

REALISATION D'ETUDES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES, ENVIRONNEMENTALES, SOCIO- ECONOMIQUES, ARCHITECTURALES, PAYSAGERES ET URBAINES

Lot N° 2 : ETUDES SCIENTIFIQUES ET ETUDES TECHNIQUES

MARCHE SUBSEQUENT N°2 : ETUDE ACOUSTIQUE SOUS- MARINE

Phase 1 : Établissement de l'état acoustique de référence

Le 09 mai 2019



Version	Rédacteurs	Vérification	Validation	Date
Version 0	Achraf DRIRA	Medjber BOUZIDI	Guillaume BLONDEAU	09/05/2019
Version 1	Achraf DRIRA	Medjber BOUZIDI	Guillaume BLONDEAU	11/06/2019
Version 2	Achraf DRIRA	Medjber BOUZIDI	Guillaume BLONDEAU	26/06/2019

09 mai 2019

1 TABLE DES MATIÈRES

Liste des figures.....	4
1. Chapitre 1 : Enjeux de l'étude acoustique de l'état initial.....	12
1.1 Contexte.....	12
1.1.1 Contexte générale du bruit sous-marin.....	12
1.1.2 Contexte scientifique.....	12
1.1.3 Contexte règlementaire.....	13
1.1.4 Contexte de l'étude	15
1.2 Objectifs de l'étude.....	16
1.3 Méthodologie.....	17
1.3.1 Méthodologie générale	17
1.3.2 Méthodologie proposée pour effectuer la Phase 1.....	19
2. Chapitre 2 : Niveau du bruit ambiant	22
2.1 Introduction	22
2.2 Campagne de Mesure acoustique du bruit ambiant	22
2.2.1 Identification des sources de bruit	22
2.2.2 Matériel utilisé pour la mesure de l'ambiance sonore.....	24
2.2.3 Choix de la zone de mouillage	27
2.2.4 Mouillage des appareils.....	30
2.2.5 Campagne de récupération du matériels.....	32
2.3 Évolution du niveau du bruit dans la zone d'étude durant la période des enregistrements	34
2.3.1 Quantification des niveaux de bruit :	34
2.3.2 Analyse des Résultats de mesures.....	47
2.3.3 Analyse Temps-Fréquences	49
2.3.4 Résultats C-POD.....	62
3. Chapitre 3 : Modélisation du bruit ambiant.....	65
3.1 Introduction à la modélisation numérique du bruit.....	65
3.2 Principe des études de modélisation du bruit sous-marin.....	66
3.3 La zone de modélisation.....	67
3.4 Recueil des données d'entrée du modèle.....	68
3.4.1 Les données utilisées dans la modélisation du bruit ambiant.....	68
3.4.2 Les données de l'environnement	69
3.4.3 Les données anthropiques.....	72
3.5 Caractérisation des sources sonores	74
3.6 Choix du model de propagation.....	77
3.7 Résolution	78
3.8 Calibration active.....	79
3.9 Calibration passive.....	85

3.10 Résultats de la modélisation	86
4. Conclusion	95
5. Bibliographie	96
6. Annexe	99

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Démarche globale de la prestation	16
Figure 2: Zone d'étude	17
Figure 3: Méthodologie de SINAY	18
Figure 4: Synthèse de la méthodologie mise en place par SINAY	19
Figure 5: Distribution fréquentielle des sources de bruit ambiant sous-marin.	23
Figure 6: Enregistreur RTsys de type EA-SD14000	24
Figure 7: Enregistreur Wildlife de type SM3M	25
Figure 8: CPOD-Dispositif pour enregistrer les clicks des mammifères marins	26
Figure 9: Cage n°1 anti-chalutage avec l'enregistreur RTsys fixé au fond du support, CPOD-945, Largeur acoustique.....	26
Figure 10: Cage n°2 anti-chalutage avec l'enregistreur « Wildlife SM3M » fixé au milieu du support, CPOD-944, Largeur acoustique	27
Figure 11: bathymétrie de la zone d'étude.....	27
Figure 12: les courants d'eau de la zone d'étude.....	28
Figure 13: l'emplacement des cages par rapport à la zone des travaux. Les points en bleu présentent les futurs points de travaux et les cercles en vert présentent les limites de 750 m autour des sources.....	28
Figure 14: Carte de la densité du trafic de la zone d'étude pour l'année 2017 calculé à partir des données AIS. La légende présente une échelle logarithmique de la présence des bateaux dans chaque maille.....	29
Figure 15: Mouillage cage 1 avec un enregistreur de type RTsys.....	30
Figure 16: Mouillage cage 2 avec un enregistreur de type Wildlife	30
Figure 17: Les cercles bleus présentent les points de mouillage des cages déposés pour mesurer le bruit ambiant des deux projets	31
Figure 18: Positionnement du matériel immergé (triangles noirs) et de la surface de la prospection réalisée avec la valise acoustique (cercles rouges).....	33
Figure 19: Circulaires réalisés en plongées autour du point de la structure et du point du corps mort.....	33
Figure 20: Niveau RMS du 15/11 jusqu'au 20/11/2018	38
Figure 21: Niveau RMS du 21/11 jusqu'au 25/11/2018	38
Figure 22: Niveau RMS du 26/11 jusqu'au 30/11/2018	39
Figure 23: Niveau RMS du 09/04/2019	39
Figure 24: Moyenne répartition journalière RMS du 15/11 jusqu'au 30/11/2018	40
Figure 25: Moyenne répartition journalière RMS du 15/11 jusqu'au 20/11/2018	41
Figure 26: Niveau SPL du 15/11 jusqu'au 20/11/2018.....	42
Figure 27: Niveau SPL du 21/11 jusqu'au 25/11/2018.....	43
Figure 28: Niveau SPL du 26/11 jusqu'au 30/11/2018.....	43
Figure 29: Niveau SPL du 09/04/2019	44
Figure 30: Niveau SEL du 25/11 jusqu'au 30/11/2018	44
Figure 31: Niveau SEL du 21/11 jusqu'à 25/11/2018	45
Figure 32: Niveau SEL du 26/11 jusqu'au 30/11/2018	46
Figure 33: Niveau SEL du 09/04/2019	46
Figure 34: Mesures de la vitesse du vent dans la zone d'étude en m/s durant la période de mesure.....	48
Figure 35: Modèle de Wenz	50
Figure 36: évolution du niveau du bruit moyen (DSP-pwelch) entre le 15 et le 20 novembre 2018. Les fenêtres en trait discontinu noir et rouge désignent respectivement les périodes de jour et de l'après midi	51
Figure 37: évolution du niveau du bruit moyen (DSP-pwelch) entre le 21 et le 25 novembre 2018. Les fenêtres en trait discontinu noir et rouge désignent respectivement les périodes de jour et de l'après midi	52
Figure 38: évolution du niveau du bruit moyen (DSP-pwelch) entre le 25 et le 30 novembre 2018. Les fenêtres en trait discontinu noir et rouge désignent respectivement les périodes de jour et de l'après midi	52
Figure 39: DSP moyenne avec le modèle de Wenz de la période (15/11-20/11).....	54
Figure 40: Niveau du bruit de la période d'enregistrement (15/11-20/11) en 1/3 d'octave	54

Figure 41: DSP moyenne avec le modèle de Wenz de la période (21/11-25/11).....	55
Figure 42: Niveau du bruit de la période d'enregistrement (21/11-25/11) en 1/3 d'octave	55
Figure 43: DSP moyenne avec le modèle de Wenz de la période (26/11-30/11).....	56
Figure 44: Niveau du bruit de la période d'enregistrement (26/11-30/11) en 1/3 d'octave	56
Figure 45: Les différents taux en percentiles 10 % (bleu), 50% (vert) et 90% (rouge) du (15/11-20/11).....	57
Figure 46: Les différents taux en percentiles 10 % (bleu), 50% (vert) et 90% (rouge) du (21/11-25/11).....	57
Figure 47: Les différents taux en percentiles 10 % (bleu), 50% (vert) et 90% (rouge) du (26/11-30/11).....	58
Figure 48: Evolution du niveau du bruit moyen (DSP-pwelch) de l'enregistrement sur le point le 09/04/2019.	58
Figure 49: DSP moyenne de la période d'enregistrement (09-04-2019) avec le modèle de Wenz.....	60
Figure 50: Niveau du bruit de la période d'enregistrement (09-04-2019) en 1/3 d'octave	60
Figure 51: Les différents taux en percentiles 10 % (bleu), 50% (vert) et 90% (rouge) du.....	61
Figure 52: Détection positives de dauphin en bleu et marsouin en orange par jour durant la période du déploiement du CPOD-937	62
Figure 53: Horaire des détections positives de dauphin et de marsouin durant la période du déploiement du CPOD-937	64
Figure 54: Les 3 composantes d'un paysage acoustique.....	65
Figure 55: principe de modélisation du bruit anthropique à l'échelle d'une zone d'étude	67
Figure 56: La zone d'étude. Le carré bleu délimite la zone de modélisation de bruit.....	68
Figure 57: Bathymétrie de la zone d'étude, source de données Emodnet.	69
Figure 58: Carte de nature du sédiment. (Source SHOM)	70
Figure 59: Les Profils de vitesse calculés pour chaque période de 8 heures de la journée le long de la colonne d'eau, en bleu la matinée, en vert le soir et en rouge à midi	71
Figure 60: Les valeurs de marée extrêmes, source SHOM	72
Figure 61: Un exemple des données AIS à un instant T sur la zone d'étude (source marine trafic).....	73
Figure 62: Exemple de cartographie qui montre la densité du trafic autour de la zone d'étude.....	74
Figure 63: Niveau de bruit en fonction de la vitesse du vent.....	75
Figure 64: Liste de source de bruit lors de déplacement d'un navire.....	76
Figure 65: Niveau d'émission DSP d'un bateau estimé avec les différentes approches présentes dans la littérature	77
Figure 66: Signal Chirp (signal modulé en fréquence) de 100 Hz à 20 KHz pour trouver la fonction du transfert de toutes les fréquences du milieu de propagation	79
Figure 67: Des signaux de sifflements des dauphins pour étudier l'effet du masquage avec le bruit ambiant	80
Figure 68: La séquence des signaux envoyé pour chaque point mesuré à 1 m du Lubell.	80
Figure 69: Niveau d'émission pour les points les plus proches.....	81
Figure 70: Niveau d'émission pour les points les plus loin.....	81
Figure 71: Les emplacements des cages et les points d'émission de la campagne de calibration le 14/11/2018	82
Figure 72: Les emplacements des cages et les points d'émissions de la campagne de calibration le 09/04/2019 Les points jaunes présentent le début d'émission, le point rouge présente la position de la cage (enregistreur) et les points orange présentent les positions finales de l'émission.	83
Figure 73: Calibration du milieu de propagation. En rouge le niveau enregistré sur le point de calibration 3. En vert le niveau du modèle le plus proche de la vérité terrain. En bleu les niveaux des différents modèles du milieu de propagation.	84
Figure 74: Les niveaux d'incertitude aux différents points de calibration en fonction de la fréquence.....	84
Figure 75: différence des niveaux de bruit de chaque modèle para rapport à la vérité-terrain	85
Figure 76: Exemple de modélisation de bruit ambiant avec la présence de trois bateaux dans la zone d'étude.....	86
Figure 77: Carte de niveaux du bruit en percentile 20 à une profondeur de 3 m	89
Figure 78: Carte de niveaux du bruit en percentile 20 à une profondeur de 3 m	89
Figure 79: Carte de niveaux du bruit en percentile 20 à une profondeur de 3 m.....	90
Figure 80: Carte de niveaux du bruit en percentile 20 à une profondeur de 3 m.....	90
Figure 81: Carte de niveaux du bruit en percentile 50 (médiane) à une profondeur de 3 m	91

Figure 82: Carte de niveaux du bruit en percentile 50 (médiane) à une profondeur de 3 m	91
Figure 83: Carte de niveaux du bruit en percentile 50 (médiane) à une profondeur de 3 m	92
Figure 84: Carte de niveaux du bruit en percentile 50 (médiane) à une profondeur de 3 m	92
Figure 85: Carte de niveaux du bruit en percentile 90 à une profondeur de 3 m.....	93
Figure 86: Carte de niveaux du bruit en percentile 90 à une profondeur de 3 m.....	93
Figure 87: Carte de niveaux du bruit en percentile 90 à une profondeur de 3 m.....	94
Figure 88: Carte de niveaux du bruit en percentile 90 à une profondeur de 3 m.....	94

Résumé - PRESENTATION DES RESULTATS

La société SINAY a réalisé un état de référence acoustique dans le port des Bas sablons et le terminal du Naye. Cet état de référence permet de caractériser et quantifier les différentes sources de bruit et de connaître le niveau du bruit moyen dans la zone.

Résultats des mesures du bruit :

L'analyse des enregistrements menés par SINAY a montré un niveau de bruit sous-marin élevé : Les niveaux de bruit dans les plus basses fréquences sont plus élevés que le niveau de bruit dans le modèle de Wenz (modèle empirique d'estimation du spectre du bruit ambiant, voir page 46) pour l'indice de trafic maritime 7 surtout durant la journée.

Ces résultats sont retrouvés pendant toute la période de l'enregistrement. Ceci montre que le niveau de bruit anthropique est fort sur cette zone et que le trafic maritime domine toute la bande fréquence de 1 Hz à 10 kHz.

Les analyses ont également révélé une différence entre le niveau de bruit pendant le jour et la nuit, notamment en basses et moyennes fréquences, en relation avec les activités quotidiennes anthropiques dans la zone.

Résultats de la cartographie du bruit :

Le niveau de bruit ambiant est très impacté par le trafic maritime. Les analyses des résultats de modélisation dans la zone ont également permis de distinguer les bruits notables auxquels le secteur est exposé, à savoir, le bruit généré par les grands bateaux comme les cargos et les Ferries.

Le bruit généré par le trafic maritime est plus élevé sur les côtes nord-ouest du port et à la sortie du chenal, avec environ 10 dB de plus pour les médianes comparées au reste de la zone.

Les paramètres du milieu de propagation des ondes acoustiques dans les zones d'étude ainsi que les faibles hauteurs d'eau ont montré une forte absorption des basses fréquences et une réponse plus favorable pour les propagations des ondes de moyenne fréquence. Les niveaux de bruit les plus élevés sont identifiables dans les zones les plus profondes.

Résultats de l'étude de la présence des mammifères marins :

Détections de dauphins: La majeure partie de l'activité des dauphins a été détectée le 20/11/2018, une activité moins importante ayant été enregistrée les 22/11/2018, 24/11/2018, 30/11/2018 et 02/12/2018. L'activité des dauphins le 20/11/2018 s'est produite de 22h à 23h, les autres détections ont été dispersées tout au long de la journée.

Détections de marsouins: les marsouins ont été détectés à un niveau bas les 17/11/2018, 18/11/2018, 20/11/2018 et 28/11/2018. Aucun profil journalier significatif de l'activité des marsouins n'a été identifié.

Cette étude nous a permis de caractériser l'ambiance sonore initiale de la zone de St-Malo et nous a fourni des informations importantes pour la phase d'évaluation de l'impact du bruit des futurs travaux.

Glossaire

La pression acoustique : c'est l'écart de pression locale par rapport à la pression atmosphérique ambiante (moyenne ou à l'équilibre) provoqué par une onde sonore. Dans l'air, la pression sonore peut être mesurée au moyen d'un microphone et dans l'eau avec un hydrophone. L'unité de pression sonore est le Pascal (Pa).

Décibel (dB) : La plage de pressions donnant un niveau sonore utile s'étale sur un rapport de un à plusieurs millions, Pour cette raison, la mesure de bruit convertit très généralement la pression acoustique en décibels. Le niveau en décibels d'une pression acoustique est le niveau de pression sonore sur une échelle logarithmique pour représenter la pression, l'intensité ou la puissance sonore d'un son.

Le niveau de pression sonore (SPL : Sound Pressure Level) : est une mesure logarithmique de la pression effective d'un son par rapport à une valeur de référence, soit l'expression du niveau de la pression acoustique, en décibels, relatif à 1 Micro Pascal à 1 mètre (dB re 1 μ Pa@1m). 1 mètre est la distance de référence standard entre une source sous-marine et un récepteur.

$$SPL = 20 \log_{10}\left(\frac{p}{p_{ref}}\right)$$

Où P est la pression sonore de l'onde sonore et p_{ref} est la pression sonore de référence.

Sound Pressure Level zero-to-peak (SPL_{pk}) : La pression sonore maximale pendant un intervalle de temps donné est mesurée entre zéro et le pic maximum du signal ; elle peut être positive ou négative. Cette valeur est généralement utile en tant que métrique pour une forme d'onde pulsée, pour les mesures de bruit impulsif (explosion, battage de pieux, etc..), bien qu'elle puisse également être utilisée pour décrire une forme d'onde périodique.

$$SPL_{pk} = 20 \log_{10}\left(\frac{\max(|p(t)|)}{p_{ref}}\right)$$

Sound pressure level peak-to-peak (SPL_{pk-pk}) : c'est la somme de la pression de compression maximale et de la pression de pointe pendant un intervalle de temps donné. Cette valeur est généralement utile en tant que métrique pour une forme d'onde pulsée, pour les mesures de bruit impulsif (explosion, battage de pieux, etc..), bien qu'elle puisse également être utilisée pour décrire une forme d'onde périodique.

$$SPL_{pk-pk} = 20 \log_{10}\left(\frac{\max(p(t)) - \min(p(t))}{p_{ref}}\right)$$

Root mean square (RMS) sound pressure level : la racine carrée de la pression carrée moyenne, ou la pression carrée moyenne, est l'intégrale temporelle de la pression sonore au carré sur un intervalle de temps donné, divisée par la durée de l'intervalle de temps. La pression sonore de RMS est calculée en évaluant d'abord les valeurs moyennes de la pression sonore pendant l'intervalle de temps spécifié puis en calculant la racine carrée de la valeur ainsi obtenue. La pression sonore RMS est

exprimée en Pascals (dB re 1 μ Pa). Le niveau RMS est un moyen efficace et utile pour calculer la moyenne des valeurs de la pression acoustique sur une période donnée pour déterminer le niveau sonore dans cet intervalle du temps.

$$SPL_{rms} = 20 \log_{10} \left(\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P(t)^2 dt} \right)$$

Niveau d'exposition sonore SEL (Sound Exposure Level) : c'est une mesure acoustique qui fournit une indication de la quantité d'énergie acoustique contenue dans un événement sonore. Elle correspond à l'énergie totale du bruit, produite à partir d'un seul événement de bruit.

Le SEL est aussi défini comme l'intégration de toute l'énergie acoustique contenue dans un événement en prenant en compte à la fois l'intensité et la durée du bruit rayonné. En acoustique sous-marine elle est calculée en (dB re 1 μ Pa².s).

$$SEL = 10 \log_{10} \left(\int_0^T P(t)^2 dt \right)$$

Pertes par propagation TL (Transmission Loss) : c'est la perte d'énergie d'une onde acoustique lors de sa propagation de la source vers le récepteur.

Sons impulsionnels : ce sont les bruits transitoires qui se produisent pendant une très courte durée et présentent souvent des pics de pression acoustique élevée.

Durée du signal acoustique de l'explosion : la durée de ce signal impulsionnel (durée de l'impulsion) est considérée entre les deux instants où, respectivement les seuils de 5 % et 95 % de l'énergie totale du signal d'explosion sont atteints.

Hertz(Hz) : c'est l'unité de mesure de la fréquence. Elle désigne le nombre de répétitions par seconde d'un événement périodique. La fréquence d'un événement qui se répète une fois par seconde est 1 Hertz (1 Hz) et la fréquence d'un événement qui se répète 1 000 fois par seconde est 1 kilohertz (1 kHz).

Représentation temps-fréquence (Spectrogramme) : elle permet de montrer la distribution de l'énergie d'un signal selon les fréquences, ainsi que son évolution dans le temps. Dans la présente étude, les fréquences sont représentées sur l'axe vertical et le temps sur l'axe horizontal. L'intensité de la couleur pour chaque point temps-fréquence est proportionnelle à l'intensité du signal en ce point.

Densité spectrale de puissance (DSP) : cette représentation décrit comment la puissance du signal est distribuée selon les fréquences.

Analyse par bandes de fréquences : elle consiste à diviser la bande fréquentielle du signal en intervalles.

Analyse par bande de 1/3 d'octave : elle consiste à évaluer la puissance du signal acoustique à partir d'une succession de bandes fréquentielles. Chaque bande de tiers d'octave autour de la fréquence de référence f_0 est donnée par $B = [f_0 2^{-\frac{1}{6}}, f_0 2^{\frac{1}{6}}]$. Les fréquences centrales de ces bandes sont donc définies par $f_c(n) = 2^{\frac{n}{3}}$.

Puissance d'un signal en 1/3 d'octave : il s'agit d'intégrer la densité spectrale de puissance du signal entre les deux fréquences f_{min} et f_{max} définissant chaque bande de tiers d'octave.

Objet du Document

Le présent document décrit l'étude réalisée par la société SINAY afin d'établir un état de référence acoustique dans le port des Bas sablons et le terminal du Naye. Cet état de référence permet de caractériser et quantifier les différentes sources de bruit et de connaître le niveau du bruit moyen dans la zone. Ce document synthétise aussi les solutions techniques et matérielles que SINAY a mis en place pour réaliser le suivi acoustique de la phase initiale.

Le document est composé de trois chapitres. Le premier présente le contexte de l'étude et la méthodologie du travail. Le deuxième décrit les campagnes de mesures et les moyens matériels utilisés dans cette étude ; il se termine par les traitements et les analyses des mesures *in situ*. Le dernier chapitre présente l'étude de la cartographie du bruit ambiant, la description du modèle, les campagnes de calibration et les résultats des études statistiques à chaque saison.

1. CHAPITRE 1 : ENJEUX DE L'ETUDE ACOUSTIQUE DE L'ETAT INITIAL

1.1 CONTEXTE

1.1.1 CONTEXTE GÉNÉRALE DU BRUIT SOUS-MARIN

Les ondes sonores font partie de notre environnement : nous maîtrisons intuitivement leurs caractéristiques physiques, et nous utilisons en permanence, de manière naturelle ou artificielle, et essentiellement pour des opérations de communication. Dans l'eau les choses sont quelque peu différentes. Les ondes acoustiques y profitent de meilleures caractéristiques de transmission que dans l'air : elles présentent une vitesse de propagation plus importante, peuvent atteindre des niveaux beaucoup plus élevés et surtout y subissent moins d'atténuation, ce qui leur permet de se propager à grande distance. Toutefois cet environnement est également soumis à d'autres contraintes ; en particulier les signaux utiles sont perturbés par beaucoup de bruit ambiant et de d'échos parasites. Par exemple, les cétacés, êtres vivants évolués, utilisent abondamment l'émission d'ondes sonores, pour communiquer entre eux, mais aussi pour explorer leur environnement et localiser les parois de leur environnement.

Pour ces raisons, une grande attention a été récemment portée aux sources de bruit anthropiques dans l'océan et à leurs effets potentiellement nocifs sur ces animaux marins.

1.1.2 CONTEXTE SCIENTIFIQUE

Le bruit ambiant en milieu sous-marin subit une augmentation générale en relation avec le développement du trafic maritime dont, en particulier, celui du trafic marchand. Par exemple, le nombre total de navires commerciaux a doublé entre 1965 et 2003 et les projections prévoient que le tonnage transporté par ces grands navires de fret va encore doubler ou tripler d'ici à 2025. De plus, les bruits issus de la circulation maritime n'ont pas cessé d'évoluer durant les 20 dernières années (20 dB d'augmentation entre 1965 et 2003).

La contribution des pollutions acoustiques à la dégradation des habitats des cétacés avait été considérée comme secondaire jusqu'à une époque assez récente. Mais l'évidence de plusieurs événements graves liés au bruit anthropique ont amené les communautés militaires et industrielles à s'interroger, avec la communauté scientifique, sur les dangers potentiels de leurs activités. Cette démarche leur a permis de développer des pistes de recherche afin d'étudier les effets du bruit sur l'environnement marin ainsi que les solutions adéquates. [Wahlberg, M., & Westerberg, H. (2005); Buckstaff, K. C. (2004); Wartzok, D., Popper, A. N., Gordon, J., & Merrill, J. (2003)]. L'examen des résultats récents nous permet de prendre en considération l'impact provoqué par les pollutions acoustiques sur les cétacés. Ils s'étendent de la simple perception jusqu'à la lésion traumatique grave, constatée dans certains cas d'intensité sonore très forte.

Ces résultats de recherche récents ont montré que l'emploi de systèmes acoustiques dans les diverses activités humaines en milieu océanique (industrielles, de défense, scientifiques) pose le problème de leur impact sur les populations de mammifères marins, poissons et invertébrés. (THOMSEN, Frank & al. (2006); POPPER, Arthur N. & HAWKINS (2012); Mueller-Blenkle & al. (2010)).

1.1.3 CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE

Le contexte réglementaire français relatif à la gestion du bruit sous-marin et de son impact sur l'environnement représente l'expression des engagements de la France à l'échelle internationale en matière de gestion, de protection et de valorisation de l'environnement marin et de son patrimoine naturel. Toutefois, il est important de souligner que les textes réglementaires pertinents pour les suivis liés aux projets industriels sont ceux qui abordent ces projets individuellement. Dans ce cas, les suivis et les mesures de réduction des impacts portent uniquement sur le projet visé et n'ont pas vocation à s'inscrire dans un programme plus vaste relatif à une approche écosystémique.

Cependant, la mise en œuvre d'une approche écosystémique dans la gestion du milieu marin est un des principes fondamentaux d'autres instruments réglementaires, tels que la Directive - Cadre « Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM) ». Les dispositions de cette directive ne s'appliquent pas aux suivis de l'environnement d'un projet industriel en mer. Or, l'impulsion du développement scientifique et technologique enclenchée par la DCSMM a été, et est toujours, bénéfique pour améliorer l'efficacité des suivis acoustiques lors de la construction et de l'exploitation des parcs éoliens en mer.

La France est à la fois un état membre de l'Union Européenne et partie prenante de plusieurs traités internationaux ayant compétence en protection de l'environnement marin :

- OSPAR, ou Convention Oslo-Paris, sur la protection de l'Atlantique Nord-Est contre les pollutions
- CIEM, Convention internationale pour l'exploration de la mer
- CBD, Convention sur la diversité biologique
- CMS, Convention sur la protection des espèces migratrices appartenant à la faune sauvage
- ASCOBANS, Accord sur la conservation des petits cétacés de la mer Baltique, du nord-est de l'Atlantique et des mers d'Irlande et du Nord

Toutes ces entités, y compris l'Union Européenne, disposent, en leur sein, d'un groupe de travail sur le bruit sous-marin. Ces groupes de travail coopèrent régulièrement pour définir les lignes directrices des programmes de suivi acoustique nécessaires à évaluer les effets d'un chantier maritime sur le milieu ainsi que l'impact sur la faune marine sensible au bruit.

Ci-après sont cités les derniers textes réglementaires pertinents au niveau de l'UE, des conventions des mers régionales et françaises :

- Directive 2014/52/UE (Directive sur l'étude d'impact)
- Directive 92/43/CEE (Directive habitats)
- Arrêté du 16 novembre 2001 relatif à la liste des types d'habitats naturels et des espèces de faune et de flore sauvages qui peuvent justifier la désignation de zones spéciales de conservation au titre du réseau écologique européen Natura 2000 (MEDDE 2001)
- Résolution CMS 10.24 « Nouvelles mesures visant à réduire la pollution acoustique sous-marine pour la protection des cétacés et autres espèces migratrices » (CMS 2011)
- Résolution ASCOBANS 6.2 (ASCOBANS 2009a)
- Loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement (MEDDE 2010a)
- Arrêté du 1er juillet 2011 fixant la liste des mammifères marins protégés sur le territoire national et les modalités de leur protection (MEDDE 2011)

Textes de référence ainsi que les dernières lignes directrices et guides de bonnes pratiques disponibles :

- CMS Family Environmental Impact Assessment Guidelines for Marine Noise-generating Activities (Prideaux 2016);
- Guide de l'étude d'impact sur l'environnement des parcs éoliens, Ministère de l'Environnement (MEDDE 2010b)
- OSPAR Guidance on Environmental Considerations for Offshore Wind Farm Development (OSPAR 2008)
- Recommandations de l'Organe subsidiaire scientifique, technique et technologique de la Convention sur la diversité biologique (CBD) : « Gestion des incidences des débris marins et du bruit sous-marin d'origine anthropique sur la diversité biologique marine et côtière ». (CBD 2016)
- ASCOBANS Mitigation Guidance for intense noise generating activities in the ASCOBANS region (ASCOBANS 2009b)
- Guide de bonnes pratiques pour la collecte et l'analyse des données acoustiques, avec proposition de standards (Robinson, S. P., Lepper, P. A., & Hazelwood 2014)
- Proposition de standard par l'institut TNO des Pays-Bas (de Jong et al. 2011)
- Note NR614 proposé par Bureau Veritas portant sur une certification pour les émissions de bruit sous-marin (Bureau Veritas 2014)
- Wind Energy Development and NATURA 2000 (European Commission 2011)
- Methodologies for measuring and assessing potential changes in marine mammal behaviour, abundance or distribution arising from the construction, operation and decommissioning of offshore windfarms (Diederichs et al. 2008)
- Implementation of Directive 2001/42 on the assessment of the effects of certain plans and programs on the environment (European Commission 2003)
- Guidance document on the strict protection of animal species of Community interest under the 'Habitats Directive' 92/43/EEC (European Commission 2007)

De plus, nous rappelons ci-après les lignes directrices et / ou autres recommandations existant dans d'autres pays européens et pouvant représenter une référence pour les travaux menés en France :

- **Au Royaume Uni** : Lignes directrices et guides sur l'étude d'impact et les suivis des départements CEFAS et DEFRA (CEFAS 2004, DEFRA 2005) ainsi que les dispositions en matière d'atténuation de risque sur les mammifères marins pendant le battage de pieux (JNCC 2009)
- **En Allemagne** : Guides préparés par le BSH (Federal Maritime and Hydrographic Agency (BSH) 2007a, b, 2013) incluant les seuils de bruit réglementaires à respecter pendant la construction des parcs.

Plusieurs rapports de suivi des travaux de construction et d'exploitation des parcs éoliens sont devenus récemment disponibles. Ils se rapportent à des projets menés dans plusieurs pays européens, notamment l'Allemagne, le Royaume Uni, le Danemark et les Pays Bas. De plus, plusieurs travaux de recherche très récents apportent de nouvelles connaissances sur les impacts des parcs éoliens sur les mammifères marins. Ils proposent des protocoles de collecte et d'analyse de données de plus en plus efficaces, ainsi que de nouvelles recommandations sur les niveaux d'exposition sonore pour certaines espèces clés. Sont notamment disponibles :

- De nouveaux critères sur les limites d'exposition sonore pour les marsouins communs (Tougaard et al. 2015)
- De nouvelles connaissances sur les impacts du bruit sur les invertébrés (Nedelec et al. 2014)

- De nouveaux résultats sur les différentes techniques d'estimation d'abondance, dont acoustiques, de marsouin commun dans le cadre d'un suivi environnemental (Mikkelsen et al. 2016)
- Les résultats du suivi des travaux de construction de 8 parcs éoliens dans les eaux allemandes (Brandt et al. 2016)

Ce dernier travail scientifique décrit notamment la disposition des capteurs acoustiques sur le terrain, ainsi que de nouvelles méthodes statistiques d'analyse pour l'évaluation des impacts du bruit sur le comportement et la fréquentation des marsouins lors des opérations de battage de pieux.

1.1.4 CONTEXTE DE L'ÉTUDE

La présente étude regroupe les besoins de deux projets distincts et indépendants, conduits par la Région Bretagne et la ville de Saint-Malo. Des études préalables sont menées conjointement afin de mutualiser les moyens d'investigation et d'adapter la métrologie aux enjeux du site.

Néanmoins, ces deux opérations constituent bien deux projets distincts et indépendants au sens réglementaire et présentant des enjeux différents. Dans ce contexte, nous produirons des rapports distincts adaptés au contexte de chaque projet.

Le présent marché est décomposé en trois phases :

- **La phase 1** : elle a pour but de collecter les données complémentaires nécessaires à l'évaluation de l'état actuel des milieux et / ou de mettre en œuvre des outils de modélisation des milieux à partir de la connaissance disponible de l'état initial. Cette tranche sera donc commune aux deux opérations ;
- **La phase 2** : elle permet d'identifier les effets du projet du terminal du Naye de la Région Bretagne et de proposer des mesures pour réduire ces derniers sur l'environnement ;
- **La phase 3** : elle permet d'identifier les effets du projet du port des Sablons de la Ville de Saint-Malo et de proposer des mesures pour réduire ces derniers sur l'environnement.

Les deux dernières phases, permettent d'analyser les effets de chaque projet séparément en prenant en compte les éventuels effets cumulés. Ces missions se doivent donc d'être étudiées distinctement conformément au schéma présenté en **Figure 1**.

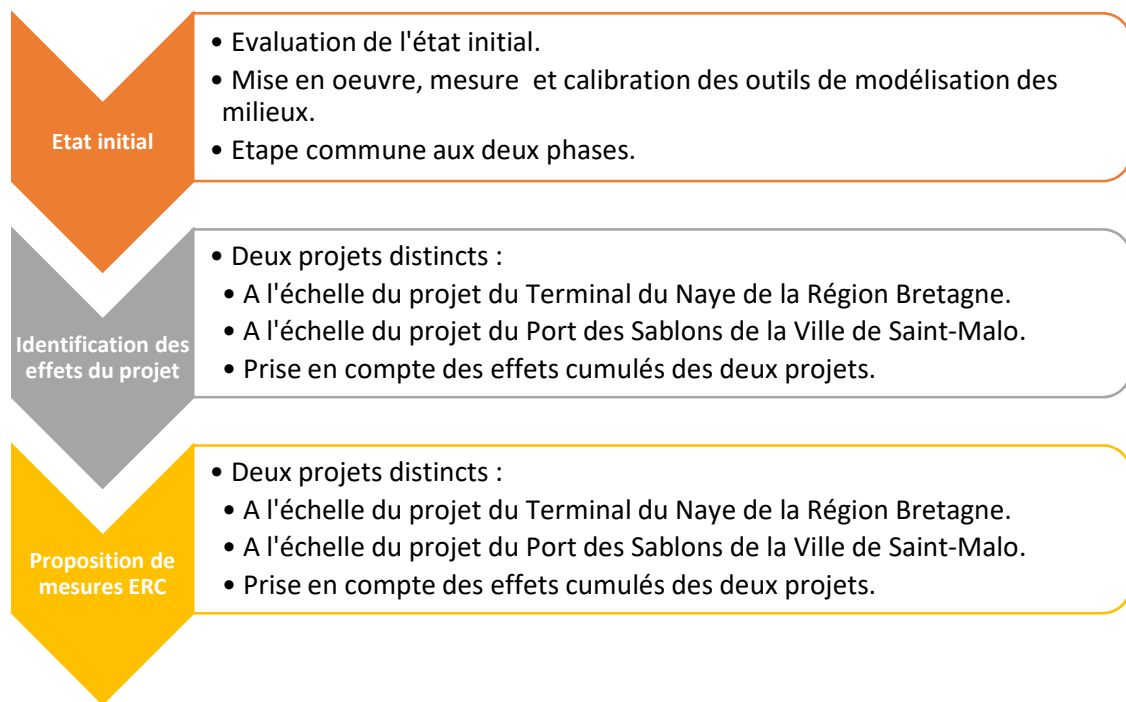


Figure 1: Démarche globale de la prestation

1.2 OBJECTIFS DE L'ETUDE

Afin de caractériser l'état initial à l'échelle de l'ensemble des secteurs impactés, la mise en place d'une campagne de mesure du bruit sous-marin a été nécessaire. Elle fut effectuée au moyen d'enregistreurs automatiques, C-POD, détecteur du clic et une cartographie du bruit ambiant a également été nécessaire. Les études sur le bruit sous-marins ont permis de réaliser un état des lieux des nuisances sonores, actuellement présentes dans l'enceinte du domaine portuaire de Saint-Malo et sur les zones de travaux maritimes.

Cette étude permet d'établir un état de référence, qui pourra être intégré dans un second temps à l'étude.

Les objectifs de cette étude acoustique sont :

- Mesurer le niveau du bruit ambiant dans les futures zones de travaux dans le port de Bas Sablons, dans l'avant-port de Saint Malo et à proximité des chenaux d'accès.
- Cartographie du bruit ambiant avec une campagne calibration actif et passif.
- Présenter une étude statistique du niveau de bruit ambiant durant un ans de trafic maritime.
- Déterminer le taux de présence des cétacés dans la zone d'étude.

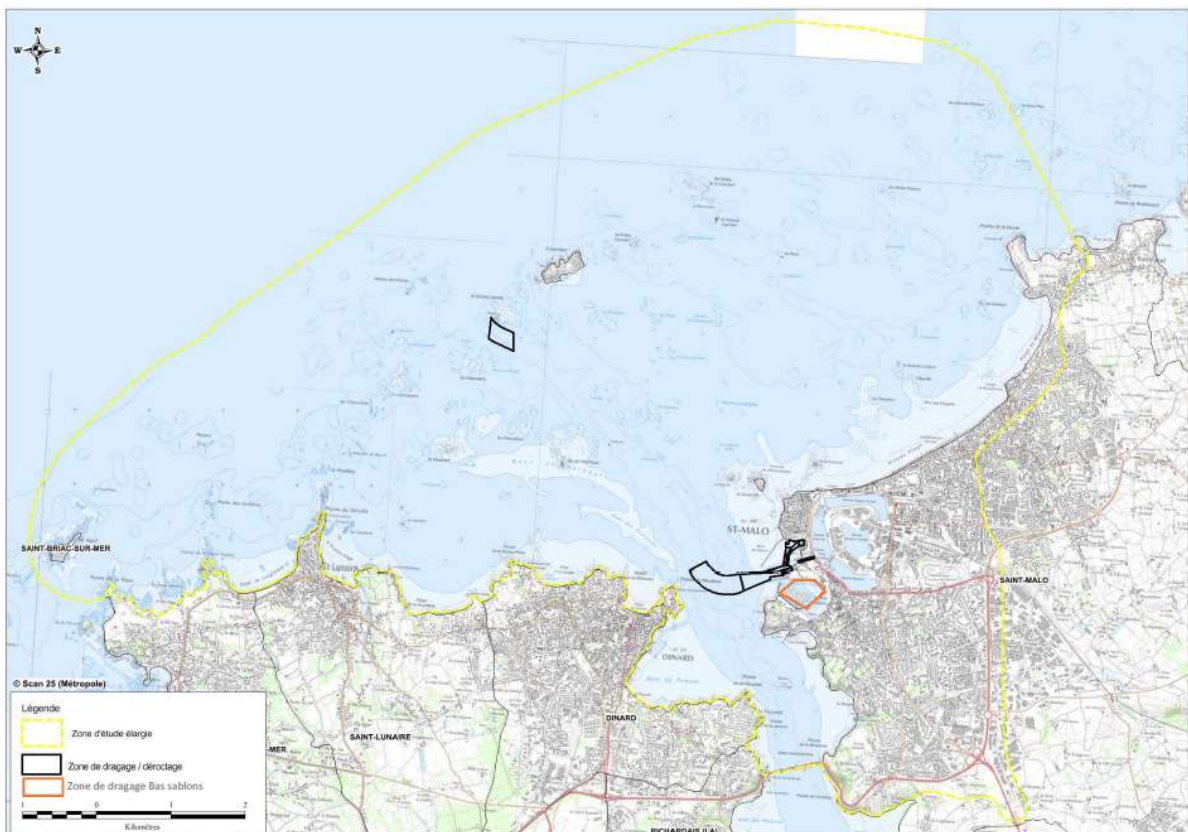


Figure 2: Zone d'étude

La **Figure 2** montre la zone d'étude située dans l'embouchure de la Rance, Les polygones noirs représentent les zones de travaux, dont déroctage et dragage, démolition et reconstruction d'ouvrage, du Terminal du Naye. Le polygone orange représente la zone de travaux des Bas Sablons.

1.3 MÉTHODOLOGIE

1.3.1 MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

Tout d'abord, les données disponibles pour la détermination des sources de bruits actuelles sont identifiées et exploitées. En particulier, des données récentes relatives à la bathymétrie de l'avant-port ainsi que des données sur les conditions de navigation mises à disposition de SINAY.

