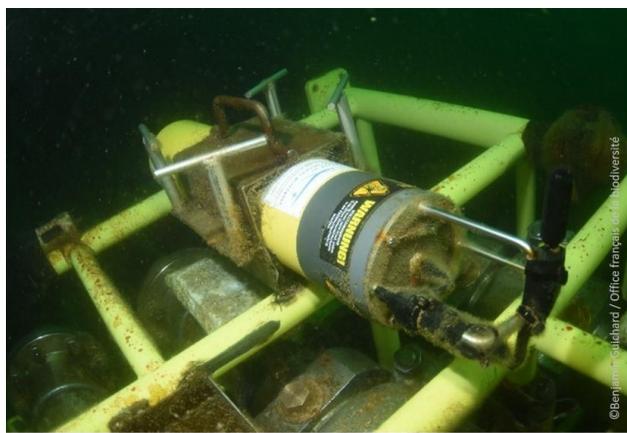


Synthèse de la connaissance scientifique sur les effets sonores des éoliennes flottantes sur la faune marine

Décembre 2021

Contribution au débat public sur le projet de parcs commerciaux d'éoliennes flottantes en Méditerranée française



Titre	Synthèse de la connaissance scientifique sur les effets sonores des éoliennes flottantes sur la faune marine
Version	3.0
Auteurs	Cédric Gervaise Directeur de l'institut de recherche CHORUS, Membre du conseil scientifique de la commission spécialisée éolien flottant du conseil maritime de façade Julie Lossent Directrice technique de l'institut de recherche CHORUS Alexandra Gigou Chargée de mission grands usages maritimes Animatrice technique du conseil scientifique de la commission spécialisée éolien flottant du conseil maritime de façade Délégation de façade maritime Méditerranée de l'Office français de la biodiversité
Date	14/12/2021
Citation	Gervaise, C., Lossent, J., Gigou, A. (2021). , <i>Synthèse de la connaissance scientifique sur les effets sonores des éoliennes flottantes sur la faune marine ; contribution au débat public sur le projet de parcs commerciaux d'éoliennes flottantes en Méditerranée française</i> . 52 pages + annexes

Contributions des auteurs

J.L. a réalisé la synthèse bibliographique nécessaire à l'élaboration de la note.

C.G. a effectué les calculs simplifiés des empreintes acoustiques, des rayons de dérangement comportemental et des risques de pertes d'audition temporaires, permanentes, ou de blessures chez les cétacés, tortues et poissons liés au bruit des parcs éoliens flottants en phase chantier et exploitation.

C.G. et J.L ont rédigé cette note et produit les figures 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 19, 22, 23 et 24.

A.G. a participé à la rédaction des éléments et paragraphes relatifs à la technologie « éolien flottant » et aux retours d'expérience disponibles, aux effets attendus sur la faune marine, aux mesures éviter-réduire-compenser et aux campagnes d'acquisition menées en Méditerranée et a réalisé la carte de bruit ambiant (figure 24 - annexe 1).

A.G. a réalisé la mise en page du document.

Tous les auteurs ont contribué à la rédaction et à la révision de la note.

Table des matières

1	Présentation des auteurs - Institut de recherche Chorus	7
2	Introduction.....	8
3	Le contexte général des effets du bruit anthropique sur la faune marine	9
3.1	Les étapes pour comprendre les effets du bruit sur la faune marine.....	9
3.2	Niveaux sonores et gamme fréquentielle d'un large panel d'activités anthropiques	10
3.3	Les animaux marins sont capables d'entendre les sons	11
3.3.1	Sens et organes auditifs.....	11
3.3.2	Gammes fréquentielles de l'audition animale et des bruits anthropiques.....	12
3.4	Les effets connus des sons sur la faune marine	13
3.5	Les cas étudiés et le niveau de maturité de la connaissance scientifique	14
4	Le cas particulier des effets du bruit des éoliennes flottantes sur la faune marine	16
4.1	Introduction.....	16
4.2	En phase chantier	18
4.2.1	Les travaux sources de bruit pour l'éolien flottant comparés à d'autres sources anthropiques	18
4.2.2	Calculs prédictifs simplifiés.....	20
4.2.3	Synthèse des effets en phase chantier.....	24
4.3	En phase d'exploitation	25
4.3.1	Les sources de bruit pour l'éolien flottant comparées à d'autres sources anthropiques	25
4.3.2	Contenu fréquentiel du bruit émis par l'éolienne flottante HYWIND Demo	27
4.3.3	Études des rayons d'effets du bruit d'une éolienne flottante en production.....	27
4.3.4	Dérangement comportemental à proximité de l'éolienne	27
4.3.5	Effets globaux des fermes éoliennes.....	28
4.3.6	Synthèse des effets attendus en phase de production.....	30
4.4	Comparaison des conclusions de nos calculs par approche simplifiée avec celles des études réalisées lors des tests de l'éolienne FLOATGEN sur le site du SEM-REV	31
4.5	Recommandations pour éviter et réduire les impacts des émissions sonores sur la faune marine	32
4.5.1	En amont du projet de parc éolien.....	32
4.5.2	En phase « Chantier ».....	32
4.5.3	En phase « Exploitation »	33
5	Synthèse	33
5.1	Objectifs abordés par le présent mémoire	33
5.2	Le contexte des effets du bruit sur la faune marine	34
5.3	Les effets durant les chantiers d'installation	34

5.4	Les effets durant la phase de production.....	34
5.5	Certitudes, incertitudes, recommandations, limites.....	35
6	Prérequis en acoustique sous-marine.....	37
6.1	Note préliminaire	37
6.2	Une onde sonore : pression, mouvement particulière et intensité.....	37
6.3	Fréquences, longueurs d’onde, niveaux reçus des ondes sonores, niveaux émis des ondes sonores.....	38
6.4	Rapports d’amplitude, de puissance et de portée pour une différence de décibels données 39	
6.5	Niveau en décibel d’une somme de signaux.....	40
6.6	Règles d’équivalence entre les niveaux sonores de sources sous-marines et les niveaux sonores de sources aériennes.....	41
6.7	Comment appréhender le niveau sonore d’une source sous-marine ?.....	42
6.8	Ordre de grandeur des rayons de portée des sources sonores en fonction de leur niveau relativement au bruit ambiant.....	43
6.9	Quel descripteur acoustique pour évaluer les effets sonores ?.....	43
6.10	Éléments essentiels sur la propagation des ondes sonores sous-marines	44
6.10.1	Phénomène 1 : les pertes géométriques.....	45
6.10.2	Phénomène 2 : atténuation par l’eau de mer (force de frottement et équilibres chimiques).....	45
6.10.3	Phénomène 3 : la réfraction.....	47
6.10.4	Phénomène 4 et 4b : interaction avec le fond et avec la surface	47
6.10.5	Phénomène 5 : fréquence de coupure.....	48
6.10.6	Synthèse des phénomènes de propagation pour l’éolien flottant	49
7	Références citées.....	50
	Annexe 1 : Programmes d’acquisition de connaissance sur le bruit en Méditerranée	53
	Annexe 2 : Synthèse des seuils de dégradation temporaire et permanente de l’audition chez les cétacés et de blessure chez les poissons et les tortues marines	56

Liste des figures

Figure 1 : Les différentes étapes pour comprendre les effets du bruit sur la faune marine	9
Figure 2 : Niveaux sonores des bruits émis par les activités humaines en mer.....	10
Figure 3 : Fréquences émises par les activités humaines en mer	11
Figure 4 : Audition chez les animaux marins.....	12
Figure 5 : Bandes fréquentielles d’écoute privilégiées pour différents groupes d’animaux superposées aux fréquences des sons anthropiques.....	13
Figure 6 : Nombre de publications traitant des effets négatifs des bruits anthropiques sur les poissons (compartiment choisi à titre d’exemple), montrant une nette augmentation des activités de recherche	

depuis 2005, notamment stimulées par le développement de l'éolien posé en mer du Nord (Gervaise et Lossent, 2020)	13
Figure 7 : Les composantes d'une ferme d'éoliennes flottantes.	17
Figure 8 : Niveau de bruit émis à la source par les différentes activités anthropiques.	20
Figure 9 : Carte de trafic maritime (Source Marine Traffic) cumulé sur l'année 2019 en mer du Nord avec un zoom sur une ferme en exploitation au large de l'Angleterre.....	25
Figure 10 : Implantation et photo de l'éolienne HYWIND dont la signature acoustique a été décrite dans Martin et al., 2011	26
Figure 11 : Spectre du bruit rayonné à 1 m de la source par l'éolienne HYWIND Demo extrait de Martin et al., 2011	27
Figure 12 : Éolienne FLOTAGEN et localisation du site d'essai SEM-REV	31
Figure 13 : Illustration du sens de la pression (p), de la vitesse particulaire (v) et de la vitesse ou célérité de l'onde sonore (c).....	37
Figure 14 : Convention de calcul des niveaux sonores.....	38
Figure 15 : Illustration des précautions requises pour comparer les niveaux sonores aériens et sous-marins exprimés en dB.	41
Figure 16 : Illustration du sens des descripteurs acoustiques utilisés pour étudier les effets sonores	43
Figure 17 : Illustration du sens de pertes en transmission	44
Figure 18 : Identification des phénomènes physiques conditionnant la propagation dans un milieu marin	44
Figure 19 : Pertes en transmission géométriques (sphérique à gauche, cylindrique à droite)	45
Figure 20 : Atténuation par l'eau de mer d'après François et Garisson, 1982.....	46
Figure 21 : Les différents patterns de propagation en fonction des environnements considérés d'après Jensen et al, 2011	47
Figure 22 : Synthèse des phénomènes de réflexion sur la surface et sur le fond.....	48
Figure 23 : Illustration du concept de fréquence de coupure.....	49
Figure 24 : Cartographie du bruit ambiant obtenue par simulation par le SHOM pour renseigner le descripteur D11 DCSMM.....	54
Figure 25 : Localisation des programmes d'acquisition de connaissances sur le bruit ambiant dans le golfe du Lion - P01 à P09	55

Liste des tableaux

Tableau 1 : Proposition de seuils provisoires pour le dérangement comportemental.....	15
Tableau 2 : Niveaux de maturité de la connaissance scientifique par type d'effets et par groupe d'animaux.....	16
Tableau 3 : Liste des activités bruyantes avec leurs caractéristiques acoustiques en lien avec les installations des éoliennes flottantes.....	18
Tableau 4 : Liste des activités bruyantes avec leurs caractéristiques acoustiques en lien avec les installations des postes électriques en mer posés (sous-stations)	19
Tableau 5 : Calcul simplifié des empreintes acoustiques des travaux de mise en place des installations flottantes	21
Tableau 6 : Calcul simplifié des empreintes acoustiques des travaux de mise en place des fondations posées d'une sous-station électrique	21

Tableau 7 : Calcul simplifié des rayons des dérangements comportementaux produits par les travaux de mise en place des installations flottantes	21
Tableau 8 : Calcul simplifié des rayons des dérangements comportementaux produits par les travaux de mise en place des installations posées (sous-station électrique)	22
Tableau 9 : Durée pour ressentir une dégradation temporaire d'audition pour les cétacés - bruit continu.....	22
Tableau 10 : Durée pour ressentir une dégradation permanente d'audition pour les cétacés - bruit continu.....	23
Tableau 11 : Durée pour ressentir une blessure pour les poissons - bruit continu	23
Tableau 12 : Distance de risque de dégradation temporaire de l'audition pour les cétacés - 1 battage	23
Tableau 13 : Distance de risque de dégradation permanente de l'audition pour les cétacés - 1 battage	24
Tableau 14 : Distance de blessure pour les poissons, les œufs et larves de poissons, et les tortues marines - 1 battage	24
Tableau 15 : Niveaux de source dB re.1μPa@1m, [5 Hz, 20 kHz] des éoliennes posées, flottantes et des navires	26
Tableau 16 : Synthèse des effets des fermes éoliennes sur la ressource halieutique	29
Tableau 17 : Synthèse des effets des fermes éoliennes posées sur les cétacés et les phoques	30
Tableau 18 : Masse volumique et célérité du son dans l'air et dans l'eau	38
Tableau 19 : Gamme de fréquences et dénomination des sons.....	38
Tableau 20 : longueur d'onde des sons sous-marins en fonction de la fréquence.....	39
Tableau 21 : Rapport d'amplitudes, de puissances et de portées en fonction de la différence en dB des sources	39
Tableau 22 : Niveau sonore en dB d'une somme de signaux.....	40
Tableau 23 : Niveau de bruit ambiant suivant le modèle de Wenz	42
Tableau 24 : Niveau de sources des navires suivant le modèle de Ross.....	42
Tableau 25 : Niveau de sources des signaux biologiques (invertébrés, poissons, cétacés).....	42
Tableau 26 : Ordre de grandeur des portées des sources sonores en fonction de leur niveau de sources et du niveau de bruit ambiant.....	43
Tableau 27 : Atténuation par l'eau de mer en fonction de la fréquence.....	46
Tableau 28 : Angle limite de rasance en fonction de la nature du fond	48
Tableau 29 : Fréquence de coupure en eaux peu profondes.....	49
Tableau 30 : Importances et spécificités des phénomènes de propagation pour l'éolien flottant	49
Tableau 31 : Descriptions de programmes d'acquisition de mesures in situ en Méditerranée	53
Tableau 32 : Synthèse des seuils de dégradation temporaire et permanente de l'audition chez les cétacés pour les signaux impulsionnels d'après Southall et al, 2019	56
Tableau 33 : Synthèse des seuils de dégradation temporaire et permanente de l'audition chez les cétacés pour les signaux continus d'après Southall et al, 2019	56
Tableau 34 : Synthèse des seuils de blessure pour les poissons et les tortues marines d'après Popper et al, 2014.....	57

1 Présentation des auteurs - Institut de recherche Chorus



Dr. Gervaise Cédric est un expert senior (20 ans d'expérience professionnelle, + 60 publications, + 1500 citations) en acoustique sous-marine et écologie marine. Titulaire d'une Habilitation à Diriger les Recherches (2012). Spécialiste du traitement de données sous-marines, de la propagation acoustique, de l'écologie acoustique et de l'étude des impacts acoustiques anthropiques sur la faune marine.

Il fut pendant 12 ans professeur à l'ENSTA Bretagne, puis chercheur invité pendant 1 an à Pêches et Océans, Canada. Il a créé et a été cotitulaire de la chaire d'excellence CHORUS de la Fondation Grenoble INP. En 2016, Il a créé l'institut de recherche CHORUS (NGO) dont il assure la direction en parallèle d'une activité de chercheur sénior et d'expert en acoustique passive (profil : <https://www.researchgate.net/profile/Cedric-Gervaise>). En 2020, Il a créé l'entreprise SENSEAFR dédiée à la création de capteurs et services innovants pour l'observation de l'environnement. Il est professeur associé en acoustique sous-marine à l'Institut des sciences de la mer de l'université du Québec, Canada. Il est membre du conseil scientifique de la commission spécialisée éolien flottant adossée au conseil maritime de façade Méditerranée.



Dr. Lossent Julie est une experte junior (8 ans d'expérience professionnelle, + 10 publications, + 300 citations) spécialiste de l'écologie acoustique, et des impacts acoustiques anthropiques sur la faune marine. Elle est titulaire d'un diplôme d'ingénieur en Environnement de l'école des Mines (2013) et d'un doctorat (2016) où elle a étudié les effets acoustiques des EMR sur la faune marine et développé des méthodes d'observation innovantes de la faune marine par acoustique passive.

Depuis 2016, elle est chercheuse au sein de l'Institut de recherche CHORUS dont elle assure la direction technique. Plongeuse professionnelle, elle a la charge de l'organisation des expériences en mer (profil : <https://www.researchgate.net/profile/Julie-Lossent>). Elle a créé en 2020, l'entreprise SENSEAFR dédiée à la création de capteurs innovants pour l'observation de l'environnement.



2 Introduction

Le présent document a été rédigé dans l'objectif d'apporter des éléments sur les connaissances actuelles concernant la problématique du bruit sous-marin, en particulier dans le cadre du développement de parcs éoliens offshore en Méditerranée.

Plusieurs lectures du mémoire peuvent ainsi être réalisées selon le niveau de détail et de technicité auquel le lecteur souhaite accéder :

- une lecture rapide, en se référant directement aux conclusions et recommandations de la partie 5, pages 33 à 36 ;
- une lecture approfondie sans développement mathématique (partie 3, page 9 → partie 4, page 16 → partie 5, page 33) ;
- une lecture approfondie avec développements mathématiques (partie 6, page 3737 → partie 3, page 9 → partie 4, page 16 → partie 5, page 33).

Sa rédaction fait suite à une présentation sur ce thème effectuée le 22 mars 2021 par C. Gervaise aux membres du conseil scientifique de la commission spécialisée éolien flottant adossée au conseil maritime de façade (CMF) Méditerranée. À la fin de cette présentation, le conseil scientifique a indiqué que la rédaction d'une note pouvait alimenter avantageusement le débat public et les futures réflexions menées autour du développement de l'éolien flottant en Méditerranée.

Ce document présente une synthèse actualisée des connaissances produites par la communauté scientifique, complétée par des calculs simplifiés permettant de fixer les ordres de grandeur du bruit généré par l'éolien flottant.

Les résultats des calculs simplifiés et conclusions présentés ici n'engagent que les auteurs de la note et ne peuvent être opposés ou se substituer à des résultats émanant d'études d'impact et à des avis de l'autorité environnementale ou des services instructeurs de l'État.

La partie 3 (pages 9 à 16) présente le contexte général des effets des bruits anthropiques sous-marins sur la faune marine. Elle n'est pas spécifique à l'éolien et a pour objectif d'apporter les informations nécessaires pour appréhender globalement les effets du bruit sous-marin induit par les activités humaines sur les animaux.

La partie 4 (pages 16 à 33) se focalise sur le thème spécifique du bruit généré par l'éolien flottant, dans un premier temps durant la phase chantier, puis dans un second temps, durant la phase d'exploitation.

La phase de prospection/exploration n'a pas été développée ici, car commune avec l'éolien posé. Des informations conséquentes sur ce thème sont disponibles dans [Gervaise et Lossent, 2020](#).

Des comparaisons avec l'éolien posé ont toutefois été réalisées pour les phases chantier et exploitation, ainsi que des calculs simplifiés permettant de fixer les ordres de grandeur du bruit généré par l'éolien flottant.

La partie 5 (pages 33 à 36) synthétise les effets potentiels du bruit généré par les éoliennes sur la faune marine en identifiant les connaissances consolidées, mais également les lacunes encore existantes. Elle propose des recommandations pour limiter les effets du bruit généré par les éoliennes sur la faune marine par la mise en œuvre de mesures d'évitement et de réduction, ainsi que des programmes à mener pour combler les lacunes de connaissance identifiées.

La partie 6 (pages 37 à 49) permet aux personnes désireuses de mieux appréhender les développements exposés dans le présent document, de disposer de prérequis en acoustique sous-marine, sans pour autant que sa lecture soit nécessaire à la compréhension globale de la note.

L'annexe 1 (pages 53 à 55) présente un panel représentatif de programmes d'acquisition de connaissances sur le bruit ambiant en Méditerranée, passés, en cours et futurs, mais n'a toutefois pas vocation à être exhaustive.

3 Le contexte général des effets du bruit anthropique sur la faune marine

3.1 Les étapes pour comprendre les effets du bruit sur la faune marine

Pour bien étudier les effets du bruit anthropique sur la faune marine, il faut dans un premier temps décrire les émissions sonores anthropiques, puis comprendre comment ces bruits se propagent de la zone d'activité vers les animaux récepteurs potentiellement impactés, qu'ils soient fixes ou mobiles. D'une part, l'amplitude de l'onde sonore incidente à l'animal est comparée directement à des seuils pour les effets mécaniques qu'elle peut engendrer sur les tissus, et d'autre part, cette onde est propagée à travers l'appareil auditif pour calculer l'amplitude de l'onde perçue par l'animal et la comparer à des seuils pour les effets liés à la perception d'un son gênant induisant un dérangement comportemental ou des réactions de stress.

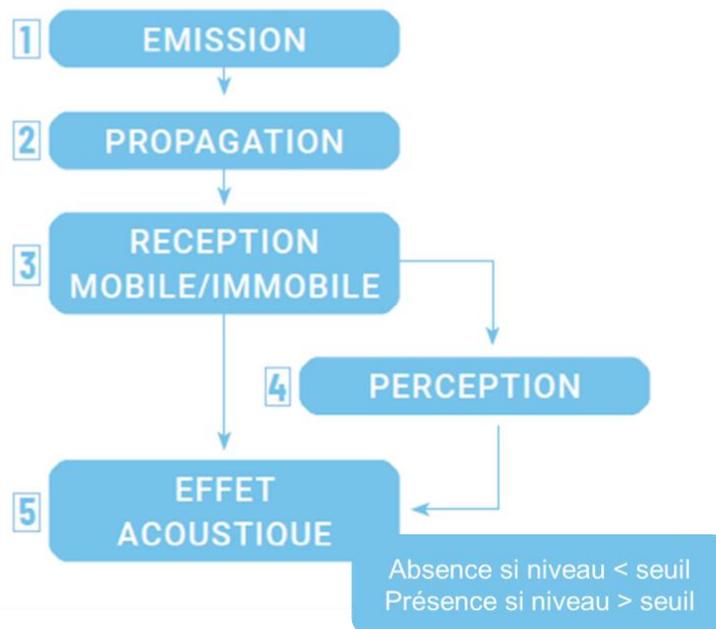


Figure 1 : Les différentes étapes pour comprendre les effets du bruit sur la faune marine

Durant le cycle de développement des projets en mer, cette étude des effets du bruit anthropique a lieu deux fois :

- Avant la réalisation des projets, elle est prédictive et basée sur des modélisations. Ses résultats sont intégrés à l'étude d'impact transmise aux autorités devant délivrer l'autorisation ;
- Durant la réalisation du projet, elle est basée sur la mesure *in situ* des niveaux de bruit émis au plus proche de l'activité, des niveaux propagés vers des zones naturellement sensibles et sur l'observation et le suivi des animaux marins.

3.2 Niveaux sonores et gamme fréquentielle d'un large panel d'activités anthropiques

De nombreuses activités humaines en mer sont génératrices de bruit.

Les émissions sonores peuvent être volontaires lorsque les hommes ont recours à des émissions pour appréhender l'environnement marin, à l'image de l'échographie utilisée en médecine.

Ces émissions permettent d'imager l'intérieur de la croûte terrestre à la recherche de réservoirs de pétrole ou de gaz (géophysique), de caractériser les premières couches de sédiments constituant les fonds marins (géophysique légère), la forme et la profondeur du fond (sonars bathymétriques), ou encore de rechercher des cibles évoluant dans la colonne d'eau (sonar de pêche, sonar militaire).

Les bruits peuvent être involontaires et collatéraux à une activité principale. Ainsi les navires génèrent du bruit principalement à cause de la cavitation¹ de l'hélice et aux bruits et vibrations des machineries transmises dans l'eau par la coque. De nombreuses activités liées aux travaux en mer sont génératrices de bruit : déroctage, dragage, forage, battage et vibrofonçage de pieux, de palplanches, etc.

Les émissions sonores anthropiques liées à un type d'activité peuvent être continues (e.g. bruit d'un navire), impulsives (courtes & fortes) émises une fois (e.g. explosion) ou impulsives mais émises régulièrement (e.g. battage de pieux).

