maree

methodes acoustiques de reconnaissance
de l'environnement

****

BARDOT OCEAN / ACOA

****

Evaluation des impacts acoustiques liés à l'utilisation du microtunnelier pour la construction du SWAC de Saint-Pierre.

****

Rapport de synthèse

Référence : R2019_05

Rédacteur : Xavier Demoulin
Décembre 2019

1 Table des matières

2 INTRODUCTION 4

3 MODELISATION DU BRUIT AMBIANT 5

3.1 APPROCHE PHENOMENOLOGIQUE 5

3.2 DONNEES D'ENTREE 9

3.3 CAS PARTICULIER DU BRUIT DE TRAFIC 14

3.4 CAS PARTICULIER DU BRUIT DE RESSAC 17

3.5 CAS PARTICULIER DU BRUIT BIOLOGIQUE 19

4 SIMULATION DU BRUIT AMBIANT 21

4.1 CARACTERISTIQUES GENERALES DU BRUIT AMBIANT 21

4.2 CARTES DE BRUIT 22

4.3 CARTES SAISONNIERES 23

4.4 SYNTHESE 28

5 CONCLUSION SUR LE BRUIT AMBIANT 29

6 CARACTERISATION ACOUSTIQUE DU MICROTUNNELIER 30

7 ANALYSE DE LA PROPAGATION 32

7.1 APPROCHE CALCULATOIRE 32

7.2 CARACTERISTIQUES GENERALES DE LA PROPAGATION 35

7.3 CARTOGRAPHIE 37

8 CONCLUSION SUR LA PROPAGATION 41

9 CARACTERISATION DES IMPACTS ACOUSTIQUES 41

9.1 LES CETACES 41

9.2 TORTUES 45

9.3 POISSONS 46

9.4 LARVES....46
9.5 IMPACTS DES ONDES ACOUSTIQUES SUR LES CETACES ET SEUILS....47

10 CARTOGRAPHIE DES IMPACTS ACOUSTIQUES....52

10.1 BASSES FREQUENCES (MYSTICETES)....52
10.2 VIBRATIONS (LARVES ET CORAUX)....54
10.3 SYNTHESE....54
10.4 VARIATIONS PAR RAPPORT AUX HYPOTHESES....55

11 CONCLUSION SUR LES IMPACTS ACOUSTIQUES....56

12 BIBLIOGRAPHIE....57

13 ANNEXE 1: DONNÉES D'ENTRÉE....59

14 ANNEXE 2 : IMPACTS D'UNE OPERATION DE DEROCTAGE....60

14.1 INTRODUCTION....60
14.2 ELEMENTS D'ENTREE (ENVIRONNEMENT GEOPHYSIQUE)....60
14.3 ÉLEMENTS D'ENTREE (EXPLOSIFS)....61
14.4 QUELQUES RAPPELS SUR LES EXPLOSIONS SOUS-MARINES....62
14.5 PROPAGATION : CALCUL AUX ELEMENTS FINIS....63
14.6 PROPAGATION : CARTOGRAPHIE....65
14.7 INTENSITES PRODUITES SELON LES SCENARIOS : LOIS EMPIRIQUES.68
14.8 IMPACTS DES DEROCTAGES : SEUILS....71
14.9 IMPACTS DES DEROCTAGES : DEPASSEMENTS DES SEUILS....72
14.10 CONCLUSION....74
14.11 BIBLIOGRAPHIE....75

2 Introduction

La société BARDOT OCEAN va prochainement avoir recours à un microtunnelier pour réaliser le SWAC de Saint-Pierre à la Réunion. Il s'agit d'appréhender le risque environnemental et en particulier d'évaluer les impacts acoustiques potentiels de ces travaux.

Cette étude d'impact acoustique se décompose en :

1. une étude du bruit ambiant sur le site,
2. une étude de la propagation des bruits rayonnés dans l'eau par les machines qui seront utilisées,
3. une étude des impacts potentiels vis-à-vis des espèces marines présentes sur le site et reposant sur les seuils acoustiques en vigueur dans ce domaine.

Il est envisagé qu'une opération de déroctage ait lieu à la fin de l'opération (récupération du tunnelier). L'évaluation des impacts acoustiques d'une telle opération est effectuée en annexe.

L'étude de la modélisation du bruit ambiant sur le site est décomposée comme suit :

(i) une présentation des principes de modélisation de bruit ambiant d'un site comme celui de Saint-Pierre,
(ii) une description et justification des paramètres d'entrée choisis,
(iii) une présentation des résultats sous forme de spectres et de cartographies saisonnières[1],
(iv) une analyse et une interprétation.

L'étude de la propagation des bruits rayonnés dans l'eau par les machines sur le site est décomposée comme suit :

(i) caractérisation des sources sonores,
(ii) analyse détaillée de la propagation,
(iii) cartographie et analyse interprétative.

L'étude des impacts potentiels des travaux vis-à-vis des espèces marines présentes sur le site est décomposée comme suit :

(i) caractérisation des impacts, partie dans laquelle on précise l'état des connaissance sur la bioacoustique d'une part et dans laquelle on définit les impacts et les seuils d'autre part,
(ii) cartographie des impacts potentiels et analyse.

[1] ATTENTION: Dans ce document, on se réfère par défaut aux saisons de l'hémisphère Nord (sauf mention contraire).

3 Modélisation du bruit ambiant

3.1 APPROCHE PHENOMENOLOGIQUE

De façon simplifiée, un spectre de bruit ambiant est décroissant de 10 Hz à 50kHz et se décompose successivement des fréquences les plus basses au plus hautes comme suit :

- En dessous de 50 Hz : bruit de turbulences, océanographique et sismique
- Entre 10 Hz et 1kHz : bruit de navires
- Entre 100Hz et 15kHz : bruit du vent et bruit de la pluie
- Au-dessus de 15kHz : bruit biologique et bruit d'agitation moléculaire.

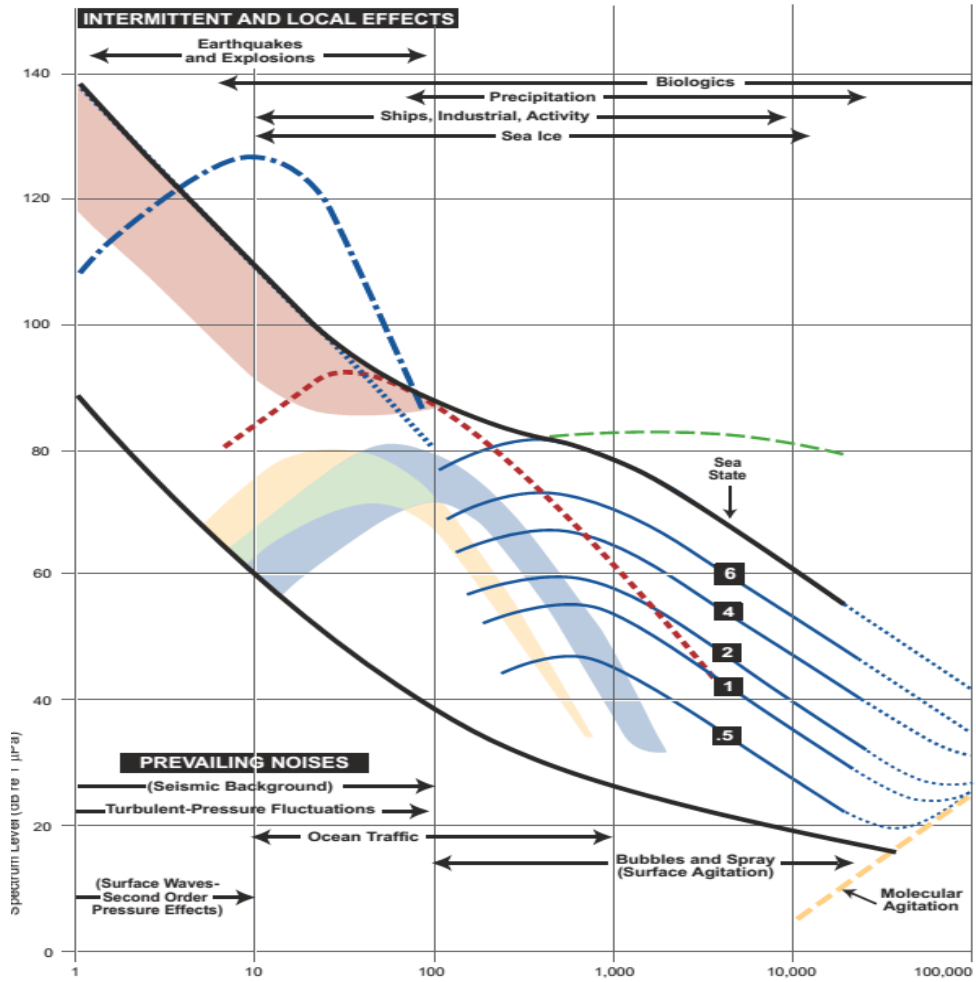


Figure 1: Spectre de bruit ambiant sous-marin (source Bradley[2]) somme de diverses composantes suivant les fréquences. Les domaines de fréquences de quelques familles de sources sonores sont également indiqués.

[2] **D.L.Bradley and R.Stern**, "Underwater Sound and the marine mammal acoustic environment – a guide to fundamental principles", US MMC, 2008

3.1.1 BRUIT DE MER

L'intensité du bruit de mer s'exprime en fonction de la vitesse du vent (établi en m/s et à 10 m au-dessus de la surface). Il est provoqué par les bulles d'air générées par le déferlement des vagues. Dominant entre 500 Hz et 10 kHz, le spectre du bruit du vent suit la fameuse règle des cinq [1] :

- Doubler la fréquence (en kHz) diminue le niveau de bruit de 5 dB ;
- Doubler le vent (en nœuds) augmente le niveau de bruit de 5 dB.

3.1.2 BRUIT DE LA PLUIE

Le bruit de la pluie est dû aux bulles d'air créées lorsque les gouttes pénètrent dans l'eau [2]. Il est dominant dès les pluies faibles aux fréquences de 10 à 15 kHz. Il peut couvrir l'ensemble du spectre allant de 1 kHz à 20 kHz ou plus lors de pluies fortes. Les lois empiriques existantes [3] établissent l'intensité spectrale en fonction de l'intensité des précipitations exprimées en mm/h.

3.1.3 BRUIT DES VAGUES ET DU COURANT

Un courant stationnaire va générer à ses frontières des fluctuations de pression (turbulences) de fréquences allant de 1 Hz à 50 Hz typiquement [1]. Il s'agit toutefois de sources quadripolaires, qui s'atténuent très vite avec la distance. Elles ne sont à prendre en compte que par rapport à ce qui se passe au niveau du capteur lui-même.

3.1.4 BRUIT DE TRAFIC

Le bruit de trafic est la somme des contributions plus ou moins éloignées de nombreux navires. Il est dominant entre quelques dizaines de Hz et 1 kHz environ. La contribution du bruit de trafic est évaluée en fonction de l'intensité du trafic, de la distance au rail de passage des navires et des conditions locales de propagation. Le bruit d'un navire dépend quant à lui de divers paramètres liés à sa motorisation et tout particulièrement à ceux associés à la cavitation des hélices. Des lois empiriques [4] établissent le spectre d'émission d'un bateau en fonction de sa vitesse et de sa taille.

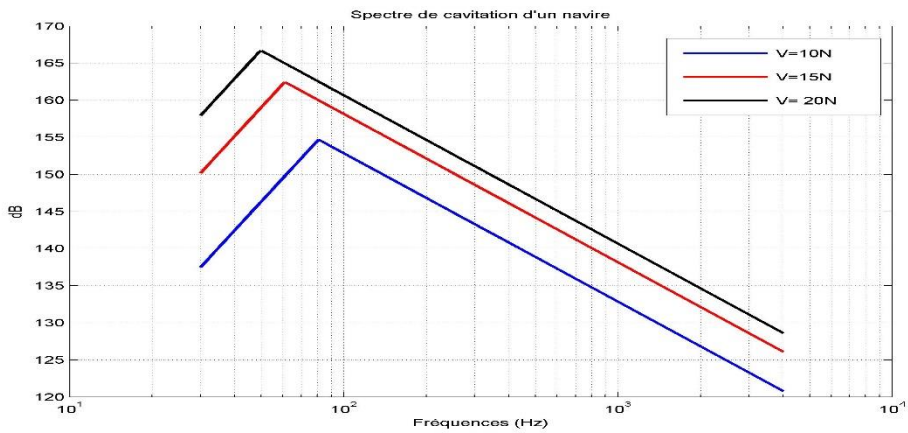


Figure 2 : Spectres émis par un navire de 80m de longueur à des vitesses de 10, 15 et 20 nœuds.

3.1.5 CHORUS BIOLOGIQUE

Le chorus biologique est le résultat de la sommation de bruits impulsionnels dus à des coquillages à valves, à des crustacés ou à des poissons. Un spectre affecté par le chorus biologique présente une bosse à haute fréquence (entre 1 kHz et 30 kHz typiquement) qui émarge à plus de 10dB (parfois à plus de 30 dB) au-dessus du niveau 'normal' à ces fréquences. Il est difficile d'en prédire la saisonnalité. On le rencontre plutôt au-dessus ou à proximité de zones rocheuses avec des hauteurs d'eau de moins de 50m.

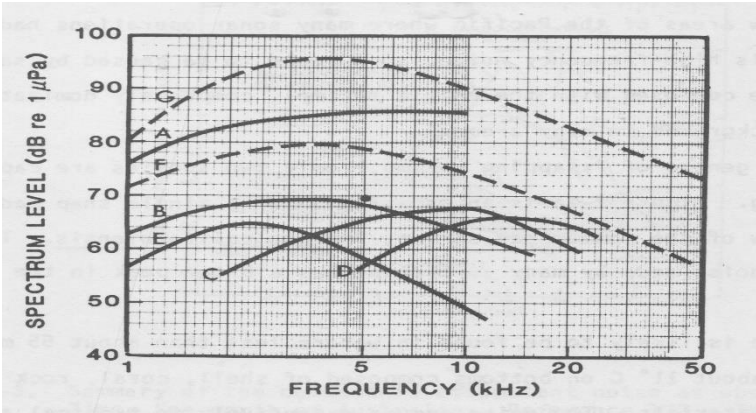


Figure 3: Synthèse des signatures spectrales du bruit de chorus biologique (source [5]). Il y a une grande variété de signatures acoustiques du chorus suivant son origine mais son spectre est toujours en cloche.

3.1.6 BRUIT DE RESSAC

Le bruit de ressac peut devenir dominant à proximité des côtes. En effet, le déferlement y est alors très fort et organisé. Dans le cas de plages ou de falaises, il peut y avoir un effet d'antenne et le bruit généré s'organise alors comme une source linéique à des fréquences allant typiquement de 100 à 1000 Hz.

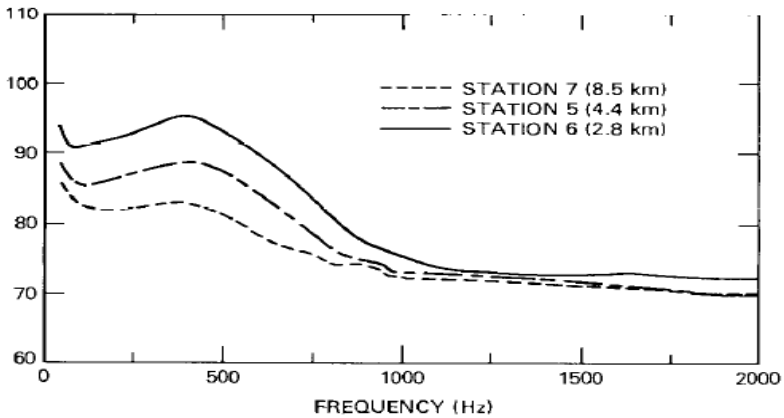


Figure 4: Bruit de ressac à proximité d'une longue plage (source [6]). Il est plus intense entre 100 et 1000 Hz et son influence diminue en s'éloignant des côtes.

3.1.7 BRUIT INDUSTRIEL

Les informations sur les signatures acoustiques de sites industriels côtiers ne sont pas courantes. On les considère peu souvent comme de possibles contributeurs au bruit ambiant. Pourtant, cela peut être le cas aux basses fréquences (et même à grande distance) en particulier par rapport aux installations de production de courant. On retrouve alors des émergences aux 50 ou 60 Hz ainsi qu'aux plus basses fréquences (10 à 30 Hz) en rapport aux vibrations des groupes diesel-électriques.

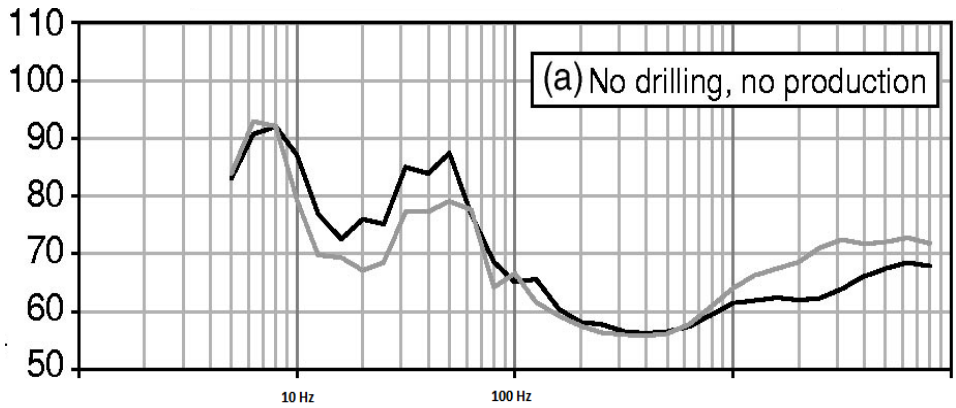


Figure 5: Spectre de bruit à proximité d'une installation industrielle côtière (source [7]).

Le bruit ambiant est le plus souvent vu au travers de deux principaux contributeurs : (1) le bruit de trafic, (2) le bruit du vent.
Toutefois, le bruit ambiant étant fortement affecté par les contributeurs les plus proches, il est difficile à prédire en environnement côtier.
Dans le cas du site de Saint-Pierre, d'autres sources de bruits peuvent être importantes. : le chorus biologique, le bruit de ressac, le bruit industriel ...

3.2.1 PREAMBULE

La plupart des données d'entrée nécessaires sont disponibles via le rapport de synthèse d'Artelia[3]. Ce rapport utilise les bases de données existantes sur les côtes de la Réunion (IGN, Shom, Ifremer …).
Nous avons défini une emprise située entre 55.4° & 55.6° E et 21.3° & 21.45° S. Cela correspond à une zone d'une dizaine de km de part et d'autre du point de sortie du micro-tunnel[4]. L'emprise est légèrement augmentée, le point de captage d'eau est situé vers le sud du point de sortie par 1000 m de fond. Il est inclus dans l'emprise.

3.2.2 BATHYMETRIE

Les profondeurs relevées sur l'emprise varient de 0 à plus de 1000 mètres. Le site est globalement orienté au S-SW. La partie qui nous concerne plus spécifiquement est côtière. Pour rappel, le point de sortie du micro-tunnel aura lieu, en 55.49103°E et 21.35278°S, par 22 m de hauteur d'eau.

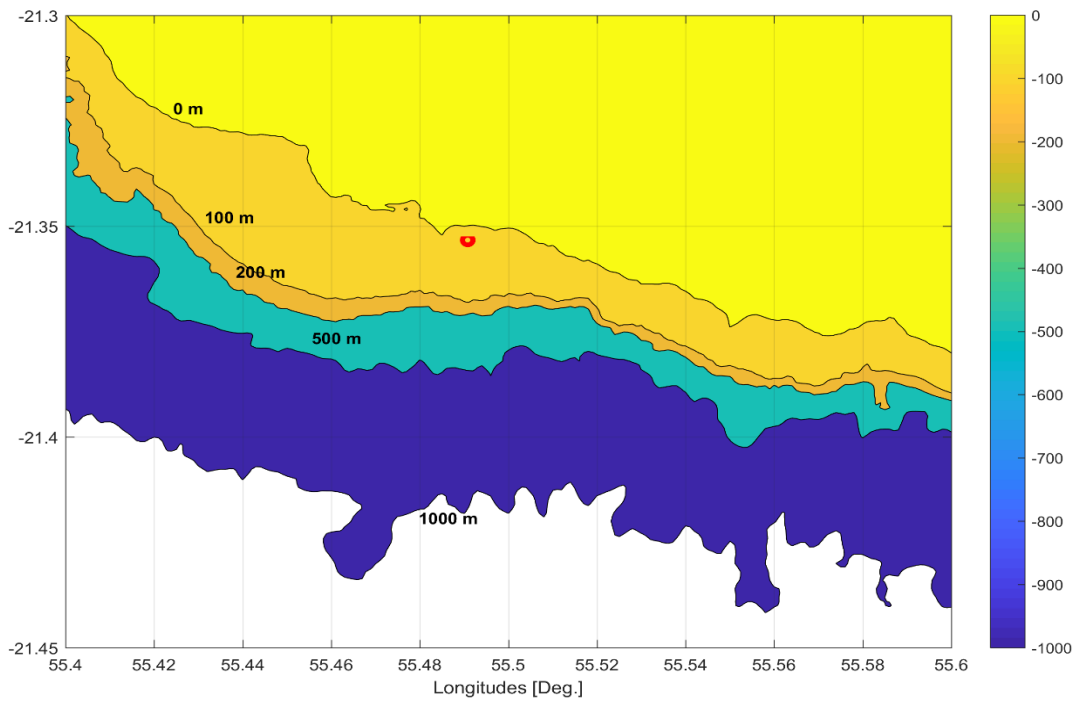


Figure 6 : Carte bathymétrique de l'emprise (issue du modèle MNT SHOM avec une résolution de 100 m). En rouge, le point de sortie du micro-tunnel.

[33] Rapport intitulé SWAC du groupe Hospitalier Sud Réunion Saint-Pierre, missions d'études environnementales et de pré-cadrage règlementaire, Juillet 2014.
[4] Cet endroit est appelé « point de sortie » dans ce rapport.

Les données du Shom sont reprises pour pouvoir disposer d'un maillage à 100 m jusqu'au trait de côte, ce qui est largement suffisant pour notre étude.

3.2.3 SEDIMENTOLOGIE

Les informations collectées dans le rapport Ocetra[5] indiquent que sur la zone côtière de l'emprise (à proximité du point de sortie), les fonds sont majoritairement constitués de roches basaltiques, souvent recouvertes de corail avec également quelques zones de sable et/ou de galets. A partir de l'isobathe 50 m, il a été relevé des étendues de sable fin d'épaisseur inconnue au-dessus du socle rocheux basaltique.

Figure 7 : Carte synthétique de la nature des fonds marins, identifiant et localisant les roches affleurantes, les roches sub-affleurantes, les sables mixtes ou les sables biodétritiques (Cartomar).

Nous avons par ailleurs utilisé la cartographie morpho-sédimentaire des fonds marins côtiers de la réunion pour construire la carte des zones à chorus biologique (voir chapitre suivant).

[5] Etude Ocetra, « Etude de caractérisation des sols dans le cadre du projet SWAC », Décembre. 2015.

3.2.4 PRECIPITATIONS

A Saint-Pierre, la hauteur des précipitations cumulées est en moyenne de 639.9 mm par an sur 10 ans. Le maximum de pluviométrie se situe généralement au mois de février. Ces données permettent de comparer les saisons entres elles mais ne suffisent pas pour le modèle.

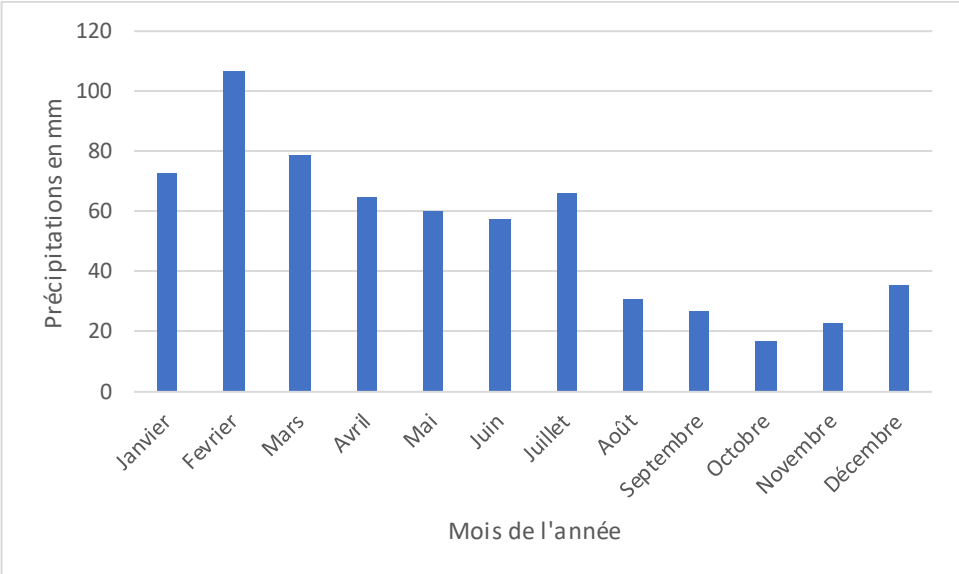


Figure 8 : Précipitations (moyenne en mm) – Pierrefonds

Comme expliqué ci-dessus, l'intensité du bruit de pluie est proportionnelle à l'intensité de la pluie (taille, mm/h…). Nous avons donc moyenné les précipitations <10 mm/j en nombre de jour par mois pour chaque saison étudiée. Ce protocole opératoire permet d'obtenir un ratio entre les moyennes de précipitation par saison et les jours ayant des pluies de forte intensité par saison.

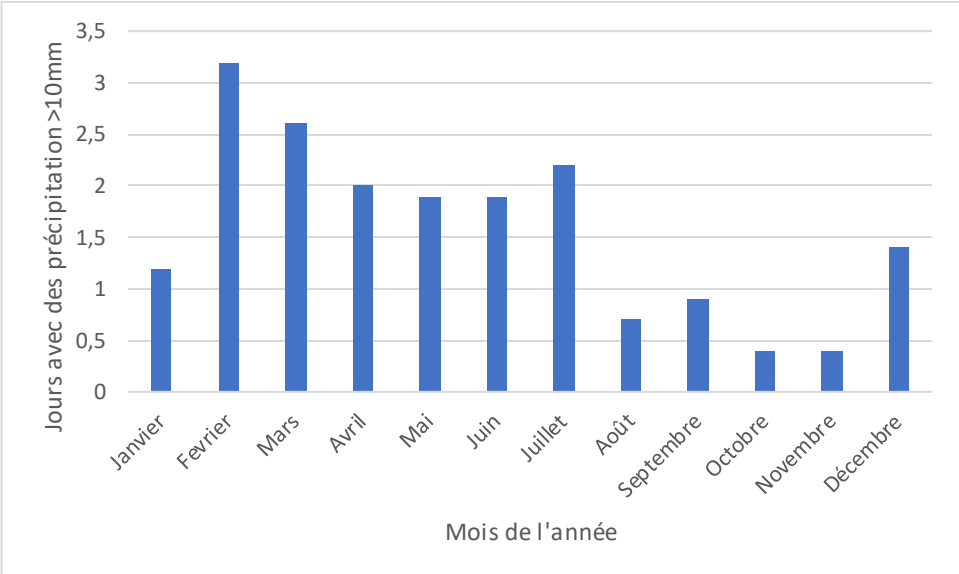


Figure 9 : Nombre de jour avec des précipitations supérieures à 10 mm - Pierrefonds

3.2.5 *VENT*

La vitesse moyenne mensuelle du vent sur le site de l'aéroport Pierrefonds oscille entre 4.0 m/s et 5.5 m/s (données Météo-France). On note un vent nettement plus faible d'octobre à mai et plus intense au printemps et en été (hiver austral).

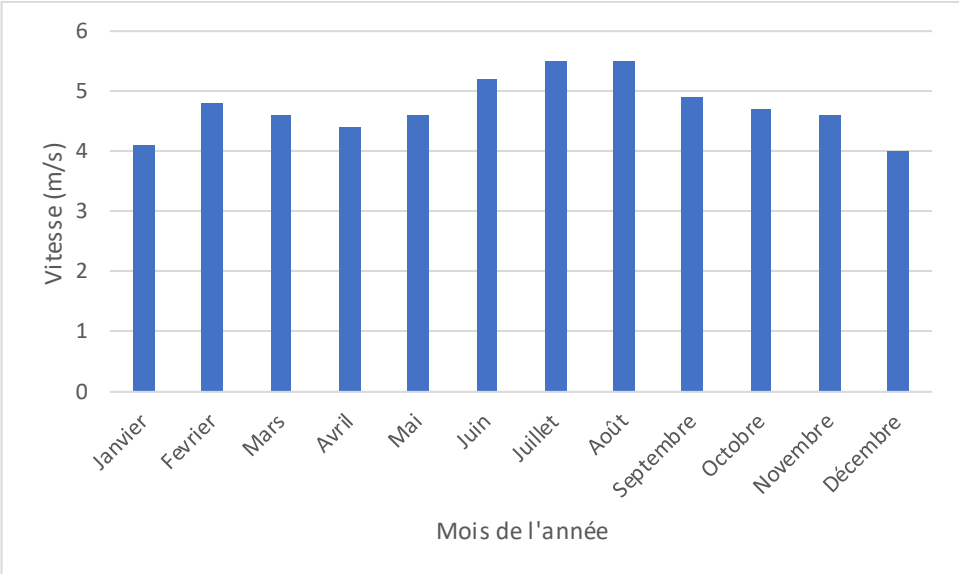


Figure 10 : Vitesse (moyennées sur dix minutes.) - Pierrefonds

Pour la modélisation du bruit ambiant, nous avons aussi extrait les moyennes en jour des vents avec des rafales supérieures à 16m/s.

