en dB par rapport à $1 \mu\text{Pa}^2 \text{ s}/\text{Hz}$, respectivement.

spectrogramme

Représentation graphique de l'amplitude acoustique en fonction du temps et de la fréquence.

spectre

Un signal acoustique représenté en fonction de sa puissance, de son énergie, de sa pression acoustique carrée moyenne ou de la distribution de l'exposition sonore en fonction de la fréquence.

déplacement temporaire du seuil (TTS)

Perte temporaire de la sensibilité auditive due à une exposition excessive au bruit.

perte de transmission (TL)

Réduction en décibels du niveau sonore entre deux points donnés, résultant de la propagation du son à partir d'une source acoustique sous l'influence de l'environnement environnant. Également appelée « perte de propagation ».

longueur d'onde

Distance parcourue par une onde au cours d'un cycle complet d'oscillation. Unité : mètre (m). Symbole : λ .

Bibliographie

- [ANSI] American National Standards Institute. S1.1-1994 (R2004). *American National Standard: Acoustical Terminology*. NY, É.-U. <https://webstore.ansi.org/Standards/ASA/ANSIS11994R2004>.
- [ANSI] American National Standards Institute and [ASA] Acoustical Society of America. S1.13-2005 (R2010). *American National Standard: Measurement of Sound Pressure Levels in Air*. NY, USA. <https://webstore.ansi.org/Standards/ASA/ANSIASAS1132005R2010>.
- [ANSI] American National Standards Institute and [ASA] Acoustical Society of America. S3.20-1995 (R2008). *American National Standard: Bioacoustical Terminology*. NY, USA. <https://webstore.ansi.org/Standards/ASA/ANSIASAS3201995R2008>.
- [ANSI] American National Standards Institute. S12.7-1986 (R2006). *American National Standard: Methods for Measurements of Impulsive Noise*. NY, USA. <https://webstore.ansi.org/Standards/ASA/ANSIS121986R2006>.
- [HESS] High Energy Seismic Survey. 1999. *High Energy Seismic Survey Review Process and Interim Operational Guidelines for Marine Surveys Offshore Southern California*. Préparé pour la California State Lands Commission et la United States Minerals Management Service Pacific Outer Continental Shelf Region par la High Energy Seismic Survey Team, Camarillo, CA, É.-U. 98 p. <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/PB2001100103.xhtml>.
- [ISO] Organisation internationale de normalisation. 2006. *ISO 80000-3:2006 Quantities and units – Part 3: Space and time*. <https://www.iso.org/standard/31888.html>.
- [ISO] Organisation internationale de normalisation. 2017. *ISO 18405:2017. Underwater acoustics – Terminology*. Genève. <https://www.iso.org/standard/62406.html>.
- [NIOSH] National Institute for Occupational Safety and Health. 1998. *Criteria for a recommended standard: Occupational noise exposure. Revised Criteria*. Document Number 98-126. US Department of Health and Human Services, NIOSH, Cincinnati, OH, É.-U. 122 p. <https://www.cdc.gov/niosh/docs/98-126/pdfs/98-126.pdf>.
- [NMFS] National Marine Fisheries Service (États-Unis). 1998. *Acoustic Criteria Workshop*. Dr. Roger Gentry et Dr. Jeanette Thomas coprésidents.
- [NMFS] National Marine Fisheries Service (É.-U.). 2016. *Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing: Underwater Acoustic Thresholds for Onset of Permanent and Temporary Threshold Shifts*. US Department of Commerce, NOAA. NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-55. 178 p.
- [NMFS] National Marine Fisheries Service (É.-U.). 2018. *2018 Revision 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*. US Department of Commerce, NOAA. NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-59. 167 p. <https://www.fisheries.noaa.gov/webdam/download/75962998>.
- [NOAA] National Oceanic and Atmospheric Administration (États-Unis). 2013. *Draft guidance for assessing the effects of anthropogenic sound on marine mammals: Acoustic threshold levels for onset of permanent and temporary threshold shifts*. National Oceanic and Atmospheric Administration, US Department of Commerce, et NMFS Office of Protected Resources, Silver Spring, MD, É.-U. 76 p.
- [NOAA] National Oceanic and Atmospheric Administration (É.-U.). 2015. *Draft guidance for assessing the effects of anthropogenic sound on marine mammal hearing: Underwater acoustic threshold levels for onset of permanent and temporary threshold shifts*. NMFS Office of Protected Resources, Silver Spring, MD, É.-U. 180 p.

- [NOAA] National Oceanic and Atmospheric Administration (É.-U.). 2016. *Document Containing Proposed Changes to the NOAA Draft Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing: Underwater Acoustic Threshold Levels for Onset of Permanent and Temporary Threshold Shifts*. National Oceanic and Atmospheric Administration and US Department of Commerce. 24 p.
- [ONR] Office of Naval Research. 1998. *ONR Workshop on the Effect of Anthropogenic Noise in the Marine Environment*. Dr. R. Gisiner, président.
- [OSMRE] Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement. 2008. *Controlling the Adverse Effects of Blasting*. Blaster's Training Modules. Module 8. <https://www.osmre.gov/resources/blasting/docs/WYBlasterCertModules/8AdverseEffectsBlasting.pdf>.
- [USGS] US Geological Survey. 2020. *What are the projection, horizontal and vertical datum, and resolution for 3D Elevation Program (3DEP) standard DEMs?* (Page Web). https://www.usgs.gov/faqs/what-are-projection-horizontal-and-vertical-datum-and-resolution-3d-elevation-program-3dep?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products. (Consultée le 23 septembre 2020).
- Aerts, L.A.M., M. Bles, S.B. Blackwell, C.R. Greene, Jr., K.H. Kim, D.E. Hannay et M.E. Austin. 2008. *Marine mammal monitoring and mitigation during BP Liberty OBC seismic survey in Foggy Island Bay, Beaufort Sea, July-August 2008: 90-day report*. Document Number P1011-1. Rapport par LGL Alaska Research Associates Inc., LGL Ltd., Greeneridge Sciences Inc., et JASCO Applied Sciences for BP Exploration Alaska. 199 p. ftp://ftp.library.noaa.gov/noaa_documents.lib/NMFS/Auke%20Bay/AukeBayScans/Removable%20Disk/P1011-1.pdf.
- Alduchov, O.A. et R.E. Eskridge. 1996. « Improved Magnus form approximation of saturation vapor pressure ». *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 35(4): 601-609. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1996\)035%3C0601:IMFAOS%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1996)035%3C0601:IMFAOS%3E2.0.CO;2).
- Austin, M.E. et G.A. Warner. 2012. *Sound Source Acoustic Measurements for Apache's 2012 Cook Inlet Seismic Survey*. Version 2.0. Rapport technique de JASCO Applied Sciences for Fairweather LLC et Apache Corporation.
- Austin, M.E. and L. Bailey. 2013. *Sound Source Verification: TGS Chukchi Sea Seismic Survey Program 2013*. Document Number 00706, Version 1.0. Rapport technique de JASCO Applied Sciences pour la TGS-NOPEC Geophysical Company.
- Austin, M.E., A. McCrodan, C. O'Neill, Z. Li et A.O. MacGillivray. 2013. *Marine mammal monitoring and mitigation during exploratory drilling by Shell in the Alaskan Chukchi and Beaufort Seas, July–November 2012: 90-Day Report*. Dans : Funk, D.W., Reiser C.M. et W.R. Koski (éditeurs). « Underwater Sound Measurements ». LGL Rep. P1272D–1. Rapport de LGL Alaska Research Associates Inc. et JASCO Applied Sciences, for Shell Offshore Inc., National Marine Fisheries Service (É.-U.), and US Fish and Wildlife Service. 266 pp plus appendices.
- Austin, M.E. 2014. Underwater noise emissions from drillships in the Arctic. Dans : Papadakis, J.S. et L. Bjørnø (éditeurs). *UA2014 - 2nd International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics*. 22-27 juin 2014, Rhodes, Grèce. pp. 257-263.
- Austin, M.E., Yurk, H. et R. Mills. 2015. *Acoustic Measurements and Animal Exclusion Zone Distance Verification for Furie's 2015 Kitchen Light Pile Driving Operations in Cook Inlet*. Version 2.0. Rapport technique par JASCO Applied Sciences pour Jacobs LLC et Furie Alaska.
- Austin, M.E. et Z. Li. 2016. *Marine Mammal Monitoring and Mitigation During Exploratory Drilling by Shell in the Alaskan Chukchi Sea, July–October 2015: Draft 90-day report*. Dans : Ireland, D.S. et L.N. Bisson (éditeurs). « Underwater Sound Measurements ». LGL Rep. P1363D. Rapporte de LGL Alaska Research Associates Inc., LGL Ltd., et JASCO Applied Sciences Ltd. pour Shell Gulf of Mexico Inc, National Marine Fisheries Service, et US Fish and Wildlife Service. 188 pp + appendices.
- Babushina, Y.S., Zaslavskii, G. L. et L.I. Yurkevich. 1991. « Air and underwater hearing characteristics of the northern fur seal: Audiograms, frequency and differential thresholds ». *Biophysics* 36(5): 909-913.

- Carnes, M.R. 2009. *Description and Evaluation of GDEM-V 3.0*. US Naval Research Laboratory, Stennis Space Center, MS. NRL Memorandum Report 7330-09-9165. 21 p.
<https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a494306.pdf>.
- Channel-Port aux Basques Town Council. 1992. *The Town of Channel - Port aux Basques Noise and Nuisance Regulations*.
https://www.portauxbasques.ca/home/pdf_bylaws/Noise%20&%20Nuisance%20Regulations.pdf.
- Collins, M.D. 1993. « A split-step Padé solution for the parabolic equation method ». *Journal of the Acoustical Society of America* 93(4): 1736-1742. <https://doi.org/10.1121/1.406739>.
- Collins, M.D. 1993. Cederberg, King, D. B. et S. Chin-Bing. 1996. « Comparison of algorithms for solving parabolic wave equations ». *Journal of the Acoustical Society of America* 100(1): 178-182.
<https://doi.org/10.1121/1.415921>.
- Coppens, A.B. 1981. « Simple equations for the speed of sound in Neptunian waters ». *Journal of the Acoustical Society of America* 69(3): 862-863. <https://doi.org/10.1121/1.382038>.
- Day, R.D., McCauley, R.D., Fitzgibbon, Q.P., Hartmann, K., Semmens, J.M. et l'Institute for Marine and Antarctic Studies. 2016 a. *Assessing the Impact of Marine Seismic Surveys on Southeast Australian Scallop and Lobster Fisheries*. Impacts of Marine Seismic Surveys on Scallop and Lobster Fisheries. Fisheries Research & Development Corporation. FRDC Project No 2012/008, University of Tasmania, Hobart. 159 p.
- Day, R.D., McCauley, R.D., Fitzgibbon, Q.P. et J.M. Semmens. 2016b. « Seismic air gun exposure during early-stage embryonic development does not negatively affect spiny lobster *Jasus edwardsii* larvae (Decapoda: Palinuridae) ». *Scientific Reports* 6: 1-9. <https://doi.org/10.1038/srep22723>.
- Day, R.D., McCauley, R.D., Fitzgibbon, Q.P., Hartmann, K. et J.M. Semmens. 2019. « Seismic air guns damage rock lobster mechanosensory organs and impair righting reflex ». *Proceedings of the Royal Society B* 286(1907).
<https://doi.org/10.1098/rspb.2019.1424>.
- Delany, M.E. et E.N. Bazley. 1970. « Acoustical properties of fibrous absorbent materials ». *Applied Acoustics* 3(2): 105-116. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(70\)90031-9](https://doi.org/10.1016/0003-682X(70)90031-9).
- Denes, S.L., Warner, G.A., Austin, M.E. et A.O. MacGillivray. 2016. *Hydroacoustic Pile Driving Noise Study – Comprehensive Report*. Document Number 001285, Version 2.0. Rapport technique par JASCO Applied Sciences pour l'Alaska Department of Transportation & Public Facilities.
<http://www.dot.alaska.gov/stwddes/research/assets/pdf/4000-135.pdf>.
- Dickerson, C., Reine, K.J. et D.G. Clarke. 2001. *Characterization of underwater sounds produced by bucket dredging operations*. DOER Technical Notes Collection (ERDC TN-DOER-E14). US Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS. 17 p.
<http://el.erdc.usace.army.mil/elpubs/pdf/doere14.pdf>.
- Dooling, R.J. et A.N. Popper. 2016. *Technical Guidance for Assessment and Mitigation of the Effects of Highway and Road Construction Noise on Birds*. Report Number CTHWANP-RT-15-306.04.2, Sacramento, CA, USA. <http://website.dot.ca.gov/env/noise/docs/noise-effects-on-birds-jun2016.pdf>.
- Ellison, W.T. et P.J. Stein. 1999. *SURTASS LFA High Frequency Marine Mammal Monitoring (HF/M3) Sonar: System Description and Test & Evaluation*. Dans le cadre d'un contrat avec l'US Navy N66604-98-D-5725. <http://www.surtass-lfa-eis.com/wp-content/uploads/2018/02/HF-M3-Ellison-Report-2-4a.pdf>.
- Erbe, C., McCauley, R.D. et A. Gavrilov. 2016. « Characterizing marine soundscapes ». Dans : Popper, A.N. et A.D. Hawkins (éditeurs). *The Effects of Noise on Aquatic Life II*. Volume 875. Springer, New York. pp. 265-271. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2981-8_31.
- Finneran, J.J. et C.E. Schlundt. 2010. « Frequency-dependent and longitudinal changes in noise-induced hearing loss in a bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) ». *Journal of the Acoustical Society of America* 128(2): 567-570. <https://doi.org/10.1121/1.3458814>.