Les bruits émis par les activités anthropiques possèdent une large gamme de niveaux sonores (dB) selon le type d'activités considéré, mais également au sein du même type d'activités (figure 2). Par ailleurs, d'une manière générale et à l'exception des activités sonores volontaires liées à l'utilisation des sonars, les activités humaines génèrent plutôt des fréquences basses ou moyennes entre 20 Hz et 5 000 Hz (figure 3).

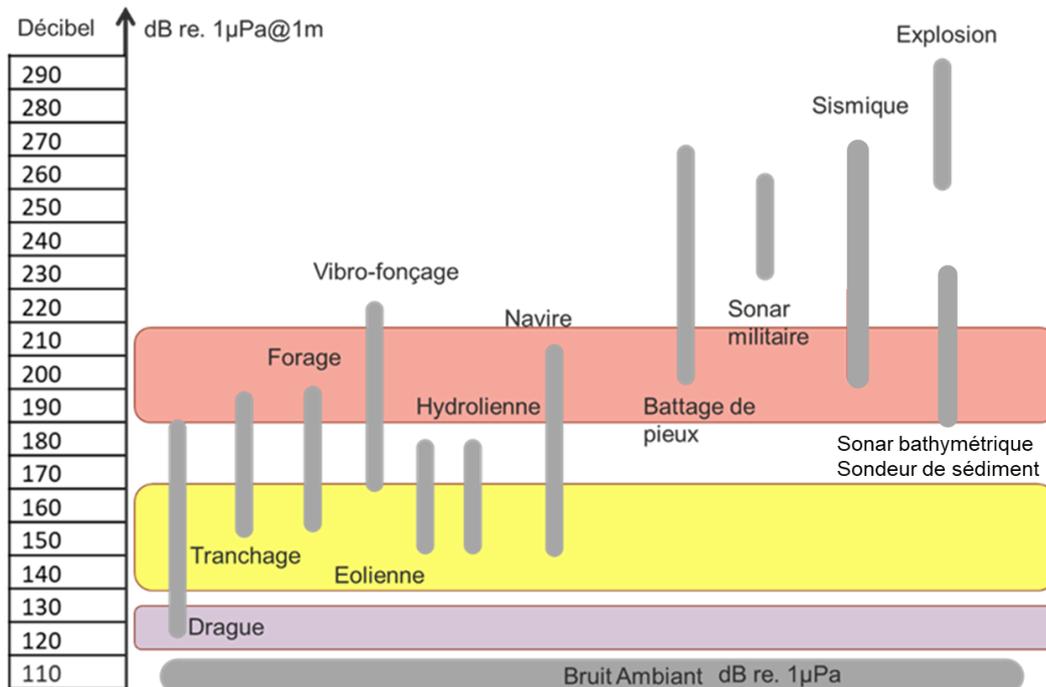


Figure 2 : Niveaux sonores des bruits émis par les activités humaines en mer.

En gris niveau de bruit ambiant, en violet seuil de risque de masquage des communications entre les animaux, en jaune seuil de risque de dérangement comportemental, en orange seuil de risque de blessures/dégradation de l'audition (pour une source de bruit située à 1 m du récepteur).

¹ La cavitation correspond à la naissance de bulles dans un liquide suite à une dépression. Sur une hélice, ces bulles sont créées en bout de pales lorsque l'hélice tourne.

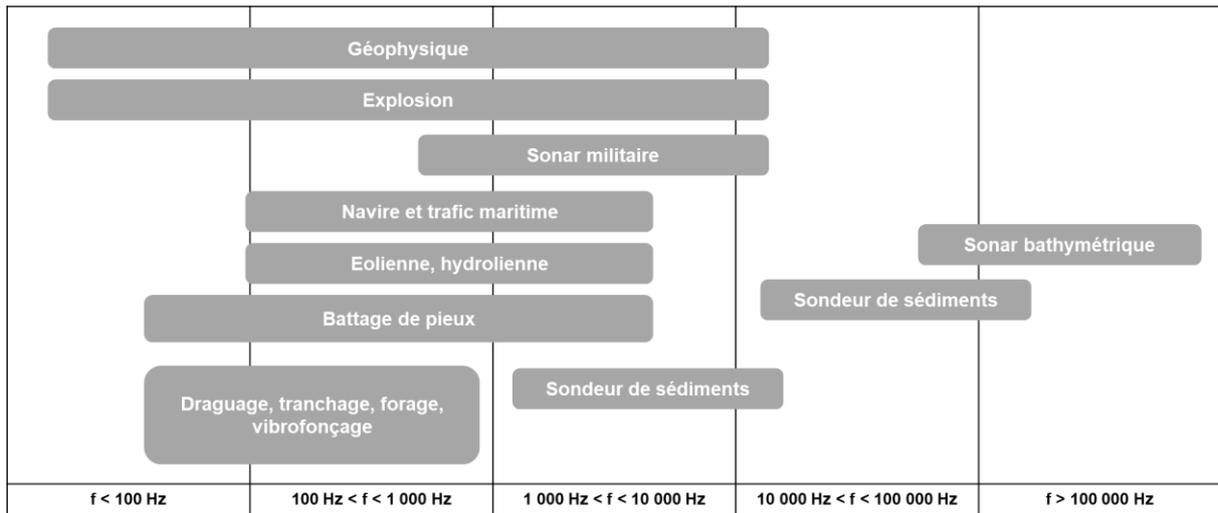


Figure 3 : Fréquences émises par les activités humaines en mer

3.3 Les animaux marins sont capables d'entendre les sons

3.3.1 Sens et organes auditifs

L'absence de lumière dans la grande proportion du volume d'eau constituant les océans a largement conditionné le développement des sens chez les animaux marins en complément de la vue : le goût, le toucher, la capacité à mesurer les champs électromagnétiques, la capacité à mesurer le champ de gravité grâce à des oreilles internes et des statocystes², et l'ouïe grâce à des organes auditifs.

Chez les invertébrés, certains possèdent des yeux (crustacés, *Levrack & Barrientos, 1995*) ou des capteurs de lumière, mais la vue reste peu développée. D'autres ont des chimiorécepteurs³, ou encore des capteurs à terminaisons ciliées.

Parmi la vaste gamme de récepteurs, les poils sensoriels externes et les statocystes internes (chez les crustacés en particulier) réagissent au déplacement causé par l'eau ou le substrat et sont sensibles aux sons du point de vue du mouvement particulière (*Popper et al, 2001*), permettant ainsi l'audition chez les invertébrés.

Les poissons possèdent pour la plupart une vue développée et donc utile pendant la journée. Certains poissons ont développé un sens en particulier comme la ligne latérale, qui leur permet de déceler les mouvements de l'eau et les changements de pression (chez les poissons osseux en particulier), le goût ou encore l'électroréception (détection de champs électromagnétiques, en particulier chez les élasmobranches (*Lisney, 2010*)). Tous les poissons sont capables d'entendre des sons, notamment grâce à leur oreille interne (composée d'otolithes), voire de ressentir des champs de pression lorsque leur vessie natatoire est reliée à leur oreille interne.

La vue, bien que présente chez les cétacés reste peu développée ; elle est compensée en partie par le développement du goût et du toucher, mais surtout principalement par l'ouïe et l'écholocalisation (*Watkins et Wartzok, 1985*). Étant des mammifères, les cétacés entendent les sons grâce à un appareil auditif très proche de celui des hommes. Leur oreille interne est identique, et contient des cellules ciliées disposées de long d'une membrane qui permet la distinction des fréquences. A l'exception de

² Organes sensoriels de nombreux invertébrés, formés d'une vésicule creuse tapissée intérieurement de cellules ciliées ou soies chitineuses et renfermant un statolithe. Le statocyste informe l'organisme de sa position par rapport au champ de pesanteur et même de ses propres mouvements circulaires.

³ Récepteurs sensibles aux stimulations chimiques

certain pinnipèdes (e.g. otaries), les mammifères marins ne possèdent pas de pavillons externes mais un ensemble de tissus gras qui assure la transmission des sons captés à proximité de la mâchoire vers l'oreille interne.

Les tortues marines, quant à elles, sont capables d'entendre les sons grâce un appareil auditif intermédiaire entre ceux des poissons et des cétacés, bien qu'il ait été peu étudié (Popper et al, 2014).

Les mammifères marins, les poissons et les invertébrés ont tiré profit de leur capacité auditive en lui associant des capacités de production sonore afin d'établir un mode de communication entre individus. Certains animaux, notamment les dauphins, ont même développé un sens composite dit « d'écholocation » consistant à émettre des sons et analyser les signaux réfléchis par l'environnement pour reconstruire sa géométrie, identifier des obstacles et des proies.

L'audition est utilisée par les animaux marins pour réaliser un ensemble de fonctions vitales comme se déplacer et s'orienter dans l'espace à différentes échelles, repérer les proies, repérer les prédateurs et les dangers, échanger des informations avec d'autres individus, notamment lors de la reproduction (signalement de la position des partenaires, sélection des partenaires, parade nuptiale, synchronisation des émissions de gamètes), assurer la défense de territoire et entendre les signaux d'alerte, assurer la cohésion des groupes et les relations parents/petits.

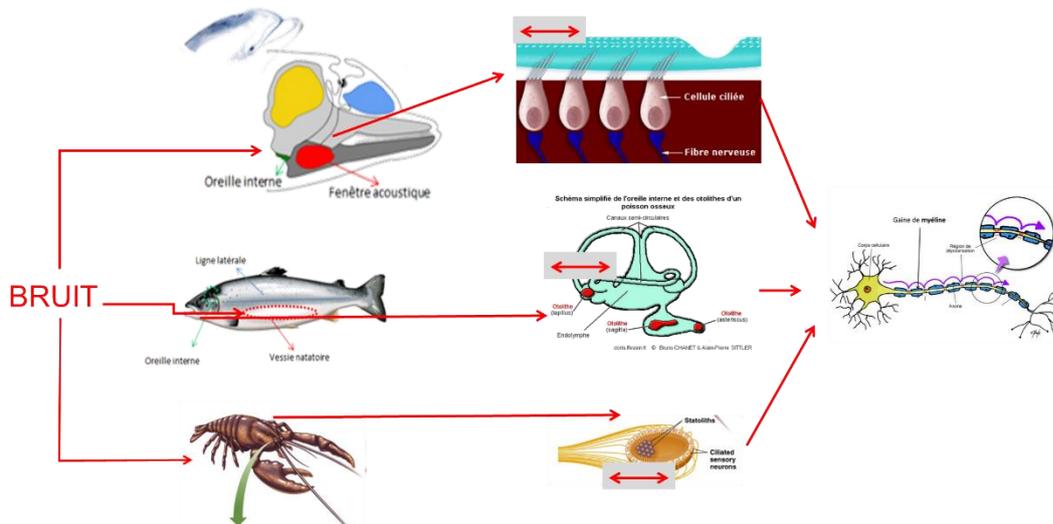


Figure 4 : Audition chez les animaux marins.

Les bruits sont captés par une fenêtre acoustique à proximité de la mâchoire chez les cétacés, par la vessie natatoire ou directement par l'otolithe chez les poissons, par les cils, les antennes ou directement les statolithes chez les invertébrés. L'onde sonore met alors en mouvement les cellules ciliées, les otolithes et les statolithes. Ces mouvements génèrent des signaux dans les cellules nerveuses permettant la perception des sons.

3.3.2 Gammes fréquentielles de l'audition animale et des bruits anthropiques

Les invertébrés et les poissons font usage *in fine* de corps calcaires (statolithes, otolithes) qui vibrent avec l'onde acoustique. La mise en mouvement de cette masse est plus efficace dans les fréquences basses ($f < 1\ 000$ Hz) alors qu'elle est plus difficile voire impossible pour les hautes fréquences ($f > 5\ 000$ Hz). Ainsi, les invertébrés et les poissons ont une audition adaptée aux basses fréquences, constat valable pour les tortues marines également.

Concernant les cétacés, les capacités auditives dépendent des groupes d'espèces :

- les mysticètes (baleines à fanon, e.g. rorqual commun) sont adaptés à l'écoute des basses fréquences ($f < 1\ 000$ Hz) ;
- les odontocètes (baleines à dent, e.g. grand dauphin) sont adaptés aux moyennes fréquences ($1\ 000\text{ Hz} < f < 30\ 000\text{ Hz}$) pour la réception des vocalises et des sifflements, ainsi qu'aux hautes fréquences ($f > 30\ 000\text{ Hz}$) pour la réception des clics d'écholocation.

La communauté scientifique est capable de quantifier les capacités auditives des animaux en mesurant leurs audiogrammes (Nedwell et al, 2004) ; cependant, les informations relatives aux capacités auditives des animaux marins sont peu nombreuses du fait, notamment, de la difficulté à les tester. Par conséquent, les valeurs citées sont à considérer avec précaution.

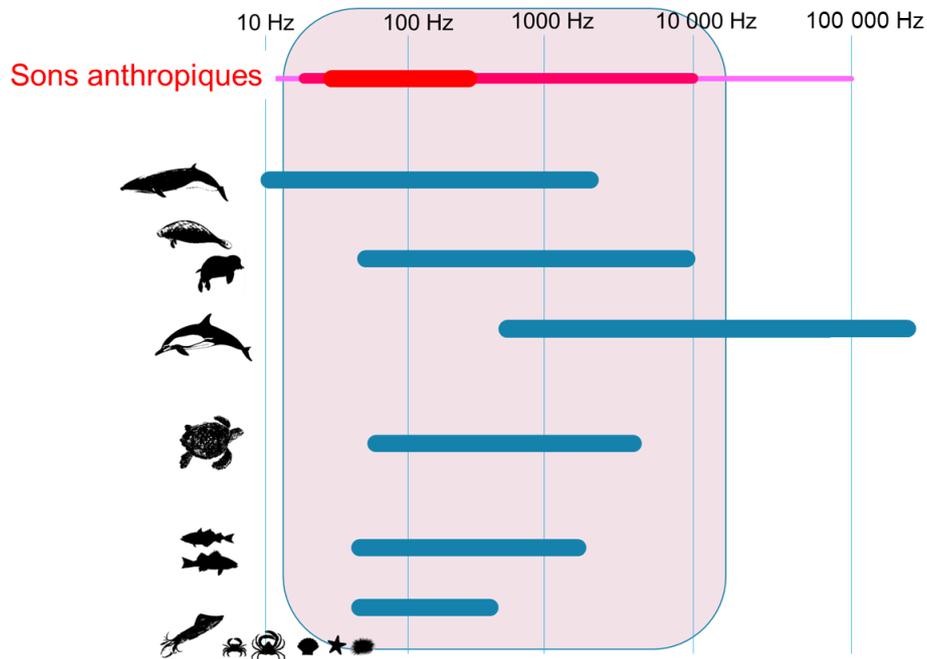


Figure 5 : Bandes fréquentielles d'écoute privilégiées pour différents groupes d'animaux superposées aux fréquences des sons anthropiques.

3.4 Les effets connus des sons sur la faune marine

Depuis les premiers échouages de cétacés constatés après des exercices navals (Frantzis, 2004), la société civile s'est inquiétée des potentiels effets négatifs des bruits sous-marins d'origine humaine sur la faune marine. Depuis une quinzaine d'années (figure 6), grâce à une activité soutenue, la communauté scientifique a démontré que les bruits humains peuvent avoir des effets sur les mammifères marins (cétacés, siréniens, phoques) (Southall et al, 2019), les poissons et les tortues marines (Popper et al, 2014), les invertébrés marins (Day et al, 2017, 2019), le zooplancton (Mc Cauley et al, 2017, Ridcharson et al, 2017).

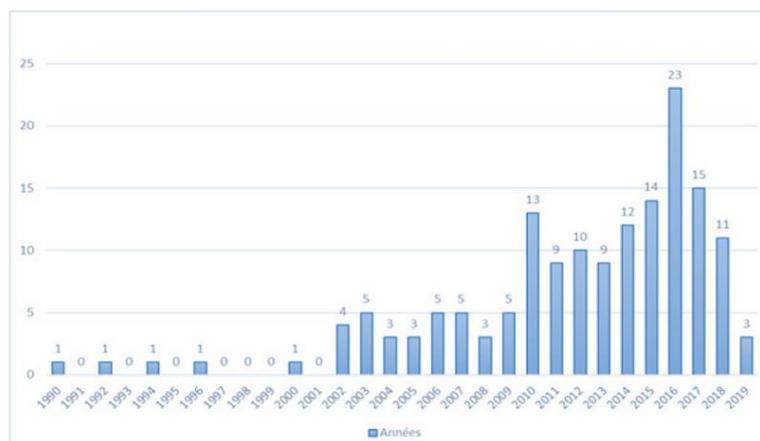


Figure 6 : Nombre de publications traitant des effets négatifs des bruits anthropiques sur les poissons (compartiment choisi à titre d'exemple), montrant une nette augmentation des activités de recherche depuis 2005, notamment stimulées par le développement de l'éolien posé en mer du Nord (Gervaise et Lossent, 2020)

Les effets rapportés par la communauté scientifiques sont très variés ([Popper et al, 2014](#), [Southall et al, 2019](#)).

Certains animaux émettent des sons pour communiquer avec des congénères ou pour se localiser ou localiser des proies ; dans ce cas une augmentation du bruit va engendrer une réduction des rayons de communication et des rayons de chasse ([Aulanier et al, 2017](#)).

En présence d'un bruit fort ou inconnu, les poissons et les invertébrés répondent de la même façon que si l'un de leurs prédateurs était présent à proximité ([Celi et al, 2016](#)). Leur comportement et leur survie se trouvent ainsi altérés. La communauté scientifique rapporte une diminution du rendement de capture des proies ([Magnhagen et al, 2017](#)), une agressivité augmentée ([Ferrari et al, 2018](#)), moins d'implication dans les relations parents-enfants ([Ferrari et al, 2018](#)), une diminution du rayon de fuite face aux prédateurs ([Everley et al, 2016](#)), un changement du profil de nage ou de plongée ([Herbert-Read et al, 2017](#)), une altération de la formation des bancs ou des groupes sociaux ([Bruintjes et Radford, 2013](#)), un éloignement de la source sonore, voire une fuite prononcée. Ces dérangements comportementaux sont souvent associés à des réactions physiologiques en lien avec la mise en place d'un métabolisme de stress (augmentation du rythme cardiaque, du rythme de respiration, du taux d'hormones comme le cortisol) ([Graham et al, 2008](#)).

Une onde sonore est une onde mécanique qui, d'une part, exerce une force sur les surfaces insonifiées, et, d'autre part, met en mouvement les tissus insonifiés. Elle possède ainsi des capacités à endommager ou non les tissus constituant les organes auditifs des animaux. Les bruits sous-marins peuvent par conséquent dégrader l'audition des animaux. Après insonification, les animaux sont assourdis et perdent leur capacité à entendre des sons de faible amplitude.

Cette capacité peut être retrouvée après un certain laps de temps ; dans ce cas on parle de dégradation temporaire de l'audition (TTS : Temporary Threshold Shift au sens de [Popper et al, 2014](#) et [Southall et al, 2019](#)).

Dans d'autres cas, les animaux ne recouvrent pas cette capacité et on parle de dégradation permanente de l'audition (PTS : Permanent Threshold Shift au sens de [Popper et al, 2014](#) et [Southall et al, 2019](#)). Les bruits sous-marins peuvent endommager d'autres organes vitaux comme la vessie natatoire des poissons, on parle alors de traumatismes non auditifs, non mortels ou mortels ([Popper et al, 2014](#)).

Certains effets sont aigus et touchent quelques individus à court terme alors que d'autres effets sont chroniques et peuvent avoir des retentissements à l'échelle des populations.

Tous les effets évoqués précédemment ne s'appliquent pas obligatoirement car ils dépendent de différents paramètres.

En effet, leur existence ou leur absence dépend des caractéristiques des bruits émis (puissance, fréquence, forme, durée) et il existe un cadre méthodologique bien établi (détaillé dans le chapitre 3.1) pour étudier au cas par cas l'existence d'effets en fonction des bruits émis, de l'animal récepteur (espèce, distance à la source, etc.) et du type d'effets.

3.5 Les cas étudiés et le niveau de maturité de la connaissance scientifique

L'étude des effets du bruit sur la faune marine s'effectue pour chaque couple (type d'effets, groupe d'espèces à l'audition similaire). La connaissance scientifique est jugée mature pour ce type d'effets et ce groupe d'espèces si la communauté a pu faire émerger des seuils limites acceptés par tous (consensus au sein de la communauté scientifique, méthodologie et valeurs soumises à un jeu de questions/réponses avec la société civile), basés sur des larges retours d'expériences *in situ* des experts.

À l'heure actuelle, les seuils sont consignés dans deux guides de référence :

- Pour les poissons et les tortues marines : [Popper, A. N., Hawkins, A. D., Fay, R. R., Mann, D. a., Bartol, S., Carlson, T. J., Coombs, S., Ellison, W. T., Gentry, R., Halvorsen, M. B., Iokkeborg, S., Rogers, P., Southall, B., Zeddies, D., & Tavalga, W. \(2014\). Sound exposure guidelines for fishes and sea turtles.](#)
- Pour les cétacés : [Southall, E. B. L., Finneran, J. J., Reichmuth, C., Nachtigall, P. E., Ketten, D. R., Bowles, A. E., Ellison, W. T., Nowacek, D. P., & Tyack, P. L. \(2019\). Marine mammal noise exposure criteria: Updated scientific recommendations for residual hearing effects. *Aquatic Mammals*, 45\(2\), 125–232.](#)

Ces guides exposent des seuils pour les effets aigus et forts en termes de mortalité, de blessure et de dégradations temporaire et permanente de l'audition. L'annexe 3, page 56 expose la synthèse de ces seuils.

Concernant les dérangements comportementaux, il n'existe pas de consensus car les animaux présentent une grande variabilité de réponses à un même bruit en fonction du contexte, de leurs motivations et de l'habituation au bruit. Toutefois le tableau 1 présente une échelle provisoire proposée par les auteurs à partir d'une vaste synthèse de la bibliographie sur le sujet ([Gervaise et Lossent, 2020](#)).

Le tableau 2 présente un état des lieux, à date de rédaction de la présente note, des niveaux de maturité de la connaissance scientifique par type d'effet et par groupe d'espèces animales.

Tableau 1 : Proposition de seuils provisoires pour le dérangement comportemental

Niveaux sonores	120 dB. re 1µPa	140 dB re. 1µPa	160 dB re. 1µPa	166 dB re. 1µPa	175 dB re. 1µPa
Correspond au bruit d'un navire de 20 m voguant à 18 nœuds attendu à :	1 700 mètres	114 mètres	10 mètres	5 mètres	1 mètre
Animaux	Poissons Cétacés	Poissons Cétacés	Poissons Cétacés	Tortues marines	Tortues marines
Effets	Dérangement faible Les animaux sont conscients de la présence d'un bruit.	Dérangement moyen Les animaux réagissent aux bruits.	Dérangement fort Les animaux réagissent fortement aux bruits.	Dérangement moyen Les animaux réagissent aux bruits.	Dérangement fort Les animaux réagissent fortement aux bruits.

