
Projet du raccordement du parc éolien en mer de Dieppe – Le Tréport

« Etude d'impact acoustique »



Février 2018

Suivi de rédaction

Version	Date	Description	Action effectuée par
0.1	23/06/2016	Rédaction initiale	A. Jolivet (TBM – SOMME), D. Mathias, B. Kinda (SOMME)
0.2	27/06/2016	Relecture	C. Gervaise (SOMME)
0.3	30/06/2016	Amendement	D. Mathias (SOMME), A. Jolivet (TBM – SOMME)
0.4	01/07/2016	Relecture	C. Gervaise (SOMME)
0.5		Relecture	G. Bouchery (TBM)
0.6		Amendement	D. Mathias (SOMME)
1.0		Transmission à RTE	
2.0	13/04/2017	Amendement	C.Gervaise (SOMME)
3.0	07/02/2018	Amendement	D. Mathias (SOMME)

Contact : mathias.somme@orange.fr

Table des matières

1	Cadre de réalisation de l'étude	5
2	Contexte environnemental et juridique de l'étude.....	6
2.1	Contexte scientifique et juridique	6
2.2	Textes applicables et guides de références (non exhaustif)	7
3	Le projet	9
3.1	Le site d'étude	9
3.2	Activités suivies	10
4	Description synthétique de la méthodologie utilisée pour conduire l'étude d'impact	11
4.1	Terminologie utilisée.....	11
4.2	Méthodologie générale de l'étude d'impact.....	12
4.3	Méthodologie particulière pour élaborer l'état initial « Paysage acoustique » ..	13
4.4	Méthodologie pour la détermination des zones d'impacts acoustiques potentiels.	16
5	Les enjeux	23
5.1	Etat initial « Mammifères Marins »	23
5.2	Les enjeux	25
6	Etat initial Paysage Acoustique – Bruit ambiant.....	30
6.1	Nature des sources sonores.....	30
6.2	Niveaux sonores	33
6.3	Budget acoustique	35
7	Déroulé de l'étude d'impact acoustique sur un exemple de couple {espèce – type d'impact}.....	37
7.1	Les données environnementales nécessaires à l'étude.....	37
7.2	Etape 1 : Niveau du bruit rayonné.....	40
7.3	Etape 2 : Propagation acoustique sur r mètres	46
7.4	Etapes 3-6 : Niveau reçu et empreinte acoustique du projet.....	48
7.5	Etapes 5-9 : Identification de la zone d'impact potentiel	51
7.6	Exemple d'impacts acoustiques : le cas du marsouin et l'impact « dérangement » 54	
8	Synthèse des différentes zones d'impact.....	57
8.1	Synthèse par gamme de niveaux sonores	57
8.2	Synthèse par type de travaux pour les mammifères marins	59
8.3	Synthèse pour les poissons	62
8.4	Traduction en terme d'impact	63

9	L'analyse des méthodes	67
10	Proposition des mesures ERC et d'un protocole de suivi	69
10.1	Les mesures d'évitement, de réduction et de compensation	69
10.2	Le protocole de suivi	70
11	Résumé non technique	71
12	Annexe 1 : Grandeurs acoustiques : définition et calculs	73
13	Annexe 2 : Méthodologie détaillée pour l'évaluation d'impact	76
13.1	Echelle de quantification des enjeux.....	76
13.2	Echelle de la quantification de la tolérance.....	77
13.3	Echelle de quantification de la sensibilité.....	78
14	Annexe 3 : Description de la campagne de mesures acoustiques <i>in situ</i>	79
14.1	Contexte et objectifs de la campagne de mesures <i>in situ</i>	79
14.2	Phase préliminaire de calibration	79
14.3	Campagne de mesures <i>in situ</i> dans la zone d'étude du projet.....	83
15	Annexe 4 : Etat initial « Paysage acoustique – Bruit ambiant » :.....	89
15.1	Objectifs.....	89
15.2	Méthodologie suivie pour l'analyse des données <i>in situ</i>	89
15.3	Résultats.....	91
16	Annexe 5 : Inversion géo-acoustique	119
16.1	Introduction.....	119
16.2	Utilisation du bruit large bande rayonné par les navires	119
16.3	Réalité sédimentaire vs paramètres géo-acoustiques.....	127
17	Annexe 6 : Note sur les seuils utilisés et les recommandations émises par les autorités de l'état	129
	Nouveaux seuils et fonctions de transfert auditives de NOAA (2016)	129
18	Références bibliographiques	134

1 Cadre de réalisation de l'étude

La société SOMME (SARL Société d'Observation Multi-Modale de l'Environnement) a été missionnée par RTE via une sous-traitance avec le groupement de bureaux d'études TBM environnement – ACRI HE, le 04 mai 2016, pour réaliser l'étude d'impact acoustique des travaux de raccordement du futur parc éolien en mer de Dieppe – Le Tréport (Figure 2). Cette étude inclut 3 étapes :

- ✓ Etape 1 : Campagne de mesures *in situ* effectuée entre le 1^{er} et le 11 mai 2016 dans la zone du projet visant i) à établir l'état initial « bruit ambiant » et ii) à réaliser la mesure des propriétés géo-acoustiques du site,
- ✓ Etape 2 : Réalisation d'une simulation acoustique permettant de cartographier la production sonore générée par les travaux et sa propagation dans la zone d'étude
- ✓ Etape 3 : Analyse des impacts acoustiques potentiels de cette production sonore sur la faune marine.

Pour cette étude, deux compartiments biologiques ont été visés : i) les mammifères marins et ii) les poissons, avec un effort particulier porté sur les mammifères marins. Quatre types d'impacts acoustiques ont été envisagés : i) le masquage des communications acoustiques entre les individus, ii) le dérangement acoustique amenant une réaction comportementale (changement d'activité, évitement), iii) le traumatisme physiologique auditif temporaire, iv) le traumatisme physiologique auditif permanent.

2 Contexte environnemental et juridique de l'étude

2.1 Contexte scientifique et juridique

La Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM, 2008) (2008/56/CE) considère le milieu marin comme un patrimoine précieux qu'il convient de protéger et de préserver. Les principaux objectifs de la directive sont de maintenir la diversité biologique, de préserver la diversité et le dynamisme des océans et des mers, et d'en garantir la propreté, le bon état sanitaire et la productivité végétale et animale.

Les mammifères marins et leurs habitats fonctionnels sont protégés au titre de l'Arrêté du 1er juillet 2011 fixant la liste des mammifères marins protégés sur le territoire national et les modalités de leur protection. Cet arrêté complète la Directive 92/43/CEE du Conseil du 21 mai 1992 concernant la conservation des habitats naturels ainsi que de la faune et de la flore sauvages.

Le déclin de la biodiversité dû à l'intervention de l'homme doit être évité afin de garantir les objectifs de bon état écologique défini dans la DCSMM.

L'introduction d'énergie acoustique par l'homme vers les écosystèmes marins peut provoquer de nouvelles pressions qui viennent s'ajouter à celles déjà existantes. Depuis les années 1970, la communauté scientifique fait part de ses inquiétudes, quant aux effets préjudiciables potentiels du bruit anthropique sur la vie marine et la recherche dans ce domaine s'est développée dans les années 1980 (Payne & Webb, 1971; Richardson, Greene, Malme, & Thomson, 1995). Au cours des dix dernières années, un certain nombre d'institutions scientifiques, d'agences gouvernementales et d'organes intergouvernementaux ont étudié ce domaine, produisant des articles sur les effets du son sur les mammifères marins (Richardson, Greene, Malme, & Thomson, 1995; Würsig & Richardson, 2002; National Research Council, 2003; Hildebrand J. , 2005; National Research Council, 2005; Madsen, Wahlberg, Tougaard, Lucke, & Tyack, 2006; Thomsen, Lüdemann, Kafemann, & Piper, 2006; Nowacek, Thorne, Johnston, & Tyack, 2007; Southall, et al., 2007) ainsi que sur les poissons (Popper & McCauley, 2004; Hastings & Popper, 2005; Wahlberg & Westerberg, 2005; Thomsen, Lüdemann, Kafemann, & Piper, 2006; Popper, et al., 2014). Ces études documentent aussi bien la présence que l'absence d'effets physiologiques et de réactions comportementales aux divers signaux acoustiques sur les mammifères marins, les poissons et un certain nombre d'espèces d'invertébrés. Les impacts individuels se traduisent par des changements physiologiques sur l'appareil auditif (TTS : Temporary Threshold Shift, PTS : Permanent Threshold Shift; Figure 1) ou des changements comportementaux (masquage acoustique, altération de l'attention, augmentation des hormones de stress, changement d'activité, fuite; Figure 1). Ces réactions aiguës ou chroniques peuvent se traduire *in fine* par une réponse populationnelle.

- **Audibilité**
Détection possible
- **Réactivité**
Réponse par le comportement ou physiologique
- **Masquage**
Ajout de bruit anthropique
⇒ Bruit de fond qui empêche la réception du signal utile
- **Perte d'audition temporaire**
Perte de sensibilité réversible (TTS)
- **Perte d'audition permanente**
Perte de sensibilité irréversible (PTS)

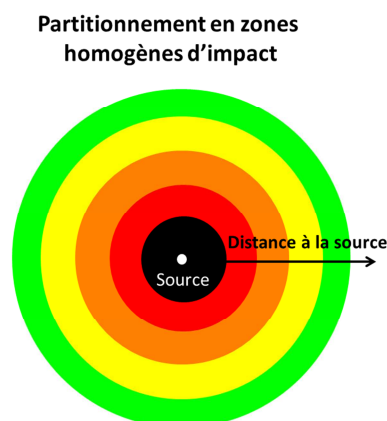


Figure 1 : Rayonnement d'une source sonore en zone homogène d'impact en fonction de son intensité sonore (Richardson, Greene, Malme, & Thomson, 1995)

Les effets préjudiciables potentiels du bruit anthropique sur la vie marine font aujourd'hui partie des préoccupations de la société civile (International Fund for Animal Welfare, 2008), de l'industrie (International Maritime Organisation, 2009) et des instances politiques (European Parliament, 2004; Marine Mammal Commission, 2007). On observe progressivement la mise en place d'une réglementation nationale et internationale à ce sujet. En Europe, elle se manifeste en premier lieu au sein de deux directives, la Directive Cadre sur l'Eau (2000/60/CE) et la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (2008/56/CE) ».

Dans le cadre de la transposition française de la DCSMM aux articles L. 219-9 à L. 219-18 et R. 219-2 à R. 219-17 du Code de l'environnement, l'Etat a repris la définition européenne de la pollution du milieu marin : « La " pollution " consiste en l'introduction directe ou indirecte, par suite de l'activité humaine, de déchets, de substances, ou d'énergie, y compris de sources sonores sous-marines d'origine anthropique, qui entraîne ou est susceptible d'entraîner des effets nuisibles pour les ressources vivantes et les écosystèmes marins, et notamment un appauvrissement de la biodiversité, des risques pour la santé humaine, des obstacles pour les activités maritimes, et notamment la pêche, le tourisme et les loisirs ainsi que les autres utilisations de la mer, une altération de la qualité des eaux du point de vue de leur utilisation, et une réduction de la valeur d'agrément du milieu marin ».

En conséquence, en France, la prise en compte de l'impact des bruits sous-marins d'origine anthropique y compris sur les mammifères marins se fait dans le cadre du droit commun de l'environnement et du principe général de mesure des impacts récemment modifié par le décret du 29 décembre 2011. En vertu de l'article L. 122-1, 1° du Code de l'environnement, « les projets de travaux, d'ouvrages ou d'aménagements publics et privés qui, par leur nature, leurs dimensions ou leur localisation sont susceptibles d'avoir des incidences notables sur l'environnement ou la santé humaine sont précédés d'une étude d'impact ».

2.2 Textes applicables et guides de références (non exhaustif)

Directives

- ✓ Directive 2008/56/CE du Parlement Européen et du Conseil du 17 juin 2008 établissant un cadre d'action communautaire dans le domaine de la politique pour le milieu marin, dite « Directive-cadre Stratégie pour le milieu marin » (DCSMM)
- ✓ Directive 92/43/CEE du Conseil du 21 mai 1992 concernant la conservation des habitats naturels ainsi que de la faune et de la flore sauvages.

Textes législatifs français

- ✓ Loi n°2010-788 du 12 juillet 2010, portant engagement national pour l'environnement, dite « Grenelle II ».
- ✓ Loi n° 2008-757 du 1er août 2008, relative à la responsabilité environnementale et à diverses dispositions d'adaptation au droit communautaire dans le domaine de l'environnement.
- ✓ Loi n° 2006-1772 du 30 décembre 2006, sur l'eau et les milieux aquatiques (LEMA).

Textes réglementaires et codes

- ✓ Décret n° 2011-2019 du 29 décembre 2011 portant réforme des études d'impact des projets de travaux, d'ouvrages ou d'aménagements.
- ✓ Décret n°2004-308, du 29 mars 2004, relatif aux concessions d'utilisation du domaine public maritime en dehors des ports.
- ✓ Arrêté du 1er juillet 2011 fixant la liste des mammifères marins protégés sur le territoire national et les modalités de leur protection (JORF 0171 du 26 juillet 2011).
- ✓ Circulaire du 15 avril 2010 relative à l'évaluation des incidences Natura 2000.
- ✓ Code de l'environnement

Guides

- ✓ Guide de l'étude d'impact sur l'environnement des parcs éoliens - actualisation 2010, actualisation en cours, MEEDDM
- ✓ Fiche technique n° 7 du Guide de l'étude d'impact sur l'environnement des parcs éoliens - Prévisions des émissions en milieu marin, juillet 2010 - MEEDDM
- ✓ Guide de conseils méthodologiques de l'article 6, paragraphes 3 et 4, de la directive « Habitats » 92/43/CEE Evaluation des plans et projet ayant des incidences significatives sur les sites Natura 2000.
- ✓ Guide Méthodologique pour l'évaluation des incidences des projets et programmes d'infrastructures et d'aménagement sur les sites Natura 2000, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, 2004.
- ✓ Définition du bon état écologique pour les régions sous-marines françaises - Résumé à l'attention du public, MEDDE, juillet 2012.
- ✓ Etude « Energie marine renouvelables - Etude méthodologique des impacts environnementaux et socio-économiques, Version 2012, MEDDE.

3 Le projet

3.1 Le site d'étude

Le projet de raccordement du futur parc éolien en mer de Dieppe – Le Tréport consiste à construire une liaison électrique (sous-marine et souterraine) d'environ 30 kilomètres entre le futur parc éolien en mer et le réseau public de transport d'électricité existant et présent dans la zone de Dieppe – Le Tréport.

Notre étude se focalise sur une zone géographique centrée autour du fuseau de raccordement (zone d'étude approchée, Figure 2) de moindre impact (RTE, Dossier de concertation - Détermination du fuseau de moindre impact, 2015), et élargie à l'aire du potentiel impact acoustique du projet (zone d'étude éloignée, Figure 2). La zone d'étude éloignée, d'une aire totale de 650 km², a été obtenue en majorant d'un facteur 2 les aires d'impact obtenues dans des études de projets similaires réalisées par SOMME pour RTE (RTE, 2013 et RTE, 2014). Cette aire d'étude éloignée comprend le périmètre du futur parc éolien.

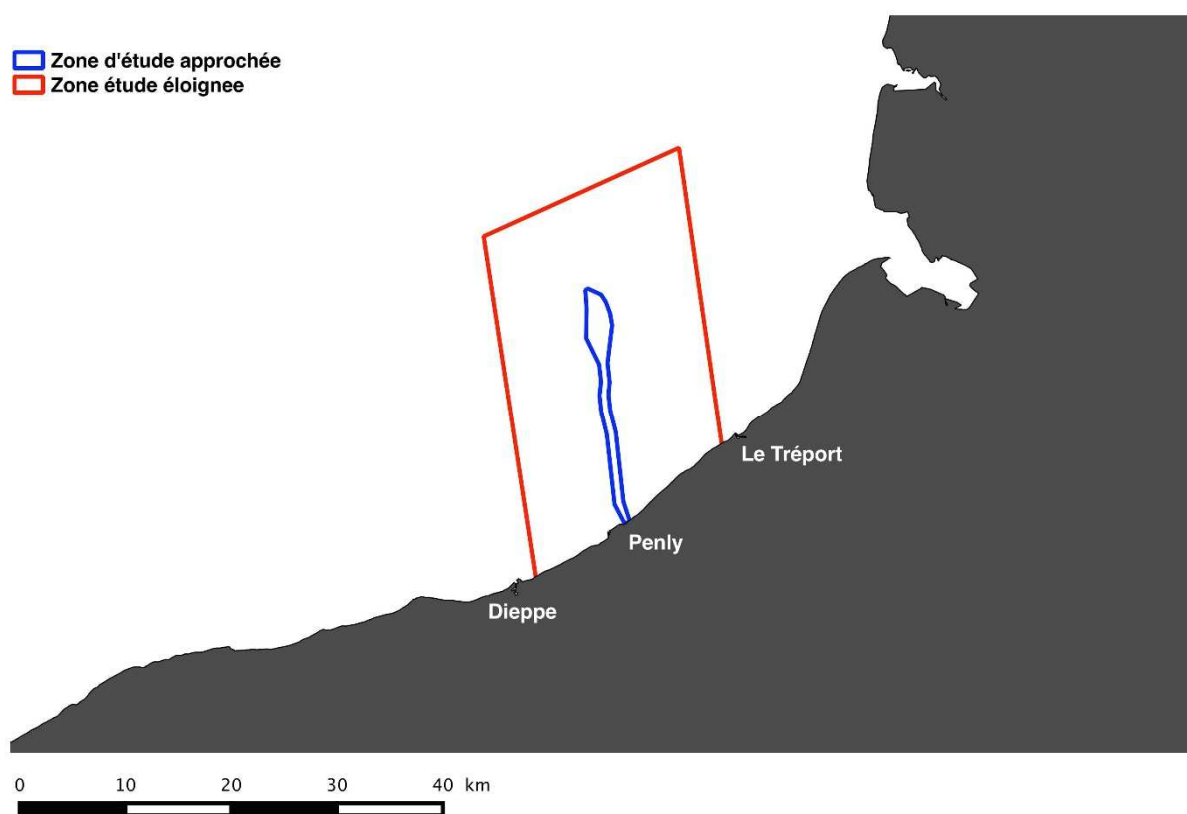


Figure 2 : Tracé du fuseau de raccordement de moindre impact du futur parc éolien en mer de Dieppe – le Tréport (zone d'étude approchée) et élargie à l'aire de potentiel impact acoustique du projet (la zone d'étude éloignée).

3.2 Activités suivies

Les impacts potentiels du bruit associés aux câbles sous-marins sont produits pendant les phases de travaux (installation, réparation éventuelle, démantèlement)

Ainsi, nous étudions l'impact acoustique des travaux d'installation des câbles par différentes techniques dont l'ensouillage et la protection extérieure des câbles suivant un tracé comprenant des zones d'affleurements rocheux et meubles. La nature des fonds conditionnant la technique à mettre en œuvre pour réaliser la pose du câble, nous effectuerons une étude bibliographique couvrant l'ensemble des procédés et permettant d'élaborer les scénarios du moins impactant au plus impactant.

4 Description synthétique de la méthodologie utilisée pour conduire l'étude d'impact

4.1 Terminologie utilisée

Enjeu environnemental : valeur prise par une fonction ou un usage, un territoire ou un écosystème au regard des préoccupations écologiques, patrimoniales, paysagères, de qualité de vie et de santé. Les enjeux sont appréciés par rapport à des critères tels que la qualité, la rareté, l'originalité, la diversité, la richesse, etc. L'appréciation des enjeux est indépendante du projet : ils ont une existence en dehors de l'idée même d'un projet.

Les enjeux sont exprimés dans l'étude d'impact en synthèse de l'état initial pour chaque espèce de mammifère marin identifiée dans l'état initial. Les enjeux sont alors définis en fonction du statut des espèces, statut patrimonial et statut local.

Effet (négatif ou positif) : décrit la conséquence objective du projet sur l'environnement, indépendamment du territoire affecté. On distingue plusieurs types d'effets :

- ✓ Effet direct : il traduit les conséquences immédiates du projet, dans l'espace et dans le temps. Il affecte l'environnement proche du projet.
- ✓ Effet indirect : il résulte d'une relation de cause à effet ayant à l'origine un effet direct.
- ✓ Effet temporaire : effet limité dans le temps, soit parce qu'il disparaît immédiatement après cessation de la cause, soit parce que son intensité s'atténue progressivement jusqu'à disparaître.
- ✓ Effet permanent : il est présent tout au long de la vie du projet.
- ✓ Effet cumulatif : il est le résultat du cumul et de l'interaction de plusieurs effets directs et indirects générés par un même projet ou par plusieurs projets distincts qui peuvent conduire à des modifications progressives des milieux ou à des changements imprévus.

Tolérance : La tolérance d'un élément à un effet peut être définie comme sa susceptibilité d'être affectée par cet effet. Pour un élément d'un écosystème (habitats, espèces), elle décrit le potentiel de destruction, dégradation, réduction qu'à l'effet sur la viabilité de cet élément.

Sensibilité : exprime le risque que l'on a de perdre tout ou une partie de la valeur d'un enjeu environnemental du fait de la nature de l'effet.

Les guides précisent que la sensibilité peut être définie à partir de la tolérance à l'effet considéré et de la résilience à cet effet. Or, un manque de connaissances générales sur la sensibilité des compartiments écologiques marins et notamment la capacité de résilience rend difficile l'application de cette méthode dans toute sa rigueur. A ce titre dans le cadre de cette étude, la sensibilité prendra en compte uniquement les notions de tolérance des espèces et des enjeux.

Impacts : croisement entre l'effet quantifié et la sensibilité du territoire ou de la composante de l'environnement touchée par le projet.

Par ailleurs, selon les compartiments et l'état des connaissances scientifiques, le principe d'évaluation des impacts pourra être simplifié (croisement entre enjeux et effets).

4.2 Méthodologie générale de l'étude d'impact

La Figure 3 présente la méthodologie et la terminologie que nous proposons de suivre pour l'évaluation des impacts d'un projet sur les récepteurs environnementaux.

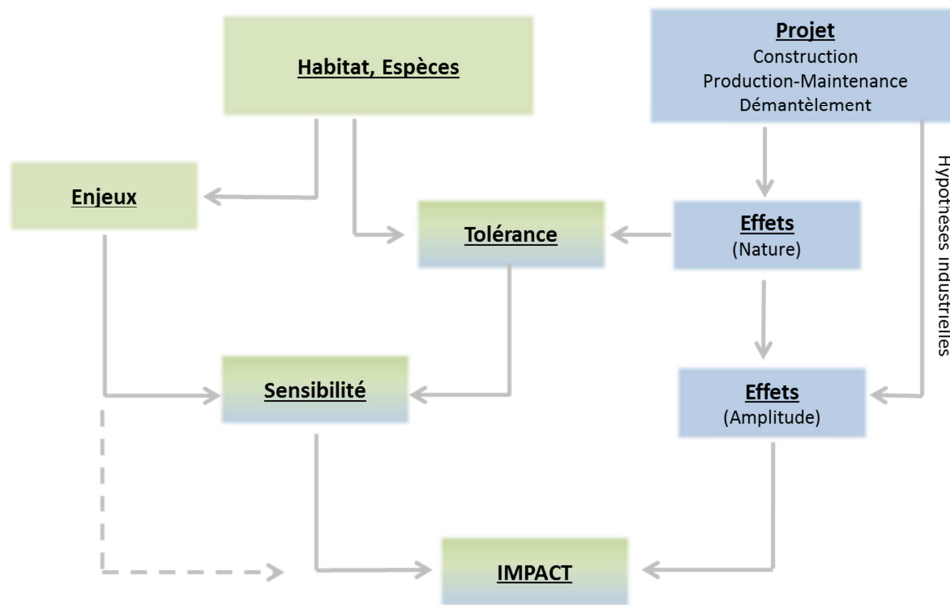


Figure 3 : Méthodologie pour l'évaluation des impacts

Dans la méthodologie proposée, figure 3 il y a d'une part à gauche l'environnement dans lequel sera implémenté le projet et d'autre part à droite le projet lui-même. L'environnement avec ces habitats et ces espèces présentent des enjeux relatifs aux valeurs de cet environnement. Ces enjeux sont intrinsèques à l'environnement et ne dépendent pas du projet. Le projet va produire des effets de différentes natures sur les habitats et les espèces qui présentent un niveau donné de tolérance à ces effets. Le croisement de la tolérance aux effets avec les enjeux définit la sensibilité à l'effet. Enfin le croisement de la sensibilité à un effet et l'amplitude de l'effet définit l'impact brut qui ensuite pourra être évité ou réduit par des mesures pour produire un effet résiduel.

Dans notre méthodologie, les impacts du projet sont évalués en croisant les attributs de deux volets, initialement indépendants l'un de l'autre :

- ✓ Le volet habitat et espèces, qui correspond aux attributs environnementaux de la zone d'étude.
- ✓ Le volet projet, qui correspond aux attributs des opérations menées lors des différentes phases du projet.

Un état initial « milieu naturel » permet d'établir les caractéristiques du volet habitat et espèces et d'en définir les enjeux. Cet état initial est construit à partir des connaissances antérieures et des études spécifiques sur les espèces présentes sur la zone d'étude (étude réalisée par le bureau d'études Biotope et fournies par RTE (Biotope, 2015).

Dans le volet projet, les hypothèses industrielles permettent l'identification des effets pour les différentes phases du projet : travaux et exploitation,)). Les effets acoustiques dus au projet conduisant à une augmentation des niveaux sonores sont : de durée limitée et d'amplitude possiblement importante lors des phases de travaux, nulle lors de la phase d'exploitation . Comme détaillé dans le chapitre 3.2, seule la phase de travaux est étudiée pour le présent projet. L'amplitude des effets acoustiques est réalisée par une phase de simulation acoustique à partir des mesures effectuées *in situ* pour i) le paramétrage des modèles et ii) la calibration/ validation des résultats de simulation.

L'analyse des données bibliographiques (publications scientifiques, études d'impact) et l'état initial (liste des espèces potentiellement présentes sur la zone) sont utilisés pour évaluer la tolérance des espèces animales considérées et notamment les mammifères marins aux effets acoustiques.

Le niveau de sensibilité des espèces est ensuite obtenu en croisant la tolérance et les enjeux.

Enfin, le croisement du niveau de sensibilité et de l'amplitude des effets permet d'aboutir à un niveau d'impact avant mesures ERC.

La synthèse des impacts acoustiques du projet sur les compartiments biologiques est présentée *in fine* dans un tableau croisant le niveau de sensibilité des espèces considérées avec les effets pressentis du projet, et propose une hiérarchisation des impacts environnementaux du site.

L'étude d'impact comporte également une synthèse des impacts du projet sur le paysage acoustique.

4.3 Méthodologie particulière pour élaborer l'état initial « Paysage acoustique »

La construction de l'état initial acoustique d'une zone d'étude passe par l'étude des questions suivantes :

- ✓ **qui fait du bruit ?** identifier la nature des sources sonores présentes dans l'aire d'étude (biophonie : sources sonores naturelles d'origine biologique, géophonie : sources sonores naturelles d'origine physique, anthropophonie : sources sonores d'origines humaines),
- ✓ **quels sont les niveaux sonores ?** quantifier la production sonore des différentes sources en fournissant la description statistique du :
 - spectre acoustique en décibel dB re. $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$,

- spectre en 1/3 d'octaves dont les 2 tiers d'octave de la DCSMM en décibel re. $1\mu\text{Pa}^2$,
 - niveau sonore perçu par une liste d'espèces animales ciblées en décibel re. $1\mu\text{Pa}^2$.
- ✓ **Qui est responsable de quoi ?** on bâtit ici le budget acoustique de la zone d'étude en associant à chaque type de sources son niveau de production sonore et sa proportion de présence sonore durant une période de référence.

L'état initial Paysage Acoustique est construit à partir de deux types de mesures acoustiques recueillies *in situ* pour le projet (Figure 4) :

- ✓ des mesures acoustiques en un point fixe permettant de caractériser le bruit ambiant, d'étudier sa variation temporelle, et d'identifier les paramètres environnementaux pilotant cette variabilité : un enregistreur acoustique et son bâti pyramidal lesté ont été déployés le long du tracé du 1^{er} au 11 mai 2016,
- ✓ des mesures acoustiques à la dérive pour réaliser une cartographie permettant d'étudier la variation spatiale du bruit ambiant sur la zone d'étude : une bouée dérivante équipée d'un enregistreur acoustique a été déployée en 8 points de la zone d'étude et le long du tracé les 1^{er} et 11 mai 2016.

Légende

- ★ Mesures au point fixe: Enregistreur SM3M et son bâti
- Mesures à la dérive : Emissions avec la source, hippodrome et bruit ambiant :
 - ◆ Debut
 - ◆ Fin
- ▭ Zone d'étude rapprochée
- ▭ Zone d'étude éloignée

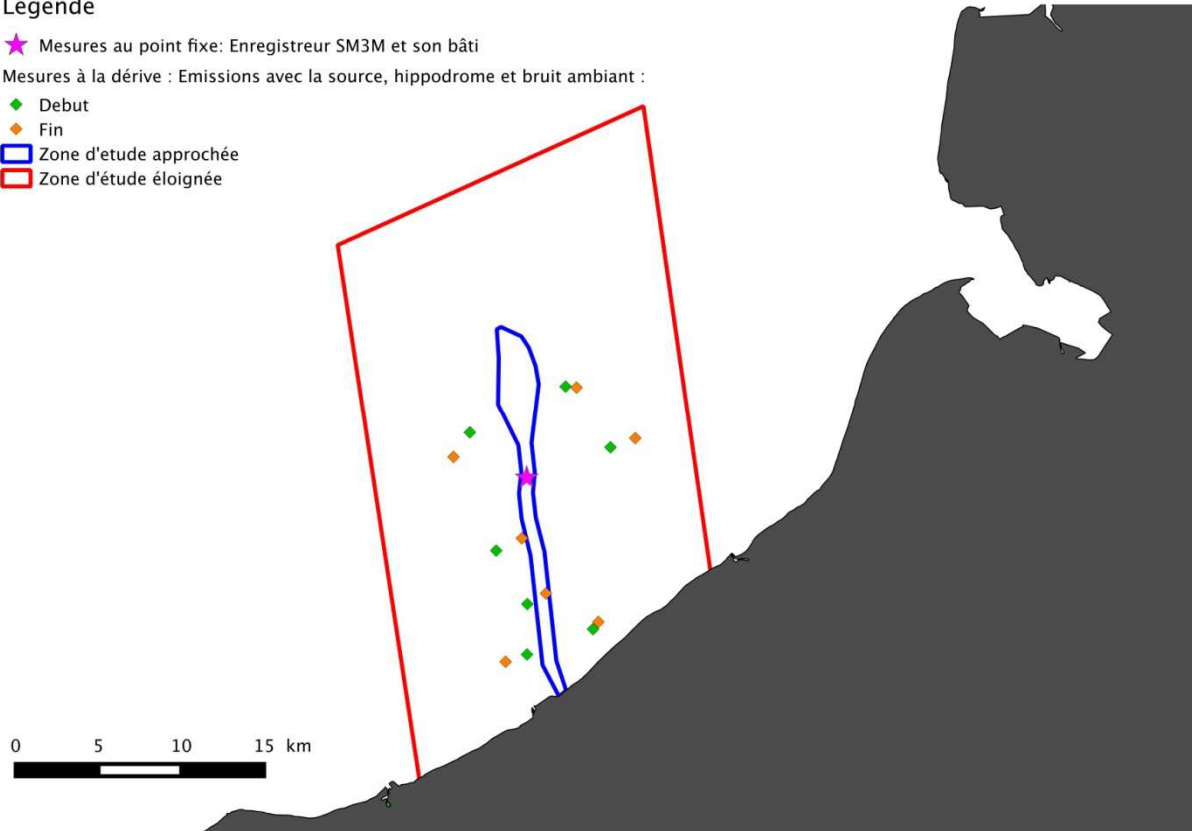


Figure 4 : Positions des mesures acoustiques in situ réalisées dans la zone d'étude éloignée du projet entre le 1^{er} et le 11 Mai 2016. Le bâti et de son enregistreur ont été déployés au point fixe du 1er au 11 Mai 2016. Les points de mesure à la dérive avec enregistrement du bruit ambiant, émissions sonores et hippodrome ont été effectués le 1er et le 11 Mai 2016.

La description détaillée de la campagne de mesures acoustiques *in situ* est disponible en Annexe 3.

Depuis la mise en place de la Directive Cadre Stratégie Milieu Marin (DCSMM), le paysage acoustique d'un site a été identifié comme l'une des propriétés intrinsèques du site permettant de décrire un habitat. Le paysage acoustique d'un site est constitué de l'ensemble des sons qu'il émet ou qui y transite. En fonction de la nature des sources sonores, le paysage acoustique est constitué de 3 composantes (Figure 5) : i) la biophonie, sons émis par les organismes vivants (invertébrés benthiques, poissons, mammifères marins), ii) la géophonie, sons émis par les phénomènes naturels abiotiques (bruit de l'agitation de surface provoquée par le vent, bruit des précipitations) et iii) l'anthropophonie, bruit des activités humaines (trafic maritime, pêche, activités nautiques récréatives).

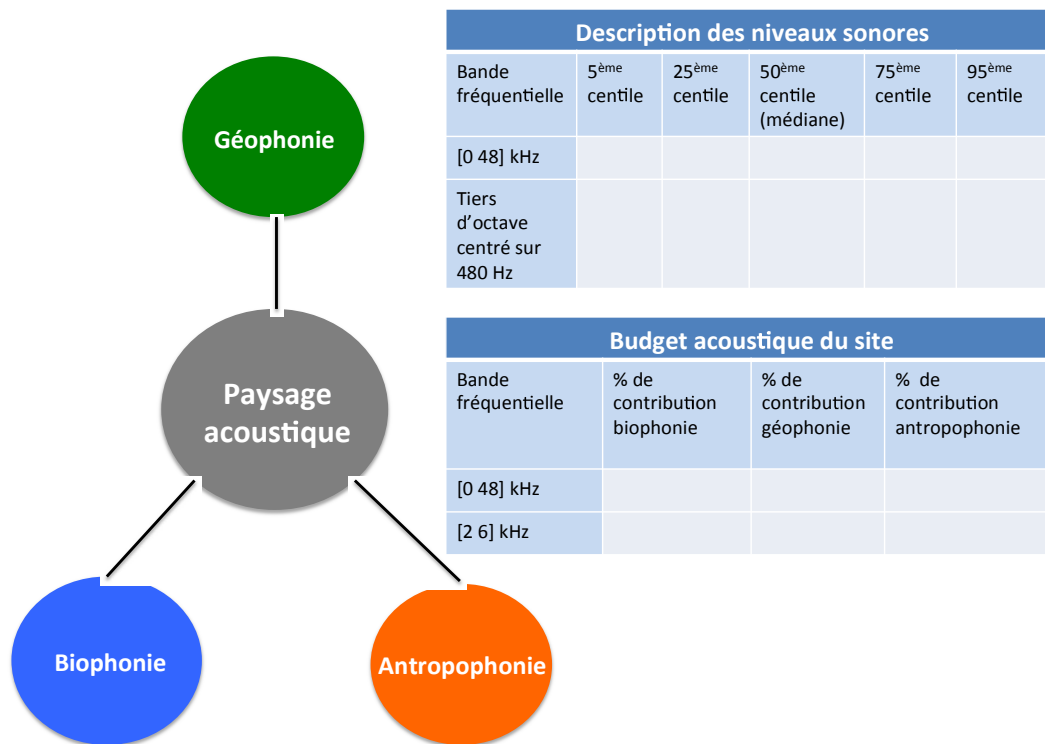


Figure 5 : Principe de la caractérisation du paysage acoustique, les percentiles et bandes fréquentielles sont donnés à titre d'illustration.

In fine, l'état initial Paysage Acoustique :

- ✓ fournit la description statistique (répartition par percentile¹) d'une large gamme d'indicateurs sonores² utiles pour l'étude d'impact :

¹ Les percentiles d'une variable sont les valeurs-seuils de cette variable qui, lorsque l'on ordonne la population selon les valeurs de la variable, la partitionnent en 100 sous-populations de taille égale. Exemple : le 5^{ème} centile signifie que 5% des valeurs sont inférieures à ce seuil et 95% des valeurs sont supérieures.

- le spectre acoustique des signaux mesurés (unité : dB re.1 μ Pa²/Hz),
- le niveau reçu large bande des signaux mesurés (unité : dB re.1 μ Pa) dans les tiers d'octave allant de 60 Hz à 30 kHz, et dans cinq bandes fréquentielles,
- les niveaux sonores perçus par les mammifères marins (après pondération par les fonctions de transfert de l'appareil auditif des mammifères)
- ✓ renseigne la variabilité temporelle du bruit ambiant et identifie les rythmes qui pilotent cette variabilité (nuit-jour, lunaire),
- ✓ renseigne la variabilité spatiale du bruit ambiant en fonction du type de biocénoses notamment en fonction de la nature du substrat (dur/rocheux, mou/sableux)
- ✓ identifie les différentes composantes (biophonie, géophonie, anthropophonie) du paysage acoustique et estime leur contribution au budget acoustique de la zone d'étude.

L'état initial acoustique d'un site est réalisé par SOMME à partir d'outils développés en interne à l'entreprise dont les bases théoriques et leurs applications sur des milieux particuliers ont été publiées dans les revues internationales à comité de lecture (évaluation par les pairs) faisant références dans la communauté acousticienne :

- ✓ Mathias, D., Gervaise, C., & Di Iorio, L. (2016). Wind dependence of ambient noise in a biologically rich coastal area. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 139(2), 839-850.
- ✓ Kinda, G. B., Simard, Y., Gervaise, C., Mars, J. I., & Fortier, L. (2013). Under-ice ambient noise in Eastern Beaufort Sea, Canadian Arctic, and its relation to environmental forcing. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(1), 77-87.
- ✓ Gervaise, C., Simard, Y., Roy, N., Kinda, B., & Menard, N. (2012). Shipping noise in whale habitat: Characteristics, sources, budget, and impact on belugas in Saguenay–St. Lawrence Marine Park hub. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 132(1), 76-89.

4.4 Méthodologie pour la détermination des zones d'impacts acoustiques potentiels.

4.4.1 Les différentes étapes

Pour un type d'impact particulier et une espèce animale visée, la démarche pour prédire la zone potentielle d'impact acoustique consiste à comparer **le niveau sonore perçu par l'espèce considérée en fonction de sa position par rapport à la source et un seuil d'impact**.

Les positions pour lesquelles les niveaux sonores perçus sont supérieurs au seuil d'impact constituent la zone d'impact potentiel. La prédiction des zones d'impact s'effectue via une démarche associant données *in situ* et modélisation prédictive.

² L'annexe 1 fournit les définitions des grandeurs acoustiques utilisées pour cette étude

La Figure 6 expose les différentes étapes (10 étapes pour 3 fonctions) de la méthodologie mise en place.

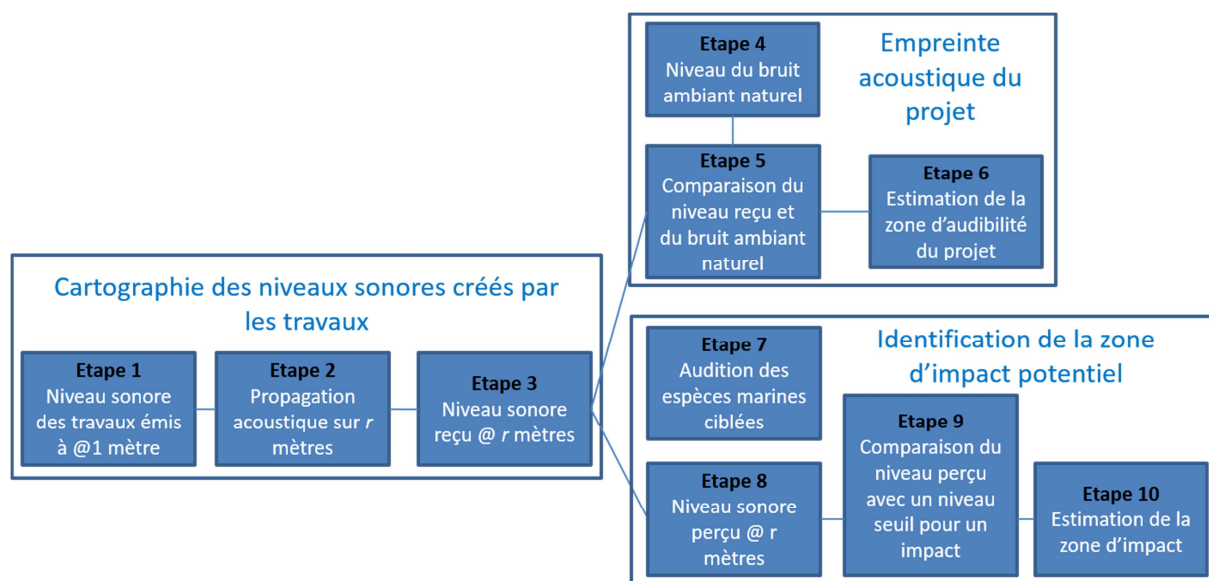


Figure 6 : 10 étapes pour prédire les risques d'impacts et identifier leurs zones, ces 10 étapes sont organisées en 3 grandes fonctions : la cartographie des niveaux sonores créés par les travaux, l'identification de l'empreinte acoustique du projet, et l'identification des zones d'impact potentiel

Dans une première partie « Cartographie des niveaux sonores créés par les travaux », nous évaluons sur la zone d'étude les niveaux sonores créés par les travaux. Pour cela trois étapes sont nécessaires :

- ✓ La première étape (étape 1, Figure 6) consiste à définir les niveaux sonores émis par les travaux. Par convention, ces niveaux sonores émis sont ceux que l'on entend à 1 mètre de la source d'émission supposée isotrope et ponctuelle. Ces niveaux sonores émis sont soit issus de mesures *in situ* soit extraits de la bibliographie pour des travaux identiques ou similaires.

Données d'entrée nécessaires pour une prédiction réaliste du bruit rayonné : nous nous baserons sur une étude bibliographique actualisée.

- ✓ La seconde étape (étape 2, Figure 6) consiste à simuler la propagation acoustique entre la position des travaux et un point d'écoute situé à une distance ' r ' de la source sonore. Cette simulation permet de calculer l'atténuation du niveau sonore le long du trajet entre la source sonore et un récepteur potentiel à la distance ' r '. Cette atténuation communément nommée 'Perte de transmission' constitue le résultat essentiel de la simulation. En faisant varier la position ' r ' du récepteur, on dresse une carte des pertes de transmission autour de la zone des travaux.

*Données d'entrée nécessaires : nous nous baserons sur un modèle de propagation alimenté par des mesures *in situ* (paramètres géo-acoustiques du*

fond) , des données bathymétriques et des propriétés physiques (fond, colonne d'eau) fournies par la société RTE.

- ✓ La troisième étape (étape 3, Figure 6) consiste à estimer le niveau reçu à une distance 'r' des travaux (position potentielle des animaux) en retranchant au niveau émis les pertes de transmission dues à la propagation.

Dans la seconde partie « Empreinte sonore du projet », nous estimons l'empreinte sonore du projet définie comme la zone pour laquelle le niveau sonore généré par le projet, reçu à une distance r, est supérieur au niveau de bruit ambiant (Etape 4, Figure 6). Cette empreinte sonore est la zone à l'intérieur de laquelle des impacts acoustiques peuvent se produire. Il n'y a pas d'impact à l'extérieur de cette zone. En effet, il ne peut y avoir d'impact si les travaux génèrent un niveau sonore inférieur à celui du bruit ambiant existant avant les travaux. Les étapes 5 et 6 de la Figure 6 permettent de construire l'empreinte. Dans l'étape 4, les niveaux de bruit ambiant de la zone sont issus de mesures *in situ*.

Données d'entrée nécessaires : mesures in situ du bruit ambiant, statistique des conditions météorologiques pendant les périodes de mesures acoustiques, statistique du trafic maritime obtenue par analyse des données AIS sur une période antérieure et d'une durée significative.

Dans la troisième partie, nous identifions, à l'intérieur de l'empreinte acoustique du projet, les zones de risques d'impact. Cette partie est effectuée pour chaque groupe fonctionnel d'espèces animales. Dans notre étude nous étudierons 4 types d'impacts au niveau individuel : i) le masquage des communications, ii) le changement de comportement, iii) les pertes d'audition temporaires, iv) les pertes d'audition permanentes. Cette partie est constituée de 4 étapes :

- ✓ Les deux premières étapes (étapes 7 et 8, Figure 6) consistent à pondérer les niveaux sonores reçus par la fonction de transfert de l'appareil auditif de l'espèce visée pour estimer le niveau perçu. En effet, pour avoir un impact, il faut que le son reçu soit perçu par l'animal (i.e. que les fréquences sonores du son reçu soient celles qui sont entendues par l'espèce, exemple : les hommes n'entendent pas les ultrasons alors qu'ils sont perçus par les chiens). Dans notre étude, nous utiliserons les fonctions de transfert proposées par Southall et al. (Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Initial Scientific Recommendations, 2007) pour les cétacés spécialistes des basses fréquences, des moyennes fréquences, des hautes fréquences et les pinnipèdes dans l'eau et par Popper et al. (ASA S3/SC1.4 TR-2014 Sound Exposure Guidelines for Fishes and Sea Turtles: A Technical Report prepared by ANSI-Accredited Standards Committee S3/SC1 and registered with ANSI, 2014) pour les poissons.
- ✓ La troisième étape (étape 9, Figure 6) consiste à choisir des seuils de risque pour chaque type d'impact. Dans notre étude, nous appliquerons les seuils issus des références bibliographiques agréés pour leur qualité par les paires et largement utilisées par la communauté (Mammifères marins Southall, et al., 2007; Poissons : Oestman, Buehler, Reyff, & Rodkin, 2009 , Popper et al., 2014). Concernant les mammifères marins, l'annexe 6 (partie 17) justifie

l'emploi des seuils de Southall et al. (2007) comme la vision la plus conservatrice pour les espèces à enjeux.

- ✓ La quatrième étape (étape 10, Figure 6) consiste à rechercher les positions géographiques où les niveaux perçus sont supérieurs aux seuils de risque d'impacts potentiels.

Notre méthodologie de simulation acoustique est basée sur des outils publiés dans les revues internationales à comité de lecture (évaluation par des pairs) faisant référence dans la communauté acousticienne :

- ✓ Gervaise, C., Aulanier, F., Simard, Y., & Roy, N. (2015). Mapping probability of shipping sound exposure level. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 137(6), EL429-EL435.
- ✓ Gervaise, C., Kinda, B. G., Bonnel, J., Stéphan, Y., & Vallez, S. (2012). Passive geoacoustic inversion with a single hydrophone using broadband ship noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(3), 1999-2010.

4.4.2 Résultats de l'étude d'impact : types et zones d'impact potentiel et les espèces visées par la présente étude

Dans notre étude, nous allons examiner 4 types d'impact à l'échelle de l'individu (le masquage de la communication et l'audibilité de l'activité, le changement de comportement, la perte auditive temporaire TTS, la perte auditive permanente PTS) pour 6 catégories d'espèces animales (Tableau 1) : les cétacés basse fréquence (LF), les cétacés moyenne fréquence (MF dont les grands dauphins, les dauphins communs et les dauphins de Risso), les cétacés haute fréquence (HF dont les marsouins), les pinnipèdes (dont les phoques gris et veau-marin), les poissons d'un poids inférieur à 2 grammes, et les poissons de plus de 2 grammes (Carlson, Hastings, & Popper, 2007; Oestman, Buehler, Reyff, & Rodkin, 2009). Lorsque les PTS et TTS sont examinés, le modèle suivant de réponse des animaux au son pendant la période d'audition sera supposée : « l'animal immobile » qui restera statique. Les seuils de modification du comportement des poissons ne sont pas traités car non disponibles dans la littérature.

Tableau 1 : Types d'impact traités en réponse au son pour les 6 catégories d'espèces animales considérées. Les cas non traités sont dus à un manque de connaissances actuelles.

Faune marine		Type d'impact			
Catégories d'espèces animales	Exemples d'espèces de la zone d'étude	Audibilité de l'activité	Modification du comportement	Modification temporaire du seuil de l'audition (TTS)	Modification permanente du seuil de l'audition (PTS)
Cétacés – Basse Fréquence (LF)	Le rorqual commun (<i>Balaenoptera physalus</i>)	Traité	Traité	Traité pour les animaux immobiles	Traité pour les animaux immobiles

Faune marine		Type d'impact			
Cétacés – Moyenne Fréquence (MF)	Le grand dauphin (<i>Tursiops truncatus</i>)	Traité	Traité	Traité pour les animaux immobiles	Traité pour les animaux immobiles
Cétacés – Haute fréquence (HF)	Le marsouin commun (<i>Phocoena phocoena</i>)	Traité	Traité	Traité pour les animaux immobiles	Traité pour les animaux immobiles
Pinnipèdes dans l'eau	Le phoque gris (<i>Halichoerus grypus</i>)	Traité	Traité	Traité pour les animaux immobiles	Traité pour les animaux immobiles
Poissons (poids < 2 g)		Traité	Non traité	Traité pour les animaux en fuite	Non traité
Poissons (poids > 2 g)		Traité	Non traité	Traité pour les animaux immobiles	Traité pour les animaux immobiles

Pour chaque type d'impact, nous supposons une activité sonore à une position donnée. Nous identifions les 4 zones dans lesquelles les risques d'impact existent (modification permanente du seuil de l'audition en noir, modification temporaire du seuil de l'audition en rouge, modification du comportement en bleu, audibilité de l'activité en vert) (Figure 7).