- Finneran, J.J. et A.K. Jenkins. 2012. *Criteria and thresholds for U.S. Navy acoustic and explosive effects analysis*. SPAWAR Systems Center Pacific, San Diego, CA, É.-U. 64 p.
- Finneran, J.J. 2015. *Auditory weighting functions and TTS/PTS exposure functions for cetaceans and marine carnivores*. Rapport technique par SSC Pacific, San Diego, CA, É.-U.
- Finneran, J.J. 2016. *Auditory weighting functions and TTS/PTS exposure functions for marine mammals exposed to underwater noise*. Rapport technique pour le Space and Naval Warfare Systems Center Pacific, San Diego, CA, É.-U. 49 p. <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/1026445.pdf>.
- Fisher, F.H. et V.P. Simmons. 1977. « Sound absorption in sea water ». *Journal of the Acoustical Society of America* 62(3): 558-564. <https://doi.org/10.1121/1.381574>.
- Funk, D.W., Hannay, D.E., Ireland, D.S., Rodrigues, R. et W.R. Koski. 2008. *Marine mammal monitoring and mitigation during open water seismic exploration by Shell Offshore Inc. in the Chukchi and Beaufort Seas, July–November 2007: 90-day report*. LGL Report P969-1. Préparé par LGL Alaska Research Associates Inc., LGL Ltd., et JASCO Research Ltd. pour Shell Offshore Inc., National Marine Fisheries Service (US), et US Fish and Wildlife Service. 218 p.
- Hannay, D.E. et R.G. Racca. 2005. *Acoustic Model Validation*. Document Number 0000-S-90-04-T-7006-00-E, Revision 02. Rapport technique par JASCO Research Ltd. pour Sakhalin Energy Investment Company Ltd. 34 p.
- Hempen, G.L., Keevin, T.M. et T.L. Jordan. 2007. « Underwater blast pressures from a confined rock removal during the Miami Harbor Deepening Project ». *33rd Annual Conference on Explosives and Blasting Technique*. 28-31 janvier 2007. International Society of Explosive Engineers, Nashville, TN. pp. 23-33.
- Hyde, D.W. 1988. *Microcomputer Programs CONWEP and FUNPRO, Applications of TM 5-855-1, 'Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons' (User's Guide)*. <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a195867.pdf>.
- Hyde, D.W. 1992. *Conventional weapons effect computer program, US Waterways Experiment Station Document Number Instructional Report SL-88-1*. US Army Corps of Engineers.
- Ireland, D.S., Rodrigues, R., Funk, D.W., Koski, D.W. et D.E. Hannay. 2009. *Marine mammal monitoring and mitigation during open water seismic exploration by Shell Offshore Inc. in the Chukchi and Beaufort Seas, July–October 2008: 90-Day Report*. Document Number P1049-1. 277 p.
- Kastak, D. et R.J. Schusterman. 1998. « Low-frequency amphibious hearing in pinnipeds: Methods, measurements, noise, and ecology ». *Journal of the Acoustical Society of America* 103(4): 2216-2228. <https://doi.org/10.1121/1.421367>.
- Kastelein, R.A., van Schie, R., Verboom, W.C. et D. de Haan. 2005. « Underwater hearing sensitivity of a male and a female Steller sea lion (*Eumetopias jubatus*) ». *Journal of the Acoustical Society of America* 118(3): 1820-1829. <https://doi.org/10.1121/1.1992650>.
- Lucke, K., Siebert, U., Lepper, P.A. et M.-A. Blanchet. 2009. « Temporary shift in masked hearing thresholds in a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) after exposure to seismic airgun stimuli ». *Journal of the Acoustical Society of America* 125(6): 4060-4070. <https://doi.org/10.1121/1.3117443>.
- MacGillivray, A.O. et N.R. Chapman. 2012. « Modeling underwater sound propagation from an airgun array using the parabolic equation method ». *Canadian Acoustics* 40(1): 19-25. <https://jcaa.caa-aca.ca/index.php/jcaa/article/view/2502/2251>.
- MacGillivray, A.O. 2018. « Underwater noise from pile driving of conductor casing at a deep-water oil platform ». *Journal of the Acoustical Society of America* 143(1): 450-459. <https://doi.org/10.1121/1.5021554>.
- Malme, C.I., Miles, P.R., Clark, C.W., Tyack, P.L. et J.E. Bird. 1983. *Investigations of the Potential Effects of Underwater Noise from Petroleum Industry Activities on Migrating Gray Whale Behavior. Final Report for the Period of 7 June 1982 - 31 July 1983*. Report Number 5366. Rapport par Bolt Beranek and Newman Inc. pour l'US Department of the Interior, Minerals Management Service, Alaska OCS Office, Cambridge, MA, É.-U. <https://www.boem.gov/sites/default/files/boem-newsroom/Library/Publications/1983/rpt5366.pdf>.

- Malme, C.I., Miles, P.R., Clark, C.W., Tyack, P.L. et J.E. Bird. 1984. *Investigations of the Potential Effects of Underwater Noise from Petroleum Industry Activities on Migrating Gray Whale Behavior. Phase II: January 1984 Migration*. Report Number 5586. Report by Bolt Beranek and Newman Inc. for the US Department of the Interior, Minerals Management Service, Cambridge, MA, USA.
<https://www.boem.gov/sites/default/files/boem-newsroom/Library/Publications/1983/rpt5586.pdf>.
- Martin, B., Bröker, K., Matthews, M.-N.R., MacDonnell, J.T. et L. Bailey. 2015. « Comparison of measured and modeled air-gun array sound levels in Baffin Bay, West Greenland ». *OceanNoise 2015*. 11-15 May 2015, Barcelona, Spain.
- Martin, B., MacDonnell, J.T. et K. Bröker. 2017 a. Cumulative sound exposure levels—Insights from seismic survey measurements. *Journal of the Acoustical Society of America* 141(5): 3603-3603.
<https://doi.org/10.1121/1.4987709>.
- Martin, S.B. et A.N. Popper. 2016. « Short- and long-term monitoring of underwater sound levels in the Hudson River (New York, USA) ». *Journal of the Acoustical Society of America* 139(4): 1886-1897.
<https://doi.org/10.1121/1.4944876>.
- Martin, S.B., Matthews, M.-N.R., MacDonnell, J.T. et K. Bröker. 2017b. « Characteristics of seismic survey pulses and the ambient soundscape in Baffin Bay and Melville Bay, West Greenland ». *Journal of the Acoustical Society of America* 142(6): 3331-3346. <https://doi.org/10.1121/1.5014049>.
- Matthews, M.-N.R. et A.O. MacGillivray. 2013. « Comparing modeled and measured sound levels from a seismic survey in the Canadian Beaufort Sea ». *Proceedings of Meetings on Acoustics* 19(1): 1-8.
<https://doi.org/10.1121/1.4800553>.
- McCrodan, A., McPherson, C.R. et D.E. Hannay. 2011. *Sound Source Characterization (SSC) Measurements for Apache's 2011 Cook Inlet 2D Technology Test*. Version 3.0. Rapport technique de JASCO Applied Sciences for Fairweather LLC et Apache Corporation. 51 p.
- McPherson, C.R. et G.A. Warner. 2012. *Sound Sources Characterization for the 2012 Simpson Lagoon OBC Seismic Survey 90-Day Report*. Document Number 00443, Version 2.0. Rapport technique par JASCO Applied Sciences for BP Exploration (Alaska) Inc.
http://www.nmfs.noaa.gov/pr/pdfs/permits/bp_openwater_90dayreport_appendices.pdf.
- McPherson, C.R., Lucke, K., Gaudet, B.J., Martin, S.B. et C.J. Whitt. 2018. *Pelican 3-D Seismic Survey Sound Source Characterisation*. Document Number 001583. Version 1.0. Rapport technique par JASCO Applied Sciences pour RPS Energy Services Pty Ltd.
- McPherson, C.R. et B. Martin. 2018. *Characterisation of Polarcus 2380 in3 Airgun Array*. Document Number 001599, Version 1.0. Rapport technique par JASCO Applied Sciences pour Polarcus Asia Pacific Pte Ltd.
- Miles, P.R., Malme, C.I. et W.J. Richardson. 1987. *Prediction of drilling site-specific interaction of industrial acoustic stimuli and endangered whales in the Alaskan Beaufort Sea*. Document Number OCS Study. MMS 87-0084. BBN Report No. 6509. USDOI. MMS, Alaska OCS Region, Anchorage, AK, É.-U. 341 p.
- Moore, P.W.B. et R.J. Schusterman. 1987. « Audiometric assessment of northern fur seals, *Callorhinus ursinus* ». *Marine Mammal Science* 3(1): 31-53. <https://doi.org/10.1111/j.1748-7692.1987.tb00150.x>.
- Mulsow, J. et C. Reichmuth. 2007. « Electrophysiological assessment of temporal resolution in pinnipeds ». *Aquatic Mammals* 33(1): 122-131.
- Mulsow, J., Finneran, J.J. et D.S. Houser. 2011 a. « California sea lion (*Zalophus californianus*) aerial hearing sensitivity measured using auditory steady-state response and psychophysical methods ». *Journal of the Acoustical Society of America* 129(4): 2298-2306. <https://doi.org/10.1121/1.3552882>.

- Mulsow, J., Reichmuth, C., Gulland, F.N.D., Rosen, D.A.S. et J.J. Finneran. 2011b. « Aerial audiograms of several California sea lions (*Zalophus californianus*) and Steller sea lions (*Eumetopias jubatus*) measured using single and multiple simultaneous auditory steady-state response methods ». *Journal of Experimental Biology* 214: 1138-1147. <https://jeb.biologists.org/content/214/7/1138>.
- Nedwell, J.R. et A.W. Turnpenny. 1998. « The use of a generic frequency weighting scale in estimating environmental effect ». *Workshop on Seismics and Marine Mammals*. 23–25 Jun 1998, London, UK.
- Nedwell, J.R., Turnpenny, A.W., Lovell, J., Parvin, S.J., Workman, R., Spinks, J.A.L. et D. Howell. 2007. *A validation of the dB_{ht} as a measure of the behavioural and auditory effects of underwater noise*. Document Number 534R1231. Rapport préparé par Subacoustech Ltd. pour Chevron Ltd, TotalFinaElf Exploration UK PLC, Department of Business, Enterprise and Regulatory Reform, Shell UK Exploration and Production Ltd, The Industry Technology Facilitator, Joint Nature Conservation Committee, et The UK Ministry of Defence. 74 p. <https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Nedwell-et-al-2007.pdf>.
- NOAA Fisheries. 2019. *Marine Mammal Acoustic Thresholds* (page Web). https://archive.fisheries.noaa.gov/wcr/protected_species/marine_mammals/threshold_guidance.html.
- O'Neill, C., Leary, D. et A. McCrodon. 2010. « Sound Source Verification ». (chapitre 3) *Dans* : Blees, M.K., Hartin, K.G., Ireland, D.S. et D.E. Hannay (éditeurs). *Marine mammal monitoring and mitigation during open water seismic exploration by Statoil USA E&P Inc. in the Chukchi Sea, August-October 2010: 90-day report*. LGL Report P1119. Préparé par LGL Alaska Research Associates Inc., LGL Ltd. et JASCO Applied Sciences Ltd. pour Statoil USA E&P Inc., National Marine Fisheries Service (É.-U.) et US Fish and Wildlife Service. pp. 1-34.
- Oriard, L.L. 2002. *Explosives engineering, construction vibrations and geotechnology*. International Society of Explosives.
- Payne, R. et D. Webb. 1971. « Orientation by means of long range acoustic signaling in baleen whales ». *Annals of the New York Academy of Sciences* 188: 110-141. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1971.tb13093.x>.
- Plomp, R. et M.A. Bouman. 1959. « Relation between Hearing Threshold and Duration for Tone Pulses ». *Journal of the Acoustical Society of America* 31(6): 749-758. <https://doi.org/10.1121/1.1907781>.
- Popper, A.N., Hawkins, A.D., Fay, R.R., Mann, D.A., Bartol, S., Carlson, T.J., Coombs, S., Ellison, W.T., Gentry, R.L. et al. 2014. *Sound Exposure Guidelines for Fishes and Sea Turtles: A Technical Report prepared by ANSI-Accredited Standards Committee S3/SC1 and registered with ANSI*. ASA S3/SC1.4 TR-2014. SpringerBriefs in Oceanography. ASA Press and Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-06659-2>.
- Porter, M.B. et Y.C. Liu. 1994. « Finite-element ray tracing ». *Dans* : Lee, D. et M.H. Schultz (éditeurs). *International Conference on Theoretical and Computational Acoustics*. Volume 2. World Scientific Publishing Co. pp. 947-956.
- Racca, R., Hannay, D.E. et S.A. Carr. 2006. « An environmental noise impact assessment and forecasting tool for military training activities ». *Canadian Acoustics* 34(4): 2. <https://jcaa.caa-aca.ca/index.php/jcaa/article/view/1862>.
- Racca, R., Rutenko, A.N., Bröker, K. et M.E. Austin. 2012 a. « A line in the water - design and enactment of a closed loop, model based sound level boundary estimation strategy for mitigation of behavioural impacts from a seismic survey ». *11th European Conference on Underwater Acoustics*. Volume 34(3), Edinburgh, UK.
- Racca, R., Rutenko, A.N., Bröker, K., et G. Gailey. 2012b. « Model based sound level estimation and in-field adjustment for real-time mitigation of behavioural impacts from a seismic survey and post-event evaluation of sound exposure for individual whales ». *Dans* : McMinn, T. (éditeur). *Acoustics 2012*. Fremantle, Australia. http://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/AAS2012/papers/p92.pdf.
- Racca, R., Austin, M.E., Rutenko, A.N. et K. Bröker. 2015. « Monitoring the gray whale sound exposure mitigation zone and estimating acoustic transmission during a 4-D seismic survey, Sakhalin Island, Russia ». *Endangered Species Research* 29(2): 131-146. <https://doi.org/10.3354/esr00703>.

- Richardson, W.J., Würsig, B. et C.R. Greene, Jr. 1986. « Reactions of bowhead whales, *Balaena mysticetus*, to seismic exploration in the Canadian Beaufort Sea ». *Journal of the Acoustical Society of America* 79(4): 1117-1128. <https://doi.org/10.1121/1.393384>.
- Richardson, W.J., Würsig, B. et C.R. Greene, Jr. 1990. « Reactions of bowhead whales, *Balaena mysticetus*, to drilling and dredging noise in the Canadian Beaufort Sea ». *Marine Environmental Research* 29(2): 135-160. [https://doi.org/10.1016/0141-1136\(90\)90032-J](https://doi.org/10.1016/0141-1136(90)90032-J).
- Salomons, E.M. 2001. *Computational Atmospheric Acoustics*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Pays-Bas. 335 p.
- Schusterman, R.J., Balliet, R.F. et J. Nixon. 1972. « Underwater audiogram of the California sea lion by the conditioned vocalization technique ». *Journal of the Experimental Analysis of Behavior* 17(3): 339-350. <https://doi.org/10.1901/jeab.1972.17-339>.
- Siskind, D.E., Stachura, V.J., Stagg, M.S. et J.W. Kopp. 1980. *Structure Response and Damage Produced by Airblast From Surface Mining*. Report Number 8485. Rapport pour l'US Department of the Interior, Bureau of Mines. <https://www.osmre.gov/resources/blasting/docs/USBM/RI8485StructureResponseDamageProducedAirblast1980.pdf>.
- Southall, B.L., Bowles, A.E., Ellison, W.T., Finneran, J.J., Gentry, R.L., Greene, C.R. Jr., Kastak, D., Ketten, D.R., Miller, J.H. et al. 2007. « Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Initial Scientific Recommendations ». *Aquatic Mammals* 33(4): 411-521.
- Southall, B.L., Finneran, J.J., Reichmuth, C.J., Nachtigall, P.E., Ketten, D.R., Bowles, A.E., Ellison, W.T., Nowacek, D.P. et P.L. Tyack. 2019. « Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Updated Scientific Recommendations for Residual Hearing Effects ». *Aquatic Mammals* 45(2): 125-232. <https://doi.org/10.1578/AM.45.2.2019.125>.
- Teague, W.J., Carron, M.J. et P.J. Hogan. 1990. « A comparison between the Generalized Digital Environmental Model and Levitus climatologies ». *Journal of Geophysical Research* 95(C5): 7167-7183. <https://doi.org/10.1029/JC095iC05p07167>.
- Warner, G.A., Erbe, C. et D.E. Hannay. 2010. « Underwater Sound Measurements ». (chapitre 3) Dans : Reiser, C.M., Funk, D., Rodrigues, R. et D.E. Hannay (éditeurs). *Marine Mammal Monitoring and Mitigation during Open Water Shallow Hazards and Site Clearance Surveys by Shell Offshore Inc. in the Alaskan Chukchi Sea, July-October 2009: 90-Day Report*. LGL Report P1112-1. Rapport par LGL Alaska Research Associates Inc. and JASCO Applied Sciences pour Shell Offshore Inc., National Marine Fisheries Service (É.-U.) et Fish and Wildlife Service (É.-U.). pp. 1-54.
- Warner, G.A., Austin, M.E. et A.O. MacGillivray. 2017. « Hydroacoustic measurements and modeling of pile driving operations in Ketchikan, Alaska » [résumé]. *Journal of the Acoustical Society of America* 141(5): 3992. <https://doi.org/10.1121/1.4989141>.
- Wood, J.D., Southall, B.L. et D.J. Tollit. 2012. *PG&E offshore 3-D Seismic Survey Project Environmental Impact Report—Marine Mammal Technical Draft Report*. Rapport par SMRU Ltd. 121 p. <https://www.coastal.ca.gov/energy/seismic/mm-technical-report-EIR.pdf>.
- Wright, D.G. et G.E. Hopky. 1998. *Lignes directrices concernant l'utilisation d'explosifs à l'intérieur ou à proximité des eaux de pêche canadiennes*. Rapport technique canadien des sciences halieutiques et aquatiques. Volume 2107, numéro de rapport 2107. Pêches et Océans Canada.
- Zhang, Z.Y. et C.T. Tindle. 1995. « Improved equivalent fluid approximations for a low shear speed ocean bottom ». *Journal of the Acoustical Society of America* 98(6): 3391-3396. <https://doi.org/10.1121/1.413789>.
- Zykov, M.M. et J.T. MacDonnell. 2013. *Sound Source Characterizations for the Collaborative Baseline Survey Offshore Massachusetts Final Report: Side Scan Sonar, Sub-Bottom Profiler, and the R/V Small Research Vessel experimental*. Document Number 00413, Version 2.0. Rapport technique par JASCO Applied Sciences pour Fugro GeoServices, Inc. et (É.-U.) Bureau of Ocean Energy Management.

