



MINISTÈRE  
DE LA TRANSITION  
ÉCOLOGIQUE  
ET SOLIDAIRE

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

# Préconisations pour limiter les impacts des émissions acoustiques en mer d'origine anthropique sur la faune marine

Juin 2020



### Coordination éditoriale

Direction de l'eau et de la biodiversité/Sous-direction de la protection et de la restauration des écosystèmes littoraux et marins/ Bureau ELM3 (Isabelle Terrier, Magali Naviner, Florian Expert)

### Affaire suivie par

Florian Expert (bureau ELM3)

### Rédacteurs

Cécile Persohn, Loïc Helloco, Estelle Baudinière (Nereis Environnement) ;  
Ludivine Martinez (Cohabys)

### Comité de pilotage

La Direction de l'eau et de la biodiversité remercie tout particulièrement les membres du comité de pilotage qui ont veillé au bon déroulement de la réalisation de ce guide : Nadia Deckert (ministère de l'Europe et des Affaires étrangères) ; Françoise Delaby (Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement des Pays de la Loire) ; Mélina Laurent (Direction de l'environnement, de l'aménagement et du logement de la Guadeloupe) ; Christelle Guyon (Direction de l'environnement, de l'aménagement et du logement de la Guyane) ; Benjamin Guichard et Sylvain Michel (Office français de la biodiversité) ; Yves Le Gall et Cécile Ducatel (Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer) ; Florent Le Courtois et Bazile Kinda (Service hydrographique et océanographique de la marine) ; Flore Samaran (École nationale supérieure de techniques avancées de Bretagne).

### Mise en page

[www.laboiteaverbe.fr](http://www.laboiteaverbe.fr)

# Avant-propos

L' introduction d'énergie sonore dans le milieu marin et son impact sur la faune marine sont aujourd'hui considérés comme une problématique importante. Ainsi, la pollution sonore est désormais intégrée dans les études d'impact environnemental au même titre que la pollution chimique. Cependant, cette problématique est parfois difficile à appréhender, du fait de sa technicité et du manque d'informations disponibles.

À ce titre, ce guide se veut être un outil permettant de faciliter la compréhension et la prise en charge de cette problématique. La réalisation de ce guide fait partie des mesures prises dans le cadre de la DCSMM au titre des Documents stratégiques de façade (DSF). Il s'inscrit dans la mesure M021-NAT2 des plans d'action pour le milieu marin de juin 2016. Le présent guide se focalise sur les émissions acoustiques d'origine anthropique en milieu marin, leurs impacts sur la faune marine et les méthodes ou techniques disponibles pour limiter ces impacts. Il inclut des éléments théoriques sur l'acoustique en général et les particularités liées à l'acoustique sous-marine. Il fait l'inventaire des différentes activités anthropiques générant du bruit en milieu marin et recense les informations disponibles et les caractéristiques des émissions sonores liées à ces activités (niveaux de bruit attendus, gammes de fréquences, *etc.*). Il fournit également des informations permettant de comprendre les impacts potentiels de ces activités sur la faune marine. Enfin, ce guide établit, le cas échéant, des préconisations visant à mieux évaluer et maîtriser ces impacts, en présentant les moyens disponibles pour éviter, réduire, voire compenser, les impacts de chaque activité.

Ce guide s'adresse principalement aux services centraux et déconcentrés de l'État. Il a pour objectif d'accompagner ces services dans l'instruction des dossiers relatifs aux activités et aux projets d'aménagements côtiers ou offshore. Il peut cependant apporter des éléments utiles à tous les acteurs concernés par l'évaluation des impacts environnementaux (gestionnaires d'aires marines protégées, industriels, bureaux d'études, *etc.*).

Ce guide n'a toutefois pas vocation à proposer des protocoles de suivis, qui doivent s'adapter aux projets, aux zones considérées et aux objectifs de chaque étude.

**Ce guide n'aborde que les sources de bruit anthropique et impacts liés aux activités civiles et exclut de son périmètre les émissions acoustiques liées aux activités militaires.**

# Glossaire

<b>ACCOBAMS</b>	Agreement on the Conservation of Cetaceans of the Black Sea, Mediterranean Sea and contiguous Atlantic Area
<b>ASCOBANS</b>	Agreement on the Conservation of Small Cetaceans of the Baltic, North East Atlantic, Irish and North Seas
<b>BEE</b>	Bon état écologique
<b>CMS</b>	Convention on the Conservation of Migratory Species of Wild Animals
<b>CDB</b>	Convention sur la diversité biologique
<b>DCSMM</b>	Directive-cadre Stratégie pour le milieu marin
<b>DSF/DSB</b>	Document stratégique de façade/de bassin
<b>EMR</b>	Énergie marine renouvelable
<b>ERC</b>	Éviter/Réduire/Compenser
<b>IFREMER</b>	Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer
<b>JNCC</b>	Joint Nature Conservation Committee
<b>MMO</b>	Marine Mammal Observer
<b>OMI</b>	Organisation Maritime Internationale
<b>PAM</b>	Passive Acoustic Monitoring
<b>PAMM</b>	Plan d'action pour le milieu marin
<b>SNML</b>	Stratégie nationale de la mer et du littoral
<b>TTS</b>	Temporary Threshold Shift
<b>PTS</b>	Permanent Threshold Shift
<b>UICN</b>	Union internationale pour la conservation de la nature

## Résumé

L'introduction de sources sonores d'origine anthropique dans le milieu marin constitue une problématique de plus en plus préoccupante ces dernières décennies. En effet, l'essor croissant des usages maritimes contribue à l'augmentation du bruit ambiant sous-marin, ce qui impacte directement et indirectement la faune sous-marine. L'introduction de bruit anthropique en milieu marin est donc aujourd'hui considérée comme une pollution au même titre que d'autres types de pollutions (chimique, microbiologique, etc.) et doit être intégrée aux études d'impact environnemental par les porteurs de projets.

Le son est généré par des ondes acoustiques. Il peut être perçu comme une variation de pression ou un mouvement de particules. Un son se caractérise par une fréquence (en Hz), un niveau (en dB) et une durée d'apparition (en s). Sa propagation dans l'eau est environ quatre fois plus rapide que dans l'air (~1 500 m/s). Cette propagation dépend toutefois des conditions environnementales, et notamment de la bathymétrie, la nature du fond, la température et la salinité de la colonne d'eau.

Un bruit peut être de nature impulsionnelle ou continue. Il existe différents indicateurs pour mesurer le niveau de bruit sous-marin, le choix de l'indicateur le plus pertinent est fonction de la nature et des caractéristiques de ce bruit. Un modèle de propagation des ondes sonores permet de cartographier son empreinte spatiale.

De nombreuses sources sonores d'origine anthropique sont susceptibles d'avoir un impact sur la faune sous-marine. Ces sources sont émises par différentes

activités : industrie du pétrole et du gaz, énergies marines renouvelables, pêche professionnelle et aquaculture, activités portuaires, aménagements côtiers, extraction de granulats, installation de câbles et de canalisations, trafic maritime, activités de recherche scientifique et activités de plaisance motorisée. Chacune de ces activités produit un ou des bruits caractéristiques, de par leur nature (impulsionnelle ou continue), leurs fréquences et leurs niveaux d'émission.

Chez les espèces marines, les capacités auditives diffèrent d'un taxon à l'autre. Chez les mammifères marins, l'audition est un sens important et ces capacités sont bien développées. D'une manière générale, les mammifères marins perçoivent les sons compris entre 10 Hz et 200 kHz, avec des seuils d'audition minimums proches de 60 dB re 1  $\mu$ Pa. Cependant, six groupes d'audition ont été définis (Cétacés basse, haute et très haute fréquence, Siréniens, Phocidés et autres Carnivores) et chaque groupe se caractérise par une plage et un seuil minimum d'audition qui diffèrent sensiblement.

Chez les tortues marines, l'audition est moins développée, mais il est établi que celles-ci peuvent percevoir les sons sous-marins compris entre 30 et 2 000 Hz. Le seuil d'audition minimum varie cependant d'une espèce à l'autre.

Chez les poissons, plusieurs organes permettent de percevoir les sons : les otolithes, la ligne latérale et la vessie natatoire. D'une manière générale, les poissons sont capables de percevoir les sons inférieurs à 100 dB re 1  $\mu$ Pa entre

50 et 300 Hz. Leurs capacités auditives sont toutefois très variables d'une espèce à l'autre, certaines espèces étant capables de percevoir des sons de 80 à 100 dB re 1  $\mu$ Pa jusqu'à plusieurs milliers de Hz.

Les crustacés et les mollusques sont également capables de percevoir les sons grâce à des organes et cellules sensoriels. Ils détectent les sons basse fréquence (< 3 000 Hz) mais à des niveaux élevés (> 100 dB re 1  $\mu$ Pa).

L'audition sous-marine des oiseaux plongeurs est encore très mal connue. Seul le grand cormoran a fait l'objet d'études. Cette espèce est capable de percevoir les sons entre 1,5 et 6 kHz avec un seuil d'audition inférieur à 80 dB re 1  $\mu$ Pa.

De par la physiologie et le mode de vie de certaines espèces, l'exposition au bruit peut avoir des impacts plus ou moins importants. À court terme, ces impacts incluent les réactions comportementales (fuite, plongée ou remontée en surface, modification de la vitesse de nage, arrêt de l'alimentation, etc.), le masquage acoustique (qui entraîne une modification des modes de communication), les lésions physiologiques non-létales permanentes ou temporaires (barotraumatismes, altération des organes, stress métabolique, etc.) et les lésions létales directes (altération des organes vitaux) ou indirectes (échouage, prédation). À long terme, le bruit sous-marin peut occasionner des perturbations comportementales (habituation, adaptation et déplacement) et influencer sur la démographie des espèces.

Il est important d'évaluer l'impact du bruit généré par une activité en mer sur la faune marine. Cette étude d'impact acoustique doit évaluer *a priori* le niveau de bruit attendu par modélisation de la propagation

des ondes sonores. Cette modélisation doit s'appuyer sur la connaissance des espèces présentes, de leurs capacités auditives et des conditions environnementales (bathymétrie, nature du fond, température et salinité notamment).

Des études récentes ont permis d'établir des seuils à partir desquels les espèces (mammifères marins, poissons et tortues) sont susceptibles de subir des pertes temporaires ou permanentes d'audition. En fonction de ces seuils et des prédictions du modèle de propagation des ondes sonores, il est alors possible de mettre en œuvre des mesures visant à réduire l'impact du bruit anthropique sur ces espèces.

Il est prioritaire d'éviter et de réduire ces impacts d'autant plus qu'il n'existe pas de mesures pour compenser l'impact du bruit sur la faune marine. Les mesures d'évitement consistent principalement à dimensionner le projet et/ou à adapter le calendrier des travaux et leur emprise spatiale à des périodes ou zones où aucune espèce sensible n'est présente, ou à utiliser des techniques non impactantes pour les espèces présentes.

Les mesures de réduction s'appliquent à trois niveaux. Il peut s'agir de planifier les travaux pour éviter d'interférer avec une période biologiquement sensible ou une zone fonctionnelle. Il est également possible d'adopter des techniques moins bruyantes ou des technologies permettant de réduire le bruit à la source (rideaux de bulles, blocs isolants, batardeaux) afin de réduire les émissions. Enfin, des mesures ayant pour objectif de contrôler la présence et d'éloigner les espèces de la zone de travaux peuvent également être mises en place.

Pour aller plus loin, des mesures d'accompagnement peuvent s'ajouter à ces mesures

d'évitement et de réduction. Ceci se traduit par l'acquisition de connaissances complémentaires sur les espèces (impacts ou biologie), sur les émissions sonores générées (niveaux et fréquences), par la mise à disposition de ces connaissances ou encore la participation à des programmes de recherche. Il est également possible de restaurer des habitats dégradés ou promouvoir des actions de sensibilisation autour du bruit sous-marin et de l'amélioration des techniques.

Afin de consolider les connaissances sur les impacts du bruit sur la faune marine, il est nécessaire d'encourager l'acquisition de connaissances et la recherche fondamentale. Ces éléments permettront aux porteurs de projets d'avoir une meilleure approche de leur étude d'impact et de proposer des projets mieux dimensionnés, des alternatives techniques et des mesures d'évitement/réduction adaptées.

## Abstract

The introduction of noise from anthropogenic sources into the marine environment has been an increasingly worrying issue in recent decades. Indeed, the growth of maritime uses contributes to the increase of underwater ambient noise, which directly and indirectly impacts marine fauna. The introduction of anthropogenic noise into the ocean is now considered as a pollution, in the same way as other types of pollution (chemical, microbiological, etc.) and must be included in environmental impact assessment (EIA) by project developers.

Sound is generated by acoustic waves. It can be perceived as a pressure variation or particle motion. A sound is characterized by a frequency (in Hz), a level (in dB) and a duration of occurrence (in s). Its propagation in water is about four times faster than in air (~1 500 m/s). However, this propagation depends on environmental conditions, including mainly bathymetry, nature of the bottom, temperature and salinity of the water column.

A sound can be impulsive or continuous. Different indicators exist to measure underwater sound level. The choice of the most relevant indicator depends on the nature and characteristics of the sound. A sound wave propagation model is used to map its spatial footprint.

Many anthropogenic noise sources are likely to have an impact on marine fauna. These sources are emitted by various activities: oil & gas industry, marine renewable energy, professional fishing and aquaculture, port activities, coastal development, marine aggregates extraction, cables and pipes

installation, shipping, scientific research activities and recreational motorboat activities. Each of these activities produces one or more types of noise, characterised by their nature (impulsive or continuous), their frequencies and their emission levels.

Auditory abilities of marine species differ between taxa. Hearing is an important sense for marine mammals and these abilities are well developed. In general, marine mammals perceive sounds between 10 Hz and 200 kHz, with minimum hearing thresholds close to 60 dB re 1  $\mu$ Pa. However, six hearing groups have been defined (low, high and very high frequency cetaceans, sirenians, phocids and other carnivores) and each group is characterized by an hearing range and a minimum hearing threshold that differ significantly.

In marine turtles, hearing is less developed but they can perceive underwater sounds between 30 and 2 000 Hz. However, the minimum hearing threshold varies amongst species.

In fish, several organs can perceive sounds: otoliths, lateral line and swim bladder. In general, fish are able to perceive sounds less than 100 dB re 1  $\mu$ Pa between 50 and 300 Hz. However, their hearing abilities vary widely from one species to another with some species being able to perceive sounds from 80 to 100 dB re 1  $\mu$ Pa up to several thousand Hz.

Crustaceans and molluscs are also able to perceive sounds through sensory organs and cells. They detect low frequency sounds (< 3000 Hz) but at high levels (> 100 dB re 1  $\mu$ Pa). The underwater hearing of diving birds is still very poorly known. Only the great cormorant

has been studied. This species is able to perceive sounds between 1.5 and 6 kHz with a hearing threshold below 80 dB re 1  $\mu$ Pa.

Due to the physiology and lifestyle of some species, exposure to noise may have more or less significant impacts. At short term, these impacts include behavioral reactions (avoidance, diving or surfacing, changes in swimming speed, foraging interruption, *etc.*), acoustic masking (which leads to a change in communication patterns), permanent or temporary non-lethal physiological lesions (barotrauma, organ damage, metabolic stress, *etc.*) and direct lethal lesions (alteration of vital organs) or indirect lesions (stranding, predation). At long term, underwater noise can cause behavioral disturbances (habituation, adaptation and displacement) and affect the demography of species.

Assessing the impact of anthropogenic noise on marine life is essential but challenging. The acoustic impact assessment must evaluate the noise level expected by modelling the propagation of sound waves. This modelling must be based on knowledge about the species of the area, their auditory abilities and environmental conditions (bathymetry, nature of the bottom, temperature and salinity in particular).

Recent studies have established thresholds at which species (marine mammals, fish and turtles) are likely to experience temporary or permanent loss of hearing. Based on these thresholds and predictions of the sound wave propagation model, it is then possible to implement measures to reduce anthropogenic noise impact on these species. If no measure are currently available to

compensate the impact of noise on marine life, it is possible to avoid and reduce these impacts. Avoidance measures consist mainly of sizing the project and/or adapting the work schedule and its spatial extent to periods or zones where no sensitive species are present, or by using non-impacting techniques.

The reduction measures apply at three levels. This may involve planning the work to avoid interfering with a biologically sensitive period or a functional area. It is also possible to adopt quieter techniques or technologies that reduce noise at the source (bubble curtains, insulating blocks, cofferdams) to reduce emissions. Finally, measures aimed at controlling the presence and keeping the species away from the work area can also be implemented.

To go further, accompanying measures can be added to these avoidance and reduction measures. This may concern the acquisition of additional knowledge about the species (impacts or biology), the noise emissions generated (levels and frequencies), the dissemination of this knowledge or participation to research programs. It is also possible to restore degraded habitats or promote awareness-raising actions around underwater noise and improved techniques.

In order to consolidate knowledge about the impacts of noise on marine life, it is necessary to encourage the acquisition of knowledge and fundamental research. These elements will enable stakeholders to have a better approach to their impact assessment and to propose better sized projects, technical alternatives and appropriated mitigation measures.

# Sommaire

Avant-propos .....	1
Glossaire .....	2
Résumé .....	3
Abstract .....	6
Sommaire .....	8
Lexique .....	11
Introduction .....	23
Réglementation .....	24
Contenu du guide .....	28
Préambule : Notions basiques d'acoustique sous-marine .....	29
Les ondes acoustiques.....	29
La propagation des ondes sonores en milieu marin .....	30
Le bruit ambiant sous-marin.....	33
Évaluer le bruit sous-marin.....	35
1) Caractérisation du bruit en fonction du type de signal.....	35
2) Bruit émis, bruit reçu et bruit perçu .....	36
3) Différents indicateurs pour évaluer le niveau de bruit.....	37
a) Indicateurs du niveau de bruit émis .....	37
b) Indicateurs du niveau de bruit reçu.....	38
c) Indicateurs du niveau de bruit perçu .....	39
4) La mesure du son dans l'eau .....	43
5) Modéliser la propagation des ondes acoustiques.....	45
<b>PARTIE 1 : Les différentes activités anthropiques génératrices de bruit sous-marin et les différents types d'émissions qu'elles génèrent .....</b>	<b>49</b>
<b>I. Industrie du pétrole et du gaz.....</b>	<b>49</b>
1) Prospection et recherche de gisements.....	49
a) Sondeurs et sonars .....	49
b) Prospection sismique.....	51
2) Exploration et production .....	53
a) Battage de pieux .....	53
b) Forage.....	53
c) Production .....	54
3) Démantèlement.....	55
<b>II. Énergies marines renouvelables .....</b>	<b>55</b>
1) Étude de terrain.....	56
2) Phase de construction.....	56
a) Battage de pieux .....	56
b) Autres activités liées à la construction.....	58
c) Pose des câbles sous-marins .....	59

3) Phase opérationnelle .....	59
a) Bruit lié au fonctionnement des structures.....	59
b) Bruit lié à la maintenance.....	61
4) Phase de démantèlement .....	61
III. Activités halieutiques .....	62
1) Pêche .....	62
a) Bruit généré par les navires de pêche .....	62
b) Bruit des engins de pêche .....	62
c) Répulsifs acoustiques (pingers).....	63
2) Aquaculture .....	63
a) Bruit généré par les embarcations .....	63
b) Répulsifs acoustiques (pingers).....	63
IV. Activités portuaires.....	64
1) Signature acoustique des navires de service .....	64
2) Dragage .....	64
V. Travaux et aménagements côtiers .....	66
1) Fonçage de palplanches.....	66
2) Déroctage.....	67
3) Enrochement.....	68
VI. Extraction de granulats .....	68
VII. Installation de câbles et canalisations .....	69
1) Phase de prospection .....	69
2) Phase d'installation .....	69
3) Phase d'entretien et de démantèlement .....	70
VIII. Trafic maritime (navires marchands et transport de passagers) .....	71
1) Contribution au bruit ambiant en champ lointain .....	71
2) Signatures individuelles de navire en champ proche .....	71
IX. Activités récréatives .....	73
X. Activités scientifiques/Recherche .....	74
XI. Synthèse .....	76
<b>PARTIE 2 : Impact des activités génératrices de bruit sur la faune marine.....</b>	<b>79</b>
I. L'audition des espèces marines .....	79
1) Les mammifères marins.....	79
2) Les tortues marines.....	82
3) Les poissons .....	84
4) Les crustacés et mollusques.....	87
5) Oiseaux plongeurs .....	88
II. Impacts des émissions sonores sur la faune marine .....	90
1) Impacts à court terme .....	91
a) Réactions comportementales, fuite, changements migratoires.....	91
b) Masquage acoustique.....	92
c) Dommages physiologiques non létaux, permanents ou temporaires.....	93
d) Lésions létales .....	95

2) Impacts à long terme.....	98
a) Habituation, adaptation, déplacements .....	98
b) Conséquences énergétiques et démographiques .....	98
3) Effets cumulés.....	100
III. Évaluer les impacts d'un projet sur la faune marine .....	102
1) Évaluer le niveau de bruit et la propagation des ondes acoustiques .....	102
a) Évaluer le niveau de bruit .....	102
b) Évaluer la propagation des ondes acoustiques .....	102
2) Connaître les espèces présentes .....	104
a) Distribution, saisonnalité et fréquentation.....	104
b) Sensibilité auditive .....	105
3) Fixer des seuils de tolérance et définir des périmètres d'exclusion .....	106
4) Modèles existants de prédiction des impacts biologiques .....	110
5) Limites et axes à développer .....	113
<b>PARTIE 3 : Procédures ou technologies disponibles pour éviter, réduire ou compenser les impacts des émissions sonores sur la faune marine.....</b>	<b>117</b>
I. Éviter .....	117
1) Planification spatiale et temporelle .....	117
2) Dimensionnement/caractéristiques du projet.....	119
3) Suspension des travaux lors des périodes écologiquement importantes.....	119
4) Utilisation de techniques d'exploitation/fonctionnement non impactantes.....	119
II. Réduire .....	122
1) Planification .....	122
2) Réduire le bruit à sa source .....	123
a) Utiliser des techniques moins bruyantes .....	123
b) Techniques visant à isoler/confiner la source de bruit.....	128
3) Procédures de suivis de présence et d'éloignement .....	130
a) Définition et calcul d'une zone d'exclusion .....	130
b) Pre-watch .....	131
c) Soft-start et ramp-up .....	132
d) Surveillance visuelle pendant les émissions.....	132
e) Surveillance acoustique .....	134
f) Arrêt des travaux en cas de présence d'animaux.....	135
g) Répulsifs acoustiques .....	135
III. Compenser .....	139
IV. Suivre .....	139
V. Accompagner .....	140
1) Acquisition de connaissances complémentaires et diffusion.....	140
2) Restauration/réhabilitation d'habitats.....	140
3) Actions de sensibilisation .....	140
VI. Synthèse .....	141
<b>PARTIE 4 : Fiches synthèse .....</b>	<b>145</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>185</b>
<b>Liste des figures .....</b>	<b>201</b>
<b>Liste des tableaux.....</b>	<b>203</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>204</b>

# Lexique

## A

### **Abondance :**

L'abondance absolue d'une espèce/d'un groupe correspond au nombre d'individus de cette espèce/ce groupe dans une zone géographique définie, ou composant une population donnée.

L'abondance relative correspond au nombre d'individus d'une espèce par unité de surface (ou de volume) par rapport au nombre total d'individus toutes espèces confondues (au sens de composition spécifique d'un peuplement). On peut également qualifier l'abondance de relative lorsque l'estimation d'abondance n'est pas corrigée pour les biais de détection et de disponibilité.

### **Absorption :**

Phénomène physique de transformation de l'énergie acoustique en une autre forme d'énergie (énergie mécanique, chaleur, etc.). Ce phénomène est responsable de la perte d'une partie de l'énergie de l'onde acoustique au contact d'une interface (par exemple eau/air) ou dans le milieu de propagation.

### **Acuité auditive :**

Capacité à percevoir les sons. L'acuité auditive varie en fonction de la fréquence. Elle peut être très différente d'une espèce à l'autre. Elle peut être représentée par un audiogramme.

### **Amplitude :**

L'amplitude correspond à l'intensité des variations de pression générées par l'onde sonore. Comme le niveau sonore, elle témoigne de la « force » d'un son.

### **Anthropophonie :**

L'anthropophonie fait référence à l'ensemble des sons émis par les activités humaines. Il s'agit d'une des trois composantes du bruit ambiant, avec la géophonie et la biophonie.

### **Audiogramme :**

Représentation graphique de l'acuité auditive. Il représente le plus bas niveau (en déciBel) de perception d'un son en fonction de la fréquence.

## B

---

### **Biophonie :**

Composante biologique du bruit ambiant, la biophonie fait référence à l'ensemble des sons d'origine biologique non humaine, émis volontairement (vocalises, clics, *etc.*) ou involontairement (déplacement).

### **Barotraumatisme :**

Blessure causée par une variation trop rapide de la pression extérieure (air ou eau) au niveau d'organes contenant des cavités remplies de gaz.

### **Bruit ambiant :**

Le bruit ambiant correspond au bruit global perçu en un point donné pour un intervalle de temps considéré en dehors de toute perturbation ou bruit particulier. Il comprend l'ensemble des sources sonores présentes dans l'environnement. Le bruit ambiant possède donc trois composantes : l'anthropophonie, la biophonie et la géophonie.

### **Bruit large bande :**

Bruit global mesuré sur une large gamme de fréquences.

### **Bruit propre :**

Bruit existant au niveau d'un récepteur (par ex. au niveau d'une antenne de réception d'un sonar).

### **Bruit rayonné :**

Tout ou partie du bruit généré par une source, qui se propage dans le milieu et peut être intercepté par un récepteur (hydrophone ou individu). Ce bruit rayonné représente ainsi la signature acoustique de cette source.

## C

---

### **Cavitation :**

Phénomène de vaporisation d'un fluide soumis à de faibles niveaux de pression. Il se forme alors des cavités gazeuses (bulles). Ce phénomène est couramment observé autour des pales d'hélice.

### **Célérité :**

Vitesse de propagation, en m/s, d'un phénomène ondulatoire comme une onde acoustique. La célérité d'un son est fonction des propriétés du milieu dans lequel il se propage : elle est de 340 m/s dans l'air à 15°C et varie entre 1 450 et 1 550 m/s dans l'eau de mer (en fonction de la température, de la salinité et de la pression).

### Champ proche/champ lointain :

Le champ proche constitue l'environnement immédiat de la source sonore, à l'intérieur d'une zone où l'intensité sonore est rapidement oscillante, passant par des *maxima* et des *minima*, avec une valeur moyenne constante. À l'inverse, le champ lointain correspond à une distance au-delà de laquelle l'intensité sonore décroît proportionnellement avec l'éloignement.

## D

### DéciBel (dB) :

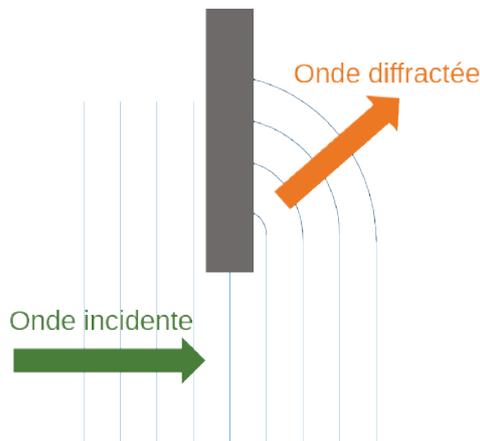
Unité logarithmique de quantification du niveau sonore (notée dB). Elle peut quantifier l'intensité sonore ou la pression acoustique. Le déciBel est une approximation de la sensation auditive.

### Densité :

Abondance d'une population exprimée en nombre d'individus par unité de surface (ex. : par km<sup>2</sup>). Elle repose sur l'analyse des comptages directs, les méthodes de capture et de recapture, les échantillonnages, ou les méthodes indirectes (ex. : analyse des traces laissées par les animaux).

### Diffraction :

Modification de la direction de propagation d'une onde sonore par un obstacle ou des reliefs de surface :



### Diffusion :

Modification de la direction de propagation d'une onde sonore du fait de l'effet cumulé des phénomènes de réflexion, réfraction et diffraction.

## E

---

### **Effet Doppler :**

Décalage de fréquence observé entre les mesures à l'émission et à la réception d'une onde acoustique. Ce décalage est dû au déplacement de la source émettrice ou du récepteur : le son devient plus aigu lorsque la source et le récepteur se rapprochent et plus grave lorsqu'ils s'éloignent.

### **Émergence sonore :**

Correspond à la différence entre le niveau de bruit dans le milieu lorsque la source sonore que l'on cherche à caractériser émet et le niveau de bruit ambiant lorsque la source n'émet pas : Émergence (dB) = Niveau de bruit perçu (source en fonction) – bruit ambiant (source stoppée)

### **Empreinte sonore :**

Lors d'une étude d'impact, l'empreinte sonore d'un projet représente la zone géographique (ou périmètre) à l'intérieur de laquelle le niveau de bruit va être modifié par le projet.

## F

---

### **Filtre passe-haut/filtre passe-bas :**

Filtre fréquentiel ne laissant passer que les sons supérieurs (filtre passe-haut) ou inférieurs (filtre passe-bas) à une certaine fréquence appelée fréquence de coupure.

### **Fitness ou valeur sélective :**

Capacité d'un individu à produire des descendants matures (viabiles et reproducteurs), relativement aux autres individus de la même population et au même moment. La *fitness* d'un individu (et donc d'une population) se définit donc par sa propriété à survivre ainsi que par sa fréquence de reproduction (taux moyen de descendants par unité de temps ou en termes absolus).

Peut aussi qualifier la contribution d'un gène ou d'un génotype à la génération suivante, relativement à la contribution des autres gènes ou génotypes de la même population et au même moment.

La *fitness* est souvent difficile à évaluer ; on utilisera alors des mesures indirectes de celles-ci (succès reproducteur, survie des jeunes, *etc.*).

### **Fondamental :**

Dans le cas d'un son pur, le fondamental désigne la fréquence  $f$  de ce son. Dans le cas d'un spectre de sons complexes, qui fait apparaître plusieurs harmoniques, la fréquence fondamentale, ou fondamental, désigne l'harmonique de premier rang, soit le plus petit intervalle fréquentiel entre les harmoniques de même origine. Les harmoniques désignent donc des signaux sinusoïdes de fréquences :

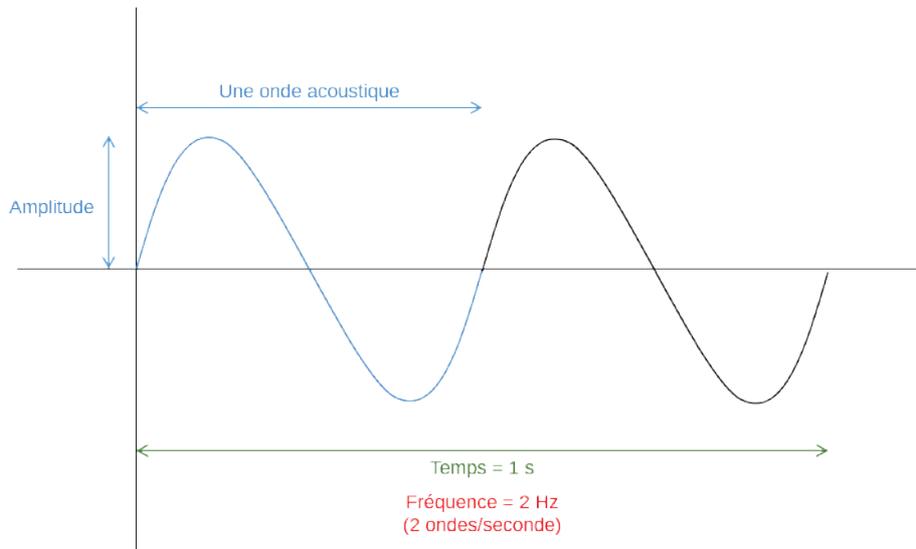
$$fn = f \times n$$

Où  $n$  est un entier positif appelé rang de l'harmonique, et  $f$  le fondamental.

### Fréquence :

Notée  $f$  et exprimée en Hertz (Hz), la fréquence correspond au nombre d'ondes acoustiques qui passent par seconde en un point donné :

La fréquence correspond à la « hauteur » d'un son : plus la fréquence est élevée, plus le son est aigu.



### Fréquence de coupure :

Fréquence (en Hz) critique en dessous de laquelle la colonne d'eau cesse d'agir comme un guide d'onde et engendre de ce fait une forte atténuation de la propagation des ondes sonores. Le milieu agit alors comme un filtre passe-haut.

## G

### Gabarit acoustique :

Un gabarit acoustique, ou gabarit de référence, représente la signature spectrale (niveaux en fonction de la fréquence) représentative d'une source de bruit dans une configuration donnée.

### Géophonie :

Composante du bruit ambiant relative aux sons d'origine naturelle mais non biologique : bruit des vagues et du vent, tonnerre, glissements sédimentaires, tremblements de terre, *etc.*

## H

### Harmonique :

Composante spectrale d'un son dont la fréquence est un multiple entier d'une fréquence dite fondamentale.

## I

### **Intensité sonore (I) :**

Une onde sonore émet un son avec une certaine puissance acoustique, exprimée en watts. L'intensité sonore correspond à la puissance moyenne reçue par unité de temps à travers une unité de surface (perpendiculairement à l'axe de la propagation). Notée  $I$ , elle s'exprime en  $\text{Watt/m}^2$ .

### **Impédance acoustique :**

L'impédance acoustique correspond au rapport entre la pression acoustique et la vitesse particulaire (vitesse d'oscillation des particules du milieu). En pratique, l'impédance correspond à la résistance du milieu au passage d'une onde acoustique. Pour une onde acoustique plane progressive, elle est égale au produit de la masse volumique du milieu par la célérité de l'onde dans le milieu :

$$Z_{ac} = \rho_m \times c$$

## L

### **Longueur d'onde :**

La longueur d'onde, notée  $\lambda$ , représente la distance en mètre parcourue par une onde en un seul cycle (ou pendant une période). Elle correspond donc à la distance la plus courte entre deux points semblables de deux cycles successifs d'une onde acoustique (ex. : deux points d'amplitude maximale). La longueur d'onde est fonction de la fréquence (et donc de la période) et de la célérité de l'onde dans le milieu :

$$\lambda = c/f = c \times T$$

## M

### **Masquage :**

Le masquage, ou « effet de masque », correspond au procédé par lequel la perception d'un son est rendue plus difficile du fait d'un bruit parasite (souvent de mêmes fréquences), ou d'un important bruit ambiant. Le seuil d'audition pour ce son est alors augmenté.

### **Mysticètes :**

Cétacés à fanons. Ce groupe taxonomique (sous-ordre des cétacés) regroupe les baleines et rorquals.

### **Mitigation :**

Opération destinée à atténuer ou à modérer un événement ou une action de forte emprise.

## N

---

### Niveau sonore (L) :

Le niveau sonore, noté  $L$  pour *level* et exprimé en dB, est lié à l'intensité sonore ou à la pression acoustique par la relation :

$$L_{(dB)} = 10 * \log_{10} \frac{I}{I_0} \quad \text{ou} \quad L_{(dB)} = 20 * \log_{10} \frac{P}{P_0}$$

Avec  $I$  : intensité sonore de l'onde acoustique exprimée en  $W/m^2$ ,  $P$  : pression acoustique en Pa,  $I_0$  : Intensité sonore de référence et  $P_0$  : pression acoustique de référence. Pour une pression acoustique de référence de  $1 \mu Pa$ ,  $I_0 = 6,5 \cdot 10^{-19} W/m^2$ .

Le niveau sonore permet d'exprimer l'intensité d'un son sur une échelle logarithmique, et donc plus restreinte et plus facile à représenter.

### Niveau de pression sonore :

Le niveau de pression sonore, noté  $L_p$  ou SPL pour *Sound Pressure Level*, exprime la quantité d'énergie reçue par un récepteur (hydrophone, individu) à une distance donnée de la source émettrice.

### Niveau d'exposition sonore :

Le niveau d'exposition sonore, noté  $L_{E,p}$  ou SEL pour *Sound Exposure Level*, est un indicateur du bruit reçu qui intègre à la fois le niveau de bruit et la durée d'exposition à ce bruit. Il correspond au niveau de pression généré par une impulsion sonore (émission sonar, battage de pieux) de durée  $t$  ramené sur une seconde.

## O

---

### Octave :

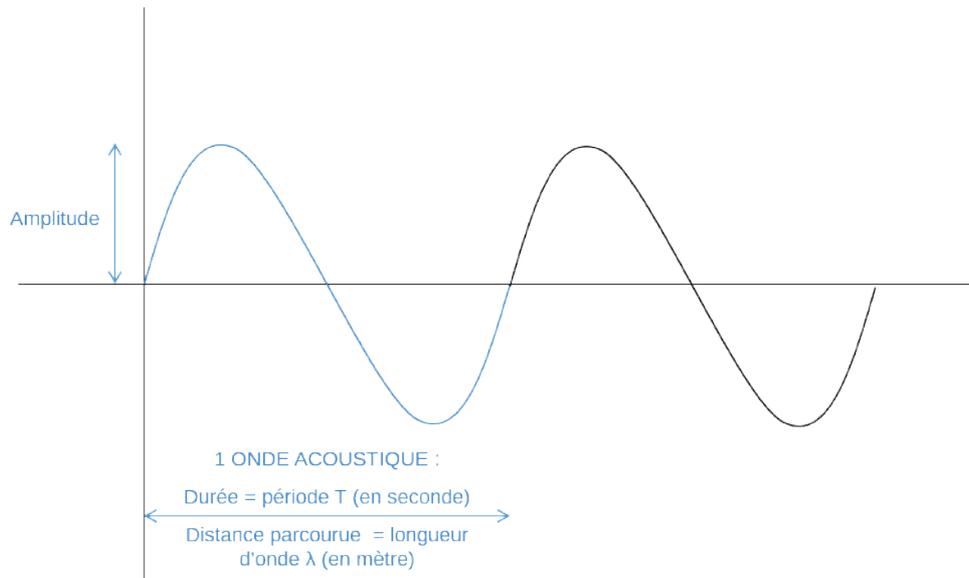
Intervalle de fréquences dont la limite supérieure correspond au double de la limite inférieure.

### Odontocètes :

Cétacés à dents. Ce groupe taxonomique (sous-ordre des cétacés) regroupe les dauphins, marsouins, cachalots, orques, globicéphales, narvals et bélugas.

### Onde acoustique (ou onde sonore)

Perturbation mécanique (due à une compression-dilatation du milieu) qui se propage dans un milieu matériel par transfert d'énergie mais sans transfert de matière. Une onde acoustique est une onde périodique dont la perturbation se répète à intervalle régulier et qui se caractérise donc par une amplitude, une longueur d'onde (distance parcourue lors d'un cycle) et une période (durée d'un cycle) :



## P

### Pascal (Pa) :

Unité de pression, notée Pa, correspondant à 1 Newton par mètre carré ( $1 \text{ Pa} = 10^{-5} \text{ bar}$ ).

### Période :

La période, notée T, correspond à la durée en seconde d'un cycle d'une onde acoustique (voir onde acoustique). Elle correspond à l'inverse de la fréquence  $f$  :

$$T = 1/f$$

### Pertes par propagation :

Pertes d'énergie acoustique (et donc d'intensité) liées à la distance entre la source et le récepteur. Également appelées « pertes par transmission », elles sont liées aux caractéristiques du milieu.

### Pinnipèdes :

Mammifères semi-aquatiques de l'ordre des Carnivores. Ce groupe taxonomique regroupe les Phocidés (phoques et éléphants de mer), les Otariidés (otaries à fourrure et lions de mer) et les Odobénidés (morses).

### Population :

Groupe d'individus ayant des ancêtres communs qui sont plus susceptibles de se reproduire entre eux qu'avec des individus d'une autre population. Ces individus appartenant à la même espèce vivent sur un territoire dont les limites sont généralement celles de la biocénose dont cette espèce fait partie. Une population est une entité réelle qui possède sa propre organisation, ses propres paramètres de répartition spatiale, de densité de structure, de natalité ou de mortalité.

### Pression acoustique :

Un son se propage dans le milieu sous la forme d'une oscillation de pression périodique autour d'une valeur de référence. La valeur de cette oscillation constitue la pression acoustique. Cette pression acoustique décrit l'amplitude du son perçu. Elle se mesure en Pascal (Pa). En milieu marin, la pression acoustique de référence est égale à 1  $\mu$ Pa.

### Puissance acoustique :

La puissance acoustique correspond à la quantité d'énergie qui génère l'onde sonore par unité de temps. Elle se mesure en Watt (W).

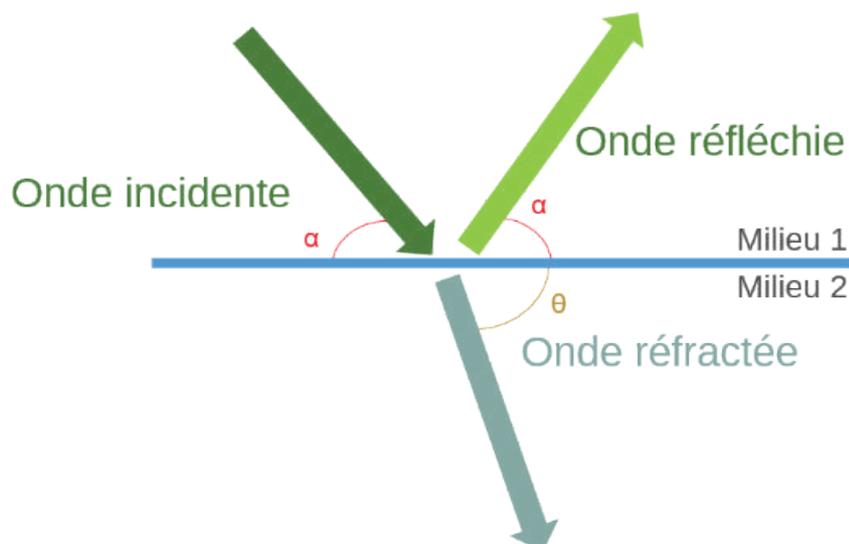
## R

### Réflexion :

Lorsqu'une onde sonore rencontre un obstacle, ou change de milieu (à l'interface eau/air par exemple), une partie de l'onde est réfléchi et repart avec un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence (cf. figure).

### Réfraction :

Lorsqu'une onde sonore rencontre un obstacle, ou change de milieu (à l'interface eau/air par exemple), une partie de l'onde est réfractée et traverse l'interface en étant déviée (cf. figure).



# S

---

## **Seuil d'audition :**

Niveau de bruit minimum qui peut être perçu par un individu, pour une fréquence donnée, en l'absence de bruit de fond significatif.

## **Signature acoustique :**

La signature acoustique est la représentation temporelle de la pression acoustique. Elle intègre l'ensemble des fréquences générées par une source sonore et permet de caractériser cette source.

## **Siréniens :**

Ordre de mammifères aquatiques regroupant les Dugongidés (dugongs) et les Trichéhidés (lamantins).

## **Son :**

Variation de pression provoquée par une onde acoustique (vibration).

## **Son complexe :**

Un son complexe est composé de plusieurs sons purs de fréquences et d'amplitudes différentes.

## **Son pur :**

Un son pur correspond à une onde sinusoïdale dont la fréquence et l'amplitude sont constantes durant toute la durée d'émission. Son spectre ne présente qu'une seule harmonique : le fondamental.

## **Sonar :**

Acronyme du terme anglais *SOund NAVigation and Ranging*. Système de détection et de localisation d'un repère sous-marin grâce à l'émission/réception (sonar actif) ou à la réception (sonar passif) d'un signal sonore.

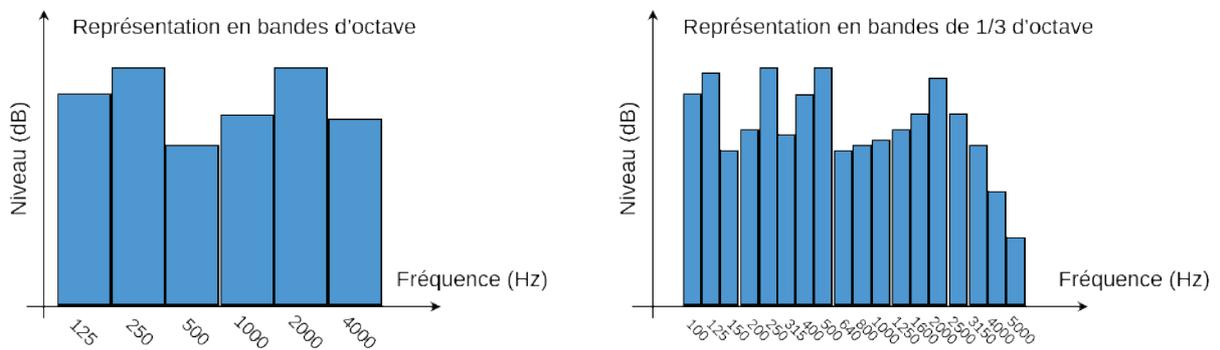
## **Spectre acoustique :**

Le spectre acoustique d'un son représente la distribution du niveau de bruit généré en fonction des fréquences produites.

# T

## Tiers d'octave :

En analyse spectrale, le tiers d'octave, qui représente une subdivision de la bande d'octave, est utilisé pour affiner les analyses. Compte tenu de la spécificité de perception sensorielle des fréquences, ces bandes d'analyse sont normalisées et sont centrées sur certaines fréquences :



## Tonalité marquée :

Une tonalité marquée est détectée dans un spectre en tiers d'octave quand la différence de niveau entre la bande de tiers d'octave et les quatre bandes de tiers d'octave les plus proches (les deux bandes immédiatement inférieures et les deux bandes immédiatement supérieures) atteint ou dépasse un certain niveau. Cela se traduit par des pics sur le spectre acoustique.



# Introduction

Depuis plusieurs dizaines d'années, la communauté scientifique tire la sonnette d'alarme concernant l'introduction de sources sonores d'origine anthropique en milieu marin [8, 16, 116, 158]. Durant les dernières décennies, le développement des usages maritimes (trafic commercial, énergies marines, constructions offshore, usages récréatifs, *etc.*) a conduit à augmenter le niveau de bruit ambiant sous-marin d'origine anthropique, notamment en moyennes et basses fréquences [30, 78, 79, 127]. De nombreuses sources de bruit d'origine anthropique viennent s'ajouter à un environnement sonore déjà riche de sons d'origine physique, telles que la houle, la pluie ou les mouvements tectoniques, et de sons d'origine biologique (communications des mammifères marins, sons générés par les pinces des crustacés, *etc.*).

Ainsi, le son est une composante importante des habitats marins. En effet, le milieu marin est très propice à la propagation des ondes sonores, et de nombreuses espèces ont évolué en tirant profit de cette propriété. Les mammifères marins, notamment, ont une ouïe particulièrement développée. Ils utilisent le son pour interagir, se déplacer et s'orienter ou détecter leurs proies et prédateurs. Certains cétacés ont développé un sonar biologique très performant qui leur permet de s'orienter dans un espace en trois dimensions et de localiser leurs proies [61, 183]. Pour ces animaux, une modification de l'environnement sonore peut donc avoir un impact conséquent. Le bruit sous-marin d'origine anthropique peut en effet interférer avec les signaux acoustiques émis par un effet de masquage et ainsi limiter les

informations perçues par les mammifères marins [41, 61], mais les conséquences peuvent également être plus dramatiques, et certaines études ont par exemple souligné le lien entre l'utilisation de sonars militaires et les échouages massifs de cétacés [68, 165, 88]. De ce fait, il est aujourd'hui établi que la préservation des espèces de mammifères marins doit intégrer les perturbations liées au bruit sous-marin d'origine anthropique [10, 16].

Les mammifères marins ne sont pas le seul groupe d'espèces à être impacté par le bruit sous-marin. Même si les effets sont moins bien connus et peu documentés, plusieurs études ont démontré la sensibilité des poissons aux ondes sonores. Chez les poissons comme chez les mammifères marins, la communication entre individus peut être masquée dans les zones où le trafic maritime est important et le bruit ambiant élevé [33]. Les sources de bruit impulsionnel, qui introduisent ponctuellement une importante quantité d'énergie acoustique dans le milieu, peuvent altérer les fonctions vitales de certains poissons et causer leur mort [151].

Les tortues marines n'utilisent pas le son pour communiquer, mais l'acoustique leur sert à se déplacer, localiser leurs proies, éviter leurs prédateurs et tirer des informations de leur environnement [45]. Si les capacités auditives des tortues marines sont encore mal connues, leur statut de conservation (6 des 7 espèces de tortues marines sont considérées comme menacées, avec un statut UICN vulnérable, en danger ou en danger critique d'extinction) a conduit à intensifier les recherches

concernant les pressions qui les menacent. Les résultats de ces recherches montrent, entre autres, que la gamme d'audition des tortues marines intersecte notamment avec la gamme de fréquences du bruit généré par les canons à air utilisés lors de campagnes de prospection sismique [40, 134]. Les effets de ce type de bruit sur les tortues marines vont du dérangement à la perte d'audition. L'évaluation des effets des émissions acoustiques en mer sur ces espèces ne doit donc pas être négligée.

D'autres espèces marines peuvent également être affectées par les émissions sonores d'origines anthropiques en milieu marin. Le bruit basse fréquence peut par exemple causer des réactions comportementales chez les céphalopodes [7, 24, 122] et chez les crustacés décapodes ; chez ces derniers, des dommages physiologiques ont également été observés lorsqu'ils sont soumis à des sons de fortes amplitudes [52, 173]. Enfin, certaines sources sonores d'origine anthropique peuvent également affecter le développement des œufs et larves et donc affecter l'équilibre et la pérennité des populations et des écosystèmes [3, 148, 152].

Les effets des émissions sonores d'origine anthropique sur la faune marine concernent donc un large panel d'espèces et peuvent être très divers, allant de la gêne susceptible de provoquer la fuite et l'abandon d'habitat aux dommages physiologiques pouvant conduire indirectement à la mort de l'individu, en passant par le masquage de signaux de communication. Ces effets sont donc susceptibles de toucher une espèce à l'échelle de l'individu ou d'un groupe d'individus, mais également à l'échelle des populations. En conséquence, les études réalisées ces dernières années ont permis de mieux comprendre et appréhender ces effets, et la pollution sonore est aujourd'hui

reconnue comme une menace pour l'environnement marin au même titre que la pollution chimique [2].

## Réglementation

S'il n'existe pas à l'heure actuelle de réglementation encadrant les émissions sonores en mer à l'échelle mondiale, plusieurs conventions internationales, dont la France est signataire, intègrent désormais le risque d'impact sur la faune marine lié à l'introduction de bruit dans le milieu marin.

- La Commission baleinière internationale s'intéresse au sujet depuis 2008 et a adopté une résolution spécifique en 2018 encourageant les États parties à mettre en place des mesures pour réduire l'impact sur les cétacés.
- L'OMI a publié en 2014 des lignes directrices pour la réduction du bruit sous-marin provenant de la navigation commerciale afin de remédier aux effets néfastes sur la vie marine.
- La Conférence des Parties de la CDB a adopté en 2016 une résolution sur les impacts des débris marins et du bruit sous-marin anthropogénique sur la biodiversité marine et côtière.
- La Conférence des Parties à la CMS a approuvé en 2017 des lignes directrices sur l'évaluation de l'impact environnemental du bruit sous-marin généré par les activités humaines.
- La Convention pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est, ou convention OSPAR, intègre depuis 2015 une stratégie de surveillance du bruit ambiant (*Ambient Noise Monitoring Strategy*) ; en 2017, une évaluation de la pression liée au bruit impulsionnel a été incluse dans l'évaluation intermédiaire de l'état de l'Atlantique du Nord-Est (*Intermediate*

*Assessment of the state of the North-East Atlantic).*

- La Convention pour la protection de la mer Méditerranée contre les pollutions, ou convention de Barcelone, a fixé 11 objectifs écologiques (OE) pour les parties contractantes. L'OE 11 concerne l'introduction d'énergie, y compris l'énergie acoustique.
- L'accord intergouvernemental ACCOBAMS (*Agreement on the Conservation of Cetaceans in the Black Sea, Mediterranean Sea and contiguous Atlantic area*), mis en place sous l'égide de la Convention de Bonn, a pris dès 2004 et jusqu'à la plus récente réunion des Parties de novembre 2019, des résolutions visant à inciter les Parties à réduire leurs émissions sonores en mer. L'ACCOBAMS conduit également des projets d'étude du bruit sous-marin qui visent à protéger les cétacés contre le bruit d'origine anthropique, et anime un groupe de travail « bruit sous-marin » conjointement avec l'ASCOBANS (*Agreement on the Conservation of Small Cetaceans of the Baltic and North Seas*) et la CMS (*Convention on the Conservation of Migratory Species of Wild Animals*). Il organise des formations pour les observateurs embarqués et pour les opérateurs de surveillance par acoustique passive concernant la mise en œuvre de mesures de réduction de l'impact sur les mammifères marins du bruit émis lors des opérations en mer.

**Au sein de l'Union européenne,** la directive-cadre Stratégie pour le milieu marin (DCSMM)<sup>1</sup>, adoptée en 2008, a pour

objectif principal de « *maintenir la diversité biolo-gique et de préserver la diversité et le dynamisme des océans et des mers et d'en garantir la propreté, le bon état sanitaire et la productivité* ». Cette directive requiert que les États membres de l'Union européenne définissent chacun une stratégie marine ayant pour but de ramener les pressions exercées par les activités humaines sur le milieu marin à des niveaux compatibles avec l'atteinte ou le maintien d'un bon état écologique (BEE) des eaux marines sous leur juridiction.

Les stratégies marines des États membres comprennent :

- une définition nationale du bon état écologique des eaux marines ;
- un diagnostic de l'état écologique des eaux marines et des pressions qui s'y exercent ;
- un programme de surveillance de l'évolution de l'état du milieu marin ;
- des objectifs environnementaux exprimant l'ambition de l'État membre en termes de limitation et de réduction des pressions nécessaires à l'atteinte ou au maintien du bon état écologique ;
- un programme de mesures ayant pour but d'atteindre les objectifs environnementaux et donc d'atteindre ou maintenir le bon état écologique des eaux marines.

L'atteinte du bon état écologique est estimée à travers onze descripteurs, parmi lesquels figure l'introduction d'énergie, y compris de sources sonores sous-marines, qui doit s'effectuer à des niveaux qui ne nuisent pas au milieu marin<sup>2</sup>.

Dans le cadre du descripteur D11, le BEE

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

<sup>2</sup> Définition du descripteur D11 selon la Décision (UE) 2017/848 de la Commission du 17 mai 2017 établissant les critères de normes méthodologiques applicables au bon état écologique des eaux marines ainsi que des spécifications et des méthodes normalisées de surveillance et d'évaluation, et abrogeant la directive 2010/477/UE.

est évalué sur la base de deux critères portant exclusivement sur les émissions sonores dans les eaux marines en matière de **bruit impulsif** (D11C1) et de **bruit continu à basse fréquence** (D11C2).

Le critère D11C1 relatif au bruit impulsif anthropique est défini comme suit : « *la répartition spatiale, l'étendue temporelle et les niveaux des sources de sons impulsifs anthropiques ne dépassent pas les niveaux nuisibles aux populations d'animaux marins* ». Deux indicateurs sont utilisés pour le mesurer : le risque de dérangement et le risque de surmortalité. Ils correspondent à la distribution temporelle et spatiale des émissions impulsives (plus ou moins fortes selon qu'il s'agisse de dérangement ou de surmortalité), exprimée en nombre de jours comportant des sources d'émissions impulsives par trimestre (ou par mois), et à la distribution spatiale du cumul de jours par trimestre (ou par mois) par maille.

Le critère D11C2 relatif au bruit continu anthropique à basse fréquence est défini comme suit : « *la répartition spatiale, l'étendue temporelle et le niveau des sons continus anthropiques ne dépassent pas les niveaux nuisibles aux populations d'animaux marins* ». Il est mesuré selon le risque de masquage, c'est-à-dire la distribution spatiale du niveau de bruit ambiant selon les maximums annuels atteint par maille dans la colonne d'eau.

Pour définir les valeurs seuils de ces deux critères, les États membres coopèrent au niveau de l'Union européenne, en tenant compte des particularités régionales ou sous-régionales.

Plusieurs pays ont pris des initiatives nationales afin de réduire les impacts liés aux émissions sonores en milieu marin dans leurs eaux territoriales. Ainsi, l'Irlande a mis en place depuis 2014 des protocoles stricts pour encadrer les émissions sonores en milieu marin<sup>3</sup>. En Allemagne, le BSH (*Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie*), agence fédérale responsable de l'approbation des installations en mer, a publié des recommandations techniques devant être mises en place *a minima* lors de l'évaluation des impacts liés à l'installation de parcs éoliens en mer. Ces recommandations incluent un protocole d'évaluation du bruit sous-marin [21]. L'Allemagne a également fixé en 2013 des seuils acoustiques à ne pas dépasser dans le cadre des opérations de battage de pieux<sup>4</sup>. La Belgique a mis en place ce type de mesure depuis 2012<sup>5</sup>. D'autres pays européens, à l'instar du Danemark ou des Pays-Bas, ont également émis des recommandations. Enfin, au Royaume-Uni, le JNCC (*Joint Nature Conservation Committee*), conseiller statutaire auprès du gouvernement britannique et des administrations décentralisées, a rédigé plusieurs directives afin de minimiser les impacts sonores liés au battage de pieux, à l'utilisation d'explosifs ou à la prospection géophysique [89-91].

**En France**, la DCSMM est transposée par les articles L. 219-7 à L. 219-18 et R. 219-2 à R. 219-10 du Code de l'environnement. Elle ne s'applique qu'en métropole.

Les stratégies marines dont l'adoption est requise par la DCSMM ont été définies en

<sup>3</sup> Surveillance visuelle préalable obligatoire, périmètre d'exclusion de 1 000 m, procédure de *soft-start/ramp-up* obligatoire si les niveaux sonores sont susceptibles de dépasser un niveau Lp,pk de 170 dB re 1 µPa @ 1 m.

<sup>4</sup> Seuils de 160 dB (LE,p) et 190 dB (Lp,pk) à 750 m de la source de bruit. Seuils fixés dans le cadre du « *Noise Mitigation Concept* ».

<sup>5</sup> Seuil Lp,pk de 185 dB à 750 m de la source de bruit.

2012 sous le terme de plans d'action pour le milieu marin. Un plan d'actions a été adopté pour chacune des quatre sous-régions marines de métropole (Manche-mer du Nord, mers celtiques, golfe de Gascogne, Méditerranée occidentale) entre 2012 et 2016. Pour le deuxième cycle de mise en œuvre de la directive, ce sont les plans d'actions des documents stratégiques de façade (DSF) qui garantissent la mise en œuvre de la DCSMM. Dans ce cadre, l'évaluation des eaux marines DCSMM ainsi que les objectifs environnementaux adoptés en 2012 ont été mis à jour à l'automne 2019. Le programme de surveillance et le programme de mesures DCSMM adoptés respectivement en 2015 et 2016 au titre du premier cycle seront révisés en 2021.

En 2019, des objectifs environnementaux ont été adoptés par les préfets pour encadrer le bruit sous-marin. Ils correspondent aux deux critères d'atteinte du bon état écologique en matière de bruit sous-marin impulsif et continu.

Afin de mesurer l'atteinte de l'objectif D11-OE1 : « Réduire le niveau de bruit lié aux émissions impulsives au regard des risques de dérangement et de mortalité des mammifères marins », deux indicateurs seront utilisés :

- l'emprise spatiale des événements recensés de niveau « fort » à « très fort »<sup>6</sup> en pourcentage sur la façade. Cette emprise sera définie, concertée et adoptée en façade simultanément aux plans d'action des DSF.

- le taux de projets générant des émissions impulsives présentant un risque de dérangement et de mortalité des mammifères marins (suite à l'évaluation environnementale) et ayant mis en place des mesures de réduction de l'impact acoustique, avec une cible de 100 % des projets autorisés à compter de l'adoption de la stratégie de façade maritime.

Afin de mesurer l'atteinte de l'objectif D11 OE2 : « Maintenir ou réduire le niveau de bruit continu produit par les activités anthropiques, notamment le trafic maritime », l'indicateur utilisé sera le bruit anthropique à basse fréquence dans l'eau (niveau maximum et étendue spatiale)<sup>7</sup>, avec une cible de diminution.

Dans l'ensemble des eaux territoriales françaises, les mammifères marins et les tortues sont protégés par des arrêtés interministériels qui interdisent notamment la perturbation intentionnelle des individus et l'altération de leurs habitats, entre autres dispositions prévues à l'article L. 411-1 du Code de l'environnement. Le Code de l'environnement dispose également, au titre de son article L. 122-1, que « les projets de travaux, d'ouvrages ou d'aménagements publics et privés, qui par leur nature, leurs dimensions ou leur localisation, sont susceptibles d'avoir des incidences notables sur l'environnement ou la santé humaine sont précédés d'une étude d'impact », ce qui inclut l'évaluation des impacts sonores. Le présent guide a donc pour vocation de fournir au niveau national des éléments

<sup>6</sup> Aux fins de l'arrêté relatif au bon état écologique, et au titre du critère D11C1, les émissions impulsives sont qualifiées comme fortes à très fortes si elles dépassent les seuils suivants :

- 22 kg TNT eq. pour les explosions sous-marines ;
- 28 Mj pour les battements de pieux ;
- 253 N0-p dB re 1 µPa @ 1 m pour les émissions des canons à air ;
- 230 Ne dB re 1 µPa<sup>2</sup> m<sup>2</sup> s @ 1 m pour les autres sources impulsives ;
- 220 N0-p dB re 1 µPa @ 1 m pour les autres sources.

<sup>7</sup> Fonction du critère D11C2 de l'arrêté BEE : la distribution spatiale du niveau de bruit ambiant (63 et 125 Hz), correspondant au niveau de bruit continu exprimé en dB re 1 µPa<sup>2</sup> sur la bande de tiers d'octave centré sur 63 Hz, respectivement sur 125 Hz.

techniques et scientifiques aux services instructeurs de l'État pour la prise en compte des perturbations liées à l'introduction de sources sonores dans l'instruction des dossiers d'autorisation. La publication de ce guide s'inscrit comme action de l'axe 2.3 « Réduire l'impact des émissions sonores sous-marines d'origine anthropique sur les cétacés » du plan d'actions pour la protection des cétacés adopté en décembre 2019.

## Contenu du guide

Dans ce contexte, il est donc important de pouvoir identifier les différentes sources de bruit d'origine anthropique, de connaître leur impact potentiel sur l'environnement et la faune marine, ainsi que les outils disponibles pour limiter ces impacts. Le bruit sous-marin d'origine anthropique peut être introduit intentionnellement ou accidentellement et les sources sont multiples. Ce guide a pour but de les lister de manière exhaustive, de les décrire et d'en expliciter les effets sur la faune marine. Il présente également les mesures permettant d'évaluer *in situ*, de

prédire, d'éviter et/ou réduire les impacts liés à l'introduction de sources sonores d'origine anthropique sur la faune marine.

Ce guide présente en préambule quelques notions basiques d'acoustique et les particularités de l'acoustique sous-marine. Une première partie recense les activités anthropiques civiles susceptibles de générer du bruit sous-marin, et présente pour chacune de ces activités les niveaux de bruit attendus. Une deuxième partie décrit l'impact de ces activités sur la faune marine. La troisième partie de ce guide liste les procédures ou technologies disponibles pour évaluer, éviter et réduire ces impacts, et, en complément, les mesures d'accompagnement qui peuvent être pertinentes. Enfin, dans une quatrième partie, des fiches synthétiques sont proposées par activité ; elles présentent une description du bruit généré par cette activité (gamme de fréquences, niveaux attendus, etc.), listent les espèces marines qui y sont les plus sensibles et les mesures disponibles pour limiter leur impact.

# Préambule :

## Notions basiques d'acoustique sous-marine

### Les ondes acoustiques

Le son est un phénomène physique généré par des vibrations ou ondes acoustiques. Ces ondes résultent d'un mouvement mécanique de compression-dilatation du milieu, qui crée une variation de pression qui se propage ensuite de proche en proche. Au passage de l'onde, chaque molécule transmet une quantité d'énergie aux molécules voisines.