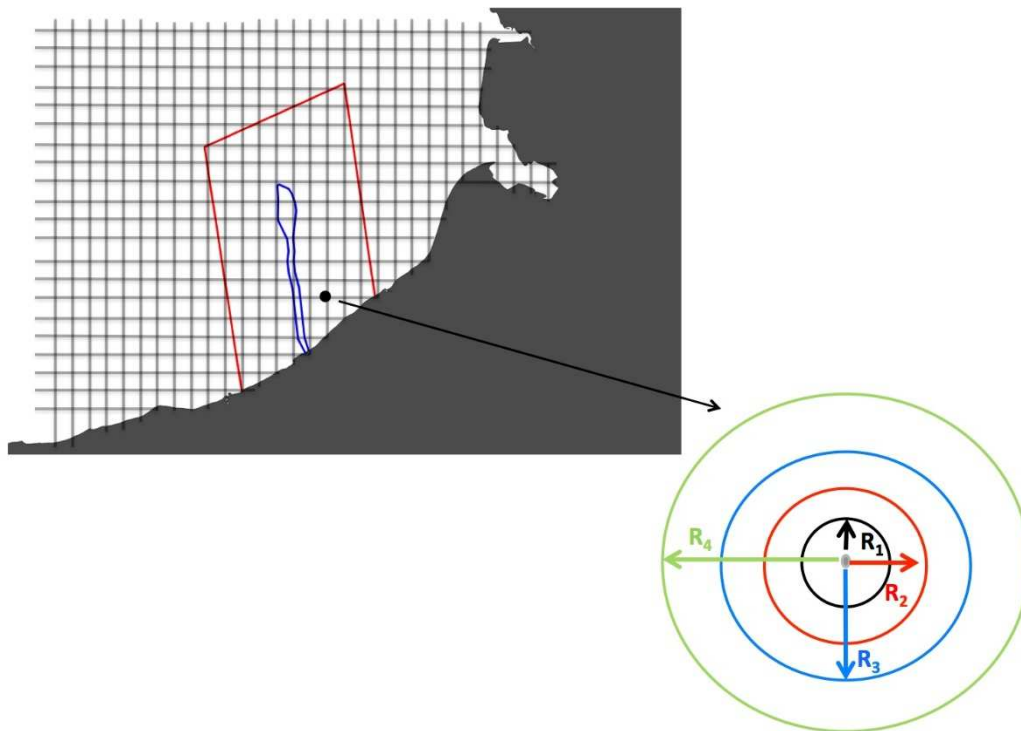


Figure 7 : Principe pour estimer les zones d'impact : Pour chaque type d'impact, nous plaçons l'activité sonore à une position spécifique. Nous calculons 4 rayons correspondant aux disques dans lesquels les risques d'impact existent (modification permanente du seuil de l'audition en noir, modification temporaire du seuil de l'audition en rouge, modification du comportement en bleu, audibilité de l'activité en vert).

Le modèle de réponses des animaux aux émissions sonores choisi est celui de « l'animal immobile » qui restera statique même en présence d'une émission sonore gênante (Figure 8). Nous choisissons volontairement une durée conservatrice de 1h pour un mammifère marin et de 6h pour un poisson. La durée de 1h pour les mammifères marins est cohérente avec la mise en place d'un protocole de monitoring par acoustique passive (PAM) et de suivi visuel (Chapitre 10.2) autour des travaux. L'approche de « l'animal immobile » est conservatrice par rapport à l'approche au scénario de « l'animal en fuite » qui quitte la zone.

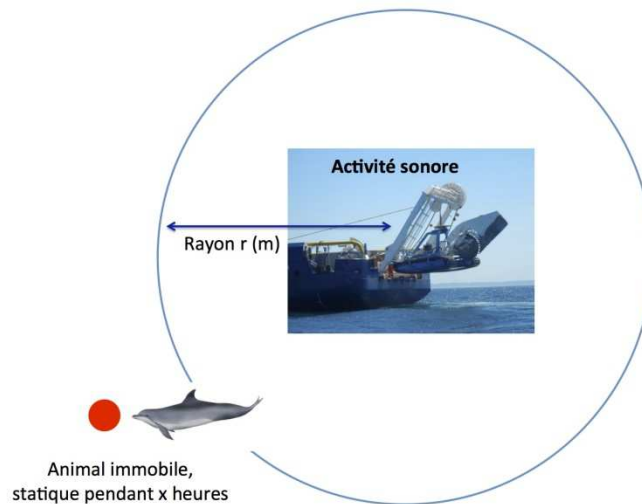


Figure 8 : Le modèle de comportement animal considéré : le modèle « animal immobile »

4.4.3 Les grandeurs acoustiques utilisées

Dans notre étude, nous utiliserons les grandeurs acoustiques suivantes :

- ✓ Pour les sources sonores (convention : le niveau émis par une source est le niveau sonore que l'on mesurerait à 1 mètre de la source, d'où l'adjonction de la notation **@1m**) :
 - La densité spectrale de puissance émise exprimée en dB re. $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}@1\text{m}$, cette quantité constitue le spectre sonore des sons émis, elle exprime la répartition de la puissance sonore émise en fonction de la fréquence à 1 mètre de la source,
 - Le niveau sonore émis SL (Source Level) par l'ensemble des fréquences contenues sur une bande fréquentielle donnée, exprimé en dB re. $1\mu\text{Pa}@1\text{m}$,
- ✓ Pour les sons reçus :

- La densité spectrale de puissance reçue exprimée en dB re. $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$, cette quantité constitue le spectre sonore des sons reçus, elle exprime la répartition de la puissance sonore reçue en fonction de la fréquence,
- Le niveau sonore reçu SPL (Sound Pressure Level) à l'intérieur d'une bande fréquentielle donnée, exprimé en dB re. $1\mu\text{Pa}$,
- Le niveau d'énergie sonore (dose) cumulée SEL (Sound Exposure Level) sur une écoute d'une durée donnée et dans une bande fréquentielle donnée, exprimé en dB re. $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$
- ✓ Les pertes de transmission, TL (Transmission Loss) exprimée en dB, celles-ci sont fonctions de la distance entre la source sonore et le récepteur potentiel et de la fréquence émise,
- ✓ Les fonctions de transfert des appareils auditifs des espèces ciblées MW (M-Weighting function) exprimées en dB ou audiogramme (exprimé en dB en fonction de la fréquence). Ces deux fonctions quantifient comment l'animal récepteur entend les sons, en fonction de la fréquence.

Les différentes grandeurs acoustiques sont exprimées en décibel relativement à une référence. Le décibel est une échelle logarithmique :

- ✓ qui permet de représenter et comparer des petites quantités avec des grandes,
- ✓ qui doit être maniée avec prudence car le niveau en décibel d'une somme de sons (comme par exemple le son d'une trancheuse de sédiment et le son du navire porteur) n'est pas la somme des niveaux en décibel.
- ✓ si une première source sonore de type 1 possède un niveau supérieur à celui d'une seconde source de type 2 de :
 - 3 dB alors la première est 2 fois plus puissante que la seconde, il faut 2 sources de type 2 pour produire la même puissance sonore que 1 source de type 1,
 - 10 dB alors la première est 10 fois plus puissante que la seconde, il faut 10 sources de type 2 pour produire la même puissance sonore que 1 source de type 1,
 - 20 dB alors la première est 100 fois plus puissante que la seconde, il faut 100 sources de type 2 pour produire la même puissance sonore que 1 source de type 1,
 - 30 dB alors la première est 1000 fois plus puissante que la seconde, il faut 1000 sources de type 2 pour produire la même puissance sonore que 1 source de type 1.

5 Les enjeux

5.1 Etat initial « Mammifères Marins »

Les résultats de la synthèse d'études « Mégafaune Marine », réalisée par le bureau d'étude Biotope en 2015 dans le cadre du projet de parc éolien en mer, et complétée par un suivi aérien de mammifères marins permettent d'établir l'état initial Mammifères Marins.

L'aire d'étude des mammifères marins (Figure 9, zone d'étude éloignée) s'étend du Nord de la Baie de Somme à Dieppe et permet de couvrir la zone de projet de parc (zone d'étude approchée) ainsi que les principaux secteurs présentant des enjeux localisés, en particulier plus au Nord (Baie de Somme, Baie d'Authie).

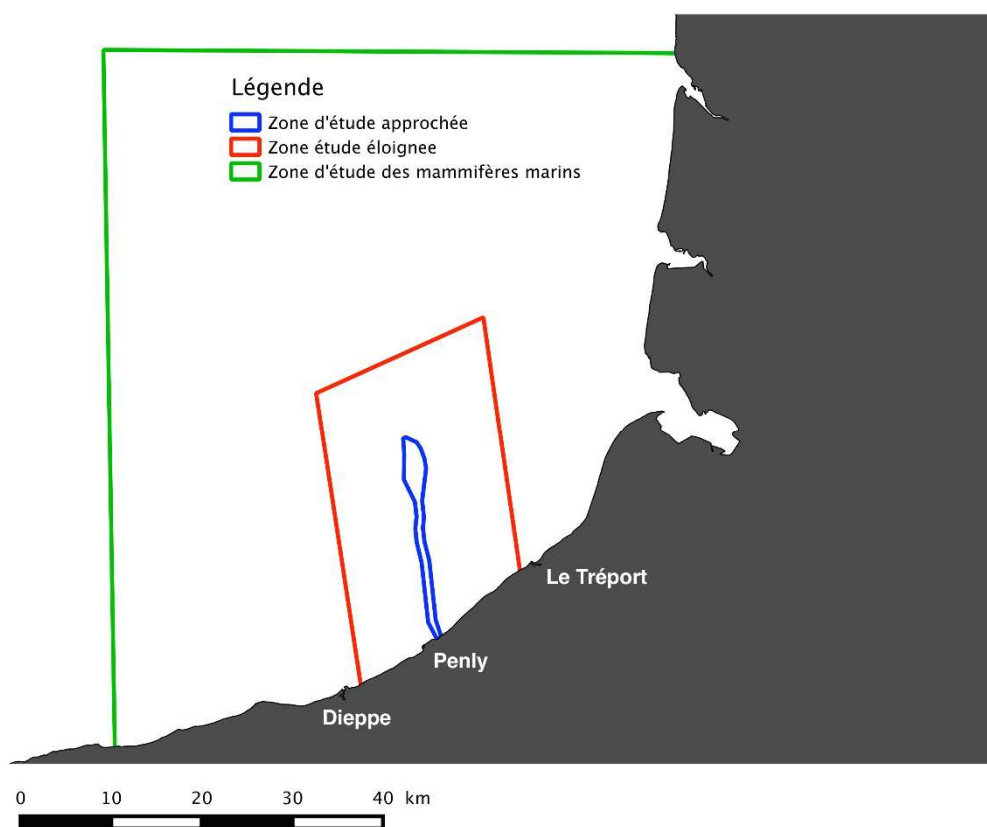


Figure 9 : Représentation de la zone d'étude des Mammifères Marins réalisée en 2015, intégrant la zone de raccordement du projet (zone d'étude approchée) et la zone d'impact potentiel (zone d'étude éloignée).

L'état initial Mammifères Marins a révélé que la zone d'étude éloignée du projet (Figure 9) est potentiellement fréquentée par 10 espèces de mammifères marins figurant dans les Annexes II et IV de la Directive Habitats-Faune-Flore (Tableau 4):

- ✓ La présence de phoques barbus est anecdotique et correspond à un écart de leur aire de répartition

- ✓ Les rorquals communs, les dauphins bleu et blanc et les dauphins de Risso vivent essentiellement sur le plateau continental et font occasionnellement des incursions dans la zone d'étude éloignée.
- ✓ Les globicéphales noirs sont régulièrement observés dans la zone d'étude entre les mois de Mars à Octobre, avec un pic de présence au mois de Mai. Les dauphins communs sont observés de façon saisonnière, pendant les mois de Février à Avril, et de Juillet à Août. Les grands dauphins sont régulièrement observés dans la zone d'étude en dehors de la période hivernale.
- ✓ Les marsouins communs vivent essentiellement sur le plateau continental et font régulièrement des incursions dans la zone d'étude éloignée. Cette présence, plus importante pendant les mois de Mars et Avril, est guidée par la recherche de proies.
- ✓ La Baie de Somme, abrite une des plus importantes colonies de phoques veaux marins et phoques gris de France. Ces deux espèces sont observées à l'année dans la zone d'étude éloignée.

Tableau 2 : Les 10 espèces de mammifères marins potentiellement présentes dans la zone d'étude (échelles de taille des espèces non respectées)

Espèces dont la présence est anecdotique

Le phoque barbu (*Erignathus barbatus*)

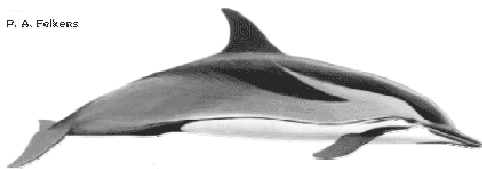


© 2003 Jon B. Hlidberg

Espèces dont la présence est occasionnelle

Le dauphin Bleu et Blanc (*Stenella coeruleoalba*)

P. A. Folkers



Source : <http://www.cetacea.online.fr>

Le rorqual commun (*Balaenoptera physalus*)



Source : www.marinebio.org

Le dauphin de Risso (*Grampus griseus*)



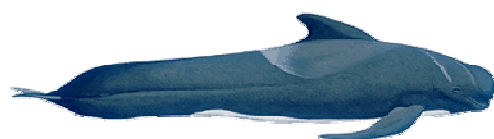
Source : www.ascobans.org

Le dauphin commun (*Delphinus delphis*)



Source : www.ioniandolphinproject.org

Le globicéphale noir (*Globicephala melas*)



Source : www.ascobans.org

Espèces dont la présence est régulière

Le marsouin commun (*Phocoena phocoena*)



Source : www.swisscetaceansociety.org

Le grand dauphin (*Tursiops truncatus*)



Source: www.webtenerife.com

Le phoque veau-marin (*Phoca vitulina*)



Source : www.fao.org

Le phoque gris (*Halichoerus grypus*)



Source : www.animaldiversity.org

5.2 Les enjeux

Cette section a pour objectif de présenter les résultats d'évaluation des enjeux mammifères marins sur la zone d'étude éloignée du projet (Figure 9). La méthodologie pour établir la grille d'évaluation des enjeux est détaillée en Annexe 2 : Méthodologie détaillée pour l'évaluation d'impact.

Le Tableau 3 présente une synthèse des résultats de l'évaluation des enjeux pour chaque espèce de mammifère marin identifiée par l'état initial comme potentiellement présentes dans la zone d'étude éloignée. Le détail de cette étude est présenté dans le Tableau 4.

Trois groupes de Mammifères marins ont ainsi pu être définis : i) les marsouins communs, phoques gris et phoques communs présentant un enjeu fort ; ii) les espèces avec un enjeu moyen (les grands dauphins, les dauphins communs et les globicéphales noirs) ; les espèces avec un enjeu faible (les dauphins bleu et blanc et de Risso, les rorquals communs et les phoques barbus).

Tableau 3 : Synthèse des enjeux pour chaque espèce identifiée dans l'état initial. Le classement est défini par ordre décroissant de niveau d'enjeu

Espèces (Nom vernaculaire)	Enjeu patrimonial	Statut local	Enjeu local
Marsouin commun	Fort	Fort	Fort
Phoque gris	Fort	Fort	Fort
Phoque commun (veau marin)	Moyen	Fort	Fort
Grand dauphin	Moyen	Moyen	Moyen
Dauphin commun	Faible	Moyen	Moyen
Globicéphale noir	Faible	Moyen	Moyen
Dauphin de Risso	Faible	Faible	Faible
Dauphin bleu et blanc	Faible	Faible	Faible
Rorqual commun	Faible	Faible	Faible
Phoque barbu	Faible	Faible	Faible

Tableau 4 : Enjeux pour chaque espèce identifiée dans l'état initial

Espèces		Statut patrimonial												Liste rouge de Haute-Normandie (2013)	Aire de répartition	Population (individus)	Synthèse de l'enjeu patrimonial	Statut local (aire d'étude éloignée)	Enjeu I (aire d'étude éloignée)
		International				Européen			Etat de conservation - Région Haute-Normandie (DH)	National			Région Manche						
Nom vernaculaire	Nom scientifique	LR	Berne	OSPARR	Bonn	LR	DH	CITES		LR	PN 1	PN 2	ZNIEFF						
Dauphin bleu et blanc	<i>Stenella coeruleoalba</i>	LC	Ann.II	/	Ann.I et II	DD	Ann.IV	Ann.A	Inconnu	LC	/	Art.2		Non applicable	Des tropiques aux eaux tempérées (talus et plateau continental)	au moins 700 000	Faible	Faible	Faible
Dauphin commun	<i>Delphinus delphis</i>	LC	Ann.II	/	Ann.I et II	DD	Ann.IV	Ann.A	Inconnu	LC	/	Art.2		Non applicable	Eaux côtières tempérées tropicales ou subtropicales (talus continental préférentiellement)	4 000 000	Faible	Moyen	Moyen
Dauphin de Risso	<i>Grampus griseus</i>	LC	Ann.II et III	/	Ann.II	DD	Ann.IV	Ann.A	Inconnu	DD	/	Art.2		Non applicable	Des tropiques aux eaux tempérées (400 et 1000 m le long du talus continental) - dans la partie sud-ouest de la manche, incursion saisonnière dans les eaux côtières.	?	Faible	Faible	Faible
Globicéphale noir	<i>Globicephala melas</i>	DD	Ann.II	/	Ann.II	DD	Ann.IV	Ann.A	Inconnu	LC	/	Art.2		Données insuffisantes	Eaux tempérées et subpolaires (entre 300 et 1800 m principalement sur le talus continental/peuvent suivre leurs proies en zones plus côtières)	1 000 000	Faible	Moyen	Moyen
Grand dauphin	<i>Tursiops truncatus</i>	LC	Ann.II	/	Ann.II	DD	Ann.II et IV	Ann.A	Quasi-menacée	LC	Art. 1	Art.2	X	Données insuffisantes	Eaux tropicales et tempérées dans les deux hémisphères (principalement côtiers mais aussi pélagiques)	600 000	Moyen	Moyen	Moyen

Espèces		Statut patrimonial												Liste rouge de Haute-Normandie (2013)	Aire de répartition	Population (individus)
		International				Européen			Etat de conservation - Région Haute-Normandie (DH)	National			Région Manche			
Nom vernaculaire	Nom scientifique	LR	Berne	OSPARR	Bonn	LR	DH	CITES			LR	PN 1	PN 2	ZNIEFF		
Marsouin commun	<i>Phocoena phocoena</i>	LC	Ann.II	Ann. V	Ann.II	VU	Ann.II et IV	Ann.A	Vulnérable	NT	Art. 1	Art.2		Vulnérable	Eaux côtières tempérées froides et subpolaires (plateau continental - eaux inférieures à 200 m)	Au moins 700 000 (250 000 européen/ 50 000 Manche)
Phoque commun (veau marin)	<i>Phoca vitulina</i>	LC	Ann.III	/	Ann.II	LC	Ann.II et V	/	Quasi-menacée	NT	Art. 1	Art 3 et 5	X	Vulnérable	Eaux côtières de l'hémisphère nord	Entre 350 000 et 500 000 animaux dont 100 000 Atlantique ouest
Phoque gris	<i>Halichoerus grypus</i>	LC	Ann.III	/	Ann.II	LC	Ann.II et V	/	Vulnérable	NT	Art. 1	Art 3 et 5	X	Données insuffisantes	Eaux côtières de l'Atlantique nord (la Bretagne est la limite sud de l'aire de répartition)	300 000
Rorqual commun	<i>Balaenoptera physalus</i>	EN	Ann.II et III	/	Ann. I et II	NT	Ann.IV	Ann.A	Inconnu	NT	/	Art.2		Non applicable	Distribution mondiale sauf dans les tropiques (eaux profondes)	Supérieur à 30 000

Légende du Tableau 4 :

LR : liste rouge UICN (mondiale, européenne, nationale)

- ✓ EN : En danger
- ✓ VU : Vulnérable
- ✓ LC : Préoccupation mineure
- ✓ NT : Quasi menacée
- ✓ DD : Données insuffisantes
- ✓ NA : Non applicable

Berne : Convention (19 septembre 1979) relative à la conservation de la vie sauvage et du milieu naturel de l'Europe. Les exigences de la convention de Berne en matière d'habitats sont satisfaites par la désignation de sites dans le cadre du Réseau Natura 2000. Ann. II : espèces de faune nécessitant une protection particulière ; Ann. III : espèces de faune sauvage protégées tout en laissant la possibilité de réglementer leur exploitation conformément à la Convention.

OSPAR : Convention (22 septembre 1992) qui guide la coopération internationale pour la protection de l'environnement marin de l'Atlantique du Nord-est. Ann. V : liste des espèces.

Bonn : Convention (23 juin 1979) sur la conservation des espèces migratrices appartenant à la faune sauvage (CMS : Convention on Migratory Species), Ann. I : regroupe la liste des espèces menacées en danger d'extinction c'est-à-dire les espèces dont l'aire de répartition pourrait disparaître ou toute espèce en danger, Ann. II : établit la liste des espèces dont l'état de conservation est défavorable.

DH : directive européenne du 21 mai 1992 92/43/CEE concerne la préservation des habitats naturels de la faune et de la flore sauvage.

- ✓ Ann. II : annexe qui regroupe les espèces animales et végétales d'intérêt communautaire dont la conservation nécessite la désignation de zones spéciales de conservation (ZSC).
- ✓ Ann. IV : annexe qui liste les espèces animales et végétales d'intérêt communautaire qui nécessitent une protection stricte : elle concerne les espèces devant être strictement protégées. Cette liste a été élaborée sur la base de l'annexe 2 de la Convention de Berne.
- ✓ Ann V : annexe qui concerne les espèces animales et végétales d'intérêt communautaire dont le prélèvement dans la nature et l'exploitation sont susceptibles de faire l'objet de mesures de gestion.

CITES : application de la convention CITES N°338/97 du conseil du 9 décembre 1996 relatif à la protection des espèces de faune et de flore sauvages par le contrôle de leur commerce. Ann. A : toutes les espèces menacées d'extinction qui sont ou pourraient être affectées par le commerce.

PN1 : arrêté du 9 juillet 1999 fixant la liste des espèces de vertébrés protégées menacées d'extinction en France et dont l'aire de répartition excède le territoire d'un département :

- ✓ Art.1 : liste espèces de vertébrés protégées au titre de l'article L. 211-1 du code rural menacées d'extinction en France en raison de la faiblesse observée ou prévisible de leurs effectifs et dont l'aire de répartition excède le territoire d'un département, au sens du 1 des tableaux « Code rural » figurant aux paragraphes 1 et 2-A du titre II de l'annexe du décret du 19 décembre 1997

PN2 : arrêté du 1er juillet 2011 fixant la liste des mammifères marins protégés sur le territoire national et les modalités de leur protection

- ✓ Art. 2 : Pour les espèces de cétacés et de siréniens dont la liste est fixée, sont interdits sur le territoire national, et dans les eaux marines sous souveraineté et sous juridiction, et en tout temps :

I. – La destruction, la mutilation, la capture ou l'enlèvement intentionnels incluant les prélèvements biologiques, la perturbation intentionnelle incluant la poursuite ou le harcèlement des animaux dans le milieu naturel.

II. – La destruction, l'altération ou la dégradation des sites de reproduction et des aires de repos des animaux. Ces interdictions s'appliquent aux éléments physiques ou biologiques réputés nécessaires à la reproduction ou au repos de l'espèce considérée, aussi longtemps qu'ils sont effectivement utilisés ou utilisables au cours des cycles successifs de reproduction ou de repos de cette espèce et pour autant que la destruction, l'altération ou la dégradation compromette la conservation de l'espèce en remettant en cause le bon accomplissement des cycles biologiques.

III. – La détention, le transport, la naturalisation, le colportage, la mise en vente, la vente ou l'achat, l'utilisation commerciale ou non des spécimens de mammifères marins prélevés dans le milieu naturel :

– du territoire national, et dans les eaux marines sous souveraineté et sous juridiction après le 1er octobre 1995 ;

– du territoire européen, et dans les eaux marines sous souveraineté et sous juridiction des autres Etats membres de l'Union européenne, après la date d'entrée en vigueur de la directive du 21 mai 1992 susvisée.

- ✓ Art. 3 : idem article 2 pour les Pinnipèdes
- ✓ Art 5 : sont interdits sur le territoire national, et dans les eaux marines sous souveraineté et sous juridiction, et en tout temps le colportage, l'utilisation commerciale, la mise en vente, la vente ou l'achat de tout produit, transformé ou non, obtenu à partir d'un animal d'une espèce d'otaridés, de phocidés ou d'odobénidés, notamment la viande, l'huile, la graisse, les organes, les pelleteries brutes et les pelleteries tannées ou apprêtées, y compris les pelleteries assemblées en nappes, sacs, carrés, croix et présentations similaires, et les articles fabriqués à partir de pelleteries.

ZNIEFF : Liste des espèces déterminantes pour la désignation des ZNIEFF

SCAN II : chiffres d'abondance issus du programme SCAN II (plateau continental Europe du nord)

CODA : chiffres d'abondance issus du programme CODA (zone hauturière Europe du nord)

s.o.: sans objet

? : non évaluée (UICN, 2015)

En conclusion :

10 espèces occupent potentiellement la zone d'étude.

La présence des espèces anecdotiques ou occasionnelles (phoque barbu, dauphin Bleu et Blanc, dauphin de Risso, rorqual commun) correspondent à des incursions ou écarts de leur aires de répartition.

Quatre espèces (marsouin commun, grand dauphin, phoques veaux marins et phoques gris) occupent régulièrement la zone d'étude, principalement entre mars et mai et juillet-août pour la recherche de proie.

Une des plus importantes colonies de phoques veaux marins et phoques gris de France vit en Baie de Somme.

La prise en compte des enjeux patrimoniaux et locaux définit trois de ces espèces avec un enjeu fort (marsouin commun, phoque gris et phoque commun) et trois avec un enjeu moyen (dauphin commun, grand dauphin et globicéphale noir). Les autres espèces présentent un enjeu faible.

6 Etat initial Paysage Acoustique – Bruit ambiant

L'état initial Paysage Acoustique (cf chapitre 4.3 pour la méthodologie et les données mesurées) construit à partir des mesures acoustiques *in situ* recueillies pour le projet, a permis i) de décrire les niveaux sonores de la zone d'étude, ii) d'identifier les sources sonores présentes dans l'environnement, et iii) d'évaluer leur contribution au budget acoustique. Les principaux résultats sont exposés dans la présente section. La méthodologie et l'analyse sont résumées dans le chapitre 4.3 et présentées en détail dans l'Annexe 4 : Etat initial « Paysage acoustique – Bruit ambiant ». Nous présentons ici les principaux résultats de l'étude.

6.1 Nature des sources sonores

Quatre classes de signaux ont pu être identifiées en explorant manuellement les spectrogrammes (visualisation temps/ fréquence des données par périodes successives de 15 minutes) :

- ✓ La classe « BIO » : production sonore des organismes benthiques,
- ✓ La classe « GEO » : production sonore induite par la pluie se traduisant par un chorus sans source individualisable,
- ✓ La classe « ANT » : bruit généré par des embarcations motorisées,
- ✓ La classe « BRU » : bruit de mesure généré par la vibration du mouillage et le transport sédimentaire.

Les figures 11 à 14 présentent les spectrogrammes-types de chaque classe, avec une échelle de niveau sonore uniformisée.

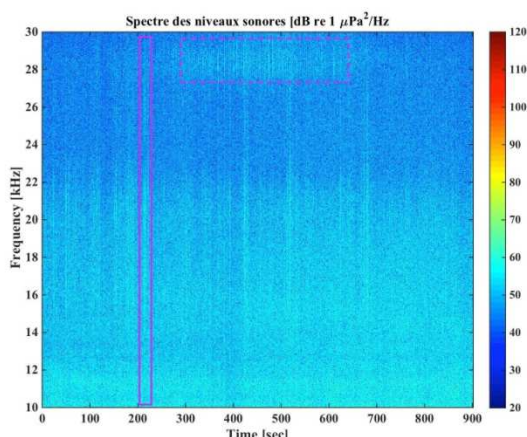


Figure 10 : Spectrogramme typique de la production sonore (impulsions) des peuplements benthiques de la zone d'étude (classe BIO). On observe des impulsions large bande (rectangle magenta en trait plein) de 14 kHz à 30 kHz et des impulsions centrées autour de 28 kHz (rectangle magenta en trait pointillé)

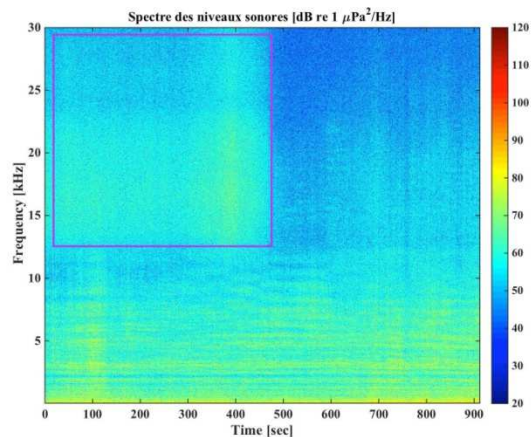


Figure 11 : Spectrogramme typique de la production sonore induite par la pluie (classe GEO, rectangle magenta). Le bruit observé de 20 Hz à 10 kHz est généré par un navire.

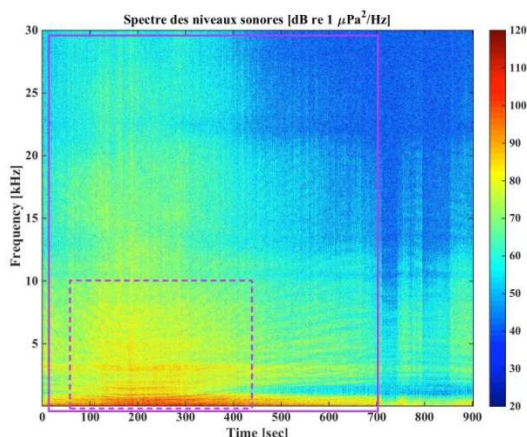


Figure 12 : Spectrogramme typique d'une embarcation motorisée transitant à proximité de l'hydrophone (classe ANT, rectangle magenta en trait plein). Le rectangle en trait pointillé contient la structure d'interférences générée par le passage du bateau à proximité de l'hydrophone.

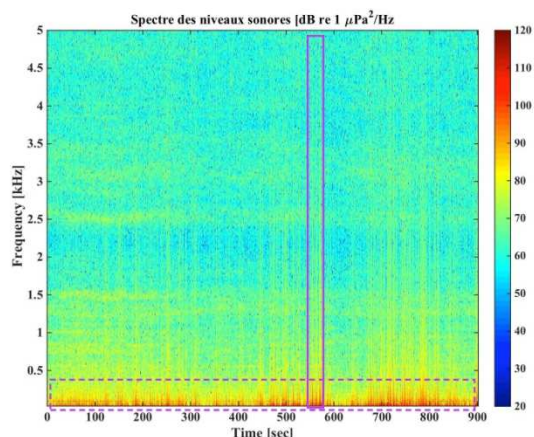


Figure 13 : Spectrogramme typique du bruit de mesure généré par la vibration du mouillage et le charriage (classe BRU). La majorité du bruit de mesure est comprise entre 0 et 400 Hz (rectangle magenta en trait pointillé). Le bruit de mesure génère occasionnellement du bruit sur toute la bande de fréquence (rectangle magenta en trait plein)

Description des différentes composantes (biophonie, géophonie, anthropophonie) du paysage acoustique :

Les caractéristiques des cinq classes de signaux identifiés sont utilisées pour analyser les 10 jours de données acoustiques segmentées en spectrogrammes de 15 minutes, soit un total de 940 spectrogrammes (Tableau 5).

Tableau 5 : Pourcentage de présence acoustique par classe d'émissions sonore, du 20 au 28 Août 2015

Classe	Nom	Bande de fréquence	Nombre de spectrogrammes (N=940)	Pourcentage de présence acoustique
ANT	Navire audible	[20 Hz - 30 kHz]	846	90 %
BIO	Biophonie benthique	[10 kHz - 30 kHz]	160	17 %

BRU	Bruit de vibration du mouillage et transport sédimentaire	[20 Hz - 30 kHz]	103	11 %
GEO	Pluie	[10 kHz - 30 kHz]	28	3 %

Note : Le pourcentage de présence acoustique d'une classe est le nombre de spectrogrammes pour lesquels la classe a été identifiée pendant les 10 jours de données. La somme des pourcentages de présence acoustique des différentes classes peut être supérieure à 100 % puisque à chaque instant t plusieurs classes peuvent être présentes.

Ainsi le paysage acoustique du site d'étude, suivi pendant 10 jours se compose de :

- ✓ Navires (classe ANT) : présents 90 % du temps et décrivant la zone d'étude comme une zone de trafic maritime dense pendant la période suivie. Lors du passage d'un navire à proximité de l'hydrophone, le bruit généré couvre toute la bande fréquentielle [20 Hz - 30 kHz] pendant 5 à 15 minutes.
- ✓ Biophonie benthique (classe BIO) : présente 17 % du temps et correspondant à des impulsions dont le niveau est maximal autour de 20 kHz. Elle ne présente pas de rythme journalier et décrit la zone d'étude comme une zone de faible densité benthique (substrat de type mou).
- ✓ Bruit de vibration généré par le mouillage de l'hydrophone et par le transport sédimentaire (classe BRU): présent 11 %. Ce bruit ne masque jamais les autres sources sonores du paysage acoustique car il est concentré sur les fréquences inférieures à 400Hz. Les niveaux sonores associés à ce bruit de mesure sont maximaux 1h après l'étal de marée basse et lors des périodes de forts coefficients de marée.
- ✓ Pluie (classe GEO) : présente 3 % du temps dans la bande de fréquence [10 kHz - 30 kHz] et générant alors un bruit continu.

Aucun sifflement ou click de cétacés n'a été détecté pendant les 10 jours d'enregistrement. Il est important de noter que le bruit généré par le trafic maritime important sur la zone d'étude peut masquer les signaux émis par les cétacés et les impulsions des organismes benthiques.

La faible vitesse du vent de la campagne observée pendant les 10 jours d'enregistrement n'a pas permis d'illustrer la contribution du vent au paysage acoustique. Deux précédentes études (RTE, FAB - Projet de création d'une interconnexion France-Aurigny-Angleterre, Etude d'impact acoustique, 2015; Mathias, Gervaise, & Di Iorio, 2016) ont montré que le niveau sonore ne dépend pas de la vitesse du vent pour des vitesses inférieures à 10 nœuds (18.5 km. h⁻¹) où les contributions biophoniques et anthropophoniques masquent le bruit généré par le vent. Au-delà, une relation linéaire entre le niveau sonore et la vitesse du vent indique qu'à partir d'une vitesse seuil de 13 nœuds, le bruit du vent devient supérieur aux contributions biophoniques et anthropophoniques. Au-delà de 15 nœuds (27.8 km. h⁻¹), le niveau sonore généré par le vent cesse d'augmenter.

6.2 Niveaux sonores

Pour évaluer l'importance du niveau de bruit ambiant de la zone d'étude, la distribution statistique (médiane et écart-type) du spectre acoustique mesuré pendant 10 jours en continu dans la zone d'étude est comparée avec le spectre de Wenz (Wenz, 1962) (Figure 14). Le spectre de Wenz est un modèle empirique fournissant les spectres sonores moyens des bruits ambiants mesurés dans l'océan en absence de sources sonores individualisables. Le spectre de Wenz comprend une première composante associée au bruit dû au trafic maritime (paramétrée par un indice compris entre 1 (trafic faible) et 7 (trafic fort)) et une seconde composante due à l'agitation de surface sous l'effet du vent (paramétrée en fonction de la vitesse du vent). Les niveaux spectraux observés sur la zone d'étude sont compatibles avec le modèle de Wenz, avec un écart positif en haute fréquence :

- ✓ Aux basses fréquences (< 200 Hz) (zone 1 de la Figure 14), le spectre acoustique de la zone d'étude correspond au modèle de Wenz pour des indices de trafic élevé.
- ✓ Entre 200 Hz et 2 kHz (zone 2 de la Figure 14), la médiane du spectre de la zone d'étude correspond au modèle de Wenz pour une vitesse de vent de 14 nœuds alors que la médiane de la vitesse de vent observée pendant les 8 jours de mesures était de 9 nœuds. Cet écart positif peut provenir du trafic maritime important sur la zone d'étude. Les navires passant au loin génèrent un bruit de fond de 20 Hz à 5 kHz.
- ✓ Entre 2 kHz et 10 kHz (zone 3 de la Figure 14), le spectre est au-dessus du modèle de Wenz pour des vitesses de vent supérieures à 14 nœuds. Cet écart positif peut provenir du trafic maritime important sur la zone d'étude. Les navires passant à proximité de l'hydrophone génèrent du bruit sur toute la bande de fréquence.
- ✓ Des impulsions sonores sont générées par le mouvement des animaux benthiques et dans la gamme de fréquences entre 10 kHz et 30 kHz (Coquereau et al., 2016, Mathias et al. 2016) (zone 4 de la Figure 14). Ces impulsions sonores sont masquées lorsqu'un navire passe à proximité de l'enregistreur. L'incrément généré par ces impulsions benthiques par rapport au niveau de Wenz à 20 kHz et pour la vitesse de vent médiane de 9 nœuds est 11 dB re.1 μ Pa² (Tableau 27). Cet incrément est faible comparé à celui observé dans des zones de forts peuplements benthiques (RTE, 2015, Mathias et al. 2016).
- ✓ Aux fréquences supérieures à 2 kHz, le spectre observé suit une pente décroissante de -20 dB par décade, semblable à celle du modèle de Wenz.

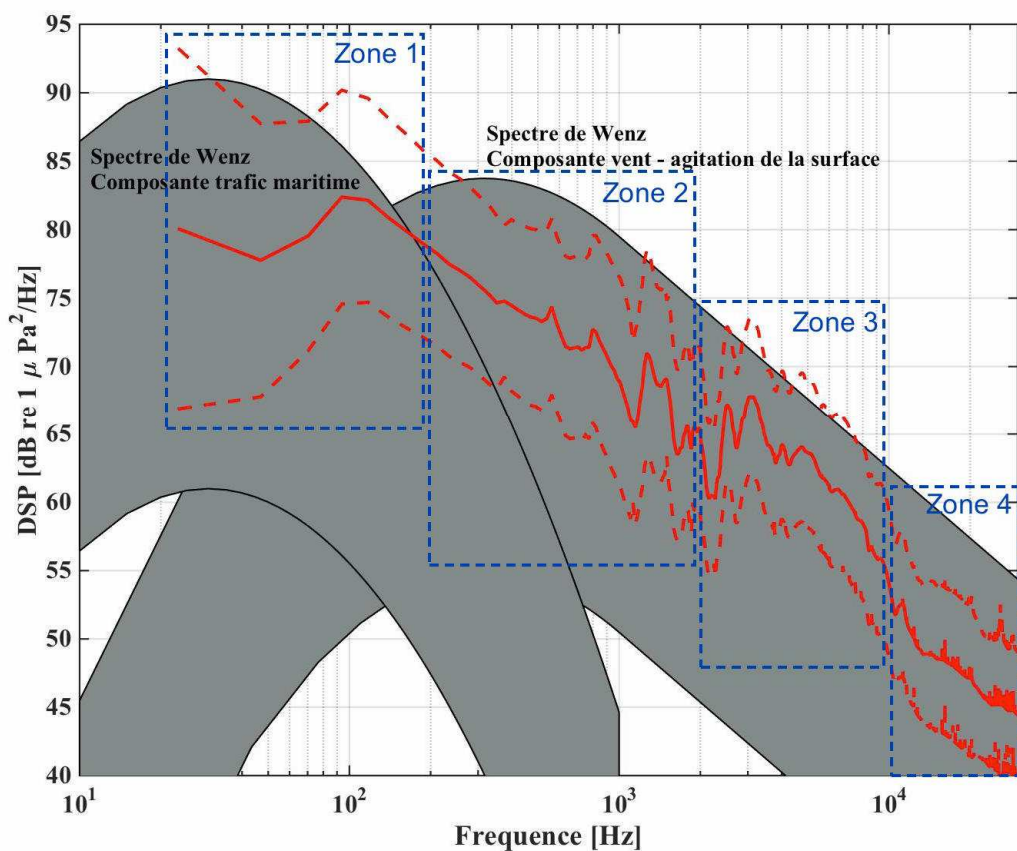


Figure 14 : Comparaison du spectre sonore du site d'étude avec le spectre de Wenz. En gris : composantes (trafic maritime, agitation de la surface par le vent) du spectre de Wenz, pour un indice de trafic variant entre 1 (faible) et 7 (fort) et une vitesse du vent variant entre 1m/s et 30m/s (2 nœuds à 60 nœuds), en rouge : médiane (+/- écart-type) de la distribution du spectre de la zone d'étude (8 jours d'enregistrement acoustique en continu). La zone 1 (fréquences inférieures à 200 Hz), la zone 2 (fréquences comprises entre 200 Hz et 2kHz), la zone 3 (fréquences comprises entre 2 kHz et 10 kHz), et la zone 4 la zone 3 (fréquences comprises entre 10 kHz et 30 kHz) correspondent à différents régimes du spectre sonore et sont discutés au dessus de la figure.

Les niveaux sonores large bande ont été calculés sur six bandes fréquentielles correspondant aux différentes sources sonores (Tableau 6) Le niveau médian sur toute la bande de fréquence (B0 : [30 - 30000] Hz) est de 109.3 dB re.1μPa². Les centiles des niveaux sonores large bande dans les six bandes fréquentielles sont détaillés en Annexe 4.

Le niveau médian de 109.3 dB re.1μPa² sera utilisé pour définir l'empreinte acoustique du projet (section 7.4 et section 8).

Tableau 6 : Bandes fréquentielles d'évaluation des niveaux sonores large bande et niveaux médians mesurés et intervalle \pm un écart-type

Bande B0	Bande B1	Bande B2	Bande B3	Bande B4	Bande B5
Totalité de la bande de fréquence	Bande du bruit de vibration du mouillage et du transport sédimentaire	Bande du bruit de transport sédimentaire et du trafic maritime	Bande du bruit de transport sédimentaire et du trafic maritime	Bande du bruit des bateaux proches	Bande du bruit des bateaux proches, des impulsions benthiques et de la pluie
[20 - 30000] Hz	[20 - 200] Hz	[200 - 1000] Hz	[1000 - 2000] Hz	[2000 - 6000] Hz	[6000 - 30000] Hz
109.3 (\pm 6.3) dB re.1 μ Pa ₂	104.4 (\pm 7.9) dB re.1 μ Pa ₂	103.0 (\pm 5.7) dB re.1 μ Pa ₂	98.0 (\pm (5.8) dB re.1 μ Pa ₂	100.6 (\pm 4.9) dB re.1 μ Pa ₂	96.8 (\pm 4.8) dB re.1 μ Pa ₂

6.3 Budget acoustique

Contribution des différentes composantes au budget acoustique de la zone d'étude :

Le budget acoustique de la zone d'étude est renseigné pour les quatre classes de sources sonores identifiées précédemment (Tableau 7).

Tableau 7 : Budget acoustique du site du 1^{er} au 11 Mai 2016, pour les quatre classes identifiées.

Classe	Niveau Spectral dB re.1 μ Pa ² / Hz, 25 ^{ème} - 75 ^{ème} centiles				Position dans le support global de l'intervalle interquartile		Pourcentage de présence acoustique
	200 Hz	1000 Hz	10000 Hz	20000 Hz	Centile min	Centile max	
ANT (Bateaux)	75 - 84	62 - 73	51 - 58	45 - 52	25	80	90 %
BIO (Benthos)	N/A	N/A	51 - 54	47 - 49	25	60	17 %
BRU (vibration/charriage)	83 - 87	70 - 73	54 - 57	53 - 58	50	90	11 %
GEO (Pluie)	N/A	N/A	54 - 58	53 - 58	50	90	3 %

L'analyse de la variabilité temporelle n'a pas permis pas d'identifier de rythme biologique associé à la production sonore de l'activité benthique.

Il n'y a pas de relation claire entre les séries temporelles des niveaux acoustiques large bande et la série temporelle de la vitesse du vent. Lors de la campagne acoustique, la vitesse du vent est restée inférieure à 15 nœuds. Des études précédentes (RTE FAB, 2015 et *Mathias et al. 2016*) ont montré qu'un masquage du bruit ambiant est observé pour des vitesses de vent supérieures à 15 nœuds. Le fort trafic maritime de la zone d'étude est possiblement responsable du masquage de la contribution du vent.

Le bruit de mesure ne nuit pas à la qualité des mesures, car présent 11% du temps dans une bande de fréquence qui ne contient pas de signal « utile ».

Ce budget acoustique a été construit avec les mesures acoustiques au point fixe, en une seule position. La variabilité spatiale est analysée grâce aux mesures réalisées avec les bouées dérivantes afin de savoir si ce budget est représentatif de toute la zone d'étude.

La variabilité spatiale du bruit ambiant sur la zone d'étude est étudiée à partir des mesures acoustiques à la dérive. Les spectres et le niveau large bande en 6 positions de la zone d'étude ont été comparés. On observe une faible variabilité de 5 dB re.1 μ Pa dans le niveau large bande ([10 kHz - 30 kHz]), qui correspond à la bande de fréquence d'émission des peuplements benthiques de la zone d'étude et qui n'est pas polluée par le trafic maritime lointain.

Plusieurs facteurs expliquent cette faible variabilité spatiale :

- ✓ les conditions météorologiques et la hauteur d'eau : toutes les mesures de bruit ambiant ont été effectuées dans des hauteurs d'eau similaires avec une vitesse de vent inférieure à 5 nœuds.
- ✓ la nature du fond : la nature du fond est peu variable sur la zone d'étude, avec des substrats de type mou (sable fin ou sable grossier). On observe un niveau spectral plus élevé de quelques dB pour les positions correspondant à un substrat de type sable grossier (positions 1, 5 et 6), comparé à un substrat de sable fin (positions 2, 3 et 4). Cette variabilité atteint un maximum de 5 dB re.1 μ Pa entre 10 kHz et 20 kHz.

Les niveaux sonores les plus forts sont donc observés sur les types de fond favorisant le plus la vie des organismes benthiques sonifères.

En conclusion :

Le paysage de la zone d'étude est piloté par le fort trafic maritime pour les fréquences supérieures à 200 Hz.

Le passage d'un bateau masque les sources sonores sur toute la bande fréquentielle de mesure [20 Hz - 30 kHz].

La zone d'étude présente les caractéristiques d'une zone de faible peuplement benthique : substrat de type mou associé à une faible production sonore benthique. L'analyse des données acoustiques n'a pas permis de détecter d'émissions sonores de cétacés. Le bruit généré par le trafic maritime important sur la zone d'étude a pu masquer des signaux émis par les cétacés et des impulsions d'organismes benthiques.

7 Déroulé de l'étude d'impact acoustique sur un exemple de couple {espèce - type d'impact}

7.1 Les données environnementales nécessaires à l'étude

Les données environnementales physiques nécessaires à l'étude permettent de définir les propriétés géo-acoustiques du canal de propagation, c'est-à-dire le milieu marin dans lequel se propage l'onde acoustique, délimité par la surface libre et le fond marin. On distingue les propriétés statiques ne changeant pas au cours du temps (propriétés géo-acoustiques du fond) et les propriétés dynamiques évaluant au cours du temps (la hauteur d'eau et ses propriétés océano-acoustiques).

La hauteur d'eau du canal : elle est un paramètre essentiel conditionnant la propagation en milieu côtier petits fonds, variant avec les marées. Dans la présente zone d'étude, cette hauteur d'eau peut être obtenue en ajoutant le marnage (0 - 10 m, observé à la station de Tréport, source SHOM) aux données publiques disponibles (Figure 15, <http://portal.emodnet-bathymetry.eu/>). Pour les calculs détaillés ci-dessous, nous avons retenu deux cas extrêmes (à savoir la marée haute maximale et la basse mer minimale, soit des marnages respectifs de 0 et 10 m observés au Tréport pour un coefficient de 111).

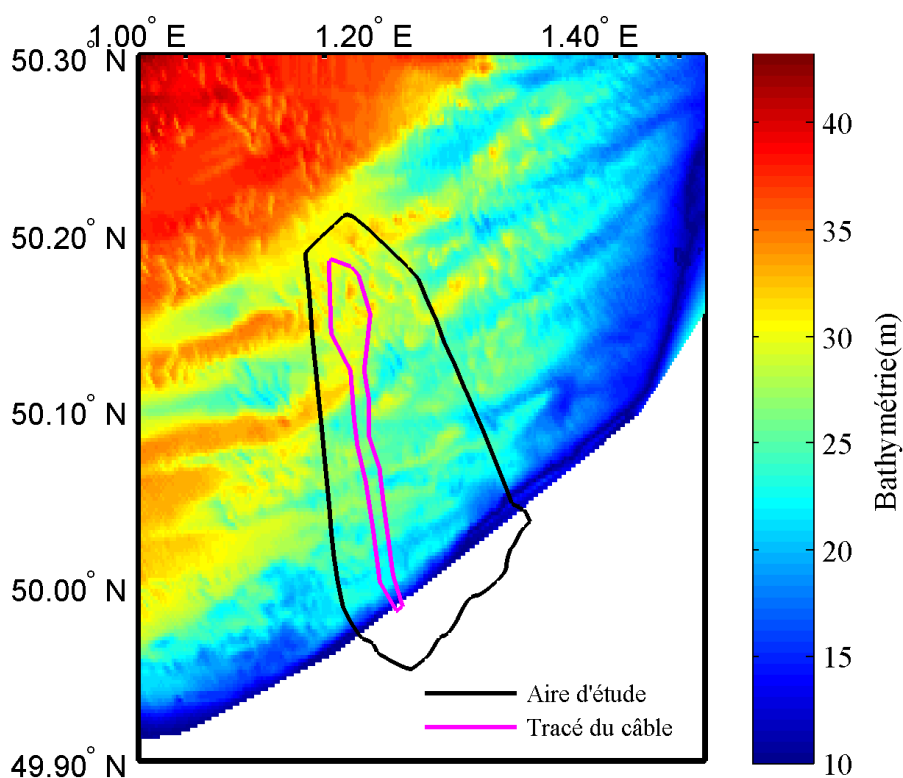


Figure 15 : Bathymétrie de la zone d'étude de résolution 230 m x 230 m (<http://portal.emodnet-bathymetry.eu/>). La zone délimitée en noire correspond à l'aire d'étude préconisée par RTE ; celle délimitée en magenta correspond au tracé du fuseau de moindre impact (zone d'étude approchée).