Notre méthodologie est constituée des 3 étapes présentées dans la figure suivante :

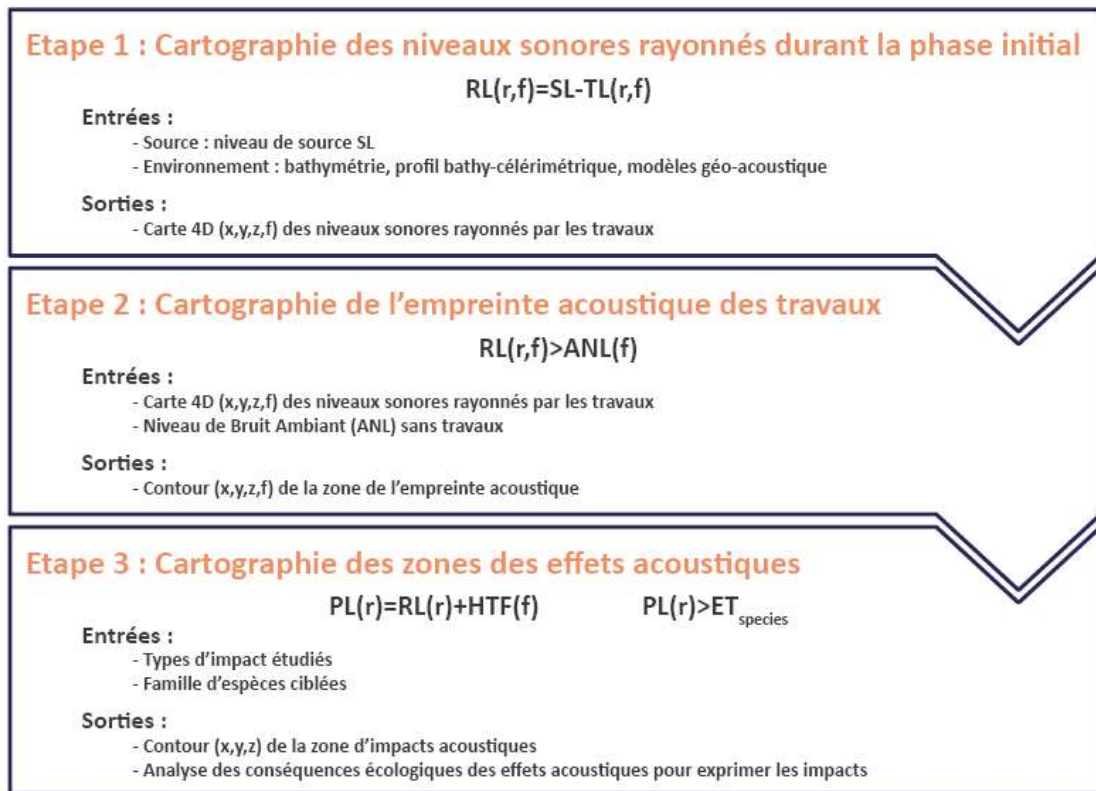


Figure 3: Méthodologie de SINAY

1.3.1.1 Etape 1

La première étape consiste à cartographier les niveaux sonores rayonnés autour de la zone de travaux pendant la phase initiale. Pour ce faire, nous utilisons un modèle de propagation acoustique ($RL(r,f)=SL - TL(r,f)$) qui permet de calculer les pertes de transmission (TL) et le niveau rayonné (RL) en tous points autour de la zone de travaux.

Les données d'entrée utilisées sont :

- La bathymétrie du site
- Les propriétés géo-acoustiques du fond
- Les profils célé-bathymétriques (acquisition *in situ*).
- La marée
- Les données AIS (automatique identification system)

Une analyse bibliographique permet de préciser les calculs des pertes de transmission (TL) en les adaptant aux petits fonds, aux basses-fréquences et fréquences les plus hautes. Cette démarche renforce l'adéquation entre le modèle et le site étudié. Son choix est particulièrement pertinent pour mettre en relation les données produites par SINAY, les données de la bibliographie et le modèle choisi.

1.3.1.2 Etape 2 :

La deuxième étape consiste à cartographier l'empreinte acoustique des travaux, c'est-à-dire la zone à l'intérieur de laquelle le niveau sonore rayonné par les travaux est supérieur au bruit ambiant naturel et susceptible de produire un effet acoustique impactant la faune marine.

1.3.1.3 Etape 3 :

Le travail s'achève avec cette troisième et dernière étape au cours de laquelle il s'agit de délimiter l'aire à l'intérieur de laquelle le niveau perçu par les individus est supérieur au seuil d'effet propre à chaque espèce ciblée. La précision de ces zones d'effets acoustiques sur la faune marine à l'intérieur de l'empreinte acoustique des travaux est produite par le biais de cartographies propres à chaque famille d'espèces ciblées.



Figure 4: Synthèse de la méthodologie mise en place par SINAY

1.3.2 MÉTHODOLOGIE PROPOSÉE POUR EFFECTUER LA PHASE 1

L'ambiance acoustique actuelle, c'est-à-dire l'état sonore initial, doit être caractérisée à partir

- Du recueil des données disponibles :
 - Biologiques ;
 - D'activités maritimes ;
 - Socio-économiques ;
 - ...
- Des résultats de mesures *in situ*, réalisées à l'aide d'enregistreurs d'acoustiques passifs et autonomes (hydrophones), immergés à des points fixes ;
- Des mesures acoustiques actives qui sont également nécessaires (émissions de signaux calibrés et contrôlés) afin de caractériser la transmission des ondes sonores dans la zone d'étude.

Cette démarche aboutit à une représentation spatiale et statistique du bruit actuel en présentant la proportion du temps et de l'espace pour laquelle le bruit dépasse un seuil donné en tenant compte des variations saisonnières.

Cartographie du bruit ambiant

L'étude de l'état acoustique initial se réalise en 5 étapes menant à une cartographie.

1- Production de données brutes

- Mesures de données *in situ*

- Exploitation de bases de données

Les paramètres influant sur la propagation acoustique sont pris en compte :

- La célérité ;
 - Température ;
 - Salinité ;
 - Profondeur ;
- La nature des fonds ;
- La bathymétrie ;
- Le marnage.

SINAY produit les données de mesure les plus précis possibles afin de permettre, d'une part une modélisation fine et, d'autre part, de rechercher la résolution la plus fine possible des bases de données exploitées.

2- Identification des sources de bruit

Les cartes sonores sont établies en prenant en compte les deux principaux contributeurs de bruit ambiant.

- Le trafic maritime
- Le vent (état de la mer)

Ces données sont acquises par SINAY au moyen de flux en temps réel produits par deux réseaux dont SINAY est déjà contributeur depuis l'installation d'une antenne AIS. Ces données sont structurées dans un second temps dans la plateforme SINAY pour être directement analysées par des algorithmes de calcul automatisés pour la modélisation du bruit sous-marin.

3- Calibration du modèle

Les données produites à partir des mesures *in situ* sont utilisées pour calibrer le modèle établi selon des méthodes acoustiques passives et actives.

- **Active** : Caractérisation des paramètres réels du milieu de propagation.
- **Passive** : Comparaison des résultats de simulation avec les valeurs réelles.

La précision du modèle est fournie notamment par le calcul de l'incertitude qui valide la qualité des calculs effectués.

4- Identification du niveau de bruit

A partir des résultats de mesures in-situ, l'état initial du bruit ambiant est décrit au moyen d'indicateurs :

- RMS ;
- SPL ;
- SEL ;
- DSP.

La moyenne et l'écart type est calculé pour chaque paramètre.

Les résultats de mesure sont comparés avec le modèle de Wenz pour produire le niveau de bruit ambiant pour chaque bande de fréquence en fonction :

- Indice du trafic ;
- Indice de la vitesse du vent.

5- Cartographie statistique du bruit ambiant

Pour plus de précision, trois paramètres statistiques indispensables pour chaque saison sont produits :

- Percentile 10%, 50% et 90%
- Moyen

Chacun de ces paramètres est calculé pour chaque

- Niveau de profondeur
- Bande de fréquence de tiers d'octave.

2. CHAPITRE 2 : NIVEAU DU BRUIT AMBIANT

2.1 INTRODUCTION

Le présent chapitre décrit l'étude réalisée par la société SINAY pour le compte de la région Bretagne et la ville de Saint-Malo afin d'établir un état acoustique de référence dans l'embouchure de la Rance. Celui-ci sert à caractériser et quantifier des différentes sources de bruit ainsi qu'à connaître le niveau du bruit moyen dans la zone.

2.2 CAMPAGNE DE MESURE ACOUSTIQUE DU BRUIT AMBIANT

La première phase de l'établissement d'un état acoustique de référence consiste à analyser l'ensemble des données à produire :

1. L'évolution du niveau du bruit dans la zone d'étude en fonction du temps ;
2. Le niveau du bruit moyen dans la zone d'étude durant période de déploiement ;
3. Le niveau des bruits de chaque type de source durant l'état initial : anthropique, bio-phonique et géo-phonique ;
4. L'étude de la fréquentation des mammifères marins dans la zone d'étude.

Les données enregistrées par les appareils sont stockées sous format « wav » contenant dans son entête la date d'enregistrement, le nom de la zone d'étude et les fichiers textes pour la configuration de l'appareil.

2.2.1 IDENTIFICATION DES SOURCES DE BRUIT

Comme tout environnement sous-marin, la zone de l'embouchure de la Rance est un environnement relativement bruyant. De plus, cette zone présente une activité humaine quotidienne bruyante en lien avec le trafic maritime, les travaux, la pêche, etc...

La **Figure 5** présente les différents sons qui contribuent au bruit sous-marin. Les bruits anthropiques sont représentés en jaune, les bruits d'origine naturelle en bleu et les bruits d'origine biologique en vert. Le niveau de bruit ambiant typique est également présenté sur cette figure. Nous pouvons voir, tout en bas de la figure, un spectre donnant le bruit ambiant en fonction des fréquences.

Les principales sources naturelles contribuant à l'ambiance sonore de la zone d'étude :

- L'agitation de la surface, liée à l'état de la mer et donc à la force du vent. Elle engendre un bruit ambiant doté d'une large gamme de fréquence allant de quelques centaines de Hertz à quelques dizaines de KiloHertz ;
- La pluie, est également une source de bruit importante. Ce dernier est généré par les impacts des gouttes d'eau sur la surface de la mer. Le niveau du bruit ainsi créé est relativement élevé ; il est situé dans la gamme de fréquence du bruit ambiant en mer ;
- L'agitation thermique des molécules d'eau crée également un bruit. Il intervient à des fréquences relativement élevées, au-delà de 100 kHz.

En plus de ces différents bruits d'origine naturelle, certaines espèces animales telles que les cétacés et les crustacés, constituent également une source de bruit que l'on appelle « bruits biologiques ».

Ces derniers peuvent être composés de signaux impulsifs ou modulés plus ou moins importants selon l'espèce émettrice (ex : sifflements et clics des dauphins, clics de crevettes calqueuses, etc.).

Quant aux bruits d'origine humaine, dits anthropiques, ils viennent principalement, dans cette phase d'étude, du trafic maritime et des travaux de pêche.

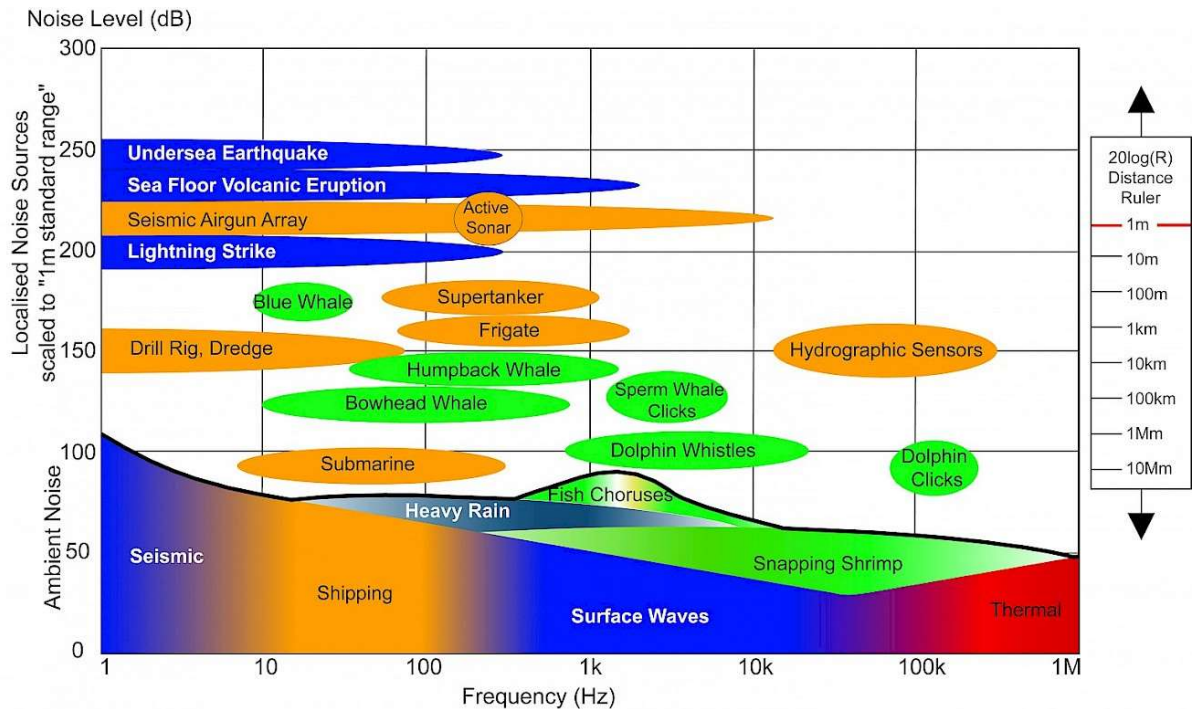


Figure 5: Distribution fréquentielle des sources de bruit ambiant sous-marin.

Trafic maritime

Le trafic maritime est l'une des sources de bruit les plus importantes. Les navires génèrent un bruit situé dans les basses fréquences. Le niveau de ce bruit dépend du type de navire, de sa taille et de sa vitesse.

La zone d'étude est un lieu de passage de tous types de navires, des voiliers des plaisanciers jusqu'aux grands bateaux de commerce et de transport en passant par les navires de pêches.

Fréquence de ces bruits anthropiques :

Les effets des bruits anthropiques sont souvent étudiés pour évaluer leurs impacts potentiels sur la faune sous-marin. Dans ce genre d'étude, trois critères sont considérés :

- L'intensité ou le niveau du bruit généré,
- Sa bande fréquentielle (bande des émissions sonores)
- Son étalement dans le temps

2.2.2 MATÉRIEL UTILISÉ POUR LA MESURE DE L'AMBIANCE SONORE

2.2.2.1 ENREGISTREURS ACOUSTIQUES

Afin de pouvoir évaluer les effets sonores des projets dans la zone d'étude, il est nécessaire d'établir un état acoustique de référence dans les zones des futurs travaux avant que ces derniers aient lieu. Cette démarche consiste à mesurer l'ambiance sonore habituellement présente à l'échelle des points de mesures. Pour ce faire, deux enregistreurs autonomes de type RTsys EA-SD14 (**Figure 6**) et de type Wildlife SM3M (**Figure 7**) ont été déployés durant le mois de novembre et jusqu'au 3 décembre.

Ces appareils, systèmes autonomes enregistrant numériquement les sons sous-marins, sont constitués d'une carte électronique et d'un compartiment pour les piles. Ils peuvent être déployés pendant de longues périodes en adaptant le nombre de piles utilisées et le mode d'enregistrement choisi (Tableau 1 et Tableau 2). Ils réalisent des enregistrements acoustiques au format 16, 24 ou 32 Bits en mode continu ou échelonné et les stockent dans leur disque dur ou sur des cartes SSD sous forme de fichiers audio numériques. Les signaux sont enregistrés dans la bande fréquentielle [8 Hz à 48 kHz] sur le Wildlife et [3 Hz à 125 kHz] sur le RTsys. L'amplificateur ajustable qui équipe la carte électronique permet de choisir le gain entre 0, 14,7 et 18 dB. Comme nos appareils sont mouillés dans une zone relativement bruitée et vu les capacités des hydrophones des appareils nous avons réglé les gains de nos appareils comme suit :

- 0 dB pour le Wildlife
- 14,7 dB pour le Rtsys.

Choix du gain :

Plus la valeur de Gain est élevée plus la sensibilité de l'hydrophone aux sons augmente. Ce qui nous permet d'augmenter la probabilité d'enregistrer les faibles sons émis par des espèces présentes sur la zone d'étude, en contrepartie, la valeur de la saturation de l'hydrophone diminue.

A titre d'exemple avec un Gain de 14,7 pour l'enregistreur Rtsys, le plus haut niveau qu'il est possible d'enregistrer est de 169 dB, ce qui couvre pratiquement l'ensemble du bruit ambiant sauf dans des cas particuliers (le passage d'un cargo juste au-dessus de l'enregistreur peut saturer l'enregistreur pour un petit moment, par exemple). Si nous choisissons le Gain de 0 dB nous pouvons enregistrer jusqu'à des niveaux très élevés (184 dB) mais en diminuant considérablement la sensibilité de l'hydrophone aux sons de niveau faible.



Figure 6: Enregistreur RTsys de type EA-SD14000

Tableau 1: Estimation de la durée d'enregistrement du RTsys en fonction du nombre de piles et de la fréquence d'échantillonnage

Table 1: Battery life in hybrid mode for 1.210 mm EA-SDA14

configuration		Duty cycles and configuration examples								
sampling rate	recording frequency	100 % continuous recording	75 % 45 min ON 15 min OFF	50 % 30 min ON 30 min OFF	40 % 24 min ON 36 min OFF	30 % 20 min ON 40 min OFF	25 % 15 min ON 45 min OFF	17 % 10 min ON 50 min OFF	10 % 1 hour ON 10 hours OFF	
		Total autonomy endurance								
54 Li SOCl2 batteries	39 kHz 3 Hz - 15 kHz	44	60	89	111	133	199	206	440	
	78 kHz 3 Hz - 20 kHz	43	57	86	107	128	160	256	430	
	312 kHz 3 Hz - 150 kHz	35	47	71	88	106	153	206	350	
54 Alkaline Battery*	39 kHz 3 Hz - 15 kHz	15	21	30	36	45	63	93	150	
	78 kHz 3 Hz - 20 kHz	15	18	27	36	42	60	90	150	
	312 kHz 3 Hz - 150 kHz	12	18	27	33	39	48	72	120	



Figure 7: Enregistreur Wildlife de type SM3M

Tableau 2: Estimation de la durée d'enregistrement du RTsys en fonction du nombre de piles et de la fréquence d'échantillonnage

Estimated Maximum Battery Life in Days

Number of Batteries	4kHz - 96kHz Sample Rate				192kHz - 384kHz Sample Rate			
	Alkaline		NiMH		Alkaline		NiMH	
	100%	50%	100%	50%	100%	50%	100%	50%
4	11	23	6.8	14	4	8	2.3	5
16	46	92	27	54	15	31	9	18
32	92	184	54	108	31	61	18	36
64	184	367	108	216	61	122	36	72

2.2.2.2 C-POD

Le C-POD fait partie des instruments de mesure acoustique sous-marine spécialisés dans la détection de cétacés (**Figure 8**). L'enregistrement en continu de l'environnement sonore permet de repérer la présence de mammifères marins à l'intérieur du périmètre de détection de l'appareil (rayon de 300 mètres), ce rayon varie selon la profondeur de l'eau et la nature du fond. Le but est de déterminer la présence et la fréquentation des mammifères marins sur une zone. Ces résultats peuvent être utilisés ensuite pour évaluer l'impact de la pollution sonore sur ces espèces.



Figure 8: C-POD-Dispositif pour enregistrer les clicks des mammifères marins

L'enregistrement des C-POD est omnidirectionnel et repose sur l'enregistrement de clics ou trains d'écholocation émis par de nombreuses espèces de mammifères marins tels que les marsouins et les différentes espèces de dauphins. Le C-POD fournit des données temporelles sur l'activité de l'animal, indicateur de la présence et de l'usage de l'habitat. Le C-POD est un outil autonome, statique, et à faible coût, comparé aux autres instruments. Il permet d'optimiser les coûts du suivi et de constituer d'importantes bases de données pendant de longues périodes avec un effort d'échantillonnage optimisé.

2.2.2.3 Les cages pyramidales

Nous avons utilisé un mouillage pesant posé sur le fond (**Figure 9** et **Figure 10**). Le mouillage pesant de forme pyramidale (cage anti-chalutage) protège l'instrumentation qui se trouve à l'intérieure.

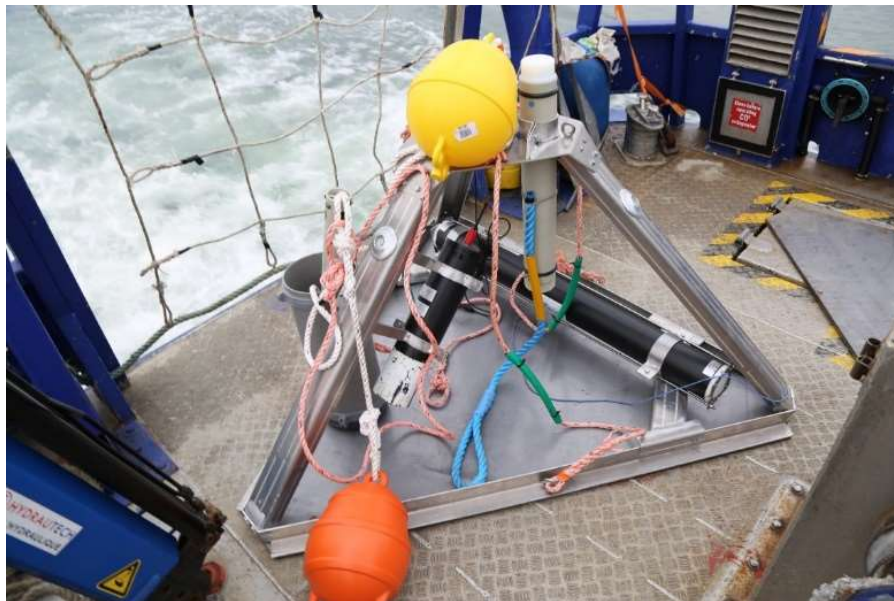


Figure 9: Cage n°1 anti-chalutage avec l'enregistreur RTsys fixé au fond du support, C-POD-945, Largeur acoustique



Figure 10: Cage n°2 anti-chalutage avec l'enregistreur « Wildlife SM3M » fixé au milieu du support, CPOD-944, Largeur acoustique

2.2.3 CHOIX DE LA ZONE DE MOUILLAGE

Dans un premier temps, le positionnement des structures est effectué en fonction des contraintes de l'environnement et des activités humaines afin que la pose, le suivi et la récupération soient facilités et se déroulent en sécurité. Ensuite, la position précise est déterminée pour convenir au mieux aux mesures de données scientifiques.

Les activités humaines et les composantes environnementales prises en compte pour déterminer les points de dépôt des structures sont présentées ci-dessous. Les zones de mouillage ont été choisies en prenant en compte tous les paramètres suivants.

1. Contrainte environnementale : Bathymétrie :

Pour des raisons logistiques, scientifiques et de sécurité (contraintes de plongée, armement navire, ...) il est décidé de ne pas placer les structures à moins de 7 m de profondeur et également sur une surface à bathymétrie stable pour éviter les déplacements au fond des structures.

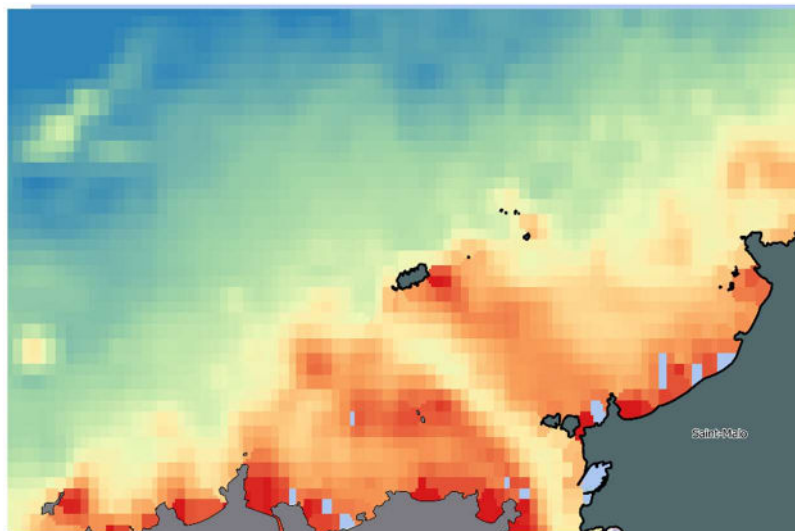


Figure 11: bathymétrie de la zone d'étude

2. Contrainte environnementale : Les courants d'eaux

Les courants maximaux au fond sur la zone sont inférieurs à 1 nd. Plus cette valeur est faible, plus le risque de mouvement des sédiments est faible. En conséquence, il faut retenir les zones à faible courant pour éviter le recouvrement des structures et leur déplacement.

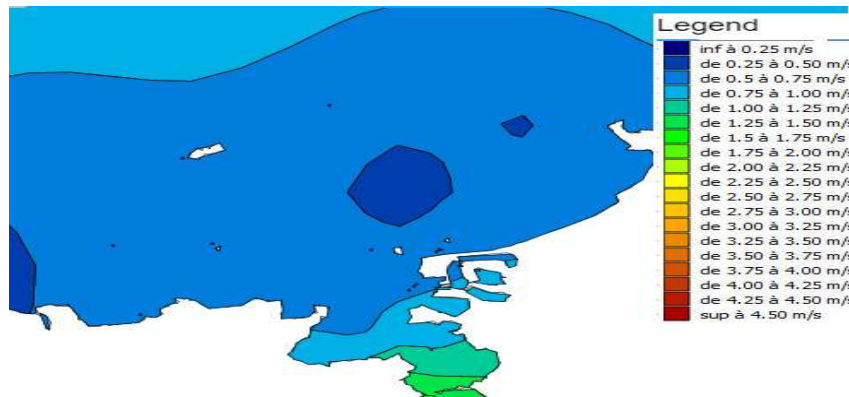


Figure 12: les courants d'eau de la zone d'étude

3. Contrainte scientifique : zone de mesure acoustique

Les points bleus dans la **Figure 13** présentent les zones des travaux. Ces points sont entourés par des cercles de 750 m de rayon. Cette distance est reconnue comme la distance de mesure acoustique des sources afin de retrouver le niveau d'émission réel (SL) sans saturer la sensibilité des enregistreurs.

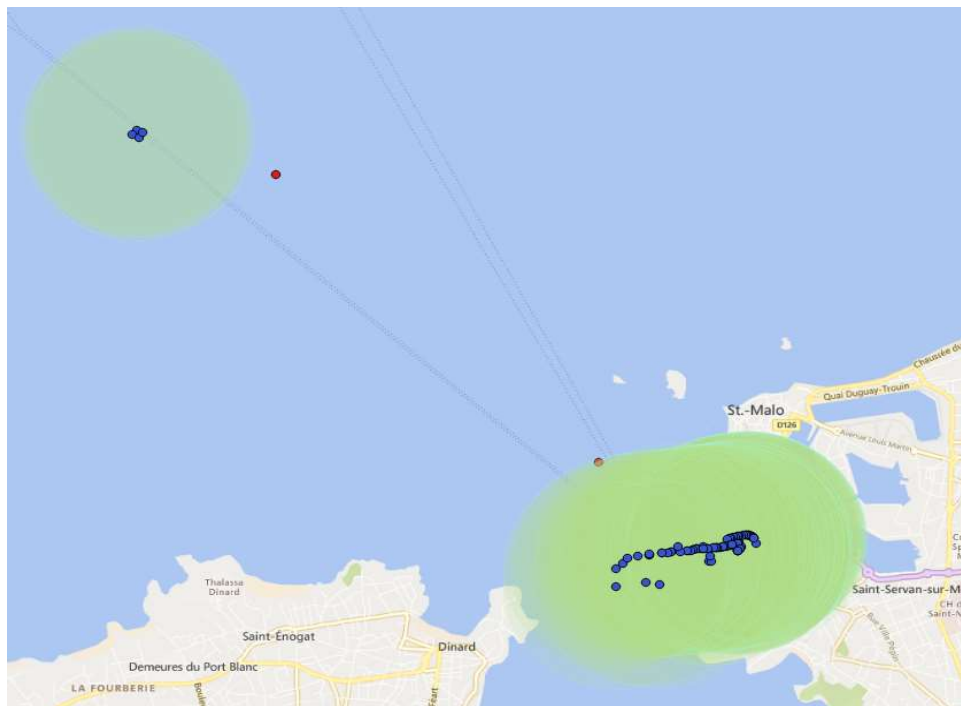


Figure 13: l'emplacement des cages par rapport à la zone des travaux. Les points en bleu présentent les futurs points de travaux et les cercles en vert présentent les limites de 750 m autour des sources.

4. Contrainte de sécurité : Densité du trafic maritime

Les risques potentiels sont liés à l'activité humaine sur la zone. Afin de déterminer ce risque, un diagnostic de l'activité de pêche et du trafic maritime a été réalisé à l'échelle de la zone. La **Figure 14** illustre les résultats obtenus pour le trafic maritime. Elle représente l'ensemble des trajectoires de tous les navires équipés d'AIS en 2017.

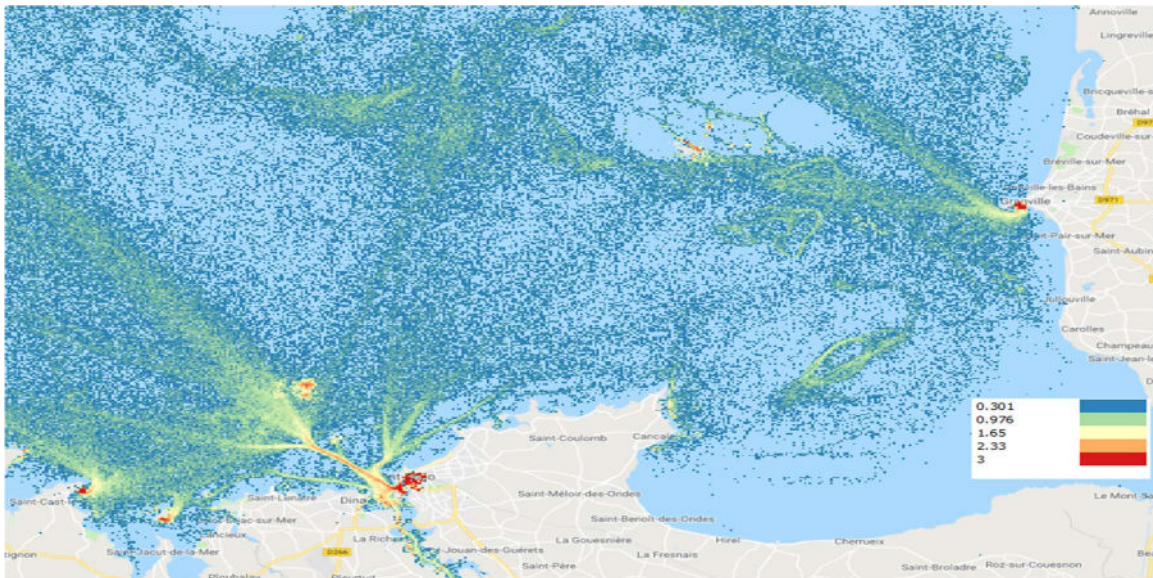


Figure 14: Carte de la densité du trafic de la zone d'étude pour l'année 2017 calculé à partir des données AIS. La légende présente une échelle logarithmique de la présence des bateaux dans chaque maille

A partir de l'étude des contraintes environnementales et humaines, il est possible de placer les points d'immersion de façon à enregistrer correctement les niveaux de bruit dans la zone tout en limitant au maximum les impacts et en facilitant les opérations de mise à l'eau et de récupération. Pour choisir les emplacements des cages nous avons choisi l'ordre de priorité suivant :

1. D'abord la profondeur de l'eau : en raison des faibles profondeurs de la zone d'étude, nous avons fixé la barre à 7 mètres (au niveau de marée le plus bas). Ceci permet de mesurer correctement le bruit ambiant et d'éviter les pertes de données car les petits fonds ont une absorption beaucoup plus importante des ondes acoustiques, en particulier des basses fréquences.
2. Les emplacements des cages sont localisés sur un fond stable afin d'éviter le déplacement des cages.
3. Les cages doivent se situer à environ 750 m des zones envisagées de travaux : ceci permet dans la phase de travaux de faire des comparaisons fiables par rapport à la phase initiale. Si nous plaçons les enregistreurs plus près, des saturations lors des enregistrements pollueront les mesures. De plus, s'ils sont trop éloignés de la zone souhaitée, les mesures ne rendront pas compte des niveaux d'émission réels des sources de bruit.
4. Les zones de forte densité de trafic maritime sont évitées. Ceci permet d'éviter les problèmes de collision ou de chalutage des structures. Malheureusement ceci n'a été possible que pour la cage 2 (voir **Figure 17**). En effet, la première cage est située dans une zone de fort trafic maritime mais afin d'éviter toute gêne de passage dans la zone d'étude, nous l'avons placée à la bordure de ce secteur.

2.2.4 MOUILLAGE DES APPAREILS

Avant de mouiller les enregistreurs sur zone, des piles neuves sont installées dans les appareils. Un test de fonctionnement et un formatage des disques durs sont réalisés. Les appareils sont configurés, au moyen de logiciels spécifiques codés par les constructeurs de ces dispositifs. Ils permettent d'enregistrer sur des bandes fréquentielles de 8 Hz à 48 kHz sur le Wildlife et 3 Hz à 125 kHz sur le RTsys, et pendant 88 % du temps du déploiement (15 / 17 min) sur Wildlife et 80 % du temps sur le RTsys (24 / 30 min).

Deux types de mouillage différents sont déployés pour respecter les normes imposées par les autorités maritime :

La cage n°1 (voir la **Figure 15** avec un enregistreur acoustique de type RTsys) est équipée d'un largueur acoustique permettant la récupération du matériel à partir de la surface. Ce type de mouillage est compact, il ne présente pas de ligne de flottaison de surface.

La cage n°2 équipé avec un enregistreur acoustique de type Wildlife est mouillé avec une bouée de surface. Le schéma de la **Figure 16** montre la méthode de déploiement. La cage est attachée à un corps mort au fond et fixé à la structure par deux câbles.

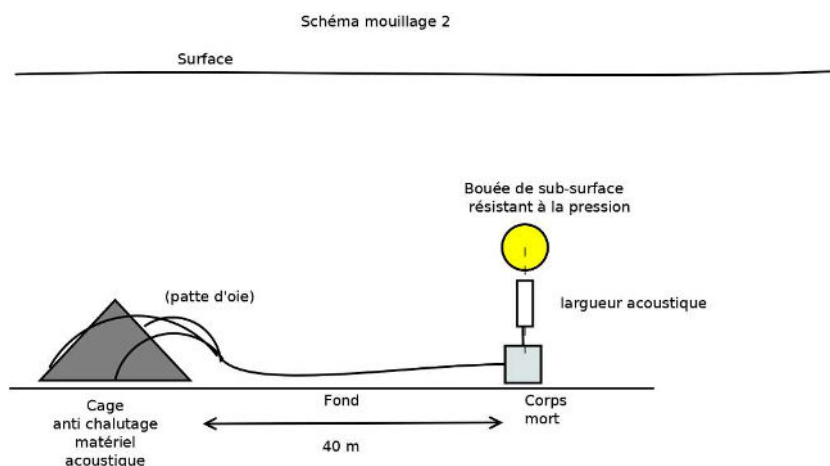


Figure 15: Mouillage cage 1 avec un enregistreur de type RTsys

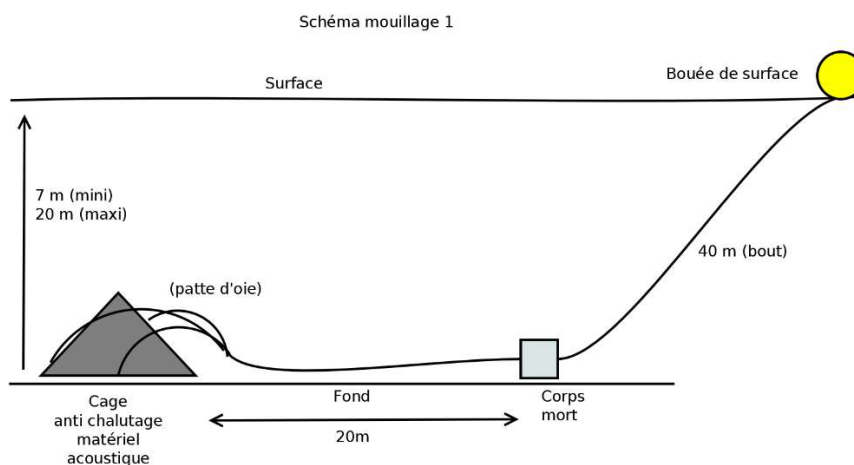


Figure 16: Mouillage cage 2 avec un enregistreur de type Wildlife

Coordonnées GPS de la première cage n°1 (projection des cartes WGS 84)

Coordonnées Sexagésimales	Coordonnées degrés minutes décimales	Coordonnées décimales
48°38'51.480" N	48°38.858' N	48.647333
2°2'25.320" E	2° 2.422' E	02.0403667

Coordonnées GPS de la deuxième cage n°2 (projection des cartes WGS 84)

Coordonnées Sexagésimales	Coordonnées degrés minutes décimales	Coordonnées décimales
48°39'57.3120" N	48°39.9552' N	48.665920
2°4'9.9600" E	2° 4.166' E	2.069433

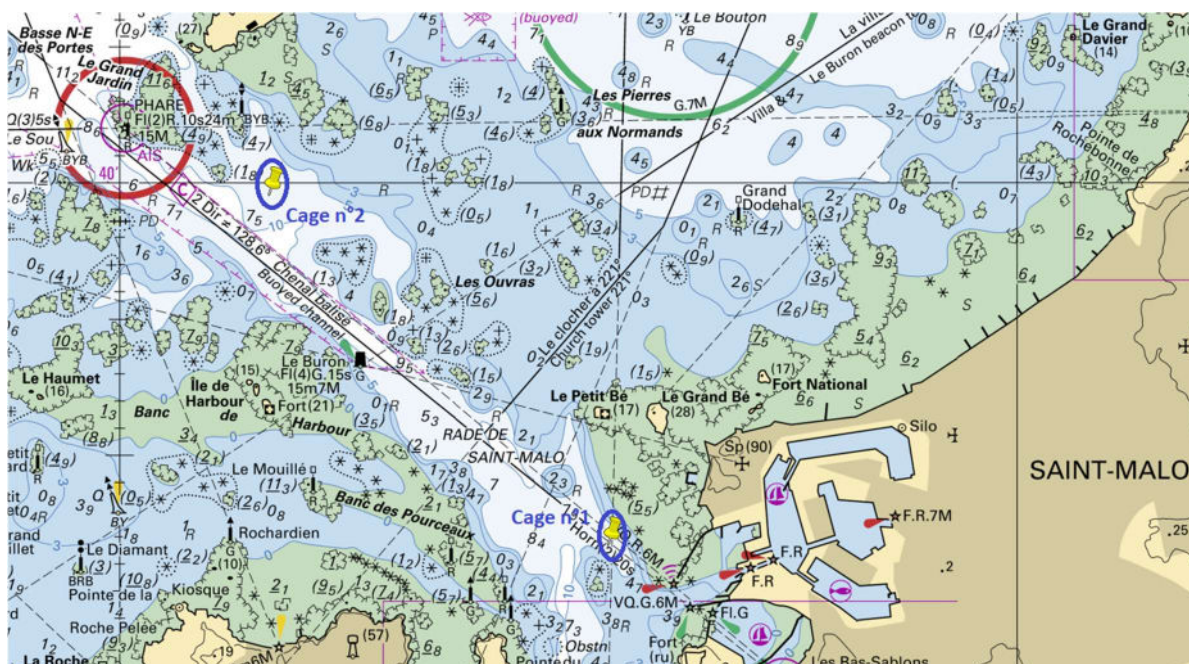


Figure 17: Les cercles bleus présentent les points de mouillage des cages déposé pour mesurer le bruit ambiant des deux projets

2.2.5 CAMPAGNE DE RÉCUPÉRATION DU MATÉRIELS

La cage n°2 avec l'enregistreur acoustique de type Wildlife a été retrouvée sur la zone sans aucun incident le 04/12/2018, car la bouée de surface est restée exactement à la position de mise à l'eau.

La Cage n°1 non récupérée, causes possibles :

- Défaut de fonctionnement / panne du largueur acoustique, qui n'a pas été repéré à l'aide de la sonde.
- Déplacement de la cage par le courant.
- Déplacement de la cage par un navire de pêche (peu probable selon capitainerie St Malo).

Perte du matériel :

La deuxième mission de récupération s'est déroulée le 13/12/2018 de 9h à 12h30. L'objectif a été la récupération de la cage n°1 mise à l'eau le 13/11/2018. Le matériel est composé d'une structure métallique anti-chalutage pyramidale d'1,20 m de côté et de hauteur, porteuse d'un enregistreur acoustique RTsys, un largueur acoustique de type Sonardyne et d'un C-POD. La structure est lestée par des plaques en acier d'un total de 120 kg. L'ensemble est lié à un corps mort de 50 kg par un bout de 40 mètres et de diamètre 16 mm. Un largueur acoustique a été placé sur ce corps mort afin de permettre la récupération.