Annexe A. Mesures acoustiques

Étant donné que l'intensité sonore perçue, en particulier celle des sons pulsés, comme ceux émis par les canons à air comprimé sismiques, les battages de pieux et les sonars, n'est généralement pas proportionnelle à la pression acoustique instantanée, plusieurs mesures de niveau sonore sont utilisées pour évaluer le bruit et ses effets sur la vie marine. Trois paramètres sont couramment utilisés : le niveau de pression de crête (PK), le niveau de pression acoustique (SPL) et le niveau d'exposition sonore (SEL). Dans la mesure du possible, nous suivons les définitions et les symboles de l'Organisation internationale de normalisation (ISO) en matière de mesures acoustiques (p. ex. ISO 2017).

La figure A-1 présente une représentation d'une onde de pression sinusoïdale (à fréquence unique) afin d'illustrer les différents indicateurs. L'amplitude de la pression est représentée sur l'axe vertical, et le temps sur l'axe horizontal. La pression de l'onde oscille autour du point neutre. La pression maximale correspond à la valeur absolue de la variation maximale par rapport à la position neutre d'une oscillation ondulatoire; elle peut donc résulter soit d'une compression, soit d'une raréfaction. La pression acoustique crête à crête correspond à la différence entre la pression maximale et la pression minimale. L'amplitude moyenne correspond à la moyenne de la valeur absolue de la pression sur la période considérée.

L'amplitude efficace est un type de moyenne obtenue en élevant au carré toutes les amplitudes sur la période considérée, en calculant la moyenne des carrés ainsi obtenus, puis en tirant la racine carrée de cette moyenne. L'amplitude efficace d'un signal impulsionnel varie considérablement en fonction de la durée de la période considérée.

Le SEL est une grandeur qui correspond à l'énergie sonore par unité de surface reçue au cours d'un certain temps, bien qu'il ne soit pas exprimé en unités d'énergie; il est proportionnel au carré de la pression acoustique et à la durée pendant laquelle le son est reçu.

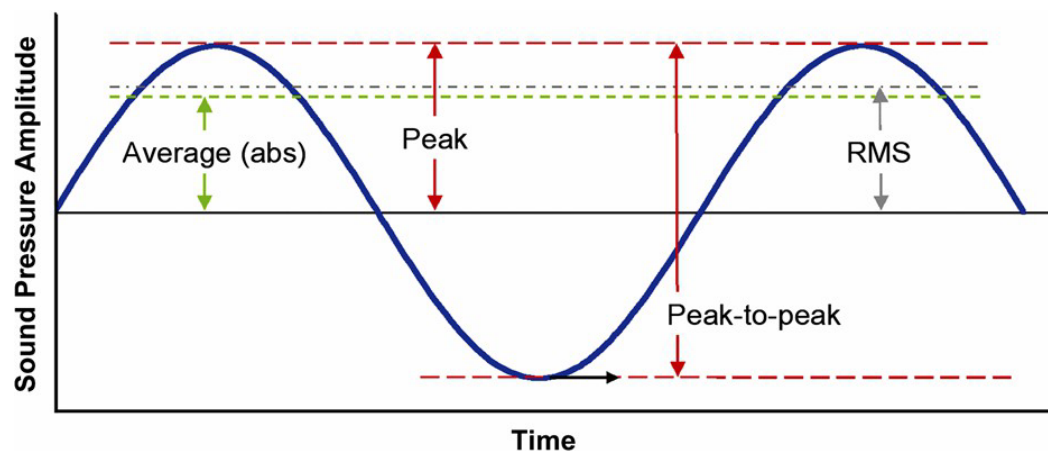


Figure A-1. Mesures de niveau sonore.

Le National Marine Fisheries Service (NMFS) américain a publié un document d'orientation technique (NMFS 2018) qui utilise une notation légèrement différente de celle de l'ISO pour les paramètres acoustiques (tableau A-1), notamment un paramètre de niveau de pression acoustique de crête non pondéré (ou plat) PK (L_{pk}) ainsi qu'un niveau d'exposition sonore cumulé SEL_{cum} (c'est-à-dire SEL_{24h}) avec pondération fréquentielle. La terminologie relative aux paramètres acoustiques utilisée dans Southall *et al.* (2019) correspond à celle de ces recommandations. Conformément à la norme ISO, le symbole L_{pk} , tel qu'utilisé par le NMFS et Southall *et al.* (2019) est ici désigné par PK. La mesure SEL_{cum} , comme utilisée par le NMFS et Southall *et al.* (2019), décrit l'énergie sonore reçue par un récepteur sur une période de 24 heures. En conséquence, conformément à la norme ISO (2017), celle-ci est désignée par SEL_{24h} dans le présent rapport.

Tableau A-1. Paramètres acoustiques utilisés dans le présent rapport de modélisation de la propagation du bruit sous-marin, comparés à d'autres publications.

Mesure	NMFS (2018) et Southall et al. (2019)	Rapport actuel (conformément à la norme ISO 2017)		Unité
		Abréviation dans le corps du texte	Symbole dans les équations/tableau x	
Niveau de pression acoustique	S. o.	SPL	L_p	décibel (dB) par rapport à 1 micropascal (μPa)
Niveau de pression acoustique de crête	PK	PK	$L_{p,k}$	dB par rapport à 1 μPa
Niveau d'exposition au bruit (par impulsion)	S. o.	SEL par impulsion	L_E	dB par rapport à 1 $\mu\text{Pa}^2 \text{ s}$
Niveau d'exposition au bruit (cumulé dans le temps), $\text{SEL}_{\text{time-period}}$	SEL_{cum}	$\text{SEL}_{24\text{h}}$	$L_{E,24\text{h}}$	dB par rapport à 1 $\mu\text{Pa}^2 \text{ s}$
Niveau de source	SL	SL	$L_{S,pk}$ $L_{S,p}$ $L_{S,E}$	dB par rapport à 1 $\mu\text{Pa m}$ (niveau de crête ou SPL de la source) ou dB 1 $\mu\text{Pa}^2 \text{ m}^2 \text{ s}$ (Niveau de source d'énergie par impulsion)

L'amplitude de la pression acoustique sous-marine est mesurée en décibels (dB) par rapport à une pression de référence fixe de $p_0 = 1 \mu\text{Pa}$. Nous proposons ici les définitions précises des mesures mentionnées ci-dessus.

Le niveau de pression acoustique de zéro à crête, ou pression acoustique de crête (PK ou $L_{p,pk}$; dB par rapport à 1 μPa), est le niveau en décibels de la pression acoustique instantanée maximale dans une bande de fréquences donnée, atteinte par un signal de pression acoustique, $p(t)$:

$$L_{p,pk} = 10 \log_{10} \frac{\max |p^2(t)|}{p_0^2} = 20 \log_{10} \frac{\max |p(t)|}{p_0} \quad (\text{A-1})$$

Le PK est souvent utilisé comme critère pour déterminer si un son est potentiellement nocif; cependant, comme il ne tient pas compte de la durée d'un événement acoustique, il constitue généralement un mauvais indicateur de l'intensité sonore perçue.

La pression acoustique crête à crête (PK-PK ou $L_{p,pk-pk}$; dB par rapport à 1 μPa) est la différence entre la pression acoustique instantanée maximale et minimale, éventuellement filtrée dans une bande de fréquences spécifiée, atteinte par un son impulsif, $p(t)$:

$$L_{p,pk-pk} = 10 \log_{10} \frac{[\max(p(t)) - \min(p(t))]^2}{p_0^2} \quad (\text{A-2})$$

Le niveau de pression acoustique (SPL ou L_p ; dB par rapport à 1 μPa) est le niveau de pression efficace (rms) dans une bande de fréquences donnée, sur une fenêtre temporelle spécifiée (T ; s). Il est important de noter que le SPL fait toujours référence à un niveau de pression efficace (rms) et non à une pression instantanée :

$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T} \int_T g(t) p^2(t) dt / p_0^2 \right) \text{ dB} \quad (\text{A-3})$$

où $g(t)$ est une fonction de pondération temporelle facultative. Dans de nombreux cas, l'instant de début de l'intégration est décalé vers l'avant par petits incréments de temps afin d'obtenir une fonction SPL variable dans le temps. Pour les événements acoustiques de courte durée, tels que les impulsions sonar et les vocalisations des mammifères marins, il est important de choisir une fenêtre temporelle adaptée à la durée du signal. Dans le cadre d'études en milieu aérien, lorsqu'on évalue l'intensité perçue de sons présentant des variations d'amplitude rapides dans le temps, la fonction de pondération temporelle $g(t)$ est souvent définie comme une fonction exponentielle décroissante qui met l'accent sur les signaux de pression les plus récents.

Cette fonction reproduit le principe d'intégration « à fuites » propre à l'audition des mammifères. Par exemple, le SPL pondéré en fonction du temps et basé sur des critères humains ($L_{p,fast}$) utilise une fonction exponentielle avec une constante de temps de 125 ms. Une approche similaire, plus simple, utilisée en acoustique sous-marine, consiste à définir $g(t)$ comme une fonction « glissante » (amplitude unitaire) d'une largeur de 125 ms; les résultats peuvent être désignés par $L_{p,boxcar 125 ms}$. Une autre approche, traditionnellement utilisée pour évaluer le SPL des signaux impulsifs sous l'eau, définit $g(t)$ comme une fonction « glissante » dont les bords sont fixés aux instants correspondant à 5 % et 95 % de la fonction de pression au carré cumulée couvrant la durée d'un événement acoustique impulsif. Ce calcul est appliqué individuellement à chaque signal impulsif, et les résultats ont été exprimés en SPL à 90 % ($L_{p, 90 \%}$).

Dans le présent rapport, le SPL pour les opérations de battage par impact ont été calculés à l'aide d'une fonction « glissante » d'une largeur de 125 ms, à savoir : $L_{p,boxcar 125ms}$.

Le niveau d'exposition sonore (SEL ou L_E ; dB par rapport à $1 \mu Pa^2 s$) est l'intégrale dans le temps du carré de la pression acoustique sur une durée (T) :

$$L_E = 10 \log_{10} \left(\int_0^T p^2(t) dt / T_0 p^2 \right) \text{ dB} \quad (\text{A-4})$$

où T_0 est un intervalle de temps de référence de 1 s. Le SEL continue d'augmenter avec le temps lorsque des signaux de pression non nuls sont présents. Il s'agit d'une mesure de type « dose »; il convient donc d'évaluer avec soin le temps d'intégration utilisé afin d'en déterminer la pertinence quant à l'impact sur les personnes exposées.

Le SEL peut être calculé sur une durée déterminée, telle que la durée d'un événement unique ou d'une période comportant plusieurs événements acoustiques. Lorsqu'il s'agit de sons pulsés, le SEL peut être calculé en additionnant les SEL des N impulsions individuelles. Pendant une durée déterminée, la pression au carré est intégrée sur la durée considérée. Dans le cas d'événements multiples, qu'il s'agisse de secondes, de coups ou de sources multiples, le SEL peut être calculé en additionnant (en unités linéaires) le SEL de chacun des N événements :

$$L_{E,N} = 10 \log_{10} \sum_{i=1}^N 10^{L_{E,i}/10} \text{ dB} \quad (\text{A-5})$$

Si la valeur SEL de l'événement individuel N est identique, on peut simplement écrire :

$$L_{E,N} = L_{E,1} + 10 \log_{10}(N) \text{ dB} \quad (\text{A-6})$$

A.1. Analyse de la bande de décadécade

La répartition de la puissance d'un son en fonction de la fréquence est décrite par le spectre de ce son. Le spectre sonore peut être divisé en une série de bandes de fréquences adjacentes. La division d'un spectre en bandes de 1 Hz de largeur, appelées « bandes passantes », permet d'obtenir la densité spectrale de puissance du son. Cette division du spectre en bandes passantes d'une largeur constante de 1 Hz ne reflète toutefois pas la manière dont les animaux perçoivent les sons.

Étant donné que les animaux perçoivent les augmentations de fréquence de manière exponentielle plutôt que linéaire, l'analyse d'un spectre sonore à l'aide de bandes passantes dont la largeur augmente de manière exponentielle permet de mieux refléter les situations réelles. En acoustique sous-marine, un spectre est généralement divisé en bandes de décadécade, dont la largeur correspond approximativement à un dixième de décade. Une décadécade est parfois appelée « 1/3 d'octave », car un dixième de décadécade équivaut approximativement à un tiers d'octave. Chaque décade correspond à un facteur 10 en fréquence sonore. Chaque octave correspond à un facteur 2 en fréquence sonore. La fréquence centrale de la i ème bande, $f_c(i)$, est définie comme suit :

$$f_c(i) = 10^{i/10} \text{ kHz} \quad (\text{A-7})$$

et la valeur basse (f_{lo}) et haute (f_{hi}) de la i ème bande de décade sont définies comme suit :

$$f_{lo,i} = 10^{\frac{-1}{20}} f_c(i) \quad \text{and} \quad f_{hi,i} = 10^{\frac{1}{20}} f_c(i) \quad (\text{A-8})$$

Les bandes de décadécade s'élargissent à mesure que la fréquence augmente, et sur une échelle logarithmique, ces bandes apparaissent espacées de manière régulière (figure A-2). La modélisation acoustique s'étend de la bande 10 ($f_c(10) = 10$ Hz) à la bande 44 ($f_c(44) = 25$ kHz).

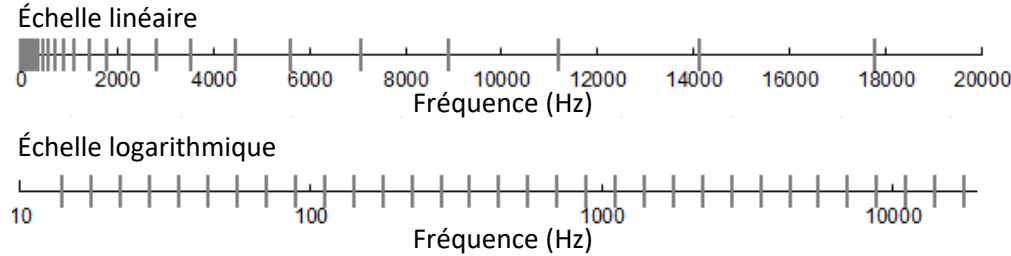


Figure A-2. Bandes de fréquences de décadécade (lignes verticales) représentées sur une échelle de fréquences linéaire et une échelle logarithmique.

Le niveau de pression acoustique dans la bande i ème ($L_{p,i}$) est calculé à partir du spectre $S(f)$ entre $f_{lo,i}$ et $f_{hi,i}$:

$$L_{p,i} = 10 \log_{10} \int_{f_{lo,i}}^{f_{hi,i}} S(f) df \quad (\text{A-9})$$

En additionnant les niveaux de pression acoustique de toutes les bandes, on obtient le niveau de pression acoustique à large bande :

$$\text{SPL à large bande} = 10 \log_{10} \sum_i 10^{\frac{L_{p,i}}{10}} \quad (\text{A-10})$$

La figure A-3 présente un exemple illustrant la comparaison entre les niveaux de pression acoustique par bande de décade et les niveaux de densité spectrale de pression acoustique d'un signal de bruit ambiant. Étant donné que les bandes de décadécade s'élargissent à mesure que la fréquence augmente, le SPL de ces bandes est supérieur aux niveaux spectraux observés aux fréquences plus élevées. La modélisation acoustique des bandes de décadécades nécessite moins de temps de calcul que celle des bandes de 1 Hz, tout en permettant de mettre en évidence la dépendance en fréquence de la source sonore et de l'environnement de propagation.