Une onde acoustique est donc une suite périodique de compressions et de dilatations du milieu qui se propagent sans transfert de matière mais uniquement par transfert d'énergie.

Ainsi, il est possible de caractériser l'onde acoustique par la variation de pression qu'elle génère par rapport à la pression statique moyenne environnante. Cette variation de pression est appelée « pression acoustique ». Elle se mesure en pascal (Pa). Outre cette composante « variation de pression », une onde sonore peut également être caractérisée par le mouvement des particules (molécules d'eau, de gaz, etc. en fonction du milieu traversé) qu'elle génère. Cette composante « mouvement de particules » renseigne sur l'intensité du son, mais également sur sa direction. Le mouvement de particules induit par une onde sonore peut se mesurer en termes de déplacement (en m), de vitesse (en m/s), ou plus communément d'accélération (en m/s<sup>2</sup>).

#### Un son se caractérise par :

- **sa fréquence** (en Hz), qui correspond au nombre de cycles (ou ondes) par seconde et qui définit la « hauteur » du son : plus la fréquence est élevée, plus le son est aigu (figure 1). La fréquence  $f$  correspond à l'inverse de la période  $T$  (durée en seconde d'un cycle) :  $f = 1/T$  ;
- **son niveau**, déterminé par l'amplitude de la variation de pression maximum par rapport à une pression de référence, qui correspond au « volume » (ou intensité) du son ;
- **sa durée d'apparition**, qui correspond au temps pendant lequel le son est émis.

Compte tenu des fortes variations de pression mesurables, de quelques  $\mu\text{Pa}$  à  $10^{12} \mu\text{Pa}$  [109], une échelle logarithmique est utilisée pour quantifier le niveau d'énergie acoustique mesuré et ainsi approximer la sensation d'audition. Cette unité, le déciBel (dB), est une unité relative, fonction du logarithme décimal du rapport quadratique entre la pression acoustique mesurée  $P$  et une pression de référence  $P_0$  :

$$\text{Niveau sonore en dB} = 20 \log_{10} x (P/P_0)$$

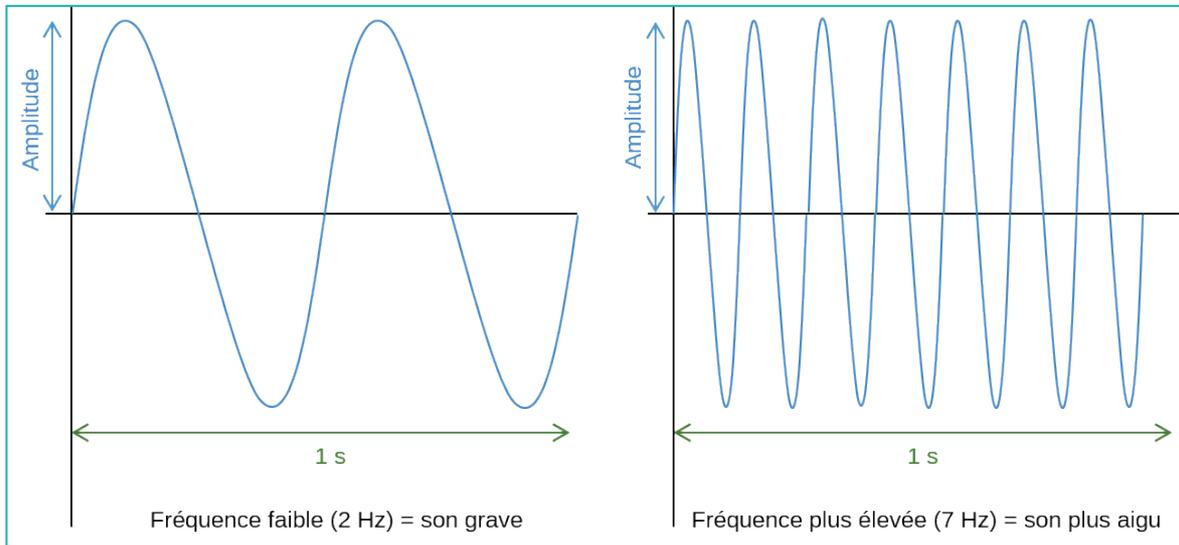


Figure 1 : La fréquence d'un son définit sa « hauteur » : plus la fréquence est élevée, plus le son est aigu.

En milieu marin la pression acoustique de référence  $P_0$  est de  $1 \mu\text{Pa}$ . **Le niveau de pression acoustique absolu en milieu marin est donc exprimé en dB par rapport à  $1 \mu\text{Pa}$  ou dB re  $1 \mu\text{Pa}$ <sup>8</sup>.**

Le déciBel étant une grandeur logarithmique, les niveaux sonores ne s'additionnent pas, et le doublement de la pression acoustique mesurée ne se traduit pas par un doublement du niveau sonore mais par une augmentation de 6 dB. Ainsi, pour une pression acoustique  $P$  mesurée de  $1 \text{ Pa}$ , le niveau sonore associé est de 120 dB re  $1 \mu\text{Pa}$  tandis que pour une pression acoustique mesurée de  $2 \text{ Pa}$  le niveau sonore associé est de 126 dB re  $1 \mu\text{Pa}$ .

Le niveau sonore peut également se calculer à partir de l'intensité sonore mesurée  $I$ , comparée à une intensité de référence  $I_0$  :

$$\text{Niveau sonore en dB} = 10 \log_{10} \times (I/I_0)$$

Pour une pression acoustique de référence de  $1 \mu\text{Pa}$ ,  $I_0 = 6,5 \cdot 10^{-19} \text{ W/m}^2$ . Dans ce cas, un doublement de l'intensité sonore se traduit par une augmentation du niveau sonore de 3 dB.

## La propagation des ondes sonores en milieu marin

L'eau de mer est un milieu propice à la propagation des ondes acoustiques. Dans l'eau, le son se propage environ 4 fois plus vite que dans l'air. Cette vitesse de propagation, ou célérité, ne dépend pas des caractéristiques de l'onde acoustique ; elle dépend uniquement des caractéristiques du milieu, et principalement de la température, de la salinité et de la pression (elle varie dans le même sens que ces trois paramètres). La célérité diffère donc spatialement, temporellement, et n'est pas homogène sur toute la colonne d'eau (figure 2). **D'une manière générale, la célérité du son dans l'eau de mer est comprise entre 1 450 et 1 550 m/s (contre 330 à 350 m/s dans l'air).**

<sup>8</sup> Dans l'air, la pression acoustique de référence est de  $20 \mu\text{Pa}$ .

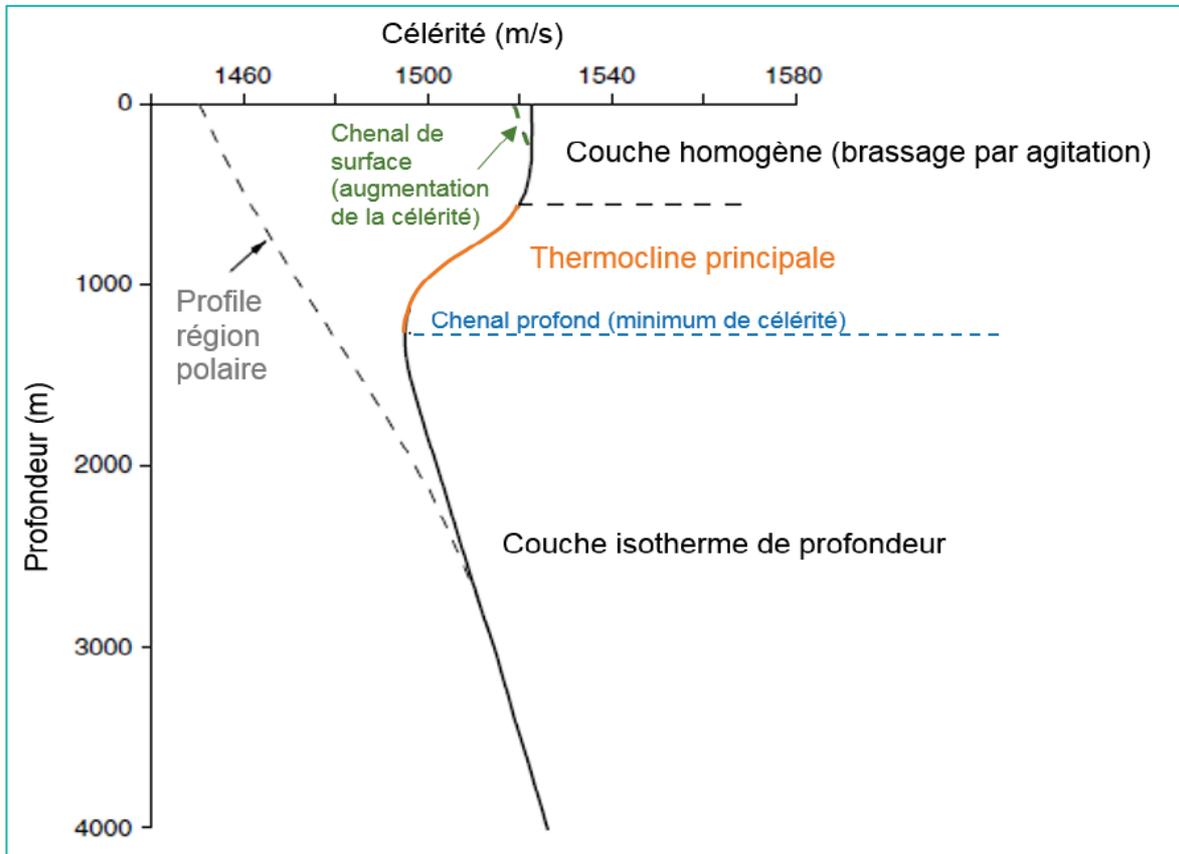


Figure 2 : Profil type de célérité du son en milieu marin ouvert (d'après [87]).

Si l'eau de mer est un milieu favorable à la propagation des sons, une onde acoustique ne se propage pas dans l'océan de façon linéaire d'un point A (source) à un point B (récepteur). Les conditions environnementales du milieu de propagation jouent un rôle important, et notamment les paramètres suivants :

- **la bathymétrie.** La propagation des ondes sonores est très différente par grands fonds et par petits fonds. En milieu
- côtier, lorsque la hauteur d'eau est faible, le milieu agit comme un « filtre passe-haut » : en dessous d'une certaine fréquence (appelée fréquence de coupure), les ondes sonores subissent des pertes très importantes ;
- **la nature du fond.** Les sédiments ont, en fonction de leur nature, la capacité de réfléchir (ex. : roche) ou d'absorber (ex. : vase) les ondes sonores ;
- **le profil de température et de salinité de la colonne d'eau.** Les variations de température et de salinité créent des chenaux de propagation (figure 2), qui influent sur la célérité de l'onde sonore.

Selon la fréquence du signal, ces paramètres ont plus ou moins d'influence.

En conséquence, la propagation de l'onde sonore peut être perturbée par de nombreux phénomènes. On peut notamment citer :

- **les variations de célérité.** Comme évoqué précédemment, la célérité dépend des caractéristiques du milieu. Elle varie avec la profondeur et les modifications locales de température et salinité ;
- **les phénomènes de réflexion,** dus à la présence des interfaces eau/air et eau/sédiment, aux obstacles présents sur le trajet de l'onde, ou à la stratification de la colonne d'eau (thermocline, intrusion d'eau douce, etc.), et qui modifie la direction de propagation de l'onde ;
- **les phénomènes d'absorption et de réfraction,** qui vont induire une perte d'énergie ;
- **les phénomènes de diffraction et diffusion,** qui provoquent un changement de direction de l'onde acoustique.

Ces phénomènes conduisent à modifier la direction et à atténuer l'intensité du signal transmis entre la source et le récepteur et à induire des interférences dues aux multiples trajets que peuvent prendre les ondes acoustiques générées par une source de bruit. Ces phénomènes sont d'autant plus importants et complexes en milieu côtier (par petit fond), où la propagation des ondes sonores est soumise à de nombreuses réflexions surface/fond.

Le milieu physique de propagation, l'eau de mer, va lui aussi contribuer à atténuer l'intensité de l'onde acoustique, d'une part par divergence sphérique (l'énergie de l'onde acoustique va « s'étaler » au fur et à mesure de sa progression et donc se diluer dans le milieu) et d'autre part par amortissement (absorption de l'énergie acoustique dissipée du fait de la viscosité du milieu et des interactions chimiques).

La transmission des sons dans le milieu marin est également liée à leur fréquence. En effet, les sons basse fréquence (plus graves) se propagent mieux que les sons haute fréquence (plus aigus). Un son de 100 Hz peut par exemple se propager sur des centaines, voire des milliers de kilomètres tandis qu'un son de 100 kHz se propagera sur une distance beaucoup plus faible [194].

La perte d'intensité d'un son entre le point d'émission et le point de réception est qualifiée de perte de transmission ou perte de propagation. Ces pertes dépendent des caractéristiques du milieu traversé et des caractéristiques de l'onde sonore (fréquence).

Les pertes de propagation peuvent être estimées, soit en réalisant des mesures *in situ* en effectuant une série d'émissions calibrées (de fréquences et niveaux connus) et en mesurant les niveaux reçus à une distance connue, soit par un modèle théorique de pertes par propagation (voir partie 2 - III - 1.b) - Évaluer la propagation des ondes acoustiques).

Tous ces phénomènes contribuent à expliquer les différences de niveaux mesurés entre le son émis par une source et le son reçu par un récepteur (figure 3).

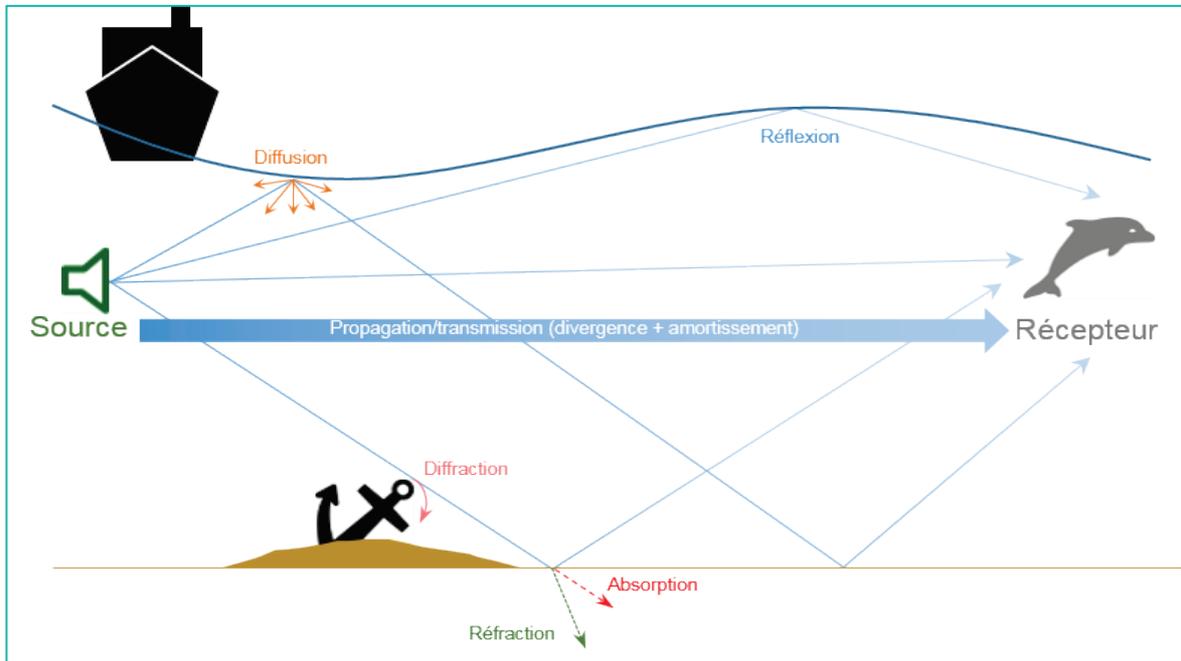


Figure 3 : Phénomènes contribuant à atténuer l'intensité d'une onde acoustique entre la source et le récepteur.

## Le bruit ambiant sous-marin

Le bruit ambiant est le bruit global mesuré en un point donné. Il est défini par la somme des contributions acoustiques d'une myriade de sources impossible à distinguer les unes des autres. Il exclut les bruits qui pourraient être liés aux conditions d'enregistrement (bruits liés à l'électronique, au mouillage, aux courants, etc.)

Lors d'une étude d'impact acoustique, le bruit ambiant correspond à l'ambiance sonore sous-marine avant travaux, en dehors de l'activité génératrice de bruit dont on cherche à évaluer l'impact.

Le bruit ambiant est composé par l'ensemble des sons émis par les sources sonores qui influent au point de mesure. En milieu marin, plusieurs sources contribuent au bruit ambiant :

- les sources liées aux phénomènes naturels, ou géophonie (pluie, houle, vent, etc.) ;
- les sources biologiques, ou biophonie (macrofaune benthique et mammifères marins notamment) ;
- les sources anthropiques, ou anthropophonie (trafic maritime et activités générant un bruit permanent).

D'une manière générale, le trafic maritime en champ lointain et le vent (par des phénomènes de turbulences, frottements, vaporisation, etc.) sont les principales sources qui contribuent au bruit ambiant global [179].

Le modèle de Wenz, établi en 1962 [188], synthétise la contribution des différentes sources sonores au bruit ambiant sous-marin en milieu ouvert par grand fond (figure 4).

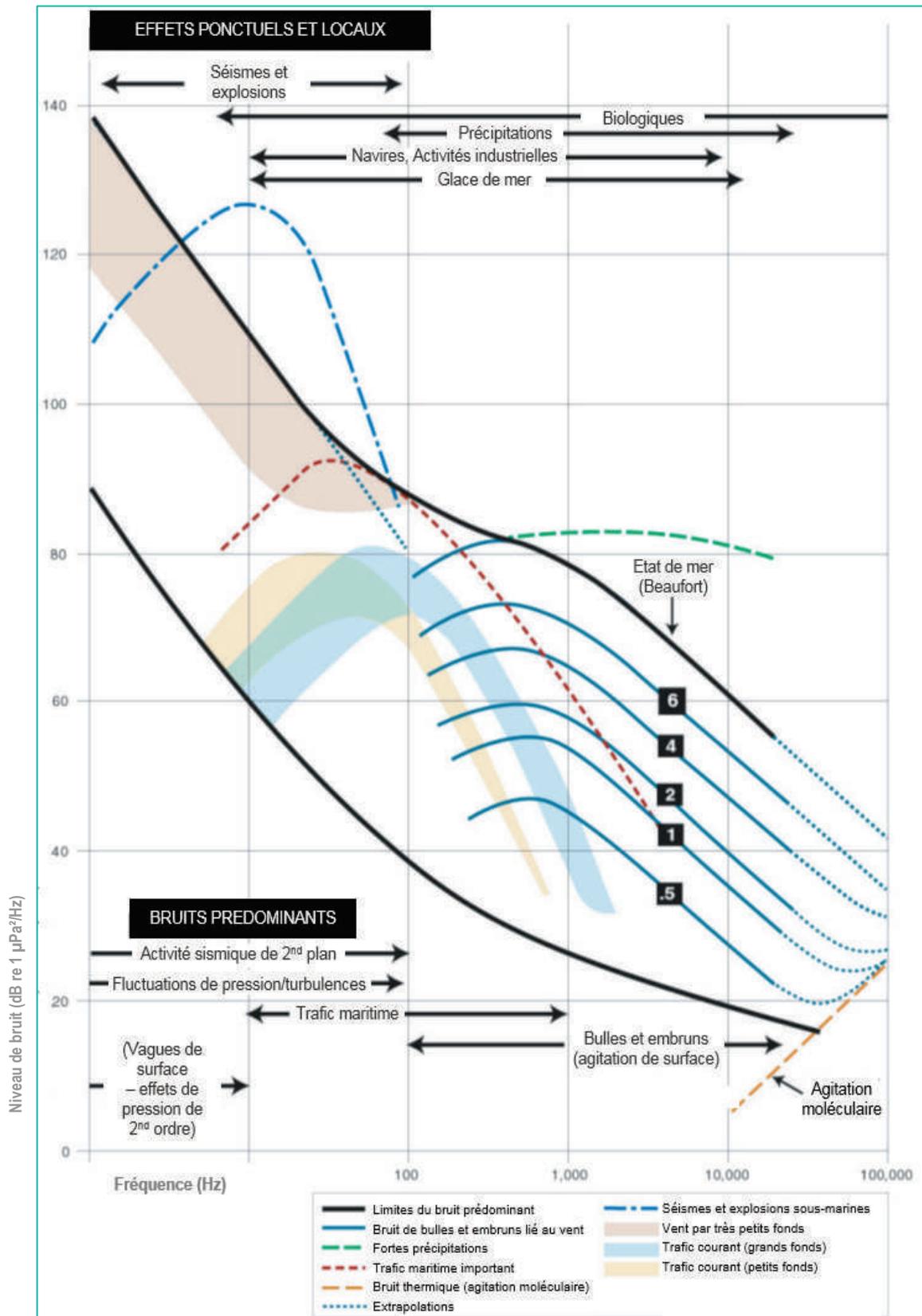


Figure 4 : Caractéristiques et composantes du bruit ambiant sous-marin par grand fond (d'après [188]).

D'après le modèle de Wenz (figure 4), le niveau de bruit ambiant sous-marin est particulièrement élevé en très basse fréquence (< 10 Hz). Ceci est dû principalement à la contribution de sources géophoniques (activité sismique, fluctuation de pression, vagues). Entre 10 et 1 000 Hz, le trafic maritime contribue majoritairement au bruit ambiant sous-marin. Au-delà de 100 Hz, la contribution de l'état de mer est importante et le niveau de bruit est corrélé aux conditions météorologiques.

Le bruit ambiant sous-marin est donc très variable, en niveau et en fréquence, temporellement et spatialement. Cette variabilité est principalement liée à l'intensité du trafic maritime et à l'influence des conditions météorologiques. La variabilité des conditions de propagation des ondes sonores (liées aux propriétés physiques du milieu de propagation et à la profondeur) influe également sur le bruit ambiant [158]).

Lorsque l'on cherche à évaluer l'effet d'un bruit d'origine anthropique sur la faune marine, il est important de prendre en compte le bruit ambiant sur la zone d'étude. En effet, le niveau de bruit ambiant a une influence directe sur la perception des ondes sonores. Plus ce niveau est important, plus il sera susceptible de masquer un bruit particulier. En effet, l'émergence sonore dépend directement du niveau de bruit ambiant et le niveau d'émission d'une source sonore pourrait être surestimé sans prise en compte de celui-ci.

## Évaluer le bruit sous-marin

### 1) Caractérisation du bruit en fonction du type de signal

L'évaluation du bruit sous-marin nécessite dans un premier temps de caractériser le type de bruit que l'on veut évaluer. On distingue deux types de bruit : le bruit impulsionnel et le bruit continu.

#### *Bruit impulsionnel*

Un bruit impulsionnel consiste en une impulsion sonore transitoire, de courte durée d'apparition, et qui correspond à une augmentation brutale de pression acoustique [136]. Il s'applique par exemple au bruit généré par le choc d'un marteau sur un pieu.

Pour caractériser un bruit impulsionnel, il est possible de déterminer :

- ses paramètres fréquentiels : fréquence centrale de l'émission, largeur de bande (différence entre les fréquences minimale et maximale) ;
- ses paramètres temporels : durée d'impulsion, durée d'émission, intervalle entre deux émissions, nombre d'émissions ;
- le niveau d'émission.

#### *Bruit continu*

Un bruit continu ne peut pas être défini par sa durée (il est parfois impossible de définir le début et la fin de l'émission). Il ne correspond pas à une brutale variation de pression acoustique [136]. L'exemple de bruit sous-marin continu le plus communément cité est celui du trafic maritime, mais il peut aussi s'appliquer au bruit généré par une colonne de forage par exemple.

Pour caractériser un bruit continu, il est possible de déterminer :

- son niveau spectral (densité spectrale de puissance) ;
- la fréquence (ou bande de fréquence) correspondant au niveau maximal.

## 2) Bruit émis, bruit reçu et bruit perçu

Pour évaluer le niveau de bruit, il est nécessaire de différencier le niveau de bruit émis, qui correspond au bruit généré par une source sonore, et le niveau de bruit reçu, qui correspond à ce même bruit arrivant au niveau d'un récepteur après avoir subi tous les phénomènes physiques qui contribuent à atténuer le signal. Le niveau de bruit reçu est donc généralement inférieur au niveau de bruit émis.

Le bruit reçu est également différent du bruit effectivement perçu par le récepteur. En effet, celui-ci possède des capacités d'intégration du signal qui lui sont propres, et qui modifient ce signal, notamment en ne conservant que certaines fréquences. Par exemple, l'oreille humaine ne capte que les fréquences comprises entre 20 Hz et 20 kHz en moyenne, avec une plus grande sensibilité pour la gamme 200-5 000 Hz. La différence entre bruit émis, bruit reçu et bruit perçu est schématisée sur la figure 5.

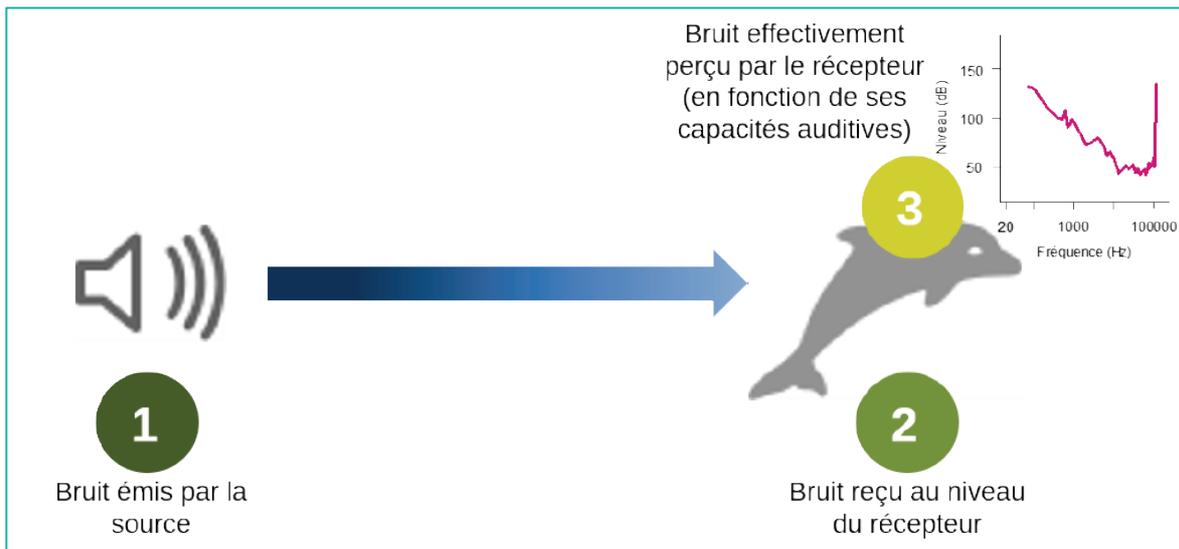


Figure 5 : Différence entre bruit émis, bruit reçu et bruit perçu. À chaque étape, le niveau de bruit (en dB) et son spectre fréquentiel est susceptible d'être modifié.

### 3) Différents indicateurs pour évaluer le niveau de bruit

#### La terminologie des indicateurs de bruit

La norme **ISO 18405:2017 Acoustique sous-marine – Terminologie** définit des standards de notation pour les indicateurs acoustiques. Ces standards étant relativement récents, ils ne sont pas systématiquement utilisés et d'autres notations peuvent être employées dans les rapports d'études ou la littérature. Ce paragraphe liste donc toutes les notations couramment observées pour chaque indicateur, en plus de la **notation normée (ISO) indiquée en gras dans ce paragraphe** (jusqu'au tableau 1 inclus). Il est néanmoins nécessaire, dans la mesure du possible, d'avoir recours aux standards afin de tendre vers une harmonisation de la terminologie en acoustique sous-marine.

#### a) Indicateurs du niveau de bruit émis

##### Niveau d'émission de la source : $L_s$ (ou **SL pour Source Level**)

Mesurer le bruit émis revient à quantifier le niveau sonore qui serait mesuré à une distance de 1 mètre de la source (noté @ 1 m). Noté  $L_s$  ou SL, **le niveau d'émission de la source se mesure en dB re 1  $\mu$ Pa @ 1 m.**

##### Densité spectrale de puissance : **DSP ou PSD (Power Spectral Density)**

La densité spectrale de puissance du bruit émis représente la répartition de la puissance acoustique émise en fonction de la fréquence, dans une bande de 1 Hz (figure 6). **Cette puissance s'exprime en dB re 1  $\mu$ Pa<sup>2</sup>/Hz.**

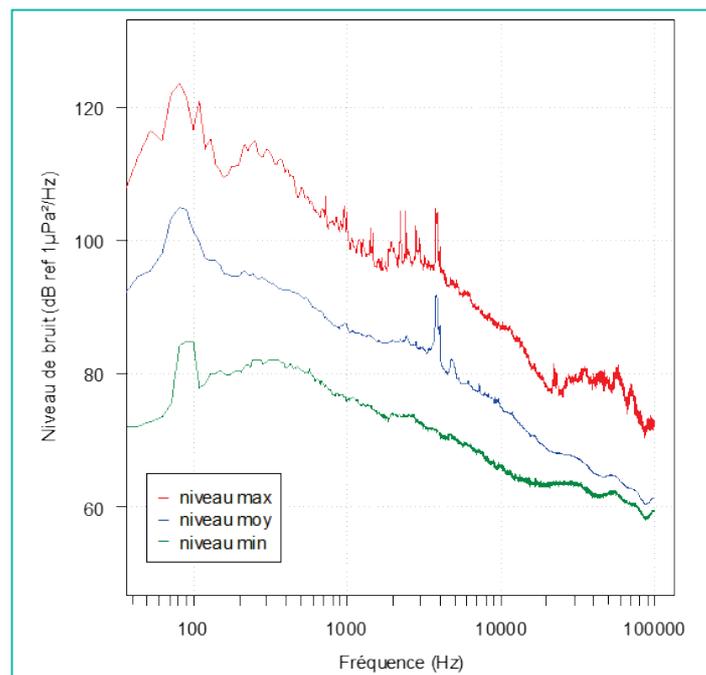


Figure 6 : Exemple de densité spectrale de puissance (DSP).

## b) Indicateurs du niveau de bruit reçu

### Niveau de pression sonore : $L_p$ (ou SPL pour Sound Pressure Level)

Le niveau de pression sonore exprime la quantité d'énergie reçue par un récepteur à une distance donnée de la source émettrice. Noté  $L_p$  ou SPL, **le niveau de pression sonore de bruit reçu s'exprime en dB re 1  $\mu$ Pa, en spécifiant la distance à la source (par exemple @ 750 m).**

Le niveau de pression sonore  $L_p$  peut être mesuré de différentes façons (figure 7) :

- en mesurant la valeur absolue maximale (différence de pression maximale ou minimale par rapport à la pression de référence). On note alors  $L_{p,pk}$ ,  $L_{p,0-pk}$ , SPL peak, SPL pic, SPL p, SPL crête, SPL zero to peak ou SPL z-p ;
- en mesurant la différence entre la valeur maximale et la valeur minimale de pression. On note alors  $L_{p,pk-pk}$ , SPL peak-peak, SPL pic-pic, ou SPL crête-crête ; Il est possible d'estimer le SPL peak-peak grâce à la relation :

$$L_{p,pk-pk} = L_{p,pk} + 6 \text{ dB} ;$$

- En calculant la valeur efficace, qui correspond à la racine carrée de la moyenne des carrés du signal sur une période donnée. Cette valeur efficace, notée  $L_{p,rms}$ , ou SPL RMS pour « *Root Mean Square* », traduit la valeur équivalente d'énergie d'une onde acoustique. Cet indicateur est privilégié pour le bruit continu.

Le niveau de pression sonore  $L_p$  peut également s'exprimer en **niveau de bruit spectral**. Il correspond alors à l'énergie contenue dans une bande de fréquence donnée, mesurée sur une période de temps  $t$ . Dans ce cas, **il s'exprime en dB re 1  $\mu$ Pa/ $\sqrt{\text{Hz}}$** . Cette notation est privilégiée dans le cas de bruit continu.

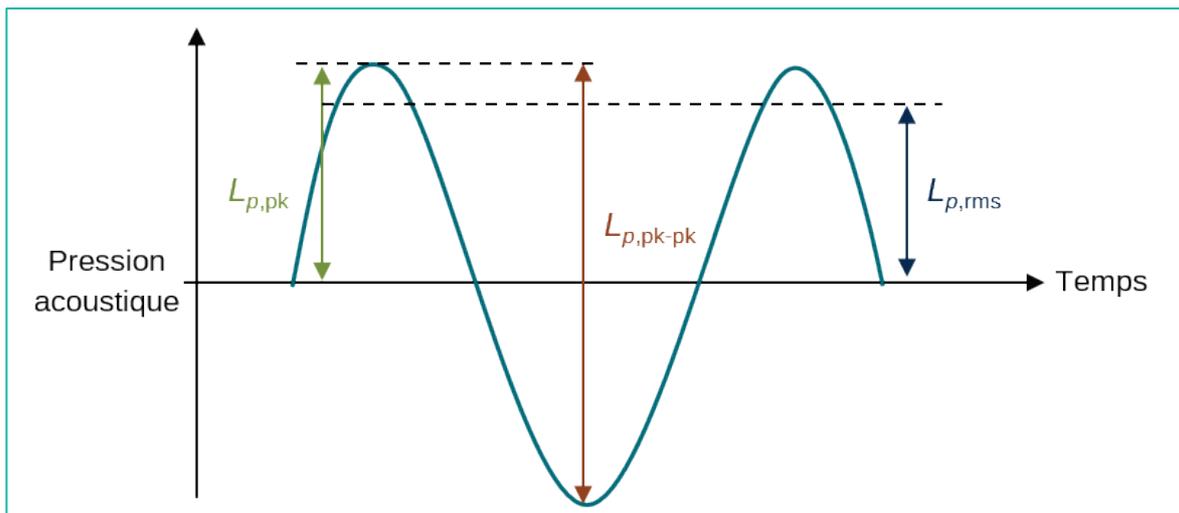


Figure 7 : Les différents indicateurs de mesure du niveau de pression sonore ( $L_p$ ).

### Densité spectrale de puissance : DSP ou PSD (Power Spectral Density)

La densité spectrale de puissance du bruit reçu représente la répartition de la puissance acoustique reçue par un hydrophone en fonction de la fréquence, dans une bande de 1 Hz. **Cette puissance s'exprime en dB re 1  $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ .**

### Niveau équivalent continu : $L_{eq,T}$ (Equivalent continuous sound pressure level)

Le  $L_{eq,T}$  correspond au niveau large bande moyenné sur toute la période d'enregistrement. **Cet indicateur s'exprime en dB re 1  $\mu\text{Pa}$ .**

### Niveau d'exposition sonore : $L_{E,p}$ (ou SEL pour Sound Exposure Level)

Pour les sons impulsionnels, il est nécessaire de prendre en compte le niveau d'émission d'une impulsion, mais également sa durée (en général moins d'une seconde). Le niveau d'exposition sonore, noté  $L_{E,p}$  ou SEL, permet de prendre en compte ces paramètres en intégrant toute l'énergie reçue pendant la durée  $t$  d'une impulsion et en la ramenant sur une seconde :

$$L_{E,p} = L_p + 10 \log_{10} t$$

Le  $L_{E,p}$  exprime donc le niveau de pression généré par une impulsion ramené sur une seconde. **Le niveau d'exposition sonore s'exprime en dB re 1  $\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$ .**

Le  $L_{E,p}$  peut être calculé pour une impulsion, on note alors  $L_{E,p,ss}$  ou  $\text{SEL}_{ss}$  pour « *Single Strike* », ou pour plusieurs, on parle alors de SEL cumulé, noté  $L_{E,p,cum}$  ou  $\text{SEL}_{cum}$ . Il est possible de lier les deux indicateurs par la formule :

$$L_{E,p,cum} = L_{E,p,ss} + 10 \log_{10} n$$

Avec  $n$  : nombre d'impulsions.

### c) Indicateurs du niveau de bruit perçu

Le bruit perçu par un récepteur (mammifère marin, poissons, etc.) correspond au bruit reçu pondéré par la capacité auditive de ce récepteur. Pour estimer le bruit perçu, deux indicateurs ont été développés.

#### Le $\text{dB}_{ht}$

Le  $\text{dB}_{ht}$  est un indicateur développé par Nedwell *et al.* [132] qui permet de filtrer le spectre du bruit reçu en fonction de l'audiogramme de l'espèce considérée. Cette méthode applique une correction au niveau sonore reçu, pour une fréquence donnée, en fonction de la capacité de l'espèce à percevoir cette fréquence. Par exemple, pour une espèce considérée, si le niveau sonore reçu par l'animal est de 100 dB à 2 000 Hz, et que cet animal perçoit les sons pour cette fréquence à partir de 30 dB, le niveau perçu sera de 70  $\text{dB}_{ht}$  pour cette espèce (figure 8).

Cette méthode permet d'estimer le bruit perçu par n'importe quelle espèce marine, à la condition qu'un audiogramme fiable pour cette espèce ait été établi.

Des seuils sont ensuite proposés, en  $\text{dB}_{ht}$ , au-delà desquels les niveaux perçus peuvent avoir des effets (faible réaction, évitement, blessure) sur l'espèce considérée.

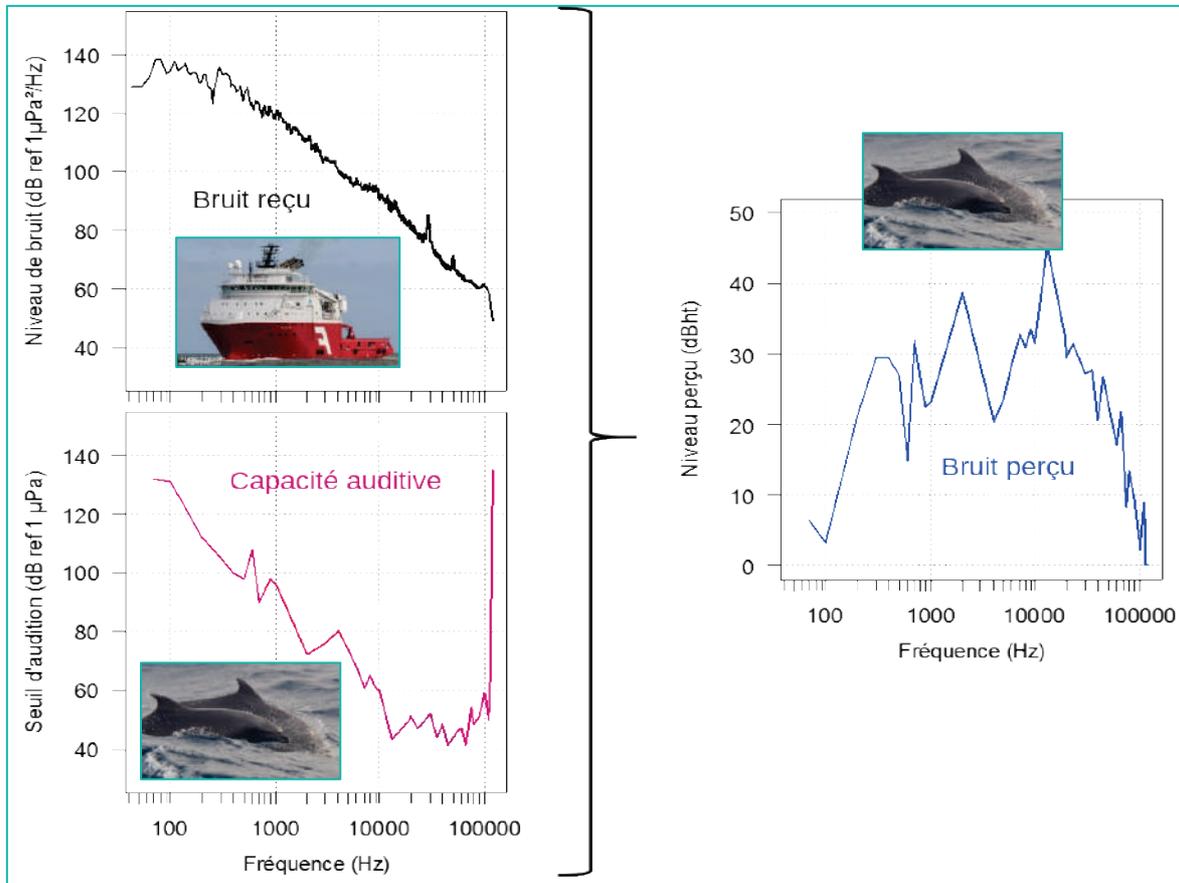


Figure 8 : Bruit d'un navire de ravitaillement perçu, en dBht, par un grand dauphin (*Tursiops truncatus*) en fonction de sa capacité auditive (audiogramme d'après [93] ; crédit photo : James D. Paterson/Marine Traffic et COHABYS).

### Les niveaux d'exposition sonore pondérés

Une autre méthode pour prendre en compte la capacité auditive du récepteur a été mise au point par Southall *et al.* en 2007 [167], puis développée et corrigée par la suite [136, 168]. À l'instar des fonctions de pondération développées pour l'audition chez l'humain<sup>9</sup>, Southall *et al.* ont développé des fonctions de pondération adaptées à l'audition des mammifères marins (*Auditory Weighting Functions*). Ces fonctions de pondération intègrent les capacités auditives des mammifères marins (audiogrammes), ainsi que d'autres paramètres audiométriques propres à chaque groupe d'espèces. Elles permettent d'évaluer le bruit perçu, en donnant moins de poids aux très basses et très hautes fréquences comparativement aux fréquences auxquelles l'animal est plus sensible. Il existe donc plusieurs fonctions de pondération adaptées aux différents groupes de mammifères marins. Ces fonctions de pondération sont décrites en détail en annexe 1.

En intégrant ces fonctions de pondération, Southall *et al.* ont ensuite calculé des niveaux

<sup>9</sup> Fonctions de pondération A, B ou C établies pour tenir compte de la sensibilité moyenne de l'oreille humaine au bruit reçu pour chaque bande de fréquences.

d'exposition sonores pondérés à partir desquels un mammifère marin est susceptible de subir une perte d'audition temporaire (TTS) ou permanente (PTS) (voir partie 2 - III- 3 - Fixer des seuils de tolérance et définir des périmètres d'exclusion).

Le tableau 1 ci-après synthétise les principaux indicateurs disponibles pour évaluer le niveau de bruit sous-marin.

Tableau 1 : Indicateurs quantitatifs permettant d'évaluer le niveau de bruit sous-marin.

	Indicateur	Notation ISO	Notation courante	Unité	Utilisation
Bruit émis	Niveau d'émission	<b><math>L_s</math></b>	SL	dB re 1 $\mu$ Pa @ 1 m	Établit le niveau d'émission d'une source sonore
	Densité spectrale de puissance	-	DSP (ou PSD)	dB re 1 $\mu$ Pa <sup>2</sup> /Hz	Établit le spectre acoustique d'une source de bruit (distribution du niveau de bruit en fonction de la fréquence)
Bruit reçu	Niveau de pression sonore (niveau peak)	<b><math>L_{p,pk}</math> ou <math>L_{p,0-pk}</math></b>	SPL peak	dB re 1 $\mu$ Pa @ X m	Quantifie le niveau de pression reçu par un récepteur à une distance donnée de la source émettrice (différence de pression maximale ou minimale par rapport à la pression de référence)
	Niveau de pression sonore (niveau peak-peak)	<b><math>L_{p,pk-pk}</math></b>	SPL peak-peak	dB re 1 $\mu$ Pa @ X m	Quantifie le niveau de pression reçu par un récepteur à une distance donnée de la source émettrice (différence entre la valeur maximale et la valeur minimale de pression)
	Niveau de pression sonore (niveau « root mean square »)	<b><math>L_{p,rms}</math></b>	SPL RMS	dB re 1 $\mu$ Pa @ X m	Quantifie le niveau de pression reçu par un récepteur à une distance donnée de la source émettrice (racine carrée de la moyenne des carrés du signal sur une période donnée), équivalent à la valeur efficace. Il est plutôt utilisé pour du bruit continu
	Densité spectrale de puissance	-	DSP (ou PSD)	dB re 1 $\mu$ Pa <sup>2</sup> /Hz @ X m	Quantifie le niveau de pression reçu par un récepteur à une distance donnée de la source émettrice par bande de fréquence et sur une période donnée
	Densité spectrale de puissance	-	DSP (ou PSD)	dB re 1 $\mu$ Pa <sup>2</sup> /Hz	Établit le spectre acoustique du bruit reçu par un hydrophone (distribution du niveau de bruit en fonction de la fréquence)
	Niveau équivalent continu	<b><math>L_{eq,T}</math></b>	Leq	dB re 1 $\mu$ Pa	Quantifie le niveau large bande moyenné sur toute la période d'enregistrement
	Niveau d'exposition sonore	<b><math>L_{E,p}</math></b>	SEL <sub>ss</sub>	dB re 1 $\mu$ Pa <sup>2</sup> .s	Évalue la quantité d'énergie reçue lors d'une impulsion sonore en intégrant également sa durée
	Niveau d'exposition sonore cumulée <sup>10</sup>	<b><math>L_{E,p}</math></b>	SEL <sub>cum</sub>	dB re 1 $\mu$ Pa <sup>2</sup> .s	Évalue la quantité d'énergie cumulée reçue lors de plusieurs impulsions en intégrant également leur durée
Bruit perçu	dBht	-	dBht	dBht	Évalue le niveau de bruit effectivement perçu par un animal en fonction de son audiogramme et l'effet inhérent (fuite, blessure)
	Niveaux d'exposition sonore pondérés	<b><math>L_{E,p,HG,24h}</math><sup>12</sup></b>	TTS ou PTS SEL	dB re 1 $\mu$ Pa <sup>2</sup> .s	Définit les niveaux d'exposition sonore à partir desquels les groupes d'espèces considérés sont susceptibles de subir des pertes d'audition temporaires (TTS) ou permanentes (PTS)

<sup>10</sup> HG pour "Hearing Group" : dépend du groupe d'audition auquel appartient l'animal considéré ; 24 h car le niveau est calculé pour une exposition sur 24 h.

#### 4) La mesure du son dans l'eau

Dans l'eau, le son se mesure à l'aide d'un enregistreur acoustique équipé d'un hydrophone. Un hydrophone est un capteur de pression qui mesure la pression acoustique générée par l'onde sonore. L'hydrophone est un transducteur qui transforme la variation de pression mesurée en variation de tension électrique. Le signal électrique ainsi produit est converti en signal numérique (par un convertisseur analogique-numérique ou CAN) qui est ensuite analysé par le système d'acquisition et de traitement des données intégré dans l'enregistreur.

Un enregistreur acoustique sous-marin se compose de plusieurs parties :

- la partie *acquisition de données*, qui comprend l'électronique d'acquisition : hydrophone, préampli puis système de conversion analogique/numérique du signal acoustique ;
- la partie *stockage des données*, constituée d'un ou plusieurs disques durs ou de cartes SD sur lesquels les données acoustiques collectées sont stockées. La capacité de stockage constitue un des facteurs conditionnant la durée de déploiement de l'enregistreur et la stratégie d'acquisition des données, en continu ou selon un cycle d'enregistrement préétabli (*duty-cycle*) ;
- la partie *alimentation* qui fournit l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement de l'enregistreur. En fonction des technologies déployées et du type d'enregistreur, cette alimentation peut être soit conditionnée dans la partie électronique du corps de l'enregistreur ou en position déportée (par l'intermédiaire de panneaux solaires ou de container spécifique) ;
- la partie *traitement de données acoustiques*. Certains traitements acoustiques, dits traitements embarqués, peuvent être réalisés directement par l'enregistreur ;
- la partie *transmission des données*. En fonction des configurations de l'enregistreur, des technologies de transfert de données brutes ou traitées peuvent être réalisées. Ces technologies permettent, par le biais de communication radio ou wifi de transmettre tout ou partie des données brutes ou traitées vers un récepteur.

En fonction des configurations choisies, il est possible de distinguer deux principales catégories d'enregistreur :

- les enregistreurs acoustiques autonomes, déployés sur un mouillage et positionnés sur le fond ou dans la colonne d'eau (figure 9). Ce type d'enregistreur est capable de stocker une quantité limitée de données et est alimenté par des batteries. Dans le cas d'un suivi à long terme, il est nécessaire d'intervenir



Figure 9 : Enregistreur acoustique autonome (OSEAN) équipé d'un hydrophone et positionné sur un corps mort avant immersion (crédit photo : NEREIS Environnement).

régulièrement sur ce type d'enregistreur afin de collecter les données, libérer la mémoire et changer les batteries ;

- les bouées acoustiques flottantes (figure 10). Alimentées par batteries ou panneaux solaires, elles permettent une transmission radio ou wifi des données acoustiques enregistrées et peuvent de ce fait réaliser un suivi en temps réel du bruit sous-marin. En fonction des configurations choisies, l'hydrophone peut être déployé à proximité ou non de la bouée.



Figure 10 : Bouée acoustique flottante autonome (RTSys - crédit photo : NEREIS Environnement).

La qualité des enregistrements acoustiques dépend directement des caractéristiques de l'hydrophone. Ces caractéristiques sont, principalement :

- **sa sensibilité.** Cette sensibilité est un élément déterminant et caractéristique des performances acoustiques de l'hydrophone. Elle correspond au rapport entre la tension  $U$  (exprimée en volt) mesurée aux bornes de l'hydrophone et une pression  $P$  (exprimée en Pa) :  $S_h = (U/P)$ . Cette sensibilité peut être exprimée en dB re V/ $\mu$ Pa et dans ce cas  $S_h = 20\log(U/U_0 / P/P_0)$ , avec  $U_0 = 1$  V et  $P_0 = 1$   $\mu$ Pa ;
- **sa bande passante.** Elle correspond à l'ensemble des fréquences qui pourront être interceptées par l'hydrophone et traitées par l'électronique d'acquisition de l'enregistreur. Cependant, la sensibilité d'un hydrophone n'est pas constante sur toute sa bande passante (figure 11). La bande de fréquences pour laquelle la sensibilité est quasi constante est appelée « bande des fréquences utiles ». C'est cette bande des fréquences utiles qui sera privilégiée pour l'interception des signaux sonores. La bande passante de l'hydrophone constitue donc un critère déterminant dans le choix de l'enregistreur qui ciblera, en fonction de celle-ci, une certaine catégorie de sources sonores (émissions de cétacés, trafic maritime, etc.) ;

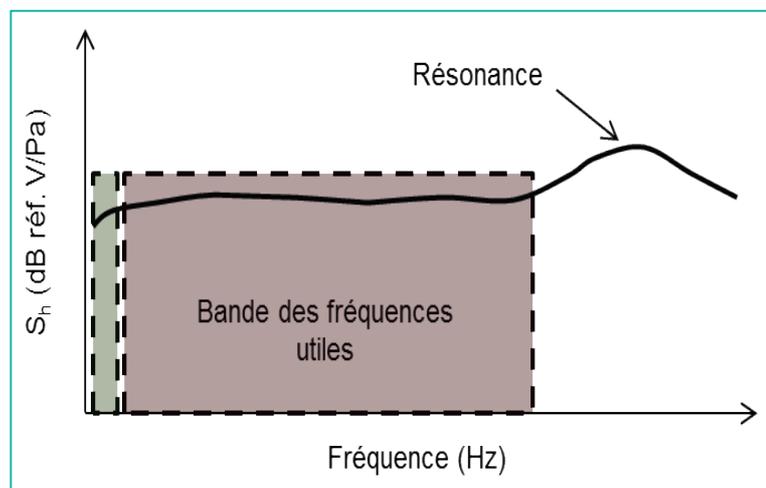


Figure 11 : Exemple de courbe de sensibilité d'un hydrophone (d'après [96]).

- **sa directivité.** Cette propriété caractérise la capacité du transducteur à intercepter les signaux dans différentes directions. Dans le cadre d'une étude d'impact acoustique, il est préférable de privilégier une écoute identique dans toutes les directions ; les hydrophones utilisés sont donc généralement omnidirectionnels.

Un autre paramètre important pour optimiser la qualité des enregistrements est lié à l'utilisation de préamplificateurs à gains variables qui va permettre d'adapter la dynamique du signal d'acquisition aux caractéristiques de l'enregistreur.

Le choix d'un enregistreur acoustique sous-marin dépend donc des objectifs préalablement déterminés et notamment :

- du type d'étude à réaliser (monitoring du bruit ambiant sur du long terme, étude des populations de cétacés, surveillance d'un chantier, *etc.*) ;
- du type de données à collecter (sources d'origine anthropique, sources biologiques, bruit ambiant large bande, *etc.*) ;
- de l'adéquation entre les paramètres de l'enregistreur et de la source sonore afin d'optimiser les enregistrements et éviter les phénomènes de saturation de l'enregistreur ou l'inverse ;
- de la stratégie d'échantillonnage : nécessité d'obtenir des informations acoustiques en temps réel ou *a posteriori*, durée d'acquisition des données et type d'enregistrement (en continu ou non), nombre d'enregistreurs déployés en fonction des enjeux et de la surface de l'aire d'étude.

## 5) Modéliser la propagation des ondes acoustiques

Afin d'évaluer l'impact sonore d'une activité en mer, il est possible de réaliser une cartographie de l'empreinte sonore de cette activité autour d'une ou plusieurs source(s) émettrice(s). Cette cartographie s'effectue à l'aide d'un logiciel (ou code) de modélisation de la propagation des ondes sonores.

Cette modélisation est complexe, en particulier dans les zones où l'on observe de fortes variations de bathymétrie. À l'inverse, en milieu ouvert (par grand fond), la propagation des ondes sonores est moins complexe et donc plus facilement prévisible. La propagation du son dépend des caractéristiques de l'onde sonore, mais également de l'environnement. Le logiciel de modélisation, pour fournir une représentation fiable, doit donc pouvoir intégrer un certain nombre de paramètres afin d'adapter ses prévisions au cas d'étude. Ces paramètres sont décrits dans la partie 2 III- Évaluer les impacts d'un projet sur la faune marine.

La propagation des ondes sonores ainsi modélisée est représentée en deux dimensions. Il est cependant possible de modéliser cette propagation à plusieurs profondeurs afin d'intégrer la composante verticale. La profondeur avec le niveau maximal prédit est alors conservée pour la représentation en 2D.

Modéliser la propagation des ondes acoustiques et cartographier l'empreinte sonore d'une activité permet ensuite de définir des périmètres à l'intérieur desquels une espèce est susceptible de subir des dommages (pertes d'audition temporaires ou permanentes). En intégrant les capacités auditives de l'espèce dans le modèle de propagation ainsi que des

seuils de tolérance au bruit, il est possible de réaliser, pour cette espèce, une carte des impacts potentiels, et ainsi de définir des zones d'exclusion à l'intérieur desquelles il convient de s'assurer de l'absence d'individus de cette espèce (figure 12).

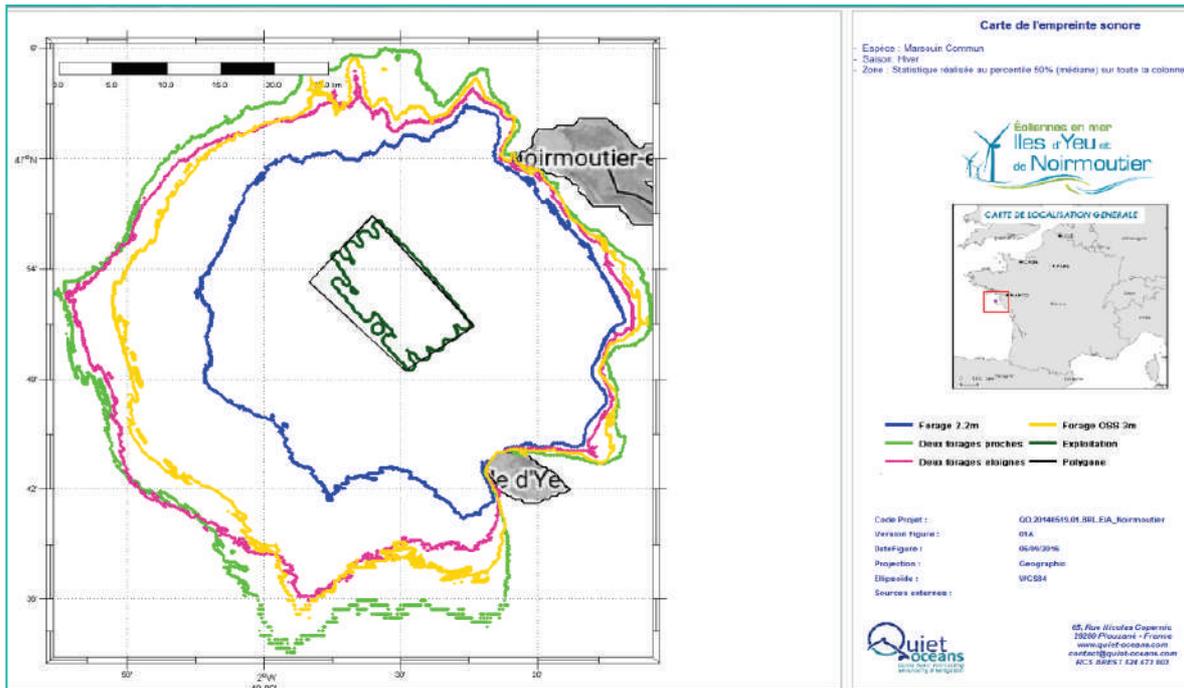


Figure 12 : Modélisation de l'empreinte sonore de différentes opérations liées aux phases de construction et d'exploitation du parc éolien en mer de Yeu-Noirmoutier pour le marsouin commun (*Phocoena phocoena*) (source : Quiet Ocean, 2016).

## Ce qu'il faut retenir

- Le son est généré par des ondes acoustiques. Il peut être perçu selon ses deux composantes : « variation de pression » (succession de compressions-dilatations du milieu) ou « mouvement de particules » (agitation des molécules du milieu).
- Un son se caractérise par :
  - sa fréquence (en Hz), qui définit sa hauteur (basse fréquence : son grave, haute fréquence : son aigu) ;
  - son niveau (en dB), qui correspond au volume du son (ou intensité) ;
  - sa durée d'apparition (en s).
- Dans l'eau, la pression de référence est de 1  $\mu$ Pa (microPascal). Le niveau de bruit est donc exprimé en dB re 1  $\mu$ Pa. Dans l'air, cette pression de référence est de 20  $\mu$ Pa.
- La célérité du son dans l'eau de mer est d'environ 1 500 m/s (contre environ 340 m/s dans l'air).
- La propagation du son dans l'eau de mer dépend des conditions environnementales et principalement :
  - de la bathymétrie ;
  - de la nature du fond ;
  - du profil de température et salinité de la colonne d'eau.
- Le bruit ambiant sous-marin se compose d'un ensemble de sources sonores, incluant les sources liées aux phénomènes naturels (géophonie), les sources d'origine biologique (biophonie) et les sources d'origine anthropique (anthropophonie).
- Le trafic maritime et le vent sont les principales sources contribuant au bruit ambiant sous-marin.
- Il existe différents indicateurs pour mesurer le niveau de bruit. La pertinence de ces indicateurs dépend du type de bruit que l'on cherche à évaluer (bruit impulsionnel ou continu, bruit émis, bruit reçu ou bruit perçu).
- La mesure du son dans l'eau se fait à l'aide d'un hydrophone, dont les caractéristiques (sensibilité, bande passante, directivité) doivent être adaptées au bruit que l'on cherche à mesurer.
- Il est possible de cartographier l'empreinte spatiale d'une source sonore, en fonction de la profondeur, à l'aide d'un logiciel de modélisation de la propagation des ondes sonores. La calibration du modèle et le choix des données d'entrée sont primordiaux pour obtenir des résultats cohérents.



# Partie 1

## Les différentes activités anthropiques génératrices de bruit sous-marin et les différents types d'émissions qu'elles génèrent

Cette partie présente de manière exhaustive et synthétique les différentes activités anthropiques génératrices de bruit sous-marin. Une synthèse de ces activités, ainsi que le numéro de la fiche descriptive correspondante (voir PARTIE 4. Fiches synthèse) sont présentés dans le tableau 8 page 77.

### I. Industrie du pétrole et du gaz

La production offshore de pétrole et de gaz représente 30 % de la production mondiale. Environ 6 000 unités d'extraction de pétrole et de gaz sont réparties en mer à travers le monde [164]. Cette industrie contribue localement au bruit ambiant sous-marin, en milieu côtier et jusqu'à des profondeurs de l'ordre de 3 000 m.

L'exploitation des ressources pétrolières et gazières en mer comporte plusieurs phases : la phase de prospection, l'exploration et l'exploitation et le démantèlement des structures.

#### 1) Prospection et recherche de gisements

La phase de prospection inclut les études géologiques, géophysiques et géotechniques nécessaires pour repérer et localiser les gisements. Certaines technologies utilisées lors de cette phase de prospection utilisent les ondes sonores. C'est le cas des prospections par sondeurs, sonars et sismiques.

##### a) Sondeurs et sonars

Les sondeurs et sonars émettent des sons haute fréquence (de 10 à 1 000 kHz) per-

mettant à la fois de mesurer la profondeur (bathymétrie), de visualiser la morphologie des fonds marins (topographie), mais également de caractériser la nature des couches superficielles des fonds marins (imagerie).

Les sondeurs et sonars émettent des impulsions sonores monochromatiques (CW) ou modulées en fréquence (FM) de quelques millisecondes à intervalles d'émission répétés (typiquement de 0,1 à 10 s [112]). Plus la profondeur est grande, plus l'intervalle entre les impulsions sera important afin de laisser à l'onde sonore le temps d'atteindre le fond et de revenir au récepteur. Le choix de la fréquence d'émission dépend du type de donnée que l'on cherche à acquérir et de la résolution recherchée. La qualité des informations recueillies dépend en effet directement des propriétés des ondes acoustiques émises : des ondes hautes fréquences de basse amplitude permettront d'obtenir des informations à haute résolution mais sur une échelle réduite, tandis que les ondes de plus faible fréquence et de plus forte amplitude se propageront plus loin mais les informations recueillies seront de plus faible définition.

Il existe plusieurs types de sondeurs :

- **Les sondeurs monofaisceaux** émettent une impulsion sonore au travers d'un faisceau d'angle réduit (5 à 30°) à la verticale du bateau. **Ces sondeurs représentent une source impulsionnelle de fréquence comprise entre 1 et 500 kHz** (les valeurs les plus communément utilisées étant 3,5, 12, 24, 30, 38, 50, 100, 120, ou 200 kHz) **et d'un niveau maximum d'émission à la source ( $L_{p,pk}$ ) de l'ordre de 210 à 240 dB re 1  $\mu$ Pa @ 1 m** [1, 112] et sont plutôt directs.
- **Les sondeurs multifaisceaux** émettent dans plusieurs directions, avec une ouverture angulaire plus importante dans le plan transversal au porteur (environ 150°), et qui permet de balayer

une plus large surface. Ils sont par contre très directs (environ 1°) dans le plan longitudinal au porteur (figure 13).

**Ces sondeurs génèrent une émission impulsionnelle à des fréquences comprises entre 10 et 500 kHz** (typiquement 12, 24 ou 32 kHz en eau profonde, 70 à 150 kHz sur le plateau continental et 200 à 400 kHz par très petits fonds). **Les niveaux d'émission ( $L_s$ ) sont de l'ordre de 210 à 220 dB re 1  $\mu$ Pa @ 1 m pour les plus hautes fréquences et de 240 dB re 1  $\mu$ Pa @ 1 m à 12 kHz** [1, 112].