Les propriétés géo-acoustiques du fond : La nature des fonds marins conditionne la propagation des ondes acoustiques dans les milieux petits fonds. Ces fonds marins sont définis par leurs propriétés géo-acoustiques (vitesse du son, densité, atténuation) pouvant avoir des variations spatiales dans une zone donnée. Ces propriétés géo-acoustiques sont parfois déduites de la réalité sédimentaire du fond marin par des approches théoriques (Buckingham, Theory of acoustic attenuation, dispersion, and pulse propagation in unconsolidated granular materials including marine sediments, 1997; Buckingham, Theory of compressional and shear waves in fluidlike marine sediments, 1998; Buckingham, Compressional and shear wave properties of marine sediments: Comparisons between theory and data, 2005) ou semi-empiriques (Hamilton, 1980; Richardson M. , 1997). Dans le cadre de cette étude, les propriétés géo-acoustiques des fonds marins, en particulier la vitesse de compression du son dans le sédiment, ont été estimées par des méthodes dites inverses (Annexe 5 : Inversion géo-acoustique) avec des mesures acoustiques réalisées *in situ* spécialement pour l'étude (Annexe 3 : Description de la campagne de mesures acoustiques *in situ*). Les variations spatiales des propriétés géo-acoustiques du fond sont fournies dans le Tableau 8 et illustrées dans la Figure 16.

On retrouve une vitesse quasi homogène ($1642 \pm 17 \text{ m. s}^{-1}$) sur toute l'étendue de la zone d'étude, représentative d'un fond marin constitué de sédiments fins. Ces résultats sont en accord avec les relevés sismiques, pour lesquels on observe une couche superficielle dont la vitesse est de l'ordre de 1600 m. s^{-1} (source : Geophysical survey for export cables, Dieppe – Le Tréport). Dans la suite de l'étude on considérera un fond marin homogène au sein duquel la vitesse de propagation du son sera de 1642 m. s^{-1} .

Tableau 8 : Vitesse de l'onde de compression dans le fond marin (en m. s^{-1}) estimée en fonction de la position dans la zone d'étude

Position		Vitesse du son moyenne (\pm écart-type) en m. s^{-1}
Latitude	Longitude	
50°5,7943'N	1°10,6316'E	1655 (\pm 17)
50°5,8483'N	1°10,4925'E	1638 (\pm 18)
50°0,3256'N	1°11,4930'E	1637 (\pm 14)
50°7,4654'N	1°7,8360'E	1624 (\pm 17)
50°7,3429'N	1°16,6376'E	1622 (\pm 17)
50°7,7007'N	1°17,3379'E	1630 (\pm 15)
50°3,9829'N	1°11,4089'E	1636 (\pm 16)
50°4,0398'N	1°11,4152'E	1681(\pm 17)
50°2,6237'N	1°12,9105'E	1646 (\pm 20)
50°1,6710'N	1°15,7522'E	1665 (\pm 19)
50°1,5077'N	1°15,2193'E	1640 (\pm 15)
50°1,4622'N	1°15,2683'E	1635 (\pm 20)

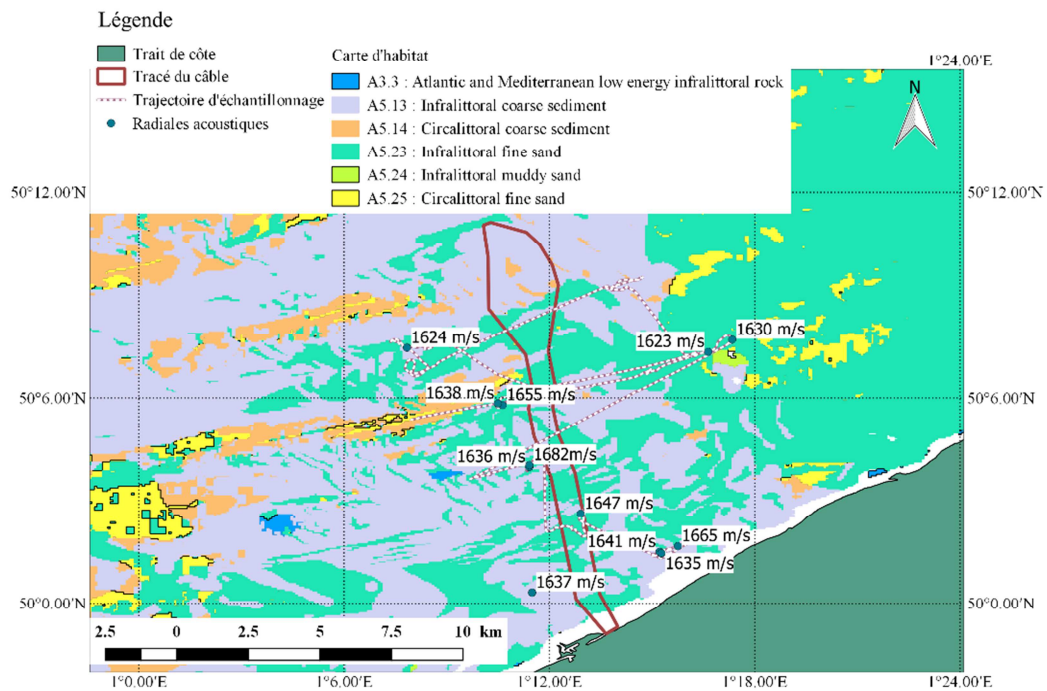


Figure 16 : Variation spatiale de la vitesse du son estimée en fonction de la position dans la zone d'étude

Les propriétés océano-acoustiques de la colonne d'eau : Le profil de la vitesse du son dans la colonne d'eau est calculé à partir des paramètres physico-chimiques (température, salinité, pression mettre référence biblio). On note que la température ainsi que la salinité varient dans le temps et dans l'espace, conduisant à des variations pour le profil de la vitesse du son. Les données de mesures directes étant indisponibles pour couvrir toute la zone d'étude, on utilisera des données publiques possédant une résolution temporelle journalière et une résolution spatiale de 7 km (<http://marine.copernicus.eu/>). On observe une variation saisonnière avec des vitesses du son plus élevées en été qu'en hiver (Figure 17). En revanche, du fait du caractère petit fond de l'environnement concerné, il n'y a pas de stratification verticale du profil de célérité pouvant entraîner des changements de conditions de propagations dans le canal. Nous choisissons donc de ne considérer qu'une seule saison, en l'occurrence l'été, pour la simulation.

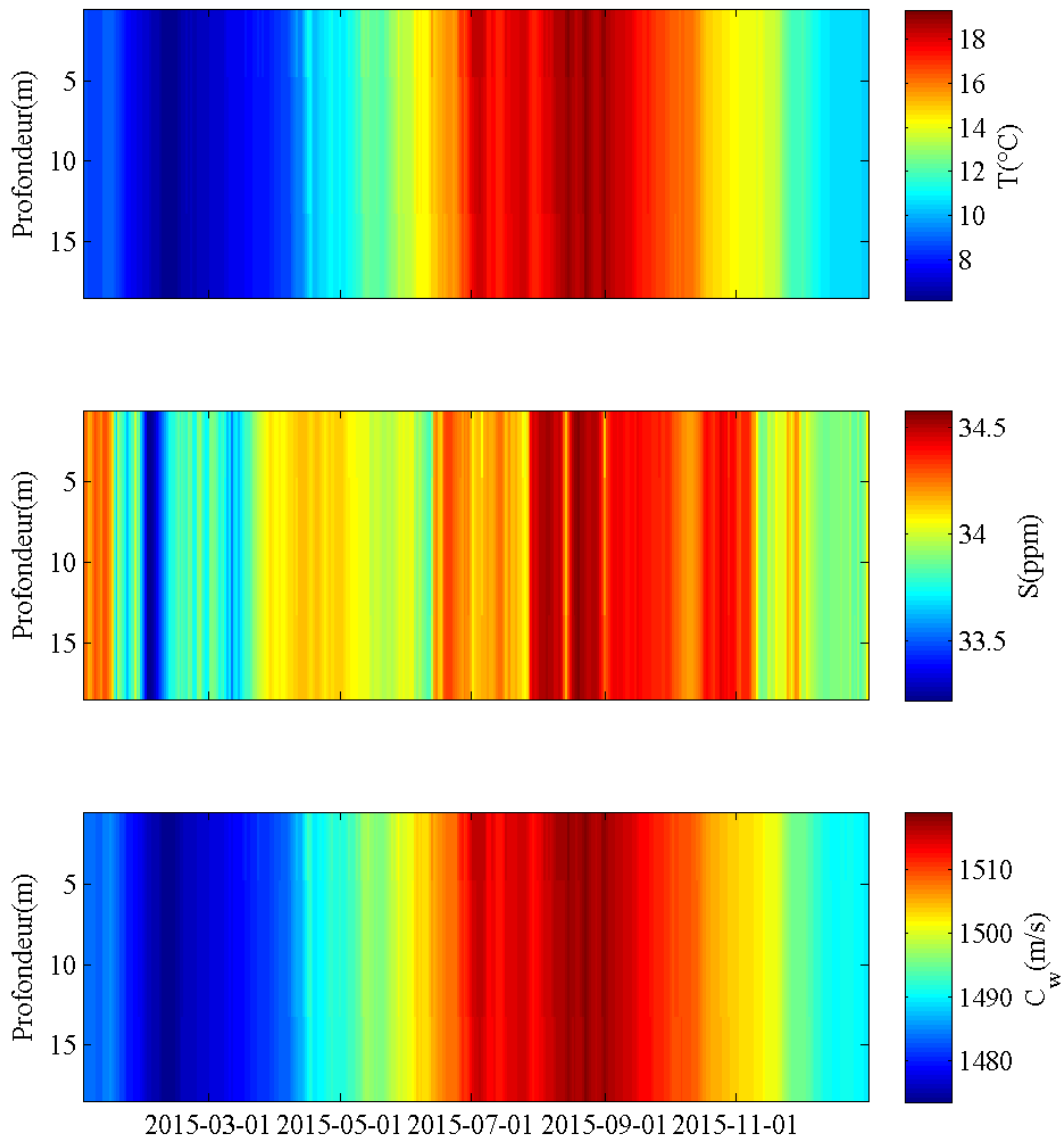


Figure 17 : Variation annuelle des propriétés de la colonne d'eau pour un point fixe pris dans l'environnement d'étude.

7.2 Etape 1 : Niveau du bruit rayonné

Il existe diverses techniques, adaptées à la nature du fond marin rencontré, pour creuser la souille dans laquelle le câble de raccordement sera posé. Nous pouvons citer les techniques de water-jetting³, de charruage⁴ (trenching, laying), de tranchage⁵ (cutter suction) auxquelles peuvent s'ajouter des techniques connexes utilisées en dragage en utilisant des bennes (grab) ou des pelles mécaniques (backhoe) ou des dragues aspiratrices. Les sources sonores associées à l'activité sont générées par les navires,

³ Water-jetting : jet d'eau haute pression pouvant être utilisé pour le creusement d'une tranchée

⁴ Charruage : principe de travaux similaire à celui d'une charrue qui fend la terre, cette méthode est utilisée dans un sol composé de sédiments meubles. Le câble est déroulé dans la tranchée charruée

⁵ Tranchage : lorsque le sol est dur, une machine de type scie circulaire est utilisée pour « couper » le sol et ouvrir une tranchée dans laquelle est déposée le câble.

structures porteuses et l'interaction entre l'outil et la nature du fond à creuser. CEDA (Underwater sound in relation to dredging - CEDA Position Paper, 7 novembre 2011, 2011) identifie les différentes techniques utilisées et recense les différentes sources sonores associées (Figure 18).

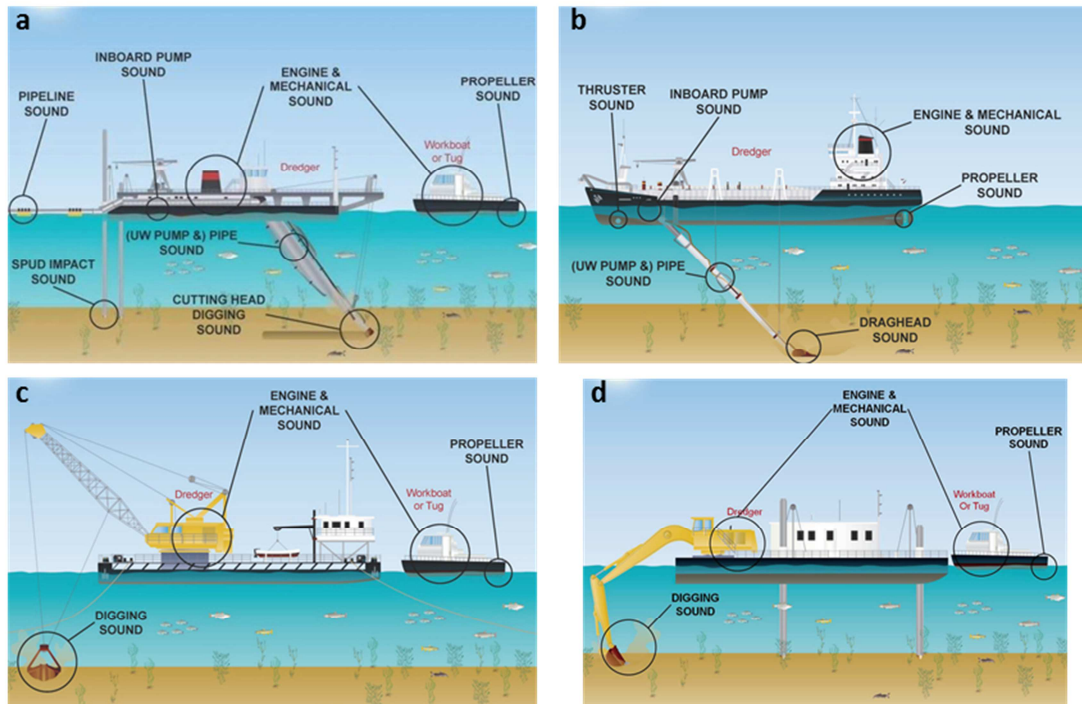


Figure 18 : Différentes techniques mises en œuvre durant les opérations de dragages ou d'ensouillage de câble et les sources sonores associées : a) tranchage, b) dragage aspiratrice, c) dragage avec bennes, d) dragage avec pelles mécaniques (CEDA, 2011)

Nous avons réalisé une étude bibliographique pour identifier les références présentant le niveau sonore (SL large bande dB re.1 μ Pa@1m) des activités d'ensouillage de câbles (Tableau 9). A notre connaissance, ces publications sont les seules faisant référence au son généré par les opérations d'enfouissement de câbles. Bien que restreinte, cette liste couvre les différentes techniques utilisables pour le projet et renseignent les niveaux à partir de mesures *in situ* dans des environnements similaires à celui du projet. Cette revue bibliographique a également été complétée par des mesures *in situ* réalisées antérieurement par SOMME (trancheuse, waterjetting, charruage et bruit du porteur en positionnement dynamique).

A l'issu de cette revue bibliographique, il apparaît que les opérations d'enfouissements produisent des niveaux sonores variables compris entre 170 et 190 dB re.1 μ Pa@1m.

Tableau 9 : Niveaux sonores mesurés à la source suivant les techniques employées pour la pose et la protection des câbles sous-marins

Type d'événements sonores	Niveaux sonores (SPL dB re.1μPa rms ou SL re.1μPa rms@1m)	Bande Passante (Hz)	Durée d'exposition	Référence
Forage dirigé horizontal (forage situé à 39m sous le lit de rivière)	129.5 dB	N/A	Courte	(Nedwell, Brooker, & Barham, Assessment of the underwater noise during the installation of export power cables at the Beatrice offshore Wind farm, 2012)
Matelas Béton / Coquille (à 1m)	< Enrochement	N/A	Longue	(Nedwell & Edwards, Measurements of underwater man made noise carried out by Subacoustech ltd, 2002)
Enrochement (à 1m)	< Bruit du navire effectuant les travaux	N/A	Longue	(Nedwell & Edward, A review of measurements of underwater man-made noise carried out by Subacoustech Ltd, 1993 – 2003, 2004)
Bakchoe dredge	[165, 173]	[10, 10000]	longue	Reine et al, 2012
Creusement de tranchée (à 1m)	[170,176]	[60,28 000] Max [100-400]	Longue	Base de données SOMME
Escavator dredge after cutting head (@1m)	[166,179]	[50,10000]	Longue	Reine et al, 2012_a
Cutting head hydraulic (@1m)	[168,178]	[20,1000]	Longue	Green et al 1985-1987
Cutting head hydraulic (@1m)	[170,175]	[50,1000]	Longue	Reine et al, 2012_a
Cutting Head (@1m)	[172,185]	[30,20000]	Longue	CEDA, 2011
Creusement de tranchée (à 1m)	[171,178]	[10,100 000] Max [100-600]	Longue	(Nedwell, Langworthy, & Howell, 2003; Nedwell, Edwards, Turnpenny, & Gordon, 2004)

Creusement de tranchée (à 1m)	[178,183]	[10,3 000] Max [50-600]	Longue	(Johansson & Andersson, 2012)
Dredge Columbia with cutting head (@1m)	[184]	[10,10000]	Longue	Whitford, 2007
Navire de support en transit (à 1m)	[160, 187]	[100,10 000] Max [100-500]	Longue	(GENESIS, 2011)
Navire en positionnement dynamique (à 1m)	186	[60,28 000] Max [80-250]	Longue	Base de données SOMME
Bucket (@1m)	[186]	[20,80000]	Longue	Johansson et al, 2012
Trailing suction (@1m)	[186]	[30,2000]	Longue	CEDA, 2011
Hopper Dredge (@1m)	[179,187]	[20,1000]	Longue	Johansson et al, 2012

Une comparaison du niveau sonore moyen de l'activité d'ensouillage avec d'autres activités naturelles ou humaines a également été dressée afin d'évaluer l'intensité sonore liée à cette activité (Tableau 10). Les niveaux sonores de l'activité d'ensouillage de câbles sont très proches du niveau de bruit rayonné par les navires (Ross, 2005; Johansson & Andersson, 2012), et de l'ordre de grandeur de bruits biologiques tels que les clics de marsouin (Villadsgaard, Wahlberg, & Tougaard, 2007) ou les crevettes claqueuses (Au & Banks, 1998), et restent bien inférieurs à des bruits biologiques tels que les clic de cachalot (Mohl, Wahlberg, Madsen, Miller, & Sulykke, 2000) et d'autres activités humaines : battage de pieux (OSPAR, 2009), émissions sismiques (Thomsen, McCully, Wood, Pace, & White, 2009), émissions de sonar militaire (Zimmer, 2004). On notera toutefois que ces derniers types d'émissions sont de courte durée (succession d'émissions d'une durée de quelques millisecondes sur lesquelles la puissance acoustique est concentrée) alors que le bruit lié à l'ensouillage est continu d'une durée plus longue mais limité à la durée du chantier (quelques jours). Le Tableau 10 présente aussi les niveaux sonores du bruit ambiant mesuré sur la zone d'étude et des niveaux de bruit minimaux et maximaux dans l'océan simulés par le modèle empirique de Wenz (Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources, 1962).

Tableau 10 : Niveaux sonores mesurés à la source pour les techniques liées à l'ensouillage de câbles sous-marins (en rouge) et aux autres activités sonores (bruits ambiants en gris, bruit de navires en bleu, bruits biologiques courts en vert, bruit humain impulsionnel en violet)

Type d'événements sonores	Niveaux sonores (SPL dB re.1μPa rms ou SL re.1μPa rms@1m)	Bande Passante (Hz)	Durée d'exposition	Référence
Bruit ambiant (Valeur min du modèle de Wenz)	[81]	[50,10000]	Continue	Wenz, 1962
Bruit ambiant (Zone d'étude, Dieppe - le Tréport)	[108]	[50,10000]	Continue	Présent Document, Annexe 4

Bruit ambiant (Valeur max du modèle de Wenz)	[108]	[50,10000]	Continue	Wenz, 1962
Bruit ambiant (Zone d'étude, Dieppe - le Tréport)	[110]	[20,30000]	Continue	Présent Document, Annexe 4
Navire 20m 16 nœuds (@1m)	[163]	[50,10000]	Longue	Ross, 2005
Navire 40m 16 nœuds (@1m)	[169]	[50,10000]	Longue	Ross, 2005
Navire 100m 16 nœuds (@1m)	[176]	[50,10000]	Longue	Ross, 2005
Navire 200m 16 nœuds (@1m)	[182]	[50,10000]	Longue	Ross, 2005
3 navires marchands (@1m)	[178,184]	[10,3500]	Longue	Johansson et al., 2012
Navire 300m 16 nœuds (@1m)	[186]	[50,10000]	Longue	Ross, 2005
ENSOUILLAGÉ DE CÂBLE (tranchage, enrochement, navire support, ...) (@1m)	[129,187]	[10,100000]	Longue	Tableau 9
Crevette claqueuse, claquement de la pince (@1m)	[183,189]	[1000, 200000]	Courte	Au et Banks, 1998
Marsouin, click d'écholocalisation (@1m)	[198]	[110000,160000]	Courte	Villadsgaard et al. 2007
Battage de pieux (@1m)	[220,257]	[10,20000]	Courte	Ospar 2009
Canons à air sismique (@1m)	[220,267]	[5, 100000]	Courte	Thomsen et al., 2011
Cachalot, click d'écholocalisation (@1m)	[236]	[5000,40000]	Courte	Mohl, 2003
Sonar militaire à basse fréquence (@1m)	[240]	[100, 500]	Courte	Zimmer, 2004

L'analyse bibliographique a renseigné le niveau sonore large bande émis (Tableau 9), montrant que les travaux relatifs à la pose des câbles rayonnent du bruit dont le maximum d'énergie se trouve en basses fréquences (50 - 600 Hz). De plus, la bande de fréquence du bruit rayonné dépend de la nature de l'opération, et peut s'étendre jusqu'à 100 kHz.

Pour évaluer l'impact acoustique des travaux d'ensouillage, nous avons besoin de la densité spectrale de puissance du bruit rayonné. Pour cela, nous avons construit un gabarit de densité spectrale de puissance (dB re.1µPa²/Hz) émise par l'activité par cette activité en ajustant le niveau absolu du gabarit spectral issu de nos mesures réalisées lors de projets antérieurs similaires (Base de données SOMME).

La Figure 19 illustre les gabarits spectraux obtenus. Ces gabarits fournissent quatre niveaux large bande représentatifs des niveaux sonores rayonnés par les travaux

identifiés par l'étude bibliographique et possédant la plus grande large bande passante, avec un maximum d'intensité acoustique en basse fréquence (10 – 1000 Hz). On remarque dans le Tableau 9, que les niveaux larges bandes pour ce type d'activité varient de 170 à 187 dB re 1 μ Pa@1m, et jusqu' à 160 dB si on inclut les navires supports de l'opération. Pour bien prendre en compte cette gamme de niveau sonore et bien couvrir les différentes activités, nous avons choisi quatre niveaux larges bande allant de 165 dB – 190 dB re.1 μ Pa@1m. Pour ces choix, l'impact minimal sera observé pour un niveau source minimal (165 dB re.1 μ Pa@1m) alors qu'un impact maximal est attendu pour l'hypothèse du niveau maximal à la source (190 dB re.1 μ Pa@1m).

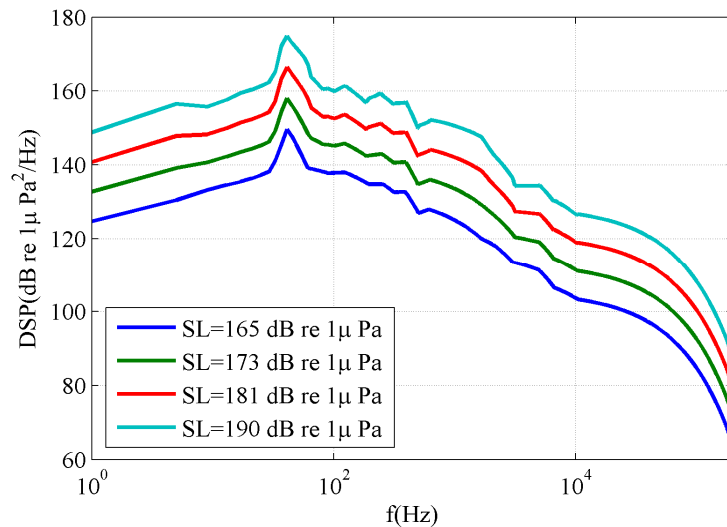


Figure 19 : Densités spectrales de puissance émises représentatives des niveaux larges bandes observés dans la littérature.

7.3 Etape 2 : Propagation acoustique sur r mètres

7.3.1 Le modèle utilisé

L'onde sonore dans sa progression perd de l'énergie du fait de l'éloignement, de l'interaction avec les interfaces du canal et des frottements visqueux. La résolution et la simulation de l'équation d'onde qui explique la propagation d'un point source vers un point récepteur est souvent complexe. On a recours à des codes de calcul qui exigent une bonne connaissance de l'environnement. Suivant les conditions, plusieurs méthodes de simulations différentes sont utilisées pour :

- ✓ couvrir la gamme fréquentielle allant de la dizaine d'Hertz à la centaine de kilohertz,
- ✓ simuler la propagation acoustique dans des canaux de faibles profondeurs.

Notre cas d'étude cumule ces deux cas (bande d'audition allant de la centaine d'Hertz pour les poissons à 200 kHz pour les marsouins, bathymétrie le long du trajet variant de 0 à ~34 m).

Il existe plusieurs codes de calcul disponibles utilisés par la communauté scientifique. Le choix d'un modèle dépend des caractéristiques de la source et du milieu de propagation. Autrement dit, certains modèles sont adaptés aux basses fréquences (méthodes des modes normaux, méthode de l'équation parabolique) alors que d'autres sont adaptés aux hautes fréquences (méthode des rayons). La notion de haute fréquence dépend par ailleurs de la hauteur du canal.

Dans la présente étude, nous mettrons en œuvre un modèle hybride adapté aux basses et hautes fréquences. Ainsi, on utilisera le code de calcul RAM basé sur la méthode de l'équation parabolique (Collins, An energy-conserving parabolic equation for elastic media, 1993; Collins, A complete energy-conservation correction for the elastic parabolic equation, 1994), pour les basses fréquences (jusqu'à 1 kHz) et Bellhop basé sur la méthode de lancer de rayons (Porter & Bucker, Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields, 1987; Porter & Liu, Finite-element ray tracing, 1994), pour les hautes fréquences (supérieures à 1 kHz). Ces deux codes de calcul sont bien adaptés pour prendre en compte les variations de la morphologie bathymétrique de la zone d'étude ainsi que les variations potentielles du profil de vitesse du son dans l'eau.

Deux points P1 et P2 ont donc été choisis le long du tracé en fonction de la bathymétrie de la zone d'étude, pour bien illustrer la diversité spatiale des environnements rencontrés (Figure 20). La hauteur d'eau entre le point P2 (point côtier) et le point P1 (point au large) évolue progressivement. Il y aura donc un passage continu des résultats de simulations entre ces deux points de calcul.

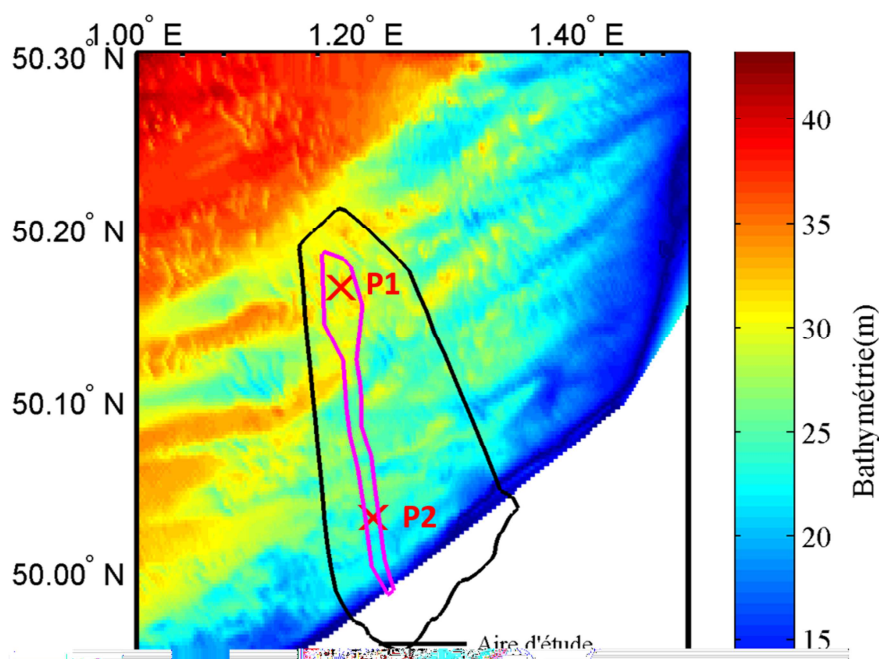


Figure 20 : Positionnement de la source acoustique en fonction de la bathymétrie dans la zone d'étude. Ainsi le point P1 désigne la position de la source dans l'environnement le plus profond alors que P2 est positionné près de la côte. La zone délimitée en noire correspond à l'aire d'étude préconisée par RTE ; celle délimitée en magenta correspond au tracé du fuseau défini comme le plus favorable par RTE (zone d'étude approchée).

7.3.2 Exemple de calcul de pertes de transmission

On considère la bande des fréquences comprises entre 20 Hz et 100 kHz, décomposée en tiers d'octave et les paramètres géo-acoustiques définis dans le Chapitre 7.1. Pour chaque position de la source, on calcule les pertes de transmission dans toutes les directions. La Figure 21 donne un exemple pour une direction particulière dans l'environnement pour une position donnée de la source.

Pour la bande de fréquence considérée, on remarque deux phénomènes importants : i) les ultra basse-fréquences ne se propagent pas du fait des fréquences de coupure du canal ; ii) les très hautes fréquences subissent une forte atténuation due à l'absorption de l'eau de mer. Il existe une bande fréquentielle optimale pour la propagation comprise entre 200 Hz et 10 kHz.

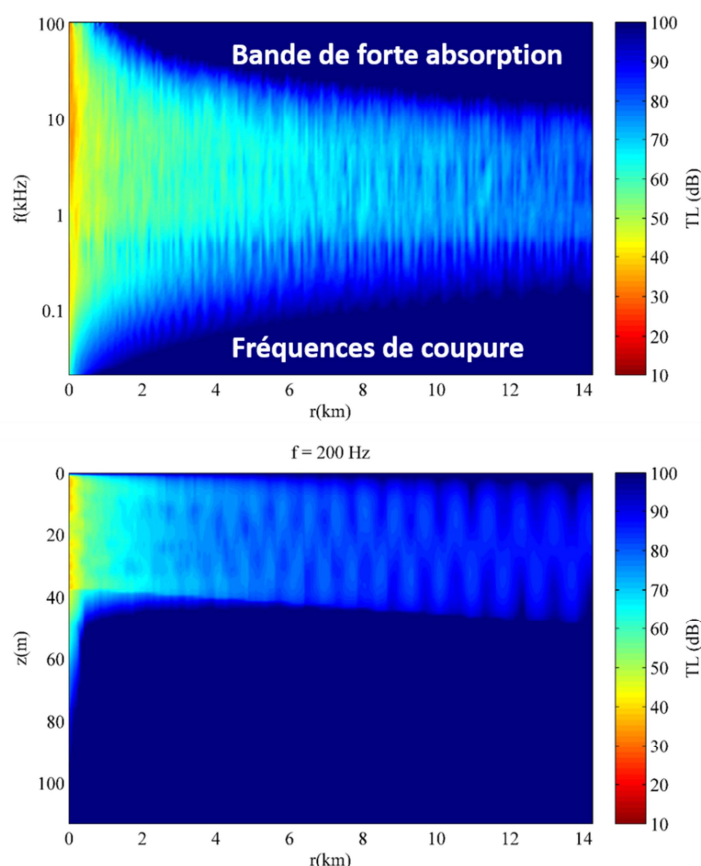


Figure 21 : Pertes de transmission calculées pour une direction donnée et une position de la source. Dans le panneau supérieur, on remarque que les ultra-basses fréquences ainsi que les très hautes fréquences sont fortement atténuées. Plus les pertes de transmissions sont importantes et plus le canal atténué

7.4 Etapes 3-6 : Niveau reçu et empreinte acoustique du projet

L'empreinte acoustique est définie à partir de la connaissance i) de l'état initial du Paysage Acoustique (Chapitre 6) et ii) des niveaux sonores générés par les travaux. Il s'agit de l'aire de la zone d'étude pour laquelle le niveau reçu généré par les travaux est supérieur au niveau du bruit ambiant prévalent. On rappelle que les spectres des signaux reçus sont calculés en fonction de la distance entre la source et le récepteur suivant $RL(r,f) = SL(f) - TL(r,f)$, c'est-à-dire en soustrayant les pertes de transmissions aux gabarits du spectre du bruit rayonné par les opérations d'ensouillage de câbles (Figure 19).

Dans la présente étude, le niveau médian du bruit ambiant mesuré vaut 109 dB re.1 μ Pa dans la bande de fréquence [10 Hz - 30 kHz]. L'empreinte acoustique du projet est définie donc pour des niveaux reçus excédant ce niveau de référence dans la même bande de fréquence. En considérant les différents scénarios de simulation pour la source sonore telle que représentée sur la Figure 19, l'empreinte acoustique varie d'un rayon moyen de 2 km et d'une surface de 10km² pour un niveau sonore de 165 dB re.1 μ Pa@1m à un rayon d'environ 18.06 km pour une surface de 630 km² lorsque le niveau sonore à la source vaut 190 dB re.1 μ Pa@1m (Figure 22).

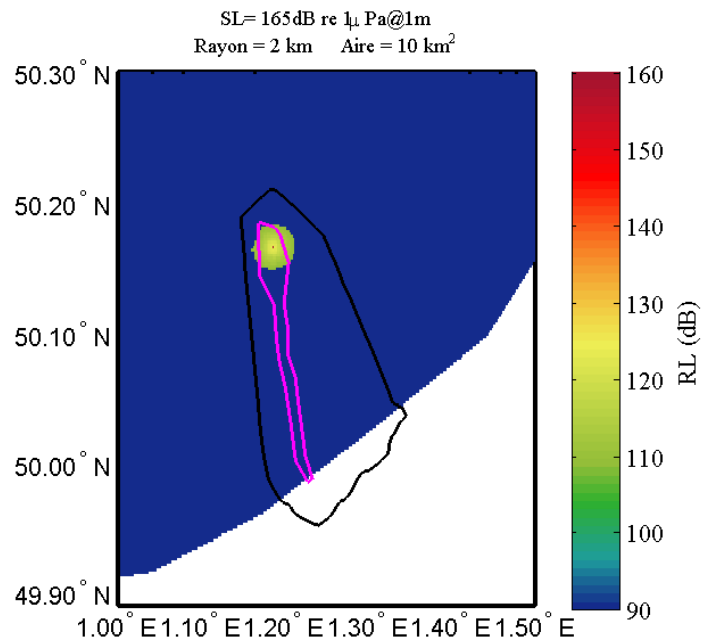


Figure 22 : Empreinte acoustique pour un niveau de bruit ambiant médian de 109 dB mesuré dans la zone d'étude et un niveau source au point P1 de 165 dB re.1 μ Pa @ 1m. Cette empreinte (zone qui n'est pas bleue) correspond à $SL-TL \geq ANL$, où ANL désigne le niveau de bruit ambiant. La zone délimitée en noire correspond à l'aire d'étude préconisée par RTE ; celle délimitée en magenta correspond au tracé du fuseau défini comme le plus favorable par RTE (zone d'étude approchée).

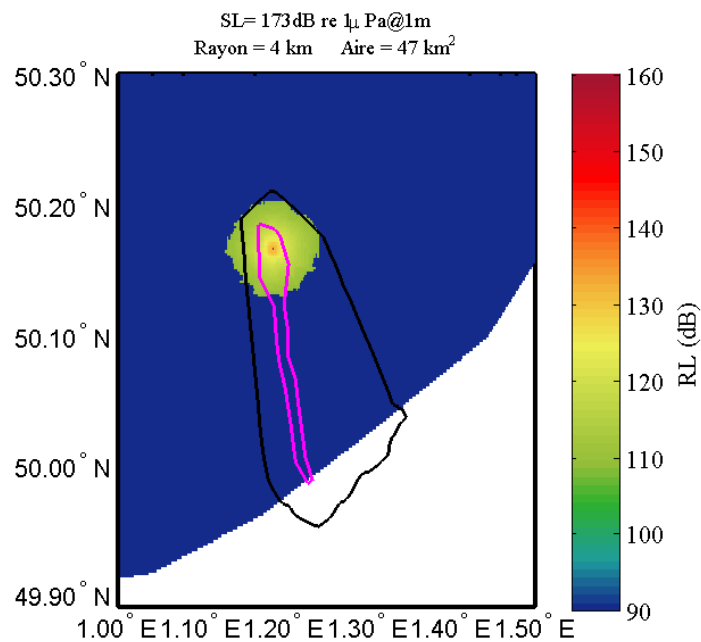


Figure 23 : Empreinte acoustique pour un niveau de bruit ambiant médian de 108 dB mesuré dans la zone d'étude et un niveau source au point P1 de 173 dB re.1 μ Pa @ 1m. Cette empreinte (zone qui n'est pas bleue) correspond à $SL-TL \geq ANL$, où ANL désigne le niveau de bruit ambiant. La zone délimitée en noire correspond à l'aire d'étude préconisée par RTE ; celle délimitée en magenta correspond au tracé du fuseau défini comme le plus favorable par RTE (zone d'étude approchée).

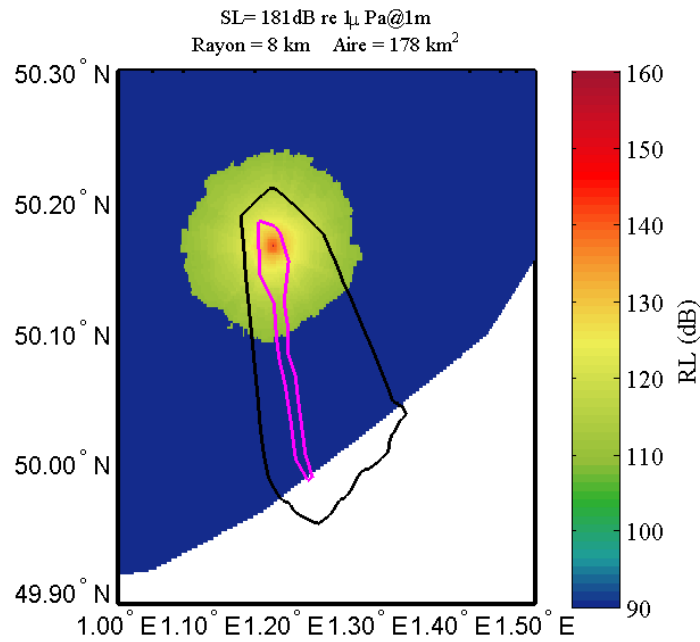


Figure 24 : Empreinte acoustique pour un niveau de bruit ambiant médian de 108 dB mesuré dans la zone d'étude et un niveau source au point P1 de 181 dB re.1 μ Pa @ 1m.. Cette empreinte (zone qui n'est pas bleue) correspond à $SL-TL \geq ANL$, où ANL désigne le niveau de bruit ambiant. . La zone délimitée en noire correspond à l'aire d'étude préconisée par RTE ; celle délimitée en magenta correspond au tracé du fuseau défini comme le plus favorable par RTE (zone d'étude approchée).

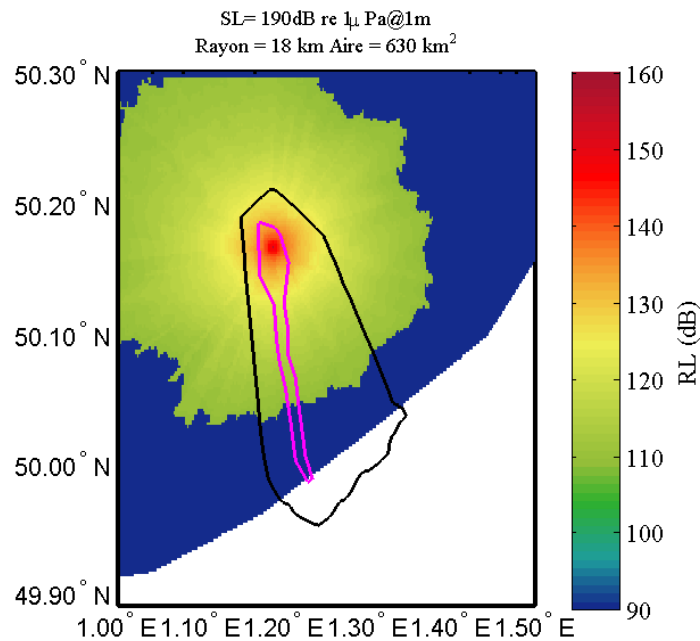


Figure 25 : Empreinte acoustique pour un niveau de bruit ambiant médian de 108 dB mesuré dans la zone d'étude et un niveau source au point P1 de 190 dB re.1 μ Pa @ 1m. Cette empreinte (zone qui n'est pas bleue) correspond à $SL-TL \geq ANL$, où ANL désigne le niveau de bruit ambiant. . La zone délimitée en noire correspond à l'aire d'étude préconisée par RTE ; celle délimitée en magenta correspond au tracé du fuseau défini comme le plus favorable par RTE (zone d'étude approchée).

7.5 Etapes 5-9 : Identification de la zone d'impact potentiel

On s'intéresse maintenant au niveau perçu, c'est-à-dire le niveau sonore reçu pondéré par les caractéristiques de la fonction de transfert de l'appareil auditif (audiogramme si disponible) de l'espèce considérée.

Dans notre étude, nous nous basons sur les fonctions de transfert de l'appareil auditif nommées « M-Weighting Functions » proposées pour les mammifères marins dans Southall et al. (Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Initial Scientific Recommendations, 2007), et pour les poissons (fonction de transfert constante quel que soit la fréquence) proposées dans Oestman et al. (Technical Guidance for Assessment and Mitigation of the Hydroacoustic Effects of Pile Driving on Fish, 2009). La forme générique d'une M-Weighting Function, telle que proposée dans Southall et al. (Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Initial Scientific Recommendations, 2007), correspond à :

$$R(f) = \frac{f_h^2 f^2}{(f^2 + f_h^2)(f^2 + f_l^2)}$$

Équation 1

$$MWF (dB) = 20 \log_{10} \left(\frac{R(f)}{\max(R(f))} \right)$$

Équation 2

où f_h et f_l désignent respectivement les bornes supérieure et inférieure de la bande fréquentielle d'audition de l'espèce ou du groupe d'espèce considéré.

Le Tableau 11 consigne les bornes supérieure et inférieure des fréquences audibles pour les différents groupes espèces considérées et la Figure 26 présente la forme de ces fonctions de pondération « M-Weighting functions ». Le Tableau 12 rappelle les 10 espèces présentes dans la zone d'étude et leur niveau d'enjeu local, et détaille leur appartenance aux groupes d'espèces de mammifères marins de (Southall, et al., 2007).

Tableau 11 : Fréquences basses et hautes des espèces pour le calcul des M-Weighting function

Groupes d'Espèces de mammifères marins	Fréquence basse de l'audition (Hz)	Fréquence haute de l'audition (Hz)
Cétacés Basses Fréquences	7	22000
Cétacés Moyennes Fréquences	150	160000
Cétacés Hautes Fréquences	200	180000
Pinnipèdes dans l'eau	200	75000
Pinnipèdes dans l'air	75	30000
Poissons	0	+infini

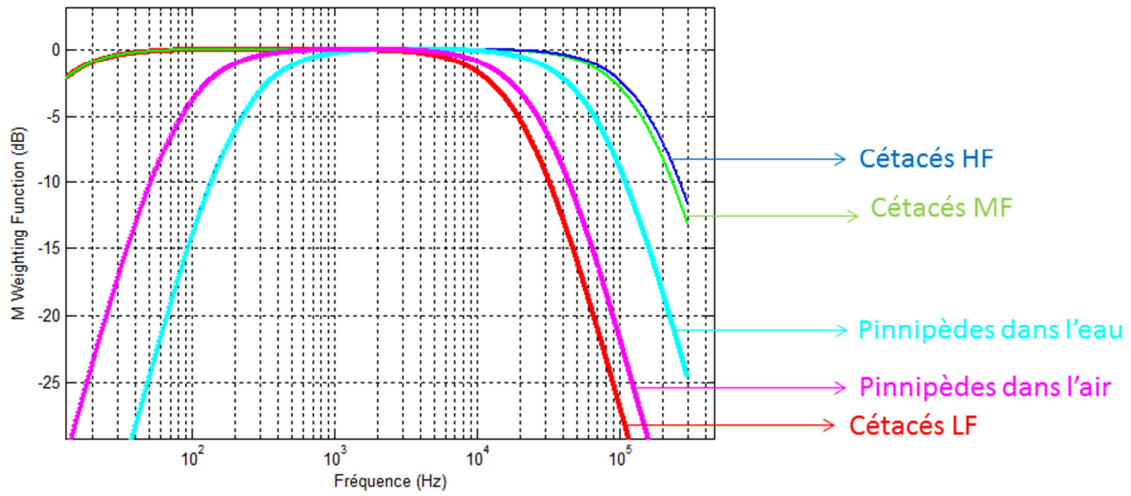


Figure 26 : Forme des M-Weighting functions pour les 5 classes d'espèces de mammifères marins

Tableau 12 : Les 10 espèces présentes dans la zone d'étude, leur niveau d'enjeu et leur appartenance aux groupes d'espèces de mammifères marins de (Southall, et al., 2007).

Espèces (Nom vernaculaire)	Enjeu local	Groupe d'espèces de MM
Marsouin commun	Fort	Cétacé Hautes Fréquences
Phoque gris	Fort	Pinnipède dans l'eau
Phoque commun (veau-marin)	Fort	Pinnipède dans l'eau
Grand dauphin	Moyen	Cétacé Moyennes Fréquences
Dauphin commun	Moyen	Cétacé Moyennes Fréquences
Globicéphale noir	Moyen	Cétacé Moyennes Fréquences
Dauphin de Risso	Faible	Cétacé Moyennes Fréquences
Dauphin bleu et blanc	Faible	Cétacé Moyennes Fréquences
Rorqual commun	Faible	Cétacé Basses Fréquences
Phoque barbu	Faible	Pinnipède dans l'eau

En fonction des caractéristiques du son émis (puissance acoustique, bande de fréquence), des caractéristiques du système de réception et la position de l'animal par rapport à la source, les effets des sons sur les animaux marins varient de la « simple gêne » à des traumatismes pouvant provoquer une mort immédiate ou différée. Le niveau sonore reçu étant fonction de la distance à la source, certains effets ne sont observés que proche de la source. D'après (Kikuchi, 2010), ces zones pour lesquelles les différents effets sont susceptibles d'être observés, sont définies telles que (Figure 27) :

- ✓ i) La zone d'audibilité définie comme l'aire à l'intérieure de laquelle une espèce est capable de détecter la présence de l'émission sonore. C'est la zone d'influence la plus étendue, pouvant couvrir une aire assez importante.
- ✓ ii) La zone de réactivité est l'aire dans laquelle on observe un changement de comportement chez l'animal après réception de l'onde sonore. Ce changement de comportement peut survenir même à des niveaux faibles entraînant des réactions d'évitement et peuvent couvrir une large aire océanique et par conséquent affecter des populations entières (Norro, Haelters, Rumes, & Degraer, 2010; Nedwell, Brooker, & Barham, 2012).
- ✓ iii) La zone de masquage est la zone dans laquelle le bruit est suffisamment fort et/ou possède des caractéristiques pour interférer avec la détection d'autres signaux d'intérêt. En fonction de l'espèce considérée ou du groupe d'espèces cibles, cette zone peut correspondre à la zone d'audibilité (Kikuchi, 2010).
- ✓ iv) La zone de traumatisme est l'aire dans laquelle le son est assez fort pour provoquer des lésions du système auditif provoquant une augmentation temporaire (Temporal Treshold Shift, TTS) ou permanente (Permanent Treshold Shift, PTS) des seuils d'audition, des blessures physiologiques pouvant conduire à la mort immédiate ou différée. Cette zone est généralement située dans le voisinage immédiat de la source.