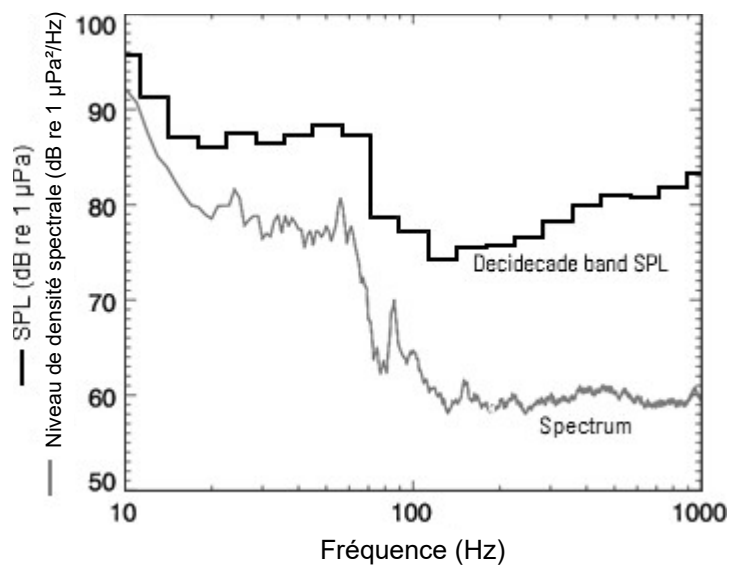


Figure A-3. Niveaux de densité spectrale de pression acoustique et niveaux de pression acoustique correspondants par bande de décidécade tirés d'exemples de bruits ambiants, représentés sur une échelle de fréquence logarithmique.

Annexe B. Critères d'impact

B.1. Groupes d'audition des mammifères marins

Afin de mieux refléter les similitudes auditives entre des espèces étroitement apparentées sur le plan phylogénétique, mais aussi les différences significatives entre les groupes d'espèces parmi les mammifères marins, Southall *et al.* (2007) ont classé les espèces de mammifères marins actuelles en groupes d'audition fonctionnels en fonction de leurs capacités auditives et de leur production sonore. Cette répartition en grandes catégories visait à définir un nombre réaliste de catégories pour lesquelles des critères d'exposition au bruit individuels ont été élaborés. Ces groupes ont été révisés par le NMFS (2018), mais cette classification s'est avérée être une approche scientifiquement fondée et utile pour élaborer des fonctions de pondération auditive et définir des critères d'exposition au bruit pour les mammifères marins. La répartition proposée par Southall *et al.* (2007) a été mise à jour en 2018 par le NMFS sur la base des données scientifiques les plus récentes disponibles.

Southall *et al.* (2019) ont publié une mise à jour des critères permettant de définir l'apparition du TTS et du PTS chez les mammifères marins (tableaux 2-4). Si les auteurs proposent une nouvelle nomenclature et une nouvelle classification des groupes d'audition fonctionnels des mammifères marins, les seuils et les fonctions de pondération proposés pour l'exposition aux sons sous-marins ne diffèrent pas, en substance, de ceux proposés par la NOAA (2018), à l'exception de l'ajout de seuils pour les groupes auditifs dans l'air. Les groupes d'audition proposés par Southall *et al.* (2019) et utilisés dans le présent rapport sont les suivants :

- Cétacés à basse fréquence (LF) (mysticètes ou baleines à fanons)
- Cétacés à haute fréquence (HF) (odontocètes : delphinidés, baleines à bec, cachalots)
- Cétacés à très haute fréquence (VHF) (autres odontocètes)
- Carnivores phocidés aquatiques (PCW) (les « véritables » phoques, notamment les phoques communs et les phoques gris)
- Autres carnivores marins vivant dans l'eau (OCW) : les phoques « à oreilles » (otaries et lions de mer), les morses, les loutres de mer et les ours polaires.
- Carnivores phocidés dans l'air (PCA)
- Autres carnivores marins dans l'air (OCA)

B.2. Fonctions de pondération auditive chez les mammifères marins

L'impact potentiel des bruits d'origine anthropique sur les mammifères marins dépend en grande partie du fait que ces bruits soient émis à des fréquences que l'animal est capable de bien percevoir (annexe B.1), à moins que le niveau de pression acoustique ne soit si élevé qu'il puisse causer des lésions physiques aux tissus, quelle que soit la fréquence. Les fonctions de pondération auditive (fréquence) reflètent la capacité d'un animal à entendre un son. Les spectres sonores sont pondérés à certaines fréquences de manière à refléter la sensibilité d'un animal à ces fréquences (Nedwell et Turnpenny 1998, Nedwell *et al.* 2007). Des fonctions de pondération auditive ont été proposées pour les mammifères marins, notamment en lien avec les seuils de déclenchement de la TTS et de la PTS. Ces valeurs sont exprimées en unités de mesure qui tiennent compte des connaissances actuelles sur l'audition des mammifères marins (p. ex. le SEL) (Southall *et al.* 2007, Erbe *et al.* 2016, Finneran 2016).

L'application de fonctions de pondération auditive aux mammifères marins souligne l'importance d'effectuer des mesures et de caractériser les sources sonores en fonction de leur chevauchement avec les fréquences importantes sur le plan biologique (p. ex. les fréquences utilisées pour la perception de l'environnement, la communication ou la détection de prédateurs ou de proies), et non pas uniquement en fonction des fréquences présentant un intérêt ou une préoccupation pour la réalisation de l'activité génératrice de bruit (c'est-à-dire le contexte de la source sonore; NMFS 2018). La présente section décrit les fonctions de pondération auditive utilisées dans le cadre de ces travaux.

En 2015, dans un rapport technique de la Marine américaine rédigé par Finneran (2015), on recommandait de nouvelles fonctions de pondération auditive. Les fonctions de pondération auditive pour les mammifères marins s'appliquent de la même manière que la pondération A utilisée pour l'évaluation des niveaux sonores chez l'être humain. Les nouvelles fonctions de pondération en fréquence s'expriment comme suit :

$$G(f) = K + 10 \log_{10} \left\{ \frac{(f/f_1)^{2a}}{[1 + (f/f_1)^2]^a [1 + (f/f_2)^2]^b} \right\} \quad (\text{B-1})$$

Finneran (2015) a proposé cinq groupes d'audition fonctionnels pour les mammifères marins dans l'eau : les cétacés à basses, moyennes et hautes fréquences (respectivement cétacés LF, MF et HF), les pinnipèdes phocidés et les pinnipèdes otariidés. Les paramètres de ces fonctions de pondération fréquentielle ont été modifiés à nouveau l'année suivante (Finneran 2016) et ont été intégrés dans les recommandations techniques de la NOAA visant à évaluer les impacts acoustiques sur les mammifères marins (NMFS 2018), ainsi que dans les critères de Southall *et al.* (2019). Le tableau B-1 présente les paramètres de pondération fréquentielle pour chaque groupe auditif, selon Southall *et al.* (2019). Les figures B-1 et B-2 présentent les courbes de pondération en fréquence obtenues.

Tableau B-1. Paramètres des fonctions de pondération auditive recommandés par Southall *et al.* (2019).

Groupe d'audition fonctionnel	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>f</i> ₁ (Hz)	<i>f</i> ₂ (Hz)	<i>K</i> (dB)
Cétacés basse fréquence	1,0	2	200	19 000	0,13
Cétacés haute fréquence	1,6	2	8 800	110 000	1,20
Cétacés très haute fréquence	1,8	2	12 000	140 000	1,36
Carnivores phocidés dans l'eau	1,0	2	1 900	30 000	0,75
Autres carnivores marins dans l'eau	2,0	2	940	25 000	0,64
Carnivores phocidés dans l'air	2	2	0,75	8,3	1,5
Autres carnivores marins dans l'air	1,4	2	2,0	20	1,39

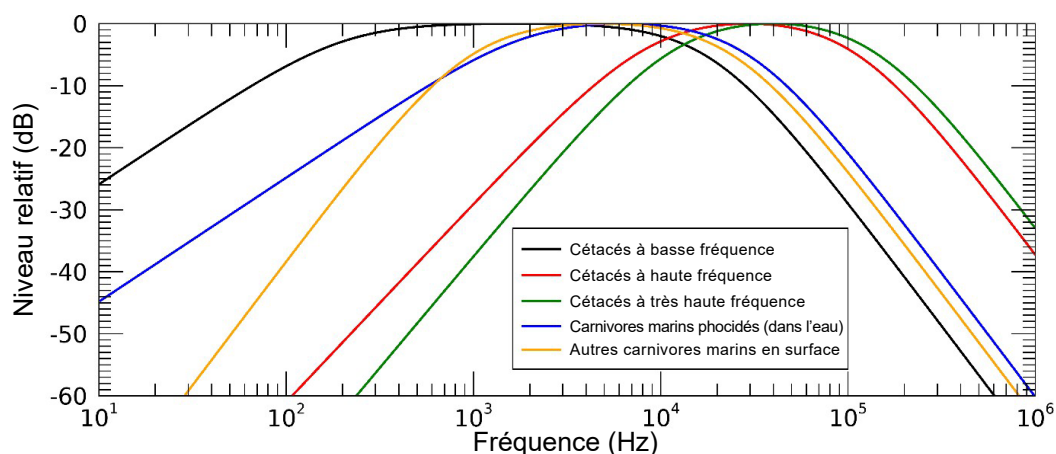


Figure B-1. Fonctions de pondération auditive pour la sensibilité auditive sous l'eau chez les groupes d'audition fonctionnels de mammifères marins conformément aux recommandations de Southall *et al.* (2019).

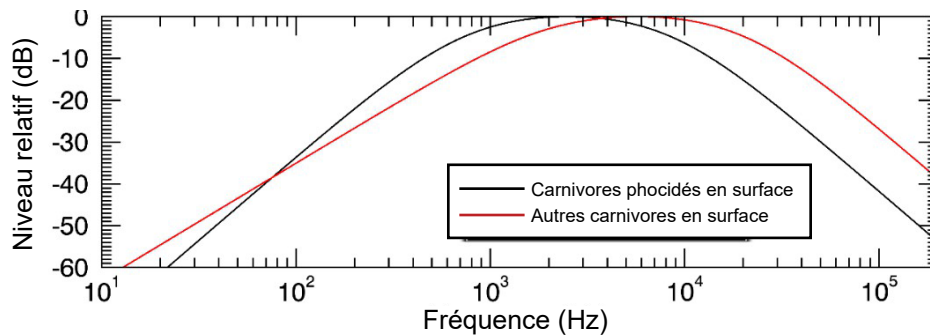


Figure B-2. Fonctions de pondération auditive pour la sensibilité auditive dans l'air chez les groupes d'audition de pinnipèdes conformément aux recommandations de Southall *et al.* (2019).

B.3. Mammifères marins

On sait depuis longtemps que les mammifères marins peuvent subir les effets néfastes du bruit sous-marin d'origine humaine. Par exemple, Payne et Webb (1971) suggèrent que les distances de communication des rorquals communs sont réduites par les bruits générés par le trafic maritime. Par la suite, des inquiétudes similaires ont été exprimées concernant les effets d'autres sources de bruit sous-marin et la possibilité que des sources impulsives – principalement les canons à air utilisés dans les études sismiques – puissent causer des lésions auditives. Cela a donné lieu à une série d'ateliers organisés à la fin des années 1990, destinés à répondre aux exigences en matière d'atténuation acoustique pour les études sismiques et d'autres sources de bruit sous-marin (NMFS 1998, ONR 1998, Nedwell et Tumpenny 1998, HESS 1999, Ellison et Stein 1999). Au cours des années qui ont suivi ces premiers ateliers, divers seuils ont été proposés tant pour les blessures (annexe B.3.1.1) que pour les perturbations (annexe B.3.1.2). Les sections suivantes résument l'évolution des seuils actuels pertinents pour la présente étude; il s'agit toutefois d'un sujet de recherche toujours d'actualité.

B.3.1.1. Critères de blessure

Les critères SPL du NMFS relatifs aux blessures causées aux mammifères marins par l'exposition acoustique ont été fixés conformément aux recommandations concernant les estimations prudentes des niveaux sonores entraînant l'apparition d'un déplacement permanent du seuil auditif (PTS). Ces critères fixaient des seuils de lésion à un SPL de 190 dB par rapport à 1 μ Pa pour les pinnipèdes et à un SPL de 180 dB par rapport à 1 μ Pa pour les cétacés, pour tous les types de sources sonores à l'exception des sonars tactiques et des explosifs (NMFS 2018). Ces seuils de blessure s'appliquent à des impulsions sonores individuelles ou à des niveaux sonores instantanés et ne tiennent pas compte de la durée totale du bruit ni de sa distribution de fréquences acoustiques.

Les critères qui ne tiennent pas compte de la durée d'exposition ou des spectres de bruit sont généralement insuffisants à eux seuls pour évaluer les lésions auditives. Les mesures d'évaluation du bruit en milieu de travail anthropique tiennent compte du SPL, de la durée d'exposition et des caractéristiques spectrales du son. Par exemple, l'International Institute of Noise Control Engineering (I-INCE) et l'Occupational Safety and Health Administration (OSHA) américaine recommandent des seuils pour le niveau de pression acoustique de crête pondéré C et le niveau sonore moyen dans le temps pondéré A ($\text{dB(A)}^2 L_{\text{eq}}$). Ils proposent également des taux de conversion qui augmentent les seuils admissibles à chaque réduction de moitié ou doublement de la durée d'exposition. Cette approche part du principe que les blessures auditives dépendent du niveau sonore relatif perçu par l'oreille humaine, et que celle-ci peut se remettre partiellement d'expositions antérieures, notamment s'il y a des périodes de calme au cours de l'exposition globale.

Conscient des limites des critères d'évaluation des blessures fondés uniquement sur le SPL, le NMFS a chargé en 2005 le Noise Criteria Group d'examiner la littérature scientifique relative à l'audition des mammifères marins afin de proposer de nouveaux critères d'exposition au bruit. Certains membres de ce groupe d'experts ont publié un article de référence (Southall *et al.* 2007) qui proposait des méthodes d'évaluation similaires à celles utilisées chez l'être humain. Les recommandations qui en ont découlé ont introduit un double critère d'atteinte acoustique pour les bruits impulsionnels, comprenant des seuils de niveau de pression de crête et des seuils de $\text{SEL}_{24\text{h}}$, l'indice « 24h » faisant référence à la période de cumul utilisée pour le calcul du SEL.

² La lettre « A » désigne un filtre spécifique dépendant de la fréquence, dont la forme est calquée sur une courbe d'égal-sonorité humaine.

Le critère de niveau de pression de crête n'est pas pondéré en fonction de la fréquence, tandis que le SEL_{24h} est pondéré en fonction de la fréquence selon l'un des quatre groupes auditifs d'espèces de mammifères marins : les cétacés à basses, moyennes et hautes fréquences (LF, MF, et HF, respectivement) et les pinnipèdes en milieu aquatique (P_{ws})³. Ces fonctions de pondération sont appelées « filtres de pondération M » (par analogie avec le filtre de pondération A utilisé chez l'être humain). Les seuils SEL_{24h} ont été obtenus en extrapolant les mesures des niveaux d'apparition du déplacement temporaire du seuil (TTS) chez les bélugas à partir de l'amplitude du TTS nécessaire pour produire un déplacement permanent du seuil (PTS) chez les chinchillas. Les recommandations de Southall *et al.* (2007) ne précisent pas de taux de conversion, ce qui laisse entendre que les seuils sont identiques, quelle que soit la durée d'exposition (c'est-à-dire que cela implique un taux de conversion de 3 dB).