Les sonars, et notamment les sonars à balayage latéral, peuvent disposer d'une ouverture angulaire transversale plus importante (180°) et d'une ouverture

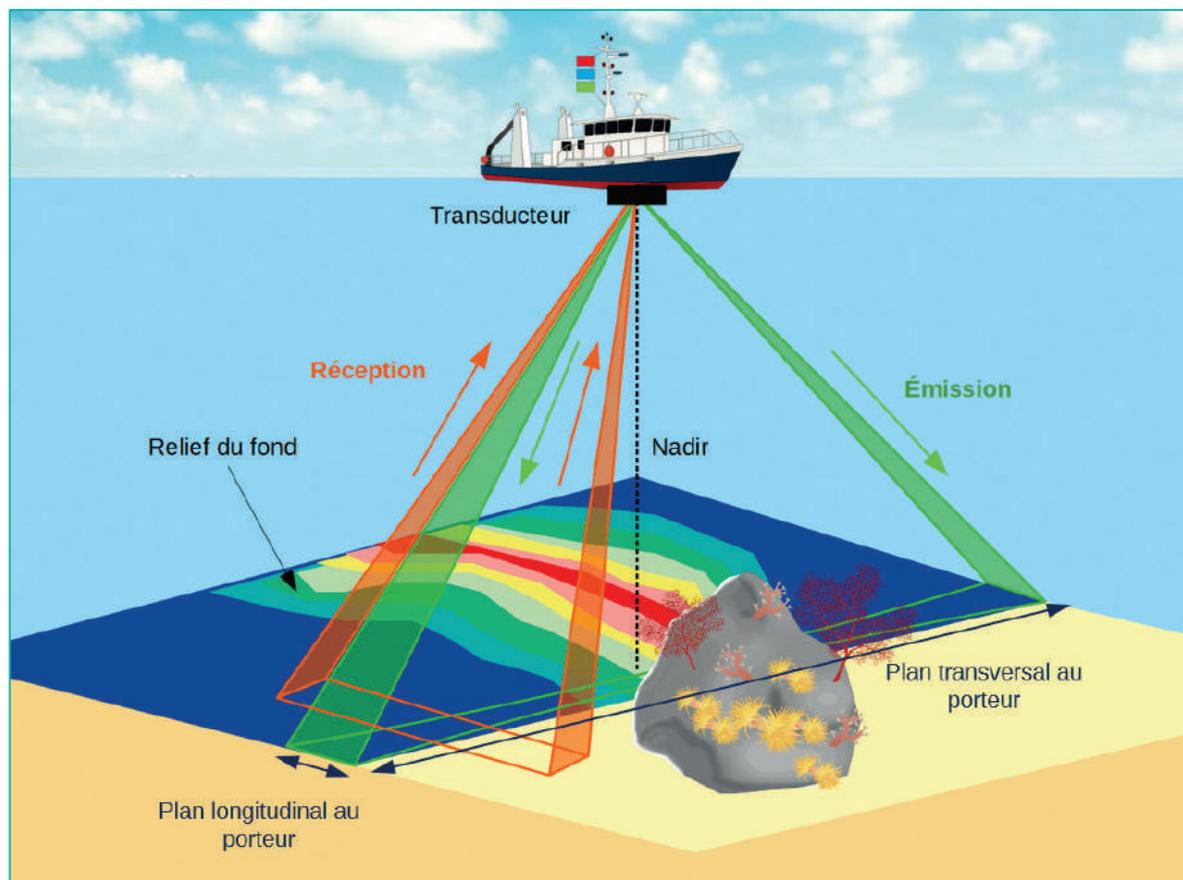


Figure 13 : Principe de fonctionnement du sondeur multifaisceaux (d'après [1]).

longitudinale très faible. Ils utilisent des fréquences plus élevées, ce qui leur confère une résolution très fine. Le niveau d'émission d'un sonar à balayage latéral est du même ordre que celui émis par un sondeur multifaisceaux.

La forte directivité des sondeurs et sonars et l'atténuation rapide de l'onde acoustique à ces fréquences limitent considérablement l'impact que peuvent avoir ces outils sur les espèces pélagiques (mammifères marins et poissons présents dans la colonne d'eau). En effet, du fait de l'importante directivité de l'émission sonore générée et des très courtes durées d'émission, il faudrait que l'animal passe sous le navire ou à proximité immédiate pour être impacté.

Les sondeurs multifaisceaux basse fréquence (10 à 40 kHz) sont potentiellement les plus impactants, mais l'étendue du faisceau reste très limitée. Les sondeurs de sédiments fonctionnent dans des gammes de fréquences plus basses (2 à 10 kHz), et avec des signaux plus longs

(jusqu'à quelques dizaines de ms) mais leurs niveaux d'émission sont plus faibles. Les sondeurs monofaisceaux sont fortement directifs et donc peu impactants. Enfin les systèmes sondeurs et sonars haute fréquence (> 100 kHz) sortent de la gamme fréquentielle d'audition des mammifères marins (à l'exception des cétacés très haute fréquence comme les marsouins (voir partie 2), et ont une portée réduite du fait de la forte absorption des signaux haute fréquence dans l'eau de mer [110].

Il est également probable que le bruit généré par la propulsion du navire agisse déjà comme un répulsif sur ces espèces. Ceci ne s'applique toutefois pas aux espèces benthiques et démersales (qui vivent sur ou près du fond).

#### b) Prospection sismique

La prospection sismique en mer est une technique d'étude visant à caractériser la structure géologique des fonds marins en étudiant les différentes strates qui les composent, afin d'identifier la présence

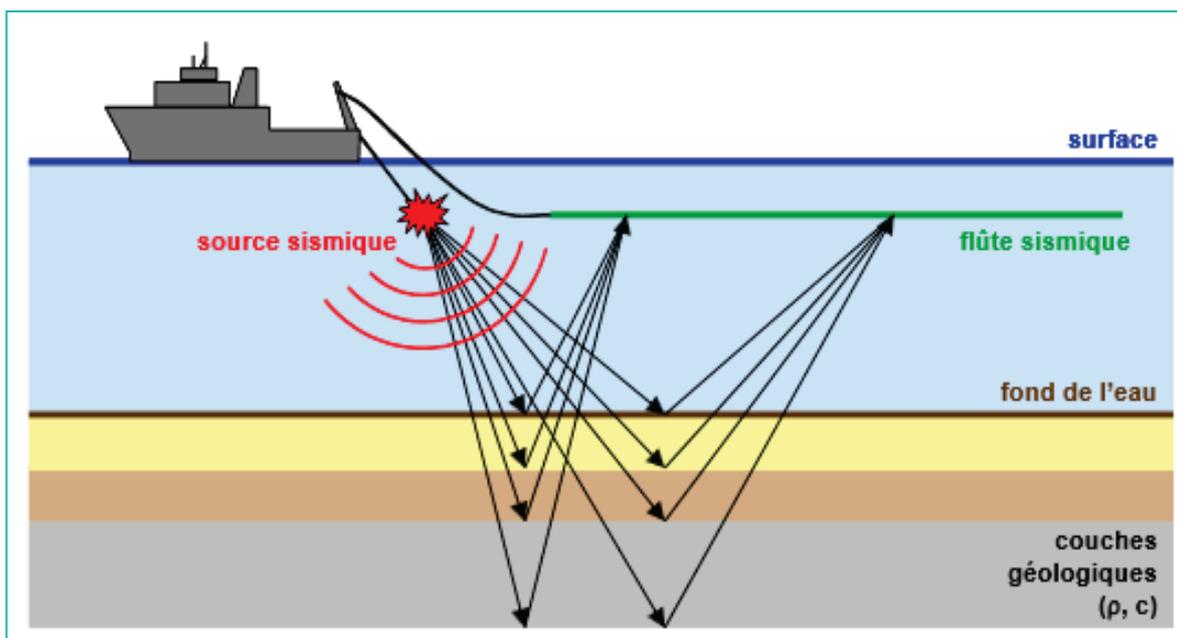


Figure 14 : Principe de fonctionnement d'une campagne de prospection sismique [143].

d'hydrocarbure ou de gaz. Chaque strate réfléchit et réfracte les ondes différemment en fonction de ses propriétés physiques. La prospection sismique consiste à envoyer vers les fonds marins, à partir d'un navire, des ondes acoustiques basses fréquences de forte intensité. Contrairement aux sondeurs et sonars, les ondes générées par la sismique ont pour objectif de pénétrer en profondeur dans le sédiment. Il est alors possible d'étudier les phénomènes de réflexion et/ou réfraction rencontrés par ces ondes avant leur réception par des hydrophones intégrés sur une ou plusieurs « flutes » (ou streamer) remorquées par le navire (figure 14). L'analyse des signaux reçus permet ensuite d'identifier la nature des différentes strates traversées par les ondes.

Aujourd'hui, la sismique utilise principalement des canons à air comprimé (« airguns ») pour générer des ondes acoustiques. Ces canons libèrent brusquement dans la colonne d'eau un volume variable d'air sous pression, créant ainsi **une source sonore de type impulsif et à large bande fréquentielle (de 5 Hz à 15 kHz) avec un maximum d'énergie entre 10 et 100 Hz [24, 170]. Le niveau de bruit généré est de forte intensité et de courte durée (quelques millisecondes).**

Le niveau émis dépend de la capacité du canon (volume d'air libéré), de la pression exercée sur ce volume et du nombre de canons mis en œuvre. **Pour un unique ca-**

**non à air de faible volume de 20 cu in GI<sup>11</sup> (soit 0,328 L), le niveau d'émission maximum ( $L_{p,pk}$ ) est de l'ordre de 230 dB re 1  $\mu$ Pa @ 1 m.**

Lors d'une campagne de prospection sismique haute résolution, 1 à 2 canons sont mis en œuvre. Pour la prospection à grande échelle, plusieurs dizaines de canons peuvent être utilisés. **Le niveau maximum d'émission ( $L_{p,pk}$ ) généré par un réseau de canons à air peut ainsi atteindre 250 à 260 dB re 1  $\mu$ Pa @ 1 m [40, 127, 158].** Les émissions sont générées de façon répétée à intervalles d'émission réguliers (toutes les 10 à 60 s environ, en fonction du volume d'air total) et peuvent durer plusieurs heures.

Bien qu'ils soient dirigés vers le fond, le bruit généré par les canons à air est généralement peu directif. Le bruit basse fréquence généré peut se propager sur des distances importantes, de plusieurs centaines de kilomètres, voire plusieurs milliers par grands fonds [106, 158].

Les autres méthodes de sismiques, par boomer ou sparker<sup>12</sup>, permettent de caractériser les couches supérieures de sédiments (sur quelques dizaines de mètres pour le boomer ou quelques centaines pour le sparker). Les ondes sonores générées par ces méthodes ont des fréquences plus élevées, entre 500 Hz et 12 kHz, des niveaux d'émission ( $L_S$ ) de l'ordre de 215 à 230 dB re 1  $\mu$ Pa @ 1 m et une durée d'impulsion de l'ordre de la milliseconde [29, 130].

<sup>11</sup> cu in GI = *cubic inch Generator injected*. Indique la quantité d'air injectée dans la chambre de compression.

<sup>12</sup> Le boomer génère du bruit grâce au rapprochement brutal de deux plaques de métal ; ce rapprochement forme une bulle d'air qui, en implosant, génère une onde acoustique. Avec le sparker des bulles d'air sont produites sous l'impulsion d'une onde de choc générée par une décharge électrique.

## 2) Exploration et production

Lorsqu'un gisement est détecté, une plateforme est mise en place afin de forer le plancher océanique pour, dans un premier temps, explorer le réservoir et évaluer sa rentabilité, puis commencer l'extraction si le gisement est considéré comme exploitable. Ces phases d'exploration et de production génèrent du bruit sous-marin à travers plusieurs activités, parmi lesquelles le battage de pieux et le forage sont certainement les plus bruyantes. Les niveaux de bruit générés par ces activités sont cependant inférieurs à ceux observés en phase de prospection.

### a) Battage de pieux

L'installation d'une plateforme de forage nécessite la pose de pieux pour maintenir la structure. Dans la mesure où le bruit généré par le battage de pieux est plus largement documenté dans le cadre des travaux de construction des parcs éoliens en mer, l'aspect acoustique de cette activité est décrit en détail dans la partie 1 - II - Énergies marines renouvelables.

### b) Forage

Le forage du plancher océanique est une activité temporaire qui précède la phase de production. Les sources sonores générées par le forage sont de type **continu à large bande fréquentielle avec un maximum d'énergie en basse fréquence (< 1 000 Hz)**, principalement dues à l'équipement mis en œuvre pour le forage (générateurs, colonne de forage, pompes, compresseurs, etc.). Les bruits générés par le frottement de la tête de forage sur le substrat et par le cisaillement de la roche contribuent également au spectre global mais dans une moindre mesure. Cette contribution serait limitée aux fréquences inférieures à 600 Hz [170, 194]. La transmission du bruit dans le milieu marin

dépend donc fortement de la structure qui supporte l'équipement de forage et de la surface d'échange avec le milieu marin [4]. Le forage du plancher océanique s'effectue à partir d'une plateforme en surface. Il existe trois types de plateforme :

- les plateformes fixes, qui reposent sur le fond marin, sont utilisées lorsque la profondeur est inférieure à 300 m ;
- les plateformes flottantes, reliées au fond à l'aide de câbles, sont privilégiées par grands fonds ;
- les plateformes mobiles, de type plateforme autoélévatrice (« *jack-up rig* ») ou navire de forage (figure 15), servent surtout pour l'exploration des gisements.

Le bruit sous-marin généré par le forage dépend du type de plateforme, les plateformes fixes et auto-élévatrices étant les moins bruyantes, tandis que les plateformes flottantes et les navires de forage émettent les plus forts niveaux de bruit [78, 158]. En effet, la principale source de bruit étant l'équipement de forage situé sur la plateforme, le bruit transmis dans le milieu marin dépend fortement de la surface d'échange. Dans le cas de plateformes flottantes ou de navire de forage, cette surface est beaucoup plus vaste. La transmission *via* la coque d'un navire de forage est particulièrement importante. À ce bruit transmis s'ajoute également celui généré par le navire lui-même, et notamment le bruit des hélices et des propulseurs permettant au navire de maintenir sa position pendant les opérations de forage. Le bruit généré par les navires de forage est donc globalement plus élevé que celui généré par les autres structures.

Le bruit généré par le forage à partir de navire est un bruit large bande (10 Hz - 10 kHz) avec des niveaux  $L_{p,rms}$  de l'ordre de

190 dB re 1  $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 1 m [158, 194]. Le bruit généré par une plateforme flottante de type FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*) est de l'ordre de 170 à 190 dB re 1  $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 1 m sur la bande 20-2 500 Hz, avec les plus forts niveaux (> 170 dB) mesurés à des fréquences inférieures à 80 Hz [60]. Enfin, les plateformes fixes sont les moins bruyantes, avec des niveaux  $L_{p,rms}$  de l'ordre de 120-130 dB re 1  $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 1 m [158, 194]. Le bruit basse fréquence lié aux activités de forage peut se propager sur plusieurs dizaines de kilomètres, voire plusieurs centaines pour les forages à grande profondeur (plus de 1 000 m).

### c) Production

La phase de production consiste à extraire le pétrole ou le gaz et à l'acheminer à terre. Au cours de cette phase, de nombreuses activités sont susceptibles d'induire du bruit sous-marin, parmi lesquelles le pompage, la pose de pipelines, le trafic maritime lié à l'acheminement des ressources, de l'équipement et du personnel, etc. Si ces sources peuvent ponctuellement générer des niveaux de bruit importants (de l'ordre de 195 dB re 1  $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 1 m), la phase de production est globalement moins bruyante que la phase d'exploration puisqu'elle ne fait plus intervenir d'engin de forage et qu'elle est principalement réalisée



Figure 15 : Plateforme mobile Cossack Pioneer de type FPSO (*Floating Production Storage and Offloading* [60]), plateforme auto-élevatrice Astra (crédit photo : EDC Ltd.) et navire de forage West Gemini (crédit photo : Thierry Gonzalez/TOTAL).

à partir de plateformes fixes ou auto-élévatrices, ayant une faible surface d'échange avec le milieu marin [158]. Hors bruit impulsionnel lié à des activités ponctuelles, le bruit moyen généré par une plateforme pétrolière en phase de production est inférieur à celui émis en phase de forage de 10-20 dB dans la bande 20-500 Hz, voire de 30 dB dans les fréquences comprises entre 100 et 600 Hz [129, 170].

Le bruit généré par les navires gravitant autour des plateformes pétrolières (tankers, navires de soutien, navires poseurs de pipeline, etc.) est détaillé dans la partie 1 - VIII - Trafic maritime (navires marchands et transport de passagers).

Les explosions accidentelles dans les puits de pétrole, liées à la production d'hydrocarbure, représentent également une potentielle source de bruit. S'il n'existe pas d'information concernant le niveau de bruit

généré par ce type d'explosion, le bruit généré par les explosions volontaires en mer (déroctage) est décrit dans la partie 1 - V - Travaux et aménagements côtiers.

### 3) Démantèlement

Le démantèlement des plateformes pétrolières nécessite l'utilisation d'explosifs et/ou de techniques mécaniques (jets d'eau abrasifs, scie diamantée, lames en carbure, cisailles guillottes, etc.) pour sectionner la structure, qui peut ensuite être enlevée pour être démantelée à terre.

À l'heure actuelle, les techniques mécaniques représentent environ 35 % des opérations de démantèlement, mais aucune donnée publiée ne permet de connaître les niveaux de bruit générés par ces techniques. Le bruit généré par l'usage d'explosif en mer est par contre connu. Cette activité est décrite en détail dans la partie 1 - V - Travaux et aménagements côtiers.

## II. Énergies marines renouvelables

Les énergies marines renouvelables (EMR) incluent l'ensemble des technologies permettant de produire de l'électricité à partir de l'énergie récupérable en milieu marin : le vent, les courants de marée, la houle, le gradient de température entre la surface et le fond.

De nombreux projets liés aux EMR sont actuellement en cours de développement aux larges des côtes françaises. Les projets les plus avancés concernent l'éolien en mer, posé ou flottant, et dans une moindre mesure l'hydrolien. D'autres projets sont actuellement au stade de démonstrateurs (houlomoteur, énergie thermique des mers, *Sea Water Air Conditioning* ou SWAC).

Les énergies marines renouvelables, de par leur diversité, sont susceptibles de générer différents types de bruits sous-marins. Cependant, certaines activités génératrices de bruit peuvent être communes à plusieurs types d'EMR durant les différentes phases du projet : étude de terrain, phase de construction, phase opérationnelle ou phase de démantèlement.

Ici, nous traiterons particulièrement de l'éolien en mer, pour lequel de nombreuses études ont été réalisées (les premières installations en Europe datent de 1991). Il existe en effet très peu de données et de retours d'expériences concernant le bruit généré par les autres technologies EMR.

## PARTIE 1 :

Les différentes activités anthropiques génératrices de bruit sous-marin et les différents types d'émissions qu'elles génèrent

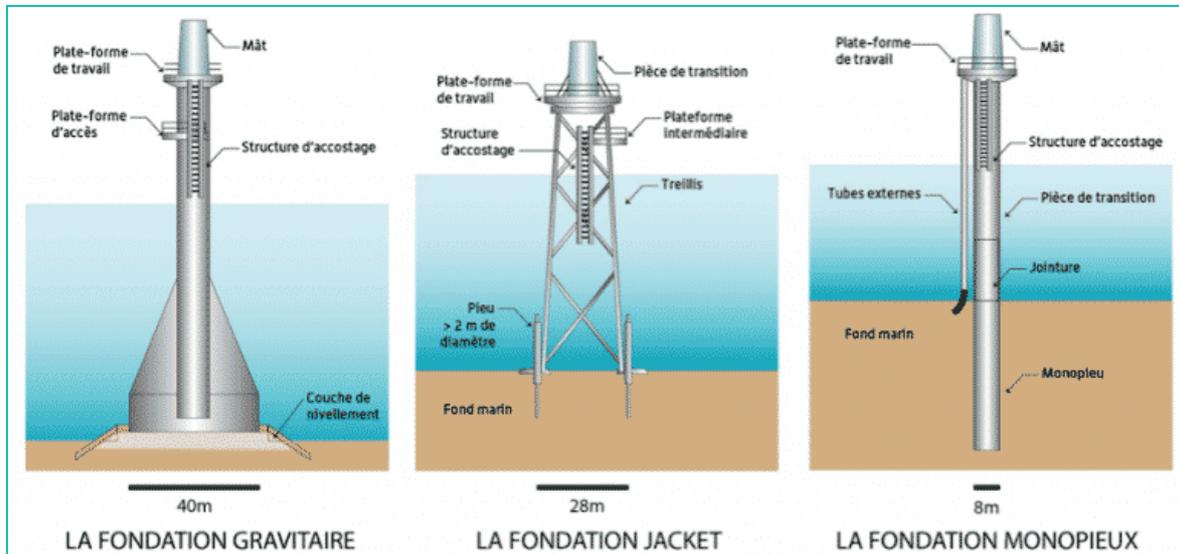


Figure 16 : Exemples de fondations d'éoliennes offshore posées (source : Éoliennes en Mer Dieppe Le Tréport).

### 1) Étude de terrain

Avant la phase de construction, il est nécessaire de connaître en détails la morphologie du sol et la nature du fond sur la zone d'étude. Pour cela, des études géologiques, géophysiques et géotechniques sont réalisées. Parmi les technologies mises en œuvre pour ces études, certaines utilisent l'acoustique et génèrent du bruit sous-marin. Ces techniques sont les mêmes que celles utilisées pour la prospection pétrolière (sondeurs et canons à air notamment) et sont décrites en détails dans la partie 1 - I - Industrie du pétrole et du gaz.

Avant le début de la phase de construction, un mât de mesure est installé sur la zone retenue. Les conditions et les techniques d'installation de ce mât sont généralement les mêmes que pour l'installation des éoliennes.

Durant cette phase d'étude, le trafic maritime sur la zone du futur parc est susceptible d'augmenter, ce qui conduira à élever le niveau de bruit ambiant sur la zone (voir partie 1 - VIII - Trafic maritime (navires marchands et transport de passagers)).

### 2) Phase de construction

La phase de construction d'un projet EMR fait intervenir de nombreuses activités génératrices de bruit sous-marin, que ce soit pour préparer le substrat ou installer les machines. Le niveau de bruit généré lors de la phase de construction dépend fortement du type de fondation choisi (figure 16). La mise en place de fondations de type monopieu est la plus bruyante car ces dernières font intervenir des activités telles que le battage de pieux et le forage. L'installation de fondations tripodes ou « jacket », qui utilisent des pieux de diamètre plus modeste, génère des niveaux de bruit moins élevés. Enfin, la mise en place de fondations de type gravitaire est la moins bruyante [138].

#### a) Battage de pieux

Le battage de pieux consiste à enfoncer un pieu en acier dans le substrat à l'aide d'un marteau (hydraulique dans la plupart des cas). Cette activité génère de forts niveaux de bruit sous-marin. Cependant, ces niveaux dépendent de nombreux paramètres dont les plus notables sont :

- le diamètre du pieu ;
- la nature du sol ;
- la bathymétrie ;
- la profondeur à laquelle le pieu doit être enfoncé dans le sol ;
- l'énergie transmise par le marteau (et donc le type de marteau) ;
- la vitesse d'enfoncement.

Le diamètre du pieu semble toutefois être le facteur le plus important [131], et la relation entre niveau de bruit et diamètre du pieu a été établie à plusieurs reprises<sup>13</sup> : plus le diamètre du pieu est important, plus le niveau de bruit généré lors du battage est élevé. Ceci est directement lié au fait qu'un pieu de diamètre important nécessite plus d'énergie mécanique, et donc un marteau plus puissant, afin d'être mis en place. Le diamètre du pieu est donc ici un indicateur de la puissance du marteau.

Les facteurs tels que la profondeur et la nature du substrat semblent eux avoir un impact direct sur la propagation du bruit généré. La propagation des ondes sonores est en effet plus complexe en milieu côtier, par petit fond, du fait des phénomènes de

réflexion, et la nature du substrat peut encourager (fond rocheux) ou limiter (fonds vaseux) ces phénomènes. Ces paramètres devront donc être pris en compte dans les modèles de prédiction du bruit généré.

Du fait de ces nombreux facteurs, il est difficile de donner une valeur moyenne du niveau de bruit généré par le battage de pieux. Cependant, cette activité fait partie des plus bruyantes, avec une intensité acoustique comparable à celle des canons à air comprimé [138]. **Le battage de pieux génère de forts niveaux de bruit impulsif large bande (10 Hz-20 kHz) avec un maximum d'énergie mesuré entre 100 Hz et 1 kHz** [6, 10]. Ce bruit est susceptible de se propager sur plusieurs dizaines de kilomètres [10, 138].

**Les niveaux émis (LS) par le battage de pieux sont en général de l'ordre de 250 dB re 1 µPa @ 1 m pour des pieux d'environ 4 m de diamètre** [130]. Le tableau 2 ci-dessous donne quelques exemples publiés dans la littérature de niveaux de bruit  $L_{p,pk}$  (ou  $L_{p,0-pk}$ ) reçus à 750 m en fonction du type de pieu et des paramètres environnementaux.

Tableau 2 : Niveau de bruit généré à 750 m par le battage de pieu de différents diamètres (d'après [138] et [6]).

Lieu	Diamètre (m)	Type de fondation	Puissance (MW)	Profondeur (m)	Niveau $L_{p,pk}$ (dB re 1 µPa @ 750 m)	Niveau $L_{E,p,ss}$ (dB re 1 µPa <sup>2</sup> .s @ 750 m)
Thorntonbank (Belgique)	1,8	Jacket	5	~ 15	189	178
Alpha Ventus (Allemagne)	2,7	Tripode	5	~ 30	199	174
Horns Rev II (Danemark)	3,9	Monopieu	2,3	9-17	195	176
Barrow (Royaume-Uni)	4,7	Monopieu	3	15-20	195	-
Belwind (Belgique)	5	Monopieu	3	15-37	194	166

<sup>13</sup> Par exemple :  $L_{S,pk-pk} = 24,3 D + 179$  avec D le diamètre du pieu [133]

Le niveau de bruit généré par le battage d'une fondation « jacket » est inférieur à celui d'une fondation monopieu (diamètre des pieux inférieur). Cependant, le temps de battage (et donc le nombre de coups) est plus important. De ce fait, les niveaux  $L_p$  sont plus faibles mais les niveaux exprimés en  $L_{E,p}$  sont plus élevés [138].

Il existe des méthodes alternatives au battage de pieux par marteau hydraulique :

- le vibrofonçage consiste à enfoncer le pieu en le faisant vibrer. Le vibrofonçage est en général moins bruyant que le battage par impact, avec des niveaux de bruit inférieur de 15 à 20 dB en moyenne [6]. Cependant le bruit généré par le vibrofonçage, qui se compose d'émissions continues (vibrations) et impulsives (oscillations du vibreur) n'est pas directement comparable avec le bruit impulsif du battage de pieu ;
- le battage « HiLo » est une méthode de battage de pieux à une fréquence plus élevée (nombre de coups par minute plus important), ce qui permet de frapper moins fort et de transmettre moins d'énergie au pieu. Les niveaux de bruit généré par cette méthode sont donc inférieurs à ceux du battage conventionnel ;
- le forage est réservé aux fonds rocheux ou hétérogènes et peut être utilisé comme alternative au battage pour des pieux de moins de 5 m de diamètre. Le bruit généré est un bruit continu de niveau inférieur à celui du battage (voir partie 1 - I - Industrie du pétrole et du gaz).

Le choix de la méthode mise en œuvre pour l'installation d'un pieu dépend directement du type de pieu et de la nature du sol. Il est souvent nécessaire de cumuler ces

différentes méthodes (battage, vibrofonçage, forage) lors de la mise en place de fondations d'éolienne.

### **b) Autres activités liées à la construction**

Les autres techniques mises en œuvre pour la construction des EMR sont en général moins bruyantes que le battage de pieux. La pose de fondations gravitaires pour les éoliennes, comme l'installation d'hydroliennes, génèrent des niveaux de bruit bien inférieurs. Ce bruit, principalement lié à l'augmentation du trafic maritime engendrée, a un niveau  $L_{p,rms}$  de l'ordre de 115 dB re  $1 \mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$ , soit quelques dB de plus que le bruit ambiant [138]. Cependant, la pose de fondations gravitaires nécessite une préparation du fond, faisant intervenir des activités bruyantes, comme le dragage (voir partie 1 - IV - Activités portuaires).

Le bruit généré par la pose des ancrages des éoliennes flottantes est fortement lié au bruit émis par le navire qui réalise l'opération. En effet, ces navires sont dans la plupart des cas équipés d'un système de positionnement dynamique (navire DP pour *Dynamic positioning*) qui utilise le système de propulsion du navire (hélice, propulseurs) pour maintenir une position. Ce système génère du bruit continu à un niveau parfois important mais de courte durée [196].

L'installation de systèmes houlomoteurs ne nécessite pas non plus d'opération de battage de pieux. Cette installation se fait, soit par ancrage à l'instar des éoliennes flottantes, soit par forage. De même, les systèmes de climatisation SWAC (*Sea Water Air Conditioning*) nécessitent souvent la mise en œuvre d'opérations de forage (voir partie 1 - I - Industrie du pétrole et du gaz).

### c) Pose des câbles sous-marins

Les câbles électriques d'un parc éolien en mer peuvent soit être enfouis dans le substrat (ou ensouillés), soit posés sur le substrat et recouvert de dispositifs de protection (enrochements, matelas).

La pose de câbles sous-marins est décrite dans la partie 1 - VII - Installation de câbles et canalisations.

## 3) Phase opérationnelle

### a) Bruit lié au fonctionnement des structures

Pour la plupart des technologies EMR, la phase opérationnelle est beaucoup moins bruyante que les phases de construction et démantèlement. Le bruit lié, par exemple, à la rotation d'une éolienne est beaucoup moins élevé que le bruit généré par son installation. Cependant, **ce bruit est continu** et, dans la mesure où les parcs éoliens en mer sont prévus pour avoir une durée de vie de 20 à 30 ans, ce bruit va contribuer sur le long terme au bruit ambiant local. Son effet n'est donc potentiellement pas négligeable.

Le bruit sous-marin généré par une éolienne est essentiellement lié à la turbine (le bruit généré par les pales ne se transmet pas au milieu marin [177]). Les vibrations créées au niveau de la nacelle se propagent *via* le mât et les fondations jusque dans la colonne d'eau et les sédiments [113].

Les retours d'expériences sur les parcs éoliens du nord de l'Europe (au Danemark, en Suède, Belgique, Allemagne et Écosse notamment) démontrent que le bruit généré par une éolienne en opération dépend de plusieurs paramètres, et notamment :

- du type de fondation ;
- de la vitesse du vent ;
- de la puissance unitaire des turbines.

Ainsi, le bruit généré en basse fréquence par une éolienne de 3 MW à fondation monopieu est globalement plus élevé que celui généré par une éolienne de 6,15 MW à fondation « jacket » [138] (figure 17).

Sur les parcs en Belgique, une relation linéaire a pu être établie entre le niveau de bruit et la vitesse du vent, en fonction du type de fondation [139] :

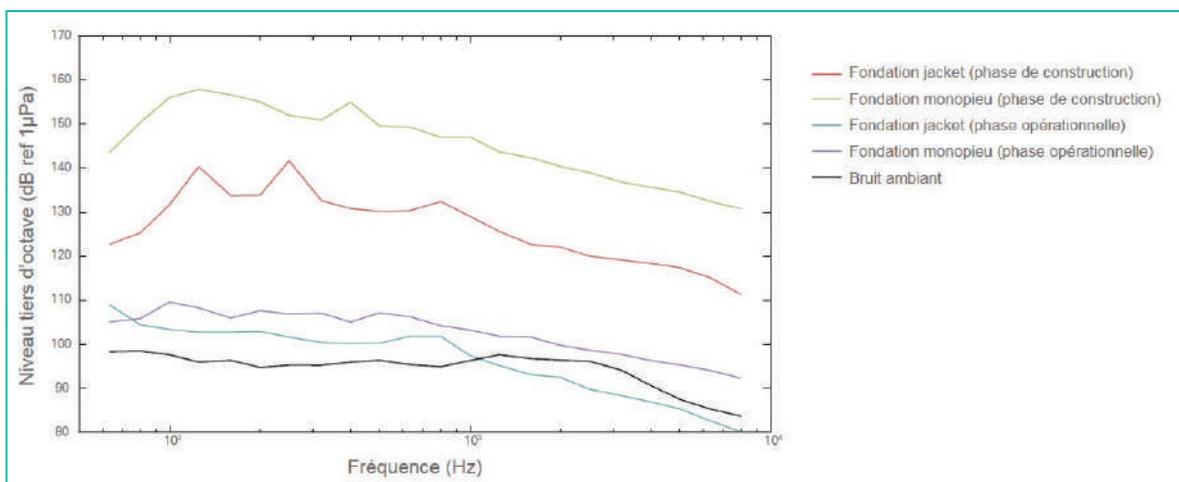


Figure 17 : Spectre en tiers d'octave du bruit ambiant sur le site de Bligh Bank (Belgique) avant construction du parc éolien offshore (en noir), et bruit généré par la pose et le fonctionnement d'une turbine de 6,15 MW sur fondation « jacket » et d'une turbine de 3 MW sur fondation monopieu (d'après [138]).

- Pour des fondations « jacket »,  $L_p = 1,1 \times$  vitesse du vent (en m/s) + 122,5 et  $L_{p,pk} = 0,96 \times$  vitesse du vent (en m/s) + 144,3
- Pour les fondations monopieu,  $L_p = 1,9 \times$  vitesse du vent (en m/s) + 120,3

Cependant, ces relations se basent sur un nombre limité d'observations.

De plus, si la vitesse du vent influe sur le bruit émis par les éoliennes en opération, elle influe également sur le bruit ambiant alentour. De ce fait, l'émergence sonore (bruit audible par-dessus le bruit ambiant) ne sera pas nécessairement plus importante si la vitesse du vent augmente. Ceci est également vrai pour les autres technologies EMR. D'une manière générale, le bruit généré par une éolienne en fonction est un bruit continu large bande avec un maximum d'énergie en basse fréquence. Le niveau  $L_{p,rms}$  est de l'ordre de 120 à 150 dB re 1  $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 1 m, et n'est audible au-dessus du bruit de fond qu'en basse fréquence (< 500 Hz) [181, 17, 177, 138]. Ce bruit pourrait être audible sur une vingtaine de kilomètres pour une turbine de 6 MW sur fondation monopieu [114]. Certaines études font état de pics de l'ordre de 125 dB re 1  $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$  ( $L_{p,rms}$ ) en dessous de 500 Hz à une centaine de mètres de la source [17, 177].

Il existe très peu de données publiées concernant le bruit généré par les autres technologies EMR en opération. Le tableau 3 ci-dessous donne quelques exemples des informations disponibles pour une éolienne flottante, une hydrolienne et des systèmes houlomoteurs.

**Ces dispositifs ont en commun le fait de générer un bruit continu large bande avec un maximum d'énergie émis en basse fréquence.** Il faut cependant noter que, dans le cas d'une hydrolienne, le bruit est directement émis dans le milieu marin par la turbine, alors que pour les autres dispositifs la principale source de bruit (turbines, flotteurs, pompes, etc.) est émergée ; le bruit généré est transmis dans le milieu marin *via* la partie immergée de la structure. Dans les cas des éoliennes flottantes et de certains dispositifs houlomoteurs, le bruit généré par le système d'ancrage (vibrations, chocs métalliques) est également non négligeable. Ces systèmes d'ancrage sont constitués de chaînes métalliques et/ou de matériaux polymères. En fonction notamment de l'état de mer, les chaînes des lignes d'ancrage peuvent générer du bruit de type impulsionnel.

Tableau 3 : Niveaux de bruit généré par les différentes technologies EMR.

Technologie	Lieu	Puissance (MW)	Niveau de bruit $L_{p,rms}$ (dB re 1 $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 m)	Fréquences de maximum d'énergie	Réf. bibliographique
Éolienne flottante	Hywind (Norvège)	2,3	162	25-100 Hz	196
Hydrolienne	Paimpol-Bréhat (France)	2,2	157 (dans la bande 40-8 192 Hz)	40-400 Hz	107
Houlomoteur	Synthèse de 7 études		125-174	125-250 Hz	160

### b) Bruit lié à la maintenance

Lors des phases de fonctionnement des EMR, les opérations de maintenance vont conduire à l'augmentation du trafic maritime aux abords de la zone. D'après les retours d'expérience, les navires de maintenance sont susceptibles de générer des niveaux  $L_{p,rms}$  de 150-180 dB re 1  $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 1 m sur la bande 20 Hz – 20 kHz avec un maximum d'énergie dans les fréquences inférieures à 1 kHz [142].

### 4) Phase de démantèlement

À ce jour, hors démonstrateurs ou prototypes, la phase de démantèlement des projets EMR ne concerne que l'éolien en mer. Quatre parcs éoliens ont été démantelés entre 2016 et 2018 (parcs de Yttre Stengrund et Utgrunden en Suède, Vindeby au Danemark et Lely aux Pays-Bas). Très peu de retours d'expérience sont à l'heure actuelle disponibles concernant ces démantèlements, et aucun d'entre eux ne fait état de mesures de bruit réalisées lors de cette phase.

Pour les parcs éoliens, le démantèlement inclut le démontage des turbines, des mâts et de la sous-station électrique, l'enlèvement des câbles, des fondations et des protections anti-affouillement, le rapatriement à terre du matériel démantelé et la remise en état du site. Le démantèlement peut être total ou partiel : selon le type de fondation, il peut être choisi, soit d'enlever la structure dans sa globalité, soit de laisser sur place la base des éoliennes (si elles sont enterrées ou colonisées) ; de même pour les câbles ensouillés qui pourraient être laissés en place.

Le bruit généré par la phase de démantèlement est donc principalement lié :

- à la présence des navires techniques en charge du démantèlement et du rapatriement des éléments à terre ;
- au procédé d'enlèvement des câbles ;
- au(x) procédé(s) d'enlèvement des fondations ;
- à la remise en état du site.

Pour les deux premières sources de bruit, le niveau attendu est équivalent aux niveaux de bruit observés lors de la phase de construction, dans la mesure où le même type de navire et le même procédé devraient être utilisés pour la pose et l'enlèvement des éoliennes (turbines et mâts) et des câbles [130].

L'enlèvement des fondations peut faire intervenir plusieurs procédés [175] :

- coupe par câble diamanté ;
- coupe par « *water-jetting* » (projection d'eau et de substance abrasive sous-pression) ;
- minage/déroctage par explosifs.

Il n'existe actuellement pas de données publiées permettant d'évaluer le niveau de bruit généré lors de coupes par câble diamanté ou par « *water-jetting* ». Le bruit sous-marin généré par les explosifs a par contre déjà été mesuré à de nombreuses occasions. Le bruit généré par les activités de minage/déroctage par explosif est décrit à la partie 1 - V - Travaux et aménagements côtiers.

Enfin, la remise en état du site consiste principalement à combler les cavités éventuellement formées par l'enlèvement total des fondations. Ce comblement pourrait faire intervenir des navires techniques de type dragues. Le bruit généré par ce type de navire est décrit à la partie 1 - IV - Activités portuaires.

### III. Activités halieutiques

Les activités halieutiques (pêche et aquaculture) génèrent du bruit sous-marin de façon involontaire, du fait de l'utilisation d'embarcations à moteur et d'engin traînant (chaluts de fond et dragues). Ces activités introduisent également volontairement du bruit dans le milieu marin en utilisant l'acoustique sous-marine, soit pour détecter les bancs de poissons, soit pour éloigner les prédateurs.

#### 1) Pêche

##### a) Bruit généré par les navires de pêche

Le bruit généré par les navires de pêche dépend de nombreux paramètres : taille du navire, type de coque, caractéristiques du moteur et de la propulsion, vitesse de déplacement, etc., et il n'est pas possible de comparer un petit navire de pêche côtière avec un navire hauturier de pêche profonde. Cependant, certaines caractéristiques acoustiques notables sont communes à tous les navires de pêche [83] :

- le bruit généré par les navires de pêche est un bruit continu large bande avec un maximum d'énergie émis en basse fréquence, entre 100 Hz et 2 kHz ;
- les plus fortes contributions en basse fréquence sont dues à la machinerie (moteur, génératrice, auxiliaires), tandis que la propulsion influence l'ensemble du spectre. Les interférences électriques et les échosondeurs influent sur la signature en haute fréquence ;
- à l'instar des autres types de navire, le niveau de bruit généré par les navires de pêche est positivement corrélé à la vitesse de navigation.

À titre d'exemple, un navire de pêche côtière de 12 m de long navigant à 7 nd génère un bruit continu de niveau  $L_{p,rms}$  de l'ordre de

150 dB re 1  $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 1 m sur la bande 250-1 000 Hz, avec un maximum d'énergie autour de 300 Hz [78].

Les navires de pêche utilisent des échosondeurs pour contrôler la bathymétrie et repérer les bancs de poissons. Ces sondeurs émettent à la verticale du navire un signal impulsionnel à des fréquences supérieures à 10 kHz. Les navires de pêche peuvent également être équipés de sonars qui émettent à l'horizontal et permettent de localiser les bancs de poissons autour du navire. Les sondeurs émettant à 38 et 200 kHz sont fréquents sur les navires de pêche, mais les navires sont de plus en plus communément équipés de sondeurs et sonars multifréquences (de 20 à 200 kHz, certains dispositifs 3D émettant jusqu'à 450 kHz, voire 800 kHz pour les plus récents). **Le niveau d'émission ( $L_s$ ) des sondeurs et sonars de pêche est de l'ordre de 220-230 dB re 1  $\mu\text{Pa}$  @ 1 m et la durée d'émission est généralement de l'ordre de la milliseconde [109, 111].**

##### b) Bruit des engins de pêche

Les engins de pêche, et notamment les engins traînants (chaluts de fond et dragues) génèrent également du bruit sous-marin. Les chaînes génèrent du bruit haute fréquence tandis que le bourrelet, en contact avec le fond, génère du bruit basse fréquence. Le frottement de l'engin sur le substrat engendre également des émissions, en moyennes et hautes fréquences.

Les chaluts peuvent également être équipés de dispositifs acoustiques netsondes. Il s'agit de capteurs qui permettent de contrôler l'ouverture de l'engin, l'écartement des panneaux, la profondeur et de détecter

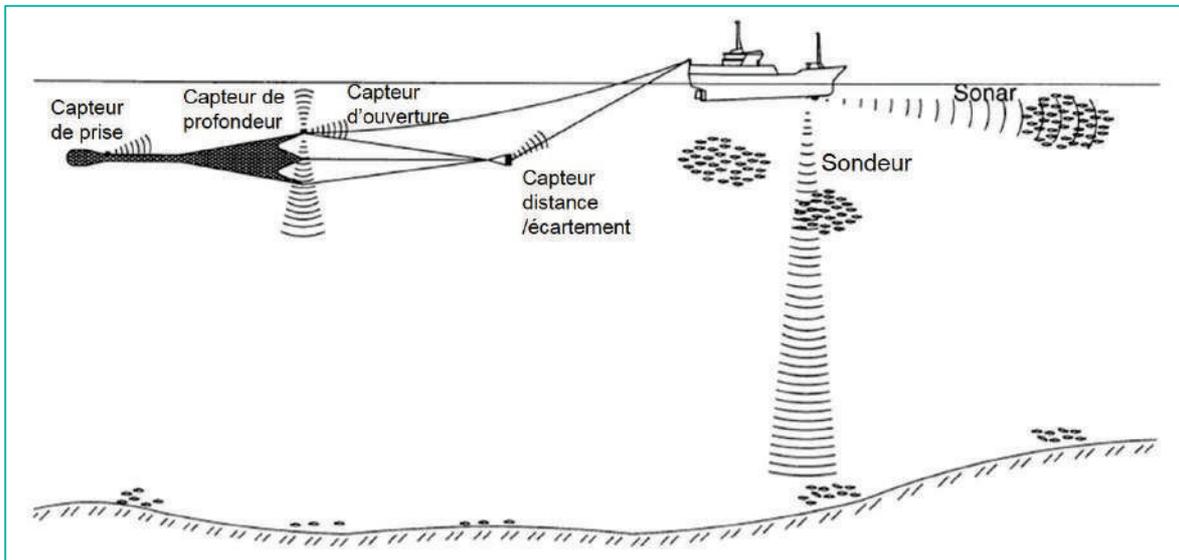


Figure 18 : Dispositifs acoustiques utilisés par les navires de pêche (d'après [120]).

les prises entrant dans le filet (figure 18). Ces dispositifs émettent en haute fréquence (entre 40 et 200 kHz typiquement) à des niveaux modérés.

### c) Répulsifs acoustiques (pingers)

Afin d'éviter les captures accidentelles de mammifères marins, certains engins de pêche sont équipés de répulsifs acoustiques, ou pingers. Ces pingers sont de petits dispositifs (figure 19) émettant un signal impulsionnel haute fréquence, dans la plage d'audition des mammifères marins. Il existe plusieurs types de pingers ; ils peuvent émettre à une ou plusieurs fréquences comprises typiquement entre 20 et 160 kHz. Le niveau d'émission ( $L_S$ ) est de l'ordre de **130 à 180 dB re 1  $\mu$ Pa @1 m** [104].

## 2) Aquaculture

### a) Bruit généré par les embarcations

Les embarcations utilisées dans les exploitations aquacoles sont généralement des barges à fond plat en aluminium équipées de puissants moteurs hors-bord. La signature acoustique de ces embar-

cations est conditionnée essentiellement par le type de motorisation : avec un moteur hors-bord (à deux ou quatre temps) ou une propulsion Z-drive (moteur *in-board* avec embase et propulsion hors-bord), la signature acoustique est proche de celle d'un navire de plaisance de type pêche-promenade ; avec un moteur *in-board* « classique », la signature acoustique est proche d'un petit navire technique ou d'un petit navire de pêche (< 12 m).

### b) Répulsifs acoustiques (pingers)

De même que pour la pêche, les répulsifs acoustiques peuvent être utilisés en



Figure 19 : Répulsif acoustique AQUAMark® 210 (AQUATEC) utilisé sur les engins de pêche (crédit photo : NEREIS Environnement).

aquaculture, pour éviter la prédation sur les cultures en mer. Les répulsifs utilisés en aquaculture sont généralement plus puissants que ceux utilisés pour la pêche, avec des niveaux d'émission ( $L_s$ ) de l'ordre de **180 à 200 dB re 1  $\mu$ Pa @ 1 m** et des fréquences plus basses, autour de 10-15 kHz, pour cibler principalement les pinnipèdes. La durée d'émission est de l'ordre de la seconde [142].

D'autres répulsifs acoustiques ont été développés pour limiter la prédation des parcs conchylicoles par certaines espèces de poissons, comme des daurades royales. Les signaux émis sont très basse fréquence (inférieure à 1 kHz) et les niveaux d'émission sont modérés (inférieurs à 170 dB re 1  $\mu$ Pa @ 1 m). La durée d'émission peut atteindre quelques secondes.

## IV. Activités portuaires

Les activités portuaires susceptibles de générer du bruit sous-marin comprennent principalement les mouvements des navires de services et le dragage des bassins et des chenaux d'accès.

### 1) Signature acoustique des navires de service

Les navires de services (remorqueurs, bateaux de lamanage et pilotines qui aident les navires de grande taille à entrer et sortir des ports, vedettes de sauvetage en mer et baliseurs principalement) participent au bon fonctionnement d'un port de commerce : départ et arrivée des navires de commerce et de transport de passagers, entretiens du balisage, sécurité, etc.

Le bruit généré par les navires de service, à l'instar des autres navires (voir partie 1 - VIII - Trafic maritime (navires marchands et transport de passagers)), dépend de nombreux facteurs dont les plus importants sont la taille du navire et sa vitesse de déplacement. En effet, les navires de grande taille ont tendance à générer des niveaux de bruit plus importants avec un maximum d'énergie en basse fréquence, tandis que les bateaux de petite taille génèrent des

niveaux de bruit moins élevés avec un spectre décalé vers les moyennes fréquences (autour de 5 kHz). De même, le niveau de bruit est fortement corrélé à la vitesse du navire [158].

Hormis les remorqueurs de haute mer, les navires de service portuaires sont majoritairement de taille inférieure à 50 m, et leur vitesse dans l'enceinte portuaire est en principe limitée à 5 nd. Le bruit sous-marin généré par ces navires est donc globalement moins élevé que celui généré par les navires de commerce ou de transport de passagers.

D'une manière générale, les navires de service génèrent un bruit continu large bande d'un **niveau de l'ordre de 150 à 170 dB re 1  $\mu$ Pa/ $\sqrt{\text{Hz}}$  @ 1 m, avec un maximum d'énergie entre 100 et 1 000 Hz**. À titre d'exemple, un remorqueur de 25 m en opération génère un niveau de l'ordre de 170-180 dB re 1  $\mu$ Pa/ $\sqrt{\text{Hz}}$  @ 1 m [23, 158].

### 2) Dragage

Le dragage des chenaux de navigation est une activité courante en milieu portuaire. Elle est nécessaire pour garantir l'accès des ports aux navires à fort tirant d'eau. Le



Figure 20 : La drague aspiratrice en marche Samuel de Champlain (GIE Dragages-Ports, crédit photo : Fabien Montreuil).

dragage consiste à prélever le sédiment qui se dépose régulièrement sur le fond des chenaux de navigation et à les déposer (ou claper) au large, sur une zone dite de clapage.

Il existe 4 principaux types de drague :

- Les dragues aspiratrices autoporteuses, ou dragues aspiratrices en marche, à élinde traînante (TSHD pour *Trailer Suction Hopper Dredger* - figure 20). Il s'agit d'un navire autopropulsé capable d'aspirer les sédiments tandis qu'il avance à vitesse réduite (1 à 4 nd). L'aspiration des sédiments est assurée par un tube, appelé élinde traînante, équipé d'une

pompe. Les sédiments aspirés remplissent la cale du navire et sont ensuite déposés sur la zone de clapage, soit en ouvrant les vannes situées sous la cale, soit par pompage.

- Les dragues suceuses à désagrégateur (CSD pour *Cutter Suction Dredger*). Celles-ci sont équipées d'une tête de désagrégation rotative qui fragmente les fonds durs (calcaire, graviers, etc.). Les fragments sont ensuite aspirés au moyen de pompes de dragage alors que la drague est ancrée. Les sédiments collectés sont ensuite refoulés sur une zone de clapage ou déposés sur des barges spéciales.
- Les dragues à pelle mécanique ou dragues à pelle rétrocaveuse (BHD pour *Backhoe Dredger*). Il s'agit d'un ponton équipé d'une pelleteuse mécanique ou hydraulique. Le positionnement du ponton est assuré par 3 pieux. Un deuxième navire peut être présent pour faire office notamment de remorqueur ou pour transporter les sédiments prélevés.
- Les dragues mécaniques à benne preneuse (GD pour *Grab Dredger*). Le principe de fonctionnement est le même

Tableau 4 : Gamme de fréquences et niveaux de bruit liés au dragage des sédiments en fonction du type de drague utilisée.

Type de drague	Bruit généré	Niveau $L_{p,rms}$ (dB re 1 $\mu$ Pa/ $\sqrt{Hz}$ @ 1 m)	Fréquences de maximum d'énergie	Réf. bibliographique(s)
<b>TSHD</b>	Continu omnidirectionnel	150-190	100-500 Hz	29, 95, 118, 156
<b>CSD</b>	Continu omnidirectionnel	170-185	100-500 Hz	29, 161
<b>BHD</b>	Transitoire et répétitif	160-180	20-300 Hz	155
<b>GD</b>	Transitoire et répétitif	150-165	< 300 Hz	118, 158

que pour la drague à pelle mais l'outil utilisé pour creuser est une benne déposée sur le fond en position ouverte et qui prélève le sédiment au moment de sa fermeture. Les sédiments prélevés sont souvent déposés sur une barge annexe.

Le bruit généré par les dragues diffère en fonction du type de drague, du type de sédiment dragué et en fonction des phases opérationnelles : phase de dragage, phase de transit (transit à vide ou chargé) et phase de clapage.

La phase de dragage est généralement la plus bruyante. Durant cette phase, le bruit est principalement lié aux mécanismes de prélèvement (choc du bec d'élinde ou de la pelle sur le fond, pompes d'aspiration, fermeture de la benne, passage du sédiment dans l'élinde, remontée de la benne, etc.). Le tableau 4 présente les niveaux de bruit généré par les différents types de drague durant cette phase de dragage.

Le bruit généré lors du dragage est un bruit large bande (30 Hz-20 kHz) omnidirectionnel avec un maximum d'énergie en basse fréquence (< 500 Hz). Ce bruit peut se propager sur de grandes distances et être

audible au-dessus du bruit ambiant jusqu'à 25 km dans le cas des navires les plus bruyants [158].

En phase de transit, une drague aspiratrice en marche génère un bruit dont le niveau  $L_{p,rms}$  est comparable à celui d'un navire de commerce de type cargo navigant à vitesse moyenne (8-16 nd), **soit environ 170 dB re 1  $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 1 m** [95, 161]. Le bruit émis en transit lège (à vide) ou chargé est équivalent car une drague chargée adopte généralement une vitesse plus faible. Lors de cette phase de transit le bruit généré provient principalement de l'appareil de propulsion.

La phase de clapage est moins bruyante que la phase de dragage, avec **des niveaux  $L_{p,rms}$  compris entre 154 et 175 dB re 1  $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 1 m, et un maximum d'énergie dans les fréquences inférieures à 500 Hz** [95].

Il faut également noter que les barges et remorqueurs qui accompagnent les dragues peuvent générer des niveaux de bruit non négligeable, parfois supérieurs à ceux de la drague elle-même [158].

## V. Travaux et aménagements côtiers

Les travaux et aménagements côtiers (aménagement portuaire, construction de digues ou de ponts, creusement de puits, etc.) mettent en œuvre de nombreuses activités susceptibles de générer du bruit sous-marin. Parmi les principales activités, on peut citer le forage, le battage de pieux, le fonçage ou vibrofonçage de palplanches, le déroctage et le dépôt d'enrochements. Les deux premières activités ayant été décrites dans les sections précédentes (partie 1 - I -

Industrie du pétrole et du gaz et 1 - II - Énergies marines renouvelables), nous nous focaliserons ici sur le fonçage de palplanches, le déroctage et l'enrochement.

### 1) Fonçage de palplanches

Les palplanches sont des pieux profilés, aplatis, servant à renforcer les berges des cours d'eau ou à construire des digues, brise-lames ou pontons. Elles possèdent des nervures latérales qui leur permettent de

s'enclencher les unes dans les autres. L'enfoncement des palplanches dans le sol se fait soit à l'aide d'un marteau (fonçage) soit à l'aide d'un vibreur ou mouton (vibrofonçage).

Le fonçage de palplanches génère un bruit impulsionnel large bande (10 Hz - 100 kHz) d'intensité moindre que celui généré par le battage de pieux car il nécessite moins d'énergie (environ 4 fois moins [51]). Les niveaux d'émission ( $L_S$ ) sont de l'ordre de **200-210 dB re 1  $\mu$ Pa @ 1 m avec un maximum d'énergie en basse fréquence, entre 50 et 1 000 Hz**. Cependant, comme pour le battage de pieux, le niveau de bruit dépend de la nature du substrat et de la profondeur.

Le vibrofonçage génère un bruit continu (qui inclut cependant des impulsions liées aux oscillations du vibreur) et de niveau beaucoup moins élevé. Il est toutefois difficile de comparer directement un bruit continu et un bruit impulsionnel. Des études réalisées dans le cadre d'aménagement portuaire font état de niveau de bruit de l'ordre de **165 à 185 dB re 1  $\mu$ Pa/ $\sqrt{\text{Hz}}$  @ 1 m, avec un maximum d'énergie entre 25 et 2 000 Hz [193]**.

## 2) Déroctage

Le déroctage consiste à fragmenter puis à déblayer les débris d'un substrat rocheux. Il peut être réalisé à l'aide d'explosifs, d'un brise-roche hydraulique (BRH), ou d'une dent de déroctage (figure 21).

Le déroctage à l'explosif (ou minage), est de loin la méthode la plus bruyante. Les explosions sous-marines constituent une des sources de bruit anthropique les plus



Figure 21 : Dent de déroctage sur ponton dipper (crédit photo : NEREIS Environnement).

impactantes et le bruit généré peut se propager sur de très grandes distances (jusqu'à plusieurs milliers de kilomètres). De façon simplifiée, l'explosion génère deux types d'ondes : les ondes de choc et les ondes sonores, toutes deux de fortes intensités. Dans un premier temps, suite à l'explosion, une onde de choc est générée. De brutales fluctuations de pression apparaissent, causées par les bulles de gaz produites par l'explosion. L'onde de choc est alors rattrapée par une onde acoustique formée par ces fluctuations de pression. Un bruit de type impulsionnel est ainsi généré [158].

L'estimation du niveau de bruit causé par ce type d'opération est complexe car elle dépend de nombreux facteurs, et notamment de la charge explosive, du nombre de charges, de l'enfouissement ou non des charges<sup>14</sup> (et de la profondeur d'enfouissement le cas échéant) et de la nature de la roche à fracturer.

Dans tous les cas, les explosions sous-marines engendrent de très importants pics de pression. **Des charges de moins d'un kg**

<sup>14</sup> L'enfouissement des charges peut conduire à une réduction de l'énergie libérée par l'explosion de l'ordre de 20 %, mais celui-ci peut nécessiter la mise en œuvre d'opérations elles-mêmes bruyantes (ex. : forage) [50].

**équivalent TNT peuvent générer des niveaux d'émission  $L_{p,pk}$  de plus de 260 dB re 1  $\mu$ Pa @ 1 m [158], tandis que des charges de plusieurs milliers de kg équivalent TNT pourront engendrer des niveaux supérieurs à 300 dB re 1  $\mu$ Pa @ 1 m.** Il s'agit d'un bruit impulsionnel et omnidirectionnel basse fréquence (de 2 Hz à 1 kHz) avec un maximum d'énergie dans les fréquences inférieures à 500 Hz [79, 174] et une durée d'impulsion de l'ordre de la milliseconde.

À l'heure actuelle, le niveau de bruit généré par le déroctage par brise-roche hydraulique n'a fait l'objet d'aucune étude publiée. Cependant, ce niveau de bruit serait similaire à celui généré par le battage d'un pieu de petit diamètre (environ 50 cm) par marteau hydraulique, dans la mesure où l'énergie fournie et la cadence de battage des deux types d'engin sont quasiment identiques [12]. Ce niveau serait donc de l'ordre de 200 dB re 1  $\mu$ Pa @ 1 m.

## VI. Extraction de granulats

L'extraction de granulats marins consiste à prélever en mer, à l'aide de cargos sabliers, des sédiments et à les ramener à terre, où ils seront traités pour être utilisés dans les travaux de construction ou le traitement des sols ou de l'eau.

L'extraction de granulats en mer génère du bruit sous-marin au moment de la phase de prospection et de recherche de gisements, puis au moment de l'extraction. Lors de la

De même, le niveau de bruit généré par une dent de déroctage (figure 21) pourrait être assimilé à celui généré par une drague de type CSD [12], soit environ 170 dB re 1  $\mu$ Pa/ $\sqrt{\text{Hz}}$  @ 1 m.

### 3) Enrochement

L'enrochement consiste à déposer des matériaux sur le fond marin à partir d'un navire équipé d'un tube métallique. La longueur du tube s'adapte à la hauteur d'eau afin de contrôler la localisation des dépôts.

La principale source de bruit lors des opérations d'enrochement serait la propulsion du navire qui réalise l'opération (et notamment le système de positionnement dynamique), tandis que le bruit du dépôt de matériaux serait masqué [128]. Une étude comparant le niveau de bruit généré par un navire de dépôt d'enrochements en phase de dépôt et en phase de positionnement (sans dépôt) a également montré que le dépôt des roches sur le fond ne contribue pas au bruit généré [129].

phase de prospection, les techniques d'acoustique active mise en œuvre sont celles décrites dans la partie 1 - I - Industrie du pétrole et du gaz.

Lors de la phase d'extraction l'activité est similaire à celle mise en œuvre pour le dragage des chenaux de navigation, à ceci près que les sédiments prélevés sont ramenés à terre et non clapés au large. Cette activité est décrite dans la partie 1 - IV - Activités portuaires.

## VII. Installation de câbles et canalisations

Les câbles sous-marins assurent les connexions électriques et de télécommunications entre les pays du globe. L'installation de câbles sur les fonds marins génère du bruit avant (durant la phase de prospection) et pendant la pose. L'installation de canalisations sous-marines suit globalement le même procédé et génère donc le même type de bruit.

### 1) Phase de prospection

La phase de prospection consiste à définir le tracé du câble ou de la canalisation en fonction des contraintes environnementales. Un certain nombre de techniques utilisées durant cette phase sont susceptibles de générer du bruit :

- les échosondeurs qui évaluent la bathymétrie et définissent la topographie du fond. Dans la majorité des cas il s'agit de sondeurs multifaisceaux ;
- les sonars à balayage latéral qui permettent d'obtenir une représentation précise du fond, à l'image d'une photographie ;
- la sismique (en général en version légère haute résolution) qui permet de déterminer la nature et l'épaisseur des couches sédimentaires.

L'ensemble de ces techniques sont décrites en détails dans la partie 1 - I - Industrie du pétrole et du gaz.

### 2) Phase d'installation

La pose du câble ou de la canalisation est réalisée à partir d'un navire câblé ou d'un navire poseur de pipeline. Les câbles sous-marins sont soit ensouillés dans le sédiment, soit déposés sur le fond et, si besoin, recouverts d'un dispositif de protection (enrochement, « matelas » de béton, protection en acier, etc.). De même, les

canalisations sont posées sur le fond et ensouillées à l'approche des zones côtières.

La pose du câble ou de la canalisation peut se faire à l'aide d'une charrue à soc qui permet la pose et l'ensouillage simultanés, par *water-jetting* (un jet d'eau sous pression permet de creuser une tranchée), par tranchage, par dragage ou par forage dirigé.

Il existe peu d'études faisant état des niveaux de bruit générés par la pose de câbles ou de canalisations en mer. L'étude d'impact acoustique du raccordement du parc éolien de North Hoyle, pour lequel une trancheuse a été utilisée, fait état d'un bruit large bande avec un maximum d'énergie entre 100 et 600 Hz. Le niveau de bruit était **de l'ordre de 178 dB re 1  $\mu$ Pa/ $\sqrt$ Hz @ 1 m** [129]. Ce bruit apparaît comme très variable, du fait notamment de la nature de la roche dans laquelle la tranchée est creusée.

L'utilisation de jetting conduirait à des niveaux de bruit du même ordre, mais à plus haute fréquence, entre 1 et 15 kHz [71]. Lors de l'utilisation d'une charrue à soc, le bruit du navire apparaît comme prédominant, notamment du fait de l'utilisation de système de positionnement dynamique (utilisation intensive du système de propulsion pour maintenir une position). Le bruit généré par ce type de navire est de l'ordre de 170-185 dB re 1  $\mu$ Pa/ $\sqrt$ Hz @ 1 m [194].

Le bruit généré lors des opérations de forage et de dragage est décrit dans les sections précédentes (partie 1 - I - Industrie du pétrole et du gaz et 1 - IV - Activités portuaires). Le recours à du forage dirigé peut être nécessaire pour l'atterrissage des câbles sous-marins (arrivée du câble en milieu terrestre) ou le passage de canyons rocheux. Le forage dirigé nécessite la mise en place d'une plateforme de forage, et donc

parfois la mise en place de pieu par battage. Le bruit généré par cette activité est décrit à la partie 1 - II - Énergies marines renouvelables.

Lorsque l'ensouillage est impossible (ou non nécessaire), le câble ou la canalisation peut être simplement posé sur le fond marin et éventuellement recouvert d'enrochements ou de matelas de béton. Le bruit généré par la mise en place de ce type de protection est décrit dans la partie 1 - V - Travaux et aménagements côtiers.

Le tableau 5 présente les niveaux de bruit

généré par les différentes méthodes ou outils utilisés durant cette phase de d'installation de câbles ou de canalisations.

### 3) Phase d'entretien et de démantèlement

L'entretien et la dépose des câbles et canalisations sous-marins fait intervenir le même type de navire et de procédés que ceux utilisés pour l'installation. Les niveaux de bruit générés sont donc du même ordre que ceux cités précédemment, soit 170-185 dB re 1  $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 1 m.

Tableau 5 : Gamme de fréquences et niveaux de bruit liés à la pose de câbles et canalisations en fonction du type de méthode ou outils utilisés.