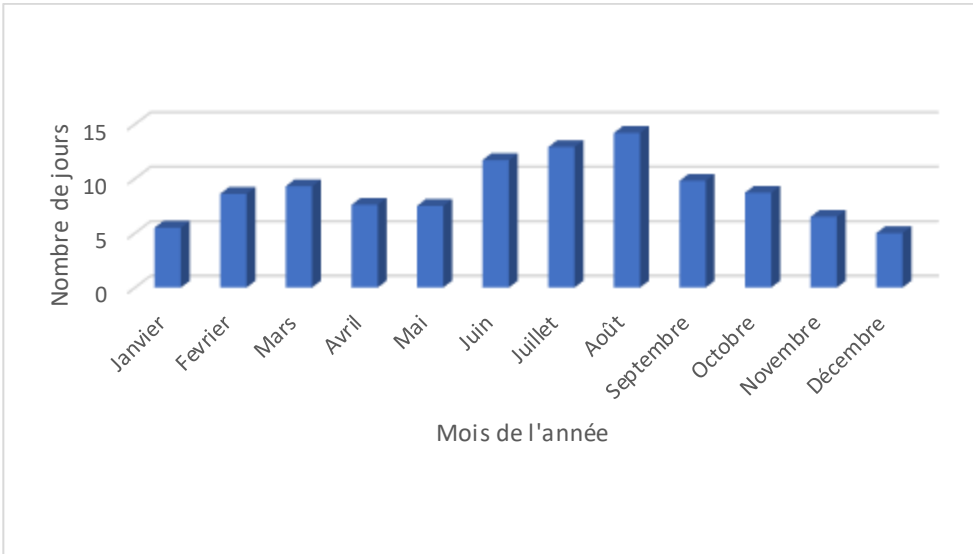


Figure 11 : Nombre de jours par mois avec des rafales supérieures à 16m/s - Pierrefonds

Une importante différence est observée entre l'hiver (été austral) ayant peu de jours avec de forts vents et l'été (hiver austral) qui au contraire est exposé à de nombreux jours avec des rafales dépassant les 16 m/s.

3.2.6 HOULE

La hauteur significative de vagues est généralement comprise entre 1m et 2m (probabilité de 69%). Les valeurs extrêmes estimées sont de l'ordre de 4 m (moins de 1% d'occurrence).

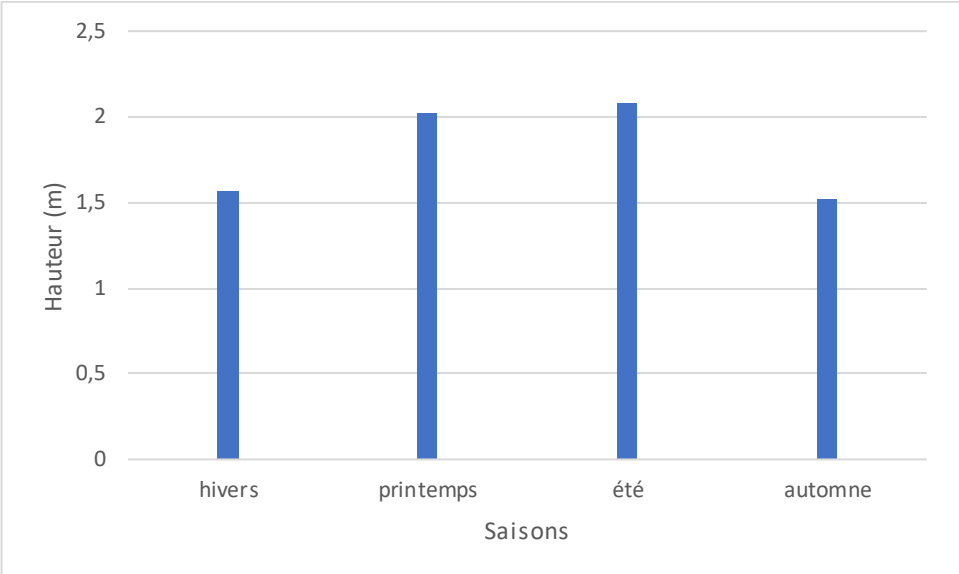


Figure 12 : Moyenne de hauteur de houle par saison au point de coordonnées [21.354 S ; 55.4965 E].

De la même manière que pour le vent ou les précipitations, pour réaliser la modélisation du bruit ambiant et pour différencier les saisons entres elles, nous avons extrait et moyenné les houles significatives (supérieures à 2 mètres).

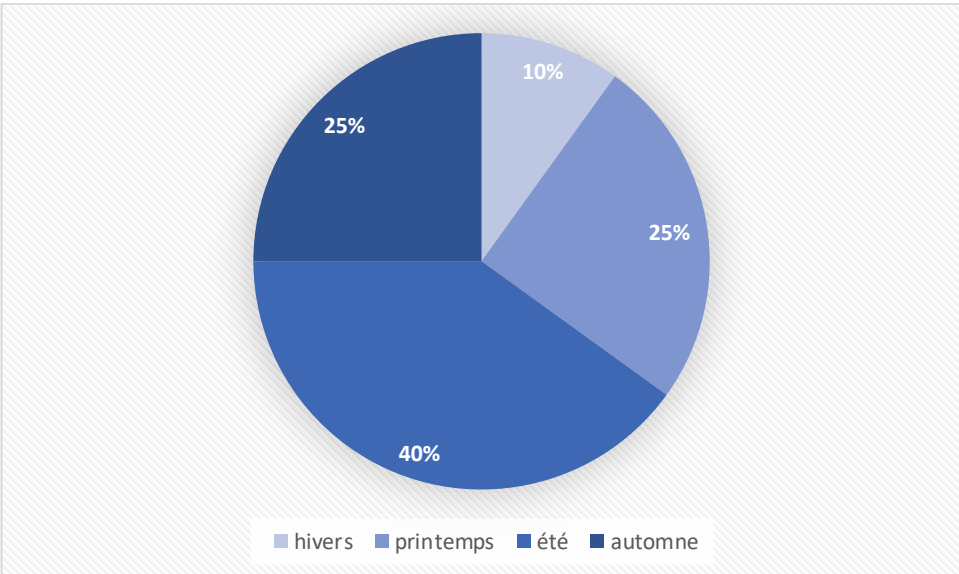


Figure 13 : Nombre de jours avec de la houle supérieure à 2 m (par saison).

En accord avec les périodes de vents forts, nous observons un fort contraste entre l'été (hiver austral) comportant la majorité des houles significatives et l'hiver (été austral) où très peu de houles supérieures à 2 mètres ont été enregistrées.

3.2.7 COURANTS DE MAREE

Pour les maximas trimestriels du courant barotrope, les trimestres 1 et 3 présentent en période de vives eaux, des vitesses maximales observées de l'ordre 1m/s. Les trimestre 2 et 4 sont plus calmes avec des courants ne dépassant pas ou peu 0.6m/s.
Le marnage moyen journalier est de 0.5m et atteint 0.9m lors de marées astronomiques.

Les valeurs des paramètres d'entrée nécessaires au modèle sont issues des documents cités ci-dessus. Des valeurs moyennes par saison ont pu en être extraites et sont regroupées dans l'annexe 1 : Paramètres d'entrées.

3.3 CAS PARTICULIER DU BRUIT DE TRAFIC

A la différence des autres composantes du bruit ambiant qui sont locales, le bruit de trafic est la composante "lointaine" du bruit ambiant, c'est à dire que son influence est soumise aux caractéristiques de propagation du site. Cela passe par une prise en considération des variations de bathymétrie d'une part et de bathycélérimétrie d'autre part.

3.3.1 BATHYCELERIMETRIE

Les profils types choisis pour la zone sont issus de la base de données Levitus (Atlas climatologique des océans). Nous avons extrait le profil de célérité moyen selon la profondeur, propre à chaque saison.

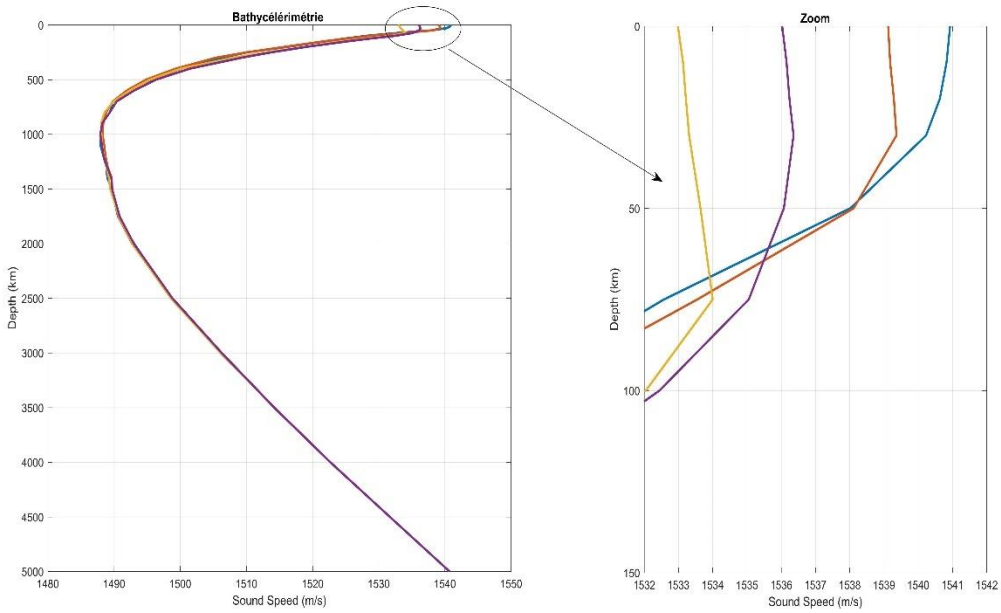


Figure 14 : Profils de célérité selon la saison (BDD Levitus) dans le sud de la Réunion.

Les principales caractéristiques de ces profils :

- L'effet des saisons concerne les premiers 100 m : il y a un léger gradient positif en été (hiver austral).
- La célérité en surface est nettement plus élevée qu'à la profondeur de 3000 m (profondeur typique du fond sous le rail de passage des navires) pour toutes les saisons.

3.3.1 PROPAGATION

Partant d'un profil de célérité typique d'une saison, il faut ensuite calculer la propagation du son émis à 100km au large et par 3000 m de fond jusqu'au point de sortie, par 20-25 m d'eau. Le problème est donc de considérer la propagation du son sur une centaine de km avec une bathymétrie remontant jusqu'à la côte.

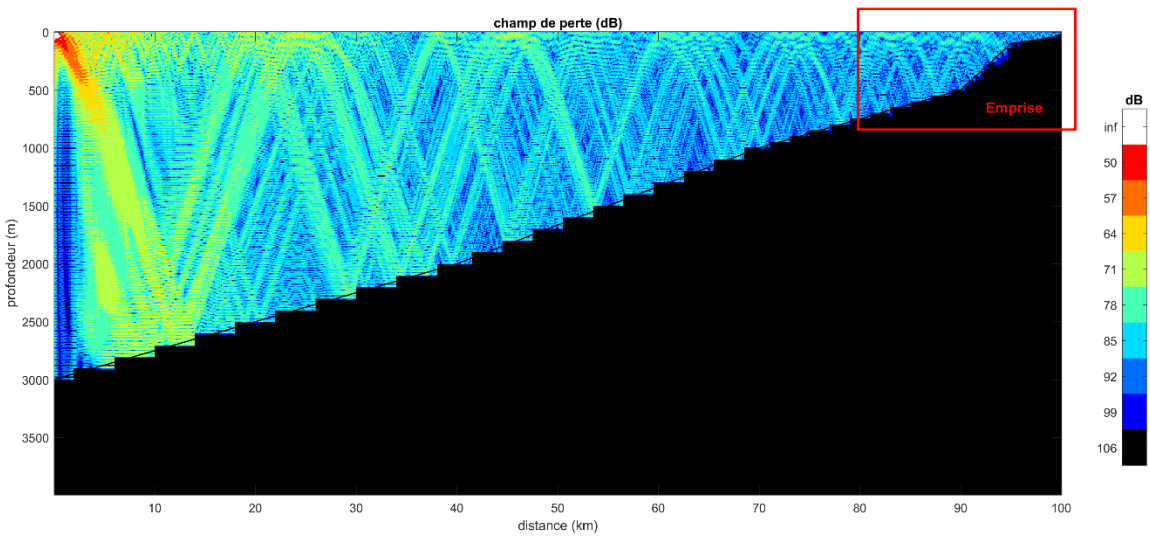


Figure 15 : Champ de pertes pour une source à 10 m sous la surface, à 100 km de Saint-Pierre et à la fréquence de 120 Hz. L'emprise est schématisée en rouge.

Ce calcul a été fait à l'aide des modes couplés [9], code de référence pour une situation de ce type (bathymétrie variable) aux fréquences allant de 30 Hz à 480 Hz (domaine du bruit de trafic).
La bathymétrie varie de 3000 m (typique des hauteurs d'eau au niveau du rail des navires) jusqu'à 20 m (hauteur d'eau du site de sortie du forage).
On constate (Figure 15) que les rayons acoustiques plongent : il y a réfraction en surface et réflexion au fond. C'est le comportement typique de la propagation acoustique en présence d'un profil à gradient négatif.

3.3.2 TRAFIC :

Une fois les pertes de propagation calculées, il est nécessaire de leurs ajouter le niveau émis par les bateaux. Le bruit de trafic sera alors la somme des différents bruits propagés par chacun des navires. Il est donc nécessaire de prendre en compte le nombre de bateaux concernés par le rail « Sud Réunion » tel qu'on peut le visualiser sur la Figure 16.

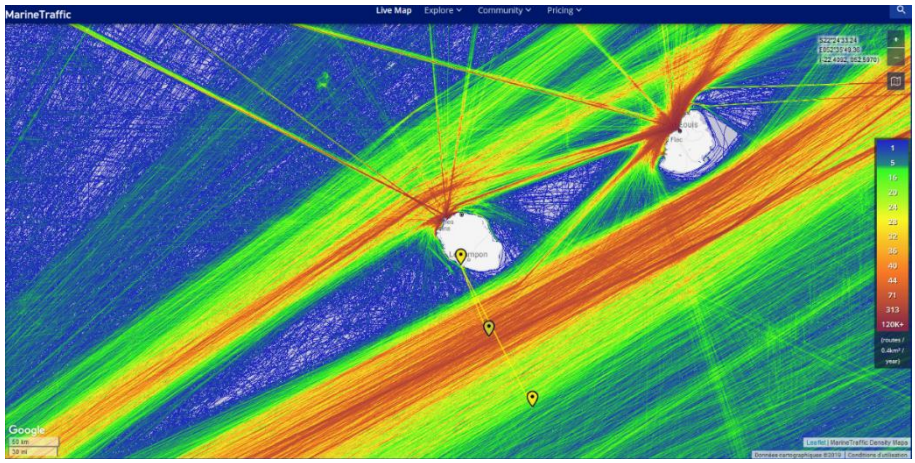


Figure 16 : Illustration extraite du site marinetrafic.com montrant la densité du trafic maritime de part et d'autre de l'île de la réunion.

On est alors arrivé à caractériser le trafic par :

i. Un rail de 20 cargos par jour situé à environ 100 km de Saint-Pierre. On considère une longueur typique de 100 mètres et une vitesse de 15 nœuds pour les cargos,

ii. Une flottille de pêche de 2 bateaux en permanence à moins de 10 km du point de sortie. On considère une longueur typique de 12 mètres et une vitesse de 6 nœuds pour ces bateaux. Ils sont placés aléatoirement à des distances comprises entre 1 et 10 km.

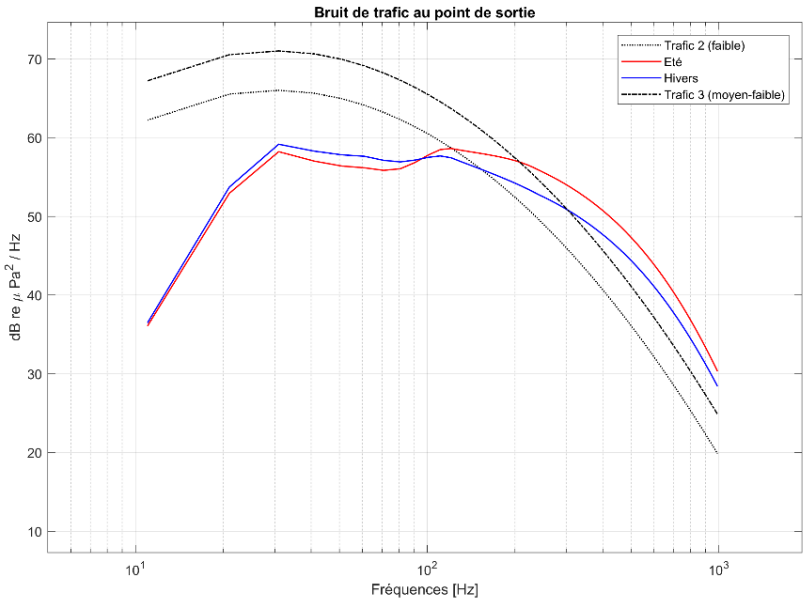


Figure 17 : Estimation du bruit de trafic au point de sortie. En traits pleins (hiver en bleu et été en rouge), modélisation complète prenant en compte les effets de talus. En pointillés, formule empirique pour un trafic moyen-faible à faible.

On constate (Figure 17) que la modélisation permet d'affiner un peu la contribution empirique du bruit de trafic, notamment aux plus basses fréquences (inférieures à 100 Hz). Cela est notamment dû aux fréquences de coupures liées à la faible profondeur au point de sortie.

3.4 CAS PARTICULIER DU BRUIT DE RESSAC

Comme indiqué, même si ce dernier a déjà été identifié et même estimé par Wilson [6], il n'est pas habituel de modéliser le bruit de ressac. Dans le cas présent, il nous semble nécessaire de le faire car le point de référence n'est qu'à 250 m d'une côte constituée de falaises et régulièrement exposée à la houle du large.

Le ressac est calculé en considérant trois paramètres :

- La distance à la côte,
- La hauteur des vagues,
- La direction des vagues par rapport à l'orientation de la côte

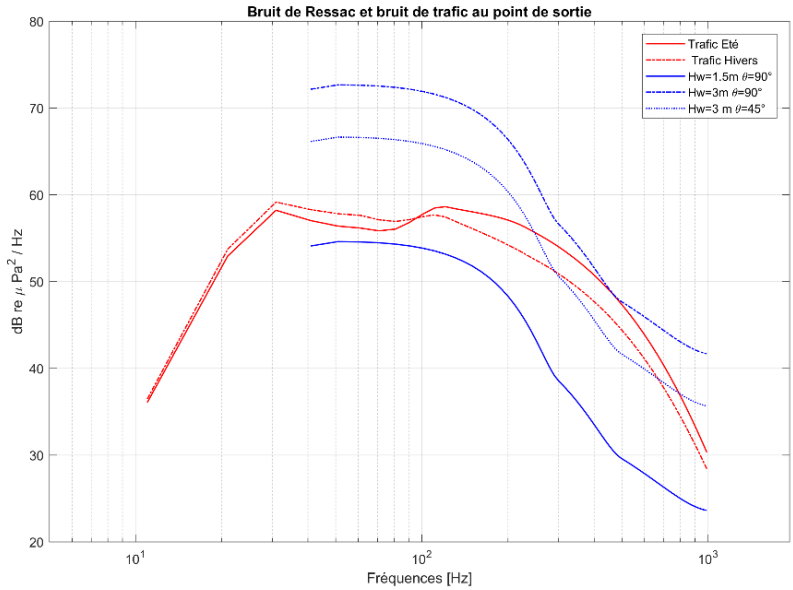


Figure 18 : En bleu, composante du bruit de ressac à 1 km de distance de la côte en fonction de la fréquence et pour plusieurs états de mer (hauteur et direction de la houle) ; En rouge, le bruit de trafic.

Plus la houle est forte et orientés perpendiculairement au trait de côte, plus le bruit de ressac est important. On constate qu'il présente des similarités avec le spectre du bruit de trafic. Le bruit de ressac sera supérieur ou inférieur au bruit de trafic selon l'état de la houle. On peut aussi cartographier son influence en tout point de l'emprise. Comme il s'agit d'un bruit basses fréquences, on représente (Figure 19) la carte de bruit à 200 Hz, contribution cumulée du bruit de trafic et du bruit de ressac.

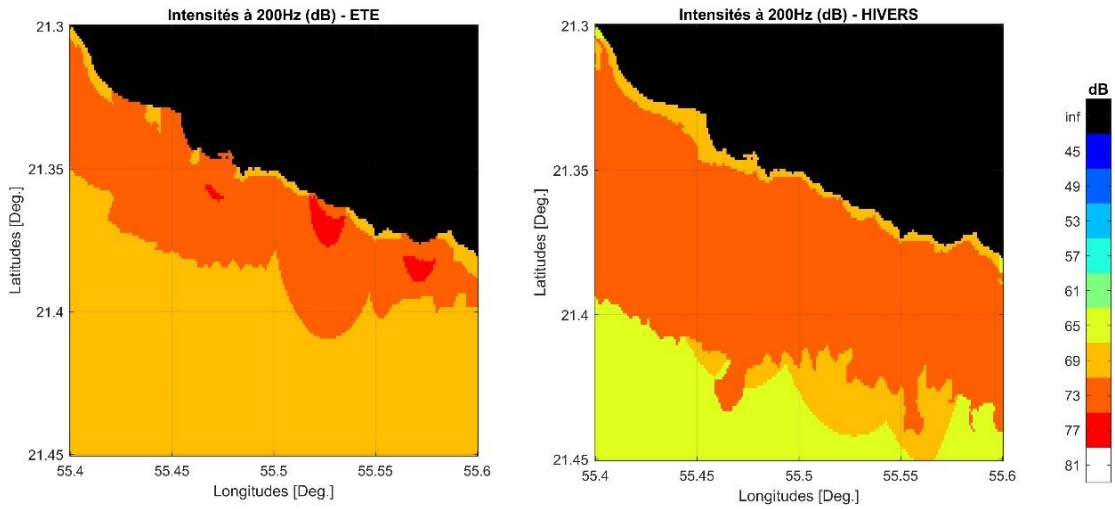


Figure 19 : Carte de bruit à 200 Hz en été (à gauche) et en hiver (à droite). On voit l'effet important du ressac, à quelques kilomètres lorsque le cumul avec le bruit de trafic est le plus fort.

Lorsque c'est le bruit de trafic qui domine, les lignes d'égale intensité suivent les isobathes. Lorsque c'est le bruit de ressac qui domine, les lignes d'égale intensité suivent des demi-cercles centrés sur les segments côtiers les plus exposés.

3.5 CAS PARTICULIER DU BRUIT BIOLOGIQUE

Le chorus biologique se révèle être la composante dominante de bruit dans les enregistrements qui nous ont été remis[6]. Même si c'est un sujet d'étude actuel (notamment pour l'évaluation de l'état écologique d'un site), il n'est pas à ce jour modélisé. Il serait pourtant incohérent de ne pas le prendre en compte dans cette étude sur le bruit ambiant. Nous proposons donc de cartographier le bruit biologique en utilisant un spectre typique [10] car il correspond assez bien au domaine spectral relevé dans les données.

Nous considérons en première approximation que le bruit de chorus est présent dans les fonds rocheux, absent ailleurs, et qu'il ne se propage pas[7]. Par ailleurs, même s'il existe probablement une saisonnalité du bruit de chorus [11] elle ne nous est pas connue et la cartographie qui est faite est fortement corrélée à la localisation des roches mais ne dépend pas de la saison (voir Figure 20).

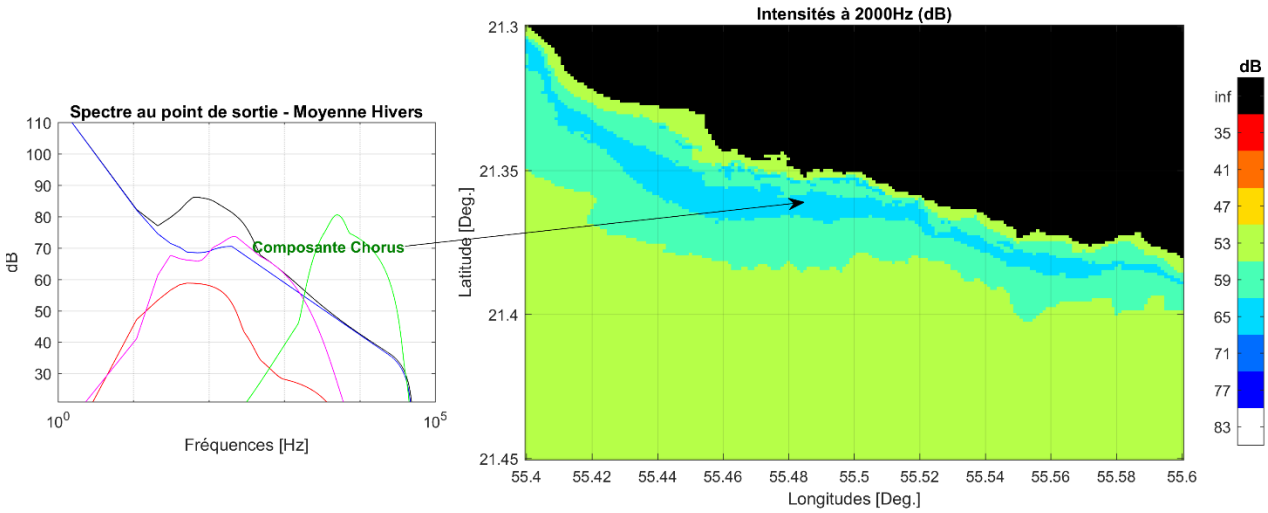


Figure 20 : Cartographie de la composante chorus. Elle se caractérise par un bruit fort vers 2000 Hz aux endroits où la roche est affleurante et où la hauteur d'eau est inférieure à 50 m. A gauche, place de la composante chorus (en vert) par rapport aux autres composantes de bruit.

[6] Enregistrements issus des campagnes de mesures in-situ lors de l'étude de pré-cadrage d'Artelia.

[7] Ce qui se justifie par le fait que ce soit un bruit haute fréquence.

Comme on peut le constater (Figure 21), le résultat de la modélisation est en accord avec les spectres de bruit expérimentaux.

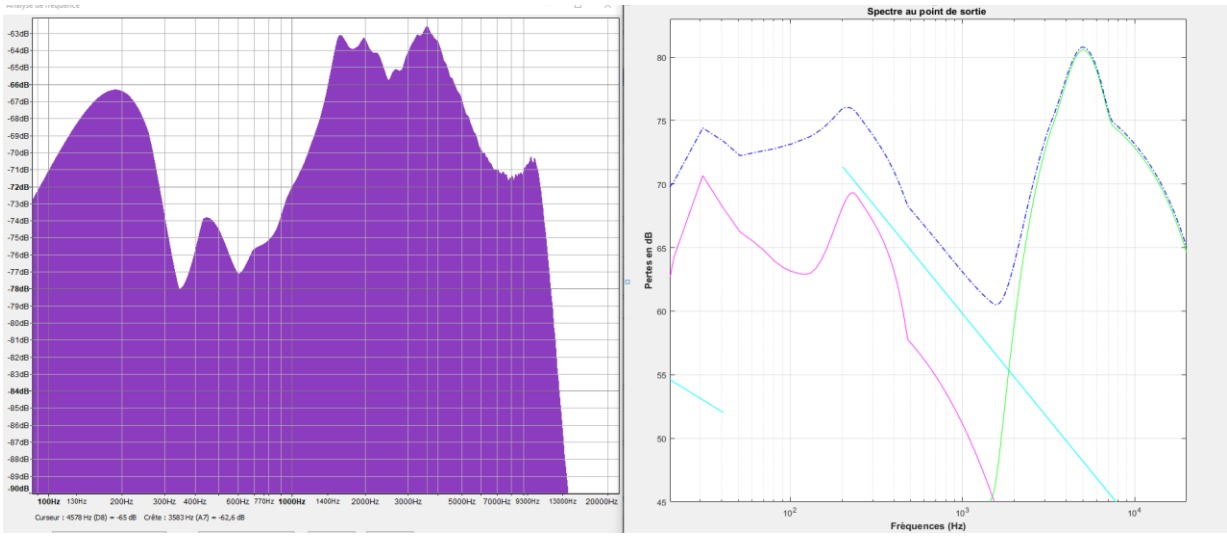


Figure 21 : Comparaison entre les spectres : une réalisation mesurée (à gauche, intensités relatives) et une réalisation simulée (à droite, spectre total en pointillés bleus). On voit bien les effets du chorus biologique. La composante BF est ici d'origine anthropique (bateaux).

4 Simulation du bruit ambiant

4.1 CARACTERISTIQUES GENERALES DU BRUIT AMBIANT

Afin d'évaluer le bruit ambiant du site, on regarde au préalable la sensibilité des spectres de bruit vis-à-vis des paramètres environnementaux caractérisant le site.