Pour récupérer le matériel, un signal sonore est envoyé dans l'eau à l'aide d'un émetteur immergé et relié à bord du navire sur une valise acoustique. L'émetteur dispose d'une portée de 500 m. Une surface de presque 2 km² a été ainsi prospectée.

Résultats :

Aucune réponse du largueur acoustique n'a été reçue près du point de la structure. La figure ci-dessous représente la position de la structure (RTsys) et de son corps mort où est fixé le largueur acoustique. Les cercles rouges représentent la surface d'émission de la valise acoustique utilisée sur le navire.

Comme le montre la figure ci-dessous d'autres points ont été prospectés à l'aide de la valise acoustique dans l'hypothèse d'un déplacement du matériel (courant, navire de pêche, ...), mais aucune détection n'a été enregistrée.



Figure 18: Positionnement du matériel immergé (triangles noirs) et de la surface de la prospection réalisée avec la valise acoustique (cercles rouges).

Dans l'hypothèse d'un non-fonctionnement du largueur acoustique, l'équipe de plongeur est intervenue. Deux plongeurs espacés de 1,5 m ont réalisé des cercles concentriques jusqu'à 25 m autour du point théorique mais n'ont pas repéré le matériel.

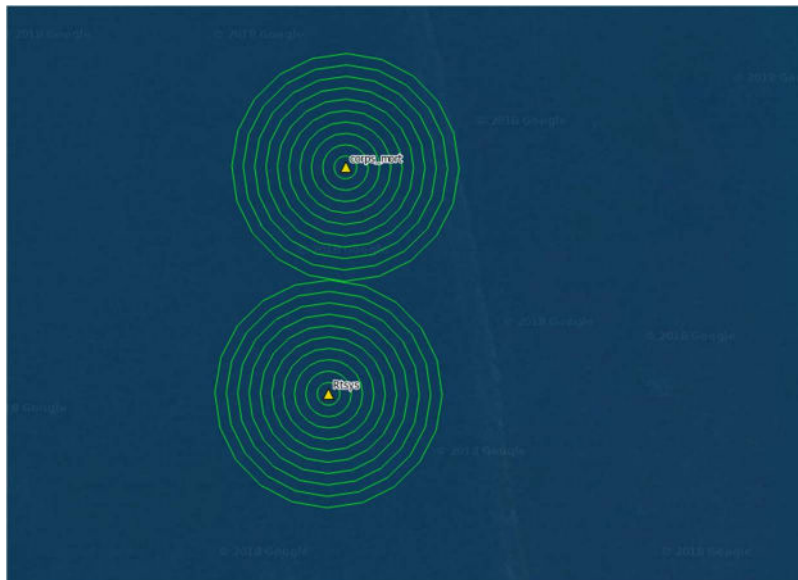


Figure 19: Circulaires réalisés en plongées autour du point de la structure et du point du corps mort.

Conclusion :

Il peut être envisagé l'hypothèse de vandalisme sur le matériel par des usagers de la mer dans cette zone. Vandalisme déjà vu sur de précédents projets.

Remarque :

Le traitement du niveau de bruit ambiant de la zone a été effectué à partir des résultats des analyses des mesures effectuées sur le point 2 récupéré sur l'enregistreur Wildlife. Ainsi une deuxième campagne de mesures pendant une demi-journée a été effectuée pour déterminer l'état de référence de la deuxième zone d'étude.

2.3 ÉVOLUTION DU NIVEAU DU BRUIT DANS LA ZONE D'ÉTUDE DURANT LA PÉRIODE DES ENREGISTREMENTS

Pour mettre en évidence l'impact acoustique des activités humaines dans la zone d'étude, nous avons mesuré, avec l'enregistreur acoustique de type Wildlife, le niveau du bruit ambiant en continu avec un échantillonnage de 15 minutes / 17 minutes. Cet enregistrement présente environ 88 % de la période d'enregistrement du 14 novembre à 9h40 jusqu'au 30 novembre à 6h00 au moment de la saturation des cartes SSD dotée d'une capacité de 1 To de données.

En raison de la perte des données de l'enregistreur RTsys au point 1. Nous avons effectué une deuxième campagne de mesures pour évaluer l'état de référence à l'échelle de cette zone d'étude. Nous avons pu réaliser une autre campagne de mesures pendant 4 heures en continu de 9h00 jusqu'à 13h00 le 09/04/2019. Cet échantillon correspond au niveau du bruit de référence de la densité du trafic du port de Saint Malo.

Pour chaque période de mesures nous évaluons les séries temporelles et les distributions statistiques (moyenne, écart-type et percentiles) des descripteurs des niveaux sonores reçus (RL : Received Level) et du bruit de fond (ANL : Ambient Noise Level, niveau sonore reçu minoré des sources sonores individualisables).

Les sons mesurés et le bruit de fond sont chiffrés par plusieurs descripteurs :

- SPL large bande [5 Hz 18 kHz] dB re. 1 μ Pa,
- SEL large bande [5 Hz 18 kHz] dB re. 1 μ Pa²s,
- DSP (dB re. 1 μ Pa²/Hz) dans les tiers d'octave compris entre 5 Hz et 18 kHz.

2.3.1 QUANTIFICATION DES NIVEAUX DE BRUIT :

L'intérêt de chaque indicateur pour les mesures de l'état initial :

La quantification du bruit ambiant en termes de niveaux SPL-crête, SEL et RMS est importante pour caractériser ce paramètre à l'échelle de la zone concernée.

Comme indiqué dans le glossaire, le niveau RMS renseigne sur le niveau d'énergie acoustique moyen contenu dans un signal. Cet indicateur est utile pour calculer la moyenne des valeurs de la pression acoustique sur une période donnée pour déterminer le niveau sonore dans cet intervalle du temps. Le RMS est très utile pour pouvoir comparer les niveaux de bruit moyen produites pendant la phase des travaux et durant la phase initiale.

Le niveau SPL-crête renseigne sur les niveaux de pression sonore maximale. A l'inverse du RMS qui lisse les valeurs sur un intervalle du temps, cet indicateur nous permet de détecter le vrai niveau de bruit générer par un événement sonore qui ne dure qu'un court instant. Le SPL est utile en tant que

métrique pour une forme d'onde pulsée, pour les mesures de bruit impulsif (explosion, battage de pieux, déroctage, etc..).

Le niveau SEL renseigne sur le niveau d'exposition sonore durant un intervalle de temps. Elle correspond à l'énergie totale du bruit, produite à partir d'un seul événement de bruit. Cet indicateur est utile pour estimer l'impact de bruit de chaque événement sonore sur les espèces présentes sur la zone d'étude (mammifères marins, les poissons, les invertébrés, etc..). Les audiogrammes et les seuils d'impact des espèces marines sont présentés dans le **Tableau 3** et **Tableau 4**.

Nous avons choisi un intervalle très fin, de dix secondes, afin de voir avec précision l'effet des événements de courte durée. Chaque point sur les courbes présentées ici est calculé à partir de dix secondes d'enregistrement.

Il faut d'abord souligner la limite d'enregistrement de notre hydrophone qui est de 165,0 dB crête et 169,3 dB crête-à-crête. En effet, notre appareil est équipé d'un hydrophone d'une sensibilité de -165 dBV / μ Pa et mesure sur une plage d'amplitude de 1 V. Comme le gain de notre appareil est réglé à 0 dB (gain adéquat pour notre étude), le niveau crête de saturation est donné par l'équation du SONAR suivante :

$$20\text{Log}_{10} \left[1\text{v} \cdot 10^{\frac{165}{20}} \cdot 10^{\frac{0}{20}} \right] = 165 \text{ dB } \mu\text{Pa}$$

Les **Figure 20** jusqu'à **Figure 33** présentent l'évolution du niveau RMS, SEL et SPL du signal enregistré par l'appareil Wildlife pour les périodes d'enregistrement allant respectivement du 15/11 au 30/11/2018 pour le point 2 et un échantillon du bruit ambiant du 09/04/2019 pour le point 1. Sur chaque figure, la période couverte est mentionnée, la valeur moyenne et l'écart-type sont également donnés.

Tableau 3: Dans le tableau ci-dessous nous présentons les audiogrammes des espèces marines

NOM VERNACULAIRE (français)	NOM VERNACULAIRE (anglais)	(SOUS)ESPECE	BANDE FREQUENTIELLE	Type de sons	Références
Baleine/ rorqual bleu	Blue whale	<i>Balaenoptera musculus musculus</i>	[7 Hz ; 18 Hz]	chant Atlantique Nord	McDonald et al, 2006; Di iorio, 2009; etc
		<i>Balaenoptera musculus musculus</i>	[15 Hz ; 90 Hz]	chant Pacifique Nord	
		<i>Balaenoptera musculus intermedia</i>	[10 Hz ; 30 Hz]	chant Antarctique	
		<i>Balaenoptera musculus (indica)</i>	[10 Hz ; 110 Hz]	chants Océan Indien	
		<i>Balaenoptera musculus brevicauda</i>	[15 Hz ; 100 Hz]	chant	
		<i>Balaenoptera musculus</i>	[20 Hz ; 420 Hz]	chant Chilie	
Rorqual d'Omura	Pygmy Bride Whale	<i>Balaenoptera omurai</i>	[14 Hz ; 60 Hz]	vocalises	Cerchio et al, 2015; etc
Rorqual commun	Fin Whale	<i>Balaenoptera physalus</i>	[16 Hz ; 25 Hz]	chant Méditerranée, Atlantique Nord	Delarue et al, 2009; etc
Rorqual de Bryde	Bryde Whale	<i>Balaenoptera edeni</i>	[18 Hz ; 80 Hz]	vocalises	Rankin et Barlow, 2007; etc
Baleine boréale	Bowhead whale	<i>Balaenoptera borealis</i>	[44 Hz, 100 Hz]	vocalises	Rankin et Barlow, 2007; etc
Petit rorqual	Minky whale	<i>Balaenoptera bonaerensis</i>	[50 Hz ; 200 Hz]	vocalises	Risch et al, 2014 ; Eddswalton, 2000; ; etc
		<i>Balaenoptera acutorostrata(dwarf)</i>	[80 Hz ; 1 800 Hz]	vocalises	
		<i>Balaenoptera acutorostrata scammoni</i>	[1000 Hz ; 5000 Hz]	vocalises	
		<i>Balaenoptera acutorostrata acutorostrata</i>	[10 Hz ; 1000 Hz]	vocalises	
Baleine à bosse	Humpback whale	<i>Megaptera novaeangliae</i>	[100 Hz ; 5 000 Hz]	chant	Winn et al, 1981, Au et al, 2006; etc
Baleine franche, Baleine noire	Right whale	<i>Eubalaena glacialis & australis</i>	[60 Hz ; 150 Hz]	contact call	Parks et al, 2011; Clark, 1982; etc
Baleine grise	Gray whale	<i>Eschrichtius robustus</i>	[100 Hz ; 1 500 Hz]	vocalises	Crane et Lashkari, 1996; etc
Béluga, baleine blanche	Beluga whale	<i>Delphinapterus leucas</i>	[100 Hz ; 10 000 Hz]	sifflements	Chmelnitsky, E. G., & Ferguson, S. H. (2012).
Morse	Walrus	<i>Odobenus rosmarus</i>	[100 Hz ; 10 000 Hz]	cris	Mouy et al, 2012; etc
		<i>Odobenus rosmarus</i>	[100 Hz ; 24 000 Hz]	chocs impulsifs	
Phoque de Weddell	Weddell seal	<i>Leptonychotes weddellii</i>	[100 Hz ; 5 000 Hz]	vocalises	Van Opzeeland et Miksisold, 2011
Cachalot	Sperm whale	<i>Physeter macrocephalus</i>	[200 Hz ; 25 000 Hz]	clics	Madsen et al, 2002; etc
Phoque barbu	Bearded seal	<i>Erignathus barbatus</i>	[300 Hz ; 5000 Hz]	vocalises	Hugues et al, 2011; etc
Phoque du Groenland	Harp seal	<i>Pagophilus groenlandicus</i>	[1 000 Hz, 2 000 Hz]	vocalises	Rosson et Terhune, 2009; etc
Lamentin	Manatee	<i>Trichechus manatus</i>	[2 000 Hz - 20 000 Hz]	vocalises	O'shea et Poché, 2009; etc
Globicéphale	Pilot whale	<i>Globicephala melas & macrorhynchus</i>	[1 000 Hz ; 18 000 Hz]	sifflements	Weilgart et Whitehead, 1990; etc
Dauphin de Risso	Risso dolphin	<i>Grampus griseus</i>	[2 000 Hz ; 20 000 Hz]	sifflements	Corkeron et Van Parijs, ; etc
Orque	Killer whale	<i>Orcinus orca</i>	[2 000 Hz; 20 000 Hz]	sifflements	Ford, 1989; etc
Dauphin à nez blanc	white beaked dolphin	<i>Lagenorhynchus albirostris</i>	[2 000 Hz ; 20 000 Hz]	sifflements	Rasmussen et Muller, 2002; etc
Dauphin bleu et blanc	Spinner dolphin	<i>Stenella coeruleoalba</i>	[2 000 Hz ; 20 000 Hz]	sifflements	Azzolin et al, 2013; etc
Grand dauphin	bottlenose dolphin	<i>Tursiops truncatus</i>	[4 000 Hz ; 20 000 Hz]	sifflements	Cadwell et Cadwell, 1979; etc
Baleine à bec	Beaked whale	<i>Hyperoodon & Mesoplodon spp.</i>	[10 000 Hz ; 100 000 Hz]	clics	Baumman-Pickering et al, 2013
Marsouin	harbor porpoise	<i>Phocoena phocoena</i>	[100 000 Hz, 200 000]	clics	Clausen et al, 2011

Groupes d'audition de mammifères marins.	Portée d'audience généralisée
Cétacés de basse fréquence (FL) (Exemple : Baleines)	7 Hz to 35 kHz
Cétacés de moyenne fréquence (MF) (Exemple : Dauphins, baleines à dents, baleines à bec, baleines à bec)	150 Hz to 160 kHz
Cétacés à haute fréquence (HF) (Exemple : Marsouins, Kogia, dauphins)	275 Hz to 160 kHz
Pinnipèdes phocidés (sous l'eau) (Exemple: Phoques)	50 Hz to 86 kHz

Tableau 4: Les seuils des impacts temporaires et permanentes des mammifères marins selon la référence NOAA 2016

	Type d'impact acoustique	Type de son	Cétacés basse fréquence	Cétacés moyenne fréquence	Cétacés haute fréquence	Pinnipède Phocidés
NOAA 2016	PTS	Impulsif	219 dB re.1µpa 183 dB re.1µpa ² s	230 dB re.1µpa 185 dB re.1µpa ² s	202 dB re.1µpa 155dB re.1µpa ² s	218 dB re.1µpa 185 dB re.1µpa ² s
		Non Impulsif	199 dB re.1µpa ² s	198 dB re.1µpa ² s	173 dB re.1µpa ² s	201 dB re.1µpa ² s
	TTS	Impulsif	204 dB re.1µpa 168 dB re.1µpa ² s	215 dB re.1µpa 170 dB re.1µpa ² s	187 dB re.1µpa 140 dB re.1µpa ² s	203 dB re.1µpa 170 dB re.1µpa ² s
		Non Impulsif	179 dB re.1µpa ² s	178 dB re.1µpa ² s	153 dB re.1µpa ² s	181 dB re.1µpa ² s

- **Pour l'indicateur SPL : dB re.1µpa**
- **Pour l'indicateur SEL : dB re.1µpa²s (24 h)**

Dans les deux enregistrements effectués, durant le mois de novembre sur le point 2 et un échantillon de la journée en avril pour le point 1, aucun de ces seuils présentés dans le Tableau 4 n'a été atteint.

Remarque :

Nous avons enregistré des niveaux SEL qui dépasse les 153 dB pendant quelques instants. Ce niveau présente le seuil des impacts temporaires (TTS) sur les cétacés de haute fréquence (comme le marsouin). Pour que l'impact du TTS soit significatif sur les mammifères marins, il faut que ces derniers soient exposés à ce niveau pendant plus que 24 h ce qui n'est pas le cas.

RMS point 2 :

Comme indiqué dans le glossaire, le niveau RMS renseigne sur le niveau d'énergie acoustique moyen contenu dans un signal. Cet indicateur est utile pour calculer la moyenne des valeurs de la pression acoustique sur une période donnée pour déterminer le niveau sonore dans cet intervalle du temps. Le RMS est très utile pour pouvoir comparer les niveaux de bruit moyen produites pendant la phase des travaux et durant la phase initiale.

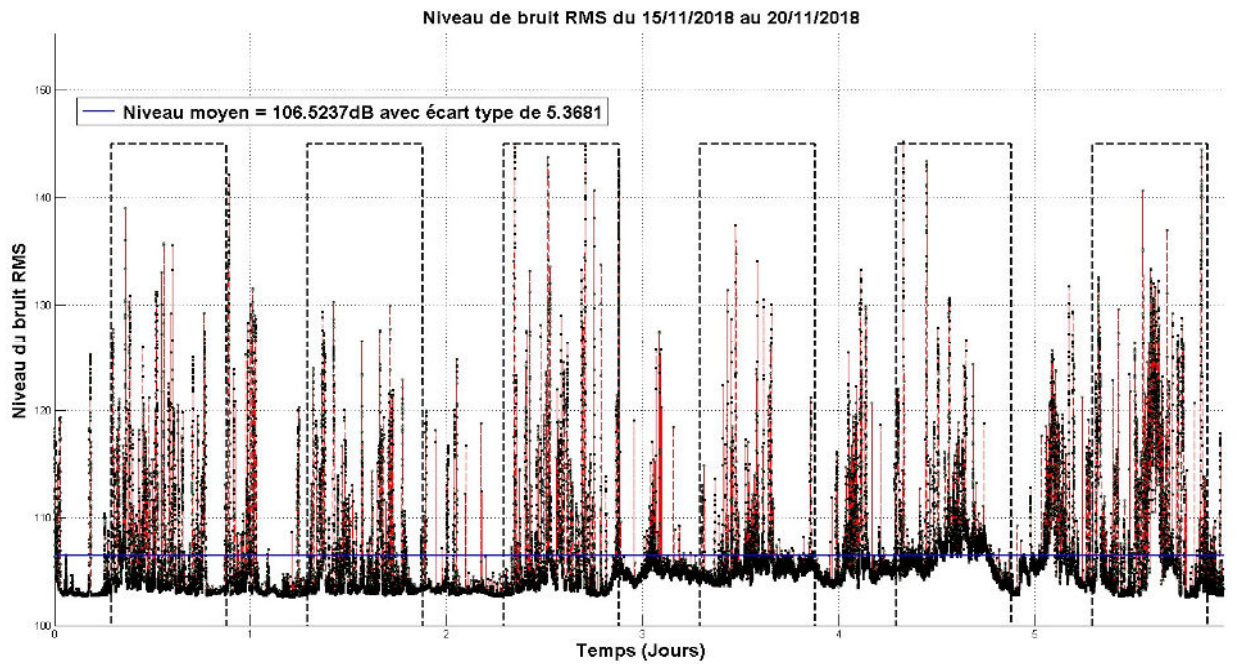


Figure 20: Niveau RMS du 15/11 jusqu'au 20/11/2018

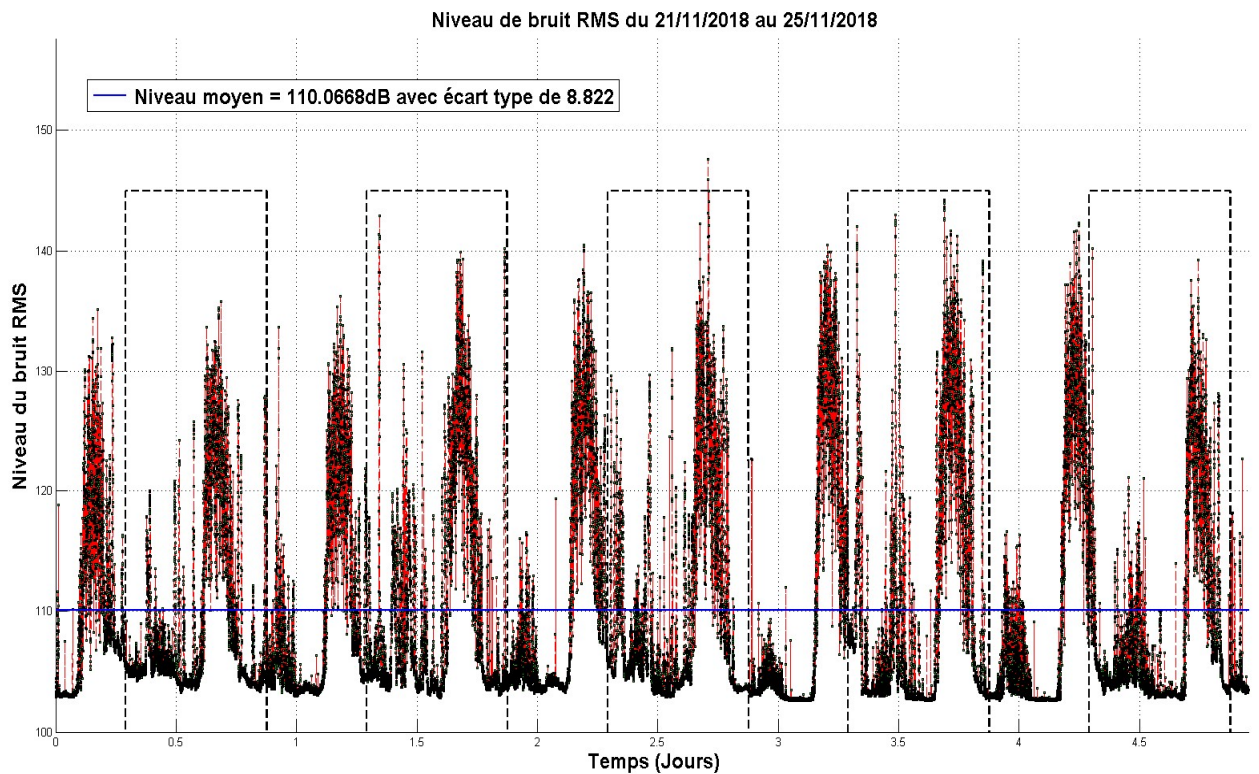


Figure 21: Niveau RMS du 21/11 jusqu'au 25/11/2018

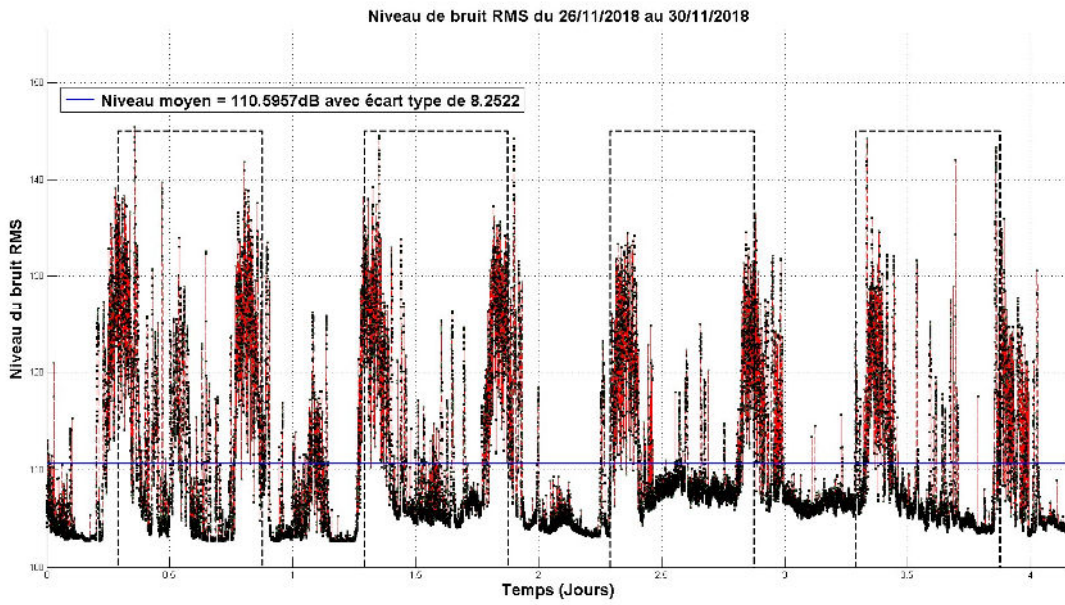


Figure 22: Niveau RMS du 26/11 jusqu'au 30/11/2018

RMS point 1:

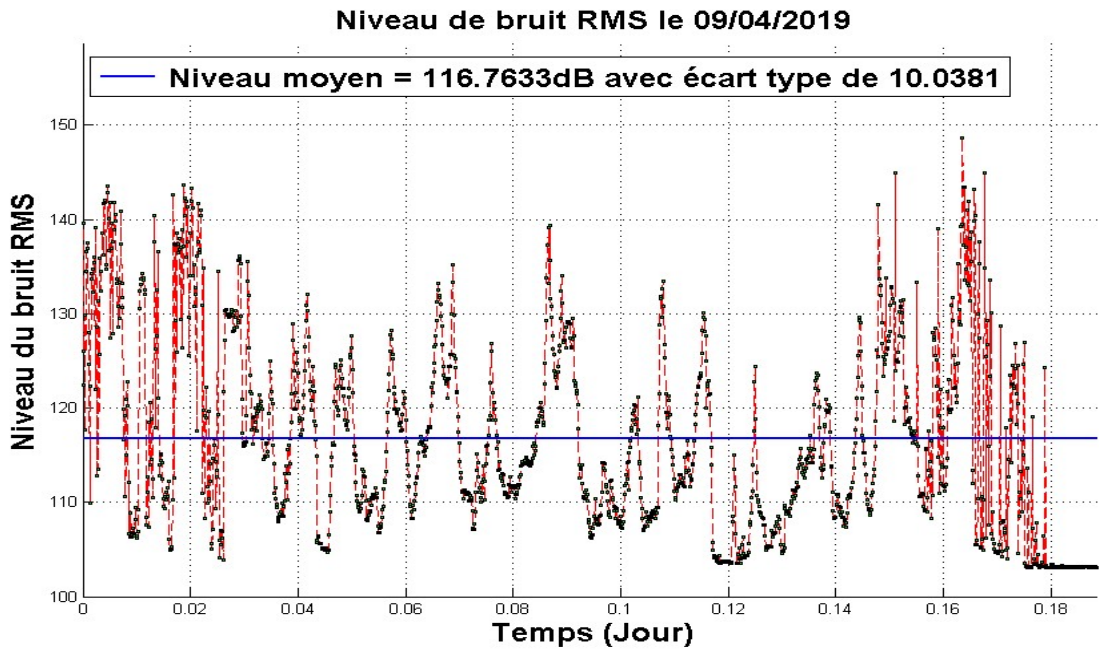


Figure 23: Niveau RMS du 09/04/2019

Afin d'identifier sur 24heures les plages horaires les plus sonores, une représentation graphique des valeurs RMS moyennées sur du 15 au 30/11/2018 a été réalisée (Figure 24).

Les plages horaires les plus bruyantes peuvent être identifiées de 2 heures à 5 heures du matin ainsi que de 14 heures à 17 heures.

Moyenne répartition journalière RMS (15/11/2018-30/11/2018)

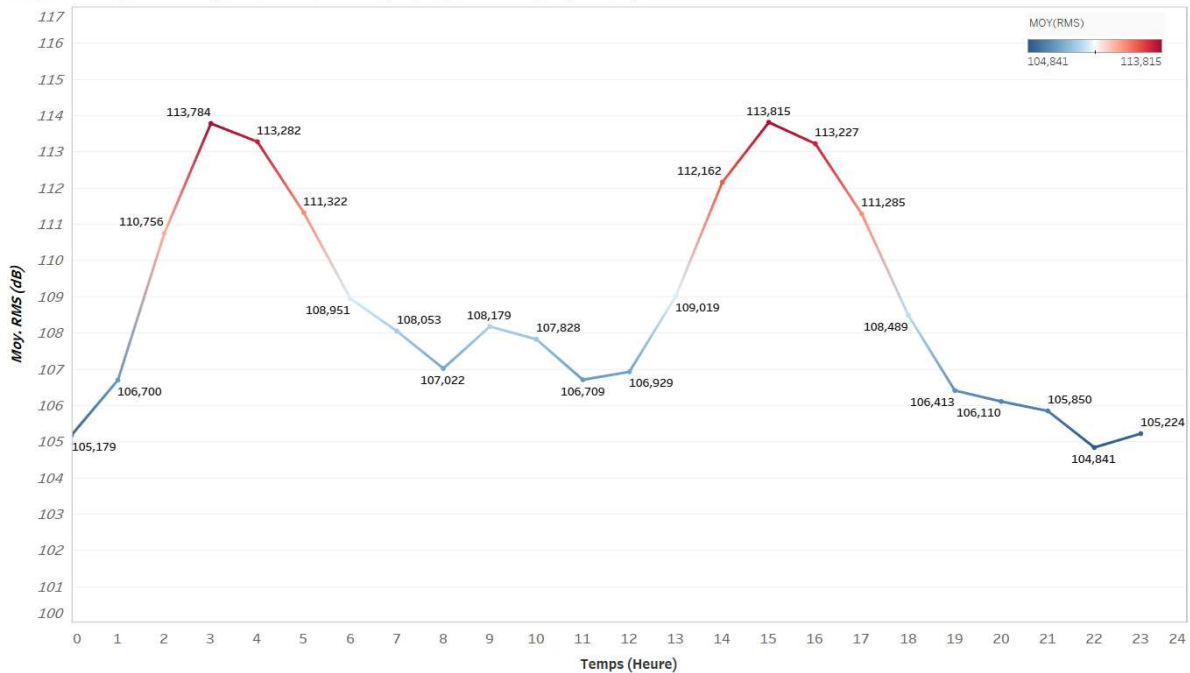


Figure 24: Moyenne répartition journalière RMS du 15/11 jusqu'au 30/11/2018

Afin d'identifier la cause première de ces deux périodes sonores, une analyse jour par jour a été entreprise.

Cette analyse révèle la présence d'un navire à partir du 21/11/2018 responsable des niveaux RMS de la figure 24.

Il a donc été possible de visualiser les niveaux RMS moyennés du 15 au 20/11/2018 (Figure 25), afin de visualiser l'environnement du site étudié ainsi que son activité sans la présence du navire responsable des niveau RMS de la figure 24.

Moyenne répartition journalière RMS (15/11/2018-20/11/2018)

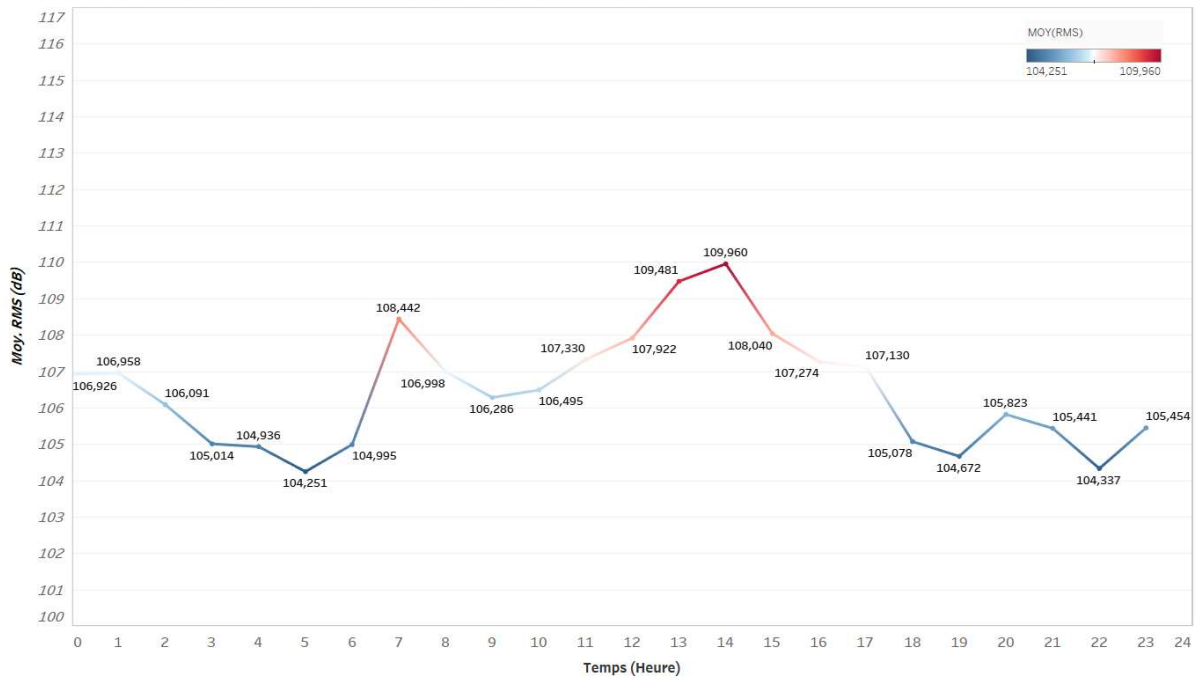


Figure 25: Moyenne répartition journalière RMS du 15/11 jusqu'au 20/11/2018

La représentation graphique des valeurs RMS moyennées de la figure 25, montre un profil révélant une période plus bruyante entre 7 heures du matin et 16 heures. Les périodes de soirées et de nuit étant moins impactées par l'activité anthropique.

SPL Zeros-to-Peaks point 2:

Le niveau SPL-crête renseigne sur les niveaux de pression sonore maximale. A l'inverse du RMS qui lisse les valeurs sur un intervalle du temps, cet indicateur nous permet de détecter le vrai niveau de bruit généré par un événement sonore qui ne dure qu'un court instant. Le SPL est utile en tant que métrique pour une forme d'onde pulsée, pour les mesures de bruit impulsif (explosion, battage de pieux, déroctage, etc..)

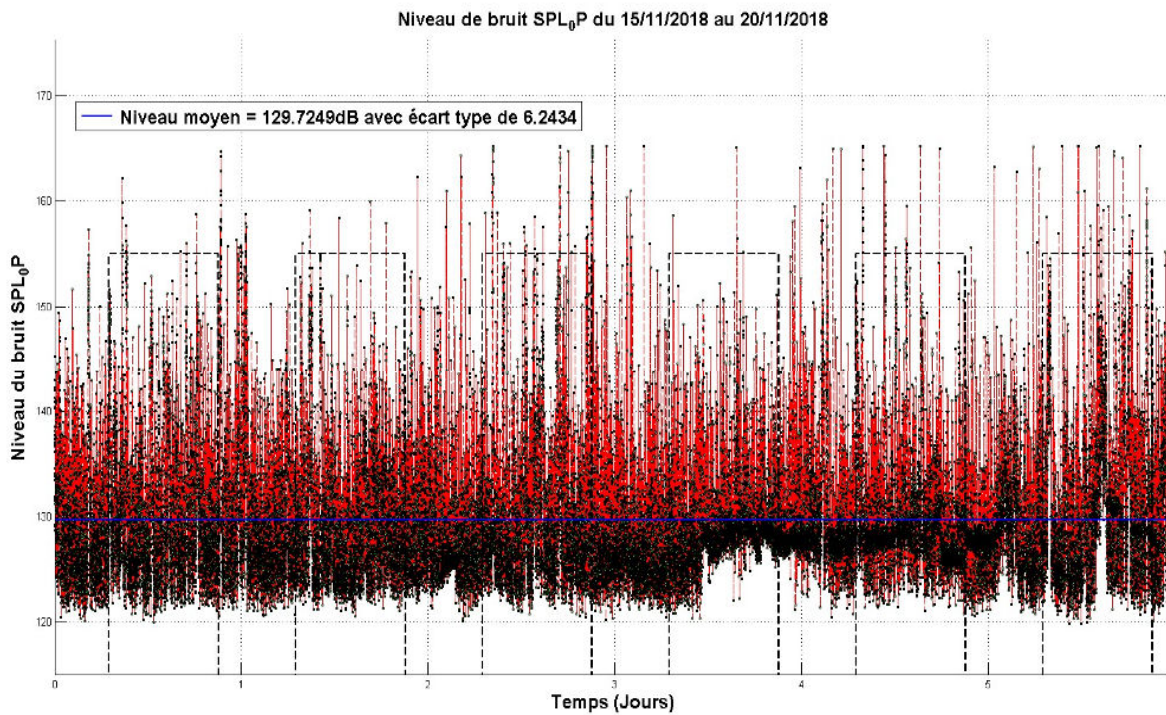


Figure 26: Niveau SPL du 15/11 jusqu'au 20/11/2018

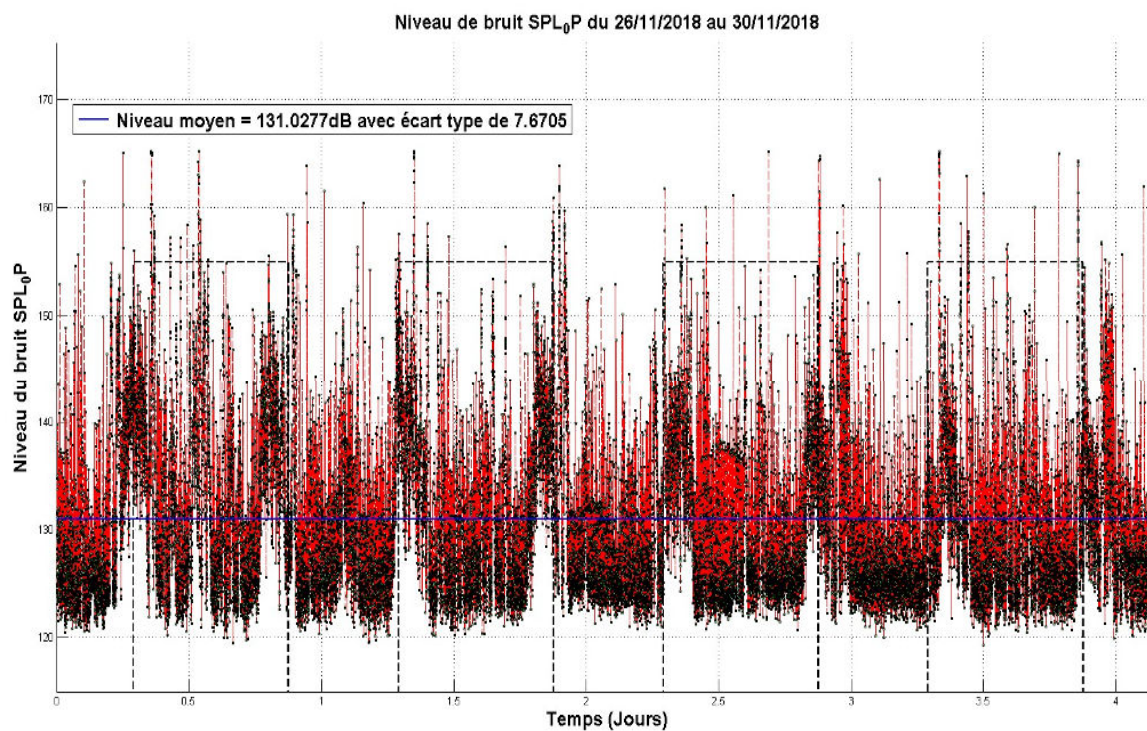


Figure 27: Niveau SPL du 21/11 jusqu'au 25/11/2018

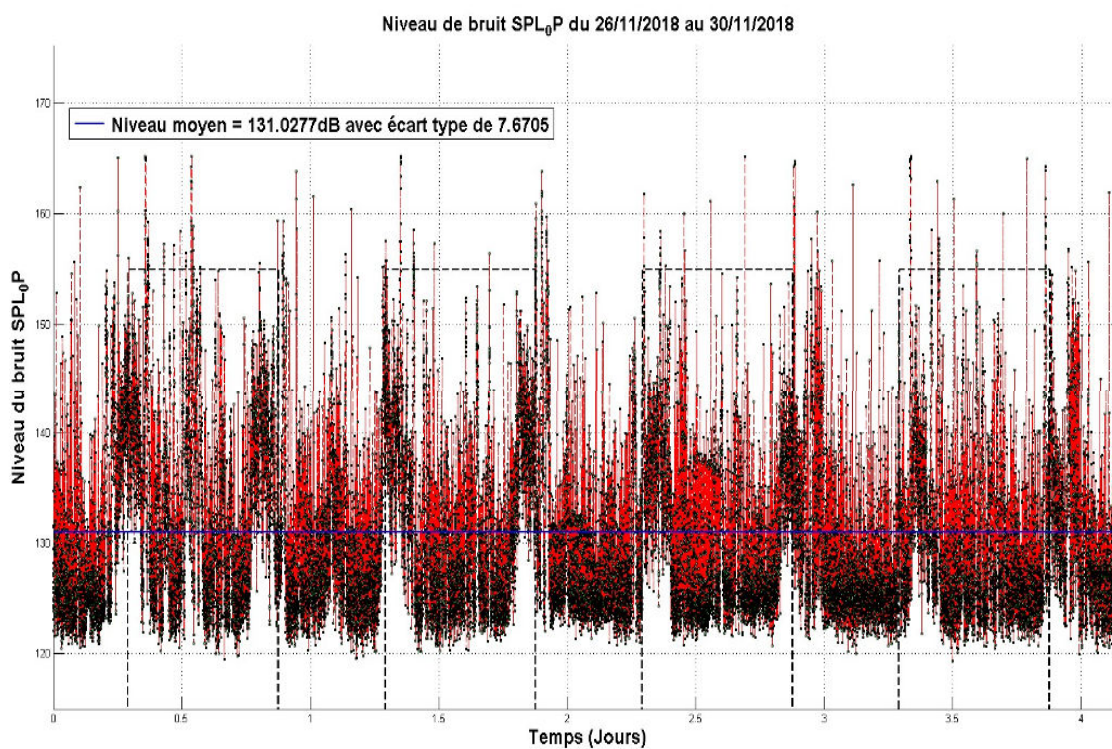


Figure 28: Niveau SPL du 26/11 jusqu'au 30/11/2018

SPL Zeros-to-Picks point 1:

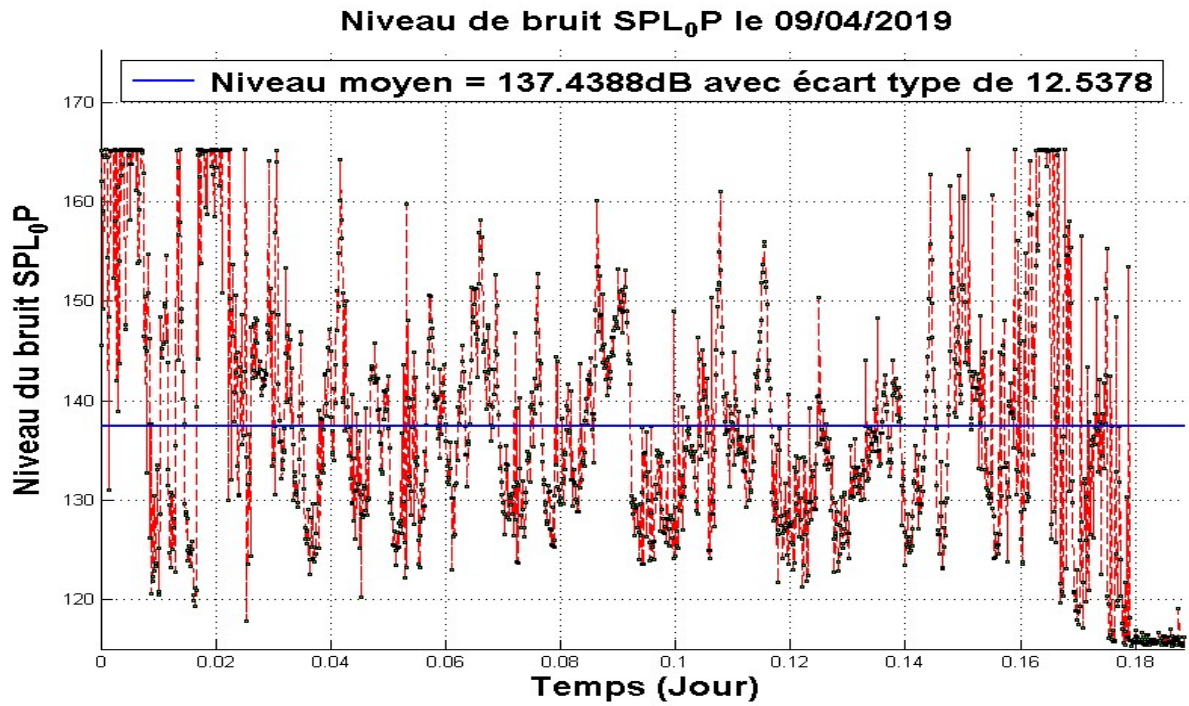


Figure 29: Niveau SPL du 09/04/2019

SEL Point 2 :

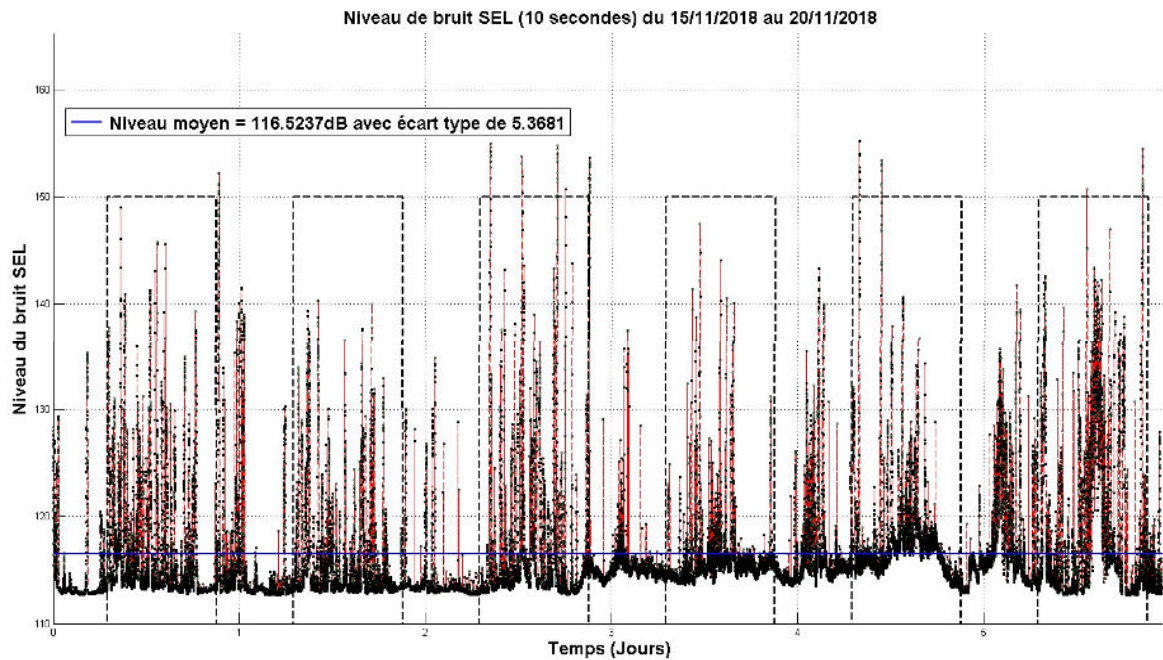


Figure 30: Niveau SEL du 25/11 jusqu'au 30/11/2018

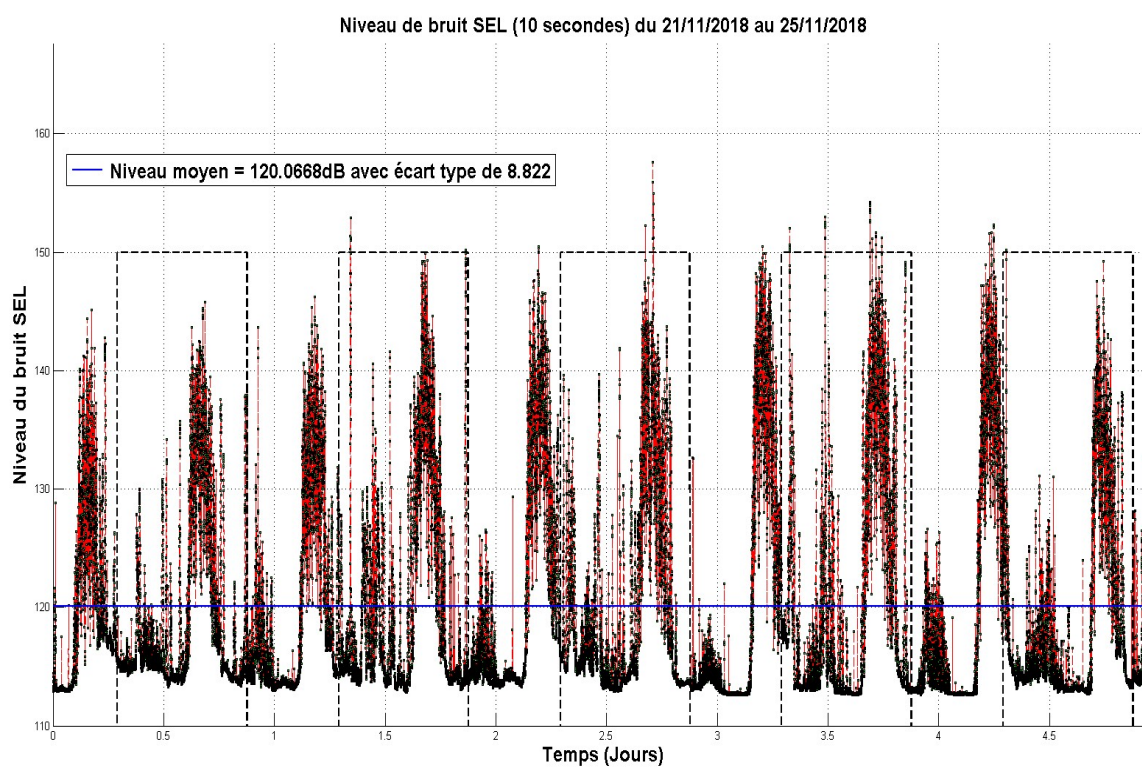


Figure 31: Niveau SEL du 21/11 jusqu'à 25/11/2018

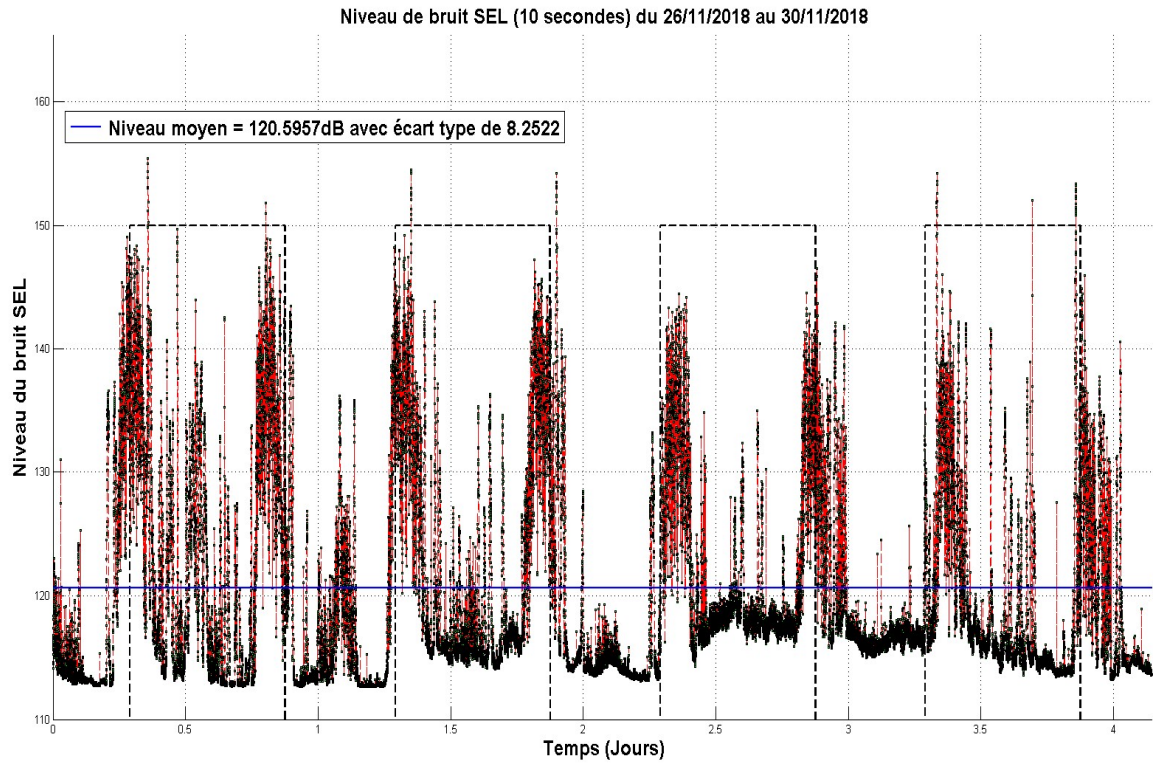


Figure 32: Niveau SEL du 26/11 jusqu'au 30/11/2018

SEL Point 1 :

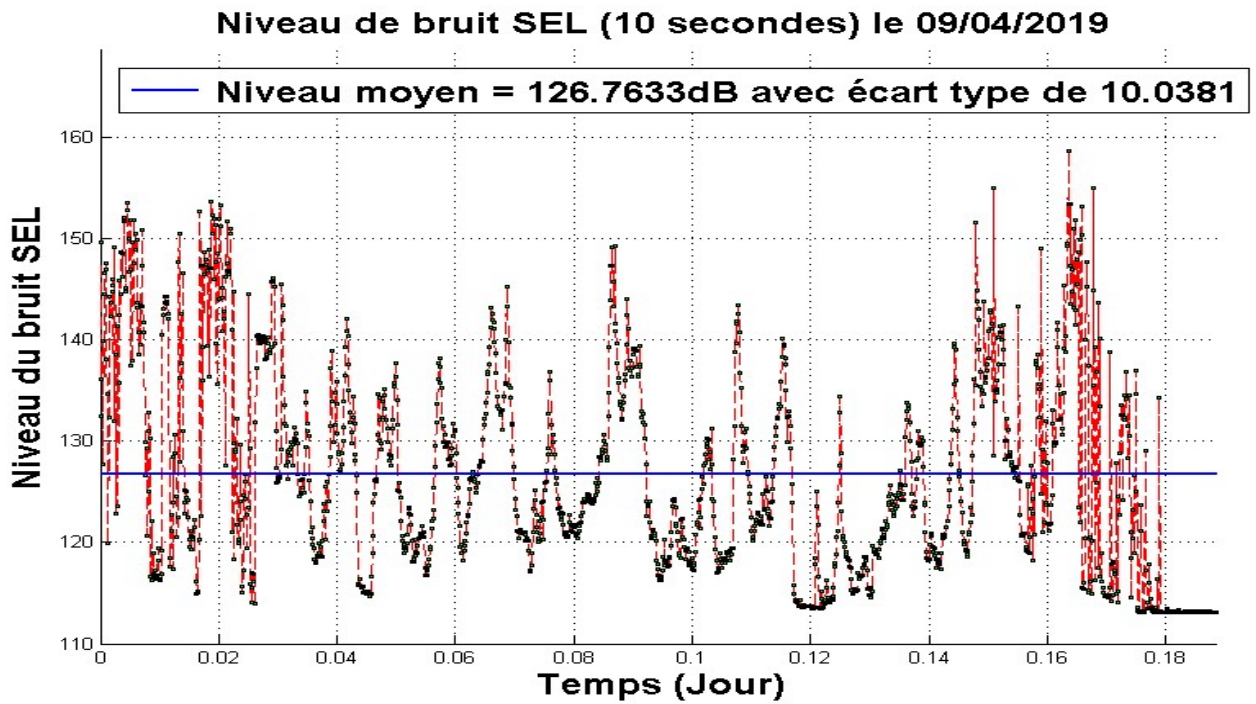


Figure 33: Niveau SEL du 09/04/2019

2.3.2 ANALYSE DES RESULTATS DE MESURES

Le niveau sonore mesuré pendant la période du 15/11 au 30/11/2018 montre un bruit permanent présentant une variabilité dépendant essentiellement des activités anthropiques en relation avec la pêche, des passages des grands navires comme les cargos et les Ferries et des perturbations météorologiques comme le vent, la houle et les précipitations.

2.3.2.1 Analyse des résultats de mesures du point 2

Les mesures des niveaux RMS durant la période d'étude montrent que le niveau de bruit moyen dans la zone d'étude est relativement élevé, avec une valeur moyenne de 108,81 dB et un écart-type de 7,70 dB (Voir annexe).

Le niveau moyen crête (SPL) ainsi obtenu pour les différentes périodes est de 130,38 dB. Les valeurs oscillent entre 120 et 165 dB re 1 μ Pa (crête) avec un écart type de 7,11 dB en considérant l'ensemble des fichiers. (Voir annexe)

Le niveau moyen SEL ainsi obtenu pour les différentes périodes est de 118,81 dB, il oscille essentiellement entre 115 et 150 dB re 1 μ Pa avec un écart type de 7,69 dB sur l'ensemble des fichiers (Voir annexe).

Les périodes de nuit sont particulièrement plus calmes, surtout avant le 20/11 avec des niveaux inférieurs à la moyenne. Aussi, les résultats de cette étape montrent que certaines journées sont plus bruyantes que d'autres, ce qui est justifié par le fait que le passage des grands navires de commerce et les activités de pêche y contribuent également.

Effet du vent :

Durant la période de mesure, le niveau du vent varie essentiellement entre 5 et 10 m/s et la houle ne dépasse pas 1,5 m (**Figure 34**). La valeur extrême du vent mesurée durant cette période est de 12 m/s, soit environ 43 km/h. Le vent, la houle et les précipitations contribuent généralement de manière significative à la génération du bruit ambiant dans des zones calmes où le trafic est faible. Ces paramètres d'environnement (surtout le vent) peuvent accroître le niveau de bruit ambiant jusqu'à 30 dB. Ce n'est pas le cas dans la zone d'étude où le passage des navires et les activités des pêches génèrent plus de bruit. De plus, durant cette période de mesure nous n'avons pas enregistré des conditions météo extrêmes. Nous voyons bien l'effet du bruit du vent sur les données surtout les 19, 28 et 29 novembre quand la vitesse du vent dépasse les 8 m/s. Durant cette période le niveau RMS passe de 103 dB à environ 110 dB. (Voir les **Figure 20**, **Figure 21** et **Figure 22**)

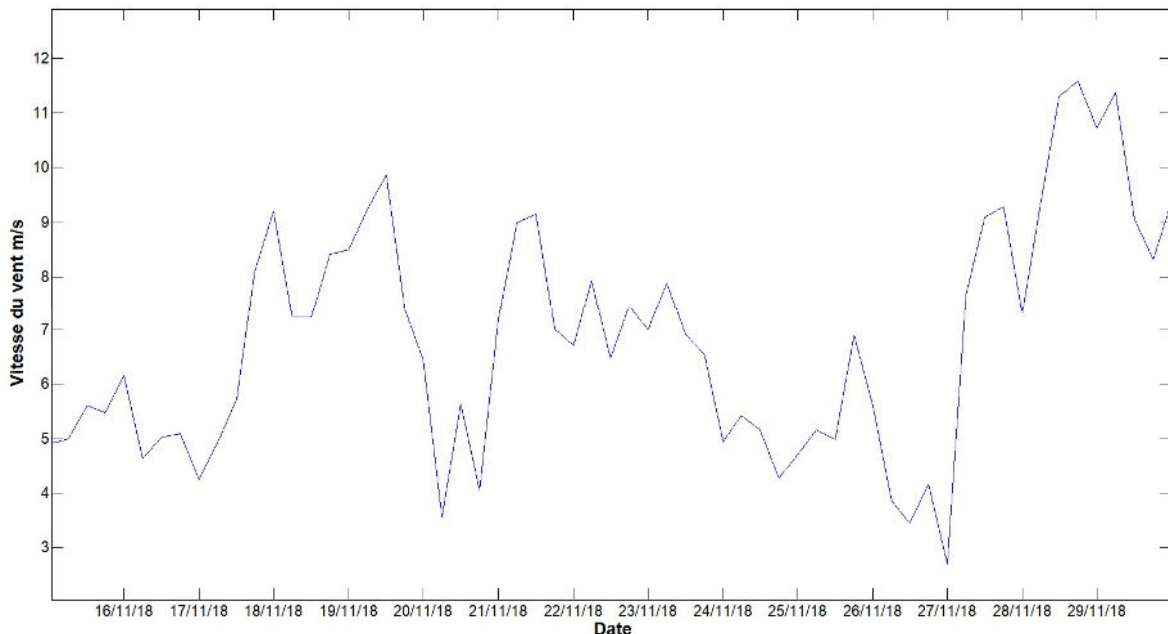


Figure 34: Mesures de la vitesse du vent dans la zone d'étude en m/s durant la période de mesure

Activités des pêches autour du point de mouillage :

Du 21 au 30 novembre nous avons constaté des activités anthropiques dont le bruit des moteurs, tôt le matin vers 6 h et l'après-midi vers 16 h. Ceux-ci durent à chaque fois deux à trois heures. Le niveau de bruit n'est pas très élevé, il ne dépasse pas 140 dB RMS ; ce qui correspond bien au bruit d'un petit bateau de pêche. Nous avons analysé les données AIS pour identifier les bateaux à l'origine de ce bruit quotidien, sans succès. Cependant, nous avons détecté pendant ces périodes des bruits passagers de moteur, cela signifie que les navires en question n'émettent pas leur signal AIS au moment du passage ou n'en sont pas équipé.

Passage des Ferry et des cargos :

Nous avons enregistré des niveaux de bruit très élevés, atteignant dans certain cas la saturation des hydrophones (niveau de bruit > 165 dB). Nous remarquons que ce bruit fort domine le bruit permanent pendant des durées de l'ordre de quelques dixièmes de minutes. Cette durée correspond au passage de navires à proximité de l'hydrophone.

Nous avons comparé les données AIS avec les enregistrements et nous avons constaté que ces niveaux de bruit correspondent bien au passage des grand navires comme les cargos et les Ferries à une distance allant de quelques centaines de mètres jusqu'à quelques kilomètres.

Remarque :

Les mesures SPL (Figure 26 à Figure 28) montrent bien que pendant toutes les périodes d'enregistrement, des pics de saturation à 165 dB apparaissent. Des signaux dépassent donc les niveaux de ces pics, néanmoins ils ne sont pas très nombreux et n'affectent que très peu la valeur de la moyenne.

2.3.2.2 Analyse des résultats de mesures du point 1

Les résultats des analyses du suivi de 4 heures (de 9h à 13h) au point 1 présentent le niveau de bruit maximal du trafic maritime de la journée. Nous avons détecté le passage de plus de 20 bateaux pendant cette durée d'enregistrement.

Les mesures des niveaux RMS durant la période d'enregistrement montrent que le niveau de bruit moyen dans la zone d'étude est élevé, à 116,763 dB avec un écart type de 10,03 dB (Voir **Figure 23**)

Le niveau moyen crête (SPL) ainsi obtenu pour les différentes périodes est de 137,43 dB. Les valeurs oscillent entre 120 et 165 dB re 1 μ Pa (crête) avec un écart type de 12,5378 dB sur l'ensemble des fichiers. (Voir **Figure 29**)

Le niveau moyen SEL ainsi obtenu pour les différentes périodes est de 126,76 dB, il oscille essentiellement entre 115 et 150 dB re 1 μ Pa avec un écart type 10 dB sur l'ensemble des fichiers (Voir **Figure 33**)

2.3.3 ANALYSE TEMPS-FRÉQUENCES

Spectrogramme :

Les différents spectrogrammes sont obtenus avec l'estimateur spectral de Welch. Ce dernier consiste à décomposer le signal global en fenêtres successives qui se recouvrent puis à calculer la densité spectrale de puissance pour chaque fenêtre temporelle (10 secondes dans notre cas) et calculer finalement la moyenne sur l'ensemble des fenêtres utilisées.

Contrairement au calcul de la densité spectrale de puissance classique, la méthode de Welch permet de diminuer la variance de la mesure par un facteur ($Q = 10$ dans notre cas) égal au nombre de sous-expériences (nombre de fenêtres) en calculant la moyenne. Dans notre cas, cette méthode est particulièrement adaptée à la mesure du niveau du bruit moyen.

Modèle du Wenz :

Dans cette étude nous utilisons le modèle de Wenz comme référence pour évaluer le niveau du bruit du trafic maritime et le bruit ambiant.

Définition du modèle du Wenz :

Les résultats des recherches récentes sur le bruit ambiant, après traitement approprié, sont comparés sur la base des spectres de pression dans la bande de fréquences 1 Hz à 20 kHz. Plusieurs sources possibles sont examinées pour déterminer l'origine la plus probable du bruit observé.

En règle générale, le bruit ambiant est composé d'au moins quatre composantes qui se chevauchent :

- Les fluctuations de la pression turbulente effective dans la bande allant de 1 Hz à 100 Hz ;
- Le bruit dépendant du vent, des bulles et des aérosols résultant principalement de l'agitation en surface, 50 Hz à 20 kHz ;
- Le trafic océanique, 10 Hz à 1000 Hz. Les caractéristiques de spectre de chaque composant et du composite sont présentées ;
- Des sources supplémentaires, notamment celles ayant des effets intermittents et locaux, sont également abordées.

En résumé, le modèle de Wenz présente les caractéristiques les plus répandues et dominantes du bruit ambiant dans l'océan.

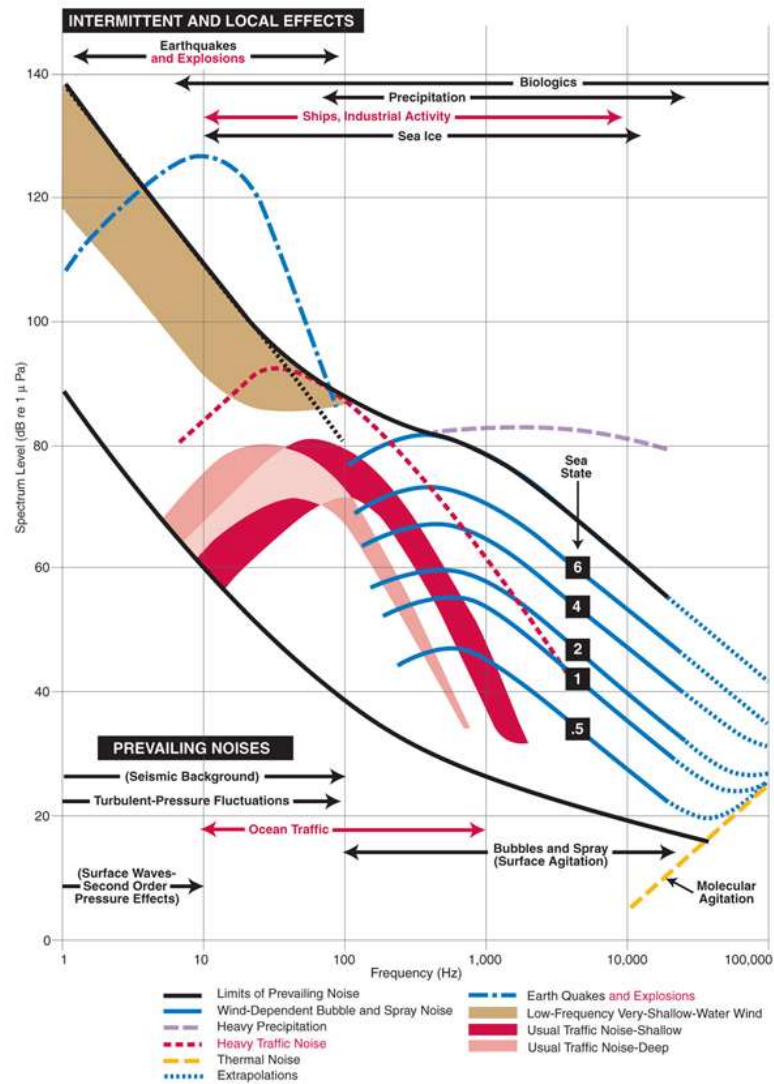


Figure 35: Modèle de Wenz

2.3.3.1 Analyse temps-fréquences des enregistrements du point 2

Analyse Temps-Fréquence :

Les (Figure 36 à Figure 38) donnent l'évolution du niveau du bruit moyen par minute, enregistré sur le Wildlife, toutes les 15 minutes / 17 minutes pour la période du 15 au 30 Novembre 2018. Chaque spectrogramme est accompagné d'une barre indiquant les niveaux en dB re 1 µPa² Hz associés aux couleurs. Plus la couleur est rouge, plus le bruit est fort.

Comme nous l'avons indiqué dans le glossaire, le spectrogramme est un moyen de montrer comment l'intensité sonore est distribuée sur les fréquences et comment elle évolue dans le temps. Pour chaque instant « T », exprimé en jour, et pour chaque fréquence « F », exprimé en Hz, un point dont l'intensité de la couleur reflète l'intensité du son est représenté.

Les spectrogrammes illustrés sur les figures montrent l'évolution du niveau du bruit en fonction du temps pour toute la période d'enregistrement. Les fenêtres en trait noir discontinu indiquent les

périodes de jour (de 6h à 20h) et les fenêtres en trait rouge discontinu indiquent les périodes des après-midi (de 12h à 18h).

Comme nous l'avons souligné avant, l'activité humaine est intense à cette période, elle est observée sur la majorité des spectrogrammes obtenus. En effet, dans la bande fréquentielle basse < 2 kHz, où se situent les bruits d'origine humaine (trafic maritime, pêche, etc.), la différence de niveau du bruit est évidente. Cela signifie que l'activité humaine contribue au bruit ambiant, situé surtout dans les plus basses fréquences.

Nous pouvons remarquer sur la plupart des figures une fluctuation des niveaux, et que généralement les niveaux de bruit les plus bas correspondent aux périodes de la nuit sauf quand un effet du vent est observé (jours 18, 19, 28 et 29). Généralement, dans les périodes d'après-midi (carré rouge) la valeur du bruit est supérieure à la moyenne mais ce n'est pas toujours le cas. Comme nous l'avons remarqué avec les niveaux de mesures (RMS, SPL et SEL), certaines activités de pêche commencent tôt le matin avant 6 h.

Nous remarquons aussi sur l'ensemble des spectrogrammes présentés dans cette section que le niveau du bruit sur la bande fréquentielle située entre 4 kHz et 10 kHz reste faible. Elle correspond aux bruits naturellement présents dans la zone d'étude (surtout le vent). Certains jours paraissent plus bruyants que d'autres, d'après les spectrogrammes et notamment les 18, 19 et du 28 au 30/11. Le bruit est accru par le vent même si sa valeur ne dépasse pas 90 dB.

Nous remarquons aussi dans le spectrogramme la présence de quelques piques qui ne durent pas très longtemps mais qui balayent toutes les fréquences. La puissance du signal est plus concentrée dans les basses fréquences, ce qui correspond bien au passage des grand bateaux comme les Ferries, Cargo ou des petits bateaux qui passent juste à côté des enregistreurs.

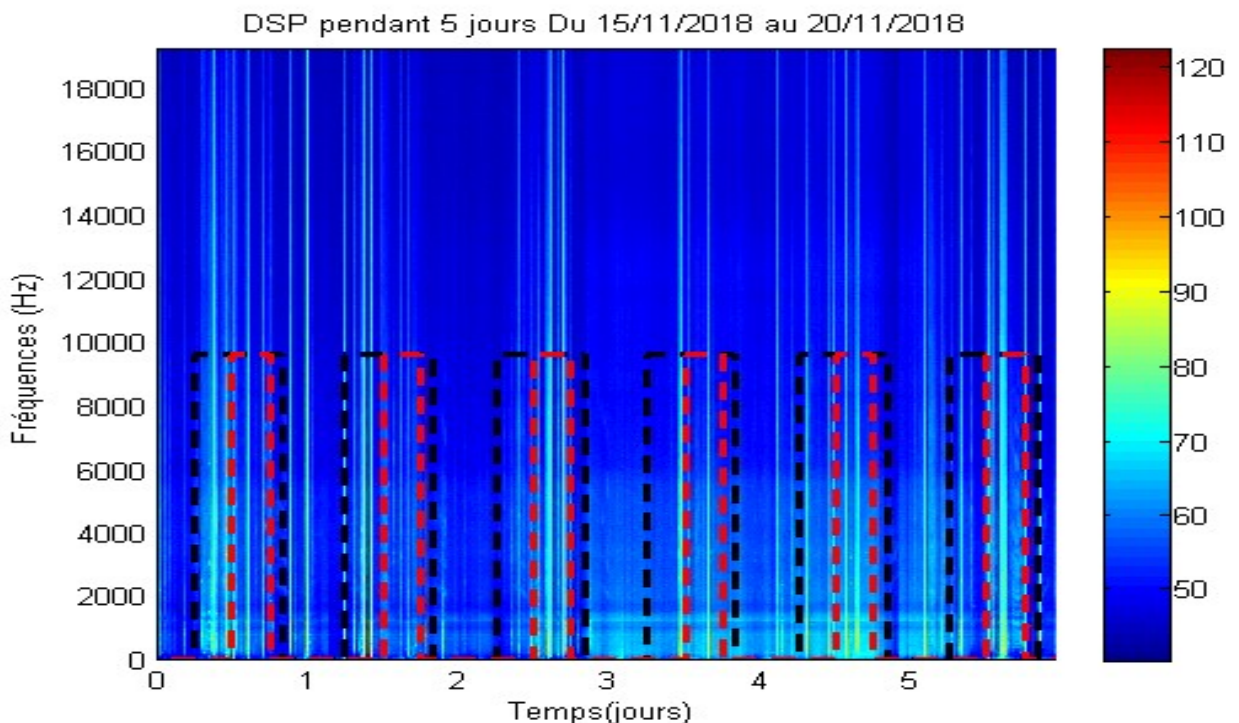


Figure 36: évolution du niveau du bruit moyen (DSP-pwelch) entre le 15 et le 20 novembre 2018. Les fenêtres en trait discontinu noir et rouge désignent respectivement les périodes de jour et de l'après midi

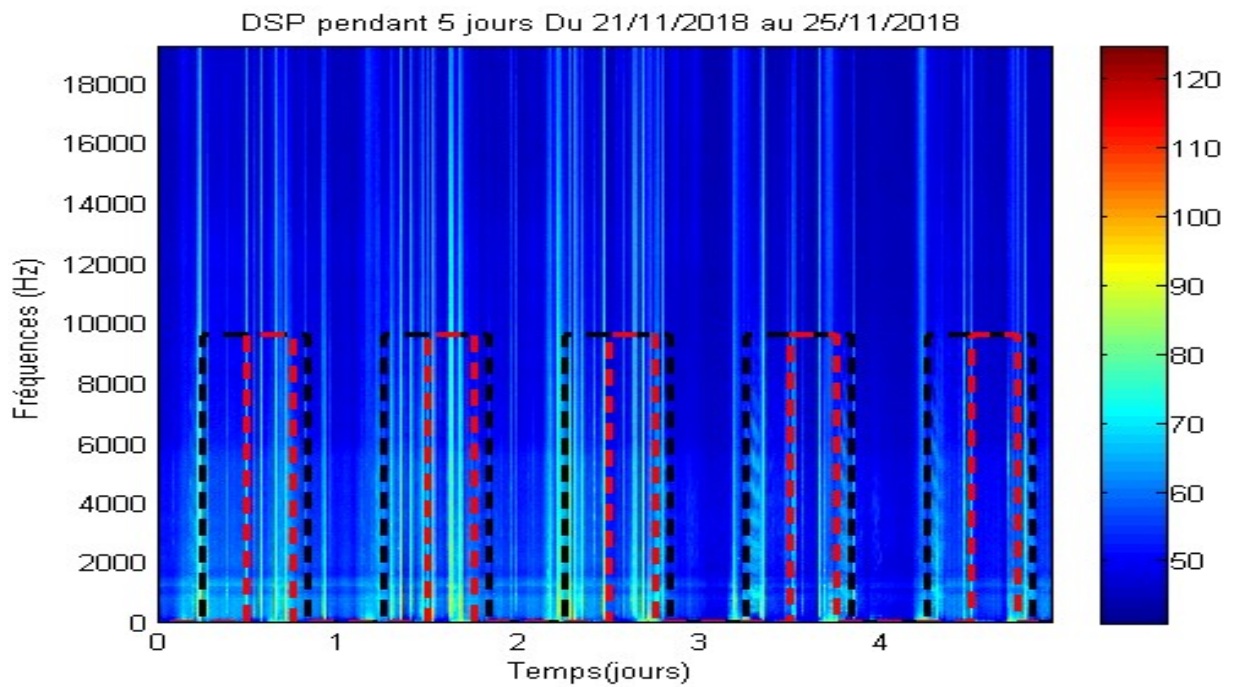


Figure 37: évolution du niveau du bruit moyen (DSP-pwelch) entre le 21 et le 25 novembre 2018. Les fenêtres en trait discontinu noir et rouge désignent respectivement les périodes de jour et de l'après midi

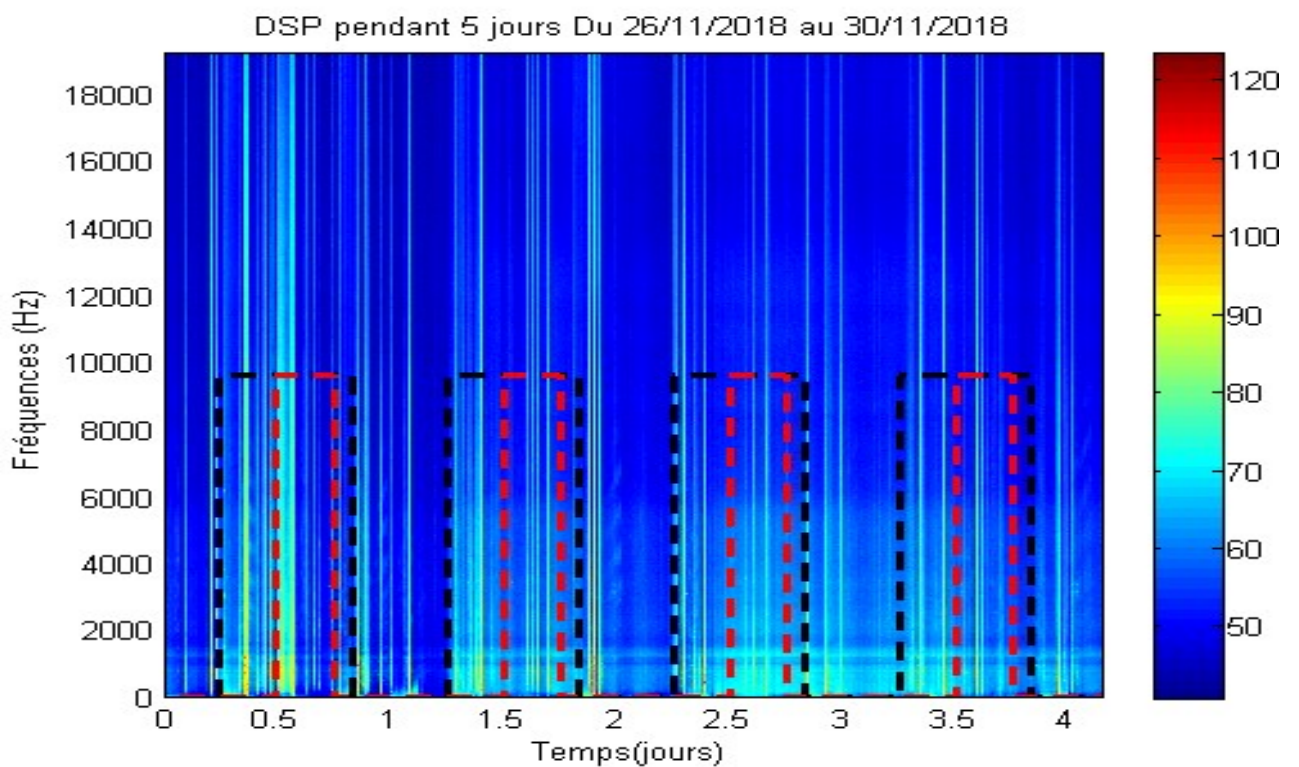


Figure 38: évolution du niveau du bruit moyen (DSP-pwelch) entre le 25 et le 30 novembre 2018. Les fenêtres en trait discontinu noir et rouge désignent respectivement les périodes de jour et de l'après midi

Analyse fréquentielle :

Les résultats présentés jusqu'ici fournissent une vue globale de l'évolution du niveau du bruit à l'échelle de la zone d'étude. Afin d'avoir une idée précise du niveau de bruit moyen sur toute la période avec la distribution fréquentielle de l'énergie, nous avons calculé le spectre moyen (**Figure 39**, **Figure 41** et **Figure 43**) pour chaque période. Nous associons le modèle de Wenz (indice de trafic de 1 à 7 et vitesse du vent de 5 à 35 m/s) à chaque spectre moyen afin de connaître la nature de bruit.

Nous pouvons d'abord remarquer que les densités spectrales de puissances moyennes ne présentent pas toutes un profil comparable au bruit ambiant typique. Cela est dû à deux facteurs :

Le premier facteur est la profondeur de l'eau, les enregistrements sont effectués dans des petits fonds, ceux-ci favorisent l'absorption des basses fréquences par les sédiments en raison des multiples réflexions qu'ils provoquent.

Le deuxième facteur est le nombre de sources anthropiques. Le niveau de bruit reste élevé pour les moyennes fréquences entre 2 kHz et 10 kHz en raison du grand nombre de bateaux qui passent à côté de l'enregistreur.

