

Extension et réaménagement du port de Galibay

Etude d'impact acoustique sous-marine

Identification du document

Référence du document	QO.20200525.RAP.01A
Donneur d'ordre	Établissement portuaire de Saint-Martin
Client	GAIA Terre Bleue
Reference du contrat	Contrat n°SAP : 2020-09
Contact	Didier GROSDÉMANGE (dgrosdemange@gaia-terrebleue.fr)

PROJET	DOC	CHRONO	VER	IND	CLIENT	ACRO	DATE	TYPE	CLASS
QO.20200525	RAP	001	01	A	GAIA	GAL	11.01.2024	PROD	DR



Historique du document

Ver	Ind.	Responsable	Date	Vérification	Validation	Transmission	Description
01	A	E. Hemon	01.03.2023	D. Clorennec	T. Folegot	01.03.2023	Version initiale

Citation

E. Hemon, D. Clorennec et T. Folegot (2023), Extension et réaménagement du port de Galisbay, Etude d'impact acoustique sous-marine , numéro QO.20200525.RAP.001.01A, Quiet-Oceans, Brest, France



PROJET FINANCÉ
par le fonds européen
de développement régional
Dans le cadre de REACT-EU :
dispositif de relance de l'Union en
réponse à la pandémie de COVID-19

Table des matières

Table des matières	3
Liste des figures	4
Liste des tableaux.....	6
Lexique	8
Chapitre I. Présentation de l'étude	11
Chapitre II. Introduction	12
II.1. La problématique du bruit sous-marin	12
II.2. Qu'est-ce que le chorus sonore sous-marin	13
II.3. De quoi dépend la distribution des bruits dans le milieu marin ?	16
II.4. Contexte scientifique et aspect réglementaire	17
II.5. Approche retenue pour l'évaluation acoustique du projet.....	18
Chapitre III. Méthodologie de modélisation de la propagation du son	20
III.1. Modèle pour la caractérisation du bruit ambiant et des empreintes sonores.....	20
III.2. Acquisition et traitement de données acoustiques in situ	23
III.3. Limites méthodologiques et approximations de la modélisation sonore	23
Chapitre IV. Données d'entrée	24
IV.1. Données pour la modélisation	24
IV.2. Méthode d'évaluation des impacts sur la faune marine	29
Chapitre V. État Perturbé	39
V.1. Sources de bruit générées par le projet.....	39
V.2. Scénarios modélisés.....	50
V.3. Propagation et empreinte sonore	50
V.4. Estimation des distances de risque et identification des catégories d'espèces à risque.....	59
V.5. Synthèse des résultats de modélisation	69
Chapitre VI. Conclusions de l'étude d'impact.....	71
VI.1. Synthèse	71
VI.2. Recommandations.....	72
Bibliographie.....	73

Liste des figures

Figure 1 : Contexte géographique du projet. L'emplacement du port de Galisbay est indiqué par une étoile rouge.	11
Figure 2 : Echelle qualitative des niveaux de bruits sous-marins émis à un mètre dans une bande basse fréquence de quelques kHz. (source Quiet-Oceans)	12
Figure 3 : Composition du chorus sonore sous-marin.	13
Figure 4 : Synthèse des niveaux de bruit typiques en fonction de la fréquence et de la nature de la source de bruit. Ces valeurs peuvent être très dépendantes du site, de la saison, et du contexte (Dosits.org, 2016).	14
Figure 5 : Spectrogramme illustratif d'un déplacement de sédiment	15
Figure 6 : Spectrogrammes de clics (gauche) et de sifflements (droite) émis par des delphinidés.	15
Figure 7 : Spectrogramme de la signature acoustique de l'hélice d'un navire.	16
Figure 8 : Méthodologie proposée pour la réalisation de l'étude d'impact.	19
Figure 9 : Description schématique de la plateforme opérationnelle de prévision des bruits. Source: Quiet-Oceans	21
Figure 10 : Bathymétrie utilisée pour la modélisation acoustique autour de la zone d'étude. L'emplacement du port de Galisbay est symbolisé par une étoile rouge.	25
Figure 11 : Cartographie de la vitesse de son en surface le 28/06/2022 et profil de célérité sur l'année 2021.	26
Figure 12 : Illustration de la donnée de houle (spatiale et temporelle).	27
Figure 13 : Illustration de la donnée de vent.	28
Figure 14 : Distribution du marnage relatif au port de Anguilla au mois de Juillet 2022.	28
Figure 15 : Mesures acoustiques passives réalisées à proximité du port de Galisbay, dont sont issus les niveaux de bruit médians utilisés dans l'étude d'impact.	29
Figure 16 : Schéma de la classification scientifique des espèces océaniques et marines. Source : Quiet-Oceans.	31
Figure 17 : Dauphin tacheté pantropical (<i>Stenella attenuata</i>). Source : TheLostCetacean.	32
Figure 18 : Dauphin tacheté de l'Atlantique (<i>Stenella frontalis</i>). Source : TheLostCetacean.	32
Figure 19 : Tortue imbriquée (<i>Eretmochelys imbricata</i>). Source : INPN.	32
Figure 20 : Tortue verte (<i>Chelonia mydas</i>). Source : AMP.	32
Figure 21 : Fonction de sensibilité auditive des différentes catégories de mammifères marins selon (Southall 2019 & NOAA 2018) et de poissons et tortues selon (Popper 2014 & McCauley 2000).	33
Figure 22 : Graduation des risques biologiques en fonction de l'éloignement à la ou les sources de bruit anthropique.	34
Figure 23 : Interaction des sons anthropiques et/ou naturels avec la communication de la faune marine.	37
Figure 24 : Illustration de la méthode d'évaluation du cumul d'énergie sonore pendant la fuite de l'animal.	38
Figure 25 : Emplacements des activités bruyantes du projet.	39
Figure 26 : Emplacement des opérations de construction de quai vis-à-vis de l'avancée de la digue	40
Figure 27 : Atténuation en fonction de la fréquence du rideau de simple BBC (Bellmann, 2020)	41
Figure 28 : Emplacement du point représentatif pour la modélisation du dragage du chenal de navigation.	42
Figure 29 : Gabarit sonore de l'atelier de dragage & Répartition de l'énergie sonore (%)	42
Figure 30 : Illustration (source internet) et emplacement de l'atelier de clapage	43
Figure 31 : Gabarit sonore de l'atelier de clapage & Répartition de l'énergie sonore (%)	43
Figure 32 : Emplacement des ducs d'Albe retenu pour la modélisation des opérations d'enfoncement de pieux du quai croisière. La partie potentiellement inachevée de la digue (musoir) est hachurée en rouge sur l'image.	44
Figure 33 : Gabarit sonore de l'atelier de forage vertical (avant mise en œuvre du BBC) & Répartition de l'énergie sonore (%)	45
Figure 34 : Gabarit sonore de l'atelier de battage de pieux (avant mise en œuvre du BBC) & répartition de l'énergie sonore (%)	45
Figure 35 : Gabarit sonore de l'atelier de vibrofonçage (avant mise en œuvre du BBC) & Répartition de l'énergie sonore (%)	46

Figure 36 : Emplacement des ducs d'Albe retenu pour la modélisation des opérations d'enfoncement de pieux des quais commerce.....	47
Figure 37 : Gabarit sonore de l'atelier de forage vertical (avant mise en œuvre du BBC) & Répartition de l'énergie sonore (%)	48
Figure 38 : Gabarit sonore de l'atelier de battage de pieux (avant mise en œuvre du BBC) & Répartition de l'énergie sonore (%)	48
Figure 39 : Gabarit sonore de l'atelier de vibrofonçage (avant mise en œuvre du BBC) & Répartition de l'énergie sonore (%)	49
Figure 40 : Empreinte sonore de l'atelier de dragage du chenal de navigation	51
Figure 41 : Empreinte sonore de l'atelier de clapage	52
Figure 42 : Empreinte sonore de l'atelier de forage vertical pour le cas du quai croisière.....	53
Figure 43 : Empreinte sonore de l'atelier de battage de pieux pour le cas du quai croisière	54
Figure 44 : Empreinte sonore de l'atelier de vibrofonçage pour le cas du quai croisière.....	55
Figure 45 : Empreinte sonore de l'atelier de forage vertical pour le cas des quais commerce.....	56
Figure 46 : Empreinte sonore de l'atelier de battage de pieux pour le cas des quais commerce	57
Figure 47 : Empreinte sonore de l'atelier de vibrofonçage pour le cas des quais commerce.....	58

Liste des tableaux

Tableau 1 : Effet des conditions physiques du milieu océanique sur la propagation acoustique et sur la génération de bruits propres contribuant à la résultante du bruit ambiant.	16
Tableau 2 : Synthèse des données environnementales utilisées pour la modélisation acoustique.....	24
Tableau 3 : Mammifères marins considérés dans l'étude d'impact	31
Tableau 4 : Tortues marines considérées dans l'étude d'impact.....	32
Tableau 5 : Graduation d'une modification du comportement attendu en fonction du seuil de tolérance acoustique	35
Tableau 6 : Groupes d'espèces considérés dans l'étude et seuils de sensibilité acoustique associés	36
Tableau 7 : Vitesses de fuite par familles d'espèces	38
Tableau 8 : Détail de la procédure de "Soft-Start" appliquée à l'atelier de battage	46
Tableau 9 : Synthèse des scénarios de la modélisation	50
Tableau 10 : Synthèse des données de modélisation de l'atelier de dragage (niveaux sonores instantanés et non-pondérés)	51
Tableau 11 : Synthèse des données de modélisation de l'atelier de clapage (niveaux sonores instantanés et non-pondérés)	52
Tableau 12 : Synthèse des données de modélisation de l'atelier de forage vertical du quai croisière (niveaux sonores instantanés et non-pondérés)	53
Tableau 13 : Synthèse des données de modélisation de l'atelier de battage de pieux du quai croisière (niveaux sonores instantanés et non-pondérés)	54
Tableau 14 : Synthèse des données de modélisation de l'atelier de vibrofonçage du quai croisière (niveaux sonores instantanés et non-pondérés)	55
Tableau 15 : Synthèse des données de modélisation de l'atelier de forage vertical des quais commerce (niveaux sonores instantanés et non-pondérés)	56
Tableau 16 : Synthèse des données de modélisation de l'atelier de battage de pieux des quais commerce (niveaux sonores instantanés et non-pondérés)	57
Tableau 17 : Synthèse des données de modélisation de l'atelier de vibrofonçage des quais commerce (niveaux sonores instantanés et non-pondérés)	58
Tableau 18 : Évaluation des distances de risques vis-à-vis de la faune marine pour l'atelier de dragage.....	59
Tableau 19 : Évaluation des distances de risques vis-à-vis de la faune marine pour l'atelier de clapage	60
Tableau 20 : Évaluation des distances de risques vis-à-vis de la faune marine pour l'atelier de forage vertical (quai croisière).....	61
Tableau 21 : Évaluation des distances de risques vis-à-vis de la faune marine pour l'atelier de battage de pieux sans soft-start (quai croisière)	62
Tableau 22 : Évaluation des distances de risques vis-à-vis de la faune marine pour l'atelier de battage de pieux avec soft-start (quai croisière).....	63
Tableau 23 : Évaluation des distances de risques vis-à-vis de la faune marine pour l'atelier de vibrofonçage (quai croisière).....	64
Tableau 24 : Évaluation des distances de risques vis-à-vis de la faune marine pour l'atelier de forage vertical (quais commerce)	65
Tableau 25 : Évaluation des distances de risques vis-à-vis de la faune marine pour l'atelier de battage de pieux sans soft-start (quais commerce)	66
Tableau 26 : Évaluation des distances de risques vis-à-vis de la faune marine pour l'atelier de battage de pieux avec soft-start (quais commerce)	67
Tableau 27 : Évaluation des distances de risques vis-à-vis de la faune marine pour l'atelier de vibrofonçage (quais commerce)	68
Tableau 28 : Synthèse des données d'entrées de chaque atelier, des empreintes sonores et des niveaux moyens à 750m des opérations	69
Tableau 29 : Synthèse des distances de risque de modification comportementale (Southall 2007)	69

Tableau 30 : Synthèse des risques de dommages physiologiques (Southall 2019, Popper 2014, McCauley 2000)70

Lexique

L'acoustique sous-marine est un domaine scientifique de la mécanique des fluides. Elle utilise son propre vocabulaire et ses propres unités. Une définition des principaux termes utilisés est présentée dans ce lexique afin de faciliter la compréhension du document par le lecteur.

Acoustique active

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

Acoustique passive

Mesure du bruit ambiant sans générer de bruit parasite qui puisse affecter l'observation du chorus sonore.

AIS

Automated Identification System est un système à bord des navires qui transmet à un réseau d'observation leur identification et leurs localisations en quasi temps-réel. Différentes stations réceptrices, mises en œuvre par les services de l'Etat ou des sociétés privées permettent ainsi de surveiller le trafic maritime en quasi-temps-réel. La couverture maximale peut atteindre 30 milles nautiques des côtes en fonction des conditions climatiques.

Benthique

Relatif aux espèces animales et végétales vivant à proximité du fond de la mer (par opposition à pélagique).

Chorus sonore

Le chorus sonore représente la diversité des sources sonores présentes dans le milieu marin. Il se compose de trois natures de bruits : les bruits naturels (ou géophonie), les bruits biologiques (ou biophonie) et les bruits d'origine humaine (anthropophonie).

Décibel

Le décibel (dB) est une mesure du niveau de pression acoustique, une quantité qui se trouve à la base de la perception du volume sonore. C'est une échelle logarithmique qui décrit un multiple d'une valeur de référence. Lorsque la puissance sonore double, la valeur en décibel augmente de 3 dB. En acoustique sous-marine, le niveau de référence du décibel est 1 μ Pa (micro Pascal).

Empreinte sonore

Une empreinte sonore représente la distribution du niveau sonore d'une source de bruit qui émerge au-dessus du bruit existant lorsque cette source est absente.

Energie acoustique reçue

L'énergie reçue est égale au carré du signal de pression acoustique reçu. Elle s'exprime en dB réf. 1 μ Pa².

Fréquence sonore

La fréquence correspond au nombre d'oscillations de la pression sonore en une seconde. Les sons graves ont une fréquence basse, les sons aigus ont une fréquence élevée. L'unité de la fréquence est l'Hertz (Hz). A titre d'illustration, l'oreille humaine ne perçoit que les fréquences comprises entre 20 Hz et 20 kHz, bien que la limite supérieure diminue généralement avec l'âge. Les espèces sous-marines ont un spectre auditif différent.

Gabarit de bruit

Niveau de pression ou d'énergie sonore émis par une source à un mètre de distance, décrit en fonction de la fréquence.

Hydrophone

Un hydrophone est un microphone destiné à être utilisé sous l'eau. Il convertit une variation de pression en variation de tension électrique permettant ainsi l'enregistrement de la pression acoustique en fonction du temps.

Mitigation

Mesure de réduction de bruit qui agit soit au niveau de la source soit au niveau de la propagation.

Octave

Une octave est l'intervalle séparant deux sons dont la fréquence fondamentale de l'un vaut le double de la fréquence de l'autre. Un tiers d'octave est une fraction d'octave. La norme américaine American National Standard Institut (ANSI S1.11 2004) définit les fréquences centrales et les caractéristiques des filtres servant à les distinguer.

Marnage

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

Modèle Numérique de Terrain (MNT)

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

Niveau d'exposition sonore

Le niveau d'exposition sonore (ou sound exposure level SEL) est l'intégrale de l'énergie acoustique reçue sur une bande de fréquence de sensibilité biologique (bande de fréquence effectivement perçue par une espèce) pendant une seconde. Il s'exprime en dB. $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$.

Niveau d'exposition sonore cumulé

Le niveau d'exposition sonore cumulé (ou cumulative sound exposure level CSEL) est l'intégrale de l'énergie acoustique reçue cumulée sur une durée T sur une bande de fréquence de sensibilité biologique (bande de fréquence effectivement perçue par une espèce) pendant une durée donnée. Il s'exprime en dB réf. $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$.

Percentile, ou centile, quantile

Un percentile correspond à la proportion du temps et de l'espace pour lequel le bruit dépasse un niveau donné. Dans le cas de cette étude, un percentile N donne donc le niveau de pression acoustique minimum que l'on mesurerait avec une probabilité de N% dans la zone géographique et la période de temps considérée.

Cette notion est très répandue, même dans la vie de tous les jours. A titre d'exemple, les carnets de santé de chaque individu présentent des courbes de répartition du poids de la population infantile en fonction de l'âge en percentiles : on peut par exemple y voir, pour chaque âge, « le poids moyen du dernier percentile », c'est-à-dire le poids moyen des 10 % des enfants les plus lourds, ou encore, le poids moyen des 5 % des enfants les plus légers. Le 50^{ième} percentile représente quant à lui le poids médian, c'est-à-dire le poids de 50% des enfants d'un même âge.

Pertes de propagation

Les pertes de propagation acoustique correspondent à l'atténuation des ondes causée par le milieu de propagation en fonction de la distance à la source. Elles s'expriment en dB.

Pression acoustique crête à crête

La pression acoustique crête à crête est la différence d'amplitude de la pression acoustique entre sa valeur maximale et sa valeur minimale sur une période.

Pression acoustique émise

La pression acoustique émise par une source de bruit est l'amplitude du signal qui serait généré à un mètre de cette source si celle-ci était ponctuelle et isotrope. Cette pression peut être exprimée en valeur instantanée, valeur moyenne, valeur efficace, ou en valeur maximale. Elle s'exprime en dB réf. $1\mu\text{Pa}$ @1m.

Pression acoustique reçue

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

Profil de célérité

La célérité décrit la vitesse à laquelle les ondes sonores se déplacent dans le milieu marin, autour d'une valeur moyenne de 1500 m/s. Elle est fonction de la profondeur, de la température et de la salinité. Sa variabilité est temporelle (en fonction des saisons, des événements météorologiques, etc.) et spatiale.

Quantile

Voir percentile.

Raie spectrale

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

Spectrogramme

Un spectrogramme est le résultat d'un traitement du signal acoustique qui permet la visualisation de ce signal en fonction du temps et de la fréquence. Cette représentation du signal offre des possibilités intéressantes quant à son analyse.

Stochastique

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

Thermocline

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

Valeur efficace

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

Chapitre I. Présentation de l'étude

L'établissement portuaire de Galisbay (Saint-Martin) a pour projet d'étendre et de réaménager ses infrastructures, afin de mieux gérer son activité et de redynamiser l'économie de l'île. Le port accueille principalement des navires de commerce, mais aussi des navires de croisière.

Les principales phases du projet sont :

- Le dragage et le balisage d'un chenal permettant l'accès de navires de plus fort tonnage ;
- La réalisation de différents quais impliquant des travaux de battage, de forage et/ou de vibrofonçage :
 - Un quai croisière de 200 m de long ;
 - Deux quais commerce de 200m et 150m de long (porte-conteneur et Roro) ;
- La création de terre-pleins supplémentaires de stockage (6ha).

Quiet-Oceans intervient en amont de ce projet, pour estimer le risque d'impact sur la faune marine lié à l'introduction de bruit dans le milieu marin. Cette étude s'appuie sur la directive-cadre Stratégie pour le milieu marin (DCSMM)¹ adoptée en 2008 au sein de l'Union Européenne, dont l'objectif principal est de « maintenir la diversité biologique et de préserver la diversité et le dynamisme des océans et des mers et d'en garantir la propreté, le bon état sanitaire et la productivité ». Elle s'inscrit dans la continuité de l'état de référence qui a été réalisé en 2022 (Clorennec et al., 2022), et donc les objectifs étaient :

- ✓ La mise en œuvre d'un suivi acoustique à l'aide d'enregistreurs acoustiques autonomes ;
- ✓ Le traitement des données mesurées dans le but de caractériser le bruit ambiant sous-marin à proximité du projet, ainsi que la fréquentation et le comportement des mammifères marins ;
- ✓ L'évaluation des conditions de propagation acoustique sous-marine dans la baie du port.

Le présent rapport traite de l'état perturbé du site, où sont estimés les effets acoustiques du projet. Les objectifs sont :

- L'identification des sources de bruit émises par le projet et les scénarios acoustiques modélisés ;
- L'évaluation des niveaux sonores mis en jeu et de l'empreinte sonore du projet ;
- L'estimation des impacts du projet sur la faune sous-marine (espèces cibles, distances de risques) ;
- D'apporter des recommandations pour suivre ou limiter les impacts du projet.

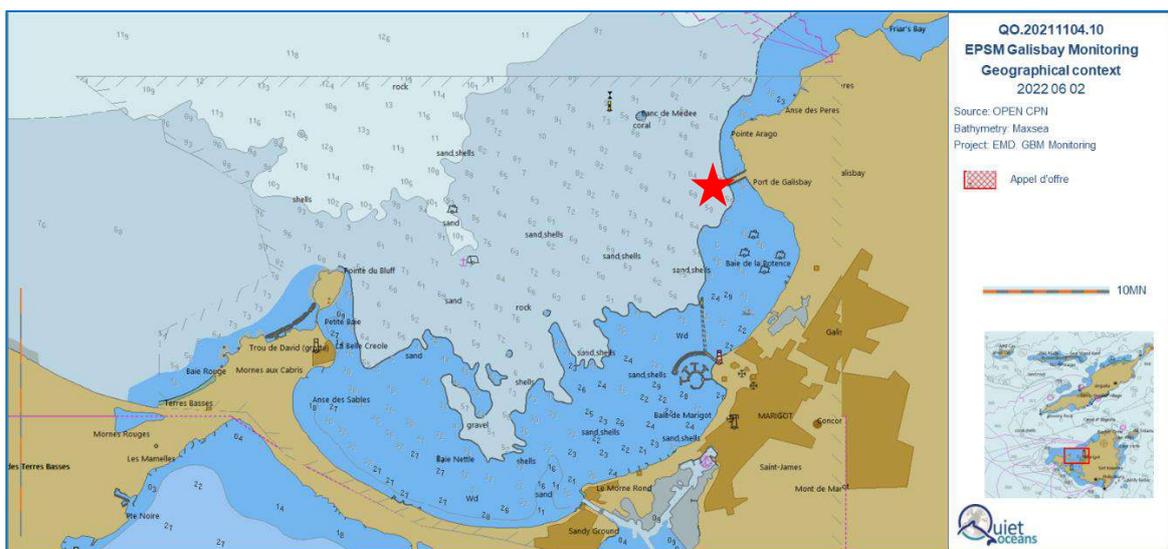


Figure 1 : Contexte géographique du projet. L'emplacement du port de Galisbay est indiqué par une étoile rouge.

¹ Directive 2008/56/CE du Parlement européen et du Conseil du 17 juin 2008 établissant un cadre d'action communautaire dans le domaine de la politique pour le milieu marin (directive-cadre Stratégie pour le milieu marin).

Chapitre II. Introduction

Ce chapitre a pour objectif de familiariser le lecteur avec le domaine technique de l'acoustique sous-marine afin de faciliter la lecture de l'étude proprement dite. Il fait référence à des termes spécifiques du domaine de l'acoustique sous-marine. Nous invitons le lecteur à se référer au lexique disponible au début du document.

II.1. La problématique du bruit sous-marin

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

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

Les niveaux de bruit sous-marin ne sont pas à comparer avec les niveaux de bruit aérien. En effet, le niveau de référence est de $1 \mu\text{Pa}$ en acoustique sous-marine, contre $20 \mu\text{Pa}$ dans l'air. De plus, avec une densité environ 1000 fois plus élevée que l'air, le milieu océanique est considéré comme un milieu de propagation incompressible contrairement à l'air. Ainsi, toute comparaison est à proscrire.

La Figure 2 donne, à titre illustratif, une échelle de niveaux sonores émis typiques, soit par les activités humaines, soit par la faune marine, soit par les conditions environnementales.

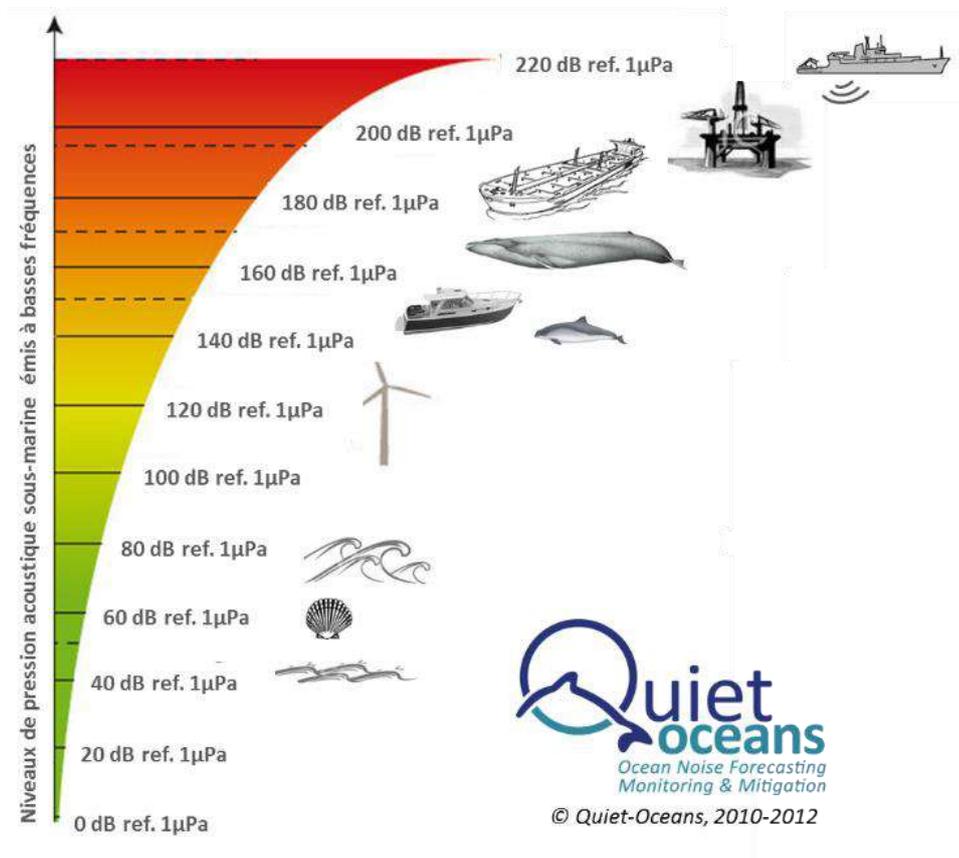


Figure 2 : Echelle qualitative des niveaux de bruits sous-marins émis à un mètre dans une bande basse fréquence de quelques kHz. (source Quiet-Oceans)

II.2. Qu'est-ce que le chorus sonore sous-marin

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

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

Tous ces bruits interagissent les uns avec les autres, se dominent les uns par rapport aux autres pour former le contexte sonore d'une aire d'étude (Figure 3). La Figure 4 synthétise les niveaux sonores typiques en dB réf. $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ en fonction de leur origine (anthropique, environnementale ou biologique) et en fonction de la gamme de fréquence (Dosits.org, 2016). L'ensemble des sources sonores contribue au bruit ambiant avec une prédominance très variable en fonction de la fréquence, des conditions environnementales, des activités humaines et du contexte local.

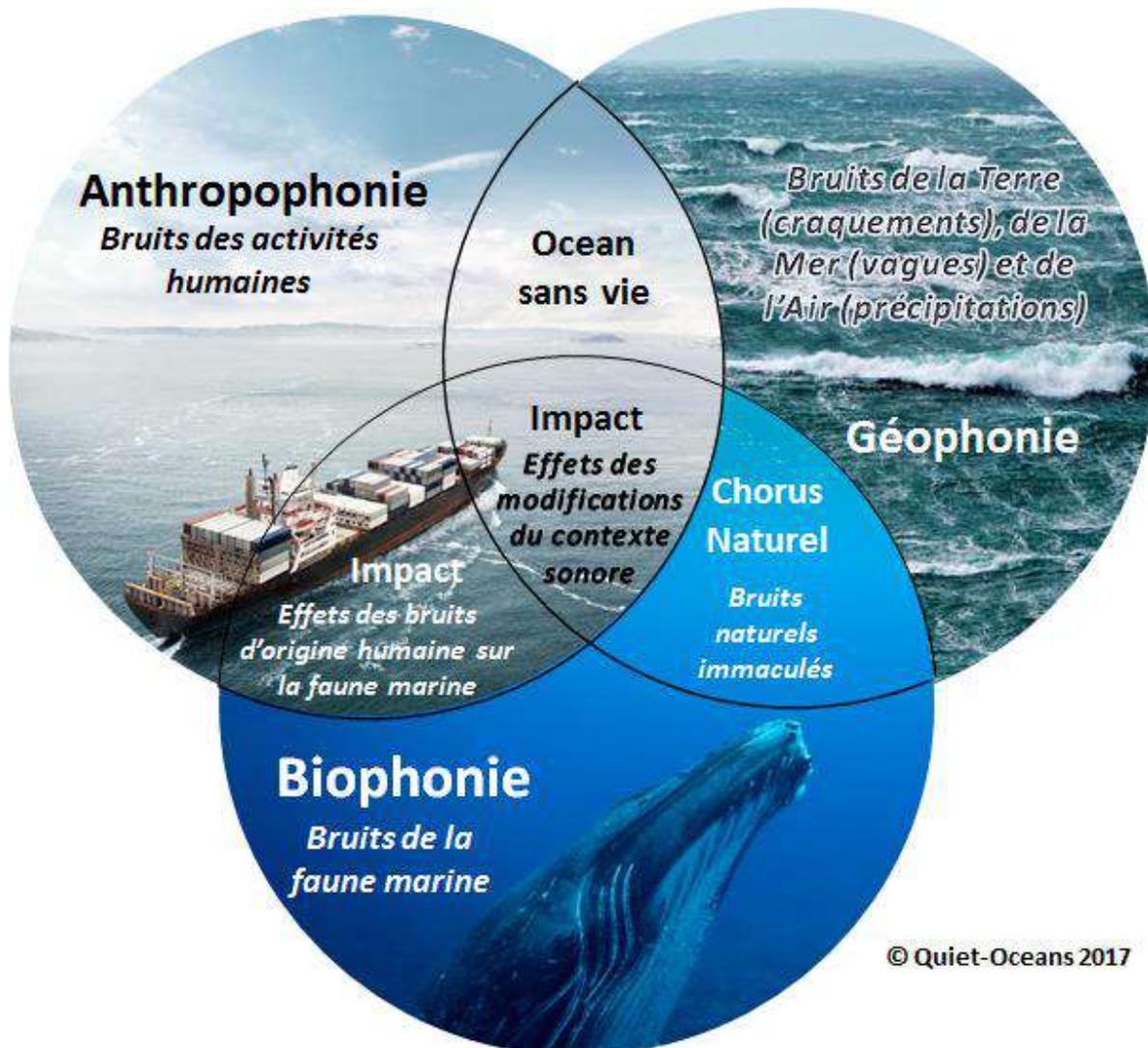


Figure 3 : Composition du chorus sonore sous-marin.