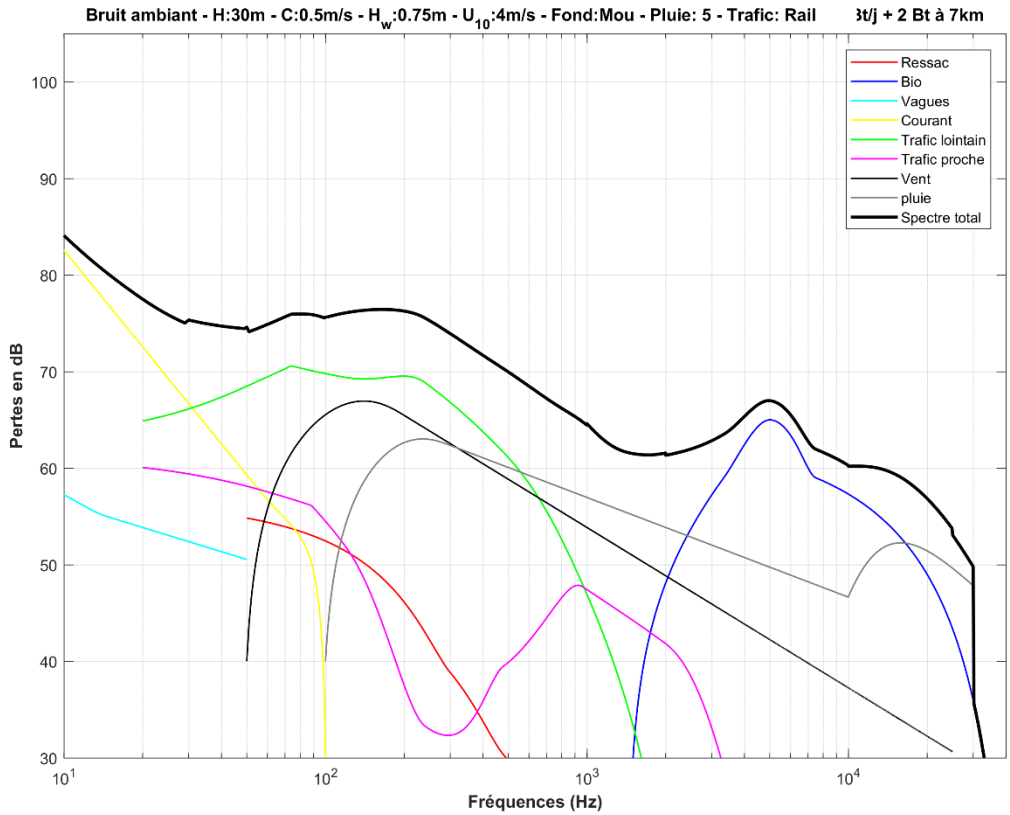


Figure 22 : Spectre du bruit ambiant total, somme de toutes les composantes modélisées.

Aux plus basses fréquences, le bruit de courant est modéré, toujours supérieur au bruit de turbulences liées aux vagues. En hautes fréquences, le bruit de chorus biologique domine sur les autres (pluies, transport). Vers 500 à 1000 Hz, on retrouve la signature du vent. Il y a juxtaposition de trois composantes vers les 100 Hz : le bruit de trafic lointain (faible), le bruit de ressac (faible sauf dans certains cas près des côtes), le bruit de trafic proche qui est dominant. Il est tout au long de cette étude considéré comme uniforme selon la saison et selon les endroits ce qui n'est bien sûr pas le cas en réalité : une moyenne de 2 bateaux situés dans une rayon de 10 kilomètres (typiquement dans l'emprise) est considérée.

Les cartes saisonnières de bruit peuvent être représentées à toutes les fréquences comprises entre 30 Hz et 40 kHz. Un exemple pour la saison été à 70 Hz est donné Figure 23.

Pour rappel, le spectre est d'abord calculé pour une configuration de courant, vagues, vent, pluie, trafic proche, donnée : c'est le spectre « base » représenté en bleu, Figure 23 en bas à droite. Il est le même dans toute l'emprise[8]. Ensuite, les composantes cartographiées : trafic, ressac, chorus biologique, sont ajoutées au spectre de base.

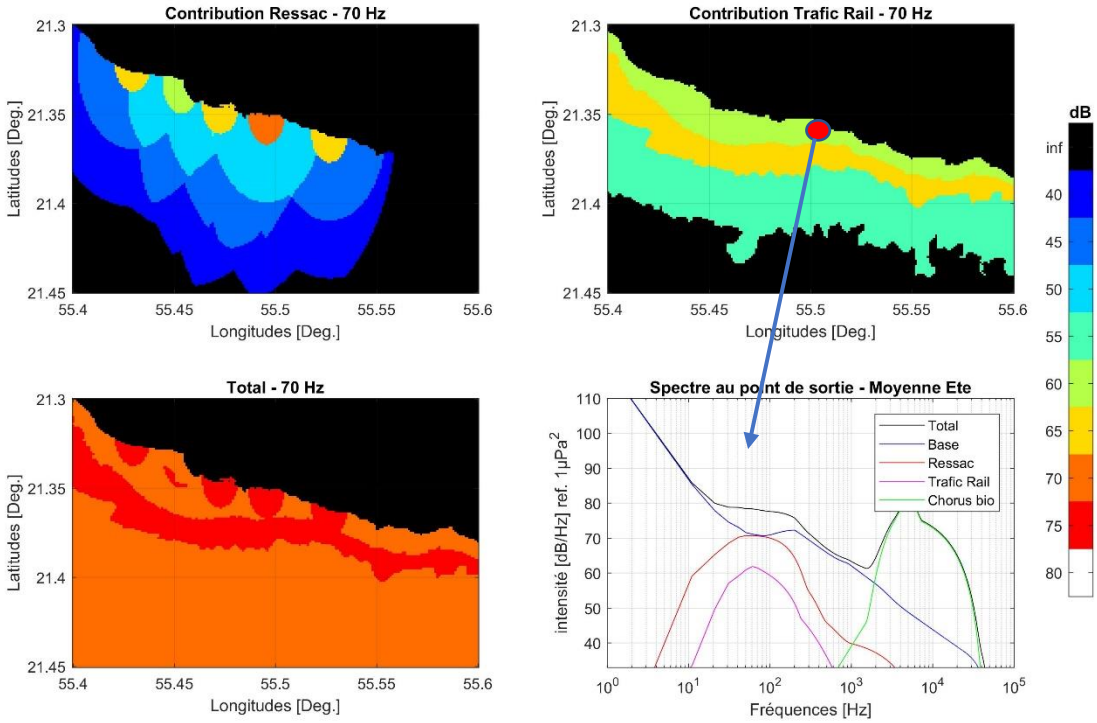


Figure 23 : Aide à la compréhension des cartes saisonnières.

Dans l'exemple illustré (Figure 23, en bas à gauche), les variations montrent des nuances d'intensité entre 70 et 75 dB typiquement. On peut comprendre la signification de cela de la façon suivante :

- Il y a d'abord la composante de base, qui est assez forte et qui est surtout composée du trafic proche,
- Il y a ensuite la composante de ressac, comme indiqué sur la carte en haut à gauche, ou bien, pour le point central, sur la Figure rouge en bas à droite,
- Il y a enfin la composante de trafic, comme indiqué sur la carte en haut à droite, ou bien, pour le point central, sur la Figure magenta en bas à droite

La composante de trafic lointain à cette fréquence est surtout dépendante de la bathymétrie, c'est pourquoi on retrouve les motifs de variation bathymétrique.

[8] Ça n'est évidemment pas exact ; ces paramètres ne sont pas tout à fait les mêmes selon l'endroit où on se trouve dans l'emprise mais nous ne pouvons pas à ce stade cartographier leurs variations.

La composante de ressac montre une très forte décroissance au fur et à mesure qu'on s'éloigne des cotes (couleur bleu). On note d'autre part des nuances selon les segments de côte : certains sont de faible intensité (en vert), d'autre sont plus forts (notamment sur le secteur de l'hôpital). Cela est lié à la nature du trait de côte d'une part, à l'orientation de la houle vis à vis de la côte d'autre part (ici, la houle vient du sud).

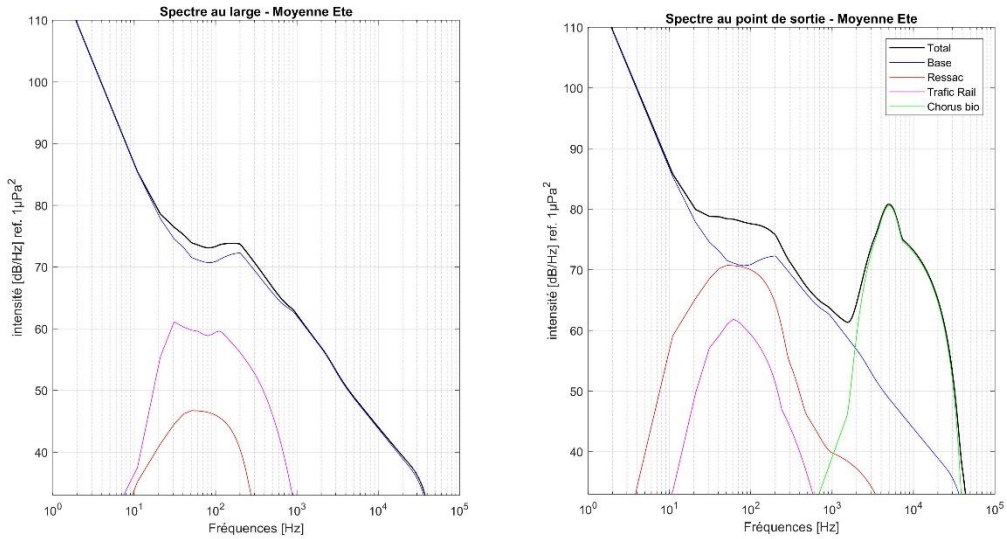


Figure 24 : A gauche, spectre pris au large (ici 5 Miles au sud du point de sortie). A droite, spectre au point de sortie (été).

La Figure 24 permet de comprendre la différence entre le spectre au point de sortie par rapport à un spectre pris plus au large : l'effet du chorus biologique a totalement disparu (il faut un fond rocheux et peu de profondeur). La composante de trafic lointain est sensiblement la même mais le bruit de ressac a également disparu. Il en résulte une différence limitée à deux domaines : les fréquences 50-200 Hz (différences de 5 à 10 dB), les fréquences du chorus, 1 kHz à 20 kHz typiquement (différences pouvant être de plus de 20 dB).

4.3 CARTES SAISONNIERES

Dans les Figures qui suivent, on prend les valeurs moyennes des paramètres environnementaux pour constituer 4 jeux de données d'entrée[9] permettant de générer quatre séries de cartes de bruit selon la saison.

[9] Voir Annexe 1 « données d'entrée »

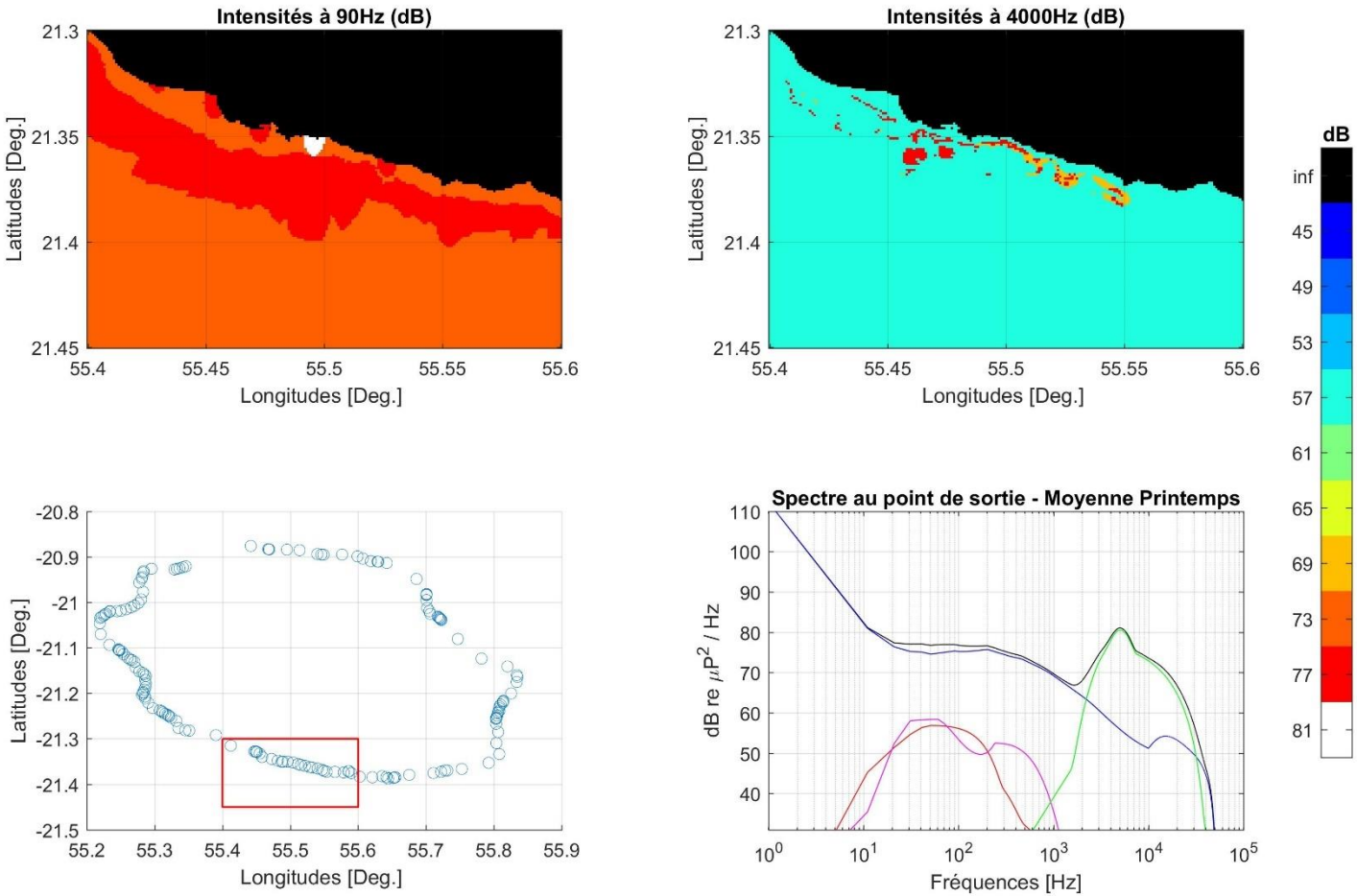


Figure 25 : Situation moyenne au printemps. En haut à gauche bruit à 90 Hz. En haut à droite, bruit à 4 kHz. En bas à gauche, emprise. En bas à droite, spectre total (en noir) et ses composantes au point de sortie.

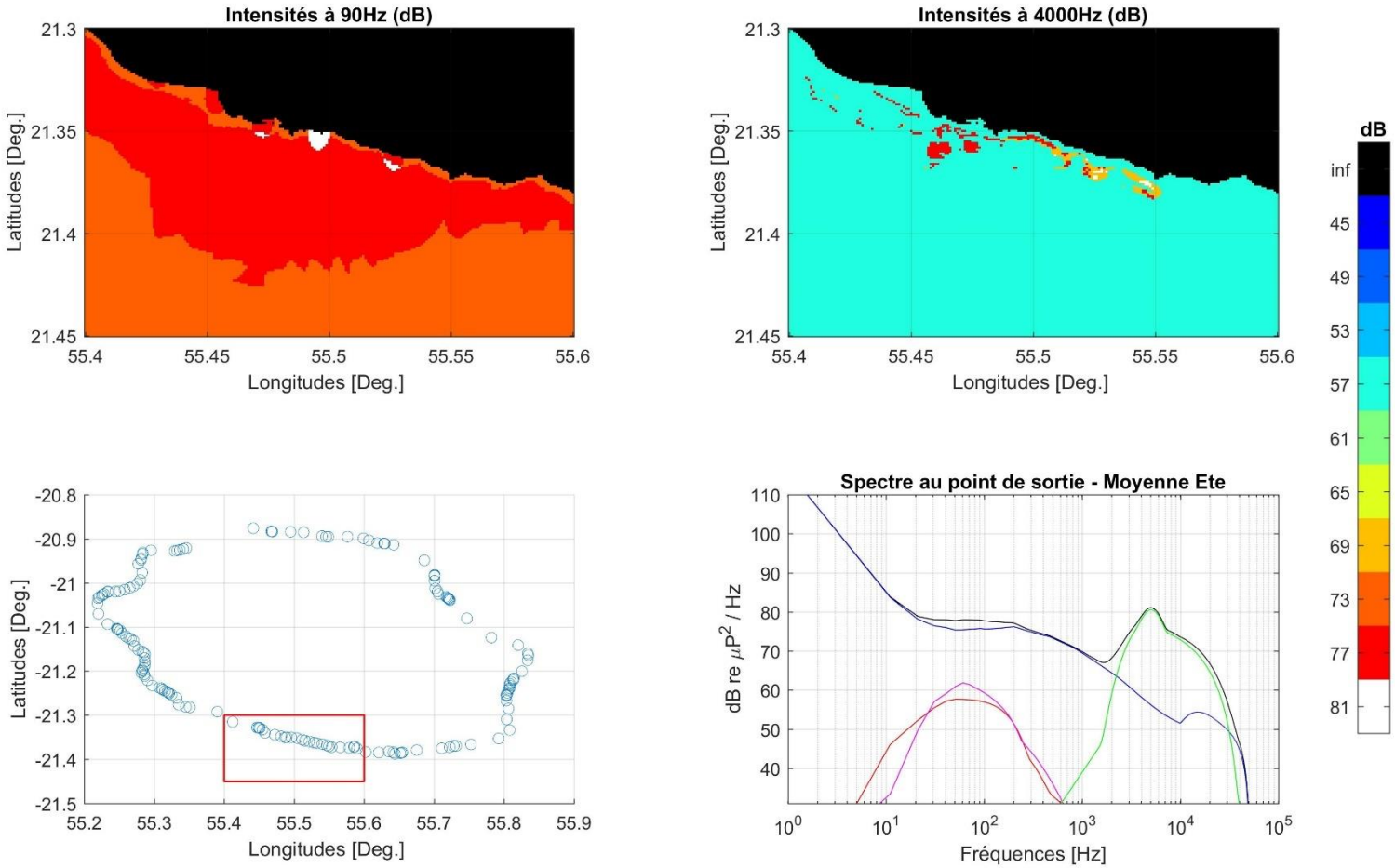


Figure 26 : Situation moyenne en été.

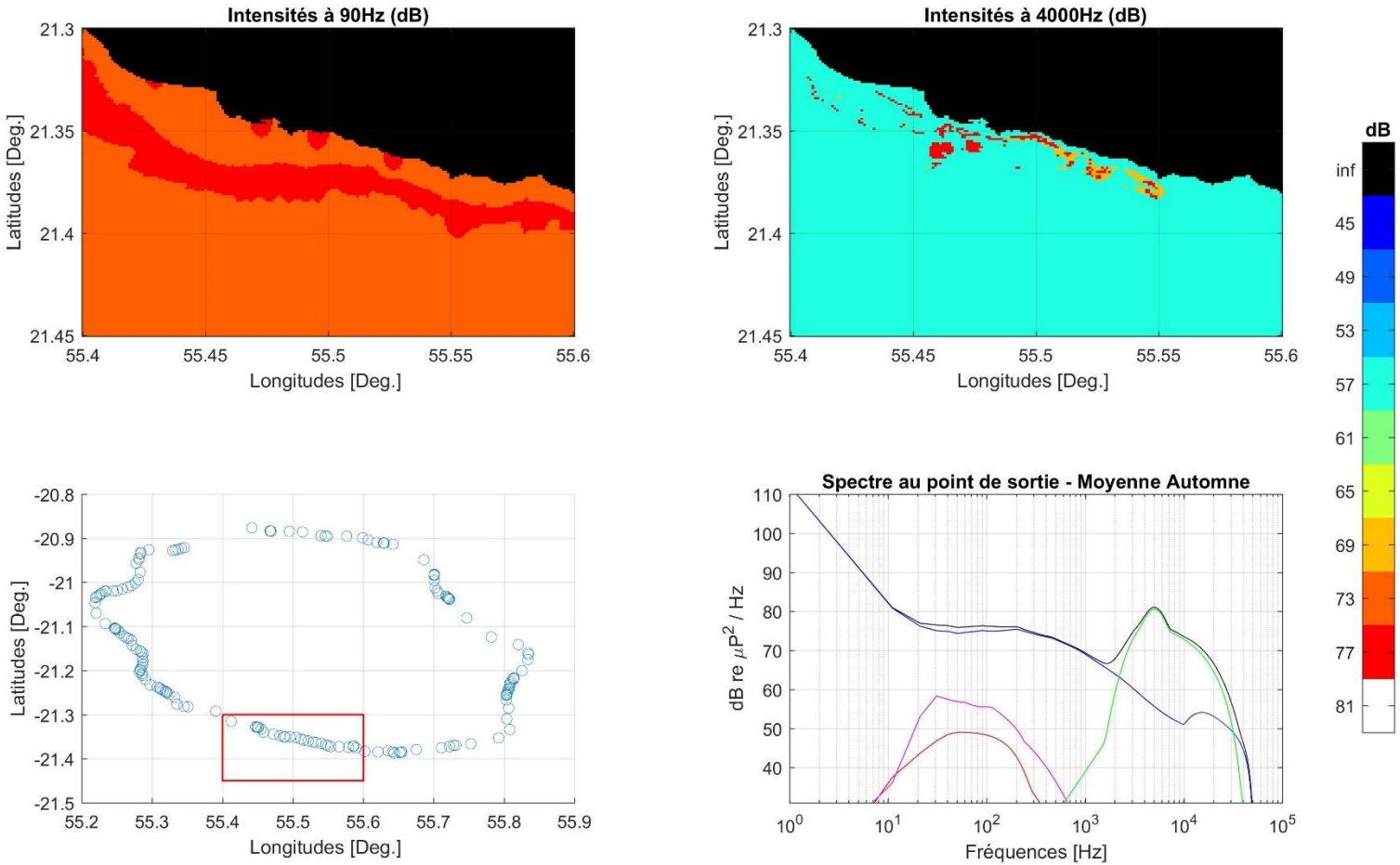


Figure 27 : Situation moyenne en automne.

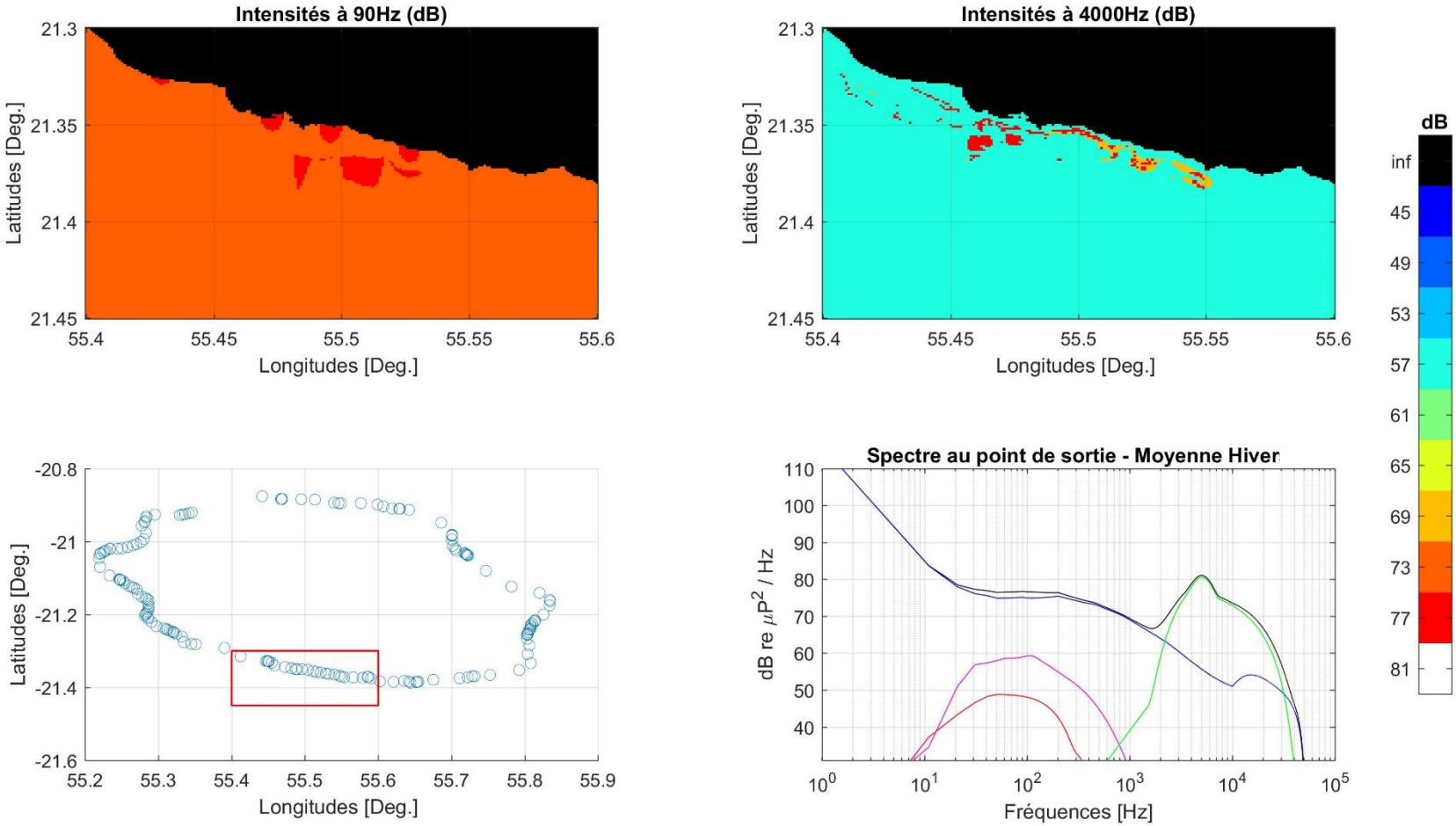


Figure 28 : Situation moyenne en hiver.

On remarque que :

- Il y a peu de variabilité selon la saison,
- Il y a une forte ressemblance des situations en automne et au printemps,
- Il y a un peu plus de contraste de bruit entre l'hiver et l'été du fait du bruit de ressac essentiellement.

4.4 SYNTHESE

Pour chaque saison, on a pris une situation moyenne. La Figure 29 montre les 4 spectres résultants au point de sortie. Parallèlement, on a simulé les spectres de 10000 réalisations possibles de paramètres d'environnements pour établir un spectre moyen et des spectres correspondant aux écart-types (σ). Ils ne sont cependant pas des indicateurs de fréquences puisque les probabilités d'apparition des situations ne sont pas intégrées.

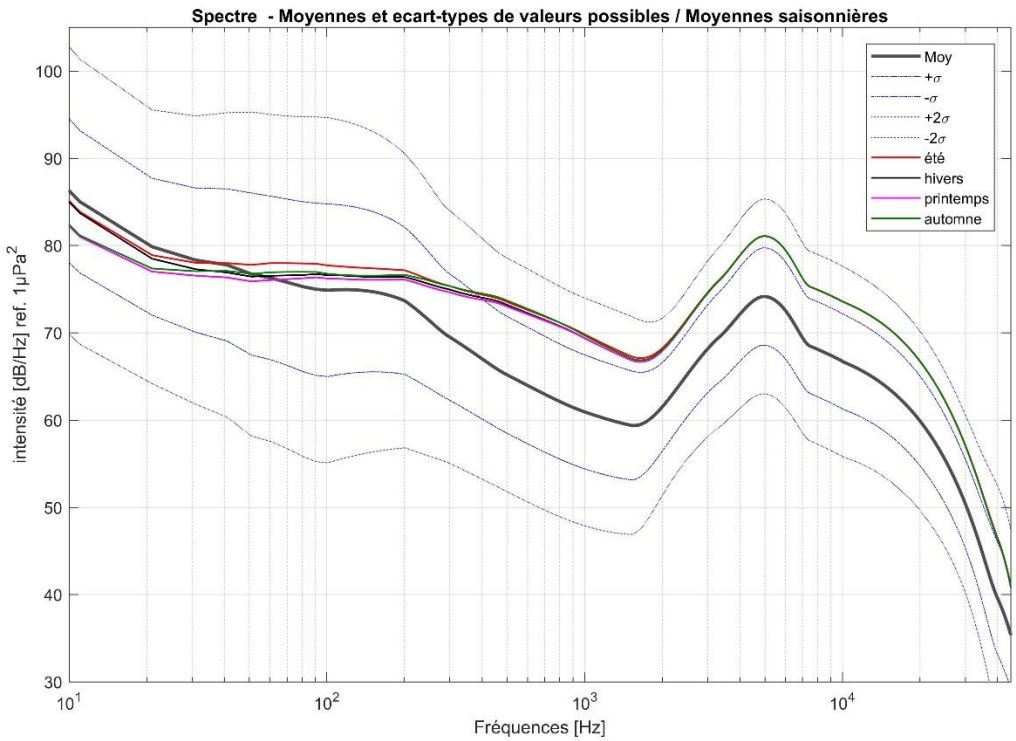


Figure 29 : Spectres moyens par saison comparés aux spectres moyens sur un jeu de 10000 simulations au point de sortie.