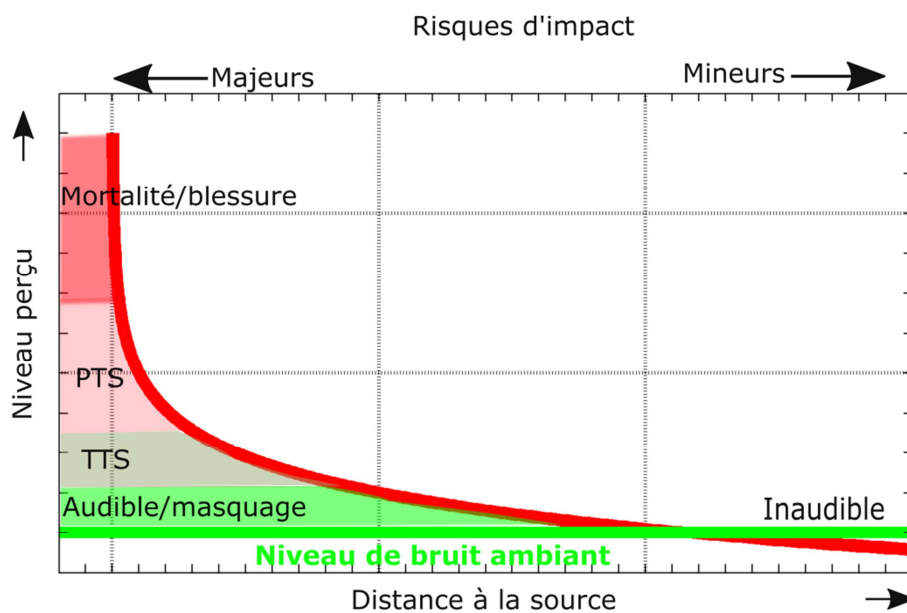


Figure 27 : Zones de risque d'impact acoustique

Le risque d'impact pour une espèce cible est donc évalué suivant une métrique acoustique à laquelle on compare un seuil. Les métriques généralement utilisées sont le niveau sonore perçu SPL (Sound Pressure Level) dans une bande de fréquence d'intérêt et la dose sonore cumulée SEL dans cette même bande fréquentielle d'intérêt pour une durée d'écoute donnée. Le Tableau 13 donne les seuils faisant références dans la communauté pour identifier les risques d'impact acoustiques. Il s'en suit des délimitations des différentes zones à risque (définies dans le précédent paragraphe) autour de la position de la source émettrice.

Tableau 13 : Seuils utilisés pour identifier les risques d'impact, (1) Southall et al., 2007 classent les réactions comportementales suivant un indice variant de 1 à 9 (1 : pas de réaction, 9 : panique, échouage), le niveau de 120 dB est susceptible de provoquer des réactions d'indices variant de 2 à 4 (alerte individuelle, changement mineur et modéré de la vitesse, de la direction de nage, du rythme de respiration et du profil de plongée, mais pas de réaction d'évitement de la source sonore), (2) nous avons retenu le niveau de bruit ambiant comme le seuil de masquage et comme le seuil d'audibilité du bruit généré par le projet, ce seuil sert à définir l'empreinte sonore du projet.

Espèces	Seuil PTS (SEL dB re.1μPa ² s)	Seuil TTS (SEL dB re.1 μPa ² s)	Seuil pour un changement comportemental (SPL dB re.1μPa)	Seuil pour masquage/audibilité (SPL dB re.1μPa)
Cétacés BF	215	195	120 ⁽¹⁾	108 ⁽²⁾
Cétacés MF	215	195	120 ⁽¹⁾	108 ⁽²⁾
Cétacés HF	215	183	120 ⁽¹⁾	108 ⁽²⁾
Pinnipèdes	203	183	120 ⁽¹⁾	108 ⁽²⁾
Poisson > 2g	N.A	187	N.A	108 ⁽²⁾
Poisson < 2g	N.A	183	N.A	108 ⁽²⁾

Concernant les mammifères marins, l'annexe 6 (partie 17) justifie l'emploi des seuils de Southall et al. (2007) comme la vision la plus conservatrice pour les espèces à enjeu.

7.6 Exemple d'impacts acoustiques : le cas du marsouin et l'impact « dérangement »

Pour le marsouin commun (*Phocoena phocoena*), on dispose des fonctions de transferts caractéristiques du groupe fonctionnel « cétacés Haute Fréquence ».

Le marsouin commun, connu pour fréquenter régulièrement la zone du projet (Biotope, 2015), appartient au groupe fonctionnel des cétacés spécialistes des hautes fréquences (notés cétacés HF) tel que défini dans le Tableau 11. Les niveaux perçus par les cétacés HF sont obtenus en pondérant les niveaux reçus RL par la fonction de transfert définie précédemment (Équation 1 et Équation 2). Les zones de risques d'impact acoustique sont calculées en comparant ces niveaux perçus en termes de SPL et de SEL avec les seuils définis dans le Tableau 13. Les résultats sont détaillés dans le Tableau 14 et les Figures 29 à 32. On note que:

- ✓ La zone de masquage ou d'audition correspond à l'empreinte acoustique du projet, pouvant correspondre à un disque en fonction de la position de la source (influence de la bathymétrie).
- ✓ On observe une zone de réaction dont l'aire augmente avec le niveau SL. Le rayon de cette zone varie de 140 m pour un niveau source (au point P1) de

165 dB re.1 μ Pa @ 1m à 5.2 km pour un niveau source de 190 dB re.1 μ Pa @1m.

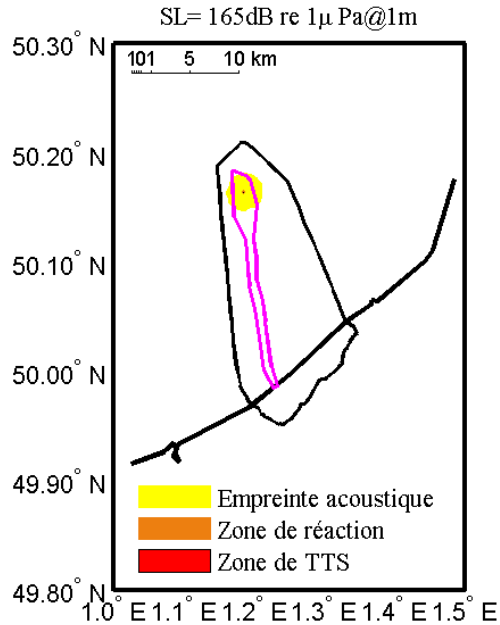


Figure 28 : Empreinte acoustique, zone de réaction et zone de TTS (perte temporaire d'audition) des cétacés spécialistes des hautes fréquences (dont le marsouin commun) pour un niveau source au point P1 de 165 dB re.1 μ Pa @ 1m. La zone délimitée en noire correspond à l'aire d'étude préconisée par RTE ; celle délimitée en magenta correspond au tracé du fuseau défini comme le plus favorable par RTE (zone d'étude approchée).

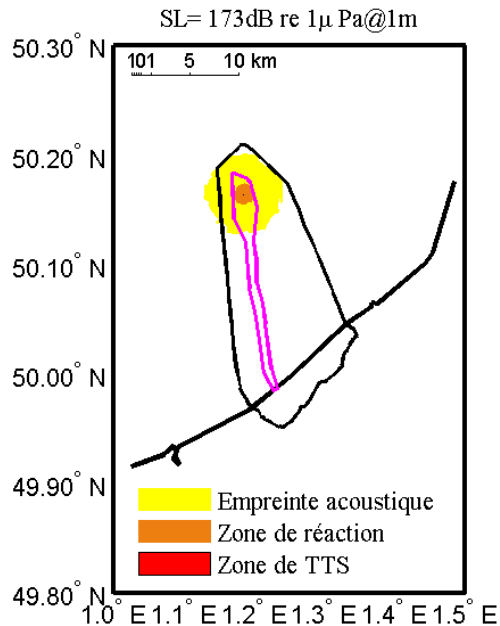


Figure 29 : Empreinte acoustique, zone de réaction et zone de TTS (perte temporaire d'audition) des cétacés spécialistes des hautes fréquences (dont le marsouin commun) pour un niveau source au point P1 de 173 dB re.1 μ Pa @ 1m. La zone délimitée en noire correspond à l'aire d'étude préconisée par RTE ; celle délimitée en magenta correspond au tracé du fuseau défini comme le plus favorable par RTE (zone d'étude approchée).

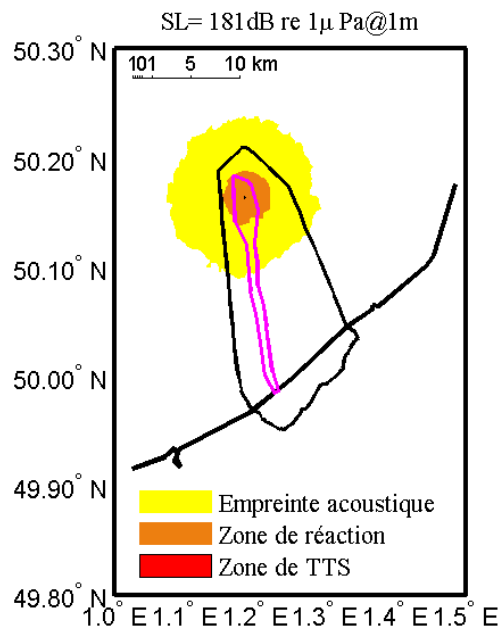


Figure 30 : Empreinte acoustique, zone de réaction et zone de TTS (perte temporaire d'audition) des cétacés spécialistes des hautes fréquences (dont le marsouin commun) pour un niveau source au point P1 de 181 dB re.1 μ Pa @ 1m. La zone délimitée en noire correspond à l'aire d'étude préconisée par RTE ; celle délimitée en magenta correspond au tracé du fuseau défini comme le plus favorable par RTE (zone d'étude approchée).

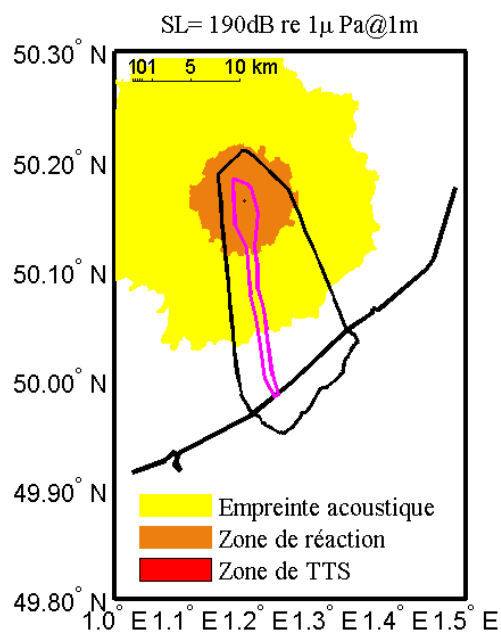


Figure 31 : Empreinte acoustique, zone de réaction et zone de TTS (perte temporaire d'audition) des cétacés spécialistes des hautes fréquences (dont le marsouin commun) pour un niveau source au point P1 de 190 dB re.1 μ Pa @ 1m. La zone délimitée en noire correspond à l'aire d'étude préconisée par RTE ; celle délimitée en magenta correspond au tracé du fuseau défini comme le plus favorable par RTE (zone d'étude approchée)..

Tableau 14 : Risque d'impact « dérangement comportemental » et rayons associées pour les cétacés spécialistes des hautes fréquences

SL (dB re.1μPa)	Empreinte acoustique (Risque de masquage)		Cétacés Hautes Fréquences			
	Rayon max (km)	Aire de l'empreinte acoustique (km ²)	Rayon de réaction (m)	Aire de la zone de réaction (km ²)	Rayon TTS (m)	Rayon PTS (m)
165	2.02	10.83	140	0.064	23	0
173	4.21	47.35	984	3.577	79	0
181	8.31	178.64	2494	22.104	110	22
190	18.06	630.97	5227	95.554	489	53

8 Synthèse des différentes zones d'impact

8.1 Synthèse par gamme de niveaux sonores


En appliquant successivement la méthode exposée dans la partie précédente pour un ensemble de couple {espèce, type d'impact}, les rayons d'impact ont été estimés pour les deux positions de la source définies précédemment le long du tracé (Figure 20) et sont donnés dans le [Tableau 15](#) pour les points P₁ (34 m de fond) à P₂ (point côtier). Les risques de pertes d'auditions sont calculés pour une exposition de 1 h pour les mammifères marins (approche conservative et durée cohérente avec le protocole de suivi des mammifères marins pendant les travaux) et de 6 h pour les poissons. On retient que :

- ✓ La zone de réaction de toutes espèces de mammifères marins augmente avec le niveau sonore large bande et avec la hauteur d'eau à laquelle se trouve la source acoustique. Les zones de risques de réaction sont relativement faibles lorsque la source acoustique se trouve proche des côtes et/ou à marée basse. Il est à noter que la longueur des rayons d'impact entre le point P₂ (point côtier) et le point P₁ (point au large) évolue progressivement avec la profondeur du canal.
- ✓ Pour les sources de niveau sonore faible (SL = 165 – 173 dB re.1μPa@1m), le risque d'impact est très faible. On note :
 - Une zone de risque de réaction modérée (rayon maximal égal à 1234 m)
 - Quelle que soit la position de la source le long du tracé et pour un niveau source de 173 dB re.1μPa@1m, il n'y a pas de risque de PTS en toute lettre pour toutes les classes de mammifères marins sauf pour les pinnipèdes dans l'eau (rayon égal à 68 m au point côtier P₂). Les phoques gris et les phoques communs, espèces à enjeu local fort font partie du groupe des pinnipèdes dans l'eau.

- La zone de risque de perte d'audition temporaire varie d'un disque de rayon compris entre 13 m et 116 m pour toutes les classes de mammifères marins et de 96 – 223 m pour les poissons.
- ✓ Pour les sources de niveau sonore intermédiaire à fort (181 dB re.1μPa@1m), on note :
 - Une augmentation sensible de la zone de risque de réaction. Elle se situe désormais entre 2044 m (pour les cétacés HF, dont le marsouin commun : espèce à enjeu local fort) et 3046 m (pour les cétacés BF, groupe d'espèces à enjeu local faible) en fonction de la profondeur du canal.
 - Une augmentation de la zone de risque de pertes d'audition temporaire (TTS) par rapport à celle observée pour des niveaux sources faibles. Le risque d'impact varie de 78 m (pour les cétacés MF, groupe d'espèces à enjeu local modéré) à 148 m (pour les pinnipèdes, groupe d'espèces à enjeu local fort) pour toutes les classes de mammifères marins. Pour les poissons, cette zone de risque de perte d'audition varie de 186 à 267m.
 - Une zone de perte d'audition permanente (PTS) est susceptible d'apparaître tout le long du tracé (P₁ à P₂) pour tous les mammifères marins. Le rayon maximal de risque de perte d'audition permanente est de 68 m pour les cétacés BF (groupe d'espèces à enjeu local faible), 56 m pour les cétacés MF (groupe d'espèces à enjeu local modéré), 54 m pour les cétacés HF (groupe d'espèces à enjeu local fort) et de 92 m pour les pinnipèdes (groupe d'espèces à enjeu local fort).
- ✓ Pour les sources de niveau sonore fort (190 dB re.1μPa@1m), on note :
 - Une extension considérable des zones de réaction pour toutes les classes de mammifères. Cette zone de réaction s'étend désormais de 4.1 km en milieu côtier (P₂) jusqu'à 6.0 km lorsque la source est dans 34 m d'eau (P₁). Les cétacés BF (groupe d'espèces à enjeu local faible) sont ceux qui sont susceptibles d'être les plus impactés. Quant aux cétacés HF (dont le marsouin commun, espèce à enjeu local fort), le rayon d'impact varie de 4.1 km en milieu côtier (P₂) à 5.2 km en milieu petit fond (34 m, P₁).
 - Une importante augmentation des zones de pertes d'audition temporaires pour les poissons de moins de 2 g variant de 247 m à 311 m et de 226 à 290 m pour les poissons de plus de 2 g.
 - Une augmentation modérée des zones de pertes d'audition permanente pour toutes les classes de mammifères marins. Le rayon de risque d'impact varie de 51 à 124 m le long du tracé, le plus grand impact étant observé pour les pinnipèdes dans l'eau (espèces à enjeu local fort). La longueur de ces rayons est cohérente à ceux reportés dans la bibliographie (Erbe C. a., 2000), (Erbe C. , 2002) and (Thomsen F. L., 2006).

8.2 Synthèse par type de travaux pour les mammifères marins


- ✓ Pour **l'ensouillage de câble au large par watter-jetting, charrue et pour le dragage de dunes, le risque d'impact est très faible**. On note :
 - L'empreinte acoustique correspond à un disque de rayon égal à 4.2 km et centré sur la position de l'engin. Les zones de risques d'impact se situent à l'intérieur de ce disque.
 - Une zone de risque de dérangement comportemental modéré (rayon maximal égal à 1330 m pour la famille des mysticètes, groupe d'espèces à enjeu local faible).
 - La zone de risque de perte d'audition temporaire est relativement restreinte, et varie d'un disque de rayon compris entre 13 m et 85 m pour toutes les classes de mammifères marins,
 - Il n'y a pas de risque de perte d'audition permanente pour toutes les classes de mammifères marins sauf pour les phoques gris et communs dans le cas d'un animal qui resterait 1 heure à moins de 30 mètres des travaux.

Ensouillage de câble au large par watter-jetting, charrue et pour le dragage de dunes (SL = 173 dB re.1 µPa@1m)			
Niveau croissant de gravité de l'impact 	Type de risque	Commentaire	Rayon de la zone
	Empreinte acoustique		4.2 km
	Comportement	risque modéré	max : 1330 m pour les mysticètes
	Perte d'audition temporaire	risque faible	85 m max pour les mammifères marins
	Perte d'audition permanente	risque très faible pour les phoques pas de risque pour les autres espèces	30 m max pour les phoques

- ✓ Pour **l'ensouillage de câble au large par trancheuse mécanique (option possible)**, on note :
 - L'empreinte acoustique correspond à un disque de rayon égal à 8.3 km et centré sur la position de l'engin. Les zones de risques d'impact se situent à l'intérieur de ce disque.
 - Une augmentation sensible de la zone de risque de dérangement comportemental par rapport à celle observée pour des niveaux sources plus faibles (ensouillage par water-jetting, charrue et dragage). Elle se


situé désormais entre 2238 m pour le marsouin commun (espèce à enjeu local fort) et 3046 m pour les mysticètes (groupe d'espèces à enjeu local faible).

- Une augmentation de la zone de risque de pertes d'audition temporaire (TTS) par rapport à celle observée pour des niveaux sources plus faibles. Cette zone reste relativement restreinte, et varie de 78 m pour les dauphins communs, grands dauphins, et globicéphales noirs (espèces à enjeu local modéré) à 116 m pour les phoques gris et communs (groupe d'espèces à enjeu local fort).
- Il existe une zone de perte d'audition permanente pour tous les mammifères marins dans le cas d'un animal qui resterait 6 heures à grande proximité des travaux. Le rayon maximal de cette zone varie de 24 m pour les marsouins communs (espèce à enjeu local fort) à 60 m pour les phoques gris et phoques communs (espèces à enjeu local fort).

Ensuillage de câble au large par trancheuse mécanique (SL = 181 dB re.1 µPa@1m)			
Niveau croissant de gravité de l'impact	Type de risque	Commentaire	Rayon de la zone
	Empreinte acoustique		8.3 km
	Comportement	risque modéré	max : 3046 m pour les mysticètes
	Perte d'audition temporaire	risque faible	116 m max pour les mammifères marins
	Perte d'audition permanente	risque très faible	24 m pour les marsouins 60 m pour les phoques

- ✓ Pour **l'ensuillage de câble par trancheuse mécanique à l'estran**, on note :
 - L'empreinte acoustique correspond à un disque de rayon égal à 6.1 km et centré sur la position de l'engin. Les zones de risques d'impact se situent à l'intérieur de ce disque. L'empreinte acoustique à l'estran est plus petite que l'empreinte acoustique au large car les eaux peu profondes de l'estran ne favorise pas l'apropagation acoustique.
 - Une zone de risque dérangement comportemental entre 2416 m pour le marsouin commun : espèce à enjeu local fort et 2978 m pour les mysticètes, groupe d'espèces à enjeu local faible.

- Une zone de risque de perte d'audition temporaire reste relativement restreinte, et varie de 111 m pour les dauphins communs, grands dauphins, et globicéphales noirs (espèces à enjeu local modéré) à 148 m pour les phoques gris et phoques communs (espèces à enjeu local fort).
- Il existe une zone de perte d'audition permanente pour tous les mammifères marins dans le cas d'un animal qui resterait 6 heures à grande proximité des travaux. Le rayon maximal de cette zone varie de 52 m pour les marsouins communs (espèce à enjeu local fort) à 92 m pour les phoques gris et phoques communs (espèces à enjeu local fort).
- Si les travaux sont conduits à marée basse (hauteur d'eau plus faible limitant la propagation du bruit des travaux), les zones de risques sont inférieures à celles mentionnées ci-dessus et sont divisées d'un facteur 1.25 environ.

Ensouillage de câble à l'estran par trancheuse mécanique			
Niveau croissant de gravité de l'impact 	Type de risqué	Commentaire	Rayon de la zone
	Empreinte acoustique		6.1 km
	Comportement	risque modéré	max : 2978 m pour les mysticètes
	Perte d'audition temporaire	risque faible	148 m max pour les mammifères marins
	Perte d'audition permanente	risque très faible	52 m pour les marsouins 92 m pour les phoques

De plus, il est à considérer que :

- le Marsouin commun semble peu évoluer à des niveaux bathymétriques de 0 à 10 m (soit environ 2 km de la côte),
- le Grand dauphin a été observé dans les zones proches de la côte (pas au niveau de l'aire d'étude immédiate),
- le Phoque veau-marin peut fréquenter l'estran de l'aire d'étude immédiate,
- le Phoque gris peut parcourir l'estran mais évolue également au large.

Le tableau et les cartes suivants résument les rayons d'impacts maximum évalués pour les mammifères marins et pour les différentes techniques de travaux.

Tableau 15 : Synthèse des rayons maximum d'impacts acoustiques sur les mammifères marins

Méthode	Rayon d'empreinte acoustique	Rayon maximum de dérangement	Rayon maximum de perte temporaire d'audition	Rayon maximum de perte permanente d'audition
Watter-jetting, charrue, dragage au large	4.2 km	1330 m	85 m	30 m
Trancheuse mécanique au large	8.3 km	3046 m	116 m	60 m
Trancheuse mécanique à l'éstran	6.1 km	2978 m	148 m	92 m

8.3 Synthèse pour les poissons

Les nuisances sonores et vibrations générées par les travaux d'ensouillage des câbles et le trafic afférant peuvent induire sur l'ichtyofaune des pertes permanentes d'audition (PTS : Permanent Threshold Shift), des pertes temporaires d'audition (TTS : Temporary Threshold Shift), des changements comportementaux, un masquage de la communication et une audibilité de l'activité.

La littérature actuelle ne permet pas d'estimer tous les types d'effets définis ci-dessus pour les adultes et les larves/œufs (Popper et al, 2014). En effet, seul les seuils acoustiques induits par des émissions de type battage de pieux et air gun en sismique pouvant induire une mortalité des poissons sont bien renseignés par la bibliographie.

Cependant, ce type de travaux n'est pas prévu dans le cadre du projet de raccordement.

Dans le cadre de cette analyse, et à partir de connaissances scientifiques actuelles (Carlson, et al., 2007; Oestman, et al., 2009), nous distinguerons les poissons en deux catégories : les poissons inférieurs à 2 g et les poissons supérieurs à 2 g pour lesquels nous utiliserons les seuils définis par Southall et al. 2007. Ainsi, seule la perte d'audition temporaire et la zone d'audibilité du projet pouvant induire un masquage des communications peuvent être étudiées pour les poissons.

Tableau 16 : Seuils utilisés pour identifier les risques d'impact, (1) Southall et al., 2007 classent les réactions comportementales suivant un indice variant de 1 à 9 (1 : pas de réaction, 9 : panique, échouage), (1) nous avons retenu le niveau de bruit ambiant comme le seuil de masquage et comme le seuil d'audibilité du bruit généré par le projet, ce seuil sert à définir l'empreinte sonore du projet.

Espèces	Seuil PTS (SEL dB re.1μPa ² s)	Seuil TTS (SEL dB re.1 μPa ² s)	Seuil pour un changement comportemental (SPL dB re.1μPa)	Seuil pour masquage/audibilité (SPL dB re.1μPa)
Poisson > 2g	N.A	187	N.A	108 ⁽¹⁾
Poisson < 2g	N.A	183	N.A	108 ⁽¹⁾

L'estimation des distances de risques liés à la perte temporaire repose sur l'hypothèse d'un spécimen immobile pendant la durée d'exposition au bruit de 6 heures pour un poisson, ainsi qu'un atelier d'ensouillage immobile sur cette période de temps (approche conservative).

La méthodologie détaillée est fournie au chapitre 8.3.2 et le rapport acoustique fait l'objet de l'annexe 06.

Le tableau et les cartes suivants résument les rayons d'impact maximum évalués pour les poissons et pour les différentes techniques de travaux.

Tableau 17 : Synthèse des rayons maximum d'impacts acoustiques sur poissons

Méthode	Rayon d'empreinte acoustique	Rayon maximum de perte temporaire d'audition (poissons < 2g)	Rayon maximum de perte temporaire d'audition (poissons > 2g)
Water-jetting, charrue, dragage au large	4.2 km	163 m	141 m
Trancheuse mécanique au large	8.3 km	208 m	186 m
Trancheuse mécanique à l'estran	6.1 km	267 m	238 m

8.4 Traduction en terme d'impact

En terme de synthèse, nous reproduisons ici les sorties de la présente étude après mise en forme et intégration dans l'étude d'impact globale

ICHTYOFAUNE
Phase Travaux

Effet	Enjeu	Sensibilité	Caractérisation	Impact
Risque d'effet de perte temporaire d'audition par les travaux (considération des rayons maximum quelle que soit la technique de travaux)				
Espèces amphihalines				
Alose feinte, Anguille européenne	<i>Fort</i>	Fort	Direct Temporaire Négatif	Faible
Grande alose, Lamproies, saumon atlantique	<i>Moyen</i>	Moyen		Faible
Truite de mer	<i>Faible</i>	Faible		Négligeable
Espèces à frayères et nourriceries locales				
Seiche commune, Limande, Lançon, Hareng, Sole, etc.	<i>Adultes : Moyen</i>	Moyen	Direct Temporaire Négatif	Faible
	<i>Larves et œufs : moyen</i>	Fort		Faible
Gobie, Grondin, Sardine, etc.	<i>Adultes : Faible</i>	Faible		Négligeable
	<i>Larves et œufs : faible</i>	Moyen		Faible
Autres espèces				
Raie bouclée	<i>Moyen</i>	Faible	Direct Temporaire Négatif	Négligeable
Bar, Turbot, etc.	<i>Faible</i>	Négligeable		Négligeable
Blennie, Souris de mer, Vieille	<i>Négligeable</i>	Négligeable		Négligeable
Perturbation des espèces amphihalines				
Alose feinte, Anguille européenne	<i>Fort</i>	Fort	Direct Temporaire Négatif	Faible
Grande alose, Lamproies, saumon atlantique	<i>Moyen</i>	Moyen		Faible
Truite de mer	<i>Faible</i>	Faible		Faible
Perte d'habitats fonctionnels				
Espèces à frayères et nourriceries locales				
Seiche commune, Limande, Lançon, Hareng, Sole, etc.	<i>Adultes : Moyen</i>	Moyen	Direct Temporaire Négatif	Faible
	<i>Larves et œufs : moyen</i>	Moyen		Faible
Gobie, Grondin, Sardine, etc.	<i>Adultes : Faible</i>	Faible		Négligeable

	<i>Larves et œufs : faible</i>	Moyen		Faible
Autres espèces				
Raie bouclée	<i>Moyen</i>	Faible	Direct	Faible
Bar, Turbot, etc.	<i>Faible</i>	Négligeable	Temporaire	Négligeable
Blennie, Souris de mer, Vieille	<i>Négligeable</i>	Négligeable	Négatif	Négligeable
Perte d'œufs et larves				
Seiche commune, Limande, Lançon, Hareng, Sole, etc.	<i>Larves et œufs : moyen</i>	Moyen	Direct Permanent	Faible
Gobie, Grondin, Sardine, etc.	<i>Larves et œufs : faible</i>	Moyen	Négatif	Faible
Effets acoustiques des travaux à l'atterrage				
Aucun effet sur l'ensemble des espèces	<i>Moyen à négligeable</i>	Moyen à négligeable	-	Nul
Effet de remise en suspension de particules				
Ensemble des espèces	<i>Moyen à négligeable</i>	Moyen à négligeable	Direct Temporaire Négatif	Négligeable à nul
Phase Exploitation				
Effet	Enjeu	Sensibilité	Caractérisation	Impact
Le chapitre 3.2.6 traite spécifiquement des champs électromagnétiques.				

MAMMIFERES MARINS					
Phase Travaux					
Effet	Enjeu	Sensibilité	Caractérisation	Potentialité de l'effet	Impact
Effets liés aux nuisances sonores (considération des rayons maximum et quelle que soit la technique de travaux) – Travaux au large et à l'estran					
Marsouin commun	<i>Fort</i>	Fort	Direct	Faible	Moyen
Phoque veau-marin	<i>Fort</i>	Fort	Temporaire	Faible	Moyen
Phoque gris	<i>Fort</i>	Fort	Négatif	Faible	Moyen
Grand dauphin	<i>Moyen</i>	Moyen		Faible	Faible

Autres espèces présentes	<i>MoyenFaible</i>	Moyen		Faible	Faible
Risque d'effets acoustiques des travaux à l'atterrage					
Aucun effet sur l'ensemble des espèces	<i>Fort à moyen</i>	Fort à moyen	-	Nulle	Nul
Risque d'effet de collision					
Ensemble des espèces	<i>Fort à moyen</i>	Fort à moyen	Direct Permanent Négatif	Moyenne	Moyen
Phase Exploitation					
Effet	Enjeu	Sensibilité	Caractérisation		Impact
Aucun effet identifié					
Ensemble des espèces	Fort à moyen	Faible	-	Nul	

9 L'analyse des méthodes

Nous avons concentré notre étude sur les impacts acoustiques pour les mammifères marins et les poissons à l'échelle des individus, mais nous ne l'avons pas fait à l'échelle de la population en raison d'un manque de connaissances sur ce sujet (Lusseau, et al., 2012). Toutefois, les activités d'ensouillage de câbles auront une durée limitée et les niveaux sonores générés seront de même ordre de grandeur que les niveaux des navires régulièrement présents dans la zone.

L'approche développée repose sur une simulation acoustique dont la sophistication est adaptée aux enjeux. Nous avons utilisé un modèle de simulation acoustique précis prenant en compte les variations spatiales de l'environnement. Par ailleurs les données géo-acoustiques nécessaires au modèle ont été estimées à partir d'une campagne in situ par des méthodes robustes en échantillonnant spatialement l'environnement. Nous avons aisément vérifié que les rayons d'impacts acoustiques dépendent de la localisation de la source. On note que les rayons d'impacts sont minimaux proches de la côte et maximum lorsque la hauteur du canal augmente. Ceci s'explique d'une part par la densité spectrale de puissance utilisée dont le maximum d'énergie se situe en basses fréquences et d'autre part par les fréquences de coupure du canal qui atténuent les basses fréquences en environnement petits fonds côtiers.

Nous avons également utilisé une densité spectrale de puissance représentative de plusieurs niveaux sources, correspondant à la variabilité observée dans la littérature (Tableau 9). Cette littérature ne renseigne cependant pas les spectres des bruits générés par les travaux d'ensouillage. Cette information sur le contenu fréquentiel est essentielle pour une meilleure caractérisation de la perception acoustique par une espèce, et donc de l'impact acoustique associé. Pour pallier à ce manque d'informations et pour estimer les impacts de façon conservative, nous avons choisi de couvrir une large gamme de niveaux sonores émis (165 à 190 dB re.1μPa@1m, Figure 19).

Nous n'avons pas pris en compte le bruit de trafic induit par les navires réalisant les travaux car leurs niveaux sonores sont inférieurs au plus faible niveau des travaux envisagés dans l'étude. En effet, nous avons envisagé 4 niveaux de sources sonores pour rendre compte du bruit généré par les différents types de techniques d'ensouillage (165, 173, 181, 190 dB re. 1μPa@1m), le bruit de trafic induit possède lui un niveau sonore égal à 156 dB re. 1μPa@1m (cf Breeding, 1996, Wagstaff, 1973 dans Quiet Ocean, 2016), inférieur de 9 dB au plus petit niveau sonore lié aux activités d'ensouillage. Ainsi la prise en compte simultanée du trafic maritime et du plus faible bruit lié à l'ensouillage produit un niveau sonore égal à :

$$SL_{combine} = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{SL_{trafic}}{10}} + 10^{\frac{SL_{ensouillage}}{10}} \right) = 165.5 \text{ dB re. } 1\mu\text{Pa}$$

Le trafic induit donc une augmentation de 0.5 dB qui se traduit par une augmentation des rayons des zones d'impact et de l'empreinte d'un facteur :

$K = 10^{0.5/20} = 1.06$ soit une augmentation de 6% de la zone d'impact calculée avec le plus faible niveau sonore des travaux liés au raccordement.

Pour l'estimation des impacts, nous avons uniquement considéré la phase de travaux et non la phase d'exploitation du câble. Il existe en effet un manque de connaissance lié au bruit généré par le câble. Cependant, celui-ci est considéré comme faible et très inférieur au bruit généré pendant la phase de travaux (Meißner, Schabelon, Bellebaum, & Sordyl, 2006; Merck & Wasserthal, 2009; NIRAS, 2016). Nous avons également utilisé une approche conservative dans le choix des scénarios d'impacts afin de s'assurer que le bruit généré par le projet sera inférieur aux niveaux de bruits pris en compte pour estimer les zones d'impact acoustique.

Concernant les seuils d'impact à utiliser pour les mammifères marins, l'annexe 6 (partie 17) justifie l'emploi des seuils de Southall et al, 2007 comme la vision la plus conservative pour les espèces à enjeux.

10 Proposition des mesures ERC et d'un protocole de suivi

Plusieurs actions sont suggérées pour i) réduire le risque d'impact acoustique des travaux d'ensouillage et ii) améliorer notre connaissance sur les impacts générés sur les mammifères marins. Ainsi, il est possible, d'une part, d'adapter les techniques de façon à créer le moins de nuisances possibles. D'autre part, des protocoles de suivi des mammifères marins peuvent être développés et mis en place pendant la phase de travaux puis d'exploitation.

10.1 Les mesures d'évitement, de réduction et de compensation

Les mesures ERC suggérées sont de 3 types :

- ✓ Le choix de la technique utilisée lors des travaux
- ✓ La mise en place de dispositifs d'éloignement
- ✓ La prise en compte de la biologie des mammifères marins et de leur présence sur site

Technique employée : Le choix de la technique employée lors de la phase de travaux est un premier facteur permettant de réduire les émissions sonores. L'étude bibliographique effectuée pour cette étude d'impact (cf Tableau 9, Tableau 10) a en effet révélé une grande variabilité de la production sonore suivant les techniques d'ensouillage de câbles (tranchage, enrochement, matelas béton, coquille, forage dirigé). Le niveau sonore pour un même type de technique peut varier d'un navire à l'autre en fonction des caractéristiques du navire, de son état de maintenance. Ainsi la caractérisation des niveaux sonores générés par les différentes techniques de pose du câble et les navires est une méthode permettant d'effectuer un choix raisonné de prestataire et de technique de pose.

Mesures d'éloignement :

- Les dispositifs de dissuasion sonore, ou répulsifs acoustiques (pingers) consistent à émettre des impulsions ou des signaux à modulation de fréquences. Ils permettent ainsi d'éloigner les animaux en dehors d'une zone où ils pourraient être exposés à des niveaux sonores élevés. Les caractéristiques de ces pingurs (type de signal, fréquence, niveau d'émission) dépendent des capacités auditives (audiogrammes) des espèces de mammifères marins ciblées. Leur efficacité est cependant discutée avec notamment des phénomènes d'accoutumance (Gordon & Northridge, 2002; López & Mariño, 2011).
- Les zones d'impact correspondant à une perte d'audition temporaire (TTS) et à une perte d'audition permanente (PTS) sont inférieures à 700 m et 130 m, respectivement. Par conséquent, la mise en place d'un dispositif d'alerte, composé d'un suivi visuel et d'une zone d'exclusion

d'un kilomètre, permettrait d'interrompre les travaux en cas d'incursion de mammifères marins dans cette zone.

- La méthode dite de "démarrage progressif" (« soft-start », « ramp-up ») consiste à démarrer progressivement la phase de travaux afin de "prévenir" les mammifères marins et leur laisser le temps de s'éloigner avant que les opérations atteignent leur pleine puissance. Cette méthode d'éloignement est principalement utilisée pour le battage de pieux. On peut cependant imaginer sa mise en œuvre pour des techniques de pose de câble telles que le tranchage ou l'enrochement.

Biologie de l'espèce : L'état initial Mammifères Marins a montré une fréquentation variable de la zone suivant les espèces considérées. Celle-ci dépend de l'importance fonctionnelle de la zone dans les activités biologiques des espèces : zone de reproduction, zone liée à alimentation, ... Ainsi, ajuster la période et l'intensité des travaux suivant la période de fréquentation de la zone par les 10 espèces identifiées permettrait de limiter les effets des travaux sur ces espèces. Ainsi, pour cette étude, il apparaît que la zone d'étude est principalement utilisée pour la recherche de proies et est surtout fréquentée entre Mars et Mai par les marsouins communs et les dauphins communs. Ces derniers sont également fortement présents en juillet août sur le site.

10.2 Le protocole de suivi

Un suivi acoustique du bruit généré par les travaux d'ensouillage de câbles (analyses des niveaux sonores et des spectres) permettra d'enrichir notre connaissance dans ce domaine. La lacune de connaissances des niveaux sonores générés par les différentes techniques de travaux d'ensouillage a en effet été identifiée dans l'analyse des méthodes comme un point faible de l'étude.

Un suivi visuel dans un rayon de 300 m autour des travaux couplé à un suivi acoustique dans un rayon de 3 km (l'acoustique permet une surveillance 24h/24) pendant et après la phase de travaux permettrait de renseigner si un éloignement des espèces a été observé, et de suivre le retour des animaux sur le site.

11 Résumé non technique

L'impact acoustique du projet de raccordement du parc éolien en mer de Dieppe - le Tréport a été étudié à partir i) d'un état initial mammifères marins, ii) de mesures acoustiques *in situ*, et iii) de travaux de simulations acoustiques.

L'état initial réalisé par le bureau d'étude Biotope en 2015 a permis d'identifier 11 espèces de mammifères marins potentiellement présentes sur la zone d'étude. Parmi ces 10 espèces, 3 présentent un enjeu local significatif (marsouin commun, phoque gris, phoque commun). Les niveaux sonores émis par les travaux ont été choisis suite à une analyse bibliographique montrant une grande dispersion (160 à 190 dB re.1 μ Pa@1m). Aussi, quatre niveaux sonores représentatifs des travaux d'ensouillage (de 165 à 190 dB re.1 μ Pa@1m) ont été retenus pour étudier quatre types d'impacts sur les mammifères marins et les poissons: le masquage des communications acoustiques, les dérangements comportementaux, la perte d'audition temporaire et la perte d'audition permanente.

Les tailles des zones d'impact ont été estimées par une simulation acoustique comprenant le meilleur de l'état de l'art pour les codes de propagation et pour les seuils d'impact. Les simulations ont été paramétrées avec des propriétés géo-acoustiques de l'environnement mesurées *in situ* spécifiquement pour l'étude.

Le rayon de la zone de réaction est de 6 km maximum pour tous les groupes de mammifères considérés dans cette étude.

Le rayon de la zone de perte d'audition temporaire est inférieur à 700 m pour tous les mammifères marins, ceci pour une durée d'exposition de 1 heure (approche conservatrice et durée cohérente avec le protocole de suivi des mammifères marins pendant les travaux). On observe un rayon de l'ordre de 300 m pour les poissons de masse supérieure à 2g et pour les poissons de masse inférieure à 2 g.

Le rayon de la zone de perte d'audition permanente est inférieur à 130 m autour du tracé du câble pour tous les mammifères marins et ceci pour une durée d'exposition de 1 heure. Pour des niveaux à la source jusqu'à 173 dB re.1 μ Pa@1m, il n'y a pas de perte d'audition permanente pour tous les mammifères, à l'exception des pinnipèdes, espèces à enjeu local fort (62 m pour SL = 173 dB re.1 μ Pa@1m au point côtier P2).

En conclusion :

Les risques d'impact sont plutôt limités pour les impacts physiologiques (pertes d'audition temporaires et définitives de tous les groupes d'espèces de mammifères marins) ce qui est cohérent avec le niveau sonore émis par les travaux d'ensouillage qui sont très proches de ceux rayonnés par les navires,

Le rayon de dérangement comportemental de l'ordre de 5 kilomètres pour les marsouins dans l'hypothèse conservatrice d'un niveau sonore émis maximal (190 dB re.1μPa@1m) doit être pris en compte et demande i) de bien maîtriser et connaître les niveaux sonores émis, notamment par le choix de la technique d'ensouillage adapté et d'un prestataire possédant des instruments peu bruyants (navire support et appareillage d'ensouillage), ii) de bien planifier les travaux en fonction des rythmes biologiques des mammifères marins fréquentant le site et iii) de mettre en place une procédure de surveillance visuelle dans un rayon de 300 m et acoustique dans un rayon de 3000 mètres autour des travaux

12 Annexe 1 : Grandeurs acoustiques : définition et calculs

Il existe plusieurs quantités pour caractériser un son, l'une des plus utilisées est la pression qui exprime la force de compression créée par l'onde sonore sur une surface d'un mètre carré au point de mesure. Cette pression $p(t)$ exprimée en μPa est mesurée en fonction du temps par un hydrophone.

La fréquence (f) d'un son est le nombre d'oscillations de l'onde sonore observées en une seconde, elle s'exprime en Hertz (Hz). Les sons possédant des fréquences inférieures à 20 Hz sont nommés infrasons, les sons possédant des fréquences comprises entre 20Hz et 20 kHz sont dits audibles (au sens où ils peuvent être perçus par l'oreille humaine), les sons possédants des fréquences supérieurs à 20 kHz sont nommés infrasons.

Soit une mesure sonore $p(t)$ réalisée dans l'intervalle $\text{INT}=\{t \in [t_0-T/2, t_0+T/2]\}$ pour laquelle nous avons pris soin de ne considérer que les fréquences comprises entre f_{\min} (Hz) et f_{\max} (Hz) (par filtrage passe-bande de la mesure), l'énergie acoustique contenue dans l'intervalle de mesure est définie par :

$$E(t_0)[\mu\text{Pa}^2\text{s}] = \int_{t_0-T/2}^{t_0+T/2} p(t)^2 dt$$

Équation 3

La pression efficace de la mesure dans l'intervalle de mesure et pour la bande $B \in [f_{\min}, f_{\max}]$ s'exprime par :

$$p_{rms}(t_0)[\mu\text{Pa}] = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0-T/2}^{t_0+T/2} p(t)^2 dt}$$

Équation 4

A partir d'une pression de référence p_{ref} égale à $1\mu\text{Pa}$ (dans l'eau) et d'une énergie acoustique de référence E_{ref} prise égale à $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$, nous pouvons définir les niveaux acoustiques exprimés en décibel :

Niveau sonore reçu (i.e. Sound Pressure Level) :

$$SPL(t_0)[\text{dB re. } 1\mu\text{Pa}] = 20 \log\left(\frac{p_{rms}(t_0)}{p_{ref}}\right)$$

Équation 5

Energie sonore cumulée (i.e. Sound Exposure Level) :

$$SEL(t_0)[\text{dB re. } 1\mu\text{Pa}^2\text{s}] = 10 \log\left(\frac{E(t_0)}{E_{ref}}\right).$$

Équation 6

SPL et SEL sont des quantités/niveaux 'Large Bande' dans le sens où elles quantifient le son autour du temps t_0 globalement sur toute la bande fréquentielle $B = [f_{\min}, f_{\max}]$. SPL et SEL s'évaluent directement sur les mesures après un filtrage passe-bande.

Pour décrire plus finement la répartition de la puissance acoustique en fonction de la fréquence, nous utilisons la fonction densité spectrale de puissance ou spectre acoustique :

$$\gamma_p(t_0, f) [\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}]$$

Équation 7

La densité spectrale de puissance exprime la quantité de puissance de son comprise dans une bande de 1Hz autour de la fréquence f pour les mesures appartenant à l'intervalle INT. En choisissant une densité spectrale de puissance de référence égale à $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$, la densité spectrale de puissance $\gamma_p(t_0, f)$ [dB re. $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$] s'exprime en décibel par :

$$10\log(\gamma_p(t_0, f) [\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}])$$

Équation 8

La densité spectrale de puissance est estimée à partir des mesures en calculant le périodogramme (Stoica & Moses, 1997). La densité spectrale de puissance est une quantité/Niveau dit 'Bande Etroite' dans le sens où elle quantifie le son dans une bande de 1Hz (étroite) autour de la fréquence f . Des liens peuvent être faits entre les niveaux 'Large Bande' et les niveaux 'Bande Etroite'. Ainsi le niveau 'Large Bande' s'exprime comme la somme des niveaux 'Bande Etroite' sur la bande de mesure :

$$SPL (dB \text{ re. } 1\mu\text{Pa}, B = [f_{min}, f_{max}]) = 10\log\left(\int_{f_{min}}^{f_{max}} \gamma_p(f) df\right)$$

Équation 9

Parmi les bandes B les plus usitées, nous rencontrons souvent les octaves et tiers d'octaves autour de f_0 (fréquence centrale au sens de la moyenne géométrique) :

$$\text{octave centrée sur } f_0: B = \left[\frac{f_0}{\sqrt{2}}, \sqrt{2}f_0\right]$$

Équation 10

$$\text{tiers d'octave centrée sur } f_0: B = \left[\frac{f_0}{2^{1/6}}, 2^{1/6}f_0\right].$$

Équation 11

La densité spectrale de puissance $\gamma_p(t_0, f)$ permet de cartographier le signal mesuré autour du temps t_0 dans l'intervalle INT en fonction de la fréquence. En faisant évoluer t_0 le long de la mesure (et donc en faisant glisser l'intervalle $\text{INT} = \{t \in [t_0 - T/2, t_0 + T/2]\}$) et en regroupant les valeurs $\gamma_p(t_0, f)$ en fonction de la fréquence et du temps, nous formons le spectrogramme de la mesure (Hlawatsch & Boudreaux-Bartels, 1992) qui cartographie le signal mesuré en fonction du temps et de la fréquence.

Les espaces de représentation temporels, fréquentiels, temps-fréquence, les niveaux 'Large Bande' SPL [dB re. $1\mu\text{Pa}$] et SEL [dB re. $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$], la densité spectrale de puissance dB [re. $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$] et finalement le spectrogramme sont les quantités que nous allons utiliser pour étudier et quantifier les paysages acoustiques.

Le Tableau 18 et la Figure 32 présentent les principales caractéristiques des sons anthropiques et biologiques (Hildebrand J., 2009; Barazzutti, Gervaise, & Mars, 2014).

Tableau 18 : Caractéristiques sonores de quelques sources anthropiques (Hildebrand J., 2009)

Type de source	Source Level (dB re.1μPa@1m)	Bande passante (Hz)	Durée (s)
Torpille	289	10-200	0.1
Canon sismique	260	5-300	0.03
Sonar LFAS	235	2000-8000	2
Battage de pieux, marteau 1000 kJ	237	100-1000	0.05
Sonar multi-faisceau	245	11500-12500	0.01
Bombe pour phoque (2.3g)	205	15-100	0.03
Cargo (173m, 16 nœuds)	192	40-100	Continu
Petit hors-bord (20 nœuds)	160	1000-5000	Continu
Eolienne offshore en opération	151	60-300	Continu

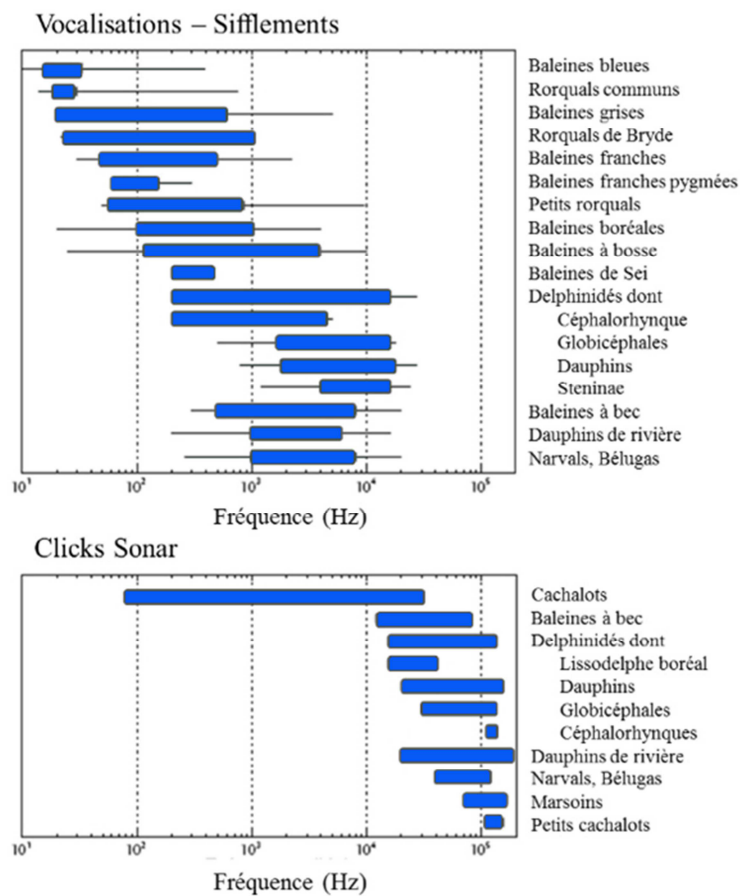


Figure 32 : Fréquences des émissions sonores de cétacés (Barazzutti, Gervaise, & Mars, 2014)

13 Annexe 2 : Méthodologie détaillée pour l'évaluation d'impact

Pour mener à bien l'évaluation des impacts, nous nous dotons d'échelles de quantification des enjeux, tolérances, sensibilités et impacts.