Tableau 2 : Niveaux de maturité de la connaissance scientifique par type d'effets et par groupe d'animaux

	Blessure mortelle	Blessure non mortelle	Dégradation permanente de l'audition (PTS)	Dégradation temporaire de l'audition (TTS)	Dérangement comportemental	Rayon d'audition et masquage acoustique	Empreinte acoustique
Bruit ambiant	---	---	---	---	---	---	●
Odontocètes à l'audition spécialiste des basses fréquences	---	---	●	●	●	---	---
Odontocètes à l'audition spécialiste des moyennes fréquences	---	---	●	●	●	●	---
Odontocètes à l'audition spécialiste des hautes fréquences	---	---	●	●	●	●	---
Lamentins et dugongs	---	---	●	●	●	●	---
Poissons sans vessie natatoire	●	●	---	●	●	●	---
Poissons avec vessie natatoire non connectée à l'oreille interne	●	●	---	●	●	●	---
Poissons avec vessie natatoire connectée à l'oreille interne	●	●	---	●	●	●	---
Œufs et larves	●	●	---	●	●	---	---
Tortues marines	●	---	---	---	●	---	---
Oiseaux marins plongeurs	À anticiper						
Odontocètes grands plongeurs	●						
Zooplancton	Qualitatif						
Pêche	Qualitatif						

- Les cases en vert correspondent à des cas où la connaissance scientifique est relativement bien consolidée.
- Les cases en bleu correspondent à des cas où la connaissance scientifique existe mais n'est pas totalement consolidée.
- Les cases en gris correspondent à des cas où les seuils ne sont pas donnés.
- Concernant les oiseaux marins plongeurs, plusieurs auteurs et études ont suggéré qu'il faudrait dans un futur proche étudier l'existence ou l'absence d'effets des sons sous-marins lors des plongées.
- Les odontocètes grands plongeurs (baleines à bec, globicéphales...) sont traités spécifiquement car le dérangement comportemental peut provoquer une réaction de fuite qui lors d'une plongée profonde peut provoquer des accidents de décompression aux conséquences néfastes alors que les conséquences d'un même dérangement peuvent être anodins pour d'autres cétacés plongeant moins profond.
- La ligne « pêche » correspond à la connaissance des conséquences des sons humains sur les quantités de prises, cette connaissance est principalement élaborée pour la géophysique pétrolière.

4 Le cas particulier des effets du bruit des éoliennes flottantes sur la faune marine

4.1 Introduction

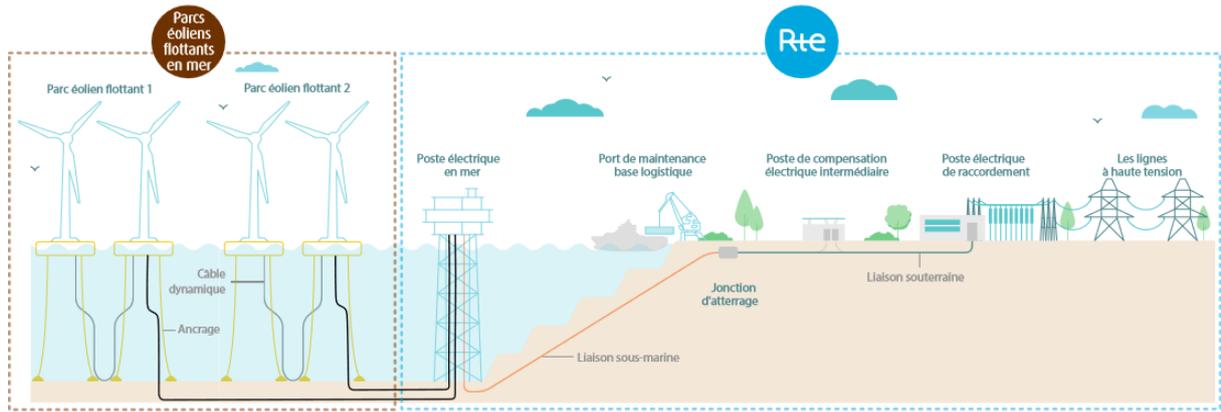
Les effets d'un projet de fermes éoliennes en mer s'évaluent sur quatre phases du cycle de vie :

1. la phase de prospection du futur site d'implantation,
2. la phase de construction,
3. la phase de d'exploitation, comprenant la maintenance en conditions opérationnelles,
4. la phase de démantèlement.

La phase d'analyse et d'exploration du futur site n'est pas spécifique au contexte de l'éolien flottant et ses effets sonores sont bien connus et étudiés (*Gervaise et Lossent, 2020*). Elle ne fait pas l'objet de développements particuliers dans la présente note.

Concernant l'éolien flottant, les conditions de démantèlement se rapprochent des conditions de construction mais sont mal connues des auteurs de la présente note, c'est pourquoi les effets de cette phase ne sont pas spécifiquement abordés ici.

La présente note se focalise donc sur les phases de chantier et d'exploitation/maintenance.



Types d'ancrage pour l'éolien flottant

1. Support semi-submersible à lignes d'ancrage libres
2. Support barge à lignes d'ancrage libres
3. Support flottant à lignes d'ancrage tendues (TLP)

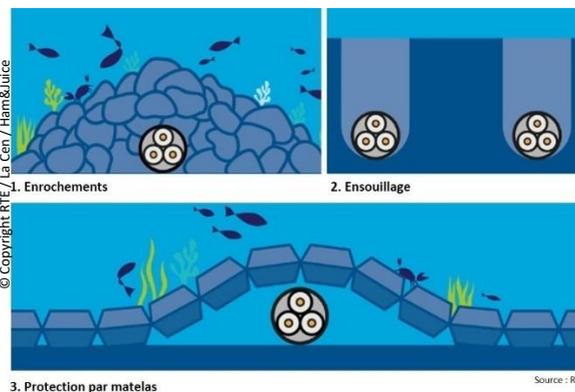
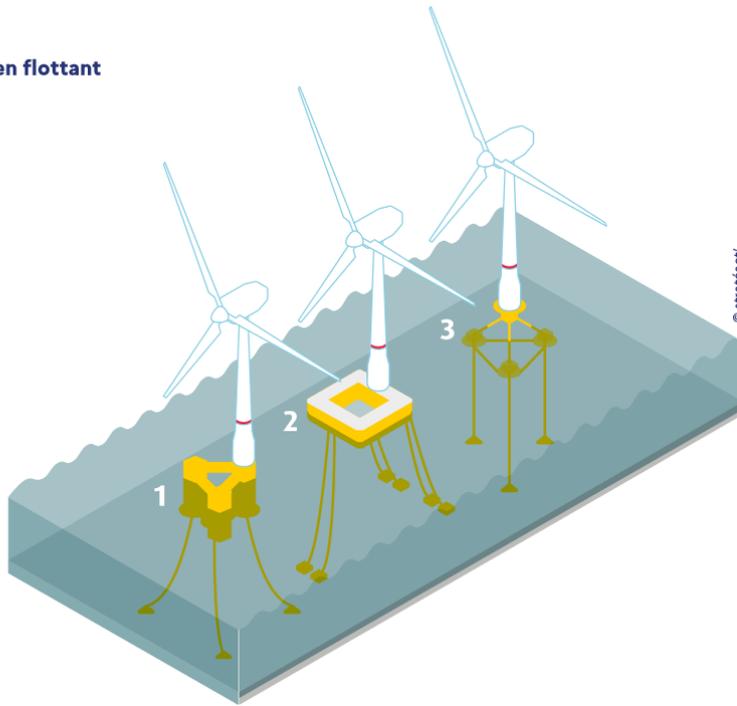


Figure 7 : Les composantes d'une ferme d'éoliennes flottantes.

En haut, vue d'ensemble d'un parc éolien et de son raccordement électrique ; au milieu, présentation des principaux types d'ancrage des éoliennes flottantes ; en bas à gauche, sous-station électrique sur jacket ; au milieu et à droite, différentes techniques d'installation et de protection des câbles sous-marins. Illustrations extraites des fiches n°15 et n°16 - Débat public EOS, projet d'éoliennes flottantes en Méditerranée et de leur raccordement.

4.2 En phase chantier

4.2.1 Les travaux sources de bruit pour l'éolien flottant comparés à d'autres sources anthropiques

L'implantation d'une ferme d'éoliennes flottantes comprend : la pose et la protection de la liaison sous-marine du raccordement (ainsi que la pose du poste électrique en mer - figure 7) et sa jonction avec la partie terrestre, l'installation des ancres et des lignes d'ancrage, le remorquage et la connexion des éoliennes flottantes aux lignes d'ancrage, la pose et la connexion des câbles inter-éoliennes aux éoliennes flottantes, et enfin la mise en service du parc et de son raccordement.

Pour l'installation des éoliennes flottantes, plusieurs activités sont particulièrement génératrices de bruit :

- présence et mouvement des embarcations mobilisées,
- installation des ancres et des lignes d'ancrage,
- tests de bonne tenue des ancrages,
- pose et protection des câbles électriques de raccordement.

Le tableau 3 présente les niveaux sonores rayonnés par ces différentes activités.

Tableau 3 : Liste des activités bruyantes avec leurs caractéristiques acoustiques en lien avec les installations des éoliennes flottantes

Activité	Niveau sonore (dB re. 1µPa@1m)	Bande fréquentielle	Commentaires
Présences des embarcations	150 dB - 180 dB ⁽¹⁾	20 Hz - 5 000 Hz	- Dépend du navire et de ses conditions d'utilisation. - Laisse aussi une empreinte sonore lors des transits. - Bruit continu durant la phase chantier.
Pose des ancres	150 dB - 160 dB ⁽²⁾	20 Hz - 5 000 Hz	- Peu de données publiées. - Le niveau sonore reporté est celui de la dépose d'enrochement. - Dépend du type d'ancre et de la nature du fond. - Bruit temporaire durant la phase chantier.
Tests de bonne tenue des ancrages	180 dB - 195 dB ⁽¹⁾	20 Hz - 5 000 Hz	- Réalisés par traction par un navire à fort régime. - Bruit temporaire durant la phase chantier.
Protection des câbles électriques	150 dB - 195 dB ⁽²⁾	20 Hz - 5 000 Hz	- Dépend de la technique employée et de la nature du fond. - Du moins fort au plus fort : pose d'enrochement, de coquilles ou de matelas béton, charruage, water-jetting, tranchage...

⁽¹⁾ Ross, 2005 ⁽²⁾ données CHORUS

Pour les fermes d'éoliennes flottantes, les sous-stations électriques peuvent être également flottantes (peu développées à l'heure actuelle) ou posées. Dans le cas de sous-stations flottantes, les activités bruyantes et leurs caractéristiques acoustiques sont décrites dans le tableau 3.

Dans le cas de sous-stations posées sur jacket, aux activités bruyantes exposées précédemment vient s'ajouter le bruit de mise en place des fondations. Ce bruit dépend de la technique utilisée : forage, vibrofonçage ou battage des pieux. Le tableau 4 présente les niveaux sonores rayonnés par ces différentes activités.

Tableau 4 : Liste des activités bruyantes avec leurs caractéristiques acoustiques en lien avec les installations des postes électriques en mer posés (sous-stations)

Activité	Niveau sonore (dB re. 1µPa@1m)	Bande fréquentielle	Commentaires	
Pose gravitaire	150 dB - 180 dB ⁽¹⁾	20 Hz - 5 000 Hz	- Principalement bruit rayonné par le navire support en positionnement dynamique.	En lien avec l'installation des postes électriques posés des fermes éoliennes flottantes
Vibrofonçage	180 dB - 200 dB ⁽²⁾	20 Hz - 5 000 Hz	- Dépend de l'environnement physique (bathymétrie, nature du fond, etc.). - Dépend de l'outil et de son utilisation (e.g. vitesse).	
Forage	180 dB - 200 dB ⁽³⁾	20 Hz - 5 000 Hz	- Dépend de l'environnement physique et notamment de la nature du fond → réservé aux fonds rocheux ou hétérogènes. - Dépend de l'outil et de son utilisation (e.g. vitesse).	
Battage de jackets (Ø 50 cm)	193 dB - 201 dB	20 Hz - 5 000 Hz	- Dépend de l'environnement physique (bathymétrie, nature du fond, etc.). - Dépend de l'outil et de son utilisation (e.g. type de marteau, fréquence des battements).	En lien avec les fondations des éoliennes posées - donné ici pour information
Battage de jackets (Ø 80 cm)	195 dB - 203 dB	20 Hz - 5 000 Hz		
Battage de jackets (Ø 100 cm)	197 dB - 206 dB	20 Hz - 5 000 Hz		
Battage de pieux (Ø 200 cm)	200 dB - 210 dB	20 Hz - 5 000 Hz		
Battage de pieux (Ø 400 cm)	210 dB - 218 dB	20 Hz - 5 000 Hz		

⁽¹⁾ Ross, 2005, ⁽²⁾ données CHORUS, ⁽³⁾ Erbe et McPherson, 2017

Les niveaux de bruit rayonné par les activités d'installation des parties flottantes sont liés au bruit rayonné des navires qui les réalisent. Ils sont par conséquent très inférieurs aux niveaux de bruit rayonné lors de l'installation des postes électriques en mer posés sur jacket, eux-mêmes inférieurs aux niveaux générés par le battage de pieux de plus gros diamètre pour des éoliennes posées (e.g. fondation monopieu).

Il existe des moyens de réduire le niveau de bruit émis à la source (mesures de réduction), par exemple en entourant le chantier par un rideau de bulles ou en confinant les pieux à battre dans un cylindre atténuant la propagation du son. Ces techniques ont été validées grâce à de nombreux retours d'expériences en mer du Nord (Bellmann et al, 2020) et peuvent apporter une réduction du bruit d'au moins 10 dB.

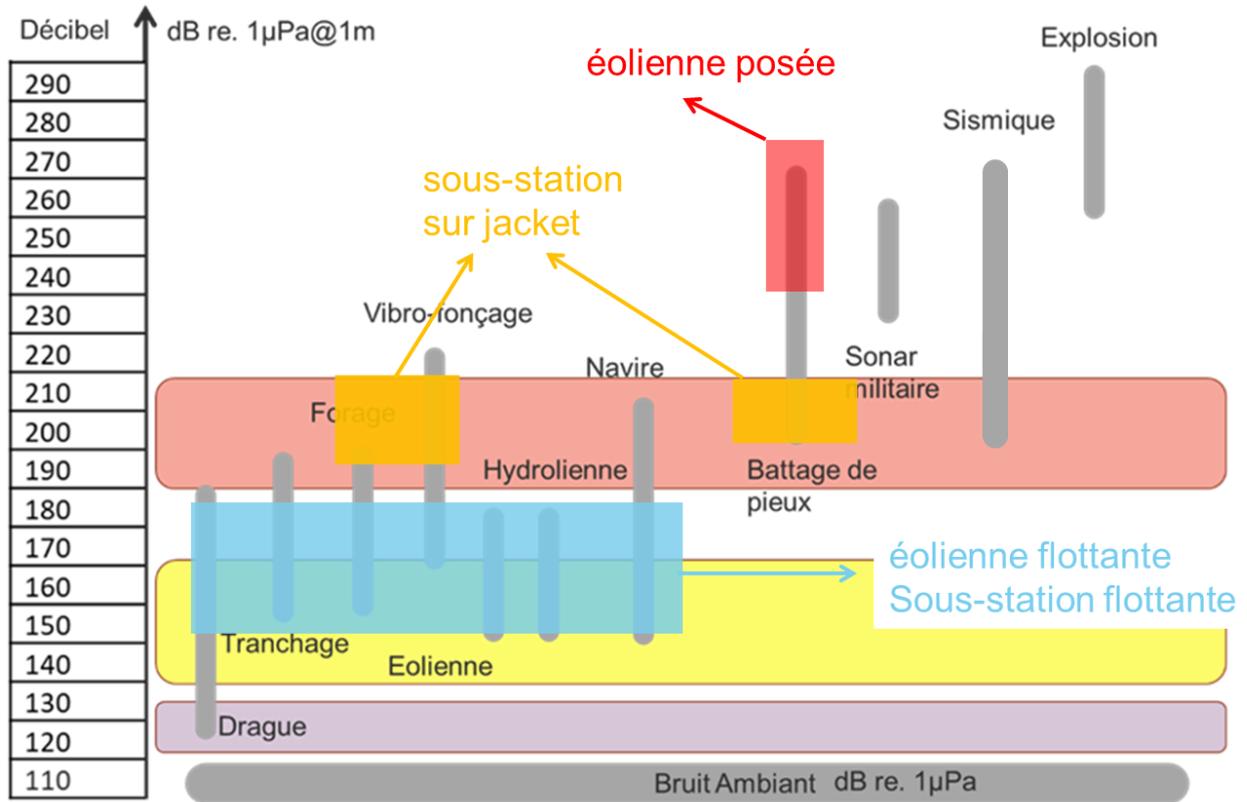


Figure 8 : Niveau de bruit émis à la source par les différentes activités anthropiques.

En gris, niveau de bruit ambiant, en violet, seuil de risque de masquage des communications entre les animaux, en jaune, seuil de risque de dérangement comportemental, en orange, seuil de risque de blessures/dégradation de l'audition.

4.2.2 Calculs prédictifs simplifiés

4.2.2.1 Limites et précautions

Les résultats présentés ici sont issus d'un calcul simplifié où les pertes en transmission (qui s'appliquent au bruit lorsqu'il se propage du chantier vers les animaux) ne sont pas issues d'une simulation acoustique précise mais sont calculées avec une formule simplifiée ($-20\log_{10}(r)$) où r est la distance en mètres entre les travaux et les animaux) proposée dans [Bellmann et al, 2020](#) et conforme aux us et coutumes de la propagation acoustique sous-marine. La méthodologie suivie a été publiée en 2018 ([Lossent et al, 2018](#)).

Ils ont pour but de fournir des ordres de grandeur informatifs et ils ne peuvent se substituer ni être opposés aux résultats des études d'impact.

4.2.2.2 Empreintes acoustiques

Le rayon de l'empreinte acoustique d'une activité est défini comme la distance à laquelle le niveau du bruit propagé est égal au niveau de bruit ambiant, à l'intérieur de l'empreinte le bruit généré par le projet est supérieur au bruit ambiant. Le niveau de bruit ambiant retenu est 105 dB re. 1µPa pour la bande comprise entre 20 Hz et 5 000 Hz ([Gervaise et al, 2021](#)). Le tableau 5 et le tableau 6 présentent les rayons des empreintes pour les installations flottantes et les installations posées (sous-stations électriques).

Tableau 5 : Calcul simplifié des empreintes acoustiques des travaux de mise en place des installations flottantes

	Empreinte acoustique des travaux de mise en place des installations flottantes (Seuil = 105 dB re.1µPa)					
	Embarcation support en positionnement dynamique		Test de tenue des ancrs		Ensouillage des câbles	
Niveau de sources dB re. 1µPa@1m [20 Hz, 5 kHz]	160 dB	180 dB	180 dB	195 dB	150 dB	195 dB
Rayon de l’empreinte (km)	560 m	5 km	5 km	31 km	170 m	31 km

Tableau 6 : Calcul simplifié des empreintes acoustiques des travaux de mise en place des fondations posées d’une sous-station électrique

	Empreinte acoustique des travaux de mise en place des fondations posées d’une sous-station électrique (Seuil = 105 dB re.1µPa)							
	Vibrofonçage	Forage	Battage jacket Ø50 cm	Battage jacket Ø50 cm + mesure réduction	Battage jacket Ø80 cm	Battage jacket Ø80 cm + mesure réduction	Battage jacket Ø100 cm	Battage jacket Ø100 cm + mesure réduction
Niveau de sources dB re.1µPa@1m [20 Hz, 5 kHz]	190 dB	190 dB	197 dB	187 dB	199 dB	189 dB	202 dB	192 dB
Rayon de l’empreinte (km)	17 km	17 km	39 km	12 km	50 km	15 km	70 km	22 km

4.2.2.3 Dérangements comportementaux

Pour déterminer les rayons d’effets à l’intérieur de l’empreinte acoustique, les seuils doivent être adaptés à chaque activité.

En considérant un seuil de dérangement comportemental égal à 140 dB quel que soit l’animal considéré (approche simplifiée, dérangement comportemental moyen cf. tableau 1, page 15), le tableau 7 et le tableau 8 présentent les rayons de dérangements comportementaux pour les installations flottantes et les installations posées (sous-stations électriques) en phase travaux.

Tableau 7 : Calcul simplifié des rayons des dérangements comportementaux produits par les travaux de mise en place des installations flottantes

	Rayon de dérangement généré par des travaux de mise en place des installations flottantes (Seuil = 140 dB re.1µPa)					
	Embarcation support en positionnement dynamique		Test de tenue des ancrs		Ensouillage des câbles	
Niveau de sources dB re. 1µPa@1m [20 Hz, 5 kHz]	160 dB (min)	180 dB (max)	180 dB (min)	195 dB (max)	150 dB (min))	195 dB (max)
Rayon de l’empreinte (m)	10 m	100 m	100 m	562 m	3 m	562 m

Tableau 8 : Calcul simplifié des rayons des dérangements comportementaux produits par les travaux de mise en place des installations posées (sous-station électrique)

Rayon de dérangement des travaux de mise en place des installations posées (Seuil = 140 dB re.1μPa)								
	Vibrofonçage	Forage	Battage jacket Ø 50 cm	Battage jacket Ø 50 cm + mesure réduction	Battage jacket Ø 80 cm	Battage jacket Ø 80 cm + mesure réduction	Battage jacket Ø 100 cm	Battage jacket Ø 80 cm + mesure réduction
Niveau de sources dB re. 1μPa@1m [20 Hz, 5 kHz]	190 dB	190 dB	197 dB	187 dB	199 dB	189 dB	202 dB	192 dB
Rayon de l'empreinte (m)	316 m	316 m	707 m	223 m	891 m	281 m	1 260 m	400 m

4.2.2.4 Pertes d'auditions temporaires, permanentes, blessures

Lorsqu'il est question de pertes d'audition temporaires, permanentes, ou de blessures, il est nécessaire de séparer les bruits émis par les travaux en deux familles pour lesquelles la détermination des effets diffère :

- Les **bruits continus** (embarcation support en positionnement dynamique, test de tenue des ancres, ensouillage des câbles, vibrofonçage, forage), pour lesquels on calcule le temps que doit rester un animal à 100 m de la source de bruit pour ressentir un effet ;
- Les **bruits impulsionnels** (battage de pieux de différents diamètres), pour lesquels on calcule la distance en-deçà de laquelle l'animal peut ressentir un effet après un battage.

Les tableaux 9, 10 et 11 présentent les durées minimales durant lesquelles un animal doit rester, à 100 mètres de la source de bruit, pour ressentir une dégradation temporaire ou permanente de l'audition pour les cétacés, et une blessure pour les poissons, dans le cas d'un chantier générant des bruits continus.

Les tableaux 12, 13 et 14 présentent les distances en-deçà desquelles l'animal peut ressentir une dégradation temporaire ou permanente de l'audition chez les cétacés, et une blessure chez les poissons, dans le cas d'un battage de pieux pour l'installation de fondations de type « jacket ».