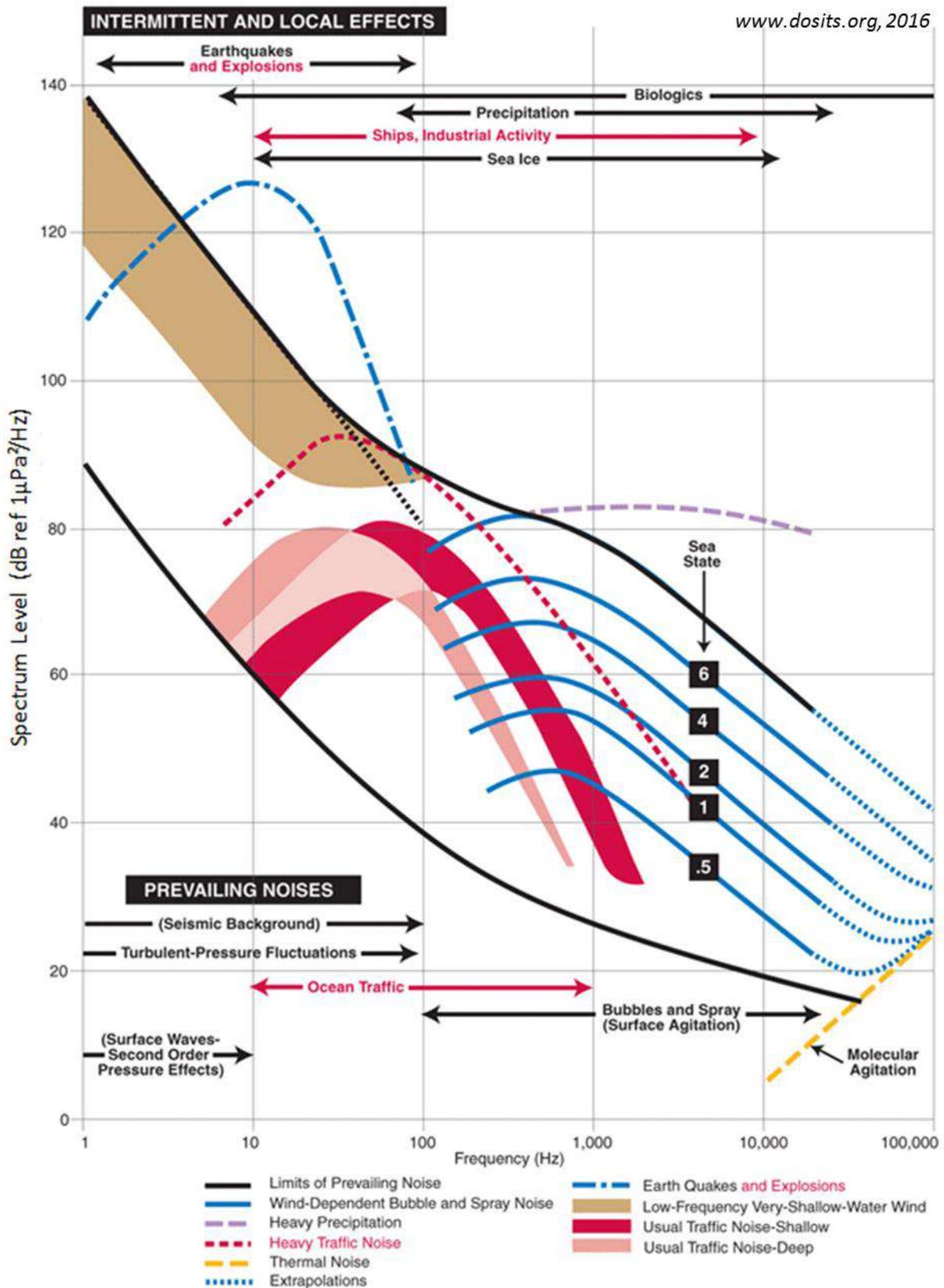


Figure 4 : Synthèse des niveaux de bruit typiques en fonction de la fréquence et de la nature de la source de bruit. Ces valeurs peuvent être très dépendantes du site, de la saison, et du contexte (Dosits.org, 2016).

II.2.1. La géophonie

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

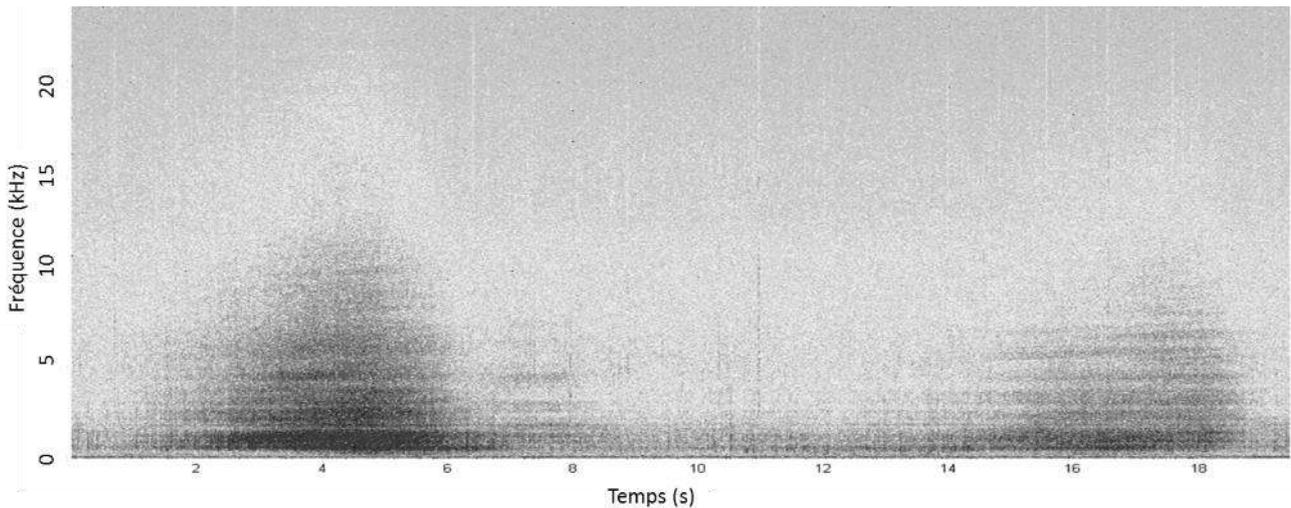


Figure 5 : Spectrogramme illustratif d'un déplacement de sédiment

II.2.2. La biophonie

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

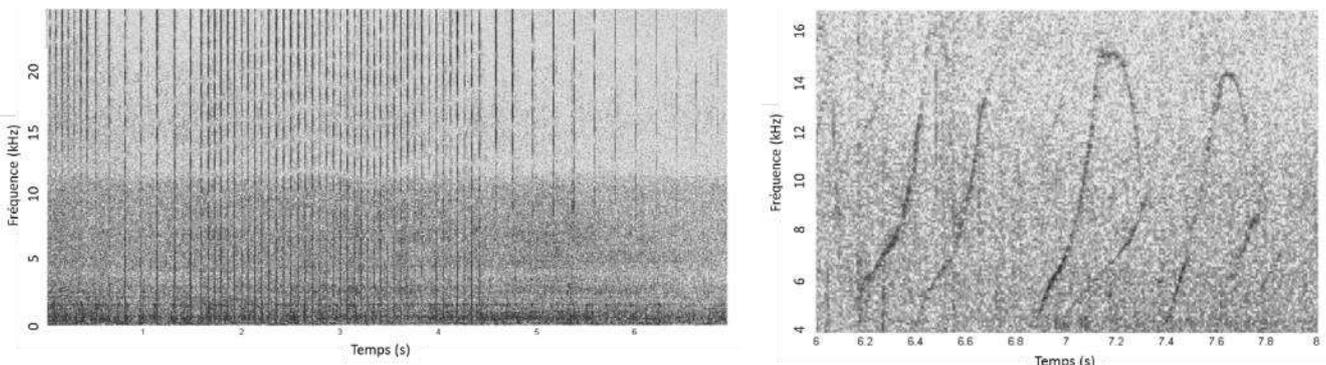


Figure 6 : Spectrogrammes de clics (gauche) et de sifflements (droite) émis par des delphinidés

II.2.3. L'anthropophonie

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

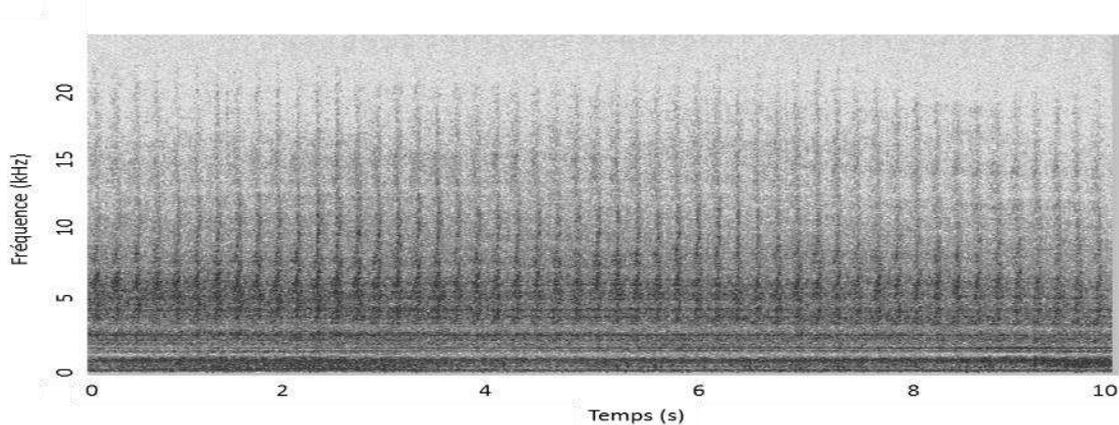


Figure 7 : Spectrogramme de la signature acoustique de l'hélice d'un navire.

II.3. De quoi dépend la distribution des bruits dans le milieu marin ?

L'objet de ce paragraphe est de décrire les paramètres qui influencent la distribution du bruit. La propagation du bruit et les niveaux de bruit ambiant sont principalement conditionnés par (Tableau 1) :

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

D'autres paramètres influent sur la propagation et sur le niveau de bruit, mais dans une moindre mesure. Ils ne seront donc pas décrits ici.

Tableau 1 : Effet des conditions physiques du milieu océanique sur la propagation acoustique et sur la génération de bruits propres contribuant à la résultante du bruit ambiant.

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

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

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

Les pertes de propagation sont d'autant plus importantes que les fonds sont meubles et de grains fins (la vase absorbe plus les ondes acoustiques que le gravier par exemple). Au contraire, plus le sédiment est dense, plus son caractère réverbérant est important lorsque les ondes sonores ont un angle d'incidence prononcé.

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

Sous l'effet du courant et/ou des vagues par petits fonds (une dizaine de mètres), le charriage des sédiments et l'entrechoquement des particules sédimentaires génèrent du bruit, avec des niveaux d'autant plus importants que les sédiments sont grossiers et que leurs déplacements sont rapides (Petrut, 2017) (Figure 5).

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

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

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

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

II.4. Contexte scientifique et aspect réglementaire

Depuis les années 1970, la communauté scientifique fait part de ses inquiétudes quant aux effets préjudiciables potentiels du bruit anthropique sur la vie marine, et la recherche dans ce domaine s'est développée dans les années 1980 (John Richardson et al., 1985; Payne & Webb, 1971), sans cesser de progresser jusqu'à nos jours. Ainsi, au cours des dix dernières années, un certain nombre d'institutions scientifiques, d'agences gouvernementales et d'organes intergouvernementaux ont clairement démontré que les mammifères marins, mais aussi que de nombreux poissons et invertébrés, sont sensibles à la pression acoustique et répondent au mouvement des particules qu'elle génère, pouvant causer différents degrés de perturbation de la vie sous-marine (Andersson et al., 2011; O. Sand & Karlsen, 2000; Olav Sand et al., 2008). À l'échelle de l'individu notamment, ses capacités à communiquer avec ses congénères, à chasser ses proies ou à échapper à ses prédateurs peuvent s'en trouver perturbées ; cela se propage à l'échelle de la population, dont le taux de survie et de mortalité évolue avec la modification des zones d'habitat, de chasse et de reproduction (Persohn et al., 2020).

Cette inquiétude gagne la société civile (IFAW, 2008), l'industrie (IMO, 2012), et les instances politiques (European Parliament, 2004; Marine Mammal Commission, 2007), en s'étendant à toutes les espèces animales sous-marines. Des discussions se sont ouvertes entre les différentes instances (politique, scientifiques et parties prenantes) sur la manière de traiter les impacts du bruit anthropique et ainsi développer des mesures de gestion significatives, permettant la mise en place progressive d'une réglementation nationale et internationale à ce sujet.

En Europe, elle se présente sous la forme de deux directives, la Directive Cadre sur l'Eau (Commission Européenne, 2000) et la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (Parlement européen et Conseil de l'Union Européenne, 2008). En France, la loi Grenelle II (Loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 du code l'environnement) traite des incidences sur la biodiversité et plus spécifiquement les sources sonores sous-marines d'origine anthropique, considérées comme pollution. Certains pays tels que l'Allemagne, la Belgique, la Hollande et le Royaume-Uni ont adopté des réglementations concernant les ateliers de battage de pieu et les ateliers EMR (Energies Marines Renouvelables), qui se traduisent par la mise en place de mesures de réduction dans le cas où un projet dépasse les seuils établis. Actuellement, la France ne fait pas partie de cette liste. Néanmoins, le Code de l'environnement français stipule que tout nouveau projet en mer doit faire l'objet d'une étude d'impact sonore, portant sur toutes ses phases (de la construction jusqu'au démantèlement), afin de rendre compatible le développement des activités humaines avec la préservation des écosystèmes marins et de leurs fonctionnalités (Persohn et al., 2020).

II.5. Approche retenue pour l'évaluation acoustique du projet

Quiet-Oceans intervient dans le cadre de la DCSMM pour prédire les impacts sonores du projet, en proposant une étude articulée en deux parties : dans un premier temps, il s'agit de caractériser l'état initial acoustique du site retenu pour le projet. Cette étape consiste à établir le contexte sonore existant de la zone du projet avant son lancement (cette caractérisation se base sur les résultats de l'état de référence du site effectué en 2022). La seconde étape consiste à étudier l'état « perturbé » du site, par l'introduction du bruit émis par le projet. Il s'agit de prédire l'empreinte acoustique des travaux, par estimation des niveaux sonores générés et comparaison au niveau de bruit existant, puis à déterminer les distances de risque vis-à-vis des espèces animales qui seront potentiellement perturbées (et éventuellement à évaluer les bénéfices des solutions de réductions).

La méthodologie proposée repose sur trois étapes (Figure 8) :

- ✓ La modélisation acoustique des scénarios bruyants du projet, constituant l'état sonore perturbé du projet, et l'établissement des champs sonores dans chaque gamme de sensibilité des espèces potentiellement présentes à proximité du site. Les niveaux de bruit ambiant mesurés sur le site du projet lors de l'état de référence en 2022 permettent d'établir l'émergence sonore des bruits du projet ;
- ✓ La comparaison des niveaux de bruit aux seuils de dommages physiologiques permanents (PTS), temporaires (TTS) et de modification du comportement des animaux ;
- ✓ L'établissement des conclusions et des recommandations.

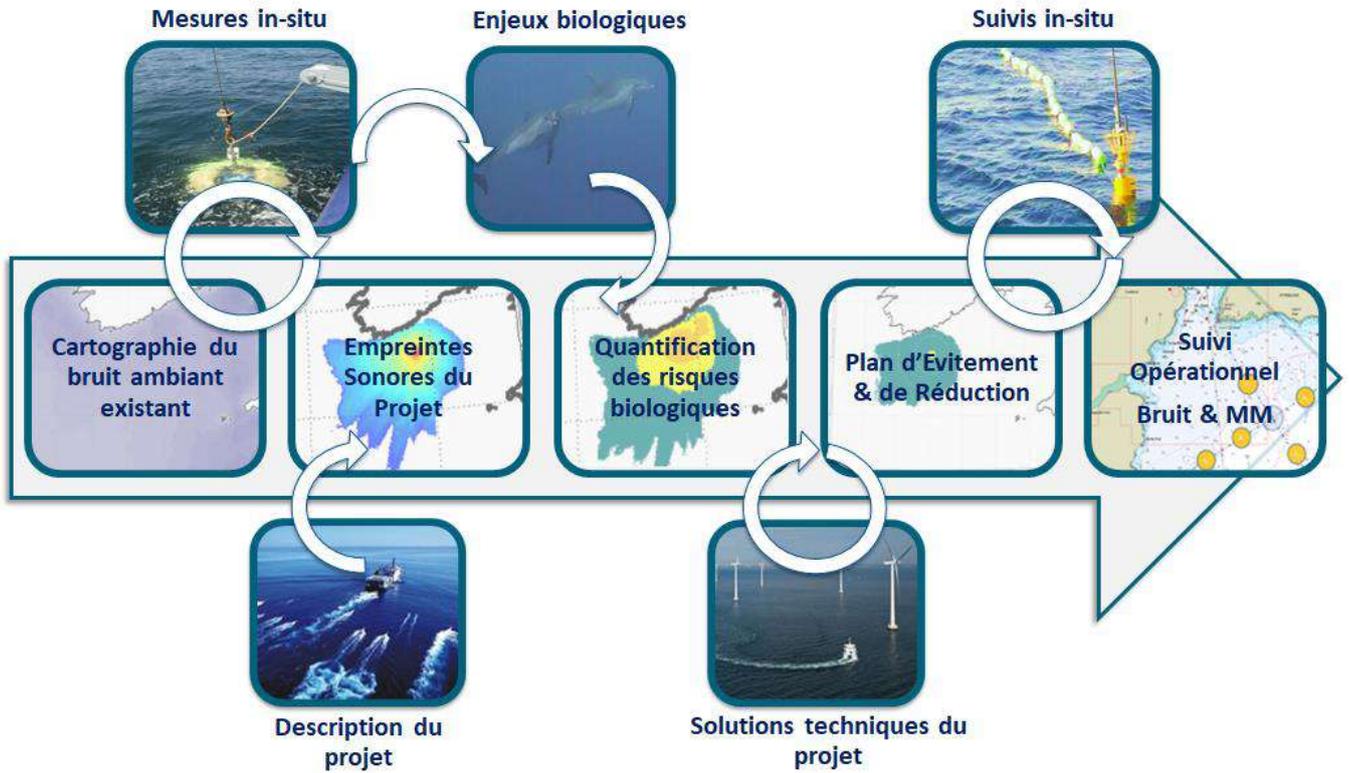


Figure 8 : Méthodologie proposée pour la réalisation de l'étude d'impact

Chapitre III. Méthodologie de modélisation de la propagation du son

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

III.1. Modèle pour la caractérisation du bruit ambiant et des empreintes sonores

L'estimation des champs sonores se fait par simulation numérique impliquant l'usage de modèles prenant en compte l'ensemble des paramètres précédemment évoqués (bathymétrie, profil de célérité, données météoro-océaniques, sources de bruit, sédimentologie, données de mesure in situ...). La Figure 9 décrit de manière schématique les données d'entrée servant à la production de la cartographie de l'état sonore initial statistique.

Quiet-Oceans propose une modélisation par équations paraboliques (Jensen, Kuperman, Porter, & Schmidt, 2000) (Collins M. D., 1994) (Collins, Cederberg, King, & Chin-Bing, 1996) qui traduit fidèlement la propagation du bruit dans la colonne d'eau en résolvant l'équation de Helmholtz :

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

où p est la pression acoustique, c est la célérité du son dans l'eau ou dans le sédiment, t est le temps, t_0 est l'instant d'émission du signal, et r la position tridimensionnelle du point d'observation et r_0 la position tridimensionnelle de la source par hypothèse ponctuelle.

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

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

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

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

Dans le cadre du projet européen AQUO (Achieve QUIeter Oceans) et JOMPANS, Quiet-Oceans a organisé et participé à une initiative internationale d'inter-comparaison de huit modèles acoustiques utilisés en acoustique sous-marine, dont ceux mis en œuvre dans Quonops[®]. Ce travail a consisté à définir plusieurs scénarios test de propagation théoriques et réalistes et à évaluer/comparer les résultats des différents modèles de propagation acoustique des différents instituts de recherche. Les résultats, rendus publics dans une publication scientifique commune (Colin et al., 2015), ont démontré que les modèles mis en œuvre par Quonops[®] font partie du meilleur de l'état de l'art international. La plateforme Quonops[®] est utilisée par les agences gouvernementales pour cartographier les bassins océaniques de la mer Baltique (projet européen BIAS), la mer du Nord (projet JOMOPANS), l'Atlantique Nord-Est (projet européen JONAS) et la mer Adriatique (projets européens SOUNDSCAPE et SATURN).

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

La plateforme de modélisation Quonops[®] prend en compte l'essentiel des données qui conditionnent la propagation des bruits dans le milieu marin (Figure 9) :

- les données environnementales, à savoir la bathymétrie, la nature des fonds, la température et la salinité de l'eau, le marnage et l'état de mer (vent et vagues) ;
- les données anthropiques descriptives des activités humaines en mer qui introduisent de l'énergie sonore dans le milieu marin.

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

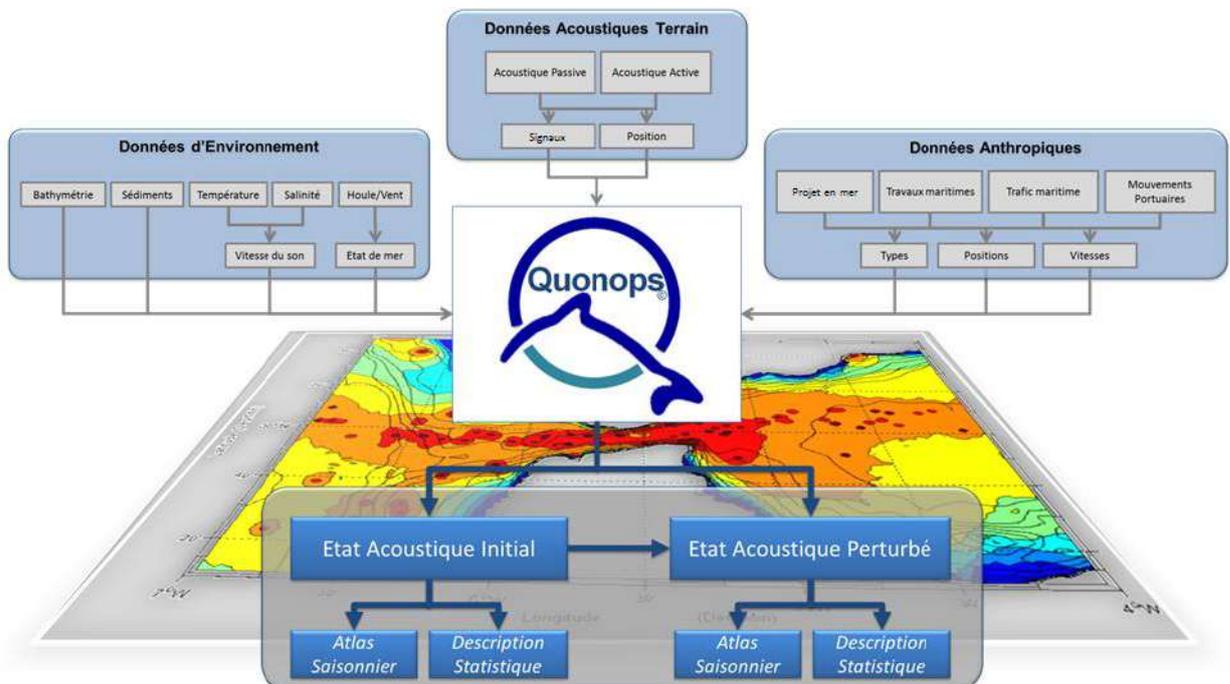


Figure 9 : Description schématique de la plateforme opérationnelle de prévision des bruits. Source: Quiet-Oceans

III.1.4. Estimation par tiers octaves

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

Par conséquent, le niveau est donné par :

$$SPL_{1/3} = SPL_{f_m} + 10 \cdot \log_{10} (f_2 - f_1)$$

où $SPL_{1/3}$ est le niveau de pression acoustique dans le tiers d'octave compris entre f_1 et f_2 tel que défini par les standards (American National Standards Institute, 2004) et (IEC61260, 1995), et SPL_{f_m} est le niveau de pression acoustique modélisé à la fréquence centrale f_m .

III.1.5. Cartographie statistique

Afin de prendre en compte la nature stochastique du bruit ambiant, les cartes sonores produites par Quonops® sont réalisées selon toutes les combinaisons d'un ensemble de situations environnementales représentatives du site d'étude et de situations anthropiques représentatives des activités maritimes existantes au voisinage du site et générant du bruit. Une approche par la méthode de Monte Carlo² (Folegot, Thomas, 2013), (Guelton et al., 2014), (Sutton et al., 2013) permet ensuite de cartographier les statistiques des champs sonores, et de décrire l'état sonore de l'aire d'étude en termes de probabilité de niveau acoustique et de distribution spatiale.

III.1.6. Métriques utilisées

La métrique utilisée pour la modélisation et la restitution des résultats est le niveau d'exposition sonore (*Sound Exposure Level*, SEL) pendant une durée cumulée de 24 heures. L'utilisation de cette métrique indique que les prévisions correspondent au niveau d'énergie sonore accumulée sur une période de 24 heures. Cette unité est particulièrement adaptée dans le cadre de cette étude pour les raisons suivantes :

- Les seuils de sensibilité sont exprimés en niveau d'exposition sonore (SEL) ;
- La métrique SEL est adaptée à la description du caractère impulsif du bruit ;
- La métrique SPL est adaptée à la description du caractère continu du bruit ;
- Le niveau SEL est égal au niveau SPL (niveau RMS, *Root Moy Square*) pour les bruits continus ou quasi-stationnaires tels que les bruits des navires lorsque le bruit est stationnaire. Cette hypothèse est généralement valide pour les navires, d'autant plus lorsque l'intervalle de temps d'analyse est d'une seconde.

III.1.7. Définition et méthode d'estimation des empreintes sonores

L'empreinte sonore est définie pour chaque étape du projet et pour chaque atelier mis en œuvre. L'empreinte sonore correspond à la zone géographique pour laquelle le bruit généré par une opération spécifique du projet est au-dessus du niveau de bruit actuel. Elle représente l'émergence du bruit au-dessus du bruit initial, et constitue donc naturellement une comparaison avec les niveaux existants. Un point géographique de la zone est considéré comme faisant partie de l'empreinte sonore si, en ce point, le bruit maximum du projet (ou percentile 0%) est supérieur à la médiane saisonnière du bruit ambiant (au percentile 50%).

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

- d'une part des cartes statistiques de bruit engendrées par le projet pendant une seconde ;
- et d'autre part, des niveaux de bruit ambiants mesurés sur le site lors de l'état de référence du projet en 2022.

² La méthode de Monte Carlo est une méthode numérique, qui utilise des tirages aléatoires pour réaliser le calcul d'une quantité déterministe. Largement utilisée dans les domaines de la finance, des sciences de la Terre et des sciences de la Vie.

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

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

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

III.2. Acquisition et traitement de données acoustiques in situ

L’étude s’appuie sur des mesures acoustiques réalisées en 2022 lors de l’état de référence du site (Clorennec et al., 2022). Des enregistreurs autonomes ont ainsi été déployés à proximité du port de Galisbay, dans le cadre du suivi acoustique dont les objectifs étaient :

- ✓ De caractériser le bruit ambiant sous-marin à proximité du projet, ainsi que la fréquentation et le comportement des mammifères marins ;
- ✓ L’évaluation des conditions de propagation acoustique sous-marine dans la baie du port à l’aide d’une campagne de mesures d’acoustique active.

III.2.1. Mesures permettant de qualifier l’état initial

Un enregistreur acoustique passif a été déployé à proximité du port aux deux saisons printemps et été 2022, pour une durée d’un mois par saison. Le traitement des données récoltées a permis de qualifier l’état initial du site du projet, et notamment les niveaux de bruit ambiant sur le site en l’absence de travaux. Ces valeurs servent de référence dans cette étude pour évaluer l’émergence des bruits du projet par rapport aux niveaux de bruit existants.

III.2.2. Mesures permettant de qualifier l’environnement

À proximité immédiate de l’emplacement des travaux, le déploiement ponctuel d’un enregistreur acoustique dans le cadre d’une mesure par acoustique active en avril 2022 a permis d’évaluer les conditions de propagation acoustique sous-marine, en qualifiant les propriétés géo-acoustiques du fond marin (valeurs de densité, célérité et atténuation de la couche sédimentaire) qui influent fortement sur la propagation des ondes sonores sous-marines (§II.3.).

III.2.3. Mesures permettant de qualifier le bruit des activités

Le bruit de chaque type d’activité se base sur la littérature disponible et sur les mesures in-situ effectuées par Quiet-Oceans sur d’autres projets de construction.

III.3. Limites méthodologiques et approximations de la modélisation sonore

Les sources acoustiques sont représentées par des sources ponctuelles ou par des ensembles de sources ponctuelles en fonction du type d’activité considéré. Ceci est une simplification vis-à-vis des sources sonores qui sont, dans la plupart des cas, étendues. Cela peut introduire une surestimation des niveaux de bruits très localement à la position représentative de la source de bruit.

Chapitre IV. Données d'entrée

Ce chapitre détaille les données nécessaires à la modélisation acoustique et à l'évaluation des effets du projet.

IV.1. Données pour la modélisation

La propagation du son et les niveaux de bruit ambiants sont principalement conditionnés par (Figure 9):

- ✓ La bathymétrie ;
- ✓ La nature du fond ;
- ✓ Les conditions océanographiques, telles que la température et la salinité, les courants, la marée ;
- ✓ Les conditions météorologiques, telles que le vent (et par conséquent les vagues).

Dans le cadre de ce projet, le Tableau 2 référence les fournisseurs et les résolutions pour chaque donnée environnementale servant à la modélisation acoustique et à l'élaboration des cartes de bruit.

Tableau 2 : Synthèse des données environnementales utilisées pour la modélisation acoustique.