13.1 Echelle de quantification des enjeux

L'évaluation des enjeux mammifères marins a été établie en croisant le statut patrimonial et le statut local des espèces concernées (Grille 1).

Définition et évaluation de l'enjeu patrimonial :

L'enjeu patrimonial est lié au statut patrimonial, les critères suivants ont été pris en compte : la vulnérabilité (degrés de menace) de l'espèce (lorsque celle-ci est connue) inscrite sur les Listes rouges IUCN (mondiale, européenne ou nationale), les aires de répartition, et la population (en nombre d'individus au niveau international).

- ✓ s.o. (sans objet) : Espèces hors de son aire de répartition (présence anecdotique),
- ✓ Faible : Population importante et étendue, espèce non menacée,
- ✓ Moyen : au moins un des critères « faibles » n'est pas respecté,
- ✓ Fort : population réduite, espèce menacée et à forts enjeux de conservation en Bretagne.

Les espèces méconnues ont été considérées par défaut comme ayant un enjeu faible en l'absence d'indication contraire.

Définition et évaluation du statut local :

Le statut local des espèces tient compte de l'importance de la zone d'étude pour l'espèce en fonction de son aire de répartition et de son usage (responsabilité régionale, utilisation de l'espace pour des fonctions vitales : repos, alimentation, reproduction, mise-bas, etc.) :

- ✓ Nul : la présence d'une espèce dans la zone est accidentelle,
- ✓ Négligeable: la zone représente une faible part de l'aire de répartition et n'héberge pas de fonctions vitales,
- ✓ Faible : la zone représente une faible part de l'aire de répartition, elle peut être ponctuellement le lieu de réalisation d'une fonction vitale,
- ✓ Moyen : la zone représente une faible part de l'aire de répartition, elle est régulièrement le lieu de réalisation d'une fonction vitale mais ces fonctions peuvent être réalisées dans d'autres parties de l'aire vitale,
- ✓ Fort : la zone représente une faible part de l'aire de répartition, elle est régulièrement le lieu de réalisation d'une fonction vitale, ces fonctions ne peuvent être réalisées dans d'autres parties de l'aire vitale,
- ✓ Très fort : la zone représente une part conséquente de l'aire de répartition, elle est régulièrement le lieu de réalisation d'une fonction vitale, ces fonctions ne peuvent être réalisées dans d'autres parties de l'aire vitale.

Grille 1 : Grille d'évaluation des enjeux

Grille d'enjeux		Enjeu patrimonial			
		Nul ou Négligeable/s.o.	Faible	Moyen	Fort
statut Local	Nul ou Négligeable				
	Faible				
	Moyen				
	Fort				
	Très Fort				

Code couleur des enjeux				
Nul ou Négligeable	Faible	Moyen	Fort	Très Fort

13.2 Echelle de la quantification de la tolérance

Cinq niveaux de tolérance acoustique sont proposés et décrits dans le Tableau 19 pour le cas spécifique de l'effet 'Acoustique'.

Tableau 19 : Echelle des niveaux de tolérance pour le cas spécifique de l'effet « Acoustique »

Niveau	Code couleur	Définition
0		Tolérance très élevée <i>Au niveau individuel</i> : Pas de détection de la perturbation acoustique <i>Au niveau populationnel</i> : pas de conséquences perceptibles
1		Tolérance élevée <i>Au niveau individuel</i> : Détection de la perturbation acoustique sans altération du comportement <i>Au niveau populationnel</i> : pas de conséquences perceptibles
2		Tolérance intermédiaire <i>Au niveau individuel</i> : Masquage des signaux de communication et/ou d'écholocation, Changement comportementaux, Dérangement, Evitement <i>Au niveau populationnel</i> : pas d'altération des fonctions sociales et vitales
3		Tolérance faible <i>Au niveau individuel</i> : Perte temporaire d'audition entraînant des lésions aux tissus <i>Au niveau populationnel</i> : Altération des taux de succès des fonctions vitales (e.g. nombre de reproduction, évolution de la taille de la population, diminution de la durée de vie), Abandon temporaire d'une route habituelle ou migratoire, désertion temporaire d'une aire vitale pour une population résidente
4		Tolérance nulle <i>Au niveau individuel</i> : Perte permanente d'audition, Décès possible <i>Au niveau populationnel</i> : abandon permanent d'une route habituelle ou migratoire, désertion permanente d'une aire vitale pour une population résidente

13.3 Echelle de quantification de la sensibilité

L'évaluation des sensibilités est établie en croisant la tolérance et les enjeux en suivant la règle décrite dans la Grille 2.

Grille 2 : Grille d'évaluation des sensibilités à un effet

Grille de sensibilité		Enjeux				
		Nul ou Négligeable / s.o.	Faible	Moyen	Fort	Très Fort
Tolérance	Très élevée					
	Elevée					
	Moyenne					
	Faible					
	Nulle					

Code couleur des enjeux				
Nul ou Négligeable	Faible	Moyen	Fort	Très Fort

14 Annexe 3 : Description de la campagne de mesures acoustiques *in situ*

14.1 Contexte et objectifs de la campagne de mesures *in situ*

L'objectif de la campagne de mesures acoustiques *in situ* est d'élaborer d'une part la carte acoustique du bruit ambiant dans la zone d'étude du projet, d'étudier ses variabilités spatiales et temporelles, et d'identifier les paramètres environnementaux pilotant cette variabilité, et d'autre déterminer les caractéristiques géo-acoustiques conditionnant la propagation des ondes acoustiques dans le milieu .

Deux types de mesures ont été réalisés lors de la campagne de mesures dans la zone d'étude du projet:

- des mesures acoustiques en un point fixe permettant de caractériser le bruit ambiant: un enregistreur acoustique et son bûtit pyramidal lesté ont été déployés le long du tracé du 1er au 11 Mai 2016,
- des mesures acoustiques à la dérive permettant d'étudier la variation spatiale du bruit ambiant sur la zone d'étude : une bouée dérivante équipée d'un enregistreur acoustique a été déployée en de nombreux points de la zone d'étude et le long du tracé les 1er et 11 Mai 2016. Cette bouée sert aussi de récepteur pour la caractérisation géo-acoustique de l'environnement d'étude.

La mise à l'eau et le relevage du bûtit, ainsi que les mesures à la dérive ont eu lieu à partir de la barge "Catamaran Southboat" de CERES, et avec l'assistance d'une équipe de plongeurs professionnels.

Au préalable, afin de valider le protocole des mesures acoustiques à réaliser dans la zone d'étude, principalement pour la partie caractérisation géo-acoustique, une journée de calibration a été réalisée à la sortie du Golfe du Morbihan le 5 Avril 2016.

14.2 Phase préliminaire de calibration

L'objectif de la phase préliminaire de calibration est de tester le protocole qui sera utilisé lors des mesures acoustiques à la dérive, de valider la procédure d'inversion géo-acoustique à partir d'une source acoustique légère déployée à partir d'un bateau. Ceci inclut :

- la technique de mise à l'eau de la source,
- le choix des paramètres d'émissions sonores,
- la distance maximale entre la source et la bouée dérivante de réception.

14.2.1 Responsable de mission et participants

Responsable de mission : Delphine Mathias, SOMME

Participants :

- ✓ Bazile Kinda, SOMME : en charge du protocole d'émissions sonores,
- ✓ Yann Patry, TBM environnement : pilote du bateau.

14.2.2 Instrumentation et moyens à la mer

L'embarcation support pour réaliser les mesures à la dérive était le bateau de TBM environnement, piloté par Yann Patry. Ce zodiac était utilisé :

- pour assurer la mise à l'eau et la récupération de la bouée dérivante,
- pour émettre des signaux afin d'effectuer l'inversion géo-acoustique.

Les mesures se sont déroulées à la sortie du Golfe du Morbihan le 5 avril 2016 (Tableau 20 et Figure 33).

Tableau 20 : Conditions océano-météorologiques lors de la réalisation des mesures in-situ

Date	Coefficient de la marée	Horaires de l'étal de basse mer	Vent (min-max)	Hauteur de la houle
5 Avril 2016	76	11h26	15 - 20 nœuds Ouest	0.8 m

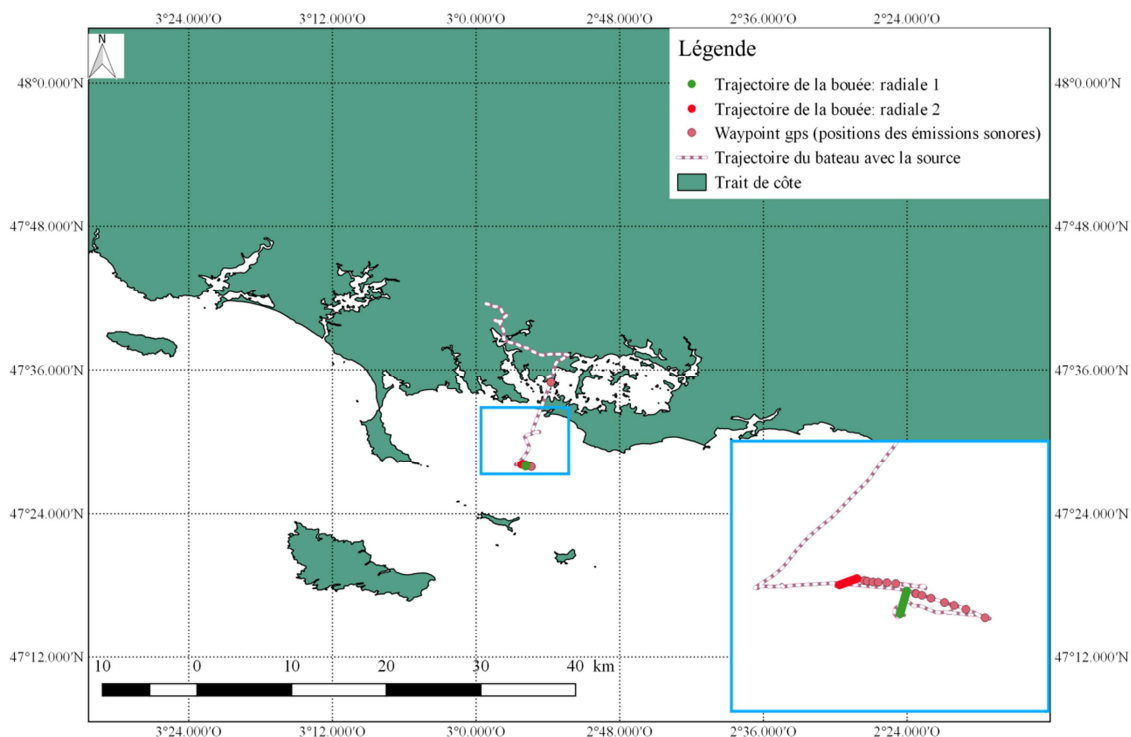


Figure 33 : Les positions des points de mesure à la dérive avec émissions sonores effectués le 5 Avril 2016 à la sortie du Golfe du Morbihan

Les signaux en réception ont été enregistrés par un système développé par SOMME constitué d'une bouée de surface avec GPS et d'un enregistreur autonome EA RTSYS à 4 voies équipé de 4 hydrophones large bande (HTI 92). Les hydrophones ont été déployés à des profondeurs différentes comprises entre 3 et 7.5 m (Tableau 21). La source sonore DNH Aqua-30 a été déployée sur le côté du bateau et un enregistreur Wildlife SM2 Bat fixé à 1 m a permis de mesurer le niveau sonore source à 1m (Tableau 21).

Tableau 21 : Caractéristiques principales de l'instrumentation utilisée

Instrumentation	Type	Commentaires
Bouée	Conception à façon, SOMME	diamètre 10 cm, longueur 150 cm, renforcée par 4 tiges métalliques fixées sur des platines inférieures et supérieures
Enregistreur acoustique	RTSYS, EA SDA 14	- Fréquence échantillonnage : 78,125 kHz - Résolution numérique : 32 bits
Hydrophones	4 HTI 92 WB	Sensibilité des hydrophones : -155 dB re 1V/1µPa Profondeur : 3m, 4m, 4.5 et 7m
Enregistreur acoustique	Wildlife, SM2 Bat	- Fréquence d'échantillonnage : 48 kHz - Résolution numérique : 16 bits
Source sonore	DNH, Aqua-30	Types de signaux : - Modulation linéaire de fréquence [0.05 – 20 kHz] de durée 1 s. - Harmonique pure de durée 300 ms centré sur les tiers d'octave entre 50 Hz et 21 kHz.
GPS	2 GPS Garmin et 1 GPS Neotek	Un GPS Garmin dans un caisson étanche fixé sur le haut de la bouée et GPS Neotek et GPS Garmin sur le navire

14.2.3 Protocoles et synthèse des mesures

Nous avons réalisé 2 radiales de mesure à la dérive avec émissions sonores (Figure 33) :

- le bateau largue la bouée dérivante, la position de début de dérive est notée, puis le bateau coupe son moteur,
- la source acoustique DNH Aqua-30 est déployée sur le côté du bateau et émet en continu des signaux de type « modulations linéaire de fréquences » ou « sinus purs » à des fréquences comprises entre 50 Hz et 21 kHz, afin de caractériser les conditions de la propagation acoustique,
- la bouée est récupérée 20 minutes plus tard (lorsque la distance entre le bateau et la bouée est supérieure à 500 m), le point de récupération en fin de dérive est noté puis le bateau fait route vers le point suivant.

La synthèse des données récoltées est listée ci-dessous.

Données acoustiques :

- L'enregistreur RTSYS a enregistré en continu sur les 4 voies, avec une fréquence d'échantillonnage de 78,125 kHz. Seules les données correspondant aux périodes de déploiement de la bouée dérivante sont analysées, ce qui représente 57 minutes de données utiles sur chacune des 4 voies.

Données de navigation :

- Trace GPS du bateau et waypoints pris depuis le zodiac,
- Trace GPS de la bouée dérivante grâce au GPS installés sur la bouée.

Données annexes :

- ✓ Notes sur le déroulement détaillé de la journée
- ✓ Profondeur : informations provenant du sondeur du bateau.

14.3 Campagne de mesures *in situ* dans la zone d'étude du projet

14.3.1 Responsable de mission et participants

Responsable de mission : Delphine Mathias, SOMME

Participants :

- Bazile Kinda, SOMME : en charge du protocole d'émissions sonores,
- Emmanuel Jan, CERES : capitaine du navire de CERES,
- Guillaume Launey et Bruno Jaubert, CERES : plongeurs professionnels.

14.3.2 Instrumentation et moyens à la mer

14.3.2.1 Mesures au point fixe

Pour minimiser les bruits de vibrations multiples qui peuvent apparaître lors des mesures acoustiques dans des zones de fort courant, nous avons choisi de privilégier un mouillage mis à l'eau par des plongeurs et ne comprenant pas de parties mobiles (flottaison, ligne de mouillage).

Une étude de la bathymétrie et de la nature du fond de la zone a permis d'identifier une position adéquate pour la pose des enregistreurs, la position de ce point étant un compromis entre :

- La proximité du tracé,
- Une profondeur raisonnable (inférieure à 20 m) pour permettre des plongées.

L'embarcation support pour effectuer la mise à l'eau du bâti pyramidal lesté de 400kg, la mise à l'eau de l'enregistreur par les plongeurs et leur récupération était la barge "Catamaran Southboat" de CERES (Figure 34). L'enregistreur acoustique WILDLIFE ACOUSTICS SM3M est équipé d'un hydrophone HTI 92 de sensibilité hydrophonique -163.7 dB re.1V/1μPa, et est programmé pour enregistrer en continu à une fréquence d'échantillonnage de 96 kHz sur 16 bits.

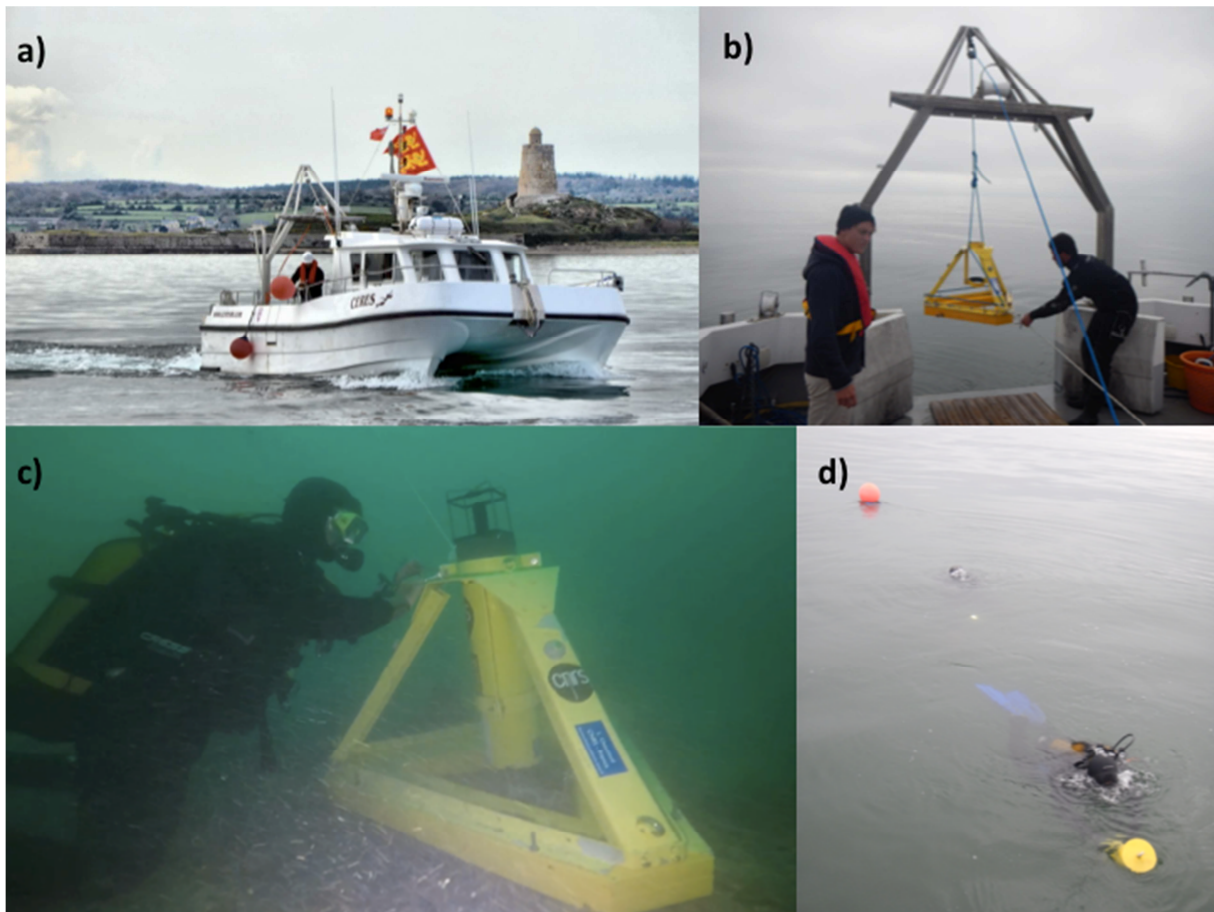


Figure 34 : Instrumentations et supports utilisés pour effectuer les mesures en un point fixe : a) la barge « Catamaran Southboat », navire de CERES ; b) le bâti pyramidal lesté de 400 kg ; c) et d) l'installation du bâti et de l'enregistreur acoustique par les plongeurs.

14.3.2.2 Mesures à la dérive

L'embarcation support pour réaliser les mesures à la dérive était la barge "Catamaran Southboat" de CERES (Figure 34). Ce navire était utilisé :

- pour assurer la mise à l'eau et la récupération de la bouée dérivante,
- pour déployer la source acoustique à l'arrière du navire,
- comme source d'opportunité pour mesurer les conditions de la propagation acoustique.

Les signaux en réception ont été enregistrés par un système SOMME constitué d'une bouée de surface avec GPS, d'un enregistreur autonome EA RTSYS à 3 voies (Figure 35). Les hydrophones large bande (HTI 92) ont été déployés à des profondeurs différentes (Tableau 22). Dans le cadre de la cartographie de bruit ambiant, l'utilisation d'une bouée dérivante présente deux intérêts :

- Intérêt opérationnel : rapidité de la mise en œuvre,
- Intérêt météorologique : le fait que la bouée dérive avec le courant minimise les bruits d'écoulement, son petit diamètre associé à sa grande longueur et sa pesée minimisent les bruits parasites du clapot et les vibrations générées par les vagues et la houle.

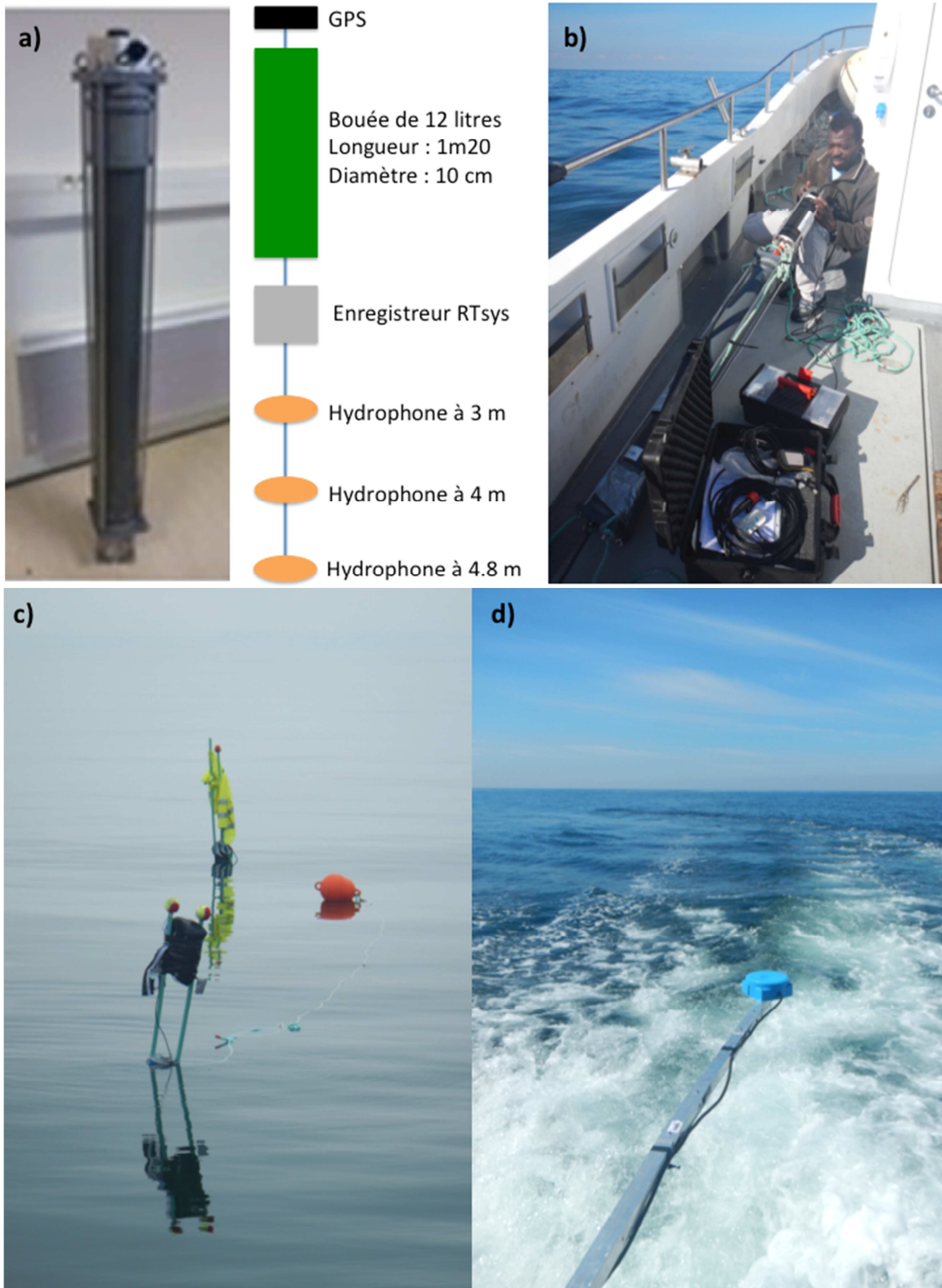


Figure 35 : Instrumentations utilisées pour effectuer les mesures à la dérive : a) et b) la bouée dérivante, l'enregistreur acoustique, l'antenne d'hydrophones et les GPS ; c) le déploiement de la source sonore à l'arrière du bateau les 1^{er} et 11 Mai 2016 .

Tableau 22 : Caractéristiques des équipements utilisés

Instrumentation	Type	Commentaires
Bouée	Conception à façon, SOMME	diamètre 10 cm, longueur 150 cm, renforcée par 4 tiges métalliques fixées sur des platines inférieures et supérieures
Enregistreur acoustique	RTSYS, EA SDA 14	Fréquence échantillonnage : 78,125 kHz Enregistrement sur 32 bits
Hydrophones	3 HTI 92 WB	Sensibilité des hydrophones : -155 dB re 1V/1 μ Pa Profondeur : 3m, 4m, 4.8m
Source sonore	DNH, Aqua-30	Types de signaux : sinus purs, FM sweeps, impulsions – fréquences comprises entre 50 Hz et 20 kHz
GPS	Garmin Montana 600 et GPS Neotek	GPS dans un caisson étanche fixé sur le haut de la bouée

14.3.3 Protocoles et synthèse des mesures

14.3.3.1 Mesures au point fixe

Mise à l'eau le 1^{er} Mai 2016

La sortie du 1^{er} Mai 2016 avait pour objectif i) de déployer le bâti pyramidal lesté (400 kg), ii) d'effectuer une plongée pour vérifier le bon emplacement du bâti, et iii) de déployer un enregistreur acoustique WILDLIFE ACOUSTICS SM3M sur le bâti (l'enregistreur est fixé verticalement sur le bâti et l'hydrophone fixé de manière rigide à l'enregistreur (Figure 35).

Cette sortie a été effectuée par des conditions de 5 à 7 nœuds de vent de Nord et avec une houle de 0.4 m (Tableau 23). Un premier passage sur la zone a été réalisé afin d'aider le pilote à la manœuvre de dépose. Le bâti, préalablement assemblé à quai, a été muni d'une bouée permettant son repérage en surface. Il a ensuite été hissé au moyen d'un treuil et déposé sur le site après vérification de la position géographique (50.10368 °N, 1.19516 °W, Figure 36) préalablement choisi. Afin d'éviter tout dommage, l'enregistreur n'a pas été monté sur le bâti avant sa pose. Les plongeurs se sont ensuite mis à l'eau avec l'enregistreur et l'ont fixé sur le bâti.

Tableau 23 : Conditions océano-météorologiques lors du déploiement de l'enregistreur acoustique et de son bâti lesté

Date	Coefficient de la marée	Horaires de l'étal de basse mer	Vent (min-max)	Hauteur de la houle
1 ^{er} Mai 2016	43	6h44	5 - 7 nœuds Nord	0.4 m
11 Mai 2016	88	10h38	1 - 3 nœuds Nord	0.2 m

Relevage le 11 Mai 2016:

Le 11 Mai 2016, l'enregistreur a été enlevé du bâti par les plongeurs sur la position (50.10368 °N, 1.19516 °W). Puis le bâti a ensuite été relevé avec le treuil de la barge CERES.

Synthèse des mesures effectuées :

- ✓ L'enregistreur WILDLIFE ACOUSTICS SM3M a enregistré en continu du 1^{er} Mai 2016 au 11 Mai 2016, avec une fréquence d'échantillonnage de 96 kHz sur 16 bits.
- ✓ En parallèle, une vidéo des plongées de mise à l'eau et relevage de l'enregistreur a été réalisée par CERES.

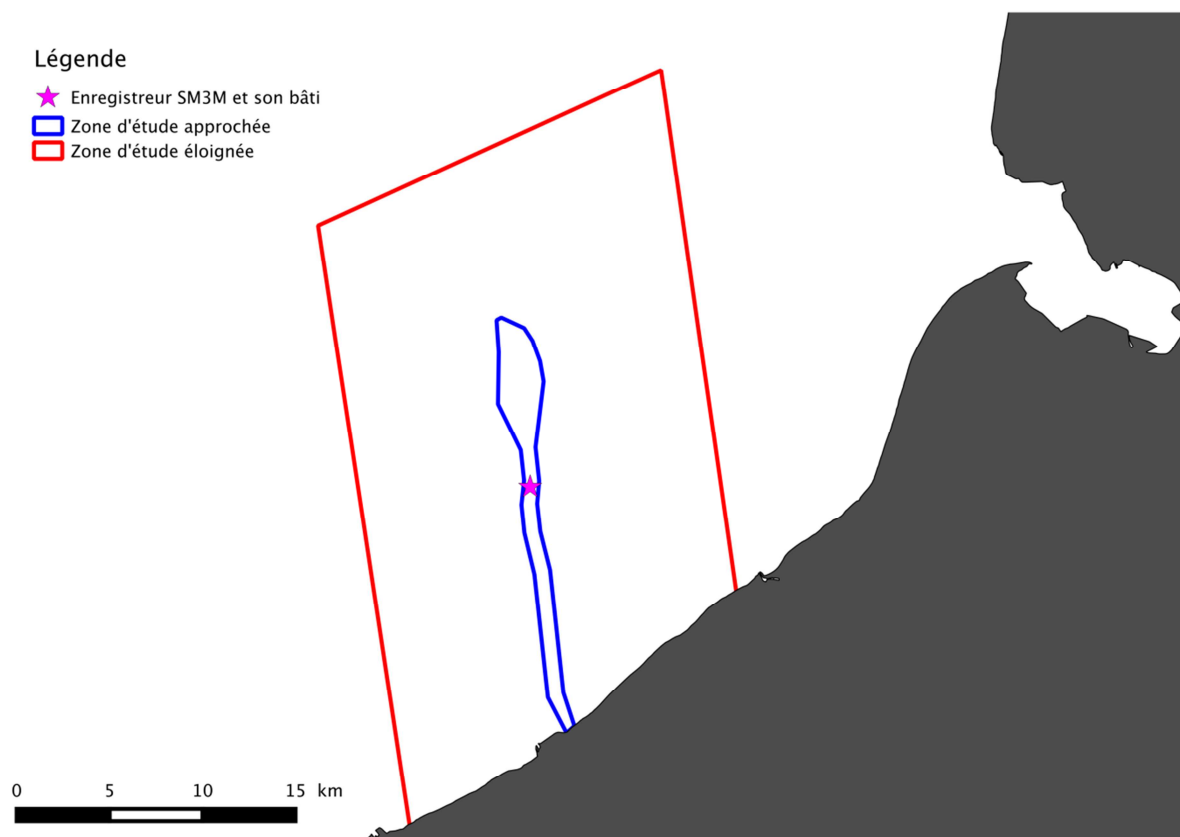


Figure 36 : Position du bâti et de son enregistreur au point fixe du 1^{er} au 11 Mai 2016

14.3.3.2 Mesures à la dérive

Nous avons réalisé 8 points de mesure à la dérive dans la zone d'étude et le long du tracé (Figure 37) avec de très bonnes conditions météo et océanographiques (Tableau 23). Le temps de mesures était de 40 à 60 minutes par point de mesure:

- le bateau largue la bouée dérivante, la position de début de dérive ainsi que la profondeur sont notées, puis le bateau coupe son moteur,
- la bouée dérive 10 minutes, phase pendant laquelle on mesure le bruit ambiant

- des émissions sonores (sinus purs, des FM sweeps et impulsions, fréquences entre 50Hz et 21 kHz) à des distances bouée-navire variant entre 12 m et 1368 m sont effectuées avec une source acoustique DNH Aqua-3 afin de caractériser les conditions de la propagation acoustique (Figure 37),
- une trajectoire en forme d'hippodrome est effectuée autour de la bouée,
- la bouée est récupérée, le point de récupération en fin de dérive est noté, puis le bateau fait route vers le point suivant.

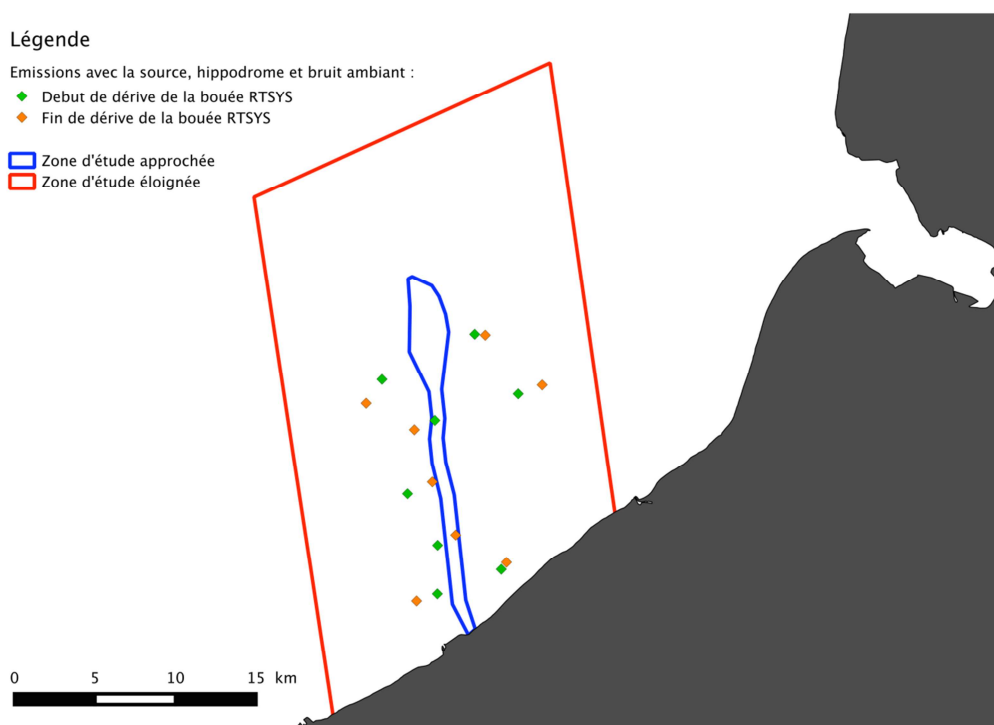


Figure 37 : Les positions des points de mesure à la dérive avec enregistrement du bruit ambiant, émissions sonores et hippodrome effectués le 1^{er} et le 11 Mai 2016

Synthèse des mesures effectuées :

- L'enregistreur RTSYS a enregistré en continu le 1^{er} et le 11 Mai 2016, sur les 3 voies, avec une fréquence d'échantillonnage de 78.125 kHz. Seules les données correspondant aux périodes de déploiement de la bouée dérivante sont analysées, ce qui représente 267 minutes de données utiles sur chacune des 3 voies.
- Les données de navigation ont été collectées (trace GPS du navire et waypoints pris depuis le navire ; trace GPS de la bouée dérivante grâce aux deux GPS installés sur la bouée).
- La hauteur de la colonne d'eau des différents points de mesures a été mesurée lors du déploiement de la bouée dérivante (informations fournies CERES, sonar du navire).

15 Annexe 4 : Etat initial « Paysage acoustique – Bruit ambiant » : Analyse du paysage acoustique à partir des mesures in-situ réalisées sur la zone d'étude du 20 au 28 Août 2015

15.1 Objectifs

Le présent document vise à établir l'état initial bruit ambiant de la zone d'étude. Il s'organise en deux parties :

- Une première partie exposant la méthodologie utilisée pour décrire le paysage acoustique de la zone d'étude à partir de données acoustiques issues d'une campagne de mesures *in situ*.
- Une deuxième partie présentant les résultats de l'analyse des données avec :
 - La distribution statistique des spectres acoustiques comparée au modèle de Wenz (modèle empirique de bruit dans les océans en fonction du trafic maritime et du vent).
 - L'estimation des niveaux sonores en tiers d'octave et large bande, et des niveaux perçus par les différentes classes de mammifères marins
 - L'étude de la variabilité temporelle et des sources sonores pilotant les rythmes identifiés
 - L'étude de la variabilité spatiale des niveaux sonores

Le dictionnaire acoustique de la zone d'étude et son budget acoustique sont établis à partir de la description et de la quantification des contributions de l'anthropophonie (bateaux), de la géophonie (pluie, transport sédimentaire) et de la biophonie (benthos).

15.2 Méthodologie suivie pour l'analyse des données *in situ*

15.2.1 Chaîne de traitement

Deux bases de données issues de la campagne de mesures *in situ* (cf. Annexe 3) sont exploitées pour décrire le paysage acoustique de la zone d'étude :

- des mesures acoustiques au point fixe : un enregistreur acoustique Wildlife SM3M et son baffle pyramidal lesté ont été déployés le long du tracé du 1^{er} au 11 Mai 2016,
- des mesures acoustiques à la dérive : une bouée dérivante équipée d'un enregistreur acoustique EA-RTSYS ont été déployés en de nombreux points de la zone d'étude et le long du tracé les 1^{er} et 11 Mai 2016.

Les données issues des mesures acoustiques au point fixe permettent i) de décrire les niveaux sonores de la zone d'étude et leur variabilité temporelle, ii) d'identifier les sources sonores présentes dans l'environnement, et iii) d'évaluer leur contribution au budget acoustique :

Les données issues de la cartographie à la dérive permettent d'étudier la variabilité spatiale des niveaux sonores.

Une chaîne de traitement commune est appliquée aux deux bases de données. Ainsi, chaque base de données (fichiers .wav) est divisée en segments de 10 sec traités individuellement tels que :

- les données brutes sont converties en données acoustiques (μPa) en corrigeant par le gain d'acquisition et la sensibilité de l'hydrophone,
- Une collection de spectres est calculée en appliquant une transformée de Fourier à fenêtre glissante (LFFT=4096, overlap=0.75, Hanning window), chaque spectre est exprimé en dB re.1 $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$,
- Le calcul de la moyenne des spectres permet d'obtenir le spectre moyen ($\gamma_r(f, r_m)$) pour le segment considéré, exprimé en dB re.1 $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$.
- L'ensemble des spectres sont mis en mémoire pour une relecture et les analyses *a posteriori*.

15.2.2 Calcul des niveaux sonores

Le calcul des niveaux sonores est effectué à partir des mesures acoustiques au point fixe (10 jours d'enregistrement en continu du 1^{er} au 11 Mai 2016).

A partir des spectres moyens ($\gamma_r(f, r_m)$), les centiles des niveaux large bande en tiers d'octave allant de 200 Hz à 30 kHz et les centiles des niveaux large bande dans 5 bandes de fréquence (B0: [20 Hz-30 kHz], B1: [10 Hz-200 Hz], B2: [200 Hz-1 kHz], B3: [1kHz-2kHz], B4: [2kHz-6kHz]; B5: [6kHz-30kHz]) sont calculés.

Après avoir évalué les centiles des niveaux sonores, ceux-ci sont comparés avec le modèle empirique de spectre acoustique de Wenz (Wenz, 1962). Cette analyse permet également d'identifier les différentes sources sonores du paysage acoustique (e.g. bateaux, pluie, impulsions benthiques, , bruit de mesure, transport sédimentaire).

Les niveaux perçus par les cinq groupes d'espèces de mammifères marins (cétacés spécialistes des basses fréquences, des moyennes fréquences, des hautes fréquences, pinnipèdes dans l'eau; pinnipèdes dans l'air) sont estimés après pondération par les fonctions de transfert de l'appareil auditif des mammifères ("M-Weighting").

15.2.3 Variabilité temporelle

La base de données des mesures acoustiques au point fixe est utilisée pour étudier la variabilité temporelle.

A partir des résultats de la segmentation de la base de données, pour chaque instant t de la mesure, les séries temporelles des niveaux large bande sont construites. La présence de rythmes (journalier, cycle de marée) est évaluée via une simple analyse temporelle et une analyse de Fourier.

15.2.4 Variabilité spatiale

La variabilité spatiale est étudiée à partir des mesures de cartographie à la dérive réalisées les 1^{er} et 11 Mai 2016.

Des périodes de bruit ambiant (sans présence de bruit de bateau) de 8 min consécutives sont identifiées pour lesquelles le spectre moyen et le niveau large bande (B0 [20 Hz-30 kHz]) sont calculés. La forme des spectres et les niveaux large bande sont ensuite confrontés à la biocénose et à la hauteur d'eau de la position correspondante afin de d'identifier les facteurs influençant la variabilité spatiale.

15.2.5 Budget acoustique

Le budget acoustique est établi à partir des mesures acoustiques au point fixe (10 jours d'enregistrement en continu du 1^{er} au 11 Mai 2016).

La base de données est segmentée en une collection de spectrogrammes de 15 min (visualisation temps/fréquence des données par périodes successives de 15 minutes). L'exploration des spectrogrammes permet d'identifier les différentes classes de signaux (anthropophonie, biophonie, géophonie) et de renseigner la proportion d'apparition de chaque classe dans la base de données complète.

Les centiles du spectre acoustique de chaque classe sont calculés et l'espace entre le 25^{ème} et le 75^{ème} centile (espace interquartile) est replacé dans la distribution globale des niveaux sonores.

15.3 Résultats

15.3.1 Description du paysage acoustique : niveaux sonore

Les résultats présentés dans cette section sont issus des mesures acoustiques au point fixe (10 jours d'enregistrements en continu du 1^{er} au 11 Mai 2016).

15.3.1.1 Spectres acoustiques

Pour évaluer l'importance du niveau de bruit ambiant de la zone d'étude, la distribution statistique (médiane et écart-type) du spectre acoustique (tel que mesuré pendant 10 jours en continu dans la zone d'étude) (Figure 38) est comparée avec le spectre de Wenz.

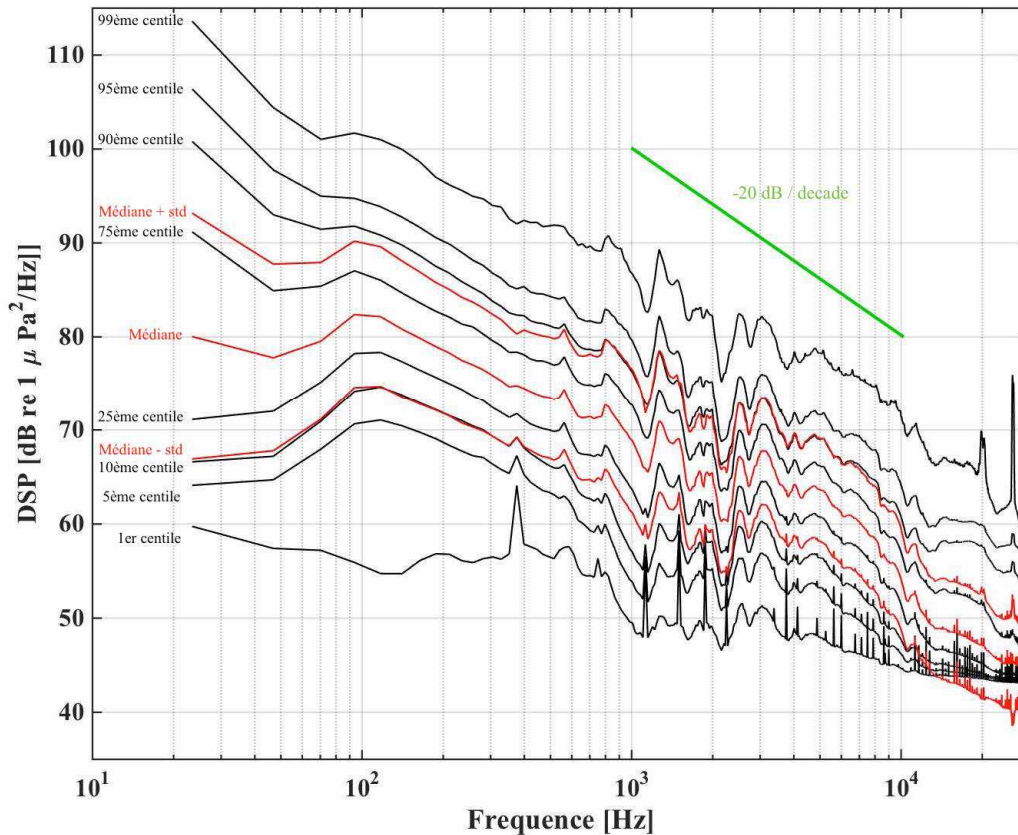


Figure 38 : Spectre acoustique sur le mouillage Wildlife SM3M, du 1^{er} au 11 Mai 2016. En noir: centiles du spectre acoustique. En Rouge: médiane et intervalle à ± 1 écart-type. En vert: droite décroissante de pente -20dB par décade.

- ✓ Les niveaux spectraux observés sur la zone d'étude sont compatibles avec le modèle de Wenz (Wenz, 1962), avec un écart significatif en haute fréquence : Aux basses fréquences (< 200 Hz) (zone 1 de la Figure 39), le spectre acoustique de la zone d'étude correspond au modèle de Wenz pour des indices de trafic élevé.
- ✓ Entre 200 Hz et 2 kHz (zone 2 de la Figure 39), la médiane du spectre de la zone d'étude correspond au modèle de Wenz pour une vitesse de vent de 14 nœuds alors que la médiane de la vitesse de vent observée pendant les 8 jours de mesures était de 9 nœuds. Cet écart positif peut provenir du trafic maritime important sur la zone d'étude. Les navires passant au loin génèrent un bruit de fond de 20 Hz à 5 kHz.
- ✓ Entre 2 kHz et 10 kHz (zone 3 de la Figure 39), le spectre est au-dessus du modèle de Wenz pour des vitesses de vent supérieures à 14 nœuds. Cet écart positif peut provenir du trafic maritime important sur la zone d'étude. Les navires passant à proximité de l'hydrophone génèrent du bruit sur toute la bande de fréquence.
- ✓ Des impulsions sonores sont générées par le mouvement des animaux benthiques et dans la gamme de fréquences entre 10 kHz et 30 kHz (Coquereau et al., 2016, Mathias et al. 2016) (zone 4 de la Figure 39). Ces impulsions sonores sont masquées lorsqu'un navire passe à proximité de l'enregistreur. L'incrément généré par ces impulsions benthiques par rapport au niveau de Wenz à 20 kHz et

pour la vitesse de vent médiane de 9 nœuds est 11 dB re.1 μ Pa² (Tableau 27). Cet incrément est faible comparé à celui observé dans des zones de forts peuplements benthiques (RTE, 2015).

- ✓ Aux fréquences supérieures à 2 kHz, le spectre observé suit une pente décroissante de -20 dB par décade, semblable à celle du modèle de Wenz.

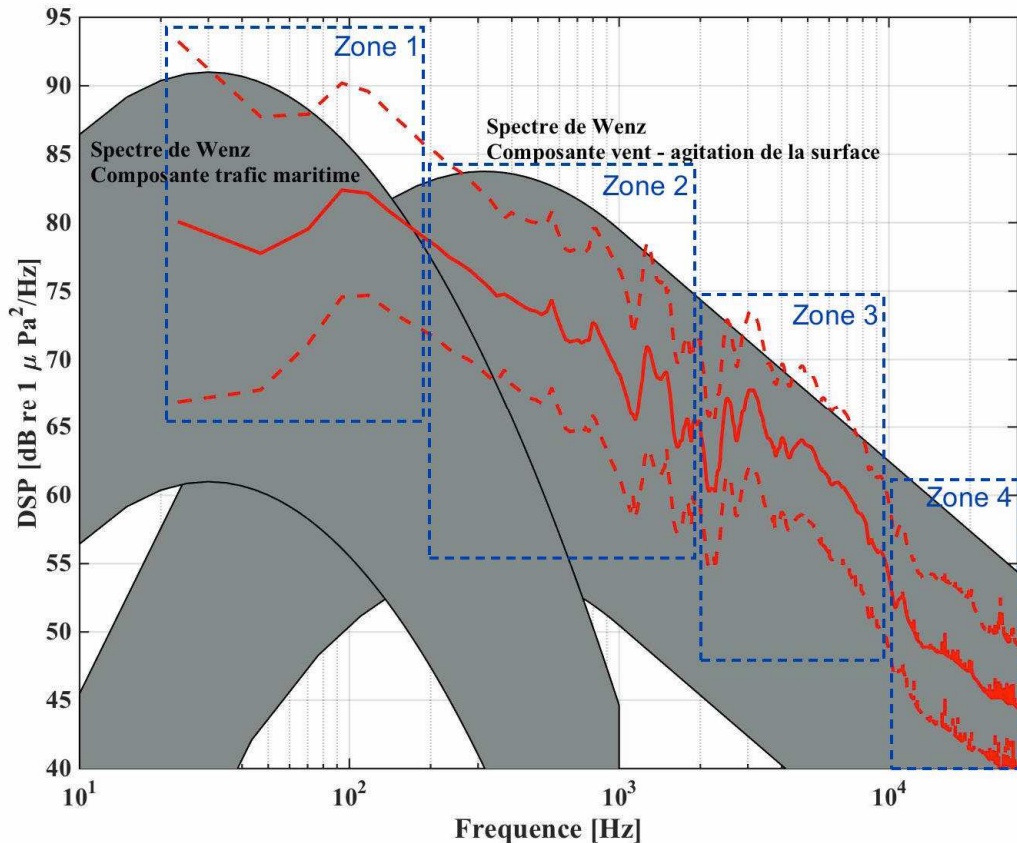


Figure 39 : Comparaison du spectre sonore du site d'étude avec le spectre de Wenz. En gris : composantes (trafic maritime, agitation de la surface par le vent) du spectre de Wenz, pour un indice de trafic variant entre 1 (faible) et 7 (fort) et une vitesse du vent variant entre 1m/s et 30m/s (2 nœuds à 60 nœuds), en rouge : médiane (+/- écart-type) de la distribution du spectre de la zone d'étude (8 jours d'enregistrement acoustique en continu). La zone 1 (fréquences inférieures à 200 Hz), la zone 2 (fréquences comprises entre 200 Hz et 2kHz), la zone 3 (fréquences comprises entre 2 kHz et 10 kHz), et la zone 4 la zone 3 (fréquences comprises entre 10 kHz et 30 kHz) correspondent à différents régimes du spectre sonore et sont discutés au dessus de la figure.