Tableau 9 : Durée pour ressentir une dégradation temporaire d'audition pour les cétacés - bruit continu

	Durée minimale durant laquelle doit rester un animal à 100 m de la source de bruit pour ressentir une dégradation temporaire de l'audition - Bruit continu						
	Embarcation support en positionnement dynamique		Test de tenue des ancres		Ensouillage des câbles		Vibrofonçage Forage
Niveau de sources dB re. 1μPa@1m [20 Hz, 5 kHz]	160 dB	180 dB	180 dB	195 dB	150 dB	195 dB	190 dB
Durée pour cumuler une énergie acoustique = 179 dB re. 1μPa²s - Mysticètes	13 200 mn	132 mn	132 mn	4 mn	132 000 mn	4 mn	13 mn
Durée pour cumuler une énergie acoustique = 178 dB re. 1μPa²s - Delphinidés	10 500 mn	105 mn	105 mn	3.3 mn	105 000 mn	3.3 mn	10 mn

Tableau 10 : Durée pour ressentir une dégradation permanente d'audition pour les cétacés - bruit continu

	Durée minimale durant laquelle doit rester un animal à 100 m de la source de bruit pour ressentir une dégradation permanente de l'audition - Bruit continu						
	Embarcation support en positionnement dynamique		Test de tenue des ancrs		Ensouillage des câbles		Vibrofonçage Forage
Niveau de sources dB re. 1µPa@1m [20 Hz, 5 kHz]	160 dB	180 dB	180 dB	195 dB	150 dB	195 dB	190 dB
Durée pour cumuler une énergie acoustique = 199 dB re. 1µPa²s - Mysticètes	919 jours	9 jours	9 jours	7 h	9 190 jours	7 h	22 h
Durée pour cumuler une énergie acoustique = 198 dB re. 1µPa²s - Delphinidés	730 jours	7,3 jours	7,3 jours	5,5 h	7 300 jours	5,5 h	17 h

Tableau 11 : Durée pour ressentir une blessure pour les poissons - bruit continu

	Durée minimale durant laquelle doit rester un animal à 100 m de la source de bruit pour ressentir une blessure - Bruit continu						
	Embarcation support en positionnement dynamique		Test de tenue des ancrs		Ensouillage des câbles		Vibrofonçage Forage
Niveau de sources dB re. 1µPa@1m [20 Hz, 5 kHz]	160 dB	180 dB	180 dB	195 dB	150 dB	195 dB	190 dB
Durée pour cumuler une énergie acoustique = 222 dB re. 1µPa²s - Poissons	502 années	5 années	5 années	58 jours	5 020 années	58 jours	183 jours

Tableau 12 : Distance de risque de dégradation temporaire de l'audition pour les cétacés - 1 battage

	Distance à la source de bruit en-dessous de laquelle il y a un risque de dégradation temporaire de l'audition 1 battage de pieu de fondation de type « jacket »					
	Battage jacket Ø 50 cm	Battage jacket Ø 50 cm + mesure de réduction	Battage jacket Ø 80 cm	Battage jacket Ø 80 cm + mesure de réduction	Battage jacket Ø 100 cm	Battage jacket Ø 80 cm + mesure de réduction
Niveau de sources dB re. 1µPa@1m peak [20 Hz, 5 kHz]	217 dB	207 dB	221 dB	211 dB	224 dB	214 dB
Rayon d'effet pour les mysticètes (Seuil = 217 dB re. 1µPa)	1,5 m	< 1 m	2,5 m	< 1 m	3,5 m	1 m
Rayon d'effet pour les dauphins (Seuil = 224 dB re. 1µPa peak)	< 1m	< 1 m	< 1 m	< 1m	1 m	< 1 m

Tableau 13 : Distance de risque de dégradation permanente de l'audition pour les cétacés - 1 battage

	Distance à la source de bruit en-dessous de laquelle il y a un risque de dégradation permanente de l'audition 1 battage de pieu de fondation de type « jacket »					
	Battage jacket Ø 50 cm	Battage jacket Ø 50 cm + mesure de réduction	Battage jacket Ø 80 cm	Battage jacket Ø 80 cm + mesure de réduction	Battage jacket Ø 100 cm	Battage jacket Ø 80 cm + mesure de réduction
Niveau de sources dB re. 1µPa@1m peak [20 Hz, 5 kHz]	217 dB	207 dB	221 dB	211 dB	224 dB	212 dB
Rayon d'effet pour les mysticètes (Seuil = 219 dB re. 1µPa peak)	< 1m	< 1 m	< 1 m	< 1 m	1.7 m	< 1 m
Rayon d'effet pour les delphinidés (Seuil = 230 dB re. 1µPa peak)	< 1m	< 1 m	< 1 m	< 1m	< 1 m	< 1 m

Tableau 14 : Distance de blessure pour les poissons, les œufs et larves de poissons, et les tortues marines - 1 battage

	Distance à la source de bruit en-dessous de laquelle il y a un risque de blessure 1 battage de pieu de fondation de type « jacket »					
	Battage jacket Ø 50 cm	Battage jacket Ø 50 cm + mesure de réduction	Battage jacket Ø 80 cm	Battage jacket Ø 80 cm + mesure de réduction	Battage jacket Ø 100 cm	Battage jacket Ø 80 cm + mesure de réduction
Niveau de sources dB re. 1µPa@1m peak [20 Hz, 5 kHz]	217 dB	207 dB	221 dB	211 dB	224 dB	214 dB
Rayon d'effet pour les poissons (Seuil = 207 dB re. 1µPa peak)	3 m	1 m	5 m	1,5 m	7 m	2 m
Rayon d'effet pour les tortues marines (Seuil = 207 dB re. 1µPa peak)	3 m	1 m	5 m	1,5 m	7 m	2 m
Rayon d'effet pour les œufs et les larves de poissons (Seuil = 207 dB re. 1µPa peak)	3 m	1 m	5 m	1,5 m	7 m	2 m

4.2.3 Synthèse des effets en phase chantier

La phase chantier induit plusieurs activités bruyantes avec une large dynamique de niveaux de bruit suivant l'activité considérée : des bruits continus (navires support, tests en tenue des ancres, ensouillage des câbles, forage et vibrofonçage des pieux constituant les fondations « jacket » des sous-stations électriques) et des bruits de très courte durée (battage des pieux constituant les fondations « jacket » des sous-stations électriques).

L'**empreinte acoustique** (rayon autour des sources dans lequel le bruit du chantier est audible) varie :

- entre **500 m et 31 km** pour les **bruits continus**,
- entre **17 km et 50 km** pour les **battages de pieux des fondations de type « jacket »**.

Au-delà de ces empreintes acoustiques, le bruit du chantier est inaudible et ne peut pas engendrer d'effets sur la faune. Par contre, à l'intérieur de ces empreintes, des effets peuvent avoir lieu à des distances variant selon la nature de l'activité et des animaux considérés.

Les rayons de **dérangements comportementaux** varient entre :

- **quelques mètres et 500 m** pour les sources de **bruit continu** ;
- **200 m à 1 260 m** pour les **bruits impulsifs** générés par les **battages des pieux des fondations « jacket »** nécessaires à la construction des sous-stations électriques.

Concernant l'impact des bruits continus sur les poissons, au regard des connaissances actuelles, les blessures sont improbables.

Pour les cétacés, seules les activités de test de tenue des ancrs semblent pouvoir engendrer une dégradation temporaire d'audition si un animal reste 5 minutes à 100 m du chantier, et une dégradation permanente de l'audition si l'animal reste 5,5 heures à 100 m du chantier. Ces effets peuvent être évités si les acteurs du chantier mettent en place une veille visuelle et/ou acoustique des cétacés et stoppent les activités pour laisser s'éloigner les animaux. Il est à noter que le chantier entraînera tout de même une désertion, au moins temporaire, du site par les animaux.

Pour les bruits de battages des pieux des fondations « jacket », les distances à la source en-deçà desquelles il existe un risque de blessures pour les poissons et de dégradation temporaires ou permanente de l'audition pour les cétacés, sont inférieures à 10 m.

Les rayons d'effet sont donc inférieurs à ceux rencontrés dans le cas de l'éolien posé car les diamètres de pieux des fondations « jacket » utilisés pour les sous-stations électriques sont inférieurs à ceux des fondations des éoliennes posées.

Ces effets du bruit sur les animaux, ainsi que les effets cumulés sur plusieurs battages, peuvent être réduits/évités si les acteurs du chantier mettent en place un protocole de montée en puissance progressive du battage et une veille visuelle et/ou acoustique des cétacés et stoppent les activités pour laisser s'éloigner les animaux. Il est à noter que le chantier entraînera tout de même une désertion, au moins temporaire, du site par les animaux.

4.3 En phase d'exploitation

4.3.1 Les sources de bruit pour l'éolien flottant comparées à d'autres sources anthropiques

En phase de production, les sources sonores principalement engendrées par un parc éolien sont les bruits générés par les éoliennes sous forme de vibrations des structures (créées au niveau de la nacelle) qui se transmettent via le mât et les fondations dans l'eau et le sol, ainsi que le bruit généré par le trafic maritime pour les activités de maintenance. En fonction, notamment, de l'état de la mer, Les chaînes utilisées pour les lignes d'ancrage peuvent également générer des bruits de type impulsif (MTES, 2020).

Concernant le trafic maritime pour les activités de maintenance, l'observation des cartes de trafic maritime élaborées à partir des données AIS (Automatic Identification System) pour les fermes en exploitation en mer du Nord montrent que ces activités peuvent engendrer une augmentation significative du bruit à l'échelle locale (figure 9). Le tableau 15 présente les niveaux de sources générés par les navires (Ross, 2005 ; Simard et al, 2016).

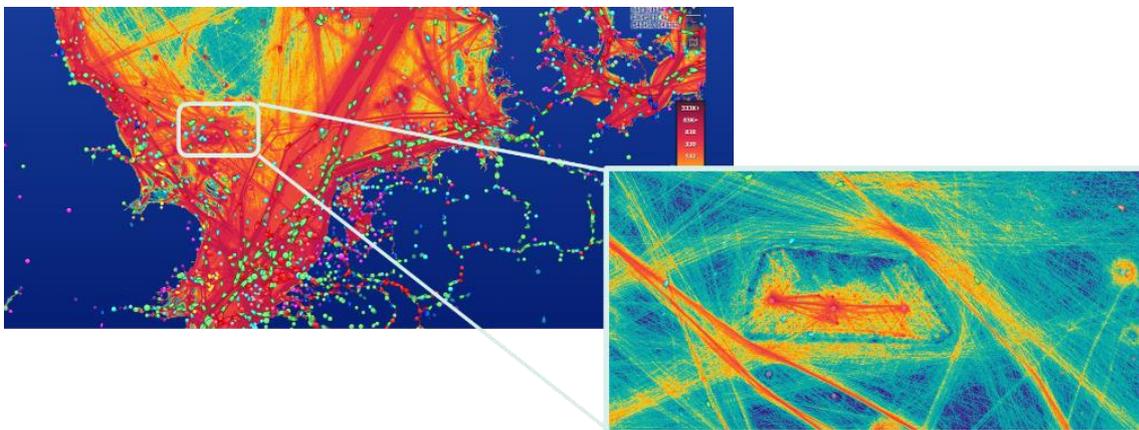


Figure 9 : Carte de trafic maritime (Source Marine Traffic) cumulée sur l'année 2019 en mer du Nord avec un zoom sur une ferme en exploitation au large de l'Angleterre.

4.3.2 Contenu fréquentiel du bruit émis par l'éolienne flottante HYWIND Demo

La figure 11 présente le spectre (distribution de la puissance rayonnée en fonction de la fréquence) du bruit rayonné à 1 mètre de la source :

- Le bruit de l'éolienne en production est concentré sur les sons de basses fréquences entre 30 Hz et 300 Hz.
- Le bruit de l'éolienne ne contient pas d'infrasons susceptibles de dépasser le bruit ambiant naturel à un mètre de l'éolienne.

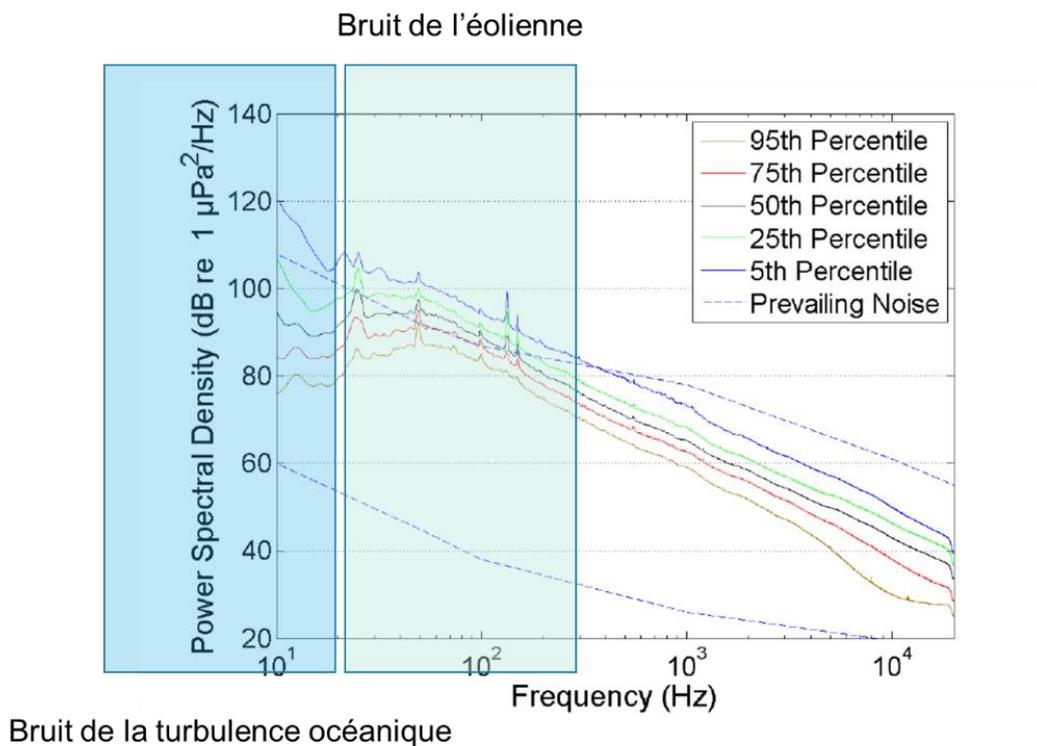


Figure 11 : Spectre du bruit rayonné à 1 m de la source par l'éolienne HYWIND Demo extrait de Martin et al., 2011

4.3.3 Études des rayons d'effets du bruit d'une éolienne flottante en production

L'empreinte acoustique d'une éolienne flottante (niveau sonore émis = 147 dB re. 1µPa@, bruit ambiant égal à 105 dB re. 1µPa) est égale à environ 300 m (calculs simplifiés).

Le rayon de dérangement comportemental faible (seuil égal à 120 dB, début de perception) est de 38 mètres et le rayon de dérangement comportemental moyen (seuil égal à 140 dB) est de 2,5 m.

Le bruit de l'éolienne est continu, conformément aux tableaux 9, 10 et 11 présentant les résultats pour un bruit de niveau égal à 150 dB re.1µPa @1m. Par conséquent, selon ces caractéristiques, les blessures sur les poissons et les dégradations temporaires ou permanentes de l'audition de cétacés apparaissent improbables.

4.3.4 Dérangement comportemental à proximité de l'éolienne

Comme indiqué précédemment (chapitre 3.5), la maturité de la connaissance scientifique sur le dérangement comportemental d'un bruit de niveau de source égal à 147 dB est imparfaite. Voici donc ci-dessous une synthèse de la bibliographie traitant des réponses des animaux à une source de niveau relativement similaire produit par des hydroliennes, mais plus élevé pour être conservatif (~ 160 dB

re. $1\mu\text{Pa}@1$). Il est à noter que les bruits émis par une hydrolienne le sont directement dans l'eau contrairement à l'éolien où les principales structures génératrices de bruit sont émergées.

Cette synthèse est exposée par ordre décroissant de l'amplitude de la réponse animale :

- [Redden et al, 2014](#) évoquent des risques de collision entre des bars rayés et les hydroliennes.
- [Grippio et al, 2017](#) constate une diminution de la densité de poissons dans un rayon de 140 m autour de l'hydrolienne et suggère que le bruit a permis aux poissons de percevoir l'hydrolienne.
- [Shen et al, 2016](#) rapportent des comportements d'évitement de l'hydrolienne jusqu'à 100 m pour les poissons.
- [Schram et al, 2017](#) montrent en milieu contrôlé grâce à des playbacks un comportement d'évitement jusqu'à 20 m pour les poissons.
- [Bevelhimer et al, 2016](#) constatent une division par deux du nombre de poissons dans un rayon de 20 mètres lorsque l'hydrolienne est opérationnelle, avec des observations de trajectoire d'évitement.
- [Hammar et al, 2013](#) constatent l'existence d'effets localisés autour de l'hydrolienne où les poissons prédateurs n'approchent pas à moins de 1,7 m du rotor en rotation.
- [Zhang et al, 2017](#) montrent par des études en milieux contrôlés que les poissons ont un taux de survie de 100% lors des interactions avec les hydroliennes et qu'ils ont tendance à s'éloigner des pales en rotation.
- [Staines et al, 2019](#) constatent que les poissons ont eu tendance à s'éloigner lors de la phase travaux mais sont revenus lorsque la turbine est entrée en fonctionnement normal.
- [Molloy et al, 2017](#) observent des bars rayés à proximité d'une hydrolienne sans réaction de stress.
- [Isaacman et Lee, 2009](#) ; [Williamson et al, 2019](#) suggèrent et constatent des effets concentrateurs des hydroliennes sur les bancs de poissons en créant des abris au courant et en fournissant une complexification de l'habitat.
- [Fraser et al, 2018](#) constatent et mesurent avec un échosondeur une augmentation de la densité de poisson à proximité de l'hydrolienne et dans son sillage, plus marquée la nuit.

S'il n'existe pas un schéma unique de réactions, avec parfois des attractions et parfois des répulsions, l'analyse suggère qu'il n'y a pas de réactions au-delà de 150 m d'une source de bruit d'un niveau équivalent à celui de l'éolienne flottante en production.

4.3.5 Effets globaux des fermes éoliennes

Le chapitre précédent a traité de la connaissance scientifique connue sur l'interaction à fine échelle entre un animal et l'éolienne. Sont abordés à présent les effets globaux connus d'une ferme d'éoliennes dans son ensemble, incluant les effets du chantier et de la ferme en exploitation. Il n'existe pas de retours d'expériences sur les fermes éoliennes flottantes en France, hormis celui du prototype FLOATGEN qui fait l'objet du paragraphe 4.4.

Le tableau 16 expose la connaissance scientifique concernant les effets des fermes d'éoliennes posées sur la ressource halieutique. Les résultats suggèrent qu'il n'y a pas d'effets répulsifs du parc éolien sur la ressource. Ces résultats concernent l'éolien posé et dépendent bien sûr du contexte environnemental, les écosystèmes marins présents, par exemple, en mer du Nord, étant très différents de ceux rencontrés en Méditerranée. Ces conclusions ne peuvent donc pas être transposées aux projets de parcs éoliens flottants de Méditerranée.

Tableau 16 : Synthèse des effets des fermes éoliennes sur la ressource halieutique

Site(s)	Années	Conclusions
Belgique, Danemark, Allemagne, UK, Suède	Champs éoliens dont les dates d'installation sont comprises entre 1991 et 2014	<p>Sur 52 champs éoliens, 44 rapports d'étude d'impact étudiés :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 39 rapports mettent en avant l'effet récif : positif pour le benthos, avec la biodiversité et complexité de l'habitat qui augmentent. - 19 rapports = l'effet récif bénéficie aux poissons car + de nourriture. - 16 rapports = cantonnement de pêche instauré → effet réserve pour les poissons. - 17 rapports = l'effet récif produit de la nourriture pour les mammifères marins. - 3 rapports = mammifères marins attirés pour la nourriture, le repos et l'effet refuge.
Belgique Thorntonbank & Bligh Bank	Installation en 2010	<ul style="list-style-type: none"> - Détection d'effets temporaires et locaux comme effet refuge (plie commune large). - Difficile de tirer des conclusions globales sur du long terme.
France, Courseulles-sur-Mer	Simulation	<ul style="list-style-type: none"> - L'activité totale de l'écosystème et l'omnivorie (proportion de mangeurs généralistes) augmentent. - Les niveaux trophiques supérieurs (espèces de poissons piscivores, mammifères marins et les oiseaux de mer ont réagi positivement à l'agrégation de la biomasse sur les pieux et aux protections contre l'affouillement des turbines). - Les simulations montrent l'existence de changement dans les groupes clés après la construction vers des compartiments plus structurants et dominants.
France, Courseulles-sur-Mer	Simulation	<ul style="list-style-type: none"> - L'écosystème devient plus mature (changements structurels) après installation du champ éolien tout en restant dans un état sain. - Le cantonnement de pêche n'aura pas d'impact sur la structure et le fonctionnement de l'écosystème. - Pas d'altération de la capacité de résilience de l'écosystème. - Effet réserve = impact globalement mineur sur l'écosystème.
France, Courseulles-sur-Mer	Simulation	<ul style="list-style-type: none"> - Augmentation du nombre d'espèces benthiques et des espèces de poissons se nourrissant de benthos. - Réponses des prédateurs plus ambiguës et plus dépendantes d'autres facteurs que le champ éolien (changement globaux).
Horns Rev 1/ Danemark	Étude réalisée entre 2002-2010 afin de couvrir la période avant la construction et 8 ans d'exploitation	<p>Étude des effets sur 3 espèces de lançon (poisson de sable)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Effet à court terme positif sur la densité de poissons (juvéniles et adultes). - Effet négatif à long terme sur les juvéniles, mais effet non significatif statistiquement.
Nysted/Danemark	Simulation	<ul style="list-style-type: none"> - Moules plus haut dans la colonne d'eau, plus grande biomasse, création de "hot spot" locaux d'activité biologique, changement dans la dynamique de l'écosystème local.
Lillgrund/Suède	Étude réalisée entre 2002-2005 (avant construction) et 2008-2010 (opération)	<ul style="list-style-type: none"> - Pas d'effet significatif sur la diversité et l'abondance des espèces benthiques de poissons durant la construction. - Changements à des échelles spatiales plus petites, croissance des espèces piscivores et certaines espèces associées à des récifs (plutôt dus à des changements de distribution des individus qu'à des immigrations).

Le tableau 17 expose la connaissance scientifique concernant les effets des fermes d'éoliennes posées (12 parcs, 2018) sur les cétacés et les phoques. Les résultats suggèrent qu'il n'y a pas d'effets répulsifs

de la ferme sur ces espèces. Il est à noter que les phoques et marsouins ne sont pas présents en Méditerranée et que les conditions environnementales diffèrent ; par conséquent, il n'est pas possible de transposer ces résultats.

Tableau 17 : Synthèse des effets des fermes éoliennes posées sur les cétacés et les phoques

	Mortalité	PTS	TTS	Comportements
Marsouin Dauphins	Non	Non	Non	Constats réalisés pour les marsouins principalement : Audibilité ~ 100 m (simulation du même type que celle menée dans le présent mémoire). Observations : sur certains sites, augmentation du nombre de détections acoustiques - effet récif et sanctuaire. Sur un site (Nysted) : pas de retour à l'état initial après 10 ans même si augmentation progressive, la question de l'intérêt initial du site pour le marsouin étant posée.
Phoque	Non	Non	Non	Audibilité ~ 100 m (simulation). Éloignement des points de respiration en surface provoqué par un play back d'un bruit de turbine de 2 MW. Observation : retour à la normale des comptages sur les reposoirs dans l'année après les travaux, parfois augmentation des comptages sur les reposoirs proches des fermes.

4.3.6 Synthèse des effets attendus en phase de production

Les niveaux sonores des bruits émis lors de la phase de production au sein de la ferme sont limités, mais continus sur toute la durée d'exploitation de la ferme (20-30 ans). Leur rayon d'audibilité est de l'ordre de 300 m. En phase de production, les effets acoustiques de la ferme seraient donc strictement confinés à l'aire de la ferme et aucun effet ne serait produit à l'extérieur.

Cependant, le niveau de connaissance actuel ne permet pas d'évaluer quel sera l'impact cumulé dans l'espace et dans le temps des parcs éoliens sur les communautés marines, à moyen ou à long terme (déplacement des populations, changements de stratégie de recherche alimentaire, etc.), et cela, au regard des activités préexistantes.