Méthode/outil	Type de substrat	Niveau $L_{p,rms}$ (dB re 1 $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 m)	Fréquences de max. d'énergie	Réf. bibliographique(s)
<b>Charrue à soc</b>	Meuble (vase, sable)	170-185 (bruit du navire)	< 1 kHz	158
<b>Water-jetting</b>	Meuble (vase, sable)	~ 170 à 180	1-15 kHz	71
<b>Tranchage</b>	Rocheux	~ 180	100 et 600 Hz	129
<b>Dragage</b>	Meuble (vase, sable, graviers)	De 150 à 190 selon le type de drague	20-500 Hz	29, 95, 118, 156, 158, 161
<b>Forage dirigé</b>	Rocheux	120-130 dB	< 1 kHz	158, 194

## VIII. Trafic maritime (navires marchands et transport de passagers)

Le trafic maritime global contribue de façon permanente au bruit ambiant en champ lointain. Chaque navire contribue également de façon ponctuelle au bruit ambiant en champ proche. Il s'agit de deux approches bien distinctes que nous traiterons séparément.

### 1) Contribution au bruit ambiant en champ lointain

Le trafic maritime contribue de façon significative au bruit ambiant sous-marin. À basse fréquence (5-500 Hz), la navigation motorisée est la principale source de bruit anthropique dans les océans [4].

De nombreuses études font état d'une corrélation entre l'augmentation du bruit ambiant sous-marin dans certaines régions (jusqu'à + 3 dB par décade, ce qui correspond à un doublement de l'intensité sonore tous les 10 ans) et l'augmentation du nombre de navires commerciaux dans ces régions [8, 116, 169].

Entre 1965 et 2003 la taille moyenne des navires marchands a été multipliée par 2, et leur tonnage brut par 4. À l'échelle mondiale, plus de 100 000 navires de commerce naviguent en permanence<sup>15</sup>, dont plus de 10 % de navires de gros tonnage (super-tankers, porte-conteneurs, etc.), considérés comme les plus bruyants. À l'heure actuelle, le nombre de navires marchands, leur taille et leur puissance (et donc leur vitesse) est en augmentation [111, 117].

Il est difficile de quantifier la contribution du trafic maritime au bruit ambiant sous-marin global car il s'agit d'une contribution à

grande échelle, avec une forte variabilité spatiale. Il est nécessaire de réaliser des suivis sur le long terme pour comprendre l'impact du bruit généré par le trafic maritime sur l'environnement et la faune marine. Ce paramètre est suivi dans le cadre de la DCSMM par l'indicateur D11a.2 (Son continu basse fréquence).

### 2) Signatures individuelles de navire en champ proche

Le bruit généré par les navires commerciaux dépend de nombreux paramètres, dont les principaux sont la taille et la vitesse de navigation<sup>16</sup>. Chaque navire possède une signature acoustique qui lui est propre, et qui va évoluer en fonction de sa vitesse. Cette signature est une combinaison de bruits large bande et de tonalités marquées (pics d'énergie à des fréquences spécifiques).

Le bruit généré par les navires motorisés est principalement dû au système de propulsion du navire (moteur + hélice). Une part importante de ce bruit provient des phénomènes de cavitations autour de l'hélice. Il s'agit généralement de la source dominante de bruit. La cavitation produit un bruit large bande qui influence la signature sur l'ensemble des fréquences (jusqu'à 100 kHz). Les autres composants de l'appareil propulsif (moteur, réducteur, etc.) génèrent également du bruit transmis au milieu marin à travers la coque. D'autres sources, comme les auxiliaires (pompes, générateurs, etc.) contribuent également à

<sup>15</sup> Sans compter plus de 2 millions de navires de pêche.

<sup>16</sup> D'autres facteurs comme le mode de propulsion et de motorisation et l'âge et la potentielle dégradation des machines tournantes influent également de façon non négligeable sur le bruit généré.

la signature acoustique. Ces deux dernières sources peuvent conduire à la formation de tonalités marquées qui caractérisent la signature acoustique des navires [158].

La taille du navire a un impact significatif sur le bruit généré. Les navires de taille moyenne (de 50 à 100 m) sont généralement dotés de propulsion diesel à 2 hélices. Ils sont également souvent équipés de propulseurs d'étrave qui influent ponctuellement sur la signature acoustique (lors des manœuvres portuaires). **Ces navires de taille moyenne représentent une source de bruit continu avec des niveaux de l'ordre de 165-180 dB re 1  $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 1 m, avec un maximum d'énergie émis en basse fréquence (< 1 kHz) et des tonalités marquées jusqu'à 50 Hz** [142, 158].

Les navires de grande taille (> 100 m : supertankers, porte-conteneurs, navires de croisière, etc.) possèdent des moteurs plus

puissants et de plus grosses hélices ayant une vitesse de rotation moins élevée. Ceci génère des niveaux de bruit plus élevés avec un maximum d'énergie en basse voire très basse fréquence (< 500 Hz). De par leur taille, ils possèdent également une surface d'échange plus importante qui contribue à transmettre, *via* la coque, les bruits de machine au milieu marin. **Ces navires de grande taille représentent une source de bruit continu avec des niveaux de l'ordre de 180-190 dB re 1  $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 1 m, avec un maximum d'énergie en très basse fréquence, inférieure à 500 Hz.** Par exemple, un supertanker de 340 m de long représente une source de bruit large bande de niveau de 190 dB re 1  $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 1 m, avec un maximum d'énergie entre 40 et 70 Hz et des tonalités marquées dont le fondamental de 6,8 Hz est audible à près de 500 km [117, 142, 158].

## IX. Activités récréatives

À l'instar des navires marchands, les bateaux de plaisance motorisés présentent une signature acoustique caractéristique qui varie fortement en fonction de plusieurs paramètres, dont les principaux sont la taille et la vitesse. Généralement, les bateaux équipés de moteurs hors-bords sont également plus bruyants [142].

Comme pour les navires marchands, le bruit généré par les navires de plaisance est principalement lié à l'appareil propulsif et aux phénomènes de cavitation autour de l'hélice. Les navires de plaisance sont principalement des navires de petite taille, équipés de petites hélices ayant une importante vitesse de rotation. Ceci conduit à produire un bruit de niveau plus faible et plus aigu (énergie décalée vers les hautes fréquences) que les navires décrits dans le paragraphe précédent.

**D'une manière générale les bateaux de plaisance constituent une source sonore continue dont les niveaux sont de l'ordre de 150-175 dB re 1  $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 1 m, avec un maximum d'énergie entre 100 et 1 000 Hz.** Quelques exemples de niveau de bruit généré par des bateaux de plaisance sont présentés dans le tableau 6 ci-dessous.

Le bruit sous-marin émis par les motomarines (jet-skis et scooters des mers) provient principalement des bulles générées par le système de propulsion par hydrojet et à la rotation des pales de la turbine. Il s'agit d'un bruit continu large bande, dont la fréquence et le niveau varie fortement en fonction de la vitesse. Les études font état **d'émissions comprises entre 100 Hz et 10 kHz et de niveaux compris entre 120 et 190 dB re 1  $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 1 m** [58, 119], avec d'importantes variations car les motomarines changent régulièrement d'allure et de direction.

Tableau 6 : Exemple de niveaux de bruit générés par des embarcations motorisées à usage récréatif.

Type d'engin	Taille	Motorisation	Vitesse	Niveau $L_{p,rms}$ (en dB re 1 $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 m)	Fréquences de max. d'énergie	Réf. bibliographique
<b>Zodiac</b>	5 m	25 CV	-	152	100 et 1 000 Hz	158
<b>Zodiac</b>	-	2 x 175 CV	30 nd	169	100 et 1 000 Hz	57
<b>Zodiac</b>	-	2 x 175 CV	5 nd	147	100 et 1 000 Hz	57
<b>Hors-bord</b>	7 m	2 x 80 CV	-	156	100 et 1 000 Hz	158
<b>Jet-ski</b>	-	1 235 cm <sup>3</sup>	35 nd	185	< 2 000 Hz	119

## X. Activités scientifiques/Recherche

Les activités scientifiques en mer utilisent l'acoustique active pour réaliser des levés bathymétriques, cartographier les fonds marins, caractériser la nature des sédiments, étudier les paramètres physiques des masses d'eau et évaluer la ressource halieutique. L'utilisation d'engins sous-marins motorisés (ROV, AUV et drones sous-marins) pour l'exploration des fonds génère également du bruit. Enfin, les navires océanographiques sont également par eux-mêmes une source de bruit.

L'utilisation des sondeurs, sonars et de la sismique pour l'étude des fonds marins est détaillée dans les sections précédentes (partie 1 - I - Industrie du pétrole et du gaz et 1 - III - Activités halieutiques). Le tableau 7 présente quelques caractéristiques de sondeurs, sonars et systèmes sismiques utilisées par la flotte océanographique de l'IFREMER. Les propriétés de la propagation des sons dans l'eau de mer ont été exploitées par les scientifiques afin d'évaluer les paramètres physiques des masses d'eau. L'étude du temps de propagation des ondes acoustiques permet en effet de repérer les anomalies locales de

températures et salinité ou un courant. La tomographie utilise ainsi l'émission de sons basse fréquence, entre 20 et 200 Hz, pour étudier la propagation des ondes sonores et évaluer la salinité et la température des masses d'eau à mésoéchelle (plusieurs dizaines de kilomètres). Les émissions sonores ( $L_s$ ) sont élevées, de l'ordre de 165 à 220 dB re 1  $\mu$ Pa @ 1 m. Cette technologie est toutefois très peu utilisée de nos jours.

Les ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) utilisent l'effet Doppler pour évaluer la vitesse de déplacement des particules en suspension, et donc la vitesse des courants. Une impulsion sonore est émise avec une fréquence  $f_1$  ; en rencontrant une particule en mouvement, sa fréquence est modifiée, l'onde réfléchie arrivera donc au récepteur avec une fréquence  $f_2$ . La différence entre  $f_1$  et  $f_2$  permet de calculer la vitesse de déplacement de la particule et donc la vitesse du courant. Les ADCP génèrent des signaux impulsions haute fréquence. Les ADCP équipant les navires de l'IFREMER par exemple émettent à 38, 75, 150 et 300 kHz. Les niveaux d'émission des ADCP sont compris entre 220 et 225 dB re 1  $\mu$ Pa @ 1 m (mesures IFREMER).

Tableau 7 : Caractéristiques de quelques-uns des sondeurs, sonars et systèmes sismiques utilisés par l'IFREMER pour la recherche océanographique (source : Y. Le Gall, communication personnelle, 2019).

Source		Fréquence de max. d'énergie (Hz)	Niveau $L_S$ (dB re 1 $\mu$ Pa @ 1 m)	Durées d'impulsion (ms)	Cadence (s)	Directivité
Sismique	Sismique réflexion 2 570 in <sup>3</sup> (14 canons à air)	45	251 ( $L_S$ peak)	20	20	-
	Sismique réfraction 4 990 in <sup>3</sup> (16 canons à air)	27	254,5 ( $L_S$ peak)	20	60	-
	Sismique rapide 300 in <sup>3</sup> (2 canons à air)	40	236 ( $L_S$ peak)	20	12	-
	Sismique haute résolution (1 canon à air)	100	224 ( $L_S$ peak)	4	6	-
Sondeur	Sondeurs de sédiments	1 500-6 500	209-212	50	1	45-20°
	Sondeur multifaisceaux	13 000	237	2 à 20	1 à 20	2° x 150°
	Sondeur multifaisceaux	95 000	226	0,2 à 2	0,1 à 1	3° x 150°
	Sondeur monofaisceau	12 000	223	1-16		16°
	Sondeur monofaisceau	200 000	228	0,06-1	> 0,05	7°
Sonar	Sonar panoramique de pêche	24 000	223	100	> 0,5	12° x 360°
	Sonar à balayage latéral	100 000 400 000	220	0,1 à 1	0,1 1	2° x 170° 1° x 170°

## **XI. Synthèse**

Le tableau 8 ci-après synthétise, pour les niveaux de bruit généré et les fréquences chaque activité présentée précédemment, d'émission.

Tableau 8 : Synthèse des niveaux à la source et des fréquences associées des principales sources de bruit anthropique.

Type de signal	Source	Niveau d'émission <sup>19</sup> (dB re 1 µPa @ 1 m)	Bande de fréquence	Fréquences de maximum d'énergie	Durée	Directivité	Description (Partie 1)	Fiche synthèse (Partie 4)
Impulsionnel	Déroctage par explosif/minage	250-300	2 Hz-1 kHz	< 50 Hz	Qq ms à 100 s	Omnidir.	p. 67 - 68	p. 159
	Sismique (canon à air)	225-260	5 Hz-15 kHz	10-300 Hz (max<100 Hz)	10-100 ms	Faible (verticale)	p. 51 - 52	p. 153 et 155
	Sismique (boomer et sparker)	200-230	500 Hz-12 kHz	Variable	< 1 ms	Faible	p. 52	-
	Battage de pieux	200-250	10 Hz-20 kHz	100-1 000 Hz	Qq ms	Omnidir.	p. 56 à 58	p. 157
	Sondeurs monofaisceaux	210-240	1-500 kHz	Variable	< 2 ms	Oui, verticale	p. 49 à 51	p. 147
	Sondeurs multifaisceaux	210-240	10-500 kHz	Variable	Qq ms	Oui, verticale	p. 49 - 51	p.149
	ADCP	220-225	38-300 kHz	Variable	Qq ms	20°	p. 74	-
	Sonars civils	200-240	> 10 kHz	Variable	< 1 s	Variable	p. 49 - 51	-
	Pingers	130-200	5-160 kHz	Variable	< 2 s	Variable	p. 63 - 64	p. 161
Type de signal	Source	Niveau de bruit spectral <sup>19</sup> (dB re 1 µPa/√Hz @ 1 m)	Bande de fréquence	Fréquences de maximum d'énergie	Durée	Directivité	Description (Partie 1)	Fiche synthèse (Partie 4)
Continu	Supertanker	~ 190	1-10 kHz	40-70 Hz	-	Omnidir.	p. 71 - 72	p. 177
	Dragage	150-190	30 Hz-20 kHz	100-500 Hz	-	Omnidir.	p. 64 à 66	p. 171
	Forage	120-190	10 Hz-10 kHz	10-1 000 Hz	-	Omnidir.	p. 53 - 54	p. 163
	Navire de pêche (12 m de long, à 7 nd)	~ 150	10 Hz-20 kHz	100-2 000 Hz	-	Omnidir.	p. 62	p. 173
	Petit hors-bord (7 m de long)	~ 156	10 Hz-20 kHz	100-1 000 Hz	-	Omnidir.	p. 73	p. 181

<sup>19</sup> Niveaux ramenés à 1 m par calcul, et non mesuré à 1 m.



# Partie 2

## Impact des activités génératrices de bruit sur la faune marine

### I. L'audition des espèces marines

#### La mesure des capacités auditives chez les animaux marins

Les informations relatives aux capacités auditives des animaux marins sont relativement peu nombreuses, et celles-ci ne sont pas toujours robustes. Tester l'audition d'un animal en conditions expérimentales génère un stress qui peut affecter les résultats. La mesure du son dans un milieu confiné (cuve, aquarium) peut également s'avérer problématique. Le faible nombre d'individus testés (souvent un ou deux) pose également question du fait de la variabilité interindividuelle.

Les valeurs citées ici (niveaux et fréquences d'audition) sont donc à considérer avec précaution et n'ont pour objectif que de donner une idée des capacités relatives d'un groupe d'espèces à percevoir les sons sous-marins.

#### 1) Les mammifères marins

Les mammifères marins, et notamment les cétacés, sont particulièrement dépendants de l'acoustique puisqu'ils utilisent le son dans tous les aspects de leur vie : lors de la reproduction, pour chasser, s'alimenter, éviter les prédateurs, communiquer ou s'orienter. En milieu marin, la visibilité n'est que de quelques dizaines de mètres au maximum alors que le son peut se propager sur des centaines voire milliers de kilomètres [184]. Chez les cétacés, l'émission et la réception de signaux sonores permet de caractériser l'environnement et de communiquer sur plusieurs dizaines, voire centaines de kilomètres [178].

Deux types de systèmes auditifs existent chez les mammifères marins : un système

auditif exclusivement aquatique pour les espèces inféodées au milieu marin (cétacés, siréniens) et un système auditif amphibie pour celles qui vivent partiellement à terre (pinnipèdes).

À l'exception de certains pinnipèdes, les mammifères marins sont dépourvus d'oreille externe. Le système auditif est donc constitué d'une oreille moyenne contenant le tympan et les osselets et qui dirige le son vers l'oreille interne, comprenant la cochlée et la membrane basilaire. Les tissus graisseux, notamment ceux de la mâchoire inférieure, jouent un rôle dans l'audition en assurant la transmission des sons vers l'oreille moyenne [123].

Dans l'eau, les mammifères marins perçoivent les sons compris entre 10 Hz et

200 kHz, avec des seuils de sensibilité minimum avoisinant les 50 dB re 1  $\mu$ Pa pour les espèces les plus sensibles. En fonction de leurs capacités auditives, il est possible de distinguer six groupes [136, 168] :

- **les Cétacés basse fréquence** : ce groupe inclut l'ensemble des mysticètes (baleines à fanons). Il est sujet à caution car les espèces de ce groupe n'ont jamais fait l'objet d'évaluation directe de leur capacité auditive. Cependant, l'étude de leurs vocalises, de leurs réactions comportementales aux stimuli sonores et de leurs appareils auditifs tendent à montrer que les cétacés basse fréquence seraient capables de percevoir des sons de 10 Hz à 30 kHz, avec une sensibilité maximale entre 1 et 8 kHz. Dans cette plage de fréquence, leur seuil d'audition est estimé à environ 60 dB re 1  $\mu$ Pa ;
- **les Cétacés haute fréquence** : ce groupe contient la plupart des Delphinidés (dauphins, orques et globicéphales), les baleines à bec (Ziphiidés), le béluga et le narval (Monodontidés) et le cachalot. Des évaluations directes de la capacité auditive (mesures comportementales ou neurophysiologiques) ont été réalisées sur environ 1/3 des espèces de ce groupe. Celles-ci sont capables de percevoir les sons entre 100 Hz et 180 kHz, avec une sensibilité maximale entre 10 et 100 kHz. Dans cette plage de fréquence leur seuil d'audition est inférieur à 60 dB re 1  $\mu$ Pa ;
- **les Cétacés très haute fréquence** : ce groupe inclut les marsouins, quelques petits Delphinidés, la plupart des dauphins d'eau douce et les cachalots nain et pygmée (Kogiidés). Chez les espèces de ce groupe, la gamme de fréquences audibles est équivalente à celle des cétacés haute fréquence, mais la sensibilité maximale se situe autour de 100 kHz, avec des seuils d'audition inférieurs à

50 dB re 1  $\mu$ Pa. Chez ces espèces, les signaux émis (et notamment les clics d'écholocation) sont également plus hauts en fréquence que chez les autres cétacés ;

- **les Siréniens** : ce groupe contient les lamantins (Trichechidés) et le dugong (Dugong dugon). Leurs capacités auditives sont proches de celles des cétacés haute fréquence, mais leurs différences anatomiques et les particularités de leurs émissions sonores les distinguent. Des mesures réalisées sur des lamantins montrent qu'ils sont capables de percevoir des sons entre 250 Hz et 60 kHz, avec une sensibilité maximale entre 10 et 20 kHz et des seuils d'audition de 60 dB re 1  $\mu$ Pa en moyenne à ces fréquences ;
- **les Phocidés** : ce groupe comprend les phoques et les éléphants de mer. Leur appareil auditif est amphibie, puisqu'ils peuvent entendre dans l'air comme dans l'eau. Ici, seules les capacités auditives des phocidés dans l'eau seront abordées. Dans l'eau, les phocidés sont capables de percevoir les sons entre 100 Hz et 100 kHz, avec une sensibilité maximale entre 2 et 30 kHz. À ces fréquences le seuil d'audition est inférieur à 60 dB re 1  $\mu$ Pa ;
- **les autres Carnivores** : ce groupe inclut les autres pinnipèdes (qui ne sont pas des phocidés : otaries, lions de mer et morse), les loutres et l'ours polaire (*Ursus maritimus*). Ici, seules les capacités auditives des autres Carnivores dans l'eau seront abordées. Les espèces de ce groupe diffèrent des phocidés de par l'anatomie de leur appareil auditif (présence d'une oreille externe notamment, sauf chez le morse) et leur sensibilité auditive. En effet, si les plages d'audition (100 Hz-60 kHz) et de sensibilité maximale (2-30 kHz) sont proches, le seuil d'audition de ces espèces est plus élevé, avec un minimum de 70 dB re 1  $\mu$ Pa en moyenne.

La figure 22 présente, pour chacun de ces groupes, un audiogramme médian (représentation du niveau de bruit perceptible en fonction de la fréquence).

À partir de ces audiogrammes, des seuils de bruit à partir desquels les mammifères marins sont susceptibles de subir des pertes d'audition ont été calculés. Ces seuils sont présentés dans le tableau 9 et le tableau 10.

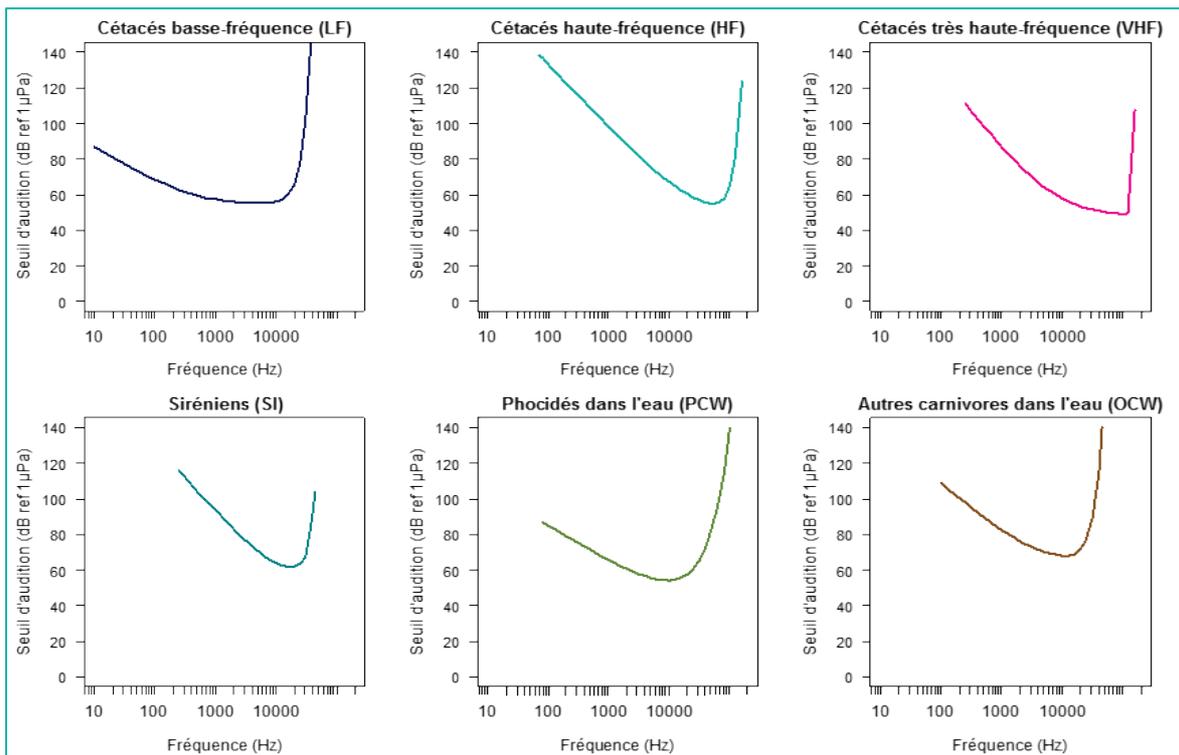


Figure 22 : Audiogrammes médians pour les Cétacés basse fréquence, les Cétacés haute fréquence, les Cétacés très haute fréquence, les Siréniens, les Pinnipèdes dans l'eau et les autres Carnivores dans l'eau (d'après [136] et [168]).

## L'audition des mammifères marins, en bref

- Chez les mammifères marins, l'utilisation du son est primordiale pour assurer certaines fonctions vitales (reproduction, alimentation, orientation, etc.).
- L'audition est conditionnée par la morphologie du système auditif dont l'étude, couplée à celle de la perception des sons sous-marins, a permis d'établir 6 groupes distincts : les Cétacés basse fréquence, les Cétacés haute fréquence, les Cétacés très haute fréquence, les Siréniens, les Phocidés et les autres Carnivores.
- Chaque groupe se caractérise par des capacités auditives sensiblement différentes, avec une plage d'audition (en Hz) et un seuil minimum d'audition (en dB re 1 $\mu$ Pa) caractéristique. Des audiogrammes ont été définis pour chacun de ces 6 groupes.
- D'une manière générale, les mammifères marins perçoivent les sons sous-marins compris entre 10 Hz et 200 kHz, avec des seuils de sensibilité minimum proches de 60 dB re 1  $\mu$ Pa en moyenne (mais cette valeur varie d'un groupe à l'autre).

## 2) Les tortues marines

Les tortues marines possèdent un système auditif développé, comprenant une oreille moyenne (avec un tympan) et une oreille interne [180]. L'oreille moyenne conduit le son *via* la columelle (petit os équivalent à l'étrier chez les mammifères), tandis que l'oreille interne le réceptionne et détecte la position et l'accélération [195].

Même si son fonctionnement est encore mal connu, les études suggèrent que l'appareil auditif des tortues marines est adapté à la détection des sons aériens et sous-marins. Le tympan est renforcé par une épaisse couche de graisse, ce qui est propre aux reptiles aquatiques. Les tortues marines sont capables de capter les stimuli acoustiques, mais également les vibrations *via* le squelette (os de la tête et colonne vertébrale notamment) et la carapace de

l'animal qui joueraient le rôle de récepteurs des ondes sonores à terre comme en mer [45, 180]. Cependant, ce processus de perception des vibrations n'est pas encore très bien connu. La présence d'une oreille moyenne (cavité remplie d'air) suggère que les tortues marines sont également capables de percevoir les variations de pression.

Les tortues marines seraient capables de percevoir des sons sous-marins basse fréquence, entre 30 et 2 000 Hz, avec une sensibilité maximale située entre 200 et 600 Hz (figure 23), cette sensibilité maximale étant toutefois variable d'une espèce à l'autre, et d'un individu à l'autre, notamment en fonction de son âge [98, 134, 152]. L'appareil auditif des tortues marines est également impliqué dans les déplacements et l'équilibre.

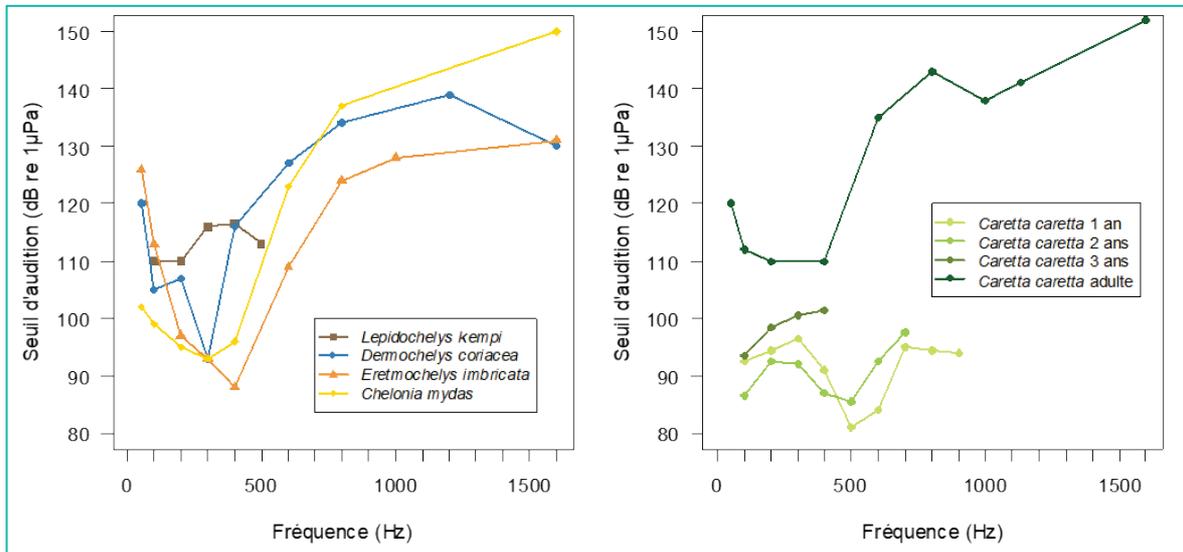


Figure 23 : À gauche, audiogrammes de quatre espèces de tortues marines : la tortue de Kemp *Lepidochelys kempii*, la tortue luth *Dermochelys coriacea*, la tortue imbriquée *Eretmochelys imbricata* et la tortue verte, ou tortue franche, *Chelonia mydas*. À droite, audiogramme de la tortue caouanne (*Caretta caretta*) à différents stades du cycle de vie (d'après [98] et [44]).

### L'audition des tortues marines, en bref

- Les tortues marines possèdent un système auditif développé, typique des reptiles aquatiques, leur permettant de percevoir les sons sous-marins et aériens. Leur squelette et leur carapace leur permettraient également de percevoir les vibrations.
- Bien que la plage d'audition soit équivalente chez les différentes espèces de tortues marines (30 à 2 000 Hz), leur sensibilité maximale varie d'une espèce à l'autre, voire même d'un individu à l'autre en fonction de son âge.

### 3) Les poissons

Ici, le terme « poissons » fait référence à l'ensemble des espèces de poissons osseux (Ostéichthyens), de poissons cartilagineux (Chondrichthyens) et d'Agnathes. Bien que ce terme n'ait plus de sens aujourd'hui d'un point de vue taxinomique, il est utilisé ici pour faciliter la lecture.

Tous les poissons sont *a priori* capables de percevoir les sons. Cependant, la détection des ondes sonores chez les poissons diffère d'une espèce à l'autre. La détection se fait *via* différents « récepteurs » [76, 152] :

#### Les organes otolithiques

- Au niveau de l'oreille interne, les **poissons osseux** (par opposition aux poissons cartilagineux comme les raies et les requins) possèdent trois cavités tapissées de cellules sensorielles, remplies d'un fluide et dans lesquelles se trouve une petite pièce calcaire appelée otolithe (figure 24). Chaque individu possède donc trois otolithes de chaque côté soit six otolithes au total. Lors d'un mouvement, l'inertie de cette pièce calcaire, très dense par rapport au fluide

qui l'entoure, est perçue par les cellules sensorielles qui transmettent l'information au cerveau sous la forme d'impulsions électriques, *via* les nerfs. Les organes otolithiques détectent donc les mouvements de particules induits par une onde sonore, à la manière d'un accéléromètre.

- Chez les **poissons cartilagineux** et chez les **lamproies**, les otolithes sont remplacés par des cristaux calcaires, appelés otoconies. Les poissons cartilagineux possèdent également un quatrième récepteur au niveau de l'oreille interne, la *macula neglecta*, qui ne contient pas de pièces calcaires mais seulement des cellules sensorielles. Ce récepteur jouerait également un rôle dans la perception du son.

#### La ligne latérale

Chez les poissons osseux et cartilagineux, la ligne latérale est composée de centaines de cellules sensorielles (neuromastes) réparties sur toute la longueur du corps. Ces cellules sont sensibles aux mouvements de particules et vont donc pouvoir percevoir les

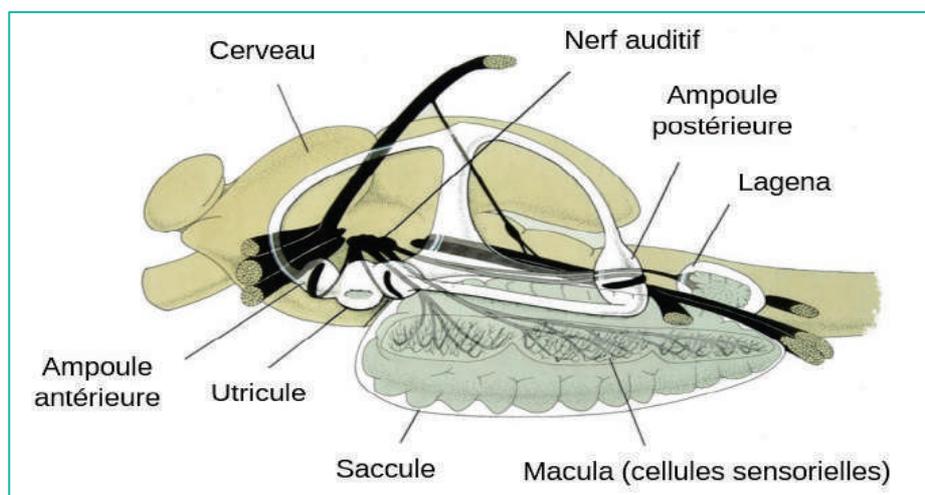


Figure 24 : Schéma de l'oreille interne gauche et des organes otolithiques d'un poisson osseux, avec ces trois otolithes : saccule, utricule et lagena (d'après [76]).

ondes sonores. Cependant, les récepteurs sensoriels de la ligne latérale ne détectent que les mouvements en champ proche et ne fonctionnent qu'à proximité de la source sonore.

### La vessie natatoire et les autres cavités gazeuses

Certains poissons osseux possèdent un organe rempli de gaz appelé vessie natatoire. Cet organe joue un rôle dans le contrôle de la flottabilité des poissons. Il est de fait sensible aux variations de pression. Au contact d'une onde sonore, le volume du gaz contenu dans la vessie natatoire va varier, entraînant un mouvement de particules qui pourra être transmis aux organes otolithiques. La proximité entre la vessie natatoire, lorsqu'elle est présente, et l'oreille interne a donc une forte influence sur la capacité à percevoir les sons. Chez certaines espèces la vessie natatoire est reliée à l'oreille interne *via* des connexions osseuses ou *via* d'autres cavités gazeuses (bulles d'air situées derrière l'oreille interne). Pour l'ensemble de ces espèces, les capacités auditives sont d'autant plus importantes : la plage de fréquences audibles est plus étendue et/ou le seuil de perception est plus bas.

Ainsi, si tous les poissons ont la capacité de percevoir les sons, les capacités auditives varient grandement d'une espèce à l'autre, en fonction des particularités physiologiques de chaque espèce (sensibilité de la ligne latérale, présence ou non d'une vessie natatoire, proximité de celle-ci et connexion avec l'oreille interne, etc.). D'une façon générale, on considère trois catégories de poissons :

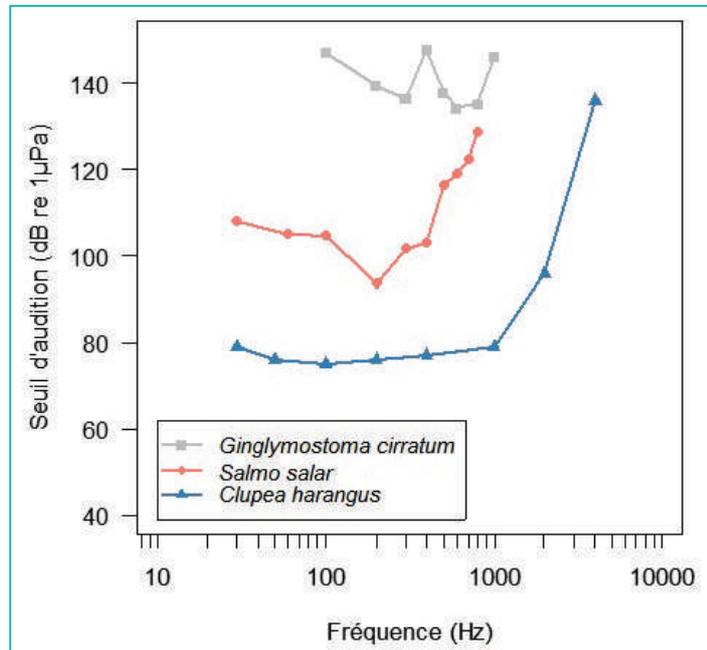


Figure 25 : Audiogrammes du requin nourrice *Ginglymostoma cirratum*, du saumon atlantique *Salmo salar* et du hareng de l'Atlantique *Clupea harengus* (d'après [26], [55] et [72]).

- les poissons dépourvus de cavité gazeuse. Ces poissons détectent uniquement la composante « mouvement de particules » de l'onde sonore, et pas la composante « variation de pression ». Il s'agit par exemple des poissons cartilagineux et des poissons plats ;
- les poissons possédant une vessie natatoire non connectée à l'oreille interne. Ces poissons sont capables de percevoir les variations de pression mais leur perception du son repose uniquement sur la détection des mouvements de particules. Ces poissons sont susceptibles de subir néanmoins des barotraumatismes s'ils sont exposés à des sons de forte intensité. Le saumon atlantique (*Salmo salar*) appartient par exemple à cette catégorie ;
- les poissons possédant une vessie natatoire connectée, *via* des connexions osseuses ou des cavités gazeuses, à

l'oreille interne. Chez ces poissons les capacités auditives sont davantage liées à la perception des variations de pression, même s'ils sont également capables de détecter les mouvements de particules. Ils risquent également des barotraumatismes en cas d'exposition à des sons de forte intensité. Cette catégorie comprend par exemple la morue de l'Atlantique (*Gadus morhua*), certains Clupéidés (hareng, sprat, aloses, etc.) ou les carpes.

La figure 25 ci-après présente les audiogrammes de quelques espèces de poissons appartenant à ces trois catégories : le requin nourrice *Ginglymos-*

*toma cirratum* qui ne possède pas de vessie natatoire, le saumon atlantique *Salmo salar* dont la vessie natatoire n'est pas connectée à l'oreille interne, et le hareng *Clupea harengus* dont la vessie natatoire est reliée à l'oreille interne par un canal.

D'une manière générale, il est admis que la grande majorité des poissons perçoit les sons entre 50 et 300 Hz à des niveaux inférieurs à 100 dB re 1  $\mu$ Pa. Chez les poissons possédant une vessie natatoire connectée à l'oreille interne la perception des sons s'étend jusqu'à plusieurs milliers de Hz [76, 152].

### L'audition des poissons, en bref

- Tous les poissons (poissons osseux, cartilagineux et Agnathes) sont capables de percevoir la composante « mouvement de particules » du son sous-marin, grâce à leurs otolithes et leur ligne latérale.
- Les capacités auditives des poissons sont toutefois très variables d'une espèce à l'autre, en fonction de leur physiologie. Certaines espèces possèdent une vessie natatoire capable de capter également la composante « variation de pression » des ondes acoustiques. Lorsque la vessie natatoire est connectée à l'oreille interne (otolithes), l'espèce présente de meilleures capacités auditives (seuil d'audition plus faible et/ou plage d'audition plus étendue).
- Les espèces possédant une vessie natatoire peuvent également subir des barotraumatismes en cas d'exposition à des sons de forte intensité.
- D'une manière générale, la plupart des poissons sont capables de percevoir des sons inférieurs à 100 dB re 1  $\mu$ Pa entre 50 et 300 Hz. Pour certaines espèces (Clupéidés, Cyprinidés) cette perception s'étend à plusieurs milliers de Hz.

#### 4) Les crustacés et mollusques

Il est communément admis que les crustacés, sont capables d'émettre activement des sons (ex. : [52]). Cependant, il existe très peu d'informations quant à leur capacité à percevoir et à réagir aux émissions sonores. Comme les poissons cartilagineux, les crustacés et les mollusques sont dépourvus de cavités gazeuses et sont donc incapables de détecter la composante « variation de pression » des ondes sonores. Toutefois, certains d'entre eux sont pourvus, comme les poissons, d'organes et cellules sensorielles qui leur permettent de détecter les mouvements des particules. Ils possèdent en effet des statocystes, un ensemble de cellules ciliées sur lesquelles reposent une ou plusieurs pièces minérales (statolithes) agissant, à l'instar de l'otolithe chez les poissons osseux, comme un accéléromètre. Les statocystes chez les mollusques céphalopodes (seiches, calmars et poulpes) sont d'ailleurs très semblables aux organes otolithiques des poissons osseux.

Chez les céphalopodes, des études ont démontré la capacité à détecter les émissions sonores basse fréquence (50 à 1 500 Hz) grâce à leurs statocystes [82, 97, 121, 122]. Les seuils sont relativement élevés, de l'ordre de 125-130 dB re 1  $\mu$ Pa pour la plage de meilleure sensibilité (autour de 600 Hz). Ces mollusques sont également

capables de ressentir les mouvements de particules en champ proche à l'aide de récepteurs sensoriels épidermiques, comparables aux lignes latérales chez les poissons. La sensibilité acoustique des céphalopodes serait liée principalement aux interactions proies-prédateurs (mécanisme de défense), mais pourrait également avoir un lien avec les mouvements migratoires. À l'instar de certains poissons, les céphalopodes pourraient en effet utiliser les infrasons pour se repérer dans l'espace [97].

Chez les crustacés, la présence de statocystes permet également de percevoir les sons. Les crustacés possèdent également des cellules sensorielles au niveau des antennes et des pattes qui seraient capables de détecter les mouvements de particules. Les crustacés utiliseraient l'acoustique principalement comme indicateur de la présence de prédateurs. Les sons basse fréquence seraient également utilisés par certains stades larvaires comme indicateur pour s'orienter (bruit du ressac en zone côtière notamment [86]). Des études réalisées sur certains crustacés montrent que ceux-ci sont capables de percevoir les sons basse fréquence, de 50 à quelques centaines de Hertz [52]. Certaines crevettes seraient capables de percevoir les sons entre 100 et 3 000 Hz, avec une sensibilité maximale inférieure à 110 dB re 1  $\mu$ Pa entre 100 et 300 Hz [108].

### L'audition des crustacés et mollusques, en bref

- Les crustacés et mollusques ne sont pas sensibles aux variations de pression mais sont capables de percevoir les mouvements de particules grâce à des cellules sensorielles appelées statocystes, semblables aux otolithes chez les poissons osseux.
- Chez les crustacés, les statocystes sont complétés par d'autres cellules sensorielles disposées au niveau des pattes et des antennes.
- Les mollusques possèdent quant à eux des récepteurs sensoriels épidermiques comparables la ligne latérale des poissons.
- Ces deux groupes semblent être capables de détecter les émissions sonores situées dans les basses fréquences (< 3 000 Hz), mais à des niveaux relativement élevés (> 100 dB re 1  $\mu$ Pa).

### 5) Oiseaux plongeurs

Si la sensibilité auditive des oiseaux dans l'air est assez bien documentée, il existe très peu d'informations sur les capacités auditives sous-marines des oiseaux plongeurs. Pourtant, certains oiseaux comme le manchot empereur peuvent rester immergés plus de 30 minutes et plonger à plus de 500 m de profondeur [5].

Quelques études réalisées notamment sur le grand cormoran *Phalacrocorax carbo sinensis* tendent cependant à montrer que les oiseaux plongeurs sont capables de détecter les sons dans l'air comme dans l'eau. Sous l'eau, le son pourrait être utilisé pour localiser les proies, éviter les prédateurs et s'orienter [92]. Le grand

cormoran a d'ailleurs développé des adaptations du système auditif au milieu marin. Ces adaptations sont beaucoup moins importantes que celles observées chez les mammifères marins, mais se rapprochent de celles observées chez les reptiles (tortues, crocodiles).

Chez cette espèce, la gamme d'audition s'étendrait de 1,5 à 6 kHz, avec une sensibilité maximale à 2 kHz. À cette fréquence, le seuil d'audition serait inférieur à 80 dB re 1  $\mu$ Pa [5, 92]. Ces résultats étant toutefois issus d'études préliminaires réalisées sur un nombre très limité d'individus (un individu par espèce dans la plupart des cas), ils sont sujets à caution.

### **L'audition des oiseaux plongeurs, en bref**

- Le grand cormoran est le seul oiseau plongeur ayant fait l'objet d'étude quant à ses capacités à percevoir les sons sous l'eau.
- Pour cette espèce, une adaptation du système auditif, proche de celui des reptiles aquatiques, a été observée.
- Le grand cormoran serait capable de percevoir les sons sous-marins situés dans les moyennes et hautes fréquences (1,5 à 6 kHz), avec une sensibilité maximale autour de 2 kHz (seuil inférieur à 80 dB re 1  $\mu$ Pa), mais ces premiers résultats nécessitent d'être confirmés.

## II. Impacts des émissions sonores sur la faune marine

Les réactions des organismes marins face aux émissions sonores sont de différents types et dépendent de l'espèce concernée, de l'intensité du bruit et de la durée d'émission. On distingue plusieurs niveaux de dérangement (figure 26 [158]) :

- **tolérance** : les animaux perçoivent le bruit mais ne réagissent pas lors de l'émission sonore (zone d'audibilité) ;
- **changements comportementaux** : réactions d'évitement ou de fuite, interruption de l'activité en cours, modifications du profil de plongée et/ou du rythme respiratoire ;
- **masquage** : les émissions nécessaires aux individus pour leur communication ou leur perception de l'environnement sont masquées par les bruits d'origine anthropique ;
- **baisse du niveau d'audition** : la sensibilité auditive des animaux diminue. Cette baisse peut être temporaire (TTS : *Temporary Threshold Shift*) ou permanente (PTS : *Permanent Threshold Shift*) ;
- **lésions létales** : la puissance du bruit émis provoque des lésions souvent mortelles pour les animaux. Elles concernent surtout les organes de l'audition, mais peuvent également toucher d'autres organes (poumons, vessie natatoire, etc.).

Les impacts peuvent être divisés en deux catégories : les impacts à court terme et les impacts à long terme.

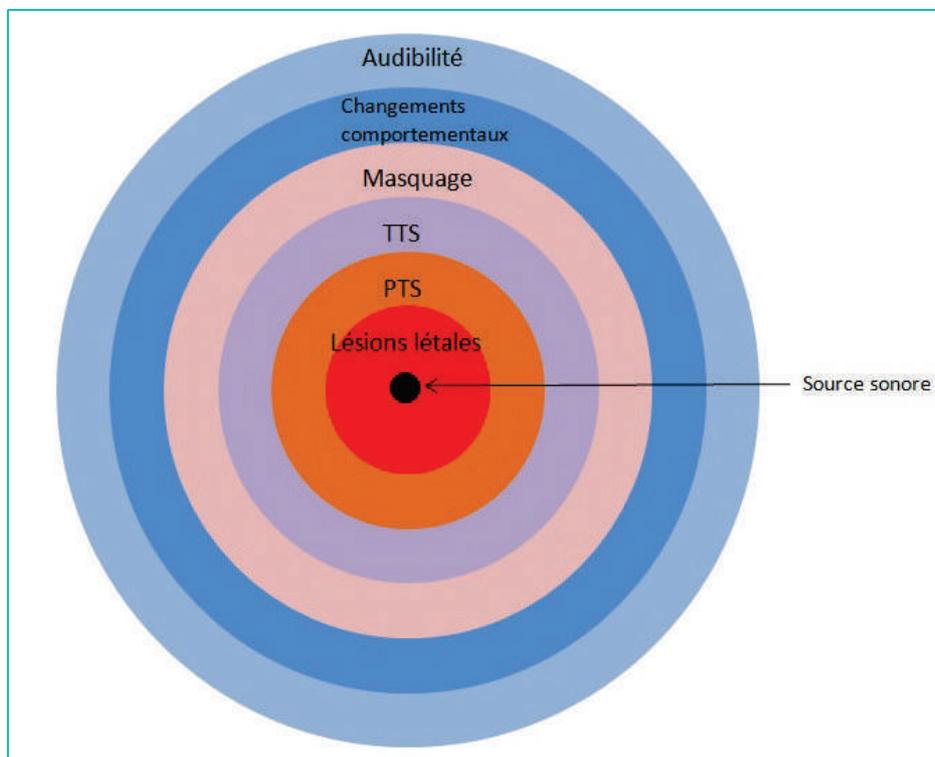


Figure 26 : Diagramme des impacts potentiels des émissions sonores selon leur degré de sévérité (d'après [158]).

## 1) Impacts à court terme

### a) Réactions comportementales, fuite, changements migratoires

Les réactions comportementales peuvent être définies comme le changement remarquable de l'activité en cours chez un animal en réponse à un son. Les exemples d'effets comportementaux incluent l'abandon d'une activité importante comme l'alimentation ou la fuite de la zone [141]. Ces réactions comportementales sont toutefois très difficiles à relier à une cause en particulier.

- Des exemples de changement de distribution ou d'abondance en réaction à des activités bruyantes ont été étudiés sur **les mammifères marins** lors de différents chantiers. Les chantiers éoliens d'Europe du Nord notamment ont fait l'objet de nombreux suivis. Lors des épisodes de battage de pieux, une diminution drastique de la présence de marsouins et de phoques à proximité des chantiers a été observée, mais une augmentation de l'abondance a été constatée à une distance de 20 à 50 km des parcs. Cela indique que les animaux ont fui les zones bruyantes mais sont néanmoins restés à proximité [19, 37, 75, 176].

Si les réactions de fuite peuvent s'observer assez facilement, les réactions comportementales de dérangement n'impliquant pas forcément une fuite des animaux sont plus difficiles à mettre en évidence [67]. Des études sur les baleines et les rorquals ont néanmoins démontré que leurs réactions au trafic maritime et aux prospections sismiques pouvaient se manifester par une modification des comportements de plongée et des activités d'alimentation [18].

Les différents groupes de cétacés

peuvent manifester des réactions différentes en réponse aux perturbations sonores : les petits cétacés, plus rapides, ont tendance à nager très vite loin de la source, tandis que les grands cétacés ont plutôt tendance à regagner la surface [141, 158, 172].

- **Chez les tortues**, les réactions comportementales liées aux perturbations sonores ont très peu été étudiées. Des études ont toutefois pu montrer que des tortues remontent en surface lorsqu'elles sont exposées aux basses fréquences, de même qu'elles augmentent leur vitesse de nage en réponse à des émissions de canons à air [134]. Une autre étude fait état de l'arrêt de l'activité et de plongées en réponse à des niveaux  $L_{p,pk}$  reçus de l'ordre de 191 dB re 1  $\mu$ Pa générés par des canons à air également [40].
- **Chez les poissons osseux**, des modifications comportementales en réaction au bruit ont également été observées, notamment suite à l'exposition à des émissions sismiques. Ces réactions se manifestent par des changements de position dans la colonne d'eau, une modification de la vitesse de nage ou des variations dans la structure des bancs de poissons [24].
- **Chez les crustacés et les mollusques**, des réactions comportementales ont pu être observées en corrélation avec des perturbations acoustiques (ex. : mouvements de valves chez les moules, des antennes chez le bernard-l'hermite). Ces réactions interviennent lorsque les vibrations induites sont de l'ordre de celles générées par le battage de pieux ou l'utilisation d'explosifs [159]. Chez les crustacés, de nombreux exemples de réactions comportementales ont été observés en réponse à des stimuli

acoustiques : arrêt de l'alimentation chez le homard et le crabe vert, enfouissement et déplacements limités chez la langoustine par exemple [52].

- Le comportement des **oiseaux marins** peut également être affecté par le bruit, mais peu d'études se sont à l'heure actuelle penchées sur la question. Des travaux ont montré un changement de zone d'alimentation chez les manchots du Cap lors d'une campagne sismique en Afrique du Sud, à une centaine de km de la colonie [149]. S'il est difficile de définir si l'effet a été direct ou indirect (fuite des proies ou des prédateurs ?), ces travaux constituent une première investigation des impacts potentiels des émissions sonores sur les oiseaux plongeurs.

Le déplacement des individus est le changement comportemental le plus largement observé en réponse au bruit [140]. Si ces effets semblent moins sévères que des mortalités directes par lésions, captures accidentelles ou collisions, ils concernent en réalité un nombre beaucoup plus important d'individus et une échelle spatio-temporelle plus étendue. Les effets indirects de ces déplacements (perte d'habitat, augmentation de la dépense énergétique, etc.) sont actuellement peu étudiés, et quasiment absents des mesures de mitigation existantes car non quantifiés [69].

### b) Masquage acoustique

Le masquage acoustique intervient lorsqu'un son extérieur couvre un signal bioacoustique ou le rend plus difficile à détecter. Le signal en question peut concerner la communication entre individus, l'orientation, la détection des proies ou des prédateurs (Nowacek *et al.*, 2007 ; Clark *et*

*al.*, 2009). Les sons basse fréquence (plus graves) se propagent sur des distances plus importantes. Les animaux, et notamment les baleines, les utilisent afin de communiquer entre eux, parfois sur de larges distances. Le masquage des émissions basse fréquence (par le trafic maritime par exemple) est *a priori* plus impactant que le masquage des émissions haute fréquence.

Le masquage est démontré chez les cétacés, mais il est très difficile de déterminer à partir de quel niveau ce masquage est susceptible de se produire. Les éléments démontrant le masquage sont des adaptations comportementales ou vocales.

Des études sur les baleines à bosse ont montré que ces dernières avaient tendance à privilégier les signaux de surface (sauts, frappes de nageoires) plutôt que les signaux vocaux pour communiquer lorsque le niveau sonore augmente [48]. D'autres espèces comme les baleines franches (*Eubalaena australis* et *E. glacialis*) modifient la gamme de fréquences de leurs vocalises : elles émettent des sons à des fréquences plus élevées et plus longtemps dans les zones où le bruit ambiant est plus élevé [145] ; certaines communautés d'orques (*Orcinus orca*) augmentent l'amplitude de leurs signaux de communication en présence de bruit de navire [81]. Il a également été démontré que la baleine bleue (*Balaenoptera musculus*) avait tendance à produire plus de vocalises en réponse au bruit généré lors de prospection sismique par sparkers<sup>18</sup> [41].

Ces modifications comportementales sont globalement connues sous le nom d'effet Lombard et ont pour objectif de maintenir un certain seuil de détectabilité des signaux de communication au sein des individus d'une population [48]. Mais la compréhension du

<sup>18</sup> Voir description des différentes méthodes de prospection sismique à la partie 1 - I - 1 - b - Prospection sismique

phénomène et surtout la prédictibilité des niveaux de masquage pour les différentes espèces reste émergente [61].

### c) Dommages physiologiques non létaux, permanents ou temporaires

Les dommages physiologiques non létaux peuvent intervenir à plusieurs niveaux :

- au niveau des organes/tissus liés à l'audition. Ces dommages peuvent se manifester par une perte d'audition temporaire ou permanente ;
- au niveau des organes/tissus non liés à l'audition. Les variations de pression engendrées par une onde sonore peuvent provoquer des lésions létales ou non au niveau de certains organes (reins, foie, gonades, etc.).
- Au niveau métabolique. La perturbation liée à l'exposition au bruit conduit à une augmentation des niveaux d'hormones de stress, du rythme respiratoire ou du rythme cardiaque. Ces différentes réponses physiologiques ont souvent pour conséquences des impacts à long terme (affaiblissement, ralentissement de la croissance, etc. - voir la partie 2 - II - 2 - Impacts à long terme).

Les pertes temporaires (TTS) ou permanentes (PTS) d'audition consistent en une altération de la capacité d'un animal à entendre, à une fréquence donnée ou sur sa gamme d'audition complète, suite à une exposition au bruit [141].

La fréquence à laquelle le bruit est émis influe sur son potentiel à générer un TTS ou un PTS, mais la nature du signal également : un bruit impulsionnel est ainsi plus propice à générer une perte d'audition qu'un bruit continu [64]. Les expositions multiples et/ou longues sont également plus à même d'impacter les animaux qu'une exposition unique de courte durée, mais il

existe encore peu de modèles d'exposition simples permettant de prédire de façon précise les effets potentiels de telles expositions. Après un TTS, le retour au seuil d'audition antérieur sera plus ou moins long, en fonction de l'intensité du son, de sa durée d'émission et de l'état physiologique de l'animal.

Dans le cadre de projets en mer, des estimations de périmètres TTS ou PTS sont ainsi régulièrement réalisées, reposant sur les seuils auditifs pondérés, les niveaux sonores générés et la propagation du bruit. Des modélisations sont ainsi effectuées en amont pour estimer la taille des zones d'impacts physiologiques (permanents ou temporaires) pour les espèces marines.

- **Chez les mammifères marins**, les seuils de perte temporaire d'audition ont fait l'objet de mesures directes sur des animaux captifs (chez les Delphinidés et le marsouin commun principalement) ; les estimations de seuils de perte permanente d'audition sont effectuées en dérivant les TTS ou en extrapolant des mesures. L'importance de la perte d'audition (augmentation du seuil de perception d'un son) et sa durée dépendent également de l'intensité du bruit perçu et de sa durée.

Au niveau métabolique, des études ont démontré qu'une exposition au bruit chez les cétacés avait une influence sur la sécrétion d'hormones (adrénaline, glucocorticoïdes) et sur les fonctions cardiovasculaires [162, 167].

- **Chez les tortues marines**, les seuils TTS et PTS sont encore mal connus. Une perte d'audition temporaire a été observée chez une tortue caouanne exposée à des tirs de canons à air à des niveaux d'exposition  $L_{E,p}$  supérieurs à 175 dB re  $1\mu Pa^2.s$  (Lenhardt, 2002). Cette observation n'est

toutefois pas suffisante pour extrapoler à l'ensemble des tortues marines, voire même à tous les individus de l'espèce *Caretta caretta*.

- **Chez les poissons**, les TTS sont dus à l'endommagement des cellules sensorielles ou des nerfs qui transmettent les signaux sensoriels. Des expériences ont montré que les émissions sismiques peuvent générer des dommages aux cils des cellules sensorielles de l'oreille interne de certaines espèces de poissons [24]. Cependant, les cellules se renouvellent régulièrement, et les cellules sensorielles endommagées pourront donc être remplacées, conduisant à un retour au niveau de sensibilité antérieur [152]. En fonction de l'intensité du bruit et de la durée d'exposition, plusieurs mois peuvent parfois être nécessaires pour qu'un individu se remette complètement d'un TTS [166]. Aucun cas de PTS n'est à l'heure actuelle documenté chez les poissons.

Les poissons osseux pourvus d'une vessie natatoire (ou autre cavité gazeuse) sont plus exposés aux risques de dommages physiologiques, d'une part car leur seuil d'audition est généralement plus bas (surtout si la vessie natatoire est reliée à l'oreille interne) et qu'ils sont de fait plus sujets aux TTS, et d'autre part car la présence de cavités gazeuses induit un risque de lésion des parois de cette cavité sous l'effet des variations de pression générées par une onde sonore (barotraumatisme). Cependant, les poissons dépourvus de cavités gazeuses sont également susceptibles, à un moindre niveau, de subir des dommages physiologiques, notamment au niveau des organes tels que le foie, la rate, les intestins et les gonades. Le manque

d'études rend toutefois difficile l'évaluation des effets physiologiques potentiels de l'exposition au bruit sur ces espèces.

- Des expériences en bassin ont également montré que l'exposition à des sources sismiques entraîne une sécrétion d'hormones de stress chez le saumon atlantique (*Salmo salar*) et le bar européen (*Dicentrarchus labrax*), ainsi qu'une augmentation de la fréquence respiratoire. En revanche, l'exposition à des sources de bruit continu n'a entraîné aucune modification de ce type [24]. D'autres espèces de poissons ont cependant montré une forte augmentation de leur taux de cortisol sanguin lorsqu'on les exposait à un bruit équivalent à celui du trafic maritime [186].
- **Chez les crustacés**, il n'a été fait état à l'heure actuelle d'aucune observation de TTS ou PTS, mais une étude témoigne de blessures à l'hépatopancréas et aux ovaires chez le crabe des neiges (*Chionoecetes opilio*) liées à la prospection sismique [52]. Cependant, une étude réalisée dans des conditions similaires sur la même espèce n'avait abouti à l'observation d'aucune blessure. Les crustacés semblent assez peu susceptibles de subir des dommages physiologiques liés aux ondes sonores, probablement parce qu'ils ne possèdent pas de cavité gazeuse et sont uniquement sensibles aux mouvements de particules. Cependant, ces organismes utilisant l'acoustique comme un indicateur de la présence de prédateurs, le bruit peut engendrer chez eux un stress pouvant affecter le métabolisme. Ainsi, une augmentation de la fréquence respiratoire, un ralentissement de la croissance et du taux de reproduction a été observé chez la crevette grise (*Crangon crangon*)

exposée à des ondes sonores de forte intensité [154]. Chez le crabe vert (*Carcinus maenas*) exposé à un bruit continu (équivalent à celui du trafic maritime) une augmentation de la fréquence respiratoire a également été observée [182].

- L'exposition au bruit peut également avoir un effet sur le développement des **œufs et des larves**. En effet, il semble que, chez les poissons osseux tout du moins, la perception du son par les larves soit équivalente à celles des adultes. De plus, chez certaines espèces, la vessie natatoire apparaît dès les premiers stades larvaires. Celles-ci sont donc potentiellement susceptibles de subir des barotraumatismes. Les larves de poissons soumises à des niveaux de bruit importants montrent également des retards de développement, et les œufs un taux de mortalité plus élevé [186].

Concernant les mollusques, l'exposition, à proximité immédiate (5 à 10 cm), de larves de pétoncles de Nouvelle-Zélande (*Pecten novaezelandiae*) à des émissions sonores identiques à celles produites par la prospection sismique conduit à des retards de développement et à des malformations chez les adultes [3]. Le même type de bruit peut retarder l'éclosion des œufs chez le crabe des neiges. L'impact du bruit sur le développement des larves a également été observé chez de nombreuses espèces de crustacés [52].

Comme les réactions comportementales, les dommages physiologiques entraînent également des effets indirects. Une perte d'audition temporaire ou permanente, comme n'importe quel autre dommage physiologique, va avoir des conséquences sur les chances de survie d'un individu (voir partie 2 - II - 2 - Impacts à long terme). Une

perte d'audition va en effet altérer la communication entre individus, ainsi que la capacité à détecter les prédateurs et proies et à évaluer l'environnement. Les dommages physiologiques ont donc des conséquences plus ou moins importantes sur l'ensemble des populations concernées.

#### d) Lésions létales

Les bruits impulsionnels de très forte intensité sont capables de causer des lésions létales aux organismes marins.

- Les implications directes d'activités anthropiques bruyantes sur des mortalités de **mammifères marins** sont difficiles à mettre en évidence. Les activités les plus souvent mises en cause concernent les opérations militaires et l'utilisation de sonars basse et moyenne fréquences. Mais la concomitance des événements ne suffit pas à mettre en évidence un lien de cause à effet [68, 88, 137, 147]. En effet, les nécropsies, qui permettraient d'établir un lien entre échouages et bruits de forte intensité, ne sont pas systématiquement réalisées, ou pas dans un laps de temps permettant de tirer des conclusions fiables. Cependant, les observations réalisées lors d'échouages en masse font souvent état d'animaux en bonnes conditions physiques, dont certains venaient de s'alimenter, présentant des hémorragies des lobes temporaux et de la cochlée, des hémorragies des poumons et des reins, des hémorragies de la mâchoire ou encore des accidents cardiovasculaires [35, 62, 88]. La présence de bulles d'air dans le parenchyme cérébral, les poumons, les reins et le foie laissent penser que la mort des animaux peut provenir d'embolie gazeuse liée à une remontée trop rapide [35, 88].

Si des échouages en masse ont eu lieu à différents endroits du globe, les

corrélations avec des activités anthropiques restent souvent incertaines. Filadelfo *et al.* [63] ont donc entrepris en 2009 un travail d'inventaire des évènements d'échouages en masse de baleines à bec et d'activités militaires sur 3 zones et ont déterminé si les corrélations étaient statistiquement significatives. La réponse est positive pour des évènements survenus en Méditerranée (14 évènements d'échouages en masse entre 1992 et 2004) et en mer des Caraïbes (7 évènements d'échouages en masse entre 1991 et 2000), mais négative pour le Japon (18 évènements d'échouages en masse entre 1978 et 1999) où d'autres facteurs peuvent expliquer ces échouages.