15.3.1.2 Niveaux en tiers d'octave

Le Tableau 24 présente les centiles des niveaux en tiers d'octave pour des tiers d'octave allant de 60 Hz à 25 kHz.

Tableau 24 : Niveaux en tiers d'octave mesurés 1^{er} au 11 Mai 2016 sur l'enregistreur au point fixe.

Fréquence centrale (Hz)	Niveau moyen (dB re 1uPa ³)	Ecart- type (dB)	Distribution des centiles (dB re 1uPa ³)								
			1 ^{er}	5 ^{ème}	10 ^{ème}	25 ^{ème}	médiane	75 ^{ème}	90 ^{ème}	95 ^{ème}	99 ^{ème}
60	98,51	8,21	74,34	86,56	89,71	93,73	97,73	103,35	109,22	113,16	119,12
75	100,68	7,89	75,91	89,35	92,49	96,22	100,02	105,24	110,80	114,46	120,56
90	100,47	7,54	74,38	89,45	92,80	96,39	100,15	104,71	109,77	112,90	119,34
120	100,23	7,37	73,74	89,38	92,68	96,38	100,15	104,18	109,00	112,02	119,09
151	100,26	7,08	75,87	89,86	93,08	96,60	100,09	103,91	108,82	111,82	118,69
190	100,01	6,90	77,08	89,92	93,01	96,45	99,74	103,52	108,44	111,44	118,12
240	98,57	6,67	77,26	88,58	91,77	95,04	98,26	102,11	106,62	109,65	116,25
380	98,55	6,31	80,83	89,02	91,89	94,91	98,16	101,97	106,26	109,24	116,25
480	98,52	6,24	81,86	88,99	91,81	94,85	98,20	101,86	105,99	109,09	116,16
604	97,95	6,17	82,40	88,20	90,85	94,40	97,73	101,24	105,22	108,38	115,50
761	97,62	6,41	81,31	87,00	89,88	94,08	97,61	101,11	104,95	108,02	115,60
960	97,28	6,69	80,77	85,46	88,70	93,52	97,64	101,05	104,71	107,90	115,85
1209	96,21	6,97	79,10	83,57	86,75	92,32	96,88	100,18	103,85	107,13	114,62
1523	96,24	6,95	79,00	83,18	86,79	92,52	97,01	100,09	103,70	107,11	114,17
1920	96,18	6,42	79,55	84,61	87,65	92,90	96,75	99,46	103,06	106,52	113,63
2419	94,09	5,77	79,24	84,25	87,08	91,03	94,13	97,08	100,38	103,54	110,78
3047	95,96	5,48	80,81	85,98	89,40	93,26	96,23	98,79	101,69	104,58	111,19
3840	97,36	5,45	82,02	87,16	90,45	94,74	97,77	100,29	102,94	105,67	111,92
4838	97,09	5,34	81,76	87,10	90,27	94,56	97,51	99,94	102,47	105,11	111,35
6095	96,48	5,31	81,59	86,77	89,79	93,98	96,82	99,20	101,92	104,61	111,07
7680	95,91	5,41	81,66	86,00	89,10	93,31	96,14	98,64	101,61	104,57	110,95
9676	94,35	5,45	81,45	84,53	87,24	91,69	94,38	96,98	100,30	103,44	110,16
12191	92,04	5,31	81,56	83,38	85,17	89,14	91,83	94,43	98,06	101,41	108,63
15360	89,67	5,16	81,81	82,74	83,86	86,32	88,71	92,37	96,03	99,09	106,26
19352	88,79	5,29	82,55	82,96	83,59	85,05	87,15	91,28	96,55	98,73	105,39
24382	88,70	5,37	83,30	83,51	83,87	84,94	86,71	90,89	97,02	99,18	107,33

Le Tableau 25 présente les centiles des niveaux en tiers d'octave du spectre de Wenz pour des vitesses de vent correspondant au 1^{er} (2 nœuds), 10^{ème} (4 nœuds), 25^{ème} (7 nœuds), 50^{ème} (9 nœuds), 75^{ème} (11 nœuds), 90^{ème} (13 nœuds) et 99^{ème} (15 nœuds) centile de la distribution de vent observée sur le site d'étude (Tableau 26).

Tableau 25 : Distribution de la vitesse du vent mesurée à la pointe de la Hague entre le 1^{er} et le 11 Mai 2016-06-17

Vitesse moyenne (nœuds)	Ecart- type (nœuds)	Distribution de la vitesse du vent entre le 1er et le 11 Mai 2016 (nœuds)						
		1 ^{er}	10 ^{ème}	25 ^{ème}	médiane	75 ^{ème}	90 ^{ème}	99 ^{ème}
8,9	3,0	2,0	4,0	7,0	9,0	11,0	13,0	15,0

Tableau 26 : Niveaux en tiers d'octave de Wenz pour différentes vitesses de vent

Fréquence centrale (Hz)	Niveau du modèle de Wenz (dB re 1 μ Pa ²) pour différentes vitesses de vent						
	2 nœuds	4 nœuds	7 nœuds	9 nœuds	11 nœuds	13 nœuds	15 nœuds
60	61,44	64,13	67,09	68,71	70,16	71,48	72,71
75	66,78	69,46	72,42	74,04	75,49	76,82	78,04
95	70,02	72,70	75,66	77,28	78,73	80,06	81,28
120	71,88	74,57	77,53	79,15	80,60	81,92	83,15
151	73,08	75,76	78,72	80,34	81,79	83,12	84,34
190	73,82	76,51	79,46	81,09	82,54	83,86	85,09
240	75,62	78,30	81,26	82,89	84,34	85,66	86,89
380	77,58	80,27	83,22	84,85	86,30	87,62	88,85
480	78,16	80,85	83,81	85,43	86,88	88,21	89,43
604	77,75	80,44	83,40	85,02	86,47	87,79	89,02
761	78,03	80,71	83,67	85,29	86,74	88,07	89,29
960	78,25	80,93	83,89	85,51	86,97	88,29	89,52
1209	77,49	80,18	83,14	84,76	86,21	87,54	88,76
1523	76,87	79,56	82,52	84,14	85,59	86,92	88,14
1920	76,27	78,95	81,91	83,54	84,99	86,31	87,54
2419	75,35	78,04	81,00	82,62	84,07	85,40	86,62
3047	74,60	77,29	80,25	81,87	83,32	84,64	85,87
3840	73,81	76,50	79,46	81,08	82,53	83,86	85,08
4838	73,09	75,77	78,73	80,35	81,81	83,13	84,35
6095	72,46	75,15	78,11	79,73	81,18	82,51	83,73
7680	71,75	74,43	77,39	79,02	80,47	81,79	83,02
9676	70,99	73,67	76,63	78,25	79,70	81,03	82,25
12191	70,27	72,95	75,91	77,53	78,98	80,31	81,53
15360	69,59	72,28	75,24	76,86	78,31	79,63	80,86
19352	68,87	71,55	74,51	76,13	77,58	78,91	80,13
24382	68,16	70,85	73,80	75,43	76,88	78,20	79,43

Le Tableau 27 présente l'écart entre les centiles des niveaux en tiers d'octave mesurés sur la zone d'étude et le niveau de Wenz pour une vitesse de vent égale à 9 nœuds (médiane de la vitesse de vent observée). Les cellules en bleu indiquent les tiers d'octave et les centiles pour lesquels le niveau sonore mesuré est inférieur au niveau de Wenz. Les cellules en vert indiquent les tiers d'octave pour lesquels le niveau sonore mesuré supérieur de moins de 15 dB re.1 μ Pa² au niveau de Wenz. Les cellules en rouge indiquent les tiers d'octave pour lesquels le niveau sonore mesuré est supérieur de plus de 15 dB re.1 μ Pa² au niveau de Wenz. Les cellules vertes et rouges montrent la présence de sources sonores non prises en compte dans le modèle de Wenz : le bruit de vibration du mouillage, le transport sédimentaire, le passage de navires à proximité de l'hydrophone et la production sonore benthique.

Tableau 27 : Ecart entre Niveau mesuré en tiers d'octave et Niveau de Wenz pour une vitesse de vent égale à 9 nœuds (valeur médiane des vitesses de vent mesurées)

Fréquence centrale (Hz)	Ecart entre les centiles des mesures in situ et le niveau de Wenz pour une vitesse de vent de 9 nœuds (dB re 1µPa ²)								
	1 ^{er}	5 ^{ème}	10 ^{ème}	25 ^{ème}	médiane	75 ^{ème}	90 ^{ème}	95 ^{ème}	99 ^{ème}
60	5,63	17,8	21,0	25,0	29,0	34,6	40,5	44,5	50,4
75	1,9	15,3	18,4	22,2	26,0	31,2	36,8	40,4	46,5
90	-2,9	12,2	15,5	19,1	22,9	27,4	32,5	35,6	42,1
120	-5,4	10,2	13,5	17,2	21,0	25,0	29,9	32,9	39,9
151	-4,5	9,5	12,7	16,3	19,7	23,6	28,5	31,5	38,3
190	-4,0	8,8	11,9	15,4	18,7	22,4	27,4	30,3	37,0
240	-5,6	5,7	8,9	12,1	15,4	19,2	23,7	26,8	33,4
380	-4,0	4,2	7,0	10,1	13,3	17,1	21,4	24,4	31,4
480	-3,6	3,6	6,4	9,4	12,8	16,4	20,6	23,7	30,7
604	-2,6	3,2	5,8	9,4	12,7	16,2	20,2	23,4	30,5
761	-4,0	1,7	4,6	8,8	12,3	15,8	19,7	22,7	30,3
960	-4,7	-0,1	3,2	8,0	12,1	15,5	19,2	22,4	30,3
1209	-5,7	-1,2	2,0	7,6	12,1	15,4	19,1	22,4	29,9
1523	-5,1	-1,0	2,6	8,4	12,9	15,9	19,6	23,0	30,0
1920	-4,0	1,1	4,1	9,4	13,2	15,9	19,5	23,0	30,1
2419	-3,4	1,6	4,5	8,4	11,5	14,5	17,8	20,9	28,2
3047	-1,1	4,1	7,5	11,4	14,4	16,9	19,8	22,7	29,3
3840	0,9	6,1	9,4	13,7	16,7	19,2	21,9	24,6	30,8
4838	1,4	6,7	9,9	14,2	17,2	19,6	22,1	24,8	31,0
6095	1,9	7,0	10,1	14,3	17,1	19,5	22,2	24,9	31,3
7680	2,6	7,0	10,1	14,3	17,1	19,6	22,6	25,6	31,9
9676	3,2	6,3	9,0	13,4	16,1	18,7	22,0	25,2	31,9
12191	4,0	5,8	7,6	11,6	14,3	16,9	20,5	23,9	31,1
15360	5,0	5,9	7,0	9,5	11,8	15,5	19,2	22,2	29,4
19352	6,4	6,8	7,5	8,9	11,0	15,1	20,4	22,6	29,3
24382	7,9	8,1	8,4	9,5	11,3	15,5	21,6	23,8	31,9

15.3.1.3 Niveaux perçus par la faune marine : SEL avec les fonctions "M-Weighting" pour les différents types de MM

Les centiles des niveaux sonores perçus par cinq groupes d'espèces (cétacés spécialistes des basses fréquences (BF), des moyennes fréquences (MF), des hautes fréquences (HF), pinnipèdes dans l'eau; pinnipèdes dans l'air) sont calculés pour trois durées d'exposition (Tableau 28). Ces niveaux peuvent ensuite être comparés aux seuils de perte temporaire d'audition (PTS) et de perte définitive d'audition (TTS) (Tableau 29). Pour un cétacé dont l'appareil auditif est adapté aux hautes fréquences (e.g. marsouin commun) le 99^{ème} percentile du niveau sonore perçu (niveau SEL) est de 171 dB re.1µPa².s si l'on considère une durée d'exposition de 24h et de 158 dB re.1µPa².s si l'on considère une durée d'exposition de 1h. A titre de comparaison, les seuils SEL de perte temporaire d'audition et de perte définitive d'audition sont de 215 dB re.1µPa².s et 195 dB re.1µPa².s.

Tableau 28 : Centiles des niveaux perçus par cinq groupes d'espèces et pour trois durées d'expositions (1h, 12h, 24h). Les niveaux perçus sont obtenus après pondération des niveaux mesurés par les fonctions de transfert de l'appareil auditif des mammifères ("M-Weighting")

Groupe d'espèces	Durée d'exposition (heure)	Distribution des centiles du SEL (dB re 1 μ Pa ² .s)								
		1 ^{er}	5 ^{ème}	10 ^{ème}	25 ^{ème}	médiane	75 ^{ème}	90 ^{ème}	95 ^{ème}	99 ^{ème}
Cétacés BF	1	126,08	132,43	135,47	139,42	143,13	147,55	153,47	157,80	164,87
	12	136,88	143,23	146,26	150,21	153,92	158,34	164,26	168,59	175,66
	24	139,89	146,24	149,27	153,22	156,93	161,35	167,27	171,60	178,67
Cétacés MF	1	127,87	133,01	135,83	139,66	143,31	147,68	153,57	157,87	164,94
	12	138,66	143,80	146,62	150,45	154,10	158,47	164,37	168,67	175,73
	24	141,67	146,81	149,63	153,46	157,11	161,48	167,38	171,68	178,74
Cétacés HF	1	127,37	130,97	133,55	137,46	140,85	144,07	147,82	150,83	157,87
	12	138,16	141,76	144,34	148,25	151,64	154,86	158,62	161,62	168,67
	24	141,17	144,77	147,35	151,26	154,65	157,87	161,63	164,64	171,68
Pinnipèdes dans l'eau	1	127,01	130,82	133,47	137,43	140,83	144,06	147,80	150,80	157,86
	12	137,80	141,61	144,26	148,22	151,63	154,86	158,59	161,59	168,65
	24	140,81	144,62	147,27	151,23	154,64	157,87	161,60	164,60	171,66
Pinnipèdes dans l'air	1	126,29	131,74	134,68	138,63	142,12	145,61	149,70	152,78	159,82
	12	137,08	142,53	145,47	149,42	152,92	156,40	160,49	163,58	170,61
	24	140,09	145,54	148,48	152,43	155,93	159,41	163,50	166,59	173,62

Tableau 29 : Seuils utilisés pour identifier les risques d'impact, (1) Southall et al., 2007 classent les réactions comportementales suivant un indice variant de 1 à 9 (1 : pas de réaction, 9 : panique, échouage), le niveau de 120 dB est susceptible de provoquer des réactions d'indices variant de 2 à 4 (alerte individuelle, changement mineur et modéré de la vitesse, de la direction de nage, du rythme de respiration et du profil de plongée, mais pas de réaction d'évitement de la source sonore).

Espèces	Seuil PTS (SEL dB re.1 μ Pa ² .s)	Seuil TTS (SEL dB re. 1 μ Pa ² .s)
Cétacés BF	215	195
Cétacés MF	215	195
Cétacés HF	215	183
Pinnipèdes	203	183

15.3.2 Description du paysage acoustique : variabilité temporelle

Les résultats présentés dans cette section sont issus des mesures acoustiques au point fixe (10 jours d'enregistrement en continu du 1^{er} au 11 Mai Aout 2016).

15.3.2.1 Niveaux sonores large bande

Les niveaux sonores large bande ont été calculés à partir des densités spectrales de puissance dans six bandes fréquentielles correspondant aux différentes sources sonores (Tableau 30 et Tableau 31). Le niveau médian sur toute la bande de fréquence (B0 : [20 - 30000] Hz)) est de 109.3 \pm 3.0 dB re.1 μ Pa². **Ce niveau médian de 109.3 dB re.1 μ Pa² est utilisé pour définir l'empreinte acoustique du projet.**

Tableau 30 : Bandes fréquentielles d'évaluation des niveaux sonores large bande et niveau moyen (\pm écart-type) mesuré.

Bande B0	Bande B1	Bande B2	Bande B3	Bande B4	Band B5
Totalité de la bande de fréquence	Bande du bruit de vibration du mouillage et du transport sédimentaire	Bande du bruit de transport sédimentaire et du trafic maritime	Bande du bruit de transport sédimentaire et du trafic maritime	Bande du bruit des bateaux proches	Bande du bruit des bateaux proches, des impulsions benthiques et de la pluie
[20 - 30000] Hz	[20 - 200] Hz	[200 - 1000] Hz	[1000 - 2000] Hz	[2000 - 6000] Hz	[6000 - 30000] Hz
110.1 (\pm 6.3) dB re.1 μ Pa ²	105.5 (\pm 7.9) dB re.1 μ Pa ²	103.0 (\pm 5.7) dB re.1 μ Pa ²	98.0 (\pm 5.8) dB re.1 μ Pa ²	100.6 (\pm 4.9) dB re.1 μ Pa ²	96.8 (\pm 4.8) dB re.1 μ Pa ²

Tableau 31 : Centiles des niveaux sonores large bande des six bandes fréquentielles

Bande de fréquence	Distribution des centiles (dB re 1 μ Pa ²)								
	1 ^{er}	5 ^{ème}	10 ^{ème}	25 ^{ème}	médiane	75 ^{ème}	90 ^{ème}	95 ^{ème}	99 ^{ème}
B0: [20 - 30000] Hz	93,51	100,58	103,55	106,66	109,31	113,33	118,81	122,28	127,87
B1: [20 - 200] Hz	81,74	94,84	97,43	100,83	104,38	109,71	116,56	120,20	126,62
B2: [200 - 1000] Hz	85,98	93,58	96,35	99,87	103,03	106,39	110,06	112,65	117,65
B3: [1000 - 2000] Hz	81,60	86,21	89,04	94,20	98,04	100,41	103,83	106,70	112,21
B4: [2000 - 6000] Hz	85,56	90,53	93,69	97,86	100,62	102,73	105,16	107,68	112,72
B5: [6000 - 30000] Hz	88,26	89,89	91,38	94,48	96,81	99,83	103,07	105,61	112,26

La Figure 40 présente l'évolution temporelle des niveaux large bande dans les bandes B1, B2, B3, B4 et B5 pour la période du 1^{er} Mai 2016 au 11 Mai 2016, et les séries temporelles de la vitesse du vent et de la hauteur d'eau correspondantes. L'analyse de cette figure permet d'identifier un rythme :

- ✓ un rythme de marée: rythme d'une durée de 12h25min qui correspond à l'intervalle moyen entre deux marées. Ce rythme pilote principalement le niveau sonore pour les basses fréquences (<200 Hz, bande de fréquence B1) et de façon plus importante pendant les périodes de forts coefficients de marée. Les forts courants associés au cycle de marée génèrent du bruit de vibration du mouillage, essentiellement dans les basses fréquences (B1) et du bruit de transport sédimentaire sur toute la bande de fréquence. Les niveaux sonores associés sont plus importants après l'étal de basse mer pendant les périodes de forts coefficients de marée.

Une analyse visuelle ne permet pas d'identifier de rythme biologique d'une durée de 24h associé à l'activité benthique et la production sonore associée

Il n'y a pas de relation claire niveaux acoustiques et vitesse du vent, excepté pour la journée du 2 Mai. L'augmentation graduelle de la vitesse du vent de 4 nœuds à 15 nœuds est accompagnée d'une augmentation du niveau sonore principalement dans les bandes B2, B3 et B4. En effet, lors de la campagne acoustique, la vitesse du vent est restée inférieure à 15 nœuds. Des études précédentes (RTE FAB, 2015 et *Mathias et al. 2016*) ont montré qu'un masquage du bruit ambiant est observé pour des vitesses de vent supérieures à 15 nœuds.

Une analyse plus détaillée du rythme lié à la marée est présentée dans la section 15.3.2.2 et de l'influence du trafic maritime sur le bruit ambiant est présenté dans la section 15.3.4.2.

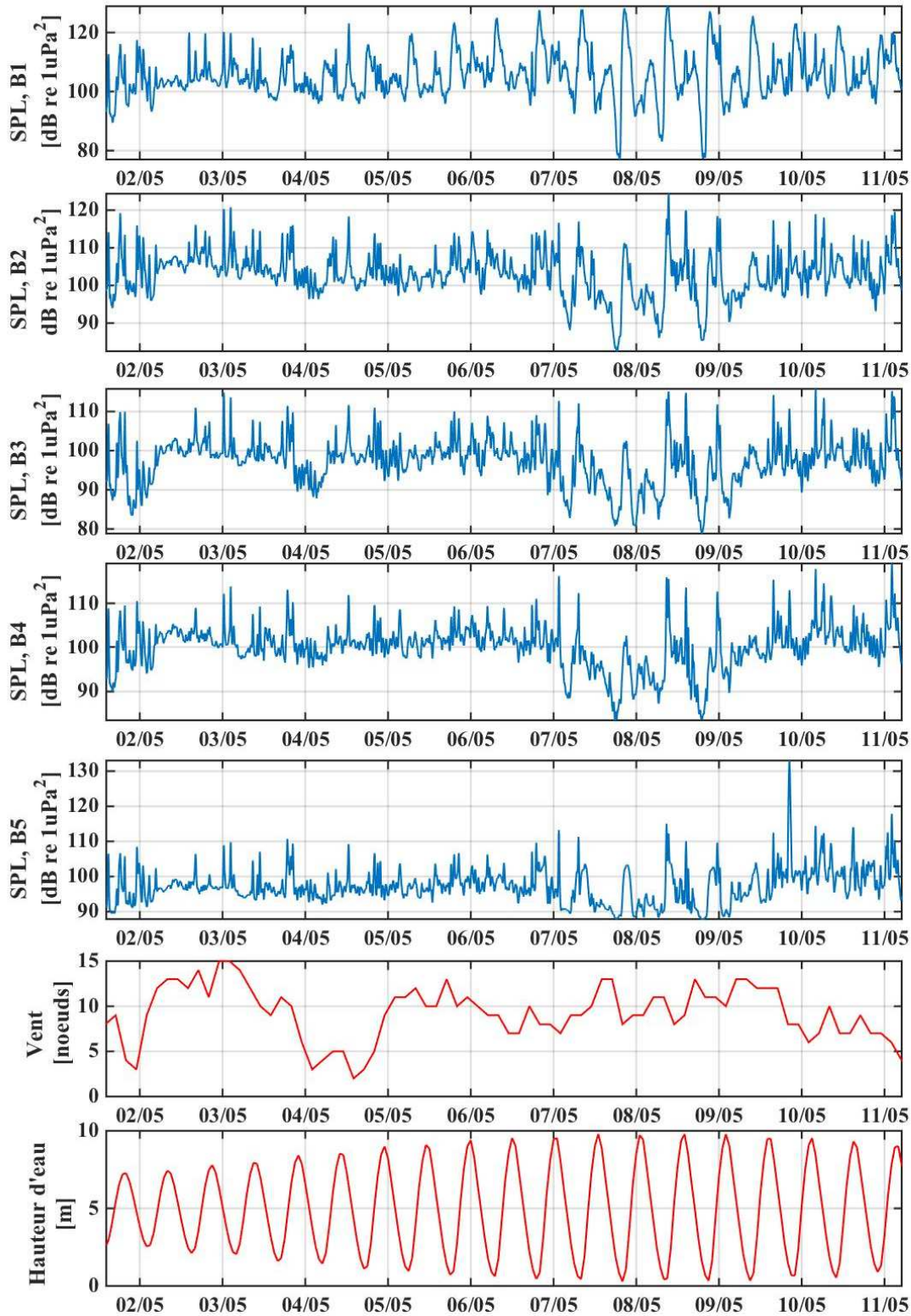


Figure 40 : Séries temporelles des niveaux large bande dans les bandes fréquentielles B1, B2, B3, B4, B5 (en bleu) et séries temporelles de la vitesse du vent et de la hauteur d'eau (en rouge) entre le 1^{er} et le 11 Mai 2016.

15.3.2.2 Rythmes

La section précédente a permis d'identifier un rythme pilotant la variabilité temporelle des niveaux sonores large bande. Une analyse de Fourier (calcul de la FFT : transformée de Fourier rapide) a été menée afin d'identifier précisément ce rythme :

- un pic à 6.24 heures correspondant à la durée entre l'étal de marée haute et l'étal de marée basse est présent pour toutes les bandes de fréquence B1, B2, B3, B4 et B5,
- un pic à 12.42 heures correspondant à la durée entre deux marées est présent pour toutes les bandes de fréquence B1, B2, B3, B4 et B5.

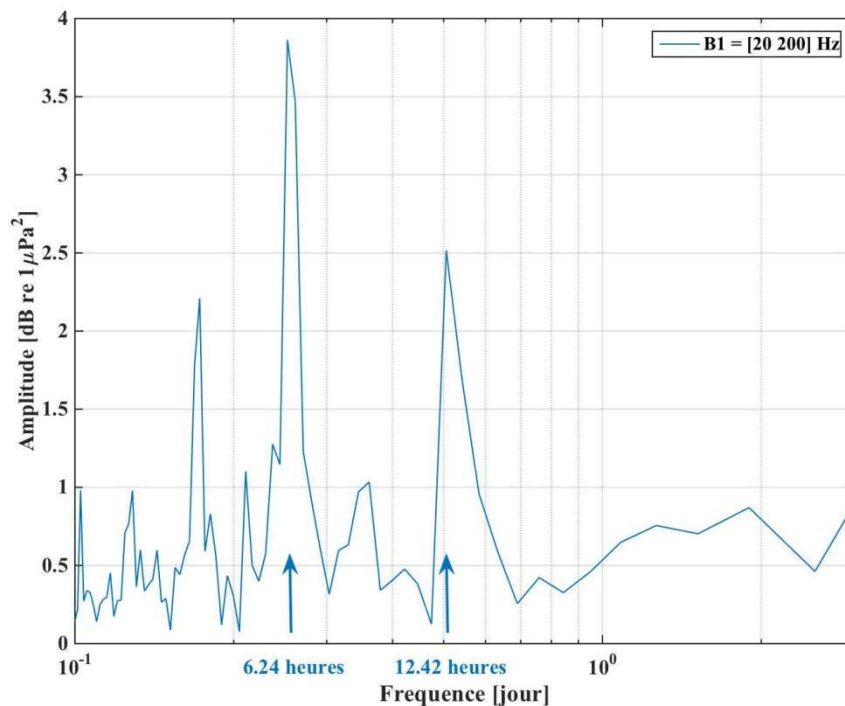


Figure 41 : Analyse de Fourier dans la bande B1 ([0Hz 200Hz])

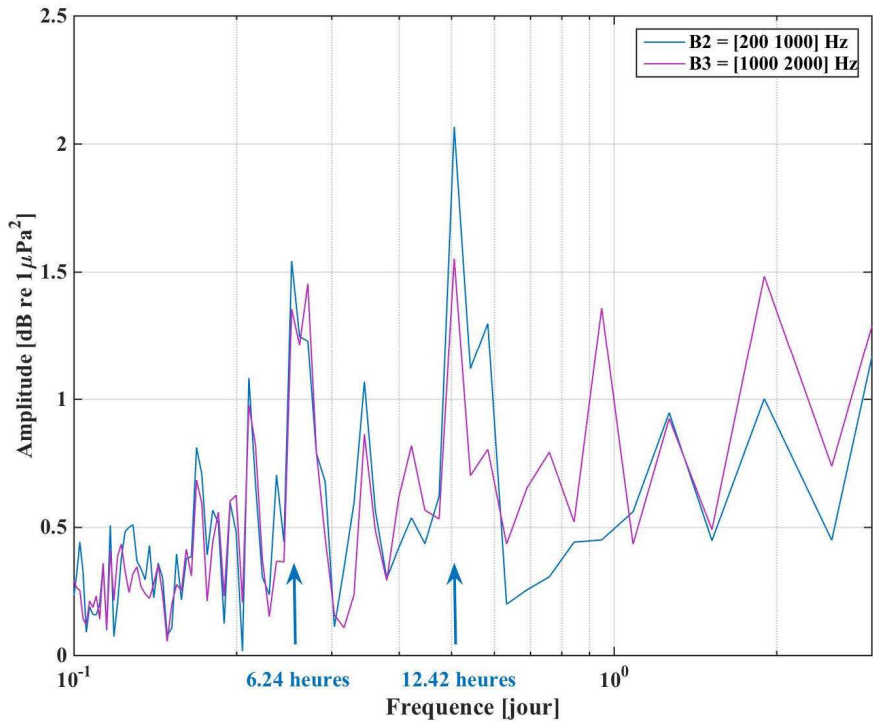


Figure 42 : Analyse de Fourier dans la bande B2 ([200Hz 1kHz]) et B3 ([1kHz 2kHz])

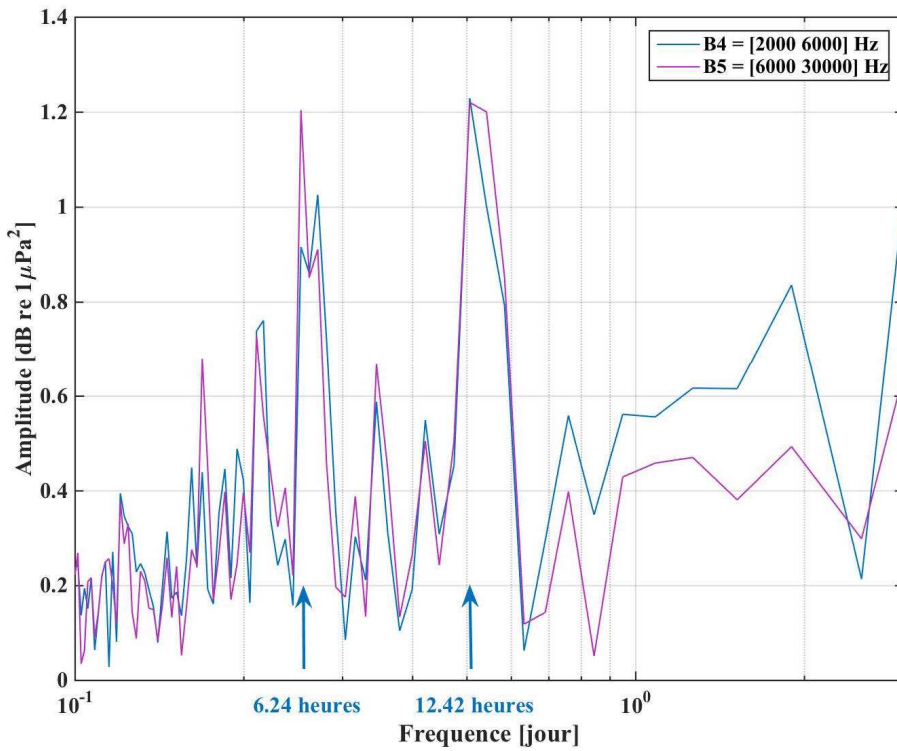


Figure 43 : Analyse de Fourier dans les bandes B4 ([2kHz 6kHz]) et B5 ([6kHz 30kHz])

Afin d'investiguer le rythme journalier et de quantifier la variabilité sonore pilotée le rythme tidal et, les séries médianes pour un rythme donné (médiane des portions d'une longueur égale au rythme, construites à partir des 10 jours de mesure) sont formées :

- La série médiane pour un rythme de 24h dans la bande de fréquence [2 kHz - 10 kHz] (Figure 44 et (Figure 45) met en évidence l'absence de rythme biologique journalier. La variabilité du niveau sonore est principalement pilotée par l'intensité du trafic maritime. L'augmentation du niveau sonore autour de 26 kHz est liée à la présence d'un bateau et de son sonar à proximité de l'hydrophone les 9 et 10 mai 2016.
- La série médiane pour un rythme de 12h25min dans la bande de fréquence [20 Hz - 10 kHz] (Figure 46) et dans la bande [20 Hz - 2 kHz] (Figure 47) et met en évidence le rythme du bruit de mesure (vibration du mouillage de l'hydrophone généré par les forts courants de marée), essentiellement aux basses fréquences (<200 Hz) et le bruit du transport sédimentaire essentiellement aux fréquences inférieures à 10 kHz . Ces niveaux sonores sont maximaux 1h après l'étal de basse-mer, ce qui correspond aux prédictions du modèle océanographique PREVIMER (Ifremer, <http://www.previmer.org/previsions/>). Un second pic est présent 1heure après l'état de haute-mer et les niveaux sonores sont minimaux 2h avant l'étal. Une différence de 19 dB re.1 μPa^2 est observée entre les niveaux maximum et minimum (Figure 48).

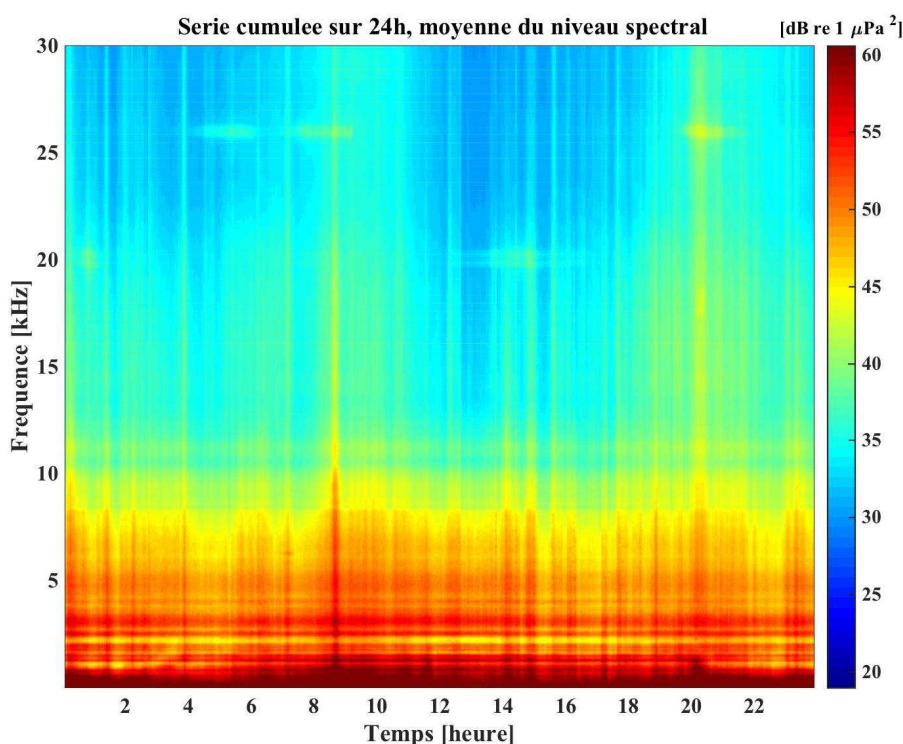


Figure 44 : Spectrogramme journalier médian (réalisé sur 10 jours), pour la bande de fréquence [20 Hz-30 kHz]

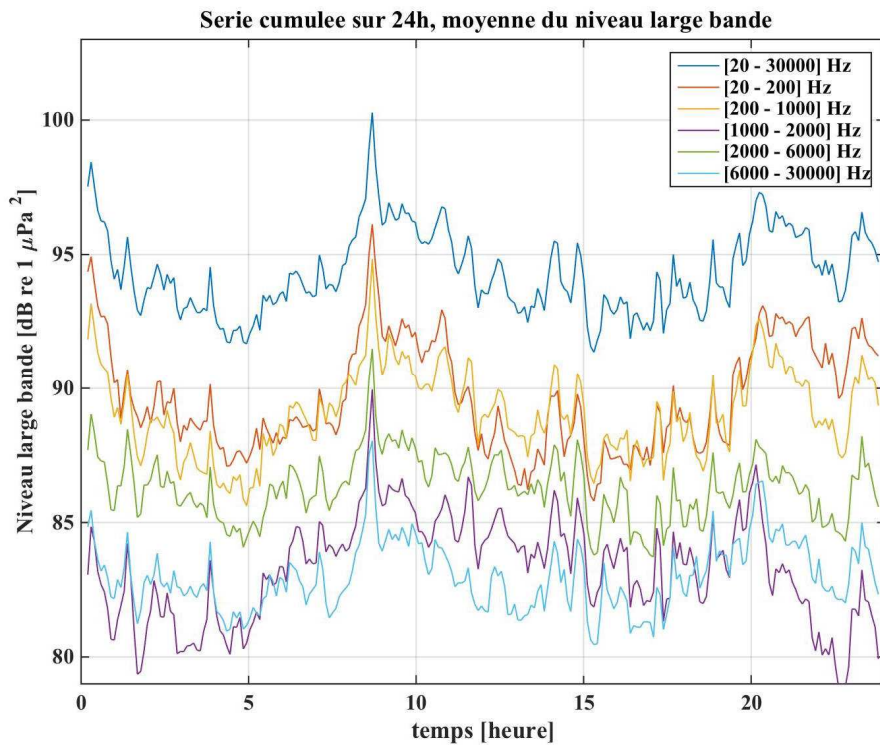


Figure 45 : Moyenne des niveaux large bande sur 24h

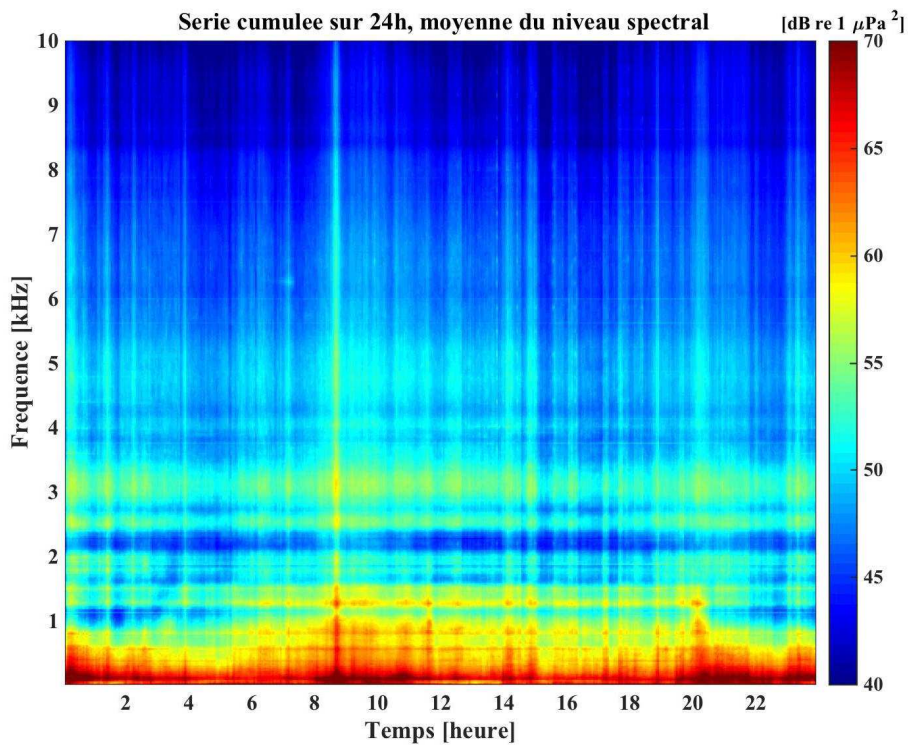


Figure 46 : Spectrogramme journalier médian (réalisé sur 10 jours), pour la bande de fréquence [20 Hz-10 kHz]

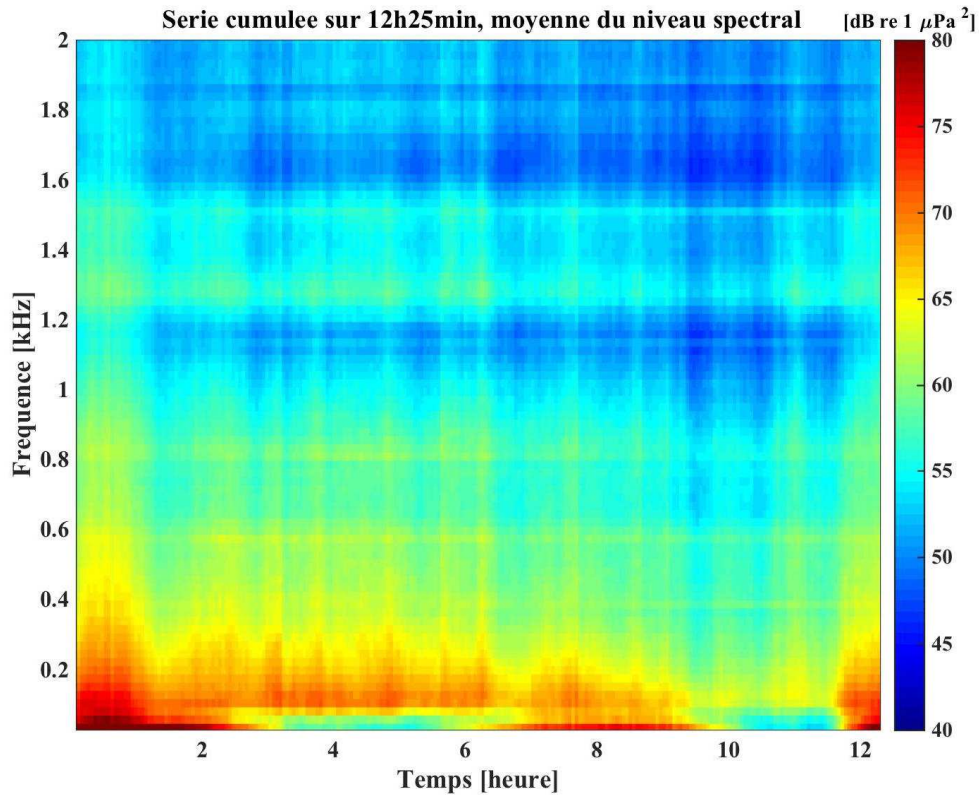


Figure 47 : Spectrogramme médian sur 12h25 min (réalisé sur 10 jours), pour la bande de fréquence [20 Hz-2 kHz]

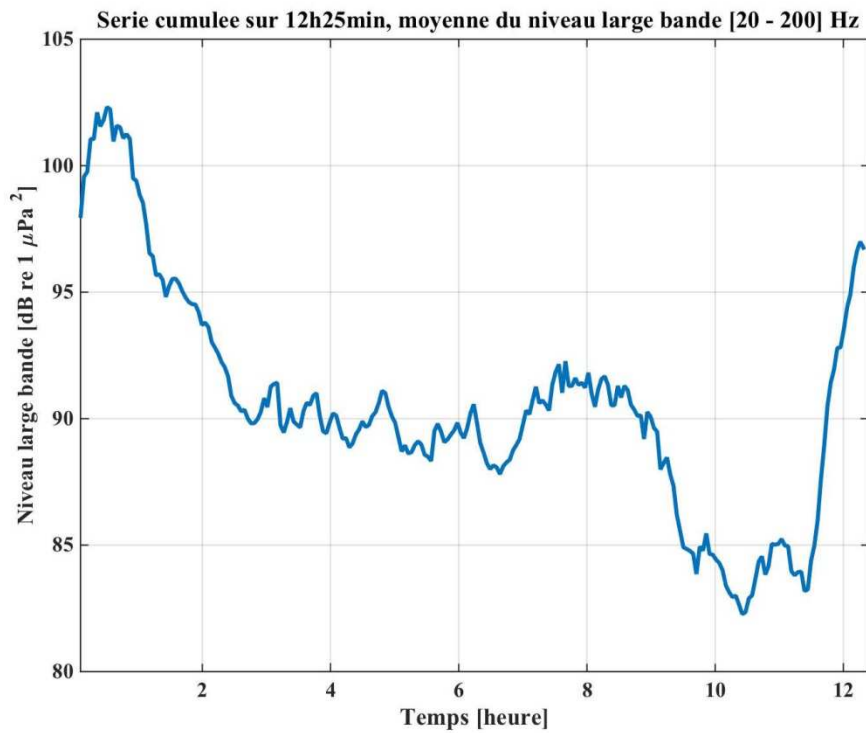


Figure 48 : Moyenne du niveau large bande [20 Hz 200 Hz] sur 12h25min

15.3.3 Description du paysage acoustique : Variabilité spatiale

La variabilité spatiale est étudiée à partir des mesures de cartographie à la dérive (1^{er} et 11 Mai 2016).

Le spectre médian pour chaque dérive de 8min et le niveau moyen large bande sont calculés. Les spectres (Figure 49) et les niveaux large bande sont ensuite reliés à la position de la mesure et à la nature du fond sur la zone d'étude (Figure 50).

Les spectres et les niveaux large bande en 6 positions de la zone d'étude sont comparés pour identifier les facteurs influençant la variabilité spatiale. On observe une faible variabilité de 5 dB re.1 μPa dans le niveau large bande ([10 kHz - 30 kHz]).

Plusieurs facteurs expliquent cette faible variabilité spatiale :

- les conditions météorologiques et la hauteur d'eau : toutes les mesures de bruit ambiant ont été effectuées dans hauteurs d'eau similaires avec une vitesse de vent inférieure à 5 nœuds.
- ✓ la nature du fond : la nature du fond est peu variable sur la zone d'étude, avec des substrats de type mou (sable fin ou sable grossier). On observe un niveau spectral plus élevé de quelques dB pour les positions correspondant à un substrat de type sable grossier (positions 1, 5 et 6), comparé à un substrat de sable fin (positions 2, 3 et 4). Cette variabilité atteint un maximum de 5 dB re.1 μPa entre 10 kHz et 20 kHz (Figure 49 et Figure 50).

Les substrats de type mou (à la différence des substrats rocheux) sont des zones qui ne favorisent pas des peuplements benthiques denses qui génèrent des impulsions sonores large bande (2 kHz - 30 kHz)]. Ceci peut expliquer la faible production sonore benthique observée dans cette étude.

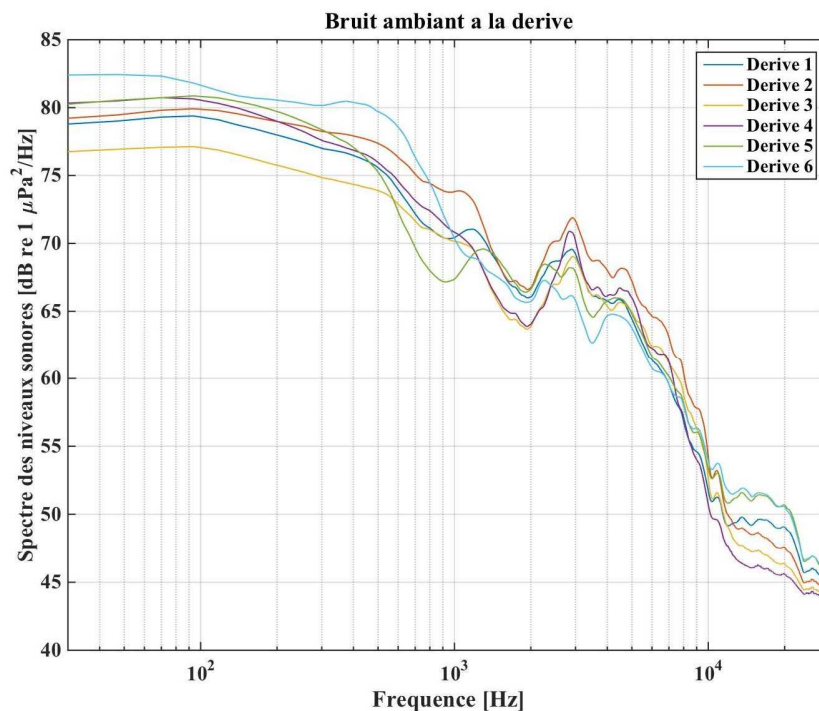


Figure 49 : Spectre médian pour chaque dérive du 1er et du 11 Mai 2016.

Légende

Niveau large bande 10kHz – 30 kHz [dB re 1uPa²]

- 88.5000 – 89.3333
- 89.3333 – 90.1667
- 90.1667 – 91.0000
- 91.0000 – 91.8333
- 91.8333 – 92.6667
- 92.6667 – 93.5000

□ zone_etude_approchee

IFR_AAMP_HAB_EUNIS_300_ATL_P

■ A3.3 : Atlantic low energy infralittoral rock

■ A5.13 : Infralittoral coarse sediment

■ A5.14 : Circalittoral coarse sediment

■ A5.23 : Infralittoral fine sand

■ A5.24 : Infralittoral muddy sand

■ A5.25 : Circalittoral fine sand

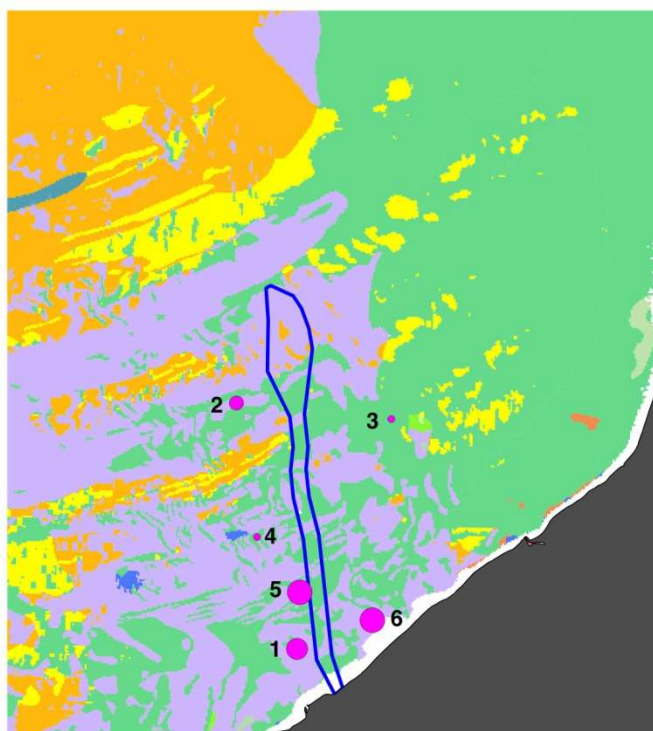
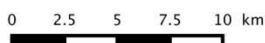


Figure 50 : Cartographie de la médiane du niveau large bande [10kHz-30kHz] et nature du fond associée

15.3.4 Description du paysage acoustique : Contributions des différentes sources sonores

15.3.4.1 Identification des classes de sons présents sur le site

Dictionnaire des signaux présents sur la zone d'étude :

Quatre classes de signaux ont pu être identifiées en explorant les spectrogrammes (visualisation temps/fréquence des données par périodes successives de 15 minutes):

- ✓ la classe "BIO" : production sonore des organismes benthiques (Figure 51),
- ✓ la classe "GEO" : production sonore induite par la pluie se traduisant par un chorus sans source individualisable (Figure 52),
- ✓ la classe "ANT" : bruit généré par des embarcations motorisées (Figure 53),
- ✓ la classe "BRU" : bruit de mesure généré par la vibration du mouillage et le transport sédimentaire (Figure 54).