Concernant l'intérieur de la ferme, il n'est pas attendu de réaction au bruit des éoliennes au-delà de 150 m. À proximité des éoliennes, les comportements attendus des animaux sont contrastés entre attractions et évitements.

Les retours d'expérience des fermes éoliennes en mer du Nord (éolien posé) semblent montrer qu'il n'y a pas d'effets répulsifs des fermes sur les poissons, les cétacés et les phoques, et que parfois un effet récif concentrateur de faune puisse être observé. Les interactions fines entre les animaux et les éoliennes en production restent toutefois peu étudiées.

En Méditerranée, il n'existe pas de retour d'expérience permettant de dire si les parcs éoliens flottants auront un effet attractif/répulsif selon les compartiments considérés. Les modifications de l'écosystème marin engendrées par l'introduction de cette nouvelle activité seront complexes et à mettre en perspective avec les changements globaux qui s'opèrent et l'évolution des autres pratiques.

4.4 Comparaison des conclusions de nos calculs par approche simplifiée avec celles des études réalisées lors des tests de l'éolienne FLOATGEN sur le site du SEM-REV

Le site d'essais SEM-REV de l'École centrale de Nantes est opéré conjointement avec le CNRS et accueille depuis 2018 une éolienne flottante de 2 MW, FLOATGEN, munie d'un système d'ancrage semi-tendu en nylon reliant la plateforme au fond marin grâce à 6 ancres charrues. C'est la première éolienne flottante en service dans les eaux françaises. Elle constitue à ce titre une source précieuse de retour d'expérience, en particulier pour le suivi environnemental lors des phases de travaux, d'exploitation et de maintenance.

La caractérisation du bruit ambiant sous-marin et des sources sonores liées à la présence de l'éolienne ont été réalisées sur le site à travers 5 campagnes entre 2017 et l'été 2021, en déployant des techniques acoustiques passives et actives.

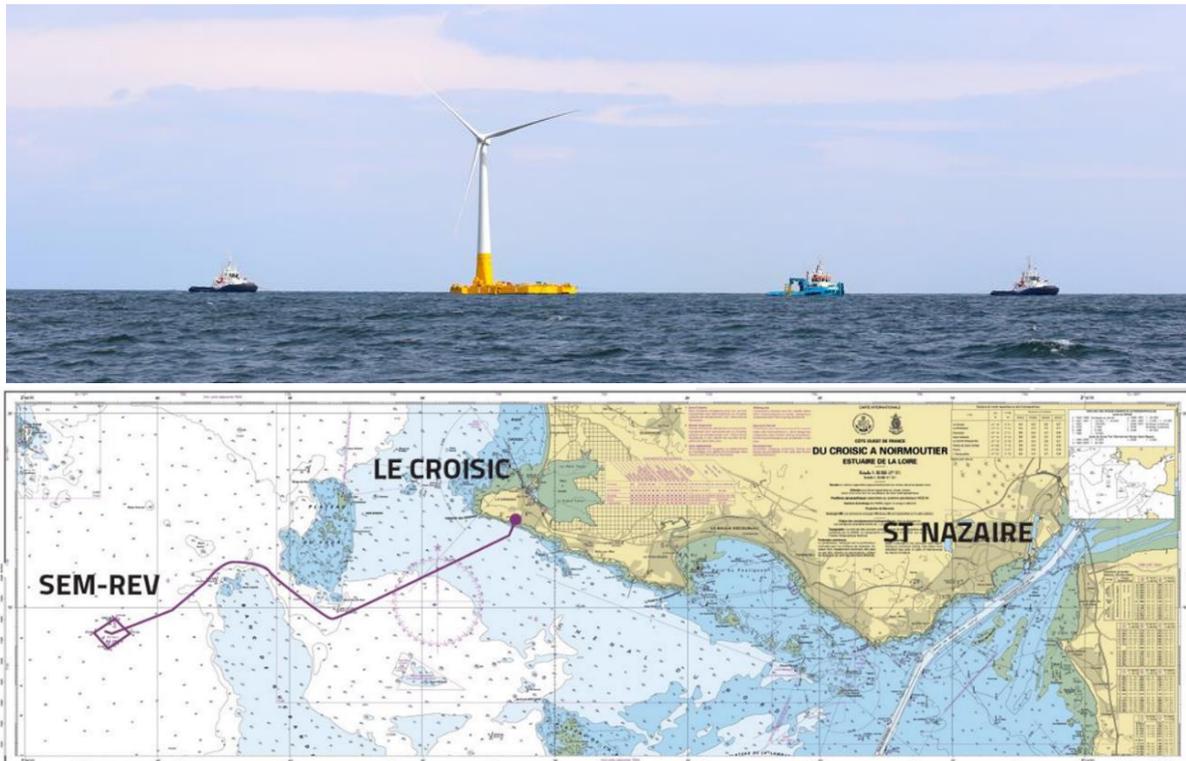


Figure 12 : Éolienne FLOTAGEN et localisation du site d'essai SEM-REV

Source : <https://sem-rev.ec-nantes.fr/navigation/technologies-testees/eolienne-flottante-floatgen>

Les conclusions des études acoustiques réalisées pour cette expérimentation ont été publiées en novembre 2021 dans un rapport de suivi environnemental (Reynaud et al., 2021).

L'analyse acoustique de la phase des travaux d'installation des lignes d'ancrage de l'éolienne flottante FLOATGEN a permis de constater que les plus hauts niveaux de bruit étaient générés par le système de propulsion du navire d'installation lors des phases de mise en tension des lignes d'ancrage et de l'ensouillage des ancres (maximum 190 dB ref $1\mu\text{pa}^2/\text{Hz}@1\text{m}$ [7Hz - 100 kHz]).

En phase d'exploitation et de maintenance, les émissions acoustiques produites par cette éolienne flottante d'une puissance de 2 MW sont bien moindres que lors de l'installation et présentent deux types de signatures : des vibrations en basses fréquences (< 350 Hz) dues aux équipements électriques et mécaniques présents sur le flotteur, et des sons impulsifs en hautes fréquences (entre 3 et 5 kHz) dus aux maillons des chaînes des lignes d'ancrage. Des radiales de mesures en dérive mettent en évidence une directivité acoustique de l'éolienne.

La modélisation des effets des émissions acoustiques en phase travaux sur les mammifères marins a conduit à une évaluation des impacts jugés comme négligeables, excepté pour le petit rorqual (un périmètre maximal de perte d'audition temporaire a été modélisé jusqu'à 390 m de la source sonore), le marsouin commun et le phoque gris (un périmètre maximal de perte d'audition temporaire (TTS) a été modélisé jusqu'à 250 m de la source sonore pour le marsouin commun).

N.B. L'hydrophone déployé (largeur de bande de 3 Hz à 125 kHz) ne permettait pas de détecter la totalité du spectre de vocalise du marsouin commun (fréquence d'émission entre 100 et 150 kHz).

Durant cette phase, il a été constaté une diminution de la fréquentation du site par les mammifères marins, avec malgré tout une présence quotidienne.

Ces résultats sont obtenus en se basant sur des scénarios acoustiques d'exposition à proximité immédiate de la source sonore sur une durée équivalente à 24h lors de travaux d'ancrage dont l'émission maximale est maintenue sur toute la durée (Reynaud et al., 2021).

En phase d'exploitation, avec des scénarios de production de l'éolienne comprise entre 25 et 100 %, les impacts sont également évalués comme étant négligeables sur les mammifères marins, excepté pour le petit rorqual (TTS jusqu'à 60 m de l'éolienne avec une production à 100 %) et le marsouin commun (TTS jusqu'à 80 m de l'éolienne avec une production à 100 %). Ces périmètres sont issus de modélisations se basant sur des scénarios acoustiques d'exposition à proximité immédiate de la source sonore sur une durée équivalente à 24h en phase de fonctionnement de l'éolienne enregistrée à la production cible maintenue sur toute la durée (Reynaud et al., 2021).

Ces distances sont jugées relativement faibles et contenues dans le périmètre géographique de SEM-REV. Les conclusions issues du rapport de suivi environnemental sont cohérentes avec les ordres de grandeur obtenus avec nos calculs par approche simplifiée.

4.5 Recommandations pour éviter et réduire les impacts des émissions sonores sur la faune marine

4.5.1 En amont du projet de parc éolien

Pour éviter les impacts négatifs d'un projet de parc éolien offshore, il conviendra de choisir des zones d'implantation qui ne soient pas connues pour être des zones fonctionnelles pour des espèces sensibles, ainsi que d'éviter les périodes sensibles pour les espèces marines pour la réalisation des activités bruyantes. Pour permettre cette planification spatiale et temporelle, il est donc nécessaire de disposer des connaissances suffisantes sur la distribution, l'abondance, les mouvements, la saisonnalité et la sensibilité au bruit des espèces. Or cette connaissance est encore très lacunaire.

Il conviendra également d'adapter les caractéristiques du projet (emplacement, techniques pressenties pour sa réalisation, etc.) et de le dimensionner au regard des enjeux environnementaux de la zone choisie (MTES, 2020).

4.5.2 En phase « Chantier »

En phase chantier, les travaux bruyants doivent être planifiés en-dehors des périodes écologiquement importantes pour les espèces connues pour fréquenter le site durant des phases sensibles de leur cycle biologique (reproduction, mise-bas, etc.).

Il est également recommandé d'avoir recours à des techniques non impactantes (fréquences et/ou niveaux d'émission en-dehors des capacités auditives des espèces potentiellement impactées) (MTES, 2020).

Les recommandations suivantes pour réduire et suivre les impacts du bruit sont en partie issues du guide *MTES, 2020* :

- Utiliser les techniques les moins bruyantes en aménageant ou modifiant les techniques ou outils employés (augmentation de la durée de la frappe et/ou utilisation d'un autre matériau que l'acier lors d'un battage de pieux, utilisation de navires adaptés pour réduire leurs émissions sonores, réduction de la vitesse des navires, etc.
- Privilégier l'utilisation de techniques moins bruyantes que le battage pour l'installation de pieux : vibrofonçage, forage, etc.).
- Utiliser des techniques visant à confiner les sources de bruit fixes : rideaux de bulles, géotextiles à bulles encapsulées, blocs isolants, batardeaux, membrane multicouche, etc.
- Définir une zone d'exclusion d'au moins 500 mètres autour du chantier et mettre en place une veille visuelle et/ou acoustique des cétacés et des tortues marines. Il conviendra d'arrêter les travaux si la présence d'animaux est détectée dans la zone d'exclusion. Il est recommandé d'éviter l'usage de répulsifs (émetteurs de bruit additionnel) et de privilégier l'attente du départ naturel des animaux.
- Effectuer une surveillance visuelle et/ou acoustique pré-travaux de la zone entourant le chantier pour s'assurer qu'aucune espèce potentiellement impactée par le bruit (cétacés, tortues) ne soit présente.
- Pour les travaux bruyants, mettre en place une procédure de démarrage progressif pendant 20 à 40 mn (*e.g. soft-start*) afin de provoquer un éloignement significatif des animaux avant que le bruit n'atteigne son niveau maximal.
- Suivre les niveaux de bruit des activités génératrices de bruit.

4.5.3 En phase « Exploitation »

En phase « exploitation », les actions suivantes peuvent être recommandées pour suivre et réduire les impacts du bruit :

- Suivre les niveaux de bruit généré par les éoliennes et les activités de maintenance.
- Utiliser les techniques les moins bruyantes en aménageant ou modifiant les techniques ou outils employés (utilisation de navires adaptés pour réduire leurs émissions sonores, réduction de la vitesse des navires, etc.).
- Mettre en place des programmes visant à comprendre les interactions fines (attraction, répulsion, neutre) entre les animaux et les éoliennes, pour contribuer notamment à mieux comprendre l'existence ou l'absence d'effet récif et mieux appréhender l'efficacité des actions de génie écologique entreprises.

5 Synthèse

5.1 Objectifs abordés par le présent mémoire

L'objectif du présent mémoire est de faire la synthèse de la connaissance scientifique relative aux effets sonores des éoliennes flottantes sur la faune marine, puis de la consolider et la présenter de manière chiffrée grâce à des calculs simplifiés.

Le présent mémoire et ses développements n'ont pas vocation à se substituer à une étude d'impact et ne peuvent être opposés aux avis des autorités délivrant les autorisations. Il a pour but d'informer et éclairer la société civile sur les effets du bruit sur la faune marine en lien avec les projets de fermes éoliennes flottantes en Méditerranée.

5.2 Le contexte des effets du bruit sur la faune marine

Les animaux marins (cétacés, poissons, invertébrés) entendent les sons dans la gamme fréquentielle des bruits émis par les activités humaines. Par conséquent, ils peuvent subir des effets négatifs de ces bruits anthropiques. Depuis les premiers échouages de cétacés il y a une vingtaine d'années, la société civile a pris conscience de l'existence de ces effets et s'en est inquiétée. La communauté scientifique par un travail soutenu a apporté des réponses partielles. Elle a tout d'abord démontré l'existence d'une large gamme d'effets : masquage, réactions physiologiques (hormones de stress, retard de croissance, etc.), réactions comportementales, dégradations temporaires ou permanentes de l'audition, blessures pouvant ou pas entraîner la mort, puis elle a proposé des seuils de niveaux sonores au-delà desquels il existe des risques pour certains effets et certaines familles d'animaux. Elle a aussi identifié des méthodes de réduction de ces risques.

L'existence ou l'absence de ces effets dépend des caractéristiques des sons émis (niveau, fréquence, forme) et de la sensibilité des animaux récepteurs.

Les effets d'un projet de ferme éolienne peuvent se produire durant la phase de prospection et d'études préparatoires (études géophysiques etc.), les chantiers d'installation/démantèlement et durant la phase de production.

5.3 Les effets durant les chantiers d'installation

Les activités bruyantes à prendre en compte concernent la mise en place des éoliennes flottantes (présence des embarcations, pose des lignes d'ancrage, tests de tenue des ancrs), l'ensouillage des câbles et la construction des sous-stations électriques posées sur des fondations de type « jacket ».

La mise en place des éoliennes flottantes génère moins de bruit que l'ensouillage des câbles, lui-même générant moins de bruit que l'installation des sous-stations électriques. Globalement l'installation des éoliennes flottantes génère moins de bruit que l'installation des éoliennes posées du fait qu'elle ne nécessite pas l'enfoncement de pieux par battage ou par vibrofonçage.

Nos calculs simplifiés réalisés spécifiquement pour ce mémoire corroborent les données publiées. L'empreinte acoustique (zone dans laquelle le bruit généré par le projet est supérieur au bruit ambiant) serait de l'ordre de 5 km pour l'installation des éoliennes, 30 km pour l'ensouillage des câbles et les tests de tenue des ancrs, et 50 km pour l'installation des sous-stations électriques.

À l'intérieur de cette empreinte, les installations des éoliennes peuvent provoquer un dérangement comportemental dans un rayon de l'ordre d'une centaine de mètres. L'ensouillage des câbles de raccordement et les tests de tenue des ancrs pourraient provoquer un dérangement comportemental dans un rayon de 500 mètres, et la pose des fondations « jacket » pour les sous-stations électriques pourraient provoquer un dérangement comportemental dans un rayon de 1 200 mètres.

Les blessures sur les poissons sont improbables, tout comme la dégradation permanente de l'audition des cétacés. Pour certaines activités (ensouillage, test en tenue des ancrs et battage des jackets), il existerait un risque faible de dégradation temporaire de l'audition chez les cétacés.

5.4 Les effets durant la phase de production

Le niveau sonore émis par une éolienne flottante est de l'ordre de grandeur de celui d'une embarcation motorisée (navire de 20 m de long voguant à 7 nœuds).

Nos calculs réalisés spécifiquement pour ce mémoire corroborent les données de la communauté scientifique. L'empreinte acoustique d'une éolienne est de l'ordre de 300 m et le rayon de

dérangement comportemental serait inférieur à 150 m autour de l'éolienne. Il n'y a donc pas de risques de blessure ou dégradation de l'audition pour les cétacés.

En phase de production, les effets acoustiques d'un parc éolien devraient être confinés à l'aire du parc et aucun effet ne devrait se produire à l'extérieur, mais ils seront continus durant toute la durée d'exploitation du parc, c'est-à-dire pendant 20 à 30 ans.

Le niveau de connaissance actuel ne permet pas d'évaluer quel sera l'impact cumulé dans l'espace et dans le temps des parcs éoliens sur les communautés marines, à moyen ou à long terme (déplacement des populations, changements de stratégie de recherche alimentaire, etc.), et cela, au regard des activités préexistantes.

À l'intérieur de la ferme, les réactions au bruit des éoliennes devraient être très rares voire inexistantes au-delà de 150 m de l'éolienne. Pour les projets de fermes flottantes, la distance prévue entre deux éoliennes de 10 MW est d'environ 800 m minimum, ce qui laisserait des espaces « acoustiquement libres » entre les éoliennes au sein de la ferme. À proximité des éoliennes, la connaissance scientifique indique que les comportements des animaux sont contrastés entre attraction, neutralité et évitement.

Les retours d'expérience des fermes éoliennes posées en mer du Nord ne mettent pas en évidence d'effets répulsifs des fermes sur les poissons, les cétacés et les phoques. Certaines études mettent en évidence un effet récif concentrateur de faune (effet récif dépendant évidemment des écosystèmes en présence, de la productivité du milieu, et de la technologie utilisée, ici éolien posé).

5.5 Certitudes, incertitudes, recommandations, limites

Concernant la phase de chantier, il est attendu que les niveaux sonores émis par les activités du chantier et les effets induits soient moindres comparés à ceux des chantiers de l'éolien posé.

Ces effets peuvent être évités, en amont, en effectuant une planification spatiale et temporelle permettant d'éviter les zones sensibles pour l'implantation du futur parc éolien, et en adaptant les caractéristiques du projet en choisissant par exemple les techniques les moins impactantes. L'efficacité de cet évitement est limitée du fait des connaissances encore parcellaires et inégales sur la distribution, l'abondance, les mouvements, la saisonnalité et la sensibilité au bruit des espèces. Il est donc nécessaire de poursuivre les programmes d'acquisition de connaissance à une échelle spatio-temporelle permettant de prendre en compte l'effet des changements globaux sur les communautés marines.

En phase chantier, les effets du bruit sur la faune marine peuvent être en adoptant un panel de mesures d'évitement et de réduction. Il est recommandé de planifier les activités bruyantes en-dehors des périodes écologiquement importantes pour les espèces connues pour fréquenter le site durant des phases sensibles de leur cycle biologique (reproduction, mise-bas, etc.).

Durant toute la durée des chantiers d'installation, il est recommandé de réaliser un suivi des niveaux de bruit des activités, de mettre en place une veille visuelle et/ou acoustique des cétacés et des tortues marines dans un rayon d'au moins 500 mètres autour de la zone de travaux et de procéder à un arrêt des travaux si présence des animaux ; pour les activités bruyantes, tel que le battage de pieux, il est recommandé également de mettre en place une procédure de démarrage progressif afin de provoquer un éloignement significatif des animaux avant que le bruit n'atteigne son niveau maximal. Un suivi des niveaux de bruit est également à réaliser durant toute la phase chantier.

Concernant la phase d'exploitation, les effets sonores d'une ferme devraient être confinés à l'intérieur du périmètre de la ferme agrandi de quelques dizaines de mètres à quelques centaines de mètres en fonction de différents paramètres, et notamment de la puissance des turbines, de la bathymétrie et de la nature du fond.

Il existe peu de connaissances à l'heure actuelle sur les interactions fines entre la faune marine et les éoliennes à l'intérieur des parcs, bien que les retours d'expériences des parcs éoliens posés en mer du Nord suggèrent qu'il n'y ait pas d'effet répulsif de la ferme pour les poissons et les cétacés.

En Méditerranée, il n'existe pas de retour d'expérience permettant de dire si les parcs éoliens flottants auront un effet attractif/répulsif selon les compartiments considérés. Les modifications de l'écosystème marin engendrées par l'introduction de cette nouvelle activité seront complexes et à mettre en perspective avec les changements globaux qui s'opèrent et l'évolution des autres pratiques.

Il est recommandé de suivre des niveaux de bruit de la ferme et mettre en place d'un programme visant à comprendre les interactions fines (attraction, répulsion, neutre) entre les animaux et les éoliennes, pour contribuer notamment à mieux comprendre l'existence ou l'absence d'effet récif et/ou concentrateur de poissons et mieux appréhender l'efficacité des actions de génie écologique entreprises.

À ce stade de la connaissance, il est possible d'affirmer que le cumul des fermes dans la Méditerranée ne provoquera pas d'augmentation globale du bruit dans la région mais pourra provoquer une augmentation locale du bruit dans le périmètre des fermes et le long des chemins suivis par les navires de maintenance.

Le niveau de connaissance actuel ne permet cependant pas d'évaluer quel sera l'impact cumulé dans l'espace et dans le temps des parcs éoliens sur les communautés marines, à moyen ou à long terme (déplacement des populations, changements de stratégie de recherche alimentaire, baisse de la reproduction, etc.), et cela, au regard des activités préexistantes. Il est donc nécessaire de développer des programmes de recherche sur cette problématique.

6 Prérequis en acoustique sous-marine

6.1 Note préliminaire

Cette partie est destinée à celles et ceux qui désirent aller plus loin dans la compréhension de la problématique du bruit sous-marin.

6.2 Une onde sonore : pression, mouvement particulaire et intensité

Une onde sonore est une onde mécanique qui se propage dans un milieu physique. Une source sonore met en mouvement les molécules à proximité de la source. Les molécules du milieu appuient sur les molécules voisines et transmettent ainsi de part en part à la fois une force de compression et un mouvement.

Si l'on dispose autour d'un point P une surface de 1 m^2 , la pression est la force qui s'exerce sur cette surface en P et la vitesse particulaire est la vitesse d'oscillation des molécules d'eau au travers de cette surface.

La vitesse de propagation des ondes sonores d'un émetteur vers un récepteur est la vitesse de propagation du son dans le milieu. Elle vaut approximativement $1\,500 \text{ m/s}$ dans l'eau et 330 m/s dans l'air.

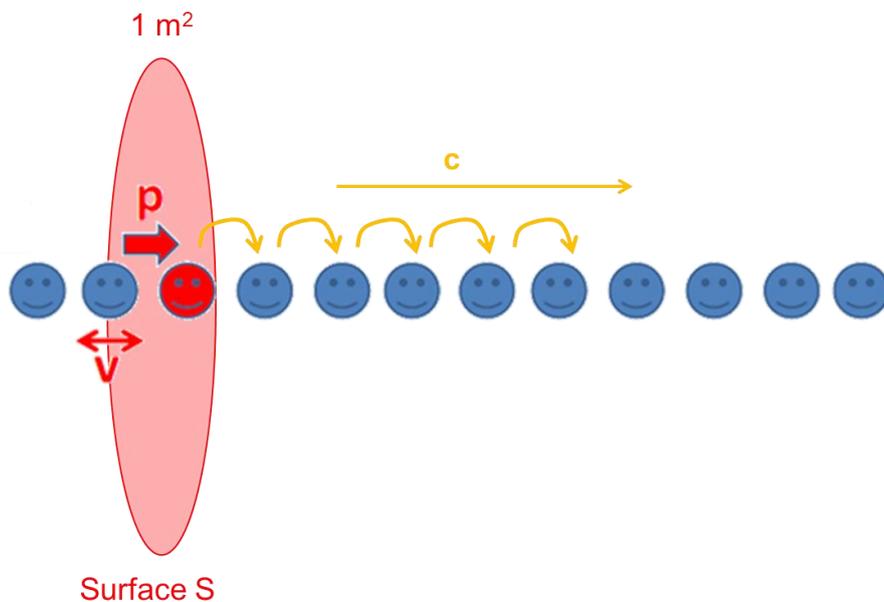


Figure 13 : Illustration du sens de la pression (p), de la vitesse particulaire (v) et de la vitesse ou célérité de l'onde sonore (c).