Couche	Source	Résolution spatiale		Résolution Temporelle
Bathymétrie	Gebco & client	lon 100 (m)	lat 100 (m)	-
Profil de célérité	CMEMS	lon 8817 (m)	lat 9223 (m)	24 h
Nature du fond	Mesures actives	-	-	-
Hauteur de vague	CMEMS	lon 8817 (m)	lat 9223 (m)	3 h
Vitesse du vent	CMEMS	lon 13 (km)	lat 14 (km)	3 h
Marée	COI (SHOM)	Le port le plus proche		5 min

IV.1.1. Bathymétrie

Au large de Saint Martin, la donnée bathymétrique LAT (Low Astronomical Tide) couvrant la zone d'étude (Figure 10, gauche) est issue de la donnée mondiale GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans) avec une résolution de 220 m. La hauteur d'eau y est comprise entre 0 et 3500 m. À proximité du port de Galisbay, la donnée GEBCO a été fusionnée avec des données issues de levés bathymétriques in situ et fournies par le client. L'ensemble de ces données a permis de construire par interpolation une bathymétrie à une résolution de 100m sur le site du projet (Figure 10, droite).

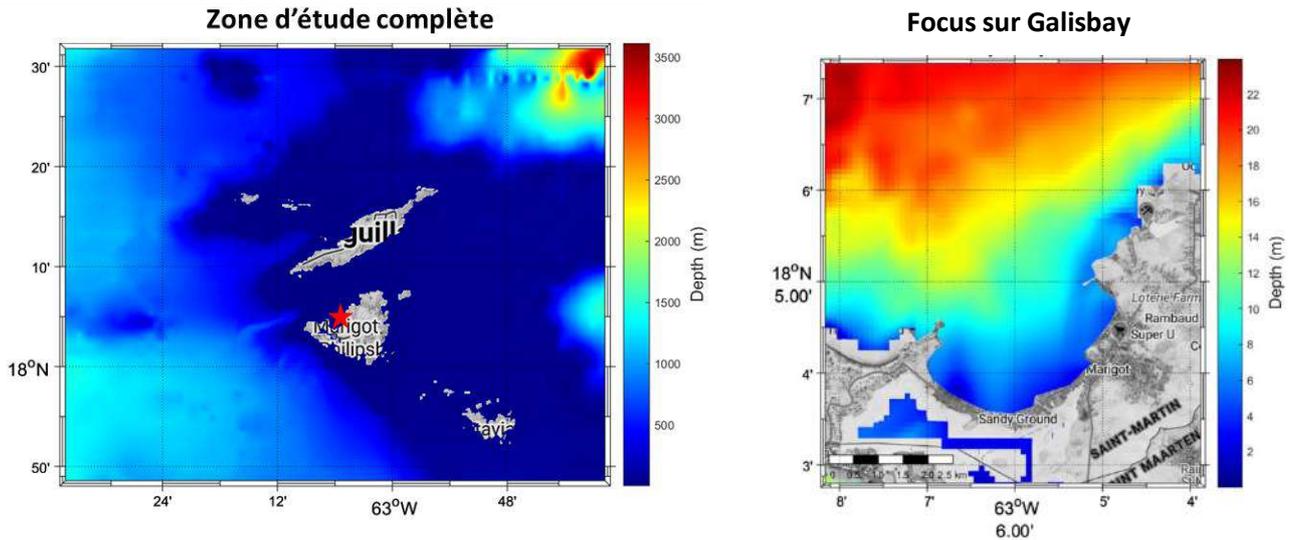


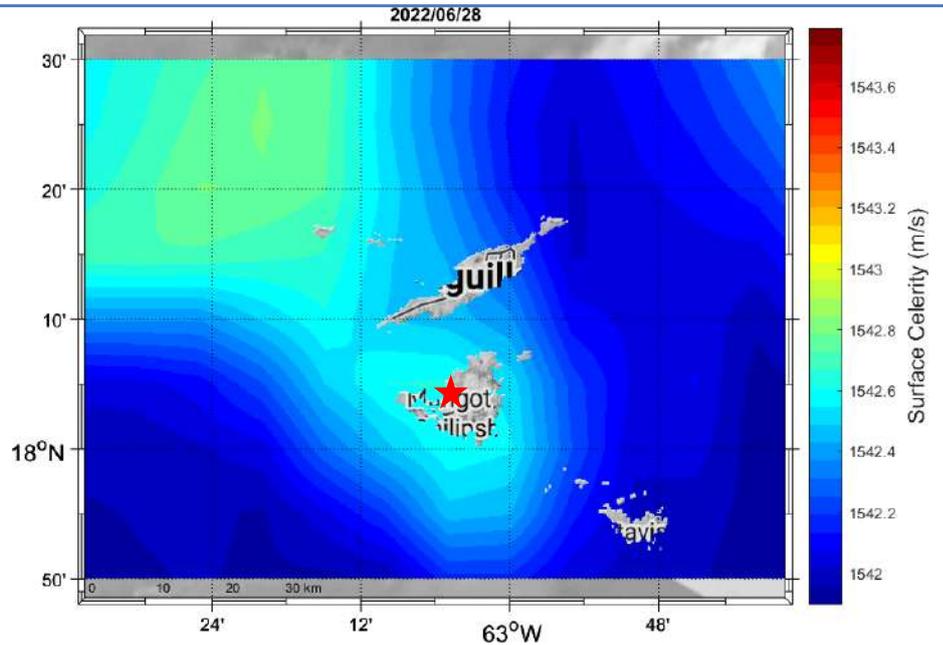
Figure 10 : Bathymétrie utilisée pour la modélisation acoustique autour de la zone d'étude. L'emplacement du port de Galisbay est symbolisé par une étoile rouge.

IV.1.2. Océanographie

La propagation du son dans les océans dépend en grande partie des conditions océanographiques locales, notamment de la température, de la profondeur et, dans une moindre mesure, de la salinité. La combinaison de ces trois paramètres physiques permet de déterminer la vitesse du son dans l'océan. En particulier les gradients du profil de vitesse verticale (évolution de la vitesse du son dans la colonne d'eau (Figure 11, bas) tendent à orienter les rayons acoustiques vers la surface en hiver ou vers le fond en été. De plus, les ondes sonores dans l'eau se propagent très rapidement (typiquement 1500 m/s) et sur des distances allant de quelques kilomètres à quelques centaines de kilomètres, d'autant plus que les fréquences sont basses et que la hauteur d'eau est importante. La répartition du niveau de bruit dans la colonne d'eau dépend principalement de la position de la source sonore modélisée, des conditions bathymétriques, des conditions de température et de salinité, de la nature du fond et de l'état de la mer.

En Figure 11 (bas), la donnée annuelle de célérité dans la zone d'étude met en évidence une variation de la célérité du son dans l'eau en fonction de la saison, qui s'explique par l'évolution de la température en surface, de la salinité et de la pression de l'eau entre l'été et l'hiver. Les tests préliminaires ont mis en évidence une propagation du son plus étendue lors de la saison estivale (mois de juillet). À titre conservateur, cette saison est donc retenue pour la modélisation du bruit du projet dans le but d'en étudier l'impact maximum.

Cartographie de la vitesse de son en surface le 28/06/2022



Évolution annuelle du profil de célérité dans la zone d'étude (anse de Galisbay)

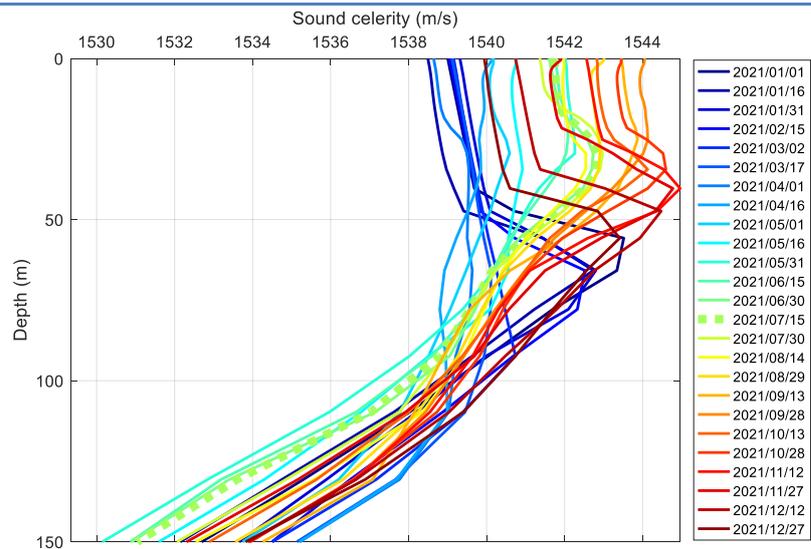


Figure 11 : Cartographie de la vitesse de son en surface le 28/06/2022 et profil de célérité sur l'année 2021

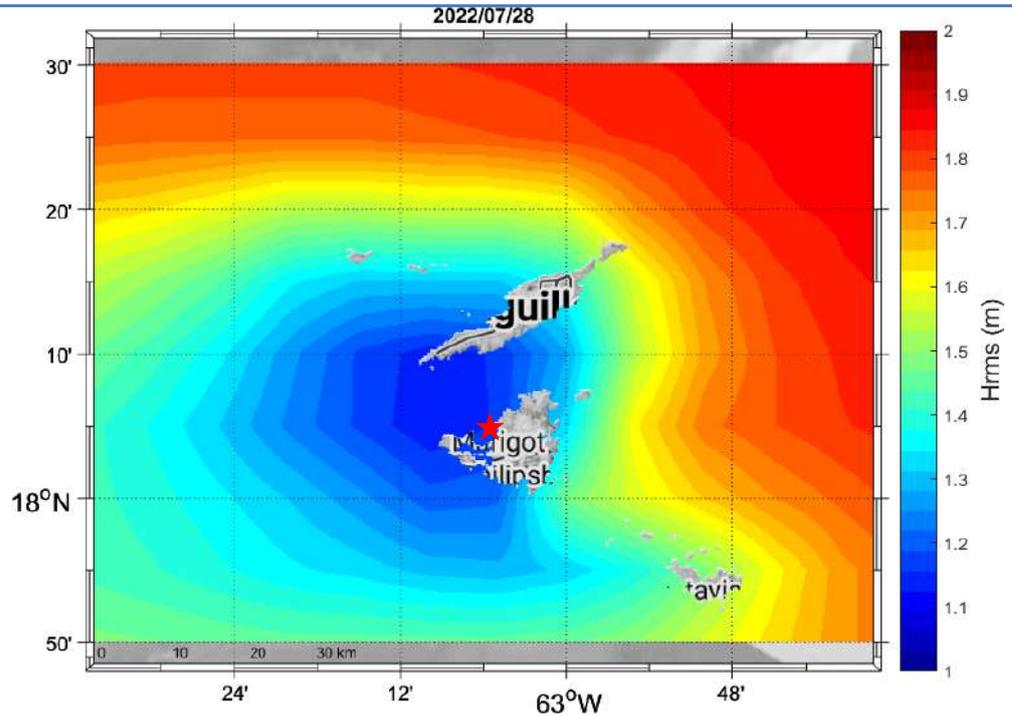
IV.1.3. Nature des fonds

Les données géo-acoustiques (densité, célérité de compression et atténuation de la couche sédimentaire) utilisées dans la modélisation sont issues du traitement des données d'acoustique actives obtenues lors de la campagne spécifique effectuée en avril 2022 (Clorennec et al., 2022). À proximité du site du projet, le sédiment est majoritairement du sable vaseux (célérité 1675 m/s ; densité 1.8 T/m³ ; atténuation 0.7 dB/λ).

IV.1.4. Vague, vent et houle

Les hauteurs de vagues significatives autour de la zone du projet ont été extraites du modèle de prévision des vagues Wave Watch III (via la plateforme CMEMS). La Figure 12 illustre d'une part cette donnée à l'échelle étendue de la zone à la date du 28/07/2022, et d'autre part à l'échelle temporelle du mois de juin 2022 en un point au large de la zone d'étude. Cette donnée conditionne les pertes de propagation en surface.

Cartographie de la houle



Evolution temporelle de la houle au large de la zone d'étude

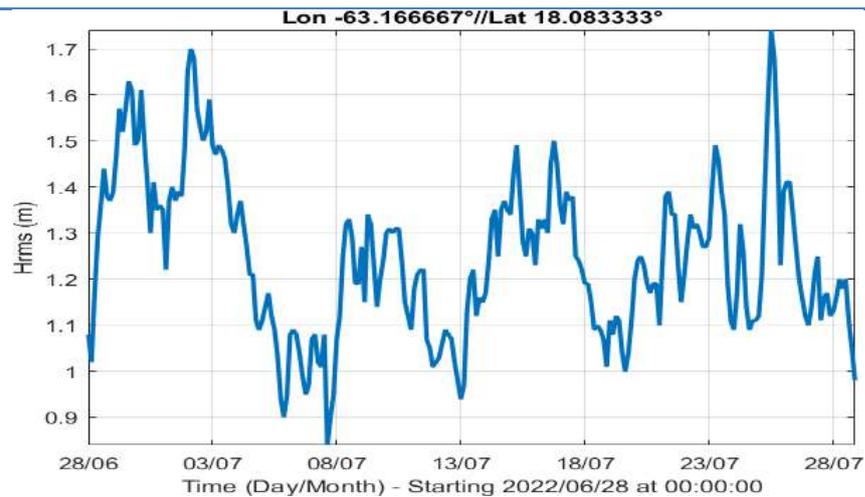


Figure 12 : Illustration de la donnée de houle (spatiale et temporelle)

La donnée de vent autour de la zone du projet est issue du modèle de prévision CMEMS. La Figure 13 illustre un exemple de cartographie du vent le 28/06/2021. Cette donnée conditionne fortement le niveau de bruit environnemental.

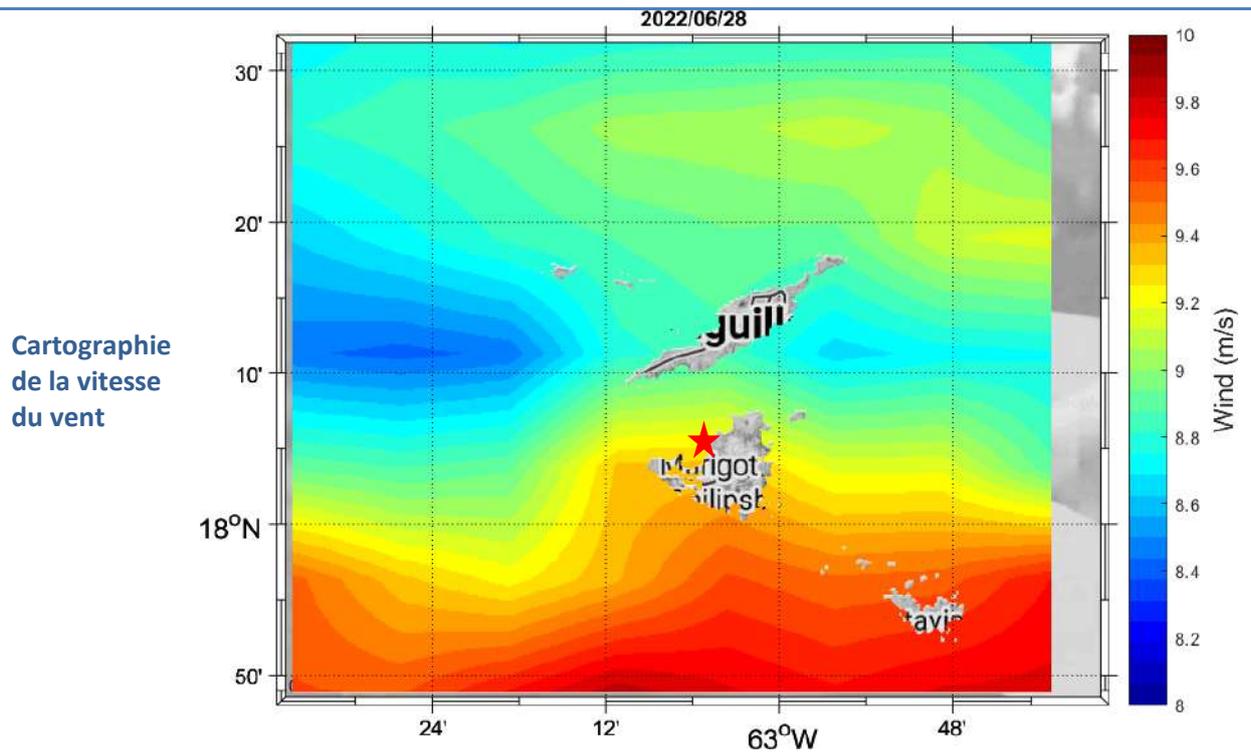


Figure 13 : Illustration de la donnée de vent

IV.1.5. Marée

Les données concernant les marées sont fournies par le service de la COI (Commission Océanographique Intergouvernementale de l'UNESCO) (Figure 14). La marée modifie le niveau d'eau disponible pour la propagation du bruit. Plus le marnage est important, plus la propagation des ondes de basse fréquence est favorisée. À proximité de l'emplacement du projet, le marnage est cependant très faible et ne dépasse pas ± 30 cm sur la période du mois de juillet 2022 et son influence reste mineure. Aucun marnage n'a donc été considéré lors de la modélisation.

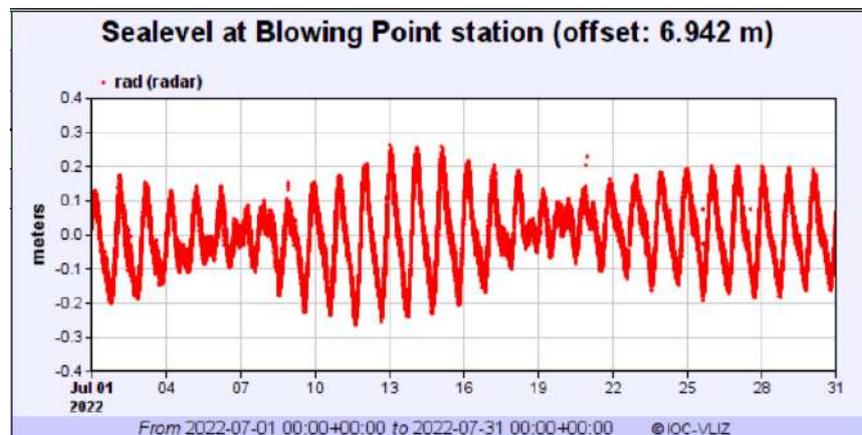


Figure 14 : Distribution du marnage relatif au port de Anguilla au mois de Juillet 2022

IV.1.6. Sources de bruit existantes

Les effets acoustiques du projet sont évalués à partir de l'émergence du bruit qu'il génère par rapport au bruit ambiant médian existant sur la zone. Lorsque la donnée AIS (*Automatic Identification System*) le permet, le bruit

- **VU** = Vulnérable (l'espèce présente un risque élevé d'extinction dans la nature sauvage) ;
- **EN** = En Danger (l'espèce affronte un risque très élevé d'extinction dans la nature) ;
- **CR** = En Danger Critique (risque extrêmement élevé d'extinction dans la nature).

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

IV.2.2. Espèces marines d'intérêt recensées dans la zone du projet

IV.2.2.a. Mammifères marins

i. Rappel sur la classification scientifique des espèces

La classification scientifique des espèces océaniques et marines de mammifères est répartie selon trois ordres : les Cétacés, les Pinnipèdes et les Siréniens (Figure 16).

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

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

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

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

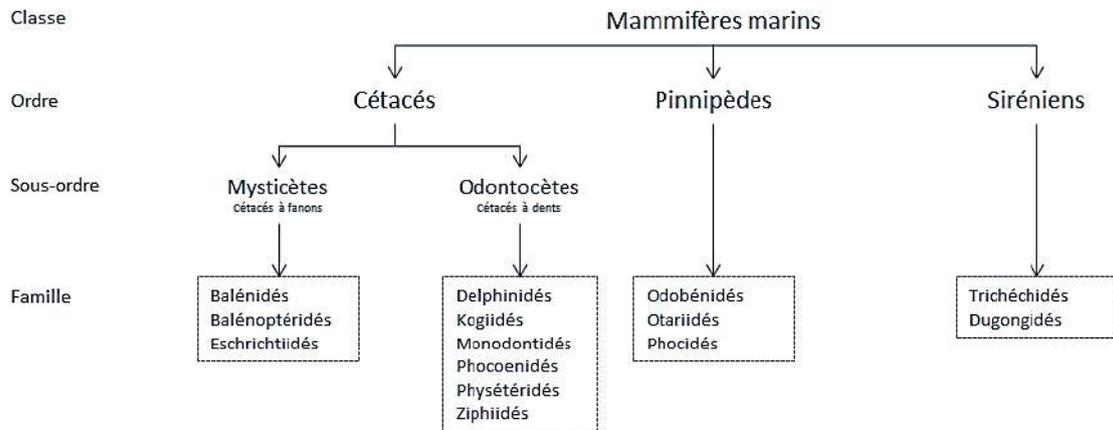


Figure 16 : Schéma de la classification scientifique des espèces océaniques et marines. Source : Quiet-Oceans.

Le traitement des données acoustiques récoltées lors de l'état de référence a permis d'identifier la présence de Delphinidés et de Balénoptéridés, ainsi que d'évaluer la fréquentation du site par ces familles d'espèces :

- Delphinidés (présence régulière au printemps et occasionnelle en été)
 - Dauphin tacheté de l'Atlantique (*Stenella frontalis*), Figure 18
 - Dauphin tacheté pantropical (*Stenella attenuata*), Figure 17
- Balénoptéridés (présence occasionnelle au printemps et absence acoustique en été)
 - Baleine à bosse (*Megaptera novaeangliae*) : période de reproduction entre l'hiver et le printemps, migration vers le nord en été
- La présence de Physétéridés (Cachalot, *Physeter macrocephalus*) est mentionnée dans la littérature mais n'a pas été identifiée dans les données acoustiques.

Les espèces de mammifères marins considérées dans l'étude sont listées dans le Tableau 3. Ce tableau spécifie les statuts de fréquentation, d'usage du site et UICN.

Tableau 3 : Mammifères marins considérés dans l'étude d'impact

Famille	Espèce		Statut de fréquentation du site	Statut de présence de l'espèce	Statut UICN Mondial	Statut UICN Antilles	Catégorie acoustique
	Nom Usuel	Nom Latin					
Delphinidés	Dauphin tacheté de l'Atlantique	<i>Stenella frontalis</i>	Régulier	Reproductrice	LC	DD	HF
	Dauphin tacheté pantropical	<i>Stenella attenuata</i>	Régulier	Reproductrice	LC	NT	HF
	Globicéphale tropical	<i>Globicephala macrorhynchus</i>	Régulier	Reproductrice	LC	DD	HF
Physétéridés	Cachalot macrocéphale	<i>Physeter macrocephalus</i>	Régulier	Reproductrice	VU	EN	HF
Balénoptéridés	Baleine à bosse	<i>Megaptera novaeangliae</i>	Occasionnel	Reproductrice	LC	VU	LF



Figure 17 : Dauphin tacheté pantropical (*Stenella attenuata*).
Source : TheLostCetacean.



Figure 18 : Dauphin tacheté de l'Atlantique (*Stenella frontalis*).
Source : TheLostCetacean.

IV.2.2.b. Tortues marines

Parmi les 7 espèces de tortues marines au monde, 5 d'entre elles sont potentiellement présentes à proximité de la zone d'étude. Le statut UICN aux Antilles des tortues imbriquées et tortues vertes (Figure 19 & 27) est jugé en danger critique d'extinction (CR), ce qui renforce l'importance de considérer ces espèces animales dans l'étude d'impact.

Tableau 4 : Tortues marines considérées dans l'étude d'impact

Famille	Espèce		Statut de fréquentation du site	Statut de présence de l'espèce	Statut UICN Mondial	Statut UICN Antilles	Catégorie acoustique
	Nom Usuel	Nom Latin					
Tortues marines	Tortue imbriquée	<i>Eretmochelys imbricata</i>	Régulier	Reproductrice	VU	CR	T
	Tortue verte	<i>Chelonia mydas</i>	Régulier	Reproductrice	EN	CR	
	Tortue luth	<i>Dermochelys coriacea</i>	Régulier	Reproductrice	VU	VU	
	Tortue caouanne	<i>Caretta caretta</i>	Occasionnel	Marginale	VU	NA	
	Tortue olivâtre	<i>Lepidochelys olivacea</i>	Occasionnel	Marginale	VU	NA	



Figure 19 : Tortue imbriquée (*Eretmochelys imbricata*). Source : INPN.



Figure 20 : Tortue verte (*Chelonia mydas*). Source : AMP.

IV.2.3. Catégories acoustiques des espèces

L'estimation des risques est contextualisée en fonction de la sensibilité acoustique des espèces identifiées comme étant potentiellement présentes dans la zone du projet. Ainsi, la dernière colonne des Tableaux 3 et 4 spécifie la gamme de fréquences auxquelles les espèces animales référencées sont naturellement sensibles (équivalent de l'audiogramme). La terminologie utilisée pour les mammifères marins tient compte de l'évolution proposée par le consensus (B. L. Southall et al., 2019), sans que les gammes de fréquences déterminées par (NOAA, 2018) n'évoluent :

- Classe acoustique des basses fréquences (acronyme LF) : 0.2-19 kHz
- Classe acoustique des hautes fréquences (acronyme HF) : 8.8-110 kHz (anciennement moyennes fréquences MF)
- Classe acoustique des très hautes fréquences (acronyme VHF) : 12-140 kHz (anciennement hautes fréquences HF)

Les siréniens ont leur propre catégorie acoustique (acronyme SI) : 4.3-25 kHz.

Les tortues marines ont leur propre catégorie acoustique (acronyme T) : < 0.9 kHz.

Les poissons sont divisés en trois catégories selon leur anatomie :

- Poissons sans vessie natatoire (acronyme F) : < 1 kHz
- Poissons avec vessie natatoire sans cils sensitifs (acronyme FB) : < 1 kHz
- Poissons avec vessie natatoire avec cils sensitifs (acronyme FBL) : < 4 kHz.

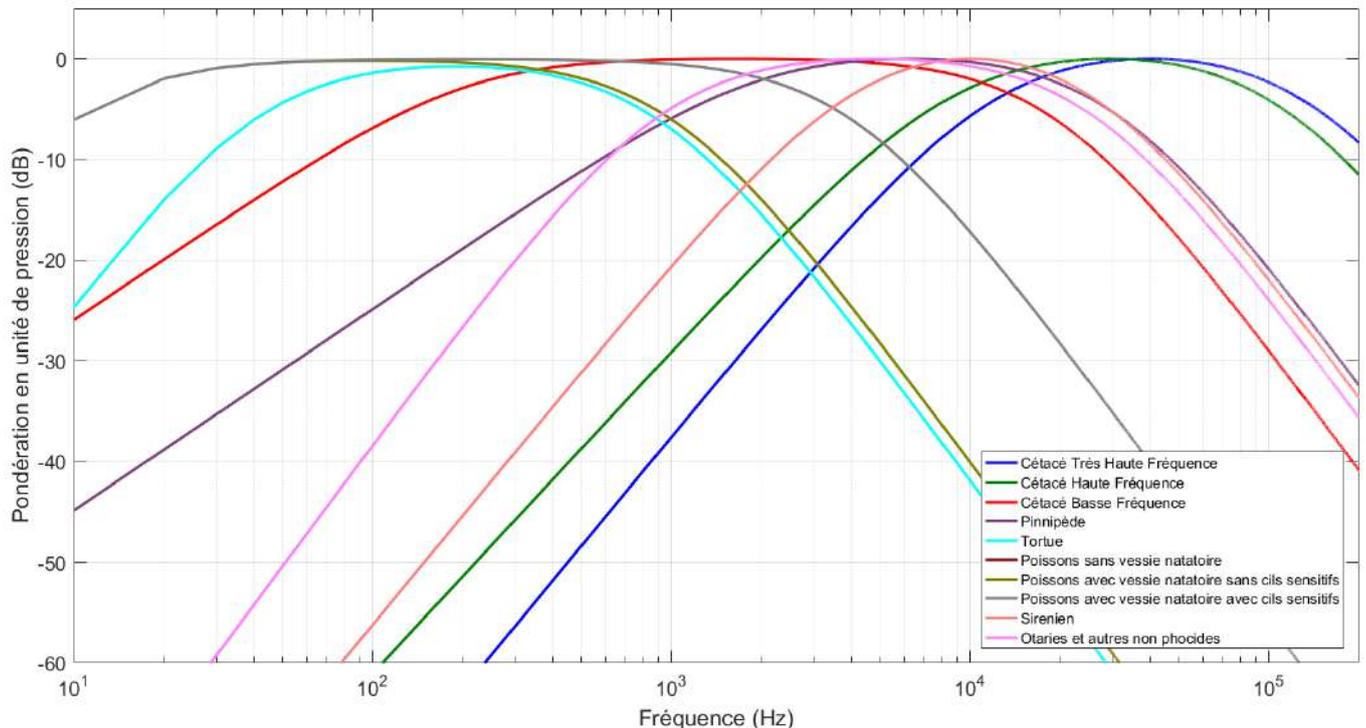


Figure 21 : Fonction de sensibilité auditive des différentes catégories de mammifères marins selon (Southall 2019 & NOAA 2018) et de poissons et tortues selon (Popper 2014 & McCauley 2000).

IV.2.4. Échelle des risques sonores

IV.2.4.a. Graduation des risques

Les risques potentiels sont d'autant plus importants que les individus se trouvent à proximité d'une ou plusieurs sources de bruit, et sont exposés à un bruit intense. Notre méthodologie prévoit une hiérarchisation des risques sur un axe de niveau de bruit décroissant, établie à partir de la littérature et des capacités scientifiques et techniques actuelles à quantifier les distances de risques pour des projets en mer (Figure 22).