Wood *et al.* (2012) ont affiné les seuils établis par Southall *et al.* (2007), en proposant des valeurs de blessure inférieures pour les cétacés LF et les cétacés HF, tout en conservant les formes des filtres. Leurs seuils révisés s'appuyaient sur les niveaux d'apparition du TTS chez les marsouins communs, tirés de Lucke *et al.* (2009), ce qui a conduit à un seuil révisé de PTS pour les sons impulsifs dans la bande HF de 179 dB par rapport à 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$. En l'absence de données concernant les baleines à fanons, Wood *et al.* (2012) ont fondé leurs recommandations concernant les cétacés LF sur les résultats d'études menées sur les cétacés MF. Ils ont notamment fait référence aux travaux de Finneran et Schlundt (2010), qui ont montré que les cétacés MF sont plus sensibles à l'exposition aux sons non impulsifs que ne l'avaient supposé Southall *et al.* (2007) l'avaient supposé. Wood *et al.* (2012) ont donc recommandé un seuil d'apparition du TTS plus prudent pour les cétacés LF, fixé à 192 dB par rapport à 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$.

Toujours en 2012, la Marine américaine a recommandé un ensemble de critères différent pour évaluer ses opérations (Finneran et Jenkins 2012). Son analyse a intégré de nouvelles courbes d'isophonie pour les dauphins⁴ afin de mettre à jour les fonctions de pondération et les seuils de blessure pour les cétacés LF, MF et HF. Elle a recommandé de diviser le groupe des pinnipèdes en otariidés (phoques à oreilles) et en phocidés (phoques sans oreilles), et d'attribuer aux premiers des seuils de fréquence ajustés sur la base de plusieurs études de sensibilité (Schusterman *et al.* 1972, Moore et Schusterman 1987, Babushina *et al.* 1991, Kastak et Schusterman 1998, Kastelein *et al.* 2005, Mulsow et Reichmuth 2007, Mulsow *et al.* 2011a, Mulsow *et al.* 2011 b).

En 2017, aucune approche définitive ne se dessine encore. La communauté scientifique s'accorde à dire qu'une méthode fondée sur le SEL est préférable, soit seule, soit en complément d'une approche fondée sur le SPL, pour évaluer le risque de blessures. En août 2016, après avoir recueilli de nombreuses contributions du public et d'experts sur trois versions préliminaires et en s'appuyant largement sur la littérature susmentionnée (NOAA 2013, 2015, 2016), le NMFS a finalisé des recommandations techniques visant à évaluer l'effet des bruits d'origine anthropique sur l'audition des mammifères marins (NMFS 2016, NMFS 2018). Ce guide décrit les critères de blessure, avec de nouveaux seuils et de nouvelles fonctions de pondération de la fréquence, pour les cinq groupes d'audition décrits par Finneran et Jenkins (2012). La dernière mise à jour de cet ouvrage a été publiée en 2018 (NMFS 2018). Southall *et al.* (2019) ont réexaminé les critères provisoires publiés en 2007. Tous les critères d'exposition au bruit définis par le NMFS (2018) et par Southall *et al.* (2019) sont identiques (pour les bruits impulsionnels et non impulsionnels); cependant, les cétacés MF du NMFS (2018) sont classés comme cétacés HF dans Southall *et al.* (2019), et les cétacés HF du NMFS (2018) sont classés comme cétacés VHF dans Southall *et al.* (2019). Par ailleurs, Southall *et al.* (2019) définissent des fonctions de pondération fréquentielle pour les groupes d'auditions carnivores phocidés dans l'air (PCA) et autres carnivores dans l'air (OCA).

B.3.1.2. Critères de perturbation

Le NMFS utilise actuellement le SPL pour la perturbation comportementale de 160 dB par rapport à 1 μPa pour les bruits impulsionnels et de 120 dB par rapport à 1 μPa pour les bruits non impulsionnels, pour toutes les espèces de mammifères marins (NMFS 2018), sur la base d'observations menées sur les mysticètes (Malme *et al.* 1983, 1984, Richardson *et al.* 1986, 1990). Depuis 2016, le NMFS applique par défaut un seuil de perturbation, mais prévoit des exceptions pour certaines espèces ou sous-populations lorsque cela se justifie.

³ Les pinnipèdes dans l'air ont également été pris en compte, mais cela ne s'applique pas au cas présent.

⁴ Une courbe d'isophonie correspond au niveau de pression acoustique mesuré (en dB par rapport à 1 μPa pour les bruits sous-marins) en fonction de la fréquence, pour lequel un auditeur perçoit une intensité sonore constante lorsqu'il est exposé à des sons purs.

B.4. Poissons, invertébrés, œufs et larves

En 2006, le groupe de travail sur les effets du bruit sur les poissons et les tortues a été créé afin de poursuivre l'élaboration de critères d'exposition au bruit pour ces espèces, travaux entamés deux ans plus tôt par un groupe d'experts de la NOAA. Les lignes directrices qui en découlent comprennent des seuils spécifiques pour différents niveaux d'effets et pour différents groupes d'espèces (Popper *et al.* 2014). Ces lignes directrices ont défini des seuils quantitatifs pour trois types d'effets immédiats :

- Mortalité, y compris les blessures entraînant le décès.
- Blessures réversibles, y compris celles qui ont peu de chances d'entraîner la mort (comme les blessures des cellules ciliées et les hématomes mineurs).
- TTS.

Les effets de masquage et les effets comportementaux sont évalués de manière qualitative, en analysant le risque relatif plutôt qu'en se basant sur des seuils de niveau sonore spécifiques. Ces effets ne sont pas évalués dans le présent rapport. Étant donné que la présence ou l'absence d'une vessie natatoire joue un rôle dans l'audition, la sensibilité d'un poisson aux lésions liées à l'exposition au bruit varie en fonction de l'espèce, ainsi que de la présence et du rôle éventuel de la vessie natatoire dans l'audition. Ainsi, différents seuils ont été proposés pour i) les poissons dépourvus de vessie natatoire (ce qui s'applique également aux requins et aux requins-baleines en l'absence d'autres informations); ii) les poissons dotés d'une vessie natatoire qui ne sert pas à l'audition et iii) les poissons qui utilisent leur vessie natatoire pour entendre.

En ce qui concerne les bruits continus générés par des activités, comme le transport maritime, le forage et le dragage, rien ne permet de conclure à une mortalité ou à des blessures potentiellement mortelles chez les poissons. En cas d'explosion, des décès et des blessures potentiellement mortelles peuvent survenir à des niveaux de crête compris entre 229 et 234 dB par rapport à μPa pour tous les types de poissons, selon (Popper *et al.* 2014). Dans cette étude, toutefois, la mortalité et les blessures potentiellement mortelles ont été évaluées à l'aide du seuil maximal plus prudent de 220 dB par rapport à μPa proposé par Wright et Hopky (1998).

Dans le cadre de ces travaux, la mortalité et les blessures potentiellement mortelles chez les œufs et les larves ont été évaluées en prenant en compte une vitesse maximale des particules de 13 mm/s, car il a été suggéré que les œufs et les larves pourraient être vulnérables aux vibrations du substrat associées à des bruits impulsifs, comme ceux générés par le battage de pieux ou les canons à air comprimé sismiques.

Annexe C. Méthodologie et paramètres de modélisation

Cette section présente une description détaillée du rapport sur la méthodologie de modélisation.

C.1. Propagation du bruit dans l'air à l'aide du modèle de propagation du bruit impulsionnel (INPM)

L'INPM utilise une solution de Padé par pas fractionnaires (Collins 1993) pour la forme parabolique de l'équation d'onde afin de déterminer les pertes de transmission dépendantes de la fréquence en fonction de la distance par rapport à une source ponctuelle. La solution de Padé par pas fractionnaires est environ deux ordres de grandeur plus rapide à calculer que la solution par différences finies de l'équation parabolique (EP) et s'avère plus précise que la solution de Fourier par étapes fractionnées pour la propagation à grand angle. Cette approche est également supérieure aux modèles classiques de tracé des rayons, qui peuvent donner lieu à des valeurs de niveau sonore reçu excessivement élevées en raison des caustiques, dont la suppression nécessite une grande puissance de calcul (Salomons 2001). Ce modèle utilise une mise en œuvre bidimensionnelle (2D) de la méthode EP qui tient compte de la diffraction, de la turbulence atmosphérique et de l'interaction du son avec le relief. La validité de l'INPM a été vérifiée en comparant les résultats du modèle à un ensemble de valeurs de référence disponibles dans la littérature scientifique. Le modèle présente une concordance quasi parfaite avec les résultats publiés (Racca *et al.* 2006).

L'INPM permet de générer le champ de niveau sonore complet, tant en étendue qu'en hauteur, le long d'une ligne radiale partant de la source. Ceci peut être représenté sous forme de graphique (figure C-1), qui illustre la propagation du bruit lors de la détonation d'une charge de 6,77 kg de TNT enfouie, en utilisant le profil atmosphérique du mois d'avril, retenu comme étant le plus prudent.

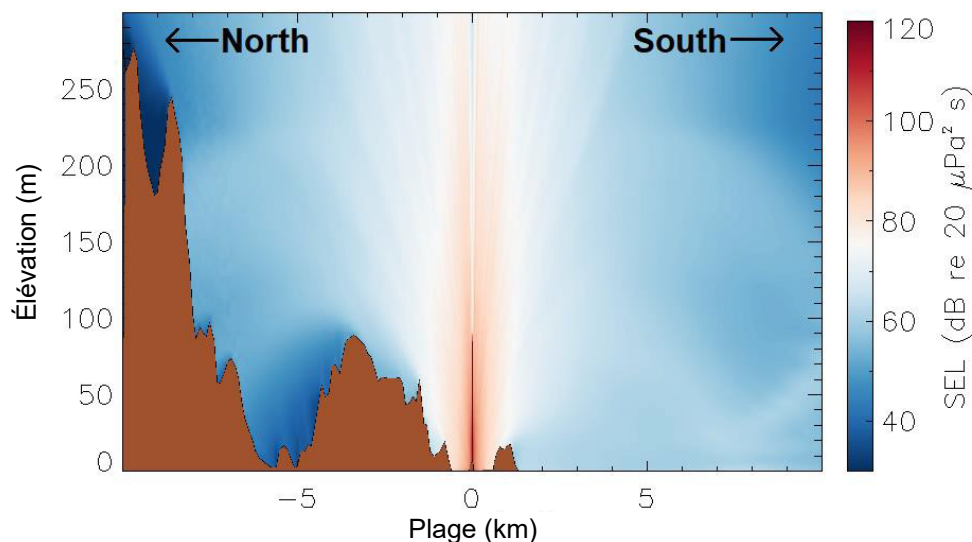


Figure C-1. Exemple de graphique radial vertical représentant le niveau sonore reçu en large bande non pondéré dans l'air, issu du modèle de propagation du bruit impulsif (de l'anglais *Impulse Noise Propagation Model* ou INPM), correspondant à la détonation souterraine d'une charge de 6,77 kg de TNT, en utilisant le profil atmosphérique le plus prudent, correspondant au mois d'avril. L'île Vardy se situe à une altitude de 0 m, tandis que la topographie au nord et au sud de l'île présente respectivement des altitudes négatives et positives.

C.2. Propagation du bruit sous-marin

C.2.1. Modèle de bruit des opérations maritimes (MONM)

Les champs sonores à longue portée ont été calculés à l'aide du modèle MONM (de l'anglais *Marine Operations Noise Model*) de JASCO. Si d'autres modèles peuvent s'avérer plus précis pour la propagation à angle raide dans un environnement à fort cisaillement, le modèle MONM est particulièrement adapté à une estimation efficace à plus longue portée.

Le MONM utilise deux sous-programmes sous-jacents : Le modèle MONM-RAM est utilisé pour la propagation des ondes acoustiques à basses fréquences (p. ex. jusqu'à 2 000 Hz) et le modèle MONM-BELLHOP est utilisé pour les hautes fréquences (p. ex. au-delà de 2 000 Hz).

Le MONM-RAM calcule la propagation acoustique à l'aide d'une solution à l'équation des ondes acoustiques de type parabolique à grand angle (Collins 1993), basée sur une version du modèle acoustique dépendant de la distance (RAM), qui a été modifiée pour tenir compte d'un fond marin élastique (Zhang et Tindle 1995). La méthode de l'équation parabolique a fait l'objet de nombreuses évaluations comparatives et est largement utilisée dans le domaine de l'acoustique sous-marine (Collins *et al.* 1996). Le modèle MONM-RAM tient compte des pertes supplémentaires par réflexion au niveau du fond marin, dues à la conversion partielle des ondes de compression incidentes en ondes de cisaillement aux interfaces entre le fond marin et les couches sous-marines, et il inclut les atténuations des ondes dans toutes les couches. Le modèle MONM-RAM intègre les caractéristiques environnementales spécifiques au site suivantes : une grille bathymétrique modélisée de la zone, la vitesse du son sous l'eau en fonction de la profondeur, ainsi qu'un profil géoacoustique basé sur la composition stratifiée globale des fonds marins.

Le modèle MONM-BELLHOP utilise un modèle de tracé des rayons acoustiques à faisceau gaussien (Porter et Liu 1994). Cette version du MONM tient compte de l'atténuation acoustique due à l'absorption d'énergie par relaxation ionique et à la viscosité de l'eau (Fisher et Simmons 1977), ainsi que des pertes de propagation dues à la rugosité de la surface de la mer. Ces deux types d'atténuation acoustique sont importants pour les fréquences supérieures à 5 kHz et ne peuvent être négligés sans que cela n'affecte de manière notable les résultats de la modélisation. Le modèle MONM-BELLHOP intègre les propriétés environnementales spécifiques au site suivantes : une grille bathymétrique modélisée de la zone, la vitesse du son sous l'eau en fonction de la profondeur, la température et la salinité moyennes de la colonne d'eau pour le calcul de l'atténuation acoustique due à l'absorption d'énergie, ainsi que les propriétés géoacoustiques des sédiments superficiels.

La précision des prévisions du modèle MONM a été validée par rapport à des données expérimentales issues de plusieurs programmes de vérification des sources sonores menés par JASCO (Hannay et Racca 2005, Aerts *et al.* 2008, Funk *et al.* 2008, Ireland *et al.* 2009, O'Neill *et al.* 2010, Warner *et al.* 2010). Le modèle MONM calcule les champs acoustiques en trois dimensions en modélisant les pertes de transmission au sein de plans verticaux bidimensionnels (2D) alignés le long de rayons couvrant un secteur de 360° à partir de la source, une approche communément appelée « N×2-D ». Ces plans radiaux verticaux sont séparés par un pas angulaire de $\Delta\theta$, ce qui donne $N = 360^\circ/\Delta\theta$ nombre de plans (figure C-2).

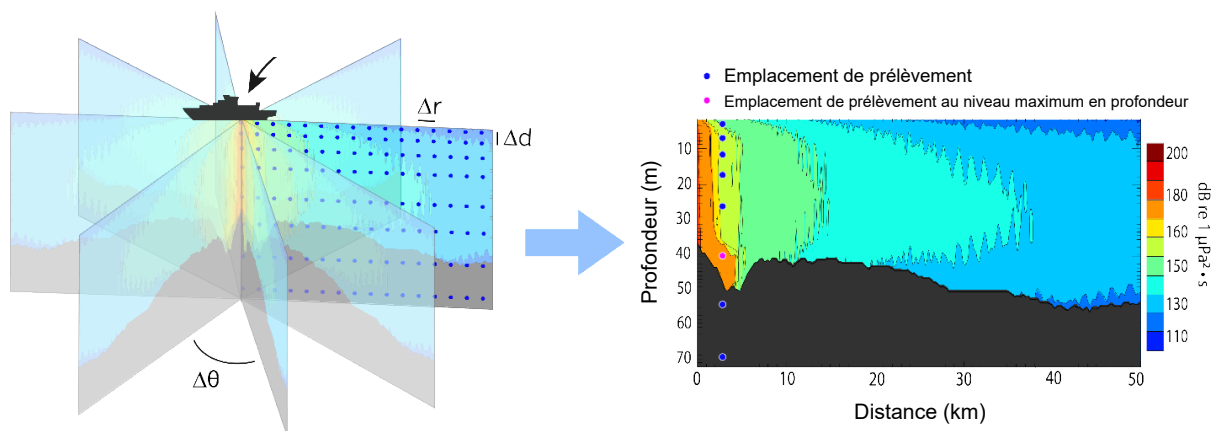


Figure C-2. Approche de modélisation N×2-D et maximum sur profondeur utilisée par le MONM.