L'unité de la pression est le pascal (newton/ m^2), l'unité de la célérité de l'onde sonore et de la vitesse particulaire est 1 mètre par seconde (m/s).

Il faut bien distinguer vitesse particulaire et vitesse de propagation du son. Pour bien comprendre, nous pouvons conduire une analogie avec les olas dans les stades. Lorsque l'on regarde une ola, nous voyons une vague qui se déplace pour faire le tour du stade, il s'agit ici de l'onde qui traverse le stade à vitesse de propagation de l'onde. Le déplacement de cette ola est horizontal. Pour créer cette onde, chaque personne du public s'est levée en se synchronisant avec ses voisins. Chaque personne est une particule qui se lève et s'assoit avec sa propre vitesse verticale dite vitesse particulaire. La ola a permis la transmission d'une information de part et d'autre du stade alors que chaque personne/particule s'est déplacée sur une courte distance en se levant et en s'asseyant.

La quantité de puissance qui transite à travers la surface S est l'intensité, son unité est le watt/m², l'intensité d'une onde acoustique est approximativement :

$$I = \frac{p^2}{\rho c}$$

Où p est la pression, ρ la masse volumique (kg/m³) et c la célérité du son dans le milieu (m/s). C'est l'intensité qui confère à une onde sonore ses capacités destructrices sur les tissus animaux.

Le tableau 18 fournit les masses volumiques et célérités du son dans l'air et dans l'eau. Il faut 3 500 fois plus de puissance dans l'air que dans l'eau pour créer la même pression sonore. L'air est dit compressible alors que l'eau non. Pour une même pression, une onde dans l'air aura plus de capacités destructrices que dans l'eau.

Tableau 18 : Masse volumique et célérité du son dans l'air et dans l'eau

Médium de propagation	Masse volumique (kg/m ³)	Célérité du son (m/s)
Air	1,3 kg/m ³	330 m/s
Eau de mer	1 000 kg/m ³	1 500 m/s

6.3 Fréquences, longueurs d'onde, niveaux reçus des ondes sonores, niveaux émis des ondes sonores

Pour décrire la perception que nous avons d'un son, en premier lieu nous indiquons si le son est grave ou aigu, puis s'il est faible ou fort.

Le caractère aigu ou grave d'un son est décrit par sa fréquence définie comme le nombre d'oscillations du son par seconde (tableau 19). L'unité de la fréquence est le Hertz (Hz, 1 oscillation par seconde).

Tableau 19 : Gamme de fréquences et dénomination des sons

Fréquence	Dénomination	Audible par l'oreille humain
$f < 20$ Hz	Infrason	Trop grave pour être entendu
20 Hz $< f < 20\ 000$ Hz	Son	Oui
$f > 20\ 000$ Hz	Ultrason	Trop aigu pour être entendu

Le niveau sonore quantifie si l'onde est forte ou faible. On peut caractériser les niveaux sonores reçus par un capteur ou un animal mais aussi les niveaux sonores émis par une source. Dans ce cas, le niveau sonore est appelé niveau de source, c'est le niveau sonore que l'on mesure si nous positionnons notre oreille à 1 mètre de la source. Pour indiquer que l'on décrit les niveaux de source on reporte par convention la notation (@1m) derrière les unités.

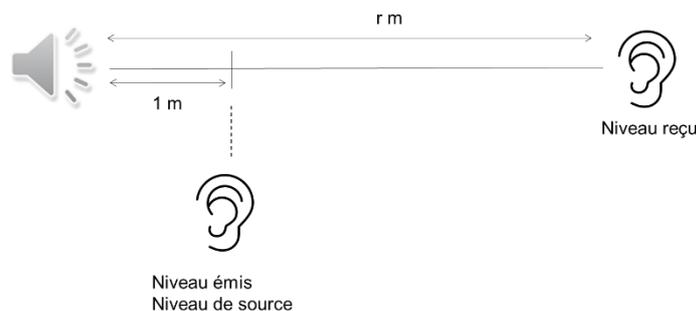


Figure 14 : Convention de calcul des niveaux sonores

Dans la nature, les niveaux sonores peuvent présenter une très large excursion en fonction du type de source considéré et de la distance entre le récepteur et la source (exemple : bruit du bruissement des feuilles et coup de tonnerre). Pour pouvoir représenter ces données et les comparer, on exprime les niveaux sonores sur une échelle logarithmique dite 'décibel'. Soit P une pression, et P_{ref} une pression de référence, la pression P exprimée en décibel relativement à la pression de référence P_{ref} est définie par :

$$P \text{ dB re. } P_{ref} = 20 \times \log_{10}\left(\frac{P}{P_{ref}}\right)$$

Pour le niveau de source, le niveau sonore émis s'exprime en $P \text{ dB re. } P_{ref}@1m$.

Pour les niveaux sonores dans l'eau, la pression sonore de référence est 1 μPa alors que la valeur de référence dans l'air est 20 μPa .

Alors que la fréquence exprime le nombre d'oscillations par seconde d'un son pour un récepteur en position fixe (la période est la durée d'une oscillation), la longueur d'onde évalue la longueur d'une oscillation du son dans l'espace à un instant donné (t). Pour visualiser le sens des fréquences et de la longueur d'onde, on peut imaginer une corde de guitare qui vibre. La fréquence est le nombre d'oscillation de la corde par seconde et la longueur d'onde est la longueur de l'oscillation le long de la corde. La longueur d'onde s'exprime par :

$$\lambda \text{ (m)} = \frac{c}{f} \text{ où } c \text{ est la célérité du son (1 500 m/s) et } f \text{ est la longueur d'onde (Hz).}$$

Tableau 20 : longueur d'onde des sons sous-marins en fonction de la fréquence

	Infrason		Son				Ultrason	
f (Hz)	5 Hz	20 Hz	50 Hz	500 Hz	5 kHz	20 kHz	30 kHz	100 kHz
λ (m)	300 m	75 m	30 m	3 m	30 cm	7,5 cm	5 cm	1,5 cm

6.4 Rapports d'amplitude, de puissance et de portée pour une différence de décibels données

Soit un bruit B1 de niveau sonore P1 dB re.1 μPa et un bruit B2 de niveau sonore P2 dB re.1 μPa ; le tableau 21 expose le rapport d'amplitude P2/P1, le rapport d'intensité I2/I1 et le rapport R2/R1 des portées des bruits B2 et B1 (calcul simplifié en pertes sphériques) en fonction de la différence de niveau sonore exprimée en dB. Une différence positive de 3 dB implique une multiplication par 1,4 de l'amplitude et de la portée et une multiplication par 2 de la puissance. Une différence positive de 10 dB implique une multiplication par 3 de l'amplitude et de la portée et une multiplication par 10 de la puissance.

Tableau 21 : Rapport d'amplitudes, de puissances et de portées en fonction de la différence en dB des sources

P2 dB - P1 dB	0 dB	3 dB	10 dB	15 dB	20 dB	25	30
P2/P1	1	1,4	3	5	10	17	31
I2/I1	1	2	10	30	100	310	1000
R2/R1	1	1,4	3	5	10	17	31

6.5 Niveau en décibel d'une somme de signaux

Si deux signaux $s_1(t)$ et $s_2(t)$ sont reçus simultanément et qu'ils ont été émis par deux sources indépendantes l'une de l'autre alors l'intensité de la somme des signaux ($s_1(t)+s_2(t)$) est la somme des intensités des signaux $s_1(t)$ et $s_2(t)$:

$$I(s_1 + s_2) = I(s_1) + I(s_2).$$

Or l'intensité d'une onde est proportionnelle à la pression élevée au carré, donc :

$$P^2(s_1 + s_2) = P^2(s_1) + P^2(s_2)$$

$$P(s_1 + s_2) = \sqrt{P^2(s_1) + P^2(s_2)}.$$

Le niveau en dB de la somme des signaux s'exprime par :

$$P(s_1 + s_2)dB = 20\log_{10}\left(P(s_1 + s_2) = \sqrt{P^2(s_1) + P^2(s_2)}\right)$$

$$P(s_1 + s_2)dB = 10\log_{10}(P^2(s_1) + P^2(s_2)).$$

Le logarithme n'est pas distributif par rapport à l'addition $\log(x+y) \neq \log(x)+\log(y)$, **ainsi le niveau en dB de la somme de deux signaux n'est pas la somme des niveaux de chaque signal en dB ;**

$$P(s_1 + s_2)dB \neq P(s_1)dB + P(s_2)dB.$$

Le développement ci-dessous présente comment évolue le niveau en décibel de la somme de 2 signaux en fonction de la différence en dB des niveaux des deux signaux :

- Si la différence en dB des niveaux de deux signaux est supérieure à 20 dB, le niveau en dB re. 1μPa de la somme est très proche du niveau du plus grand signal :
 - si le signal s_1 a un niveau de 100 dB re.1μPa et le signal s_2 a un niveau de 80 dB re.1μPa alors
 - le niveau sonore en dB re.1μPa de la somme s_1+s_2 **N'EST PAS** $100+80 = 180$ dB re.1μPa,
 - le niveau sonore en dB de la somme $s_1+ s_2$ **EST** 100,04 dB re. 1μPa,
 - si le signal s_1 a un niveau sonore de 100 dB re.1μPa et le signal s_2 a un niveau sonore de 100 dB re.1μPa alors
 - le niveau sonore en dB de la somme s_1+s_2 **N'EST PAS** $100+100 = 200$ dB re.1μPa,
 - le niveau sonore en dB de la somme s_1+S_2 **EST** 103 dB re.1μPa.

Tableau 22 : Niveau sonore en dB d'une somme de signaux

$P(s_2)dB = P(s_1)dB + \delta dB$									
δdB	-30	-20	-10	-3	0	3	10	20	30
$P(s_1+s_2) dB$	$P(s_1)dB$ +0.004 dB	$P(s_1)dB$ +0.04 dB	$P(s_1)dB$ +0.4 dB	$P(s_1)dB$ +1.7 dB	$P(s_1)dB$ +3 dB	$P(s_2)dB$ +1.7 dB	$P(s_2)dB$ +0.4 dB	$P(s_2)dB$ +0.04 dB	$P(s_2)dB$ +0.004 dB

6.6 Règles d'équivalence entre les niveaux sonores de sources sous-marines et les niveaux sonores de sources aériennes

L'être humain ayant un mode de vie terrestre, nous avons une bonne culture des niveaux sonores émis par les sources dans l'air (exemple un violon, un aspirateur, une voiture, etc.).

Il faut cependant être très prudent lorsque l'on fait un parallèle entre les niveaux sonores dans l'eau et les niveaux sonores dans l'air. Tout d'abord, il faut avoir en tête que le niveau sonore quantifie la pression de l'onde exprimée en dB. Or, les références en acoustique aérienne (20 μ Pa) et en sous-marin (1 μ Pa) sont différentes. Ainsi, dire qu'un son aérien possède un niveau de 20 dB est incomplet ; il faut dire que le niveau sonore vaut 20 dB re. 20 μ Pa, et dans ce cas l'amplitude de l'onde vaut $10 \times 20 \mu\text{Pa} = 200 \mu\text{Pa}$. De la même manière, dire qu'un son sous-marin possède un niveau de 20 dB est incomplet, il faut dire que le niveau sonore vaut 20 dB re. 1 μ Pa et dans ce cas l'amplitude de l'onde vaut $10 \times 1 \mu\text{Pa} = 10 \mu\text{Pa}$. D'autre part, nous avons vu dans le chapitre 6.2 que le pouvoir destructeur des sons est lié à leur intensité (quantité de puissance par m^2) et que, pour un même niveau d'intensité, la pression est 3 500 fois moins forte dans l'eau que dans l'air.

Ainsi, si l'on désire comparer deux sons, l'un sous l'eau et l'autre dans l'air et trouver leur équivalence en matière d'effets, il faut retrancher 61 dB aux sons sous-marins pour trouver leur équivalent dans l'air.

Par exemple, le niveau de bruit ambiant sous-marin « normal » en Méditerranée vaut 105 dB (re.1 μ Pa). Sans précaution, si l'on regarde les sources sonores aériennes fournissant un niveau de bruit égal à 105 dB re. 20 μ Pa nous trouvons un niveau extrêmement bruyant généré par un hélicoptère ou un trombone alors que si l'on retranche 61 dB on trouve un niveau « équivalent » égal à 44 dB correspondant à un bruit de niveau inférieur à celui créé par une pluie faible.

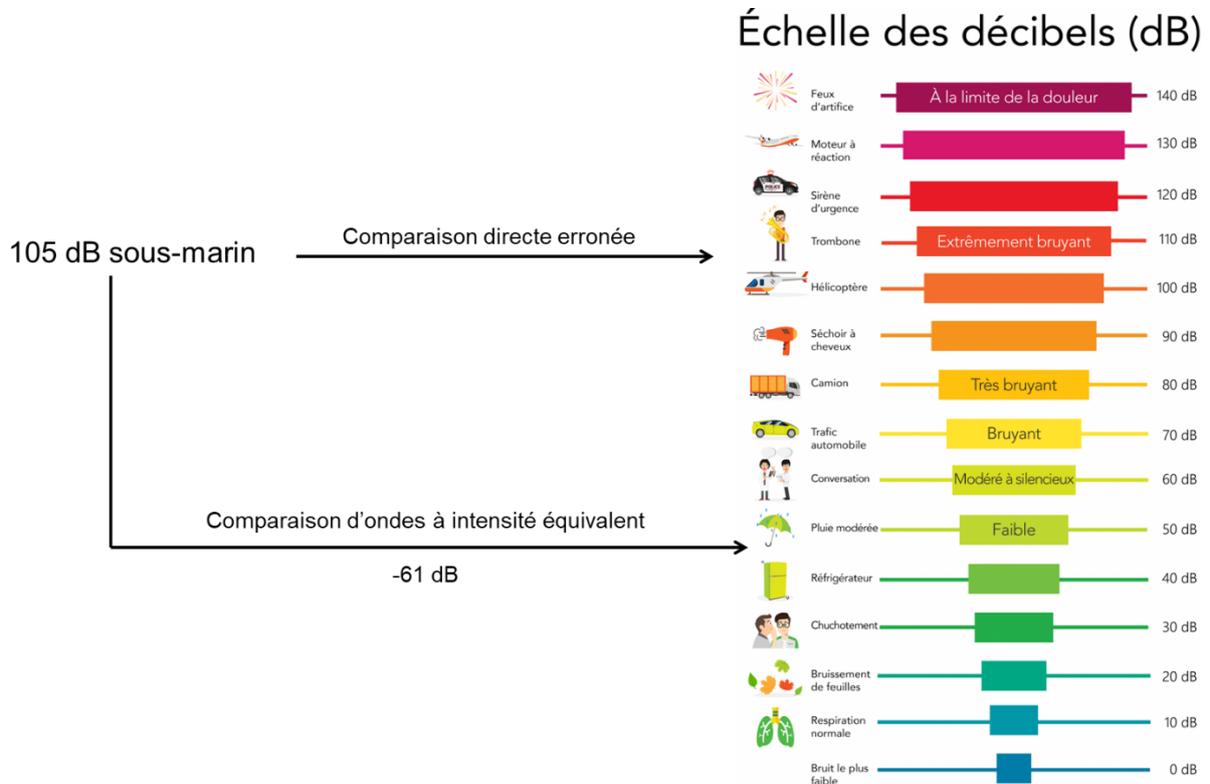


Figure 15 : Illustration des précautions requises pour comparer les niveaux sonores aériens et sous-marins exprimés en dB.

6.7 Comment appréhender le niveau sonore d'une source sous-marine ?

Comme indiqué dans le chapitre 3.2, il n'est pas évident au premier abord d'appréhender le niveau sonore d'une source sous-marine. Une source sonore d'un niveau de 130 dB re. 1µPa sous l'eau est-elle faible, intermédiaire ou forte ? Une solution est de replacer le niveau de la source dans une échelle de sources sonores régulièrement et/ou naturellement présentes dans les environnements marins.

Le tableau 23 présente les niveaux de bruit ambiant dans l'océan en fonction de la vitesse du vent et de la densité de trafic, le tableau 24 indique les niveaux des sources émis par les navires en fonction de leur taille et de leur vitesse et le tableau 25 reporte les niveaux de sources émis par les animaux marins.

Tableau 23 : Niveau de bruit ambiant suivant le modèle de Wenz

Niveau de bruit ambiant dB re. 1µPa [20 Hz, 10 kHz] (Wenz 1962)			
Vitesse du vent (nœuds)	Trafic maritime faible	Trafic maritime moyen	Trafic maritime fort
0 nœud	85 dB re. 1µPa	92 dB re. 1µPa	107 dB re. 1µPa
5 nœuds	92 dB re. 1µPa	95 dB re. 1µPa	107 dB re. 1µPa
10 nœuds	96 dB re. 1µPa	97 dB re. 1µPa	108 dB re. 1µPa
15 nœuds	99 dB re. 1µPa	100 dB re. 1µPa	108 dB re. 1µPa
20 nœuds	102 dB re. 1µPa	102 dB re. 1µPa	109 dB re. 1µPa
25 nœuds	104 dB re. 1µPa	104 dB re. 1µPa	110 dB re. 1µPa

Tableau 24 : Niveau de sources des navires suivant le modèle de Ross

Niveau de source des navires, dB re. 1µPa@1m [20 Hz, 10 kHz] (Ross, 2005)			
Vitesse du navire (nœuds)	Navire longueur 50 m	Navire longueur 100 m	Navire longueur 200 m
5 nœuds	150 dB re.1µPa@1m	155 dB re.1µPa@1m	161 dB re.1µPa@1m
10 nœuds	167 dB re.1µPa@1m	173 dB re.1µPa@1m	179 dB re.1µPa@1m
15 nœuds	178 dB re.1µPa@1m	184 dB re.1µPa@1m	190 dB re.1µPa@1m
20 nœuds	186 dB re.1µPa@1m	192 dB re.1µPa@1m	198 dB re.1µPa@1m

Tableau 25 : Niveau de sources des signaux biologiques (invertébrés, poissons, cétacés)

Niveau de source des animaux (dB re. 1µPa@1m)		
Espèces	Bande fréquentielle	Gamme de niveau sonore émis
Invertébrés	[1 500 Hz, 70 kHz]	140 dB -170 dB re. 1µPa@1m
Dauphins (sifflements)	[1 000 Hz, 20 kHz]	150 dB - 170 dB re. 1µPa@1m
Dauphins (clics)	[30 kHz, 120 kHz]	180 dB re.1µPa@1m hors de l'axe d'émission 210 dB re.1µPa@1m dans l'axe d'émission
Baleines à fanon (rorquals communs, etc.)	[10 Hz, 300 Hz]	160 dB - 200 dB re. 1µPa@1m

6.8 Ordre de grandeur des rayons de portée des sources sonores en fonction de leur niveau relativement au bruit ambiant

Pour fixer les ordres de grandeur des portées des sources acoustiques dans le bruit ambiant, nous présentons dans le tableau 26 les distances pour lesquelles le niveau transmis par une source est égal au niveau de bruit ambiant en supposant une propagation simplifiée entre l'émetteur et le récepteur (perte en $-20\log(r)$ pour une propagation sur r mètres).

Par exemple, un bruit généré par des travaux, égal à 160 dB re.1 μ Pa@1m, se propagera sur 930 mètres avant de diminuer et d'atteindre le niveau de bruit ambiant, dans l'hypothèse où celui-ci serait égal à 100 dB re.1 μ Pa. Au-delà de 930 mètres, il passera donc sous le niveau de bruit ambiant.

Tableau 26 : Ordre de grandeur des portées des sources sonores en fonction de leur niveau de sources et du niveau de bruit ambiant

	Portée (m)			
	Niveau de bruit ambiant 95 dB re.1 μ Pa	Niveau de bruit ambiant 100 dB re.1 μ Pa	Niveau de bruit ambiant 105 dB re.1 μ Pa	Niveau de bruit ambiant 110 dB re.1 μ Pa
Niveau de sources 150 dB re.1μPa@1m	560 m	300 m	177 m	100 m
Niveau de sources 160 dB re.1μPa@1m	1 736 m	930 m	548 m	316 m
Niveau de sources 170 dB re.1μPa@1m	5 600 m	3 000 m	1 770 m	1000 m
Niveau de sources 180 dB re.1μPa@1m	17 km	9 km	5 km	3 km
Niveau de sources 190 dB re.1μPa@1m	56 km	30 km	17 km	10 km

6.9 Quel descripteur acoustique pour évaluer les effets sonores ?

Pour étudier les effets des sons sur les animaux, 3 grandeurs acoustiques sont couramment utilisées et identifiées par les guides de référence (figure 16) :

- Le niveau pic ou 'Sound Pressure Level peak, SPL peak', unité dB re. 1Pa peak : il quantifie la plus grande pression reçue instantanément ; il est utilisé pour évaluer les risques de blessures et de dégradations temporaires ou permanentes de l'audition par rupture des tissus sous l'effet de la pression.
- Le niveau efficace ou 'Sound Pressure Level root mean square, SPL rms', unité dB re. 1Pa rms : il quantifie l'amplitude moyenne reçue durant une certaine durée ; il est utilisé pour évaluer le dérangement comportemental.
- Le niveau d'exposition sonore cumulé sur 24 heures ou 'Sound Exposure Level, SEL24h', unité dB re. 1Pa²s : il quantifie la dose d'énergie sonore cumulée sur 24 heures ; il est utilisé pour évaluer les risques de blessures et de dégradations temporaires ou permanentes de l'audition par fatigue auditive.

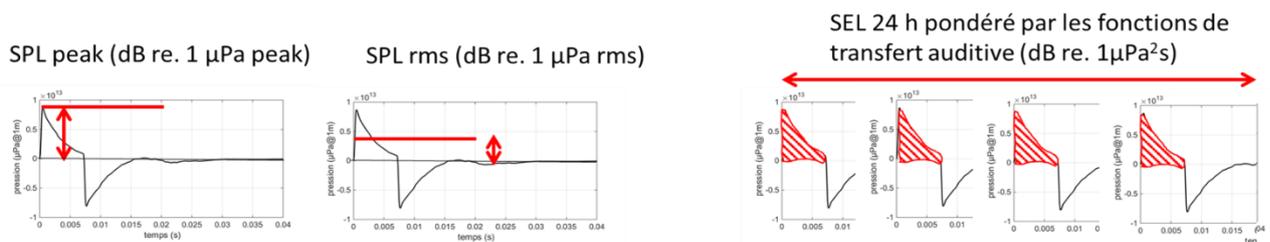


Figure 16 : Illustration du sens des descripteurs acoustiques utilisés pour étudier les effets sonores

6.10 Éléments essentiels sur la propagation des ondes sonores sous-marines

Lorsque l'on s'intéresse à quantifier les effets d'un bruit anthropique sur la faune marine et notamment évaluer les zones où ces effets risquent d'exister, il faut comprendre comment les sons se propagent entre un émetteur (la source de bruit) et un récepteur (l'animal). On cherche notamment à évaluer de combien s'atténue le niveau sonore en dB lorsque l'onde parcourt le chemin de l'émetteur vers le récepteur. Cette atténuation est nommée perte en transmission ('TL' pour 'Transmission Loss').