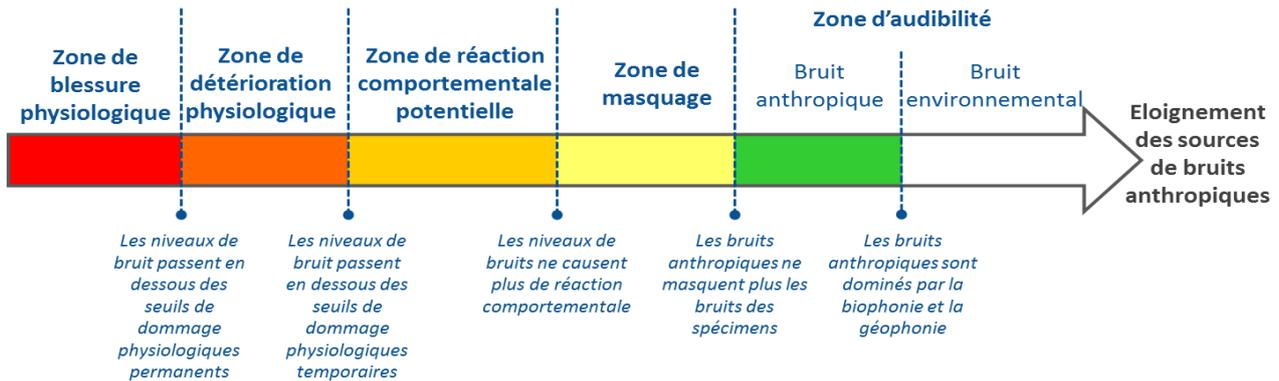


Figure 22 : Graduation des risques biologiques en fonction de l'éloignement à la ou les sources de bruit anthropique

Au fur et à mesure que les niveaux de bruit se réduisent, les zones de risque changent de nature (Dooling RJ, 2013). Le passage d'une zone de risque à l'autre correspond au franchissement d'un seuil biologique fourni, le cas échéant, par la recherche et par la littérature (Mccauley et al., 2000; NOAA, 2018; Popper, Hawkins, Fay, Mann, Bartol, Carlson, Coombs, Ellison, Gentry, Halvorsen, Løkkeborg, et al., 2014; E. B. L. Southall et al., 2019). Il existe un consensus international sur la graduation des risques et sur les valeurs de seuil pour les dommages physiologiques, mais l'état de la connaissance scientifique ne permet pas à ce jour de statuer sur les seuils relatifs aux modifications de comportement.

La graduation des effets est :

- ✓ Une zone de blessure physiologique qui correspond à une zone dans laquelle les niveaux de bruit dépassent les seuils de dommage physiologique permanent (PTS), provoquant des lésions irréversibles ;
- ✓ Une zone de détérioration physiologique qui correspond à une zone dans laquelle les niveaux de bruit sont susceptibles de provoquer des dommages physiologiques temporaires (TTS) se traduisant en des lésions réversibles. Les cellules retrouvent leur état initial après un certain temps hors d'une exposition importante au bruit ;
- ✓ Une zone de réaction comportementale qui correspond à une zone dans laquelle les niveaux de bruit sont susceptibles de provoquer une gêne suffisante pour que les individus interrompent leur activité normale pour fuir la zone. Les conséquences ne sont pas directes, mais provoquent une augmentation de la consommation d'énergie individuelle d'autant plus critique que l'individu est jeune, une interruption dans leurs activités de chasse ou de socialisation, un changement forcé d'habitat. In-fine, les impacts peuvent se faire ressentir à l'échelle des individus et de la population ;
- ✓ Une zone de masquage qui intervient lorsque les sons émis et reçus par les spécimens (sons essentiels dans leurs activités de chasse, de socialisation, de reproduction, ou d'évitement des prédateurs) sont couverts par les bruits anthropiques. Ce type d'effet est pertinent pour les bruits continus ou les bruits impulsionnels ayant une forte cadence et se prolongeant dans le temps. Dans cette zone, le rayon d'interaction des spécimens est réduit, ce qui présente des impacts potentiels à l'échelle des individus et de la population ;

- ✓ Une zone d'audibilité, zone sans risque, qui correspond à une zone dans laquelle les bruits anthropiques, biologiques et naturels sont perçus par les individus, sans pour autant causer d'effet particulier connu.

IV.2.4.b. Quantification des risques de dommage physiologique

L'évaluation du dépassement des seuils est réalisée par comparaison entre les champs sonores générés par les activités du projet et les seuils de sensibilité des espèces.

Les seuils et les gammes fréquentielles de sensibilité adoptés pour cette étude sont issus de (NOAA, 2018; B. L. Southall et al., 2019) pour les mammifères marins et de (McCauley et al., 2000; Popper, Hawkins, Fay, Mann, Bartol, Carlson, Coombs, Ellison, Gentry, Halvorsen, Løkkeborg, et al., 2014) pour les poissons. Ces références constituent à ce jour les standards internationaux.

Ces références précisent :

- ✓ Les catégories acoustiques d'espèces à considérer :
 - Les cétacés Très Hautes Fréquences (abréviation VHF),
 - Les cétacés Hautes Fréquences (abréviation HF),
 - Les cétacés Basses Fréquences (abréviation LF),
 - Les pinnipèdes (abréviation P),
 - Les siréniens (abréviation SI),
 - Les poissons sans vessie natatoire (abréviation F),
 - Les poissons avec vessie natatoire mais sans cils sensitifs (abréviation FB),
 - Les poissons avec vessie natatoire et avec cils sensitifs (abréviation FBL),
 - Les tortues marines (abréviation T).
- ✓ Les modèles de bandes de sensibilité (ou audiogramme) pour chaque catégorie (Figure 21) ;
- ✓ Les seuils de sensibilité pour chaque bande de fréquence de chaque catégorie en fonction du type de signal (impulsif ou non-impulsif) (Tableau 6).

Concernant le seuil de modification du comportement ou de dérangement, (B. L. Southall et al., 2019) et (NOAA, 2018) ne proposent pas de seuil de réaction pour les mammifères marins, de même que (Popper, Hawkins, Fay, Mann, Bartol, Carlson, Coombs, Ellison, Gentry, Halvorsen, Løkkeborg, et al., 2014) pour les poissons. Cependant, (B. L. Southall et al., 2007) classent les réactions comportementales suivant un indice variant de 1 (pas de réaction) à 9 (panique, échouage). Dans cette étude, nous proposons d'appliquer aux mammifères trois valeurs de seuils acoustiques (120, 140 et 160 dB réf 1 μ Pa) afin d'évaluer les différents degrés d'un risque de réaction (Tableau 5). Ces différents seuils de modification du comportement ne tiennent pas compte de la sensibilité auditive de l'espèce (ou de l'audiogramme) donc les distances estimées sont indépendantes de l'espèce.

Dans le cadre des tortues, nous proposons d'appliquer le seuil de modification comportementale de 166 dB réf 1 μ Pa proposé par (Popper, Hawkins, Fay, Mann, Bartol, Carlson, Coombs, Ellison, Gentry, Halvorsen, Løkkeborg, et al., 2014) pour les bruits impulsifs à l'ensemble des types de bruits (impulsifs et continus).

Tableau 5 : Graduation d'une modification du comportement attendu en fonction du seuil de tolérance acoustique

Seuil acoustique	Effet potentiel sur le comportement
120 dB réf 1 μ Pa	Déplacements erratiques modérés ou multiples Cessation / modification brefs ou mineurs des vocalises Changements mineurs ou brefs des cycles de respiration
140 dB réf 1 μ Pa	Changements modérés de direction, de vitesse, et / ou plongées mais pas d'évitement de la source de bruit

	Changements mineurs, brefs dans la constitution des groupes Cessation ou changements modérés des vocalises (durant la durée des travaux)
160 dB réf 1μPa	Comportement agressif prolongé ou étendu Séparation femelles / progéniture modérée Réponses anti-agression claires et visibles Évitement de la source de bruit de manière importante / durable Cessation modérée des cycles de reproduction

Tableau 6 : Groupes d'espèces considérés dans l'étude et seuils de sensibilité acoustique associés

Dégradation de l'audition			Bruits impulsifs (Niveau d'Exposition Sonore) Unité dB réf. 1 μ Pa ² s (Niveau cumulé sur 24 heures)			Bruits continus (Niveau de Pression Sonore) Unité dB réf. 1 μ Pa (Niveau cumulé sur 24 heures)		
Famille	Référence	Gamme de fréq. de perception	Seuil de réaction	Seuil de dommage temporaire	Seuil de dommage permanent	Seuil de réaction	Seuil de dommage temporaire	Seuil de dommage permanent
Cétacés Très Hautes Fréquences (VHF)	Southall 2019	12-140 kHz	NC ¹	140	155	NC ¹	153	173
Cétacés Hautes Fréquences (HF)		8.8-110 kHz	NC ¹	170	185	NC ¹	178	198
Cétacés Basses Fréquences (LF)		0.2-19 kHz	NC ¹	168	183	NC ¹	179	199
Siréniens (SI)	NOAA 2018	4.3-25 kHz	NC ¹	175	190	NC ¹	186	206
Altération des tissus et des structures anatomiques								
Famille	Référence	Gamme de fréq. de perception	Seuil de réaction	Seuil de blessure temporaire	Seuil de mortalité directe ou indirecte	Seuil de réaction	Seuil de blessure temporaire	Seuil de mortalité directe ou indirecte
Tortues Marines (T)	McCauley 2000	< 0.9 kHz	166	NC	210	NC ²	NC	NC
Poissons sans vessie natatoire (F)	Popper 2014	< 1 kHz	NC	186	219	NC	NC	NC
Poissons avec vessie natatoire sans cils sensitifs (FB)		< 1 kHz	NC	186	210	NC	NC	NC
Poissons avec vessie natatoire avec cils sensitifs (FBL)		< 4 kHz	NC	186	207	NC	NC	NC

NC : Non Connu (seuil manquant dans la littérature)

NC¹ : seuils de 120, 140 et 160 dB réf 1 μ Pa appliqués aux mammifères marins à titre conservateur afin d'évaluer un risque de réaction léger à avéré (Southall 2007)

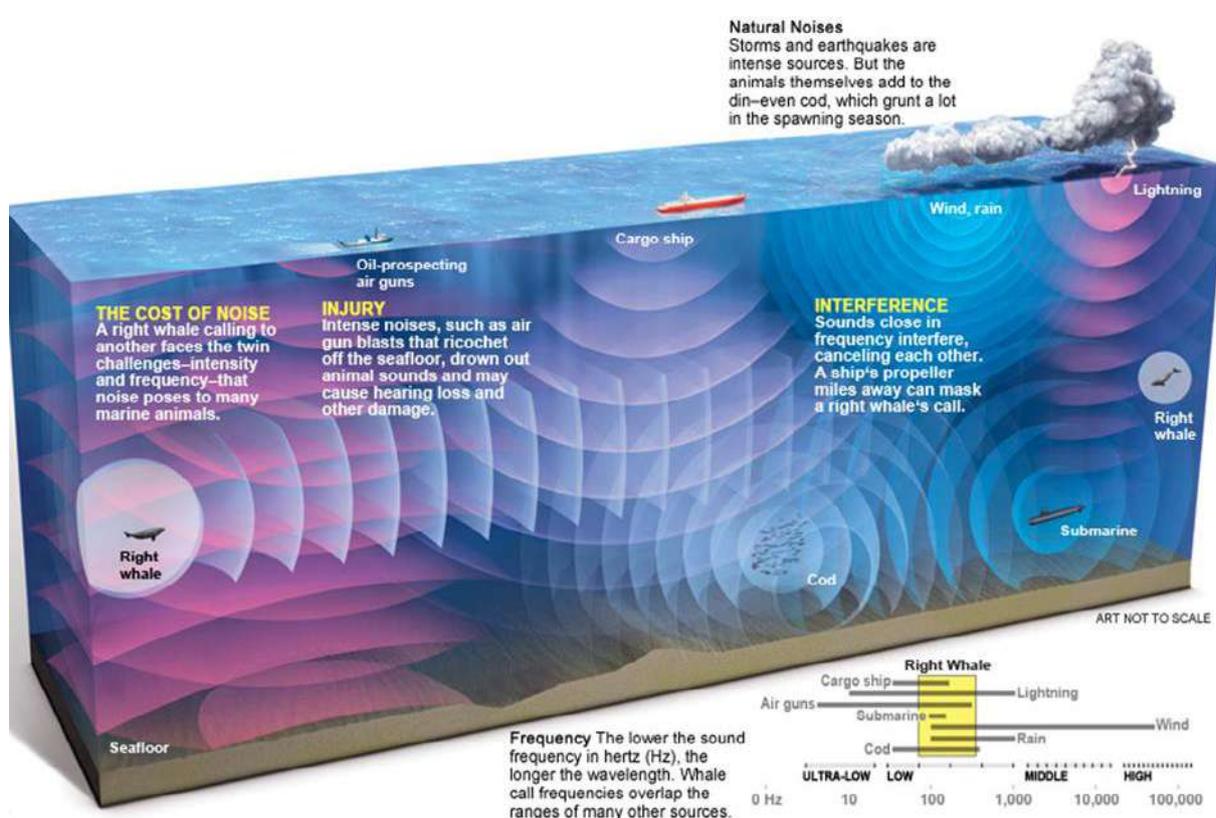
NC² : seuil de 166 dB réf 1 μ Pa appliqué à l'ensemble des types de bruit pour le seuil de réaction des tortues

IV.2.4.c. *Risque de masquage*

L'effet de masquage des sons émis et reçus par les espèces (dans leurs activités de chasse, de socialisation, de reproduction ou d'évitement des prédateurs) par les bruits du projet est quantifié à partir de l'estimation de l'élévation du niveau de bruit préexistant par les ateliers du projet. Ainsi la présence d'une source sonore anthropique additionnelle dans la zone de fréquentation des animaux est susceptible d'engendrer à minima un risque de masquage en raison de l'élévation du niveau sonore vis-à-vis du niveau sonore ambiant (§IV.2.4.a.). À titre d'exemple, la Figure 23 illustre la perte de communication entre deux baleines franches, perturbée par l'ajout de contributions anthropiques (navire, sous-marin et prospections sismiques) ou naturelles (vent, pluie, foudre...). Les deux animaux voulant communiquer doivent donc se rapprocher pour percevoir le signal émis (chant).

Figure 23 : Interaction des sons anthropiques et/ou naturels avec la communication de la faune marine

(D'après Graphic: Stefan Fichtel. Sources: C. W. Clark, Cornell Lab of Ornithology; Brandon Southall, University of California, Santa Cruz; Kathleen Vigness-Raposa, Marine Acoustics, Inc)



IV.2.4.d. *Exposition prolongée aux bruits (niveaux sonores accumulés)*

Dans un milieu ouvert, afin de tenir compte du déplacement potentiel de l'animal pendant la durée de l'atelier et conformément au consensus (NOAA, 2018), un modèle de fuite rectiligne uniforme intègre l'énergie sonore accumulée par l'animal lors de sa fuite (Figure 24). Les vitesses de fuites utilisées proviennent de la littérature (Bailey & Thompson, 2006; Cape & Limited, n.d.; Scottish Natural Heritage, 2016), et sont mentionnées dans le Tableau 7. La durée journalière cumulée de l'atelier ne peut excéder 24 heures.

Les niveaux sonores accumulés (notés SEL dB réf 1µPa²s) sont comparés aux seuils de sensibilité des espèces (Tableau 6) et permettent de déduire les distances minimales en dessous desquelles l'animal court un risque biologique au démarrage de l'atelier. Ce critère est relié à l'énergie totale du signal et permet de comparer des expositions sonores de différentes durées, dans le but d'en déterminer les impacts.

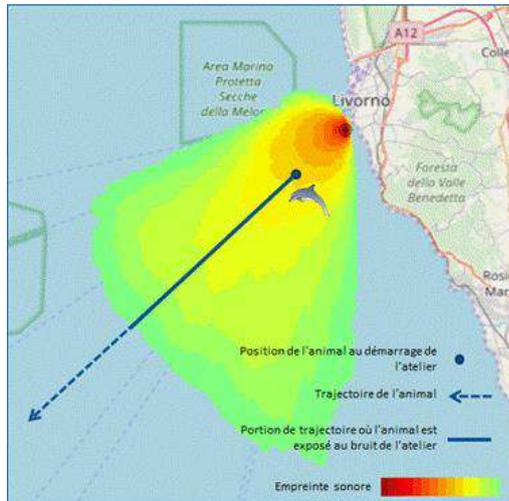


Figure 24 : Illustration de la méthode d'évaluation du cumul d'énergie sonore pendant la fuite de l'animal

Tableau 7 : Vitesses de fuite par familles d'espèces

Famille	Vitesse moyenne de fuite (m/s)
Cétacés Hautes Fréquences	1.4
Cétacés Moyennes Fréquences	1.5
Cétacés Basses Fréquences	2.1
Pinnipèdes dans l'eau	1.8
Tortues Marines	1.1
Poissons	1.1

IV.2.5. Lacunes de connaissance relative aux seuils de tolérance

À ce jour, les seuils de tolérances ne sont pas connus pour toutes les espèces animales sous-marines par manque de connaissance de la communauté scientifique. La première tentative d'établir un consensus des seuils date de 2007 (B. L. Southall et al., 2007). Les dernières mises à jour de ce consensus datent de 2018 (NOAA, 2018) et 2019 (B. L. Southall et al., 2019), mais ne statuent pas sur les valeurs des seuils de modification du comportement (malgré les différentes publications établies depuis 2007). Des travaux de recherche sont en cours et tentent de définir, soit de manière contrôlée en bassin soit in-situ, des changements de comportement d'une espèce (fuite, changement de direction, augmentation de la vitesse, remontée en surface, ...) en fonction du type d'activité ou en fonction d'un type de signal (énergie et bande de fréquence). Dans ce domaine, la connaissance scientifique progresse proportionnellement aux enjeux et à la difficulté que représente cette thématique.

Chapitre V. État Perturbé

Ce chapitre détaille :

- ✓ Les sources de bruit émises par le projet et les scénarios acoustiques modélisés ;
- ✓ L'évaluation des niveaux sonores mis en jeu et l'empreinte sonore du projet
- ✓ L'estimation des impacts du projet sur la faune sous-marine (espèces cibles, distances de risques)

V.1. Sources de bruit générées par le projet

Le projet d'extension et de réaménagement du port de Galisbay est susceptible de générer différentes sources de bruit dans le milieu sous-marin. Les activités principales du projet sont les suivantes :

- Draguer et baliser un chenal permettant l'accès de navires de plus fort tonnage :
 - Dragage (par une barge munie d'une pelle rétro-caveuse)
 - Clapage en mer des matériaux dragués excédentaires
- Créer des terre-pleins supplémentaires de stockage sur 6ha (déversement depuis la terre, à priori non-bruyant : cette activité n'est pas évaluée dans l'étude d'impact en acoustique sous-marine) ;
- Réaliser un nouveau quai de 200m de long (quai croisière) :
 - Vibrofonçage, battage et forage de pieux ou palplanches (depuis une barge par le sud du quai)
- Réaliser deux nouveaux quais de 200m et 150m de long (quais commerce : porte-conteneur & RoRo) :
 - Vibrofonçage, battage et forage de pieux ou palplanches (depuis une barge par le nord du quai)

La Figure 25 illustre l'emplacements de ces différentes activités.

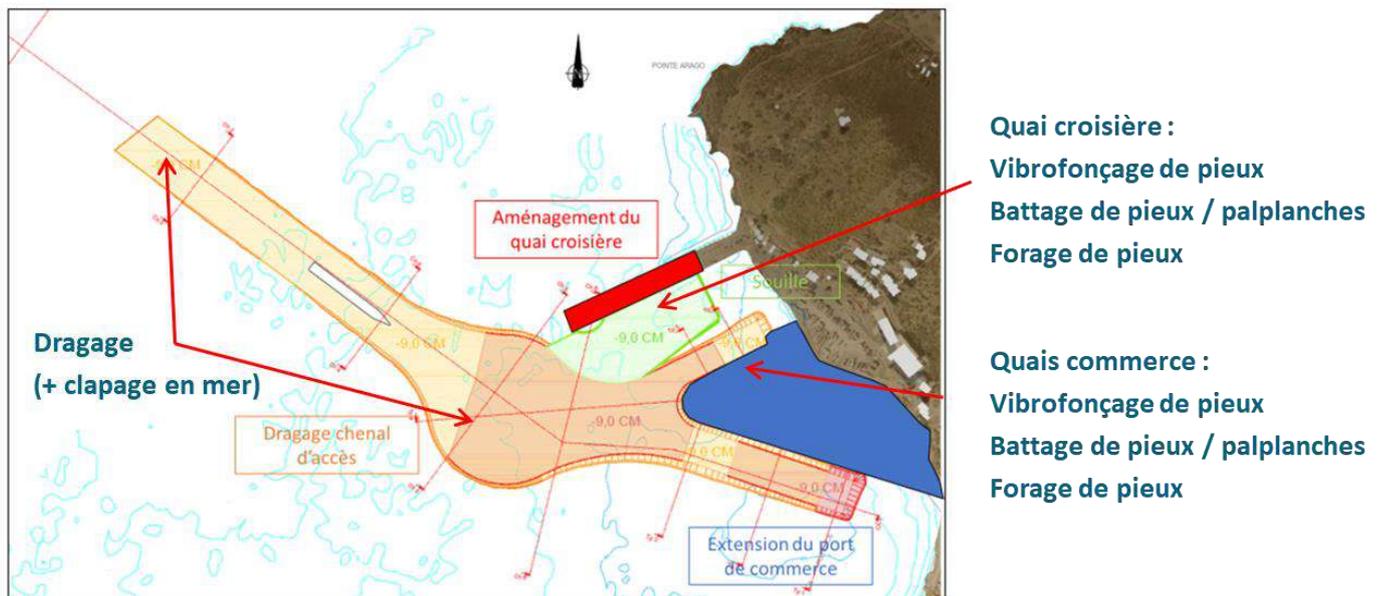


Figure 25 : Emplacements des activités bruyantes du projet

Le niveau sonore des opérations d'enfoncement des pieux (vibrofonçage, battage, forage) réalisées dans le cadre de la construction des quais dépend du diamètre des pieux considérés, ou des dimensions des palplanches utilisées le cas échéant. À titre conservateur, nous proposons de ne modéliser que les opérations d'enfoncement des ducs d'Albe dont le diamètre est le plus important du projet (1m à 1.1m), et qui devraient ainsi engendrer les niveaux sonores les plus élevés.

V.1.1. Construction des quais vis-à-vis de l'avancée de la digue

La Figure 26 présente plus en détail l'emplacement choisi pour les opérations d'enfoncement des pieux dans le cadre de la construction des quais. Ces opérations sont concomitantes de la construction de la digue au nord du quai croisière ; or la présence de la digue peut potentiellement présenter un obstacle à la propagation du bruit généré par la construction des quais. Aussi, la digue doit-elle être correctement prise en compte dans la modélisation pour que les effets acoustiques du projet soient évalués le plus fidèlement possible :

- Quai croisière : le phasage du projet envisagé au moment de l'étude acoustique prévoit la construction des ducs d'Albe après la réalisation du quai croisière. La digue sera réalisée simultanément au quai croisière mais ne sera pas terminée au moment de l'enfoncement des ducs d'Albe : il est probable que son extrémité (musoir) soit inachevée au moment des opérations bruyantes de vibrofonçage, battage et forage, ouvrant ainsi la propagation sonore des bruits générés sur un axe relativement large. À titre conservateur, seule la partie courante de la digue est considérée comme obstacle à la propagation lors de la modélisation.
- Quais commerce : en l'absence d'information sur le phasage de la construction des quais commerce vis-à-vis de l'avancement de la digue du quai croisière, seule la digue existante en l'état actuel du port est considérée dans la modélisation pour maximiser l'axe de propagation sonore des opérations d'enfoncement des ducs d'Albe des quais commerce.

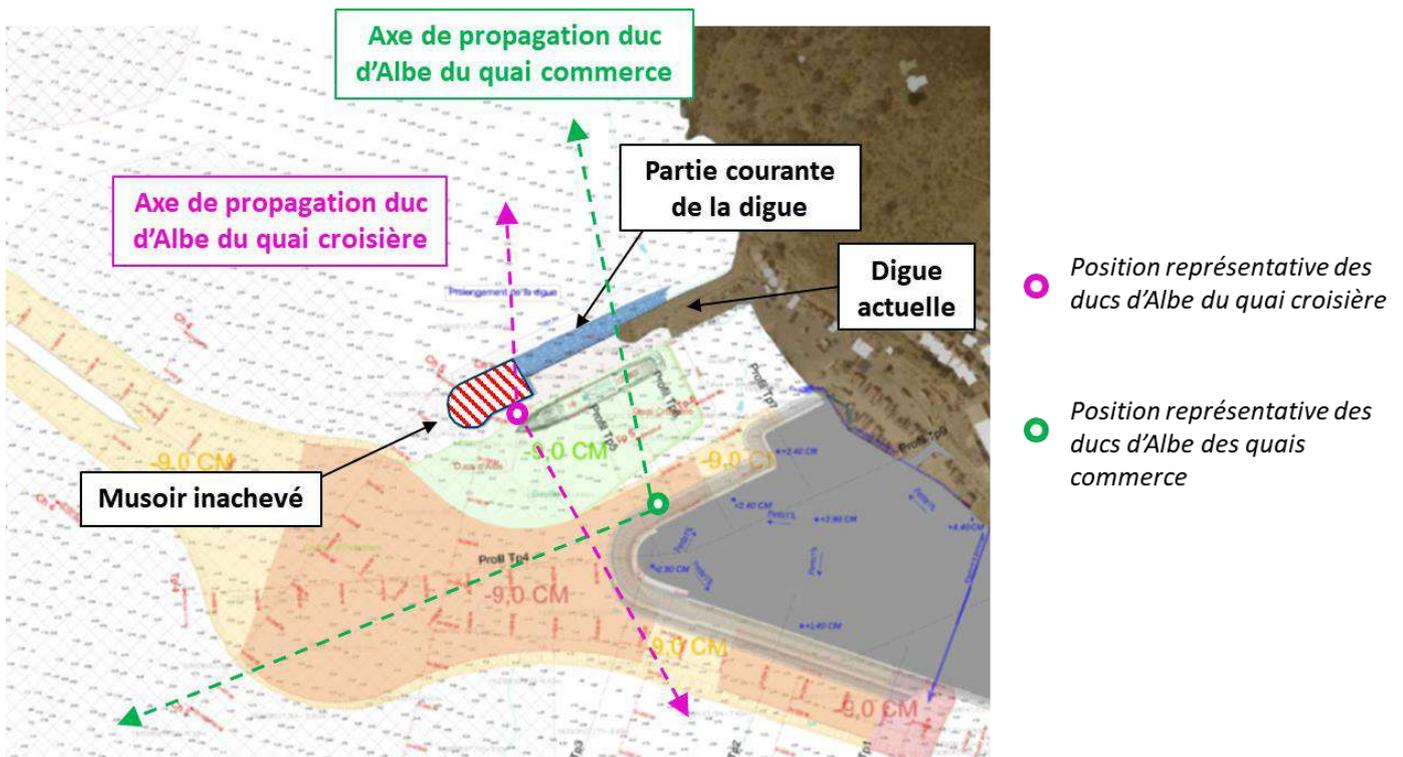


Figure 26 : Emplacement des opérations de construction de quai vis-à-vis de l'avancée de la digue

V.1.2. Solution de réduction sonore envisagée

Une solution de réduction sonore sous la forme d'un rideau de bulles simple (BBC) est envisagée par le projet pour les ateliers bruyants intervenant lors de la construction des quais. Les ateliers de forage, de battage et de vibrofonçage de pieux seront donc modélisés sans puis avec prise en compte de cette solution, dont les caractéristiques d'atténuation du son en fonction de la fréquence sont issues de (Bellmann et al., 2020) et illustrées en Figure 27.

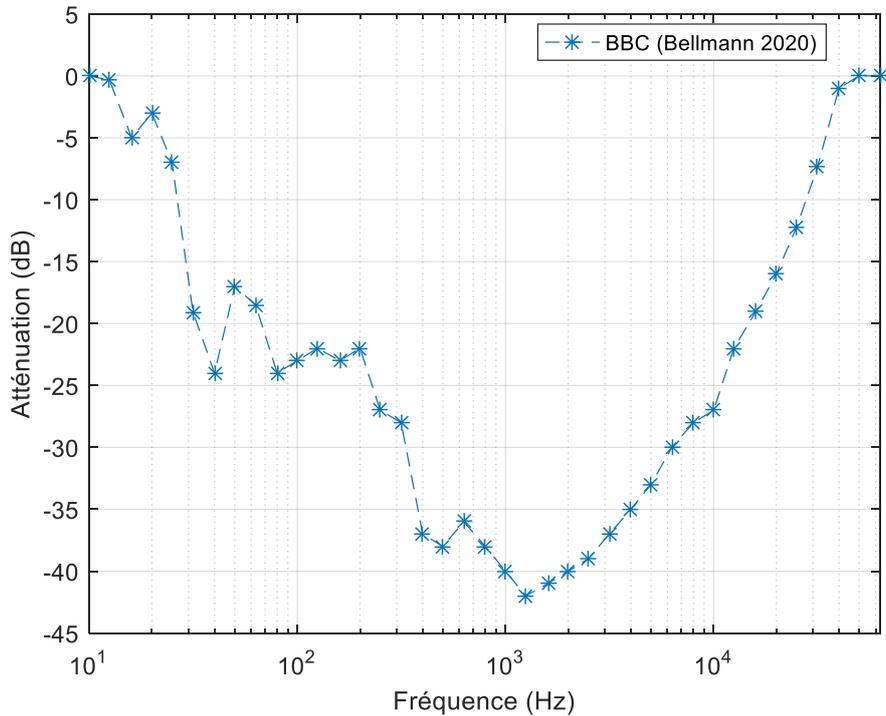


Figure 27 : Atténuation en fonction de la fréquence du rideau de simple BBC (Bellmann, 2020)

V.1.3. Dragage du chenal de navigation

Le plan de dragage du chenal est divisé en trois sections, A, B et C comme indiqué en Figure 28. Pour maximiser la propagation du bruit de cet atelier, l'emplacement choisi pour la modélisation acoustique est celui le plus à l'extérieur de la baie, en extrémité de zone A.

Le dragage du chenal ne devrait mobiliser qu'une seule drague rétro-caveuse (*backhoe dredger*), mais s'effectuer sur une durée quotidienne ininterrompue de 24 heures.