Le modèle MONM tient compte de la dépendance en fréquence en calculant l'atténuation acoustique aux fréquences centrales des bandes de 1/3 d'octave. Un nombre suffisant de bandes de 1/3 d'octave, à partir de 10 Hz, est modélisé afin de couvrir la majeure partie de l'énergie acoustique émise par la source. Pour chaque fréquence centrale, la perte de transmission est modélisée dans chacun des N plans verticaux en fonction de la profondeur et de la distance par rapport à la source. Le SEL par impulsion reçu dans la bande de 1/3 d'octave est calculé en soustrayant les valeurs de perte de transmission de la bande du niveau de source directionnelle dans cette bande de fréquences. Le SEL composite à large bande reçu par impulsion est ensuite calculé en additionnant les niveaux reçus par bande de 1/3 d'octave.

Le champ sonore SEL reçu par seconde (p. ex. pour les opérations de dragage et de forage) au sein de chaque plan radial vertical est échantillonné à différentes distances de la source, généralement avec un pas radial fixe. À chaque intervalle d'échantillonnage le long de la surface, le champ sonore est échantillonné à différentes profondeurs, l'écart entre les échantillons augmentant avec la profondeur sous la surface. Les pas de résolution sont choisis de manière à assurer une couverture accrue à proximité de la profondeur de la source et aux profondeurs présentant un intérêt pour l'étude du profil de la vitesse du son. Dans les zones où les eaux sont profondes, aucun échantillonnage n'est effectué à des profondeurs supérieures à celles accessibles aux mammifères marins. Le SEL reçu par impulsion ou par seconde à un point d'échantillonnage en surface correspond à la valeur maximale observée parmi tous les échantillons prélevés dans la colonne d'eau, c'est-à-dire le SEL reçu par impulsion maximal sur toute la profondeur. Ces valeurs maximales de SEL par impulsion, rapportées à la profondeur, sont représentées sous forme de courbes de niveau colorées autour de la source.

C.2.2. Modèle dépendant de la gamme complète des formes d'onde (FWRAM)

Pour les bruits impulsifs issus d'explosions sous-marines, il faut disposer de représentations dans le domaine temporel des ondes de pression générées dans l'eau afin de calculer le SPL et le niveau de pression de crête. De plus, le pieu doit être modélisé comme une source répartie afin de caractériser avec précision les effets de directivité verticale dans la zone de champ proche. Dans le cadre de cette étude, des formes d'onde de pression synthétiques ont été calculées à l'aide du modèle FWRAM, un modèle acoustique en domaine temporel reposant sur le même algorithme d'EP à grand angle que le modèle MONM. Le modèle FWRAM calcule des formes d'onde de pression synthétiques en fonction de la distance et de la profondeur pour des environnements acoustiques marins à distance variable, et il utilise les mêmes données environnementales que le modèle MONM (bathymétrie, profil de la vitesse du son dans l'eau et profil géoacoustique des fonds marins). Contrairement au modèle MONM, le modèle FWRAM calcule les formes d'onde de pression par synthèse de Fourier de la fonction de transfert acoustique modélisée dans des bandes de fréquences très rapprochées. Le modèle FWRAM utilise la méthode du champ initial de réseau pour modéliser avec précision la propagation du son à partir d'une source répartie dans l'espace (MacGillivray et Chapman 2012).

Des formes d'onde de pression synthétiques ont été modélisées sur une plage de fréquences comprise entre 10 et 1 024 Hz, dans une fenêtre de 1 s (figure C-3). Les courbes de pression synthétiques ont été traitées a posteriori, après application d'une correction du temps de propagation, afin de calculer les mesures standard SPL et SEL en fonction de la distance et de la profondeur par rapport à la source.

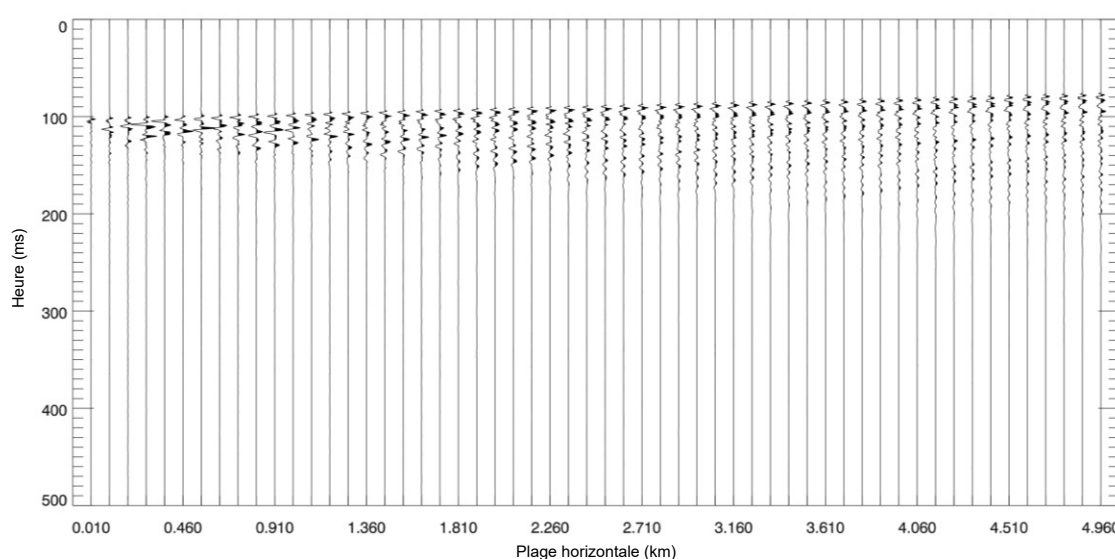


Figure C-3. Exemple de courbes de pression synthétiques calculées par le modèle FWRAM pour le pieu n° 2 à différents décalages de plage. La profondeur du récepteur est de 35 m et les amplitudes des courbes de pression ont été normalisées à des fins d'affichage.

C.2.3. Information sur la validation du modèle

Les prévisions issues des modèles de propagation de JASCO (MONM, FWRAM) ont été validées par rapport à des données expérimentales issues de plusieurs programmes de mesures acoustiques sous-marines menés par JASCO à l'échelle mondiale, notamment dans l'Arctique américain et canadien, dans les eaux canadiennes et du sud des États-Unis, le Groenland, la Russie et l'Australie (Hannay et Racca 2005, Aerts *et al.* 2008, Funk *et al.* 2008, Ireland *et al.* 2009, O'Neill *et al.* 2010, Warner *et al.* 2010, Racca *et al.* 2012a, Racca *et al.* 2012 b, Matthews et MacGillivray 2013, Martin *et al.* 2015, Racca *et al.* 2015, Martin *et al.* 2017a, Martin *et al.* 2017 b, Warner *et al.* 2017, MacGillivray 2018, McPherson *et al.* 2018, McPherson et Martin 2018).

Par ailleurs, JASCO a mené des programmes de mesure liés à un nombre important d'activités anthropiques, qui ont notamment comporté une validation interne de la modélisation (notamment McCrodan *et al.* 2011, Austin et Warner 2012, McPherson et Warner 2012, Austin et Bailey 2013, Austin *et al.* 2013, Zykov et MacDonnell 2013, Austin 2014, Austin *et al.* 2015, Austin et Li 2016, Martin et Popper 2016).

C.3. Estimation des plages par rapport aux niveaux de seuil

Pour la modélisation sous-marine, les courbes de niveau acoustique ont été calculées à partir des champs acoustiques prédits par les modèles de propagation, en retenant la valeur maximale parmi toutes les profondeurs modélisées au-dessus du fond marin pour chaque emplacement de la zone modélisée. Pour la modélisation en milieu aérien, les courbes de niveau sonore ont été calculées à partir du champ acoustique situé entre 0 et 15 cm au-dessus de l'eau ou du sol. Les distances prévues jusqu'à des niveaux spécifiques ont été calculées à partir de ces courbes de niveau. Pour chaque niveau acoustique, deux distances par rapport à la source sont indiquées : 1) $R_{\max}$, la portée maximale du niveau sonore donné sur tous les azimuts, et 2) $R_{95\%}$, la portée correspondant au niveau sonore donné après exclusion des 5 % de points les plus éloignés (voir les exemples de la figure C-4).

On utilise le $R_{95\%}$ car les empreintes du champ acoustique ont souvent une forme irrégulière. Dans certains cas, une courbe de niveau acoustique peut présenter de petites protubérances ou des franges isolées anormales. C'est ce qu'illustre l'image de la figure C-4(a). Dans des cas comme celui-ci, où relativement peu de points sont exclus dans une direction donnée, $R_{\max}$ peut donner une image faussée de la superficie de la région exposée à ces effets, et $R_{95\%}$ est considéré comme plus représentatif. En revanche, dans les cas fortement asymétriques, comme ceux illustrés à la figure C-4(b), $R_{95\%}$ ne tient pas compte des saillies importantes dans l'empreinte. Dans de tels cas, $R_{\max}$ pourrait mieux représenter la zone d'effet dans certaines directions. Ce genre de cas est généralement lié à des caractéristiques bathymétriques qui influent sur la propagation. La différence entre $R_{\max}$ et $R_{95\%}$ dépend de la directivité de la source (toutes les sources de cette étude ont une directivité uniforme) et de la non-uniformité de l'environnement acoustique.

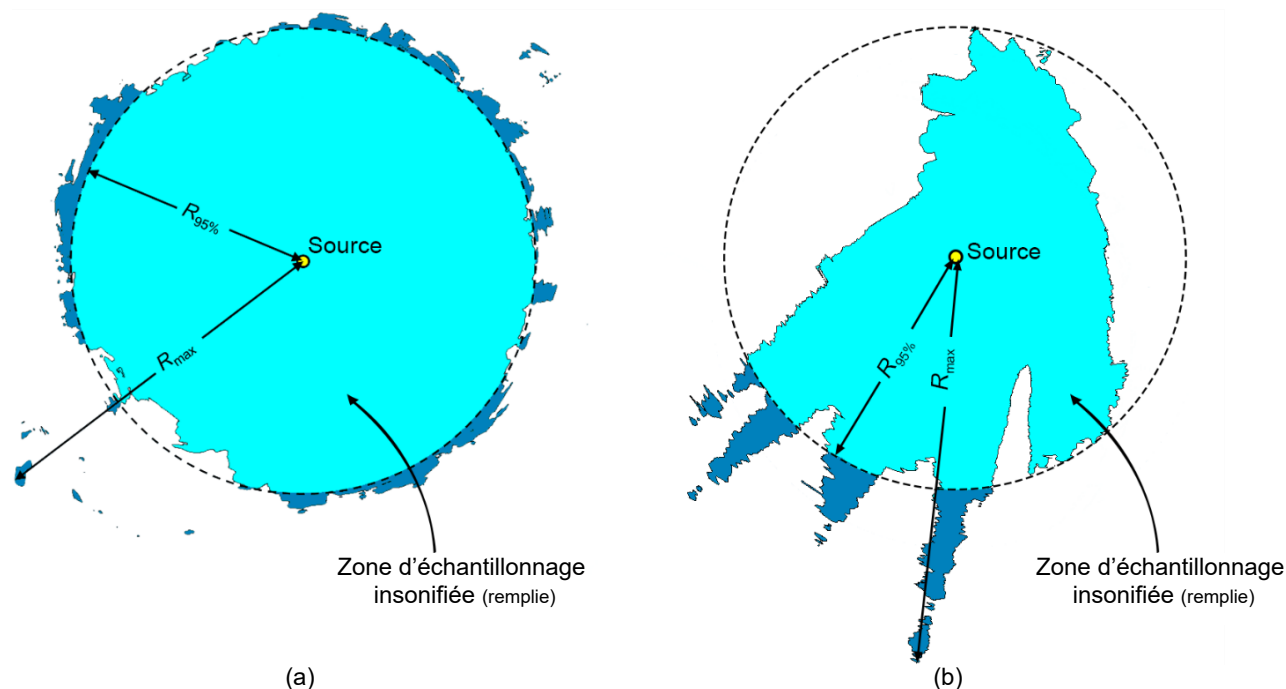


Figure C-4. Zones d'échantillonnage insonifiées à un niveau acoustique arbitraire avec R_{max} et $R_{95\%}$ indiqués pour deux scénarios différents. (a) Courbe de niveau acoustique globalement symétrique, présentant de légères saillies. (b) Courbe de niveau acoustique très symétrique, présentant de longues saillies. Le bleu clair indique les zones soumises à l'échographie délimitées par $R_{95\%}$; le bleu plus foncé indique les zones situées en dehors de cette limite qui déterminent R_{max} .

C.4. Paramètres environnementaux

C.4.1. Environnement acoustique dans l'air

Cette section décrit la topographie du terrain, l'impédance du terrain et les profils atmosphériques, qui constituent les données d'entrée du modèle INPM dans le cadre de cette étude.

En ce qui concerne la topographie du terrain, deux ensembles de données ont été utilisés pour générer une grille altimétrique de 25×25 km centrée sur l'île Vardy :

- Sur l'île Vardy, le client a fourni un modèle altimétrique du terrain en haute résolution.
- Pour la zone environnante, les données altimétriques du terrain, d'une résolution de 20×30 m, ont été obtenues à partir du programme de modélisation altimétrique 3D de l'United States Geological Survey (USGS) dans le cadre de son programme d'élévation 3D (USGS 2020).

Les deux ensembles de données ont été combinés, ajustés à une altitude de 0 m au niveau de la marque de marée haute, puis maillés à une résolution de 10×10 m pour la modélisation acoustique de l'INPM (figure C-5).

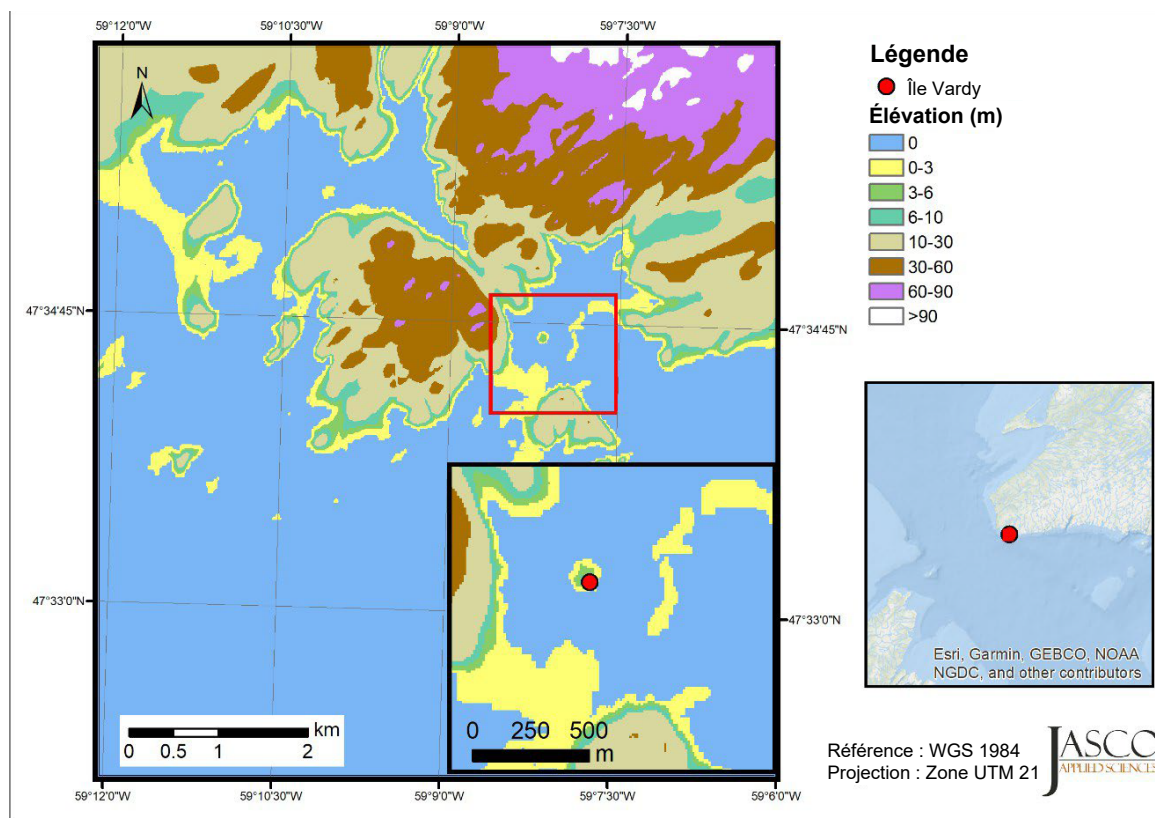


Figure C-5. Altitude du terrain dans la zone modélisée.