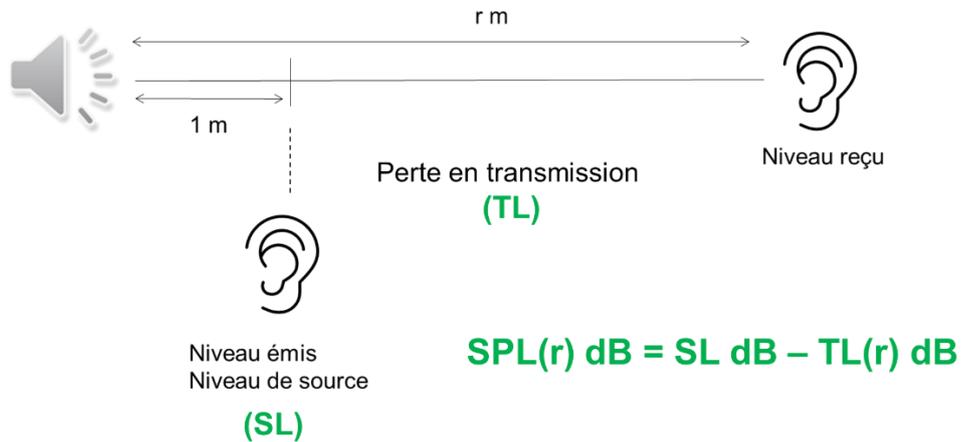


Figure 17 : Illustration du sens de pertes en transmission

Plusieurs phénomènes physiques conditionnent les pertes en transmission (figure 18) :

- Phénomène 1 : les pertes géométriques.
- Phénomène 2 : l'atténuation par l'eau de mer (force de frottement et équilibres chimiques).
- Phénomène 3 : la réfraction.
- Phénomène 4 et 4b : les interactions avec le fond (transmission, réflexion) et avec la surface (réflexion).
- Phénomène 5 : la fréquence de coupure du canal de propagation.

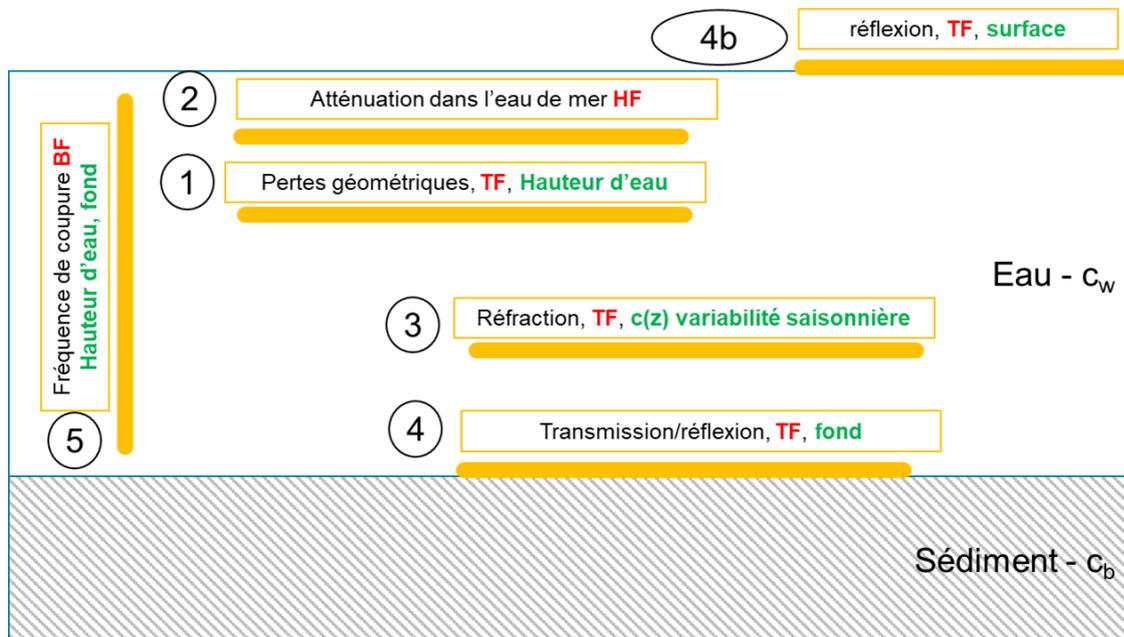


Figure 18 : Identification des phénomènes physiques conditionnant la propagation dans un milieu marin

6.10.1 Phénomène 1 : les pertes géométriques

Ce phénomène s'applique à toutes les fréquences.

On suppose négliger tous les autres phénomènes (2 à 5) et on suppose que la source sonore introduit dans l'environnement une puissance Q (W, joule/s). Lorsque l'onde se propage de la source vers le récepteur, la surface S sur laquelle se répartit la puissance Q augmente, et par conséquent la quantité de puissance par unité de surface (*i.e.* son intensité) diminue. Or l'intensité d'une onde est égale à $P^2/(\rho.c)$, où P est la pression, ρ la densité et c la célérité du son dans l'eau ; la pression diminue à cause de cette augmentation de surface. Comme cette diminution est due essentiellement à la géométrie (*i.e.* comment augmente la surface sur laquelle se distribue la puissance introduite), on parle de pertes géométriques (figure 19) :

- Lorsque la propagation de l'onde s'est confinée à l'eau sans avoir encore interagi avec la surface et le fond, la puissance introduite se répartit sur une sphère. On parle de pertes sphériques $TL = 20\log_{10}(r)$ où r est la distance de propagation entre la source et le récepteur.
- Lorsque l'onde a interagi avec la surface et le fond, sa propagation est confinée et la puissance introduite se répartit sur un cylindre. On parle de pertes cylindriques $TL=10\log_{10}(r)$ où r est la distance de propagation entre la source et le récepteur.
- Dans un environnement réel, l'onde subit d'abord une perte sphérique avant d'atteindre le fond et la surface, puis elle subit des pertes cylindriques, un modèle mixte peut alors être proposé :
 - $TL(r)=20\log_{10}(r)$, $r < 2h$ où h est la hauteur d'eau ;
 - $TL(r)=20\log_{10}(2h)+10\log_{10}(r/(2h))$, $r > 2h$ où h est la hauteur d'eau.
- Certains scientifiques proposent un modèle de pertes « intermédiaires » sous la forme $TL(r)=k\log_{10}(r)$ avec $k=15$ ou $k=17$.

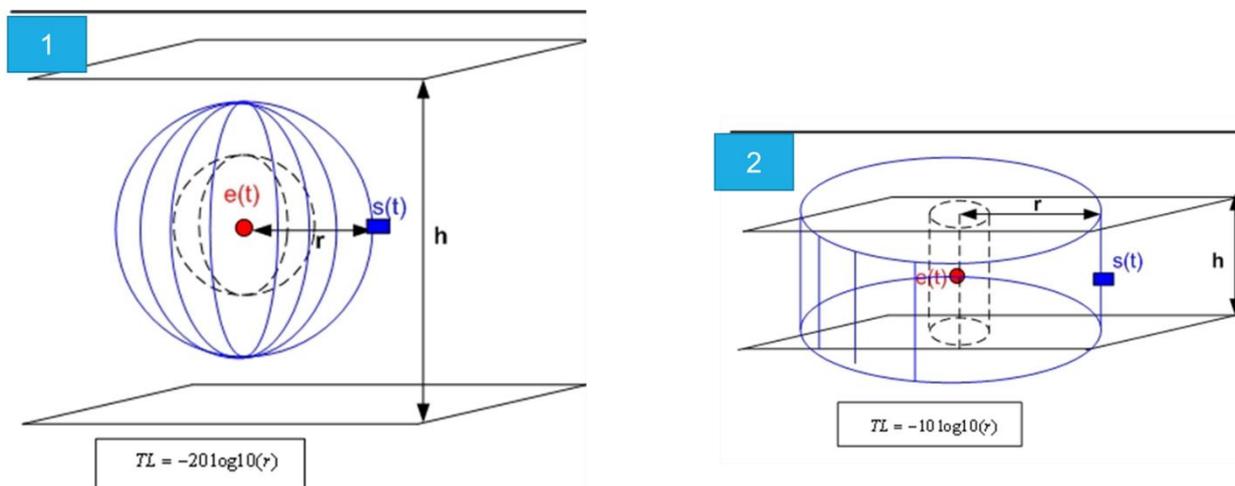


Figure 19 : Pertes en transmission géométriques (sphérique à gauche, cylindrique à droite)

6.10.2 Phénomène 2 : atténuation par l'eau de mer (force de frottement et équilibres chimiques)

Ce phénomène s'applique plus aux hautes fréquences qu'aux basses fréquences.

Ici on se focalise seulement sur l'eau sans considérer le fond ni la surface et on considère que la célérité du son est constante. Lorsqu'une onde de fréquence f_0 se propage :

- elle fait osciller la pression ; la pression est une propriété thermodynamique qui agit sur les équilibres chimiques de l'acide borique et du sulfate de magnésium. Pour modifier cet

équilibre, l'onde sonore cède de l'énergie aux réactions chimiques relatives à l'acide borique et au sulfate de magnésium ;

- elle fait vibrer les molécules d'eau les unes sur les autres et subit donc des forces de frottement ; plus la fréquence est élevée, plus le nombre de mouvements par seconde est important et plus les frottements sont importants.

L'atténuation des ondes acoustiques par les forces de frottement et les équilibres chimiques se traduit par des pertes en transmission de la forme :

$$TL(r, f)|dB = \alpha(f) \frac{r}{1000}$$

où $\alpha(f)$ est l'atténuation en dB par km à la fréquence f , et où r est la distance en mètres entre l'émetteur et le récepteur.

François et Garrison, 1982 fournissent une formule pour évaluer l'atténuation des ondes par l'eau de mer. Les pertes par atténuation par l'eau de mer croissent avec la fréquence (figure 20, tableau 27).

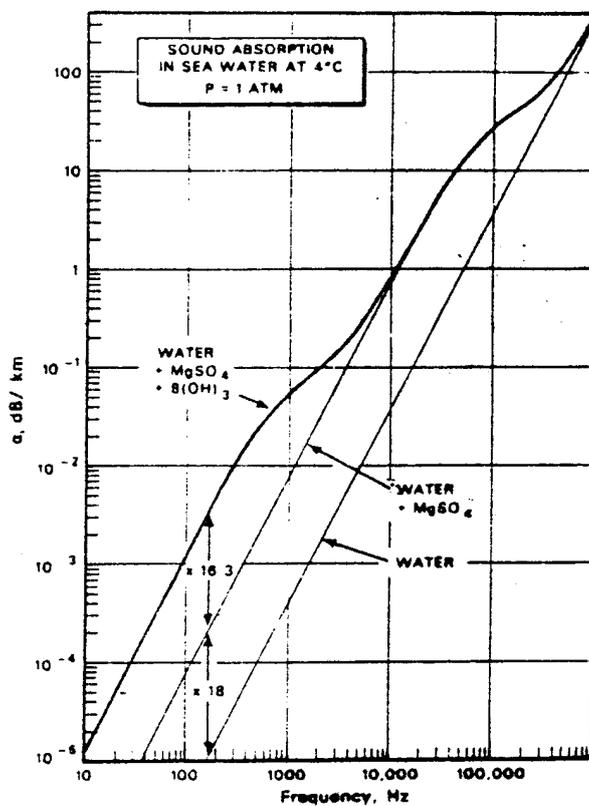


Figure 20 : Atténuation par l'eau de mer d'après François et Garrison, 1982

Tableau 27 : Atténuation par l'eau de mer en fonction de la fréquence

Fréquence	10 Hz	100 Hz	1 kHz	10 kHz	100 kHz	1MHz
Amortissement (dB/km)	10^{-5}	10^{-3}	0.06	1	33	300

6.10.3 Phénomène 3 : la réfraction

Ce phénomène s'applique à toutes les fréquences.

La célérité du son dans l'eau dont la valeur est proche de 1 500 m/s n'est pas strictement constante ; elle dépend de la pression, de la température et de la salinité (*Chen et Millero, 1977*).

Dans un milieu marin où la célérité du son dans l'eau est constante, les ondes sonores créées par un émetteur se propagent en ligne droite.

Dans un milieu marin où la célérité est variable, les ondes sonores ne se propagent pas en ligne droite mais sont courbées. Ce phénomène est nommé « réfraction ». Les ondes se courbent pour se propager dans les régions où la célérité est minimale (*Jensen et al, 2011*).

Ainsi, les zones dans lesquelles les ondes ne vont pas auront de fortes pertes en transmission dues à la réfraction. Au contraire, les zones dans lesquelles les ondes se concentrent auront de faibles pertes en transmission.

La figure 21 présente les différents patterns de transmission des ondes en fonction de l'environnement considéré.

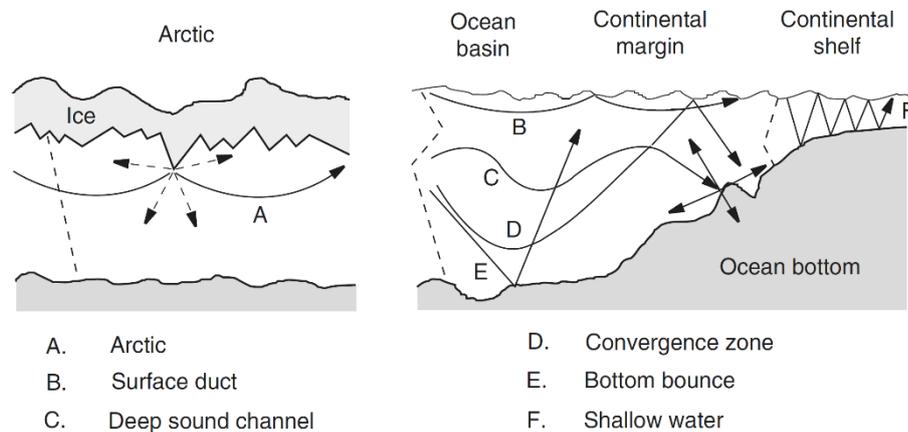


Figure 21 : Les différents patterns de propagation en fonction des environnements considérés d'après Jensen et al, 2011

La propagation dite « en petits fonds » ou « shallow water » (F, figure 21) comme celle qui concerne l'éolien flottant dans le golfe du Lion est caractérisée par de nombreuses interactions avec le fond et la surface.

6.10.4 Phénomène 4 et 4b : interaction avec le fond et avec la surface

Ce phénomène s'applique à toutes les fréquences.

La réfraction guide les ondes sonores le long de trajets acoustiques qui peuvent rencontrer la surface et le fond.

Lorsqu'une onde rencontre la surface, elle s'y réfléchit. Si l'on considère une surface plane sans vent et si θ_i est la direction de propagation de l'onde par rapport à l'horizontal alors l'onde réfléchie se propage avec une direction $-\theta_i$ et son amplitude est multipliée par un facteur -1. Le niveau sonore de l'onde réfléchie sur la surface est donc inchangé. Lorsque la surface n'est pas plane (vent et vagues), la valeur absolue du coefficient de réflexion devient inférieure à 1 et l'onde cède un peu d'énergie à chaque réflexion sur la surface.

Lorsqu'une onde rencontre le fond, elle va donner naissance à une onde réfléchie et peut donner naissance à une onde transmise dans le fond. Si l'on considère un fond plat et si θ_i est la direction de

propagation de l'onde par rapport à l'horizontal alors l'onde réfléchi se propage avec une direction - θ_i . Pour chaque nature de fond, il existe un angle dit « angle limite de rasance » :

- Si l'onde incidente arrive horizontalement avec une direction de propagation inférieure à l'angle limite de rasance, l'onde ne transmet pas d'énergie et ne crée pas d'onde transmise vers le fond ; elle crée une onde réfléchi qui possède un coefficient de réflexion égal à 1.
- Si l'onde incidente arrive plutôt verticalement avec une direction de propagation supérieure à l'angle limite de rasance, l'onde transmet de l'énergie et crée une onde transmise vers le fond, elle crée une onde réfléchi qui possède un coefficient de réflexion inférieur strictement à 1.

Lorsque la surface du fond n'est pas plane, le coefficient de réflexion avec un surface rugueuse est toujours inférieur ou égal à celui du fond plat.

Tableau 28 : Angle limite de rasance en fonction de la nature du fond

Nature du sédiment	Vase	Sable	Gravier
Angle limite de rasance	9°	33°	47°

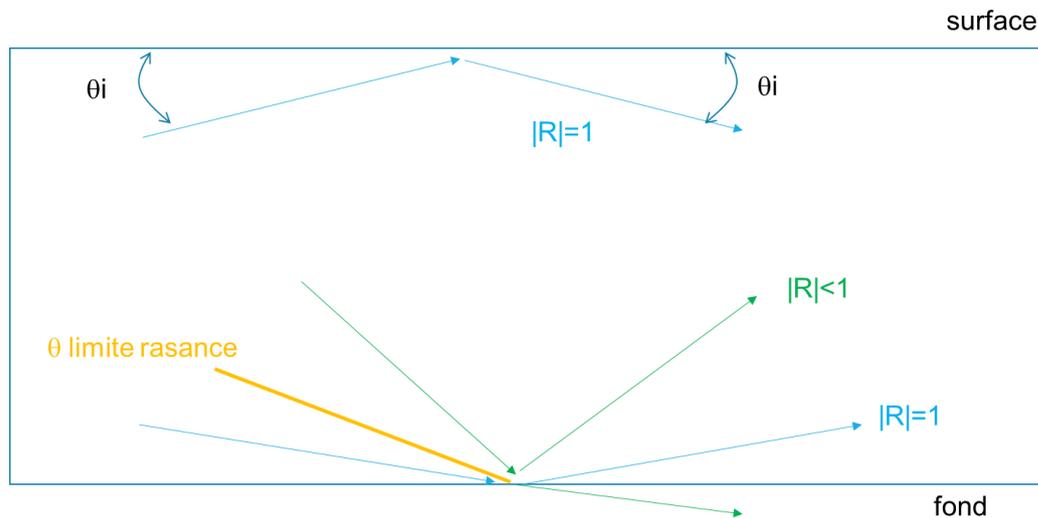


Figure 22 : Synthèse des phénomènes de réflexion sur la surface et sur le fond

6.10.5 Phénomène 5 : fréquence de coupure

Ce phénomène s'applique aux basses fréquences.

Le tableau 20 a présenté les longueurs d'onde en fonction de la fréquence et a montré que les basses fréquences avaient des longueurs d'onde grandes. Pour qu'un canal de propagation puisse transmettre une onde, il faut que sa taille soit grande devant la longueur d'onde (figure 23). Une analogie peut être faite avec les chaînes hifi de diffusion des sons : pour que celle-ci soit capable d'émettre des sons de basses fréquences, le caisson de basse est toujours de grande taille.

Weston et Tindle, 1979 définissent les fréquences de coupure pour un environnement marin simplifié (canal de Pékeris : une colonne d'eau à célérité constante sur un fond sédimentaire homogène semi-infini). Le tableau 29 présente les fréquences de coupure pour différents types de sédiments et différentes hauteurs d'eau.

Dans le cas de l'éolien flottant en Méditerranée, les canaux de propagation ne peuvent pas transmettre des sons de fréquences inférieures à 50 Hz, tels que les infrasons.

Tableau 29 : Fréquence de coupure en eaux peu profondes

Profondeur (m)	Vase	Sable	Gravier
H=30 m	Fc = 300 Hz	Fc = 188 Hz	Fc=142 Hz
H=60 m	Fc =155 Hz	Fc = 94 Hz	Fc = 71 Hz
H=90 m	Fc =103 Hz	Fc = 62 Hz	Fc = 47 Hz
H=120 m	Fc = 77 Hz	Fc = 47 Hz	Fc = 35 Hz

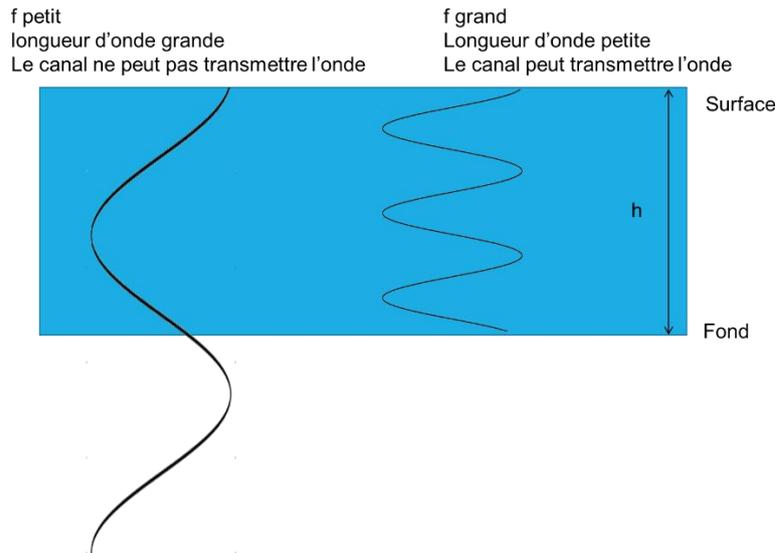


Figure 23 : Illustration du concept de fréquence de coupure

6.10.6 Synthèse des phénomènes de propagation pour l'éolien flottant

L'importance et les spécificités des phénomènes de propagation et des pertes en transmission pour l'éolien flottant sont conditionnés par la profondeur limitée des sites d'installation.

Tableau 30 : Importances et spécificités des phénomènes de propagation pour l'éolien flottant

Phénomène	Importance et spécificités pour l'éolien flottant en Méditerranée
Phénomène 1 : pertes géométriques	Important pour toutes les fréquences. Pas de spécificités particulières pour l'éolien flottant en Méditerranée.
Phénomène 2 : atténuation par l'eau de mer	Important pour les hautes fréquences. Les bruits émis par l'éolien flottant sont de basses fréquences, ce phénomène intervient peu.
Phénomène 3 : réfraction	Important pour toutes les fréquences. Pour l'éolien flottant en Méditerranée, les sons sont guidés vers le fond en été et vers la surface et le fond en hiver.
Phénomène 4 et 4b : réflexion sur le fond et sur la surface	Important pour toutes les fréquences. Pour l'éolien flottant en Méditerranée, la propagation génère beaucoup d'interaction avec le fond, ce qui limite la propagation du son.
Phénomène 5 : fréquence de coupure	Important aux basses fréquences. Pour l'éolien flottant en Méditerranée, la profondeur limitée empêche la propagation des fréquences inférieures à 50 Hz dont les infrasons.