De nouveau, il apparait évident que les variations selon les saisons sont faibles en situation moyenne. En effet, les seuls contributeurs variants temporellement sont le bruit de trafic lointain et/ou le bruit de ressac. Or ces paramètres sont de plus faible intensité que la composante trafic proche.

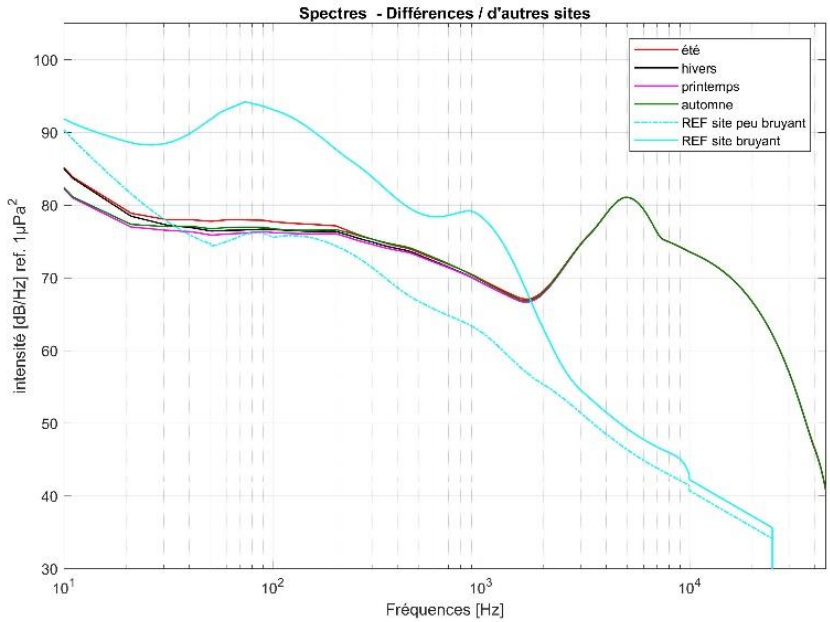


Figure 30 : Superposition des 4 spectres moyens saisonniers estimés avec 2 spectres relevés en situation côtière en Métropole.

Sur la Figure 30, on montre comment se situe le spectre au point de sortie (Saint-Pierre) par rapport à des spectres de métropole : le plus intense se trouve à une cinquantaine de kilomètres d'un rail de cargo. Le moins intense correspond à un site plus calme à proximité de Saint-Brieuc. On met là en évidence les caractéristiques du bruit de Saint-Pierre : (i) un bruit assez faible aux basses fréquences (peu de trafic maritime), un bruit de chorus biologique fort et localisé.

5 Conclusion sur le bruit ambiant

Afin de simuler au mieux le bruit ambiant du site de Saint-Pierre, nous avons développé une solution de modélisation du chorus biologique et du ressac. En effet, ces paramètres peu communs sont sur ce site les plus influents.

Le bruit ambiant moyen du site est caractérisé par une contribution importante du chorus biologique.
La falaise bordant le CHU de Saint-Pierre étant exposée aux vagues, on peut s'attendre à des effets significatifs (en cas de houles australes) du bruit de ressac sur le spectre du bruit ambiant au niveau du point de sortie.
Le courant et le trafic ont dans le cas présent une faible influence.

6 Caractérisation acoustique du microtunnelier

On trouve assez peu de documentation sur les vibrations produites par les TBM (*Tunnel Boring Machine*). Le problème des vibrations se pose particulièrement lors des constructions de tunnels près des zones habitées (métro par exemple). On s'inspire ici plus particulièrement de [Rahman, 12], [Speakman, 13] et [Swinnen, 14] pour essayer de caractériser le spectre et les intensités émises par le tunnelier en contexte de roche dure.
Dans tous les cas, il apparait que les vibrations produites les plus fortes sont inférieures à 100 Hz (Figure 31).

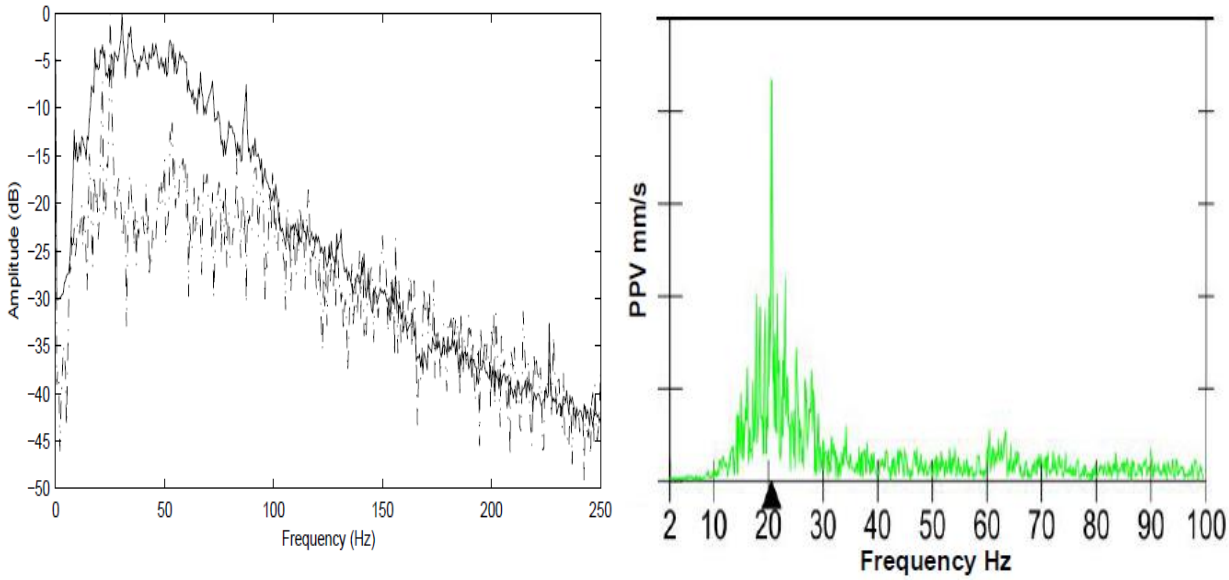


Figure 31 : Deux mesures de spectres de TBM : A gauche, spectre en échelle log du signal de composante horizontale d'un géophone placé quelques mètres au-dessus de la machine (source [14]). A droite, spectre typique mesuré dans la roche tendre (source [13]).

Il s'agit de sources d'ondes de cisaillement liées à la friction des machines tournantes. Les TBM étant historiquement plus utilisées dans les roches tendres, on trouve moins d'information en roche dure. Toutefois, comme indiqué dans [12], la fréquence dominante de la machine augmente de 8 Hz jusqu'à 30 Hz au fur et à mesure que la dureté du milieu augmente. On prendra donc comme référence de calcul la fréquence de 30 Hz car le Basalte de la Réunion est une roche dure.

En ce qui concerne les intensités, on se base sur [12] (voir figure 32). L'unité la plus utilisée (du fait de l'utilisation de géophones qui mesurent des vitesses vibratoires) est le PPV (*Peak Particule Velocity*). C'est le maximum d'une des trois composantes v_x,v_y,v_z, de vitesse vibratoire, mesuré le plus souvent en mm/s.
En régime harmonique, on peut relier vitesse vibratoire v et pression P selon: $P = \rho \times C \times v$
avec pour valeurs typiques, la densité ρ = 2500 Kg/m^3, la vitesse des ondes P, C_p=4500 m/s, la vitesse des ondes S, C_s=2000 m/s.

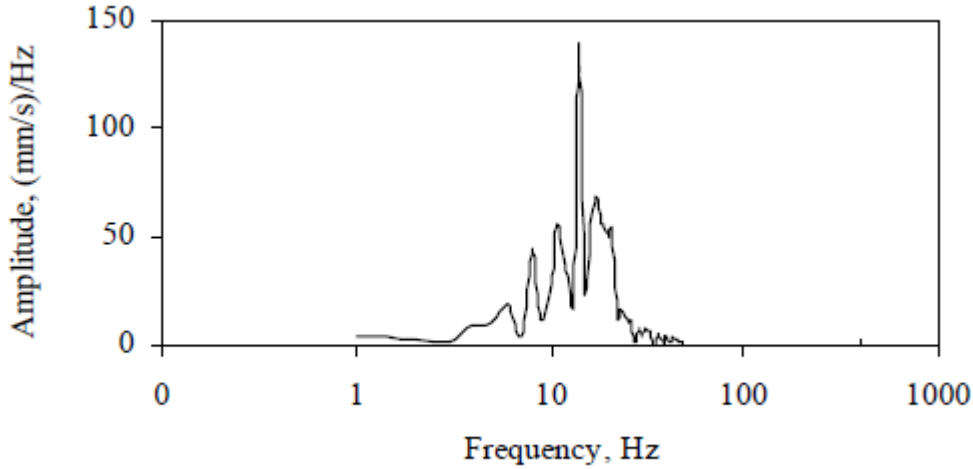


Figure 32 : Densité spectrale rayonnée par la source (composante transverse) : PPV en mm/s/Hz.

On propose de partir d'une valeur typique PPV de 100mm/s/Hz à 30 Hz de la composante de cisaillement émise. Ces valeurs sont cohérentes avec les valeurs trouvées dans la littérature (Figure 32, [12]) et avec les valeurs mesurées à une dizaine de m ([13] ou [14]). Nous nous intéressons aux pressions P propagées dans l'eau.

Le code aux éléments finis que nous utiliserons pour analyser la propagation à courte distance au chapitre suivant est capable de gérer toutes les conversions d'ondes résultant d'une excitation de cisaillement produite dans la roche. Ça n'est en revanche pas le cas des codes de propagation « classiques » (PE, modes normaux …) de sorte qu'on va considérer l'émission d'une source fluide équivalente. Ce problème est très difficile à traiter du point de vue théorique de sorte qu'on va plutôt utiliser la procédure suivante :

- On introduit le rapport d'impédance Z_w/Z_b entre la roche (indice b, comme *bottom*) et l'eau (indice w comme *water*) pour prendre en compte le coefficient de transmission de l'onde du milieu où se trouve la source vers l'eau,
- On introduit l'effet de la profondeur par une relation en D^1 (dispersion géométrique),

On arrive donc à une expression du type : $\frac{P_{modif}}{P_0} = \frac{2(Z_w / Z_b)}{1+(Z_w / Z_b)} \times \frac{1}{D}$, permettant d'estimer les intensités émises à partir de PPV (Tableau 1).

Freq Hz	PPV (mm/s)	I^s_0 dB	I^p_0 dB 5m	I^p_0 dB 20m
20	50	229	204	192
30	100	235	210	198
60	50	229	204	192
120	5	209	184	172

Tableau 1 : Estimation du niveau émis (équivalent onde P) par la source à partir des valeurs de PPV.

Il s'agit donc en première approximation d'une source omnidirectionnelle harmonique continue :
- De fréquence centrale de 30 Hz
- D'intensité émise calculée à partir des données de PPV et fonction de la nature du sol et de la distance à l'interface.

7 Analyse de la propagation

On distingue deux façons d'appréhender la propagation dans le cas présent : (i) par une approche calculatoire complète et basée sur une modélisation aux éléments finis [15], adaptée aux courtes distances, (ii) par un code aux modes normaux couplés [9], limité par diverses approximations mais apte à effectuer les calculs sur toute l'emprise en milieu variable. On commence par une interprétation phénoménologique basée sur un calcul aux éléments finis appliqué à une configuration représentative de la zone pour justifier les approximations qui sont faites dans l'élaboration de la cartographie.

7.1 APPROCHE CALCULATOIRE

De façon simplifiée, l'environnement 2D est défini comme indiqué en Figure 33. Le tableau 2 précise les valeurs des paramètres.

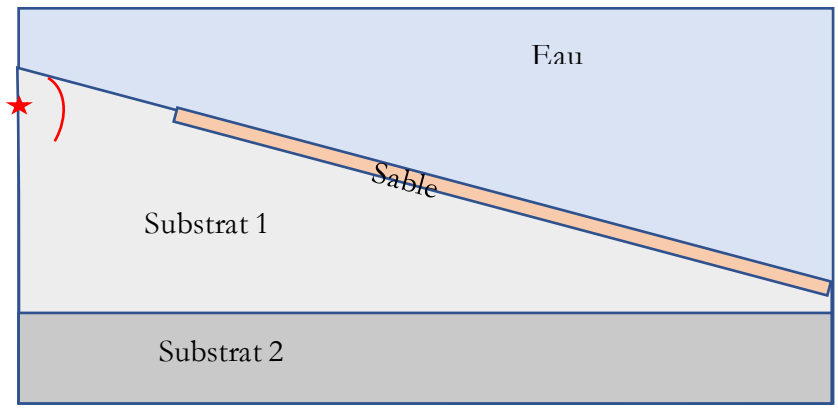


Figure 313 : Configuration 2D choisie (emprise de 1000 m de distance sur 300 m de profondeur): source de cisaillement placé dans la roche, profondeur croissante, présence de sable aux plus grandes profondeurs.

Produit	Epaisseur @ 0m	Epaisseur @ 1000m	Cp (m/s)	Cs (m/s)	Densité	Atténuation
Eau	20	100	1520	0	1	0
Sédiment1	0	5	1650	800	1.8	0.5
Substrat1	180	95	4250	2000	2.4	0.25
Substrat2	100	100	5000	2500	2.6	0.25

Tableau 2 : Paramètres d'environnement simplifié choisis.

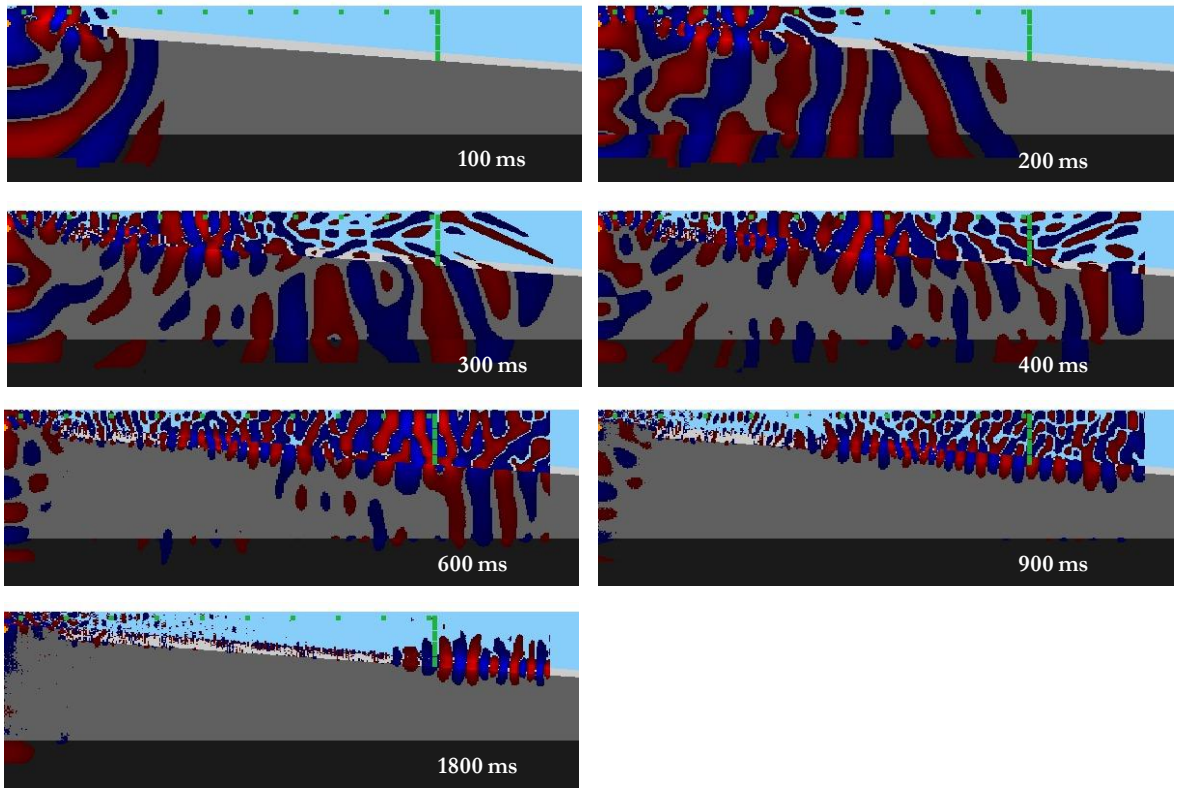


Figure 34 : Snapshots successifs pour la configuration décrite. En haut à gauche, on voit la couche d'eau au-dessus du sol basaltique ainsi que les récepteurs (en vert). Sur les autres figures, on voit le train d'onde progressant vers la droite à diverses vitesses suivant les ondes dominantes.

La source est placée à 10 m sous l'interface eau-basalte. On observe la propagation d'une source type Ricker, centrée à 30 Hz, configuration axisymétrique. Sur la figure 34, on peut successivement voir :

- Les ondes P dans le basalte (4250m/s), déjà presque arrivées à 750 m à 200 ms alors que les ondes P évoluent bien moins vite dans l'eau (1500m/s),
- A 400 ms, les arrivées issues des conversions d'ondes S (2000m/s) sont déjà là,
- A 600 ms, arrivent les ondes P propagées dans l'eau (1500m/s) et dans le sable (1650m/s),
- A 900 ms, arrivent les conversions d'ondes S propagées dans le sable (800 m/s),
- A 1800 ms, les ondes d'interface (les plus lentes, < min(C_s)) sont passées.

On représente ensuite sur la figure 35 les signaux temporels et les spectres qui seraient reçus par un hydrophone placé à 10 m sous la surface, à respectivement 30 m, 375 m et 750 m du point source. En dernier, on représente le signal reçu à 750 m placé à 10 m au-dessus du fond.

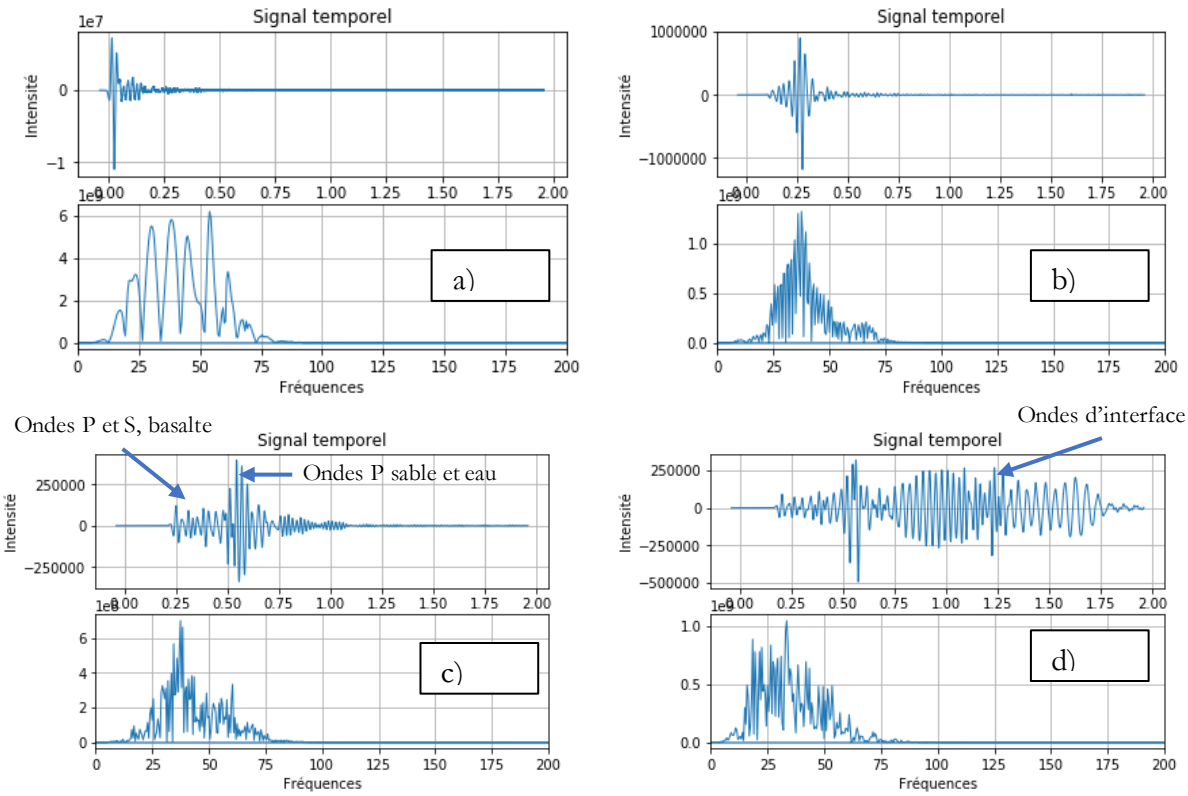


Figure 35 : Signaux synthétiques reçus à 10 m sous la surface (en temps en haut et en fréquences en bas). En haut, à 30 m (à gauche) et à 375 m (à droite). En bas, à 750 m (à gauche), à 750 m mais à 10 m du sol (à droite).

On peut voir :

- Sur la figure a), le spectre à 30 m, très proche de la forme spectrale émise par un TBM,
- Sur la figure c), le signal étendu de 0.25 s à 1 s (arrivées des ondes P du substrat jusqu'aux conversion des ondes S du sable),
- Sur la figure d), le signal beaucoup plus étalé temporellement du fait des ondes de surface (avec une forte amplitude).

Ce calcul permet de voir le rôle des diverses ondes en fonction des natures de fond en présence, de la position de la source et de son contenu spectral.
Parallèlement, cela permet de se faire une idée de ce qui se passera réellement, comment s'articuleront les contributions du bruit propagé par la machine. On voit aussi que le calcul effectué pour les cartographies, simplifié car il ne prend pas en compte les ondes d'interfaces, reste tout à fait correct sauf au plus près du fond où les ondes d'interfaces sont plus fortes. Ce point, qui pourrait être impactant sur les zones nourricières ou vis-à-vis des vibrations terrestres, a moins d'importance pour les mammifères marins comme les baleines.

La propagation est cette fois calculée sur la base d'un code de propagation aux modes couplés. La source est placée au point de sortie à 10 mètres sous l'interface eau-roche. Le fond est considéré comme rocheux, hauteur d'eau de 22 m. Le calcul est ensuite réalisé pour une pluralité de radiales partant de ce point et rejoignant les extrémités de l'emprise ; il y a donc une multitude de profils bathymétriques (Figure 36).

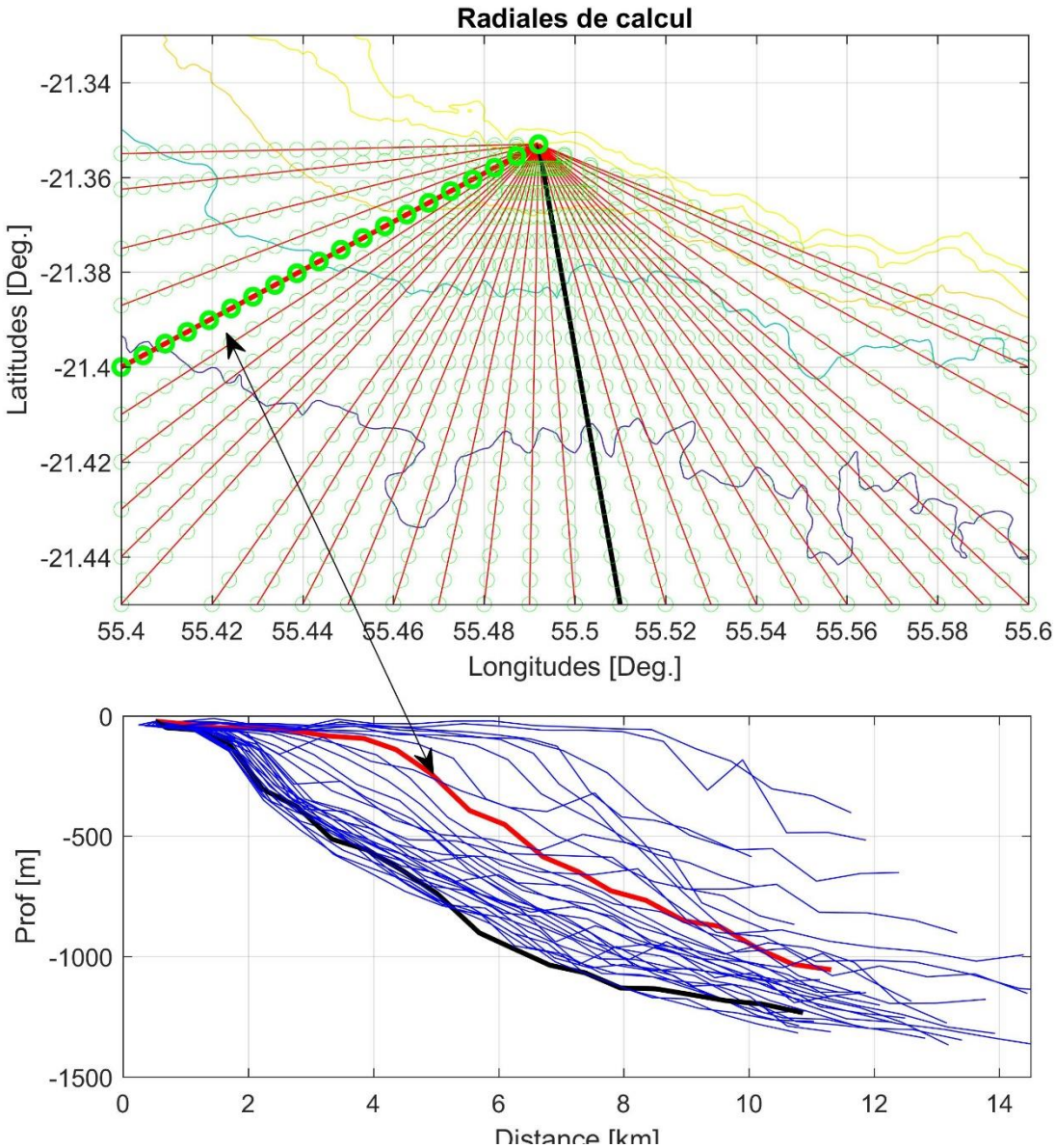


Figure 36 : Construction de la cartographie. Du point de sortie partent une pluralité de radiales (en haut), dont on extrait ensuite la bathymétrie (en bas).

Le profil de célérité est celui de la saison choisie. Le calcul présenté est fait à la fréquence de 30 Hz. En Figure 37, les images représentent le champ de perte en fonction de la distance et de la profondeur pour plusieurs radiales successives.

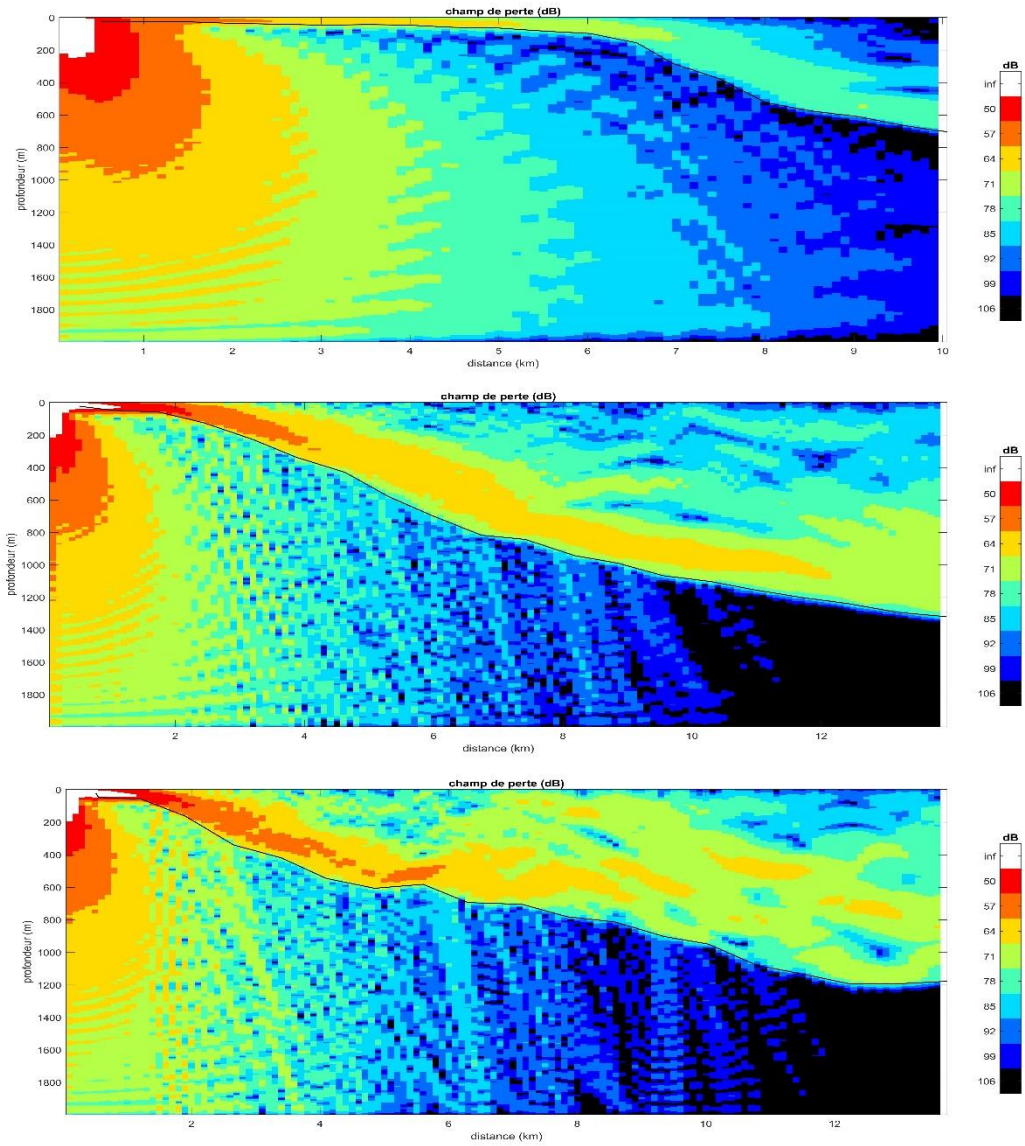


Figure 37 : Champ de pertes à 30 Hz pour diverses radiales (numérotées de 1 à 34 depuis l'ouest vers l'est en passant par le sud).