Dans le modèle INPM, l'interaction du son avec le terrain est prise en compte en tenant compte de la relation entre l'impédance acoustique du sol ou de l'eau et celle de l'air. Cette relation détermine le rapport entre l'énergie sonore réfléchiée dans l'atmosphère et celle absorbée par le sol ou l'eau. Le paramètre qui décrit cette absorption d'énergie est appelé résistance spécifique à l'écoulement (Delany et Bazley 1970). Dans cette étude, plusieurs zones situées autour de l'île Vardy (figure C-6) ont été sélectionnées en fonction d'une valeur spécifique de résistance spécifique à l'écoulement, déterminée en fonction du type de matériau prédominant en surface (comme identifié par inspection visuelle d'images aériennes). Pour les saisons sans neige (mai-octobre), les zones terrestres ont été classées soit comme zones rocheuses/végétalisées, soit comme zones urbaines. Pour les saisons enneigées (novembre-avril), toutes les zones terrestres ont été modélisées avec une résistance spécifique à l'écoulement correspondant à de la neige tassée molle. Pour ces deux saisons, on a supposé que les plans d'eau étaient exempts de glace et de neige. La résistance spécifique à l'écoulement pour chaque type de terrain est indiquée dans le tableau C-1.

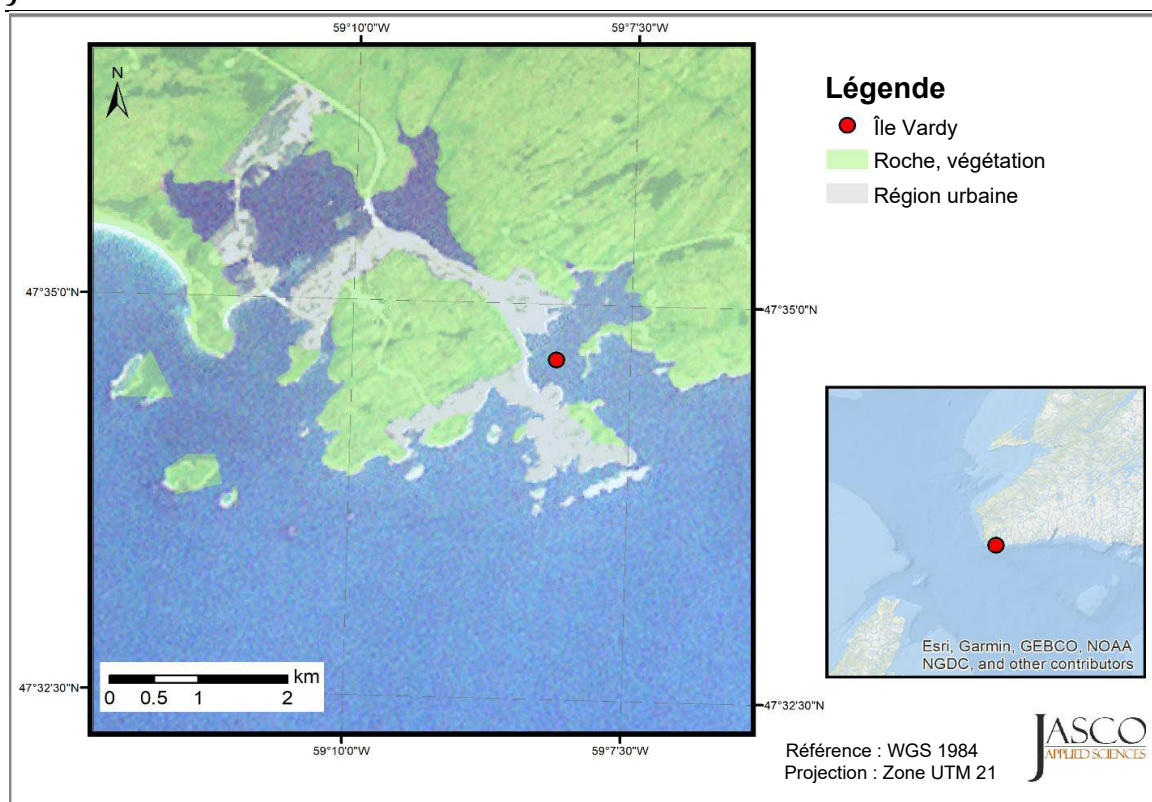


Figure C-6. Zones de résistance spécifique à l'écoulement au sein de la zone de modélisation Les valeurs figurent dans le tableau C-1.

Tableau C-1. Valeurs de résistance spécifique à l'écoulement associées aux zones situées à proximité de l'île Vardy.

Région	Résistance spécifique à l'écoulement (kNs/m ⁴)
Roche/végétation	100
Zone urbaine	630
Neige meuble	40
Eau	2 000

Les profils atmosphériques utilisés dans cette étude ont été calculés à partir des lancements de ballons-sondes effectués deux fois par jour depuis la station de mesure la plus proche, située à Stephenville (Terre-Neuve-et-Labrador), au cours de l'année 2019. Pour chaque mois, les données météorologiques comprennent des profils de pression, de température et de point de rosée en fonction de l'altitude. L'humidité relative a ensuite été calculée à partir de la température et du point de rosée, à l'aide de l'équation proposée par Alduchov et Eskridge (1996). Toutes les données ont été moyennées par tranches de 50 m, interpolées entre 0 et 3 km d'altitude, puis lissées à l'aide d'une moyenne mobile. La pression, la température, le point de rosée et l'humidité relative à des altitudes inférieures à 50 m ont été considérés comme constants, car les mesures les plus basses enregistrées à Anchoage l'ont été à 50 m. Une modélisation préliminaire des niveaux de SEL non pondérés à large bande a été réalisée afin de déterminer le profil atmosphérique susceptible de fournir les distances les plus prudentes par rapport aux seuils. Le profil d'avril utilisé dans cette étude (figure C-7) a donné les résultats les plus prudents parmi tous les profils.

La vitesse du vent, contrairement aux autres paramètres du profil atmosphérique utilisés dans le modèle INPM, est une grandeur vectorielle. Le modèle INPM utilise un profil scalaire de vitesse du vent qui correspond à la vitesse du vent projetée le long de la direction radiale de propagation du son modélisée. Nous avons retenu une vitesse du vent égale à zéro dans notre modèle afin de ne pas fausser la propagation du son dans aucune direction, étant donné qu'il n'y a pas de vents dominants à cet endroit.

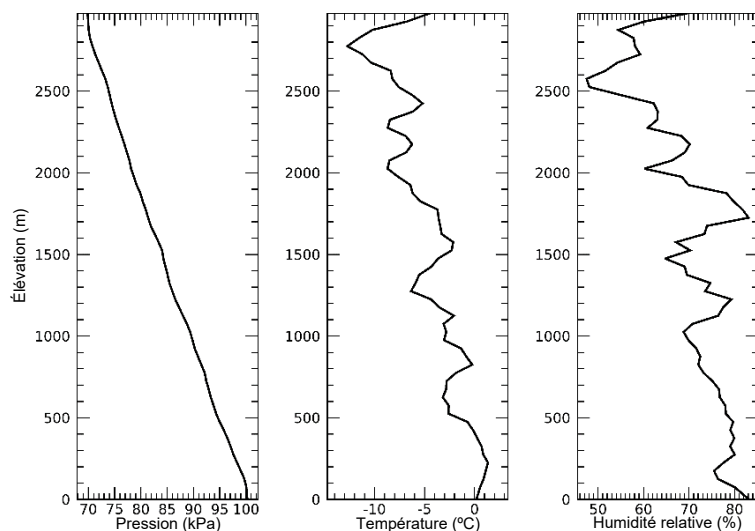


Figure C-7. Avril : Profils de pression atmosphérique, de température et d'humidité relative utilisés pour modéliser la propagation du son résultant de la détonation d'explosifs enfouis.

C.4.2. Bathymétrie

Pour la modélisation de la propagation acoustique sous-marine, une grille bathymétrique a été créée à partir de données issues de plusieurs ensembles de données (figure C-8). Les données disponibles pour la zone du projet comprenaient :

- Données ponctuelles fournies par le client couvrant le chenal de navigation et les zones adjacentes (résolution spatiale d'environ 1 m);
- Éléments tirés de la carte de navigation CHS4641 (isobathes, sondages ponctuels et littoral) couvrant la région de Port aux Basques et s'étendant sur environ 2 km en pleine mer;
- Modèle numérique d'élévation bathymétrique de l'Est du Canada à une résolution de 3 secondes d'arc, établi par la NOAA (États-Unis) (résolution de la grille : environ 60 × 90 m).

Deux grilles bathymétriques ont été établies afin de représenter les différentes étapes de la construction : Étape 1 (figure C-10) avec la bathymétrie actuelle pour la modélisation des opérations de dynamitage, et l'étape 2 (figure C-10) représentait la phase finale du dragage. La profondeur visée pour le dragage était de 10,5 m sous la surface de la mer, à l'intérieur du chenal de navigation. La grille de la phase 2 correspondait à la dernière étape de l'enlèvement de la roche mère, au cours de laquelle la profondeur visée a été atteinte. Cette grille a servi à modéliser le champ acoustique généré par les opérations de dragage.

Les données initiales sur la profondeur de l'eau avaient pour niveau de référence la « marée normale la plus basse ». La grille bathymétrique utilisée pour la modélisation acoustique a été convertie au niveau de référence de la « marée normale la plus haute » en ajoutant 2 m aux profondeurs d'eau. Par conséquent, la profondeur cible au niveau de la « marée normale la plus haute » était de 12,5 m.

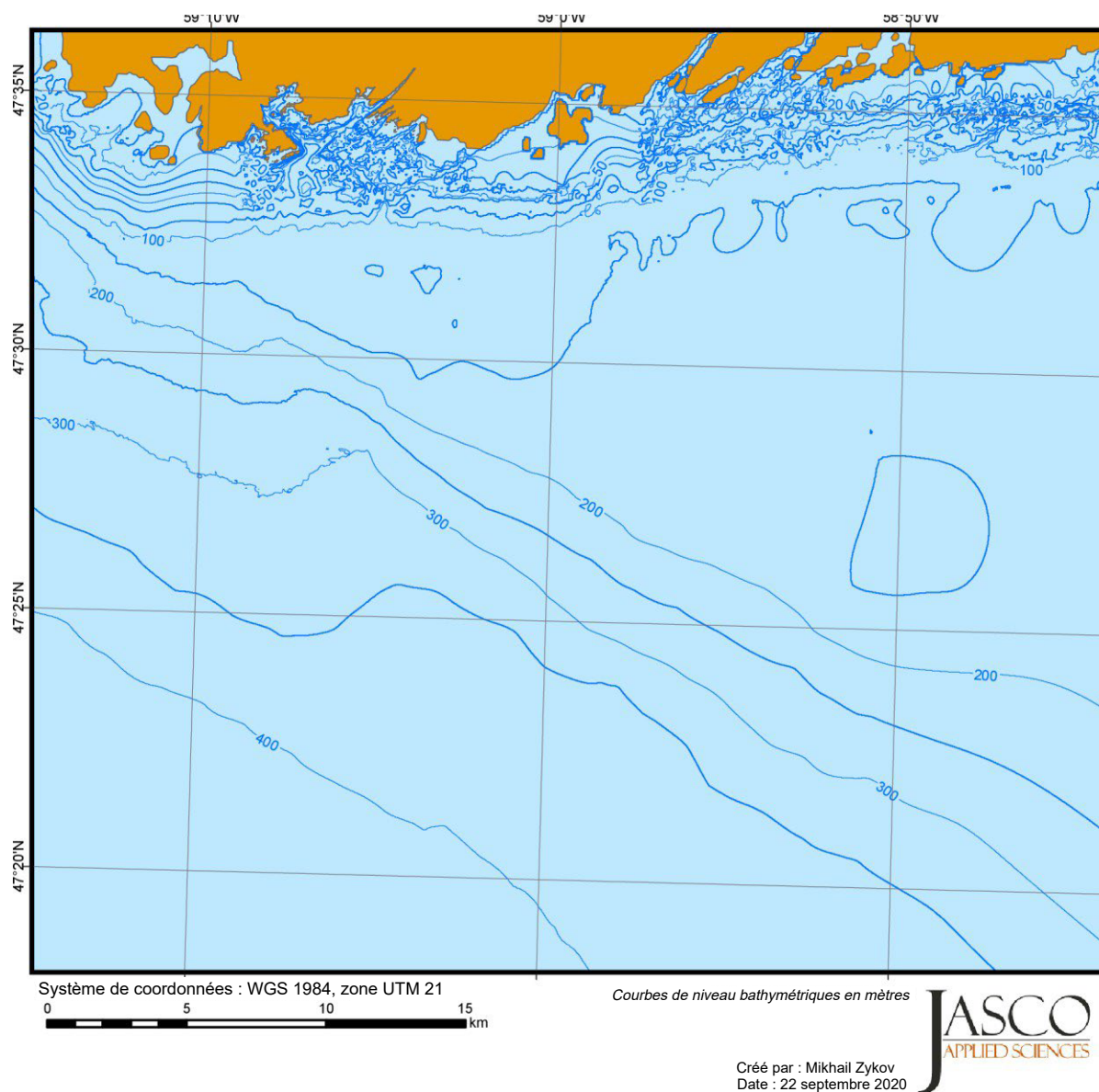
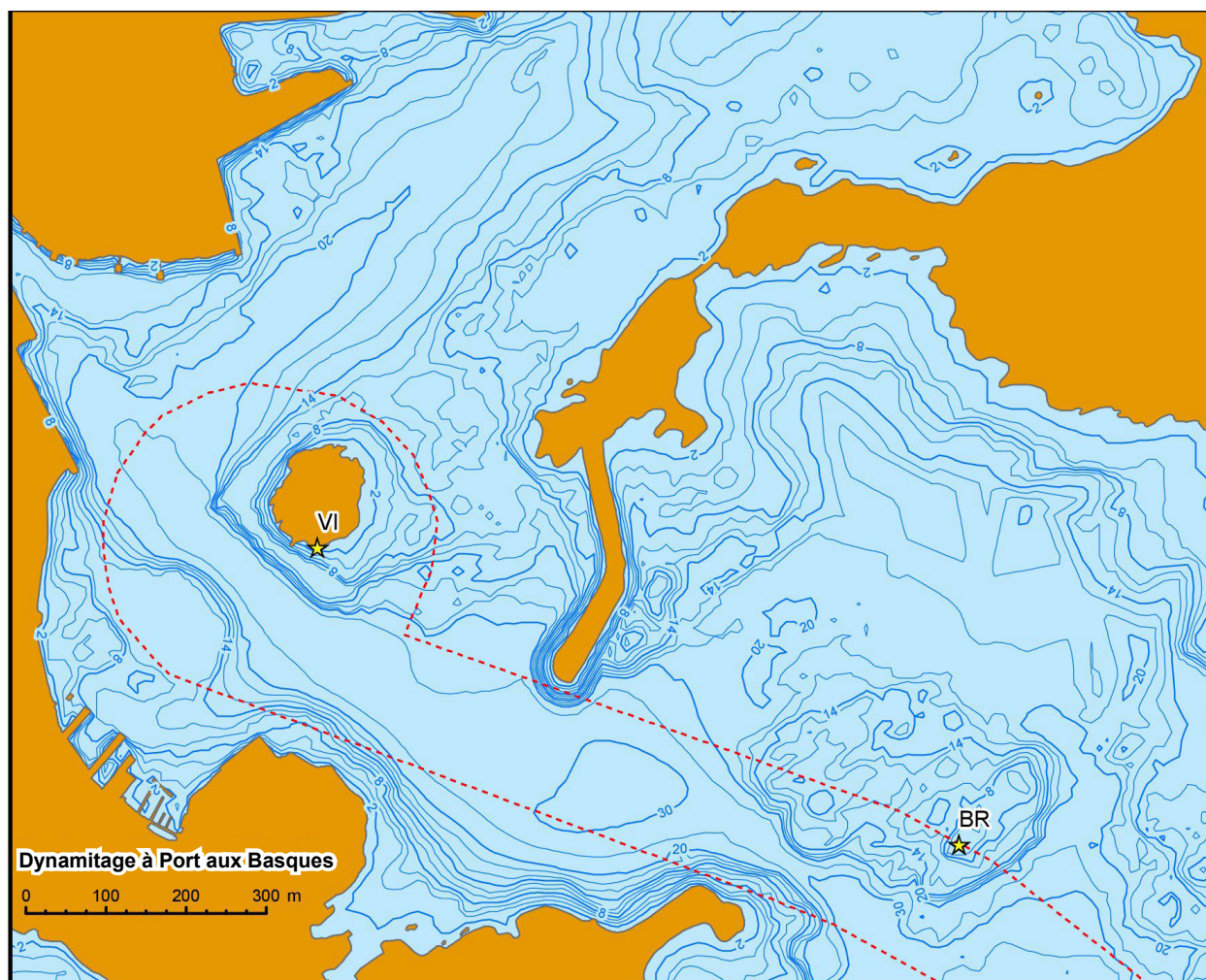