7 Références citées

- Aulanier F., Y. Simard, N. Roy, C. Gervaise, and M. Bandet (2017). Effects of shipping on marine acoustic habitats in Canadian Arctic estimated via probabilistic modeling and mapping, *Marine Pollution Bulletin*, 125(12), 115-131, 2017
- Bellmann, M. A., May, A., Wendt, T., Gerlach, S., Remmers, P., & Brinkmann, J. (2020). Underwater noise during percussive pile driving: Influencing factors on pile-driving noise and technical possibilities to comply with noise mitigation values. *ERA Report: Experience Report on Piling-Driving Noise with and without Technical Noise Mitigation Measures*, 2020(August).
https://www.itap.de/media/experience_report_underwater_era-report.pdf.
- Bevelhimer, M.S., Colby, J., Adonizio, M.A., Tomichuk, C., Scherelis, C.C., Kleinschmidt Associates, Pittsfield, ME (United States) (2016). Informing a Tidal Turbine Strike Probability Model through Characterization of Fish Behavioral Response using Multibeam Sonar Output (No. ORNL/TM--2016/219, 1324172). <https://doi.org/10.2172/1324172>.
- Bruintjes R, Radford AN (2013). Context-dependent impacts of anthropogenic noise on individual and social behaviour in a cooperatively breeding fish. *Anim Behav* 85:1343–1349
- Gervaise, C. and J. Lossent (2020). Étude des effets acoustiques des levés géophysiques et UXO du projet de raccordement électrique des éoliennes en mer de Saint-Brieuc sur la ressource halieutique, Rapport RTE, 51 pages.
- Celi M, Filiciotto F, Maricchiolo G, Genovese L, Quinci EM, Maccarrone V, Mazzola S, Vazzana M, Buscaino G (2016). Vessel noise pollution as a human threat to fish: assessment of the stress response in gilthead sea bream (*Sparus aurata*, Linnaeus 1758). *Fish Physiol Biochem* 42:631–641.
- Chen, C. T., & Millero, F. J. (1977). Speed of sound in seawater at high pressures. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 62(5), 1129-1135.
- Day, R. D., McCauley, R. D., Fitzgibbon, Q. P., Hartmann, K., & Semmens, J. M. (2019). Seismic air guns damage rock lobster mechanosensory organs and impair righting reflex. *Proceedings of the Royal Society B*, 286(1907), 20191424.
- Day, R. D., McCauley, R. D., Fitzgibbon, Q. P., Hartmann, K., & Semmens, J. M. (2017). Exposure to seismic air gun signals causes physiological harm and alters behavior in the scallop *Pecten fumatus*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(40), E8537-E8546.
- Erbe, C., & McPherson, C. (2017). Underwater noise from geotechnical drilling and standard penetration testing. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 142(3), EL281-EL285.
- Everley KA, Radford AN, Simpson SD (2016). Pile-Driving Noise Impairs Antipredator Behavior of the European Sea Bass *Dicentrarchus labrax*. In: *The Effects of Noise on Aquatic Life II. Advances in Experimental Medicine and Biology*, Popper AN, Hawkins A (eds) Springer New York, New York, NY, p 273-279
- Ferrari MCO, McCormick MI, Meekan MG, Simpson SD, Nedelec SL, Chivers DP (2018). School is out on noisy reefs: the effect of boat noise on predator learning and survival of juvenile coral reef fishes. *Proc R Soc B* 285:20180033.
- Francois, R. E., & Garrison, G. R. (1982). Sound absorption based on ocean measurements. Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 72(6), 1879-1890.
- Frantzis, A. (2004). The first mass stranding that was associated with the use of active sonar (Kyparissiakos Gulf, Greece, 1996). *ECS Newsletter*, 42(Special Issue), 14-20.

- Fraser, S., Williamson, B.J., Nikora, V., Scott, B.E., (2018). Fish distributions in a tidal channel indicate the behavioural impact of a marine renewable energy installation. *Energy Reports* 4, 65–69. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2018.01.008>
- Gervaise, C., Lossent, J, Magnin, M, Boissery, P. (2021), Atlas des paysages acoustiques de Méditerranée 2015-2020.
- Graham AL, Cooke SJ (2008) The effects of noise disturbance from various recreational boating activities common to inland waters on the cardiac physiology of a freshwater fish, the largemouth bass (*Micropterus salmoides*). *Aquat Conserv Mar Freshw Ecosyst* 18:1315–1324.
- Grippo, M., Shen, H., Zydlewski, G.B., Shivanesh, R., Goodwin, A., (2017). Behavioral responses of fish to a current-based hydrokinetic turbine under multiple operational conditions: final report. *Environmental Science Division, Argonne National Laboratory*.
- Hammar, L., Andersson, S., Eggertsen, L., Haglund, J., Gullström, M., Ehnberg, J., Molander, S., 2013. Hydrokinetic Turbine Effects on Fish Swimming Behaviour. *PLoS ONE* 8, e84141. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0084141>
- Herbert-Read JE, Kremer L, Bruintjes R, Radford AN, Ioannou CC (2017) Anthropogenic noise pollution from pile-driving disrupts the structure and dynamics of fish shoals.
- Isaacman, L., Lee, K., 2009. Current State of Knowledge on the Environmental Impacts of Tidal and Wave Energy Technology in Canada (*DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc.*).
- Jensen, F. B., Kuperman, W. A., Porter, M. B., & Schmidt, H. (2011). *Computational ocean acoustics*. Springer Science & Business Media.
- Laverack, M. S., & Barrientos, Y. (1985). Sensory and other superficial structures in living marine Crustacea. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 76(2–3), 123–136. <https://doi.org/10.1017/S0263593300010397>
- Lisney, T. J. (2010). A review of the sensory biology of chimaeroid fishes (Chondrichthyes; Holocephali). *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 20(4), 571–590. <https://doi.org/10.1007/s11160-010-9162-x>
- Lossent, J., Lejart, M., Folegot, T., Clorennec, D., Di Iorio, L., & Gervaise, C. (2018). Underwater operational noise level emitted by a tidal current turbine and its potential impact on marine fauna. *Marine Pollution Bulletin*, 131. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.03.024>
- Magnhagen C, Johansson K, Sigray P (2017) Effects of motorboat noise on foraging behaviour in Eurasian perch and roach: a field experiment. *Mar Ecol Prog Ser* 564:115–125.
- Martin, B, MacDonnell, J, Vallarta, J, Lumsden, E and Burns, R. (2011). HYWIND Acoustic Measurement Report: Ambient Levels and HYWIND Signature. *Technical report for Statoil by JASCO Applied Sciences. Jasco project P001135-001, Report n. 00229*
- McCauley, R. D., Day, R. D., Swadling, K. M., Fitzgibbon, Q. P., Watson, R. A., & Semmens, J. M. (2017). Widely used marine seismic survey air gun operations negatively impact zooplankton. *Nature ecology & evolution*, 1(7), 1-8.
- Nedwell, J., Edwards, B., Turnpenny, A.W.H., & Gordon, J. (2004). Fish and Marine Mammal Audiograms : A summary of available information. *Subacoustech Report Ref: 534R0214 By, September 2004*, 281.
- Persohn C., Helloco L., Baudinière E., Martinez L., (2020). Préconisations pour limiter les impacts des émissions acoustiques en mer d'origine anthropique sur la faune marine. *Guide réalisé pour le compte du Ministère de la Transition écologique et solidaire. 203 p. + annexes -Juin 2020*

- Popper, A. N., Hawkins, A. D., Fay, R. R., Mann, D. a., Bartol, S., Carlson, T. J., Coombs, S., Ellison, W. T., Gentry, R., Halvorsen, M. B., Iokkeborg, S., Rogers, P., Southall, B., Zeddies, D., & Tavolga, W. (2014). *Sound exposure Guidelines for fishes and sea turtles*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-06659-2_7.
- Popper, A., Salmon, M., Horch, K. (2001). Acoustic detection and communication by decapod crustacean, *J. Comp. Physiol A* 187:83-89.
- Redden, A.M., Broome, J., Keyser, F., Stokesbury, M., Bradford, R., Gibson, J., Halfyard, E., (2014). Use of animal tracking technology to assess potential risks of tidal turbine interactions with fish. *Proceedings of the 2nd International Conference on Environmental Interactions of Marine Renewable Energy Technologies (EIMR2014)*.
- Reynaud, M., Le Bourhis E., Soulard T., Perignon Y., (2021). Rapport de suivi environnemental de l'éolienne flottante FLOATGEN, site d'essais SEM-REV. *Centrale Nantes, CNRS-LHEEA. Avec la collaboration de A. Bertholon, A. Blangy, H. Erussard, S. Lambert, G. Le Bihan, I. Le Crom, H. Lugez, J. M. Rousset, L. Sigoigne, et O. Thilleul, avec le support matériel des équipes de BW-Ideol - Nov. 2021.*
- Richardson, A. J., Matear, R. J., & Lenton, A. (2017). Potential impacts on zooplankton of seismic surveys. *Australia : CSIRO*.
- Ross, D. (2005). Ship sources of ambient noise. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 30(2), 257-261.
- Schramm, M.P., Bevelhimer, M., Scherelis, C., (2017). Effects of hydrokinetic turbine sound on the behavior of four species of fish within an experimental mesocosm. *Fisheries Research* 190, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2017.01.012>
- Shen, H., Zydlewski, G.B., Viehman, H.A., Staines, G., (2016). Estimating the probability of fish encountering a marine hydrokinetic device. *Renewable Energy* 97, 746–756. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.06.026>
- Simard, Y., Roy, N., Gervaise, C., & Giard, S. (2016). Analysis and modeling of 255 source levels of merchant ships from an acoustic observatory along St. Lawrence Seaway. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 140(3), 2002-2018.
- Southall, B. L., Finneran, J. J., Reichmuth, C., Nachtigall, P. E., Ketten, D. R., Bowles, A. E., Ellison, W. T., Nowacek, D. P., & Tyack, P. L. (2019). Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Updated Scientific Recommendations for Residual Hearing Effects. *Aquatic Mammals*, 45(2), 125–232. <https://doi.org/10.1578/AM.45.2.2019.125>
- Staines, G., Zydlewski, G., Viehman, H., (2019). Changes in Relative Fish Density Around a Deployed Tidal Turbine during on-Water Activities. *Sustainability* 11, 6262. <https://doi.org/10.3390/su11226262>
- Watkins, W. A., & Wartzok, D. (1985). Sensory Biophysics of Marine Mammals. *Marine Mammal Science*, 1(3), 219-260. <https://doi.org/10.1111/j.1748-7692.1985.tb00011.x>
- Zhang, J., Kitazawa, D., Taya, S., Mizukami, Y., (2017). Impact assessment of marine current turbines on fish behavior using an experimental approach based on the similarity law. *J Mar Sci Technol* 22, 219–230. <https://doi.org/10.1007/s00773-016-0405-y>
- Weston, D. E., & Tindle, C. T. (1979). Reflection loss and mode attenuation in a Pekeris model. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 66(3), 872-879.

Annexe 1 : Programmes d'acquisition de connaissance sur le bruit en Méditerranée

Cette annexe démontre que les enjeux liés au bruit sous-marin font partie des préoccupations de la communauté scientifique. Plusieurs programmes d'acquisition de connaissance sur le bruit en Méditerranée, passés, présents et à venir sont identifiés ci-dessous, mais cette liste n'a nullement vocation à être exhaustive.

La connaissance sur le bruit ambiant est réalisée à partir d'une approche mixant la modélisation et les mesures *in situ*. Le SHOM dans le cadre de la DCSMM réalise une cartographie par modélisation du bruit dans la ZEE métropolitaine pour les fréquences spécifiques 63 Hz et 125 Hz bien adaptées au suivi du bruit de trafic maritime et ses effets sur les mysticètes (figure 24)⁴.

Le tableau 31 identifie plusieurs programmes d'acquisition de mesures *in situ* produisant des données sur le bruit ambiant en Méditerranée (liste non exhaustive). La figure 25 illustre les positions de points de mesure acoustiques mis en œuvre dans le golfe du Lion dans le cadre de programmes dans lesquels intervient Chorus.

Tableau 31 : Descriptions de programmes d'acquisition de mesures *in situ* en Méditerranée

Projet	Période	Partenaires & financeurs (Liste non exhaustive)
P01 DELTAMARE	2021 - 2022	Ecocean Arcelormittal Université de Perpignan CHORUS ...
P02 LIFE PIAQUO P06 LIFE PIAQUO	2020 - 2022	Union Européenne / projet LIFE CHORUS Parc naturel marin du golfe du Lion Parc national des Calanques Réserve de Cerbère-Banyuls ...
P03 DCSMM D11	À partir de janvier 2022	SHOM OFB Parc naturel marin du golfe du Lion CHORUS
P04 OCG DATA	2021 - 2023	Ocergy Tachysema Université de Perpignan CHORUS ADEME ...
P05 BOB II	2021 - 2022	Ecocean Université de Perpignan CHORUS ENGIE

- ⁴ Voir données téléchargeables : https://www.milieufrance.fr/Acces-aux-donnees/Catalogue#/search?fast=index&content_type=json&sortBy=changeDate&from=1&to=30&keyword=D11:%20Bruit%20sous-marin&thesaurus-local.theme.simm.thematiques=%2FFetat%20du%20Milieu%2FPollutions

P07 CALME	2015 - 2023	Agence de l'Eau RMC CHORUS
P08 CALME GLIDER	2019 - 2020	Agence de l'Eau RMC ALSEAMAR CHORUS
P09 Cartographie acoustique de l'habitat du grand dauphin - golfe du Lion	2021	EcoOcean Institut CHORUS DREAL Occitanie OFB
STOP COLLISION Sanctuaire Pelagos	2020 - 2022	WWF Quiet oceans Andromède océanologie OFB
NAUTILUS Mer Ligure	2019 - 2021	iBV, ECOSEAS Université de Nice Côte d'Azur CHORUS LOV CIRM ...
Observatoire BOMBYX Pelagos	2010 - ...	Aix Marseille Université, CNRS, INSU, IRD, ENSAM, UMR 7294, MIO Université de Toulon, LISIS UMR 7296 Institut universitaire de France ...
Sphyrna Odyssey 2019 Pelagos	2019 - 2020	Sea Proven, Lemer Pax Revue Marine & Océans Université de Toulon, UMR, CNRS, LIS ACCOBAMS Fondation Prince Albert II ...

Légende

-  Concessions parcs pilotes
-  Macrozones à potentiel pour le développement de l'éolien flottant commercial

-  65 - 70
-  70 - 75
-  75 - 80
-  80 - 85
-  85 - 90
-  90 - 95
-  95 - 100
-  100 - 105
-  105 - 110
-  110 - 115
-  115 - 120
-  120 - 125

Sources
 Descripteur D11 DCSMM : SHOM
 Macrozones : DIRM Méditerranée
 Concessions parcs pilotes : EFGL, Eolmed, PGL
 Fond de carte : Base Map

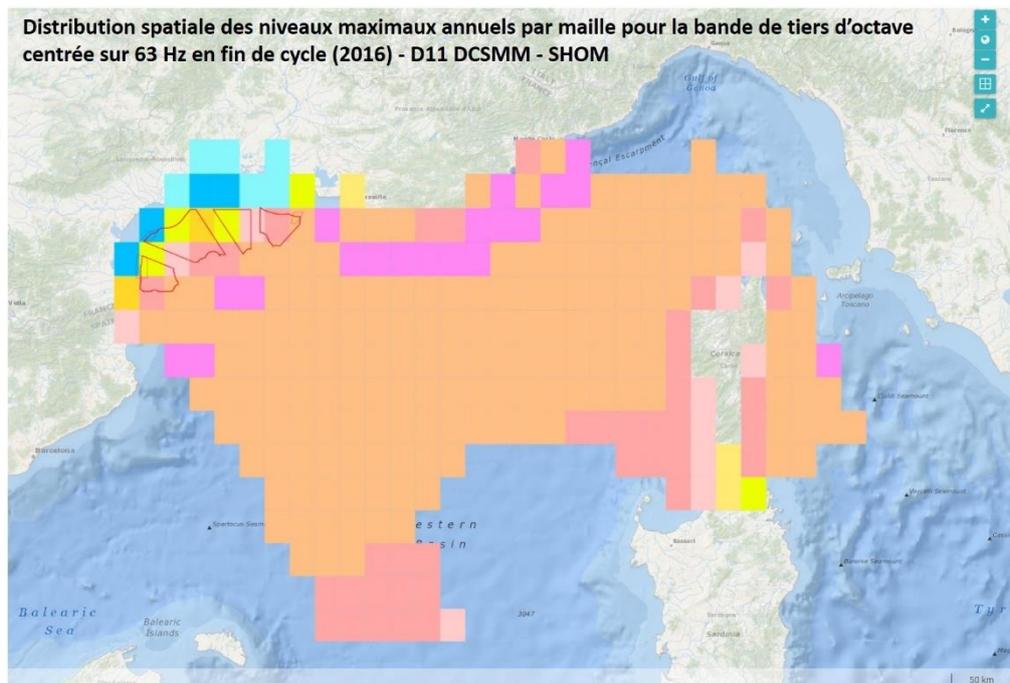


Figure 24 : Cartographie du bruit ambiant obtenue par simulation par le SHOM pour renseigner le descripteur D11 DCSMM

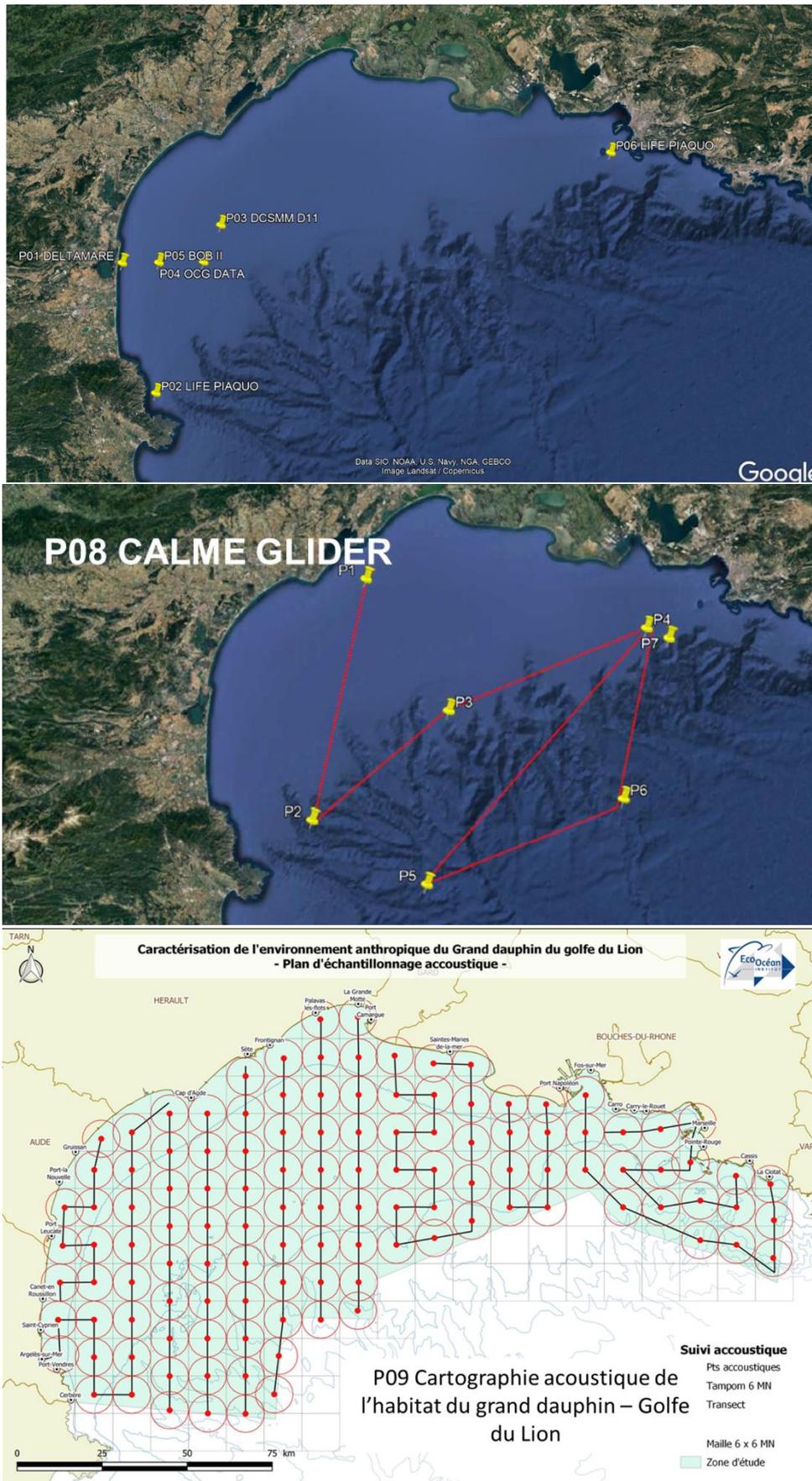


Figure 25 : Localisation des programmes d'acquisition de connaissances sur le bruit ambiant dans le golfe du Lion - P01 à P09

Annexe 2 : Synthèse des seuils de dégradation temporaire et permanente de l'audition chez les cétacés et de blessure chez les poissons et les tortues marines

Tableau 32 : Synthèse des seuils de dégradation temporaire et permanente de l'audition chez les cétacés pour les signaux impulsionnels d'après Southall et al, 2019

Groupe taxonomique des mammifères marins	Seuil PTS et TTS – pour les bruits impulsionnels			
	Dégradation permanente de l'audition		Dégradation temporaire de l'audition	
	Pk SPL, dB re 1µPa	Weighted SEL _{24hr} , dB re 1µPa ² ·S	Pk SPL, dB re 1µPa	Weighted SEL _{24hr} , dB re 1µPa ² ·S
Cétacés "basse fréquence" (LF) (Baleines à Fanon)	219+	183+	213+	168+
Cétacés "haute fréquence" (HF) (Dauphins)	230+	185+	224+	170+
Cétacés "très haute fréquence" (VHF) (marsouin)	202+	155+	196+	140+ 183*
Siréniens (SI) (lamentins, Dugong..)	226+	203+	220+	175+
Phoques carnivores dans l'eau (PCW)	218+	185+	212+	170+
Autres carnivores dans l'eau (OCW)	232+	203+	226+	188+

Tableau 33 : Synthèse des seuils de dégradation temporaire et permanente de l'audition chez les cétacés pour les signaux continus d'après Southall et al, 2019

Groupe taxonomique des mammifères marins	Signaux continus	
	Dégradation Permanente de l'audition	Dégradation temporaire de l'audition
	Weighted SEL _{24hr} , dB re 1µPa ² ·S	Weighted SEL _{24hr} , dB re 1µPa ² ·S
Cétacés "basse fréquence" (LF) (Baleines à Fanon)	199	179
Cétacés "haute fréquence" (HF) (Dauphins)	198	178
Cétacés "très haute fréquence" (VHF) (marsouin)	173	153
Siréniens (SI) (lamentins, Dugong..)	206	186
Phoques carnivores dans l'eau (PCW)	201	181
Autres carnivores dans l'eau (OCW)	219	199

Les effets sonores des éoliennes flottantes sur la faune marine

Tableau 34 : Synthèse des seuils de blessure pour les poissons et les tortues marines d'après Popper et al, 2014

Groupe taxonomique	Mort ou blessure létale	Effets non létaux			Dérangement comportemental
		Blessures réversibles	TTS	Masquage	
Poisson sans vessie natatoire	>219 dB SEL _{24hr} or >213 dB Pk SPL	>216 dB SEL _{24hr} or >213 dB Pk SPL	>>186 dB SEL _{24hr}	(N) Low (I) Low (F) Low	(N) High (I) Moderate (F) Low
Poisson avec vessie natatoire non connectée à l'oreille interne	210 dB SEL _{24hr} or >207 dB Pk SPL	203 dB SEL _{24hr} or >207 dB Pk SPL	>>186 dB SEL _{24hr}	(N) Low (I) Low (F) Low	(N) High (I) Moderate (F) Low
Poisson avec vessie natatoire connectée à l'oreille interne	207 dB SEL _{24hr} or >207 dB Pk SPL	203 dB SEL _{24hr} or >207 dB Pk SPL	186 dB SEL _{24hr}	(N) Low (I) Low (F) Moderate	(N) High (I) High (F) Moderate
Tortues marines	210 dB SEL _{24hr} or >207 dB Pk SPL	(N) High (I) Low (F) Low	(N) High (I) Low (F) Low	(N) Low (I) Low (F) Low	(N) High (I) Moderate (F) Low
Œufs et larves de poissons	>210 dB SEL _{24hr} or >207 dB Pk SPL	(N) Moderate (I) Low (F) Low	(N) Moderate (I) Low (F) Low	(N) Low (I) Low (F) Low	(N) Moderate (I) Low (F) Low