- Chez les poissons osseux, les barotraumatismes peuvent entraîner la mort, immédiatement après l'exposition à une forte variation de pression ou jusqu'à plusieurs jours plus tard. Les poissons ne possédant pas de vessie natatoire sont peu susceptibles de subir des lésions létales. Chez les poissons qui en possèdent une, les lésions interviennent directement au niveau de la vessie natatoire ou au niveau des organes adjacents (foie, reins, rate, gonades [36]). Des études réalisées sur différentes espèces de poissons exposés au bruit généré par du battage de pieux ont montré que ce type de bruit pouvait causer des lésions létales aux poissons présents dans un proche périmètre [56, 150], à un niveau variable selon l'espèce.
- André *et al.*, en 2011 [7], ont exposé quatre espèces de **mollusques céphalopodes** (deux espèces de calmars, la seiche *Sepia officinalis* et le poulpe *Octopus vulgaris*) à des sons dont le niveau  $L_{p,pk}$  reçu était de 175 dB re 1  $\mu$ Pa sur une bande de fréquence comprise

entre 50 et 400 Hz. Tous les individus exposés ont montré de sévères lésions cellulaires ainsi que des dégénérescences neuronales non compatibles avec la survie de l'animal. Ces résultats ont par la suite été confirmés par d'autres études [186]. Les auteurs soulignent l'importance des dommages physiologiques observés à des niveaux d'émissions considérés comme bas et confirment la nécessité de poursuivre les recherches sur ces espèces.

Au début des années 2000, plusieurs échouages en masse de calmars géants ont eu lieu en Espagne. Les individus montraient tous d'importantes lésions internes, au niveau des statocystes et de certains organes internes. Ces échouages ont eu lieu alors que des campagnes de prospections sismiques (canons à air) étaient en cours à proximité, et il est probable que les lésions constatées sur ces mollusques soient liées à l'exposition à des ondes sonores de forte intensité [70].

- Les ondes sonores de forte intensité peuvent également impacter mortellement **les œufs et larves** de nombreuses espèces. Ainsi, les œufs du crabe des neiges, exposés à proximité immédiate (2 m) d'un son équivalent à celui généré lors de prospection sismique augmente significativement le taux de mortalité [52]. Une étude montre également que les canons à air peuvent multiplier par deux, voire par trois selon les taxons, le taux de mortalité du zooplancton sur un périmètre de plus d'un kilomètre autour de la source. Les larves de krill semblent être particulièrement sensibles à ce type d'émission [115].

La mortalité due à l'exposition des ondes sonores peut être directe, du fait d'une blessure létale, mais également indirecte

lorsqu'une blessure mineure ou une perturbation affecte la capacité à survivre d'un organisme. Ainsi, un TTS, même de faible intensité peut conduire à la désorientation et la mort d'un animal. De

même, une réaction brutale, comme une remontée trop rapide vers la surface, peut causer une embolie gazeuse et avoir des conséquences mortelles.

### Les impacts à court terme, en bref

- Les impacts à court terme correspondent aux effets observables en réponse directe à l'exposition au bruit. Ils englobent les réactions comportementales, le masquage acoustique, les lésions physiologiques, létales ou non, qui peuvent être de nature permanente ou temporaire.
- Les réactions comportementales les plus communément observées correspondent à la fuite (déplacement, enfouissement) et, selon les espèces, à des changements de position dans la colonne d'eau, de la vitesse de nage ou encore dans l'alimentation. Cependant, les conséquences (effets indirects) de ces réactions restent peu étudiées.
- Les connaissances sur les phénomènes de masquage n'en sont qu'à leurs balbutiements. La compréhension et la prédictibilité des niveaux de masquage restent émergentes et la poursuite des recherches est nécessaire. Cependant, il existe certaines études démontrant que les cétacés (groupe le plus étudié), en réponse au masquage acoustique, ont développé une adaptation comportementale vocale également appelée « effet Lombard ». En effet, l'acoustique étant primordiale pour assurer la communication entre individus d'une même population, les cétacés doivent maintenir un certain seuil de détectabilité des signaux.
- Les lésions physiologiques non létales, permanentes ou temporaires, influencent les chances de survie des individus et peuvent avoir des conséquences plus ou moins importantes sur les populations concernées, à la fois pour les différents stades larvaires (retard d'éclosion et de développement, malformations) comme pour les adultes (barotraumatisme, organe lésé, stress métabolique, altération des communications). En fonction des espèces, ce type de lésion dépend de l'intensité sonore, de la durée d'exposition, ainsi que de l'état physiologique de l'animal.
- Les lésions létales peuvent être causées par une exposition, même brève, aux bruits impulsionnels de très forte intensité. La mortalité des individus peut être immédiate (hémorragie, lésion des organes vitaux) ou indirecte (échouage, prédation).

## 2) Impacts à long terme

### a) Habituation, adaptation, déplacements

L'exposition préalable des animaux au bruit et leur habituation ou non peut expliquer qu'ils réagissent différemment aux perturbations. Des études menées dans les années 1980 ont montré que les populations de baleines résidentes d'Arctique étaient beaucoup plus sensibles que les autres au bruit occasionné par les brise-glaces. Ces populations non migrantes ayant été peu ou pas exposées aux nuisances sonores (populations dites « naïves ») montraient des comportements de fuite alors que le navire était à plus de 50 km, et des perturbations comportementales à plus de 80 km [125].

En parallèle, d'autres populations s'adaptent à ces modifications de leur environnement. Dans différentes zones anthropisées à travers le monde, des études ont montré une modification durable des signaux émis par plusieurs espèces de cétacés. Comme exposé précédemment, avec l'augmentation du bruit de fond dans certaines régions, des espèces ont « adapté » leur communication en modifiant la fréquence de leurs émissions, leur intensité ou en diminuant l'intervalle entre chaque signal [31, 145].

Cependant, une apparente tolérance aux perturbations peut avoir des effets à l'échelle de la population qui sont plus difficiles à évaluer, en particulier pour les animaux avec une forte propension à être fidèles à un site [13, 14]. Certaines zones ont un rôle important dans la survie d'une population animale (reproduction, alimentation, etc.), et la quitter en raison d'un dérangement peut avoir des conséquences significatives sur la

*fitness* de la population (succès reproductif, augmentation du risque de prédation, exposition à d'autres pressions, etc.). Certaines populations vont donc préférer rester dans la zone malgré le risque d'impact plutôt que la quitter [162]. Le manque de réaction peut alors être interprété comme une absence d'impact, tandis qu'il s'agit plutôt d'une absence d'alternative face aux contraintes [13].

Une potentielle habituation à des signaux répétitifs a été démontrée chez certains poissons. Durant des expositions répétées à des émissions sismiques, des sébastes ont montré un retour à leur comportement pré-exposition durant les tirs, suggérant ainsi une habituation. Des poissons de récifs ont quant à eux montré une diminution de l'intensité de leur réponse au bruit au fur et à mesure de leur exposition à une même source. Ce type de comportement d'habituation a également été observé chez les calmars, les crabes et les seiches [24].

### b) Conséquences énergétiques et démographiques

Pour certaines organisations comme le *National Marine Fisheries Service* (NMFS)<sup>19</sup>, les perturbations comportementales ne sont pas considérées comme un dommage. Or si elles n'occasionnent pas de lésions à proprement parler, elles peuvent être à l'origine de conséquences importantes pour l'individu et la population à plus long terme, du fait des risques liés aux difficultés d'accès aux ressources, à la diminution des taux de reproduction ou de survie des jeunes par exemple. Il est toutefois très complexe de relier directement la perturbation individuelle à l'effet sur la population.

---

<sup>19</sup> Organisme fédéral des États-Unis, dépendant de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), elle-même appartenant au *U.S. Department of Commerce*.

Certaines études ont montré que les émissions sonores répétées, selon leur intensité et leur fréquence, peuvent engendrer un état de stress chronique chez les mammifères marins, et plus spécifiquement les baleines à bec. Cet état de stress impliquerait des effets sur l'alimentation et la reproduction des animaux [190].

Un changement de comportement ou un stress chronique peuvent induire l'abandon d'une activité importante (nourrissage,

reproduction ou élevage des jeunes) ou d'un site d'importance écologique en réaction au bruit émis. L'abandon répété ou prolongé d'activités vitales pourrait mener à des conséquences dommageables pour l'animal affecté [141] et à terme pour la population [74]. L'impossibilité d'accéder à une zone fonctionnelle comme une zone d'alimentation ou de reproduction peut affecter les réserves énergétiques d'un animal et par conséquent sa survie ou sa fertilité [135].

### **Les impacts à long terme, en bref**

- Les impacts à long terme peuvent occasionner des perturbations comportementales et influencer sur la démographie des espèces.
- Certaines espèces ne s'adaptent pas aux émissions sonores qui les affectent et les fuient. Leur comportement peut s'en trouver modifié, même loin de la source sonore. Un stress, parfois chronique, peut apparaître, allant jusqu'à l'arrêt d'une activité primordiale pour la survie de la population (alimentation, reproduction, élevage des jeunes).
- D'autres espèces s'habituent aux émissions sonores, avec parfois un retour à un comportement antérieur, ou bien développent des adaptations. Cette absence de fuite ne présage en rien d'une absence d'impact sur la population, mais peut témoigner d'une absence d'alternative face aux contraintes. Les impacts à long terme, notamment s'ils se prolongent ou sont répétés individuellement, peuvent avoir des conséquences importantes sur le maintien et la démographie de la population.

### 3) Effets cumulés

Les activités anthropiques génèrent différentes pressions qui vont s'appliquer sur les individus, les populations et les écosystèmes. Les pressions interagissent entre elles et peuvent modifier la magnitude d'un effet en l'augmentant (synergie) ou en le diminuant (antagonisme). L'évaluation des effets de ces pressions requiert l'accès à des données physiologiques, démographiques et comportementales expérimentales et de terrain à une échelle spatio-temporelle très large, depuis l'individu jusqu'à l'écosystème. En milieu marin, ces données sont quasiment inexistantes [32].

La question des effets cumulés du bruit se pose à différents niveaux. Le bruit est une pression venant se cumuler à d'autres (destruction d'habitat, capture accidentelle, collision, pêche, mais aussi acidification des océans, changement climatique, etc.). Une seule activité anthropique génère à elle seule des pressions de différentes natures. L'évaluation des pressions cumulées concernant le bruit est déjà un défi, mais ne reste qu'une évaluation partielle des effets cumulés de l'ensemble des activités anthropiques. Il faut notamment prendre en compte :

- **Le cumul des impacts du même chantier sur toute sa durée.** Les méthodes de calculs des périmètres et des niveaux d'impacts pour les mammifères marins sont souvent basées sur des durées bien inférieures à la durée totale des chantiers. Il est difficile de prédire le comportement d'espèces hautement mobiles comme les mammifères, les poissons ou les tortues face aux nuisances sonores. Prédire le cumul des impacts générés par des travaux sur l'ensemble de leur durée implique de

connaître le comportement (éloignement ou non) des animaux, ce qui est impossible. Toutefois, en présence d'activités très bruyantes comme la sismique ou le battage de pieux, il est très peu probable que les animaux restent à proximité de la source de bruit sans réagir [65, 168].

- **Le cumul spatial des impacts de plusieurs chantiers ou activités bruyantes.** Prédire l'impact acoustique de plusieurs chantiers proches nécessite d'avoir accès aux informations sur le bruit généré par chacune des activités, ce qui peut être compliqué dans le cadre de projets industriels pour des raisons de confidentialité. Le recours à des modèles robustes permettant de définir la propagation et les niveaux d'exposition de plusieurs chantiers simultanés est indispensable dans ces cas de figures. L'effet de barrière acoustique est souvent mentionné comme un impact probable des chantiers spatialement proches, en particulier si les travaux sont concomitants. Celui-ci doit être confirmé par la modélisation.
- **Le cumul dans le temps des impacts de plusieurs chantiers ou activités bruyantes.** Même s'ils n'ont pas lieu en même temps, l'exposition répétée des organismes marins aux nuisances engendrées par des chantiers proches ou avec des activités de routine (trafic maritime notamment) peut avoir des impacts et notamment créer un état de stress chronique [190]. L'impact de cette situation de stress sur la *fitness* des individus, et *in fine* sur la population, est difficile à estimer avec les méthodes actuelles. Il s'agit donc d'un axe de recherche à développer.

### **Les impacts cumulés, en bref**

- Les impacts cumulés des activités anthropiques génératrices de bruits nécessitent l'acquisition de connaissances robustes à différentes échelles géographiques et saisonnières, à la fois sur les pressions sonores existantes et sur les populations présentes et potentiellement impactées. L'évaluation des impacts cumulés nécessite donc d'aller au-delà d'une simple étude d'impact pour un projet donné.
- Les travaux de recherche fondamentaux sur cette problématique sont à encourager, ainsi que le rapprochement des différents acteurs impliqués (scientifiques, industriels, services de l'état, etc.).

### III. Évaluer les impacts d'un projet sur la faune marine

#### 1) Évaluer le niveau de bruit et la propagation des ondes acoustiques

Pour évaluer les impacts d'un projet sur la faune marine, la première étape consiste à quantifier le niveau de bruit attendu et à modéliser la propagation des ondes acoustiques, en fonction des caractéristiques du bruit et de la zone d'étude.

##### a) Évaluer le niveau de bruit

Pour obtenir une représentation fiable de l'impact sonore d'un projet, il est tout d'abord nécessaire d'évaluer le plus précisément possible les caractéristiques spectrales du bruit dont on cherche à modéliser la propagation. Ces caractéristiques acoustiques seront ensuite intégrées au modèle de propagation des ondes sonores sous la forme d'un gabarit acoustique (représentation des niveaux d'émission en fonction de la fréquence) représentatif de la source sonore étudiée.

Ce gabarit doit être représentatif des conditions d'émission à évaluer. Par exemple, dans le cas d'un battage de pieux, le gabarit doit être établi pour le même diamètre de pieu, le même matériau, la même récurrence de battage, la même méthode d'enfoncement, *etc.*

En l'absence de données collectées *in situ*, il convient de rechercher dans la bibliographie les données les plus représentatives possibles du bruit que l'on cherche à évaluer. S'il n'existe pas de données sur la source de bruit à caractériser, il est possible d'utiliser un gabarit d'une source ayant des caractéristiques similaires. Par exemple, l'impact sonore d'un brise-roche hydraulique, pour lequel aucune donnée acoustique n'est disponible à l'heure actuelle, peut être assimilé à celui généré

par le battage d'un pieu de 50 cm de diamètre, dans la mesure où la cadence de battage est similaire à celle du brise-roche, que le diamètre du pieu correspond à celui du marteau et que l'énergie transmise par le moteur est du même ordre pour les deux engins [12].

Pour vérifier la pertinence du gabarit, un recalage du modèle pourra éventuellement être fait *a posteriori* avec des données mesurées *in situ* afin de vérifier la cohérence des prédictions du modèle.

##### b) Évaluer la propagation des ondes acoustiques

La propagation des ondes acoustiques est un phénomène complexe, et son évaluation nécessite parfois d'avoir recours à des logiciels de modélisation spécifiques. La modélisation de la propagation des ondes acoustiques est indispensable pour évaluer l'impact sonore d'un projet, notamment par petit fond où les phénomènes de réflexion/réfraction sont particulièrement importants et où la propagation des ondes basse fréquence est fortement atténuée.

Avant de modéliser l'empreinte sonore d'une source de bruit, il est nécessaire de réaliser une carte de l'ambiance sonore préexistante, c'est-à-dire de modéliser le bruit ambiant sur la zone d'étude sans la source de bruit dont on cherche à évaluer l'impact. Cette estimation du bruit ambiant doit être représentative des conditions environnementales attendues au moment où la source sonore sera introduite dans le milieu (même température, même état de mer, *etc.*). Le logiciel de modélisation doit prendre en compte le bruit ambiant sur la zone d'étude. Si le bruit ambiant n'est pas pris en compte dans le modèle, l'émergence sera plus

importante et le bruit propre de la source émettrice à évaluer sera alors surestimé.

La précision des prédictions d'un modèle dépend du choix des algorithmes qui doivent être adaptés à la situation à modéliser, mais également de la qualité des données d'entrée fournies au modèle. La propagation du son étant dépendante des caractéristiques du milieu, un logiciel de modélisation de la propagation des ondes acoustiques doit prendre en compte les paramètres environnementaux de la zone d'étude, et *a minima* :

- **la bathymétrie.** Les algorithmes doivent être adaptés à la bathymétrie de la zone d'étude. La bathymétrie a une forte influence sur la propagation des ondes acoustiques. La propagation par petit fond est en effet très différente de la propagation par grand fond, du fait des phénomènes de réflexions notamment, et certains algorithmes (comme ceux basés sur la théorie des rayons sonores) n'y sont pas adaptés [158] ;
- **la nature du fond.** La composition des sédiments influe fortement sur le comportement des ondes acoustiques : le sable aura tendance à favoriser la réflexion des ondes, la vase est propice aux phénomènes d'absorption et les substrats rocheux aux phénomènes de diffusion. La nature du fond doit donc être prise en compte afin d'intégrer dans le modèle les propriétés géoacoustiques de la zone d'étude ;
- **un profil bathycélérimétrique**, établi sur la base de profils de température et salinité en fonction de la profondeur (profils CTD), afin que le modèle puisse

calculer la célérité des ondes acoustiques et intégrer l'éventuelle stratification de la colonne d'eau. Ce profil doit être représentatif des conditions environnementales de la zone d'étude au moment où les émissions sonores vont être générées (même lieu, même saison).

Le logiciel doit également intégrer un modèle de pertes par propagation adaptée à la zone d'étude afin de prendre en compte l'atténuation du signal entre la source et le récepteur. Ce modèle peut être établi grâce à des mesures *in situ*. Cette option est à privilégier afin de garantir un modèle représentatif des conditions environnementales de la zone d'étude et donc une estimation plus précise des pertes. À défaut, un modèle théorique peut être utilisé.

Il existe plusieurs modèles théoriques de pertes par propagation ; le plus simple est le modèle de propagation sphérique, qui considère que l'onde acoustique se propage de la même façon dans toutes les directions. Les pertes se calculent alors de la façon suivante :

$$\text{Pertes (en dB)} = 20 \log_{10} X + \alpha X/1000$$

Où X est la distance (en m) entre la source et le récepteur, et  $\alpha$  est le coefficient d'atténuation par amortissement (en dB/km).

Ce modèle de propagation sphérique donne une représentation très simplifiée des phénomènes de pertes par propagation et son utilisation ne doit pas être systématique.

Enfin, le modèle de propagation des ondes acoustiques doit intégrer, sous la forme d'un gabarit acoustique détaillant les niveaux par fréquence, le bruit généré par la source émettrice qui aura été évalué préalablement.

## L'évaluation et la modélisation de la propagation des ondes sonores, en bref

- L'étude d'impact acoustique d'un projet doit évaluer *a priori* le niveau de bruit attendu au sein de la zone d'étude et anticiper la propagation des ondes sonores. Cette évaluation se fait lorsque le contexte l'exige à l'aide d'un logiciel de modélisation.
- Le modèle doit être calibré grâce à des données d'entrée représentatives de la zone et de la période d'étude. Ces données incluent *a minima* la bathymétrie, la nature du fond et le profil bathycélérimétrique de la colonne d'eau. Le modèle doit également intégrer les pertes subies par les ondes sonores lors de leur propagation dans le milieu, ainsi que le bruit ambiant sur la zone considérée.
- Le bruit dont l'impact est à évaluer est intégré au modèle sous la forme d'un gabarit acoustique (représentation des niveaux d'émission en fonction de la fréquence) qui doit être représentatif des conditions d'émissions.
- Bien que la calibration du modèle puisse s'appuyer sur des sources bibliographiques, les mesures *in situ* sont à privilégier pour se rapprocher des conditions réelles et assurer la robustesse des prédictions.

## 2) Connaître les espèces présentes

### a) Distribution, saisonnalité et fréquentation

Pour évaluer les impacts potentiels d'une activité anthropique, des connaissances de base sur les peuplements marins du secteur sont nécessaires. Il convient donc de renseigner *a minima* les informations suivantes :

- La diversité spécifique : Quelles sont les espèces présentes ou potentiellement présentes sur le site d'étude ?
- La distribution spatio-temporelle : Quelles sont les zones les plus fréquentées ? Quelles espèces sont présentes sur ces zones ? Ont-elles une saisonnalité de présence ?
- La fréquentation et l'utilisation du site : Les espèces sont-elles résidentes sur le site ou de passage ? Quelle est l'importance de ce site par rapport aux environs ? La

zone est-elle connue pour une utilisation particulière (alimentation, reproduction, nurserie) ?

- La sensibilité des espèces présentes : L'espèce est-elle particulièrement sensible au bruit ? Qu'elle est son statut de conservation ? L'espèce subit-elle d'autres pressions au sein de la zone d'étude (pêche, pollution, diminution des ressources, etc.) ?

L'ensemble de ces informations permet de définir les enjeux et d'évaluer les effets potentiels du projet sur les communautés marines.

Un certain nombre de données existent pour la France métropolitaine et l'outre-mer, mais elles sont rarement suffisantes pour évaluer les impacts d'un projet. Si elles apportent des données précieuses sur le fonctionnement général d'un secteur (à l'échelle d'une façade maritime), les données

publiques existantes sont généralement acquises selon une échelle spatiale et temporelle non compatibles avec une étude fine de la fréquentation et de l'utilisation de la zone par les espèces marines. Des acquisitions de données dédiées, par suivi *in situ*, sont donc nécessaires dans la plupart des cas. Pour tout suivi environnemental, il convient d'identifier clairement la question à laquelle on souhaite répondre, en cohérence avec l'ampleur et le niveau d'impact attendu du chantier. Les types de suivis et les échelles spatio-temporelles adaptées varient en fonction des objectifs recherchés : identifier un changement de distribution ou d'abondance dans le cadre d'un projet éolien n'est pas la même chose que d'identifier un changement de comportement lors d'une campagne sismique.

### **b) Sensibilité auditive**

Il convient dans un premier temps de recenser les espèces sensibles potentiellement présentes sur la zone d'étude et d'évaluer leur sensibilité auditive en fonction des données disponibles. Une étude bibliographique préalable est indispensable, pour disposer d'un audiogramme pour chaque espèce (ou groupe d'espèces), ou, à défaut, de celui d'une espèce taxinomiquement proche.

Les mammifères marins peuvent être répartis en 6 groupes d'audition en fonction de leur utilisation de l'acoustique [167, 168] (voir la partie 2 - 1 - 1 - Les mammifères marins pour plus de détails) :

- les cétacés basse fréquence, qui regroupent les grandes baleines ;
- les cétacés haute fréquence, comme les grands plongeurs et la plupart des Delphinidés ;
- les cétacés très haute fréquence, comme certains delphinidés et les marsouins ;
- les siréniens ;
- les phocidés ;
- les autres carnivores.

Pour chaque groupe, la sensibilité au bruit est différente en fonction des gammes de fréquence de meilleure audition.

De même, chez les poissons, la sensibilité auditive peut être très différente d'une espèce à l'autre (voir partie 2 - 1 - L'audition des espèces marines).

Certaines réglementations, mesures de mitigation et guides de bonnes pratiques préconisent de ne considérer impactantes que les émissions acoustiques situées dans les gammes d'audition des espèces considérées. Si cette mesure semble logique, elle n'est pas unanime en raison des variabilités interspécifiques et inter-individuelles qui peuvent être observées.

## Déterminer les espèces présentes, en bref

- Le porteur de projet doit recenser les espèces présentes dans la zone de travaux, s'informer de leur statut de protection, de leur utilisation spatio-temporelle du site et de leur sensibilité aux pressions, et notamment au bruit. En effet, selon les taxons, les capacités auditives et la sensibilité au bruit diffèrent.
- Ces éléments permettront au porteur de projet d'appréhender les enjeux et les effets potentiels du projet sur les espèces présentes et de formuler les bonnes questions pour adapter l'étude d'impact à la sensibilité de la zone d'étude.

### 3) Fixer des seuils de tolérance et définir des périmètres d'exclusion

Afin de limiter l'impact sonore d'un projet, certains pays ont défini des seuils de tolérance, sous forme d'un niveau maximal à ne pas dépasser à une distance donnée de la source. L'Allemagne a, depuis 2013, fixé ce seuil à 160 dB re 1  $\mu\text{Pa}^2 \cdot \text{s}$  ( $L_{E,p}$ ) et 190 dB re 1  $\mu\text{Pa}$  ( $L_{p,pk}$ ) à 750 m de la source de bruit dans le cadre d'opération de battage de pieux ; la Belgique a également fixé un seuil  $L_{p,pk}$  de 185 dB re 1  $\mu\text{Pa}$  à 750 m.

En France, il n'existe pas de critères réglementaires concernant les seuils d'exposition au bruit sous-marin. L'arrêté ministériel du 9 septembre 2019 relatif à la définition du bon état écologique des eaux marines et aux normes méthodologiques d'évaluation (NOR : TREL1923380A) fixe les critères pour évaluer l'état écologique et les pressions sur le milieu marin à l'échelle des sous-régions marines. Il ne fixe pas de seuil réglementaire à ne pas dépasser dans le cadre de projets en mer, mais des travaux en ce sens sont néanmoins en cours à l'échelle nationale et européenne.

Les travaux de Southall *et al.* en 2007 [167], qui ont défini des seuils TTS et PTS pour les mammifères marins, ont fait référence pendant plus de 10 ans en s'imposant comme les seuils à respecter. Cependant, depuis 2007 les connaissances en matière de bioacoustique ont progressé [59, 64, 66, 168]. La *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA – U.S. Department of Commerce) met à jour les calculs de pondération auditifs et les seuils sur la base des avancées scientifiques, tout en essayant de garantir une robustesse statistique au regard des données rares et des revues par les pairs. Les nouveaux seuils proposés intègrent les nouvelles connaissances sur les capacités auditives des mammifères marins et les caractéristiques des différentes sources de bruit. De nouvelles fonctions de pondération ont été développées (voir annexe 1), notamment dans le cadre des travaux de l'*U.S. Navy* [65]. Ces nouveaux seuils et fonctions de pondération ont fait l'objet d'une récente publication [168].

Nous considérerons ces résultats comme

l'état de connaissance le plus avancé et le plus opérationnel dans le domaine à ce jour. Comme décrit précédemment, six groupes de mammifères marins sont distingués : les cétacés basse fréquence (grandes baleines), les cétacés haute fréquence (la plupart des Delphinidés, les cachalots et baleines à bec notamment), les cétacés très haute fréquence (marsouins, Kogiidés, dauphins d'eau douce), les siréniens, les phocidés et les autres carnivores (Otariidés, Ursidés et Mustélidés).

Deux types de sons sont considérés : les sons impulsionnels et les sons non-impulsionnels ou continus. En effet, une exposition à des sons impulsionnels peut générer un risque plus élevé de fatigue mécanique de l'oreille interne que ne le ferait une exposition à des sons non-impulsionnels [77]. La durée de l'exposition sonore n'est donc pas le seul critère pouvant entraîner un dommage physiologique. Dans

ce cas, le niveau d'exposition sonore ( $L_{E,p}$ ) n'est pas la métrique la plus appropriée pour décrire les effets des sons impulsionnels. Une approche duale est donc proposée en exprimant les seuils TTS et PTS à la fois en niveaux d'exposition sonore ( $L_{E,p}$ ) et en niveaux de pression sonore ( $L_{p,pk}$ ) pour chaque groupe d'audition.

De nouveaux seuils TTS ont ainsi été déterminés, extrapolés ensuite aux PTS. Des seuils différents ont été établis pour les bruits de type impulsionnel (tableau 9) ou continu (tableau 10). Pour les bruits de type impulsionnel, les seuils sont déclinés en deux versions : les seuils  $L_{E,p}$  pondérés (incluant les fonctions de pondération par groupe d'espèces), c'est-à-dire fonction des fréquences auxquelles les différents groupes sont les plus sensibles, et les seuils  $L_{p,pk}$  non-pondérés (seuils de niveaux reçus indépendamment de la capacité auditive du récepteur).

Tableau 9 : Seuils TTS et PTS pour les différentes catégories de mammifères marins exposés à un son impulsionnel. Les niveaux d'exposition sonore cumulée sur 24 h ( $L_{E,p,24h}$ ) sont exprimés en dB re 1  $\mu Pa^2.s$ . Les niveaux de pression sonore ( $L_{p,pk}$ ) sont exprimés en dB re 1  $\mu Pa$  (d'après [136] et [168]).

Son impulsionnel	TTS		PTS	
	$L_{E,p,24h}$ (pondéré)	$L_{p,pk}$ (non pondéré)	$L_{E,p,24h}$ (pondéré)	$L_{p,pk}$ (non pondéré)
Cétacés basse fréquence	168	213	183	219
Cétacés haute fréquence	170	224	185	230
Cétacés très haute fréquence	140	196	155	202
Siréniens	175	220	190	226
Phocidés dans l'eau	170	212	185	218
Autres carnivores dans l'eau	188	226	203	232

Tableau 10 : Seuils TTS et PTS pour les différentes catégories de mammifères marins exposés à un son continu. Les niveaux d'exposition sonore cumulée sur 24 h ( $L_{E,p,24h}$ ) sont exprimés en dB re  $1\mu Pa^2.s$  (d'après [136] et [168]).

Son continu	TTS	PTS
	$L_{E,p,24h}$ (pondéré)	$L_{E,p,24h}$ (pondéré)
Cétacés basse fréquence	179	199
Cétacés haute fréquence	178	198
Cétacés très haute fréquence	153	173
Siréniens	186	206
Phocidés dans l'eau	181	201
Autres carnivores dans l'eau	199	219

Il n'existe pas à l'heure actuelle de seuils de réaction d'évitement définis pour les différents groupes d'espèces. Quelques valeurs issues d'expériences en bassin ou découlant d'extrapolation existent et sont parfois utilisées. Mais seules les valeurs de TTS et PTS font l'objet d'un relatif consensus.

Pour les tortues et les poissons, les travaux de Popper *et al.* en 2014 [152] ont également permis d'établir des seuils de TTS et de PTS pour différentes sources de

sons impulsionnels. Comme pour les mammifères marins, les seuils sont proposés en niveaux d'exposition sonore ou niveaux de pression sonore. Concernant les réactions comportementales, aucune valeur ne fait aujourd'hui consensus au sein de la communauté scientifique.

Ce travail est toujours en évolution et devrait faire l'objet d'une mise à jour prochainement. Les valeurs données dans le tableau 11 sont donc appelées à être modifiées.

Tableau 11 : Seuils TTS et PTS pour les différentes catégories de poissons et les tortues à un son impulsionnel de type battage de pieux. Les niveaux d'exposition sonore ( $L_{E,p}$ ) sont exprimés en dB re  $1\mu Pa^2.s$ . Les niveaux de pression sonore ( $L_{p,pk}$ ) sont exprimés en dB re  $1\mu Pa$  (d'après [152]).

Groupe	TTS	PTS	
	$L_{E,p}$	$L_{E,p}$	$L_{p,pk}$
Tortues	Non disponible	210	207
Poisson (sans vessie natatoire)	186	219	213
Poisson (vessie natatoire non reliée à l'oreille interne)	186	210	207
Poisson (vessie natatoire reliée à l'oreille interne)	186	207	207
Œufs et larves	Non disponible	210	207

### **Les seuils de tolérance, en bref**

- Certains pays ont fixé des niveaux de bruit à ne pas dépasser, à une certaine distance, dans le cadre de travaux sous-marins (battage de pieux notamment). En France, aucun seuil n'a été établi à l'heure actuelle.
- De récents travaux bibliographiques (2019) proposent cependant des seuils limites, au-delà desquels des pertes d'audition (TTS ou PTS) peuvent être observées. Ces seuils constituent à l'heure actuelle les valeurs de référence à prendre en compte dans le cadre des études d'impact acoustique.
- Concernant les seuils de réactions comportementales, il n'existe pas aujourd'hui de consensus scientifique.

#### 4) Modèles existants de prédiction des impacts biologiques

Les impacts potentiels du bruit sur la faune peuvent être appréhendés à deux échelles distinctes :

- À l'échelle de l'individu, les impacts s'appliquent au niveau de sa capacité à communiquer avec ses congénères, à chasser et détecter les prédateurs et *in fine*, à sa survie.
- À l'échelle de la population, les impacts s'appliquent au niveau de la capacité des individus à se reproduire, au taux de survie et à la mortalité.

Les méthodes existantes de modélisation du bruit et d'estimation des impacts à partir des seuils acoustiques et des fonctions de pondération des différents groupes d'espèces peuvent permettre de définir statistiquement le nombre d'animaux impactés au moment de l'activité bruyante. Mais cela ne présume pas des conséquences à moyen ou long terme sur les animaux. Des modèles prédictifs de conséquences à long terme sont donc en développement. Ces modèles sont très dépendants des données d'entrées et reposent souvent, au moins en partie, sur du dire d'expert. La part d'incertitude autour des résultats qu'ils produisent est donc importante. Néanmoins, ils offrent des approches nouvelles en prenant en compte les aspects démographiques et énergétiques. La recherche avançant, ces modèles sont amenés à évoluer rapidement, voire à être remplacés par de nouveaux outils.

- **Le modèle SAFESIMM** (*Statistical Algorithms For Estimating the Sonar Influence on Marine Megafauna*) est un modèle basé sur les agents (individus) pour quantifier l'impact d'une activité

bruyante sur les mammifères marins. Initialement développé dans le cadre de l'utilisation du sonar, le modèle a depuis été élargi à d'autres sources de bruit comme la construction de parcs EMR [43]. À partir des niveaux de bruit générés par l'activité et des niveaux reçus par les agents, la probabilité de subir un PTS, TTS ou une réaction comportementale est estimée pour chacun des agents à partir d'une relation dose-réponse. Les résultats sont ensuite intégrés sur la totalité de la période de travaux sous forme d'un historique du nombre de dommages (lésions permanentes ou temporaires) et/ou perturbations (dérangements) subis par chacun des agents.

La modélisation de différents scénarios *via* cet outil permet de quantifier les impacts de différentes méthodes de construction ou de différentes sources de bruit et constitue ainsi un outil d'aide à la décision pour le porteur de projet.

- **L'Interim PCoD (IPCoD)** a été développé par le *Sea Mammal Research Unit* (SMRU) de l'Université de St Andrews en 2014 afin de produire une première estimation quantitative des effets potentiels sur les populations de mammifères marins de la construction et l'exploitation de tous types de dispositifs d'énergies marines renouvelables dans les eaux britanniques [73, 99]. Il est une version simplifiée du PCoD, qui ne pouvait pas être appliquée aux espèces à enjeux de la région, en raison de l'absence d'information empirique pour de nombreux paramètres. L'objectif de ce modèle est de prédire sur des pas de temps plus ou moins longs les impacts démographiques potentiels de travaux de construction de parcs éoliens sur une population de mammifères marins

donnée. Si ce type de modèle dépend beaucoup des données d'entrée et du dire d'expert, et malgré toutes les incertitudes associées à chacun des paramètres d'entrée, il n'en reste pas moins un outil intérimaire pour commencer à quantifier les impacts à long terme des nuisances acoustiques.

- **Le modèle DEPONS** vise à prédire les impacts à long terme du bruit sur les mammifères marins [126]. Il utilise des modèles existants de déplacements et de balance énergétique (apports/pertes d'énergie) basés sur le fait que les domaines vitaux et la dynamique des populations reposent sur la compétition alimentaire. Le modèle DEPONS est proche de l'IPCoD mais diffère au niveau des informations de base et du traitement

des aspects démographiques. Si l'IPCoD utilise des moyennes de taux de survie pour les espèces considérées, le modèle DEPONS est plus axé sur l'énergétique et considère la survie à travers la capacité des individus à trouver de la nourriture. Ce modèle nécessite donc des connaissances sur la disponibilité de proies. Il permet de simuler les effets sur les populations selon différents scénarios, distances à la source et sur un laps de temps plus ou moins long. Aujourd'hui, le modèle DEPONS s'applique uniquement au marsouin commun.

Le tableau 12 ci-après synthétise les modèles de prédiction des impacts biologiques existants.

### Les modèles de prédiction des impacts biologiques, en bref

- Différents modèles permettant de prédire les conséquences à long terme des perturbations sur les mammifères marins ont été développés.
- Dans tous les cas, ces modèles reposent sur des hypothèses, que cela soit sur la propagation du son, sur les paramètres démographiques, sur les seuils ou encore les comportements.
- Si leurs résultats sont toujours à relativiser, ces outils apportent néanmoins les premières quantifications des impacts du bruit sur la faune marine. La plupart n'est aujourd'hui disponible que pour quelques espèces, faute de données suffisantes, mais ces modèles offrent des perspectives prometteuses pour l'évaluation des impacts et la simulation de différentes solutions. Ils sont donc appelés à devenir des outils d'aide à la décision pour les chantiers en mer.

Tableau 12 : Tableau récapitulatif des différents modèles prédictifs existants.

Outil	Éléments d'entrée	Développé pour	Indiqué pour	Moins indiqué pour
<b>SAFESIMM</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Niveau de bruit généré par l'activité</li> <li>- Niveau de bruit reçu par les agents (individus)</li> <li>- Durée des travaux</li> <li>- Nombre d'individus concernés</li> </ul>	Impact des émissions sonar sur les mammifères marins, étendu depuis à d'autres activités	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Définir le nombre de PTS, TTS ou perturbations comportementales subis par les mammifères marins dans le cadre d'une exposition à de forts niveaux sonores</li> <li>- Explorer des scénarios de calendrier de travaux</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Définir les effets sur la <i>fitness</i> ou réaliser des projections à long terme</li> </ul>
<b>IPCoD</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nombre d'individus affectés par jour</li> <li>- Paramètres démographiques de la population concernée</li> <li>- Nombre de jours de dérangement</li> </ul>	Impact du dérangement acoustique sur les populations de mammifères marins	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prédire les trajectoires de populations (impactées vs non impactées) en réponse aux travaux</li> <li>- Explorer des scénarios, notamment sur les effets cumulés</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Travailler sur des espèces pour lesquelles peu de données existent</li> <li>- Travailler sur des zones avec de grandes variations saisonnières de densité</li> </ul>
<b>DEPONS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Paramètres démographiques de la population</li> <li>- Carte de disponibilité de proies</li> <li>- Mouvements de la population</li> <li>- Distance de réaction à bruit</li> </ul>	Impact du bruit sur les marsouins communs de Mer du Nord	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Évaluer les effets cumulés sur le marsouin</li> <li>- Explorer des scénarios spatio-temporels de construction</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Travailler sur d'autres espèces que le marsouin commun</li> </ul>

## 5) Limites et axes à développer

Le bruit agit à différents niveaux sur les espèces marines et peut donc générer des impacts de différentes natures. Si la compréhension et la quantification des impacts directs sont déjà difficiles à appréhender et sont loin de faire l'unanimité dans la communauté scientifique, les impacts indirects sont très peu connus et/ou documentés. Les connaissances actuelles sur la faune marine restent lacunaires. Notre capacité à détecter un déclin avant qu'il ne prenne des proportions dramatiques pose question [184, 192]. L'amélioration des connaissances fondamentales sur la distribution, les cycles biologiques et les schémas migratoires reste un point essentiel pour appréhender les impacts et définir des mesures de mitigation efficaces.

L'évaluation de l'impact sonore d'un projet sur l'environnement repose sur la robustesse des logiciels de modélisation de propagation des ondes sonores. Le choix des algorithmes est donc déterminant et ceux-ci doivent être adaptés aux conditions environnementales de la zone d'étude, et notamment à la bathymétrie. La modélisation par petit fond est particulièrement complexe et requiert des adaptations,

notamment liées aux fréquences de coupure. La calibration du modèle apparaît également comme un facteur déterminant pour la qualité des prédictions. La qualité et la fiabilité des données d'entrée sont donc primordiales. Le recours à des données collectées *in situ*, notamment pour l'évaluation des pertes par propagation, est à privilégier dans la mesure du possible afin de limiter les biais dans les estimations.

Le but premier des méthodes de mitigation classiquement mises en place pour réduire les impacts directs (*soft-start/ramp-up*, arrêt des activités quand les animaux sont observés à proximité, *etc.*) repose sur l'hypothèse que les animaux sont capables de fuir pour ne pas être impactés. Cela présume également que le déplacement des animaux a des effets moins néfastes que les impacts directs. Cela peut être faux pour certaines espèces, en particulier celles inféodées à des zones restreintes ou résidentes. Un déplacement peut alors avoir des conséquences sur la survie des individus et donc de la population [67] (figure 27). La capacité de la population à trouver des zones alternatives adaptées doit donc être considérée dans l'évaluation des impacts.

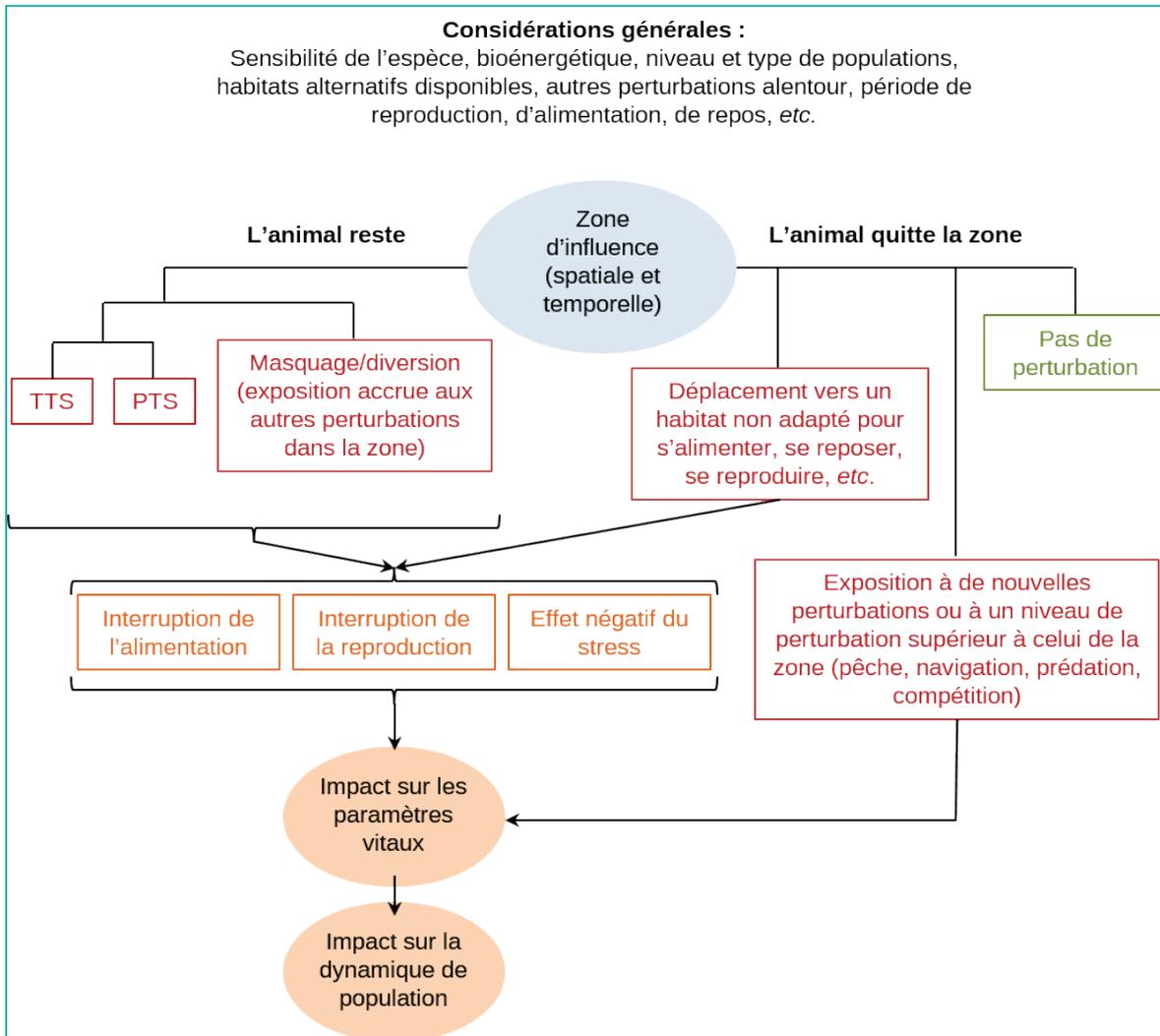


Figure 27 : Trame suggérée pour évaluer les impacts des activités anthropiques sur les mammifères marins. Pour les populations avec une fidélité importante au site, le déplacement peut avoir des conséquences significatives et aboutir aux mêmes conséquences qu'un dommage direct (d'après [67]).

L'extrapolation des impacts individuels au niveau populationnel est un axe de recherche en développement qu'il faut encourager pour pouvoir réduire les incertitudes et marges d'erreurs, encore nombreuses. Les études sur les réactions au bruit des autres taxons que les mammifères marins sont encore plus limitées, ce qui restreint la compréhension du phénomène.

Les réponses indirectes des animaux, les conséquences énergétiques et les impacts à long terme ainsi que le mécanisme de cumul des pressions nouvelles et existantes apparaissent aussi comme des axes de recherche essentiels à développer pour que

les mesures de mitigation deviennent réellement adaptées aux impacts et aux échelles spatio-temporelles et non plus seulement régies par un principe de précaution. Enfin, la détermination de seuils à partir desquels la mise en place d'évaluation des distances d'impact et, le cas échéant, de mesures de mitigation est obligatoire est à encourager. Bien que cela suppose un travail de fond sur les connaissances existantes et requiert le développement d'indicateurs et de méthodologies adaptées, cela permettrait une standardisation dans le traitement des impacts et une harmonisation des pratiques.

### **Limites et axes à développer, en bref**

- Une bonne connaissance des espèces potentiellement impactées, de leur biologie et de leurs capacités auditives, ainsi qu'un modèle de propagation du bruit bien calibré sont essentiels pour évaluer les impacts et proposer des mesures de mitigation adaptées.
- En cas de perturbation, certaines espèces résidentes ou inféodées à une zone voient leur capacité de survie sérieusement affectée alors que d'autres ont la capacité de fuir. Dans ce cas, il est nécessaire d'évaluer leur capacité à trouver des zones alternatives fonctionnelles pertinentes.
- Les propositions des mesures de mitigation aux impacts doivent être établies sur des échelles spatiales et temporelles adaptées afin de s'affranchir du principe de précaution.
- La détermination de seuils réglementaires est encouragée.



*Crédit photo : Cohabys*

# Partie 3

## Procédures ou technologies disponibles pour éviter, réduire ou compenser les impacts des émissions sonores sur la faune marine

### I. Éviter

Une mesure d'évitement est définie comme une mesure modifiant un projet afin de supprimer un impact négatif que le projet aurait sur l'environnement. Cela signifie que pour une espèce ou un groupe d'espèces, l'évitement garantit l'absence totale d'impact, direct ou indirect, sur l'ensemble des individus de la population et sur les composantes physiques et biologiques nécessaires à l'accomplissement de l'ensemble de son cycle de vie [124].

Une même mesure peut, selon son efficacité, être rattachée à de l'évitement ou de la réduction : on parlera d'évitement lorsque la solution retenue garantit la suppression totale d'un impact. Si la mesure n'apporte pas ces garanties, il s'agira d'une mesure de réduction [124]. Certaines mesures décrites ici seront donc également mentionnées dans le chapitre sur la réduction.

#### 1) Planification spatiale et temporelle

La plupart des guides de bonnes pratiques et recommandations internationales s'accordent sur l'utilité de définir **des zones et/ou des périodes sensibles pour les espèces marines, dans ou durant lesquelles les activités bruyantes seraient interdites**. Mais seuls quelques pays ont défini clairement des zones et/ou des périodes fermées à des activités comme les

campagnes sismiques en raison de leur intérêt écologique (Brésil, Australie, Russie et pays signataires de l'ACCOBAMS notamment). Ces zones et/ou périodes concernent la reproduction, l'alimentation, l'élevage de jeunes ou encore la migration.

Cette mesure apparaît comme un moyen de mitigation simple et efficace pour s'assurer de ne pas nuire aux espèces sensibles dans les périodes où elles sont les plus vulnérables [146, 185, 187, 191]. Pour ce faire, deux prérequis sont nécessaires : (i) avoir une connaissance suffisante des zones écologiquement importantes pour les espèces sensibles, et connaître leur distribution, leur abondance, leurs mouvements, leur saisonnalité et leur sensibilité au bruit ; (ii) avoir une réglementation officielle qui fixe ces périodes et/ou zones de fermeture.

Il serait donc judicieux que plus de pays suivent cette mesure lorsque les connaissances sont suffisantes ou lorsque des zones propices ont déjà été identifiées.

La mise en commun de données de distribution et l'utilisation de techniques de modélisation ou d'extrapolation des données existantes pour fournir des informations sur les secteurs où les connaissances sont limitées voire inexistantes sont à encourager.

Des zones « tampon » autour de ces zones

protégées et fermées aux activités bruyantes peuvent également permettre de s'assurer que les risques de dommages aux animaux sont minimisés [42, 187, 192].

Le cas des cétacés grands plongeurs en général, et des baleines à bec en particulier, mérite une attention spécifique dans la mesure où ces espèces sont difficiles à détecter visuellement, étant donné leur discrétion et le temps très important passé en plongée. Il convient de rappeler qu'il s'agit d'espèces vivant constamment en limite de leurs capacités physiologiques (longues apnées, fortes pressions, etc.) et qui sont d'autant plus sensibles au stress, que celui-ci soit chronique ou résultant d'un cumul d'impacts [192]. **Les zones connues pour être les habitats préférentiels des baleines à bec (tête de canyons, pente du talus continental) sont donc à éviter ou à**

**monitorer de façon très attentive, en particulier lorsque ces zones sont situées non loin des côtes** [42, 190]. À titre d'exemple, la carte ci-dessous (figure 28) matérialise les zones définies comme d'intérêt particulier pour les baleines à bec de Cuvier (*Ziphius cavirostris*). À l'intérieur de ces zones, il est préconisé d'éviter les émissions de sons impulsifs de forte intensité [2].

L'évitement de zones de concentration de proies (et notamment les frayères) est également conseillé afin d'éviter d'impacter leur disponibilité pour les mammifères marins [42].

Les zones d'intérêt écologique (frayères, nourriceries) peuvent différer en fonction des taxons considérés. La valeur patrimoniale des espèces et leur sensibilité aux émissions sonores doivent être prises en

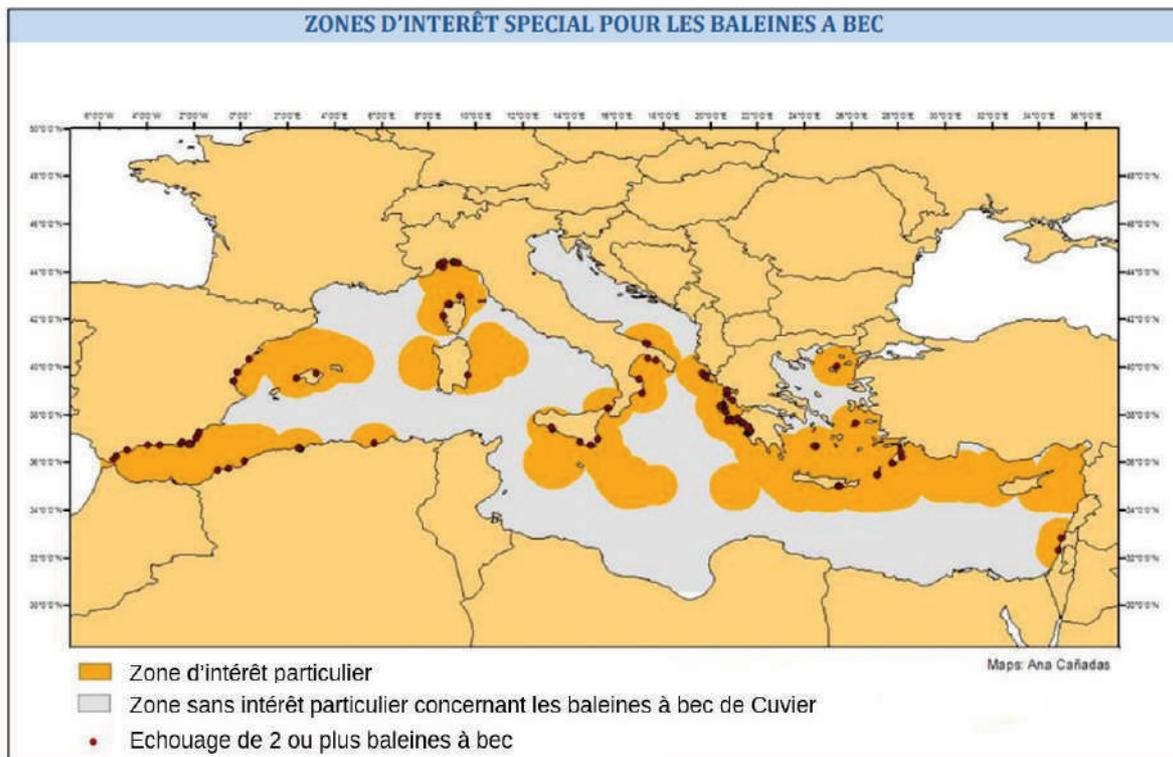


Figure 28 : Localisation des zones d'intérêt spécial pour les baleines à bec de Cuvier en zone ACCOBAMS (d'après [2]).

compte. **Dans le cas où une mesure permettant d'éviter un impact sur un taxon sensible provoquerait des impacts majeurs sur d'autres taxons, une solution de compromis doit être trouvée, et la solution redéfinie en mesure de réduction.**

## 2) Dimensionnement/caractéristiques du projet

L'adaptation du projet au regard des enjeux environnementaux peut être une solution pour éviter des impacts identifiés en amont. L'adaptation peut concerner le **dimensionnement du projet, son emplacement, ou les techniques pressenties pour sa réalisation.**

Une analyse des impacts potentiels en fonction du tracé du projet, des routes envisagées, du nombre de fondations et de leurs types, des types d'ancrages ou des sources acoustiques utilisées doit être effectuée systématiquement pour chaque projet. L'analyse de méthodes et/ou de secteurs alternatifs et l'examen des gains potentiellement obtenus en termes de réduction sonore doivent également être pris en compte. Cela requiert d'avoir une connaissance fine des niveaux sonores générés par chacun des scénarios envisagés et des impacts sur les espèces en présence.

**L'orientation vers les pratiques les moins bruyantes et les zones de moindre impact est à encourager.**

## 3) Suspension des travaux lors des périodes écologiquement importantes

Dans les zones pour lesquelles des périodes particulières de cycles biologiques ont été identifiées, la suspension des travaux bruyants peut être envisagée. Cela peut concerner des zones de frayères, des zones de reproduction ou de mise bas durant lesquelles les nuisances acoustiques peuvent interférer et causer des effets à long terme sur l'équilibre et la pérennité des populations. Lorsque ces zones et périodes sont connues, les travaux doivent être aménagés de façon à en tenir compte.

**Le caractère saisonnier de l'activité n'empêche pas le déroulé du projet, mais le calendrier doit tenir compte de ces périodes de façon à les éviter.**

## 4) Utilisation de techniques d'exploitation/fonctionnement non impactantes

L'utilisation de techniques émettant dans des fréquences, selon des cadences et/ou des durées non impactantes pour les espèces en présence peut constituer une mesure d'évitement des impacts. Si la mesure ne permet pas d'exclure totalement la probabilité d'impact pour les espèces considérées, il s'agira alors d'une mesure de réduction et non plus d'évitement.

Le tableau 13 synthétise les principales mesures d'évitement des impacts pouvant être mises en œuvre lors de travaux en mer.

Tableau 13 : Récapitulatif des principales méthodes d'évitement des impacts (en vert : mesures à mettre en place en amont, en orange : mesures à mettre en place lors des phases de travaux, exploitation et/ou démantèlement).

Mesure	Activité concernée	Mise en œuvre	Efficacité	Limite
Planification spatiale et temporelle	Toutes	Interdire les activités bruyantes dans des zones ou à des périodes reconnues comme sensibles pour les espèces marines (ex. : habitat des baleines à bec, zone de reproduction ou mise bas pour les baleines à bosse, frayères pour les poissons, etc.)	Bonne	Connaissances de ces zones/périodes souvent lacunaires
Adapter le dimensionnement ou les caractéristiques du projet	Toutes	Définir le secteur, les routes empruntées, les méthodes de construction et/ou le dimensionnement du projet de façon à choisir les scénarios de moindre impact	Bonne	Connaissances fines des niveaux sonores générés par chacun des scénarios envisagés
Suspension des travaux lors des périodes écologiquement importantes	Toutes	Aménager le calendrier des travaux de façon à tenir compte des cycles biologiques des espèces en évitant des périodes les plus sensibles (reproduction, mise bas, etc.)	Bonne	Connaissance des cycles biologiques des espèces
Utilisation de techniques non impactantes	Sonars, sondeurs mono ou multifaisceaux, utilisation de répulsifs acoustiques	Choisir autant que possible des techniques qui permettent d'éviter les impacts sur un groupe d'espèces donné en jouant sur les fréquences, les cadences, les durées	Variable selon la technique	Non applicable à tous les groupes d'espèces en même temps

### **Les mesures d'évitement, en bref**

Il existe différentes mesures d'évitement permettant d'écarter un impact négatif lié au bruit sous-marin d'un projet. Pour ce faire, le porteur de projet peut :

- Adapter l'emprise spatiale de son projet et/ou le calendrier des travaux (en évitant les zones/périodes à risque, en dimensionnant au mieux le projet et/ou en stoppant les travaux lors d'observations de mammifères marins/tortues ;
- Adapter son projet (en termes de dimensions et caractéristiques) aux enjeux environnementaux ;
- Suspendre les travaux lors des périodes écologiquement importantes ;
- Utiliser des techniques non impactantes (fréquences et/ou niveaux d'émission en dehors des capacités auditives des espèces potentiellement impactées).

Un compromis devra être trouvé si ces mesures impactaient d'autres taxons. Le porteur peut également définir précisément ses besoins pour affiner l'emplacement de ses travaux ou les techniques utilisées. L'orientation vers l'utilisation de techniques les moins bruyantes est vivement encouragée.

## II. Réduire

Les mesures de réduction sont des mesures visant à réduire les impacts négatifs permanents ou temporaires d'un projet sur l'environnement, en phase de construction, d'exploitation ou de démantèlement. Elles peuvent agir en diminuant la durée ou en ajustant l'emprise saisonnière, en réduisant l'intensité ou l'emprise spatiale de l'impact [124].

La mise en place de mesures de réduction n'est pas systématique. Elle fait suite à une évaluation des impacts et est définie au cas par cas. Les mesures doivent être proportionnées à l'impact, lui-même étant directement lié aux espèces présentes, à l'intérêt écologique de la zone et aux incidences attendues de l'activité.

Les seuils à partir desquels des mesures de réduction sont à mettre en place ne sont aujourd'hui pas définis. Concernant la prospection sismique par canons à air, quelques initiatives ont défini des volumes de sources (en *cubic inch* ou  $\text{in}^3$ ) à partir desquels des mesures sont à mettre en place. En Nouvelle Zélande, le *Department of Conservation* a défini sur cette base 3 catégories de campagnes sismiques en fonction des volumes concernés ( $< 150 \text{ in}^3$ , entre 151 et  $426 \text{ in}^3$  et  $> 427 \text{ in}^3$ ). En dessous de  $150 \text{ in}^3$ , aucune mesure de réduction n'est nécessaire. Pour les volumes supérieurs, des mesures sont requises mais varient en fonction de la catégorie [39]. En France, l'IFREMER s'est auto-réglémenté sur la question et a mené des travaux internes visant à définir également un volume seuil. Ainsi, lors de campagnes utilisant des sources de moins de  $500 \text{ in}^3$ , aucune mesure de réduction n'est mise en œuvre. Pour toute campagne supérieure à  $500 \text{ in}^3$ , un protocole de mitigation est appliqué [46].

L'élargissement de ces travaux aux autres sources de bruit est primordial. Définir les volumes des sources sismiques ou le diamètre des pieux à partir desquels des mesures de réduction sont à mettre en place dépasse le périmètre de ce guide. Il s'agit toutefois d'un prérequis essentiel pour la mise en place de mesures de réduction efficaces et dimensionnées au projet. Le développement de ces travaux de définition de seuils est donc vivement encouragé.

### 1) Planification

À l'instar des solutions d'évitement, la première solution de réduction des impacts consiste à **aménager le calendrier des travaux en fonction des périodes propices aux espèces marines**. Si l'utilisation de l'habitat de certaines espèces est difficile à appréhender, certains secteurs sont connus pour être des lieux de reproduction ou d'alimentation pour les mammifères marins, tortues, poissons pélagiques, etc. Lors de leur présence saisonnière sur ces secteurs, ils sont particulièrement vulnérables aux nuisances. En minimisant les dérangements lors de ces périodes, on diminue la probabilité d'impacter ces espèces.

Il est également important de considérer lors de l'étude d'impact la **présence de zones alternatives** où les espèces potentiellement impactées pourront trouver refuge, et d'intégrer la capacité des individus à rejoindre ces zones.

De même, il est nécessaire **d'envisager en amont du projet les méthodes ou technologies qui pourraient permettre de limiter l'impact sonore**. Pour cela, le choix des techniques et des matériaux de construction est prépondérant.

**La prise en compte des activités déjà existantes** et des projets en cours sur le secteur peut également permettre **d'aménager les calendriers** de façon à réduire les dérangements. En fonction des projets et des intensités, cela peut prendre différentes formes : un projet peu bruyant, ou de plus faible ampleur spatiale, peut avoir intérêt à se dérouler en même temps qu'un projet plus gros/bruyant si celui-ci masque son empreinte sonore ; deux projets d'ampleurs similaires pourront s'étaler dans le temps ou se faire simultanément en fonction des prédictions d'impacts cumulés qui auront été modélisées en amont.

Pour les projets de type EMR, il est préconisé de **penser l'implantation du parc de façon à éviter un éventuel effet barrière** généré par les différents dispositifs. Cela signifie par exemple de veiller à ne pas « fermer » une baie ou un passage restreint, de laisser suffisamment d'espace entre deux éoliennes ou hydroliennes ou de ne pas juxtaposer des parcs.

## 2) Réduire le bruit à sa source

### a) Utiliser des techniques moins bruyantes

Il existe plusieurs solutions pour limiter le bruit généré par des travaux ou activités en mer. Celles consistant à utiliser des techniques moins bruyantes peuvent être classées en trois catégories :

#### Mesures consistant à aménager ou modifier les techniques ou outils employés

- Il est possible **d'augmenter la durée de la frappe** lors de la mise en place de pieux par battage. En allongeant la durée de frappe lors de battage de pieux, on diminue l'amplitude de la contrainte dans le pieu. Cela modifie le spectre du bruit

émis en le décalant vers les basses fréquences [54]. Mais cela peut aussi potentiellement augmenter le niveau d'exposition sonore ( $L_{E,p}$ ). Pour l'instant, cette mesure est limitée à des pieux de petits diamètres (moins de 2 m). Cette mesure est donc à analyser au cas par cas lorsque proposée dans des projets.

- **L'utilisation d'un autre matériau que l'acier** est parfois proposée lors d'activités comme le battage de pieux. En utilisant un matériau alternatif comme les fibres composites, il est possible de réduire le rayonnement des surfaces latérales et donc de réduire le bruit. Une réduction de l'ordre de 20 dB ( $L_{p,pk}$ ) est annoncée par certains auteurs [157] mais la viabilité économique de telles solutions pose question.
- Pour les travaux de prospection par sismique ou sondeur, la préconisation principale consiste à **restreindre les émissions aux zones d'études**, c'est-à-dire d'éteindre les sources lorsque les acquisitions ne sont pas nécessaires (changement de ligne, transit sur zones, etc.). Pour la sismique, Il est également recommandé d'utiliser la source de plus petit volume (pour les canons à air) pour atteindre les objectifs du levé et de réduire autant que possible la proportion d'énergie qui se propage horizontalement [42, 185].
- La réduction des niveaux sonores générés par les navires passe par **l'adaptation du design du navire**, notamment en adaptant le profil de la coque et de l'hélice. Cette mesure devant intervenir en amont de la construction, elle concerne peu les navires déjà existants. Des adaptations peuvent tout de même leur être appliquées sous réserve qu'elles soient viables économiquement. Il est donc recommandé que les États et les armateurs passent en revue leur flotte

marchande afin de définir quels navires seraient les plus à même de bénéficier d'aménagements pour réduire efficacement leurs niveaux sonores [84]. Des outils existent pour cela comme l'EEDI (*Energy Efficiency Design Index*) développé par l'Organisation maritime internationale (OMI).

D'après une étude datant de 2014 [102], rendre plus silencieux les navires les plus bruyants est le meilleur moyen de réduire le bruit lié au trafic maritime. **La cavitation est la source majeure de bruit rayonné.** La cavitation excessive générée par ces navires est souvent due à une mauvaise conception des pièces immergées. Des solutions de réajustement pour les navires déjà construits existent ou se développent<sup>20</sup>. Les hélices doivent ainsi être conçues de manière à réduire les phénomènes de cavitation. Le design de la coque, *via* l'écoulement de l'eau vers l'hélice, joue également un rôle dans la réduction de la cavitation.