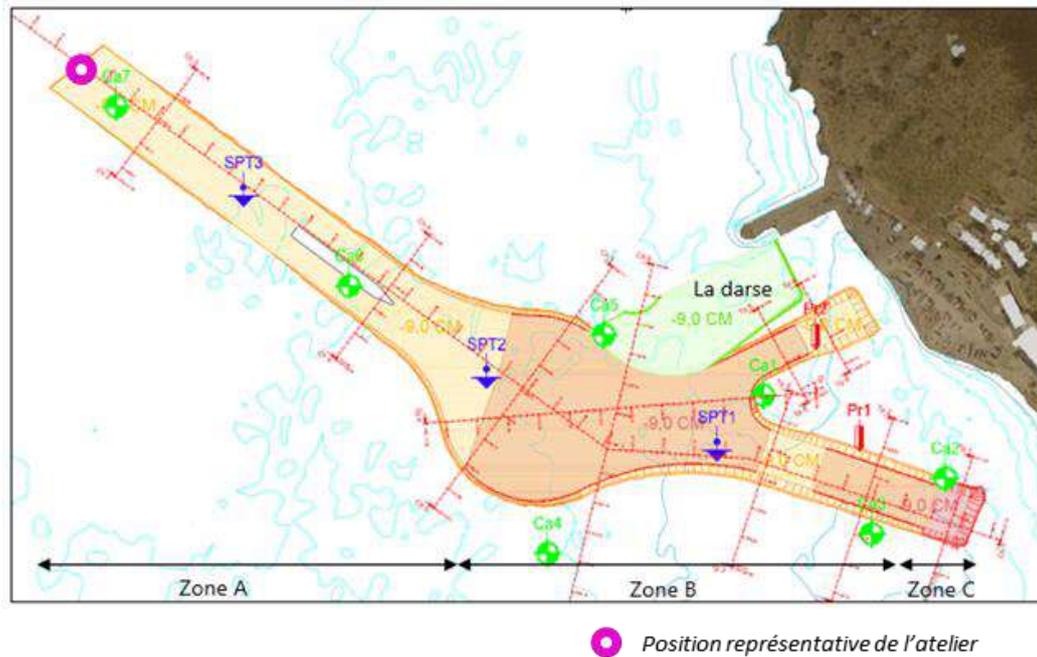


Figure 28 : Emplacement du point représentatif pour la modélisation du dragage du chenal de navigation

La modélisation de l'atelier de dragage utilise un gabarit sonore issu de la littérature (Reine et al., 2014). Cet atelier devrait engendrer un bruit de type continu avec un niveau d'exposition sonore large bande (entre 10 Hz et 70 kHz) de 178.3 dB réf. 1µPa à 1 m (Figure 29). La répartition spatiale des sources sonores correspond d'une part à l'action de la drague sur le fond marin, et d'autre part aux vibrations générées par les machines installées sur la barge, et leur transmission au milieu marin.

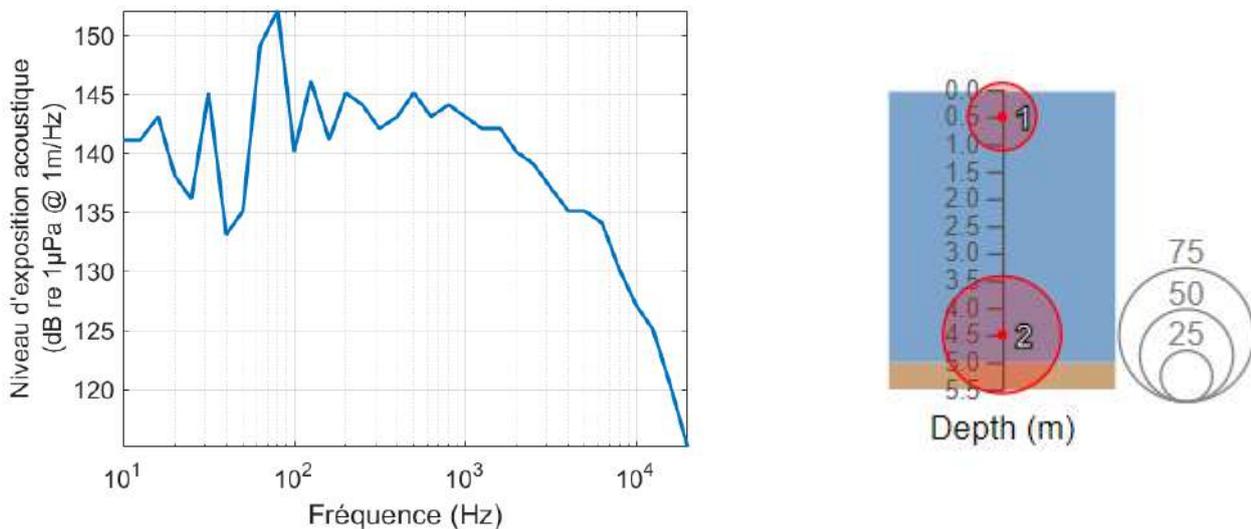
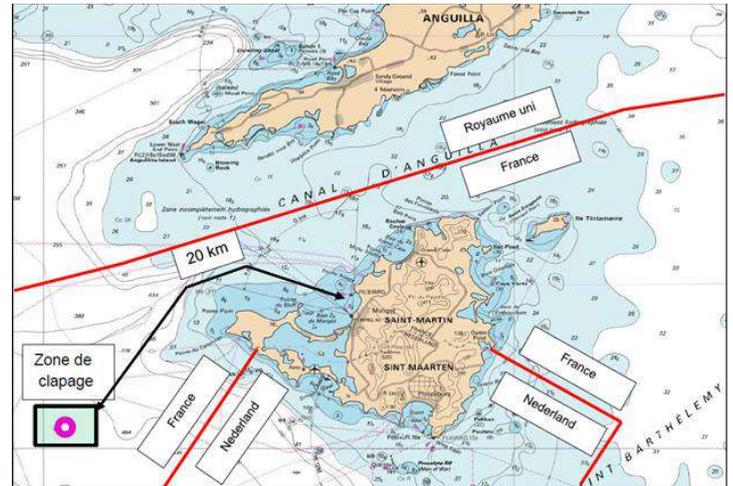


Figure 29 : Gabarit sonore de l'atelier de dragage & Répartition de l'énergie sonore (%)

V.1.4. Clapage des matériaux dragués

Le déversement des sédiments dragués le long du chenal de navigation est effectué par clapage depuis une barge à fond ouvrant. Cet atelier est modélisé dans une zone de clapage au large, définie par le projet à 20km à l'Ouest de l'île de Saint Martin (Figure 30). Deux barges seront utilisées en rotation, pour un total de 6 clapages par jour

(pas d'opérations simultanées). La modélisation ne considère cependant qu'un seul clapage par jour en termes d'accumulation du niveau sonore par la faune sous-marine, puisque la durée entre deux clapages est suffisamment longue (4h en théorie) pour considérer les évènements sonores indépendants et permettre aux animaux de retrouver une période temporelle significative de bruit existant.



● Position représentative de l'atelier

Figure 30 : Illustration (source internet) et emplacement de l'atelier de clapage

La modélisation de l'atelier de clapage utilise un gabarit sonore issu de mesures réalisées par Quiet-Oceans dans le cadre d'un projet d'extension de port. Cet atelier devrait engendrer un bruit court d'une dizaine de secondes, assimilé à un bruit de type impulsif avec un niveau d'exposition sonore large bande (entre 10 Hz et 70 kHz) de 180 dB réf. $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$ à 1 m (Figure 31).

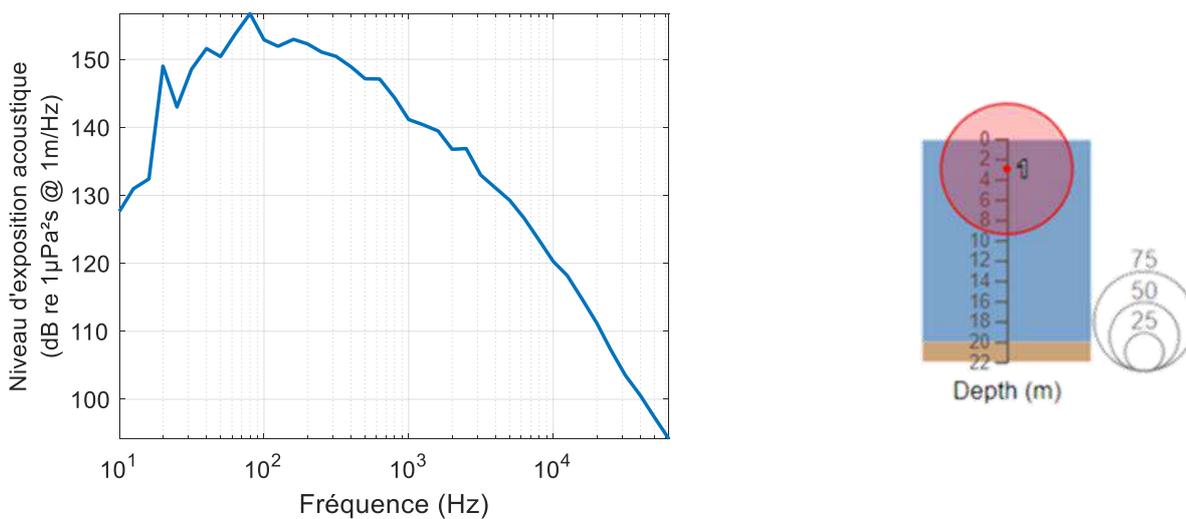
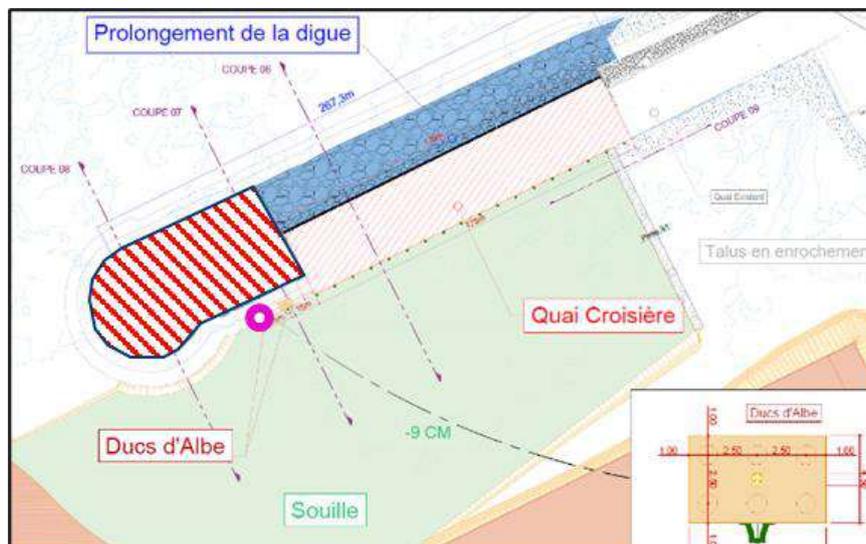


Figure 31 : Gabarit sonore de l'atelier de clapage & Répartition de l'énergie sonore (%)

V.1.5. Enfoncement des ducs d'Albe du quai croisière

La construction des quais est susceptible de nécessiter l'enfoncement de plusieurs pieux dans le fond marin, sur une période prolongée. Différentes techniques sont envisagées par le projet (forage vertical préalable, suivi de battage de pieux ou de vibrofonçage), et sont évaluées dans l'étude d'impact. Le bruit généré par ces techniques dépend du diamètre du pieux (ou des dimensions de la palplanche, le cas échéant). À titre conservateur, nous proposons de ne modéliser que les opérations d'enfoncement des ducs d'Albe dont le diamètre est le plus important du projet (1m dans le cas du quai croisière), et qui devraient ainsi engendrer les niveaux sonores les plus élevés.

L'emplacement des ducs d'Albe retenu pour la modélisation est indiqué en Figure 32. Lors des opérations d'enfoncement des pieux du quai croisière, il est probable que le musoir soit inachevé d'après le phasage des travaux, et seule la partie courante de la digue est considérée dans la modélisation.



● Position représentative de l'atelier

Figure 32 : Emplacement des ducs d'Albe retenu pour la modélisation des opérations d'enfoncement de pieux du quai croisière. La partie potentiellement inachevée de la digue (musoir) est hachurée en rouge sur l'image.

V.1.5.a. Forage vertical

Des opérations de forage sont susceptibles d'être nécessaires pour préparer l'enfoncement des pieux dans le fond marin. Ces opérations seront réalisées depuis une barge, par le sud du quai, sur une durée quotidienne de 8h ininterrompues. Une solution de réduction de bruit à la source est envisagée sous la forme d'un rideau de bulle simple (BBC).

La modélisation utilise un gabarit sonore pour l'atelier de forage issu de la littérature (Nedwell, Jeremy; Langworthy, John; Howell, 2004; Nedwell & Brooker, 2008) et illustré en Figure 33. Ces opérations devraient engendrer un niveau d'exposition sonore de type bruit continu avec un niveau de source large bande (entre 10 Hz et 70 kHz) de 176.4 dB réf 1µPa @1m, avant mise en œuvre du BBC. Avec le BBC, le niveau sonore de cet atelier est estimé à 157.0 dB réf 1µPa @1m, soit une réduction d'environ 19 dB. La répartition spatiale des sources indique que le bruit provient principalement des vibrations des machines en rotation installées sur la barge qui se transmettent dans le milieu marin, ainsi qu'au contact entre la tête de la foreuse et le fond marin, et le long de l'axe de la foreuse.

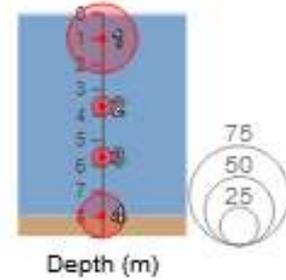
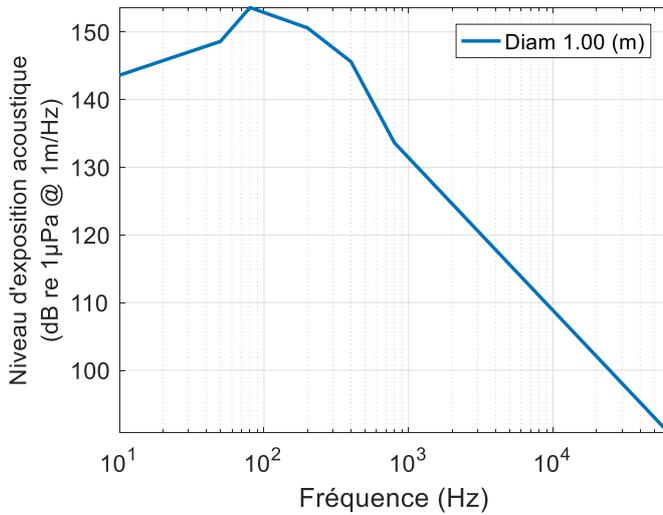


Figure 33 : Gabarit sonore de l'atelier de forage vertical (avant mise en œuvre du BBC) & Répartition de l'énergie sonore (%)

V.1.5.b. Battage de pieux

La technique d'enfoncement des pieux par battage est réalisée depuis une barge, par le sud du quai. En l'absence d'information de la part du projet, nous proposons d'appliquer une cadence de 30 coups / min dans la modélisation, valeur usuelle couramment observée sur des projets similaires, pendant une durée quotidienne de 8h ininterrompues. Une solution de réduction de bruit à la source est envisagée sous la forme d'un rideau de bulle simple (BBC), et une procédure de soft-start (démarrage progressif du battage) est également prévue par le projet.

La modélisation utilise un gabarit sonore issu de la littérature (Bellmann et al., 2020; Betke, 2008) pour estimer le bruit émis par l'atelier de battage de pieux. Cette opération devrait engendrer un bruit de type impulsionnel avec un niveau global d'exposition sonore large bande (entre 10 Hz et 70 kHz) de 203.1 dB réf. 1µPa²s à 1 m (Figure 34) pour un diamètre de 1m, avant mise en œuvre du BBC. Avec le BBC, le niveau sonore de cet atelier est estimé à 183.6 dB réf 1µPa²s @1m, soit une réduction d'environ 20 dB. La répartition spatiale des sources indique que le bruit provient principalement du contact entre le pieu et le fond marin, mais également du corps du pieu qui est mis en vibration par les coups du marteau de battage et qui rayonne dans le milieu marin.

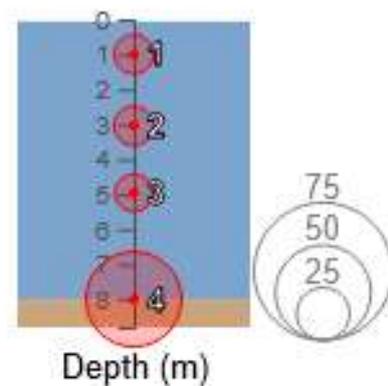
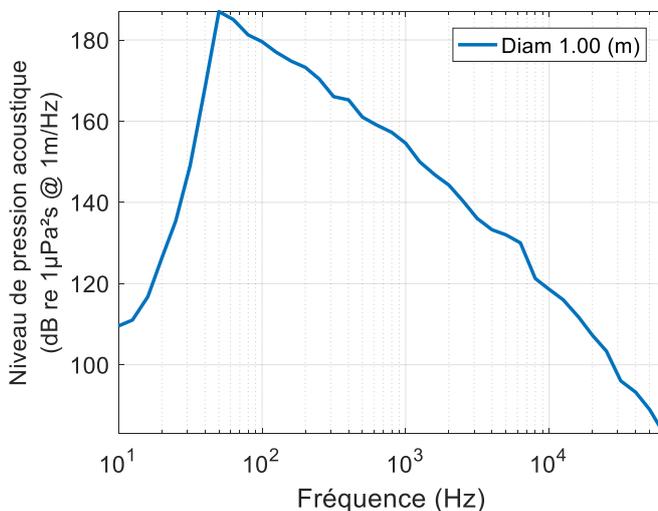


Figure 34 : Gabarit sonore de l'atelier de battage de pieux (avant mise en œuvre du BBC) & répartition de l'énergie sonore (%)

Les valeurs caractéristiques de la procédure de soft-start sont présentées dans le Tableau 8. Il s'agit d'une proposition, en l'absence de valeurs fournies par le projet, de caractéristiques couramment appliquées dans des projets similaires.

Tableau 8 : Détail de la procédure de "Soft-Start" appliquée à l'atelier de battage

	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Nominale
Durée (minutes)	7,5	7,5	7,5	7,5	Jusqu'à la fin de la séquence
Fraction énergie déposée (%)	5	10	20	50	100%
Cadence (coups/minute)	10	10	15	15	30

V.1.5.c. Vibrofonçage de pieux

La technique d'enfoncement des pieux par vibrofonçage est également réalisée depuis une barge par le sud du quai, sur une durée quotidienne de 8h ininterrompues. Une solution de réduction de bruit à la source est envisagée sous la forme d'un rideau de bulle simple (BBC).

La modélisation utilise un gabarit sonore illustré en Figure 35, issu de mesures réalisées par Quiet-Oceans dans le cadre d'un projet similaire. Le vibrofonçage d'un pieu de 1m de diamètre devrait engendrer un niveau d'exposition sonore de type bruit continu avec un niveau de source large bande (entre 10 Hz et 70 kHz) de 198.3 dB réf 1µPa @1m avant mise en œuvre du BBC. Avec le BBC, le niveau sonore de cet atelier est estimé à 174.2 dB réf 1µPa @1m, soit une réduction d'environ 24 dB. La répartition spatiale des sources indique que le bruit provient principalement du point de contact entre le pieu et le fond marin, ainsi que du corps du pieu dont les vibrations se transmettent dans le milieu marin.

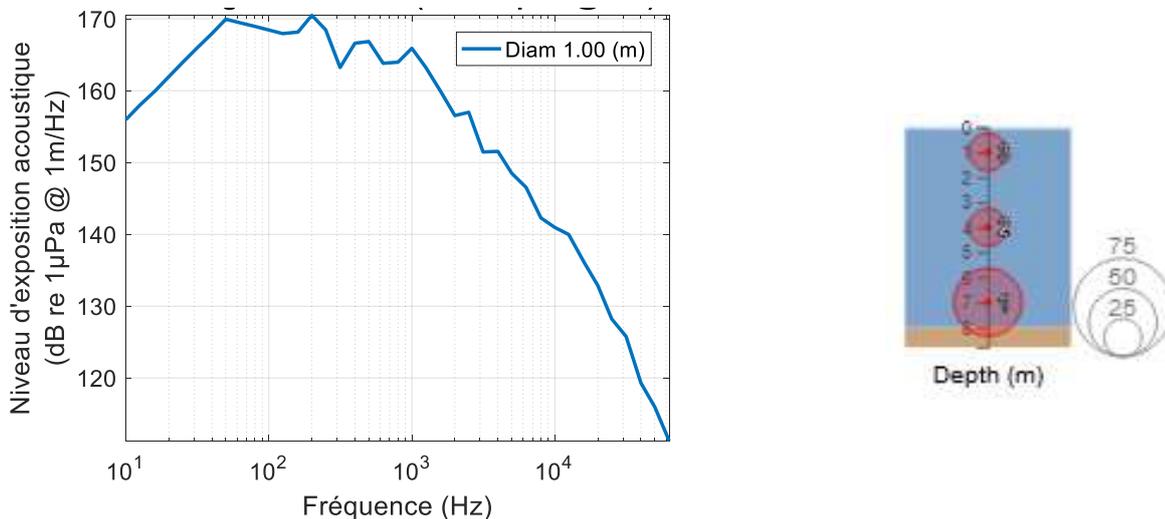


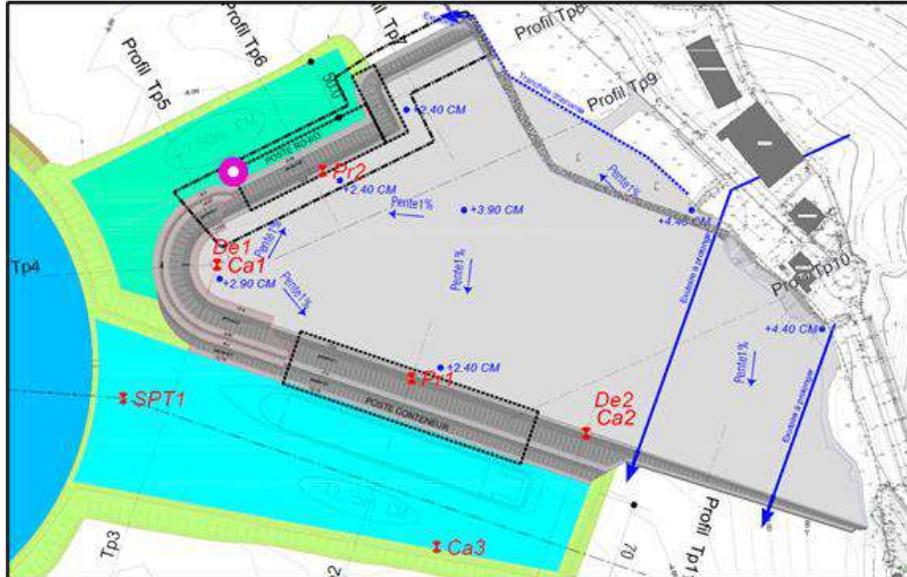
Figure 35 : Gabarit sonore de l'atelier de vibrofonçage (avant mise en œuvre du BBC) & Répartition de l'énergie sonore (%)

V.1.6. Enfoncement des ducs d'Albe des quais commerce

De la même façon que pour le quai croisière, la construction des quais commerce (porte-conteneur & Ro-Ro) est susceptible de nécessiter l'enfoncement de plusieurs pieux dans le fond marin, sur une période prolongée. Les trois techniques de forage vertical, battage de pieux et vibrofonçage sont de nouveau envisagées par le projet. À titre conservateur, nous proposons de ne modéliser que les opérations d'enfoncement des ducs d'Albe dont le

diamètre est le plus important du projet (1.1m dans le cas des quais commerce), et qui devraient ainsi engendrer les niveaux sonores les plus élevés.

L'emplacement des ducs d'Albe retenu pour la modélisation est indiqué en Figure 32. Lors des opérations d'enfoncement des pieux des quais commerce, en l'absence d'information relatif au phasage des travaux, seule la digue existante en l'état actuel du port est considérée dans la modélisation (voir Figure 26).



 Position représentative de l'atelier

Figure 36 : Emplacement des ducs d'Albe retenu pour la modélisation des opérations d'enfoncement de pieux des quais commerce.

V.1.6.a. Forage vertical

Des opérations de forage sont susceptibles d'être nécessaires pour préparer l'enfoncement des pieux dans le fond marin. Ces opérations seront réalisées depuis une barge, par le nord du quai, sur une durée quotidienne de 8h ininterrompues. Une solution de réduction de bruit à la source est envisagée sous la forme d'un rideau de bulle simple (BBC).

La modélisation utilise un gabarit sonore issu de la littérature (Nedwell, Jeremy; Langworthy, John; Howell, 2004; Nedwell & Brooker, 2008) et illustré en Figure 37. Ces opérations devraient engendrer un niveau d'exposition sonore de type bruit continu avec un niveau de source large bande (entre 10 Hz et 70 kHz) de 177.4 dB réf 1 μ Pa @1m dans le cas d'une largeur de puit de 1.1m, avant mise en œuvre du BBC. Avec le BBC, le niveau sonore de cet atelier est estimé à 158.0 dB réf 1 μ Pa @1m, soit une réduction d'environ 19 dB. La répartition spatiale des sources indique que le bruit provient principalement des vibrations des machines en rotation installées sur la barge qui se transmettent dans le milieu marin, ainsi qu'au contact entre la tête de la foreuse et le fond marin, et le long de l'axe de la foreuse.

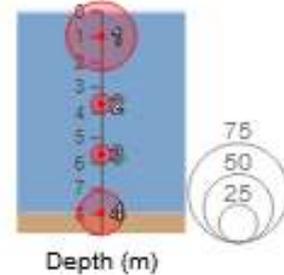
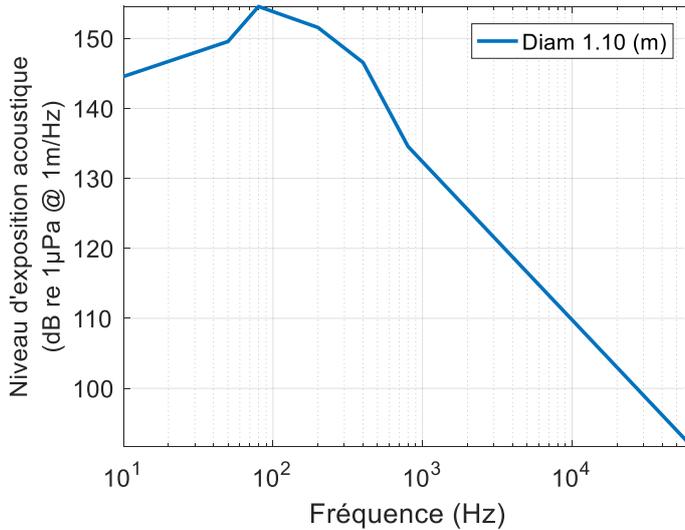


Figure 37 : Gabarit sonore de l'atelier de forage vertical (avant mise en œuvre du BBC) & Répartition de l'énergie sonore (%)

V.1.6.b. Battage de pieux

La technique d'enfoncement des pieux par battage est réalisée depuis une barge, par le nord du quai. Nous proposons d'appliquer la même cadence usuelle que celle utilisée pour l'atelier de battage du quai croisière, soit 30 coups / min, pendant une durée quotidienne de 8h ininterrompues. Une solution de réduction de bruit à la source est également envisagée sous la forme d'un rideau de bulle simple (BBC), ainsi qu'une procédure de soft-start (démarrage progressif du battage) dont les caractéristiques sont identiques à celles proposées au Tableau 8.

La modélisation utilise un gabarit sonore issu de la littérature (Bellmann et al., 2020; Betke, 2008) pour estimer le bruit émis par l'atelier de battage de pieux. Cette opération devrait engendrer un bruit de type impulsif avec un niveau global d'exposition sonore large bande (entre 10 Hz et 70 kHz) de 204.1 dB réf. 1µPa²s à 1 m (Figure 38) pour un diamètre de 1.1m, avant mise en œuvre du BBC. Avec le BBC, le niveau sonore de cet atelier est estimé à 184.6 dB réf 1µPa²s @1m, soit une réduction d'environ 20 dB. La répartition spatiale des sources indique que le bruit provient principalement du contact entre le pieu et le fond marin, mais également du corps du pieu qui est mis en vibration par les coups du marteau de battage et qui rayonne dans le milieu marin.

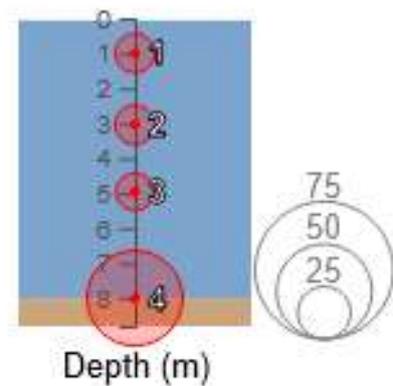
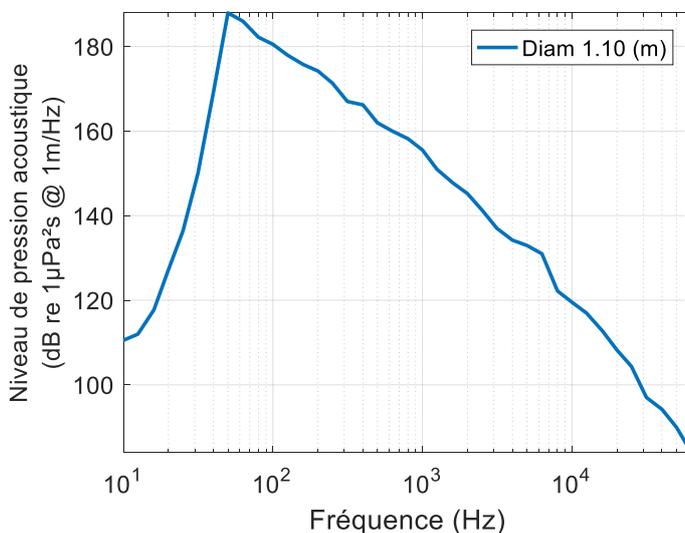


Figure 38 : Gabarit sonore de l'atelier de battage de pieux (avant mise en œuvre du BBC) & Répartition de l'énergie sonore (%)

V.1.6.c. Vibrofonçage de pieux

La technique d'enfoncement des pieux par vibrofonçage est également réalisée depuis une barge par le nord du quai, sur une durée quotidienne de 8h ininterrompues. Une solution de réduction de bruit à la source est envisagée sous la forme d'un rideau de bulle simple (BBC).

La modélisation utilise un gabarit sonore illustré en Figure 39, issu de mesures réalisées par Quiet-Oceans dans le cadre d'un projet similaire. Le vibrofonçage d'un pieu de 1.1m de diamètre devrait engendrer un niveau d'exposition sonore de type bruit continu avec un niveau de source large bande (entre 10 Hz et 70 kHz) de 199.3 dB réf 1 μ Pa @1m, avant mise en œuvre du BBC. Avec le BBC, le niveau sonore de cet atelier est estimé à 177.6 dB réf 1 μ Pa @1m, soit une réduction d'environ 23 dB. La répartition spatiale des sources indique que le bruit provient principalement du point de contact entre le pieu et le fond marin, ainsi que du corps du pieu dont les vibrations se transmettent dans le milieu marin.