Figure C-8. Carte bathymétrique de la zone de modélisation



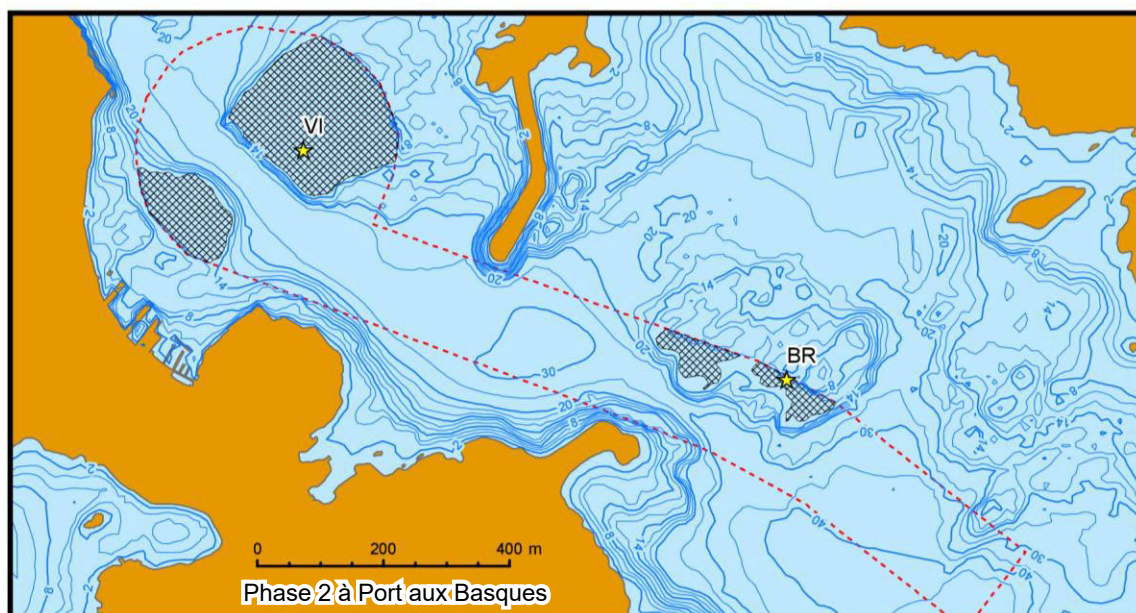
Système de coordonnées : WGS 1984, zone UTM 21

Courbes de niveau bathymétriques en mètres

Créé par : Mikhail Zykov
Date : 26 février 2021

JASCO
APPLIED SCIENCES

Figure C-9. Bathymétrie spécifique aux travaux de dynamitage à Port-aux-Basques. Lieux de modélisation : VI – Île Vardy; BR – Baldwin Rock



Système de coordonnées :
WGS 1984, zone UTM 21

- ★ Sites de modélisation
acoustique sous-marine
- ▨ Zones draguées
- Chenal de navigation

Courbes de niveau
bathymétriques en mètres

Créé par : Mikhail Zykov
Date : 22 septembre 2020

JASCO
APPLIED SCIENCES

Figure C-10. Étape de dragage spécifique aux travaux de dynamitage à Port-aux-Basques. Lieux de modélisation : VI – Île Vardy; BR – Baldwin Rock

C.4.3. Profils de la vitesse du son sous l'eau

Le projet de construction devant se dérouler tout au long de l'année, les 12 mois ont été pris en compte lors du choix du profil de vitesse du son pour la modélisation de la propagation.

Les profils de vitesse du son ont été établis à partir des profils de température et de salinité issus du *Generalized Digital Environmental Model V 3.0* du Naval Oceanographic américain (GDEM; Teague *et al.* 1990, Cames 2009). Le GDEM fournit une climatologie océanique de la température et de la salinité des océans du monde entier sur une grille de latitude et de longitude d'une résolution de $0,25^\circ$, avec une résolution temporelle d'un mois, sur la base des observations historiques mondiales issues du Master Oceanographic Observational Data Set (MOODS) de la Marine américaine. Les profils climatologiques comprennent 78 points à profondeur fixe jusqu'à une profondeur maximale de 6 800 m (là où l'océan atteint cette profondeur), dont 55 profondeurs standard comprises entre 0 et 2 000 m. Les profils de température et de salinité du GDEM ont été convertis en profils de vitesse du son selon Coppens (1981).

L'ensemble de données hydrologiques a été relevé à la position $47,5^\circ \text{ N}$, $59,25^\circ \text{ O}$. Les profils de vitesse du son pour chacun des douze mois sont présentés dans la figure C-11 (à gauche). Le profil de la vitesse du son présente des variations importantes tout au long de l'année, avec un chenal superficiel bien marqué pendant les mois d'hiver. Le profil de vitesse du son calculé pour le mois de février (figure C-11, à droite) a été retenu pour la modélisation de tous les scénarios de propagation.

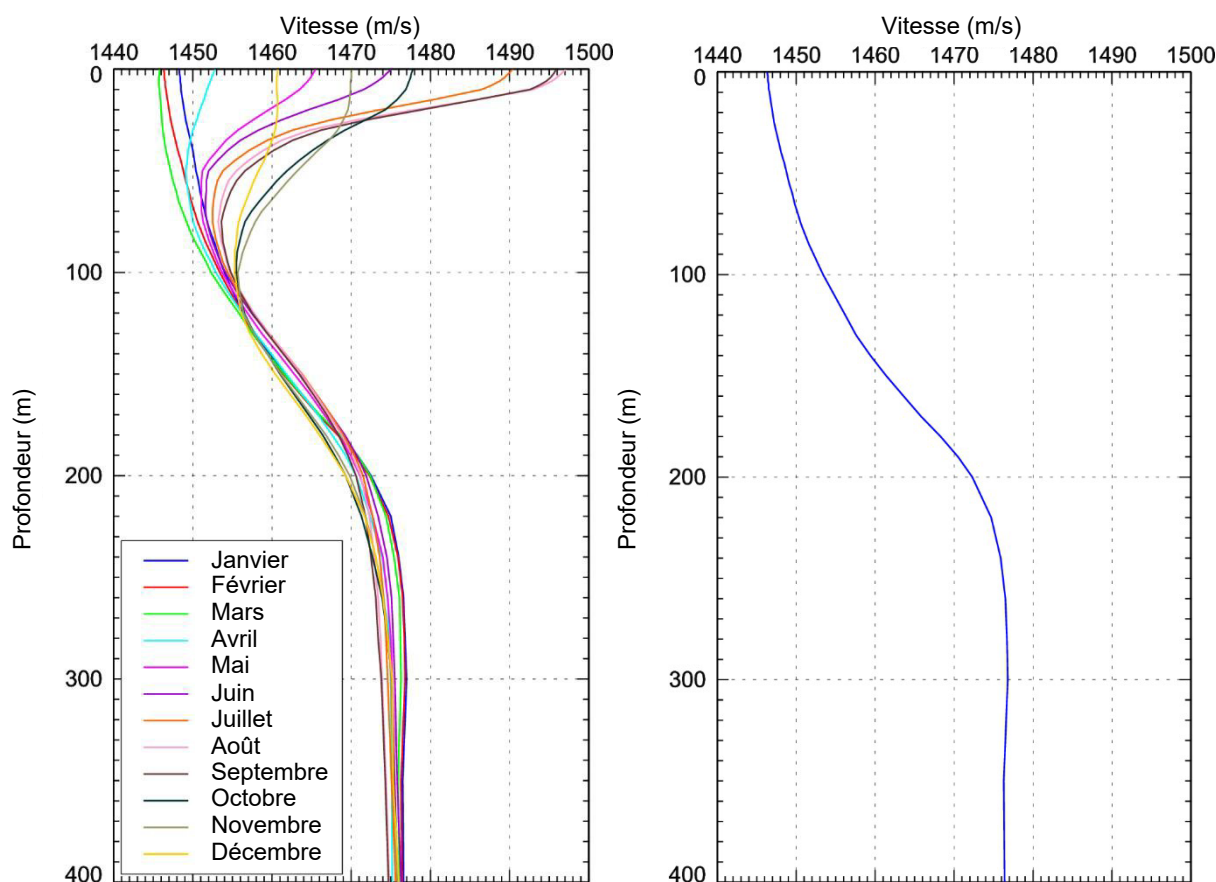


Figure C-11. Profil mensuel moyen de la vitesse du son dans la colonne d'eau pour tous les mois considérés (à gauche) et profil de la vitesse du son retenu pour la modélisation de la propagation (février; à droite). D'après les données du GDEM V 3.0 au point de prélèvement situé à $47,5^\circ \text{ N}$, $59,25^\circ \text{ O}$.

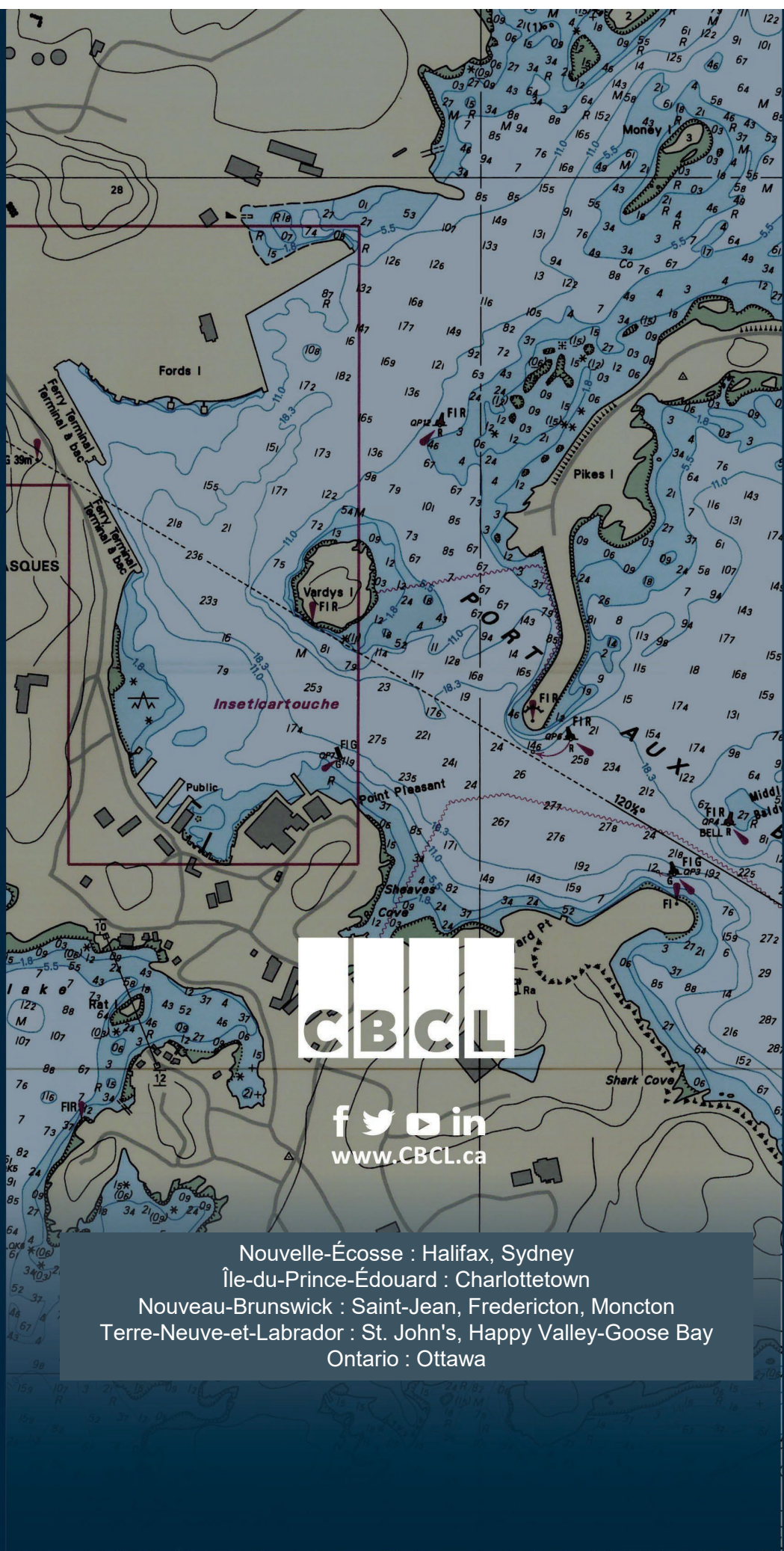
C.4.4. Profils géoacoustiques des fonds marins

Le fond marin de la zone du projet est constitué de roche-mère, sur laquelle repose par endroits une fine couche de sédiments non compactés à grains grossiers (gravier/sable grossier). Les prévisions relatives au champ acoustique doivent être fournies pour l'état du projet dans lequel au moins quelques mètres de la couche de sédiments et de roche-mère auront été retirés sur le site d'essai.

Aux fins de la propagation acoustique, le fond est considéré comme une couche de roche mère. Les forages géotechniques réalisés sur l'île Vardy ont mis en évidence la présence d'amphibolite et de gneiss. Les propriétés géoacoustiques caractéristiques de ces types de roches ont été relevées. Le modèle géoacoustique utilisé pour la propagation du son sous l'eau est présenté dans le tableau C-2 (identique pour les deux sites).

Tableau C-2. Modèle géoacoustique de Port-aux-Basques. Dans chaque plage de profondeur, chaque paramètre varie de manière linéaire dans la plage indiquée. L'onde de compression est l'onde primaire. L'onde de cisaillement est l'onde secondaire.

Profondeur sous le fond marin (m)	Matériau	Densité (g/cm ³)	Onde de compression		Onde de cisaillement	
			Vitesse (m/s)	Atténuation (dB/λ)	Vitesse (m/s)	Atténuation (dB/λ)
0–1 000	Amphibolite/gneiss	2,7	3 000–3 500	0,1	500	0,2
>1 000			3 500			



f t y in
www.CBCL.ca

Nouvelle-Écosse : Halifax, Sydney
Île-du-Prince-Édouard : Charlottetown
Nouveau-Brunswick : Saint-Jean, Fredericton, Moncton
Terre-Neuve-et-Labrador : St. John's, Happy Valley-Goose Bay
Ontario : Ottawa