- Le choix de la machinerie et l'optimisation de son emplacement dans la coque peuvent également contribuer à réduire le bruit rayonné. **La propulsion diesel-électrique** a été identifiée comme une configuration intéressante pour réduire le bruit et les vibrations et doit être encouragée lorsqu'elle est envisageable.

Des mesures *in situ* doivent parallèlement être réalisées pour évaluer les gains obtenus par les nouveaux designs de coque, d'hélice et de propulsion [102].

- Outre le design spécifique, la maintenance régulière de certains équipements comme les hélices et la coque permet de réduire le bruit. En ôtant le *biofouling* et les rugosités de ces surfaces, on limite la résistance et les frottements qui contribuent aux phénomènes de cavitation.
- Enfin **la réduction de la vitesse** en dessous de la vitesse de création de phénomènes de cavitation permet également de diminuer les niveaux sonores et constitue une mesure simple et largement applicable [9, 85]. De récents travaux ont ainsi montré qu'une diminution de 10 % de la vitesse de la flotte mondiale réduirait de 40 % l'énergie acoustique produite par le trafic maritime dans le monde [101]. Les gains sont d'autant plus importants que cette mesure permet également de baisser les émissions de gaz à effet de serre et le risque de collision avec les grands cétacés. **La réduction de la vitesse des navires apparaît donc comme une mesure adaptée, facile à appliquer et efficace et dont la mise en place à grande échelle est vivement préconisée.**

### La norme ISO 17208-1:2016

Le développement de standards et de normes pour mesurer le bruit rayonné par les navires et la réduction de leurs émissions acoustiques est à encourager pour fixer des références et harmoniser les pratiques. Dans cette optique, la norme ISO 17208-1:2016 décrit les procédures à mettre en place et les grandeurs à utiliser pour mesurer le bruit sous-marin généré par les navires, notamment en eaux profondes.

<sup>20</sup> Voir Leaper *et al.*, 2014 [102] pour plus de détails.

### Mesures consistant à choisir d'autres techniques que celles classiquement utilisées afin de réduire les émissions acoustiques

- La technique de **vibrofonçage** consiste à installer des pieux en combinant enfoncement par oscillation et enfoncement par battage. Pour cela, le pieu est soumis à un mouvement oscillatoire à une fréquence de 20 Hz au moyen de poids en rotation. Ces mouvements vibratoires permettent la pénétration dans le substrat. Le battage n'est alors utilisé que pour finir d'enfoncer le pieu dans sa position finale. Cette technique permet ainsi de réduire le temps de battage et donc le niveau d'exposition sonore. Les gains d'utilisation de cette technique sont de l'ordre de 15 à 20 dB  $L_{E,p}$ . Toutefois, le bruit généré par le vibrofonçage est un bruit continu, difficile à comparer directement aux bruits impulsionnels du battage de pieux [100]. L'utilisation **du forage en remplacement ou en complément du battage de pieux** est également une piste développée par plusieurs sociétés proposant des technologies adaptées aux différents types de pieu et de sédiment. Le forage est déjà utilisé pour un certain nombre de substrats pour lesquels le battage est difficile (roche dure ou calcaire par exemple).
- Pour les parcs éoliens, le choix de **fondation gravitaire** plutôt que monopieu peut également représenter une solution pour réduire le bruit. Elle consiste à placer au fond de l'eau des structures en béton directement sur le sol ou sur une couche de nivellement, qui est ensuite remplie de matériaux de ballastage. Elle ne nécessite donc pas de forage ou de battage de

pieux, et induit donc en principe des niveaux sonores beaucoup plus faibles. Cependant, les fondations gravitaires nécessitent de préparer le sol (aplanissement, nivellement, etc.), ce qui peut également engendrer des nuisances sonores [25] liées aux techniques utilisées (dragage notamment).

- Pour la prospection sismique, l'utilisation de **technologies alternatives** comme Marine Vibroseis est émergente [47]. Avec cette technique, des fréquences plus basses et des signaux modulés sont utilisés, permettant d'abaisser le niveau de pression sonore ( $L_{p,pk}$ ) par rapport à une source classique, pour un niveau d'exposition sonore ( $L_{E,p}$ ) équivalent. Cependant, l'utilisation de signaux impulsionnels très basse fréquence et d'une durée beaucoup plus longue qu'une source classique peut générer des impacts plus importants pour la faune marine. La source sismique devient alors comparable à un sonar militaire très basse fréquence. Des études sont encouragées pour étudier les impacts de ces nouvelles méthodes.

### Mesures consistant à mettre en place des actions incitatives

Ces mesures ne constituent pas elles-mêmes une solution pour réduire le bruit mais elles encouragent les compagnies industrielles à chercher et adopter de telles solutions. L'initiative du port de Vancouver au Canada (programme ECHO, visant à mieux comprendre et gérer les impacts du trafic maritime sur les mammifères marins) est un exemple de projet transdisciplinaire et collaboratif pour réduire le bruit généré par les navires. Certaines compagnies de certification ont développé des indicateurs de performance sur la base du volontariat

pour les ports, les armateurs ou les terminaux incluant la réduction du bruit (*Green Marine* aux USA). De telles initiatives, volontaristes mais conseillées et économiquement intéressantes (bonus, réduction de la consommation de carburant, etc.), apparaissent comme une bonne méthode pour rallier les différents acteurs autrement que par une réglementation stricte. D'une façon générale, une analyse des différentes techniques utilisables et des niveaux de bruit qu'elles génèrent doit être

menée pour chaque projet. Le choix de la méthode doit se faire à la lumière de ses impacts attendus. **L'orientation vers la pratique la moins bruyante est encouragée, sous réserve qu'elle ne soit pas plus impactante sur d'autres plans (destruction des fonds, pollution, etc.).**

Les mesures de réduction de bruit liées à des adaptations ou à des modifications de techniques sont récapitulées dans le tableau 14 ci-après.

PARTIE 3 :

Procédures ou technologies disponibles pour éviter, réduire ou compenser les impacts des émissions sonores sur la faune marine

Tableau 14 : Tableau récapitulatif des mesures de réduction liées à des adaptations ou modifications de techniques  
(en vert : mesures à mettre en œuvre en amont ; en orange : mesures à mettre en œuvre lors des phases de travaux, exploitation et/ou démantèlement).

Mesure	Activité concernée	Mise en œuvre	Efficacité	Limite
Augmenter la durée de la frappe	Battage de pieux	Augmenter la durée de la frappe lors du battage de pieux	Inconnue	Abaisse la fréquence des émissions, et augmente potentiellement le niveau $L_{E,p}$
Changer de matériaux	Battage de pieux	Utiliser un autre matériau que l'acier (fibres composites)	Inconnue	Viabilité économique et résistance du matériau alternatif à moyen/long terme
Restreindre les émissions	Sismique	Restreindre les émissions aux zones étudiées, utiliser la plus petite source nécessaire pour réaliser l'étude	Bonne	Procédure de démarrage à reprendre à chaque début de ligne
Design des navires et de la propulsion	Transport maritime	Conception des coques et hélices de façon à réduire la cavitation, choix de la propulsion	Bonne	S'adresse peu aux navires déjà construits
Maintenance des navires	Transport maritime	Entretien des coques et hélices pour réduire les frottements	Inconnue	-
Réduction de la vitesse des navires	Transport maritime	Réduire la vitesse des navires en dessous de la vitesse de cavitation	Bonne	Augmentation des délais
Vibrofonçage, forage	Battage de pieux	Utilisation de la technique de vibrofonçage ou de forage en complément ou remplacement du battage de pieux	Bonne	Connaissances manquantes sur l'impact du bruit continu
Fondation gravitaire	Battage de pieux	Choix de fondations de type gravitaire en remplacement de fondation monopieu	Bonne	Impact de la préparation des sols
Marine Vibroseis	Sismique	Technologie alternative Marine Vibroseis au lieu des canons à air classique	Inconnue	Son très basse fréquence comparable aux signaux des sonars militaires
Normes, standardisations	Toutes	Mise en place de normes pour la mesure du bruit	Bonne	Nécessité d'un consensus scientifique ; cadre d'application
Actions incitatives	Toutes	Mise en place d'actions incitatives pour pousser les compagnies à développer ou adopter des mesures de réductions du bruit	Bonne	Contreparties financières

### b) Techniques visant à isoler/confiner la source de bruit

**Les rideaux de bulles** représentent la méthode de réduction du bruit à la source la plus largement répandue pour les sources sonores fixes (battage de pieux et vibrofonçage, forage, usage d'explosifs principalement). Le principe est simple : de l'air comprimé est injecté dans des tuyaux perforés, l'air ainsi évacué forme un nuage de bulles. Le contraste d'impédance acoustique causée par l'interface air/eau entraîne la diffusion des ondes sonores à travers les bulles d'air, et la réflexion des ondes au niveau du rideau ainsi formé permet de réduire le bruit généré [100].

Plusieurs technologies existent, dont certaines déjà commercialisées. Globalement, on distingue deux familles : les grands rideaux de bulles disposés autour d'un chantier et les petits rideaux de bulles disposés autour d'un point précis (d'un pieu à battre par exemple). Le dispositif est parfois doublé, voire triplé, pour augmenter la réduction.

L'utilisation de rideaux de bulles a été largement testée lors de différents chantiers. Si la maturité de la technique est bonne et les réductions obtenues sont intéressantes (jusqu'à 18 dB), la contrainte principale reste le courant de marée. L'efficacité de cette méthode est de fait liée aux conditions environnementales (bathymétrie, état de mer, courant, etc.).

Le système de **bulles encapsulées** (*Hydro Sound Damper* ou HSD) est une variante du rideau de bulles dans laquelle un filet parsemé de ballons remplis d'air et d'éléments polymères est déployé autour de la source de bruit. L'objectif de ce système est d'éviter la dérive des bulles avec le courant de marée. De plus, la fréquence

d'absorption maximale est modifiable en changeant la taille des ballons et leur composition. Ce système reste toutefois tributaire des conditions météorologiques, et ne peut être déployé en présence de courant fort ou de houle trop importante.

D'autres variantes existent, comme le **rideau de bulles confiné**, qui consiste à enfermer le rideau de bulles dans une enveloppe cylindrique. Ces dispositifs sont proches du concept de blocs isolants (voir ci-après).

Le concept des **blocs isolants** consiste à confiner la source de bruit (pieu à battre dans la plupart des cas) dans des enveloppes cylindriques en acier ou en plastique recouvertes de matériaux isolants pour réduire le bruit. Certaines technologies incluent un rideau de bulles à l'intérieur des enveloppes.

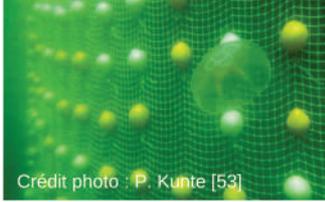
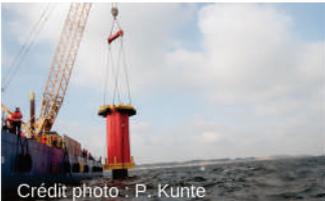
Les **atardeaux** sont des blocs isolants visant à créer un espace sans eau autour du pieu. Le pieu est placé à l'intérieur d'une coque en acier plus grande que son propre diamètre et des pompes évacuent l'eau entre les 2 structures. L'onde reste alors confinée dans la coque de par la différence d'impédance entre l'air et l'eau.

Ces techniques ont été déployées sur plusieurs parcs éoliens en mer du Nord (Riffgat et Aarhus Bight par exemple) et affichent des réductions de bruit intéressantes (jusqu'à 23 dB  $L_{E,p}$  [100]).

Ces deux dernières techniques (blocs isolants et atardeaux), plus récentes et moins répandues que les rideaux de bulles, ont l'avantage d'être moins influencées par le courant que les rideaux de bulles, et peuvent donc être des alternatives intéressantes.

Les caractéristiques de l'ensemble de ces techniques sont résumées dans le tableau 15.

Tableau 15 : Récapitulatif des principales technologies de rideaux de bulles et blocs isolants existantes (d'après [2]).

Technologies	Capacité de réduction du bruit	Applications possibles	Maturité	Réf. bibliographiques
<b>Grand rideau de bulles</b>  Crédit photo : Trianel GmbH/Lang	Rideau de bulles simple : 10 à 15 dB $L_{E,p}$ Rideau double : 15 à 18 dB $L_{E,p}$	Battage de pieux Forage Dragage Explosion	Commercialisé, nombreuses utilisations à travers le monde	15, 100
<b>Petit rideau de bulles</b>  D'après JACCOBAMS, 2016	4 à 14 dB $L_{E,p}$	Battage de pieux Forage	Technologie éprouvée sur différents chantiers	15, 100
<b>Bulles encapsulées</b>  Crédit photo : P. Kunte [53]	4-13 dB $L_{E,p}$	Battage de pieux Forage Dragage Explosion	Technologie testée sur plusieurs parcs éoliens	15, 100
<b>Bloc isolant</b>  Crédit photo : P. Kunte	Sans rideau de bulles : 10 à 14 dB $L_{E,p}$ Avec rideau : 17 à 23 dB $L_{E,p}$	Battage de pieux Forage	Commercialisé, tests dans différents parcs éoliens	15, 100
<b>Batardeau (Cofferdam)</b>  Crédit photo : K. Thomsen	10 à 23 dB $L_{E,p}$	Battage de pieux Forage	Technologie éprouvée sur quelques chantiers	15, 100

### 3) Procédures de suivis de présence et d'éloignement

Des procédures standardisées nationales ou internationales ont été initiées par un certain nombre de pays à travers le monde pour proposer des mesures de mitigation lors d'activités bruyantes. Ces guides sont généralistes ou focalisés sur une activité en particulier (sismique, éolien, sonar, etc.).

En 1995, le guide du JNCC au Royaume-Uni a été le premier guide national fixant des lignes directrices et les mesures de mitigation à mettre en œuvre pour la sismique. Bien que des variations soient notables entre les guides édités par la suite par d'autres régions et pour d'autres activités, la plupart des mesures sont inspirées de ce guide. De nombreuses mesures ont donc été empruntées à ce guide « pionnier » sans pour autant être applicables ou adaptées à d'autres zones [146, 187, 191]. De plus, en tant que « pionnier », ce guide repose essentiellement sur des mesures de bon sens plus que sur des bases scientifiques établies [146]. Il a néanmoins fixé les bases de la plupart des procédures actuelles de par le monde.

#### a) Définition et calcul d'une zone d'exclusion

Une zone d'exclusion est une zone d'un rayon prédéfini autour de la source de bruit. Il s'agit de la zone considérée comme dangereuse pour les espèces marines concernées.

De nombreux guides recommandent une zone d'exclusion fixe de 500 m de rayon autour de la source sonore. Si cette zone peut être suffisante (voire même supérieure selon les sources mises en œuvre) pour éviter les lésions, des perturbations comportementales et du masquage acoustique sont possibles dans une zone plus

étendue [158]. Des études rapportent ainsi des réactions significatives observées au-delà de la zone arbitrairement définie des 500 m [11, 27, 69, 172].

Certains guides/recommandations proposent donc un calcul de la zone d'exclusion à partir des seuils auditifs de perturbation comportementale, ce qui semble beaucoup plus protecteur. Or cela pose deux problèmes majeurs : d'une part, cela implique que ces valeurs de seuils existent et qu'elles soient fiables ; d'autre part, les zones de mitigation ainsi définies seront plus larges que celles définies à partir des seuils de lésions. La question de la possibilité d'assurer une surveillance visuelle d'une zone de plusieurs km peut alors se poser [34].

D'autres schémas d'organisation sont alors à envisager comme de placer des observateurs sur d'autres navires ou le recours à des suivis aériens pour localiser les animaux sur une plus large échelle [94, 140, 146]. Les suivis aériens sont notamment utilisés dans certaines régions (Hawaii, Californie, Australie) lors d'exercices navals incluant l'utilisation de sonars [42].

En conclusion, il est prématuré, en l'état actuel des connaissances et des techniques, de définir des zones d'exclusion basées sur les impacts comportementaux. Pour les projets susceptibles de causer des dommages permanents ou temporaires aux espèces marines, il est donc recommandé d'appliquer une zone d'exclusion adaptée aux enjeux et aux caractéristiques du site et du projet, correspondant *a minima* à la zone de risque de dommages physiologiques (périmètre PTS) des espèces présentes, assortie d'un facteur de précaution à définir en fonction des conditions environnementales (zones, périodes, rôle écologique, etc.), **sous réserve que le rayon minimal soit de 500 m.**

L'initiative prise par la Nouvelle-Zélande, consistant à augmenter la taille de la zone d'exclusion en présence de jeunes semble pertinente au vu de leur sensibilité plus élevée [34]. Il est donc recommandé d'augmenter ce facteur de précaution dans les zones/périodes propices à la présence de jeunes individus et de définir une zone tampon. Une zone d'alerte peut également être définie autour de la zone d'exclusion, et constituer une zone dans laquelle un animal vu est susceptible de pénétrer dans la zone d'exclusion (figure 29).

#### b) Pre-watch

Le *pre-watch*, ou surveillance pré-travaux, est **une surveillance minutieuse de la zone entourant le chantier visant à s'assurer qu'aucune espèce potentiellement impactée par le bruit (en général mammifères marins et/ou tortues) ne s'y**

trouve avant le début des émissions sonores. Il s'agit d'une surveillance visuelle à 360° et/ou acoustique menée par des observateurs de faune marine (MMO pour *Marine Mammal Observer*) et/ou des opérateurs en acoustique passive (PAM pour *Passive Acoustic Monitoring*). Cette mesure est proposée par l'ensemble des guides de bonnes pratiques. La zone à surveiller peut correspondre à la zone d'exclusion précédemment définie ou être plus large et englober également une « zone d'alerte ». La durée du *pre-watch* va généralement de 30 min (profondeur < 200 m) à 60 min (profondeur > 200 m), durant lesquelles aucune observation/détection ne doit être effectuée pour que les travaux puissent commencer. Dans les zones où peuvent potentiellement être rencontrés des cétacés grands plongeurs (cachalots, baleines à bec), une durée de 60 min est

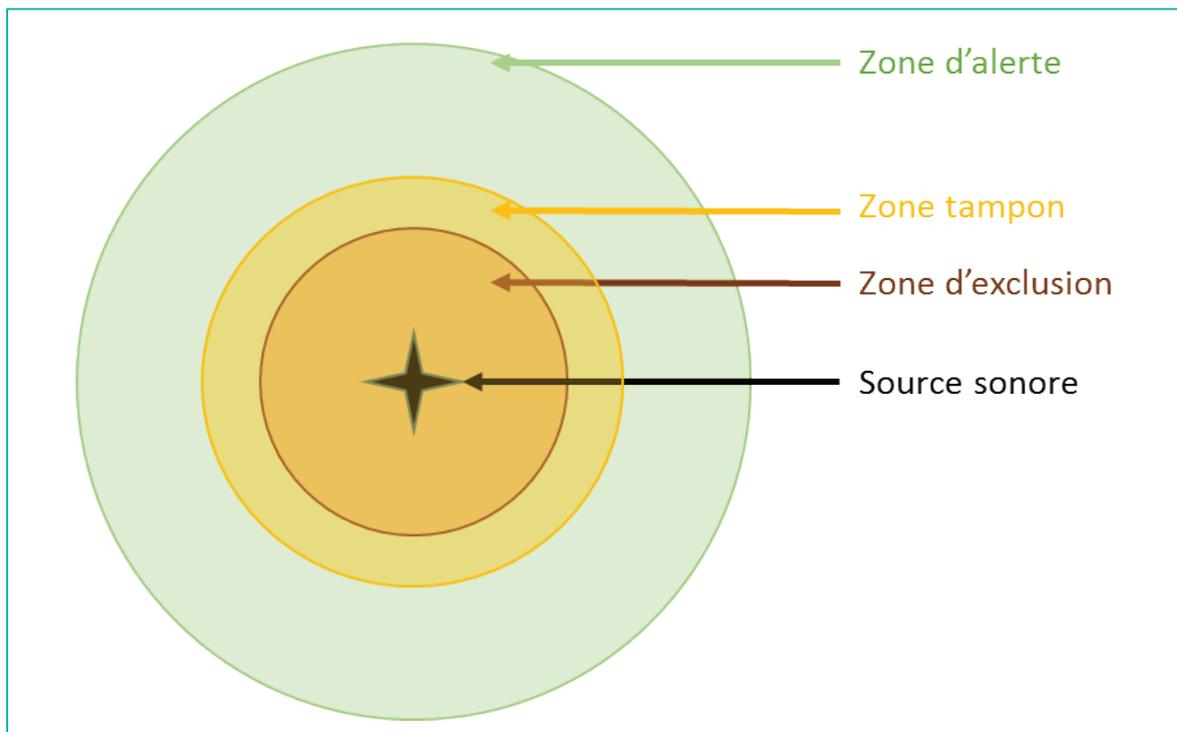


Figure 29 : Zones définies autour de la source sonore.

fortement conseillée par la plupart des recommandations (voire 120 min pour ACCOBAMS). En cas de présence d'animaux dans ce laps de temps, le début des émissions sonores est reporté.

Le *pre-watch* implique que les conditions météorologiques permettent de surveiller visuellement la zone d'exclusion et ses alentours. Cela signifie que les MMOs doivent être suffisamment haut, avoir une vue dégagée et qu'ils peuvent observer au moins dans un rayon de 1 km autour de la plateforme d'observation. De la même façon, il convient de s'assurer de la portée du ou des hydrophones afin de s'assurer de couvrir la zone à surveiller.

**Il est donc recommandé de mettre en place un *pre-watch* visuel et/ou acoustique pour les activités bruyantes<sup>21</sup> de l'ordre de 60 min pour les zones de profondeur supérieure à 200 m et/ou susceptibles d'abriter des cétacés grands plongeurs et de 30 min pour les zones de moins de 200 m de profondeur.**

### c) *Soft-start et ramp-up*

Le *soft-start* et le *ramp-up* sont des procédures d'augmentation progressive du niveau sonore qui visent à éloigner les espèces marines se trouvant au voisinage des sources émettrices de façon à éviter tout risque de dommage physiologique. Le *soft-start* consiste à démarrer progressivement l'activité (mise en route graduelle des canons à air en cas de sismique, augmentation progressive de la vitesse du rotor en cas de forage ou de la cadence de frappe pour le battage de pieux par exemple) jusqu'à atteindre le niveau maximum d'émission. Lorsque cela n'est

pas possible (dans le cas d'utilisation d'explosifs, ou de machines dont il est impossible de régler l'intensité), la technique *ramp-up* est utilisée : du bruit va être émis dans le milieu par un autre moyen, avec un niveau d'émission croissant, jusqu'à atteindre le niveau sonore attendu. Ce n'est qu'une fois ce niveau atteint que la source sonore sera mise en œuvre.

La durée de la procédure doit être suffisamment longue pour provoquer un éloignement significatif, mais pas pour provoquer une habitude. Si l'efficacité, la durée et la marche à suivre de ces procédures font l'objet de débats [48, 191], elles restent néanmoins une mesure de référence dans la plupart des chantiers et sont recommandées par l'ensemble des guides ou préconisations de bonnes pratiques. La durée préconisée est généralement de 20 à 40 min pendant laquelle le niveau de bruit va augmenter progressivement. Pour obtenir l'effet répulsif escompté, certains guides préconisent une augmentation par pas de 6 dB jusqu'à atteindre la puissance maximale attendue [28].

**La mise en place d'une procédure de *soft-start* ou *ramp-up* d'une durée de 20 à 40 min est recommandée dès lors que celle-ci peut être techniquement mise en place.**

### d) *Surveillance visuelle pendant les émissions*

La surveillance visuelle est la méthode d'atténuation la plus commune, présente dans tous les guides, recommandations ou protocoles généralement appliqués en cas d'activités bruyantes (figure 30). Cependant, les modalités varient largement, que cela

<sup>21</sup> Le seuil à partir duquel une activité bruyante requiert la mise en place de mesure de mitigation n'est pas défini ici. Pour rappel, pour la prospection sismique par canons à air, l'IFREMER a défini le seuil de 500 in<sup>3</sup> comme volume d'air à partir duquel des mesures sont mises en œuvre.



Figure 30 : Observateur de faune marine en poste  
(crédit photo : Cohabys).

soit en nombre d'observateurs ou concernant le caractère continu ou non de la surveillance.

Si son efficacité dépend fortement des observateurs et des conditions météorologiques, la surveillance visuelle reste une mesure pertinente. On considère généralement qu'au-delà de 4 Beaufort (vent supérieur à 16 nd), les conditions ne permettent plus d'assurer une surveillance efficace. La hauteur de houle et la visibilité sont également des éléments à prendre en compte. De plus, l'observation visuelle ne peut être assurée que de jour. La complémentarité d'un système de surveillance par acoustique passive permet de palier en partie ces limitations.

L'utilisation d'imagerie thermique ou infrarouge peut permettre de prolonger la surveillance de nuit. Si cette technologie n'est aujourd'hui efficace que dans le cas d'animaux de grande taille et en zone polaire ou subpolaire, il est probable que cela deviendra un outil prometteur dans les années à venir.

Le recours à des observateurs expérimentés et indépendants est primordial pour assurer

une surveillance et des prises de décision impartiales, efficaces et rapides [144, 187]. Il convient donc d'être vigilant sur les compétences et expériences des observateurs. Certaines régions imposent des certifications obligatoires pour pouvoir travailler dans les eaux sous leur juridiction de façon à s'assurer de la qualité des observateurs. Le Royaume-Uni impose ainsi la certification MMO JNCC pour travailler dans ses eaux ; dans le golfe du Mexique, la formation PSO du BOEM est nécessaire. La Nouvelle-Zélande impose la formation du Département de la Conservation (NZ) et certains pays méditerranéens la formation MMO dispensée sous l'égide d'ACCOBAMS.

**Pour assurer une surveillance attentive, les observateurs doivent pouvoir avoir des temps de pause. Il est donc recommandé d'avoir recours à au moins trois personnes. Deux observateurs sont ainsi en poste simultanément et peuvent organiser des rotations.**

**Trois personnes sont ainsi recommandées pour réaliser un suivi de la faune marine pendant les opérations bruyantes<sup>22</sup>. Une standardisation des protocoles issus des travaux de références (JNCC, ACCOBAMS, etc.) est encouragée. Le recours à des observateurs qualifiés, expérimentés voire certifiés est également essentiel.**

Outre leur rôle de mitigation, les observations visuelles peuvent également jouer un rôle important dans le suivi des impacts du chantier. Sans suffire à constituer un suivi, elles peuvent permettre d'apporter des éléments sur la fréquentation de la mégafaune marine à proximité immédiate du chantier.

<sup>22</sup> Le seuil à partir duquel une activité bruyante requiert la mise en place de mesure de mitigation n'est pas défini ici. Pour rappel, pour la prospection sismique par canons à air, l'IFREMER a défini le seuil de 500 in<sup>3</sup> comme volume d'air à partir duquel des mesures sont mises en œuvre.

### e) Surveillance acoustique

**La surveillance acoustique en temps réel** doit être considérée comme un outil complémentaire aux observations visuelles, dans la mesure où elle permet de détecter des mammifères marins lorsque les conditions d'observations sont mauvaises pour les observateurs (de nuit ou lorsque les conditions météo sont mauvaises). Différents systèmes existent, depuis des systèmes PAM tractés derrière les navires sismiques aux réseaux de bouées munies d'enregistreurs autonomes. Les systèmes PAM permettent *via* des algorithmes de détections et/ou l'écoute par un opérateur PAM de détecter en temps réel les signaux de cétacés émis à proximité des hydrophones. Des logiciels comme PAMGuard, Ishmael ou les logiciels propres aux différents fournisseurs de solutions permettent de visualiser les détections.

Cependant, la méthode a encore ses limites. Il est ainsi difficile de discriminer certaines espèces sur la seule base de leurs signaux et de localiser précisément la position de l'animal détecté. Si certaines espèces émettent des signaux dont la portée est faible (moins de 200 m pour les marsouins par exemple), d'autres comme les baleines ou les cachalots peuvent être audibles sur

des kilomètres. La fiabilité des algorithmes de détections et de classification automatique manque aujourd'hui de robustesse. Il convient également de vérifier que les algorithmes utilisés soient adaptés à la zone d'étude.

Contrairement aux observations visuelles, il existe très peu de protocoles détaillés sur l'utilisation du PAM comme outil de monitoring dans le cadre de chantiers offshore. Son utilisation est souvent encouragée (JNCC, ACCOBAMS) sans qu'une procédure ne soit réellement détaillée.

À l'instar des observations, la qualification des opérateurs PAM est cruciale. Il est impératif que ces derniers soient des spécialistes, formés et forts de nombreuses expériences dans l'utilisation de tels systèmes.

Pour monitorer en continu une zone d'exclusion, il est nécessaire que le nombre d'opérateurs PAM et le nombre d'hydrophones soient cohérents avec la tâche à accomplir et le nombre de MMOs présents à bord.

De nombreuses innovations technologiques sont en cours dans ce domaine que cela soit pour la localisation des animaux ou la détection automatique des signaux bioacoustiques. Cet outil est donc amené à évoluer très rapidement.

De même que pour les observations

### La surveillance visuelle et acoustique

La surveillance visuelle de la zone d'étude est communément préconisée en cas de recours à des activités particulièrement bruyantes (prospection sismique, forage, battage de pieux, utilisation d'explosifs, etc.). Elle peut efficacement être complétée par une surveillance acoustique, la nuit ou en cas de mauvaises conditions météorologiques.

Ces surveillances doivent être réalisées par des opérateurs qualifiés, expérimentés voire certifiés (*Marine Mammal Observers* ou MMOs pour la surveillance visuelle et *Passive Acoustic Monitoring operators* ou PAM pour la surveillance acoustique). Certains organismes comme l'ACCOBAMS proposent des certifications pour ces opérateurs.

visuelles, le monitoring acoustique peut contribuer au suivi des impacts du chantier en renseignant sur la fréquentation des cétacés à proximité immédiate du chantier et sur les niveaux d'émission en temps réel.

**L'utilisation d'un système PAM lors des opérations bruyantes<sup>23</sup> est recommandée en complément d'observations visuelles. Le recours à des opérateurs qualifiés, expérimentés voire certifiés est essentiel.**

#### **f) Arrêt des travaux en cas de présence d'animaux**

Les guides et procédures de bonnes pratiques ne sont pas unanimes sur l'arrêt des travaux en cas de présence d'animaux dans la zone d'exclusion : (i) certains guides préconisent d'arrêter les travaux et de ne les reprendre que lorsque les animaux seront sortis de la zone d'exclusion (après avoir effectué à nouveau un *pre-watch* et un *soft-start*) ; (ii) d'autres recommandent de ne les arrêter que si les animaux entrant dans la zone d'exclusion sont des espèces sensibles (définies au préalable) ; (iii) d'autres enfin considèrent que le fait que des animaux entrent dans la zone d'exclusion alors que les activités sont en cours signifie que le bruit généré ne les dérange pas. Aucun arrêt n'est donc nécessaire [42, 191]. Étant donné que la définition de la zone d'exclusion est généralement basée sur les seuils connus de tolérance (seuils de dommage physiologique, augmentés d'une marge de précaution), que les animaux peuvent être désorientés lors de l'exposition au bruit et que l'efficacité des mesures d'éloignement comme le *soft-start* n'est pas connue, **il est recommandé d'arrêter les**

**travaux en cas d'intrusion d'animaux dans la zone d'exclusion. Cela implique qu'une zone d'exclusion soit définie en amont pour les différentes espèces désignées comme sensibles au bruit généré. La détection des animaux est alors effectuée par les observations visuelles et le monitoring acoustique.**

Ce type de mesure peut ralentir le projet et allonger les délais. Mais cela permet de réduire le risque d'impact temporaire ou permanent sur les animaux s'aventurant en zone potentiellement dangereuse. Cette contrainte devrait donc être intégrée en amont du projet de façon à en tenir compte dans la planification et la budgétisation du projet.

Le logigramme présenté sur la figure 31 détaille un exemple de protocole pouvant être mis en place pour réduire les impacts sur la faune marine dans le cadre de réalisation de travaux en mer.

#### **g) Répulsifs acoustiques**

Il n'est évoqué ici que l'utilisation des répulsifs acoustiques comme mesure de réduction du risque d'impact du bruit dans le cadre de chantiers bruyants. Leur utilisation dans le cadre des pêcheries n'est pas abordée.

Deux principaux types de répulsifs acoustiques peuvent être utilisés pour faire fuir des animaux de zones potentiellement dangereuses : les pingurs, qui émettent généralement entre 2,5 et 100 kHz, et les effaroucheurs à phoques (*seal scarer*) qui émettent entre 8 et 17 kHz. Les deux types d'instruments, initialement destinés à éloigner les animaux des pêcheries et à réduire les captures accidentelles, sont de

<sup>23</sup> Le seuil à partir duquel une activité bruyante requiert la mise en place de mesure de mitigation n'est pas défini ici. Pour rappel, pour la prospection sismique par canons à air, l'IFREMER a défini le seuil de 500 in<sup>3</sup> comme volume d'air à partir duquel des mesures sont mises en œuvre.

plus en plus utilisés lors de constructions de parcs éoliens en mer [20] ou d'aménagements portuaires. Les effaroucheurs à phoques sont ainsi fréquemment recommandés comme mesure d'éloignement pour les marsouins communs car jugés par certains auteurs moins impactants que les pingons pour l'espèce du fait de leurs fréquences d'émissions [20]. Si leur efficacité a été prouvée, certains auteurs estiment que ces dispositifs éloigneraient les mammifères marins sur des distances beaucoup plus importantes que ce qui était attendu [22] et pourraient participer à l'exclusion des animaux de leurs habitats favorables en augmentant voire dépassant l'impact du chantier [38, 189].

**Si les répulsifs acoustiques ont montré**

**leur efficacité sur certains chantiers, ils ne peuvent toutefois pas être recommandés sur tous les chantiers et leur utilisation ne peut pas être généralisée. Comme pour les autres sources acoustiques, il convient de ne pas émettre à des niveaux supérieurs aux besoins. Pour les espèces très haute fréquences en particulier, la prudence est de mise. La conduite d'un *soft-start* et d'une surveillance minutieuse de la zone de chantier suffit généralement à éloigner les animaux des zones potentiellement impactées.**

Les procédures de suivis de présence et d'éloignement sont synthétisées dans le tableau 16 ci-après.

### Les mesures de réduction du bruit, en bref

Pour réduire les impacts du bruit lors d'activités bruyantes, on distingue 3 catégories de mesures :

- Des mesures visant à planifier les travaux hors des périodes ou zones écologiquement critiques ;
- Des mesures visant à réduire le bruit à sa source ;
- Des mesures visant à éloigner les espèces sensibles des zones potentiellement dangereuses pour elles.

Les deux premières catégories sont à privilégier. Il est en effet plus conservateur de chercher à réduire le bruit avant qu'il ne soit impactant plutôt que d'éloigner les animaux de zones potentiellement importantes pour leurs cycles biologiques. Ce type de mesures est également quantifiable en mesurant le son généré, alors qu'il est plus difficile d'évaluer les techniques d'éloignement.

**La surveillance de la présence d'animaux vient ensuite compléter ces mesures. Cette surveillance peut être visuelle et acoustique et doit être assurée par des opérateurs qualifiés et expérimentés, voire certifiés.**

Le choix des mesures à mettre en œuvre doit être cohérent au regard des impacts attendus. Le porteur de projet se doit d'analyser les différentes mesures disponibles et de les intégrer dans la planification et le budget du projet.

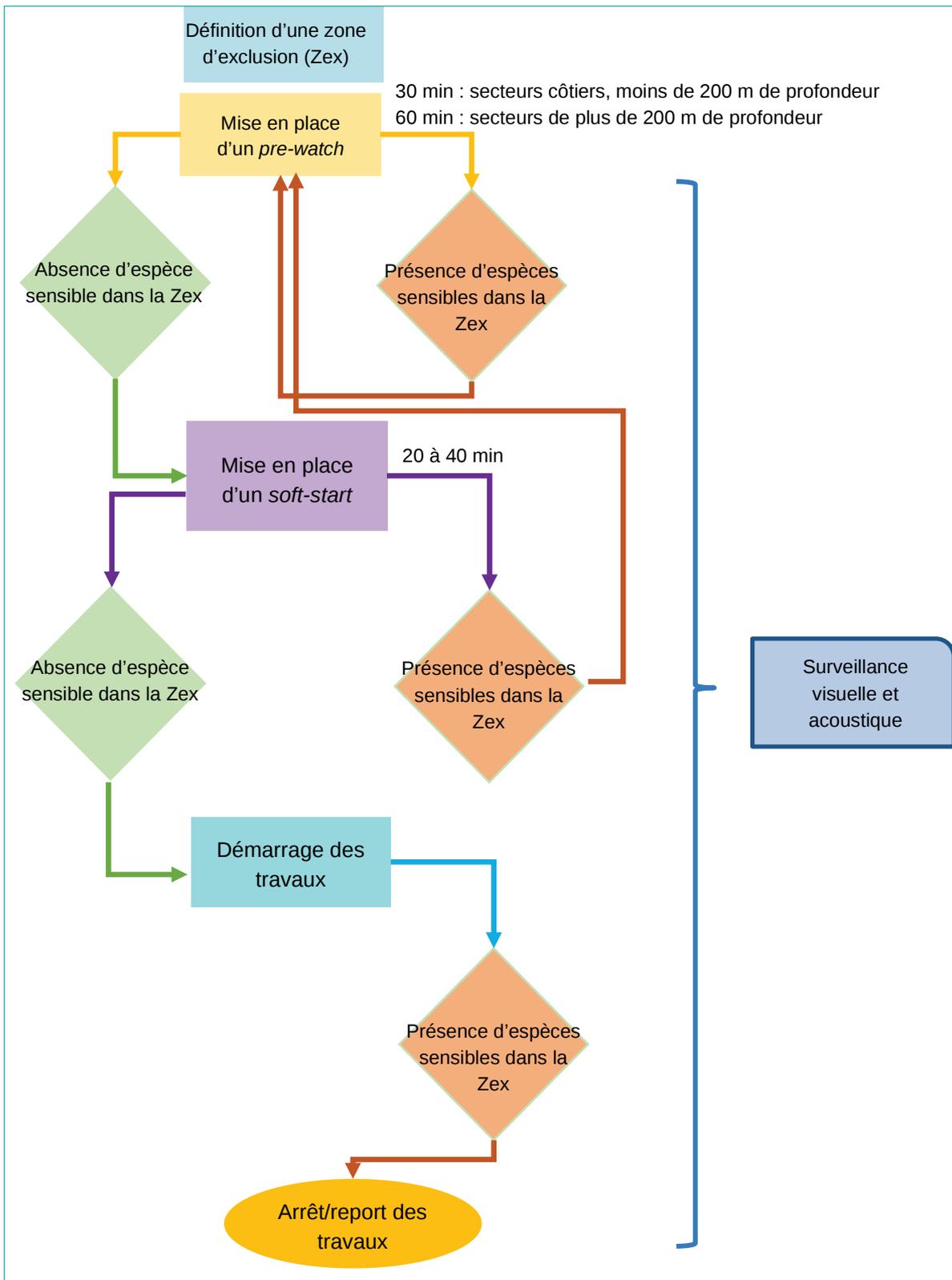


Figure 31 : Exemple de protocole à mettre en place pour réduire les impacts sur la faune marine dans le cadre de réalisation de travaux en mer.

Tableau 16 : Tableau récapitulatif des mesures de réduction liées à des adaptations ou modifications de techniques  
(en vert : mesures à mettre en œuvre en amont ; en orange : mesures à mettre en œuvre lors des phases de travaux, exploitation et/ou démantèlement).

Mesure	Activité concernée	Mise en œuvre	Efficacité	Limite
Définition d'une zone d'exclusion	Chantiers en mer, forage, battage de pieux, sismique, dragage, explosion	Définir une zone dans laquelle aucune espèce sensible ne doit se trouver (zone d'impact physiologique)	Bonne	Disponibilité de mesures ou outil de monitoring pour des zones de plus d'un km
<i>Pre-watch</i>	Chantiers en mer, forage, battage de pieux, sismique, dragage, explosion	Surveillance visuelle/acoustique de la zone d'exclusion et de ses alentours pour vérifier l'absence d'espèces sensibles. Durée de 30 à 60 min en fonction de la zone.	Bonne	Disponibilité de mesures ou outil de monitoring pour des zones de plus d'un km
<i>Soft-start/ramp-up</i>	Chantiers en mer, forage, battage de pieux, sismique, dragage, explosion	Augmentation progressive des niveaux sonores pour éloigner les espèces sensibles. Durée de 20 à 40 min.	Inconnue	Connaissance limitée sur la séquence d'augmentation efficiente en fonction des espèces/groupe d'espèces
Surveillance visuelle	Toutes	Présence d'observateurs de faune marine qualifiés et expérimentés pour surveiller la zone d'exclusion et ses abords. 2 à 3 personnes nécessaires	Bonne	Tributaire des conditions d'observation, impossible pendant la nuit
Surveillance acoustique	Toutes	Déploiement d'un dispositif acoustique passif de détection et de localisation des signaux émis par les cétacés	Bonne	Identification jusqu'à l'espèce compliquée, distance de détection variable selon l'espèce
Arrêt des travaux	Chantiers en mer, forage, battage de pieux, sismique, dragage, explosion	Arrêt des travaux en cours en cas de présence d'espèces sensibles dans la zone d'exclusion, reprise quand ils en sont sortis selon une procédure à définir	Bonne	Coût économique pour le chantier, acceptation par le donneur d'ordre
Utilisation de répulsifs	Chantiers en mer, forage, battage de pieux, sismique, dragage, explosion	Utilisation de dispositifs type pingurs ou effaroucheurs à phoques pour éloigner les animaux	Non unanime dans la communauté scientifique	Éloignement de zones écologiquement importantes, habituation des animaux

### III. Compenser

Les mesures compensatoires ont pour but d'apporter une contrepartie aux effets négatifs directs ou indirects qui n'ont pu être évités ou suffisamment réduits. Ces mesures doivent compenser dans le respect de l'équivalence écologique et avec pour objectif l'absence de perte nette de biodiversité [124].

**Face au bruit sous-marin d'origine anthropique, il n'existe pas à l'heure actuelle de mesure compensatoire pour la faune marine.** À défaut, toute action inscrite dans un Plan national d'action (tortues, mammifères marins par exemple) contribue à la conservation des espèces concernées, et ces actions sont donc encouragées.

### IV. Suivre

Toute mesure ERC doit faire l'objet d'un suivi, imposé par la réglementation, afin de justifier de la mise en place des mesures et de leur efficacité. Ce suivi doit donc répondre à un objectif précis, et permettre d'évaluer les résultats obtenus vis-à-vis de ceux attendus. En d'autres termes, le suivi doit permettre d'appréhender l'évolution du milieu et des espèces durant le chantier, et de définir si les mesures ERC planifiées ont eu l'effet escompté.

Le type de suivi, sa fréquence, son emprise, ses modalités de mise en œuvre mais également le type d'analyse effectué, dépendent du projet lui-même, des espèces présentes et de l'intérêt écologique du secteur.

Les suivis doivent donc permettre de vérifier si un impact a été observé ou non, généralement en réponse à un état initial réalisé en amont des travaux. Pour les projets ayant une poursuite après la phase travaux, tels que les parcs EMR, cela induit

un suivi du projet en fonctionnement et au cours de la vie du parc et un suivi de la fréquentation par les espèces marines selon des méthodes à définir en fonction du projet et de la zone.

Pour les autres projets (sismique, dragage, déroctage, explosion), une attention particulière devra être portée aux échouages d'animaux dans les secteurs concernés *via* les réseaux d'intervention existants. Un suivi post-travaux peut être envisagé pour ces projets également.

Pour des activités continues, comme le trafic maritime, il est difficile de mettre en place des mesures de suivi. Les mesures ERC proposées étant essentiellement basées sur l'adaptation du design, la maintenance et la réduction de la vitesse, des mesures techniques sur le gain obtenu en termes de réduction sonore doivent être réalisées *in situ*. Des mesures d'accompagnement peuvent être proposées pour aller plus loin.

## V. Accompagner

Aux mesures ERC peuvent également s'ajouter des mesures d'accompagnement. Contrairement aux mesures ERC, les mesures d'accompagnement ne répondent pas à une obligation réglementaire mais sont une proposition du porteur de projet pour améliorer les connaissances ou augmenter l'efficacité de mesures ERC. Elles ne se substituent pas à des mesures ERC mais traduisent plutôt un engagement vis-à-vis des espèces ou des habitats concernés par le projet [124].

### 1) Acquisition de connaissances complémentaires et diffusion

L'acquisition de connaissances complémentaires sur des zones ou des espèces concernées par les projets ou travaux constitue une mesure d'accompagnement. Cela peut se traduire par la conduite de suivis environnementaux complémentaires de plus grande ampleur (spatialement et/ou thématiquement par rapport à ce qui est requis pour l'état initial), la mise à disposition de données collectées, l'approfondissement des connaissances relatives aux impacts ou à la biologie des espèces, la participation à des programmes de recherche, etc.

Ces nouvelles connaissances peuvent par ailleurs profiter à la définition des zones et périodes écologiquement importantes.

L'acquisition de connaissances sur les niveaux sonores générés par les différentes activités anthropiques est également encouragée, puisqu'aujourd'hui encore les données restent parcellaires voire inexistantes pour certaines sources. L'amélioration des connaissances sur les impacts des émissions sonores sur la faune marine est également à poursuivre et à accompagner. La diffusion et la valorisation des

données collectées lors des suivis ou dans le cadre des mesures d'accompagnement est également un point essentiel.

### 2) Restauration/réhabilitation d'habitats

La restauration d'habitats dégradés ou la réhabilitation de secteurs en vue d'y favoriser ou accroître la biomasse ou la biodiversité constituent des mesures d'accompagnement. Cela implique que ces habitats présentent des caractéristiques propices au développement de la faune et de la flore locales.

Ces mesures de restauration peuvent ainsi participer à l'amélioration de l'état écologique d'un secteur et le faire évoluer vers un état plus favorable à son fonctionnement ou à sa biodiversité.

La création d'aires marines protégées est une prérogative de l'État qui ne peut constituer une mesure de compensation ou d'accompagnement de la part du porteur de projet. En revanche la participation à l'amélioration des habitats ou à la restauration d'écosystèmes peuvent constituer une mesure d'accompagnement tout en s'inscrivant dans les objectifs d'une aire marine protégée.

### 3) Actions de sensibilisation

Le maître d'ouvrage peut accompagner son projet d'actions de sensibilisation auprès des usagers et du grand public autour des thématiques clés. Des actions autour du bruit sous-marin et des méthodes pour le réduire, la maîtrise des impacts et des incidences sur la faune marine peuvent donc être envisagées par les porteurs de projet. La communication et la transparence autour des méthodes utilisées sur ledit chantier sont également encouragées.

### **Les autres mesures, en bref**

- Il n'existe pas de mesure compensatoire pour les impacts liés aux émissions sonores.
- Des mesures d'accompagnement peuvent cependant être mises en place. Celles-ci consistent à acquérir des connaissances complémentaires sur les zones ou les espèces impactées, sur les niveaux sonores générés, à mettre en place des programmes de restauration d'habitats, ou à mener des actions de sensibilisation.

## **VI. Synthèse**

Le tableau 17 ci-après synthétise l'ensemble des mesures disponibles pour éviter et réduire les impacts sonores sur la faune marine.

Tableau 17 : Tableau récapitulatif des mesures pour éviter et réduire l'impact des émissions sonores sur la faune marine  
(en vert : mesures à mettre en œuvre en amont, en orange : mesures à mettre en œuvre en phase de travaux, exploitation et/ou démantèlement).

Type de mesure	Activité concernée	Efficacité	Mise en œuvre	Niveau de maturité	Coût de mise en œuvre	Difficulté
<b>Éviter</b>						
Définir des zones/périodes sensibles	Battage de pieux, sismiques, forages, dragages, explosions, trafic maritime, pose de câbles	Bonne	Analyse de données, connaissances fondamentales	Dépend des secteurs	Aucun, mais impact possible sur le calendrier du chantier	Limitation des connaissances
Dimensionnement du projet	Battage de pieux, sismiques, forages, dragages, explosions, trafic maritime, pose de câbles	Bonne	Dimensionner le projet en regard des enjeux environnementaux	?	Potentiellement significatif, à considérer le plus en amont possible	Viabilité économique, connaissances existantes
Suspension des travaux	Battage de pieux, sismiques, forages, dragages, explosions, trafic maritime, pose de câbles	Bonne	Suspendre les travaux lors des périodes clés	?	Potentiellement important, à considérer le plus amont possible	Connaissances existantes, viabilité économique
<b>Réduire</b>						
Aménagement des techniques, techniques moins bruyantes	Battage de pieux, sismiques, forages, dragages, explosions, trafic maritime, pose de câbles	Variable	Adaptation/modification des techniques, du calendrier	Variable	Potentiellement significatif, à considérer le plus amont possible	Connaissances existantes, viabilité économique
Définition d'une zone d'exclusion	Battage de pieux, sismique, forage, dragage	Bonne	Suivi visuel et acoustique, modélisation	Couramment mis en place	Aucun	Limites techniques
<i>Pre-watch</i>	Battage de pieux, sismique, forage, dragage	Bonne	Suivi visuel et acoustique, modélisation	Couramment mis en place	Observateurs et opérateurs acoustiques (3 à 5 personnes, soit 1 200 à 2 200 € HT/jour)	Limites techniques
<i>Soft-start/ramp-up</i>	Battage de pieux, sismique, forage, dragage	Inconnue	Augmentation graduelle des niveaux sonores	Couramment mis en place	Observateurs et opérateurs acoustiques (3 à 5 personnes, soit 1 200 à 2 200 € HT/jour)	Limitation des connaissances

PARTIE 3 :

Procédures ou technologies disponibles pour éviter, réduire ou compenser les impacts des émissions sonores sur la faune marine

Type de mesure	Activité concernée	Efficacité	Mise en œuvre	Niveau de maturité	Coût de mise en œuvre	Difficulté
Surveillance visuelle	Battage de pieux, sismiques, forages, dragages, explosions, trafic maritime, pose de câbles	Bonne	Présence d'observateurs à bord	Couramment mis en place	3 observateurs de faune marine (environ 1 200 € HT/jour)	Tributaire de la météo
Surveillance acoustique	Battage de pieux, sismiques, forages, dragages, explosions, trafic maritime, pose de câbles	Bonne	Matériel acoustique, opérateur PAM	Couramment mis en place	2 opérateurs en acoustique passive (environ 1 000 € HT/jour)	Limites techniques
Arrêt des travaux en cas de présence d'animaux	Battage de pieux, sismiques, forages, dragages, explosions, trafic maritime, pose de câbles	Présumée bonne	Surveillance visuelle/acoustique temps réel	Couramment mis en place	Potentiellement important, à considérer le plus en amont possible	Acceptation, conséquences économiques
Répulsifs acoustiques	Battage de pieux, sismiques, forages, dragages, explosions, trafic maritime, pose de câbles	Discutée	Mise en place de dispositifs d'effarouchement	Souvent utilisé	De 200 à 500 € par unité	Perte d'habitat
Rideaux de bulles (air ou HSD)	Battage de pieux, forage, utilisation d'explosifs	Bonne	Rideaux déployés autour du chantier ou de l'atelier	Commercialisé	De 10 000 à 100 000 € en fonction du type de chantier	Tributaire du courant
Matériaux tampons, batardeaux, blocs isolants	Battage de pieux, forage	Bonne	Déploiement autour du chantier ou de l'atelier	Commercialisé ou en test	?	Moins mature que les rideaux de bulles



# Partie 4

## Fiches synthèse

Les fiches présentées dans cette partie synthétisent, pour certaines sources sonores :

- les niveaux attendus et les plages de fréquences concernées par les émissions ;
- les espèces potentiellement exposées ;
- les impacts potentiels ;
- les mesures à envisager pour éviter ou réduire ces impacts, et la ou les éventuelle(s) mesure(s) d'accompagnement à mettre en place.

Chaque fiche présente également un exemple concret d'observation pour chacune des sources présentées, avec les niveaux large bande mesurés (niveau calculé sur l'ensemble de la bande de fréquences d'enregistrement).

Ces fiches permettent d'illustrer des catégories d'activités, mais des différences majeures existent au sein de chacune de ces catégories. Les niveaux sonores générés peuvent varier grandement au sein d'une même activité en fonction des caractéristiques des projets. Les impacts potentiels sont également variables en fonction des opérations (techniques utilisées, durée des émissions, niveaux sonores générés, etc.) et des enjeux du site (présence des espèces dans la zone, intérêt écologique de la zone, récurrence des activités bruyantes, etc.).

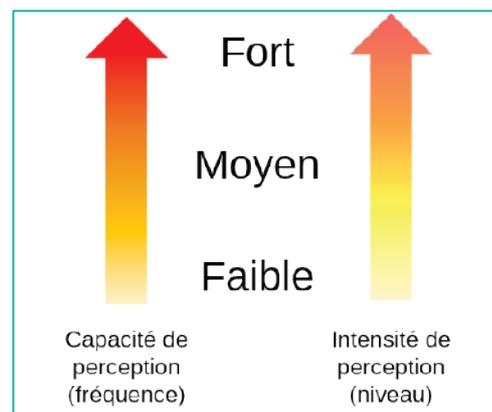
Les mesures d'évitement, de réduction ou d'accompagnement à mettre en place doivent ainsi être proportionnées aux

impacts attendus. **Dans ces fiches synthèse, un certain nombre de mesures sont proposées pour chaque activité, mais cela ne signifie pas qu'elles doivent systématiquement être mises en œuvre.**

**En conséquence, une étude au cas par cas est nécessaire afin d'établir si des mesures doivent être mises en place.** Il est nécessaire d'évaluer des distances d'impact (périmètres PTS *a minima*), notamment en modélisant la propagation du bruit et en réalisant l'inventaire des espèces potentiellement présentes afin de quantifier le niveau d'impact. Les mesures d'évitement, de réduction et d'accompagnement sont alors à adapter en fonction de ce niveau.

Ces fiches sont classées en fonction de la nature du bruit généré par l'activité présentée : bruit impulsionnel (fiches bleues) ou bruit continu (fiches vertes).

Sur chaque fiche, à côté de la liste des espèces exposées, une échelle de couleur



permet d'évaluer le risque pour chaque groupe d'espèce **en cas d'exposition directe**. Ces flèches permettent d'appréhender l'exposition de chaque groupe d'espèce à la source de bruit en question en fonction de ses capacités auditives, en particulier des fréquences qu'elles sont capables de percevoir (et de l'étendue de la gamme de fréquences en question) et du niveau de bruit à partir duquel elles vont entendre le son.

Ainsi, les couleurs (rouge, orange, jaune et beige) témoignent de la capacité des

espèces à percevoir les fréquences émises (le rouge signifie que le groupe d'espèce correspondant est susceptible d'être fortement exposée au bruit émis par la source, car les fréquences émises correspondent à la gamme de fréquences perçue, tandis que le beige signifie que le groupe d'espèce est peu exposé). L'intensité de la couleur (vif ou pastel) reflète l'intensité du bruit perçu : plus la couleur est vive et plus le niveau émis par la source de bruit est susceptible d'être fortement perçu par le groupe d'espèces considéré.

### Index des fiches :

	Activité	Numéro de fiche	Page
Bruit impulsionnel	Sondeur monofaisceau	1	147
	Sondeur multifaisceaux	2	149
	Sondeur de sédiments	3	151
	Prospection sismique par canon à air (sismique « lourde »)	4	153
	Prospection sismique haute résolution	5	155
	Battage de pieux par marteau hydraulique	6	157
	Déroctage à l'explosif	7	159
	Répulsifs acoustiques (pingers)	8	161
Bruit continu	Forage	9	163
	Éolienne (posée) en fonctionnement	10	165
	Hydrolienne en fonctionnement	11	167
	Vibrofonçage	12	169
	Dragage par drague aspiratrice en marche (TSHD)	13	171
	Navire de pêche côtière (< 12 m)	14	173
	Navire technique	15	175
	Navire de commerce de plus de 100 m	16	178
	Navire à grande vitesse	17	179
	Navire de plaisance à moteur hors-bord (< 12 m)	18	181
	Motomarine	19	183

## Bruit impulsif

## 1. SONDEUR MONOFAISCEAU

## DESCRIPTION

Outil émettant des ondes sonores dans le milieu marin dont la réflexion sur le fond permet de mesurer la hauteur d'eau, d'observer la colonne d'eau, de visualiser la morphologie des fonds marins et de caractériser superficiellement la nature du substrat.

Les sondeurs monofaisceaux émettent au travers d'un faisceau d'angle réduit à la verticale du bateau.



© IFREMER

## APPLICATIONS

- Industrie du pétrole et du gaz
- Énergies marines renouvelables
- Installation de câbles et canalisations
- Activités halieutiques (pêche)
- Activités scientifiques/Recherche

## CAS GÉNÉRAL

Type d'émission	Impulsif
Bande passante (max. d'énergie)	12-500 kHz (variable)
Niveau $L_s$ attendu (@ 1 m)	210 à 240 dB re 1 $\mu$ Pa
Durée d'impulsion	< 2 ms
Directivité	Verticale Importante (quelques degrés)

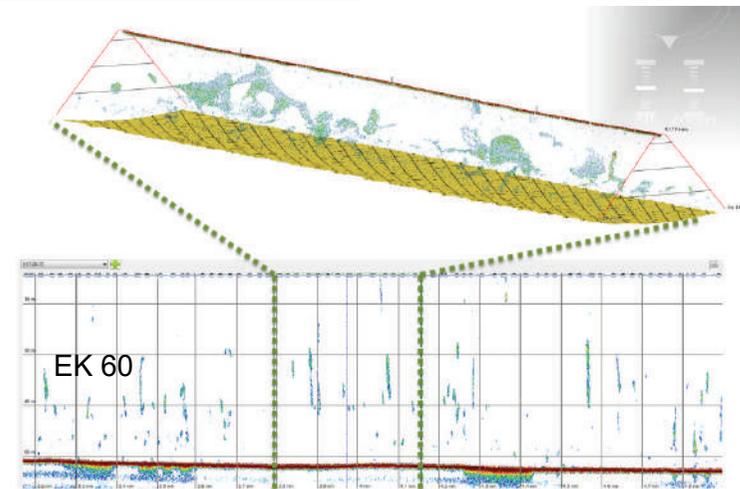
## Principaux paramètres influents :

- Fréquence de maximum d'énergie (plus la fréquence est faible, plus l'onde sonore se propage sur de grandes distances)
- Directivité

## EXEMPLE D'UN CAS D'ÉTUDE

Conditions d'observation :

Type de sondeur	Sondeur monofaisceau halieutique <b>Simrad EK60-38</b>
Navire	Navire océanographique



© IFREMER

Observations :

Type d'émission	Impulsif
Fréquence nominale	38 kHz
Niveau d'émission maximal ( $L_s$ @ 1 m)	231 dB re 1 $\mu$ Pa
Durée d'impulsion	0,25 – 4 ms
Directivité émission	7°

Source : IFREMER

## Bruit impulsif

## 1. SONDEUR MONOFAISCEAU

## ESPÈCES EXPOSÉES



Cétacés très haute fréquence  
 Cétacés haute fréquence  
 Phocidés  
 Siréniens  
 Autres carnivores  
 Cétacés basse fréquence (émissions < à 30 kHz)

## IMPACTS POTENTIELS

Faible probabilité d'impact du fait de la forte directivité du faisceau d'émission et des durées d'impulsion réduites : risques limités à la zone située à la verticale du sondeur, à proximité de l'antenne.

Les sondeurs haute fréquence (> 100 kHz) ne sont perceptibles que par les cétacés haute fréquence et très haute fréquence. Les sondeurs dont les émissions sont supérieures à 180 kHz ne sont plus audibles par la faune marine.

## ÉVALUATION

Aucune recommandation

## ÉVITER

Mesure	Description	Efficacité	Page
Éviter certaines zones	Éviter les zones d'importance écologique connues (nurseries, zones de reproduction, d'alimentation)	++	p. 117-118
Éviter certaines périodes	Éviter les périodes écologiquement importantes (mise bas, reproduction, alimentation, migration)	++	p. 117 à 119

## RÉDUIRE

Mesure	Description	Efficacité	Page
Limiter l'utilisation	Utiliser le dispositif le plus adapté à l'objectif, restreindre l'étendue spatiale et temporelle d'utilisation aux zones étudiées	++	p. 123
Limiter les émissions	Utiliser la plus petite puissance pour l'objectif envisagé	++	p. 123

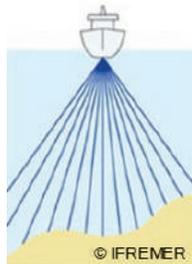
## Bruit impulsif

## 2. SONDEUR MULTIFAISCEAU

## DESCRIPTION

Outil émettant des ondes sonores dans le milieu marin dont la réflexion sur le fond permet de mesurer la hauteur d'eau, de visualiser la morphologie des fonds marins et de caractériser superficiellement la nature du substrat.

Les sondeurs multifaisceaux émettent dans plusieurs directions, avec une ouverture angulaire importante dans le plan transversal au porteur.



## APPLICATIONS

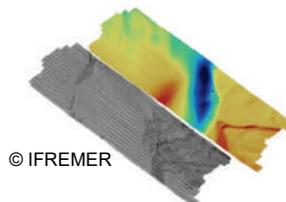
- Industrie du pétrole et du gaz
- Énergies marines renouvelables
- Installation de câbles et canalisations
- Activités halieutiques (pêche)
- Activités scientifiques/Recherche

## CAS GÉNÉRAL

Type d'émission	Impulsif
Bande passante (max. d'énergie)	10-500 kHz (variable)
Niveau $L_s$ attendu (@ 1 m)	210 à 240 dB re 1 $\mu$ Pa
Durée d'impulsion	Quelques ms
Directivité	Importante (plan longitudinal au porteur)

## Principaux paramètres influents :

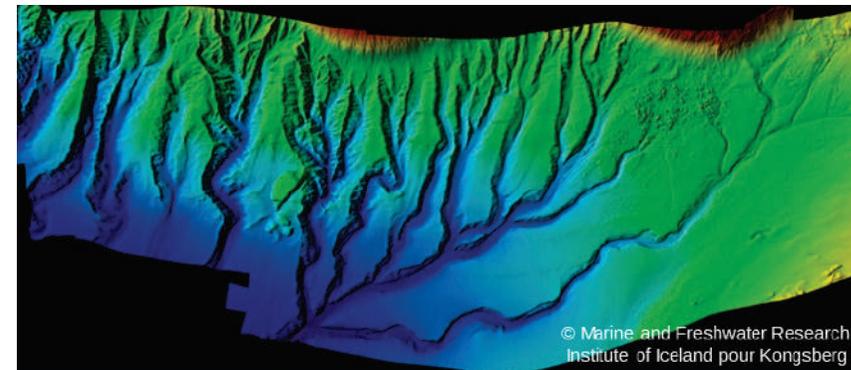
- Fréquence de maximum d'énergie (plus la fréquence est faible, plus l'onde sonore se propage sur de grandes distances)
- Directivité



## EXEMPLE D'UN CAS D'ÉTUDE

Conditions d'observation :

Type de sondeur	Sondeur multifaisceau <b>Kongsberg EM304</b>
Navire	Navire océanographique



Observations :

Type d'émission	Impulsif
Fréquence nominale	30 kHz
Bande passante	26-34 kHz
Niveau d'émission maximal ( $L_s$ @ 1 m)	234 dB re 1 $\mu$ Pa
Durée d'impulsion	Quelques ms
Directivité émission	0.5° x 140°

Source : IFREMER

## Bruit impulsif

## 2. SONDEUR MULTIFAISCEAU

## ESPÈCES EXPOSÉES



- Cétacés très haute fréquence
- Cétacés haute fréquence
- Phocidés
- Siréniens
- Autres carnivores
- Cétacés basse fréquence (émissions < à 30 kHz)

## IMPACTS POTENTIELS

Faible probabilité d'impact du fait de la forte directivité du faisceau d'émission et des durées d'impulsion réduites : risques limités à la zone située à la verticale du sondeur, à proximité de l'antenne.