Le niveau du bruit moyen est situé entre 90 dB re 1 μ Pa @1m et 110 dB re 1 μ Pa @1m, selon la période, dans les très basses fréquences (< 20 Hz). Ce niveau décroît avec une pente d'environ 20 et 30 dB décade pour se situer entre 70 dB et 80 dB dans la plage fréquentielle 30 Hz à 1 kHz. Ce dernier niveau reste relativement faible en lien avec la forte absorption du terrain des basses fréquences.

Dans la plage fréquentielle 1 kHz - 10 kHz, le bruit décroît linéairement jusqu'à atteindre les 60 dB re 1 μ Pa @1m. Sur cette bande de fréquence le bruit anthropique domine le bruit de fond, car durant cette période la vitesse du vent ne dépasse pas les 12 m/s, ce qui correspond à des niveaux de bruit très faibles. Or le niveau de bruit enregistré dépasse l'indice de 35 m/s. Cela n'est donc pas lié à l'agitation générée en surface par le vent mais au bruit produit par le trafic maritime.

Ces figures montrent aussi que le niveau de bruit dans les plus basses fréquences (<30 Hz) est plus élevé que le niveau de bruit dans le modèle de Wenz pour l'indice de trafic 7 surtout durant les dix derniers jours d'enregistrement. Le niveau de bruit est le même ou plus fort que l'indice de trafic maximal sur la bande de fréquence [30 à 100 Hz]. Ces résultats sont retrouvés pendant toute la période de l'enregistrement. Ceci montre que le niveau de bruit anthropique est fort sur cette zone et que le trafic maritime domine toute la bande fréquence de 1 Hz à 10 kHz.

Les **Figure 40**, **Figure 42** et **Figure 44** présentent la distribution de la moyenne des niveaux DSP sur les tiers d'octaves jusqu'à 15 kHz. Sur toutes les figures des tiers d'octaves, nous constatons que sur les basses fréquences (< 8 Hz) les niveaux sont faibles. Comme nous l'avons décrit précédemment, cela est dû à la pénétration de ces ondes dans les sédiments en raison des multiples réflexions dans les petits fonds. Le niveau des tiers d'octaves à partir de 10 Hz jusqu'aux 5 kHz sont presque au même niveau entre 85 et 90 dB. Ces valeurs valident bien la théorie de la domination du bruit anthropique durant les périodes d'enregistrements. Cela permet aussi de caractériser les niveaux de bruit sur chaque bande de fréquence durant la phase initiale.

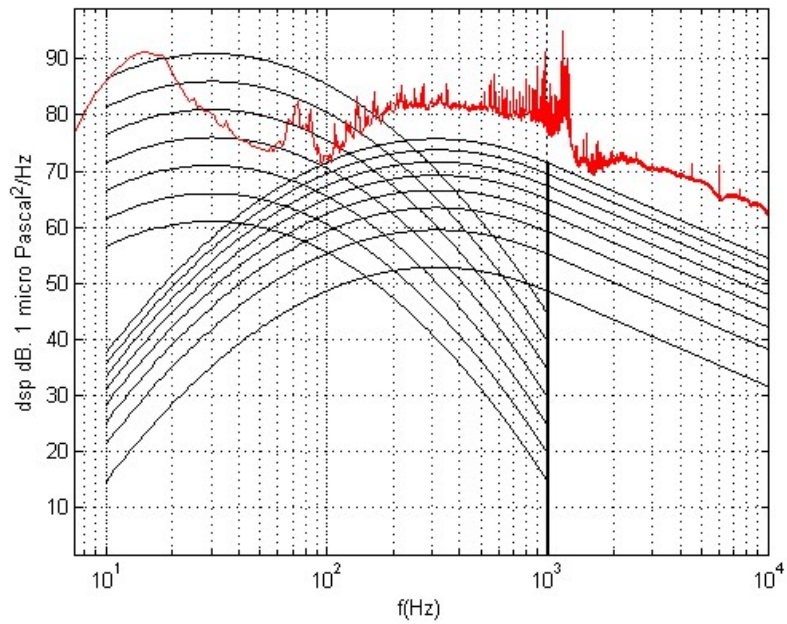


Figure 39: DSP moyenne avec le modèle de Wenz de la période (15/11-20/11)

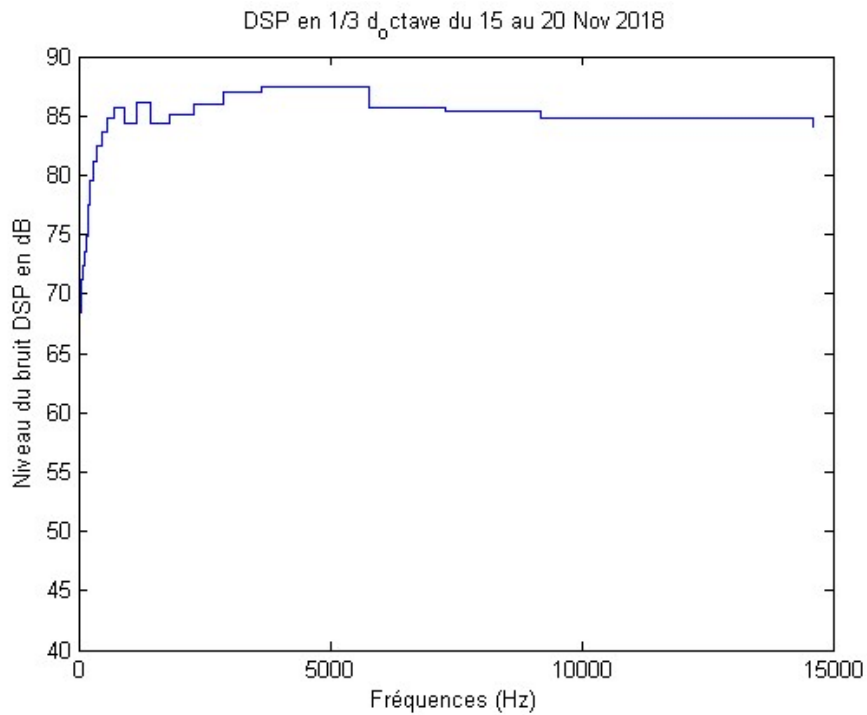


Figure 40: Niveau du bruit de la période d'enregistrement (15/11-20/11) en 1/3 d'octave

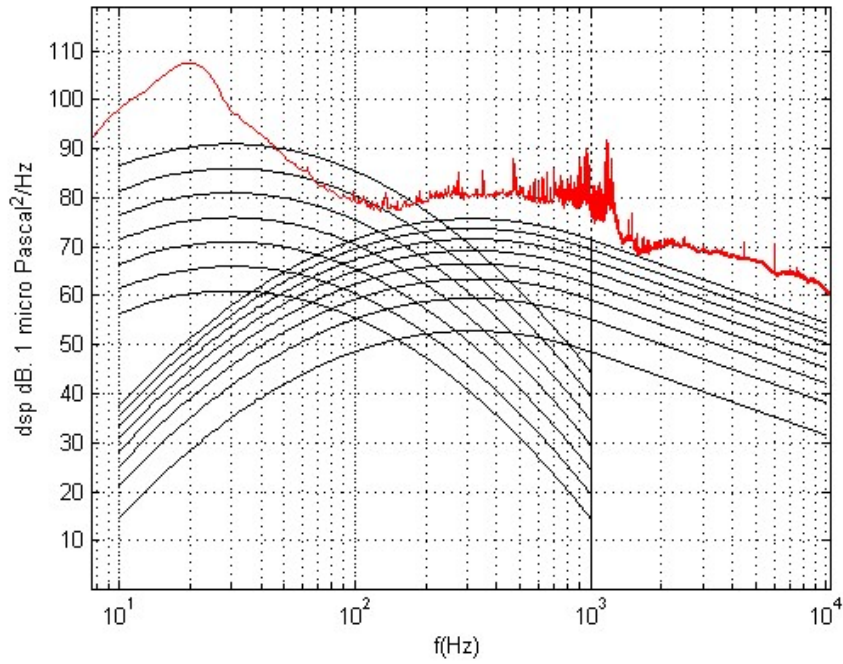


Figure 41: DSP moyenne avec le modèle de Wenz de la période (21/11-25/11)

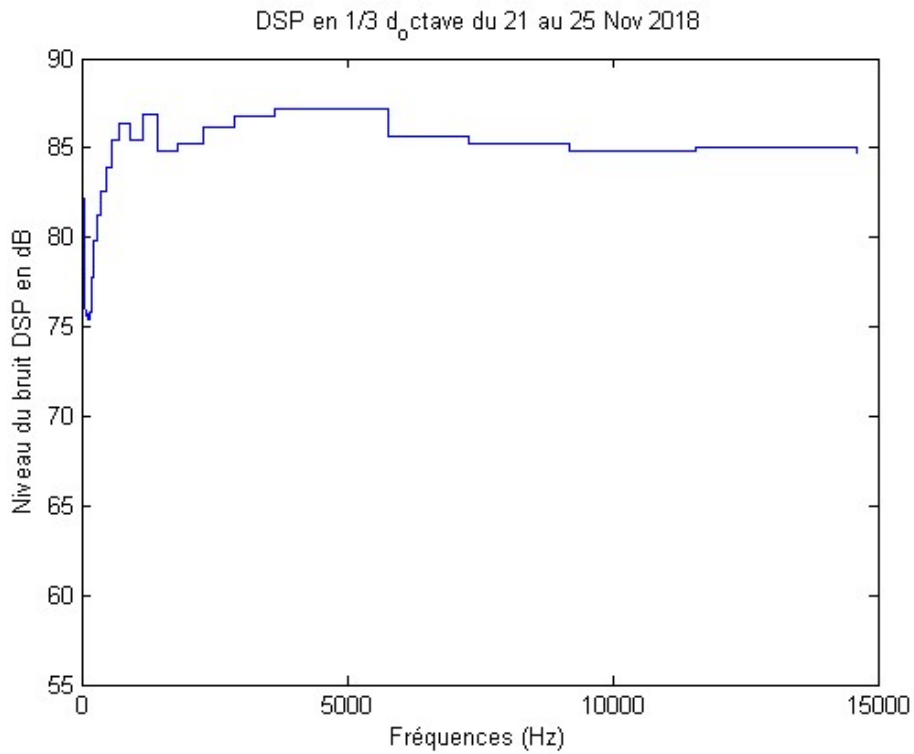


Figure 42: Niveau du bruit de la période d'enregistrement (21/11-25/11) en 1/3 d'octave

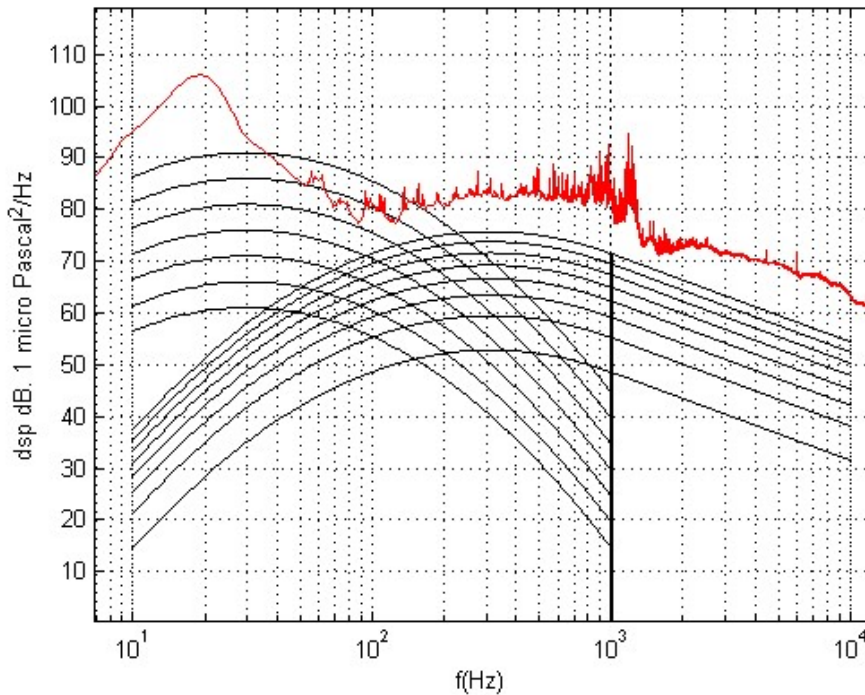


Figure 43: DSP moyenne avec le modèle de Wenz de la période (26/11-30/11)

DSP en 1/3 d_octave du 26 au 30 Nov 2018

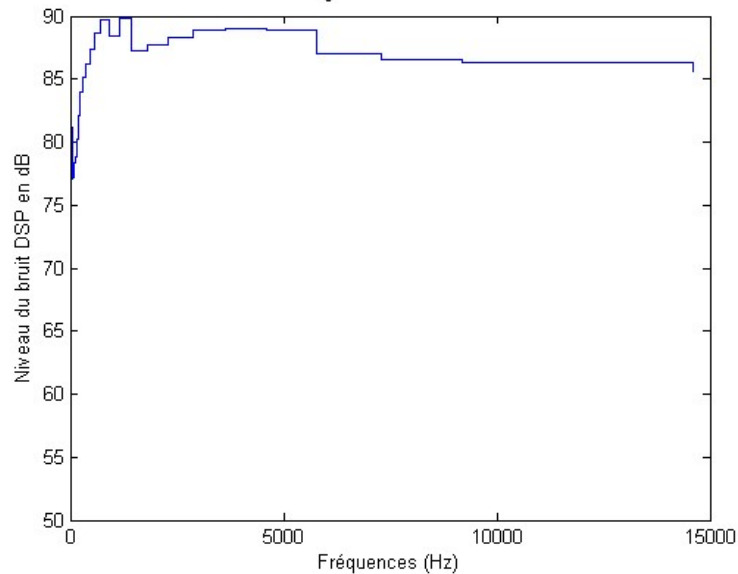


Figure 44: Niveau du bruit de la période d'enregistrement (26/11-30/11) en 1/3 d'octave

Analyse statistique

Afin de bien étudier le niveau de bruit à un état de référence, nous calculons aussi la distribution statistique du spectre sonore mesuré (densité spectrale de puissance dB réf. 1 μ Pa²/Hz) qui est représentée sous la forme de percentiles (en bleu 10 %, en vert 50 % et en rouge 90 %).

Ici, nous utilisons la définition donnée par la norme internationale ISO 1996-1 : 2003 (E), définissant les percentiles comme les niveaux de dépassement. Selon cette définition, le percentile N est le niveau de bruit dépassé pour N % du temps de la période d'étude. Par conséquent, les niveaux exprimés en percentiles montrent pour chaque courbe combien de temps le niveau de bruit est dépassé au cours de la période d'enregistrement.

A partir de la définition des percentiles, le niveau 10 % présente le niveau du bruit ambiant sans la contribution du trafic maritime. Le niveau 50% présente la médiane du niveau de bruit sur la zone d'étude, et 90% présente le niveau au moment du passage des bateaux autour de la zone d'étude.

Les spectres mesurés (10 % et 50 %) sont globalement compatibles avec le modèle de Wenz pour les niveaux et formes. Cependant pour le percentile 90 % le niveau enregistré est bien supérieur au modèle d'environ 20 dB, ce qui est expliqué par la forte densité de trafic sur la zone.

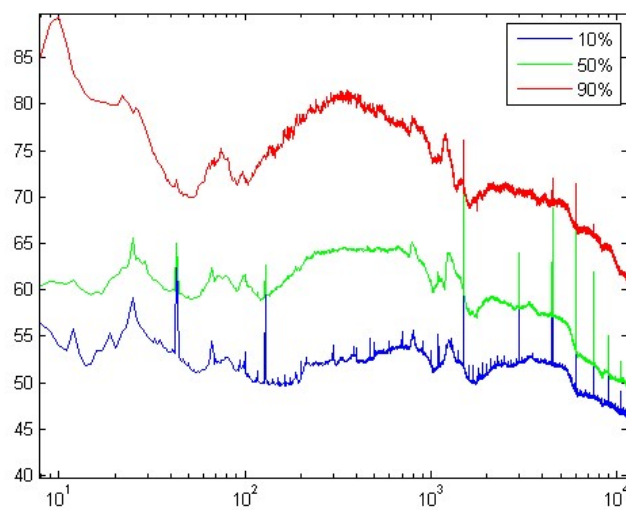


Figure 45: Les différents taux en percentiles 10 % (bleu), 50% (vert) et 90% (rouge) du (15/11-20/11)

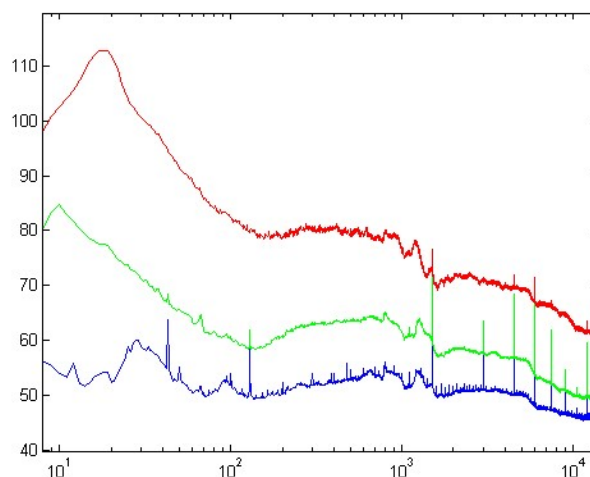


Figure 46: Les différents taux en percentiles 10 % (bleu), 50% (vert) et 90% (rouge) du (21/11-25/11)

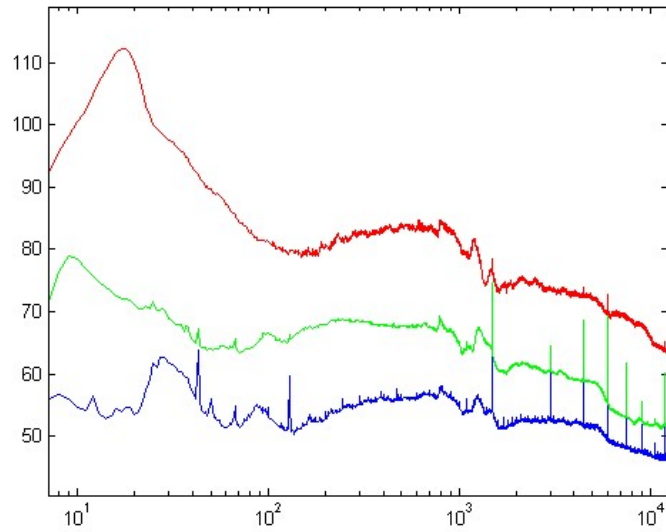


Figure 47: Les différents taux en percentiles 10 % (bleu), 50% (vert) et 90% (rouge) du (26/11-30/11)

2.3.3.2 Analyse temps-fréquences des enregistrements du point 1

Analyse Temps-Fréquence :

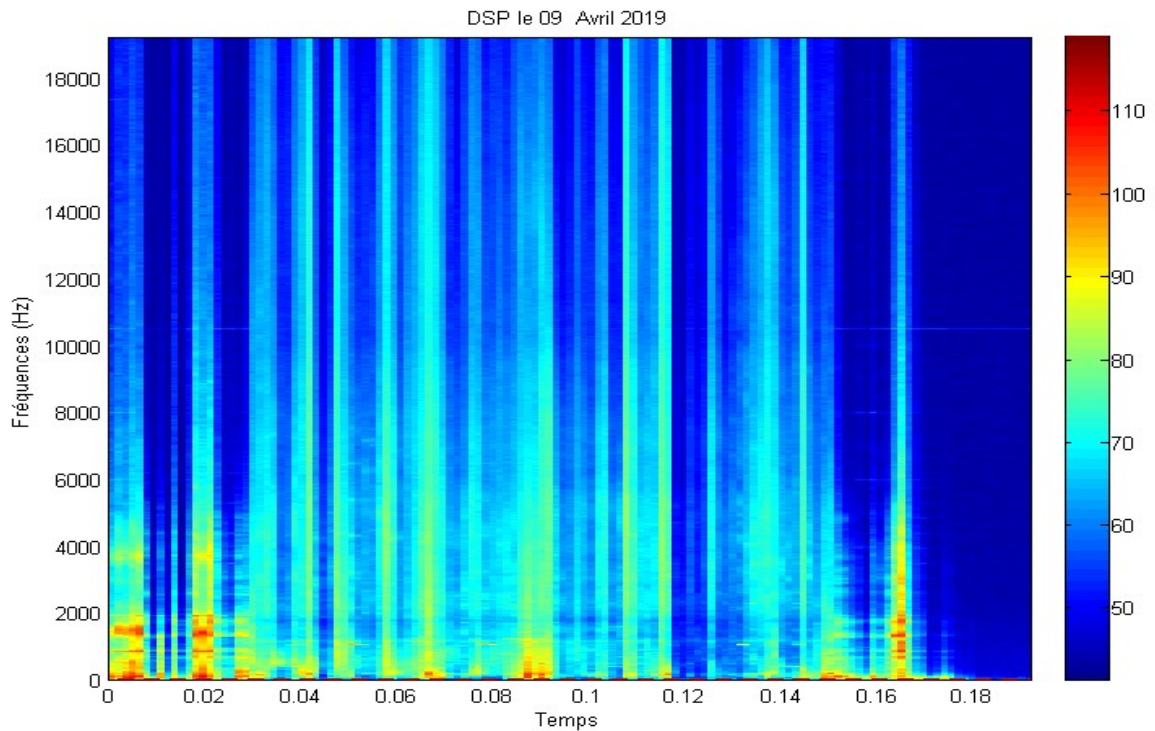


Figure 48: Evolution du niveau du bruit moyen (DSP-pwelch) de l'enregistrement sur le point le 09/04/2019.

Comme nous l'avons souligné précédemment, le trafic maritime à ce point d'enregistrement est intense dans la matinée. Cette situation est observée sur la majorité des spectrogrammes obtenus. Chaque barre sur le spectrogramme présente le passage d'un bateau. La majorité des bateaux passe à proximité de la cage de quelques kilomètres à quelques centaines de mètres, c'est pourquoi le niveau de bruit est très élevé dans les basses fréquences (< 2 kHz). Les niveaux les plus élevés enregistrés durant cet échantillon de temps sont ceux du début de l'enregistrement. Cela correspond à l'effet du bruit produit par notre bateau pour la mise à l'eau de la cage. Une heure après la dépose de la cage, le bruit est celui d'un bateau de pêche qui est passé juste à quelques dizaines de mètres de notre enregistreur. Finalement, vers 11h40, nous avons enregistré le passage de deux Ferries à quelques kilomètres de notre point de mesure.

Analyse fréquentielle :

Les résultats présentés jusqu'ici présentent une vue globale de l'évolution du niveau de bruit à l'échelle de la zone d'étude.

Nous remarquons que la densité spectrale de puissances moyennes enregistrée pendant cet intervalle du temps pour cette zone d'étude est très élevée. Le bruit anthropique domine quasiment toutes les fréquences. Même en considérant la faible profondeur et la forte absorption des ondes de basse fréquence par le milieu, dans notre cas, le niveau de bruit dans les basses fréquences reste élevé. Cela est dû à la faible distance entre les sources (bateaux) et l'enregistreur, car la cage a été déposée à côté du chenal.

Le niveau de bruit moyen est compris entre 90 dB à 1 m et 110 dB à 1 m, dans les très basses fréquences (< 20 Hz). Ce niveau reste constant jusqu'à 200 Hz et puis s'atténue pour se situer entre 80 dB et 90 dB dans la plage fréquentielle 30 Hz à 1 kHz, ce qui constitue un niveau relativement élevé.

Dans la plage fréquentielle 1 kHz - 2 kHz, le niveau de bruit atteint de nouveau les 100 dB à 1 m puis de 2 kHz à 10 kHz le bruit décroît linéairement jusqu'à atteindre 70 dB. Ceci montre que sur ces bandes de fréquence le bruit anthropique domine aussi le bruit de fond.

Ces figures montrent aussi que le niveau de bruit est plus élevé que le niveau de bruit dans le modèle de Wenz pour l'indice de trafic 7. Ce résultat montre que le niveau de bruit anthropogénique est fort à l'échelle de cette zone et que le trafic maritime domine toute les bandes fréquences de 1 Hz à 10 kHz. Cela se confirme avec les résultats de mesure de tiers d'octaves présentés dans la **Figure 50**.

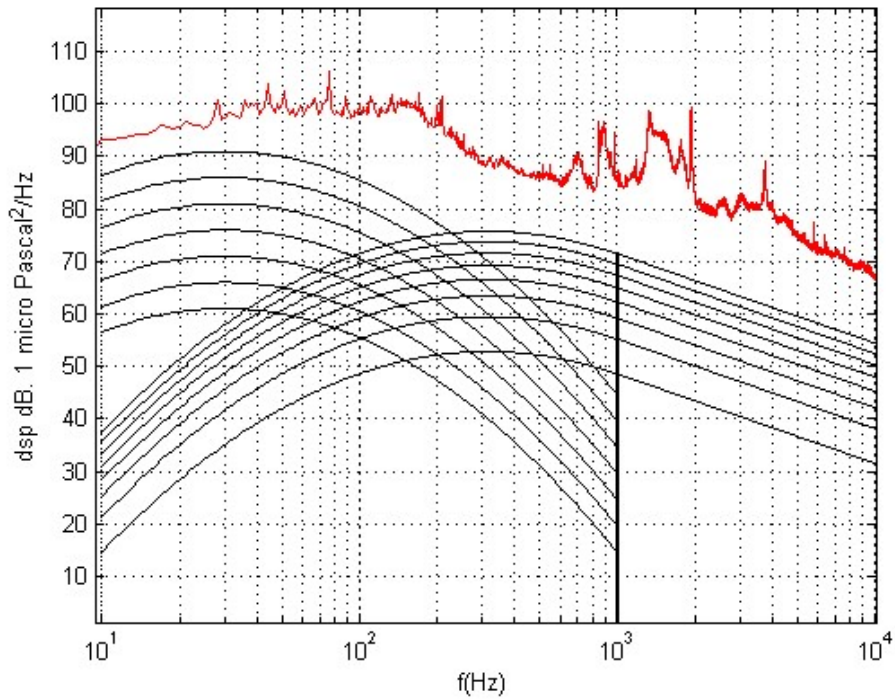


Figure 49: DSP moyenne de la période d'enregistrement (09-04-2019) avec le modèle de Wenz

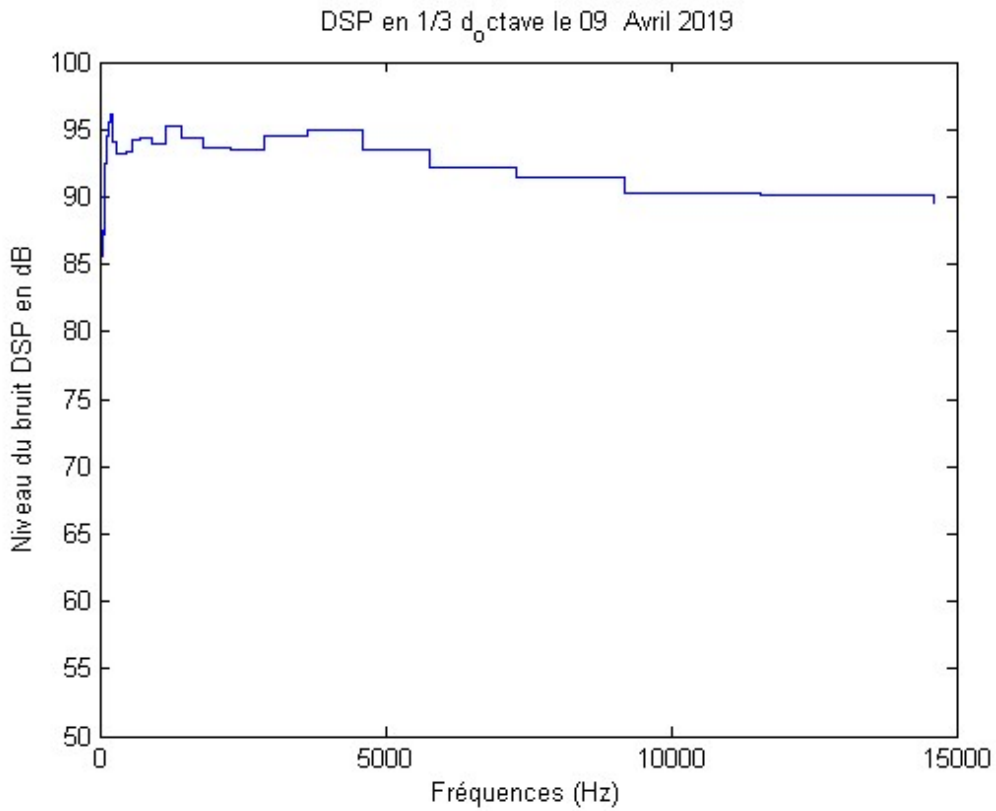


Figure 50: Niveau du bruit de la période d'enregistrement (09-04-2019) en 1/3 d'octave

Analyse statistique

A partir de la définition des percentiles et en raison du niveau de bruit qui atteint 70 dB pendant 10 % du temps d'enregistrement, nous constatons que l'effet du bruit des bateaux est quasiment présent sur toute la période.

La médiane du bruit est comprise entre 65 et 78 dB dans les basses fréquences (< 1 kHz) et entre 70 et 60 jusqu'à 10 kHz. Ce résultat nous montre que le niveau de bruit, pendant cet intervalle du temps, est 10 fois plus élevé que le niveau de bruit enregistré dans la zone du point 2.

A partir des résultats des percentiles 90 %, nous constatons que le niveau de bruit reste supérieur à 85 dB sur toutes les basses fréquences (< 1 kHz) pendant 10 % du temps.

Cet échantillon du temps ne présente que le niveau de bruit pendant la journée où les activités humaines sont au maximum. Le niveau de bruit peut être plus faible la nuit. Le principe retenu consiste à prendre au moins un échantillon du temps pour remplacer les données perdues avec l'enregistreur, et que cet échantillon soit au niveau maximum pour pouvoir comparer le bruit de la phase initiale avec celles des travaux ultérieurs.

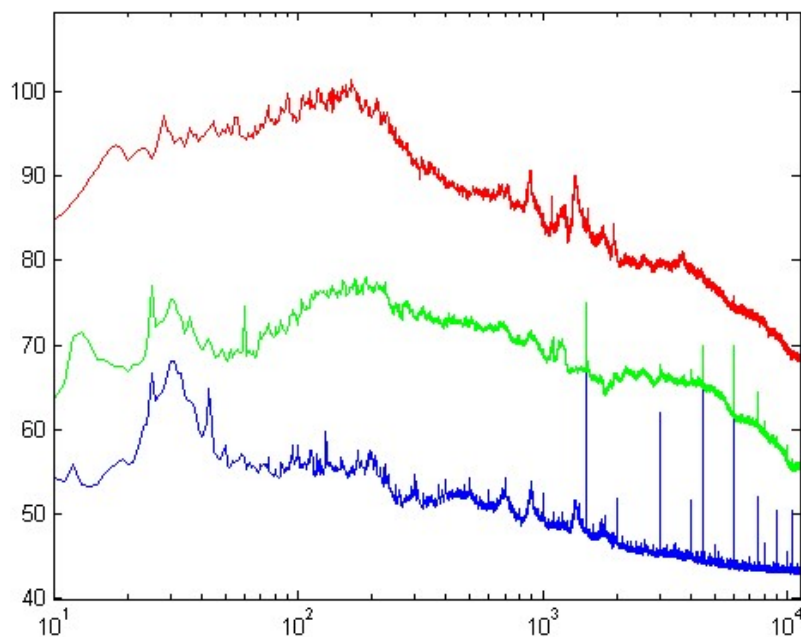


Figure 51: Les différents taux en percentiles 10 % (bleu), 50% (vert) et 90% (rouge) du (09-04-2019)

2.3.4 RÉSULTATS C-POD

L'étude de la présence des mammifères marins sur la zone a été effectuée en utilisant les C-POD installés dans les cages instrumentées. Le C-POD récupéré sur la cage (point 2) a enregistré des données de bonne qualité pour un total de 20 jours de déploiement du 14/11/2018 jusqu'à 04/12/2018.

Au cours de ces 20 jours, le C-POD a été complètement submergé. Cinq jours de détections étaient positifs pour le dauphin et quatre jours pour le marsouin.

Détections de dauphins: La majeure partie de l'activité des dauphins a été détectée le 20/11/2018, une activité moins importante ayant été enregistrée les 22/11/2018, 24/11/2018, 30/11/2018 et 02/12/2018. L'activité des dauphins le 20/11/2018 s'est produite de 22h à 23h, les autres détections ont été dispersées tout au long de la journée.

Détections de marsouins: les marsouins ont été détectés à un niveau bas les 17/11/2018, 18/11/2018, 20/11/2018 et 28/11/2018. Aucun profil journalier significatif de l'activité des marsouins n'a été identifié.

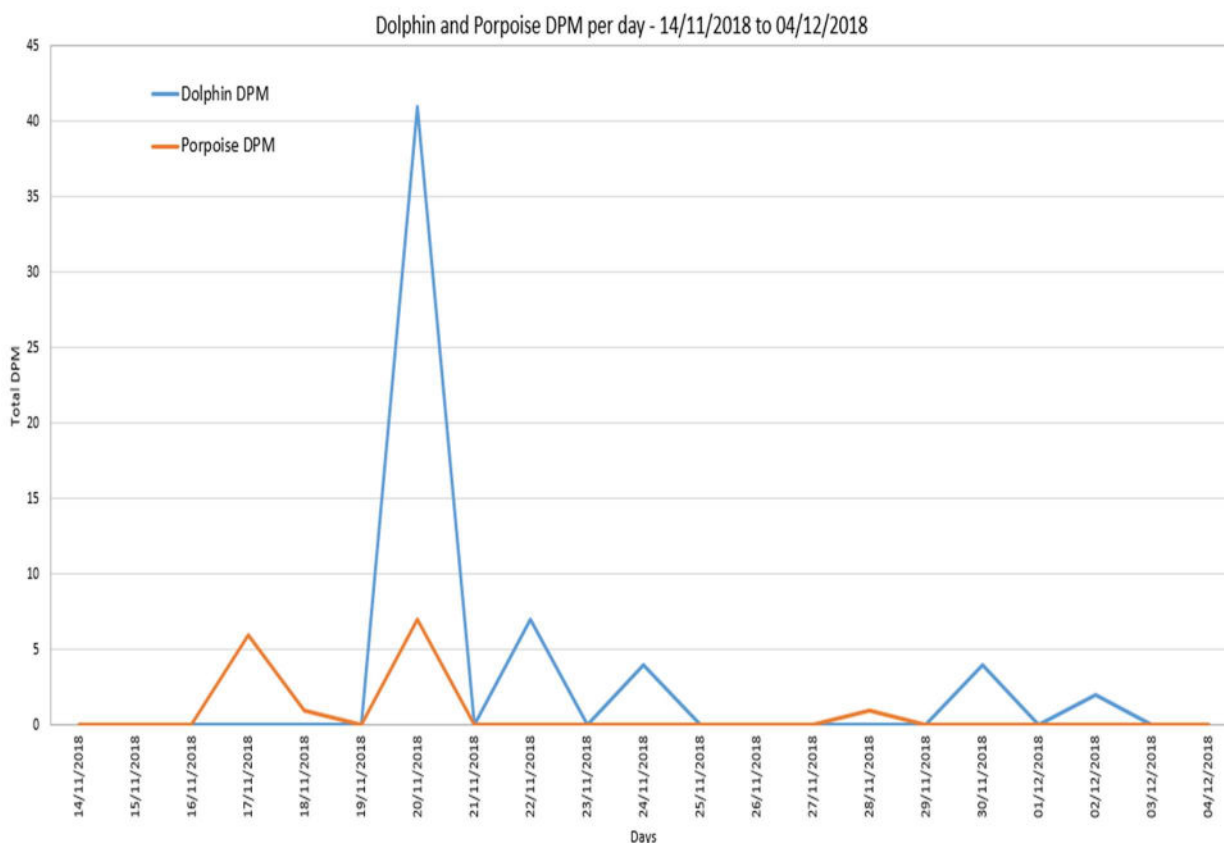


Figure 52: Détection positives de dauphin en bleu et marsouin en orange par jour durant la période du déploiement du C-POD-937

Tableau 5: Données de déploiement récapitulatif et statistiques de détection des dauphins

File	Début	Fin	Nombre de jour actif	Dauphin DPD % par jour	Dauphin DPM	Moyenne DPM/Jour
CPOD-937	14/11/2018 08 :44	04/12/2018 10 :59	20	23.81%	58	2.76

Tableau 6: Données de déploiement récapitulatif et statistiques de détection des marsouins

File	Début	Fin	Nombre de jour actif	Marsouin DPD % par jour	Marsouin DPM	Moyenne DPM/Jour
CPOD-937	14/11/2018 08 :44	04/12/2018 10 :59	20	19.05%	15	0.71

DPD % de jours : les jours positifs de détection en pourcentage par rapport aux jours de déploiement.

DPM : Minutes positives de détection, minutes où au moins un clic de dauphins ou de marsouin a été détecté.

De faibles niveaux d'activité des dauphins et des marsouins ont été détectés. Les données récapitulatives du tableau indiquent que le pourcentage de jours positifs pour la détection était de :

- 23,81%, résultant de 5 jours positifs pour la détection des dauphins
- 19,05%, résultant de 4 jours positifs pour la détection des marsouins

La **Figure 53** montre la répartition temporelle de l'activité des dauphins et des marsouins sur une journée. L'activité significative des dauphins le 20/11/2018 a eu lieu entre 22h et 23h. mais Il n'y avait pas de profil journalier significatif de l'activité des marsouins.

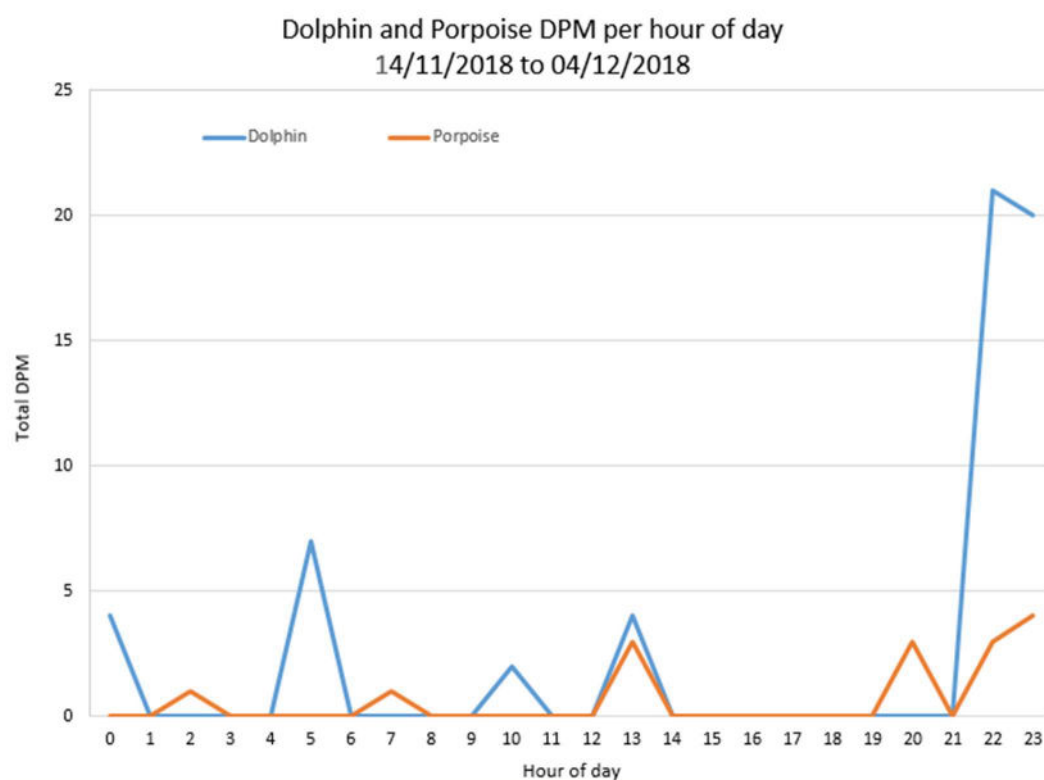


Figure 53: Horaire des détections positives de dauphin et de marsouin durant la période du déploiement du CPOD-937

3. CHAPITRE 3 : MODELISATION DU BRUIT AMBIANT

3.1 INTRODUCTION À LA MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU BRUIT

Le bruit ambiant est le résultat de la somme des bruits produits par de nombreuses sources sonores en mer **Figure 54**. Il est possible de distinguer des sources de bruit naturelles, biologiques et anthropiques. Le bruit issu de sources naturelles est produit par des processus physiques : l'activité tectonique (volcans sous-marins, tremblements de terre, etc.), le vent, les vagues ainsi que la pluie en frappant la mer en surface. Les sources sonores biologiques proviennent des animaux capables de vocaliser ou de produire des bruits au travers de mécanismes très différents. Parmi eux, on peut trouver les mammifères marins et certaines espèces de crevettes et de poissons. Le bruit d'origine anthropique est généré par les activités de navigation commerciale, militaire et de loisir, ainsi que par des ouvrages d'aménagement en mer ou encore par des opérations de recherche et exploitation des ressources marines.