Les caractéristiques principales sont les suivantes :

- Le son « s'écoule » vers le large en restant « collé » au fond (effet du profil de vitesses, quelle que soit la saison),
- Il y a peu de variation de la propagation en fonction de la saison à cette fréquence. La encore, cela est dû à la faible profondeur d'eau d'une part, au fait que l'émission soit située dans le sol d'autre part,
- Les pertes sont largement sous-évaluées (conservatif) en très petits fonds car on a pris un fond dur et une mer plate,

Par conséquent, à l'échelle de l'emprise déca-kilométrique, il n'est pas nécessaire de refaire les calculs pour toutes les saisons. On effectue par contre des calculs pour plusieurs distances à l'interface.

Pour chaque fréquence, on représente les intensités sonores rayonnées dans toute l'emprise en dB*re*µPa²/Hz. A 30 Hz, on a effectué le calcul pour deux profondeurs de réception : une profondeur fixe de 25 m (profondeur du point de sortie à 5 m près), une profondeur variable à 5 m au-dessus du sol. Pour les autres fréquences, on montrera les résultats pour cette dernière configuration qui est plus conservative (puisque c'est la configuration la plus critique du fait que les sons y soient le plus fort).
Les résultats sont présentés pour la saison d'été en considérant un temps calme (conservatif). Les paramètres géoacoustiques du fond sont ceux d'un fond dur (conservatif). On considère la source à 5 m sous la surface du fond au point de sortie, ce qui est de loin la configuration la pire en terme de bruit émergeant.

7.3.1 RESULTATS A 30 HZ

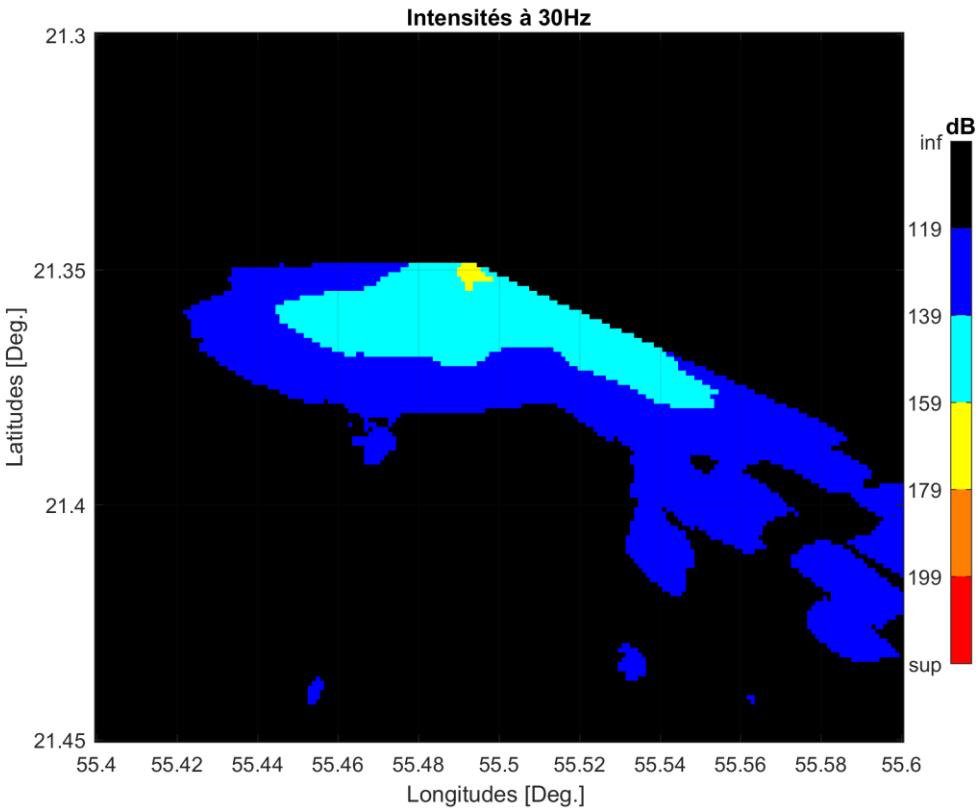


Figure 38 : Cartographie sonore du bruit rayonné par la machine (localisée à 5 m sous l'interface du point de sortie) dans l'emprise à 30 Hz et calculée à la profondeur de 25 m.

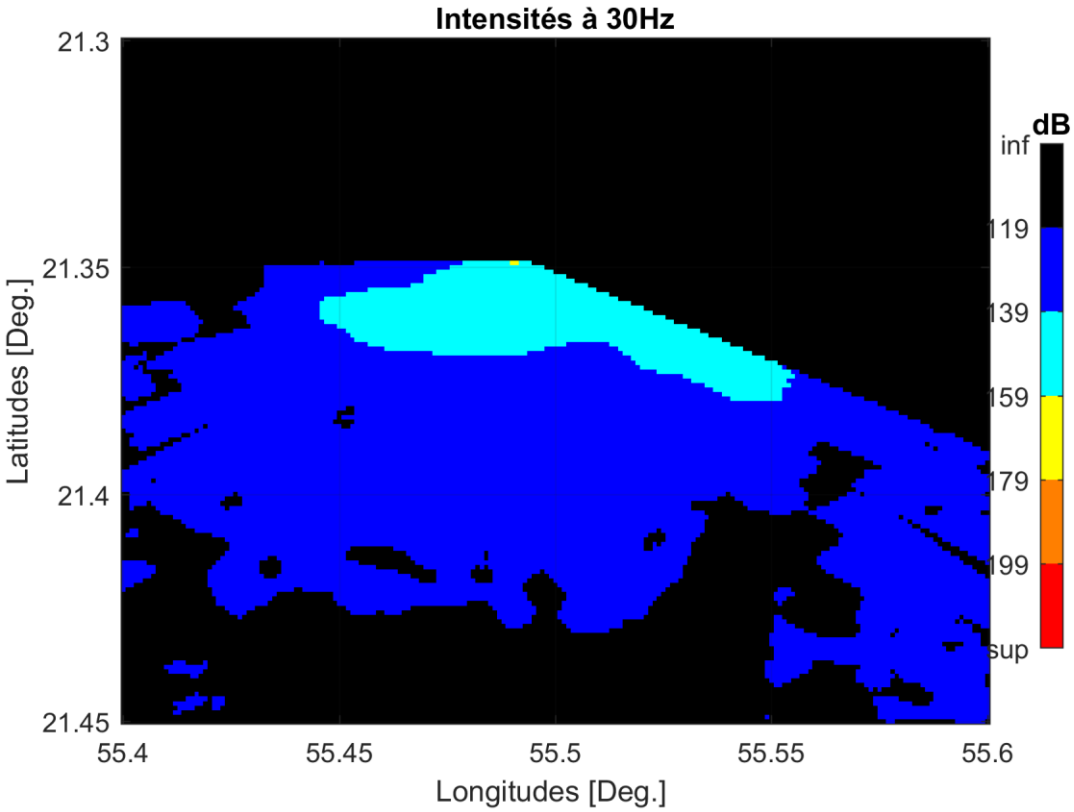


Figure 39 : Cartographie sonore dans l'emprise à 30 Hz et calculée à 5 m au-dessus du fond (machine localisée à 5 m sous l'interface du point de sortie).

On constate (Figure 39) que le bruit rayonné dépasse les 119 dB jusqu'à une distance de 10 km typiquement (couleur noire en dessous de 119 dB), ce qui est supérieur au bruit ambiant attendu à cette fréquence (compris entre 63 et 95 dB avec un intervalle de confiance à 95%, figure 29, page 27 du rapport sur le bruit ambiant).
Toutefois, il reste inférieur à 179 dB (seuil d'impact physique des cétacés décrit dans la suite), même au plus près de la source[10], ce qui est l'information la plus importante. En effet, dans un tel cas de figure, l'intensité *peak to peak* de 190 dB ne sera pas atteinte.

7.3.2 RESULTATS A 60 ET A 120 HZ :

A 60 Hz, le niveau émis est moins fort, peu au-dessus du bruit ambiant (dont la valeur baisse assez peu entre 30 et 120 Hz). A 120 Hz, le niveau de 119 dB reste confiné dans un petit périmètre.

[10] Dans le cadre de la procédure utilisée pour cartographier le bruit : la valeur en un point est la somme pondérée des valeurs calculées dans un périmètre de 1000 m. Les contrastes sont donc estompés.

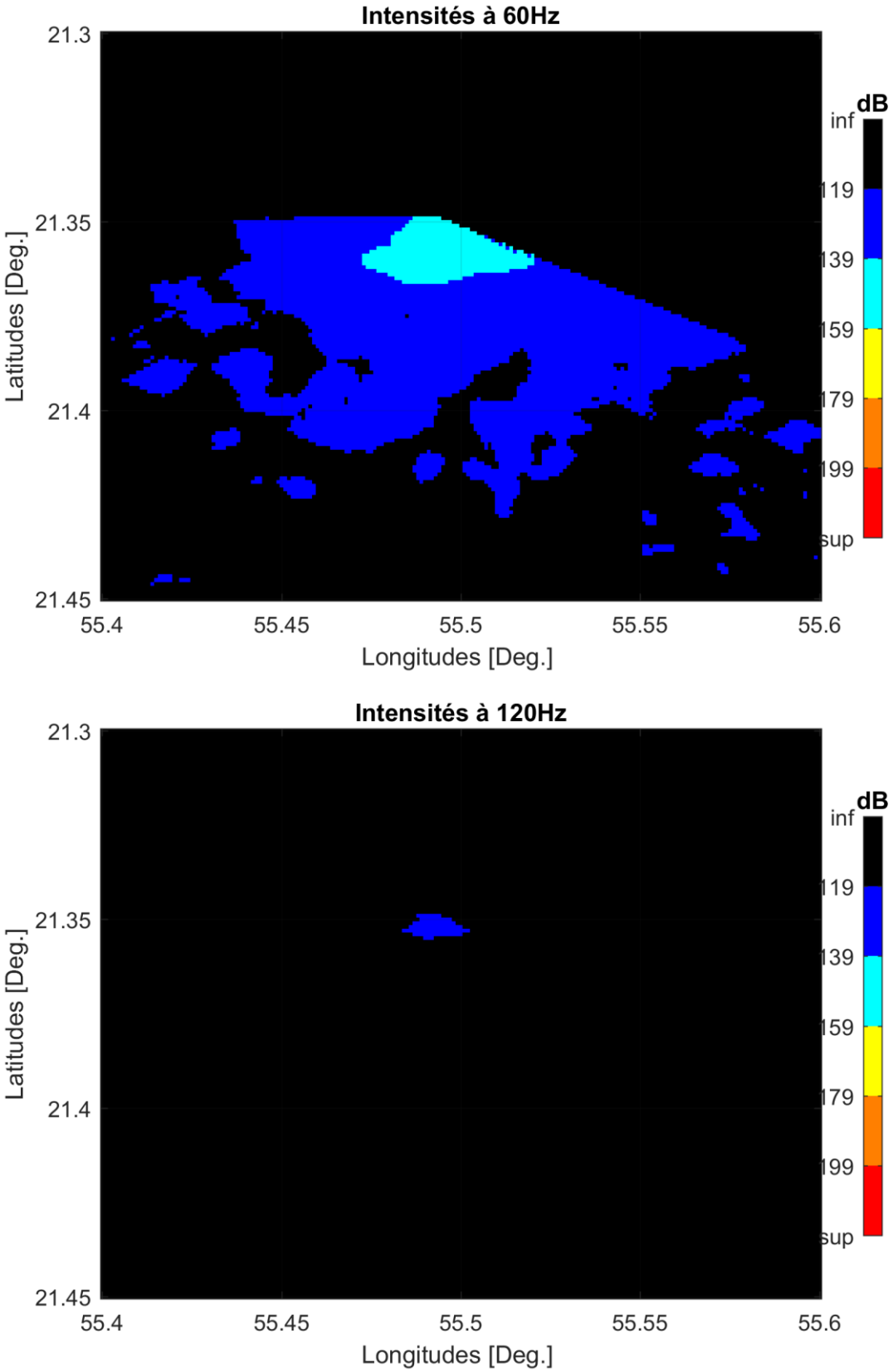


Figure 32 : Cartographies sonores dans l'emprise à 60 Hz (en haut) et à 120 Hz (en bas).

7.3.3 RESULTATS EN SEL SELON LA PROFONDEUR

Les résultats précédemment présentés sont calculés dans la configuration la pire (centre de la machine à 5 m sous la surface, soit très près de la sortie). On présente ensuite (Figure 41) le résultat en SEL et pour deux distances (de la machine à l'interface) : 5 m et 20 m.

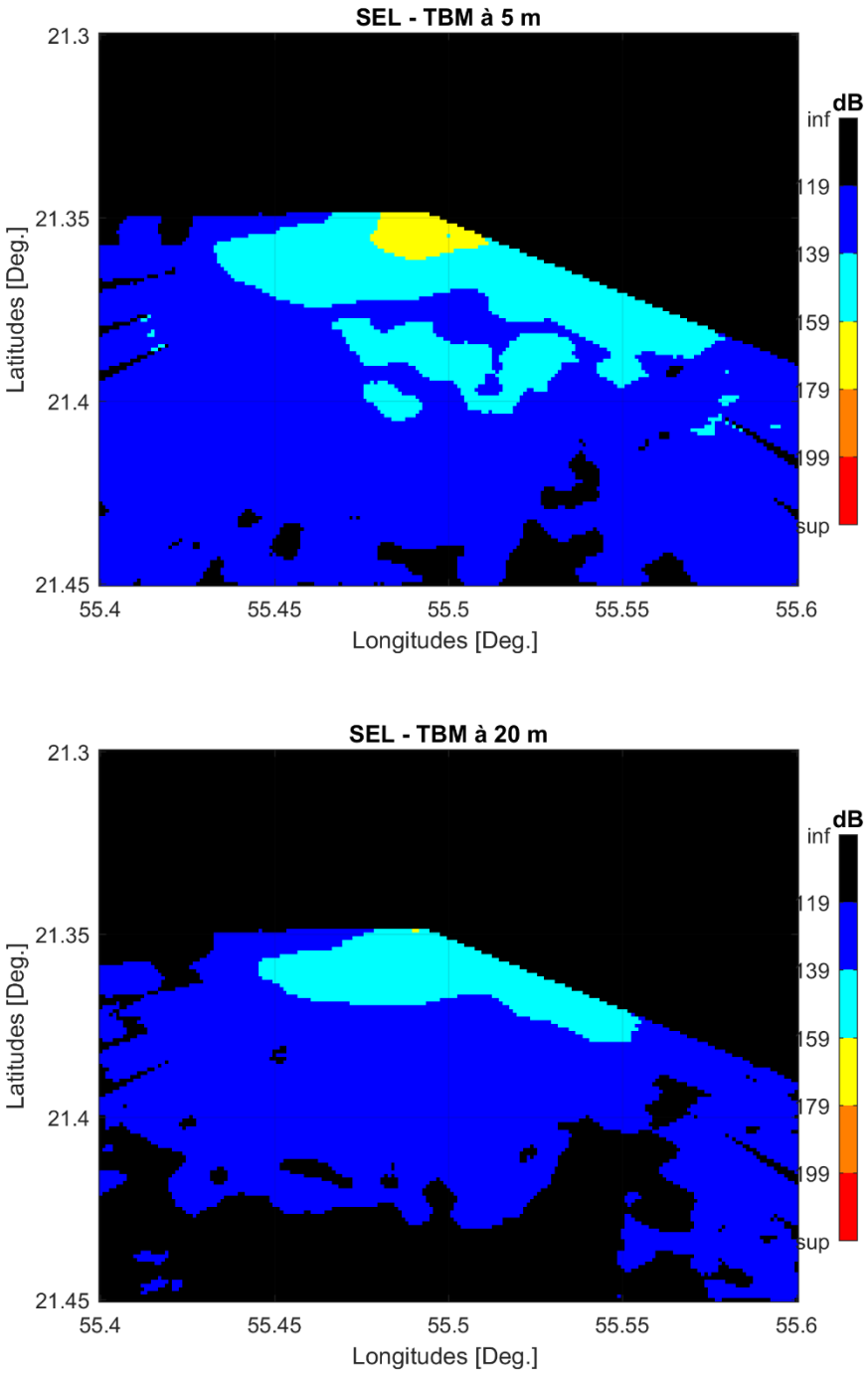


Figure 41 : SEL (1 Hz à 60 Hz) pour 2 profondeurs du TBM.

8 Conclusion sur la propagation

Dans ce rapport, nous avons d'abord recueilli des informations sur les vibrations produites par les microtunneliers, tels que ceux qui vont être utilisés. Compte tenu des roches dures rencontrées, nous avons estimé que la fréquence dominante serait de l'ordre de 30 Hz avec des vitesses vibratoires maximum de 100 mm/s à cette fréquence.
Nous avons ensuite appliqué un calcul de propagation à courte distance à l'aide des éléments finis pour analyser le problème de propagation dans l'eau d'une source de cisaillement placée dans la roche, près du fond.
Dans un second temps, nous avons effectué les calculs simplifiés de propagation sur toute l'emprise. A ces fréquences, le son propagé s'écoule vers la large en suivant le fond.
Enfin, nous avons pris les configurations les plus conservatives possibles pour calculer les cartes de bruit rayonné par la machine à diverses fréquences. On a ensuite calculé les cartes de SEL (*Sound Exposure Level*) entre 1 Hz et 60 Hz pour plusieurs distances de la machine à l'interface. Les SEL présentés peuvent paraitre élevés : ils sont conservatifs, ils concernent la bande de fréquence de bruit la plus énergétique. D'ailleurs, en ce qui concerne les mammifères marins, seuls les impacts sur les baleines seront à étudier de près tant le bruit est insignifiant aux fréquences plus hautes.
Dans tous les cas, même le plus conservatif, on verra (objet du lot 3) que l'intensité *peak to peak* n'a à priori pas de risque de dépasser 190 dB, même au plus près. Le SEL peut dépasser les 160 dB mais dans un rayon très limité (que nous préciserons dans l'étude d'impact) et uniquement quand la machine est juste sous l'interface.
Il parait essentiel de réaliser des mesures avec des hydrophones et si possible avec des géophones, pour calibrer ces modèles. Il y a en effet de fortes incertitudes sur les intensités émises dans ce contexte. Elles permettraient aussi de calibrer le modèle aux éléments finis, le plus à même de prédire les intensités propagées à courte distance dans une telle complexité.

9 Caractérisation des impacts acoustiques

Les impacts sont ici abordés en tant que nuisance sonore potentielle d'activités offshore sur des espèces marines. On effectue d'abord une brève description sur les cétacés et leur système acoustique car c'est parmi les cétacés qu'on trouve le plus d'espèces protégées. Puis, on rappelle quelques notions sur les impacts avant de définir les seuils sur lesquels on va se baser ensuite.

9.1 LES CETACES

Les cétacés comprennent deux grandes familles: les mysticètes (cétacés à fanons – 11 espèces environ) et les odontocètes (cétacés à dents – 70 espèces environ). Ces familles sont elles-mêmes divisées en genres (ie, genre des Ziphiidés auquel appartiennent les différentes espèces de baleines à bec). Nous rappelons ici la terminologie de quelques espèces courantes.

Nom scientifique	Nom Français	Nom Anglais
Odontocètes		
Physeter macrocephalus	Cachalot	Sperm whale
Orcinus orca	Orque	Killer whale
Tursiops truncatus	Grand dauphin	Bottlenose dolphin
Phocoena phocoena	Marsouin commun	Harbour porpoise
Ziphius cavirostris	Baleine à bec de cuvier	Cuvier's beaked whale
Mysticètes		
Balaenoptera musculus	Baleine bleu	Blue whale
Megaptera novaeangliæ	Baleine à bosse	Humpback whale

Tableau 3 : Noms de quelques espèces courantes.

9.1.1 CETACES SUR LE SITE DE SAINT PIERRE

Une étude sur les cétacés observables et observés sur le site du projet a été menée[11] en 2014 par Clik'Research pour Artelia. D'après cette étude, les cétacés susceptibles d'être présents à proximité de la réunion sont :

- Le Grand Dauphin Indo-Pacifique (*Tursiops aduncus*)
- Le Grand Dauphin Commun (*Tursiops truncatus*)
- Le Dauphin Tacheté Pantropical (*Stenella attenuata*)
- Le Dauphin de Fraser (*Lagenodelphis hosei*)
- Le Peponocéphale (*Peponocephala electra*)
- Le Globicéphale Tropical (*Globicephala macrorhynchus*)
- Le Cachalot (*Physeter macrocephalus*)
- La Baleine à bosse (*Megaptera novaeangliae*)
- Le Petit Rorqual Antarctique (*Balaenoptera bonaerensis*)

Parmi ces espèces, celles rencontrées par Click'Research sont:

- Les baleines à bosse (*Megaptera novaeangliae*) à proximité immédiate du site dont la présence n'est pas une surprise car elles sont présentes le long de la côte de la Réunion de juin à novembre, à des profondeurs parfois très faibles.
- la présence de Dauphins long bec (*Stenella longirostris*) est connue sur ce site, où on peut également les retrouver sur de faibles profondeurs, plus particulièrement en début de journée.

Les espèces non rencontrées mais susceptibles d'être présentes sont:

- Les grands dauphins Indo-Pacifique (*Tursiops aduncus*). Des observations à proximité ont régulièrement été effectuées. La zone d'étude correspond également à leur habitat (20 à 50 m de profondeur) : ils l'utilisent comme un corridor, évoluant généralement parallèlement à la côte,

[11] « Rapport compile des campagnes de prospection mammiferes marins », 2014.

- Les dauphins tachetés (*Stenella attenuata*). S'il est rare de les rencontrer, leur présence est avérée à la Réunion. Ils ont d'ailleurs déjà été observés devant Saint-Pierre, également à faible profondeur.

9.1.2 CARACTERISTIQUES ACOUSTIQUES DES CETACES

Les cétacés évoluant dans le milieu sous-marin, leur sens le plus développé concerne naturellement l'acoustique. Les cétacés émettent des sons. Pour les odontocètes, on parle le plus souvent de clicks (associé à leur sonar) ou de sifflements (associé à leur mode de communication). Pour les mysticètes, on parle plus souvent de chants ou de mugissements (avec parfois aussi des clicks ou des sifflements). On trouve beaucoup plus d'informations sur les petits odontocètes que sur les mysticètes.

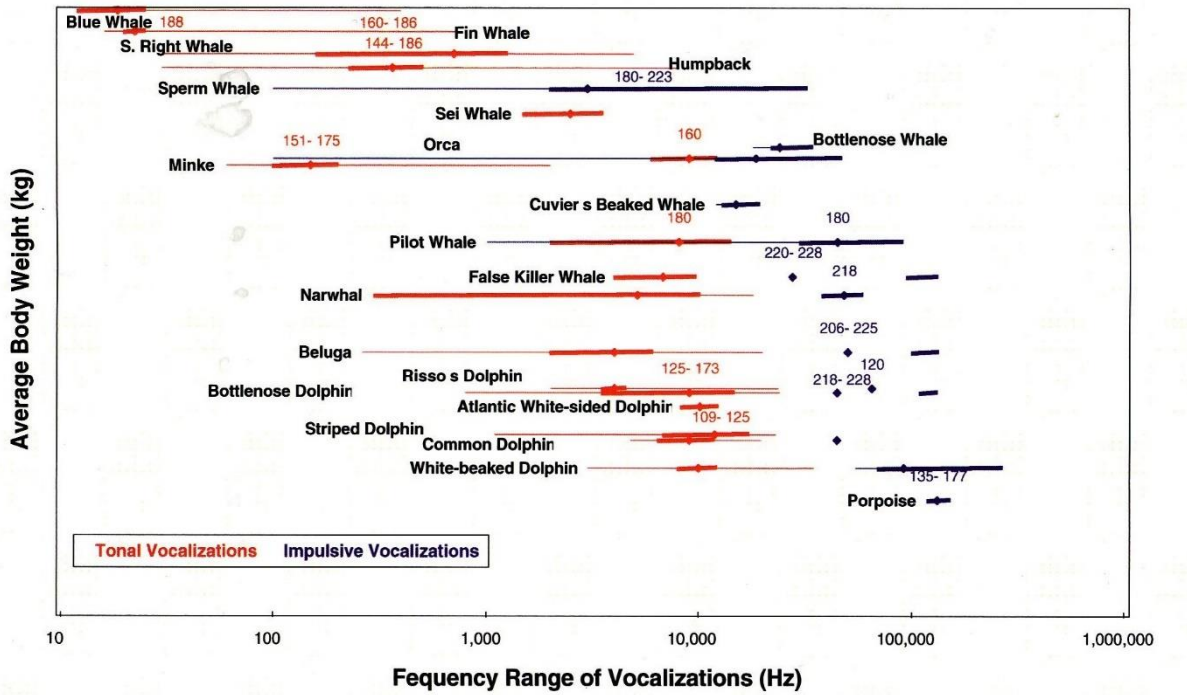


Tableau 4 : Caractéristiques synthétiques des émissions de quelques cétacés [Ocean Studies Board ,16]). Chaque ligne représente les spécificités d'une espèce (des plus petites aux plus grandes de bas en haut).

En simplifiant à l'extrême,

- les mysticètes émettent entre 20Hz et quelques kHz. Leurs signaux se retrouvent couramment dans les enregistrements de stations d'observations de séismes ou de surveillances (CTBTO).
- Les odontocètes sifflent entre 1kHz et 30kHz typiquement. Les clicks (faisant fonction de sonars) se situent entre quelques kHz (cachalots) et 150kHz (marsouin); le plus souvent entre 50kHz et 100kHz.

9.1.3 *CARACTERISTIQUES DE RECEPTION*

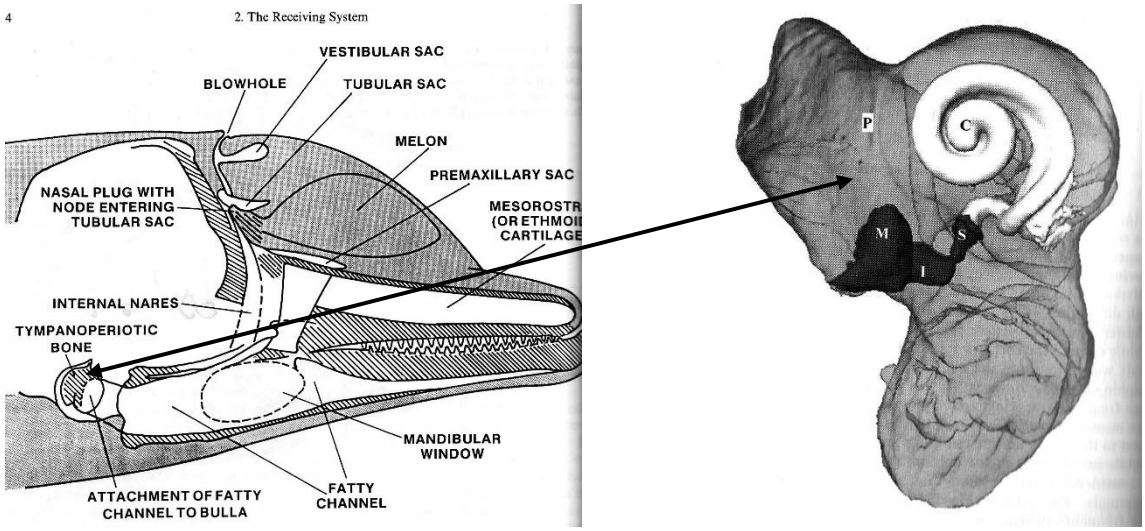


Figure 42 : Schéma montrant le mécanisme de réception du son chez l'odontocète. A gauche, schéma d'ensemble montrant la place du dispositif de réception, le son étant conduit par la graisse de la mandibule inférieure (d'après [Au,17]). A droite, détail du système tympan-osselets-cochlée (d'après [Ketten,18]).

Le principe du système de réception chez l'odontocète semble assez proche du système d'audition de l'homme: une oreille externe qui conduit à la membrane vibrante tympanique. Ces vibrations sont transmises aux osselets puis à la cochlée (limaçon), emplie de liquide. Cette dernière est munie de cils et agit comme un convertisseur mécanique-électrique pour les vibrations.
L'oreille externe est quasi inexistante (il n'y a pas la nécessité d'une adaptation d'impédance air-eau comme chez l'homme) et le tympan de l'odontocète semble plutôt excité par le maxillaire inferieur (transmission par le tissu adipeux).
Le mécanisme semble grossièrement similaire pour les mysticètes [Ketten,18].