Les sondeurs haute fréquence (> 100 kHz) ne sont perceptibles que par les cétacés haute fréquence et très haute fréquence. Les sondeurs dont les émissions sont supérieures à 180 kHz ne sont plus audibles par la faune marine.

## ÉVALUATION

Aucune recommandation

## ÉVITER

Mesure	Description	Efficacité	Page
Éviter certaines zones	Éviter les zones d'importance écologique connues (nurseries, zones de reproduction, d'alimentation)	++	p. 117-118
Éviter certaines périodes	Éviter les périodes écologiquement importantes (mise bas, reproduction, alimentation, migration)	++	p. 117 à 119

## RÉDUIRE

Mesure	Description	Efficacité	Page
Limiter l'utilisation	Utiliser le dispositif le plus adapté à l'objectif, restreindre l'étendue spatiale et temporelle d'utilisation aux zones étudiées	++	p. 123
Limiter les émissions	Utiliser la plus petite puissance pour l'objectif envisagé	++	p. 123

## Bruit impulsif

## 3. SONDEUR DE SÉDIMENTS

## DESCRIPTION

Équipement acoustique émettant des ondes sonores qui permettent de caractériser les couches sédimentaires sur plusieurs dizaines de mètres de profondeur.

## APPLICATIONS

- Industrie du pétrole et du gaz
- Énergies marines renouvelables
- Installation de câbles et canalisations
- Activités scientifiques/Recherche

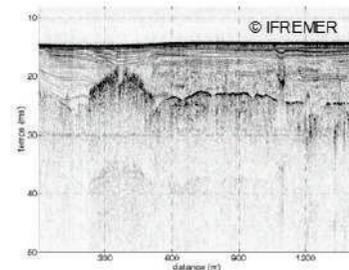


## CAS GÉNÉRAL

Type d'émission	Impulsif
Bande passante (max. d'énergie)	1-10 kHz (variable)
Niveau $L_S$ attendu (@ 1 m)	190 à 230 dB re 1 $\mu$ Pa
Durée d'impulsion	Quelques dizaines de ms
Directivité	Importante (verticale)

## Principaux paramètres influents :

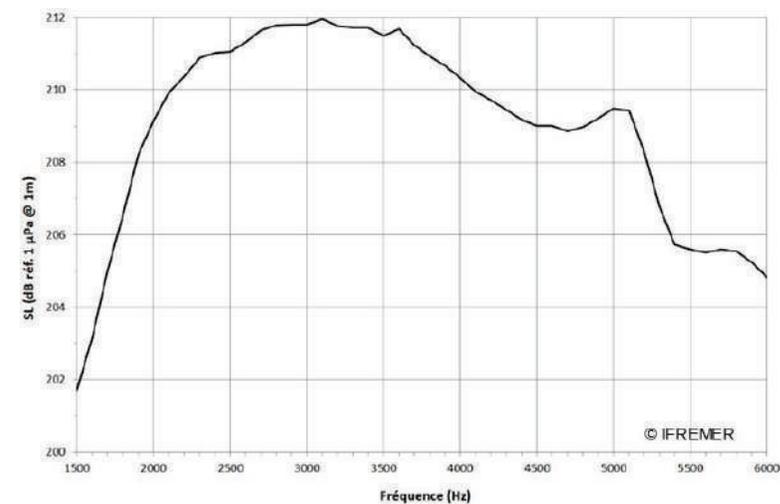
- Fréquence de maximum d'énergie (plus la fréquence est faible, plus l'onde sonore se propage sur de grandes distances)
- Directivité



## EXEMPLE D'UN CAS D'ÉTUDE

Conditions d'observation :

Type de sondeur	Sondeur de sédiments <b>IxBlue Echoes 3500</b>
Type de navire	Navire océanographique



Observations :

Type d'émission	Impulsif
Bande passante	1,5-6,5 kHz
Fréquence de max. d'énergie	3,1 kHz
Niveau d'émission maximal ( $L_S$ @ 1 m)	212 dB re 1 $\mu$ Pa
Durée d'impulsion	10 - 100 ms
Directivité émission	20 - 50°

Source : IFREMER

## Bruit impulsif

## 3. SONDEUR DE SÉDIMENTS

## ESPÈCES EXPOSÉES



Cétacés basse fréquence  
 Cétacés haute fréquence  
 Cétacés très haute fréquence  
 Phocidés  
 Siréniens  
 Autres carnivores  
 Oiseaux plongeurs (émissions < à 6 kHz)  
 Poissons (émissions < à 3 kHz)  
 Tortues (émissions < à 3 kHz)  
 Crustacés et mollusques (émissions < à 3 kHz)

## IMPACTS POTENTIELS

Faible probabilité d'impact du fait de la forte directivité du faisceau d'émission, des durées d'impulsion réduites et du niveau d'émission modéré : risques limités à la zone située à la verticale du bateau, à proximité de l'antenne du sondeur.

Les sondeurs de sédiments émettant à plus de 3 kHz ne sont audibles que par les mammifères marins et, dans une moindre mesure, par les oiseaux plongeurs (jusqu'à 6 kHz).

## ÉVALUATION

Aucune recommandation

## ÉVITER

Mesure	Description	Efficacité	Page
Éviter certaines zones	Éviter les zones d'importance écologique connues (nurseries, zones de reproduction, d'alimentation)	++	p. 117-118
Éviter certaines périodes	Éviter les périodes écologiquement importantes (mise bas, reproduction)	++	p. 117 à 119

## RÉDUIRE

Mesure	Description	Efficacité	Page
Limiter l'utilisation	Utiliser le dispositif le plus adapté à l'objectif, restreindre l'étendue spatiale et temporelle d'utilisation aux zones étudiées	++	p. 123
Limiter les émissions	Utiliser la plus petite puissance pour l'objectif envisagé	++	p. 123

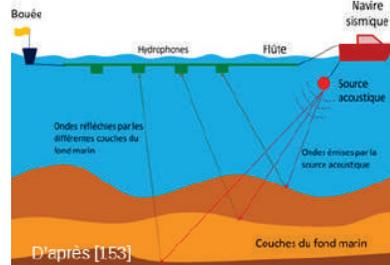
## 4. PROSPECTION SISMIQUE PAR CANON À AIR

### DESCRIPTION

Technique visant à émettre une onde sonore de forte intensité (grâce à un ou plusieurs canons à air) et à étudier sa réflexion et sa réfraction par les différentes strates du fond marin afin d'en caractériser la structure géologique.

### APPLICATIONS

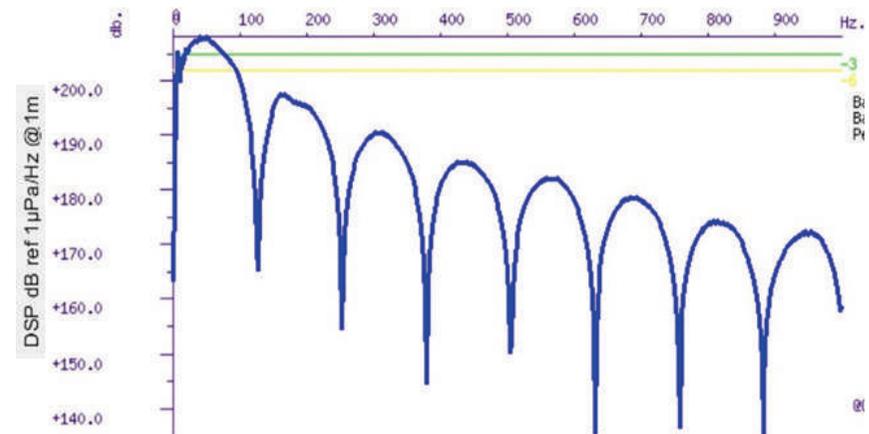
- Industrie du pétrole et du gaz
- Énergies marines renouvelables
- Installation de câbles et canalisations
- Activités halieutiques (pêche)
- Activités scientifiques/Recherche



### EXEMPLE D'UN CAS D'ÉTUDE (SISMIQUE LOURDE)

Conditions d'observation :

Contexte	Sismique Multi-traces IFREMER
Type de canon	Canons à air (GGUN)
Volume	2 570 in <sup>3</sup>
Nombre de canons	14



© IFREMER

Observations :

Fréquences de max. d'énergie	< 100 Hz
Pression crête	36,4 bar @ 1 m
Niveaux max. ramenés @ 1 m	$L_{S,pk}$ : 251 dB re 1 µPa $L_{E,p}$ : 229 dB re 1 µPa <sup>2</sup> s
Cadence de tirs	20 s

Source : IFREMER

### CAS GÉNÉRAL

Type d'émission	Impulsif
Bande passante (max. d'énergie)	5 Hz-15 kHz (10-100 Hz)
Niveau $L_S$ attendu (@ 1 m)	240 à 260 dB re 1 µPa ( $L_{S,pk}$ )
Durée d'impulsion	10-100 ms
Directivité	Faible

Principaux paramètres influents :

- Volume d'air contenu dans le canon
- Nombre de canons à air
- Pression exercée sur le volume d'air



© IFREMER

## Bruit impulsif

## 4. PROSPECTION SISMIQUE PAR CANON À AIR

## ESPÈCES EXPOSÉES



Cétacés basse fréquence  
 Cétacés haute fréquence et très haute fréquence  
 Phocidés et autres carnivores  
 Siréniens  
 Poissons  
 Tortues  
 Oiseaux plongeurs  
 Crustacés et mollusques

## IMPACTS POTENTIELS

## Variables en fonction de la puissance de la source

- PTS (dizaines voire centaines de m)
- TTS (dizaines à centaines de m)
- Masquage (distance inconnue)
- Dérangement (plusieurs km)
- Effets indirects (fuite des proies, perte d'habitat, etc.)
- Conséquences énergétiques / valeur sélective

## ÉVALUATION

- Liste des espèces potentiellement impactées et fréquentation de la zone d'étude (saisonnalité)
- Modélisation pour évaluer la distance d'impact pour chaque groupe d'espèce : détermination *a minima* de périmètres de dommages physiologiques (PTS)
- Intérêt de la zone pour les espèces/groupes d'espèces
- Présence de zones alternatives ?
- Cumul avec d'autres pressions

## ÉVITER

Mesure	Description	Efficacité	Page
Éviter certaines zones	Éviter les zones d'importance écologique connues (nurseries, zones de reproduction, d'alimentation)	+++	p. 117-118
Éviter certaines périodes	Éviter les périodes écologiquement importantes (mise bas, reproduction, alimentation, migration)	+++	p. 117 à 119

## RÉDUIRE

Mesure	Description	Efficacité	Page
Surveillance MMO – PAM + mitigation	Établissement d'un périmètre de sécurité surveillé en permanence par MMOs + système d'acoustique passive = arrêt en cas de présence dans la zone d'exclusion	++	p.132 à 135
Procédure de <i>pre-watch</i> et <i>soft-start</i>	Observation avant le démarrage des émissions et augmentation progressive du niveau sonore des opérations	+	p.131-132
Limiter les émissions	Utiliser la plus petite source pour l'objectif envisagé, restreindre les émissions aux zones étudiées	+	p. 123

## ACCOMPAGNER

Mesure	Page
Acquisition de connaissances complémentaires, restauration d'habitats, actions de sensibilisation, etc.	p. 140

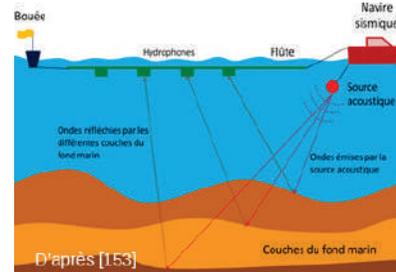
## 5. PROSPECTION SISMIQUE HAUTE RÉOLUTION

### DESCRIPTION

Technique visant à émettre une onde sonore de forte intensité (grâce à un faible nombre de canons à air) et à étudier sa réflexion et sa réfraction par les différentes strates du fond marin afin d'en caractériser la structure géologique.

### APPLICATIONS

- Industrie du pétrole et du gaz
- Énergies marines renouvelables
- Installation de câbles et canalisations
- Activités scientifiques/Recherche



### CAS GÉNÉRAL

Type d'émission	Impulsif
Bande passante (max. d'énergie)	5 Hz-15 kHz (10-100 Hz)
Niveau $L_s$ attendu (@ 1 m)	225 à 240 dB re 1 $\mu\text{Pa}$ ( $L_{s,pk}$ )
Durée d'impulsion	10-100 ms
Directivité	Faible

#### Principaux paramètres influents :

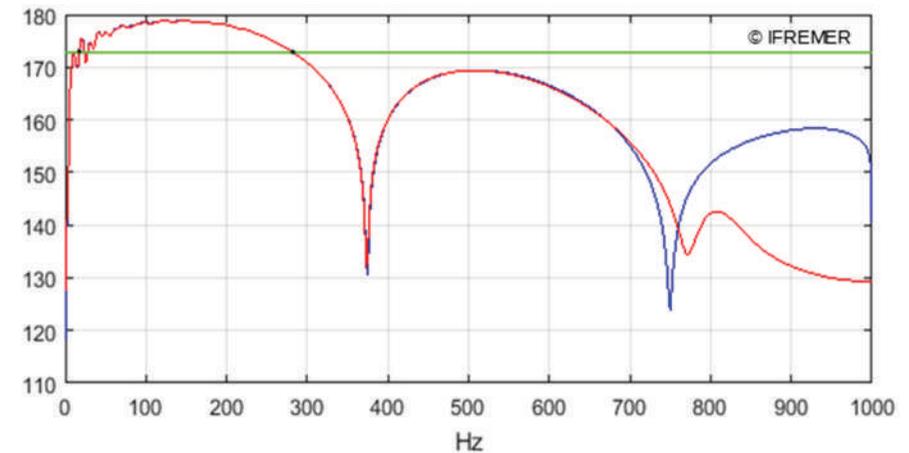
- Volume d'air contenu dans le canon
- Nombre de canons à air
- Pression exercée sur le volume d'air



### EXEMPLE D'UN CAS D'ÉTUDE (SISMIQUE HAUTE RÉOLUTION)

Conditions d'observation :

Contexte	Sismique HR IFREMER
Type de canon	Canons à air (mini-GI)
Volume	96 in <sup>3</sup>
Nombre de canons	2



Observations :

Fréquences de max. d'énergie	< 100 Hz
Pression crête	4,3 bar @ 1 m
Niveaux max. ramenés @ 1 m	$L_{s,pk}$ : 233 dB re 1 $\mu\text{Pa}$ $L_{E,p}$ : 206 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$
Cadence de tirs	6 s

Source : IFREMER

## ESPÈCES EXPOSÉES



Cétacés basse fréquence  
 Cétacés haute fréquence et très haute fréquence  
 Phocidés et autres carnivores  
 Siréniens  
 Poissons  
 Tortues  
 Oiseaux plongeurs  
 Crustacés et mollusques

## IMPACTS POTENTIELS

**Impacts plus limités que pour la sismique lourde et variables en fonction de la puissance de la source.**

- PTS (de quelques m à quelques dizaines de m)
- TTS (< 50 m)
- Masquage (distance inconnue)
- Dérangement (quelques km)
- Effets indirects (fuite des proies, perte d'habitat, etc.)
- Conséquences énergétiques / valeur sélective

## ÉVALUATION

- Liste des espèces potentiellement impactées et fréquentation de la zone d'étude (saisonnalité)
- Modélisation pour évaluer la distance d'impact pour chaque groupe d'espèce : détermination *a minima* de périmètres de dommages physiologiques (PTS)
- Intérêt de la zone pour les espèces/groupes d'espèces
- Présence de zones alternatives ?
- Cumul avec d'autres pressions

## ÉVITER

Mesure	Description	Efficacité	Page
Éviter certaines zones	Éviter les zones d'importance écologique connues (nurseries, zones de reproduction, d'alimentation)	+++	p. 117-118
Éviter certaines périodes	Éviter les périodes écologiquement importantes (mise bas, reproduction, alimentation, migration)	+++	p. 117 à 119

## RÉDUIRE

Mesure	Description	Efficacité	Page
Limiter l'utilisation	Utiliser le dispositif le plus adapté à l'objectif, restreindre l'étendue spatiale et temporelle d'utilisation aux zones étudiées	+	p. 123
Limiter les émissions	Utiliser la plus petite puissance pour l'objectif envisagé	++	p. 123

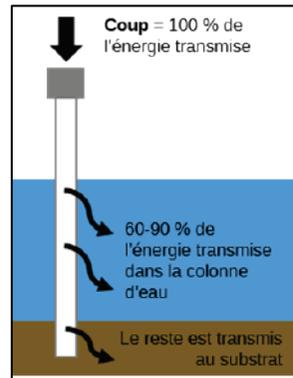
## 6. BATTAGE DE PIEUX PAR MARTEAU HYDRAULIQUE

## DESCRIPTION

Procédé consistant à enfoncer un pieu, souvent métallique, dans le substrat à l'aide d'un marteau hydraulique simple.

## APPLICATIONS

- Industrie du pétrole et du gaz
- Énergies marines renouvelables
- Travaux et aménagements côtiers
- Installation de câbles et canalisations (installation de plateforme de forage)



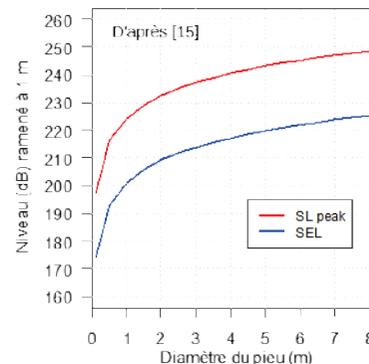
D'après [6]

## CAS GÉNÉRAL

Type d'émission	Impulsif
Bande passante (max. d'énergie)	10 Hz-20 kHz (100-1 000 Hz)
Niveau $L_s$ attendu (@ 1 m)	200-250 dB re 1 $\mu$ Pa
Durée d'impulsion	Quelques millisecondes
Directivité	Omnidirectionnel

## Principaux paramètres influents :

- Diamètre du pieu
- Nature du fond
- Bathymétrie
- Profondeur d'enfouissement
- Type de marteau et énergie transmise
- Cadence d'enfouissement



D'après [15]

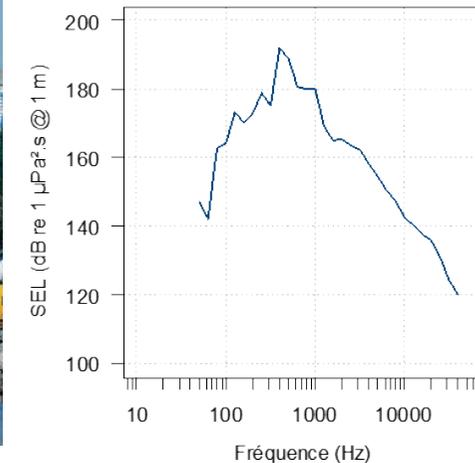
## EXEMPLE D'UN CAS D'ÉTUDE

## Conditions d'observation :

Diamètre du pieu	1,22 mètre
Nature du fond	Vase + roche
Bathymétrie	10 m en moyenne
Profondeur d'enfouissement	6 m
Type de marteau et énergie transmise	Marteau hydraulique IHC-S70 Energie nette max./coup : 70 kJ Poids masse frappante : 3,5 t Poids du marteau : 8,3 t
Cadence d'enfouissement	50 coups/min max.



© NEREIS Environnement



## Observations :

Fréquence de max. d'énergie	400 Hz
Niveaux max. ramenés @ 1 m	$L_{S,pk}$ : 207 dB re 1 $\mu$ Pa $L_{E,p}$ : 192 dB re 1 $\mu$ Pa <sup>2</sup> .s
Durée d'impulsion observée	80 ms

## ESPÈCES EXPOSÉES



Cétacés basse fréquence  
 Phocidés et autres carnivores  
 Cétacés haute fréquence et très haute fréquence  
 Siréniens  
 Poissons  
 Tortues  
 Crustacés et mollusques  
 Oiseaux plongeurs

## IMPACTS POTENTIELS

## Variables en fonction des niveaux de bruits attendus

- PTS (dizaines voire centaines de m)
- TTS (plusieurs dizaines à centaines de m)
- Masquage (plusieurs km)
- Dérangement (plusieurs km)
- Effets indirects (fuite des proies, perte d'habitat, etc.)
- Conséquences énergétiques / valeur sélective

## ÉVALUATION

- Liste des espèces potentiellement impactées et fréquentation de la zone d'étude (saisonnalité)
- Modélisation pour évaluer la distance d'impact pour chaque groupe d'espèce : détermination *a minima* de périmètres de dommages physiologiques (PTS)
- Intérêt de la zone pour les espèces/groupes d'espèces
- Présence de zones alternatives ?
- Cumul avec d'autres pressions

## ÉVITER

Mesure	Description	Efficacité	Page
Éviter certaines zones	Éviter les zones d'importance écologique connues (nurseries, zones de reproduction, d'alimentation)	+++	p. 117-118
Éviter certaines périodes	Éviter les périodes écologiquement importantes (mise bas, reproduction, alimentation, migration)	+++	p. 117 à 119

## RÉDUIRE

Mesure	Description	Efficacité	Page
Rideau de bulles, bloc isolant, etc.	Utiliser un dispositif permettant de réduire le bruit à la source	+++	p. 128-129
Surveillance MMO – PAM + mitigation	Établissement d'un périmètre de sécurité surveillé en permanence par des MMOs + système d'acoustique passive = arrêt en cas de présence dans la zone d'exclusion	++	p. 132 à 135
Procédure de <i>soft-start</i>	Augmentation progressive du niveau sonore d'une opération de travaux	+	p. 132
Méthodes alternatives	Utilisation de méthodes alternatives (vibrofonçage, forage) Choix d'autres fondations (EMR), réduction du diamètre du pieu	/	p. 125

## ACCOMPAGNER

Mesure	Page
Acquisition de connaissances complémentaires, restauration d'habitats, actions de sensibilisation, etc.	p. 140

## Bruit impulsif

## 7. DEROCTAGE À L'EXPLOSIF

## DESCRIPTION

Procédé consistant à fragmenter, à l'aide d'explosifs, un substrat rocheux puis à déblayer les débris

## APPLICATIONS

- Industrie du pétrole et du gaz
- Énergies marines renouvelables (démantèlement)
- Travaux et aménagements côtiers

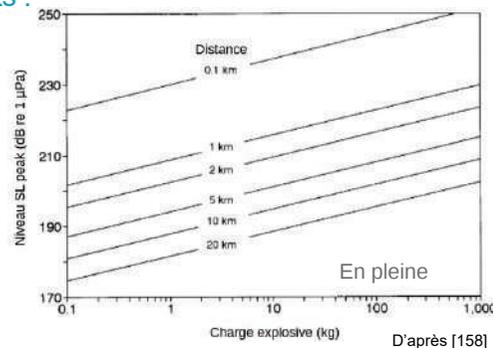


## CAS GÉNÉRAL

Type d'émission	Impulsif
Bande passante (max. d'énergie)	2 Hz-1 kHz (< 500 Hz)
Niveau $L_S$ attendu (@ 1 m)	250 à + de 300 dB re 1 $\mu$ Pa
Durée d'impulsion	Quelques ms
Directivité	Omnidirectionnel

## Principaux paramètres influents :

- Charge explosive
- Nombre de charges
- Enfouissement/ profondeur d'enfouissement
- Nature de la roche
- Bathymétrie

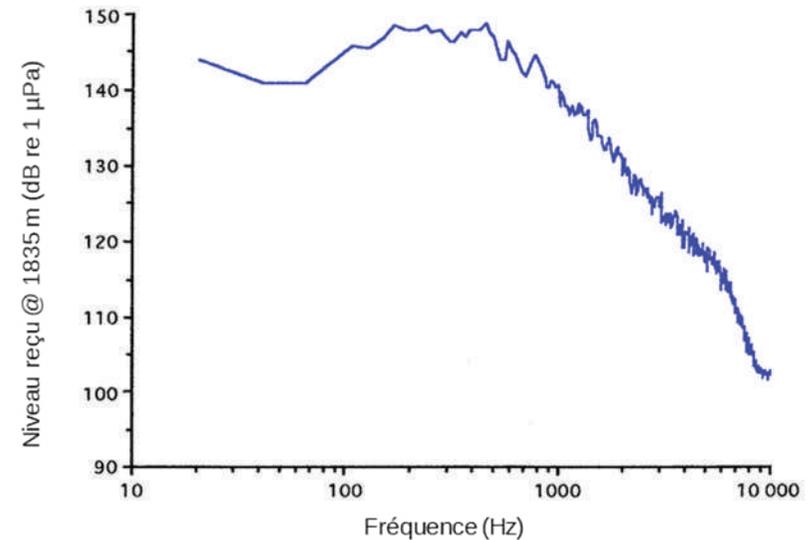


D'après [158]

## EXEMPLE D'UN CAS D'ÉTUDE

Conditions d'observation :

Type d'explosif	Tovex <sup>TM</sup>
Charge explosive	1 510 kg
Nature du fond	Rocheux
Profondeur d'enfouissement	Entre 3 et 10 m
Bathymétrie	Environ 15 m



Observations :

Fréquence de max. d'énergie	456 Hz
Niveau max. @ 1 835 m	$L_{S,pk}$ : 149 dB re 1 $\mu$ Pa
Niveau max. ramené @ 1 m	$L_{S,pk}$ : 214 dB re 1 $\mu$ Pa

D'après [174]

## Bruit impulsif

## 7. DEROCTAGE À L'EXPLOSIF

## ESPÈCES EXPOSÉES



Cétacés basse fréquence  
 Phocidés  
 Autres carnivores  
 Cétacés très haute fréquence  
 Cétacés haute fréquence  
 Siréniens  
 Poissons  
 Tortues  
 Crustacés et mollusques  
 Oiseaux plongeurs

## IMPACTS POTENTIELS

## Variables en fonction des niveaux de bruits attendus

- PTS (de quelques dizaines de m à plusieurs km)
- TTS (de quelques dizaines de m à plusieurs km)
- Masquage (?)
- Dérangement (plusieurs km)
- Effets indirects (fuite des proies, perte d'habitat, etc.)
- Conséquences énergétiques / valeur sélective

## ÉVALUATION

- Liste des espèces potentiellement impactées et fréquentation de la zone d'étude (saisonnalité)
- Modélisation pour évaluer la distance d'impact pour chaque groupe d'espèce : détermination *a minima* de périmètres de dommages physiologiques (PTS)
- Intérêt de la zone pour les espèces/groupes d'espèces
- Présence de zones alternatives ?
- Cumul avec d'autres pressions

## ÉVITER

Mesure	Description	Efficacité	Page
Éviter certaines zones	Éviter les zones d'importance écologique connues (nurseries, zones de reproduction, d'alimentation)	+++	p. 117-118
Éviter certaines périodes	Éviter les périodes écologiquement importantes (mise bas, reproduction, alimentation, migration)	+++	p. 117 à 119

## RÉDUIRE

Mesure	Description	Efficacité	Page
Rideau de bulles, bloc isolant, etc.	Utiliser un dispositif permettant de réduire le bruit à la source	+++	p. 128-129
Surveillance MMO – PAM + mitigation	Établissement d'un périmètre de sécurité surveillé en permanence par des MMOs + système d'acoustique passive = report en cas de présence dans la zone d'exclusion	++	p. 132 à 135
Procédure de <i>pre-watch et ramp-up</i>	Observation avant le démarrage des travaux et augmentation progressive du niveau sonore	+	p. 131-132

## ACCOMPAGNER

Mesure	Page
Acquisition de connaissances complémentaires, restauration d'habitats, actions de sensibilisation, etc.	p. 140

## 8. RÉPULSIFS ACOUSTIQUES (PINGERS)

### DESCRIPTION

Les répulsifs acoustiques (ou pingers) sont de petits dispositifs émettant un signal impulsionnel haute fréquence permettant de garder les mammifères marins à distance des engins de pêche, des sites aquacoles ou des activités potentiellement dangereuses.

### APPLICATIONS

- Activités halieutiques
- Énergies marines renouvelables
- Industrie du pétrole et du gaz
- Travaux et aménagements côtiers
- Activités scientifiques/Recherche



### CAS GÉNÉRAL

Type d'émission	Impulsionnel
Bande passante (max. d'énergie)	5-160 kHz (variable selon l'espèce ciblée)
Niveau $L_S$ attendu (@ 1 m)	130 à 200 dB re 1 $\mu$ Pa
Durée d'impulsion	< 2 s
Directivité	Variable

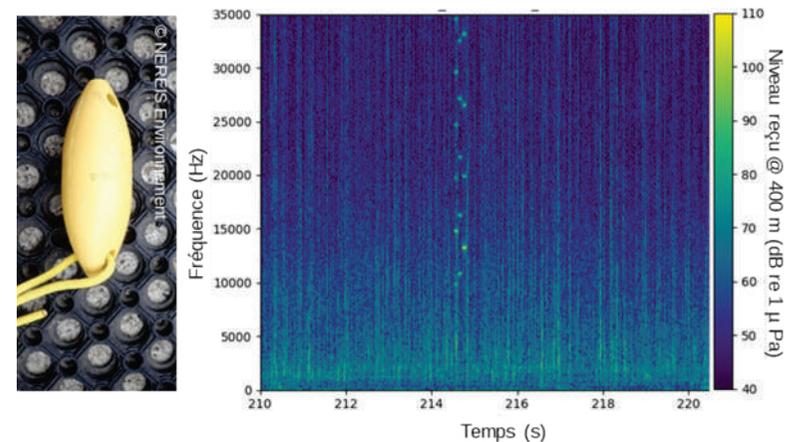
#### Principaux paramètres influents :

Le choix de la (des) fréquence(s) et du niveau d'émission dépend de l'usage du répulsif et des espèces de mammifères marins que l'on cherche à éloigner.

### EXEMPLE D'UN CAS D'ÉTUDE

Conditions d'observation :

Type de répulsif	Répulsif à dauphins/marsouins
Marque et modèle	AQUATEC Aquamark 210
Profondeur d'immersion	2 m
Bathymétrie	10 m
Type d'émission	Aléatoire avec modulations de fréquence (5 à 160 kHz) et durée d'impulsion variable (50-300 ms)



Observations :

Fréquences de max. d'énergie	Variable
Niveaux d'émission maximum ramenés @ 1 m	$L_{S,pk}$ : 148 dB re 1 $\mu$ Pa $L_{E,p}$ : 143 dB re 1 $\mu$ Pa <sup>2</sup> .s
Durée d'impulsion observée	300 ms

## 8. RÉPULSIFS ACOUSTIQUES (PINGERS)

## ESPÈCES EXPOSÉES

## Variable en fonction des espèces ciblées



Cétacés haute fréquence et très haute fréquence  
 Phocidés  
 Siréniens  
 Autres carnivores  
 Cétacés basse fréquence  
 Oiseaux plongeurs

## IMPACTS POTENTIELS

- TTS
- Masquage
- Dérangement
- Effets indirects (fuite des proies, attraction, etc.)
- Conséquences énergétiques / valeur sélective

## ÉVALUATION

Les répulsifs acoustiques étant mis en place délibérément pour faire fuir certaines espèces, leur utilisation ne s'accompagne généralement pas d'évaluation préalable.

Dans le cas où ces répulsifs sont utilisés pour sécuriser un périmètre (dans le cadre de travaux impactants), il est cependant important d'évaluer leur efficacité (modélisation de l'empreinte sonore, évaluation du nombre de répulsifs nécessaires, etc.).

## ÉVITER

Mesure	Description	Efficacité	Page
Éviter certaines zones	Éviter les zones d'importance écologique connues (nurseries, zones de reproduction, d'alimentation)	++	p. 117-118
Éviter certaines périodes	Éviter les périodes écologiquement importantes (mise bas, reproduction, alimentation, migration)	++	p. 117 à 119

## RÉDUIRE

Mesure	Description	Efficacité	Page
Restreindre l'utilisation	Utiliser le dispositif le plus adapté à l'objectif, restreindre l'étendue spatiale et temporelle d'utilisation	++	p. 123

## ACCOMPAGNER

Mesure	Page
Acquisition de connaissances complémentaires, restauration d'habitats, actions de sensibilisation, etc.	p. 140

## Bruit continu

## 9. FORAGE

## DESCRIPTION

Technique permettant de réaliser un puits dans le plancher océanique, soit pour accéder à un réservoir d'hydrocarbures, soit pour y placer un pieu.

## APPLICATIONS

- Industrie du pétrole et du gaz
- Énergies marines renouvelables
- Travaux et aménagements côtiers
- Installation de câbles et canalisations



## EXEMPLE D'UN CAS D'ÉTUDE

Conditions d'observation :

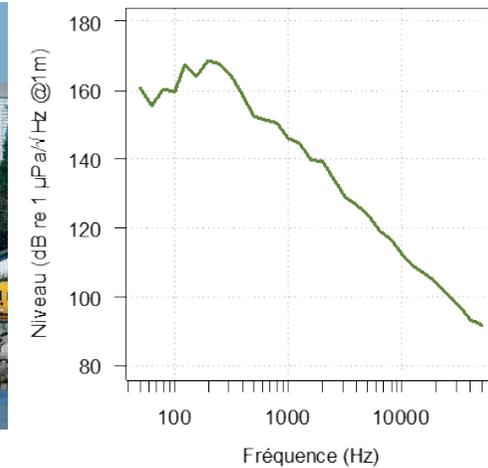
Système de forage	Système Symmetrix (permet de forer dans les sédiments meubles et/ou instables)
Nature du fond	Vase + roche
Type de support	Plateforme à terre
Diamètre de la colonne de forage	0,9 m
Vitesse de rotation	15 tr/min en moyenne
Profondeur de forage	5 m
Bathymétrie	13 m

## CAS GÉNÉRAL

Type d'émission	Continue
Bande passante (max. d'énergie)	10 Hz - 10 kHz (10-1 000 Hz)
Niveau attendu (@ 1 m)	120 à 190 dB re 1 $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$
Directivité	Omnidirectionnel

Principaux paramètres influents :

- Type de support : plateforme fixe, flottante ou mobile
- Type de roche
- Diamètre de la colonne de forage
- Profondeur



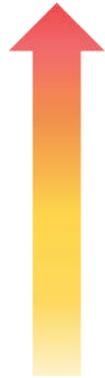
Observations :

Fréquence de maximum d'énergie	200 Hz
Niveau max. ramené @ 1 m	168 dB re 1 $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$

## Bruit continu

## 9. FORAGE

## ESPÈCES EXPOSÉES



Cétacés basse fréquence  
 Phocidés et Autres carnivores  
 Cétacés haute fréquence et très haute fréquence  
 Siréniens  
 Poissons  
 Tortues  
 Crustacés et mollusques  
 Oiseaux plongeurs

## IMPACTS POTENTIELS

## Variables en fonction des niveaux de bruits attendus

- PTS (quelques mètres)
- TTS (quelques dizaines de mètres)
- Masquage
- Dérangement
- Effets indirects (fuite des proies, perte d'habitat, etc.)
- Conséquences énergétiques / valeur sélective

## ÉVALUATION

- Liste des espèces potentiellement impactées et fréquentation de la zone d'étude (saisonnalité)
- Modélisation pour évaluer la distance d'impact pour chaque groupe d'espèce : détermination *a minima* de périmètres de dommages physiologiques (PTS)
- Intérêt de la zone pour les espèces/groupes d'espèces
- Présence de zones alternatives ?
- Cumul avec d'autres pressions

## ÉVITER

Mesure	Description	Efficacité	Page
Éviter certaines zones	Éviter les zones d'importance écologique connues (nurseries, zones de reproduction, d'alimentation)	++	p. 117-118
Éviter certaines périodes	Éviter les périodes écologiquement importantes (mise bas, reproduction, alimentation, migration)	++	p. 117 à 119

## RÉDUIRE

Mesure	Description	Efficacité	Page
Rideau de bulles, bloc isolant, etc.	Utiliser un dispositif permettant de réduire le bruit à sa source	+++	p. 128-129
Surveillance MMO – PAM + mitigation	Établissement d'un périmètre de sécurité surveillé en permanence par des MMOs + système d'acoustique passive = arrêt en cas de présence dans la zone d'exclusion	++	p. 132 à 135
Procédure de <i>pre-watch</i> et <i>soft-start</i>	Observation avant le démarrage des travaux et augmentation progressive du niveau sonore des opérations de travaux	+	p. 131-132

## ACCOMPAGNER

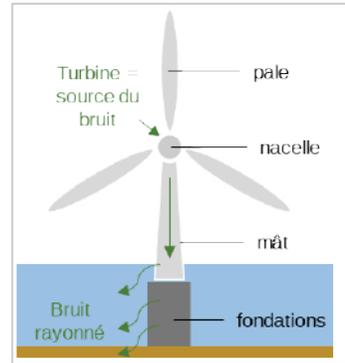
Mesure	Page
Acquisition de connaissances complémentaires, restauration d'habitats, actions de sensibilisation, etc.	p. 140

Bruit continu

## 10. ÉOLIENNE (POSÉE) EN FONCTIONNEMENT

### DESCRIPTION

Une éolienne offshore (fixée) transmet du bruit dans le milieu marin : les vibrations créées par la turbine au niveau de la nacelle se propagent *via* le mât et les fondations jusque dans la colonne d'eau et les sédiments.



### APPLICATIONS

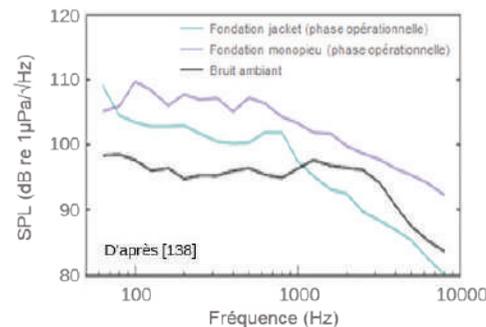
- EMR

### CAS GÉNÉRAL

Type d'émission	Continue
Bande passante (max. d'énergie)	50 Hz - 2 kHz (< 500 Hz)
Niveau attendu (@ 1 m)	120-150 dB re 1 $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$
Directivité	Omnidirectionnel

#### Principaux paramètres influents :

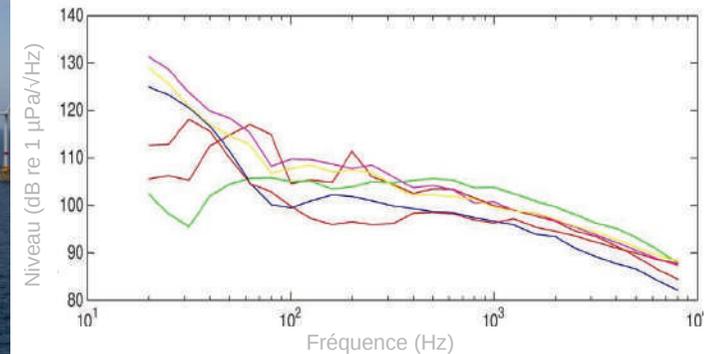
- Type de fondation (gravitaire < jacket < monopieu)
- Vitesse du vent
- Puissance unitaire des turbines



### EXEMPLE D'UN CAS D'ÉTUDE

Conditions d'observation :

Localisation	Parc éolien offshore C-Power (Thorntonbank, Belgique)
Type de fondation	Jacket (4 pieux)
Puissance unitaire des turbines	5 et 6 MW
Nombre d'éoliennes	54 (325 MW au total)
Bathymétrie	30 m en moyenne
Vitesse du vent	10 m/s
État de mer	1 à 2-3



Observations (moyenne des 5 enregistrements) :

Fréquence de max. d'énergie	20-500 Hz
Niveau max. ramené @ 1 m	133 dB re 1 $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$

D'après [139]

## 10. ÉOLIENNE (POSÉE) EN FONCTIONNEMENT

## ESPÈCES EXPOSÉES



Cétacés basse fréquence  
 Phocidés  
 Autres carnivores  
 Cétacés haute fréquence et très haute fréquence  
 Siréniens  
 Poissons  
 Tortues  
 Crustacés et mollusques  
 Oiseaux plongeurs

## IMPACTS POTENTIELS

## Impacts encore mal connus

- Masquage ?
- Déangement ?
- Effets indirects (fuite des proies, perte d'habitat, effet barrière)
- Conséquences énergétiques / valeur sélective

## ÉVALUATION

- Liste des espèces potentiellement impactées et fréquentation de la zone d'étude (saisonnalité)
- Intérêt de la zone pour les espèces/groupes d'espèces
- Présence de zones alternatives ?
- Cumul avec d'autres pressions

## ÉVITER

Mesure	Description	Efficacité	Page
Éviter certaines zones	Éviter les zones d'importance écologique connues (nurseries, zones de reproduction, d'alimentation)	++	p. 117-118
Éviter certaines périodes	Éviter les périodes écologiquement importantes (mise bas, reproduction, alimentation, migration)	++	p. 117 à 119

## RÉDUIRE

Mesure	Description	Efficacité	Page
Limiter les vibrations	Choisir des matériaux et des fondations permettant de réduire les vibrations lors du fonctionnement	+	p. 122-123
Favoriser la circulation des animaux	Penser l'implantation du parc de façon à éviter de créer un effet barrière	/	p. 123

## ACCOMPAGNER

Mesure	Page
Acquisition de connaissances complémentaires, restauration d'habitats, actions de sensibilisation, etc.	p. 140
Favoriser la colonisation des fondations (effet récif) et encadrer les activités de pêche dans le parc (effet réserve)	p. 140

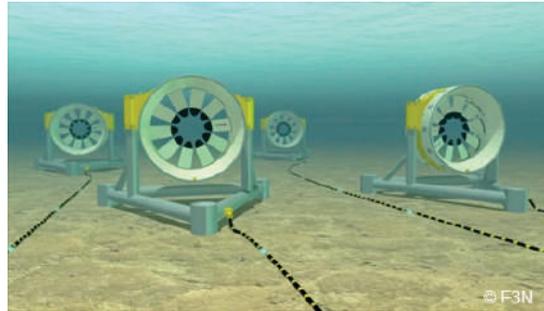
## Bruit continu

## 11. HYDROLIENNE EN FONCTIONNEMENT

## DESCRIPTION

L'hydrolienne est une turbine immergée qui produit du courant grâce aux courants marins.

L'ensemble de la structure va donc directement émettre du bruit dans le milieu marin.



## APPLICATIONS

- EMRC

## CAS GÉNÉRAL

Type d'émission	Continue
Bande passante (max. d'énergie)	10 Hz - 3 kHz ( $< 500$ Hz)
Niveau attendu (@ 1 m)	150-165 dB re 1 $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$
Directivité	Omnidirectionnel

Principaux paramètres influents :

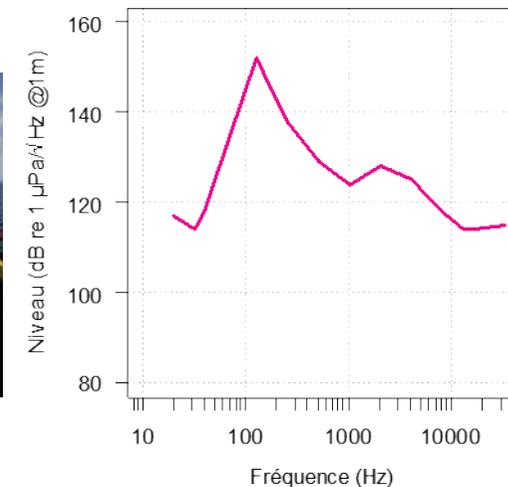
- Vitesse du courant
- Puissance unitaire des turbines



## EXEMPLE D'UN CAS D'ÉTUDE

Conditions d'observation :

Type d'hydrolienne	Hydrolienne 'Arcouest' (OpenHydro)
Puissance de la turbine	2,2 MW
Bathymétrie	Entre 40 et 50 m
Substrat	Rocheux
Conditions météorologiques	Vent : 6 à 8 nd État de mer $< 2$ Beaufort
Courant mesuré	Entre 0,69 et 1,66 m/s

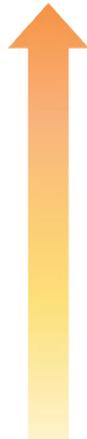


Observations :

Fréquence de max. d'énergie	128 Hz
Niveau max. ramené @ 1 m	152 dB re 1 $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$

D'après [107]

## ESPÈCES EXPOSÉES



Cétacés basse fréquence  
 Phocidés  
 Autres carnivores  
 Cétacés haute fréquence et très haute fréquence  
 Siréniens  
 Poissons  
 Tortues  
 Crustacés et mollusques  
 Oiseaux plongeurs

## IMPACTS POTENTIELS

## Impacts encore mal connus

- Masquage ?
- Dérangement ?
- Effets indirects (fuite des proies, perte d'habitat, effet barrière)
- Conséquences énergétiques / valeur sélective

## ÉVALUATION

- Liste des espèces potentiellement impactées et fréquentation de la zone d'étude (saisonnalité)
- Intérêt de la zone pour les espèces/groupes d'espèces
- Présence de zones alternatives ?
- Cumul avec d'autres pressions

## ÉVITER

Mesure	Description	Efficacité	Page
Éviter certaines zones	Éviter les zones d'importance écologique connues (nurseries, zones de reproduction, d'alimentation)	++	p. 117-118
Éviter certaines périodes	Éviter les périodes écologiquement importantes (mise bas, reproduction, alimentation, migration)	++	p. 117 à 119

## RÉDUIRE

Mesure	Description	Efficacité	Page
Technique et maintenance	Réduction du bruit généré par les pales : <i>biofouling</i> , cavitation, vitesse de rotation, <i>etc.</i>	++	p. 124
Favoriser la circulation des animaux	Penser l'implantation du parc de façon à éviter de créer un effet barrière	/	p. 123

## ACCOMPAGNER

Mesure	Page
Acquisition de connaissances complémentaires, restauration d'habitats, actions de sensibilisation, <i>etc.</i>	p.140

## Bruit continu

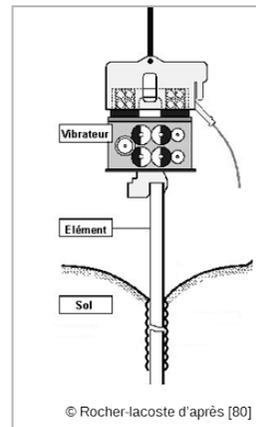
## 12. VIBROFONÇAGE

## DESCRIPTION

Technique permettant d'enfoncer un pieu ou une palplanche dans le substrat par oscillation à l'aide d'un vibreur (ou mouton).

## APPLICATIONS

- Travaux et aménagements côtiers
- Industrie du pétrole et du gaz
- Énergies marines renouvelables
- Installation de câbles et canalisations



© Rocher-lacoste d'après [80]

## CAS GÉNÉRAL

Type d'émission	Continue et impulsionnelle
Bande passante (max. d'énergie)	10 Hz - 50 kHz (25-2 000 Hz)
Niveau attendu (@ 1 m)	165-185 dB re 1 $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$
Durée d'impulsion	Quelques dizaines de ms
Directivité	Omnidirectionnel

## Principaux paramètres influents :

- Type de substrat
- Diamètre/taille du pieu/palplanche
- Profondeur d'enfouissement
- Bathymétrie
- Type de vibreur et énergie transmise
- Fréquence de vibration



ptc.fayat.com

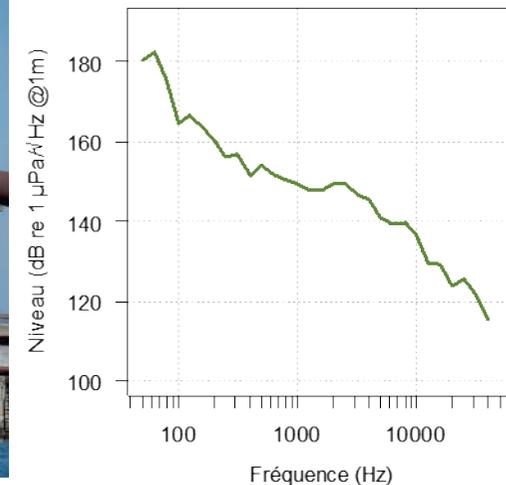
## EXEMPLE D'UN CAS D'ÉTUDE

## Conditions d'observation :

Diamètre du pieu	1,22 m
Nature du fond	Vase + roche
Bathymétrie	Environ 10 m
Type de vibreur et caractéristiques	Vibreur ICE modèle 416 L Puissance hydraulique = 209 kW Force centrifuge max. = 646 kN Poids dynamique = 2 350-2 840 kg
Fréquence de vibration	1 080 t/min (max = 1 600 t/min)



© NEREIS Environnement



## Observations :

Fréquence de max. d'énergie	63 Hz
Niveau max. ramené @ 1 m	182 dB re 1 $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$
Durée d'impulsion observée	30 ms

## 12. VIBROFONÇAGE

## ESPÈCES EXPOSÉES



Cétacés basse fréquence  
 Phocidés  
 Autres carnivores  
 Cétacés très haute fréquence  
 Cétacés haute fréquence  
 Siréniens  
 Poissons  
 Tortues  
 Crustacés et mollusques  
 Oiseaux plongeurs

## IMPACTS POTENTIELS

## Variables en fonction des niveaux de bruits attendus

- PTS et TTS possible pour certaines catégories d'espèces (cétacés basse fréquence, phocidés, certains poissons)
- Masquage
- Dérangement
- Effets indirects (fuite des proies, perte d'habitat, etc.)
- Conséquences énergétiques / valeur sélective

## ÉVALUATION

- Liste des espèces potentiellement impactées et fréquentation de la zone d'étude (saisonnalité)
- Modélisation pour évaluer la distance d'impact pour chaque groupe d'espèce : détermination *a minima* de périmètres de dommages physiologiques (PTS)
- Intérêt de la zone pour les espèces/groupes d'espèces
- Présence de zones alternatives ?
- Cumul avec d'autres pressions

## ÉVITER

Mesure	Description	Efficacité	Page
Éviter certaines zones	Éviter les zones d'importance écologique connues (nurseries, zones de reproduction, d'alimentation)	++	p. 117-118
Éviter certaines périodes	Éviter les périodes écologiquement importantes (mise bas, reproduction, alimentation, migration)	++	p. 117 à 119

## RÉDUIRE

Mesure	Description	Efficacité	Page
Surveillance MMO – PAM + mitigation	Établissement d'un périmètre de sécurité surveillé en permanence par des MMOs + système d'acoustique passive = arrêt en cas de présence dans la zone d'exclusion	++	p. 132 à 135
Procédure de <i>soft-start</i>	Augmentation progressive du niveau sonore d'une opération de travaux	+	p. 132

## ACCOMPAGNER

Mesure	Page
Acquisition de connaissances complémentaires, restauration d'habitats, actions de sensibilisation, etc.	p. 140

## Bruit continu

## 13. DRAGAGE PAR DRAGUE ASPIRATRICE EN MARCHÉ

## DESCRIPTION

Le dragage par drague aspiratrice en marche (*Trailer Suction Hopper Dredger* ou TSHD) consiste à prélever des sédiments superficiels à partir d'un navire à l'aide d'une élinde équipée d'une pompe, qui aspire le sédiment.

## APPLICATIONS

- Activités portuaires
- Extraction de granulats
- Énergies marines renouvelable
- Installation de câbles et canalisations



www.indiamart.com

## CAS GÉNÉRAL

Type d'émission	Continue
Bande passante (max. d'énergie)	30 Hz - 20 kHz (100-500 Hz)
Niveaux attendus (@ 1 m) :	
- Phase de dragage	150-190 dB re 1 $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$
- Phase de clapage	154-175 dB re 1 $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$
- En transit	~ 170 dB re 1 $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$
Directivité	Omnidirectionnel

## Principaux paramètres influents :

- Type de motorisation
- Type de substrat
- Vitesse de déplacement



© NEREIS Environnement

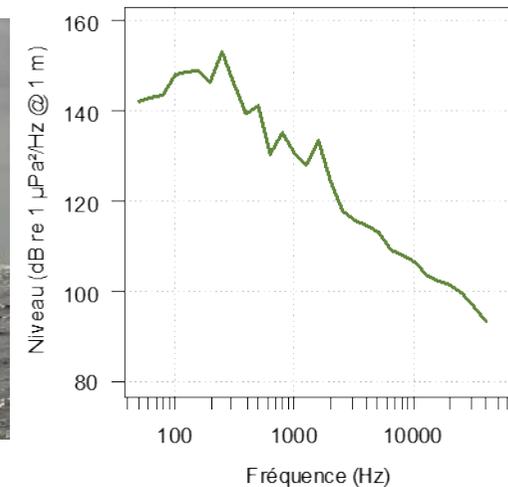
## EXEMPLE D'UN CAS D'ÉTUDE

Conditions d'observation :

Type de drague	Drague aspiratrice en marche à élinde trainante
Taille du navire	117 m
Type de motorisation	Diesel-électrique
Type de substrat	Vase
Phase enregistrée	Dragage
Vitesse de déplacement	2 à 4 nd
Bathymétrie	Supérieure à 15 m



© NEREIS Environnement



Observations :

Fréquence de max. d'énergie	200 Hz
Niveau max. ramené @ 1 m	153 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$

## 13. DRAGAGE PAR DRAGUE ASPIRATRICE EN MARCHÉ

## ESPÈCES EXPOSÉES



Cétacés basse fréquence  
 Phocidés  
 Autres carnivores  
 Cétacés très haute fréquence  
 Cétacés haute fréquence et Siréniens  
 Poissons  
 Tortues  
 Oiseaux plongeurs  
 Crustacés et mollusques

## IMPACTS POTENTIELS

## Variables en fonction des navires, des techniques et des phases opérationnelles

- Masquage
- Dérangement
- Effets indirects (fuite/destruction des proies, perte d'habitat, etc.)
- Conséquences énergétiques / valeur sélective

## ÉVALUATION

- Liste des espèces potentiellement impactées et fréquentation de la zone d'étude (saisonnalité)
- Intérêt de la zone pour les espèces/groupes d'espèces
- Présence de zones alternatives ?
- Cumul avec d'autres pressions

## ÉVITER

Mesure	Description	Efficacité	Page
Éviter certaines zones	Éviter les zones d'importance écologique connues (nurseries, zones de reproduction, d'alimentation)	++	p. 117-118
Éviter certaines périodes	Éviter les périodes écologiquement importantes (mise bas, reproduction, alimentation, migration)	++	p. 117 à 119

## RÉDUIRE

Mesure	Description	Efficacité	Page
Améliorations techniques	Conception : coque, hélice, propulsion, etc. Réduction des phénomènes de cavitation et des vibrations	++	p. 123-124
Adaptations	Réduire la vitesse des navires en transit	++	p. 124

## ACCOMPAGNER

Mesure	Page
Acquisition de connaissances complémentaires, restauration d'habitats, actions de sensibilisation, etc.	p. 140

## Bruit continu

## 14. NAVIRE DE PÊCHE CÔTIÈRE (&lt; 12 M)

## DESCRIPTION

Les navires de pêche génèrent du bruit sous-marin, principalement du fait de la machinerie (moteur, génératrice, auxiliaires) et de la propulsion (hélice notamment). Les interférences électriques et l'utilisation d'échosondeur(s) contribuent également à la signature acoustique des navires de pêche.

Leur vitesse de croisière se situe généralement autour de 10 nd.

## APPLICATIONS

- Activités halieutiques
- Activités scientifiques/Recherche



## CAS GÉNÉRAL

Type d'émission	Continue
Bande passante (max. d'énergie)	10 Hz - 20 kHz (100 Hz - 2 kHz)
Niveau attendu (@ 1 m)	130-160 dB re 1 $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$
Directivité	Omnidirectionnel

## Principaux paramètres influents :

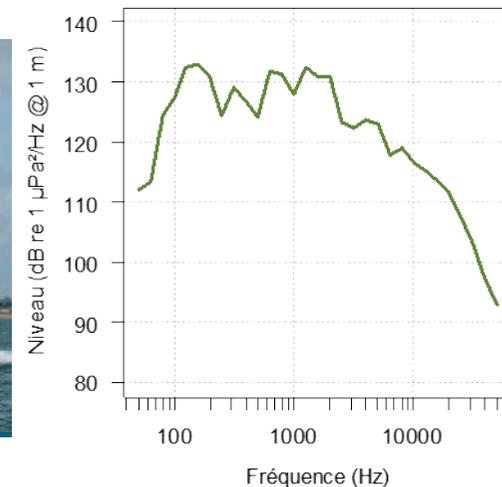
- Taille du navire
- Caractéristiques du moteur et de la propulsion
- Vitesse de déplacement
- Âge du navire et entretien
- Type de coque



## EXEMPLE D'UN CAS D'ÉTUDE

## Conditions d'observation :

Type de navire de pêche	Chalutier
Puissance moteur	242 kW
Taille du navire	11,98 m
Vitesse de déplacement	Environ 7 nd
Type de coque	Polyester
Année de construction	1989



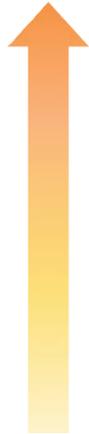
## Observations :

Fréquence de max. d'énergie	125, 160 et 250 Hz
Niveau max. ramené @ 1 m	133 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$

## Bruit continu

## 14. NAVIRE DE PÊCHE CÔTIÈRE (&lt; 12 M)

## ESPÈCES EXPOSÉES



Cétacés basse fréquence  
 Phocidés  
 Autres carnivores  
 Cétacés haute fréquence et très haute fréquence  
 Siréniens  
 Poissons  
 Tortues  
 Crustacés et mollusques  
 Oiseaux plongeurs

## IMPACTS POTENTIELS

## Variables en fonction du navire et de sa vitesse

- Masquage
- Dérangement
- Effets indirects (fuite des proies, perte d'habitat, etc.)
- Conséquences énergétiques / valeur sélective

## ÉVALUATION

Aucune recommandation

## ÉVITER

Mesure	Description	Efficacité	Page
Éviter certaines zones	Éviter les zones d'importance écologique connues (nurseries, zones de reproduction, d'alimentation)	++	p. 117-118
Éviter certaines périodes	Éviter les périodes écologiquement importantes (mise bas, reproduction, alimentation, migration)	++	p. 117 à 119

## RÉDUIRE

Mesure	Description	Efficacité	Page
Améliorations techniques	Conception : coque, hélice, propulsion, etc. Réduction des phénomènes de cavitation et des vibrations	++	p.123-124
Adaptations	Réduire la vitesse de navigation	++	p.124

## ACCOMPAGNER

Mesure	Page
Acquisition de connaissances complémentaires et développement de nouvelles pratiques	p. 125-126 p. 140

Bruit continu

15. NAVIRE TECHNIQUE

**DESCRIPTION**

Les navires techniques regroupent l'ensemble des navires de petite taille (< 50 m) susceptibles d'intervenir pour le fonctionnement des ports, la sécurité en mer, le transport d'équipe sur des chantiers offshore, le contrôle des installations EMR, etc.

Ces navires sont équipés de moteurs *in-board*. Leur vitesse de croisière varie entre 8 et 25 nd.

**APPLICATIONS**

- Activités portuaires
- EMR
- Trafic maritime



**CAS GÉNÉRAL**

Type d'émission	Continue
Bande passante (max. d'énergie)	1 Hz à 20 kHz (< 1 000 Hz)
Niveau attendu (@ 1 m)	150-180 dB re 1 µPa/√Hz
Directivité	Omnidirectionnel

Principaux paramètres influents :

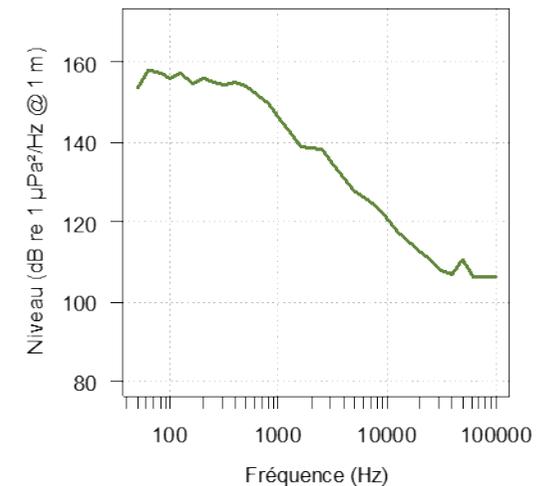
- Taille du navire
- Caractéristiques du moteur et de la propulsion
- Vitesse de déplacement
- Type de coque



**EXEMPLE D'UN CAS D'ÉTUDE**

Conditions d'observation :

Type de navire	Navire de travaux polyvalent
Type de propulsion	2 x 1 140 kW
Taille du navire	34 m
Vitesse de déplacement	4 nd
Année de construction	2015



Observations :

Fréquence de max. d'énergie	63 Hz
Niveau max. ramené @ 1 m	158 dB re 1 µPa²/Hz

## Bruit continu

## 15. NAVIRE TECHNIQUE

## ESPÈCES EXPOSÉES



Cétacés basse fréquence  
 Phocidés et Autres carnivores  
 Cétacés haute fréquence et très haute fréquence  
 Siréniens  
 Poissons  
 Tortues  
 Crustacés et mollusques  
 Oiseaux plongeurs

## IMPACTS POTENTIELS

Variable en fonction du navire et de sa vitesse

- Masquage
- Dérangement
- Effets indirects (fuite des proies, perte d'habitat, etc.)
- Conséquences énergétiques / valeur sélective

## ÉVALUATION

Aucune recommandation à l'heure actuelle. Cependant, une évaluation des impacts potentiels (liste des espèces présentes, fréquentation de la zone, modélisation des périmètres d'impact) pourrait être recommandée dans les zones de fort intérêt écologique (aires marines protégées, zones de frayère, d'alimentation, nurseries).

## ÉVITER

Mesure	Description	Efficacité	Page
Éviter certaines zones	Éviter les zones d'importance écologique connues (nurseries, zones de reproduction, d'alimentation)	++	p. 117-118
Éviter certaines périodes	Éviter les périodes écologiquement importantes (mise bas, reproduction, alimentation, migration)	++	p. 117 à 119

## RÉDUIRE

Mesure	Description	Efficacité	Page
Améliorations techniques	Conception : coque, hélice, propulsion, etc. Réduction des phénomènes de cavitation et des vibrations	++	p. 123-124
Adaptations	Réduire la vitesse de navigation	++	p. 124

## ACCOMPAGNER

Mesure	Page
Acquisition de connaissances complémentaires et développement de nouvelles pratiques	p. 125-126 p. 140

Bruit continu

16. NAVIRE DE COMMERCE DE PLUS DE 100 M

DESCRIPTION

Les navires de commerce de grande taille (> 100 m) incluent les porte-conteneurs, les tankers et supertankers, les vraquiers et les paquebots. Ce type de navire contribue significativement au bruit ambiant sous-marin global.

Ces navires se caractérisent par des émissions sonores basse et très basse fréquence et une vitesse de croisière située entre 10 et 20 nd.