Avec la modélisation numérique, nous réalisons une cartographie statistique du bruit ambiant de l'état initial avec différents indicateurs dont, en particulier, le DSP et par percentile. La cartographie du bruit du trafic maritime par simulation est une tâche complexe reposant sur de nombreux intrants environnementaux, des descriptions de la distribution spatio-temporelle des navires et de leur niveau d'intensité de la source, des hypothèses simplificatrices et des paramètres du modèle. Les principaux contributeurs de bruit ambiant considérés dans cette étude pour l'établissement des cartes sonores du bruit ambiant sont le trafic maritime et le vent (ou l'état de mer). Les principaux paramètres considérés pour l'influence de la propagation acoustique sont la célérité (liée à la température et la salinité), la nature des fonds, la bathymétrie et le marnage.

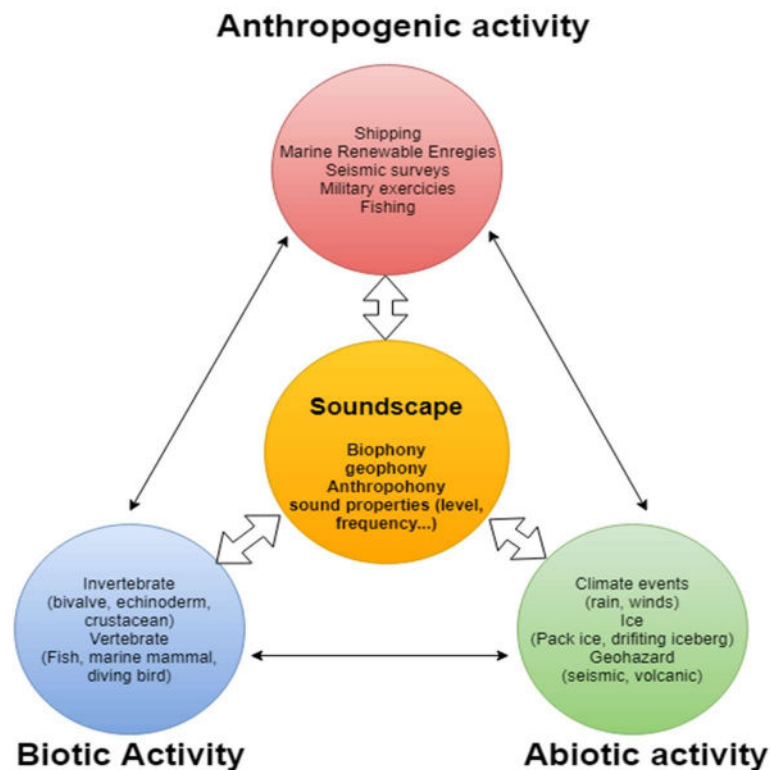


Figure 54: Les 3 composantes d'un paysage acoustique

3.2 PRINCIPE DES ÉTUDES DE MODÉLISATION DU BRUIT SOUS-MARIN

La modélisation du bruit sous-marin et de la propagation des ondes acoustiques en mer consiste à calculer les valeurs d'atténuation des ondes tout au long de leur propagation dans l'environnement. L'atténuation est la diminution de l'intensité acoustique ou du niveau de pression lors de la propagation d'une onde sonore dans un milieu entre deux points. Elle est causée par trois phénomènes indépendants :

- **La perte de divergence géométrique** qui est habituellement notée TL pour la perte de transmission. C'est l'énergie acoustique distribuée dans l'espace pendant la propagation de l'onde ;
- **L'absorption** qui est l'effet de la viscosité, de la relaxation moléculaire et de la friction inter-grains dans l'eau ou le sédiment. Plus la fréquence de propagation est élevée plus l'absorption du milieu est forte ;
- **Les interactions** avec les obstacles (une interface comme le fond de la mer ou un objet) dans l'eau qui génèrent une diffusion ou une réflexion.

Notre objectif principal consiste à modéliser les propagations des ondes acoustiques générées par les différents types de source de bruit dans une zone sélectionnée afin d'estimer le niveau du bruit total pour chaque point de la carte et à chaque niveau de profondeur en tenant compte des paramètres des milieux de propagation. Pour y parvenir, nous adoptons le plan suivant :

- Sélectionner une zone géographique d'étude ;
- Identifier les paramètres d'entrée du modèle de propagation ;
- Identifier les sources de bruit (Du Trafic Maritime dans notre cas) ;
- Choisir un modèle de propagation ;
- Calculer le niveau de bruit émis pour chaque source et son gabarit fréquentiel ;
- Calibrer le modèle avec des enregistrements *in situ* ;
- Additionner les pressions acoustiques de chaque point de la zone sélectionnée en 3D ;
- Faire une étude statistique du bruit en percentiles pour chaque bande de fréquence ;
- Etudier les corrélations des cartes de bruit avec la présence des mammifères marins.

Ci-dessous (Figure 55) nous présentons l'organigramme du principe de modélisation du bruit généré par le trafic maritime et l'impact sur les différentes espèces présentes dans la zone d'étude.

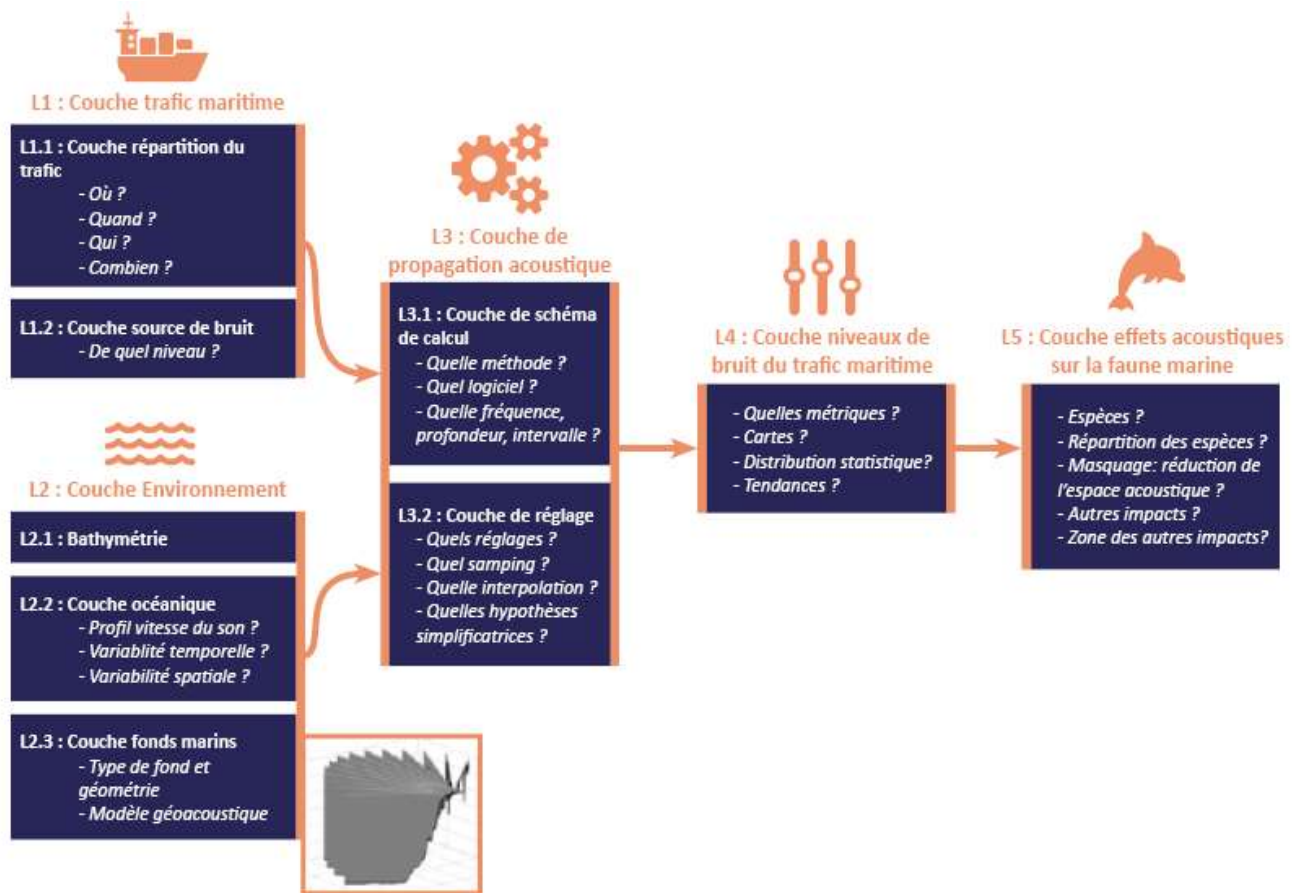


Figure 55: principe de modélisation du bruit anthropique à l'échelle d'une zone d'étude

3.3 LA ZONE DE MODÉLISATION

La connaissance de la zone d'étude est indispensable à la caractérisation de la propagation de bruit généré par les activités anthropiques comme le trafic maritime ou les travaux offshore ainsi qu'aux statistiques du bruit existant sur zone. Le choix de la zone d'étude nous permet aussi d'identifier les principales conditions environnementales de propagation, les sources de bruits associées aux types d'activité maritime et l'établissement des prévisions de distribution du bruit ambiant.

Les coordonnées de la zone d'étude sont fixées de manière empirique autour de la zone d'étude. Elles ont été calculées par rapport au point de localisation des futurs travaux. Un rayon de 10 km autour de la zone des travaux a été choisi car les pertes de transmission ($TL=20 \log_{10}(R)$) sont de l'ordre de 80 dB. Cette perte d'énergie acoustique ramène les niveaux de bruit des navires aux alentours de la zone à la valeur du bruit ambiant (Abiotic activity).

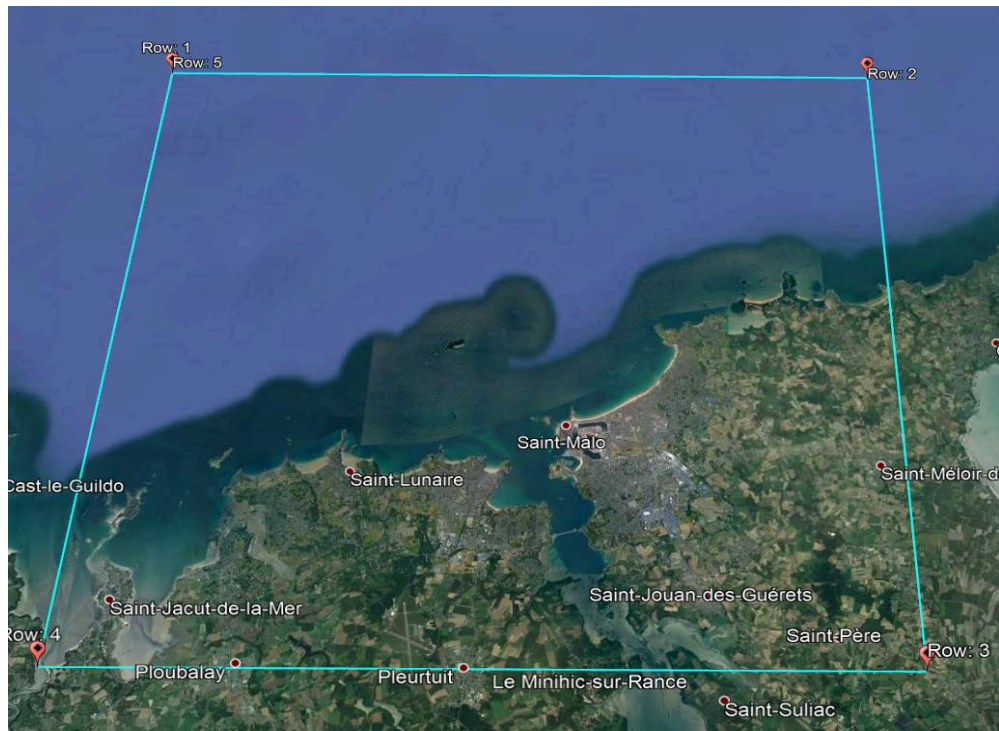


Figure 56: La zone d'étude. Le carré bleu délimite la zone de modélisation de bruit.

3.4 RECUEIL DES DONNÉES D'ENTRÉE DU MODÈLE

3.4.1 Les données utilisées dans la modélisation du bruit ambiant

Les paramètres de l'environnement (3.4.2 Les données de l'environnement) et du trafic maritime sont collectés à l'échelle de la zone d'étude car :

- Ils ont des effets sur les conditions de propagation acoustique ;
- Ils génèrent des bruits propres ;
- Ils peuvent être corrélées à la présence de mammifères marins.

Tableau 7: Liste exhaustive des types et des sources de données

Types de données	Sources de données
<ul style="list-style-type: none"> • AIS • Bathymétrie • Température • Salinité • Vent • Précipitation • Marée • Nature du fonds 	<ul style="list-style-type: none"> • CLS+ AISHUB • Emodnet • Mesures réalisées in-situ • NOAA • SHOM • Copernicus

3.4.2 LES DONNÉES DE L'ENVIRONNEMENT

Ces données environnementales décrivent le milieu de propagation des ondes acoustiques, plus ces données sont précises ou proches de la réalité, plus les résultats de la modélisation seront précis. C'est pour cette raison que les sources de ces bases de données et leurs résolutions sont essentielles pour une modulation efficace. Une calibration passive et active avec des mesures *in situ* permet de corriger et ajuster les paramètres de l'environnement.

Dans cette section, nous allons définir et détailler l'importance de chaque paramètre sur la propagation de l'onde acoustique ainsi que les sources de données utilisées dans cette étude.

3.4.2.1 Bathymétrie

La propagation des ondes acoustiques dans l'océan peut être définie en deux phases principales : la propagation libre et les interactions avec les frontières et les obstacles. Lorsqu'une onde acoustique rencontre le fond, une partie est transmise au sédiment, tandis que l'autre partie est réfléchi. C'est pourquoi les pertes d'énergie dans les eaux peu profondes sont beaucoup plus importantes que dans les eaux profondes et donc le niveau de bruit est plus bas dans la zone peu profonde surtout pour les ondes de basse fréquence.

La forme du fond est également importante. De nombreux phénomènes peuvent être considérés tels que la diffusion des ondes, la réflexion totale ainsi que l'angle d'incidence de l'onde dans les sédiments. Ceux-ci affectent la quantité d'énergie transmise et réfléchi. Par conséquent, la résolution des données bathymétriques est un paramètre important dans le choix de la base de données.

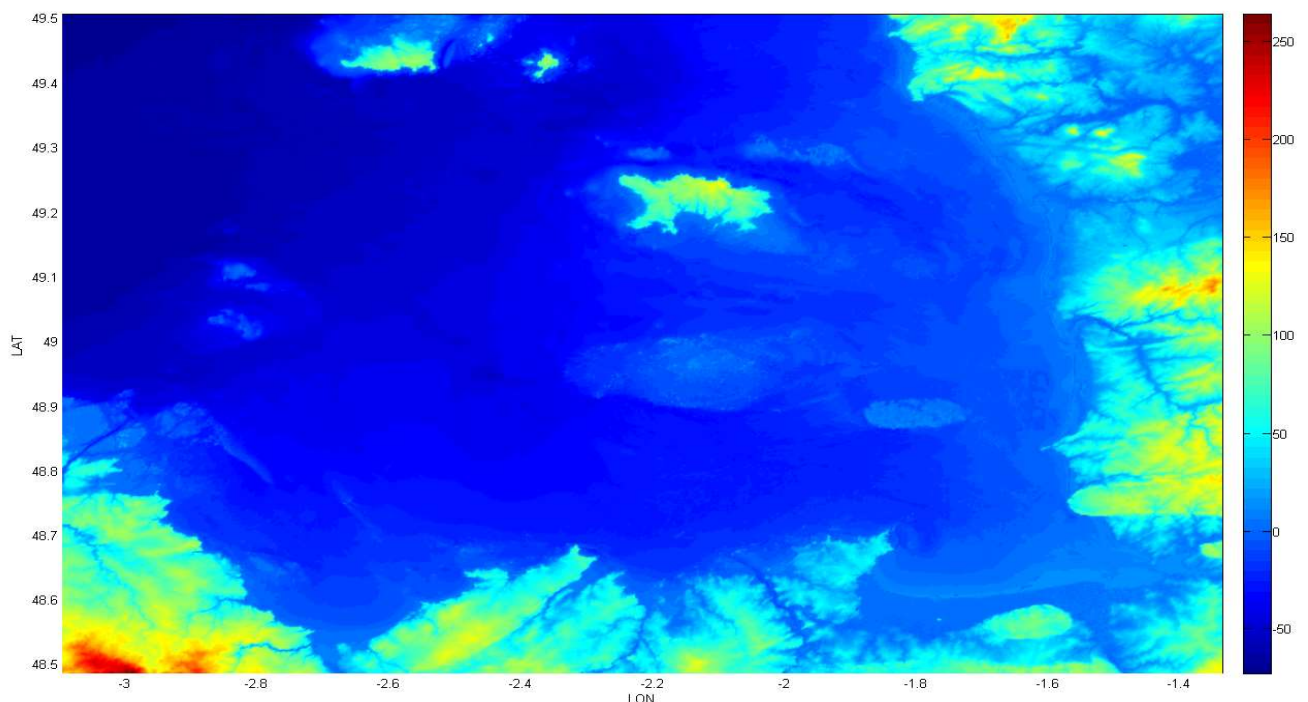


Figure 57: Bathymétrie de la zone d'étude, source de données Emodnet.

Plusieurs sources proposent des données bathymétriques présentant des résolutions plus ou moins acceptables. Nous avons choisi EMODnet comme source de données de la bathymétrie car la

résolution proposée est de l'ordre de quelques dizaines de mètres. Il s'agit d'une des meilleures résolutions disponibles ; elle est surtout assez fine par rapport à la taille de la zone d'étude.

3.4.2.2 Nature du fonds

La formation de sédiments conduit, dans la plupart des cas, à leur stratification verticale.

L'influence du fond marin est beaucoup plus complexe que celle de la surface, de nombreux phénomènes se produisent simultanément : diffusion par le relief de l'interface du fond, la pénétration de l'onde incidente dans les sédiments, l'amortissement des sédiments, les réfractions et les réflexions dans les couches sédimentaires et l'atténuation des ondes P (longitudinales) et S (de cisaillement). Avec le type de sédiment nous pouvons appréhender les valeurs de la densité et le coefficient d'atténuation de l'onde acoustique dans ce milieu.

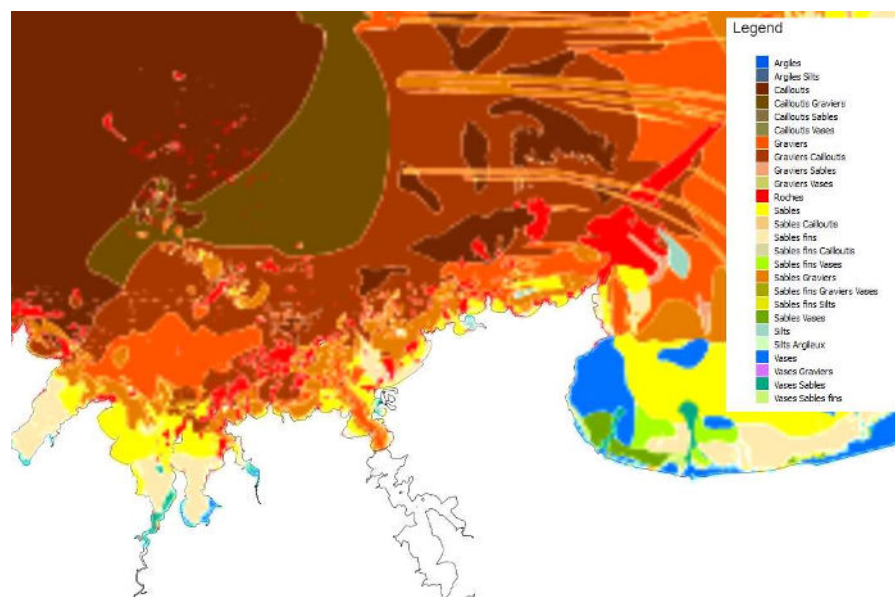


Figure 58: Carte de nature du sédiment. (Source SHOM)

Nous avons choisi les données proposées par le SHOM comme source de données de sédimentologie. Les types de sédiments qui englobent la zone d'étude sont un mélange de sable, de roche et de graviers. Vers le nord de la zone d'étude le substrat est constitué de cailloutis.

3.4.2.3 Le profil de vitesse du son

Du fait de la limitation du milieu de propagation par la surface et le fond marin, l'onde acoustique subit des réflexions successives sur les interfaces. De plus, les variations de la vitesse du son peuvent provoquer des déformations des trajets d'ondes sonores. La vitesse du son dépend à la fois de la température, de la salinité et de la profondeur, et varie dans le même sens que ces trois grandeurs. C'est pour cette raison que la température et la salinité de la zone sont deux paramètres-clés pour le calcul du profil de vitesse du son dans le milieu de propagation.

Ce qui nous intéresse dans l'étude de modélisation sont les profils de la température et de la salinité tout au long de la colonne d'eau. Nos données environnementales sont récoltées principalement à

l'échelle européenne via Emodnet et Copernicus avec des bouées *in situ* et avec des modèles validés au moyen de données de calibration réelles.

Nous avons choisi Copernicus comme source de données pour les paramètres physiques de la zone d'étude. Afin d'avoir les résultats les plus proches possibles des données réelles, le profil de vitesse est calculé pour chaque période de 8 heures au cours de la période de l'étude. La **Figure 59** montre la différence entre le profil de vitesse de la matinée (en bleu), de la journée (en rouge) et de la soirée (en vert). La différence entre les valeurs maximales et minimales dans la journée dépasse les 4 m / s d'où l'intérêt de calculer le profil de vitesse pour chaque simulation.

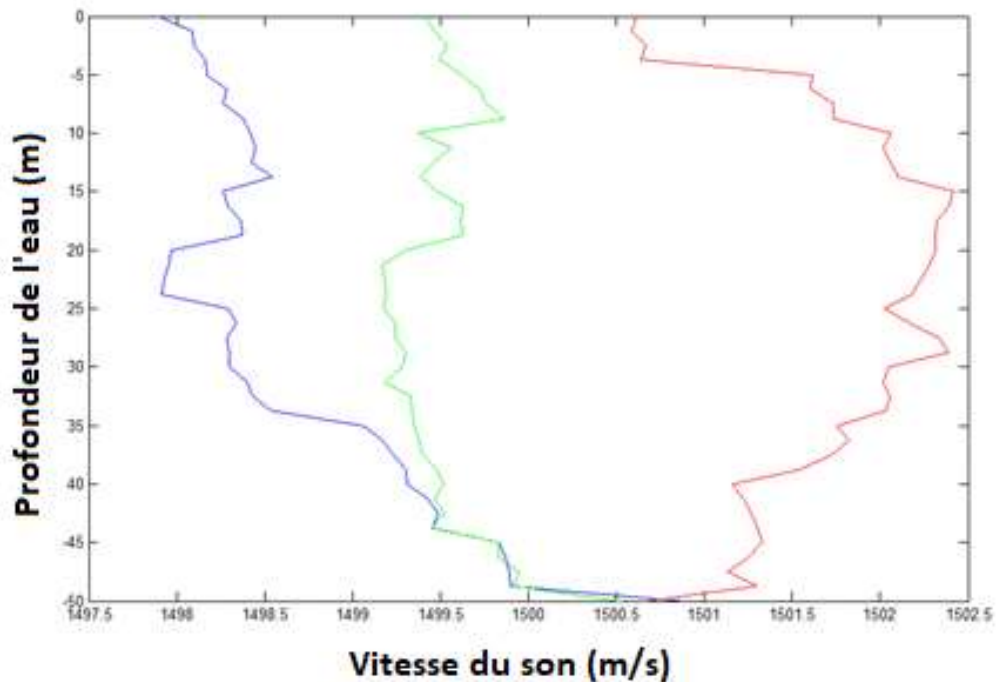


Figure 59: Les Profils de vitesse calculés pour chaque période de 8 heures de la journée le long de la colonne d'eau, en bleu la matinée, en vert le soir et en rouge à midi

3.4.2.4 Marée

La marée joue sur la profondeur de l'eau qui affecte la propagation des ondes acoustiques, surtout pour de faibles niveaux de hauteur d'eau. A titre d'exemple, dans la zone d'étude, le niveau minimum du fond est de l'ordre de 8 m et le marnage maximal sur la zone est de l'ordre de 8 m (Figure 60). Cette valeur présente 100 % de la hauteur d'eau totale. La différence de niveau d'atténuation d'énergie acoustique dans les deux différents cas de propagation peut atteindre des valeurs très importantes, de l'ordre de 10 dB, sur une distance de propagation de quelques kilomètres.

Nous avons choisi les données proposées par le SHOM comme source de données de marée. Le niveau de marée qui englobe la zone de propagation est de l'ordre de 8 à 15 m. Le caractère ondulatoire des marées impose de choisir une valeur moyenne de la distribution des valeurs présentes sur la zone afin de s'approcher des valeurs réelles.

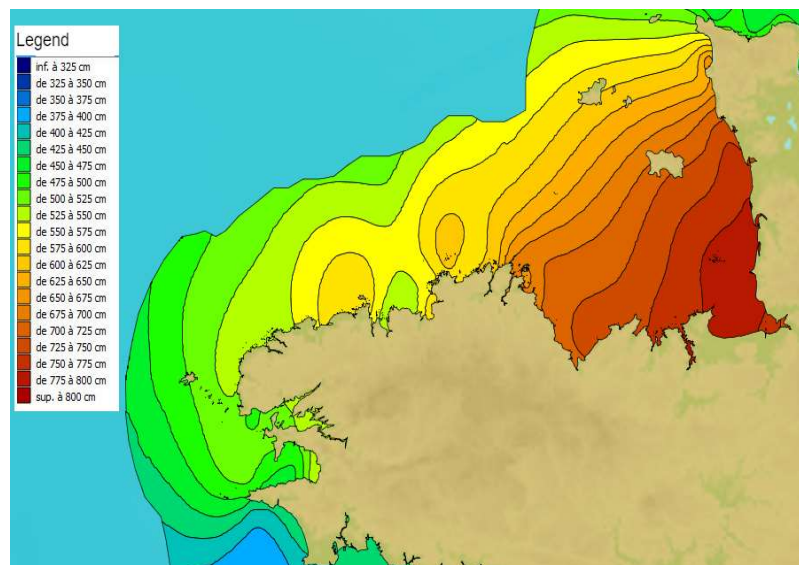


Figure 60: Les valeurs de marée extrêmes, source SHOM

3.4.3 Les données anthropiques

3.4.3.1 AIS

AIS (Automatic Identification System) est un système d'échange automatisé de messages entre navires par radio VHF. Généralement, ce système est utilisé pour éviter les collisions, identifier et localiser les informations. Les données AIS sont également utilisées pour la connaissance du domaine maritime, la recherche et le sauvetage, la surveillance de l'environnement et les applications de renseignement maritime. Dans notre cas, ce système nous permet de connaître l'identité, le statut, la position en temps quasi réel, ainsi que la taille, la vitesse, la charge et l'itinéraire des navires situés dans la zone. Ainsi, les données AIS sont structurées de manière à pouvoir être directement exploitées par des algorithmes de modélisation du bruit sous-marin.

Grâce à l'installation d'antennes AIS, SINAY est contributeur de deux réseaux de distribution des données AIS. Cette situation nous offre un accès privilégié aux flux de données en temps réel. SINAY structure les données AIS dans sa plateforme de manière qu'elles soient directement exploitables par des algorithmes de calcul tels que les algorithmes de modélisation du bruit sous-marin. De plus, nous suivons plus particulièrement en temps réel les navires impliqués sur la zone d'études.

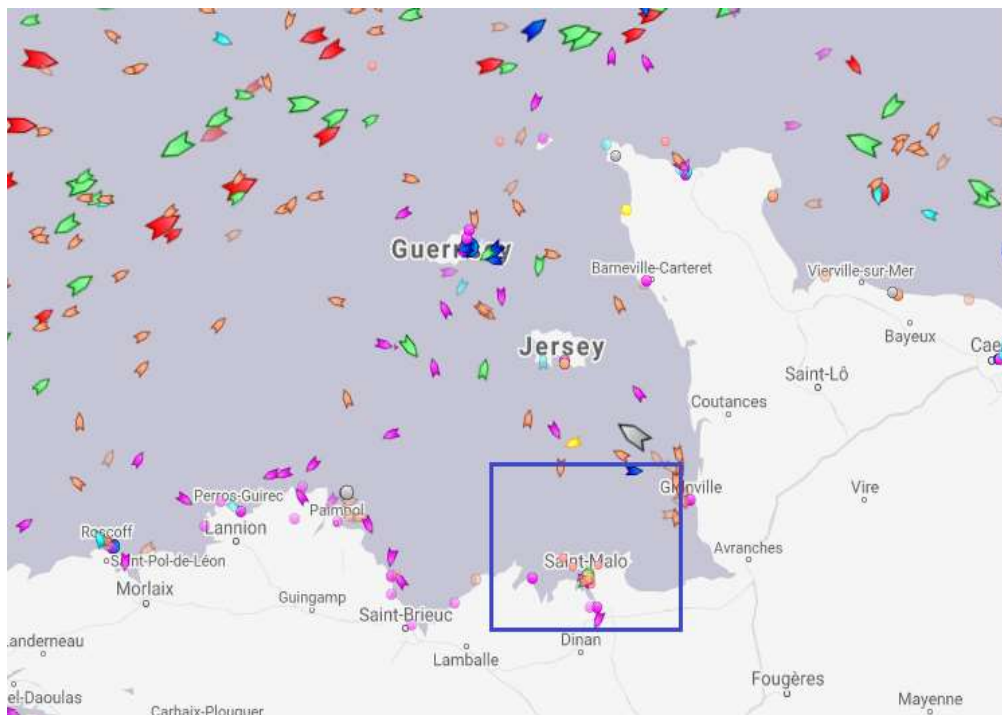


Figure 61: Un exemple des données AIS à un instant T sur la zone d'étude (source marine trafic)

3.4.3.2 Complément des données AIS

Le satellite AIS (S-AIS) permet de localiser les navires dans les zones les plus reculées du monde, en particulier sur les océans et hors de la portée des systèmes AIS terrestres par images satellitaires. En s'associant à certaines informations maritimes de confiance comme le réseau AIS, ce système offre l'image situationnelle la plus complète de l'activité mondiale des navires aujourd'hui. Dans notre cas, nous utilisons ces données satellitaires afin de compléter notre réseau de données plus spécifiquement les bateaux de pêche avec une taille inférieure à 12 m. Ces types de bateau de pêche ne disposent pas d'antenne AIS.

3.4.3.3 Densité du trafic maritime

La densité du trafic global sur la période d'étude du (01/01/17 au 31/12/17) (voir **Figure 62**) peut nous permettre de trouver les routes maritimes et identifier les zones qui génèrent le plus de bruit. Il existe cependant de nombreuses façons de voir la distribution du trafic maritime pour effectuer une modélisation. Dans notre cas nous utilisons la route réelle complète suivie par les navires individuels dans la modélisation, nous considérons que chaque navire est une source sonore individuelle.

Comme nous pouvons l'observer sur la **Figure 61**, notre zone d'étude présente une densité de trafic maritime élevée.

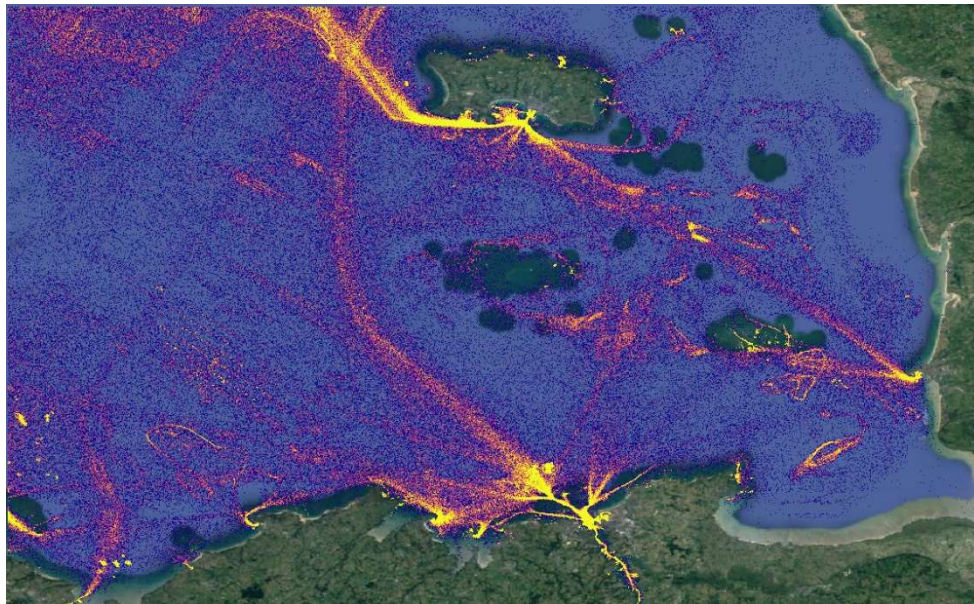


Figure 62: Exemple de cartographie qui montre la densité du trafic autour de la zone d'étude

3.5 CARACTÉRISATION DES SOURCES SONORES

Dans cette étude de l'état initial, aucune activité anthropique spécifique n'a été communiquée. Nous nous concentrons sur le bruit généré par le trafic maritime dans la zone d'étude et sur un rayon de 10 km autour de cette zone.

Les sources sonores utilisées dans les modèles de propagation sont caractérisées à partir de la littérature scientifique, des enregistrements *in situ* effectués par SINAY au cours de ses différentes campagnes et sur des modèles d'estimation.

Tableau 8: Liste des publications utilisées pour estimer SL le niveau du bruit généré par le vent et les navires

Nature du bruit	Publications sources
Bruit généré par le vent	(Wenz, 1962)
Bruit généré par les navires	(MAGLIO, <i>et al.</i> , 2015), (Wales & Heitmeyer, 2002), (Hildebrand, 2009), (ARVESON,2000), (MCKENNA,2012), (MERCHAN, 2012)

3.5.1.1 Bruit du vent:

Les sons naturels de l'océan sont produits par le vent, les vagues, les précipitations, les événements sismiques naturels et les créatures qui viennent créer un environnement bruyant (Wenz 1962, Tavolga 1967). Pour prédire le niveau du bruit ambiant généré par les conditions météo, et surtout le vent, nous utilisons le modèle de Wenz. Ce modèle nous permet de

représenter des spectres moyens de bruit ambiant généré par le vent pour différents niveaux d'expression, et de l'état de la mer (ou des vitesses de vent de 1 jusqu'à 35 par pas de 5). Ci-dessous, la Figure 63 montre un exemple de niveau de bruit généré pour différentes vitesses du vent de 1 à 35 m/s avec un intervalle de 5 m/s.

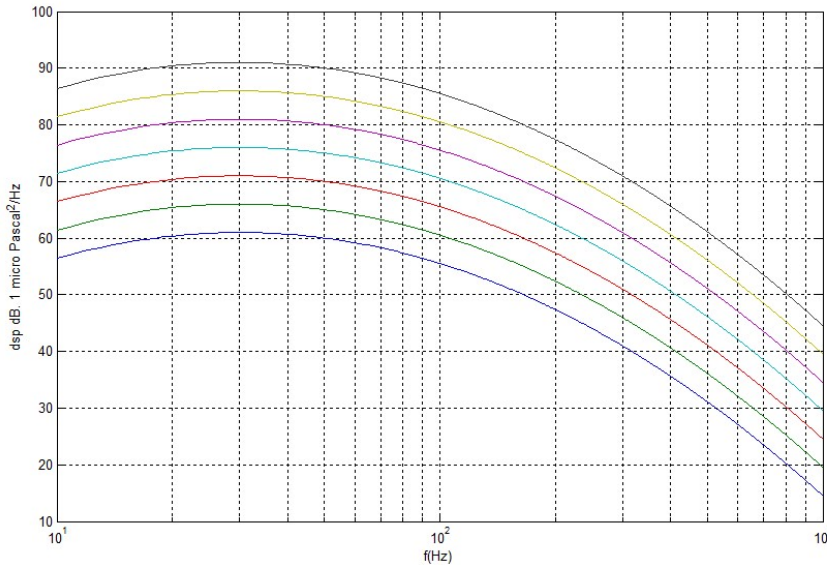


Figure 63: Niveau de bruit en fonction de la vitesse du vent

A partir des enregistrements réalisés *in situ* dans la zone d'étude (sur les points 1 et 2), nous avons constaté que le bruit du vent est négligeable par rapport au niveau de bruit rayonné par le trafic maritime. C'est pour cette raison que nous négligeons le bruit du vent dans notre modèle pour cette étude.

3.5.1.2 Bruit du trafic maritime :

Le niveau source (SL) est l'entrée du modèle pour prévoir le bruit de la navigation dans l'océan. Plusieurs phénomènes physiques peuvent générer du bruit dans le déplacement d'un navire. Par exemple l'effet de la cavitation, de la vibration de la ligne d'arbre, de la vibration de la machine tournante transmise par la coque etc. (voir Figure 64). Chacun de ces phénomènes produit un bruit sur une bande de fréquence différente et avec un niveau différent. Ce qui nous intéresse dans cette étude sont les basses et moyennes fréquences qui ont le niveau le plus élevé et qui se propagent mieux dans le milieu de propagation. Nous nous concentrons alors sur le bruit des hélices des navires qui génèrent le plus de bruit situé dans les basses fréquences avec l'amplitude la plus élevée. Le niveau de ce bruit dépend du type de navire, de sa taille et de sa vitesse.



Figure 64: Liste de source de bruit lors de déplacement d'un navire

La zone d'étude est un lieu de passage de tous types de navires : des voiliers et bateaux de pêche jusqu'aux grands bateaux de commerce et de transport. Pour effectuer des mesures efficaces du niveau de bruit généré réellement par chaque type de bateau, il faut suivre un protocole standard, difficile à réaliser, car il nécessite une certaine profondeur (environ 150 m) qui dépasse largement le niveau de l'eau dans la zone d'étude (maximum 35 m). Pour ces raisons, nous utilisons des modèles qui simulent le niveau de source, de plus cette démarche a montré son efficacité dans plusieurs études.

Liste non-exhaustive des noms des modèles utilisés aujourd'hui :

- Recall of ANSI standard;
- Biases and limitations of SL collection in shallow water;
- Ross model;
- Randi model;
- Wales and Heitmeyer;
- Simard *et al.*,

Le graphique suivant (**Figure 65**) illustre des gabarits acoustiques (SL) utilisés pour mesurer le niveau d'émission SL d'un bateau avec les différents types de modèles utilisés dans la littérature.

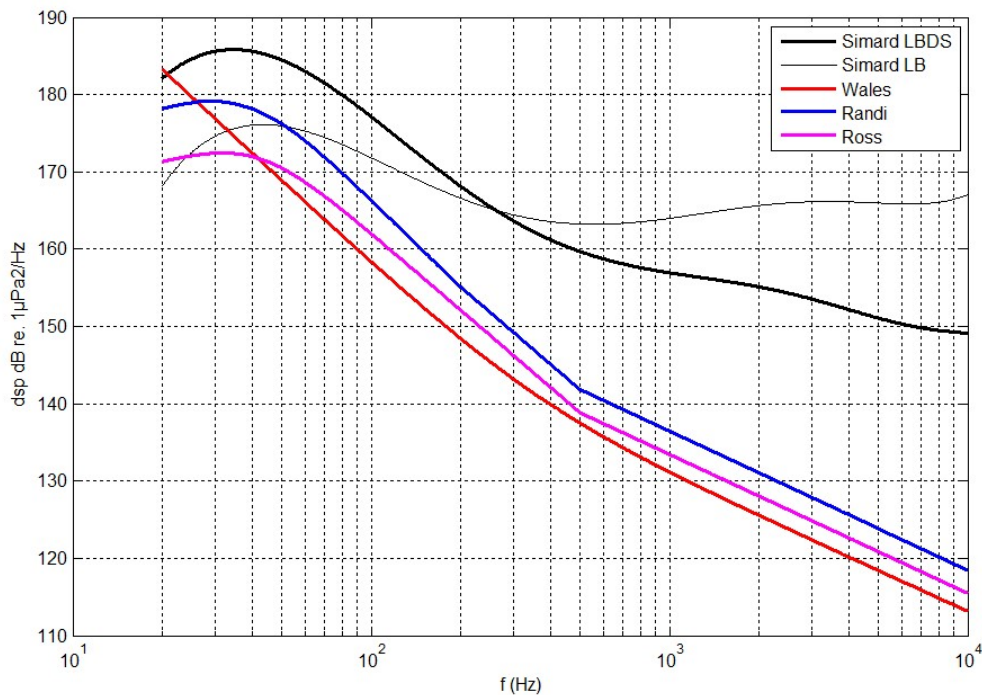


Figure 65: Niveau d'émission DSP d'un bateau estimé avec les différentes approches présentes dans la littérature

Compte tenu du nombre de méthodes proposées, nous recherchons les méthodes les plus efficaces dans notre cas. Après recherche bibliographique, nous avons constaté que chaque méthode présente des avantages par rapport aux autres, en relation avec l'état de la mer, les informations disponibles sur le navire, la profondeur de l'eau, la distance de mesure, etc. Le choix du modèle a été effectué de manière empirique en utilisant les données de calibration (voir partie calibration).