Les audiogrammes permettent de caractériser la capacité auditive des cétacés; ils quantifient le seuil d'audition (sensibilité) en fonction de la fréquence.
Les techniques de potentiels évoqués sont les plus utilisées pour les caractériser; ce sont les réponses des voies nerveuses et du cerveau qui se produisent à la suite d'une stimulation.
Il en existe pour les odontocètes, les pinnipèdes et les poissons [Nedwell,19] mais pas chez les mysticètes.

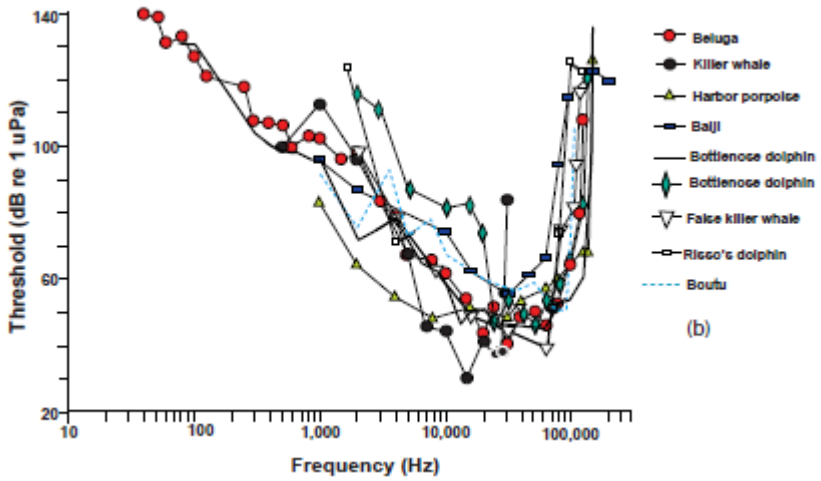


Figure 43 : Audiogrammes de quelques odontocètes (d'après [Bradley,20]).

En simplifiant, les audiogrammes des odontocètes sont similaires dans leur forme à ceux de l'homme: décroissance de 20dB/décade jusqu'à un minimum (plateau du maximum de sensibilité de quelques 10aine de kHz) suivi d'une augmentation très rapide. En revanche, il est décalé vers les hautes fréquences par rapport à l'homme avec un minimum entre 20kHz et 50kHz environ (4kHz chez l'humain). Le minimum se situe entre 40 et 60dB suivant les espèces (au dessus du bruit ambiant).
Le seuil d'audition des mysticètes est beaucoup plus difficile à établir. Leur minimum se situerait entre 20Hz et 2kHz (en rapport à leur plage d'émission). Il serait plus élevé que chez les odontocètes, aux alentours de 60-70 dB re 1m Pa @1m, en rapport avec le bruit de fond beaucoup plus élevé dans cette région du spectre.

9.2 TORTUES

D'après l'atlas Polmar de la réunion[12], deux espèces de tortues marines fréquentent les eaux réunionnaises et occasionnellement les plages : la tortue à écailles (Eretmochelys imbricata) et la tortue franche ou tortue verte (Chelonia mydas). La sensibilité auditive maximale des tortues marines se situe entre 100 Hz et 1000 Hz avec un seuil de 80 dB à 400 Hz (100 dB à 100&1 kHz – figures extraites de l'article : S.H.Ridgway, « hearing in the giant sea turtle, chelonia mydas », Psychology, Vol.64, pp884-890, 1969).

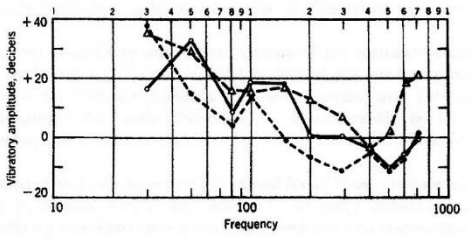
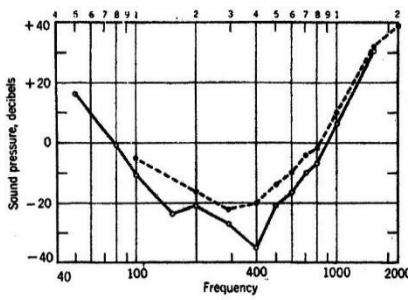


FIG. 3.—Sensitivity for vibratory stimulation. Shown is the rms amplitude, in decibels relative to 1 mμ, required to produce a cochlear potential of 0.1 μv.

FIG. 2.—Sensitivity curves for aerial sounds, obtained in two specimens of *Chelonia mydas*. The sound pressure is shown, in decibels relative to 1 dyne/cm,² required to produce a cochlear potential of 0.1 μv.



[12] « Atlas de sensibilité du littoral aux pollutions marines », dec. 2012.

9.3 POISSONS

La pratique de la pêche est courante à Saint-Pierre et il y a des espèces recherchées de poissons au large: marlin bleu, thon, dorade …
Les audiogrammes des poissons (figure jointe) montrent un maximum de sensibilité vers les basses fréquences : typiquement 80 à 100 dB entre 100 Hz et 400 Hz suivant les espèces. Il en est de même pour les requins d'ailleurs[13].

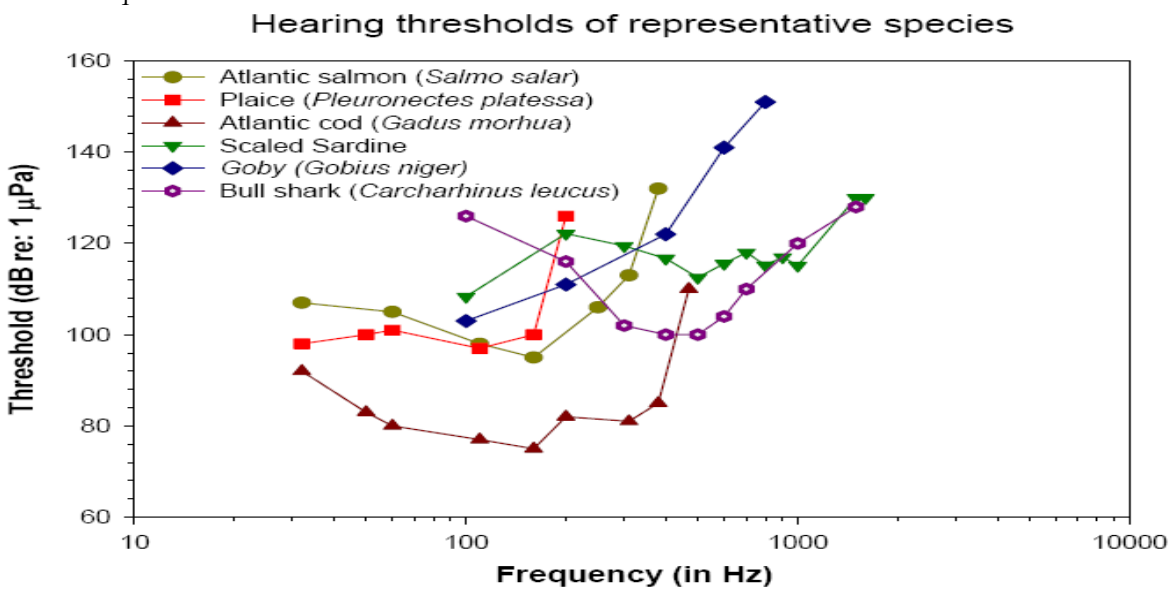


Figure 44 : Audiogrammes de quelques poissons (source [Wright,21]).

Il est donc logique de prendre aussi les poissons en compte dans le scope des impacts acoustiques car ils sont potentiellement impactés par les nuisances basses fréquences. Toutefois, il n'est pas nécessaire d'en évaluer quantitativement les impacts à ce stade, (i) car les fréquences concernées restent au-dessus de celles des émissions des microtunneliers, (ii) car les seuils à partir desquels ils peuvent être blessés sont plus élevés que pour les cétacés (voir chapitre suivant).

9.4 LARVES

Cet ensemble regroupe les larves de poissons, crevettes, invertébrés. Peu de données concernant ce groupe existent au niveau de la zone d'étude. S'agissant d'une source vibrant dans le sol et à faible distance de l'interface, il semble pertinent de considérer les éventuels impacts liés aux vibrations de surface, notamment dues aux ondes d'interface. Il en est de même des coraux.

Les espèces les plus susceptibles d'être impactées par les travaux sont les mysticètes (baleines à bosses ici) du fait des très basse fréquences émises par le microtunnelier. Viennent ensuite les poissons, les larves et les tortues. Les odontocètes seront en principe moins impactés car ils sont sensibles aux « moyennes fréquences ». Enfin, les éventuels effets des vibrations produites sur les coraux, s'il y en a en abondance tout près du point de sortie, sont à surveiller aussi.

[13] Zoology, « Sharks senses and shark repellant", 2014.

9.5.1 RAPPELS UTILES

On rappelle quelques conventions de notations:

- SL_{pp} = Niveau de pression pic à pic (*peak to peak*) en dB *re* µPa (souvent noté dB_{pp})
- SL_S = Densité de puissance spectrale en dB *re* $\mu Pa^2/Hz$

La première grandeur est calculée à partir du signal temporel et respectent des normes propres à un signal transitoire idéal propagé en eau libre et sans bruit.

Le niveau « pic à pic » (*peak-peak*) ou « 0-pic » (SL_{0p}) quantifie la surpression « instantanée » liée à une impulsion de courte durée. Il est établi à partir de la mesure des différences de pression (maximum –minimum) d'une même onde. En fait, une arrivée est la combinaison non résolue temporellement de plusieurs trajets de sorte que la mesure pic-pic est une grandeur sensible au bruit et à l'endroit où on se trouve.

C'est maintenant surtout le SEL (*Sound Exposure Level* ou Niveau d'exposition sonore) qui est utilisé dans les études = densité de flux d'énergie en dB *re* μPa^2-1s définit par:

$$E = \frac{1}{\rho c} \cdot \int_{t_1}^{t_2} p^2(t)dt \text{ en J/m}^2$$

Ces notations sont un peu lourdes mais traduisent la difficulté de quantifier les niveaux suivant les nuisances étudiées. Par exemple, un décollement de tissu peut se produire du fait d'une onde de choc; on s'intéresse alors prioritairement à la valeur dB_{pp}. Inversement, dans le cas d'une exposition prolongée à des signaux, on s'intéressera plutôt au SEL.

9.5.2 NOTIONS D'IMPACT ACOUSTIQUE

On peut simplifier la représentation des nuisances sonores sur un animal en fonction de sa distance à la source. On distingue alors classiquement quatre types d'impacts [Simmonds,22]: les impacts physiques, les impacts perceptifs, les impacts comportementaux et les impacts physiologiques (augmentation du stress, non traité ici).

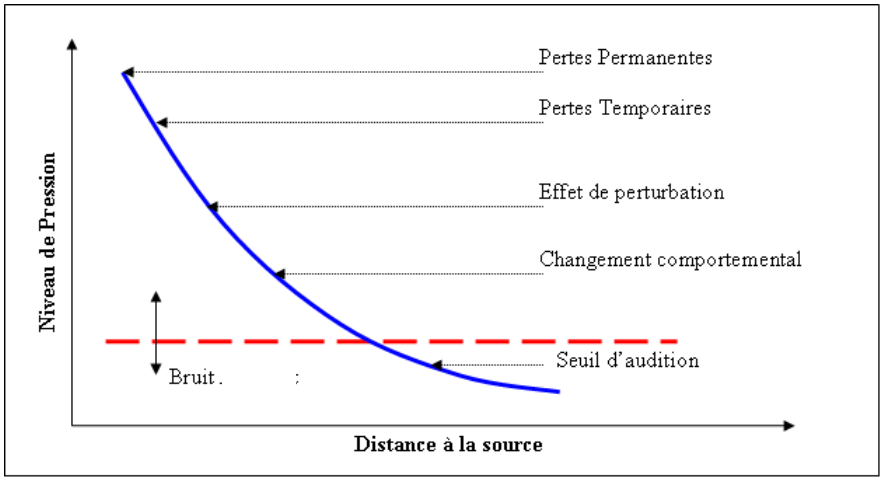


Figure 45 : Nuisances causées à un animal en fonction du niveau acoustique reçu.

Les impacts physiques

Ce sont des impacts lourds et visibles :

- Des pertes temporaires ou permanentes de la capacité auditive.
- Des lésions au niveau de certains tissus et / ou aux poumons.
- Formations de bulles de gaz dans les organes internes.

On parle fréquemment de PTS (*Permanant threshold shift*) ou de TTS (*temporary threshold shift*).

Il a été par exemple estimé que des dommages auditifs temporaires ou permanents peuvent avoir lieu à des distances allant jusqu'à 5,5 km de la source pour les pinnipèdes et les baleines à fanons, et jusqu'à 200 m pour les odontocètes (en prenant pour acquis que la source est de 255 dB) [Whitford,23].

Impacts perceptifs

Il s'agit de la réduction de la capacité des mammifères marins à détecter d'autres sons importants ce qui peut avoir comme conséquences de :

- Diminuer la distance de communication intra spécifique.
- Masquer les communications et les autres bruits biologiques importants (masking)
- Perturbation de l'écholocation
- Changer la vocalise des individus

Par exemple, certaines baleines bleues arrêteraient temporairement leurs vocalises à quelques dizaines de kilomètres de la source sismique (entre 10 et 60 Hz) [Gordon,24]. Dans certains cas, le silence peut même être chronique [Jasny,25].

Impacts sur le comportement

Il s'agit d'une modification comportementale liée à une exposition à une source de bruit donnée :

- Fuite de la source sonore.
- Ecartement de la trajectoire de migration, des lieux de reproduction et d'alimentation.
- Modifications des habitudes de plongées.
- Modification des interactions sociales.

La fuite est la réponse comportementale la plus fréquemment observée chez les mammifères marins. En général, plus de 80 % (toutes espèces confondues) des baleines ont un comportement de fuite face à un signal de 180 dB [Simmonds,22].

9.5.3 QUANTIFICATION DU RISQUE: SEUILS POUR LES CETACES

préambule

L'idéal serait de pouvoir établir des niveaux seuils en fonction de l'animal et en fonction des caractéristiques de la source[14]. Toutefois, nous sommes loin d'une telle solution. Il nous semble important de rappeler que:

- les réactions dépendent des particularités d'une espèce (plongées profondes, particularité anatomiques …),
- les réactions peuvent dépendre de l'âge de l'animal ou même de son état physique,
- il y a une très grosse différence entre les mécanismes de réactions liés à des signaux 'longs' du type sonar et des signaux de type explosifs,
- il faut aussi prendre en compte la gamme de fréquences de sensibilité des animaux. Par exemple, les Odontocètes sont plutôt sensibles aux moyennes fréquences (1-30kHz), alors que les mysticètes le sont plus aux basses fréquences (<1kHz). Tout dépend donc du contenu fréquentiel du signal émis.

[14] Un critère pratique considère qu'une exposition à plus de 140dB (durée de référence d'1s) au-dessus du seuil d'audition le plus bas génère un dégât physique (dérivé des critères établis sur l'humain). On peut alors se baser sur l'audiogramme de l'animal et évaluer son seuil.

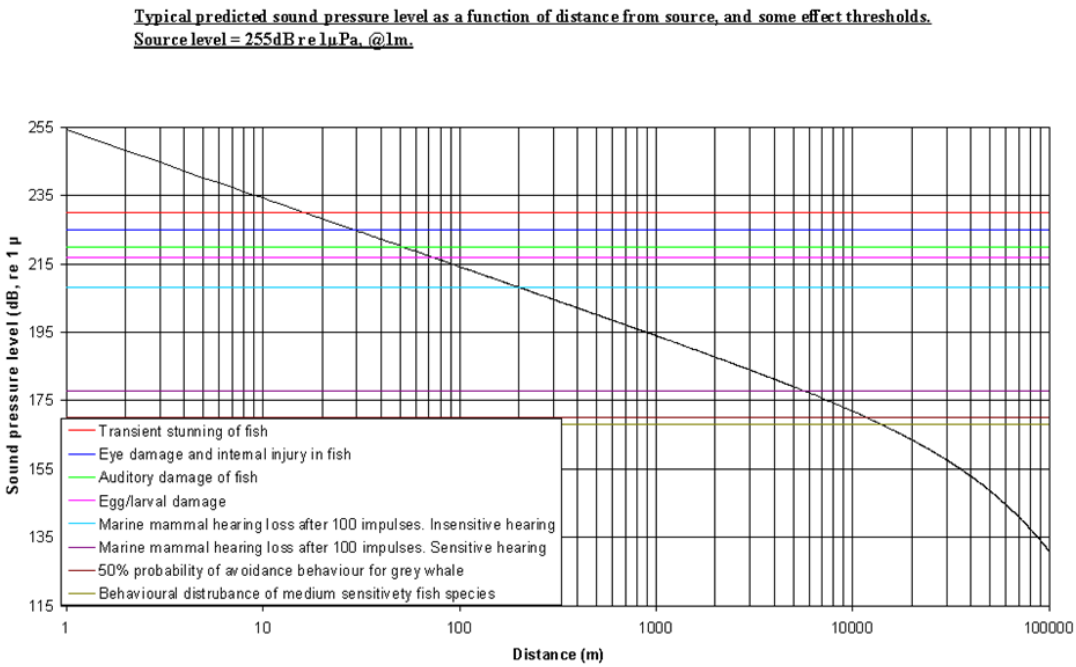


Figure 46 : Figure synthétique de l'US navy (source personnelle) rapportant des niveaux seuils de plusieurs espèces d'animaux marins vis-à-vis d'une source à 255dB.

Normes en cours

Les normes NMFS (*National Marine Fisheries Service,* [26]) d'évaluation à priori des risques acoustiques sont synthétisés dans le tableau 5 ci-dessous. Les espèces sont classées selon leur domaine fréquentiel de sensibilité. Dans le cas présent, il s'agit du domaine des basses fréquences (BF) pour les baleines, des fréquences moyennes (MF) pour toutes les autres espèces.

$W(f) = C + 10\log_{10}\left\{\frac{(f/f_1)^{2a}}{\left[1+(f/f_1)^2\right]^a\left[1+(f/f_2)^2\right]^b}\right\}$						Non-impulsive		Impulse			
						TTS threshold	PTS threshold	TTS threshold		PTS threshold	
Group	a	b	f_1 (kHz)	f_2 (kHz)	C (dB)	SEL (weighted)	SEL (weighted)	SEL (weighted)	peak SPL (unweighted)	SEL (weighted)	peak SPL (unweighted)
LF	1	2	0.20	19	0.13	179	199	168	213	183	219
MF	1.6	2	8.8	110	1.20	178	198	170	224	185	230
HF	1.8	2	12	140	1.36	153	173	140	196	155	202
SI	1.8	2	4.3	25	2.62	186	206	175	220	190	226
OW	2	2	0.94	25	0.64	199	219	188	226	203	232
PW	1	2	1.9	30	0.75	181	201	170	212	185	218

Tableau 5 : Summary of weighting function parameters and TTS/PTS thresholds. SEL thresholds are in dB re 1 µPa2s and peak SPL thresholds are in dB re 1 µPa (extrait de [NMFS,26]).

Dans le cas présent, seuls les bruits non impulsifs sont à considérer.
On se focalise exclusivement sur les espèces basses fréquences puisque les productions sonores aux fréquences moyennes sont insignifiantes. Pour les cétacés, on adopte donc les seuils SEL suivants:

• 199 dB *re* μPa^2-s : Seuil PTS au-dessus duquel des effets physiques sont susceptibles de se produire avec des dommages auditifs éventuellement permanents (PTS, *Permanent Threshold Shifts*)
• 179 dB *re* μPa^2-s: Seuil TTS au-dessus duquel peuvent se produire des perturbations temporaires d'audition et des effets notables de comportement (TTS, *Temporary Threshold Shifts*).

9.5.4 SEUILS POUR D'AUTRES GROUPES QUE LES CETACES

Pour le groupe des larves, il existe quelques références [*Canadian regulation*] :
No explosive is to be detonated that produces, or is likely to produce, a peak particle velocity greater than 13 mm/s in a spawning bed during the period of egg incubation.

Pour les larves et des coraux[15], le seuil limite de vibrations sur le sol proposé est de 13 mm/s.

Pour le groupe des poissons, les problèmes peuvent venir, (i) des endommagements de vessies natatoires pour les poissons qui en ont (vis-à-vis des signaux impulsifs type explosion), (ii) des endommagements des neuromastes de la ligne latérale, notamment aux basses fréquences.
Dans l'article [Popper, 27], il est indiqué que des pertes d'audition chez le goldfish (*Carassius auratus*) et le tilapia (*Oreochromis niloticus*) ont été constaté après plusieurs jours successifs d'exposition à des SEL de 170 dB (calculé entre 100 Hz et 10 kHz).

Pour le groupe des poissons, il est proposé de prendre le seuil SEL de 170 dB[16] comme référence.

[15] Les niveaux seuils à partir desquelles les coraux sont susceptibles d'être cassés sont bien plus élevés encore.
[16] Attention, ce seuil est plus bas que celui des mysticètes mais il s'agit d'un calcul de SEL fait entre 100 Hz et 10kHz. Ainsi, comme on le verra dans la configuration la plus défavorable, le seuil des mysticètes sera atteint alors qu'il ne le sera pas pour les poissons (du fait des fréquences des vibrations émises).

10 Cartographie des impacts acoustiques

Comme vu précédemment, il existe des seuils d'intensité acoustique au-dessus desquels il y a des impacts pour les espèces marines. Dans le cas présent l'attention est portée, (i) sur les basses fréquences[17] car ce sont les fréquences dominantes des bruits de microtunnelier, (ii) sur le critère d'exposition sonore SEL plutôt que sur l'intensité pic à pic car il s'agit de signaux continus, (iii) sur les distances proches de la machine car les niveaux émis dépassent pas ou peu les seuils, (iv) sur le cas le plus critique vis-à-vis du bruit qui est celui où la machine est au plus près du fond.

10.1 BASSES FREQUENCES (MYSTICETES)

La première carte présentée (Figure 47) est la carte des expositions sonores SEL liées à un microtunnelier travaillant dans la roche dure à 5 m de l'interface, au point de sortie. L'emprise a été réduite à une zone de 1000 m de part et d'autre du point de sortie et 1500 m vers le large.

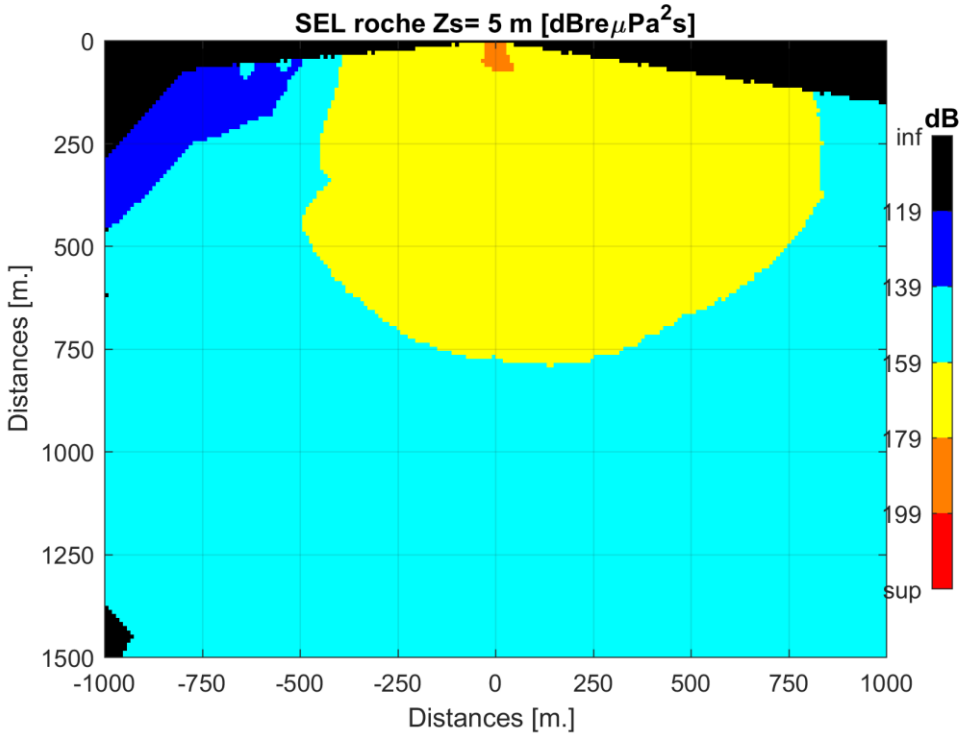


Figure 47 : Cartographie des expositions sonores dans une emprise réduite dans la configuration la plus défavorable du chantier.

Comme on peut le constater sur la Figure 46, même dans la pire des configurations, le niveau SEL ne dépasse le TTS de 179 dB reμPa^2-s que dans un rayon de 30 m environ et passe en deçà de 160 dB entre 500 m et 750 m. Une autre manière d'exposer cette situation est donnée en Figure 47. La courbe de SEL est représentée en fonction de la distance (selon une direction typiquement orientée vers le large). On y indique dans le même temps (en vert) le SEL du au bruit ambiant calculé entre 1 Hz et 160 Hz (valeur de 130 dB reμPa^2-s). La valeur seuil de 179 dB reμPa^2-s n'est dépassée que dans un rayon d'une trentaine de m autour du point de sortie.

[17] moins de 1000 Hz et même essentiellement moins de 100 Hz

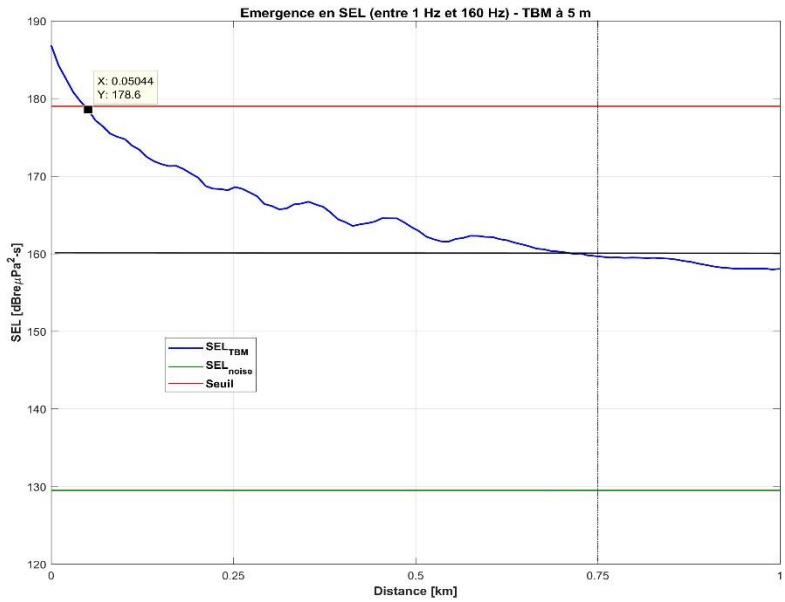


Figure 48 : SEL dû au microtunnelier (en bleu) en fonction de la distance. Comparaison avec les niveaux 179 dB (en rouge), 160 dB (en noir) et le bruit ambiant (130 dB, en vert).

Dans la configuration la plus défavorable, le seuil TTS n'est dépassé que dans un rayon très limité d'une cinquantaine de m. Le SEL passe en dessous de 160 dB à moins de 750 m. Il reste néanmoins supérieur au SEL du bruit naturel sur plusieurs kilomètres.

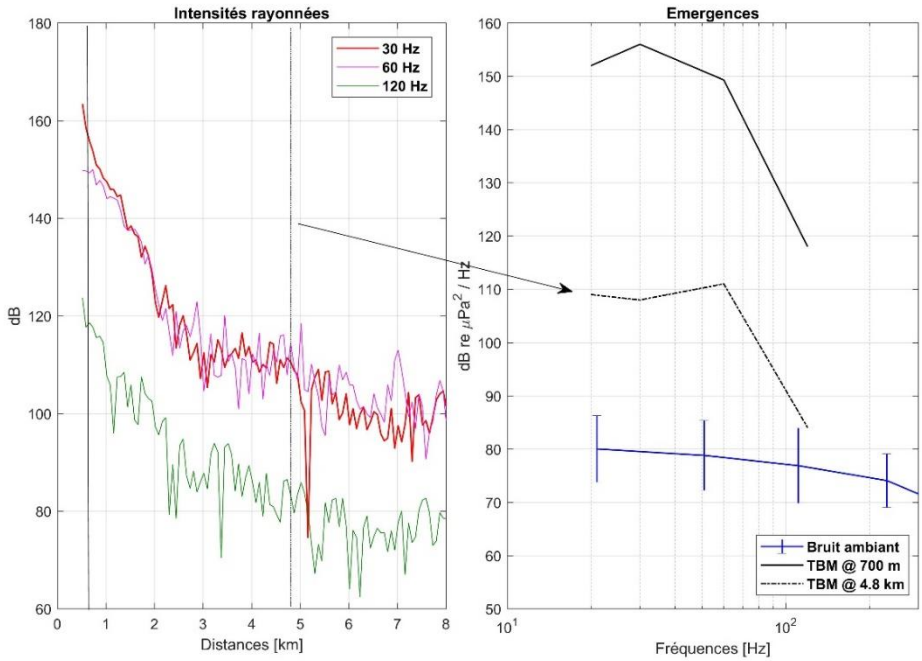


Figure 49 : A gauche, courbes d'intensités sonore aux fréquences de 30 Hz (en rouge), 60 Hz (en magenta) et 120 Hz (en vert) en fonction de la distance, sur plusieurs kilomètres. A droite, émergences dues au microtunnelier vis-à-vis du bruit ambiant (en bleu) en fonction de la fréquence (entre 1 Hz et 120 Hz).