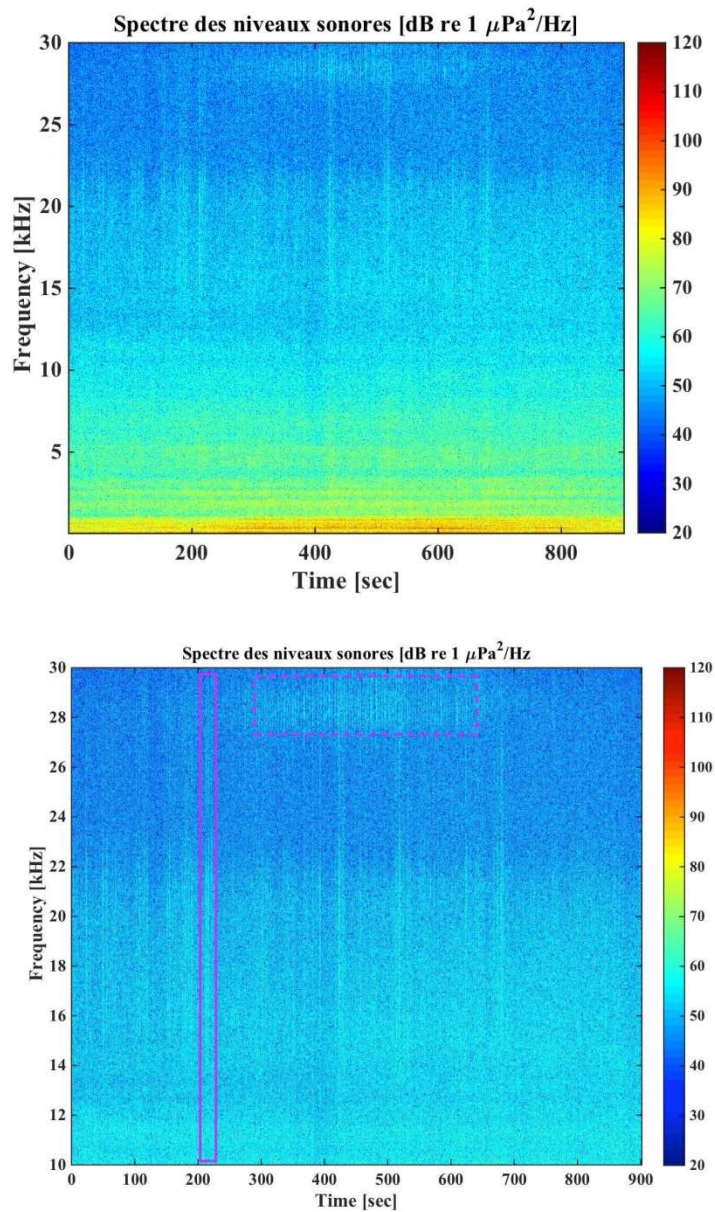


Figure 51 : Spectrogramme typique de la production sonore (impulsions) des peuplements benthiques de la zone d'étude (classe B10). En haut : bande fréquentielle complète. En bas : zoom sur la bande de fréquence [10 kHz - 30 kHz]. On observe des impulsions large bande (rectangle magenta en trait plein) de 14 kHz à 30 kHz et des impulsions centrées autour de 28 kHz (rectangle magenta en trait pointillé)

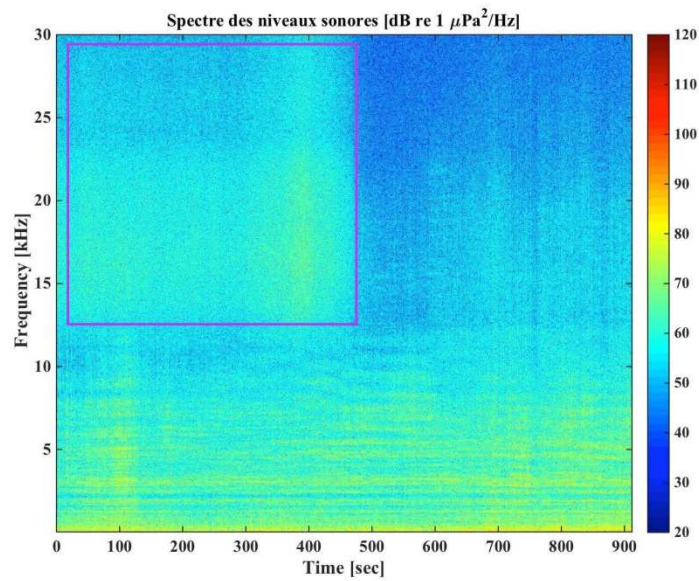


Figure 52 : Spectrogramme typique de la production sonore induite par la pluie (classe GEO, rectangle magenta), avec un pic de niveau sonore autour de 400 sec. Le bruit observé de 20 Hz à 10 kHz est généré par un navire.

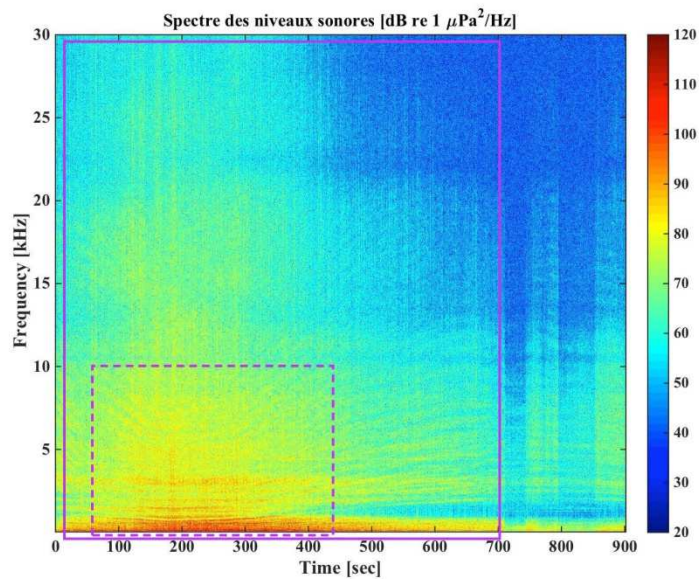


Figure 53 : Spectrogramme typique d'une embarcation motorisée transitant à proximité de l'hydrophone (classe ANT, rectangle magenta en trait plein). Le rectangle en trait pointillé contient la structure d'interférences générée par le

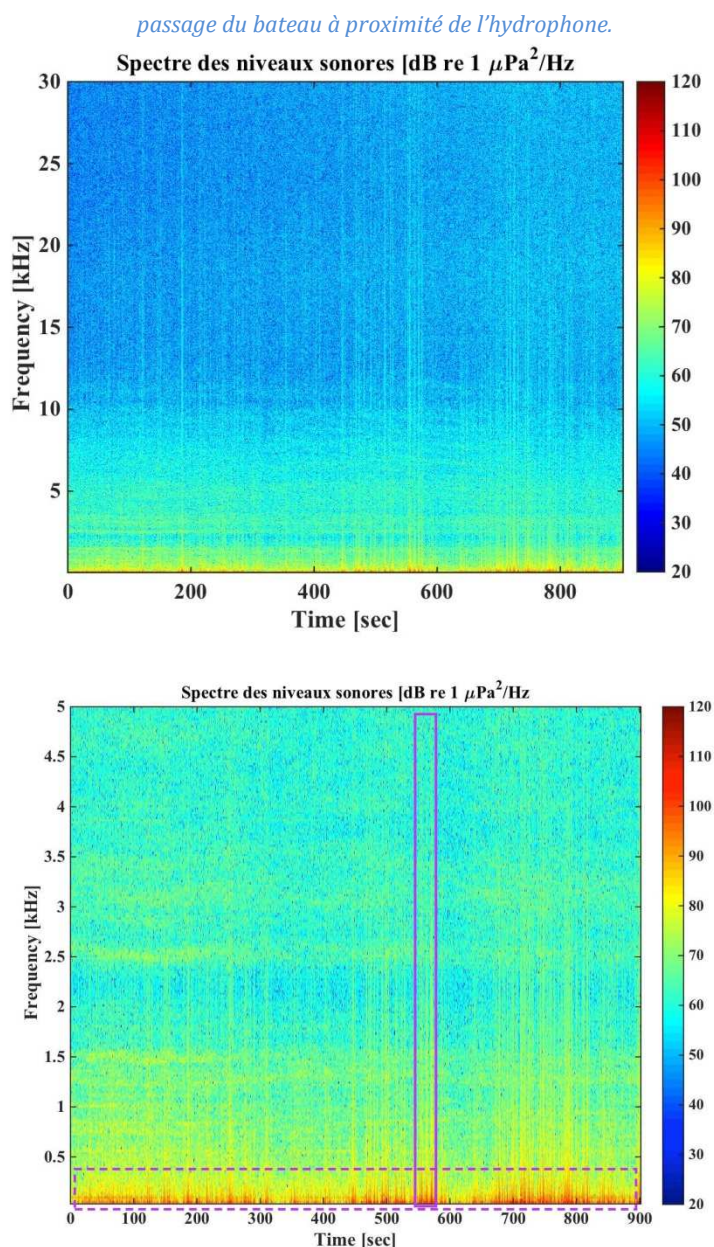


Figure 54 : Spectrogramme typique du bruit de mesure généré par la vibration du mouillage et/ou le transport sédimentaire (classe BRU). En haut : bande fréquentielle complète. En bas : zoom sur la bande de fréquence [20 Hz - 5 kHz]. La majorité du bruit de mesure est comprise entre 0 et 400 Hz (rectangle magenta en trait pointillé). Le bruit de mesure génère occasionnellement du bruit sur toute la bande de fréquence (rectangle magenta en trait plein)

Description des différentes composantes (biophonie, géophonie, anthropophonie) du paysage acoustique :

Les caractéristiques des quatre classes de signaux identifiés sont utilisées pour analyser les 10 jours de données acoustiques segmentées en spectrogrammes de 15 minutes, soit un total de 940 spectrogrammes (Tableau 32).

Tableau 32 : Pourcentage de présence acoustique par classe d'émissions sonore, du 1^{er} au 11 Mai 2016

Classe	Nom	Bande de fréquence	Nombre de spectrogrammes (N=940)	Pourcentage de présence acoustique
ANT	Navire audible	[20 Hz - 30 kHz]	846	90 %
BIO	Biophonie benthique	[10 kHz - 30 kHz]	160	17 %
BRU	Bruit de mesure (vibration du mouillage) et/ou transport sédimentaire	[20 Hz - 30 kHz]	103	11 %
GEO	Pluie	[10 kHz - 30 kHz]	28	3 %

Note : Le pourcentage de présence acoustique d'une classe est le nombre de spectrogrammes pour lesquels la classe a été identifiée pendant les 10 jours de données. La somme des pourcentages de présence acoustique des différentes classes peut être supérieure à 100 % puisque à chaque instant t plusieurs classes peuvent être présentes.

Ainsi le paysage acoustique du site d'étude, suivi pendant 10 jours se compose de :

- Navires (classe ANT) : présents 90 % du temps et décrivant la zone d'étude comme une zone de trafic maritime dense pendant la période suivie. Lors du passage d'un navire à proximité de l'hydrophone, le bruit généré couvre toute la bande fréquentielle [20 Hz - 30 kHz] pendant 5 à 15 minutes.
- Biophonie benthique (classe BIO) : présente 17 % du temps et correspondant à des impulsions dont le niveau est maximal autour de 20 kHz. Elle ne présente pas de rythme journalier et décrit la zone d'étude comme une zone de faible densité benthique (substrat de type mou).
- Bruit de vibration généré par le mouillage de l'hydrophone et par le transport sédimentaire (classe BRU) : présent 11 %. Ce bruit ne masque jamais les autres sources sonores du paysage acoustique car il est concentré sur les fréquences inférieures à 400Hz. Les niveaux sonores associés à ce bruit de mesure sont maximaux 1h après l'étal de marée basse et lors des périodes de forts coefficients de marée.
- Pluie (classe GEO) : présente 3 % du temps dans la bande de fréquence [10 kHz - 30 kHz] et générant alors un chorus continu.

Aucun sifflement ou click de cétacés n'a été détecté pendant les 10 jours d'enregistrement. Il est important de noter que le bruit généré par le trafic maritime important sur la zone d'étude peut masquer les signaux émis par les cétacés et les impulsions des organismes benthiques.

La faible vitesse du vent de la campagne observée pendant les 10 jours d'enregistrement n'a pas permis d'illustrer la contribution du vent au paysage acoustique. Deux précédentes études (RTE, 2015; Mathias, Gervaise, & Di Iorio, 2016) ont montré que le niveau sonore ne dépend pas de la vitesse du vent pour des vitesses inférieures à 10

nœuds (18.5 km. h⁻¹) où les contributions biophoniques et anthropophoniques masquent le bruit généré par le vent. Au-delà, une relation linéaire entre le niveau sonore et la vitesse du vent indique qu'à partir d'une vitesse seuil de 13 nœuds, le bruit du vent devient supérieur aux contributions biophoniques et anthropophoniques. Au-delà de 15 nœuds (27.8 km. h⁻¹), le niveau sonore généré par le vent cesse d'augmenter.

15.3.4.2 Contribution de l'anthropophonie

Comme attendu, la Figure 55 et la Figure 56 montrent que la zone est très fréquentée par des navires. Des bateaux audibles sont présents 90% du temps et la fréquentation est légèrement plus importante tôt le matin et en fin d'après-midi.

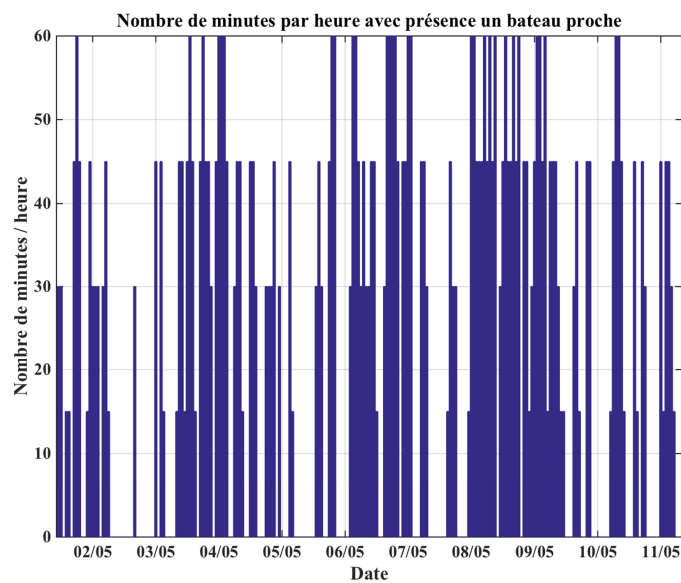


Figure 55 : Histogramme de la fréquentation de la zone par des bateaux passant à proximité de l'hydrophone

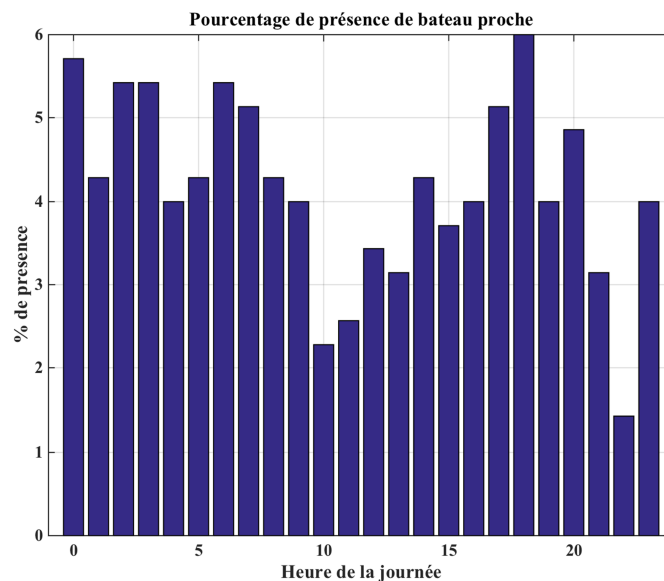


Figure 56 : Histogramme du nombre de bateaux proches par tranche d'heure

La Figure 57 et la Figure 58 présentent les centiles du spectre acoustique en présence de bateaux et l'espace entre le 25^{ème} et le 75^{ème} centile (espace interquartile) est replacé dans la distribution globale des niveaux sonores afin de quantifier la contribution du bruit généré par les bateaux au paysage acoustique (Tableau 33). Le pic à 26 kHz dans les centiles élevés dans la distribution globale des niveaux sonores correspond à un sonar de bateau présent dans la zone d'étude pendant 2 jours.

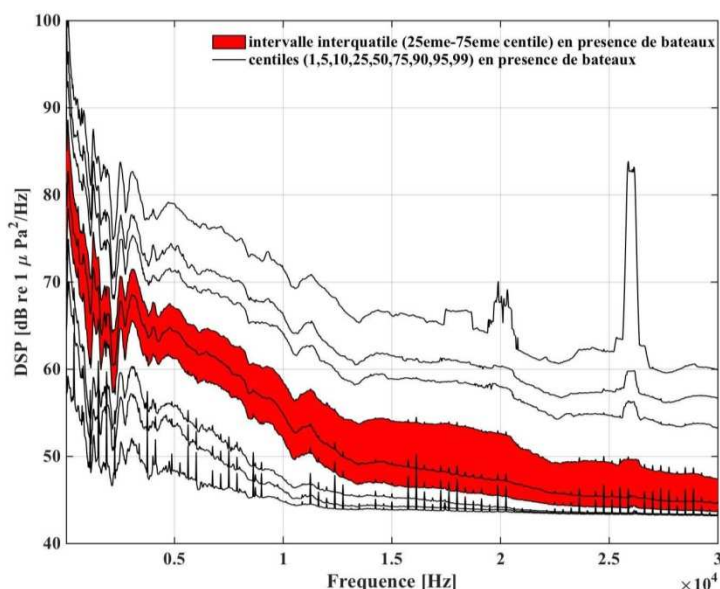


Figure 57 : Centiles de la distribution des spectres en présence de bateaux. En rouge: intervalle interquartile (25^{ème} centile au 75^{ème} centile) de ces spectres.

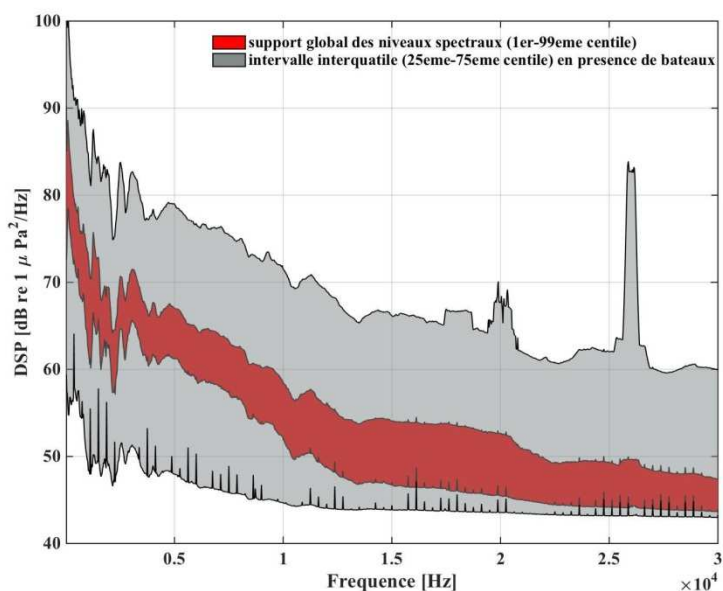


Figure 58 : En gris: support global des niveaux spectraux du site et en noir les centiles de la distribution globale des spectres. En rouge: l'intervalle interquartile (25^{ème} centile au 75^{ème} centile) des spectres en présence de bateaux.

Tableau 33 : Contribution du bruit généré par les bateaux au paysage acoustique

Classe	Niveau Spectral dB re 1 μ Pa ² / Hz, 25 ^{ème} - 75 ^{ème} centile				Position dans le support global de l'intervalle interquartile		Pourcentage de présence acoustique
	200 Hz	1 kHz	10 kHz	20 kHz	Centile min	Centile max	
ANT (Bateaux)	75 - 84	62 - 73	51 - 58	45 - 52	25	80	90 %

15.3.4.3 Contribution de la biophonie - Impulsions benthiques

Nous étudions dans cette section les contributions des impulsions benthiques, lorsque l'on n'a pas de masquage par des bateaux proches.

La Figure 59 et la Figure 60 présentent les centiles du spectre acoustique en présence de bateaux et l'espace entre le 25^{ème} et le 75^{ème} centile (espace interquartile) est replacé dans la distribution globale des niveaux sonores afin de quantifier la contribution du bruit généré par les impulsions benthiques (Tableau 34).

La biophonie est présente 17% du temps, et correspond à des impulsions dont le niveau est maximal entre 4 kHz et 6 kHz. Elle ne présente pas de rythme journalier où les sons sont minimaux le jour, forts la nuit et maximaux au crépuscule et au lever du soleil.

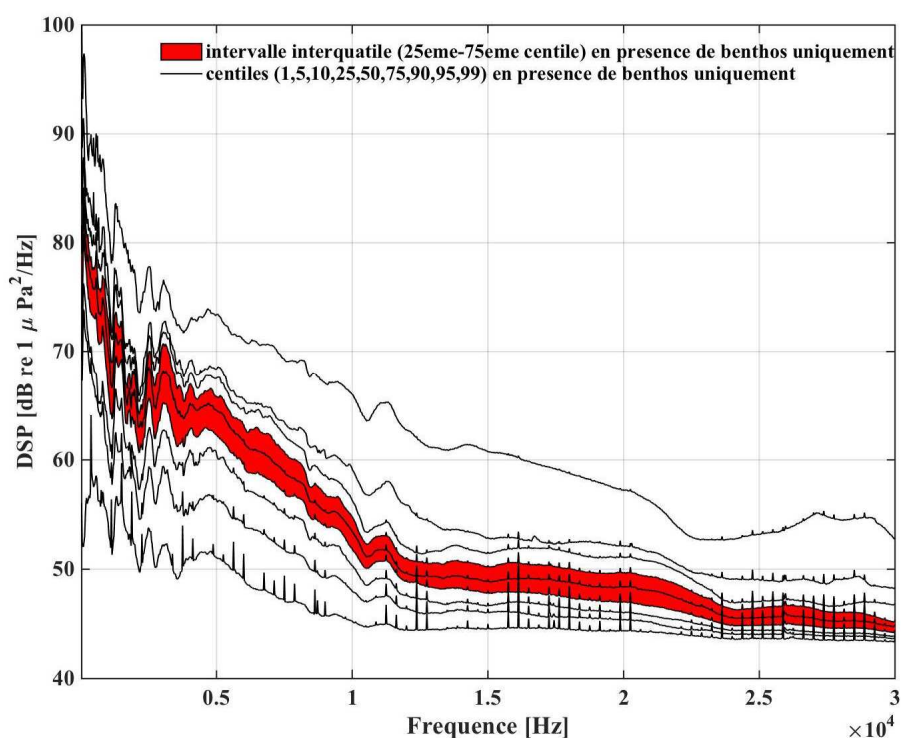


Figure 59 : Centiles de la distribution des spectres en présence d'impulsions benthiques. En rouge: intervalle interquartile (25^{ème} centile au 75^{ème} centile) de ces spectres.

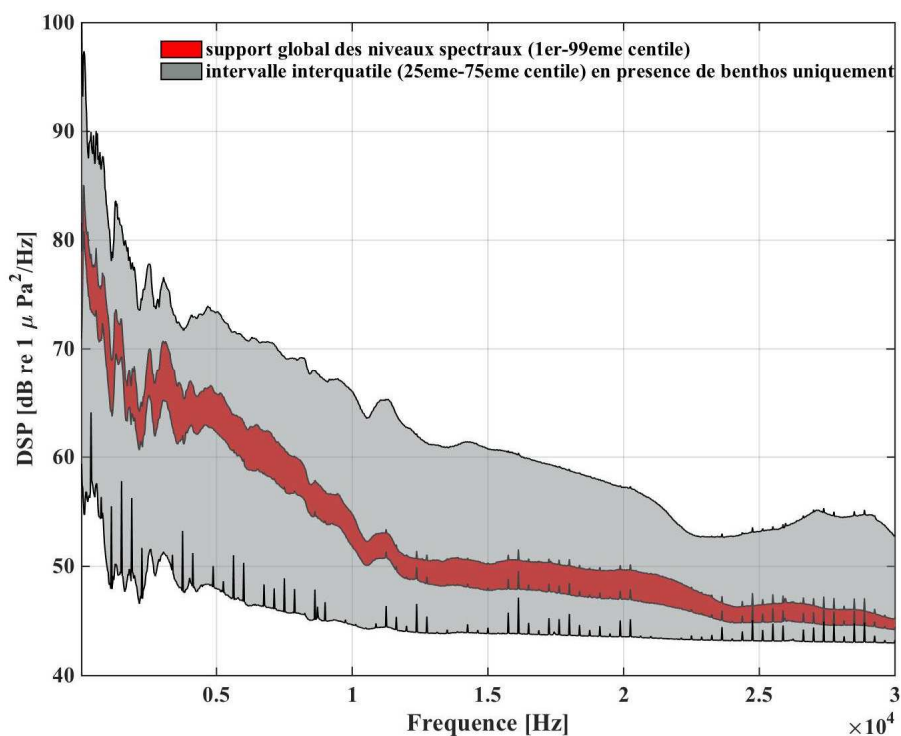


Figure 60 : En gris: support global des niveaux spectraux du site et en noir les centiles de la distribution globale des spectres. En rouge: l'intervalle interquartile (25^{ème} centile au 75^{ème} centile) des spectres en présence d'impulsions benthiques.

Tableau 34 : Contribution du bruit généré par le benthos au paysage acoustique

Classe	Niveau Spectral dB re.1µPa ² / Hz, 25 ^{ème} - 75 ^{ème} centile				Position dans le support global de l'intervalle interquartile		Pourcentage de présence acoustique
	200 Hz	1 kHz	10 kHz	20 kHz	Centile min	Centile max	
BIO (Benthos)	N/A	N/A	51 - 54	47 - 49	25	60	17 %

15.3.4.4 Contribution du bruit de vibration du mouillage et du transport sédimentaire

Nous étudions dans cette section les contributions du bruit de vibration du mouillage et du transport sédimentaire.

La Figure 61 et la Figure 62 présentent les centiles du spectre acoustique en présence de bateaux et l'espace entre le 25^{ème} et le 75^{ème} centile (espace interquartile) est replacé dans la distribution globale des niveaux sonores afin de quantifier la contribution du bruit généré par la vibration du mouillage et le transport sédimentaire (Tableau 34).

Le bruit lié aux courants de marée est présent 11% du temps. La vibration du mouillage existe aux fréquences inférieures à 200 Hz et le transport sédimentaire est présent sur toute la bande de fréquences.

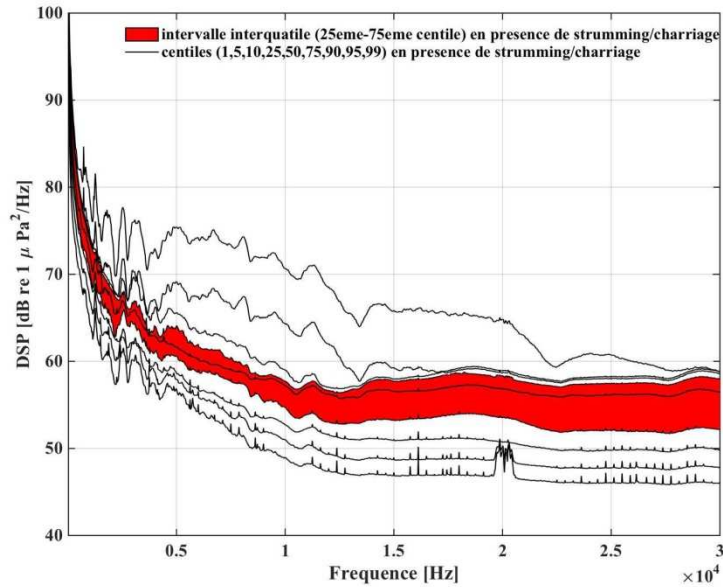


Figure 61 : Centiles de la distribution des spectres en présence de bruit vibration du mouillage et de charriage. En rouge: intervalle interquartile (25^{ème} centile au 75^{ème} centile) de ces spectres.

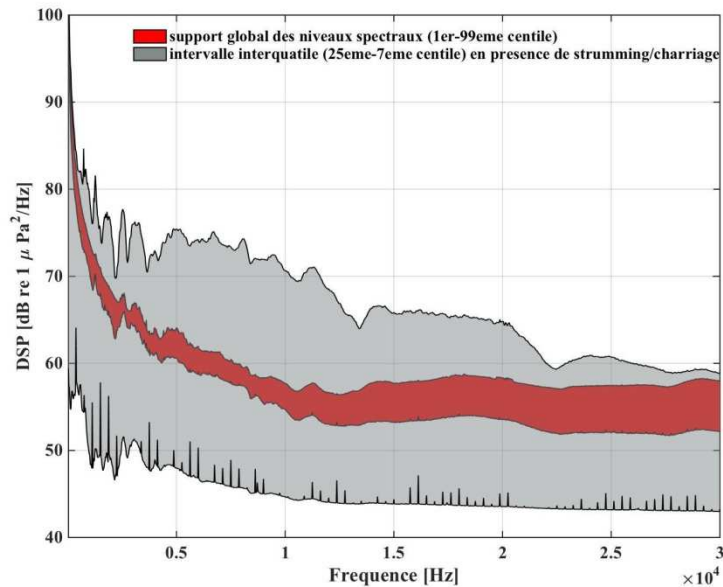


Figure 62 : En gris: support global des niveaux spectraux du site et en noir les centiles de la distribution globale des spectres. En rouge: l'intervalle interquartile (25^{ème} centile au 75^{ème} centile) des spectres en présence de présence de bruit de mesure et de transport sédimentaire

Tableau 35 : Contribution du bruit généré par la vibration du mouillage et le transport sédimentaire au paysage acoustique

Classe	Niveau Spectral dB re.1 μ Pa ² / Hz, 25 ^{ème} - 75 ^{ème} centile				Position dans le support global de l'intervalle interquartile		Pourcentage de présence acoustique
	200 Hz	1 kHz	10 kHz	20 kHz	Centile min	Centile max	
BRU (vibration/transport sédimentaire)	83 - 87	70 - 73	54 - 57	53 - 58	50	90	11 %

15.3.4.5 Contribution de la géophonie - Pluie

Nous étudions dans cette section la contribution de la pluie

La Figure 63 et la Figure 64 présentent les centiles du spectre acoustique en présence de pluie et l'espace entre le 25^{ème} et le 75^{ème} centile (espace interquartile) est replacé dans la distribution globale des niveaux sonores afin de quantifier la contribution du bruit généré par la pluie (Tableau 36).

La pluie est présente 3 % du temps, et correspond à un chorus sans source individualisable dont le niveau est maximal entre 15 kHz et 20 kHz.

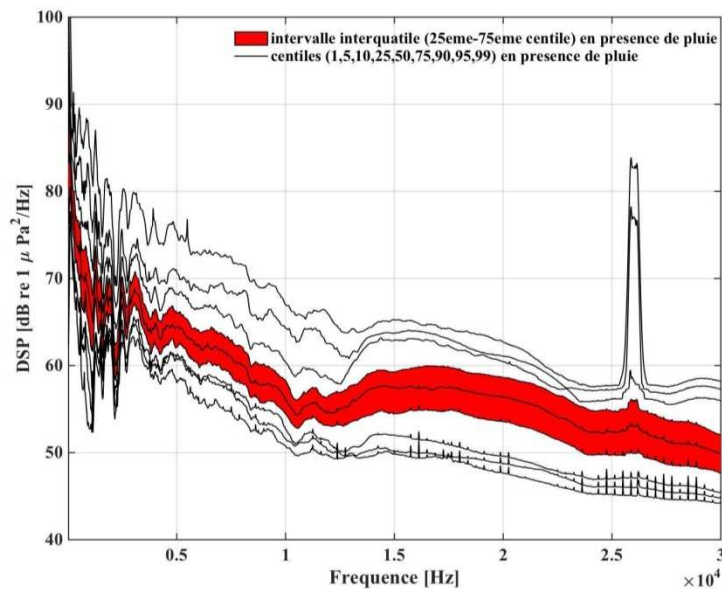


Figure 63 : Centiles de la distribution des spectres en présence pluie. En rouge: intervalle interquartile (25^{ème} centile au 75^{ème} centile) de ces spectres.

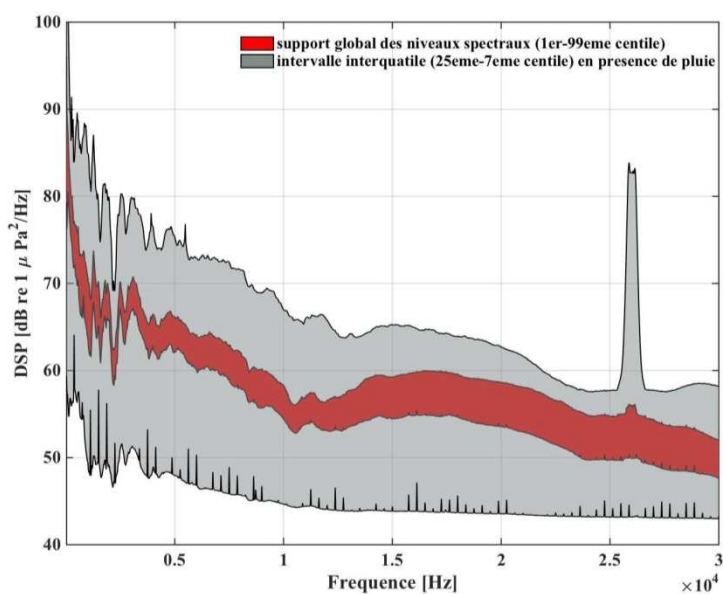


Figure 64 : En gris: support global des niveaux spectraux du site et en noir les centiles de la distribution globale des spectres. En rouge: l'intervalle interquartile (25^{ème} centile au 75^{ème} centile) des spectres en présence de pluie.

Tableau 36 : Contribution du bruit généré par la pluie au paysage acoustique

Classe	Niveau Spectral dB re.1µPa ² / Hz, 25 ^{ème} - 75 ^{ème} centile				Position dans le support global de l'intervalle interquartile		Pourcentage de présence acoustique
	200 Hz	1 kHz	10 kHz	20 kHz	Centile min	Centile max	
GEO (PLUIE)	N/A	N/A	54 - 58	53 - 58	50	90	3 %

15.3.5 Synthèse: Budget acoustique

Le budget acoustique de la zone d'étude est renseigné pour les quatre classes de sources sonores identifiées précédemment (Tableau 37).

Tableau 37 : Budget acoustique du site du 1^{er} au 11 Mai 2016, pour les quatre classes identifiées.

Classe	Niveau Spectral dB re.1 μ Pa ² / Hz, 25 ^{ème} - 75 ^{ème} centile				Position dans le support global de l'intervalle interquartile		Pourcentage de présence acoustique
	200 Hz	1000 Hz	10000 Hz	20000 Hz	Centile min	Centile max	
ANT (Bateaux)	75 - 84	62 - 73	51 - 58	45 - 52	25	80	90 %
BIO (Benthos)	N/A	N/A	51 - 54	47 - 49	25	60	17 %
BRU (vibration/charriage)	83 - 87	70 - 73	54 - 57	53 - 58	50	90	11 %
GEO (Pluie)	N/A	N/A	54 - 58	53 - 58	50	90	3 %

En conclusion :

Le paysage de la zone d'étude est piloté par le fort trafic maritime pour les fréquences supérieures à 200 Hz.

Le bruit de vibration du mouillage pilote le paysage acoustique pour les fréquences inférieures à 200 Hz.

La zone d'étude présente les caractéristiques d'une zone de faible peuplement benthique : substrat de type mou associé à une faible production sonore benthique. Le passage d'un bateau masque les sources sonores sur toute la bande fréquentielle de mesure [20 Hz - 30 kHz].

L'analyse des données acoustiques n'a pas permis de la détection d'émissions sonores de cétacés.

Le bruit généré par le trafic maritime important sur la zone d'étude a pu masquer des signaux émis par les cétacés et des impulsions d'organismes benthiques.

Les faibles vitesses de vents observées pendant la campagne acoustique n'ont pas permis de caractériser la contribution du chorus généré par le vent au paysage acoustique.

16 Annexe 5 : Inversion géo-acoustique

16.1 Introduction

La propagation des ondes acoustiques dans les environnements marins petits fonds est conditionnée à la fois par la nature des fonds marins et les propriétés de la colonne d'eau. Par conséquent, toute prédiction des pertes de transmission d'un canal acoustique sous-marin nécessite la connaissance de ces propriétés environnementales. Celles-ci sont le plus souvent estimées par des méthodes d'inversion géo-acoustiques suivant le schéma de la Figure 65. Ainsi, des répliques simulés à partir d'un jeu de paramètres modélisant l'environnement, sont comparés à des mesures effectuées dans le milieu que l'on cherche à caractériser. Les paramètres géo-acoustiques du milieu ainsi que la configuration source-récepteur sont obtenus par optimisation d'une fonction coût judicieusement choisie suivant les observables disponibles. Nous mettons en œuvre deux méthodes pour accomplir cette tâche. Une première méthode basée sur l'exploitation des propriétés vibratoires du canal acoustique pour une source large bande et une seconde méthode basée sur la mesure des pertes de transmission d'harmoniques pures (cette méthode est connue sous le nom de « matched field processing »).

16.2 Utilisation du bruit large bande rayonné par les navires

On s'intéresse dans le présent chapitre à l'estimation des propriétés géo-acoustiques du fond marin à partir du bruit large bande rayonné par les navires, en supposant les autres paramètres du problème connus. On décrira succinctement le modèle direct régissant la propagation acoustique en environnement marin petits fonds. Puis, on présentera un exemple d'application sur des données réelles, acquises dans le cadre de cette étude.

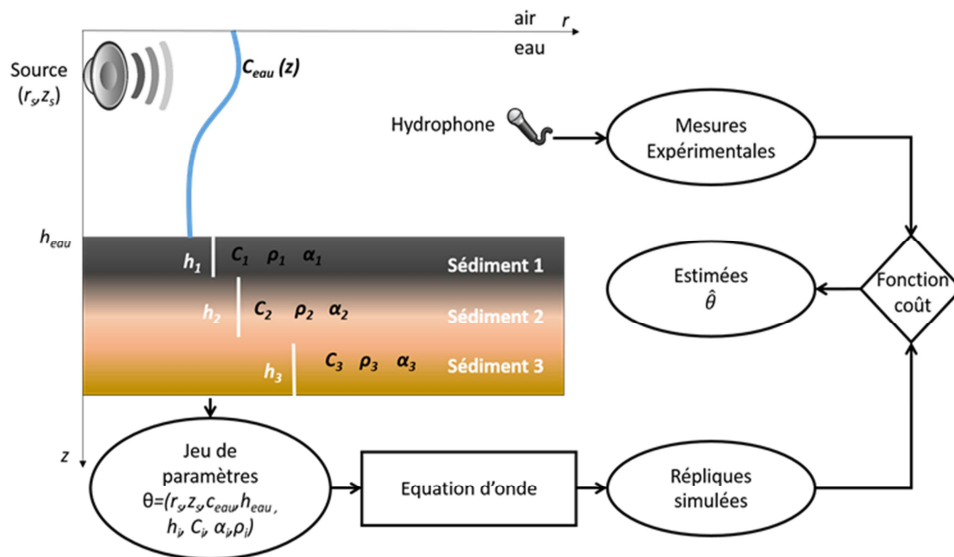


Figure 65 : Principe de l'inversion géo-acoustique

16.2.1 Modèle direct

16.2.1.1 Courbes de dispersion relatives dans un canal petit fond

La propagation acoustique en environnement marin petit fond est convenablement décrite par la théorie des modes normaux. Pour un environnement marin isotrope, la fonction de transfert entre une source de pulsation ($\omega = 2\pi f$), située à une profondeur z_s et un récepteur (à la profondeur z_r) placé à une distance r est donné par l'Équation 12:

$$p = Q \sum_{m=1}^N \psi_m(z_s) \psi_m(z_r) \frac{e^{-jk_{rm}(\omega)r}}{\sqrt{k_{rm}(\omega)}}$$

$$Q = \frac{je^{-j\pi/4}}{\rho\sqrt{8\pi r}}$$

Équation 12

où m est l'indice du mode caractérisé par sa fonction modale ψ_m et son nombre d'onde horizontal k_r^m . Pour une source large bande de densité spectrale de puissance $\gamma_s(f)$, l'intensité acoustique reçue est alors définie par l'Équation 13 :

$$I = \left\{ \gamma_s(f) |Q|^2 \left(\sum_n A_n^2 + 2 \sum_{n \neq m} A_n A_m \cos[\Delta k_{m,n}(\omega)r] \right) \right.$$

Équation 13

où $\Delta k_{m,n} = k_r^m(\omega) - k_r^n(\omega)$ désigne la différence des nombres d'onde horizontaux des modes d'index m et n , et $A_n = |\psi_m(z_s)\psi_m(z_r)/\sqrt{k_{rn}(\omega)}|$. Pour chaque distance source-récepteur r , en supposant la densité constante dans la colonne d'eau, le terme Q devient une constante et l'intensité acoustique s'exprime comme une composante continue modulée par un terme en cosinus. Ainsi pour un couple de modes (m,n) , on a des maxima et des minima suivant la valeur du produit $\Delta k_{m,n}(\omega)r$. Pour chaque fréquence et une position de la source données, les modes peuvent ainsi interagir en phase ou en opposition de phase, engendrant des sommations constructives ou destructives. Cette propriété se manifeste dans le plan temps-fréquence par la présence de pattern d'interférences (Figure 66). En corrigeant l'Équation 13 du terme de divergence géométrique (Q), l'intensité acoustique s'écrit suivant l'Équation 14 :

$$I(r, f) = \gamma_s(f) \left(\sum_n A_n^2 + 2 \sum_{n \neq m} A_n A_m \cos[\Delta k_{m,n}(\omega)r] \right)$$

Équation 14

Les différences de nombre d'ondes horizontaux sont donc accessibles par transformation de Fourier suivant la distance de l'intensité acoustique exprimé dans le plan (r,f) .

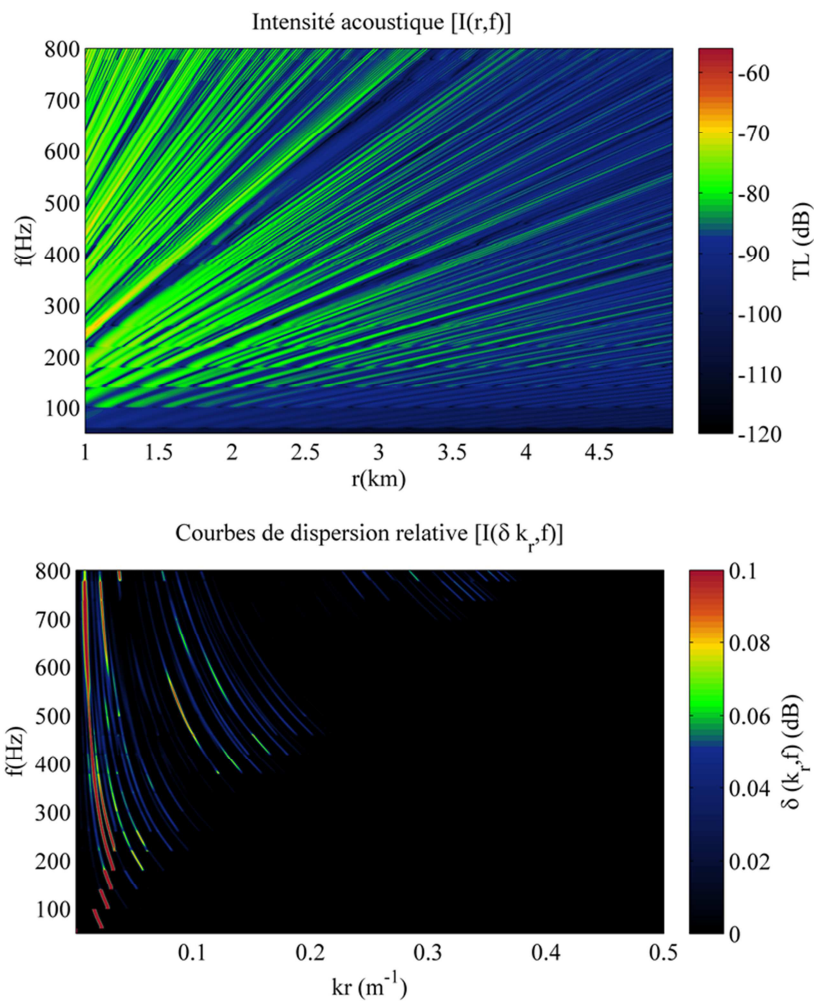


Figure 66 : Intensité acoustique et courbes de dispersion relatives pour un canal acoustique constitué d'une colonne d'eau ($c_w = 1500$ m/s) sur un fond marin fluide ($c_b=1700$ m/s, $\rho=1.8$ g/cm², $\alpha = 0.1$ dB/λ). L'intensité acoustique montre le pattern d'interférence (le battement entre modes propagatifs). Les courbes de dispersion relatives sont obtenues par transformée de Fourier de l'intensité acoustique ci-dessus.

16.2.1.2 Le bruit rayonné par les navires

Lorsqu'un navire réalise une radiale à proximité d'un hydrophone dans un canal petit fond, il émet un bruit large bande basse fréquence se propageant suivant la théorie des modes décrite précédemment. Chaque fréquence excite alors plusieurs modes de propagation qui interagissent pour créer un réseau d'interférences dans le plan temps-fréquence. Lorsque le navire transite en ligne droite, le spectrogramme est équivalent à l'intensité acoustique dans le plan distance-fréquence (on convertit le temps en distance en utilisant les paramètres de navigation du bateau, si disponible). La transformée de Fourier en fonction de la distance fournit les courbes de dispersion relatives du canal qui représente la signature vibratoire du canal acoustique. Ces courbes de dispersion relatives sont des observables pour réaliser une estimation des propriétés géo-acoustiques du milieu marin, en choisissant une fonction coût appropriée (Gervaise, Simard, Roy, Kinda, & Menard, 2012).

Gervaise et al. (Shipping noise in whale habitat: Characteristics, sources, budget, and impact on belugas in Saguenay–St. Lawrence Marine Park hub, 2012) montrent par ailleurs que cette signature vibratoire permet d'accéder à la première couche sédimentaire du fond marin, les modes propagatifs pénétrant peu pour les angles de propagation considérés. L'inversion géo-acoustique revient donc à rechercher un milieu acoustiquement équivalent (un guide de Pekeris, Figure 67) possédant les mêmes caractéristiques que le milieu océanique réel.

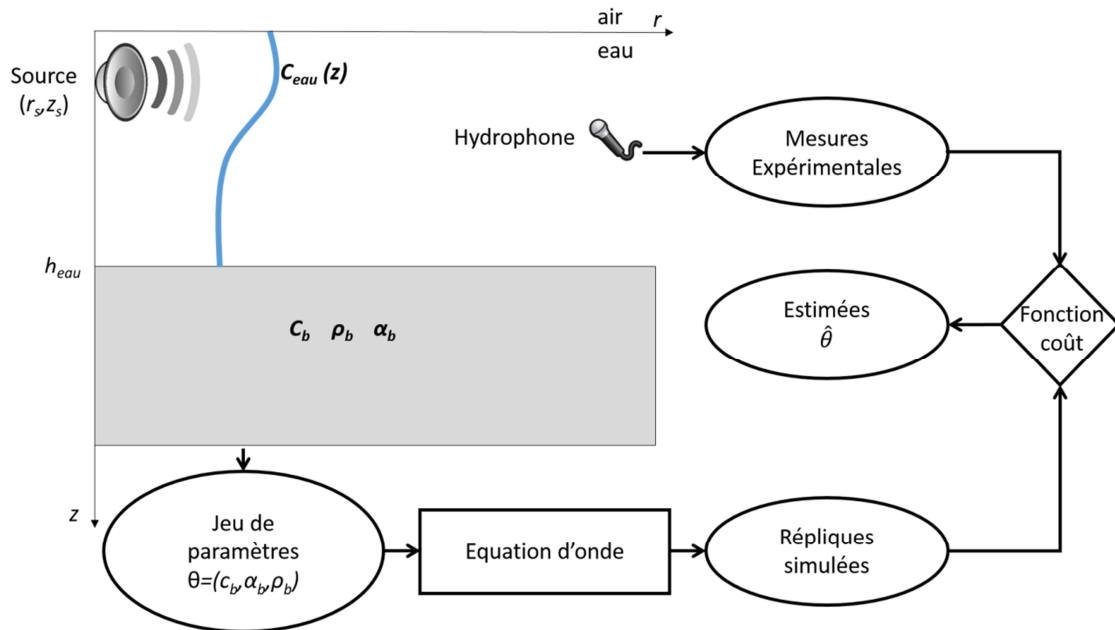


Figure 67 : Modèle d'environnement simplifié et procédure d'inversion géo-acoustique adaptée au bruit large bande rayonné par les navires.