3.6 CHOIX DU MODEL DE PROPAGATION

Il existe plusieurs méthodes mathématiques pour résoudre l'équation d'onde, pour calculer les pertes de transmission et tenir compte des phénomènes physiques de la propagation de l'onde acoustique. Les méthodes diffèrent car elles sont spécialisées pour l'environnement dépendant du champ lointain et du champ proche, « Range dépendant (RD) »¹ ou « Range indépendant (RI) »² ; cf tableau ci-dessous (Farcas, et al., 2016).

Le choix du modèle de propagation est directement lié à la nature et à la profondeur du fond. Les méthodes de modélisation les plus adaptées pour cette étude (Tableau 9), petit fond (< 30 m) dans le cas de RD est l'équation parabolique pour **les basses fréquences**, et le tracé de rayons pour **les hautes fréquences**.

¹ Variation des paramètres du milieu de propagation en fonction de la distance

² Les paramètres du milieu de propagation ne varient pas avec la distance

Tableau 9 : Comparaison d'efficacité des différentes méthodes de modélisation dans les différentes conditions de fonds et de sources

Les approches	Algorithme de modélisation	Applications							
		Zone peu profonde				Zone profonde			
		Basses Fréquences		Hautes Fréquences		Basses Fréquences		Hautes Fréquences	
		RI	RD	RI	RD	RI	RD	RI	RD
Tracé de rayons	Bellhop (Porter et Liu)								
Mode Normaux	Kraken (Porter)								
Équation parabolique	RAM (Collins)								

Adéquat
 Pas adéquat

Les modèles de propagation choisis pour simuler la propagation des ondes sonores générées par les bateaux dans la zone d'étude sont RAM et Bellhop.

Les implémentations des méthodes de simulation de la propagation sont réalisées par SINAY sur la base des codes publiés par Porter et Collins (<http://oalib.hlsresearch.com/>). Ces codes sont implémentés sur le cluster de calcul AIMS.

Les entrées du modèle sont :

- Géométrie : bathymétrie, source récepteur, rugosité de surface et du fond ;
- Colonne d'eau : profil de célérité (variations en z et variations en r) ;
- Modèle géo-acoustique du fond : nombre de couches, profil de célérité, densité et atténuation des ondes de compression et des ondes de cisaillement ;
- Invariance en R (RD ou RI) ;
- Propriétés de la source : paramètres relatifs aux signaux émis ;

Les sorties du modèle sont :

- Les paramètres permettant d'exprimer la forme d'onde du signal reçu (fonction de transfert dans l'espace de Fourier, temps de propagation et atténuation) ;
- Cartes des pertes de transmission ou équivalent de $RL(r,z,f)$;
- Trajectoires suivies par les rayons sonores de la source jusqu'aux récepteurs.

3.7 RÉOLUTION

Angle de propagation :

On projette le milieu de propagation 3D de chaque source en un ensemble de milieux 2D. La résolution du maillage de l'espace dépend du pas d'angle choisi. La dimension de ce dernier affecte énormément la résolution des résultats et le temps de calcul.

Dans cette étude, nous avons fixé le pas d'angle à 0,5 degré car nous disposons de capacités de calcul importantes.

Nombre de récepteurs horizontaux :

Ceci est calculé par (Distance/Nombre REC), le nombre de récepteurs horizontaux présente la distribution uniforme des récepteurs le long de la distance de propagation.

À titre d'exemple, dans notre cas d'étude, pour une distance de propagation de 30 km et pour un récepteur tous les 10 m, nous disposons de l'équivalent de 1000 récepteurs pour chaque niveau de profondeur.

Nombre de récepteurs verticaux :

Ceci est calculé par (profondeur/nombre de récepteurs). La distribution est toujours uniforme et le choix du nombre de récepteurs est arbitraire en relation avec l'exigence de la résolution. Dans notre cas d'étude, nous avons choisi un pas de 2 m. La seule différence avec les récepteurs horizontaux c'est qu'au lieu de choisir une distance de propagation, la valeur est fixée par la profondeur du fond.

Nombre de fréquence pour chaque source :

Chaque source dispose de plusieurs fréquences d'émission. Afin de produire des résultats crédibles et les plus proches des données réelles, nous calculons pour chaque fréquence son niveau d'émission présente dans la DSP (Figure 65) pour tous les tiers d'octaves en basse fréquence (< 4 kHz).

3.8 CALIBRATION ACTIVE

L'obtention d'une modélisation calibrée nécessite de procéder à une phase de mesures actives à l'échelle de la zone étudiée. Cette dernière consiste à faire se propager dans la zone ciblée, via la chaîne de calibration, des signaux acoustiques dont le niveau et la forme sont connus et contrôlés par ordinateur.

Ci-dessous quelques exemples de signaux émis et leurs niveaux d'émission :

Les signaux émis

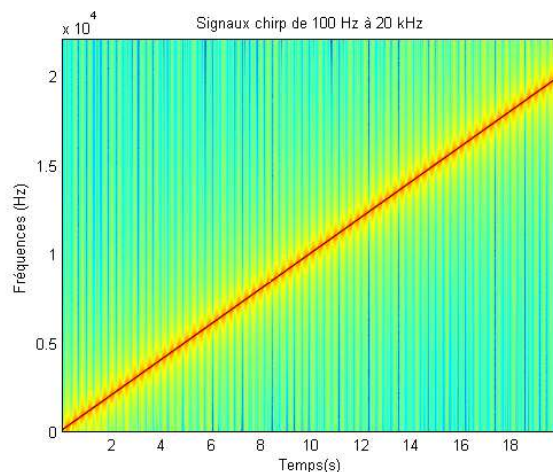


Figure 66: Signal Chirp (signal modulé en fréquence) de 100 Hz à 20 KHz pour trouver la fonction du transfert de toutes les fréquences du milieu de propagation

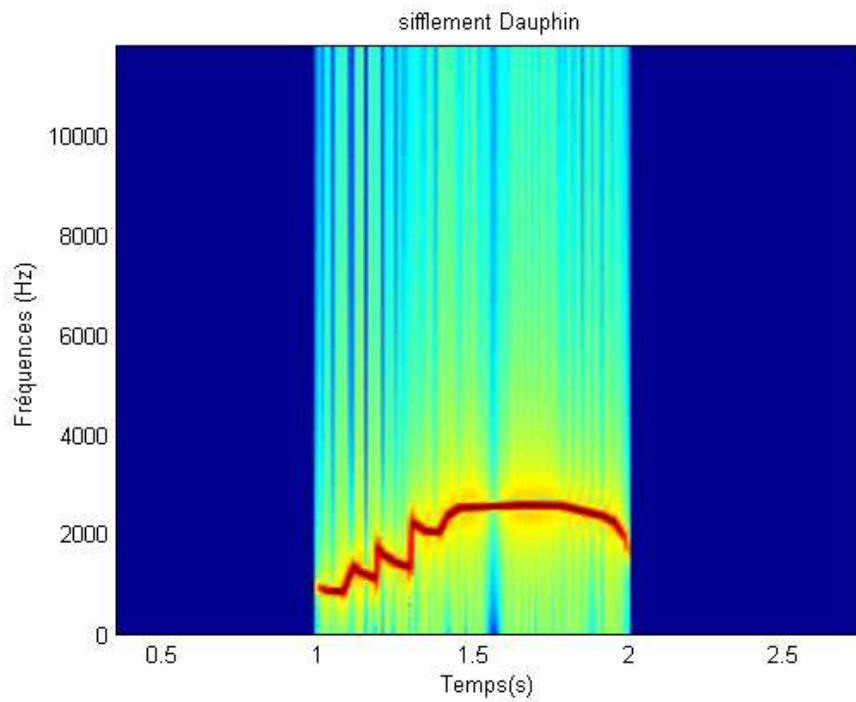


Figure 67: Des signaux de sifflements des dauphins pour étudier l'effet du masquage avec le bruit ambiant

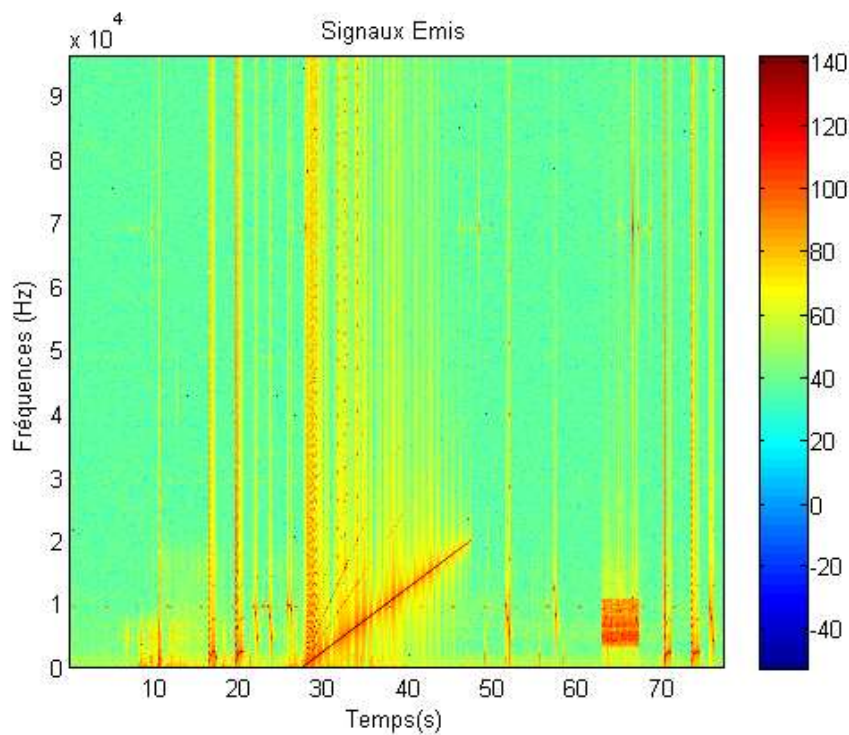


Figure 68: La séquence des signaux envoyé pour chaque point mesuré à 1 m du Lubell.

Les niveaux d'émission :

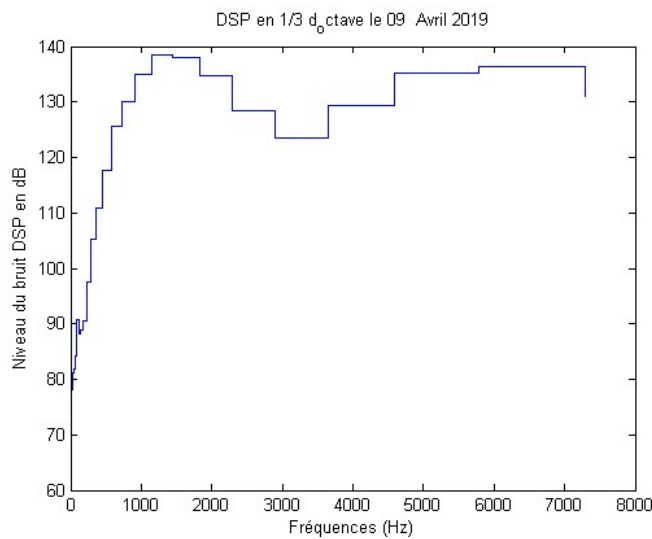


Figure 69: Niveau d'émission pour les points les plus proches

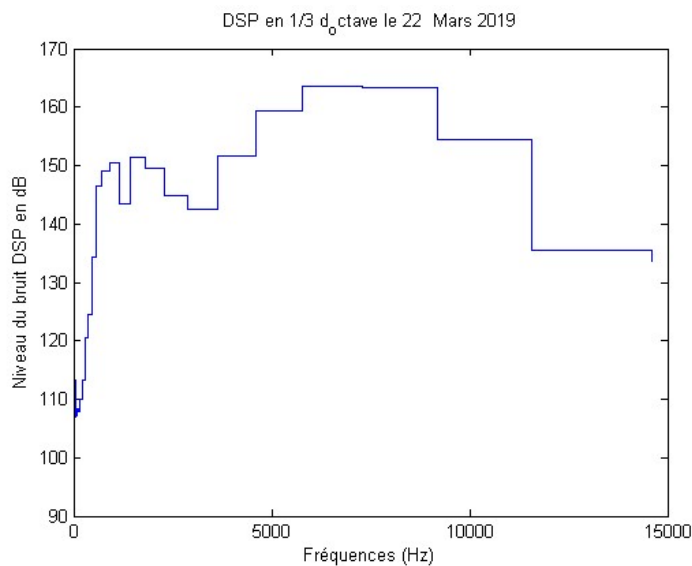


Figure 70: Niveau d'émission pour les points les plus loin

La séquence est constituée d'un ensemble de signaux naturels comme des sifflements de dauphin et des signaux artificiels comme des signaux modulés en fréquence. La durée de chaque séquence est d'environ une minute.

Les émissions sont réalisées à partir d'un ensemble de positions choisies (voir Figure 71 et Figure 72) et sont captées par un enregistreur. La comparaison des niveaux des résultats modélisés avec les niveaux réellement mesurés permet d'identifier les paramètres du milieu et donc de calibrer le modèle.

Matériels utilisés pour la calibration active :

Equipements pour réaliser les calibrations par émissions sonores contrôlées.

Moyens matériels :

- (a) Enregistreur autonome,
- (b) Transmetteur Lubel,
- © Système de contrôle des émissions par ordinateur.

(Source : SINAY)



The figure consists of three photographs labeled (a), (b), and (c). (a) shows a cylindrical autonomous recorder mounted on a wooden surface. (b) shows a blue transmitter unit on a boat deck. (c) shows a yellow laptop with various cables connected to it, used for controlling the emissions.

Deux campagnes de calibration ont eu lieu pour cette étude :

- 1- La première campagne est effectuée le jour de la mise à l'eau des enregistreurs le 14/11/2018 ;
- 2- Une deuxième campagne de calibration est effectuée le 09/04/2019, afin de remplacer les données perdues avec l'enregistreur RTsys au point 1.



Figure 71: Les emplacements des cages et les points d'émission de la campagne de calibration le 14/11/2018



Figure 72: Les emplacements des cages et les points d'émissions de la campagne de calibration le 09/04/2019 Les points jaunes présentent le début d'émission, le point rouge présente la position de la cage (enregistreur) et les points orange présentent les positions finales de l'émission.

Des points d'émission autour de chaque zone d'étude sont effectués. Le but est de calibrer le modèle et les paramètres d'environnement ainsi que de préparer les études des phases deux et trois pour comprendre les impacts réciproques des travaux de chaque zone.

Un exemple de résultat de calibration est présenté dans la Figure 73. Les courbes bleues présentent les niveaux calculés par le modèle pour des différents types de fonds. Nous modélisons les paramètres géoacoustiques qui sont la densité et l'atténuation des sédiments dans chaque cas. La courbe en rouge présente le niveau mesuré réellement sur le terrain. La courbe verte présente le niveau le plus proche de la vérité-terrain calculée par le modèle.

L'incertitude entre le modèle et la vérité-terrain varie avec les fréquences. Dans cet exemple les incertitudes des tiers d'octaves de 3 000 Hz et 6 000 Hz sont les plus fortes avec environ 6 dB. Pour le reste l'incertitude ne dépasse pas les 2 dB.

L'incertitude entre le modèle choisi et les valeurs mesurées n'est pas toujours la même pour les autres points de calibration. Cette situation est due à plusieurs éléments que nous ne sommes pas capables de contrôler. A titre d'exemple, les niveaux de bruit mesurés ne sont pas dûs qu'à notre émission sonore à cause du niveau de bruit élevé du trafic maritime. La nature du fond change d'une direction à une autre car le milieu n'est pas homogène. La profondeur de l'eau au point d'enregistrement a changé entre le début et la fin de la mission, à environ 2 m. Tous ces paramètres rendent la calibration moins exacte que dans un milieu contrôlé. Afin d'augmenter les chances de calculer les bonnes valeurs nous avons effectué une étude d'incertitude de tous les points de calibration pour chaque tiers d'octave. Les résultats sont présentés dans la Figure 74.

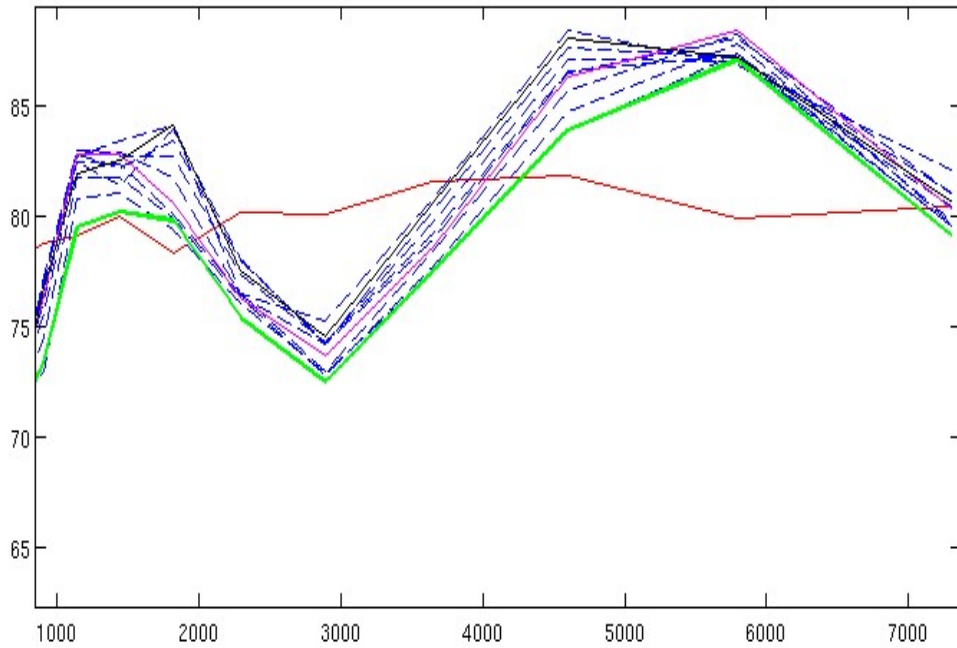


Figure 73: Calibration du milieu de propagation. En rouge le niveau enregistré sur le point de calibration 3. En vert le niveau du modèle le plus proche de la vérité terrain. En bleu les niveaux des différents modèles du milieu de propagation.

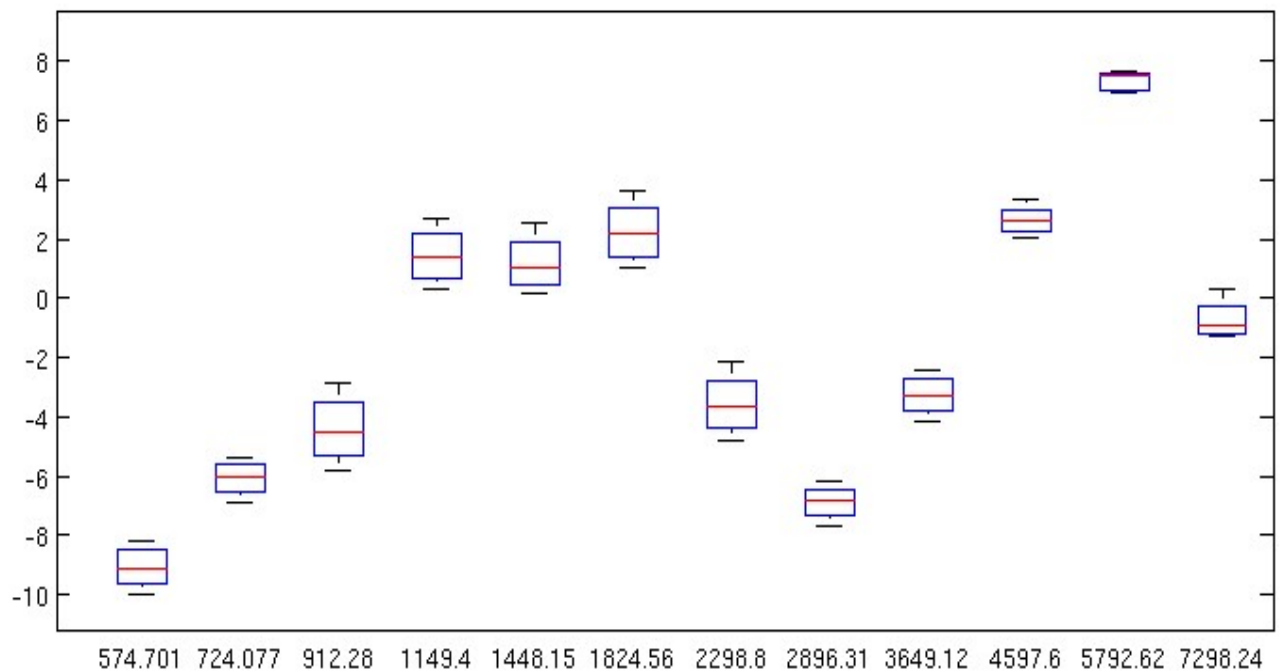


Figure 74: Les niveaux d'incertitude aux différents points de calibration en fonction de la fréquence.

3.9 CALIBRATION PASSIVE

Cette phase consiste à enregistrer *in situ* et caractériser les signaux émis (niveau et fréquence de bruit rayonné) durant la phase initiale pour calibrer et valider les résultats de modélisation.

CALIBRATION DU MODELE DE SIMULATION DU NIVEAU D'EMISSION SL DES NAVIRES :

Nous comparons les résultats de modélisation aux mesures ponctuelles réalisées afin de les valider à l'échelle de toute la zone étudiée. En effet, ce mode opératoire permet de valider le modèle et ainsi de produire des cartographies sonores calibrées représentatives à l'échelle locale.

Pour cette tâche, nous avons sélectionnée tous les bateaux qui sont passés à côté de notre enregistreur, de 7 km à quelques centaines de mètres, durant la période d'enregistrement. Des mesures du niveau de bruit émis pour chaque type de bateau sont mesurés sur toute les bandes de tiers d'octaves (< 6 kHz). Ensuite nous avons calculé les niveaux SL générés par chaque modèle : Randi, Ross, Wales et Siamrd. Nous avons alors comparé les résultats de chaque modèle par rapport au niveau enregistré à chaque fréquence. Nous avons constaté que les résultats des modèles sont proches des valeurs réelles mais à des fréquences différentes. Par exemple pour les basses fréquences (<150 Hz) ce sont les modèles de Ross et Randi qui correspondent le mieux aux données réelles, le modèle de Wales est le plus adapté de 150 à 200 Hz et le modèle de Siamrd pour les fréquences supérieures à 200 Hz.

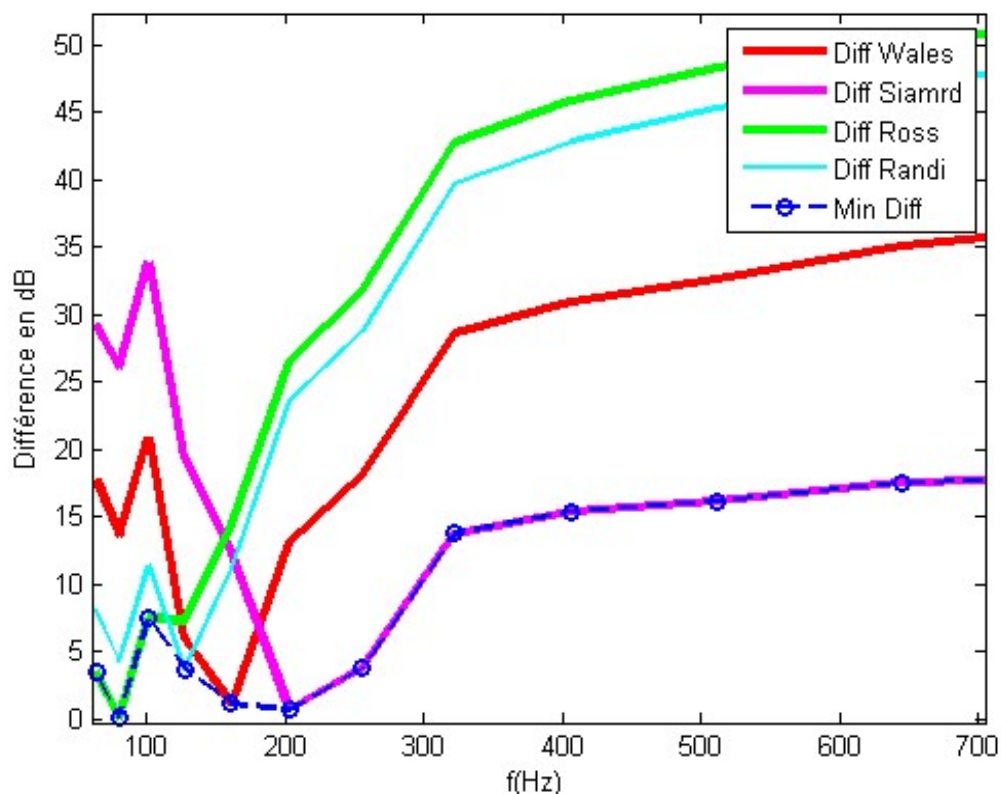


Figure 75: différence des niveaux de bruit de chaque modèle para rapport à la vérité-terrain

3.10 RESULTATS DE LA MODELISATION

La modélisation du bruit ambiant sur la zone d'étude est effectuée à l'échelle d'un an de trafic maritime, du 01/01/17 jusqu'à 31/12/17. Une simulation du niveau de bruit sur toute la hauteur d'eau est lancée pour chaque scénario. Chaque scénario prend en considération tous les navires présents sur la zone d'étude durant un intervalle de temps qui dure 20 minutes. Nous échantillonons en produisant une carte toutes les 8 heures durant toute la période conformément à la norme MFCD. Les échantillons du temps sont choisis comme suit : 8 heures du matin pour la journée, à 16 heures pour l'après midi et à minuit pour la nuit. Nous avons remarqué l'absence des bateaux pour quelques échantillons surtout pendant la nuit. A titre d'exemple pour le mois de novembre nous avons compté 29 scénarios au lieu de 90 prévu. Afin d'avoir une étude statistique correcte, nous ne prenons en compte que les scénarios actifs où nous avons une contribution de bruit des bateaux.

La **Figure 76** présente un exemple de résultat de simulation de bruit généré par le trafic maritime, à un niveau de profondeur de 3 m, à un instant T (le 01/04/2017 à 8 heures). Cette figure présente la distribution spatiale du bruit ambiant à l'échelle de la zone d'étude. Nous avons choisi de présenter cet exemple afin de monter l'effet de chaque type, taille et vitesse, de navire sur la zone d'étude.

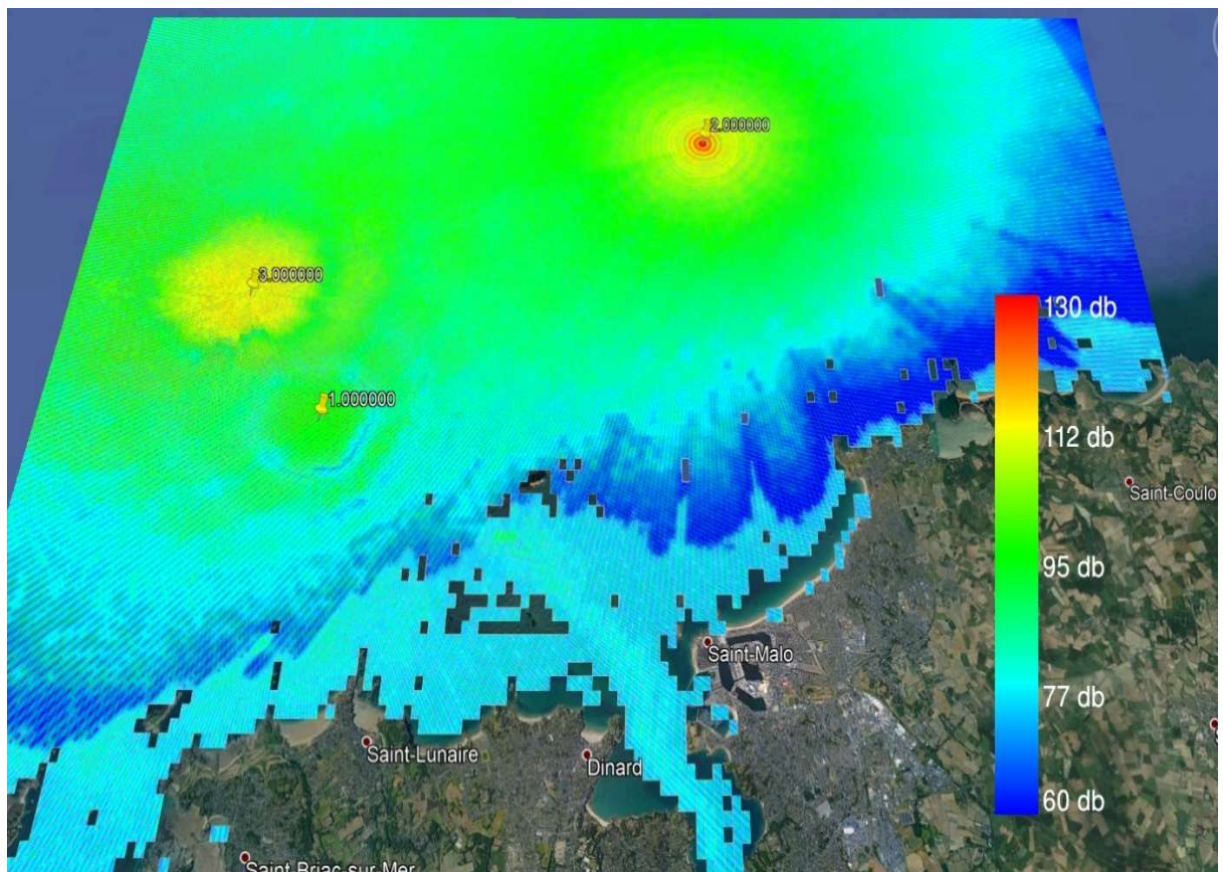


Figure 76: Exemple de modélisation de bruit ambiant avec la présence de trois bateaux dans la zone d'étude.

Les points jaunes matérialisent les navires présents à cet instant. Trois types de navire sont détectés dans le cadre de ce scénario exemple :

- Un grand navire se déplace à une vitesse de 5.4 nœuds génère environ 169 dB (point 2) ;
- Un moyen navire se déplace à une vitesse de 17.79 nœuds génère environ 139 dB (point 3) ;

- Un petit navire se déplace à une vitesse de 4.4 nœuds génère environ 117 dB (point 1).

Comme l'illustre la figure, les niveaux de bruit sont bas, < 80 dB, sur les côtes vu la faible hauteur d'eau et la forte absorption du milieu des basses fréquences surtout à la partie Est du port de Saint-Malo.

Le niveau de bruit est assez élevé autour des sources, > 120 dB, et la propagation des ondes est importante surtout pour le grand navire en point 2 avec un rayon de 5 km autour de la source avec un niveau qui dépasse les 100 dB.

La présence de ces trois bateaux impacte le bruit ambiant de toute la partie nord et le chenal de sortie du port de la zone d'étude. Ceci pourrait expliquer la faible présence des mammifères marins sur la zone dans la journée. Sur le reste de la zone d'étude le bruit est hétérogène, ceci est dû à la distribution aléatoire des bateaux et surtout à la bathymétrie.

Les cartes générées, pour chaque scénario des données AIS, sont disponibles en format Png, KML et KMZ. Chaque carte présente le bruit généré par un ou plusieurs bateaux présents au même moment sur la zone d'étude.

Afin d'avoir une vision plus claire de la distribution spatiale du bruit durant toute la période de l'étude nous étudions l'ensemble des cartes calculées avec des méthodes statistiques. Pour cela les cartes de bruit dans la zone d'étude sont établies et présentées par percentile. Ici, nous utilisons la définition donnée par la norme internationale ISO 1996-1 : 2003 (E), définissant les percentiles comme les niveaux de dépassement. Selon cette définition, le percentile N est le niveau de bruit dépassé pendant N % du temps de la période d'étude. Par conséquent, les niveaux exprimés en percentiles montrent pour chaque point de la zone d'étude combien de temps un niveau de bruit est dépassé au cours de la période d'étude.

Nous avons effectué des calculs statistiques basés sur les résultats des percentiles pour chaque saison de l'année.

Les **Figure 77** à **Figure 88** présentent les percentiles 20, 50 et 90, ce qui signifie que les niveaux de bruit dépassent le niveau présenté respectivement pendant 80 %, 50 % et 10 % du temps. Ces figures présentent le niveau de bruit à un niveau de profondeur de 3 m dans la bande de fréquence de [63 Hz à 4 kHz].

Remarque :

Les études faites avec ces modèles de simulations permettent de donner une idée globale sur le niveau du bruit généré par le trafic maritime pendant la période sélectionnée. Cependant, il faut aussi noter que le niveau du bruit calculé avec les modèles de simulation ne sont pas comparables avec les résultats de mesures pendant un enregistrement complet, pour plusieurs raisons :

- 1- Pour comparer les résultats de mesures avec les modèles il faut reprendre un scénario à un instant précis comme nous l'avons fait pour la calibration.
- 2- Ces études statistiques sont basées sur des échantillons des scénarios et non pas sur toute la période.
- 3- Pour chaque point de la carte, nous prenons en compte que la contribution de bruit des navires sur la zone. D'ailleurs, nous ne prenons pas en compte les moments du silence ou il y a la contribution du bruit naturel.

Quel que soit la période ou la saison, les résultats d'étude de bruit sont hétérogènes. Ceci est dû au nombre de bateaux présents sur la zone, leur distribution aléatoire, et à la bathymétrie. Cependant

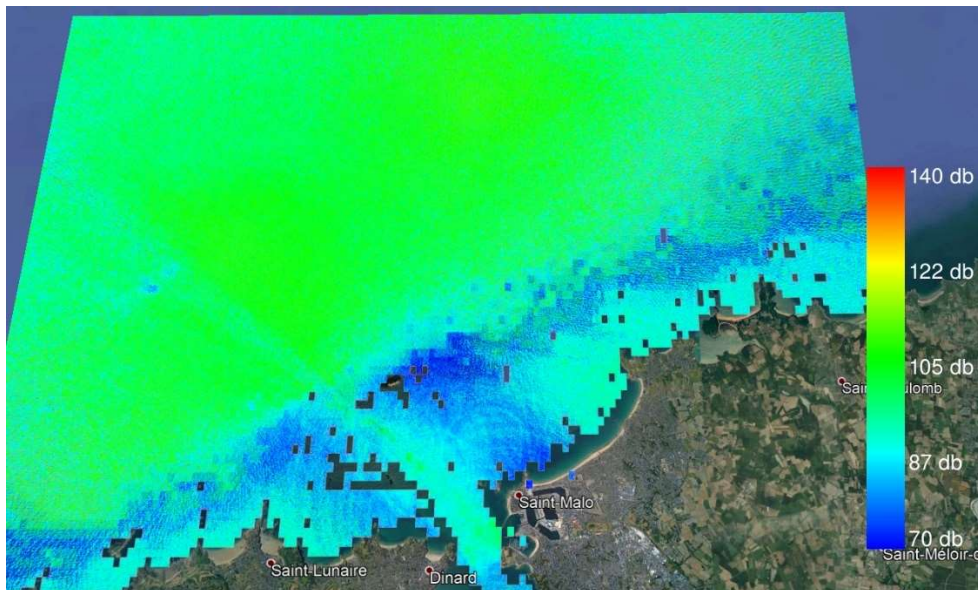
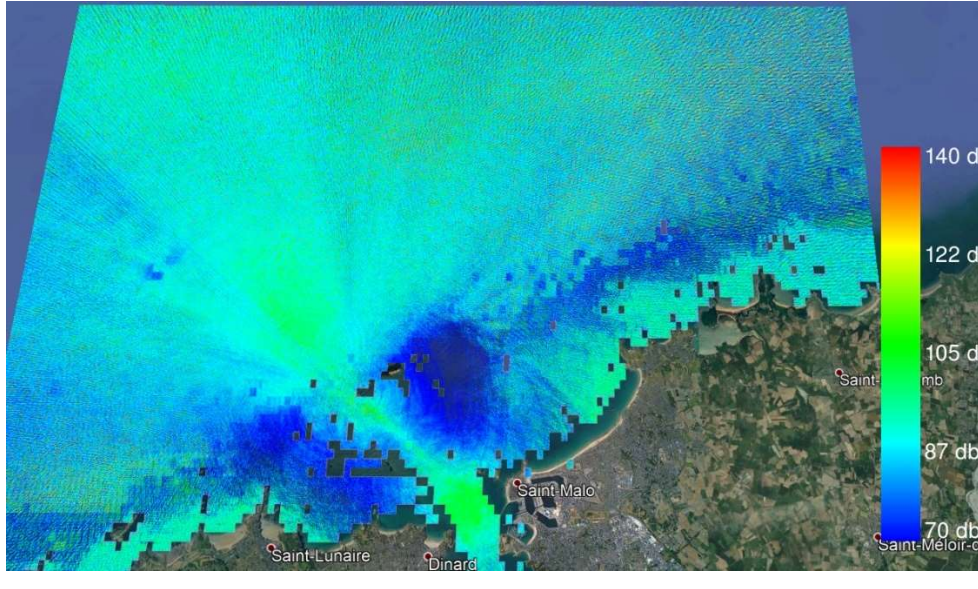
nous remarquons les effets de la variation de la bathymétrie sur la propagation des ondes acoustiques ainsi que les routes maritimes. L'intensité du bruit est proportionnelle à la profondeur.