Une autre manière de présenter les émergences sonores relatives aux travaux de microtunnelier sur le site est indiqué en figure 49.

10.2 VIBRATIONS (LARVES ET CORAUX)

On a d'abord présenté les impacts liés aux pressions sonores dans l'eau. S'agissant d'une source vibrant dans le sol et à faible distance de l'interface, il s'agit maintenant de considérer les éventuels impacts liés aux vibrations de surface, notamment dues aux ondes d'interface.

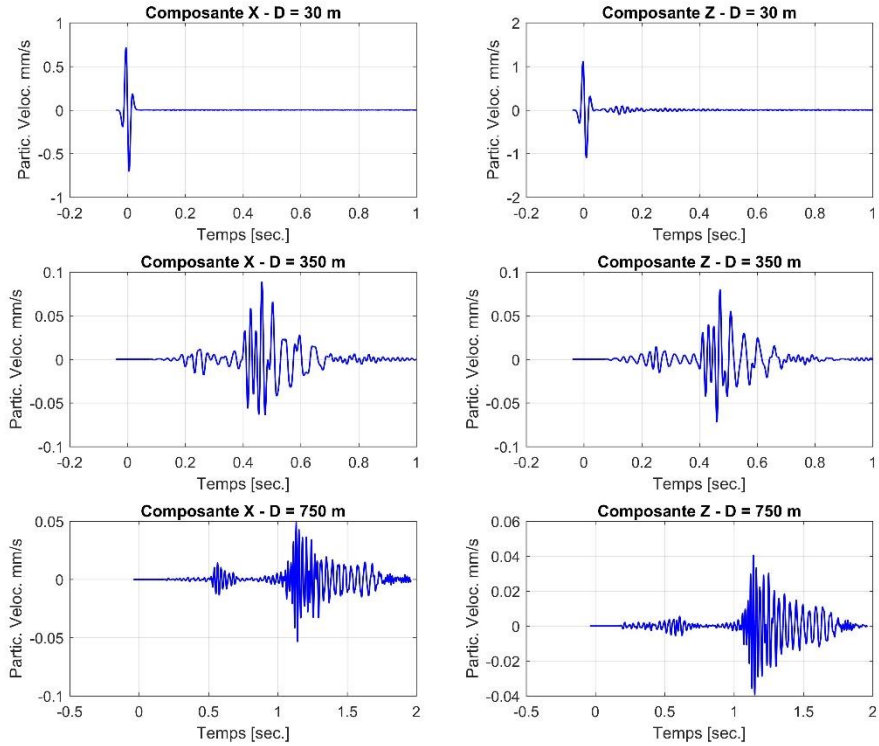


Figure 50 : Vitesses particulaires (horizontales à gauche, verticales à droite) en mm/s calculées au niveau du sol à plusieurs distances : 30 m (en haut), 350 m (au centre) et à 750 m (en bas).

Les vitesses particulaires sont calculées à l'aide d'un code aux éléments finis pour une source placée à 5 m sous l'interface et sur la base d'une émission à 100 mm/s. Il est clair (Figure 50) que ces valeurs sont toutes largement en dessous des seuils recommandés de 13 mm/s.

10.3 SYNTHESE

Scénario	Seuil 130dB (bruit ambiant)	Seuil 160dB	Seuil 179dB (TTS, NMFS)	Seuil 199dB (PTS, NMFS)
1- TBM à 5m	>10 km	<750 m	<50 m	Non
2- TBM à + de 10 m	>10 km	200 m	Non	Non

Tableau 6 : Distances de franchissement de seuils pour le microtunnelier .

Les travaux présentés jusqu'ici sont basés sur des hypothèses décrites dans le rapport sur la propagation : source de fréquence dominante de 30 Hz, vitesse particulaire de 100 mm/s, roche dure … On présente (Figure 51) le cas où le microtunnelier sortirait dans le sable plutôt que dans la roche. Les intensités sont moins élevées dans ce cas, donc les impacts moins forts, du fait que l'impédance et le module de rigidité sont réduis.

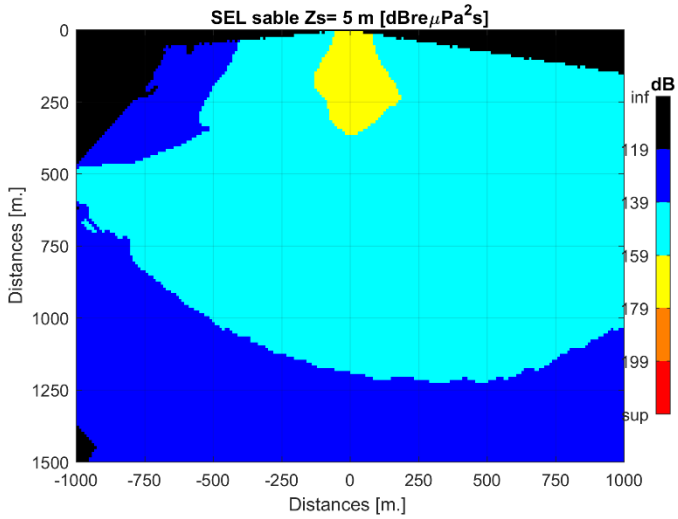


Figure 51 : Carte des SEL avec un fond de sable à la place de la roche dure.

Dans le cas où les roches sont hétérogènes, des successions de chocs s'ajoutent au bruit. Leurs fréquences centrales sont aussi plus élevées [Buckley,28]. On ne connait pas précisément leur intensité. La Figure 52 est une cartographie des intensités pic à pic qui en résulteraient (sur la base de PPV de 50mm/s). On voit qu'on reste largement en deçà du seuil I_{pp} de 199 dB re µPa.

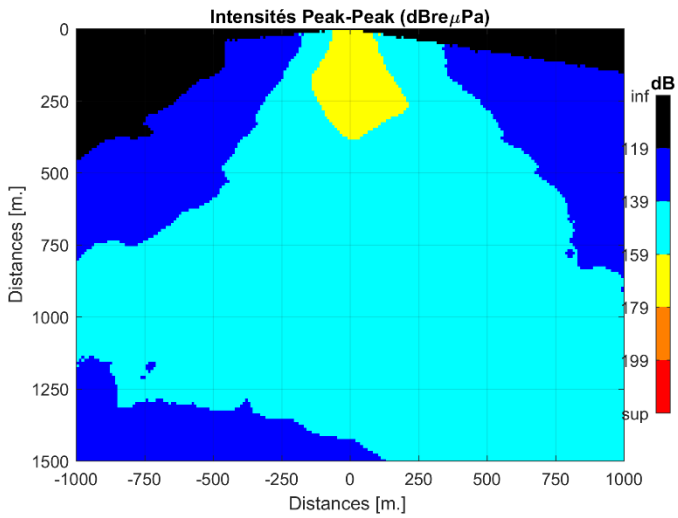


Figure 52 : Carte des intensités *peak-peak* pour le cas où des signaux transitoires liés à des hétérogénéités seraient présents (hypothèse de fréquence de 300 Hz).

11 Conclusion sur les impacts acoustiques

Dans l'état des connaissances actuelles, les impacts acoustiques sous-marins des travaux de micro-tunnel prévus à Saint-Pierre sont essentiellement limités aux baleines. En effet, les vibrations émises dans le basalte par le microtunnelier sont en principe très basses fréquences (10 Hz à 100 Hz avec un maximum vers 30 Hz).
Pour les baleines, dans le cas où le microtunnelier est à moins de 10 m de l'interface, il y a risque avéré que le SEL dépasse la valeur seuil TTS de 179 dB re μPa^2-s dans un rayon d'une cinquantaine de m autour du point de sortie. Au-delà de 750 m de distance, il est déjà inférieur à 160 dB et ne constitue plus un impact physique. Il peut cependant avoir un impact perceptif même à plus grande distance. L'idéal serait d'éviter de réaliser la fin de forage à la période où les baleines sont potentiellement présentes.
Les impacts sur les odontocètes sont minimes puisque leurs seuils d'audition ne se recoupent pas avec le spectre d'émission de la source.
Les impacts sur les larves sont inexistants puisque les vibrations produites sont très en dessous des seuils.
Même si les fréquences hautes du microtunnelier s'avéraient plus élevées (200 ou 300 Hz par exemple), configuration défavorable pour les poissons, les impacts seraient circonscrits : ils ne concerneraient que les poissons proches exposés longtemps qui resteraient à moins de 300 m.

Par ailleurs, il subsiste des incertitudes sur la caractérisation du bruit qui sera rayonné par le microtunnelier lorsqu'il opérera sur le site. Il paraitrait judicieux d'effectuer des mesures de contrôle pour quantifier au mieux le spectre d'émission de la machine en fonctionnement et fiabiliser ainsi les prédictions.

12 Bibliographie

[1] **G. Wenz**, "Acoustic ambient noise in the ocean: Spectra and sources", *J.Acoust.Soc.Am,* **34**, 1936-1956, 1962.

[2] **H.Medwin & all** , "The anatomy of underwater rain noise", *J.Acoust.Soc.Am,* **92**(3) 1613-1623, 1992.

[3] **J.A.Nystuen**, "Rainfall measurements using underwater ambient noise", *J.Acoust.Soc.Am,* **79**(4) 972-982, 1986.

[4] **D.Ross**, "Mechanics of underwater noise", Peninsula Publishing, 1987.

[5] **R.J.Urick**, "Ambient noise in the sea", Peninsula Publishing, 1986.

[6] **O.B.Wilson & all**, "Noise source level density due to surf - Part I, Monterey Bay, CA", *IEEE J.Oceanic Eng., Vol.17, Nro1,* pp. 425-433, 1997.

[7] **Blackwell, S. B., Greene, C. R., Jr., and Richardson, W. J.**, "Drilling and operational sounds from an oil production island in the ice-covered Beaufort Sea," *J.Acoust.Soc.Am* **116**, 3199–3211, 2004.

[9] **R. B. Evans**, "A coupled mode solution for acoustic propagation in a waveguide with stepwise depth variations of a penetrable bottom," J. Acoust. Soc. Am. 74, 188-195 (1983).

[10] **Lossent, Julie, et al**. "Mapping the diversity of spectral shapes discriminates between adjacent benthic biophonies." Marine Ecology Progress Series585 (2017): 31-48.

[11] **Elise, Simon, et al.** "An optimized passive acoustic sampling scheme to discriminate among coral reefs' ecological states." Ecological Indicators 107 (2019).

[12] **Rahman, Muhammad E., and Trevor Orr.** , "Finite element modelling of ground vibrations due to tunnelling activities." *International Journal of Civil and Environmental Engineering* 3.1 (2011): 143-149.

[13] **Speakman, Colin, and Stephen Lyons**. "Tunnelling induced ground-borne noise modelling." *Acoustics*. 2009.

[14] **Swinnen, Gerda**. "Acoustic monitoring for tunnel boring in soft soils." (2003).

[15] **Basini, P., et al**. SPECFEM 3D user manual. Technical Report, Computational Infrastructure for Geodynamics, Princeton University, University of PAU, CNRS, and INRIA, 2012.

[16] **Ocean Studies Board,** "Ocean noise and marine mammals", *National Academies Press*, 2003.

[17] **W.L Au**, "The Sonar of dolphins", *Springer-Verlag*, 1993.

[18] **Ketten, D.R**. 1994. "Functional analysis of whale ear: adaptations for underwater hearing". IEEE Proc. Underwat. Acoustics 1/264-270

[19] **J.R.Nedwell & all,** "Fish and marine mammals audiograms: a summary of available informations", *Subacoustech report*, 2004.

[20] **D.L.Bradley and R.Stern**, "Underwater Sound and the marine mammal acoustic environment – a guide to fundamental principles", US MMC, 2008.

[21] **D.G. Wright and G.E. Hopky**, "Guidelines for the Use of Explosives In or Near Canadian Fisheries Waters", Department of Fisheries and Oceans, Ottawa, Ontario, 1998.

[22] **Simmonds, M. et S. Dolman**, 2003. "*Oceans of noise: a WDCS Science report*". Chippenham. 164 p.

[23] **Whitford, J.**, 2003. *Strategic Environmental Assessment - Laurentian Subbasin* (draft). Jacques Whitford Environment Limited.

[24] **Gordon, J., Gillespie, D., Potter, J., Frantzis, A., Simmonds, M. et R. Swift**, 1998. *The effects of seismic surveys on marine mammals*. Chapitre 6 tiré de : Tasker, M.L. and C. Weir, 23-25 juin 1998. *Proceedings of the seismic and marine mammals workshop*, London.

[25] **Jasny, M.** (Natural Resources Defense Council), 1999. *Sounding the depths : Supertankers, sonar and the rise ofundersea noise.*

[26] **National Marine Fisheries Service (NMFS)**, "2018 revision to: Technical guidance for assessing the effects of anthropogenic sound on marine mammal hearing (version 2.0): Underwater thresholds for onset of permanent and temporary threshold shifts." (2018): 167.

[27] **Smith, Michael E., Andrew S. Kane, and Arthur N. Popper**. "Acoustical stress and hearing sensitivity in fishes: Does the linear threshold shift hypothesis hold water?." Journal of Experimental Biology 207.20 (2004): 3591-3602.

[28] **Buckley, Jessica M.**, "Monitoring the vibration response of a tunnel boring machine: application to real time boulder detection". *Diss. Colorado School of Mines*. Arthur Lakes Library, 2015.

13 Annexe 1: Données d'entrée

	Janvier	Fevrier	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Total / moyenne
	été			automne			hivers			printemps			
Vitesse du vent moyenné sur 10 mn Source : Aeroport Saint pierre meteo France	4,1	4,8	4,6	4,4	4,6	5,2	5,5	5,5	4,9	4,7	4,6	4	4,7
Moyennes (m/s)		4,5			4,733333333			5,3			4,433333333		
Rafales >=16m/s	5,5	8,6	9,3	7,6	7,5	11,7	12,9	14,2	9,8	8,7	6,5	5	107,2
Moyennes rafales (j/mois)		7,8			8,933333333			12,3			6,733333333		
Hauteur de précipitations (moyenne en mm) Source Meteo France Saint pierre aeroport	72,5	106,8	79	64,5	60,1	57,2	66,3	30,8	27,2	17,2	22,8	35,5	639,9
Moyennes (mm)		86,1			60,6			41,43333333			25,16666667		53,325
<10mm/j	1,2	3,2	2,6	2	1,9	1,9	2,2	0,7	0,9	0,4	0,4	1,4	18,6
Moyennes précipitation <10mm/j (j/mois)		2,333333333			1,933333333			1,266666667			0,733333333		
Courant (m/s) Source rapport ARTELIA 2													
Moyennes (m/s)		0,3			0,3			0,3			0,3		0,3
Max courant barotrope :		1m/s			0,6m/s			1m/s			0,6m/s		
Vagues (m) Source HydroRun													
Moyennes (m)		1,5666			2,028			2,084			1,522		1,8
jours/mois <2m (%)		3,9			9,8			15,7			9,8		

Figure 53 : Données d'entrée pour le modèle.

14 Annexe 2 : Impacts d'une opération de déroctage

14.1 INTRODUCTION

Les déroctages consistent à casser et à fragmenter la roche, le plus souvent à l'aide d'explosifs. Les explosions sous-marines engendrent des ondes de chocs dont les intensités sont très élevées ce qui peut engendrer des dommages sur la faune et la flore environnante. Il s'agit ici d'évaluer les impacts acoustiques potentiels de ces opérations.

Dans une première partie, on décrit l'environnement géophysique dans lequel ces travaux seront menés, on rappelle les principales caractéristiques des signaux explosifs sous-marins et on définit les scenarios caractérisant des opérations type de déroctage.

Ensuite, on effectue des calculs de propagation du son à l'aide d'outils appropriés : (i) un code aux éléments finis, permettant de gérer les difficultés liées à la source enfouie et aux ondes d'interfaces associées, (ii) un code au modes couplés permettant de réaliser une cartographie spatialisée du son.

En définitive, ces calculs ne sont qu'une première phase permettant d'ajuster les lois empiriques existantes aux conditions géophysiques environnantes. En effet, les lois empiriques de prédiction des intensités propagées par les explosions sous-marines restent essentielles car elles tiennent compte des phénomènes non linéaires, non modélisables par des codes de propagation classiques.

On évaluera enfin les impacts potentiels en comparant aux seuils existants et on effectuera quelques recommandations pour la bonne réalisation de ces opérations.

14.2 ELEMENTS D'ENTREE (ENVIRONNEMENT GEOPHYSIQUE)

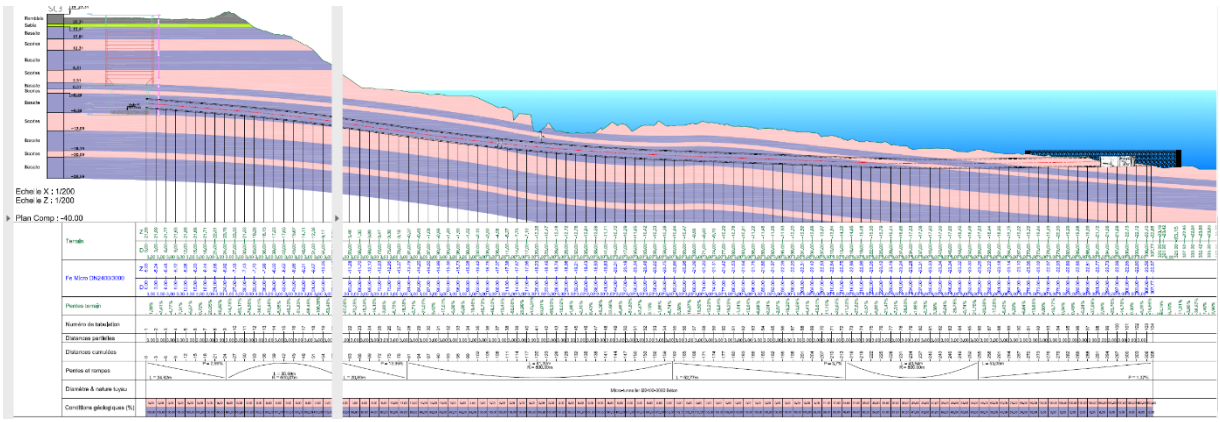


Figure 54 : Informations sur la bathymétrie et la nature du sous-sol entre la terre et le point de sortie où auront lieu les déroctages.

On rappelle que la hauteur d'eau au niveau du point de sortie est de 22 m environ (Figure 54). Le sous-sol est constitué d'alternances de basalte dur (C_p=5500m/s, C_s = 2800 m/s) et de scories (C_p=3000m/s, C_s = 1000 m/s).

L'environnement plus au large est caractérisé par une hauteur d'eau plus importante. Elle est déterminée à partir de la radiale « *BathyChart long profile, LP10* ». Le sous-sol est considéré comme identique sur toute l'emprise.

14.3 ÉLEMENTS D'ENTREE (EXPLOSIFS)

Les déroctages sont effectués à l'aide d'explosifs caractérisés par leur charge W (*Weight*, poids équivalent TNT), placés dans des trous forés dans la roche à une profondeur Db (*burial depth*).

La roche est paramétrée par son impédance acoustique Zb. Le signal est alors propagé dans le canal acoustique sous-marine, notamment défini par Hw (*water depth*).

Afin d'augmenter l'efficacité du déroctage, il est d'usage de procéder à des tirs multiples : plusieurs charges élémentaires dont les déclenchements sont décalés les uns par rapport aux autres par des micro-retards, ce qui permet d'éviter que les ondes de chocs ne se cumulent.

On propose donc de considérer les cas suivants :
- Charges (classiques) de 1, 2, 5 et 10 Kg, charge AUTOSTEM de 2 Kg
- Enfouissement de 1 m ou 2 m,
- Nombre de charges cumulées avec microretards : 1, 5 ou 10

Les microretards sont typiquement de 25 ms au moins. Les charges sont bourrées par des graviers. Un cas avec charge AUTOSTEM est également pris en compte. Le tableau fourni montre que ce produit a une vitesse de detonation bien plus lente ce qui permet de réduire l'intensité de l'onde de choc de 90 %, soit de 20 dB, pour une énergie libérée quasiment identique (pour les rapports de charges spécifiées, Tableau 7).

Produit	Vitesse de détonation m/s	Energie libérée J/g	Charge Kg
AUTOSTEM	340	5120	1.7
TNT	6800	4500	12.5 ou 25

Tableau 7 : Comparaison entre des paramètres de AUTOSTEM et TNT.

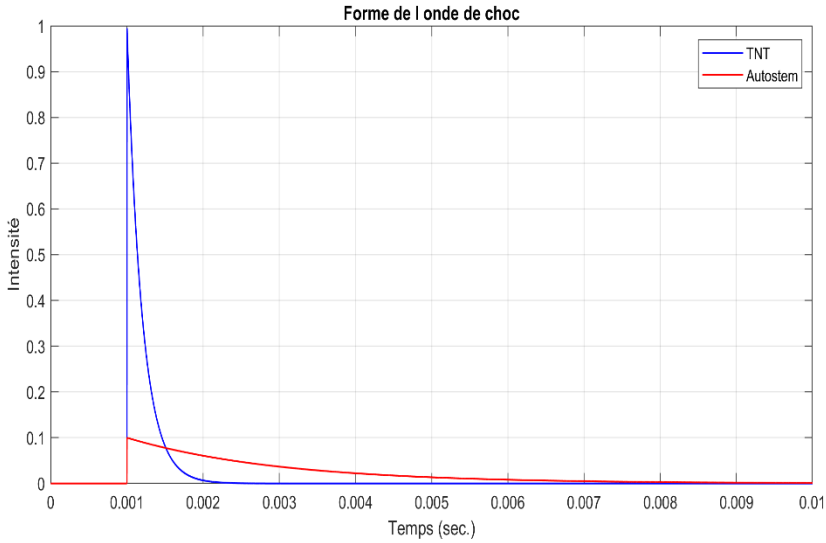


Figure 55 : Forme d'onde de l'onde de choc pour un produit classique TNT (en bleu), pour l'AUTOSTEM (en rouge).

14.4 QUELQUES RAPPELS SUR LES EXPLOSIONS SOUS-MARINES

Le problème de la propagation des signaux issus d'explosions sous-marines est complexe car il relève des lois de l'acoustique non linéaire. Il a cependant été traité très tôt [1, Cole], sous un aspect empirique [2, Weston] ou plus récemment sous divers aspects théoriques et expérimentaux. Une charge explosive déclenchée dans l'eau génère un signal acoustique propagé dans l'eau composé : (i) d'une onde de choc (dite onde de choc primaire, fréquence principale de 200 Hz au moins), (ii) d'une ou plusieurs oscillations de la bulle de gaz (dites ondes de choc secondaire, tertiaire …, fréquence principale de moins de 50 Hz).

On s'intéresse à la variation de la pression Pic ($I_{P2P} = 20.\log_{10}P_{peak}$ en dB *re* µPa) et de la SEL en fonction de la distance à la source. Sans entrer dans le détail, l'atténuation de la pression pic dans l'eau selon la distance R (en m) pour une charge W (en Kg, équivalent TNT) est donnée par:

$$P_{peak} = 52.4 \times 10^6 \left(\frac{R}{W^{1/3}}\right)^{-1.13} \text{ en Pa} \qquad (1)$$

Enfin, [3, Soloway] propose l'expression suivante pour la SEL :

$$SEL = 6.14 \times log_{10}\left[W^{1/3}\left(\frac{R}{W^{1/3}}\right)^{-2.12}\right] + 219 \qquad \text{en dB } re \text{ µPa}^2\text{-1s} \quad (2)$$

Ce sont cependant des lois empiriques déterminées pour des explosions déclenchées en pleine eau. Elles ne tiennent pas compte du contexte géophysique.

Les calculs aux éléments finis sont réalisés à l'aide du code SPECFEM. Ils sont intéressants car ils apportent une compréhension unique, (i) sur les ondes de surface, (ii) sur les intensités transmises dans l'eau par des sources de cisaillement enfouies (ce qui est notre cas ici).

En effet, les ondes d'interfaces sont importantes dans le cas d'une source proche de l'interface, ce qui est le cas ici (les ondes de surface sont les plus dangereuses à grande distance car elles s'atténuent moins vite).

Les codes sont illustrés selon deux fréquences dominantes : 50 Hz et 200 Hz

Figure 56 : Snapshot à T=0.08 sec de l'onde propagée (50 Hz).

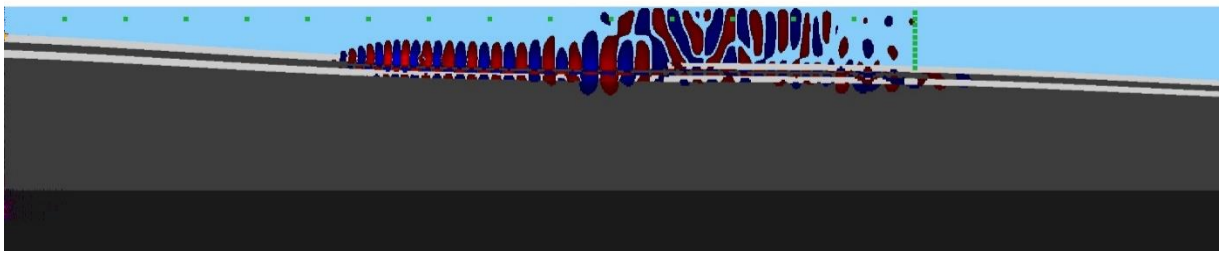


Figure 57 : Snapshot à T=0.4 sec de l'onde propagée (50 Hz).

Dans ces deux figures, l'eau est en bleu (entre 0 et 1000 m), la source enfouie à 1 m dans le sol (à gauche) dans la couche gris clair (scories) par 22 m de hauteur d'eau. Le sous-sol est composé alternativement de scories et de basalte. Les récepteurs sont en vert (entre 50 et 750 m, à 750 m entre 10 m et 50 m de profondeur). La figure du haut, snapshot de la propagation de l'onde à T=0.08s est caractérisé par l'onde de volume propagé rapidement dans le sous-sol. La partie confinée dans l'eau et aux interfaces se propage plus lentement. Comme on le voit à T=0.4 s, l'onde d'interface qui voyage plus lentement et concerne surtout la partie profonde de la colonne d'eau.

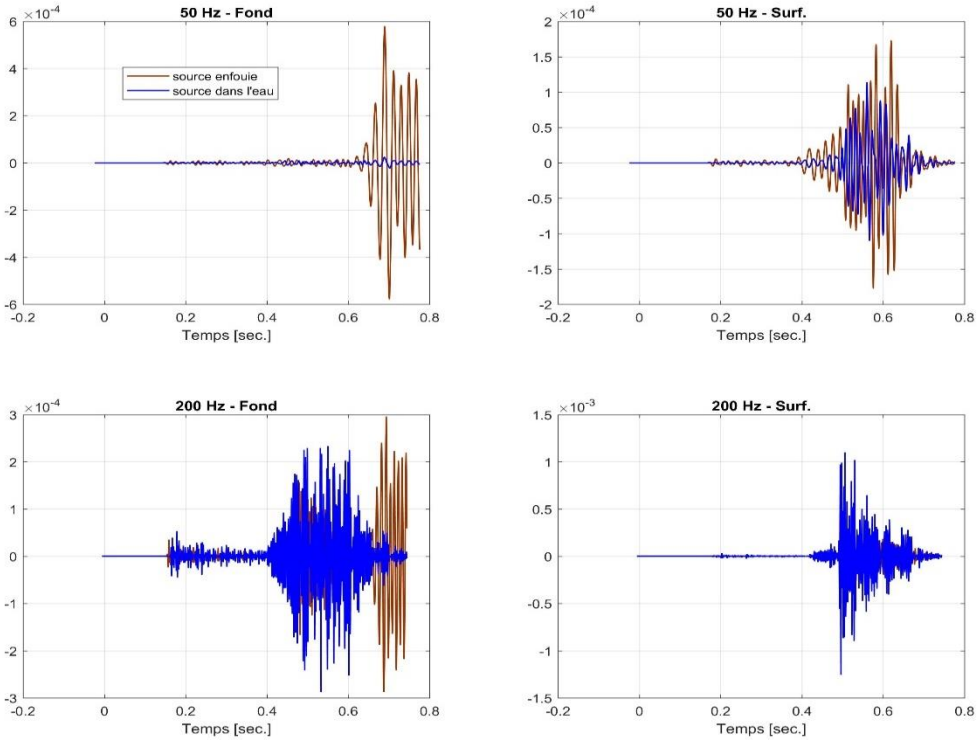


Figure 58 : Formes d'ondes reçues à 750 m ; à 50 Hz en haut ; à 200 Hz en bas. Récepteur à 10 m sous la surface à gauche, à 10 m du fond à droite. En bleu, source émise dans l'eau. En marron, source à 1 m dans le sol.

La Figure 58 présente les formes d'ondes reçues à 750 m. En simplifiant, le signal à 50 Hz est une représentation de la composante de l'onde de choc secondaire et la composante à 200 Hz, de l'onde de choc primaire.