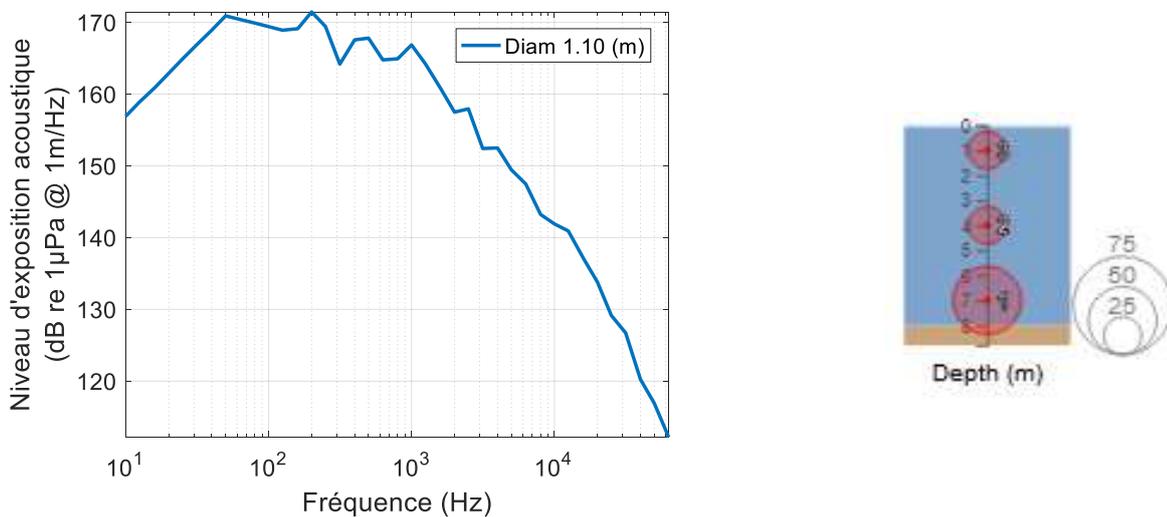


Figure 39 : Gabarit sonore de l'atelier de vibrofonçage (avant mise en œuvre du BBC) & Répartition de l'énergie sonore (%)

V.2. Scénarios modélisés

Le Tableau 9 synthétise l'ensemble des scénarios acoustiques de la modélisation, correspondant aux ateliers bruyants du projet. Pour rappel, les situations de travaux sont modélisées en saison estivale car les conditions sont favorables à la propagation acoustique (§IV.1.2.). La modélisation considère un modèle de fuite des animaux, et l'évaluation des risques est réalisée pour un animal dynamique sur la durée quotidienne d'émission du bruit de chaque atelier (NOAA 2018) (§IV.2.4.d.).

Tableau 9 : Synthèse des scénarios de la modélisation

Atelier	Localisation	Niveau d'émission sonore	Saison prise en compte dans la modélisation	Durée cumulée quotidienne	Mobilité des animaux
Dragage du chenal de navigation	Extrémité de zone A	178.3 dB 1μPa@1m	Estivale	24 heures	Dynamiques
Clapage des matériaux dragués	Zone au large	180 dB 1μPa ² s@1m		1 clapage / jour	
Forage vertical • Avec et sans BBC	Quai croisière	176.4 dB 1μPa@1m (157.0 dB 1μPa@1m avec BBC)		8 heures	
Battage de pieux • Avec et sans BBC • Avec et sans Soft-start		203.1 dB 1μPa ² s@1m (183.6 dB 1μPa ² s@1m avec BBC)			
Vibrofonçage • Avec et sans BBC		198.3 dB 1μPa@1m (174.2 dB 1μPa@1m avec BBC)			
Forage vertical • Avec et sans BBC	Quais commerce	177.4 dB 1μPa@1m (158.0 dB 1μPa@1m avec BBC)		8 heures	
Battage de pieux • Avec et sans BBC • Avec et sans Soft-start		204.1 dB 1μPa ² s@1m (184.6 dB 1μPa ² s@1m avec BBC)			
Vibrofonçage • Avec et sans BBC		199.3 dB 1μPa@1m (177.6 dB 1μPa@1m avec BBC)			

V.3. Propagation et empreinte sonore

Pour chaque atelier, les illustrations présentées dans cette section mettent en évidence l'empreinte sonore des scénarios modélisés. Pour rappel, l'empreinte sonore d'un atelier est définie par la distance maximale de perception, et correspond à l'émergence du niveau de bruit maximum du projet (dans la colonne d'eau) par rapport au niveau de bruit médian mesuré en saison estivale (107.3 dB réf. 1μPa² à proximité du site du projet). Les niveaux d'exposition sonore SEL (dB réf. 1μPa²s) illustrés sont dits « sans pondération » car ils ne tiennent pas compte de la sensibilité ni de la gamme d'audition des espèces animales.

Les distances de perception et les distances de modification comportementale sont ensuite détaillées pour chaque atelier dans des tableaux proposant une analyse indépendante de l'espèce animale, réalisée sur des niveaux sonores instantanés et non-pondérés. Les niveaux sonores moyens à la distance de contrôle courante de 750m sont également estimés à titre indicatif.

Pour chaque illustration, la zone colorée représente l'empreinte sonore de l'atelier. Au-delà (zone blanche), le bruit de l'atelier devrait être dominé par le bruit ambiant au moins la moitié du temps. Cette empreinte sonore instantanée est évaluée au moment du fonctionnement nominal de l'atelier (après un éventuel soft-start).

V.3.1. Dragage du chenal de navigation

Le résultat de la modélisation du bruit de l'atelier de dragage est présenté sous la forme d'une cartographie sonore (Figure 40). L'empreinte sonore de cet atelier de dragage devrait s'étendre au maximum jusqu'à 10km. La propagation du bruit de cet atelier est limitée au Nord par la présence de l'île Anguilla.

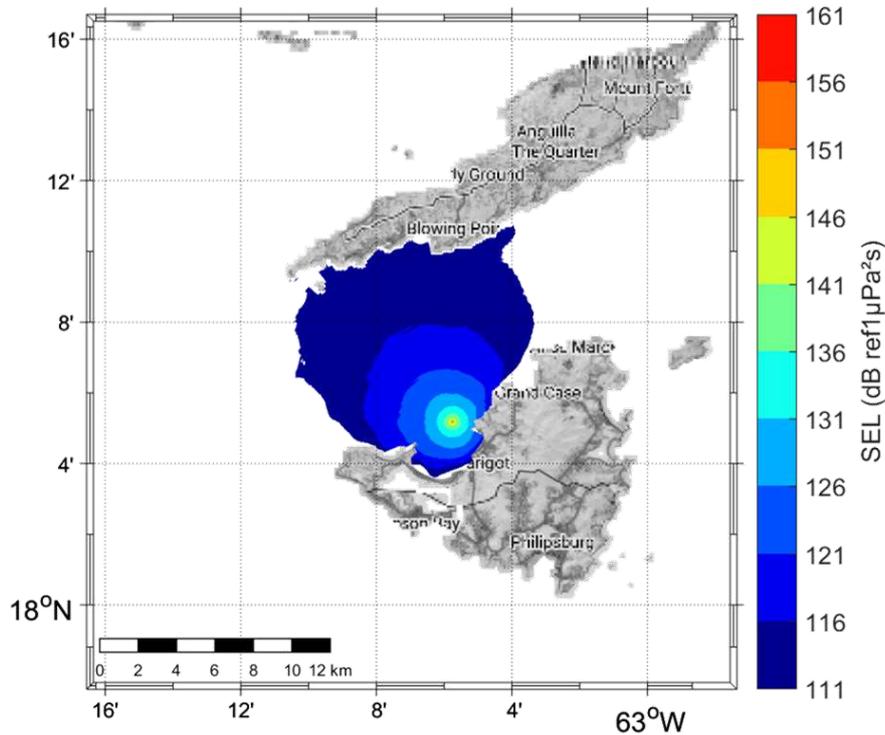


Figure 40 : Empreinte sonore de l'atelier de dragage du chenal de navigation

Le Tableau 10 présente une synthèse des données de modélisation des scénarios acoustiques de l'atelier de dragage. Le tableau précise notamment le niveau sonore moyen à la distance de contrôle régulièrement admise de 750 m de la source sonore. Les distances de modification comportementale sont également décrites pour les mammifères marins, comme indiqué en section §IV.2.4.b. . Une réaction intermédiaire est attendue jusqu'à environ 190 m de l'atelier. Ces résultats concernent un niveau de bruit instantané et ne tiennent pas compte de la sensibilité acoustique des espèces.

Tableau 10 : Synthèse des données de modélisation de l'atelier de dragage (niveaux sonores instantanés et non-pondérés)

Dragage du chenal de navigation Bruit continu – Été (cas conservateur)	Niveau SL à 1m (dB réf. 1μPa)	Niveaux sonores moyens à 750m (dB réf. 1μPa)
Backhoe dredger	178.3	131 ± 3

Analyse indépendante de l'espèce animale (niveaux instantanés sur 1sec et non-pondérés)						
Empreinte sonore de l'atelier			Distance de modification comportementale			
			Mammifères marins			Tortues marines (km)
Moy (km)	Max (km)	Aire (km²)	Légère (km)	Intermédiaire (km)	Avérée (km)	
4.9	10.4	106.7	2.2	0.19	Absence	Absence

■ - Seuil manquant dans la littérature, valeur appliquée à titre conservateur : 166 dB ref 1μPa

V.3.2. Clapage des matériaux dragués

Le résultat de la modélisation du bruit de l'atelier de clapage est présenté en Figure 41. L'empreinte sonore de cet atelier devrait s'étendre au maximum jusqu'à 24km. La propagation du bruit est favorisée vers l'Ouest (vers le large), et limitée à l'Est en raison de la remontée bathymétrique de l'île de Saint Martin. Des résurgences du niveau sonore apparaissent localement, et sont probablement dues à des réflexions du son sur le fond marin et aux profils de célérité.

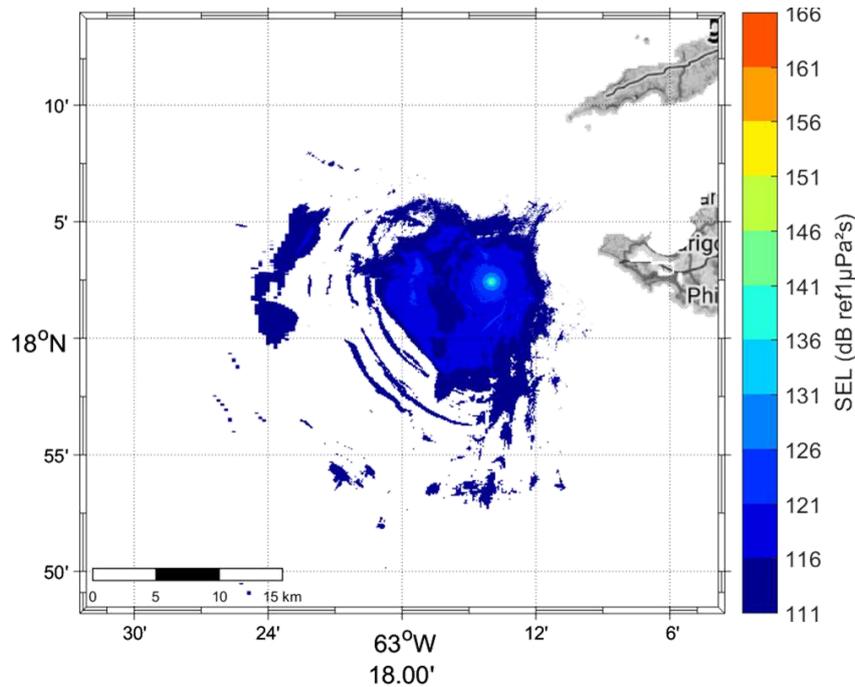


Figure 41 : Empreinte sonore de l'atelier de clapage

Le Tableau 11 présente une synthèse des données de modélisation du scénario acoustique de l'atelier de clapage. Ces résultats indiquent qu'une réaction intermédiaire est susceptible de se produire chez les mammifères marins jusqu'à 90 m de cet atelier.

Tableau 11 : Synthèse des données de modélisation de l'atelier de clapage (niveaux sonores instantanés et non-pondérés)

Clapage Bruit impulsif – Été (cas conservateur)	Niveau SL à 1m (dB réf. 1µPa²s)	Niveaux sonores moyens à 750m (dB réf. 1µPa²s)
• Barge à fond ouvrant	180	125 ± 3

Analyse indépendante de l'espèce animale (niveaux instantanés sur 1sec et non-pondérés)						
Empreinte sonore de l'atelier			Distance de modification comportementale			
			Mammifères marins			Tortues marines (km)
Moy (km)	Max (km)	Aire (km²)	Légère (km)	Intermédiaire (km)	Avérée (km)	
10.1	23.7	223.7	2.3	0.09	0.01	Absence

V.3.3. Forage vertical (quai croisière)

Le résultat de la modélisation du bruit de l'atelier de forage vertical dans le cadre des opérations d'enfoncement des ducs d'Albe du quai croisière est présenté en Figure 42. En l'absence de solution de réduction, l'empreinte sonore de cet atelier devrait s'étendre au maximum jusqu'à 4.2km, du fait des niveaux sonores relativement faibles générés par le forage. En présence d'une solution de réduction de type rideau de bulles simple (BBC), l'empreinte sonore du forage devrait se limiter à 300m de la source sonore.

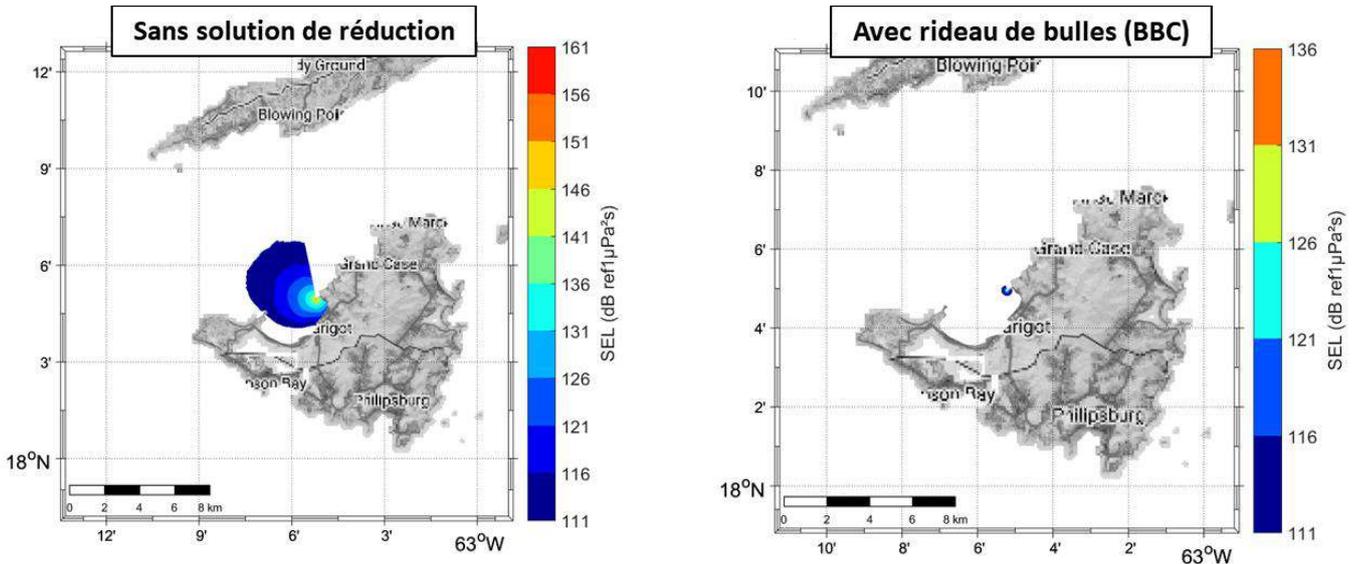


Figure 42 : Empreinte sonore de l'atelier de forage vertical pour le cas du quai croisière

Le Tableau 12 présente une synthèse des données de modélisation des scénarios acoustiques de l'atelier de forage vertical. D'après ces résultats, un risque de modification comportementale intermédiaire des mammifères marins est susceptible d'exister jusqu'à 120m des opérations de forage de pieux en l'absence d'une solution de réduction. Ce risque devrait être inexistant lorsqu'un rideau de bulles (BBC) est utilisé.

Tableau 12 : Synthèse des données de modélisation de l'atelier de forage vertical du quai croisière (niveaux sonores instantanés et non-pondérés)

Quai croisière – Forage vertical Bruit continu – Été (cas conservateur)	Solution de réduction	Niveau SL à 1m (dB réf. 1µPa)	Niveaux sonores moyens à 750m (dB réf. 1µPa)
Duc d'Albe diamètre 1.0m	Sans	176.4	127 ± 3
	Avec BBC	157.0	Non perception

■ - Seuil manquant dans la littérature, valeur appliquée à titre conservateur : 166 dB ref 1µPa

Solution de réduction	Analyse indépendante de l'espèce animale (niveaux instantanés sur 1sec et non-pondérés)						
	Empreinte sonore de l'atelier			Distance de modification comportementale			
				Mammifères marins			Tortues marines (km)
	Moy (km)	Max (km)	Aire (km²)	Légère (km)	Intermédiaire (km)	Avérée (km)	
Sans	1.6	4.2	15.9	0.9	0.12	Absence	Absence
Avec BBC	0.2	0.3	0.2	Absence	Absence	Absence	Absence

V.3.4. Battage de pieux (quai croisière)

Le résultat de la modélisation du bruit de l'atelier de battage des ducs d'Albe du quai croisière est présenté en Figure 43. En l'absence de solution de réduction, l'empreinte sonore de cet atelier devrait s'étendre au maximum jusqu'à 30km, à l'Ouest de l'île Anguilla. La propagation du bruit est limitée à l'Est par la présence de la partie courante de la digue du quai croisière.

En présence d'une solution de réduction de type rideau de bulles simple (BBC), l'empreinte sonore du battage est limitée à l'échelle de la baie de la Potence, jusqu'à 1.7km de la source sonore.

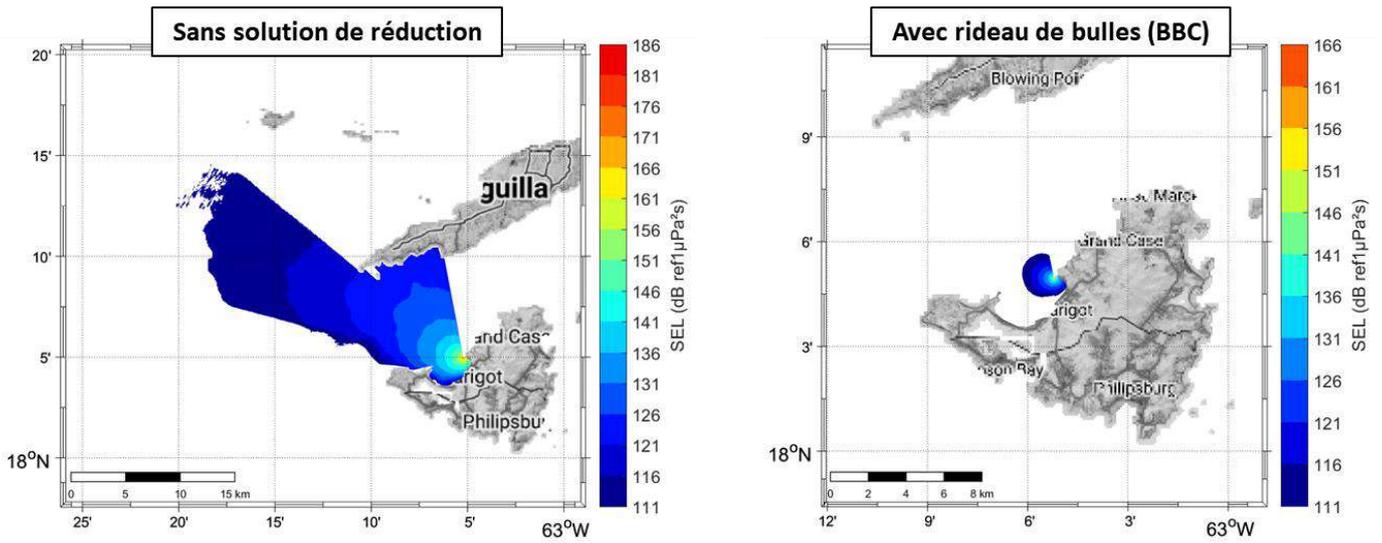


Figure 43 : Empreinte sonore de l'atelier de battage de pieux pour le cas du quai croisière

Le Tableau 13 présente une synthèse des données de modélisation des scénarios acoustiques de l'atelier de battage de pieux. D'après ces résultats, un risque de modification comportementale intermédiaire des mammifères marins est susceptible d'exister jusqu'à 890m des opérations de battage en l'absence d'une solution de réduction. Ce risque devrait être réduit à 70m lorsqu'un rideau de bulles (BBC) est utilisé.

Tableau 13 : Synthèse des données de modélisation de l'atelier de battage de pieux du quai croisière (niveaux sonores instantanés et non-pondérés)

Quai croisière – Battage de pieux Bruit impulsif – Été (cas conservateur)	Solution de réduction	Niveau SL à 1m (dB réf. 1µPa²s)	Niveaux sonores moyens à 750m (dB réf. 1µPa²s)
Duc d'Albe diamètre 1.0m	Sans	203.1	148 ± 3
	Avec BBC	183.6	119 ± 3

* Évaluation sur 1 seconde sans prise en compte du soft-start

Solution de réduction	Analyse indépendante de l'espèce animale (niveaux instantanés sur 1sec et non-pondérés)						
	Empreinte sonore de l'atelier			Distance de modification comportementale			
				Mammifères marins			Tortues marines (km)
	Moy (km)	Max (km)	Aire (km²)	Légère (km)	Intermédiaire (km)	Avérée (km)	
Sans*	4.4	29.5	224.1	3.1	0.89	0.14	Absence
Avec BBC*	0.9	1.7	3.6	0.5	0.07	Absence	Absence

V.3.5. Vibrofonçage (quai croisière)

Le résultat de la modélisation du bruit de l'atelier de vibrofonçage des ducs d'Albe du quai croisière est présenté en Figure 44. En l'absence de solution de réduction, l'empreinte sonore de cet atelier devrait s'étendre au maximum jusqu'à 50km, à l'Ouest de l'île Anguilla. La propagation du bruit est limitée à l'Est par la présence de la partie courante de la digue du quai croisière.

En présence d'une solution de réduction de type rideau de bulles simple (BBC), l'empreinte sonore du vibrofonçage est limitée à l'échelle de la baie de la Potence, jusqu'à 1.7km de la source sonore.

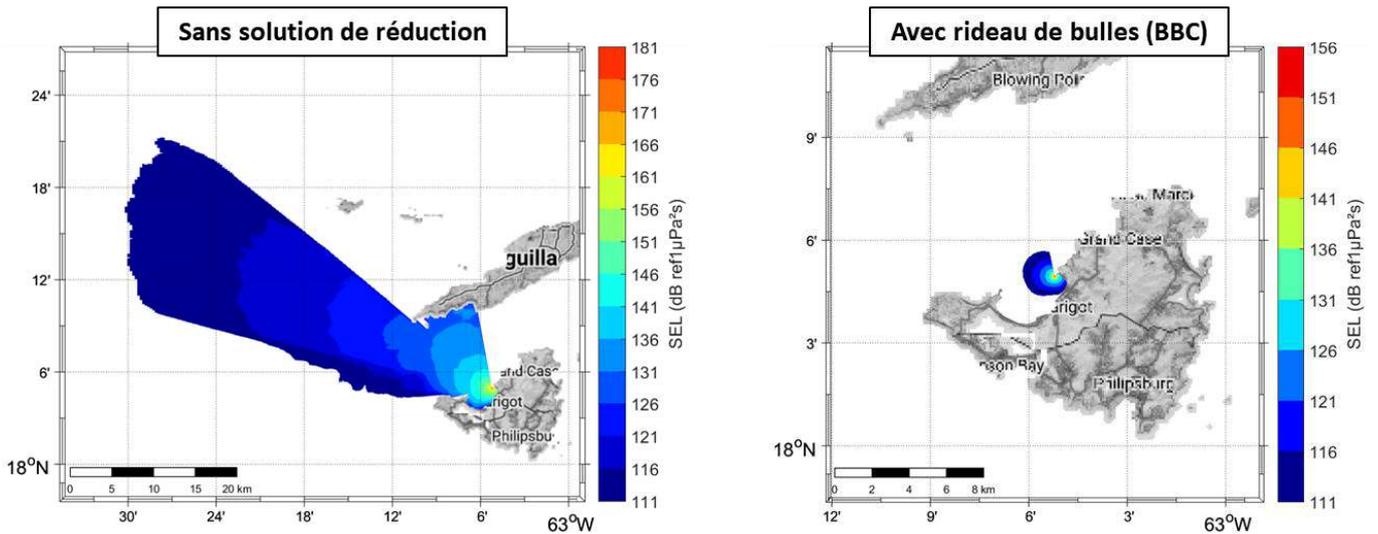


Figure 44 : Empreinte sonore de l'atelier de vibrofonçage pour le cas du quai croisière

Le Tableau 14 présente une synthèse des données de modélisation des scénarios acoustiques de l'atelier de forage vertical. D'après ces résultats, un risque de modification comportementale intermédiaire des mammifères marins est susceptible d'exister jusqu'à 1.26km des opérations de battage en l'absence d'une solution de réduction. Ce risque devrait être réduit à 50m lorsqu'un rideau de bulles (BBC) est utilisé.

Tableau 14 : Synthèse des données de modélisation de l'atelier de vibrofonçage du quai croisière (niveaux sonores instantanés et non-pondérés)

Quai croisière – Vibrofonçage Bruit continu – Été (cas conservateur)	Solution de réduction	Niveau SL à 1m (dB réf. 1µPa)	Niveaux sonores moyens à 750m (dB réf. 1µPa)
Duc d'Albe diamètre 1.0m	Sans	198.3	152 ± 3
	Avec BBC	174.2	119 ± 3

■ - Seuil manquant dans la littérature, valeur appliquée à titre conservateur : 166 dB ref 1µPa

Solution de réduction	Analyse indépendante de l'espèce animale (niveaux instantanés sur 1sec et non-pondérés)						
	Empreinte sonore de l'atelier			Distance de modification comportementale			
				Mammifères marins			Tortues marines (km)
	Moy (km)	Max (km)	Aire (km²)	Légère (km)	Intermédiaire (km)	Avérée (km)	
Sans	6.4	49.5	644.6	3.9	1.26	0.21	Absence
Avec BBC	0.9	1.8	3.9	0.5	0.05	Absence	Absence

V.3.6. Forage vertical (quais commerce)

Le résultat de la modélisation du bruit de l'atelier de forage vertical dans le cadre des opérations d'enfoncement des ducs d'Albe des quais commerce est présenté en Figure 45. En l'absence de solution de réduction, l'empreinte sonore de cet atelier devrait s'étendre au maximum jusqu'à 3.7km, du fait des niveaux sonores relativement faibles générés par le forage. En présence d'une solution de réduction de type rideau de bulles simple (BBC), l'empreinte sonore du forage devrait se limiter à 300m de la source sonore.

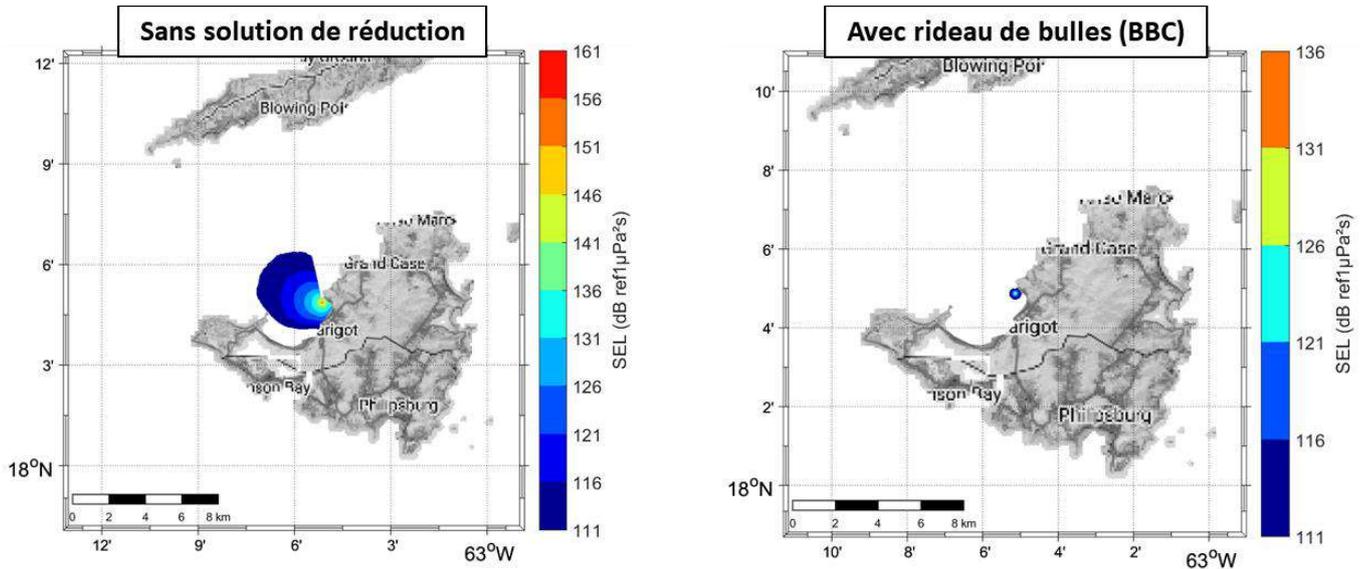


Figure 45 : Empreinte sonore de l'atelier de forage vertical pour le cas des quais commerce

Le Tableau 15 présente une synthèse des données de modélisation des scénarios acoustiques de l'atelier de forage vertical. D'après ces résultats, un risque de modification comportementale intermédiaire des mammifères marins est susceptible d'exister jusqu'à 190m des opérations de forage de pieux en l'absence d'une solution de réduction. Ce risque devrait être inexistant lorsqu'un rideau de bulles (BBC) est utilisé.