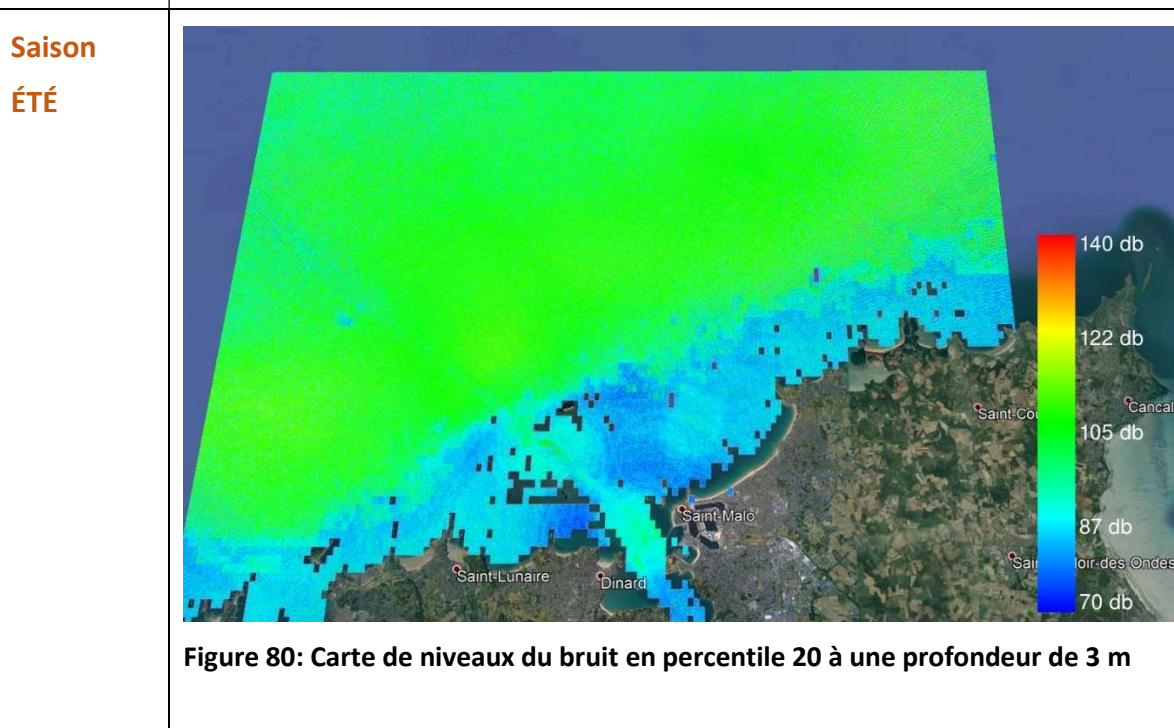
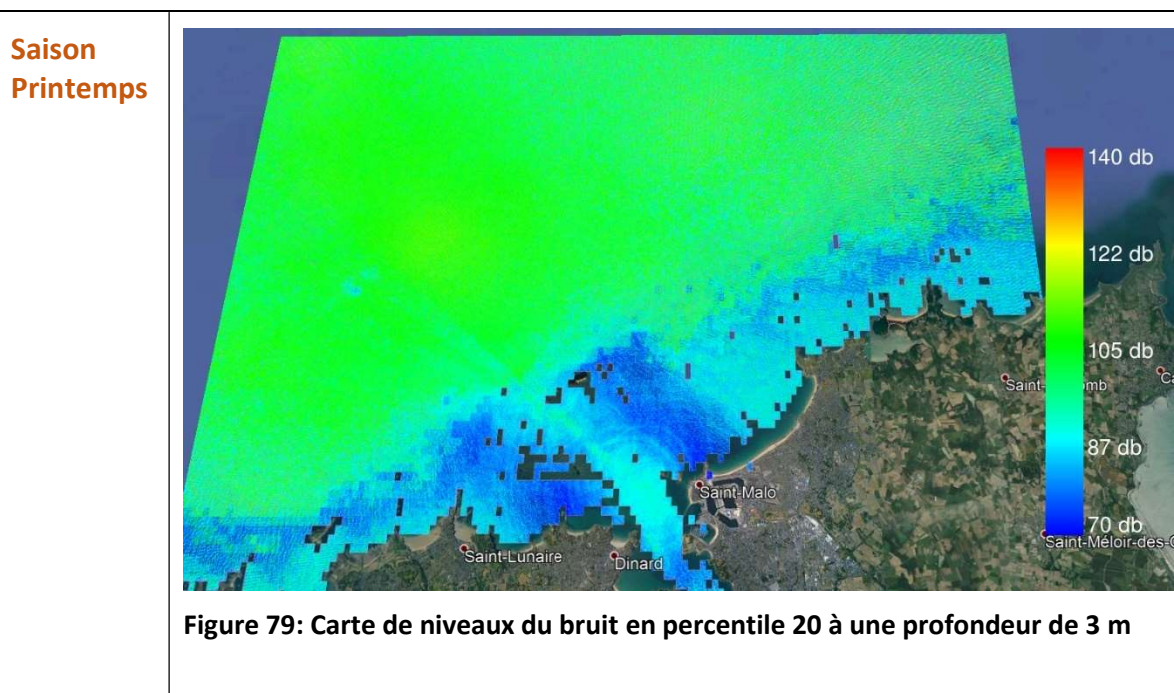
Nous constatons une différence des niveaux de bruit entre les saisons. C'est plus visible sur les percentiles (50% et 90%). C'est pendant le printemps et surtout l'été que le niveau du bruit augmente le plus. Ceci est dû à l'accroissement du trafic maritime tel que celui lié à la plaisance et passages de ferry. Les effets de thermocline n'affectent pas les résultats à cause de la faible profondeur de la zone.

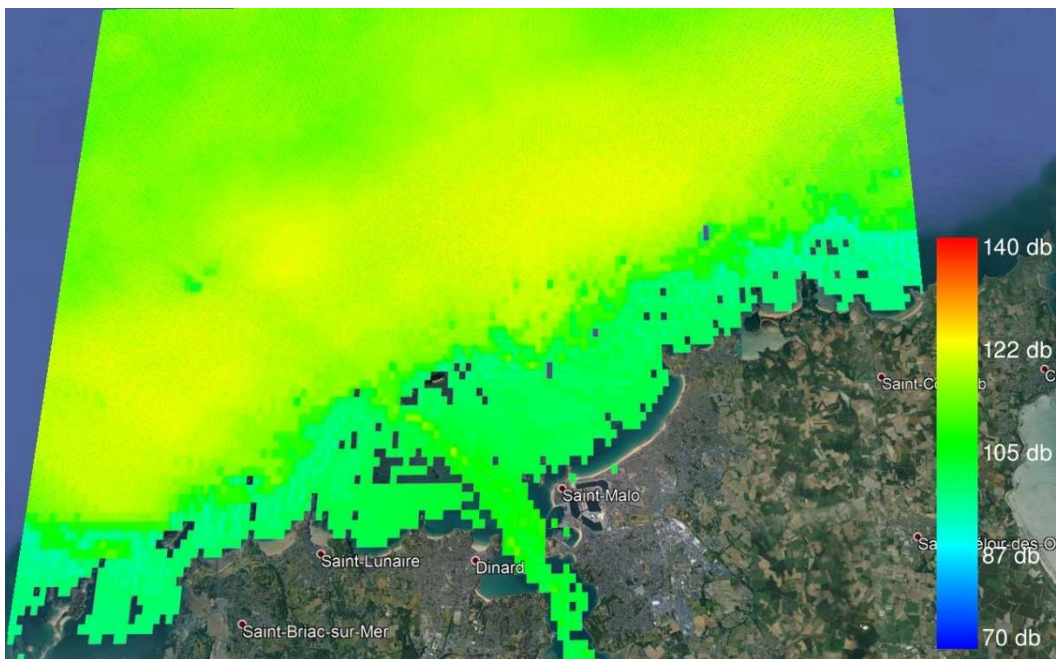
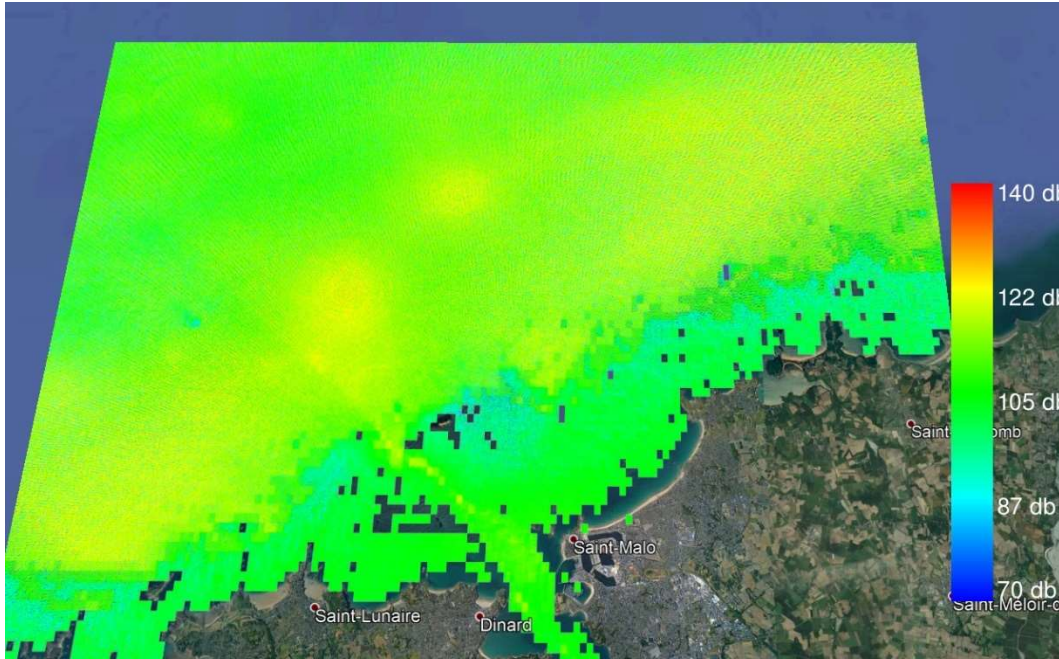
Les résultats des modèles montrent que pour toutes les saisons le bruit dans le chenal, à la sortie du port, dépasse les 80 dB pendant 90% du temps. Cette zone est affichée en vert clair (percentile 20%) à jaune (percentile 50%), et en rouge pour les percentiles 90%. Ceci s'explique par le nombre de bateaux qui traversent cette zone, comme le montre la **Figure 62** (densité du trafic). De même, les figures des percentiles montrent qu'à partir de 7 km des côtes ouest du port et à 10 km de la sortie du chenal, un niveau de 100 dB est dépassé 90% du temps et 110 dB durant 50% du temps. Le niveau du bruit sur cette zone dépasse les 120 dB pendant 10% du temps surtout pendant les saisons de l'été et le printemps. Ceci est expliqué par le fait que la hauteur d'eau est plus importante dans ces endroits que sur le reste de la zone d'étude. L'augmentation du niveau de profondeur réduit le nombre des multiples réflexions sur le fond et favorise la propagation des ondes de basses fréquences qui ont le niveau le plus élevé.

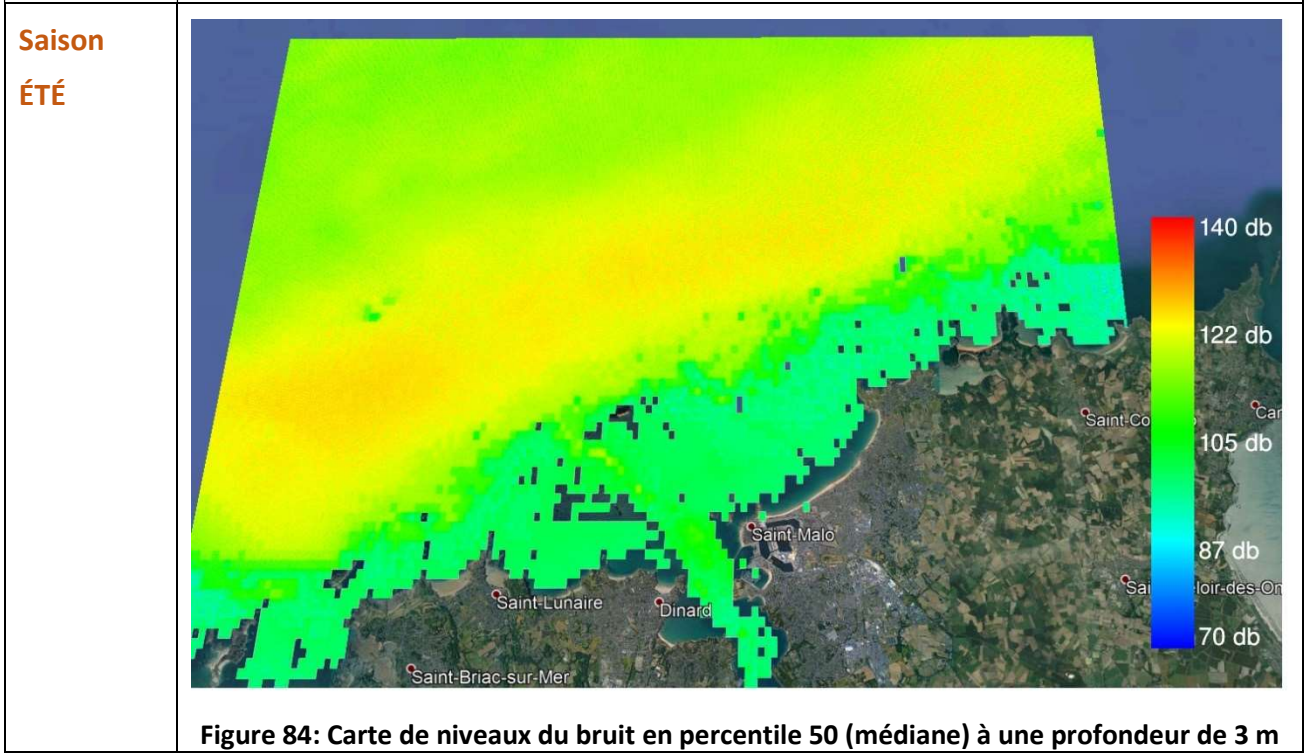
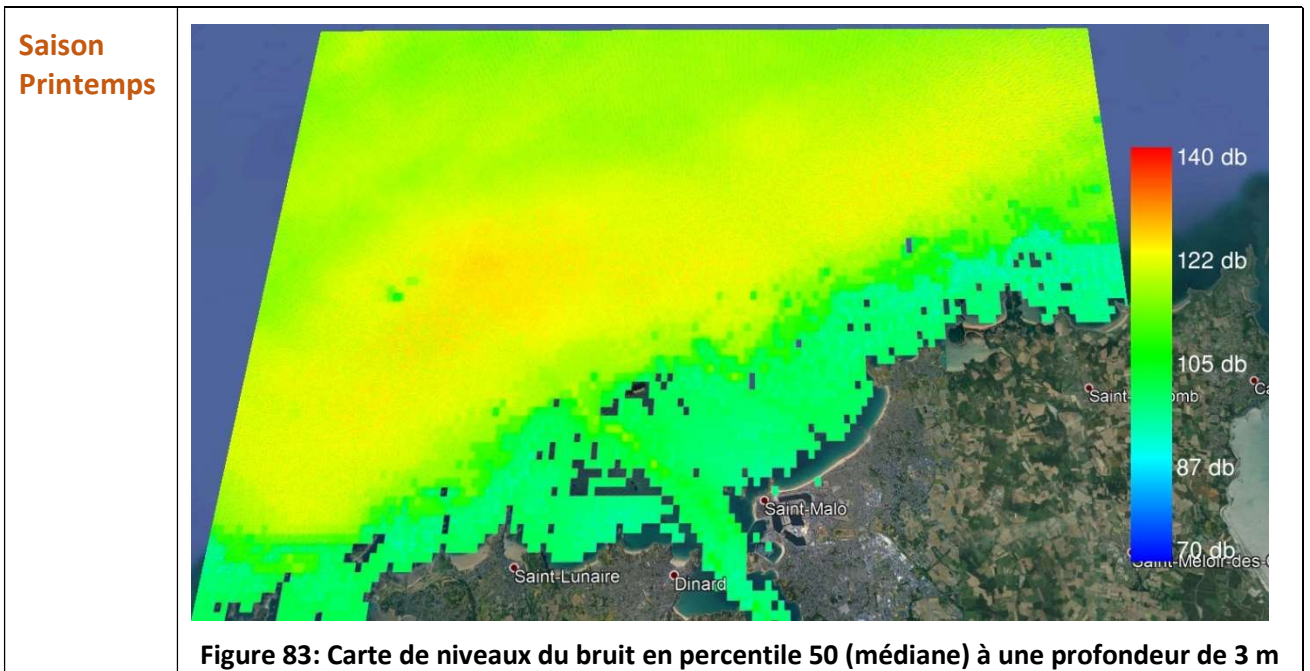
Ce que nous pouvons conclure de cette étude statistique, c'est que le bruit généré par le trafic maritime est plus élevé sur les côtés ouest nord du port et à la sortie du chenal, avec environ 15 dB de plus pour les percentiles 50% (médiane comparée au reste de la zone. Pendant l'été le niveau du bruit est plus élevé.

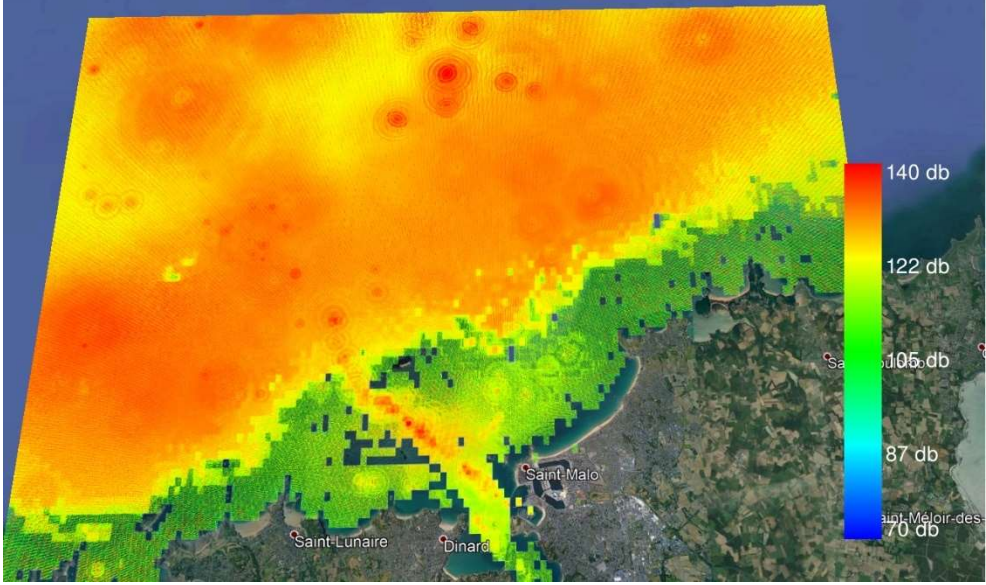
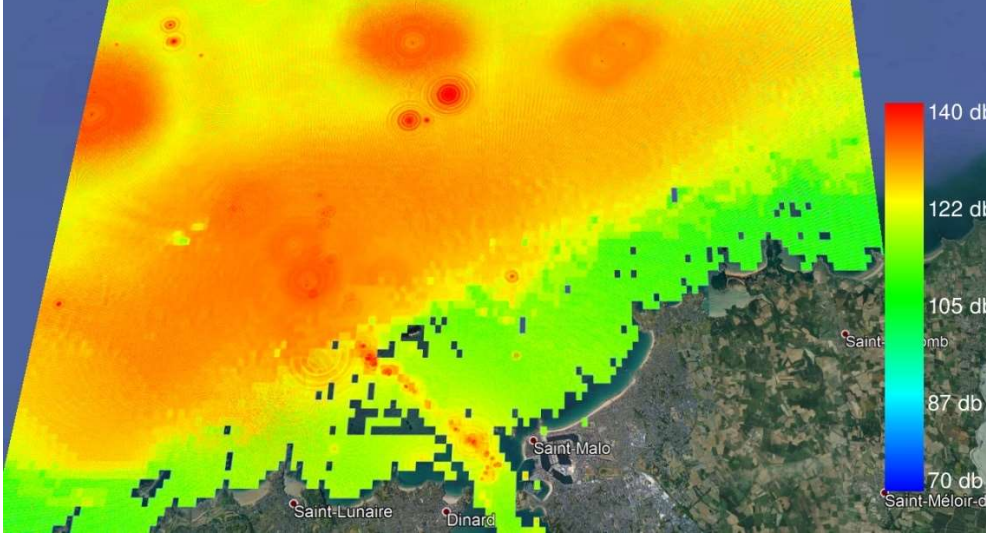
Les différentes natures de sédiments présents de la zone d'étude et les faibles hauteurs d'eau absorbent bien les ondes de basses fréquences et atténuent la propagation de ces ondes vers l'extérieur de la zone. Les niveaux de bruit les plus élevés sont dans les zones les plus profondes. Le niveau de bruit généré par les bateaux, sur toutes les bandes de basses et moyennes fréquences, domine 90% du temps le niveau de bruit naturel, vent et houle, sur une grande partie de la zone d'étude.

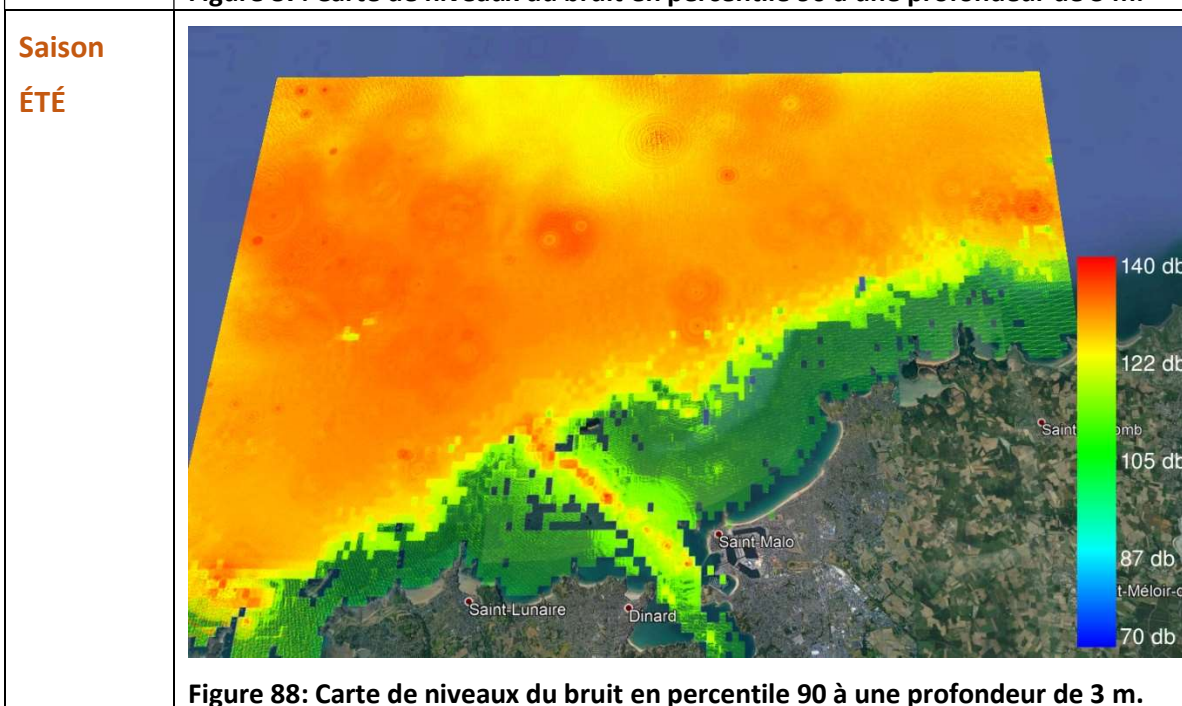
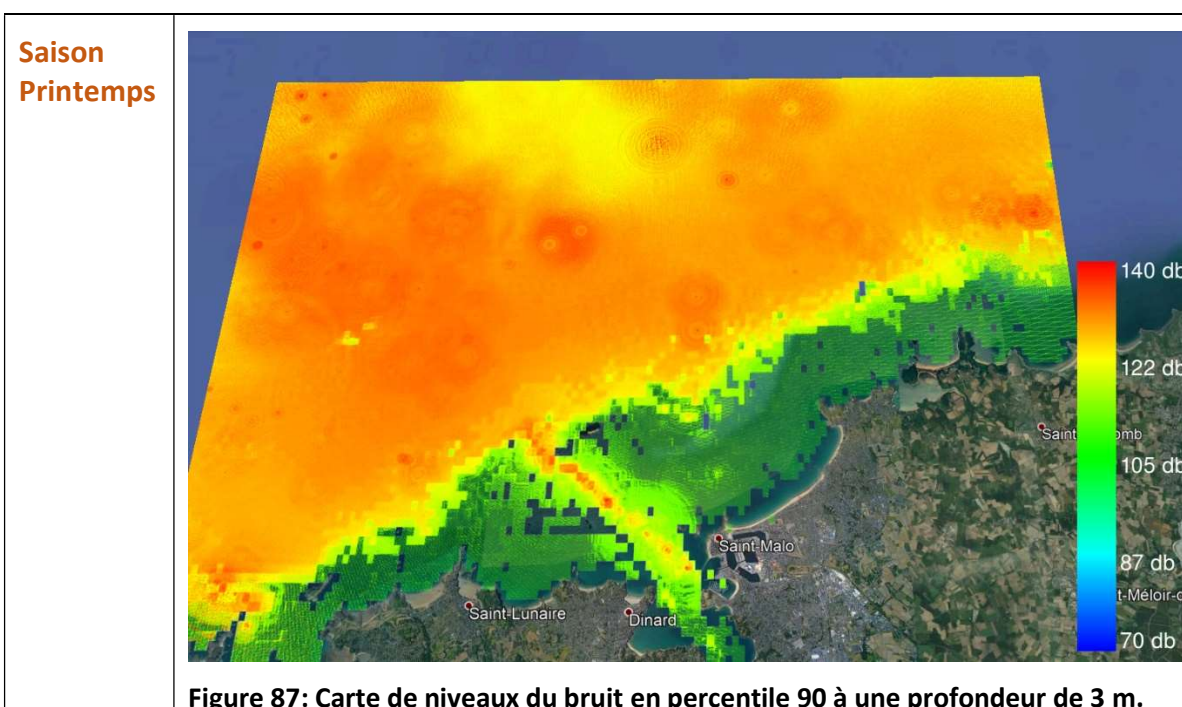
<p>Percentile 20</p>	<p>Le niveau du bruit dépasse le niveau indiqué sur la carte pendant 80% du temps</p>
<p>Saison Automne</p>	 <p>Figure 77: Carte de niveaux du bruit en percentile 20 à une profondeur de 3 m</p>
<p>Saison Hiver</p>	 <p>Figure 78: Carte de niveaux du bruit en percentile 20 à une profondeur de 3 m</p>



<p>Percentile 50</p>	<p>Le niveau du bruit dépasse le niveau indiqué sur la carte pendant 50% du temps</p>
<p>Saison Automne</p>	 <p>Figure 81: Carte de niveaux du bruit en percentile 50 (médiane) à une profondeur de 3 m</p>
<p>Saison Hiver</p>	 <p>Figure 82: Carte de niveaux du bruit en percentile 50 (médiane) à une profondeur de 3 m</p>



<p>Percentile 90</p>	<p>Le niveau du bruit dépasse le niveau indiqué sur la carte pendant 10% du temps</p>
<p>Saison Automne</p>	 <p>Figure 85: Carte de niveaux du bruit en percentile 90 à une profondeur de 3 m.</p>
<p>Saison Hiver</p>	 <p>Figure 86: Carte de niveaux du bruit en percentile 90 à une profondeur de 3 m.</p>



4. CONCLUSION

Ce rapport est consacré à la caractérisation du niveau de bruit ambiant pendant la phase initiale dans la zone de l'embouchure de la Rance. Les moyens matériels, le protocole et la méthodologie suivie y sont décrits. Cette étude consiste à analyser pendant toute la durée de calibration, (Novembre à Décembre 2018), l'ambiance sonore régnant dans de la zone d'étude sélectionnée. Pour ce faire, deux enregistreurs autonomes de type RTsys et Wildlife ont été déployés dans la zone d'étude durant deux semaines. Deux C-pod sont aussi utilisés afin d'étudier la fréquentation des dauphins et des marsouins durant la phase initiale du projet. Deux campagnes de calibration, active et passive, sont effectuées à l'échelle de la zone d'étude pour déterminer avec le maximum de précision les paramètres du milieu de propagation et les niveaux des sources de bruit anthropiques. Finalement, une étude du bruit anthropique est réalisée avec des modélisations du bruit généré par l'ensemble des navires présents sur la zone d'étude durant une année.

Une grande quantité de données acoustiques (fichiers wav) a été récoltée (plus de 1 000 Go) et analysée. Les méthodes d'analyses utilisées ont permis de mesurer l'évolution du niveau de bruit dans les deux zones d'étude, de caractériser les bruits typiques auxquels la vie marine est exposée quotidiennement, de connaître le niveau du bruit moyen ainsi que les espèces et la quantité des mammifères marins.

L'analyse de ces enregistrements a montré un niveau de bruit élevé. En particulier, la situation au point 1 n'est pas typique des bruits ambiants en mer. Les analyses ont également révélé une différence entre le niveau du bruit pendant le jour et la nuit, notamment en basse et moyenne fréquences, en relation avec les activités quotidiennes dans la zone. Le niveau de bruit ambiant est très impacté par le trafic maritime surtout durant la nuit.

Les analyses des résultats de modélisation dans la zone ont également permis de distinguer les bruits notables auxquels le secteur est exposé, à savoir, le bruit généré par les grands bateaux comme les cargos et les Ferries.

Les paramètres du milieu de propagation des ondes acoustiques dans les zones d'étude ont montré une très forte absorption des basses fréquences et une réponse plus favorable pour les propagations des ondes de moyenne fréquence.

Les bruits de navires de commerce, cargos et ferries constituent une source importante de bruit mais ne dépassent pas 169 dB (crête), ce qui est très proche de la saturation de nos hydrophones. Pour ce dernier bruit, une étude de plusieurs passages est nécessaire pour estimer son importance, puisqu'il est étroitement lié à plusieurs paramètres variables du navire (tel que le régime moteur).

Cette étude nous a bien permis de caractériser l'ambiance sonore initiale de la zone de St-Malo et nous a fourni des informations importantes pour la phase d'évaluation de l'impact du bruit des futurs travaux et en phase d'exploitation du terminal du Naye et du port des Bas Sablons.

5. BIBLIOGRAPHIE

ARVESON, Paul T. et VENDITTIS, David J. Radiated noise characteristics of a modern cargo ship. The Journal of the Acoustical Society of America, 2000, vol. 107, no 1, p. 118-129.

MCKENNA, Megan F., ROSS, Donald, WIGGINS, Sean M., et al. Underwater radiated noise from modern commercial ships. The Journal of the Acoustical Society of America, 2012, vol. 131, no 1, p. 92-103.

MERCHANT, Nathan D., WITT, Matthew J., BLONDEL, Philippe, et al. Assessing sound exposure from shipping in coastal waters using a single hydrophone and Automatic Identification System (AIS) data. Marine pollution bulletin, 2012, vol. 64, no 7, p. 1320-1329.

SIMARD, Yvan, ROY, Nathalie, GERVAISE, Cédric, et al. Analysis and modeling of 255 source levels of merchant ships from an acoustic observatory along St. Lawrence Seaway. The Journal of the Acoustical Society of America, 2016, vol. 140, no 3, p. 2002-2018.

VEIRS, Scott, VEIRS, Val, et WOOD, Jason D. Ship noise extends to frequencies used for echolocation by endangered killer whales. PeerJ, 2016, vol. 4, p. e1657.

WALES, Stephen C. et HEITMEYER, Richard M. An ensemble source spectra model for merchant ship-radiated noise. The Journal of the Acoustical Society of America, 2002, vol. 111, no 3, p. 1211-1231.

FARCAS, Adrian, THOMPSON, Paul M., et MERCHANT, Nathan D. Underwater noise modelling for environmental impact assessment. Environmental Impact Assessment Review, 2016, vol. 57, p. 114-122.

WENZ, Gordon M. Acoustic ambient noise in the ocean: Spectra and sources. The Journal of the Acoustical Society of America, 1962, vol. 34, no 12, p. 1936-1956.

COLLINS, Michael D. A split-step Padé solution for the parabolic equation method. The Journal of the Acoustical Society of America, 1993, vol. 93, no 4, p. 1736-1742.

MAGLIO, A. et al., 2015. Mapping shipping noise in the Pelagos Sanctuary (French part) through acoustic modelling to assess potential impacts on marine mammals. Sci. Rep. Port-Cros Natl. Park, Volume 29, pp. 167-185.

PORTER, Michael B. The KRAKEN normal mode program. NAVAL RESEARCH LAB WASHINGTON DC, 1992.

PORTER, Michael B. et LIU, Yong-Chun. Finite-element ray tracing. Theoretical and computational acoustics, 1994, vol. 2, p. 947-956.

Wiggins, S. M., Frasier, K. E., Henderson, E. E. & Hildebrand, J. A., 2013. Tracking dolphin whistles using an autonomous acoustic recorder array. The Journal of the Acoustical Society of America, Volume 133, pp. 3813-3818.

R. Coates, The Advanced Sonar Course: Further Topics in Underwater Acoustics. Seiche.Com Limited, 2001.

C. I. Malme, P. W. Smith, et P. R. Miles, Characterisation of geophysical acoustic survey sounds, OCS Study. Prepared by BBN Laboratories Inc., Cambridge, for Battelle Memorial Institute to the Department of the Interior-Mineral Management Service, Pacific Outer Continental Shelf Region, Los Angeles, CA, 1986.

S. B. Blackwell, J. W. Lawson, et M. T. Williams, "Tolerance by ringed seals (*phoca hispida*) to impact pipe-driving and construction sounds at an oil production island," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 115, p. 2346, 2004.

P. Theobald, P. Lepper, S. Robinson, et D. Hazelwood, "Cumulative noise exposure assessment for marine mammals using sound exposure level as a metric," in 3rd International Conference on Underwater Acoustic Measurements: echnologiesss & Results, 2009.

DRIRA, A., BOUZIDI, M., MAGLIO, A., PAVAN, G., & SALIVAS, M. (2018). Modelling underwater sound fields from noise events contained in the ACCOBAMS impulsive noise register to address cumulative impact and acoustic pollution assessment.

Maglio, A., Drira, A., Fossati, C., & Pavan, G. Modelli di previsione della propagazione sonora in ambiente marino per il monitoraggio del rumore subacqueo e del suo impatto sui cetacei.

N. R. Chapman, "Measurement of the waveform parameters of shallow explosive charges," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 78, p. 672, 1985.

M. E. Dos Santos, M. N. Couchinho, A. R. Luís, et E. J. Gonçalves, "Monitoring underwater explosions in the habitat of resident bottlenose dolphins," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 128, p. 3805, 2010.

P. T. Madsen, "Marine mammals and noise: Problems with root mean square sound pressure levels for transients," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 6, n. 117, pp. 3952–3957, 2005.

J. J. Finneran, D. A. Carder, et S. H. Ridgway, "Low-frequency acoustic pressure, velocity, and intensity thresholds in a bottlenose dolphin (*tursiops truncatus*) and white whale (*delphinapterus leucas*)," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 111, pp. 447–456, 2002.

J. J. Finneran, C. E. Schlundt, R. Dear, D. A. Carder, et S. H. Ridgway, "Temporary shift in masked hearing thresholds in odontocetes after exposure to single underwater impulses from a seismic watergun," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 111, pp. 2929–2940, 2002.

R. D. McCauley, J. Fewtrell, A. J. Duncan, C. Jenner, M. J. Jenner, J. T. Penrose, R. I. T. Prince, A. Adhitya, J. Murdoch, et K. McCabe, "Marine seismic surveys: Analysis and propagation of airgun signals; and effects of exposure on humpback whales, sea turtles, fishes and squid. Environmental implications of offshore oil and gas development in Australia: Further research," *Australian Petroleum Production Exploration, Association*, Canberra, pp. 364–521, 2003.

Richardson, W. J., Fraker, M. A., Würsig, B., & Wells, R. S. (1985). Behaviour of bowhead whales *Balaena mysticetus* summering in the Beaufort Sea: reactions to industrial activities. *Biological Conservation*, 32(3), 195-230.

Mueller-Blenkle, C., McGregor, P. K., Gill, A. B., Andersson, M. H., Metcalfe, J., Bendall, V., ... & Thomsen, F. (2010). Effects of pile-driving noise on the behaviour of marine fish.

POPPER, Arthur N. et HAWKINS, Anthony (ed.). *The effects of noise on aquatic life*. Springer Science & Business Media, 2012.

THOMSEN, Frank, LÜDEMANN, Karin, KAFEMANN, Rudolf, et al. *Effects of offshore wind farm noise on marine mammals and fish*. Biola, Hamburg, Germany on behalf of COWRIE Ltd, 2006, vol. 62.

Wahlberg, M., & Westerberg, H. (2005). Hearing in fish and their reactions to sounds from offshore wind farms. *Marine Ecology Progress Series*, 288, 295-309.

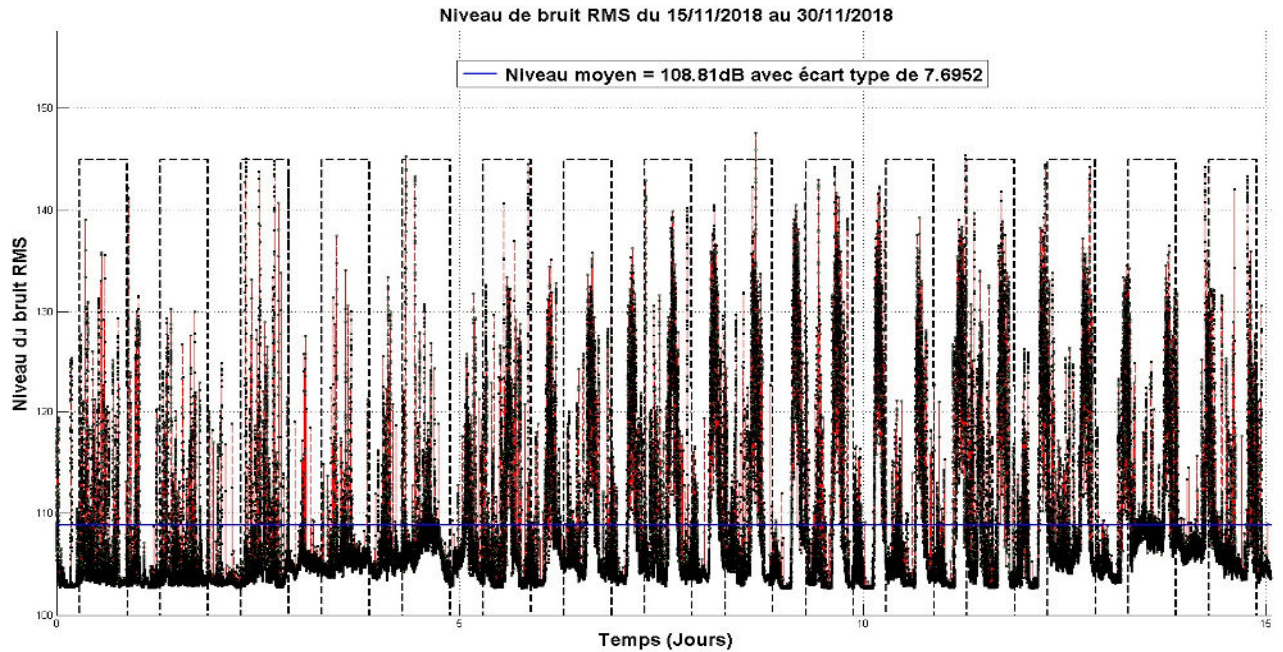
Buckstaff, K. C. (2004). Effects of watercraft noise on the acoustic behavior of bottlenose dolphins, *Tursiops truncatus*, in Sarasota Bay, Florida. *Marine mammal science*, 20(4), 709-725.

Wartzok, D., Popper, A. N., Gordon, J., & Merrill, J. (2003). Factors affecting the responses of marine mammals to acoustic disturbance. *Marine Technology Society Journal*, 37(4), 6-15.

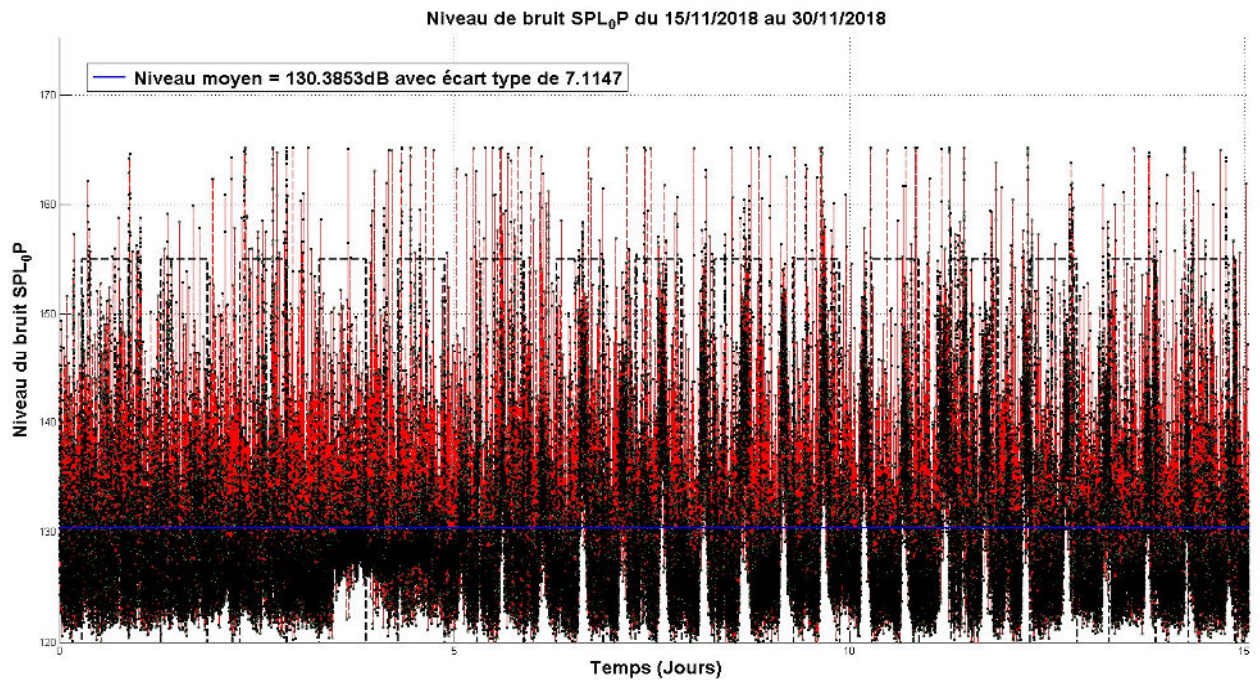
OSPAR (2009) *Overview of the impacts of anthropogenic underwater sound in the marine environment*

6. ANNEXE

RMS du 15/11 au 30/11/2018 enregistré sur le point 2 :



SPL du 15/11 au 30/11/2018 enregistré sur le point 2 :



SEL du 15/11 au 30/11/2018 enregistré sur le point 2 :