On voit que :

- l'onde de choc primaire se propage surtout dans l'eau. Elle est bien plus forte si la source est dans l'eau que si la source est dans le sol,

- l'onde de choc secondaire est plus forte pour une source placée dans le sol que dans l'eau. Elle est surtout manifestée par une onde d'interface dont l'intensité est particulièrement forte près du fond.

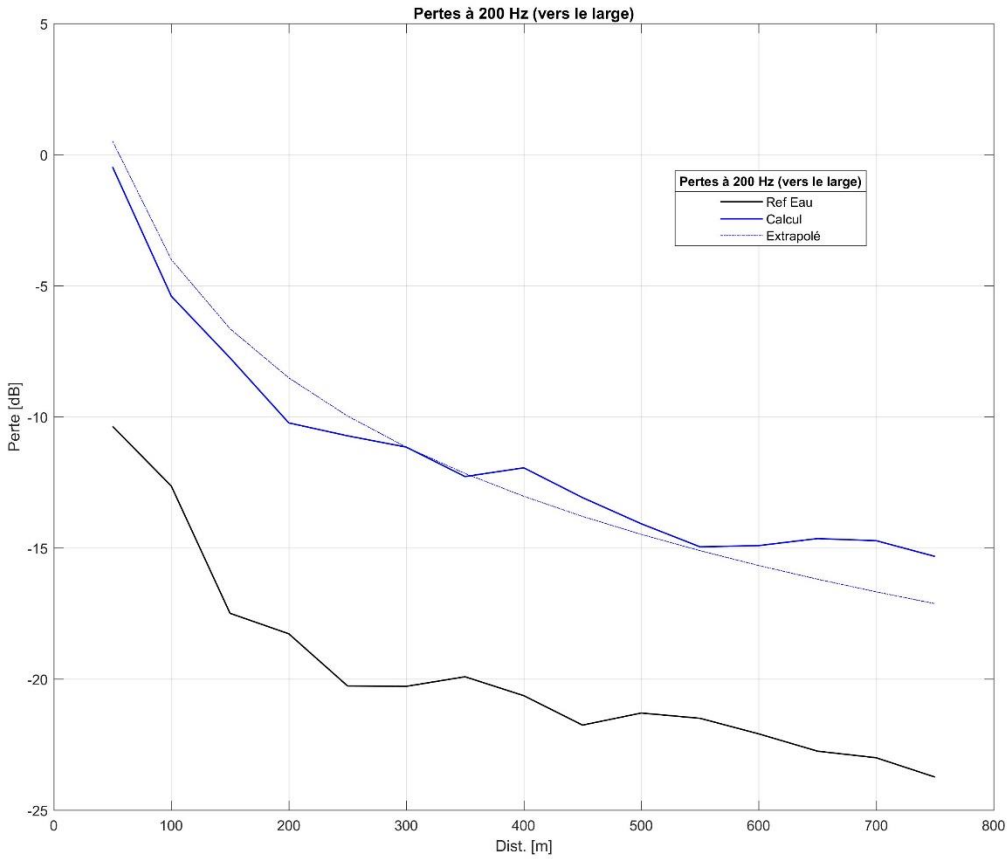


Figure 59 : Calibration numérique relative des lois de propagation du site (courbe bleu). Calibration des effets d'enfouissement (différence entre la courbe noire et la courbe bleu).

A partir de ces calculs,

- on a pu établir (Figure 59) la loi de propagation du site, ce qui permet d'ajuster ensuite les lois empiriques.

- on a pu quantifier l'effet de l'enfouissement de la source, ce qui permet d'ajuster les cartographies bâties à l'aide des codes aux modes normaux.

14.6 PROPAGATION : CARTOGRAPHIE

Les cartographies présentées sont basées sur les mêmes calculs de propagation que ceux de l'étude d'impact déjà réalisée : code de calcul aux modes couplés réalisé dans une emprise réduite (environ 1000 m autour du point de tir) et dans une emprise étendue (environ 15 km autour du point de tir). Les codes couleurs ont été modifiés pour tenir compte des seuils adaptés

aux explosions sous-marines : en rouge, dépassement du PTS (*Permanant threshold shift*); en orange, dépassement du TTS (*temporary threshold shift*). On constate que le dépassement du TTS ne dépasse pas 750 mètres.

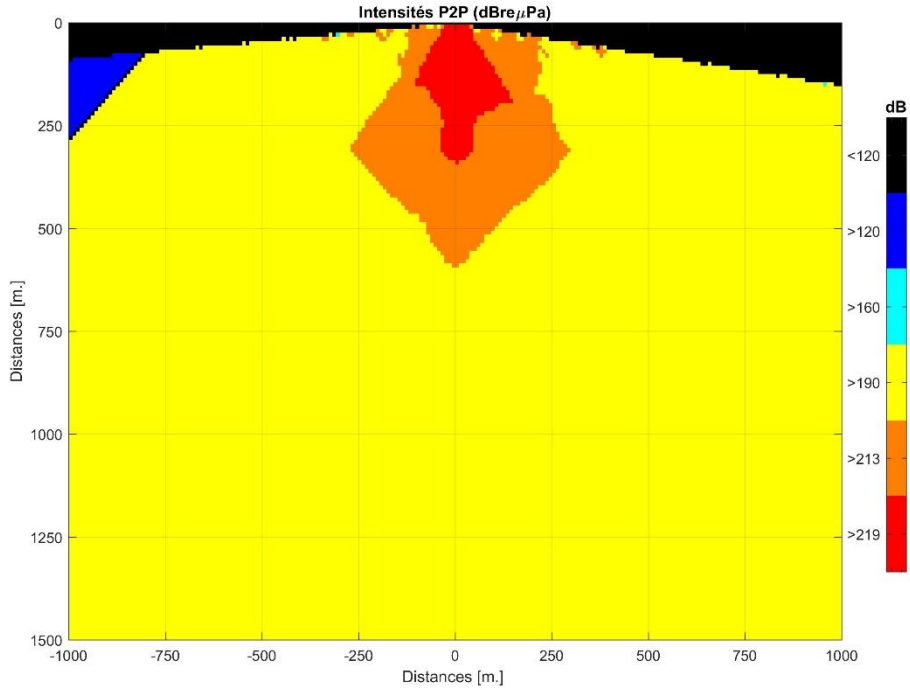


Figure 60 : Carte (emprise réduite) des intensités P2P pour une explosion de 5 kg enfouie à 1m.

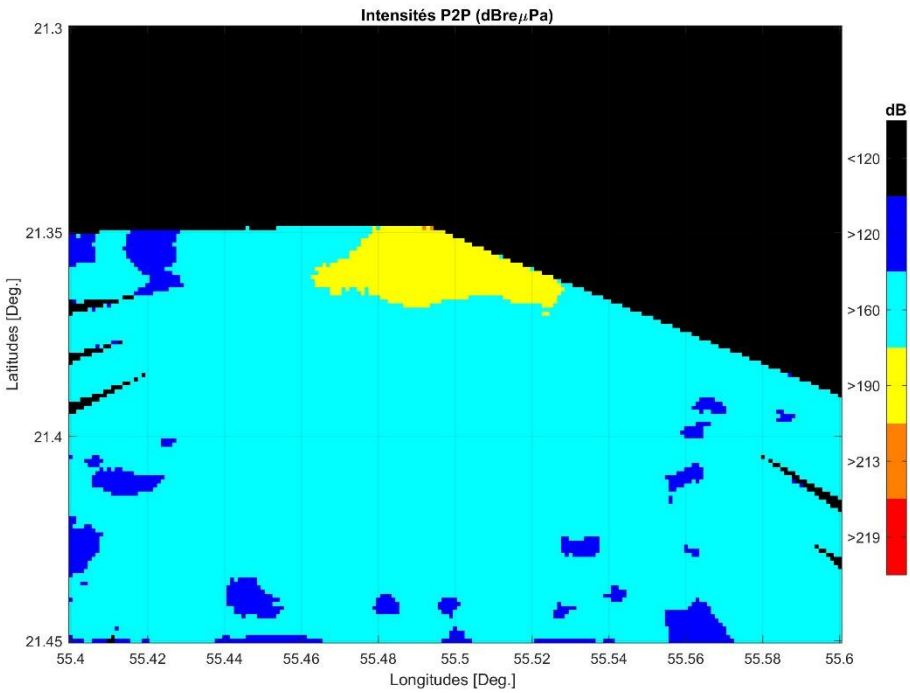


Figure 61 : Carte (emprise étendue) des intensités P2P pour une explosion de 5 kg enfouie à 1m.

Ces résultats sous forme cartographique sont néanmoins à prendre avec circonspection (pas de prise en compte des effets de non-linéarité dans les codes de propagation) et il reste plus sûr de se baser sur les lois empiriques modifiées pour évaluer les intensités en fonction des différents scenarios prédéfinis.

Les lois empiriques déjà évoquées au chapitre $2.2 ont donc été ajustées à l'environnement géophysique en tenant compte des calculs précédents. Une prise en compte de l'enfouissement de la charge a par ailleurs été faite.

On veut visualiser les intensités acoustiques P2P (*peak to peak*) et SEL (*Sound Exposure Level*) produites en fonction de la distance pour chacun des scénarios. Les figures qui suivent montrent donc :

- les intensités pour chaque charge : 1 kg en bleu, 2 Kg en rouge, 5 Kg en vert et 10 Kg en noir (pour 1m d'enfouissement et 1 charge),

- les intensités pour chaque profondeur : 1 m en vert, 2 m en vert pointillés (pour 1 charge de 5 Kg),

- les intensités pour chaque nombre de charges : 1 en vert, 5 en vert pointillés, 10 en points verts (pour 1 charge de 5 Kg, enfouissement 1 m),

- les intensités pour l'AUTOSTEM versus le TNT (pour 1 charge de 2 Kg),

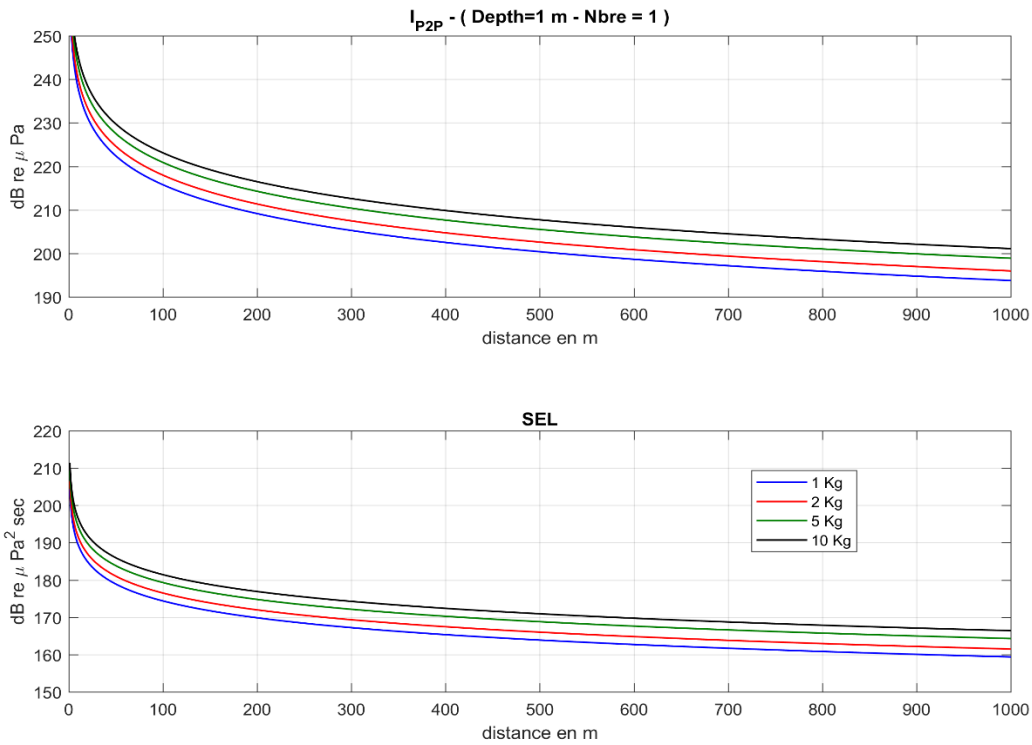


Figure 62 : Intensités en fonction de la distance pour différentes charges.

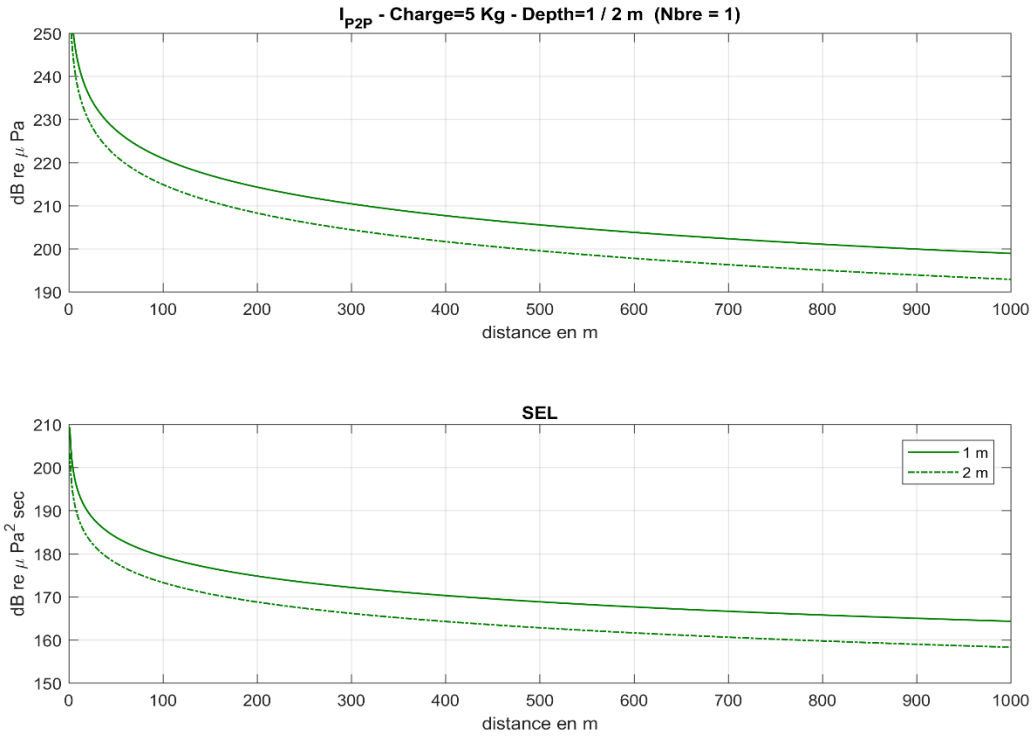


Figure 63 : Effet de l'enfouissement.

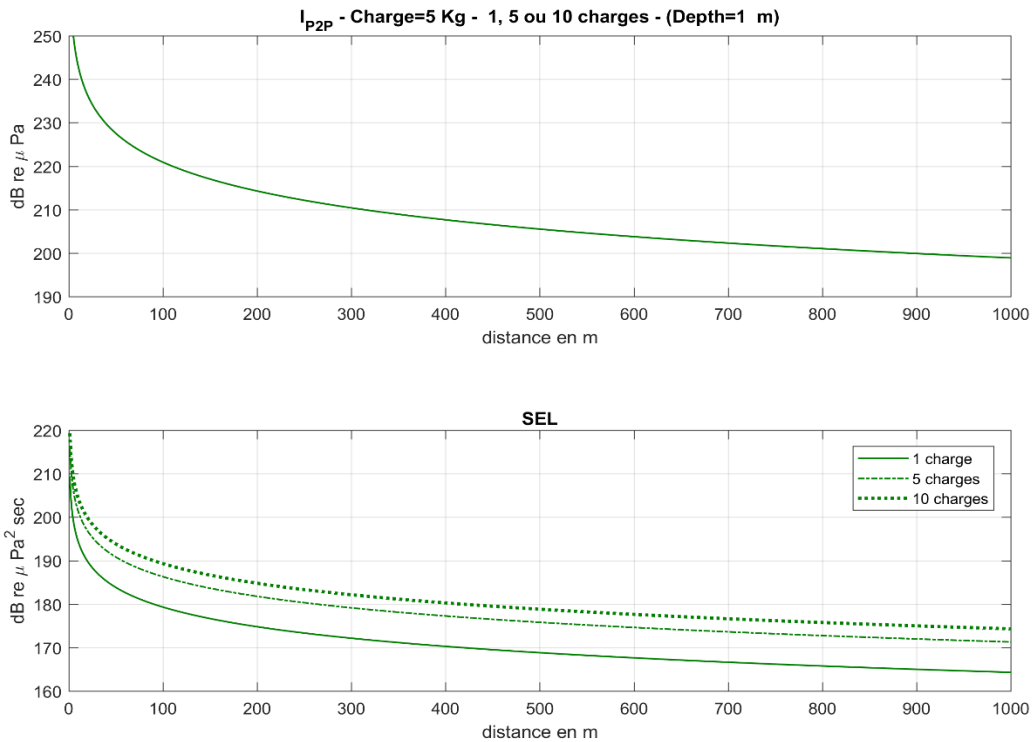


Figure 64 : Effet du nombre de charges

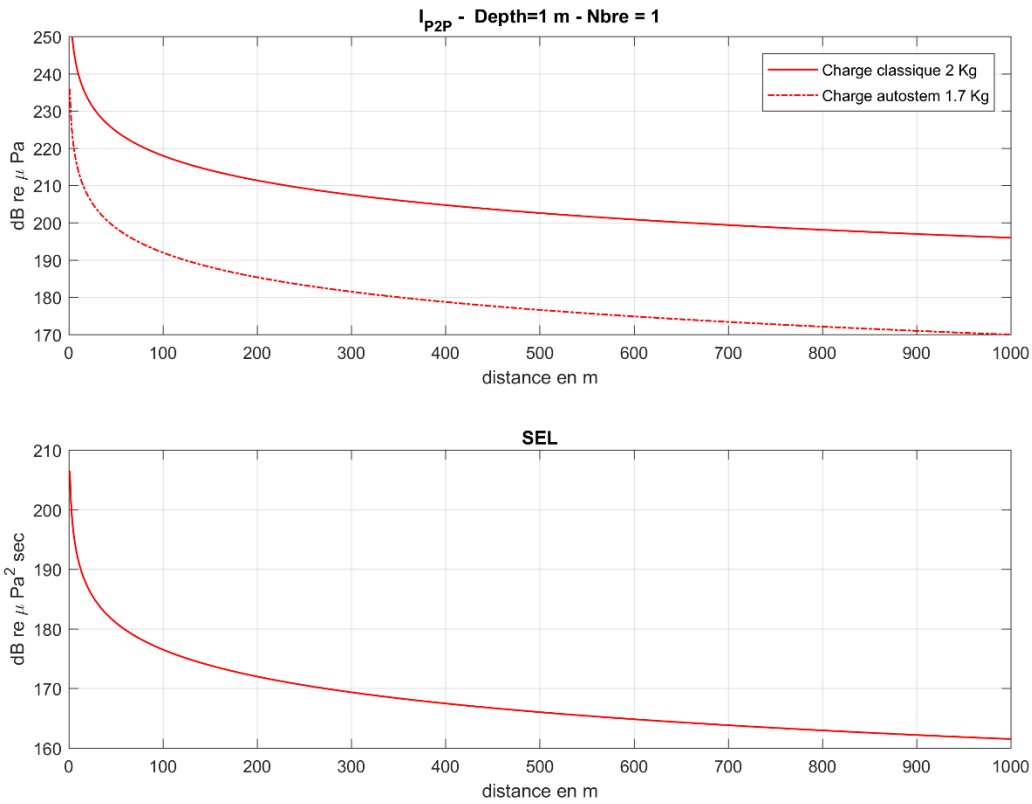


Figure 65 : Comparaison AUTOSTEM et TNT (charge unitaire de 2 Kg).

On constate que :

- Les effets de la charge sont prévisibles : augmentation modérée de 2 dB pour chaque doublement de charge (effet de la loi en W1/3), aussi bien en P2P qu'en SEL,

- Enfouir plus la charge réduit les intensités aussi bien en P2P qu'en SEL (uniquement pour l'onde de choc primaire),

- Augmenter le nombre de charges augmente le SEL en 10log10(N), mais n'augmente pas les intensités P2P. Attention, cela n'est vrai que si les microretards sont suffisamment grands,

- L'AUTOSTEM réduit fortement les intensités P2P mais ne modifie pas le SEL (l'énergie libérée est la même).

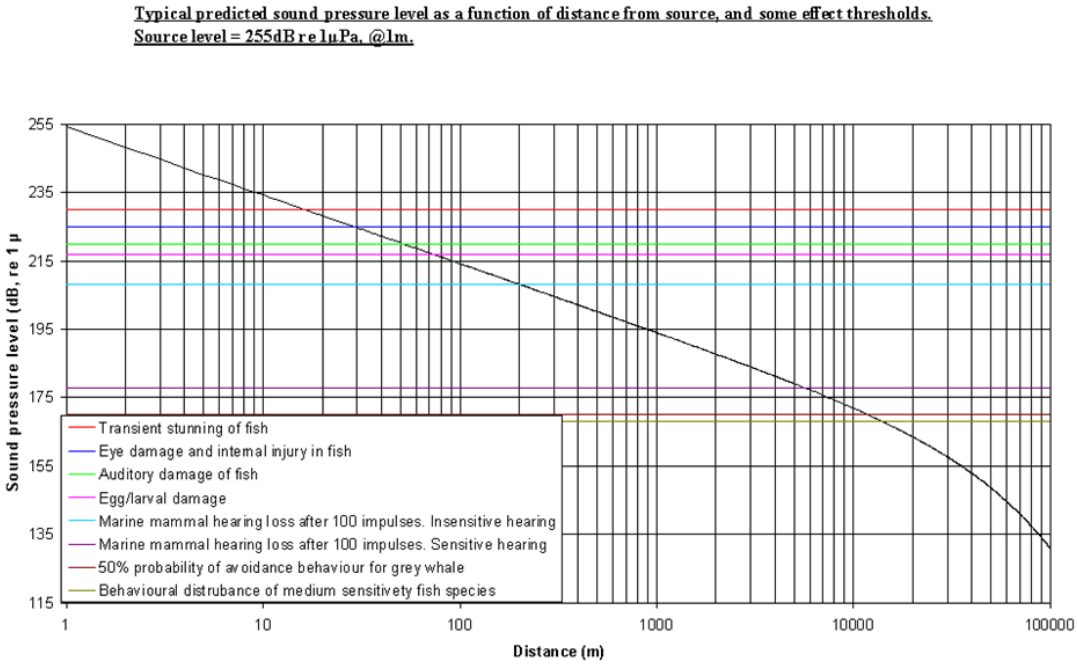


Figure 66 : Figure synthétique de l'US navy (source personnelle) rapportant des niveaux seuils de plusieurs espèces d'animaux marins vis-à-vis d'une source impulsive à 255dB.

$W(f) = C + 10\log_{10}\left\{\frac{(f/f_1)^{2a}}{\left[1+(f/f_1)^2\right]^a\left[1+(f/f_2)^2\right]^b}\right\}$						Non-impulsive		Impulse			
						TTS threshold	PTS threshold	TTS threshold		PTS threshold	
Group	a	b	f_1 (kHz)	f_2 (kHz)	C (dB)	SEL (weighted)	SEL (weighted)	SEL (weighted)	peak SPL (unweighted)	SEL (weighted)	peak SPL (unweighted)
LF	1	2	0.20	19	0.13	179	199	168	213	183	219
MF	1.6	2	8.8	110	1.20	178	198	170	224	185	230
HF	1.8	2	12	140	1.36	153	173	140	196	155	202
SI	1.8	2	4.3	25	2.62	186	206	175	220	190	226
OW	2	2	0.94	25	0.64	199	219	188	226	203	232
PW	1	2	1.9	30	0.75	181	201	170	212	185	218

Tableau 8 : Summary of weighting function parameters and TTS/PTS thresholds. SEL thresholds are in dB re 1 µPa2s and peak SPL thresholds are in dB re 1 µPa.

Dans le cas du déroctage, seuls les bruits impulsifs sont à considérer.

Pour les cétacés présents à la Réunion, on adopte donc les seuils SEL suivants :

• 219 dB *re*µPa (P2P) et 183 dB *re*µPa^2-s (SEL) : Seuil PTS au-dessus duquel des effets physiques sont susceptibles de se produire avec des dommages auditifs éventuellement permanents (PTS, *Permanent Threshold Shifts*)

• 213 dB *re*µPa (P2P) et 168 dB *re*µPa^2-s (SEL) : Seuil TTS au-dessus duquel peuvent se produire des perturbations temporaires d'audition et des effets notables de comportement (TTS, *Temporary Threshold Shifts*).

14.9 IMPACTS DES DEROCTAGES : DEPASSEMENTS DES SEUILS

Ces seuils sont évidemment dépassés à courte distance. Les intensités P2P produites par des charges explosives, même enfouies, dépassent les 240 dB. Nous avons donc choisi de présenter les intensités P2P et SEL pour chacun des scenarios à la distance de 750 m. La discussion porte alors sur le dépassement ou non de ces intensités prédites par rapport aux valeurs seuils TTS.

Tableau 9 : Intensités prédites à la distance de 750m en P2P (pour 1, 5 et 10 charges).

Charge	1 kg	2 kg	5 kg	10 kg	AutoStem
Enfouissement 1 m					
1	196.5	198.8	201.7	203.9	172.8
5					179.8
10					182.8
Enfouissement 2 m					
1	190.5	192.8	195.7	197.9	166.8
5					173.9
10					176.8

Tableau 10 : Intensités prédites à la distance de 750m en SEL (pour 1, 5 et 10 charges).

Charge	1 kg	2 kg	5 kg	10 kg	AutoStem
Enfouissement 1 m					
1	161.3	163.4	166.2	168.3	163.4
5	168.3	170.4	173.2	175.3	170.4
10	171.3	173.4	176.2	178.3	173.4
Enfouissement 2 m					
1	155.3	157.4	160.2	162.3	157.4
5	162.3	164.4	167.2	169.3	164.4
10	165.3	167.4	170.2	172.3	167.4

Une autre façon de présenter les choses (Tableaux 11 et 12) est de calculer les distances à partir desquelles les intensités redescendent en dessous des seuils (le TTS dans le cas présent). Pour une configuration donnée, on définit ainsi deux « distances de sécurité ».

Tableau 11 : Distances (en m) à partir desquelles les intensités P2P passent sous les seuils TTS (pour 1, 5 et 10 charges).

Charge	1 kg	2 kg	5 kg	10 kg	AutoStem
Enfouissement 1 m					
1	134	169	229	288	21
5					33
10					42
Enfouissement 2 m					
1	72	90	122	154	12
5					18
10					23

Tableau 12 : Distances (en m)) à partir desquelles les intensités SEL passent sous les seuils TTS (pour 1, 5 et 10 charges). Les indications « n.c. » signifient que les distances sont supérieures à 1000 m.

Charge	1 kg	2 kg	5 kg	10 kg	AutoStem
Enfouissement 1 m					
1	267	370	568	787	370
5	780	951	n.c.	n.c.	951
10	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.
Enfouissement 2 m					
1	106	147	226	312	147
5	310	429	659	913	429
10	491	680	n.c.	n.c.	680

On constate :

- Les rayons de dépassement des seuils P2P sont tous inférieurs à 300 m.

- Les rayons de dépassement des seuils SEL peuvent être supérieurs à 1000 m dès que le nombre de charges augmente. Cela est du au fait que les intensités SEL s'ajoutent alors que ça n'est pas le cas des intensités P2P tant que les micro-délais sont suffisants.

- En AUTOSTEM, ou bien avec des charges classiques de 1 Kg, les seuils sont respectés presque partout dans un rayon de 750 m.

- L'enfouissement réduit significativement les nuisances.

- En cas de tirs composés de plusieurs charges classiques et supérieures à 1 kg avec un enfouissement ne dépassant pas le m, un rideau de bulles réduirait significativement les rayons de sécurité.

14.10 CONCLUSION

Dans l'état des connaissances actuelles, le recours au déroctage sur le site engendrerait des impacts acoustiques, perte temporaire d'audition chez des cétacés qui se trouveraient à l'intérieur des périmètres de sécurité calculés.

Ces impacts restent cependant limités puisque ce sont des produits enfouis avec des charges réduites à quelques kilos et sur des emprises limitées spatialement et temporellement.

Par ailleurs, ces impacts sont nettement réduits, au moins vis-à-vis de l'onde choc primaire (P2P) si on a recours au produit AUTOSTEM.

Dans le cas où il s'avérerait nécessaire de procéder à des tirs à micro-retards avec un grand nombre de charges classiques de plusieurs kilos et en enfouissement faible, la mise en place d'un rideau de bulles est recommandée.

[1] **Cole, R. H., & Weller, R**. "Underwater explosions". *Physics Today*, *1*(6), 35-35, 1948.

[2] **Weston, D. E.** ,"Underwater explosions as acoustic sources." *Proceedings of the Physical Society*, 76(2), 233, 1960.

[3] **Soloway, Alexander G., and Peter H. Dahl.** "Peak sound pressure and sound exposure level from underwater explosions in shallow water." *The Journal of the Acoustical Society of America* 136.3 (2014): EL218-EL223.

[4] **R.N.Gupta, P.Pal Roy and B.Singh**, "Prediction of peak particle velocity and peak air pressure generated by buried explosion", *International Journal of Mining and Geological Engineering*, 1988, 6, 15-16.