16.2.1.3 La frontière modale

Tout mode propagatif dans un guide de Pekeris vérifie le système d'équations suivant, où c_w et c_b désignent respectivement les vitesses du son dans l'eau et dans le fond marin (Équation 15).

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_m > \theta_c \\ k_r^m = \frac{\omega}{c_w} \sin(\theta_m) \\ k_r^m \geq \frac{\omega}{c} \\ k_z^m = \frac{\omega}{c_w} \cos(\theta_m) \\ k_z^m \leq \frac{\omega}{c_w} \sqrt{1 - \left(\frac{c_w}{c_b}\right)^2} \end{array} \right.$$

Équation 15

On considère la deuxième équation du système d'Équation 15 et on s'intéresse aux cas particuliers des modes d'index 1 et d'index maximal à la fréquence f . Ces deux modes se propagent respectivement avec des angles d'incidence proche de $\pi/2$ et de l'angle critique θ_c . On obtient donc l'Équation 16 dans laquelle N désigne le nombre maximal de modes propagatifs du canal à la fréquence f .

$$\begin{cases} \theta_1 \simeq \frac{\pi}{2}, \rightarrow k_r^1 \simeq \frac{2\pi f}{c_w} \\ \theta_N \simeq \theta_c, \rightarrow k_r^N \simeq \frac{2\pi f}{c_b} \\ \theta_c = \arcsin\left(\frac{c_w}{c_b}\right) \end{cases}$$

Équation 16

La différence des nombres d'onde horizontaux pour ces deux modes propagatifs s'écrit suivant l'Équation 17 et ne fait intervenir que les vitesses du son (dans l'eau et dans le fond) et la fréquence d'émission.

$$\Delta k_r^{N,1} = 2\pi f \left[\frac{1}{c_w} - \frac{1}{c_b} \right]$$

Équation 17

De façon équivalente, la fréquence est donc une fonction affine (la frontière modale) de la différence des nombres d'onde horizontaux suivant l'Équation 18. Lorsque la célérité du son dans l'eau est connue, on n'en déduit la vitesse du son dans le fond marin pour une source acoustique large bande.

$$\begin{cases} f = \frac{\Delta k_r^{N,1}}{2\pi \left[\frac{1}{c_w} - \frac{1}{c_b} \right]} \\ c_b = \frac{2\pi c_w \Delta f}{2\pi \Delta f - c_w \Delta(\Delta k_r^{N,1})} \end{cases}$$

Équation 18

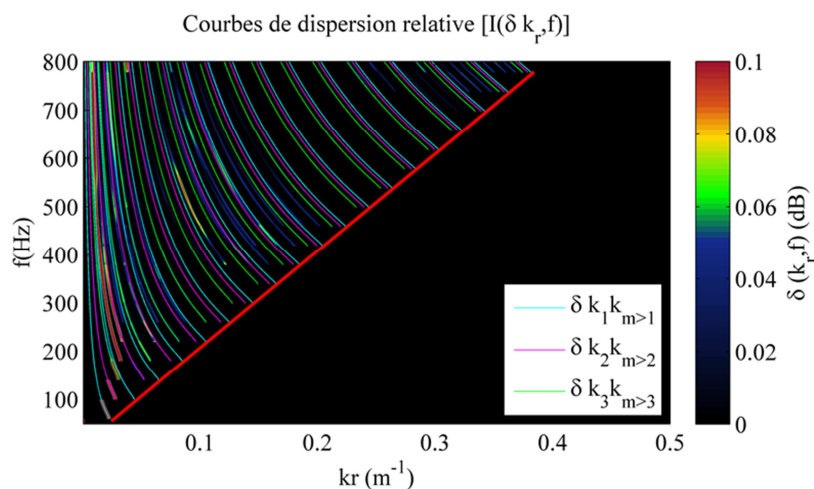


Figure 68 : Courbes de dispersion relatives d'un canal dispersif simulé montrant les différences de nombres d'onde horizontaux. La ligne rouge montre la frontière modale, c'est-à-dire, la différence des nombres d'onde des modes d'index 1 et maximal pour chaque fréquence considérée

16.2.2 Application aux données réelles de la zone d'étude

16.2.2.1 Inversion géo-acoustique par frontière modale

Les données acoustiques acquises *in situ* pour la caractérisation géo acoustiques des fonds marins de la zone d'étude ont été décrites dans l'Annexe 3. Le navire support de la mesure est utilisé comme source sonore pour mesurer les conditions de la propagation acoustique. Un échantillonnage spatial a été effectué en réalisant plusieurs hippodromes constitués de plusieurs radiales acoustiques (Figure 69a). On procède ainsi comme suit :

- ✓ Pour chaque hippodrome, on calcule le spectrogramme (T-F) des enregistrements acoustiques correspondants (Figure 69b)
- ✓ On calcule ensuite la distance source-récepteur en utilisant les données de trajectographie de la bouée dérivante et du navire (Figure 69b)
- ✓ On sélectionne ensuite les parties du spectrogramme correspondant à des trajectoires rectilignes présentant des patterns d'interférences (Figure 69b).
- ✓ En remplaçant l'axe du temps par la distance source-récepteur dans la représentation temps-fréquence, on construit l'intensité acoustique dans le plan distance-fréquence (Figure 69c) dont la transformée de Fourier fournit la carte des courbes de dispersion relatives (Figure 69d).
- ✓ On déduit la vitesse du son dans le fond marin connaissant la vitesse du son dans l'eau calculée à partir des propriétés physico-chimiques de la colonne d'eau.

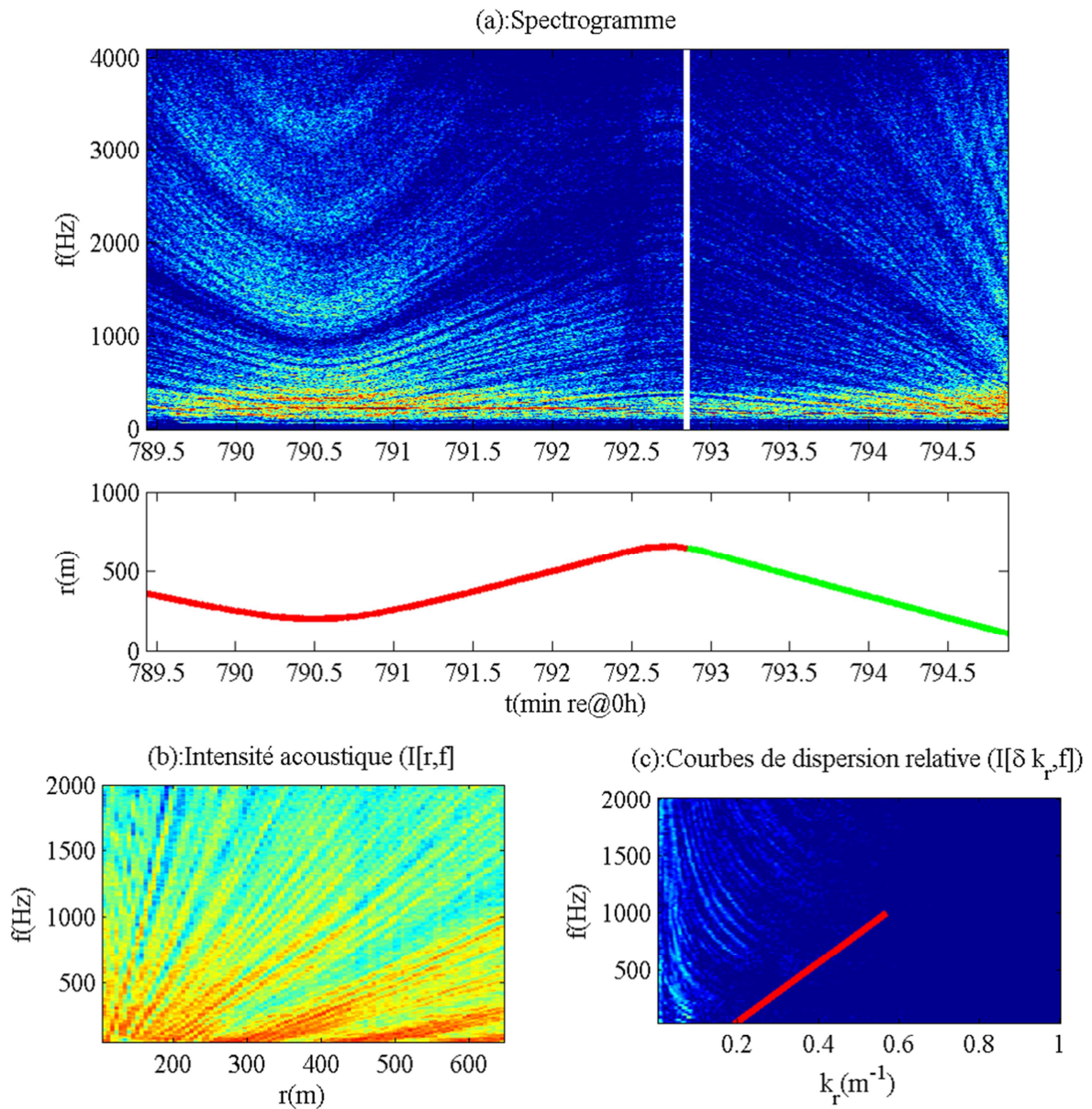


Figure 69 : (a) spectrogramme du bruit bande rayonné par le bateau, ainsi que la distance source-récepteur. La partie verte de courbe correspondant à une trajectoire rectiligne donc la portion du spectrogramme correspondante est délimitée en blanc. (b) Intensité acoustique dans le plan (r,f) et (c), courbes de dispersion relatives du canal et frontière modale estimée

16.2.2.2 Synthèse des résultats

On applique la méthode décrite ci-dessus pour l'ensemble des hippodromes réalisés dans la zone d'étude. Les résultats sont donnés dans le Tableau 38 et les variations spatiales représentées sur la Figure 70. On retrouve une vitesse quasi homogène (1642 ± 17 m/s) sur toute l'étendue de la zone d'étude, représentative d'un fond marin constitué de sédiments fins. Ces résultats sont en accord avec les relevés sismique, pour lesquels on observe une couche superficielle dont la vitesse de l'ordre de 1600 m/s (source : GEOPHYSICAL SURVEY FOR EXPORT CABLES, DIEPPE - LE TRÉPORT) sur un socle rocheux.

Tableau 38 : Vitesse de l'onde de compression et densité dans le fond marin (en m. s⁻¹) estimées en fonction de la position dans la zone d'étude.

Position		Vitesse du son (m.s ⁻¹)	Densité (g.cm ⁻³)
Latitude	Longitude		
50°5,7943'N	1°10,6316'E	1655	1.69
50°5,8483'N	1°10,4925'E	1638	1.67
50°0,3256'N	1°11,4930'E	1637	1.67
50°7,4654'N	1°7,8360'E	1624	1.65
50°7,3429'N	1°16,6376'E	1622	1.65
50°7,7007'N	1°17,3379'E	1630	1.66
50°3,9829'N	1°11,4089'E	1636	1.67
50°4,0398'N	1°11,4152'E	1681	1.72
50°2,6237'N	1°12,9105'E	1646	1.68
50°1,6710'N	1°15,7522'E	1665	1.70
50°1,5077'N	1°15,2193'E	1640	1.67
50°1,4622'N	1°15,2683'E	1635	1.67

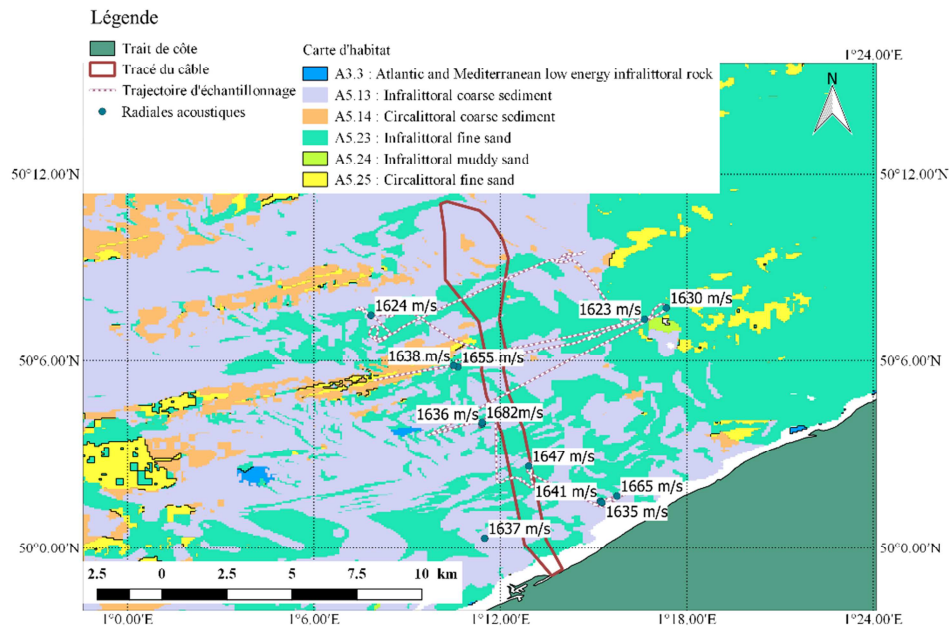


Figure 70 : Variation spatiale de la vitesse du son dans le fond marin

16.3 Réalité sédimentaire vs paramètres géo-acoustiques

Les paramètres géo-acoustiques sont souvent traduits des paramètres physiques du fond marin, mais également estimés à partir de mesures acoustiques. Dans la littérature, il existe des méthodes d'estimation basées sur une exploration d'un grand volume de paramètres géo-acoustiques, pouvant avoir des corrélations entre eux par optimisation d'une fonction coût. Ces méthodes sont généralement coûteuses en temps de calcul et les courbes de dispersions relatives sont peu sensibles à certains paramètres géo-acoustiques.

Physiquement, les propriétés des sédiments ne varient pas indépendamment les uns des autres. Ainsi, il y a une forte probabilité qu'un sédiment dense possède une célérité de compression importante. Dans la littérature, il existe plusieurs modèles reliant les données géo-acoustiques des sédiments marins (célérité de compression, célérité de cisaillement, atténuation) et la densité avec les propriétés géophysiques comme la porosité n du sédiment. Le Tableau 39 et la Figure 75 résument les modèles disponibles à notre connaissance dans la littérature. On remarque que les sédiments compacts présentent des célérités de compression plus importantes que les sédiments poreux.

Nous avons donc pris le parti de modéliser le lien entre les propriétés géo-acoustiques des sédiments afin de faciliter la convergence de l'inversion passive. Certes, cette méthode contraint le sédiment trouvé à suivre le modèle, mais ne s'éloigne pas trop de la réalité physique. Nous avons retenu la paramétrisation d'Hamilton-Bachman qui est largement utilisée pour l'inversion et notamment dans les travaux avancés en inversion du bruit des navires (Heaney, 2004). Cette paramétrisation exprime la célérité du sédiment et sa densité en fonction de la taille des grains avec les formules suivantes :

$$c_b = \frac{c_w}{1.18 - 3.34\phi + 0.0013\phi^2}$$

$$\rho = \frac{28.85 - \phi}{10.275}$$

$$\phi = -\log_2(\mu)$$

Équation 19

avec μ taille moyenne des grains en mm. A partir de l'estimation de la célérité de compression décrite dans la section précédente, on en déduit la densité des sédiments mais ainsi que leurs variations spatiale (Tableau 37 et Figure 74).

Tableau 39 : Liste des modèles théoriques liant vitesse de compression et porosité du sédiment marin (source : Garlan, 2004)

Formule	Domaine d'application	Auteurs
$C_p = 22.906 n + 0.14977 n^2 + 2367.1$	Sédiments marins	Roehne et al
$C_p = 1000 (1631 - 17.80 n + 0.12 n^2) * C_{eau}$	Sédiments marins	Akal, 1972
$C_p = 2367 - 22.91 n + 0.15 n^2$	Sédiments marins	Anderson, 1974
$C_p = 2782.6 - 34.997 n + 0.2348 n^2$	Sédiments marins (20°C, 5 atm)	Bennel, 1979
$C_p = 2502.0 - 23.45 n + 0.14 n^2$	Plateau continental (23°C, 1 atm)	Hamilton et Bachman , 1982
$C_p = 1410.6 + 1.177n$	Sédiments abyssaux pélagiques (23°C, 1 atm)	Hamilton et Bachman, 1982
$C_p = 1564.6 - 0.597n$	Sédiments abyssaux turbiditiques (23°C, 1 atm)	Hamilton et Bachman, 1982
$C_p = 2750 - 2870 n + 1600 n^2$	Sédiments argileux	Guillaume et al, 1991
$C_p = 2090 n + 2975 n^2$	Sédiments carbonatés	Guillaume et al, 1991

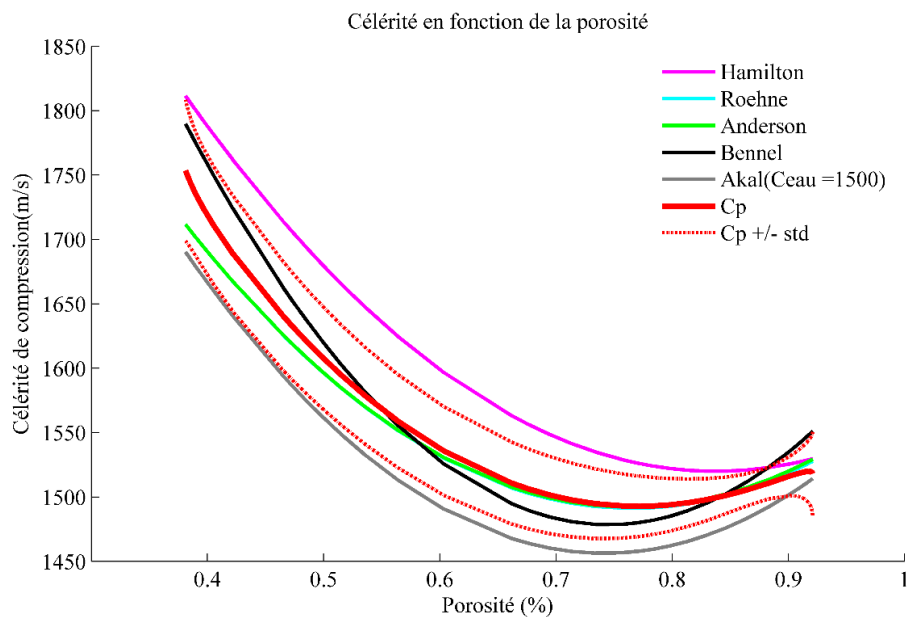


Figure 71 : Célérité de compression de l'onde acoustique en fonction de la porosité. On remarque que plus le sédiment est compact, plus la célérité de compression est élevée.

17 Annexe 6 : Note sur les seuils utilisés et les recommandations émises par les autorités de l'état.

Cette note a été rédigée par Cédric Gervaise le 13 Avril 2017 et amendée par Delphine Mathias le 7 Février 2018 en complément de l'étude d'impact. Elle met à jour et commente le choix des seuils utilisés dans l'étude d'impact.

L'autorité environnementale indique qu'il convient de prendre les seuils d'impact « les plus pessimistes pour l'évaluation de l'étude d'impact ».

Notre étude a été réalisée au premier semestre 2016 en se basant sur la référence bibliographique disponible à date : Southall et al. (2007) :

- Southall, B., Bowles, A., Ellison, W., Finneran, J., Gentry, R., Greene, C., et al. (2007). Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Initial Scientific Recommendations. *Aquatic Mammals*, 33 (4), 411-521.

Depuis, deux documents ont été publiés et identifiés par les services de l'état :

- REF1 NOAA (2016) : D'un draft (mars 2016) du document NOAA (2016) paru au final en juillet 2016 « Technical Guidance for assessing the effects of anthropogenic sound on marine mammal hearing – underwater acoustics thresholds for onset of permanent and temporary threshold shifts » NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-55, July 2016
- REF2 : “Marine mammals and underwater noise in relation to pile driving – revision of assesement”, December 2015.

Il faut noter que les deux références REF1 et REF2 traitent uniquement des impacts acoustiques physiologiques de l'appareil auditifs temporaires (TTS) et permanents (PTS). La REF2 rapporte uniquement les seuils pour le battage de pieux et est hors sujet pour l'évaluation de l'impact acoustique des travaux de raccordement du parc éolien en mer de Dieppe-Le Tréport qui n'implique pas de battage. Les nouveaux seuils du rapport NOAA (2016) concernent uniquement les cétacés, pinnipèdes et siréniens. Ainsi, aucune modification n'est apportée aux seuils de tolérance des poissons.

Cette note technique présente les nouveaux seuils de tolérance acoustique des cétacés (“hautes frequences”, “moyennes frequences” et “basses frequences”) et pinnipèdes de NOAA (2016). Les distances de risques d'impact pour ces categories de mammifères marins pour les seuils de Southall (2007) et NOAA (2016) sont ensuite rapportées et les differences sont discutées.

Nouveaux seuils et fonctions de transfert auditives de NOAA (2016)

Southall et al. (2007) propose des seuils pour le dérangement comportemental et pour les impacts acoustiques physiologiques de l'appareil auditifs temporaires (TTS) et permanents (PTS) alors que les deux références REF1 et REF2 traitent uniquement des

impacts acoustiques physiologiques de l'appareil auditifs temporaires (TTS) et permanents (PTS).

Les seuils utilisés pour le dérangement comportemental de Southall et al, 2007 ne sont pas remis en cause par NOAA 2016 puisque pas abordé.

Concernant les impacts acoustiques physiologiques de l'appareil auditifs temporaires (TTS) et permanents (PTS), les seuils diffèrent entre Southall et al, 2007 et ceux de NOAA 2016 (cf Tableau 40) avec une tendance à l'abaissement systématique des seuils (+ pessimiste) pour NOAA 2016 (cf Tableau 41).

Tableau 40 : Recensement des seuils d'impact Southall et al, 2007 et NOAA 2016

	type of acoustics impacts	type of sound	Cetacean Low Frequency Hearing group (LF)	Cetacean Mid Frequency Hearing group (MF)	Cetacean High Frequency Hearing group (HF)	Phocid pinniped Underwater group (PW)	Otariid pinniped underwater group (OW)	
Southall & al, 2007	PTS ONSET	single pulse	230 dB re. 1μPa* 198 dB re. 1Pa2s**	230 dB re. 1μPa* 198 dB re. 1Pa2s**	230 dB re. 1μPa* 198 dB re. 1Pa2s**	218 dB re. 1μPa* 186 dB re. 1Pa2s**		
		multiple pulses	230 dB re. 1μPa* 198 dB re. 1Pa2s**	230 dB re. 1μPa* 198 dB re. 1Pa2s**	230 dB re. 1μPa* 198 dB re. 1Pa2s**	218 dB re. 1μPa* 186 dB re. 1Pa2s**		
		nonpulses	case 2 230 dB re. 1μPa* 215 dB re. 1Pa2s**	case 3 230 dB re. 1μPa* 198 dB re. 1Pa2s**	case 4 230 dB re. 1μPa* 198 dB re. 1Pa2s**	case 5 218 dB re. 1μPa* 203 dB re. 1Pa2s**		
	TTS ONSET	nonpulses	case 6 195 dB re. 1Pa2s**	case 7 195 dB re. 1Pa2s**	case 8 183 dB re. 1Pa2s**	case 9 183 dB re. 1Pa2s**		
	Behavioral	single pulse	224 dB re. 1μPa* 183 dB re. 1Pa2s**	224 dB re. 1μPa* 183 dB re. 1Pa2s**	224 dB re. 1μPa* 183 dB re. 1Pa2s**	212 dB re. 1μPa* 171 dB re. 1Pa2s**		
		multiple pulses	[140-180] dB re. 1μPa*** ^	[120-180] dB re. 1μPa*** ^	[90-130] dB re. 1μPa*** ^	[160-200] dB re. 1μPa*** ^		
		nonpulses	[110-140] dB re. 1μPa*** ^	[120-180] dB re. 1μPa*** ^	[90-130] dB re. 1μPa*** ^	[110-130] dB re. 1μPa*** ^		
	NOAA 2016	PTS ONSET	impulsive	219 dB re. 1μPa* 183 dB re. 1Pa2s**	230 dB re. 1μPa* 185 dB re. 1Pa2s**	202 dB re. 1μPa* 155 dB re. 1Pa2s**	218 dB re. 1μPa* 185 dB re. 1Pa2s**	232 dB re. 1μPa* 203 dB re. 1Pa2s**
			non impulsive (+20 dB of TTS ONSET)	case 10 199 dB re. 1Pa2s**	case 11 198 dB re. 1Pa2s**	case 12 173 dB re. 1Pa2s**	case 13 201 dB re. 1Pa2s**	case 14 219 dB re. 1Pa2s**
TTS ONSET (Threshold for TTS = 6dB)		impulsive (-15 dB of PTS ONSET)	213 dB re. 1μPa* 168 dB re. 1Pa2s**	224 dB re. 1μPa* 170 dB re. 1Pa2s**	196 dB re. 1μPa* 140 dB re. 1Pa2s**	212 dB re. 1μPa* 170 dB re. 1Pa2s**	226 dB re. 1μPa* 188 dB re. 1Pa2s**	
		non impulsive	case 15 179 dB re. 1μPa2s**	case 16 178 dB re. 1μPa2s**	case 17 153 dB re. 1μPa2s**	case 18 181 dB re. 1μPa2s**	case 19 199 dB re. 1μPa2s**	

Tableau 41 : Différence de seuil entre Southall et al, 2007 et NOAA 2016 (différence positive : NOAA 2016 est plus pessimiste).

	BF cetacean	MF cetacean	HF cetacean	Phocid in water
Threshold Southall, 2007 – Threshold NOAA 2016 for PTS onset, dB	16 dB	0 dB	25 dB	2 dB
Threshold Southall, 2007 – Threshold NOAA 2016 for TTS onset, dB	16 dB	17 dB	30 dB	2 dB

Cependant pour statuer d'un impact, ces seuils sont comparés au niveau perçu par l'animal (niveau reçu juste avant l'oreille pondéré par la fonction de transfert de l'appareil auditif) et non au niveau reçu :

Impact si (Niveau PERÇU = Niveau REÇU + fonction de transfert auditive > SEUIL).

Impact si (Niveau REÇU > SEUIL- fonction de transfert auditive).

L'évaluation de l'impact implique le seuil et la fonction de transfert auditive. Si NOAA (2016) a révisé les seuils (en les abaissant), NOAA (2016) a aussi révisé les fonctions de transfert auditives en intégrant les connaissances scientifiques acquises de 2007 à 2016. Les fonctions de transfert de NOAA 2016 comparées à celles de Southall, 2007 sont systématiquement plus resserrées en termes de gamme de fréquence entendue (cf Figure 72), ce qui limite le niveau perçu pour NOAA 2016 par rapport à Southall et al, 2007.

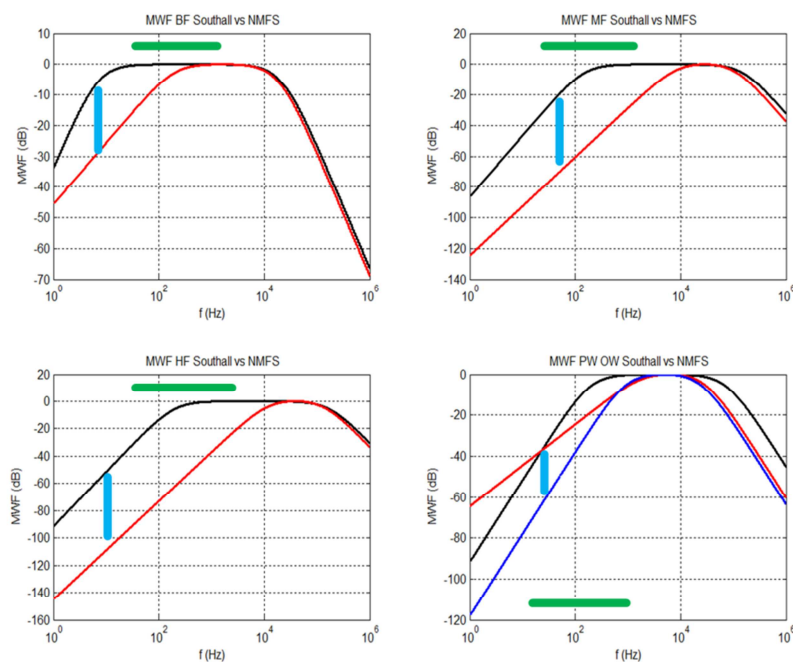


Figure 72 : Comparaison entre les weighting functions de Southall et al, 2007 (noir) and NOAA 2016 (rouge, et rouge pour PW (phoque dans l'eau) and bleu pour OW (otarie dans l'eau)). Segment horizontal vert : bande passante des bruits générés par les travaux de raccordement. Segment vertical bleu : décroissance systématique des fonctions de transfert auditives entre Southall et al, 2007 et NOAA 2016.

Ainsi NOAA (2016) a révisé la connaissance scientifique pour les impacts de réaction comportementale, de TTS et de PTS par rapport à Southall et al. (2007) en :

- Abaissant les seuils d'impact (vision plus pessimiste),
- Resserrant les fonctions de transfert auditives (vision plus optimiste).

Le seul abaissement des seuils ne peut donc pas être attribué comme une situation plus pessimiste systématiquement mais doit être pondéré par le resserrement des fonctions de transfert.

Distances de risques d'impact

Le Tableau 42 rappelle les rayons d'impacts obtenus avec les seuils et les fonctions de transfert auditives de Southall (2017). Le Tableau 43 présente les rayons d'impacts obtenus avec les conséquences cumulées des deux changements identifiés dans NOAA (2016).

Tableau 42 : Synthèse des rayons de risques d'impact pour les cétacés et les pinnipèdes en utilisant les seuils et fonctions de transfert de Southall (2007)

		SL (dB re 1μPa @1m)	Cétacés BF			Cétacés MF			Cétacés HF			Pinnipèdes dans l'eau		
			Réaction (m)	TTS (m)	PTS (m)	Réaction (m)	TTS (m)	PTS (m)	Réaction (m)	TTS (m)	PTS (m)	Réaction (m)	TTS (m)	PTS (m)
P1 Point au large (50°9.864'N, 1°11.10'E)	Pleine mer (coef. 111)	165	341	14	0	143	9	0	140	23	0	153	27	0
		173	1330	58	0	1067	47	0	984	79	0	1198	85	30
		181	3046	87	35	2653	78	24	2494	110	22	2868	116	60
		190	6023	118	65	5515	111	55	5227	489	53	5854	605	92
P2 Point près de la côte (50°1.83'N, 1°12.85'E)	Pleine mer (coef. 111)	165	351	30	0	143	24	0	140	40	0	158	42	0
		173	1357	90	0	1047	79	0	932	111	0	1211	116	62
		181	2978	120	68	2584	111	56	2416	143	54	2824	148	92
		190	5777	151	98	5354	143	87	5108	566	85	5665	682	124

Tableau 43 : Synthèse des rayons de risques d'impact pour les cétacés et les pinnipèdes avec la mise à jour des seuils TTS/PTS et des fonctions de transfert de NOAA (2016)

		SL (dB re 1μPa @1m)	Cétacés BF			Cétacés MF			Cétacés HF			Pinnipèdes dans l'eau		
			Réaction (m)	TTS (m)	PTS (m)	Réaction (m)	TTS (m)	PTS (m)	Réaction (m)	TTS (m)	PTS (m)	Réaction (m)	TTS (m)	PTS (m)
P1 Point au large (50°9.864'N, 1°11.10'E)	Pleine mer (coef. 111)	165	375	15	0	136	8	0	134	20	0	147	24	0
		173	1490	64	0	1003	44	0	935	75	0	1138	81	27
		181	3472	98	39	2467	73	20	2344	105	19	2696	110	52
		190	6926	130	72	5074	103	49	4861	471	47	5444	584	80
P2 Point près de la côte (50°1.83'N, 1°12.85'E)	Pleine mer (coef. 111)	165	386	37	0	136	20	0	134	35	0	152	42	0
		173	1520	105	0	984	71	0	885	104	0	1150	109	51
		181	3395	138	79	2403	99	51	2271	135	46	2655	140	81
		190	6644	170	113	4926	133	79	4750	542	72	5268	658	101

Conclusion

A part pour les cétacés « Basses fréquences », les seuils et les fonctions de transferts auditives de Southall et al. (2007) donnent une vision plus pessimiste ou équivalente des aires d'impact comparée avec celles de NOAA (2016).

Pour les cétacés « Basses fréquences », les seuils et les fonctions de transferts auditives de NOAA (2016) entraînent une légère augmentation des rayons de risques d'impact. L'étude d'impact a montré que seul le rorqual commun parmi les cétacés « Basses fréquences » a une présence occasionnelle dans la zone et un niveau d'enjeu faible.

Ainsi, l'utilisation de Southall et al. (2007) correspond à une approche conservatrice en terme d'évaluation des risques d'impact pour les espèces à enjeu.

L'étude NOAA (2016) a permis de mettre à jour les niveaux acoustiques de sensibilité (seuils d'impact) et les fonctions de transfert auditives de Southall et al. (2007). La prise en compte de ces modifications pour le calcul des rayons de risque d'impact des différents types de travaux ne modifie pas les conclusions de l'étude d'impact acoustique réalisée en 2016.

18 Références bibliographiques

Au, W., & Banks, K. (1998). The acoustics of the snapping shrimp *Synalpheus parneomeris* in Kaneohe Bay. *The Journal of the Acoustical Society of America* , 103 (1), 41-47.

Barazzutti, A., Gervaise, C., & Mars, J. (2014). Marine mammal's directivity in geoacous-. Rhodes, Greece: 2nd international conference and exhibition on Underwater Acoustic, June 2014.


Biotope. (2015). *Synthèse d'études sur la mégafaune marine pour le projet de parc éolien en mer de Dieppe - Le Tréport* . :

Buckingham, M. (2005). Compressional and shear wave properties of marine sediments: Comparisons between theory and data. *The Journal of the Acoustical Society of America* , 117 (1), 137-152.

Buckingham, M. (1997). Theory of acoustic attenuation, dispersion, and pulse propagation in unconsolidated granular materials including marine sediments. *The Journal of the Acoustical Society of America* , 102 (5), 2579-2596.

Buckingham, M. (1998). Theory of compressional and shear waves in fluidlike marine sediments. *The Journal of the Acoustical Society of America* , 103 (1), 288-299.

Carlson, T., Hastings, M., & Popper, A. (2007). *Update on Recommendations for Revised Interim Sound Exposure Criteria for Fish during Pile Driving Activities*. : Memorandum to Suzanne Theiss (California Department of Transportation) and Paul Wagner (Washington Department of Transportation).

- CEDA. (2011). *Underwater sound in relation to dredging - CEDA Position Paper, 7 november 2011*. the Netherlands: Central Dredging Association.
- Chan, A., Giraldo-Perez, P., Smith, S., & Blumstein, D. (2010). Anthropogenic noise affects risk assessment and attention: the distracted prey hypothesis. *Biology Letters* , 6 (4), 458-461.
- Collins, M. (1994). A complete energy-conservation correction for the elastic parabolic equation. *Journal of The Acoustical Society of America* , 95 (5), 2907.
- Collins, M. (1993). An energy-conserving parabolic equation for elastic media. *Journal of The Acoustical Society of America* , 94 (2), 975-982.
- Coquereau, L. G. (2016). Sound production and associated behaviours of benthic invertebrates from a coastal habitat in the north-east Atlantic. *Marine Biology*, 163(5), 1-13. .
- DCSMM. (2008). Directive 2008/56/CE du Parlement Européen et du Conseil du 17 juin 2008, établissant un cadre d'action communautaire dans le domaine de la politique pour le milieu marin (directive-cadre "stratégie pour le milieu marin").
- Erbe, C. a. (2000). *Zones of impact around icebreakers affecting beluga whales in the* .
- Erbe, C. (2009). Underwater noise from pile driving in Moreton Bay, QLD. *Acoustics Australia*, 37(3).
- Erbe, C. (2002). Underwater noise of whale-watching boats and potential effects on killer whales.
- European Parliament. (2004). *Resolution on the environmental effects of high-intensity active Naval sonar*. Brussels: European Parliament.
- GENESIS. (2011). *Review and Assessment of Underwater Sound produced from Oil and Gas Sound Activities and Potential Reporting Requirements under the Marine Strategy Framework Directive*. Aberdeen, Scotland: Genesis Oil and Gas Consultants Ltd.
- Gervaise, C. A. (2015). (2015). Mapping probability of shipping sound exposure level. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 137(6), EL429-EL435.
- Gervaise, C. A. (2015). . Mapping probability of shipping sound exposure level. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 137(6), EL429-EL435.
- Gervaise, C. K. (2012). Passive geoacoustic inversion with a single hydrophone using broadband ship noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(3), 1999-2010.
- Gervaise, C., Simard, Y., Roy, N., Kinda, B., & Menard, N. (2012). Shipping noise in whale habitat: Characteristics, sources, budget, and impact on belugas in Saguenay–St. Lawrence Marine Park hub. *The Journal of the Acoustical Society of America* , 132 (1), 76-89.

- Gordon, J., & Northridge, S. (2002). *Potential impacts of acoustic deterrent devices on Scottish marine wildlife*. Scotland: Scottish Natural Heritage Commissioned Report.
- Greene, C.R. (1987), *Characteristics of Oil industry dredge and drilling sounds in the Beaufort Sea*, JASA, 82(4): 1315-1324
- Hamilton, E. (1980). Geoacoustic modeling of the sea floor. *The Journal of the Acoustical Society of America* , 68, 1313.
- Hastings, M., & Popper, A. (2005). *Effects of sound on fish*. Sacramento: California Department of Transportation.
- Heaney, K. (2004). Rapid geoacoustic characterization using a surface ship of opportunity. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* , 29 (1), 88-99.
- Hildebrand, J. (2009). Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean. *Marine Ecology Progress Series* , 395 (5), 5-20.
- Hildebrand, J. (2005). Impacts of anthropogenic sound. Dans J. Reynolds III, W. Perrin, R. Reeves, S. Montgomery, & T. Ragen, *Marine mammal research: conservation beyond crisis* (pp. 101-124). Baltimore, Maryland: The Johns Hopkins University Press.
- Hlawatsch, F., & Boudreaux-Bartels, G. (1992). Linear and quadratic time-frequency signal representations. *IEEE signal processing magazine* , 9 (2), 21-67.
- International Fund for Animal Welfare. (2008). *Ocean Noise: turn it down, a report on ocean noise pollution*. Yarmouth Port, Massashusets, USA: IFAW International headquarters.
- International Maritime Organisation. (2009). *Noise from commercial shipping and its adverse effects on marine life*. Marine Environment Protection Committee.
- Johansson, T., & Andersson, M. (2012). *Ambiant underwater noise levels at Norra Midjöbanken during the construction of the Nord stream pipeline*. Zug, Switzerland: Nord Stream.
- Kikuchi, R. (2010). Risk formulation for the sonic effects of offshore wind farms on fish in the EU region. *Marine Pollution Bulletin* , 60 (2), 172-177.
- Kinda, G. B. (2013). (2013). Under-ice ambient noise in Eastern Beaufort Sea, Canadian Arctic, and its relation to environmental forcing. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(1), 77-87.
- López, B., & Mariño, F. (2011). trial of acoustic harassment device efficacy on free-ranging bottlenose dolphins in Sardinia, Italy. *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology* , 44 (4), 197-208.
- Lusseau, D., Christiansen, F., Harwood, J., Mendes, S., Thompson, P., Smith, K., et al. (2012). *Assessing the risks to marine mammal populations from renewable energy devices : an interim approach*. Peterborough, Eng: Joint Nature Conservation Committee.

Madsen, P., Wahlberg, M., Tougaard, J., Lucke, K., & Tyack, P. (2006). Wind turbine underwater noise and marine mammals: implications of current knowledge and data needs. *Marine Ecology Progress Series*, 309, 279–295.

Marine Mammal Commission. (2007). *The Marine Mammal Protection Act of 1972 as ammended 2007*. Silver Spring, MD, USA: NOAA's National Marine Fisheries Service.

Mathias, D., Gervaise, C., & Di Iorio, L. (2016). Wind dependence of ambient noise in a biologically rich coastal area. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 139 (2), 839-850.

MEDDE. (2012). *Energies Marines Renouvelables - Etudes méthodologiques des impacts environnementaux et socio-économiques*. Paris: Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie.

Meißner, K., Schabelon, H., Bellebaum, J., & Sordyl, H. (2006). *Impacts of submarine cables on the marine environment - a litterature review*. Federa lAgency of Nature Conservation.

Merck, T., & Wasserthal, R. (2009). *Assessment of the environmental impacts of cables*. OSPAR Commission, Biodiversity Series.

Mohl, B., Wahlberg, M., Madsen, P., Miller, L., & Sulykke, A. (2000). Sperm whale clicks: Directionality and source level revisited. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 107 (1), 638-648.

National Research Council. (2005). *Marine Mammal Populations and Ocean Noise: Determining When Noise Causes Biologically Significant Effects*. Washington DC: The National Academies Press.

National Research Council. (2003). *Ocean Noise and Marine Mammals*. Washington DC: The National Academies Press.

Nedwell, J., & Edward, B. (2004). *A review of measurements of underwater man-made noise carried out by Subacoustech Ltd, 1993 - 2003*. Hampshire, UK: Subacoustech Environmental Report.

Nedwell, J., & Edwards, B. (2002). *Measurements of underwater man made noise carried out by Subacoustech ltd*. Hampshire, UK: Subacoustech Environemental Report.

Nedwell, J., Brooker, A., & Barham, R. (2012). *Assessment of the underwater noise during the installation of export power calbes at the Beatrice offshore Wind farm*. Hampshire, UK: Subacoustech Environmental Report.

Nedwell, J., Edwards, B., Turnpenny, A., & Gordon, J. (2004). *Fish and marine mammal audiograms: A summary of available information*. Hampshire, UK: Subacoustech Environmental Report.

Nedwell, J., Langworthy, J., & Howell, D. (2003). *Assessment of sub-sea acoustic noise and vibration from offshore wind turbines and its impact on marine wildlife; initial measurements of underwater noise during construction of offshore windfarms, and comparison with background noise*. Hampshire, UK: Subacoustech Environmental Report.

NIRAS. (2016). *Subsea cable interactions with the marine environment - Expert review and recommendations report*. Renewables Grid Initiative.

National Marine Fisheries Service (NMFS) (2016). Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing: Underwater Acoustic Thresholds for Onset of Permanent and Temporary Threshold Shifts. U.S. Dept. of Commer., NOAA. NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-55, 178 p

Norro, A., Haelters, J., Rumes, B., & Degraer, S. (2010). Underwater noise produced by the piling activities during the construction of the Belwind offshore wind farm (Bligh Bank, Belgian marine waters). Dans S. Degraer, R. Brabant, & B. Rumes (Éds.), *Offshore wind farms in the Belgian part of the North Sea: Early environmental impact assessment and spatio-temporal variability* (pp. 37-52). Bruxelles: Royal Belgian Institute of Natural Sciences.

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

Oestman, R., Buehler, D., Reyff, J., & Rodkin, R. (2009). *Technical Guidance for Assessment and Mitigation of the Hydroacoustic Effects of Pile Driving on Fish*. Sacramento, CA: California Department of Transportation.

OSPAR. (2009). *Overview of the impacts of anthropogenic underwater sound in the marine environment*. Récupéré sur www.ospar.org

Payne, R., & Webb, D. (1971). Orientation by means of long range acoustic signaling in baleen whales. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 188, 110-141.

Perrin, W., Würsig, B., & Thewissen, J. (2009). *Encyclopedia of Marine Mammals* (éd. 2e). London: Academic Press.

Pijanowski, B., Villanueva-Rivera, L., Dumyahn, S., Farina, A., Krause, B., Napoletano, B., et al. (2011). Soundscape ecology: the science of sound in the landscape. *BioScience*, 61 (3), 203-216.

Pine, M., Jeffs, A., & Radford, C. (2012). Turbine sound may influence the metamorphosis behaviour of estuarine crab megalopae. *PLoS ONE*, 7 (12), e51790.

Popper, A. F., & McCauley, R. (2004). Anthropogenic sound: Effects on the behavior and physiology of fishes. *Marine Technology Society Journal*, 37 (4), 35-40.

Popper, A., Hawkins, A., Fay, R., Mann, D., Bartol, S., Carlson, T., et al. (2014). *ASA S3/SC1.4 TR-2014 Sound Exposure Guidelines for Fishes and Sea Turtles: A Technical Report prepared by ANSI-Accredited Standards Committee S3/SC1 and registered with ANSI*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing.

Porter, M., & Bucker, H. (1987). Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 82 (4), 1349-1359.

- Porter, M., & Liu, Y. (1994). Finite-element ray tracing. *Theoretical and computational acoustics*, 2, 947-956.
- Purser, J., & Radford, A. (2011). Acoustic Noise Induces Attention Shifts and Reduces Foraging Performance in Three-Spined Sticklebacks (*Gasterosteus aculeatus*). *PLoS ONE*, 6 (2), e17478.
- Quiet Ocean (2016), Etude d'impact Raccordement électrique du parc éolien en mer des îles d'Yeu et de Noirmoutier, RTE
- Reine, K., Douglas, C. & Dickerson, C., (2012). Characterization of Underwater Sound Produced by a Backhoe Dredge Excavating Rock and Gravel. *ERDC TN-DOER-E36*.
- Reine, K., Douglas, C., & Dickerson, C. (2012a). Characterization of Underwater Sound Produced by a Hydraulic Cutterhead Dredge fracturing limestone rock. *ERDC TN-DOER-E36*.
- Richardson, J., Greene, C., Malme, C., & Thomson, D. (1995). *Marine Mammals and Noise*. San Diego: Academic Press.
- Richardson, M. (1997). In-situ, shallow-water sediment geoacoustic properties. *Shallow-Water Acoustics*, 163-170.
- Ross, D. (2005). Ship sources of ambient noise. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 30 (2), 257-261.
- RTE. (2015). *Dossier de concertation - Détermination du fuseau de moindre impact*. : .
- RTE. (2014). *FAB - Interconnexion électrique sous-marine et souterraine entre la France et la Grande Bretagne via Aurigny*. France: Dossier de présentation du projet et de son aire d'étude.
- RTE. (2015). *FAB - Projet de création d'une interconnexion France-Aurigny-Angleterre, Etude d'impact acoustique*.
- RTE. (2013). *Projet de raccordement du parc éolien en mer du Calvados, Etude d'impact acoustique*.
- Simpson, S., Meekan, M., McCauley, R., & Jeffs, A. (2004). Attraction of settlement-stage coral reef fishes to reef noise. *Marine Ecology Progress Series*, 276 (1), 263-268.
- Southall, B., Bowles, A., Ellison, W., Finneran, J., Gentry, R., Greene, C., et al. (2007). Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Initial Scientific Recommendations. *Aquatic Mammals*, 33 (4), 411-521.
- Stoica, P., & Moses, R. (1997). *Introduction to spectral analysis*. Upper Saddle River, New Jersey USA: Prentice Hall.
- Thomsen, F. L. (2006). Effects of offshore wind farm noise on marine mammals and fish. Biola, Hamburg, Germany on behalf of COWRIE Ltd, 6.

Thomsen, F., Lüdemann, K., Kafemann, R., & Piper, W. (2006). *Effects of offshore wind farm noise on marine mammals and fish*. Newbury, U.K.: COWRIE Ltd.

Thomsen, F., McCully, S., Wood, D., Pace, F., & White, P. (2009). *A generic investigation into Noise Profiles of marine dredging in relation to the acoustic sensitivity of marine life in the UK - Technical Report Phase 1, Lowestoft: Marine Aggregate Levy Sustainability Fund (MALSF)*. Plymouth, UK: Centre for the Environment Fisheries and Aquaculture Science (CEFAS).

Villadsgaard, A., Wahlberg, M., & Tougaard, J. (2007). Echolocation signals of wild harbour porpoises, *Phocoena phocoena*. *Journal of Experimental Marine Biology*, 210 (1), 56-64.

Würsig, B., & Richardson, W. (2002). Effects of Noise. Dans W. Perrin, B. Würsig, & J. Thewissen, *The Encyclopedia of Marine Mammals* (pp. 794-802). New-York: Academic Press.

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

Wenz, G. (1962). Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 34 (12), 1936-1956.

Whitford, J. (2007), *Source level of the dredge Columbia and Killer Whale Acoustics report update*, Project n°1021281, May 2007

Zimmer, W. (2004). Sonar systems and stranding of beaked whales. Dans P. Evans, & L. Miller (Éds.), *Proc. Workshop on Active Sonar and Cetaceans* (Vol. 42, pp. 8-13). Denver: ECS Newsletter.