Tableau 15 : Synthèse des données de modélisation de l'atelier de forage vertical des quais commerce (niveaux sonores instantanés et non-pondérés)

Quais commerce – Forage vertical Bruit continu – Été (cas conservateur)	Solution de réduction	Niveau SL à 1m (dB réf. 1µPa)	Niveaux sonores moyens à 750m (dB réf. 1µPa)
Duc d'Albe diamètre 1.1m	Sans	177.4	127 ± 3
	Avec BBC	158.0	Non perception

■ - Seuil manquant dans la littérature, valeur appliquée à titre conservateur : 166 dB ref 1µPa

Solution de réduction	Analyse indépendante de l'espèce animale (niveaux instantanés sur 1sec et non-pondérés)						
	Empreinte sonore de l'atelier			Distance de modification comportementale			
				Mammifères marins			Tortues marines (km)
	Moy (km)	Max (km)	Aire (km²)	Légère (km)	Intermédiaire (km)	Avérée (km)	
Sans	1.5	3.7	12.5	0.8	0.19	Absence	Absence
Avec BBC	0.3	0.3	0.2	0.1	Absence	Absence	Absence

V.3.7. Battage de pieux (quais commerce)

Le résultat de la modélisation du bruit de l'atelier de battage des ducs d'Albe des quai commerce est présenté en Figure 46. En l'absence de solution de réduction, l'empreinte sonore de cet atelier devrait s'étendre au maximum jusqu'à 25km, à l'Ouest de l'île Anguilla. La propagation du bruit est limitée à l'Est par la digue existante en l'état actuel du port. Bien que le diamètre des ducs d'Albe soit légèrement plus important sur le quai commerce, les empreintes sonores générées sont moins larges en raison d'une hauteur d'eau plus faible qui limite la propagation acoustique.

En présence d'une solution de réduction de type rideau de bulles simple (BBC), l'empreinte sonore du battage est limitée à l'échelle de la baie de la Potence, jusqu'à 1.6km de la source sonore.

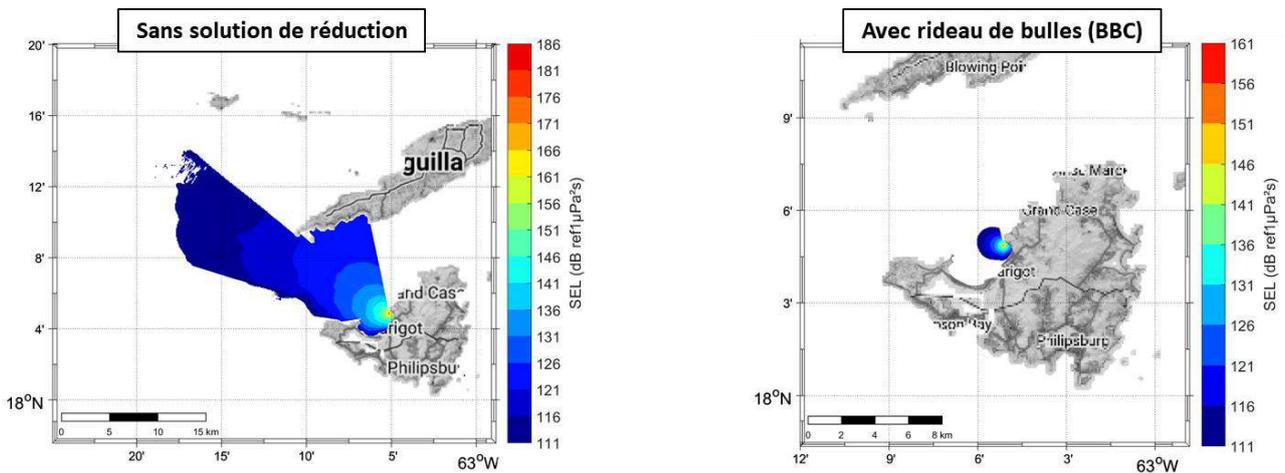


Figure 46 : Empreinte sonore de l'atelier de battage de pieux pour le cas des quais commerce

Le Tableau 16 présente une synthèse des données de modélisation des scénarios acoustiques de l'atelier de battage de pieux. D'après ces résultats, un risque de modification comportementale intermédiaire des mammifères marins est susceptible d'exister jusqu'à 860m des opérations de battage en l'absence d'une solution de réduction. Ce risque devrait être réduit à 110m lorsqu'un rideau de bulles (BBC) est utilisé.

Tableau 16 : Synthèse des données de modélisation de l'atelier de battage de pieux des quais commerce (niveaux sonores instantanés et non-pondérés)

Quais commerce – Battage de pieux Bruit impulsif – Été (cas conservateur)	Solution de réduction	Niveau SL à 1m (dB réf. 1µPa²s)	Niveaux sonores moyens à 750m (dB réf. 1µPa²s)
Duc d'Albe diamètre 1.1m	Sans	204.1	148 ± 3
	Avec BBC	184.6	118 ± 3

* Évaluation sur 1 seconde sans prise en compte du soft-start

Solution de réduction	Analyse indépendante de l'espèce animale (niveaux instantanés sur 1sec et non-pondérés)						
	Empreinte sonore de l'atelier			Distance de modification comportementale			
				Mammifères marins			Tortues marines (km)
	Moy (km)	Max (km)	Aire (km²)	Légère (km)	Intermédiaire (km)	Avérée (km)	
Sans*	4.1	25.3	199.8	3.0	0.86	0.22	Absence
Avec BBC*	0.8	1.6	3.0	0.5	0.11	Absence	Absence

V.3.8. Vibrofonçage (quais commerce)

Le résultat de la modélisation du bruit de l'atelier de vibrofonçage des ducs d'Albe des quais commerce est présenté en Figure 47. En l'absence de solution de réduction, l'empreinte sonore de cet atelier devrait s'étendre au maximum jusqu'à 45km, à l'Ouest de l'île Anguilla. La propagation du bruit est limitée à l'Est par la présence de la digue existante en l'état actuel du port.

En présence d'une solution de réduction de type rideau de bulles simple (BBC), l'empreinte sonore du vibrofonçage est limitée à l'échelle de la baie de la Potence, jusqu'à 1.6km de la source sonore.

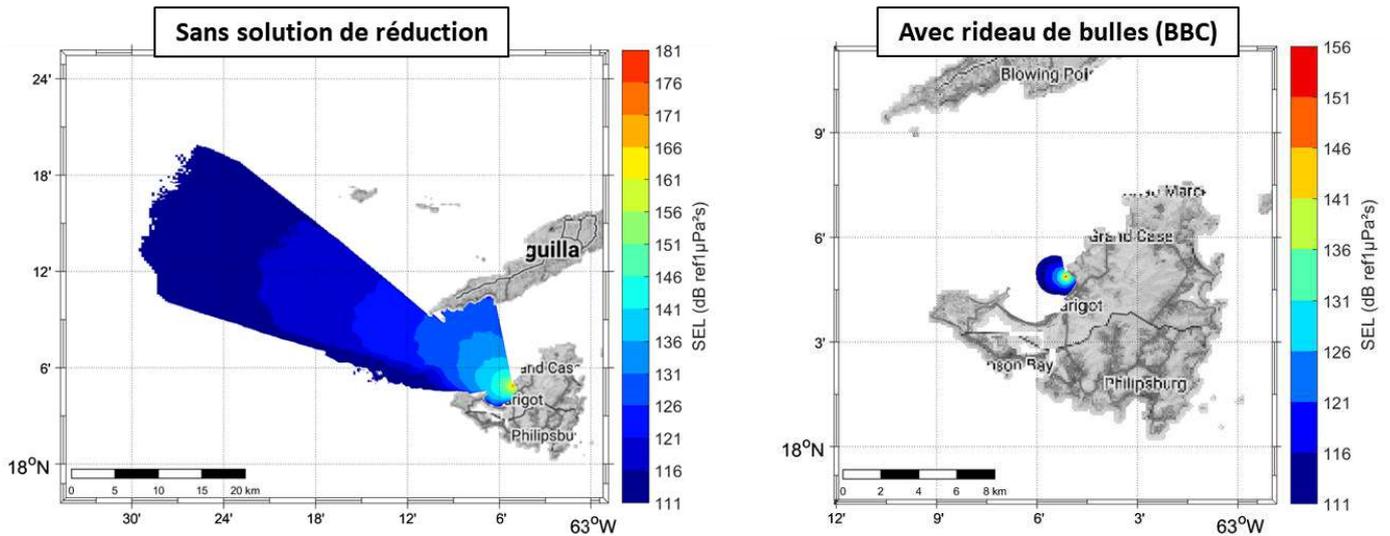


Figure 47 : Empreinte sonore de l'atelier de vibrofonçage pour le cas des quais commerce

Le Tableau 17 présente une synthèse des données de modélisation des scénarios acoustiques de l'atelier de vibrofonçage. D'après ces résultats, un risque de modification comportementale intermédiaire des mammifères marins est susceptible d'exister jusqu'à 1.17km de cet atelier en l'absence d'une solution de réduction, et jusqu'à 100m pour les tortues. Ce risque devrait être réduit à 80m lorsqu'un rideau de bulles (BBC) est utilisé.

Tableau 17 : Synthèse des données de modélisation de l'atelier de vibrofonçage des quais commerce (niveaux sonores instantanés et non-pondérés)

Quais commerce – Vibrofonçage Bruit continu – Été (cas conservateur)	Solution de réduction	Niveau SL à 1m (dB réf. 1µPa)	Niveaux sonores moyens à 750m (dB réf. 1µPa)
Duc d'Albe diamètre 1.1m	Sans	199.3	151 ± 3
	Avec BBC	177.6	118 ± 3

■ - Seuil manquant dans la littérature, valeur appliquée à titre conservateur : 166 dB ref 1µPa

Solution de réduction	Analyse indépendante de l'espèce animale (niveaux instantanés sur 1sec et non-pondérés)						
	Empreinte sonore de l'atelier			Distance de modification comportementale			
				Mammifères marins			Tortues marines (km)
	Moy (km)	Max (km)	Aire (km²)	Légère (km)	Intermédiaire (km)	Avérée (km)	
Sans	6.0	45.7	565.0	3.7	1.17	0.27	0.1
Avec BBC	0.8	1.6	3.2	0.5	0.08	Absence	Absence

V.4. Estimation des distances de risque et identification des catégories d'espèces à risque

Cette section reprend la base des résultats présentés précédemment à propos de l'empreinte sonore des ateliers bruyants du projet, cette fois en intégrant les effets prolongés du bruit sur la faune marine et en contextualisant les résultats en fonction de la sensibilité acoustique des espèces animales identifiées comme étant potentiellement présentes dans la zone du projet (voir section §IV.2.2.).

Conformément aux recommandations des consensus (NOAA, 2018) et (B. L. Southall et al., 2019) quant aux cétacés, (McCauley et al., 2000) et (Popper, Hawkins, Fay, Mann, Bartol, Carlson, Coombs, Ellison, Gentry, Halvorsen, Løkkeborg, et al., 2014) quant aux poissons et tortues marines ; les effets prolongés du bruit de chaque type d'atelier sont comparés aux seuils de tolérance sur 24 heures, en supposant l'animal en fuite dans un milieu ouvert, selon le Tableau 7 (Bailey & Thompson, 2006; Cape & Limited, n.d.; Scottish Natural Heritage, 2016). Les distances estimées correspondent à la position de l'animal au démarrage de la fuite supposée rectiligne, vis-à-vis de la position de l'atelier (Figure 24).

À titre conservateur, le fonctionnement des ateliers est supposé continu sur les durées quotidiennes présentées au Tableau 9, sans interruption ni variation du bruit émis au cours des périodes considérées (hormis la période de démarrage progressif pour les ateliers concernés par le soft-start).

V.4.1. Dragage du chenal de navigation

Le Tableau 18 présente les résultats obtenus à partir de la modélisation de l'atelier de dragage du chenal de navigation, dont les effets sont calculés sur une durée quotidienne ininterrompue de 24h et en tenant compte du modèle de fuite des animaux. Une seule barge est considérée.

Tableau 18 : Évaluation des distances de risques vis-à-vis de la faune marine pour l'atelier de dragage

Dragage du chenal Backhoe dredger (1 seule barge considérée) <i>Bruit continu – Été (cas conservateur)</i> Durée quotidienne : 24h	Empreinte sonore Niveaux instantanés sur 1sec Avec pondération selon l'audiogramme des espèces			Blessure temporaire TTS Cumul des effets sur la durée quotidienne de l'atelier (avec modèle de fuite)			Blessure permanente PTS Cumul des effets sur la durée quotidienne de l'atelier (avec modèle de fuite)		
	Moy (km)	Max (km)	Aire (km ²)	Moy (km)	Max (km)	Aire (km ²)	Moy (km)	Max (km)	Aire (km ²)
Cétacés Très Hautes Fréquences (VHF)	0.6	0.6	1.1	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
Cétacés Hautes Fréquences (HF)	0.9	1.1	2.6	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
Cétacés Basses Fréquences (LF)	4.9	10.4	103.3	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
Pinnipèdes dans l'eau (P)	3.2	5.1	36.1	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
Tortues marines (T)	3.3	5.4	39.2						
Poissons sans vessie natatoire (F)	3.4	5.9	43.7						
Poissons avec vessie sans cils sensitifs (FB)	4.8	10.4	98.2						
Poissons avec vessie avec cils sensitifs (FBL)	3.4	5.9	43.7						

 - Non évaluable (seuil manquant dans la littérature)

Compte tenu des niveaux sonores relativement faibles émis par la barge munie d'une pelle rétro-caveuse, les opérations de dragage ne devraient pas générer de risque de blessure temporaire ou permanente sur les espèces animales cibles de l'étude.

V.4.2. Clapage des matériaux excédentaires

Le Tableau 19 présente les résultats obtenus à partir de la modélisation de l'atelier de clapage, assimilé à un bruit impulsif, dont les effets sont calculés sur une durée quotidienne de 10 secondes et en tenant compte du modèle de fuite des animaux. Un seul clapage par jour est considéré.

Tableau 19 : Évaluation des distances de risques vis-à-vis de la faune marine pour l'atelier de clapage

Clapage Barge à fond ouvrant (1 clapage / jour) <i>Bruit impulsif – Été (cas conservateur)</i> Durée quotidienne : 10 secondes	Empreinte sonore			Blessure temporaire TTS			Blessure permanente PTS		
	Niveaux instantanés sur 1sec Avec pondération selon l'audiogramme des espèces			Cumul des effets sur la durée quotidienne de l'atelier (avec modèle de fuite)			Cumul des effets sur la durée quotidienne de l'atelier (avec modèle de fuite)		
	Moy (km)	Max (km)	Aire (km ²)	Moy (km)	Max (km)	Aire (km ²)	Moy (km)	Max (km)	Aire (km ²)
Cétacés Très Hautes Fréquences (VHF)	0.2	0.3	0.2	0.01	0.03	0.01	Absence	Absence	Absence
Cétacés Hautes Fréquences (HF)	0.3	0.4	0.3	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
Cétacés Basses Fréquences (LF)	8.9	19.6	158.1	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
Pinnipèdes dans l'eau (P)	2.6	6.0	16.4	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
Tortues marines (T)	8.0	19.6	139.4		Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
Poissons sans vessie natatoire (F)	8.5	19.6	156.2	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
Poissons avec vessie sans cils sensitifs (FB)	10.0	23.7	213.3	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
Poissons avec vessie avec cils sensitifs (FBL)	8.5	19.6	156.2	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence

- Non évaluable (seuil manquant dans la littérature)

D'après ces résultats, les opérations de clapage pourraient générer un risque de blessure temporaire sur la catégorie acoustique des cétacés très hautes fréquences (marsouin commun, cachalot nain ou pygmée) jusqu'à une distance moyenne de 10m de la source de bruit.

V.4.3. Forage vertical (quai croisière)

Le Tableau 20 présente les résultats obtenus à partir de la modélisation de l'atelier de forage mis en œuvre dans le cadre de la construction du quai croisière, dont les effets sont calculés sur une durée quotidienne de 8h et en tenant compte du modèle de fuite des animaux. Ce tableau est divisé en 2 sections pour distinguer les résultats obtenus avec et sans solution de réduction (rideau de bulles simple BBC).

Tableau 20 : Évaluation des distances de risques vis-à-vis de la faune marine pour l'atelier de forage vertical (quai croisière)

Forage vertical Duc d'Albe quai croisière (diamètre 1m) <i>Bruit continu – Été (cas conservateur)</i> Durée quotidienne : 8h		Empreinte sonore			Blessure temporaire TTS			Blessure permanente PTS		
		Niveaux instantanés sur 1sec Avec pondération selon l'audiogramme des espèces			Cumul des effets sur la durée quotidienne de l'atelier (avec modèle de fuite)			Cumul des effets sur la durée quotidienne de l'atelier (avec modèle de fuite)		
		Moy (km)	Max (km)	Aire (km ²)	Moy (km)	Max (km)	Aire (km ²)	Moy (km)	Max (km)	Aire (km ²)
Sans solution de réduction	Cétacés Très Hautes Fréquences (VHF)	0.1	0.1	0.0	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Cétacés Hautes Fréquences (HF)	0.1	0.1	0.0	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Cétacés Basses Fréquences (LF)	1.5	3.9	14.2	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Pinnipèdes dans l'eau (P)	0.8	1.6	3.3	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Tortues marines (T)	1.4	3.2	10.6						
	Poissons sans vessie natatoire (F)	1.4	3.3	11.3						
	Poissons avec vessie sans cils sensitifs (FB)	1.6	4.1	15.3						
	Poissons avec vessie avec cils sensitifs (FBL)	1.4	3.3	11.3						
Avec rideau de bulles (BBC)	Cétacés Très Hautes Fréquences (VHF)	0.0	0.0	0.0	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Cétacés Hautes Fréquences (HF)	0.0	0.0	0.0	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Cétacés Basses Fréquences (LF)	0.1	0.2	0.1	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Pinnipèdes dans l'eau (P)	0.0	0.0	0.0	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Tortues marines (T)	0.2	0.2	0.1						
	Poissons sans vessie natatoire (F)	0.2	0.2	0.1						
	Poissons avec vessie sans cils sensitifs (FB)	0.2	0.3	0.2						
	Poissons avec vessie avec cils sensitifs (FBL)	0.2	0.2	0.1						

 - Non évaluable (seuil manquant dans la littérature)

Compte-tenu des niveaux sonores relativement faibles générés par cet atelier, les opérations de forage des pieux du quai croisière ne devraient pas générer de risque de blessure temporaire ou permanente sur les espèces animales cibles de l'étude, indépendamment de l'utilisation d'un rideau de bulles (BBC).

V.4.4. Battage de pieux (quai croisière)

Les Tableaux 21 et Tableau 22 présentent les résultats obtenus à partir de la modélisation de l'atelier de battage de pieux mis en œuvre dans le cadre de la construction du quai croisière, sans puis avec respect d'une procédure de soft-start. Les effets de l'atelier de battage sont calculés sur une durée quotidienne de 8h et en tenant compte du modèle de fuite des animaux, et chaque tableau est divisé en 2 sections pour distinguer les résultats obtenus avec et sans solution de réduction (rideau de bulles simple BBC).

Tableau 21 : Évaluation des distances de risques vis-à-vis de la faune marine pour l'atelier de battage de pieux sans soft-start (quai croisière)

Battage de pieux Duc d'Albe quai croisière (diamètre 1m)		Empreinte sonore			Blessure temporaire TTS			Blessure permanente PTS		
		Niveaux instantanés sur 1sec Avec pondération selon l'audiogramme des espèces			Cumul des effets sur la durée quotidienne de l'atelier (avec modèle de fuite)			Cumul des effets sur la durée quotidienne de l'atelier (avec modèle de fuite)		
		Moy (km)	Max (km)	Aire (km ²)	Moy (km)	Max (km)	Aire (km ²)	Moy (km)	Max (km)	Aire (km ²)
SANS SOFT START										
Bruit impulsif – Été (cas conservateur)										
Durée quotidienne : 8h										
Sans solution de réduction	Cétacés Très Hautes Fréquences (VHF)	0.3	0.5	0.5	0.03	0.06	0.01	Absence	Absence	Absence
	Cétacés Hautes Fréquences (HF)	0.7	1.3	2.4	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Cétacés Basses Fréquences (LF)	4.4	29.5	218.3	0.43	0.87	0.89	Absence	Absence	Absence
	Pinnipèdes dans l'eau (P)	3.3	15.1	101.6	0.02	0.07	0.01	Absence	Absence	Absence
	Tortues marines (T)	3.6	18.2	133.0	-	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Poissons sans vessie natatoire (F)	3.7	19.0	139.3	0.01	0.04	Absence	Absence	Absence	Absence
	Poissons avec vessie sans cils sensitifs (FB)	4.3	29.5	212.9	0.01	0.04	Absence	Absence	Absence	Absence
	Poissons avec vessie avec cils sensitifs (FBL)	3.7	19.0	139.3	0.01	0.04	Absence	Absence	Absence	Absence
Avec rideau de bulles (BBC)	Cétacés Très Hautes Fréquences (VHF)	0.0	0.0	0.0	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Cétacés Hautes Fréquences (HF)	0.0	0.0	0.0	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Cétacés Basses Fréquences (LF)	0.8	1.5	2.9	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Pinnipèdes dans l'eau (P)	0.3	0.4	0.4	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Tortues marines (T)	0.8	1.6	3.2	-	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Poissons sans vessie natatoire (F)	0.8	1.7	3.3	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Poissons avec vessie sans cils sensitifs (FB)	0.8	1.7	3.6	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Poissons avec vessie avec cils sensitifs (FBL)	0.8	1.7	3.3	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence

- Non évaluable (seuil manquant dans la littérature)

Sans soft start, les opérations de battage des pieux du quai croisière pourraient générer un risque de blessure temporaire sur les catégories acoustiques des cétacés basses et très hautes fréquences (jusqu'à 430m et 30m respectivement), ainsi que sur les pinnipèdes (jusqu'à 20m) et les poissons (jusqu'à 10m). Ces risques devraient être inexistantes lorsqu'un rideau de bulles (BBC) est utilisé.

Tableau 22 : Évaluation des distances de risques vis-à-vis de la faune marine pour l'atelier de battage de pieux avec soft-start (quai croisière)

Battage de pieux Duc d'Albe quai croisière (diamètre 1m) AVEC SOFT START <i>Bruit impulsif – Été (cas conservateur)</i> Durée quotidienne : 8h		Empreinte sonore			Blessure temporaire TTS			Blessure permanente PTS		
		Niveaux instantanés sur 1sec Avec pondération selon l'audiogramme des espèces			Cumul des effets sur la durée quotidienne de l'atelier (avec modèle de fuite)			Cumul des effets sur la durée quotidienne de l'atelier (avec modèle de fuite)		
		Moy (km)	Max (km)	Aire (km ²)	Moy (km)	Max (km)	Aire (km ²)	Moy (km)	Max (km)	Aire (km ²)
Sans solution de réduction	Cétacés Très Hautes Fréquences (VHF)	0.3	0.5	0.5	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Cétacés Hautes Fréquences (HF)	0.7	1.3	2.4	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Cétacés Basses Fréquences (LF)	4.4	29.5	218.3	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Pinnipèdes dans l'eau (P)	3.3	15.1	101.6	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Tortues marines (T)	3.6	18.2	133.0		Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Poissons sans vessie natatoire (F)	3.7	19.0	139.3	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Poissons avec vessie sans cils sensitifs (FB)	4.3	29.5	212.9	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Poissons avec vessie avec cils sensitifs (FBL)	3.7	19.0	139.3	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
Avec rideau de bulles (BBC)	Cétacés Très Hautes Fréquences (VHF)	0.0	0.0	0.0	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Cétacés Hautes Fréquences (HF)	0.0	0.0	0.0	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Cétacés Basses Fréquences (LF)	0.8	1.5	2.9	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Pinnipèdes dans l'eau (P)	0.3	0.4	0.4	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Tortues marines (T)	0.8	1.6	3.2		Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Poissons sans vessie natatoire (F)	0.8	1.7	3.3	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Poissons avec vessie sans cils sensitifs (FB)	0.8	1.7	3.6	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Poissons avec vessie avec cils sensitifs (FBL)	0.8	1.7	3.3	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence

 - Non évaluable (seuil manquant dans la littérature)

Avec la mise en œuvre d'un soft start, les opérations de battage des pieux du quai croisière ne devraient pas générer de risque de blessure temporaire ou permanente sur les espèces animales cibles de l'étude, indépendamment de l'utilisation d'un rideau de bulles (BBC).

V.4.5. Vibrofonçage de pieux (quai croisière)

Le Tableau 23 présente les résultats obtenus à partir de la modélisation de l'atelier de vibrofonçage mis en œuvre dans le cadre de la construction du quai croisière, dont les effets sont calculés sur une durée quotidienne de 8h et en tenant compte du modèle de fuite des animaux. Ce tableau est divisé en 2 sections pour distinguer les résultats obtenus avec et sans solution de réduction (rideau de bulles simple BBC).

Tableau 23 : Évaluation des distances de risques vis-à-vis de la faune marine pour l'atelier de vibrofonçage (quai croisière)

Vibrofonçage de pieux Duc d'Albe quai croisière (diamètre 1m) <i>Bruit continu – Été (cas conservateur)</i> Durée quotidienne : 8h		Empreinte sonore			Blessure temporaire TTS			Blessure permanente PTS		
		Niveaux instantanés sur 1sec Avec pondération selon l'audiogramme des espèces			Cumul des effets sur la durée quotidienne de l'atelier (avec modèle de fuite)			Cumul des effets sur la durée quotidienne de l'atelier (avec modèle de fuite)		
		Moy (km)	Max (km)	Aire (km ²)	Moy (km)	Max (km)	Aire (km ²)	Moy (km)	Max (km)	Aire (km ²)
Sans solution de réduction	Cétacés Très Hautes Fréquences (VHF)	1.6	3.5	14.7	0.02	0.04	0.01	Absence	Absence	Absence
	Cétacés Hautes Fréquences (HF)	2.1	6.2	28.6	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Cétacés Basses Fréquences (LF)	6.4	49.0	633.5	0.01	0.03	Absence	Absence	Absence	Absence
	Pinnipèdes dans l'eau (P)	5.0	31.5	309.1	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Tortues marines (T)	4.7	31.1	270.9						
	Poissons sans vessie natatoire (F)	4.9	32.6	300.4						
	Poissons avec vessie sans cils sensitifs (FB)	6.2	47.7	592.9						
	Poissons avec vessie avec cils sensitifs (FBL)	4.9	32.6	300.4						
Avec rideau de bulles (BBC)	Cétacés Très Hautes Fréquences (VHF)	0.3	0.5	0.4	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Cétacés Hautes Fréquences (HF)	0.3	0.5	0.5	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Cétacés Basses Fréquences (LF)	0.8	1.6	3.2	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Pinnipèdes dans l'eau (P)	0.4	0.6	0.7	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Tortues marines (T)	0.8	1.5	3.0						
	Poissons sans vessie natatoire (F)	0.8	1.6	3.2						
	Poissons avec vessie sans cils sensitifs (FB)	0.9	1.7	3.7						
	Poissons avec vessie avec cils sensitifs (FBL)	0.8	1.6	3.2						

 - Non évaluable (seuil manquant dans la littérature)

D'après ces résultats, il apparaît que les opérations de vibrofonçage des pieux du quai croisière pourraient générer un risque de blessure temporaire sur les catégories acoustiques des cétacés très hautes et basses fréquences (jusqu'à 20m et 10m respectivement).

Ces risques devraient être inexistantes lorsqu'un rideau de bulles (BBC) est utilisé.

V.4.6. Forage vertical (quais commerce)

Le Tableau 24 présente les résultats obtenus à partir de la modélisation de l'atelier de forage mis en œuvre dans le cadre de la construction des quais commerce, dont les effets sont calculés sur une durée quotidienne de 8h et en tenant compte du modèle de fuite des animaux. Ce tableau est divisé en 2 sections pour distinguer les résultats obtenus avec et sans solution de réduction (rideau de bulles simple BBC).

Tableau 24 : Évaluation des distances de risques vis-à-vis de la faune marine pour l'atelier de forage vertical (quais commerce)

Forage de pieux Duc d'Albe quais commerce (diamètre 1.1m) <i>Bruit continu – Été (cas conservateur)</i> Durée quotidienne : 8h		Empreinte sonore			Blessure temporaire TTS			Blessure permanente PTS		
		Niveaux instantanés sur 1sec Avec pondération selon l'audiogramme des espèces			Cumul des effets sur la durée quotidienne de l'atelier (avec modèle de fuite)			Cumul des effets sur la durée quotidienne de l'atelier (avec modèle de fuite)		
		Moy (km)	Max (km)	Aire (km ²)	Moy (km)	Max (km)	Aire (km ²)	Moy (km)	Max (km)	Aire (km ²)
Sans solution de réduction	Cétacés Très Hautes Fréquences (VHF)	0.1	0.1	0.0	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Cétacés Hautes Fréquences (HF)	0.1	0.2	0.1	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Cétacés Basses Fréquences (LF)	1.4	3.5	11.4	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Pinnipèdes dans l'eau (P)	0.8	1.5	2.9	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Tortues marines (T)	1.3	2.9	8.4						
	Poissons sans vessie natatoire (F)	1.3	3.0	9.0						
	Poissons avec vessie sans cils sensitifs (FB)	1.4	3.6	12.0						
	Poissons avec vessie avec cils sensitifs (FBL)	1.3	3.0	9.0						
Avec rideau de bulles (BBC)	Cétacés Très Hautes Fréquences (VHF)	0.0	0.0	0.0	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Cétacés Hautes Fréquences (HF)	0.0	0.0	0.0	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Cétacés Basses Fréquences (LF)	0.2	0.2	0.2	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Pinnipèdes dans l'eau (P)	0.0	0.0	0.0	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Tortues marines (T)	0.2	0.3	0.2						
	Poissons sans vessie natatoire (F)	0.2	0.3	0.2						
	Poissons avec vessie sans cils sensitifs (FB)	0.3	0.3	0.2						
	Poissons avec vessie avec cils sensitifs (FBL)	0.2	0.3	0.2						

 - Non évaluable (seuil manquant dans la littérature)

Compte-tenu des niveaux sonores relativement faibles générés par le forage de puits de l'ordre d'un mètre de diamètre, et de la même façon que pour l'atelier de forage du quai croisière, les opérations de forage des quais commerce ne devraient pas générer de risque de blessure temporaire ou permanente sur les espèces animales cibles de l'étude, indépendamment de l'utilisation d'un rideau de bulles (BBC).

V.4.7. Battage de pieux (quais commerce)

Les Tableaux 25 et Tableau 26 présentent les résultats obtenus à partir de la modélisation de l'atelier de battage de pieux mis en œuvre dans le cadre de la construction des quais commerce, sans puis avec respect d'une procédure de soft-start. Les effets de l'atelier de battage sont calculés sur une durée quotidienne de 8h et en tenant compte du modèle de fuite des animaux, et chaque tableau est divisé en 2 sections pour distinguer les résultats obtenus avec et sans solution de réduction (rideau de bulles simple BBC).

Tableau 25 : Évaluation des distances de risques vis-à-vis de la faune marine pour l'atelier de battage de pieux sans soft-start (quais commerce)

Battage de pieux Duc d'Albe quais commerce (diamètre 1.1m)		Empreinte sonore			Blessure temporaire TTS			Blessure permanente PTS		
		Niveaux instantanés sur 1sec Avec pondération selon l'audiogramme des espèces			Cumul des effets sur la durée quotidienne de l'atelier (avec modèle de fuite)			Cumul des effets sur la durée quotidienne de l'atelier (avec modèle de fuite)		
		Moy (km)	Max (km)	Aire (km ²)	Moy (km)	Max (km)	Aire (km ²)	Moy (km)	Max (km)	Aire (km ²)
SANS SOFT START										
<i>Bruit impulsif – Été (cas conservateur)</i>										
Durée quotidienne : 8h										
Sans solution de réduction	Cétacés Très Hautes Fréquences (VHF)	0.4	0.5	0.6	0.05	0.07	0.01	Absence	Absence	Absence
	Cétacés Hautes Fréquences (HF)	0.7	1.1	2.1	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Cétacés Basses Fréquences (LF)	4.1	24.9	195.7	0.44	0.76	0.80	0.01	0.03	<0.01
	Pinnipèdes dans l'eau (P)	3.2	14.3	91.4	0.04	0.07	0.01	Absence	Absence	Absence
	Tortues marines (T)	3.6	17.6	124.8		Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Poissons sans vessie natatoire (F)	3.6	18.2	129.7	0.02	0.04	<0.01	Absence	Absence	Absence
	Poissons avec vessie sans cils sensitifs (FB)	4.1	24.2	191.0	0.04	0.07	0.01	Absence	Absence	Absence
	Poissons avec vessie avec cils sensitifs (FBL)	3.6	18.2	129.7	0.02	0.04	<0.01	Absence	Absence	Absence
Avec rideau de bulles (BBC)	Cétacés Très Hautes Fréquences (VHF)	0.0	0.0	0.0	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Cétacés Hautes Fréquences (HF)	0.0	0.0	0.0	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Cétacés Basses Fréquences (LF)	0.8	1.4	2.4	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Pinnipèdes dans l'eau (P)	0.4	0.4	0.5	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Tortues marines (T)	0.8	1.5	2.6		Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Poissons sans vessie natatoire (F)	0.8	1.5	2.8	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Poissons avec vessie sans cils sensitifs (FB)	0.8	1.6	3.0	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Poissons avec vessie avec cils sensitifs (FBL)	0.8	1.5	2.8	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence

 - Non évaluable (seuil manquant dans la littérature)

Sans soft start, les opérations de battage des pieux des quais commerce pourraient générer un risque de blessure temporaire sur les catégories acoustiques des cétacés basses et très hautes fréquences (jusqu'à 440m et 50m respectivement), ainsi que sur les pinnipèdes (jusqu'à 40m) et les poissons (jusqu'à 40m). Ces risques devraient être inexistantes lorsqu'un rideau de bulles (BBC) est utilisé.

Tableau 26 : Évaluation des distances de risques vis-à-vis de la faune marine pour l'atelier de battage de pieux avec soft-start (quais commerce)

Battage de pieux Duc d'Albe quais commerce (diamètre 1.1m) AVEC SOFT START <i>Bruit impulsif – Été (cas conservateur)</i> Durée quotidienne : 8h		Empreinte sonore Niveaux instantanés sur 1sec Avec pondération selon l'audiogramme des espèces			Blessure temporaire TTS Cumul des effets sur la durée quotidienne de l'atelier (avec modèle de fuite)			Blessure permanente PTS Cumul des effets sur la durée quotidienne de l'atelier (avec modèle de fuite)					
		Moy (km)	Max (km)	Aire (km ²)	Moy (km)	Max (km)	Aire (km ²)	Moy (km)	Max (km)	Aire (km ²)			
		Sans solution de réduction		Cétacés Très Hautes Fréquences (VHF)	0.4	0.5	0.6	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
Cétacés Hautes Fréquences (HF)	0.7			1.1	2.1	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence		
Cétacés Basses Fréquences (LF)	4.1			24.9	195.7	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence		
Pinnipèdes dans l'eau (P)	3.2			14.3	91.4	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence		
Tortues marines (T)	3.6			17.6	124.8		Absence	Absence	Absence	Absence	Absence		
Poissons sans vessie natatoire (F)	3.6			18.2	129.7	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence		
Poissons avec vessie sans cils sensitifs (FB)	4.1			24.2	191.0	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence		
Poissons avec vessie avec cils sensitifs (FBL)	3.6			18.2	129.7	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence		
Avec rideau de bulles (BBC)				Cétacés Très Hautes Fréquences (VHF)	0.0	0.0	0.0	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
				Cétacés Hautes Fréquences (HF)	0.0	0.0	0.0	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
				Cétacés Basses Fréquences (LF)	0.8	1.4	2.4	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
				Pinnipèdes dans l'eau (P)	0.4	0.4	0.5	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
				Tortues marines (T)	0.8	1.5	2.6		Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
				Poissons sans vessie natatoire (F)	0.8	1.5	2.8	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
				Poissons avec vessie sans cils sensitifs (FB)	0.8	1.6	3.0	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
		Poissons avec vessie avec cils sensitifs (FBL)	0.8	1.5	2.8	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence		

 - Non évaluable (seuil manquant dans la littérature)

Avec soft start, les opérations de battage des pieux des quais commerce ne devraient pas générer de risque de blessure temporaire ou permanente sur les espèces animales cibles de l'étude, indépendamment de l'utilisation d'un rideau de bulles (BBC).

V.4.8. Vibrofonçage de pieux (quais commerce)

Le Tableau 27 présente les résultats obtenus à partir de la modélisation de l'atelier de vibrofonçage mis en œuvre dans le cadre de la construction des quais commerce, dont les effets sont calculés sur une durée quotidienne de 8h et en tenant compte du modèle de fuite des animaux. Ce tableau est divisé en 2 sections pour distinguer les résultats obtenus avec et sans solution de réduction (rideau de bulles simple BBC).

Tableau 27 : Évaluation des distances de risques vis-à-vis de la faune marine pour l'atelier de vibrofonçage (quais commerce)

Vibrofonçage de pieux Duc d'Albe quais commerce (diamètre 1.1m) Bruit continu – Été (cas conservateur) Durée quotidienne : 8h		Empreinte sonore			Blessure temporaire TTS			Blessure permanente PTS		
		Niveaux instantanés sur 1sec Avec pondération selon l'audiogramme des espèces			Cumul des effets sur la durée quotidienne de l'atelier (avec modèle de fuite)			Cumul des effets sur la durée quotidienne de l'atelier (avec modèle de fuite)		
		Moy (km)	Max (km)	Aire (km ²)	Moy (km)	Max (km)	Aire (km ²)	Moy (km)	Max (km)	Aire (km ²)
Sans solution de réduction	Cétacés Très Hautes Fréquences (VHF)	1.4	3.0	10.8	0.04	0.07	0.01	Absence	Absence	Absence
	Cétacés Hautes Fréquences (HF)	1.9	5.0	22.3	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Cétacés Basses Fréquences (LF)	5.9	45.1	555.0	0.01	0.04	<0.01	Absence	Absence	Absence
	Pinnipèdes dans l'eau (P)	4.7	30.0	267.7	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Tortues marines (T)	4.4	29.3	237.3						
	Poissons sans vessie natatoire (F)	4.7	31.1	267.0						
	Poissons avec vessie sans cils sensitifs (FB)	5.8	43.8	518.8						
	Poissons avec vessie avec cils sensitifs (FBL)	4.7	31.1	267.0						
Avec rideau de bulles (BBC)	Cétacés Très Hautes Fréquences (VHF)	0.4	0.6	0.5	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Cétacés Hautes Fréquences (HF)	0.4	0.6	0.6	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Cétacés Basses Fréquences (LF)	0.8	1.4	2.7	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Pinnipèdes dans l'eau (P)	0.5	0.6	0.8	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
	Tortues marines (T)	0.8	1.4	2.5						
	Poissons sans vessie natatoire (F)	0.8	1.4	2.6						
	Poissons avec vessie sans cils sensitifs (FB)	0.8	1.6	3.0						
	Poissons avec vessie avec cils sensitifs (FBL)	0.8	1.4	2.6						

■ - Non évaluable (seuil manquant dans la littérature)

D'après ces résultats, les opérations de vibrofonçage des pieux du quai commerce pourraient générer un risque de blessure temporaire sur les catégories acoustiques des cétacés très hautes et basses fréquences (jusqu'à 40m et 10m respectivement).

Ces risques devraient être inexistantes lorsqu'un rideau de bulles (BBC) est utilisé.

V.5. Synthèse des résultats de modélisation

Les tableaux suivants rappellent les niveaux sonores des gabarits utilisés en données d'entrées de la modélisation acoustique, et les distances de perception du bruit de chaque atelier (empreintes sonores). Ils présentent également une synthèse des distances de risque de modification comportementale pour les mammifères marins et les tortues, puis finalement les distances de risque de dommages physiologiques associées à chaque atelier du projet.

Tableau 28 : Synthèse des données d'entrées de chaque atelier, des empreintes sonores et des niveaux moyens à 750m des opérations

Atelier :	Unité	SL @1m	Niveaux sonores instantanés et non-pondérés (valeurs moyennes)	
			Empreinte sonore (km)	Niveau sonore à 750m
Dragage du chenal	dB 1μPa	178.3	4.9	131±3
Clapage des matériaux dragués	dB 1μPa ² s	180.0	10.1	125±3
Battage des ducs d'Albe (quai croisière)	dB 1μPa ² s	203.1 (183.6 avec BBC)	4.4 (0.9 avec BBC)	148±3 (119±3 avec BBC)
Vibrofonçage des ducs d'Albe (quai croisière)	dB 1μPa	198.3 (174.2 avec BBC)	6.4 (0.9 avec BBC)	152±3 (119±3 avec BBC)
Forage des ducs d'Albe (quai croisière)	dB 1μPa	176.5 (157.0 avec BBC)	1.6 (0.2 avec BBC)	127±3 (absence avec BBC)
Battage des ducs d'Albe (quai commerce)	dB 1μPa ² s	204.0 (184.6 avec BBC)	4.1 (0.8 avec BBC)	148±3 (118±3 avec BBC)
Vibrofonçage des ducs d'Albe (quai commerce)	dB 1μPa	199.3 (177.6 avec BBC)	6.0 (0.8 avec BBC)	151±3 (118±3 avec BBC)
Forage des ducs d'Albe (quai commerce)	dB 1μPa	177.4 (158.0 avec BBC)	1.5 (0.3 avec BBC)	127±3 (absence avec BBC)

Tableau 29 : Synthèse des distances de risque de modification comportementale (Southall 2007)

Atelier :	Niveaux sonores instantanés et non-pondérés (sur 1 sec)			
	Mammifères marins			Tortues marines
	Léger (km)	Intermédiaire (km)	Avéré (km)	
Dragage du chenal	2.2	0.19	Absence	Absence
Clapage des matériaux dragués	2.3	0.09	0.01	Absence
Battage des ducs d'Albe (quai croisière)	3.1 (0.5 avec BBC)	0.89 (0.07 avec BBC)	0.14 (absence avec BBC)	Absence
Vibrofonçage des ducs d'Albe (quai croisière)	3.9 (0.5 avec BBC)	1.26 (0.05 avec BBC)	0.21 (absence avec BBC)	Absence
Forage des ducs d'Albe (quai croisière)	0.9 (absence avec BBC)	0.12 (absence avec BBC)	Absence (absence avec BBC)	Absence
Battage des ducs d'Albe (quai commerce)	3.0 (0.5 avec BBC)	0.86 (0.11 avec BBC)	0.22 (absence avec BBC)	Absence
Vibrofonçage des ducs d'Albe (quai commerce)	3.7 (0.5 avec BBC)	1.17 (0.08 avec BBC)	0.27 (absence avec BBC)	0.1 (absence avec BBC)
Forage des ducs d'Albe (quai commerce)	0.8 (0.1 avec BBC)	0.19 (absence avec BBC)	Absence	Absence

Tableau 30 : Synthèse des risques de dommages physiologiques (Southall 2019, Popper 2014, McCauley 2000)

Synthèse des risques de dommage physiologique Distances moyennes vis-à-vis de l'atelier - Été (cas conservateur)		Cumul des effets sur la durée quotidienne de l'atelier – avec modèle de fuite				
		Blessure temporaire (TTS)		Blessure permanente (PTS)		
Dragage du chenal		Absence		Absence		
Clapage des matériaux dragués		Cétacés Très Hautes Fréquences : 10m		Absence		
QUAI CROISIÈRE	Battage des ducs d'Albe	Sans BBC	Sans soft start	Cétacés Très Hautes Fréquences : 30m Cétacés Basses Fréquences : 430m Pinnipèdes dans l'eau : 20m Poissons (toutes catégories) : 10m	Absence	
		Sans BBC	Avec soft start	Absence	Absence	
		Avec BBC	Sans soft start	Absence	Absence	
		Avec BBC	Avec soft start	Absence	Absence	
	Vibrofonçage des ducs d'Albe	Sans solution de réduction		Cétacés Très Hautes Fréquences : 20m Cétacés Basses Fréquences : 10m	Absence	
		Avec BBC		Absence	Absence	
	Forage des ducs d'Albe	Sans solution de réduction		Absence	Absence	
		Avec BBC		Absence	Absence	
	QUAI COMMERCE	Battage des ducs d'Albe	Sans BBC	Sans soft start	Cétacés Très Hautes Fréquences : 50m Cétacés Basses Fréquences : 440m Pinnipèdes dans l'eau : 20m Poissons (toutes catégories) : 40m	Cétacés Basses Fréquences : 10m
			Sans BBC	Avec soft start	Absence	Absence
Avec BBC			Sans soft start	Absence	Absence	
Avec BBC			Avec soft start	Absence	Absence	
Vibrofonçage des ducs d'Albe		Sans solution de réduction		Cétacés Très Hautes Fréquences : 40m Cétacés Basses Fréquences : 10m	Absence	
		Avec BBC		Absence	Absence	
Forage des ducs d'Albe		Sans solution de réduction		Absence	Absence	
		Avec BBC		Absence	Absence	

Les ateliers possédant un risque de blessure physiologique sur la faune sous-marine sont colorés en orange dans le Tableau 30. Pour rappel, ceux-ci correspondent aux ateliers de battage et de vibrofonçage des quais lorsqu'aucune solution de réduction est mise en œuvre (rideau de bulles BBC ou soft-start). L'atelier de clapage est coloré en orange clair, car la seule catégorie d'espèce animale à risque est celle des cétacés très hautes fréquence, dont l'enjeu est à relativiser du fait de la faible probabilité que ces animaux fréquentent le site du projet.

Chapitre VI. Conclusions de l'étude d'impact

VI.1. Synthèse

L'étude d'impact en acoustique sous-marine a considéré plusieurs opérations bruyantes dans le cadre de l'extension et du réaménagement du port de Galisbay (Saint-Martin). L'évaluation des effets acoustiques du projet a été réalisée par modélisation, à partir de données d'entrée issues de mesures in situ (en ce qui concerne la bathymétrie, la nature du sédiment et les conditions de propagation acoustique). L'émergence du bruit émis par le projet a été calculée à partir des niveaux de bruit ambiants mesurés à proximité du port en saison estivale 2022, lors des mesures acoustiques réalisées dans le cadre de l'état de référence du projet. Le traitement des données bioacoustiques récoltées, ainsi qu'une étude de la littérature spécialisée ont permis de contextualiser l'analyse sur les espèces animales présentes à Galisbay. Ces espèces sont :

- Les cétacés basses fréquences , Balénoptéridés : Baleine à bosse (*Megaptera novaeangliae*) ;
- Les cétacés hautes fréquences , Delphinidés : Dauphin tacheté de l'Atlantique (*Stenella frontalis*), Dauphin tacheté pantropical (*Stenella attenuata*) ;
- Les tortues marines et les poissons.

L'évaluation des risques s'appuie sur la littérature concernant la sensibilité acoustique des espèces identifiées (McCauley et al., 2000; NOAA, 2018; Popper, Hawkins, Fay, Mann, Bartol, Carlson, Coombs, Ellison, Gentry, Halvorsen, Lokkeborg, et al., 2014; E. B. L. Southall et al., 2019). Le calcul est basé sur le cumul quotidien des bruits du projet, et sa comparaison aux seuils de tolérance des animaux. Les effets prolongés du bruit de chaque type d'atelier sont comparés aux seuils de tolérance sur 24 heures, en supposant l'animal en fuite dans un milieu ouvert.

Les opérations bruyantes du projet qui ont été modélisées consistent en :

- des travaux de dragage pour augmenter la profondeur du chenal d'accès au port ;
- la construction de deux types de quais : l'un à l'usage des navires de croisière, et le second pour le transit des marchandises commerciales.

Par le bruit qu'ils génèrent dans le milieu marin, certains des ateliers modélisés pourraient présenter un risque pour la faune sous-marine (évaluation à l'échelle de 24h selon le guide *Southall 2019*). C'est le cas du :

- **Clapage** utilisé pour déverser les matériaux dragués excédentaires au large du port, avec un risque de blessure temporaire (TTS) chez les cétacés très hautes fréquences (marsouin commun, cachalot nain / pygmée) jusqu'à une distance de 10m de la source de bruit. Cette catégorie d'espèce est cependant peu susceptible d'être rencontrée à proximité de Galisbay, ce qui relativise les risques associés à ces animaux. Le **dragage du chenal** ne devrait pas présenter de risque de dommage physiologique chez les espèces étudiées, mais un risque de modification comportementale intermédiaire des mammifères marins jusqu'à une distance de 200m de l'activité (*Southall 2007*) ;
- **Battage de pieux (sans mesure de réduction BBC et/ou soft-start)** intervenant lors de la construction des quais, avec un risque de blessure permanente (PTS) sur les cétacés basses fréquences jusqu'à 10m de la source de bruit, et de blessure temporaire (TTS) sur les cétacés basses et très hautes fréquences (jusqu'à 440m et 50m respectivement), ainsi que sur les poissons (jusqu'à 40m) et les pinnipèdes (dont l'unique représentant était le phoque moine des Caraïbes, a priori éteint depuis 1950). Cet atelier est susceptible de présenter un risque de modification comportementale intermédiaire chez les mammifères marins jusqu'à 900m de la source de bruit ;
- **Vibrofonçage de pieux (sans mesure de réduction BBC)**, technique alternative au battage, avec un risque de blessure temporaire (TTS) sur les cétacés très hautes et basses fréquences (jusqu'à 40m et 10m respectivement). Le risque de modification comportementale intermédiaire des mammifères marins est estimé à 1200m pour cet atelier.

La modélisation a montré que la mise en œuvre d'une solution de réduction de type rideau de bulles (simple BBC) autour des ateliers bruyants permet d'éviter les risques de blessure associés à la construction des quais, pour l'ensemble des espèces étudiées. Grâce à cette solution, les distances de risque de modification comportementale

des mammifères marins sont également réduites à moins de 200m. De la même façon, le respect d'une procédure de soft start (démarrage progressif) devrait permettre d'éviter les risques associés au battage de pieux, en laissant un temps de fuite suffisant aux individus éventuellement exposés.

VI.2. Recommandations

À partir des résultats de la modélisation acoustique sous-marine effectuée dans le cadre de l'étude d'impact du projet d'extension et de réaménagement du port de Galisbay à Saint Martin, cette section présente les recommandations pour limiter les risques liés à l'introduction du bruit du projet dans le milieu sous-marin et sur les espèces animales sensibles identifiées à proximité de la zone. Il est ainsi préconisé de :

- Éviter les travaux bruyants au printemps, saison où les baleines à bosse sont majoritairement présentes au large des Antilles ;
- Recourir à une solution de réduction de bruit de type rideau de bulles (simple BBC) sur les opérations de battage et de vibrofonçage, dont la mise en œuvre permet d'éviter les risques de blessure associés à la construction des quais, et de limiter le risque de modification comportementale des mammifères marins à une distance de 200m ;
- Respecter une procédure de soft start pour les ateliers le permettant (le battage notamment), pour laisser un temps de fuite aux animaux éventuellement exposés au bruit de ces ateliers ;
- Procéder à un suivi visuel régulier par MMO (Marine Mammal Observer) afin de s'assurer de l'absence de mammifères marins dans un rayon de 200m autour des travaux (distance correspondant au risque de réaction comportementale intermédiaire des ateliers modélisés). Conformément aux règles imposées par les normes internationales (BOEM 2014, JNCC 2017)), cette surveillance doit démarrer 30min avant le début des opérations. Toute présence dans ce rayon de 200 m entraîne le retard ou l'arrêt momentané de l'atelier (uniquement pour le battage et le vibrofonçage).
- Réaliser des mesures acoustiques ponctuelles et spécifiques du niveau sonore émis par les différents ateliers pour confirmer les valeurs prédites dans cette étude et les effets induits sur les espèces. Ces données serviront également à accroître les connaissances sur ce type d'activités.
- Tenir à jour une base de données des détections de mammifères marins effectuées à proximité de la zone du projet, par des moyens visuels et/ou acoustiques, afin d'améliorer les connaissances sur la fréquentation du site par les mammifères marins.

Par ailleurs, la construction des quais étant susceptible de nécessiter une période prolongée de battage de pieux, il est préconisé d'évaluer la variation de la fréquentation des mammifères marins en effectuant un suivi acoustique longue durée au même emplacement que celui effectué lors de l'état de référence (préférentiellement aux saisons printanière et estivale).

Bibliographie

- Andersson, M. H., Sigray, P., & Persson, L. K. G. (2011). Operational wind farm noise and shipping noise compared with estimated zones of audibility for four species of fish. *The Journal of the Acoustical Society of America*. <https://doi.org/10.1121/1.3588249>
- Bailey, H., & Thompson, P. (2006). Quantitative analysis of bottlenose dolphin movement patterns and their relationship with foraging. *Journal of Animal Ecology*, 75(2), 456–465. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2006.01066.x>
- Bellmann, M. A., May, A., Wendt, T., Gerlach, S., Remmers, P., & Brinkmann, J. (2020). Underwater noise during percussive pile driving: Influencing factors on pile-driving noise and technical possibilities to comply with noise mitigation values. *ERa Report: Experience Report on Piling-Driving Noise with and without Technical Noise Mitigation Measures, 2020(May)*. https://www.itap.de/media/experience_report_underwater_era-report.pdf
- Betke, K. (2008). Measurement of wind turbine construction noise at Horns Rev II. *Report by Bioconsult and Institut Fur Technische Und Angewandte Physik GmbH (Itap)*.
- Cape, I., & Limited, O. (n.d.). *INCH CAPE OFFSHORE LIMITED* www.inchcapewind.com i.
- Clorennec, D., Chompret, J., & Bellanger, J. (2022). *Suivi acoustique passif du bruit ambiant et des mammifères marins dans le cadre de l'aménagement portuaire du port de Galisbay Etat de référence*. 1–61.
- Colin, M. E. G. D., Ainslie, M. A., Binnerts, B., De Jong, C. A. F., Karasalo, I., Ostberg, M., Sertlek, H. O., Folegot, T., & Clorennec, D. (2015). Definition and results of test cases for shipping sound maps. *MTS/IEEE OCEANS 2015 - Genova: Discovering Sustainable Ocean Energy for a New World, January 2016*. <https://doi.org/10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271461>
- Commission Européenne. (2000). *Directive-cadre sur l'Eau*.
- Dooling RJ, B. S. (2013). Avian sound perception in noise. In: *Brumm H (Ed) Animal Communication and Noise*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp 229–250.
- European Parliament. (2004). *European Parliament resolution on the environmental effects of high-intensity active naval sonars*. 1600, 5. <http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//NONSGML+MOTION+B6-2004-0089+0+DOC+PDF+V0//EN>
- Folegot, Thomas, C. D. (2013). A Monté-Carlo approach to anthropogenic sound mapping. *Underwater Acoustics Conference, Corfu, Greece*.
- Guelton, S., Clorennec, D., Pardo, É., Brunet, P., & Folegot, T. (2014). *Quonops, la prévision opérationnelle en acoustique sous-marine sur grille de calcul*. https://hal-institut-mines-telecom.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/927502/filename/succes2013_resume_1.0_.pdf%5Chttps://hal.inria.fr/hal-00927502/document
- IFAW. (2008). *Ocean Noise : Turn it down A report on ocean noise pollution " Noise : a sound , especially one that is loud , unpleasant , CD contents include :*
- IMO. (2012). *Noise from Commercial Shipping and its Adverse Impacts on Marine Life – Report of the Correspondence Group Action Requested - International Maritime Organization*. 17(August 2010), 4–6.
- John Richardson, W., Fraker, M. A., Würsig, B., & Wells, R. S. (1985). Behaviour of Bowhead Whales *Balaena mysticetus* summering in the Beaufort Sea: Reactions to industrial activities. *Biological Conservation*, 32(3), 195–230. [https://doi.org/10.1016/0006-3207\(85\)90111-9](https://doi.org/10.1016/0006-3207(85)90111-9)
- Marine Mammal Commission. (2007). *The marine mammal protection act of 1972 as amended*. 127–218.
- Mccauley, R. D., Fewtrell, J., Duncan, A. J., Jenner, C., Jenner, M.-N., Penrose, J. D., Prince, R. I. T., Adhitya, A., Murdoch, J., & McCabe, K. (2000). *Marine Seismic Surveys: Analysis and Propagation of Air-Gun Signals; And Effects of Air-Gun Exposure on Humpback Whales, Sea Turtles, Fishes and Squid*. 203.
- Mccauley, R. D., Fewtrell, J., Duncan, A. J., Jenner, C., Jenner, M.-N., Penrose, J. D., Prince, R. I. T., Adhitya, A.,

- Murdoch, J., & McCabe, K. (2000). MARINE SEISMIC SURVEYS— A STUDY OF ENVIRONMENTAL IMPLICATIONS. *The APPEA Journal*. <https://doi.org/10.1071/AJ99048>
- Nedwell, Jeremy; Langworthy, John; Howell, D. (2004). Underwater noise and offshore windfarms. *BWEA Conference - Subacoustech Presentation in Collaboration with COWRIE.*, Subacoustic Ref 544R0503. www.subacoustech.com
- Nedwell, J. R., & Brooker, A. G. (2008). Measurement and assessment of background underwater noise and its comparison with noise from pin pile drilling operations during installation of the SeaGen tidal turbine device, Strangford Lough. In *Subacoustech report, Cowrie Ltd* (Issue September, p. 33). www.offshorewind.co.uk
- NOAA. (2018). 2018 Revision to: Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing (Version 2.0). *NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-59, April*, 167. <https://www.fisheries.noaa.gov/national/marine-mammal-protection/marine-mammal-acoustic-technical-guidance>
- Parlement européen et Conseil de l'Union Européenne. (2008). Directive 2008/56/CE du Parlement européen et du Conseil du 17 juin 2008 établissant un cadre d'action communautaire dans le domaine de la politique pour le milieu marin (directive-cadre "stratégie pour le milieu marin"). *Journal Officiel de l'Union Européenne Du 25.6.2008 (JO L 164/19).*, 22 p. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0056&rid=1>
- Payne, R., & Webb, D. (1971). Orientation By Means of Long Range Acoustic Signaling in Baleen Whales. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 188(1), 110–141. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1971.tb13093.x>
- Persohn, C., Helloco, L., Baudinière, E., & Martinez, L. (2020). *Préconisations pour limiter les impacts des émissions acoustiques en mer d'origine anthropique sur la faune marine*. 212.
- 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., Halvorsen, M. B., Lokkeborg, S., Rogers, P. H., Southall, B. L., Zeddies, D. G., & Tavolga, W. N. (2014). Sound Exposure Guidelines for Fishes and Sea Turtles. In *Springer Briefs in Oceanography*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-06659-2>
- 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., Halvorsen, M. B., Løkkeborg, S., Rogers, P. H., Southall, B. L., Zeddies, D. G., & Tavolga, W. N. (2014). Sound Exposure Guidelines for Fishes and Sea Turtles: A Technical Report prepared by ANSI-Accredited Standards Committee S3/SC1 and registered with ANSI. In *Springer*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-06659-2>
- Reine, K. J., Clarke, D., & Dickerson, C. (2014). Characterization of underwater sounds produced by hydraulic and mechanical dredging operations. *The Journal of the Acoustical Society of America*. <https://doi.org/10.1121/1.4875712>
- Sand, O., & Karlsen, H. E. (2000). Detection of infrasound and linear acceleration in fishes. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. <https://doi.org/10.1098/rstb.2000.0687>
- Sand, Olav, Karlsen, H. E., & Knudsen, F. R. (2008). Comment on "Silent research vessels are not quiet" [J. Acoust. Soc. Am. 121, EL145–EL150]. *The Journal of the Acoustical Society of America*. <https://doi.org/10.1121/1.2839134>
- Scottish Natural Heritage. (2016). *Assessing collision risk between underwater turbines and marine wildlife. SNH guidance note. May*, 93.
- Southall, B. L., Bowles, A. E., Ellison, W. T., Finneran, J. J., Gentry, R. L., Jr, C. R. G., Kastak, D., Ketten, D. R., Miller, J. H., Nachtigall, P. E., Richardson, W. J., Thomas, J. A., Tyack, P. L., & Greene, C. R. J. (2007). Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Initial Scientific Recommendations - Chapter 4. Criteria for Behavioral Disturbance. *Aquatic Mammals*. <https://doi.org/10.1578/AM.33.4.2007.446>
- Southall, B. L., Finneran, J. J., Reichmuth, C., Nachtigall, P. E., Ketten, D. R., Bowles, A. E., Ellison, W. T., Nowacek, D. P., & Tyack, P. L. (2019). Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Updated Scientific Recommendations for Residual Hearing Effects. *Aquatic Mammals*, 45(2), 125–232. <https://doi.org/10.1578/AM.45.2.2019.125>
- Southall, E. B. L., Finneran, J. J., Reichmuth, C., Nachtigall, P. E., Ketten, D. R., Bowles, A. E., Ellison, W. T., Nowacek, D. P., & Tyack, P. L. (2019). Marine mammal noise exposure criteria: Updated scientific recommendations

for residual hearing effects. *Aquatic Mammals*, 45(2), 125–232. <https://doi.org/10.1578/AM.45.2.2019.125>

Sutton, G., Jessopp, M., Clorenec, D., & Folegot, T. (2013). Mapping the Spatio-temporal Distribution of Underwater Noise in Irish Waters. STRIVE Report Series No. 121. In *EPA STRIVE Programme 2007-2013* (Issue March). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1673.1289>

Thomsen, F., Gill, A., Kosecka, M., Andersson, M., André, M., Degraer, S., Folegot, T., Gabriel, J., Judd, A., Neumann, T., Norro, A., Risch, D., Sigray, P., Wood, D., & Wilson, B. (2015). *MaRVEN – Environmental Impacts of Noise, Vibrations and Electromagnetic Emissions from Marine Renewable Energy*. <https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Marven-Report-2015.pdf>