APPLICATIONS

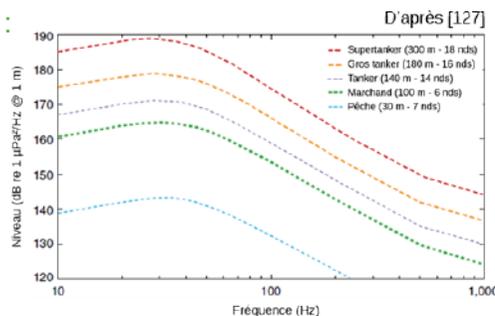
- Trafic maritime
- Activités portuaires

CAS GÉNÉRAL

Type d'émission	Continue
Bande passante (max. d'énergie)	1 Hz à 10 kHz (< 500 Hz)
Niveau attendu (@ 1 m)	170-190 dB re 1 µPa²/√Hz
Directivité	Omnidirectionnel

Principaux paramètres influents :

- Taille du navire
- Caractéristiques du moteur et de la propulsion
- Vitesse de déplacement
- Âge du navire et entretien
- Poids du chargement

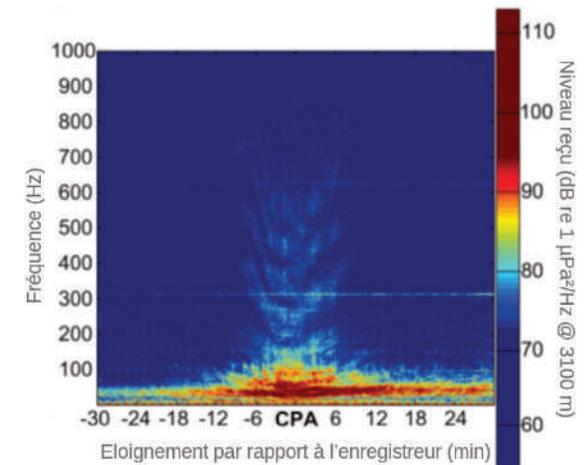


EXEMPLE D'UN CAS D'ÉTUDE

Conditions d'observation :

Type de navire	Oil Tanker
Taille du navire	228 m
Puissance moteur	13 500 kW
Tonnage	42 514 t
Vitesse de déplacement	15 nd
Année de construction	2007
Distance/enregistreur (CPA*)	3 100 m

\*CPA : Closest Point of Approach (point où la distance entre l'enregistreur et le navire est minimale)



Observations :

Fréquence de max. d'énergie	< 100 Hz
Niveau max. ramené @ 1 m	183 dB re 1 µPa²/√Hz

D'après [117]

**ESPÈCES EXPOSÉES**

Cétacés basse fréquence  
 Phocidés  
 Autres carnivores  
 Cétacés haute fréquence et très haute fréquence  
 Siréniens  
 Poissons  
 Tortues  
 Crustacés et mollusques  
 Oiseaux plongeurs

**IMPACTS POTENTIELS****Variables en fonction du navire et de sa vitesse**

- Masquage
- Dérangement
- Effets indirects (fuite des proies, perte d'habitat, etc.)
- Conséquences énergétiques / valeur sélective

**ÉVALUATION**

Aucune recommandation à l'heure actuelle. Cependant, une évaluation des impacts potentiels (liste des espèces présentes, fréquentation de la zone, modélisation des périmètres d'impact) pourrait être recommandée dans les zones de fort intérêt écologique (aires marines protégées, zones de frayère, d'alimentation, nurseries).

**ÉVITER**

Mesure	Description	Efficacité	Page
Éviter certaines zones	Éviter les zones d'importance écologique connues (nurseries, zones de reproduction, d'alimentation)	++	p. 117-118
Éviter certaines périodes	Éviter les périodes écologiquement importantes (mise bas, reproduction, alimentation, migration)	++	p. 117 à 119

**RÉDUIRE**

Mesure	Description	Efficacité	Page
Améliorations techniques	Conception : coque, hélice, propulsion, etc. Réduction des phénomènes de cavitation et des vibrations	++	p. 123-124
Adaptations	Réduire la vitesse de navigation	++	p. 124

**ACCOMPAGNER**

Mesure	Page
Acquisition de connaissances complémentaires et développement de nouvelles pratiques	p. 125-126 p. 140

## Bruit continu

## 17. NAVIRE À GRANDE VITESSE

## DESCRIPTION

Les navires à grande vitesse (NGV) sont généralement affectés au transport de passagers sur de courtes distances (traversée de la Manche, du Pas-de-Calais, liaisons Corse-continent, etc.).

Leur vitesse maximale est généralement comprise entre 30 et 40 nd.

## APPLICATIONS

- Trafic maritime (transport de passagers)



## CAS GÉNÉRAL

Type d'émission	Continue
Bande passante (max. d'énergie)	1 Hz - 25 kHz (< 200 Hz)
Niveau attendu (@ 1 m)	150-200 dB re 1 $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$
Directivité	Omnidirectionnel

## Principaux paramètres influents :

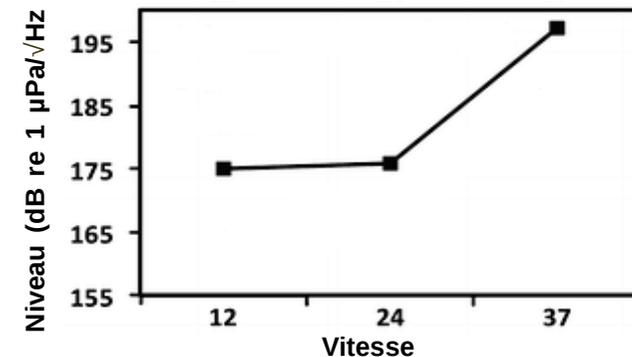
- Taille du navire
- Caractéristiques du moteur et de la propulsion
- Vitesse de déplacement
- Type de coque



## EXEMPLE D'UN CAS D'ÉTUDE

Conditions d'observation :

Type de navire	Transport de passagers et véhicules
Type de propulsion	Hydrojets (4 x 8 200 kW)
Taille du navire	110 m
Vitesses observées	12, 24 et 37 nd
Type de coque	Aluminium
Année de construction	2007



Observations :

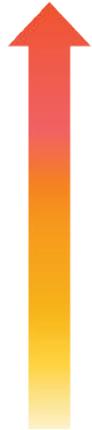
Fréquence de max. d'énergie	< 100 Hz
Niveau max. ramené @ 1 m	197 dB re 1 $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$ à 37 nd

D'après [163]

## Bruit continu

## 17. NAVIRE À GRANDE VITESSE

## ESPÈCES EXPOSÉES



Cétacés basse fréquence  
 Phocidés  
 Autres carnivores  
 Cétacés haute fréquence et très haute fréquence  
 Siréniens  
 Poissons  
 Tortues  
 Crustacés et mollusques  
 Oiseaux plongeurs

## IMPACTS POTENTIELS

- TTS
- Masquage
- Dérangement
- Effets indirects (fuite des proies, perte d'habitat, etc.)
- Conséquences énergétiques / valeur sélective

## ÉVALUATION

Aucune recommandation à l'heure actuelle. Cependant, une évaluation des impacts potentiels (liste des espèces présentes, fréquentation de la zone, modélisation des périmètres d'impact) pourrait être recommandée dans les zones de fort intérêt écologique (aires marines protégées, zones de frayère, d'alimentation, nurseries).

## ÉVITER

Mesure	Description	Efficacité	Page
Éviter certaines zones	Éviter les zones d'importance écologique connues (nurseries, zones de reproduction, d'alimentation)	++	p. 117-118
Éviter certaines périodes	Éviter les périodes écologiquement importantes (mise bas, reproduction, alimentation, migration)	++	p. 117 à 119

## RÉDUIRE

Mesure	Description	Efficacité	Page
Améliorations techniques	Conception : coque, hélice, propulsion, etc. Réduction des phénomènes de cavitation et des vibrations	++	p. 123-124
Adaptations	Réduire la vitesse de navigation	++	p. 124

## ACCOMPAGNER

Mesure	Page
Acquisition de connaissances complémentaires et développement de nouvelles pratiques	p. 125-126 p. 140

## Bruit continu

## 18. NAVIRE DE PLAISANCE À MOTEUR HORS-BORD (&lt; 12 M)

## DESCRIPTION

Les navires de plaisance dotés de moteurs hors-bord génèrent du bruit sous-marin, principalement lié aux phénomènes de cavitation (bulles) au niveau de leur appareil propulsif.

## APPLICATIONS

- Activités récréatives
- Activités scientifiques/Recherche



## CAS GÉNÉRAL

Type d'émission	Continue
Bande passante (max. d'énergie)	10 Hz - 20 kHz (100 Hz - 1 kHz)
Niveau attendu (@ 1 m)	135-175 dB re 1 $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$
Directivité	Omnidirectionnel

## Principaux paramètres influents :

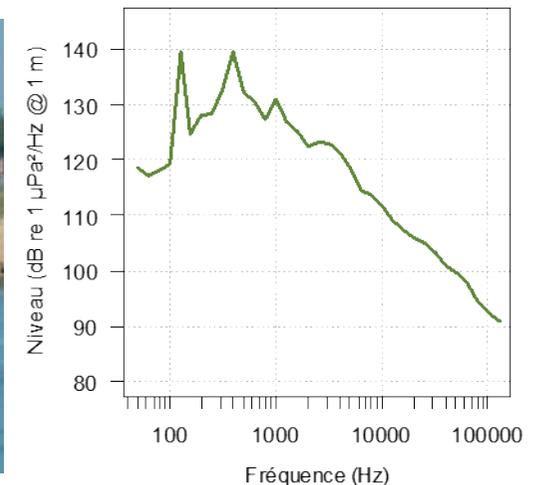
- Taille du navire
- Vitesse de déplacement
- Caractéristiques du moteur et de la propulsion
- Type de coque



## EXEMPLE D'UN CAS D'ÉTUDE

Conditions d'observation :

Type de navire	Bateau de club de plongée
Puissance de la motorisation	Moteur Yamaha 150 cv
Taille du navire	8 m
Vitesse de déplacement	Environ 10 nd
Type de coque	Aluminium



Observations :

Fréquence de max. d'énergie	125 et 400 Hz
Niveau max. ramené @ 1 m	139 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$

## 18. NAVIRE DE PLAISANCE À MOTEUR HORS-BORD (&lt; 12 M)

## ESPÈCES EXPOSÉES



Cétacés basse fréquence  
 Phocidés  
 Autres carnivores  
 Cétacés haute fréquence et très haute fréquence  
 Siréniens  
 Poissons  
 Tortues  
 Crustacés et mollusques  
 Oiseaux plongeurs

## IMPACTS POTENTIELS

## Variables en fonction du navire et de sa vitesse

- Masquage
- Dérangement
- Effets indirects (fuite des proies, perte d'habitat, etc.)
- Conséquences énergétiques / valeur sélective

## ÉVALUATION

Aucune recommandation

## ÉVITER

Mesure	Description	Efficacité	Page
Éviter certaines zones	Éviter les zones d'importance écologique connues (nurseries, zones de reproduction, d'alimentation)	++	p. 117-118
Éviter certaines périodes	Éviter les périodes écologiquement importantes (mise bas, reproduction, alimentation, migration)	++	p. 117 à 119

## RÉDUIRE

Mesure	Description	Efficacité	Page
Améliorations techniques	Conception : coque, hélice, propulsion, etc. Réduction des phénomènes de cavitation et des vibrations	++	p. 123-124
Adaptations	Réduire la vitesse de navigation	++	p. 124

## ACCOMPAGNER

Mesure	Page
Acquisition de connaissances complémentaires et développement de nouvelles pratiques	p. 125-126 p. 140

Bruit continu

19. MOTOMARINE

**DESCRIPTION**

Les motomarines (jet-skis et scooters des mers) génèrent du bruit sous-marin qui provient principalement des bulles formées par le système de propulsion par hydrojet et par la rotation des pales de la turbine (phénomènes de cavitation).

Leur vitesse maximale se situe généralement autour de 40 nd (jusqu'à 70 nd pour les engins de compétition).



**APPLICATIONS**

- Activités récréatives

**CAS GÉNÉRAL**

Type d'émission	Continue
Bande passante (max. d'énergie)	100 Hz - 10 kHz (< 2 000 Hz)
Niveau attendu (@ 1 m)	120-190 dB re 1 $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$
Directivité	Omnidirectionnel

Principaux paramètres influents :

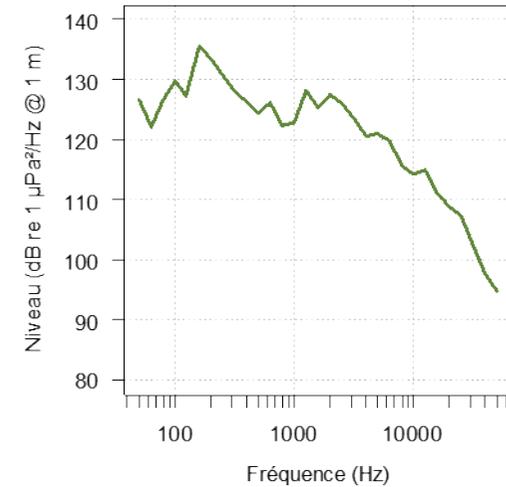
- Type d'engin
- Motorisation
- Vitesse de déplacement



**EXEMPLE D'UN CAS D'ÉTUDE**

Conditions d'observation :

Type d'engin	Jet-ski
Type de moteur	4 temps
Puissance de la motorisation	110 cv
Vitesse de déplacement	Variable, 10 nd en moyenne



Observations :

Fréquence de max.d'énergie	160 Hz
Niveau max. ramené @ 1 m	136 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$

## 19. MOTOMARINE

## ESPÈCES EXPOSÉES



Cétacés basse fréquence  
 Phocidés  
 Autres carnivores  
 Cétacés haute fréquence et très haute fréquence  
 Siréniens  
 Poissons  
 Tortues  
 Crustacés et mollusques  
 Oiseaux plongeurs

## IMPACTS POTENTIELS

## Variables en fonction du type d'engin et de sa vitesse

- TTS ?
- Masquage
- Dérangement
- Effets indirects (fuite des proies, perte d'habitat, etc.)
- Conséquences énergétiques / valeur sélective

## ÉVALUATION

Aucune recommandation à l'heure actuelle. Cependant, une évaluation des impacts potentiels (liste des espèces présentes, fréquentation de la zone, modélisation des périmètres d'impact) pourrait être recommandée dans les zones de fort intérêt écologique (aires marines protégées, zones de frayère, d'alimentation, nurseries).

## ÉVITER

Mesure	Description	Efficacité	Page
Éviter certaines zones	Éviter les zones d'importance écologique connues (nurseries, zones de reproduction, d'alimentation)	++	p. 117-118
Éviter certaines périodes	Éviter les périodes écologiquement importantes (mise bas, reproduction, alimentation, migration)	++	p. 117 à 119

## RÉDUIRE

Mesure	Description	Efficacité	Page
Améliorations techniques	Conception : coque, hélice, propulsion, etc. Réduction des phénomènes de cavitation et des vibrations	++	p. 123-124
Adaptations	Réduire la vitesse de navigation	++	p. 124

## ACCOMPAGNER

Mesure	Page
Acquisition de connaissances complémentaires et développement de nouvelles pratiques	p. 125-126 p. 140

## BIBLIOGRAPHIE

1. Abadie, A. & Viala, C., 2018. Le sondeur multifaisceaux en hydrographie : utilisations actuelles et futures. XYZ **157**, 17-27.
2. ACCOBAMS, 2016. Methodological Guide: Guidance on underwater noise mitigation measures. V. 2.0. Sixth Meeting of the Parties to ACCOBAMS, Monaco.
3. Aguilar de Soto, N., Delorme, N., Atkins, J., Howard, S., Williams, J. & Johnson, M., 2013. Anthropogenic noise causes body malformations and delays development in marine larvae. Scientific Reports **3** (Article number : 2831), 1-5.
4. Ainslie, M. A., de Jong, C. A. F., Dol, H. S., Blacquièrre, G. & Marasini, C., 2009. Assessment of natural and anthropogenic sound sources and acoustic propagation in the North Sea. TNO Defensie en Veiligheid, TNO Report n°TNO-DV 2009 C085, 110 p.
5. Anderson Hansen, K., Larsen, O. N., Wahlberg, M. & Siebert, U., 2016. Underwater hearing in the great cormorant (*Phalacrocorax carbo sinensis*): Methodological considerations. Fourth International Conference on the Effects of Noise on Aquatic Life, Dublin, Ireland. Proceedings of Meetings on Acoustics, Vol. 27.
6. Andersson, M. H., Andersson, S., Ahlsén, J., Andersson, B. L., Hammar, J., Persson, L. K., Pihl, J., Sigra, P. & Andreas, W., 2017. A framework for regulating underwater noise during pile driving. A technical Vindval report, Swedish Environmental Protection Agency, Stockholm, Sweden, Report 6775, 113 p.
7. André, M., Solé, M., Lenoir, M., Durfort, M., Quero, C., Mas, A., Lombarte, A., Van der Schaar, M., López-Bejar, M., Morell, M., Zaugg, S. & Houégnigan, L., 2011. Low-frequency sounds induce acoustic trauma in cephalopods. Frontiers in Ecology and the Environment **9** (9), 489-493.
8. Andrew, R. K., Howe, B. M., Mercer, J. A. & Dzieciuch, M. A., 2002. Ocean ambient sound: Comparing the 1960s with the 1990s for a receiver off the California coast. Acoustics Research Letters Online **3** (2), 65-70.
9. Audoly, C., Rousset, C., Baudin, E. & Folegot, T., 2016. AQUO Project - Research on solutions for the mitigation of shipping noise and its impact on marine fauna – Synthesis of guidelines. 23rd International Congress on Sound & Vibration, Athens, Greece.
10. Bailey, H., Senior, B., Simmons, D., Rusin, J., Picken, G. & Thompson, P. M., 2010. Assessing underwater noise levels during pile-driving at an offshore windfarm and its potential effects on marine mammals. Marine Pollution Bulletin **60** (6), 888-897.
11. Bain, D. & Williams, R., 2006. Long-range effects of airgun noise on marine mammals: responses as a function of received sound level and distance. 58th Meeting of the International Whaling Commission, Saint Kitts and Nevis.

12. Barham, R. J., 2017. App D13.09 - Underwater noise baseline and modelling. Subacoustech, Report n°E522R0704, 46 p.
13. Beale, C. M. & Monaghan, P., 2004. Behavioural responses to human disturbance: a matter of choice? *Animal Behaviour* **68** (5), 1065-1069.
14. Bejder, L., Samuels, A., Whitehead, H., Finn, H. & Allen, S., 2009. Impact assessment research: use and misuse of habituation, sensitisation and tolerance in describing wildlife responses to anthropogenic stimuli. *Marine Ecology Progress Series* **395**, 177-185.
15. Bellmann, M. A., 2014. Overview of existing Noise Mitigation Systems for reducing Pile-Driving Noise. Inter.noise 2014, Melbourne, Australia.
16. Berkowitz, H. & Dumez, H. (Eds.), 2017. Racket in the oceans: why underwater noise matters, how to measure and how to manage it. Paris, Observatory for Responsible Innovation (Mines ParisTech) / Palaiseau (France): i3-CRG (CNRS – École polytechnique), 123 p.
17. Betke, K., 2006. Measurement of underwater noise emitted by an offshore wind turbine at Horns Rev. ITAP, 19 p.
18. Blair, H. B., Merchant, N., D., Friedlaender, A. S., Wiley, D. N. & Parks, S. E., 2016. Evidence for ship noise impacts on humpback whale foraging behaviour. *Biology letters* **12** (8), Art. n°20160005.
19. Brandt, M. J., Diederichs, A., Betke, K. & Nehls, G., 2011. Responses of harbour porpoises to pile driving at the Horns Rev II offshore wind farm in the Danish North Sea. *Marine Ecology Progress Series* **421**, 205-216.
20. Brandt, M. J., Höschle, C., Diederichs, A., Betke, K., Matuschek, R., Witte, S. & Nehls, G., 2012. Effectiveness of a sealscarrer in deterring harbour porpoises (*Phocoena phocoena*). BioConsult SH, Final report, 109 p.
21. BSH, 2013. Investigation of the Impacts of Offshore Wind Turbines on the Marine Environment (StUK4). Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), BSH-Nr. 7003, 86 p.
22. Carlström, J., Berggren, P. & Tregenza, N. J. C., 2009. Spatial and temporal impact of pingers on porpoises. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **66** (1), 72-82.
23. Carr, S. A., Laurinolli, M. H., Tollefsen, C. D. S. & Turner, S. P., 2006. Cacouna Energy LNG Terminal: Assessment of Underwater Noise Impacts. JASCO Research Ltd., 39 p.
24. Carroll, A. G., Przeslawski, R., Duncan, A., Gunning, M. & Bruce, B., 2017. A critical review of the potential impacts of marine seismic surveys on fish & invertebrates. *Marine Pollution Bulletin* **114** (1), 9-24.

25. Carstensen, J., Henriksen, O. D. & Teilmann, J., 2006. Impacts of offshore wind farm construction on harbour porpoises: acoustic monitoring of echolocation activity using porpoise detectors (T-PODs). *Marine Ecology Progress Series* **321**, 295-308.
26. Casper, B. M., 2006. The hearing abilities of elasmobranch fishes. Graduate Theses and Dissertations, University of South Florida, 146 p.
27. Castellote, M., Clark, C. W. & Lammers, M. O., 2012. Acoustic and behavioural changes by fin whales (*Balaenoptera physalus*) in response to shipping and airgun noise. *Biological Conservation* **147** (1), 115-122.
28. Cato, D. H., Noad, M. J., Dunlop, R. A., McCauley, R. D., Gales, N. J., Salgado Kent, C. P., Kniest, H., Paton, D., Jenner, K. C. S., Noad, J., Maggi, A. L., Parnum, I. M. & Duncan, A. J., 2013. A study of the behavioural response of whales to the noise of seismic air guns: Design, methods and progress. *Acoustics Australia* **41** (1), 88-97.
29. CEDA, 2011. Underwater Sound In Relation To Dredging. Central Dredging Association, 6 p.
30. Chapman, N. R. & Price, A., 2011. Low frequency deep ocean ambient noise trend in the Northeast Pacific Ocean. *The Journal of the Acoustical Society of America* **129** (5), EL161-EL165.
31. Clark, C. W., Ellison, W. T., Southall, B. L., Hatch, L., Van Parijs, S. M., Frankel, A. & Ponirakis, D., 2009. Acoustic masking in marine ecosystems: intuitions, analysis, and implication. *Marine Ecology Progress Series* **395**, 201-222.
32. Clarke Murray, C., Mach, M. E. & Martone, R. G., 2014. Cumulative effects in marine ecosystems: scientific perspectives on its challenges and solutions. WWF-Canada & Center For Ocean Solutions, 60 p.
33. Codarin, A., Wysocki, L. E., Ladich, F. & Picciulin, M., 2009. Effects of ambient and boat noise on hearing and communication in three fish species living in a marine protected area (Miramare, Italy). *Marine Pollution Bulletin* **58** (12), 1880-1887.
34. Compton, R., Goodwin, L., Handy, R. & Abbott, V., 2008. A critical examination of worldwide guidelines for minimising the disturbance to marine mammals during seismic surveys. *Marine Policy* **32** (3), 255-262.
35. Cox, T. M., Ragen, T. J., Read, A. J., Vos, E., Baird, R. W., Balcomb, K., Barlow, J., Caldwell, J., Cranford, T., Crum, L., D' Amico, A., D' Spain, G., Fernandez, A., Finneran, J. J., Gentry, R. L., Gerth, W., Gulland, F., Hildebrand, J., Houser, D., Hullar, T., Jepson, P. D., Ketten, D. R., MacLeod, C. D., Miller, P., Moore, S., Mountain, D. C., Palka, D., Ponganis, P., Rommel, S., Rowles, T. K., Taylor, B., Tyack, P. L., Wartzok, D., Gisiner, R. C., Mead, J. G. & Benner, L., 2006. Understanding the impacts of anthropogenic sound on beaked whales. *Journal of Cetacean Research and Management* **7** (3), 177-187.
36. Dahl, P. H., de Jong, C. A. F. & Popper, A. N., 2015. The Underwater sound field from Impact Pile Driving and Its Potential Effects on Marine life. *Acoustics Today* **11** (2), 18-25.

37. Dähne, M., Gilles, A., Lucke, K., Peschko, V., Adler, S., Krügel, K., Sundermeyer, J. & Siebert, U., 2013. Effects of pile-driving on harbour porpoises (*Phocoena phocoena*) at the first offshore wind farm in Germany. *Environmental Research Letters* **8** (2), 025002 (16 pp).
38. Dähne, M., Tougaard, J., Carstensen, J., Rose, A. & Nabe-Nielsen, J., 2017. Bubble curtains attenuate noise from offshore wind farm construction and reduce temporary habitat loss for harbour porpoises. *Marine Ecology Progress Series* **580**, 221-237.
39. Department of Conservation, 2013. 2013 Code of Conduct for Minimising Acoustic Disturbance to Marine Mammals from Seismic Survey Operations. New Zealand Department of Conservation, 30 p.
40. DeRuiter, S. L. & Larbi Doukara, K., 2012. Loggerhead turtles dive in response to airgun sound exposure. *Endangered Species Research* **16** (1), 55-63.
41. Di Iorio, L. & Clark, C. W., 2010. Exposure to seismic survey alters blue whale acoustic communication. *Biology letters* **6** (1), 51-54.
42. Dolman, S. J., Weir, C. R. & Jasny, M., 2009. Comparative review of marine mammal guidance implemented during naval exercises. *Marine Pollution Bulletin* **58** (4), 465-477.
43. Donovan, C. R., Harris, C. M., Milazzo, L., Harwood, J., Marshall, L. & Williams, R., 2017. A simulation approach to assessing environmental risk of sound exposure to marine mammals. *Ecology and evolution* **7** (7), 2101-2111.
44. Dow Piniak, W. E., 2012. Acoustic Ecology of Sea Turtles: Implications for Conservation. Dissertation, Duke University, 114 p.
45. Dow Piniak, W. E., Eckert, S. A., Harms, C. A. & Stringer, E. M., 2012. Underwater hearing sensitivity of the leatherback sea turtle (*Dermochelys coriacea*): Assessing the potential effect of anthropogenic noise. U.S. Department of the Interior Bureau of Ocean Energy Management, Headquarters, Herndon, VA., OCS Study BOEM 2012-01156, 25 p.
46. Ducatel, C., 2019. Protocole de protection de la faune marine lors des campagnes sismiques. IFREMER, IFREMER/DFO/NSE, ASTI-2019-148, 49 p.
47. Duncan, A. J., Weilgart, L. S., Leaper, R., Jasny, M. & Livermore, S., 2017. A modelling comparison between received sound levels produced by a marine Vibroseis array and those from an airgun array for some typical seismic survey scenarios. *Marine Pollution Bulletin* **119** (1), 277-288.
48. Dunlop, R. A., Cato, D. H. & Noad, M. J., 2010. Your attention please: increasing ambient noise levels elicits a change in communication behaviour in humpback whales (*Megaptera novaeangliae*). *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* **277** (1693), 2521-2529.
49. Dunlop, R. A., Noad, M. J., McCauley, R. D., Kniest, E., Slade, R., Paton, D. & Cato, D. H., 2016. Response of humpback whales (*Megaptera novaeangliae*) to ramp-up of a small experimental air gun array. *Marine Pollution Bulletin* **103** (1), 72-83.

50. Dzwilewski, P. T. & Fenton, G., 2003. Shock Wave/Sound Propagation Modeling Results for Calculating Marine Protected Species Impact Zones During Explosive Removal of Offshore Structures. U.S. Department of the Interior, Minerals Management Service, OCS Study MMS 2003-059, 39 p.
51. East, S., 2018. Underwater noise propagation modelling at Port of Cromarty Firth, Invergordon, Scotland. Subacoustech Environmental Report No. P226R0103, 25 p.
52. Edmonds, N., Firmin, C., Goldsmith, D., Faulkner, R. & Wood, D., 2016. A review of crustacean sensitivity to high amplitude underwater noise: Data needs for effective risk assessment in relation to UK commercial species. *Marine Pollution Bulletin* **108** (1), 5-11.
53. Elmer, K.-H., 2013. Underwater pile driving noise reduction by air filled balloons and PE-foam elements as Hydro Sound Dampers. ALA-DAGA 2013, Merano.
54. Elmer, K.-H., Gerasch, W.-J., Neumann, T., Gabriel, J., Betke, K. & Schltz-von Glahn, M., 2007. Measurement and Reduction of Offshore Wind Turbine Construction Noise. *DEWI Magazin* **30**, 33-38.
55. Enger, P. S., 1967. Hearing in herring. *Comparative Biochemistry and Physiology* **22** (2), 527-538.
56. Erbe, C., 2009. Underwater noise from pile driving in Moreton Bay, QLD. *Acoustics Australia* **37** (3), 87-92.
57. Erbe, C., 2011. Underwater Acoustics: Noise and the Effects on Marine Mammals - A Pocket Handbook. JASCO Applied Sciences, Brisbane, Australia, 64 p.
58. Erbe, C., 2013. Underwater noise of small personal watercraft (jet skis). *The Journal of the Acoustical Society of America* **133** (4), EL326-EL330.
59. Erbe, C., Dunlop, R. & Dolman, S., 2018. Effects of Noise on Marine Mammals. In: *Effects of Anthropogenic Noise on Animals*. H. Slabbekoorn, R. J. Dooling, A. N. Popper & R. R. Fay (Eds). Springer, New York, pp 277-309.
60. Erbe, C., McCauley, R., McPherson, C. & Gavrilov, A., 2013. Underwater noise from offshore oil production vessels. *The Journal of the Acoustical Society of America* **133** (6), EL465-EL470.
61. Erbe, C., Reichmuth, C., Cunningham, K., Lucke, K. & Dooling, R., 2016. Communication masking in marine mammals: A review and research strategy. *Marine Pollution Bulletin* **103** (1-2), 15-38.
62. Fernández, A., Edwards, J. F., Rodríguez, F., de los Monteros, A. E., Herráez, P., Castro, P., Jaber, J. R., Martín, V. & Arbelo, M., 2005. "Gas and Fat Embolic Syndrome" Involving a Mass Stranding of Beaked Whales (Family *Ziphiidae*) Exposed to Anthropogenic Sonar Signals. *Veterinary Pathology* **42** (4), 446-457.
63. Filadelfo, R., Mintz, J., Michlovich, E., Dtextquoteright Amico, A., Tyack, P. & Ketten, D., 2009. Correlating Military Sonar Use with Beaked Whale Mass Strandings: What Do the Historical Data Show? *Aquatic Mammals* **35** (4), 435-444.

64. Finneran, J. J., 2015. Noise-induced hearing loss in marine mammals: A review of temporary threshold shift studies from 1996 to 2015. *The Journal of the Acoustical Society of America* **138** (3), 1702-1726.
65. Finneran, J. J., 2016. Auditory Weighting Functions and TTS/PTS Exposure Functions for Marine Mammals Exposed to Underwater Noise. SSC Pacific, Technical Report 3026, 59 p.
66. Finneran, J. J. & Jenkins, K. A., 2012. Criteria and Thresholds for U.S. Navy Acoustic and Explosive Effects Analysis. Space and Naval Warfare Systems Center Pacific, 65 p.
67. Forney, K. A., Southall, B. L., Slooten, E., Dawson, S., Read, A. J., Baird, R. W. & Brownell, R. L., Jr., 2017. Nowhere to go: noise impact assessments for marine mammal populations with high site fidelity. *Endangered Species Research* **32**, 391-413.
68. Frantzis, A., 1998. Does acoustic testing strand whales? *Nature* **392** (6671), 29-29.
69. Gordon, J. C. D., Gillespie, D., Potter, J., Frantzis, A., Simmonds, M. P., Swift, R. & Thompson, D., 2003. A review of the effects of seismic surveys on marine mammals. *Marine Technology Society Journal* **37** (4), 16-34.
70. Guerra, A., González, Á. F. & Rocha, F., 2004. A review of records of giant squid in the north-eastern Atlantic and severe injuries in *Architeuthis dux* stranded after acoustic exploration. ICES Annual Science Conference, Vigo, Spain.
71. Hale, R., 2018. Sounds from Submarine Cable & Pipeline Operations. 19th meeting of the United Nations Open-ended Informal Consultative Process on Ocean and the Law of the Sea - Anthropogenic underwater noise, New York, USA.
72. Harding, H., Bruintjes, R., Radford, A. N. & Simpson, S. D., 2016. Measurement of Hearing in the Atlantic salmon (*Salmo salar*) using Auditory Evoked Potentials, and effects of Pile Driving Playback on salmon Behaviour and Physiology. Marine Scotland Science, Scottish Marine and Freshwater Science Report Vol 7 No 11, 47 p.
73. Harwood, J., King, S., Schick, R., Donovan, C. R. & Booth, C., 2014. A Protocol for Implementing the Interim Population Consequences of Disturbance (PCoD) Approach: Quantifying and Assessing the Effects of UK Offshore Renewable Energy Developments on Marine Mammal Populations. Report No SMRUL-TCE-2013-014. Scottish Marine and Freshwater Science, Volume 5 Number 2, 90 p.
74. Harwood, J. & King, S., 2014. The Sensitivity of UK Marine Mammal Populations to Marine Renewables Developments. SMRU, Report n°SMRUL-NER-2012-027, 52 p.
75. Hastie, G. D., Russell, D. J. F., McConnell, B., Moss, S., Thompson, D. & Janik, V. M., 2015. Sound exposure in harbour seals during the installation of an offshore wind farm: predictions of auditory damage. *Journal of Applied Ecology* **52** (3), 631-640.

76. Hawkins, A. D. & Popper, A. N., 2018. Directional hearing and sound source localization by fishes. *The Journal of the Acoustical Society of America* **144** (6), 3329-3350.
77. Henderson, D. & Hamernik, R. P., 1986. Impulse noise: Critical review. *The Journal of the Acoustical Society of America* **80** (2), 569-584.
78. Hildebrand, J. A., 2004. Sources of Anthropogenic Sound in the Marine Environment. International Workshop: Policy on Sound and Marine Mammals, U.S. Marine Mammal Commission and Joint Nature Conservation Committee, London.
79. Hildebrand, J. A., 2009. Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean. *Marine Ecology-Progress Series* **395**, 5-20.
80. Holeyman A., 2002. Soil behaviour under vibratory driving - Keynote Lecture. Proceedings of the International Conference on Vibratory Pile Driving and Deep Soil Compaction, Louvain-La-Neuve, Belgium.
81. Holt, M. M., Noren, D. P. & Emmons, C. K., 2011. Effects of noise levels and call types on the source levels of killer whale calls. *The Journal of the Acoustical Society of America* **130** (5), 3100-3106.
82. Hu, M. Y., Yan, H. Y., Chung, W.-S., Shiao, J.-C. & Hwang, P.-P., 2009. Acoustically evoked potentials in two cephalopods inferred using the auditory brainstem response (ABR) approach. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology* **153** (3), 278-283.
83. ICES, 2007. Collection of acoustic data from fishing vessels. International Council for the Exploration of the Sea, ICES Cooperative Research Report N°287, 83 p.
84. International Maritime Organization, 2009. Interim guidelines on the method of calculation of the energy efficiency design index for new ships. IMO, Circular MEPC.1/Circ.681, London, UK.
85. International Maritime Organization, 2014. Guidelines for the reduction of underwater noise from commercial shipping to address adverse impacts on marine life. IMO, Circular MEPC.1/Circ.833, London, UK.
86. Jeffs, A., Tolimieri, N. & Montgomery, J. C., 2003. Crabs on cue for the coast: the use of underwater sound for orientation by pelagic crab stages. *Marine and Freshwater Research* **54** (7), 841-845.
87. Jensen, F. B., Kuperman, W. A., Porter, M. B. & Schmidt, H., 2011. *Computational Ocean Acoustics*. Springer, New York, 794 p.
88. Jepson, P. D., Arbelo, M., Deaville, R., Patterson, I. A. P., Castro, P., Baker, J. R., Degollada, E., Ross, H. M., Herráez, P., Pocknell, A. M., Rodríguez, F., Howie, F. E., Espinosa, A., Reid, R. J., Jaber, J. R., Martin, V., Cunningham, A. A. & Fernández, A., 2003. Gas-bubble lesions in stranded cetaceans. *Nature* **425**, 575-576.
89. JNCC, 2010. JNCC guidelines for minimising the risk of injury to marine mammals from using explosives. Joint Nature Conservation Committee, 10 p.

90. JNCC, 2010. Statutory nature conservation agency protocol for minimising the risk of injury to marine mammals from piling noise. Joint Nature Conservation Committee, 14 p.
91. JNCC, 2017. JNCC guidelines for minimising the risk of injury to marine mammals from geophysical surveys. Joint Nature Conservation Committee, 28 p.
92. Johansen, S., Larsen, O. N., Christensen-Dalsgaard, J., Seidelin, L., Huulvej, T., Jensen, K., Lunneryd, S.-G., Boström, M. & Wahlberg, M., 2016. In-Air and Underwater Hearing in the Great Cormorant (*Phalacrocorax carbo sinensis*). In: The Effects of Noise on Aquatic Life II. A. N. Popper & A. Hawkins (Eds). Springer-Verlag, New-York, pp 505-512.
93. Johnson, C.S., 1967. Sound detection thresholds in marine mammals. In: Tavolga, W.N. (Ed.), Marine Bio-Acoustics II. Pergamon Press, Oxford, pp 247-260.
94. Johnson, S. R., Richardson, W. J., Yazvenko, S. B., Blokhin, S. A., Gailey, G., Jenkerson, M. R., Meier, S. K., Melton, H. R., Newcomer, M. W., Perlov, A. S., Rutenko, S. A., Würsig, B., Martin, C. R. & Egging, D. E., 2007. A western gray whale mitigation and monitoring program for a 3-D seismic survey, Sakhalin Island, Russia. Environmental Monitoring and Assessment **134** (1), 1-19.
95. Jones, D., Marten, K. & Harris, K., 2015. Underwater sound from dredging activities: establishing source levels and modelling the propagation of underwater sound. CEDA Dredging Days 2015, Rotterdam, the Netherlands.
96. Joubert, C., 2015. Étude et calibration d'un hydrophone embarqué sur un flotteur dérivant - application à la sismologie. Thèse pour l'obtention du titre de Docteur en Sciences, Université Nice Sophia Antipolis, 256 p.
97. Kaifu, K., Akamatsu, T. & Segawa, S., 2008. Underwater sound detection by cephalopod statocyst. Fisheries Science **74** (4), 781-786.
98. Ketten, D. R. & Bartol, S. M., 2006. Functional Measures of Sea Turtle Hearing. Woods Hole Oceanographic Institution, ONR Award No: N00014-02-1-0510, Report No: 13051000, 6 p.
99. King, S. L., Schick, R. S., Donovan, C., Booth, C. G., Burgman, M., Thomas, L. & Harwood, J., 2015. An interim framework for assessing the population consequences of disturbance. Methods in Ecology and Evolution **6** (10), 1150-1158.
100. Koschinski, S. & Lüdemann, K., 2013. Development of Noise Mitigation Measures in Offshore Wind Farm Construction. Bundesamt für Naturschutz, 97 p.
101. Leaper, R., 2019. The Role of Slower Vessel Speeds in Reducing Greenhouse Gas Emissions, Underwater Noise and Collision Risk to Whales. Frontiers in Marine Science **6**, 1-8 (Article 505).
102. Leaper, R., Renilson, M. & Ryan, C., 2014. Reducing underwater noise from large commercial ships: Current status and future directions. Journal of Ocean Technology **9** (1), 50-69.

103. Le Courtois, F., Kinda, G. B. & Stéphan, Y., 2018. Évaluation du descripteur 11 « Energie sonore » en France métropolitaine. Rapport scientifique pour l'évaluation 2018 au titre de la DCSMM. SHOM, 166 p.
104. Le Gall, Y., Origné, L., Scalabrin, C. & Morizur, Y., 2004. Le répulsif à cétacés, performances acoustiques requises. 13<sup>e</sup> Conférence Internationale sur les Cétacés de Méditerranée et du 6<sup>e</sup> Séminaire annuel du Réseau National des Échouages, Nice, France.
105. Lenhardt, M., 2002. Sea turtle auditory behavior. *The Journal of the Acoustical Society of America* **112** (5), 2314-2314.
106. LGL Ltd., 2011. Environmental Assessment of a Marine Geophysical Survey by the R/V Marcus G. Langseth in the central Gulf of Alaska, June 2011. LGL Ltd. Report to the United States Geological Survey and National Science Foundation, 202 p.
107. 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**, 323-334.
108. Lovell, J. M., Findlay, M. M., Moate, R. M. & Yan, H. Y., 2005. The hearing abilities of the prawn *Palaemon serratus*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology* **140** (1), 89-100.
109. Lurton, X., 1998. Acoustique sous-marine - Présentation et applications. IFREMER, Plouzané, 110 p.
110. Lurton, X., 2015. Prise en compte de l'impact environnemental sur les mammifères marins lors des opérations de systèmes sonar sur les navires de l'Ifremer. IFREMER, AS-2015-116, 8 p.
111. Lurton, X. & Antoine, L., 2007. Analyse des risques pour les mammifères marins liés à l'emploi des méthodes acoustiques en océanographie. IFREMER, Rapport final, 88 p.
112. Lurton, X. & DeRuiter, S., 2011. Sound radiation of seafloor-mapping echosounders in the water column, in relation to the risks posed to marine mammals. *The International Hydrographic Review* **6**, 7-17.
113. Madsen, P. T., Wahlberg, M., Tougaard, J., Lucke, K. & Tyack, P., 2006. Wind turbine underwater noise and marine mammals: implications of current knowledge and data needs. *Marine Ecology Progress Series* **309**, 279-295.
114. Marmo, B., Roberts, I., Buckingham, M. P., King, S. & Booth, C., 2013. Modelling of Noise Effects of Operational Offshore Wind Turbines including noise transmission through various foundation types. Edinburgh: Scottish Government, Document No: MS-101-REP-F, 100 p.
115. McCauley, R. D., Day, R. D., Swadlow, 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**, Art. n°0195.

116. McDonald, M. A., Hildebrand, J. A. & Wiggins, S. M., 2006. Increases in deep ocean ambient noise in the Northeast Pacific west of San Nicolas Island, California. *The Journal of the Acoustical Society of America* **120** (2), 711-718.
117. McKenna, M. F., Ross, D., Wiggins, S. M. & Hildebrand, J. A., 2012. Underwater radiated noise from modern commercial ships. *The Journal of the Acoustical Society of America* **131** (1), 92-103.
118. McQueen, A. D., Suedel, B. C. & Wilkens, J. L., 2019. Review of the Adverse Biological Effects of Dredging-Induced Underwater Sounds. *WEDA Journal of Dredging* **17** (1), 1-22.
119. Miksis-Olds, J. L., Donaghay, P. L., Miller, J. H., Tyack, P. L. & Reynolds lii, J. E., 2007. Simulated vessel approaches elicit differential responses from manatees. *Marine Mammal Science* **23** (3), 629-649.
120. Misund, O. A., 1997. Underwater acoustics in marine fisheries and fisheries research. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* **7** (1), 1-34.
121. Mooney, T. A., Hanlon, R. T., Christensen-Dalsgaard, J., Madsen, P. T., Ketten, D. R. & Nachtigall, P. E., 2010. Sound detection by the longfin squid (*Loligo pealeii*) studied with auditory evoked potentials: sensitivity to low-frequency particle motion and not pressure. *The Journal of Experimental Biology* **213** (21), 3748-3759.
122. Mooney, T. A., Hanlon, R., Madsen, P. T., Christensen-Dalsgaard, J., Ketten, D. R. & Nachtigall, P. E., 2012. Potential for Sound Sensitivity in Cephalopods. In: *The Effects of Noise on Aquatic Life*. A. N. Popper & A. Hawkins (Eds). Springer, New York, pp 125-128.
123. Mooney, T. A., Yamato, M. & Branstetter, B. K., 2012. Hearing in Cetaceans: From Natural History to Experimental Biology. In: *Advances in Marine Biology* (vol. 63). M. Lesser (Ed.). Academic Press, Cambridge, MA, pp 197-246.
124. MTES, 2018. Évaluation environnementale - Guide d'aide à la définition des mesures ERC. Théma Balise, CGDD, 133 p.
125. Myrberg, A. A., 1990. The effects of man-made noise on the behavior of marine animals. *Environment International* **16** (4), 575-586.
126. Nabe-Nielsen, J., van Beest, F. M., Grimm, V., Sibly, R. M., Teilmann, J. & Thompson, P. M., 2018. Predicting the impacts of anthropogenic disturbances on marine populations. *Conservation Letters* **11** (5), e12563.
127. National Research Council, 2003. *Ocean Noise and Marine Mammals*. The National Academies Press, Washington D.C., 220 p.
128. Nedwell, J. R., Brooker, A. G. & Barham, R. J., 2012. Assessment of underwater noise during the installation of export power cables at the Beatrice Offshore Wind Farm. Subacoustech, Environmental Report No. E318R0106, 15 p.

129. Nedwell, J. R. & Edwards, B., 2004. A review of measurements of underwater man-made noise carried out by Subacoustech Ltd, 1993 – 2003. Subacoustech Report ref: 534R0109, 131 p.
130. Nedwell, J. R. & Howell, D., 2004. A review of offshore windfarm related underwater noise sources. COWRIE, Subacoustech Ltd. Tech. Rep. 544R0308, 57 p.
131. Nedwell, J. R., Parvin, S. J., Edwards, B., Workman, R., Brooker, A. G. & Kynoch, J. E., 2007. Measurement and interpretation of underwater noise during construction and operation of offshore windfarms in UK waters. Subacoustech, Report No. 544R0738 to COWRIE Ltd., 80 p.
132. Nedwell, J. R., Turnpenny, A. W. H., Lovell, J., Parvin, S. J., Workman, R., Spinks, J. A. L. & Howell, D., 2007. A validation of the dBht as a measure of the behavioural and auditory effects of underwater noise. Subacoustech Ltd., Subacoustech Report No. 534R1231, 74 p.
133. Nedwell, J. R., Workman, R. & Parvin, S. J., 2005. The assessment of likely levels of piling noise at Greater Gabbard and its comparison with background noise, including piling noise measurements made at Kentish Flats. Subacoustech Ltd., Subacoustech Report No. 633R0115.
134. Nelms, S. E., Piniak, W. E. D., Weir, C. R. & Godley, B. J., 2016. Seismic surveys and marine turtles: An underestimated global threat? *Biological Conservation* **193**, 49-65.
135. New, L. F., Clark, J. S., Costa, D. P., Fleishman, E., Hindell, M. A., Klanjšček, T., Lusseau, D., Kraus, S., McMahon, C. R., Robinson, P. W., Schick, R. S., Schwarz, L. K., Simmons, S. E., Thomas, L., Tyack, P. & Harwood, J., 2014. Using short-term measures of behaviour to estimate long-term fitness of southern elephant seals. *Marine Ecology Progress Series* **496**, 99-108.
136. NMFS, 2018. 2018 Revisions to: Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing (Version 2.0): Underwater Thresholds for Onset of Permanent and Temporary Threshold Shifts. U.S. Department of Commerce, NOAA, NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-59, 167 p.
137. NOAA, 2001. Joint Interim Report - Bahamas Marine Mammal Stranding - Event of 15-16 March 2000. U.S. Department of Commerce, NMFS/NOAA, 59 p.
138. Norro, A., Botteldooren, D., Dekoninck, L., Haelters, J., Rumes, B., Van Renterghem, T. & Degraer, S., 2013. Qualifying and quantifying offshore wind farm-generated noise, *In: Degraer, S., Brabant, R. & Rumes, B. (Eds.) Environmental impacts of offshore wind farms in the Belgian part of the North Sea: Learning from the past to optimise future monitoring programmes.* pp. 63-69
139. Norro, A. & Degraer, S., 2016. Quantification and characterisation of Belgian offshore wind farm operational sound emission at low wind speeds. *In: Degraer, S., Brabant, R., Rumes, B. & Vigin, L. (Eds.) Environmental impacts of offshore wind farms in the Belgian part of the North Sea: Environmental impact monitoring reloaded.* Royal Belgian Institute of Natural Sciences, OD Natural Environment, Marine Ecology and Management Section, pp. 25-36.

140. Nowacek, D., Broker, K., Donovan, G., Gailey, G., Racca, R., R. Reeves, R., Vedenev, A., Weller, D. & Southall, B., 2013. Responsible Practices for Minimizing and Monitoring Environmental Impacts of Marine Seismic Surveys with an Emphasis on Marine Mammals. *Aquatic Mammals* **39** (4), 356-377.
141. Nowacek, D. P., Thorne, L. H., Johnston, D. W. & Tyack, P. L., 2007. Responses of cetaceans to anthropogenic noise. *Mammal Review* **37** (2), 81-115.
142. OSPAR Commission, 2009. Overview of the impacts of anthropogenic underwater sound in the marine environment. OSPAR Commission, Publication Number: 441/2009, 133 p.
143. Pacault, A. & Léon, P., 2015. Les équipements sismiques. IFREMER, Présentation disponible à l'adresse : <https://docplayer.fr/26689964-Les-equipements-sismiques.html>.
144. Parente, C. L. & de Araújo, M. E., 2011. Effectiveness of Monitoring Marine Mammals during Marine Seismic Surveys off Northeast Brazil. *Journal of Integrated Coastal Zone Management* **11** (4), 409-419.
145. Parks, S. E., Clark, C. W. & Tyack, P. L., 2007. Short- and long-term changes in right whale calling behavior: the potential effects of noise on acoustic communication. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **122** (6), 3725–3731.
146. Parsons, E. C. M., Dolman, S. J., Jasny, M., Rose, N. A., Simmonds, M. P. & Wright, A. J., 2009. A critique of the UK's JNCC seismic survey guidelines for minimising acoustic disturbance to marine mammals: Best practise? *Marine Pollution Bulletin* **58** (5), 643-651.
147. Parsons, E. C. M., Dolman, S. J., Wright, A. J., Rose, N. A. & Burns, W. C. G., 2008. Navy sonar and cetaceans: Just how much does the gun need to smoke before we act? *Marine Pollution Bulletin* **56** (7), 1248-1257.
148. Payne, J. F., 2004. Potential Effects of Seismic Surveys on Fish Eggs, Larvae and Zooplankton. Canadian Science Advisory Secretariat, Department of Fisheries and Oceans, Research Document 2004/125, 12 p.
149. Pichegru, L., Nyengera, R., McInnes, A. M. & Pistorius, P., 2017. Avoidance of seismic survey activities by penguins. *Scientific Reports* **7** (1), Art. n°16305.
150. Popper, A. N., Halvorsen, M. B., Casper, B. M. & Carlson, T. J., 2013. Effects of Pile Sounds on Non-Auditory Tissues of Fish. U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management, Headquarters, Herndon, VA., OCS Study BOEM 2012-105, 61 p.
151. Popper, A. N. & Hastings, M. C., 2009. The effects of anthropogenic sources of sound on fishes. *Journal of Fish Biology* **75** (3), 455-489.

152. Popper, A. N., Hawkins, A. D., Fay, R. R., Mann, D. A., Bartol, S., Carlson, T. J., Coombs, S., Ellison, W. T., Gentry, R. L., Halvorsen, M. B., Løkkeborg, S., Rogers, P. H., Southall, B. L., Zeddies, D. G. & Tavalga, W. N., 2014. Sound Exposure Guidelines for Fishes and Sea Turtles: A Technical Report prepared by ANSI-Accredited Standards Committee S3/SC1 and registered with ANSI. Springer International Publishing, 73 p.
153. Pusineri, C., 2016. Guide de bonnes pratiques pour limiter l'impact de l'exploration sismique sur les cétacés en Guyane. DEAL Guyane, 63 p.
154. Regnault, M. & Lagardère, J. P., 1983. Effects of ambient noise on the metabolic level of *Crangon crangon* (Decapoda, Natantia) Marine Ecology Progress Series **11**, 71-78.
155. Reine, K. J., Clarke, D. & Dickerson, C., 2012. Characterization of Underwater Sounds Produced by a Backhoe Dredge Excavating Rock and Gravel. US Army Corp of Engineers, Engineer Research and Development Center, ERDC TN-DOER-E36, 30 p.
156. Reine, K. J., Clarke, D. & Dickerson, C., 2014. Characterization of underwater sounds produced by hydraulic and mechanical dredging operations. The Journal of the Acoustical Society of America **135** (6), 3280-3294.
157. Reinhall, P. G. & Dardis, J. T., 2014. New methods in impact pile driving noise attenuation. 2nd International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics, Island of Rhodes, Greece.
158. Richardson, W. J., Greene, C. R. J., Malme, C. I. & Thomson, D. H., 1995. Marine Mammals and Noise. Academic Press, San Diego, 576 p.
159. Roberts, L., Cheesman, S., Breithaupt, T. & Elliott, M., 2015. Sensitivity of the mussel *Mytilus edulis* to substrate-borne vibration in relation to anthropogenically-generated noise. Marine Ecology Progress Series **538**, 185-195.
160. Robinson, S. P. & Lepper, P. A., 2013. Scoping study: Review of current knowledge of underwater noise emissions from wave and tidal stream energy devices. The Crown Estate, 70 p.
161. Robinson, S. P., Theobald, P. D., Hayman, G., Wang, L. S., Lepper, P. A., Humphrey, V. & Mumford, S., 2011. Measurement of noise arising from marine aggregate dredging operations. Marine Aggregate Levy Sustainability Fund (MALSF), MEPF Ref no. 09/P108, 144 p.
162. Rolland, R. M., Parks, S. E., Hunt, K. E., Castellote, M., Corkeron, P. J., Nowacek, D. P., Wasser, S. K. & Kraus, S. D., 2012. Evidence that ship noise increases stress in right whales. Proceedings of the Royal Society B **279** (1737), 2363-2368.

163. Rudd, A. B., Richlen, M. F., Stimpert, A. K. & Au, W. W. L., 2015. Underwater Sound Measurements of a High-Speed Jet-Propelled Marine Craft: Implications for Large Whales. *Pacific Science* **69** (2), 155-164.
164. Scarborough Bull, A. & Love, M. S., 2019. Worldwide oil and gas platform decommissioning: A review of practices and reefing options. *Ocean & Coastal Management* **168**, 274-306.
165. Schrope, M., 2002. Whale deaths caused by US Navy's sonar. *Nature* **415**, 106.
166. Smith, M. E., Kane, A. S. & Popper, A. N., 2004. Noise-induced stress response and hearing loss in goldfish (*Carassius auratus*). *Journal of Experimental Biology* **207** (3), 427-435.
167. Southall, B. L., Bowles, A. E., Ellison, W. T., Finneran, J. J., Gentry, R. L., Greene, C. R., Kastak, D., Ketten, D. R., Miller, J. H., Nachtigall, P. E., Richardson, W. J., Thomas, J. A. & Tyack, P. L., 2007. Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Initial Scientific Recommendations. *Aquatic Mammals* **33** (4), 411-521.
168. 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.
169. Southall, B. L., Scholik-Schlomer, A. R., Hatch, L., Bergmann, T., Jasny, M., Metcalf, K., Weilgart, L. S. & Wright, A. J., 2017. Underwater Noise from Large Commercial Ships—International Collaboration for Noise Reduction. In: *Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering*. J. Carlton, P. Jukes & Y. S. Choo (Eds). Wiley, 9 p.
170. Spence, J., Fischer, R., Bahtiarian, M., Boroditsky, L., Jones, N. & Dempsey, R., 2007. Review of Existing and Future Potential Treatments for Reducing Underwater Sound from Oil and Gas Industry Activities. Noise Control Engineering, Inc. report to Joint Industry Programme on E&P Sound and Marine Life, NCE Report 07-001, 185 p.
171. Stéphan, Y., Boutonnier, J.-M. & Pistre, C., 2012. Bilan des activités anthropiques génératrices de bruit sous-marin et de leur récente évolution en France métropolitaine (version 2.0). SHOM, rapport N° 32 SHOM/DOPS/HOM/CFUD/NP, 45 p.
172. Stone, C. J. & Tasker, M. L., 2006. The effect of seismic airguns on cetaceans in UK waters. *Journal of Cetacean Research and Management* **8** (3), 255-263.
173. Tidau, S. & Briffa, M., 2016. Review on behavioral impacts of aquatic noise on crustaceans. *Proceedings of Meetings on Acoustics - Fourth International Conference on the Effects of Noise on Aquatic Life*, Dublin, Ireland.
174. Todd, S., Stevick, P., Lien, J., Marques, F. & Ketten, D., 1996. Behavioral effects of exposure to underwater explosions in humpback whales (*Megaptera novaeangliae*). *Canadian Journal of Zoology* **74**, 1661-1672.

175. Topham, E. & McMillan, D., 2017. Sustainable decommissioning of an offshore wind farm. *Renewable Energy* **102** (Part. B), 470-480.
176. Tougaard, J., Carstensen, J., Teilmann, J., Skov, H. & Rasmussen, P., 2009. Pile driving zone of responsiveness extends beyond 20 km for harbor porpoises (*Phocoena phocoena* (L.)). *The Journal of the Acoustical Society of America* **126** (1), 11-14.
177. Tougaard, J., Henriksen, O. D. & Miller, L. A., 2009. Underwater noise from three types of offshore wind turbines: Estimation of impact zones for harbor porpoises and harbor seals. *The Journal of the Acoustical Society of America* **125** (6), 3766-3773.
178. Tyack, P. L., 2008. Implications for Marine Mammals of Large-Scale Changes in the Marine Acoustic Environment. *Journal of Mammalogy* **89** (3), 549-558.
179. Ulrick, R. J., 1984. Ambient noise in the sea. Naval Sea Systems Command, Department of the Navy, Washington, D.C., 20362, 194 p.
180. Viada, S. T., Hammer, R. M., Racca, R., Hannay, D., Thompson, M. J., Balcom, B. J. & Phillips, N. W., 2008. Review of potential impacts to sea turtles from underwater explosive removal of offshore structures. *Environmental Impact Assessment Review* **28** (4), 267-285.
181. Wahlberg, M. & Westerberg, H., 2005. Hearing in fish and their reactions to sound from offshore wind farms. *Marine Ecology-progress Series* **288**, 295-309.
182. Wale, M. A., Simpson, S. D. & Radford, A. N., 2013. Size-dependent physiological responses of shore crabs to single and repeated playback of ship noise. *Biology letters* **9** (2), 20121194.
183. Wei, C., Au, W. W. L., Ketten, D. R., Song, Z. & Zhang, Y., 2017. Biosonar signal propagation in the harbor porpoise's (*Phocoena phocoena*) head: The role of various structures in the formation of the vertical beam. *The Journal of the Acoustical Society of America* **141** (6), 4179-4187.
184. Weilgart, L. S., 2007. The impacts of anthropogenic ocean noise on cetaceans and implications for management. *Canadian Journal of Zoology* **85** (11), 1091-1116.
185. Weilgart, L. S., 2014. Are We Mitigating Underwater Noise-Producing Activities Adequately?: A Comparison of Level A and Level B Cetacean Takes International Whaling Commission, Working Paper SC/65b/E07, 17 p.
186. Weilgart, L. S., 2018. The impact of ocean noise pollution on fish and invertebrates. Dalhousie University, Report for OceanCare, Switzerland, 34 p.
187. Weir, C. R. & Dolman, S. J., 2007. Comparative Review of the Regional Marine Mammal Mitigation Guidelines Implemented During Industrial Seismic Surveys, and Guidance Towards a Worldwide Standard. *Journal of International Wildlife Law & Policy* **10** (1), 1-27.

188. Wenz, G. M., 1962. Acoustic Ambient Noise in the Ocean: Spectra and Sources. *The Journal of the Acoustical Society of America* **34** (12), 1936-1956.
189. Wilson, B., Batty, R. S., Daunt, F. & Carter, C., 2006. Collision risks between marine renewable energy devices and mammals, fish and diving birds. Scottish Association for Marine Science, Report to the Scottish Executive, 105 p.
190. Wright, A. J., Aguilar de Soto, N., Baldwin, A. L., Bateson, M., Beale, C. M., Clark, C. W., Deak, T., Edwards, E. F., Fernandez, A., Godinho, A., Hatch, L., Kakuschke, A., Lusseau, D., Martineau, D., Romero, M., Weilgart, L. S., Wintle, B., Notarbartolo-di-Sciara, G. & Martin, V., 2007. Do marine mammals experience stress related to anthropogenic noise? *International Journal of Comparative Psychology* **20**, 274-316.
191. Wright, A. J. & Cosentino, A. M., 2015. JNCC guidelines for minimising the risk of injury and disturbance to marine mammals from seismic surveys: We can do better. *Marine Pollution Bulletin* **100** (1), 231-239.
192. Wright, A. J., Deak, T. & Parsons, E. C. M., 2009. Concerns related to chronic stress in marine mammals. *International Journal of Comparative Psychology* **20** (2-3), SC/61/E16.
193. WSP, 2016. Étude acoustique subaquatique dans le cadre de l'étude d'impact pour l'agrandissement du port de Québec – Secteur Beauport. WSP Canada Inc, Rapport produit pour le Port de Québec, 53 p.
194. Wyatt, R., 2008. Joint Industry Programme on Sound and Marine Life Review of Existing Data on Underwater Sounds Produced by the Oil and Gas Industry - Issue 1. Seiche Measurements Ltd. report to Joint Industry Programme on Sound and Marine Life, 98 p.
195. Wyneken, J., 2001. *The Anatomy of Sea Turtles*. U.S. Department of Commerce, NOAA Technical Memorandum NMFS-SEFSC-470, 172 p.
196. Xodus Group Ltd, 2015. Hywind Scotland Pilot Park Project - Marine Noise Desk Study. Technical note to Statoil ASA, Doc. n°A-100142-S00-TECH-003, 17 p.

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : La fréquence d'un son définit sa « hauteur » : plus la fréquence est élevée, plus le son est aigu. ....	30
Figure 2 : Profil type de célérité du son en milieu marin ouvert (d'après [87]). ....	31
Figure 3 : Phénomènes contribuant à atténuer l'intensité d'une onde acoustique entre la source et le récepteur. ....	33
Figure 4 : Caractéristiques et composantes du bruit ambiant sous-marin par grand fond (d'après [188]). ....	34
Figure 5 : Différence entre bruit émis, bruit reçu et bruit perçu. À chaque étape, le niveau de bruit (en dB) et son spectre fréquentiel est susceptible d'être modifié. ....	36
Figure 6 : Exemple de densité spectrale de puissance (DSP). ....	37
Figure 7 : Les différents indicateurs de mesure du niveau de pression sonore (Lp). ....	38
Figure 8 : Bruit d'un navire de ravitaillement perçu, en dBht, par un grand dauphin ( <i>Tursiops truncatus</i> ) en fonction de sa capacité auditive (audiogramme d'après [93] ; crédit photo : James D. Paterson/Marine Traffic et COHABYS). ....	40
Figure 9 : Enregistreur acoustique autonome (OSEAN) équipé d'un hydrophone et positionné sur un corps mort avant immersion (crédit photo : NEREIS Environnement). ....	43
Figure 10 : Bouée acoustique flottante autonome (RTSys - crédit photo : NEREIS Environnement). ....	44
Figure 11 : Exemple de courbe de sensibilité d'un hydrophone (d'après [96]). ....	44
Figure 12 : Modélisation de l'empreinte sonore de différentes opérations liées aux phases de construction et d'exploitation du parc éolien en mer de Yeu-Noirmoutier pour le marsouin commun ( <i>Phocoena phocoena</i> ) (source : Quiet Ocean, 2016). ....	46
Figure 13 : Principe de fonctionnement du sondeur multifaisceaux (d'après [1]). ....	50
Figure 14 : Principe de fonctionnement d'une campagne de prospection sismique [143]. ....	51
Figure 15 : : Plateforme mobile Cossack Pioneer de type FPSO (Floating Production Storage and Offloading [60]), plateforme auto-élevatrice Astra (crédit photo : EDC Ltd.) et navire de forage West Gemini (crédit photo : Thierry Gonzalez/TOTAL). ....	54
Figure 16 : Exemples de fondations d'éoliennes offshore posées (source : Éoliennes en Mer Dieppe Le Tréport). ....	56
Figure 17 : Spectre en tiers d'octave du bruit ambiant sur le site de Bligh Bank (Belgique) avant construction du parc éolien offshore (en noir), et bruit généré par la pose et le fonctionnement d'une turbine de 6,15 MW sur fondation «jacket » et d'une turbine de 3 MW sur fondation monopieu (d'après [138]) ....	59
Figure 18 : Dispositifs acoustiques utilisés par les navires de pêche (d'après [120]). ....	63
Figure 19 : Répulsif acoustique AQUAmark® 210 (AQUATEC) utilisé sur les engins de pêche (crédit photo : NEREIS Environnement). ....	63
Figure 20 : La drague aspiratrice en marche Samuel de Champlain (GIE Dragages-Ports, crédit photo : Fabien Montreuil). ....	65
Figure 21 : Dent de déroctage sur ponton dipper (crédit photo : NEREIS Environnement). ....	67

Figure 22 : Audiogrammes médians pour les Cétacés basse fréquence, les Cétacés haute fréquence, les Cétacés très haute fréquence, les Siréniens, les Pinnipèdes dans l'eau et les autres Carnivores dans l'eau (d'après [136] et [168]).	81
Figure 23 : A gauche, audiogrammes de quatre espèces de tortues marines : la tortue de Kemp <i>Lepidochelys kempii</i> , la tortue luth <i>Dermochelys coriacea</i> , la tortue imbriquée <i>Eretmochelys imbricata</i> et la tortue verte, ou tortue franche, <i>Chelonia mydas</i> . A droite, audiogramme de la tortue caouanne ( <i>Caretta caretta</i> ) à différents stades du cycle de vie (d'après [98] et [44]).	83
Figure 24 : Schéma de l'oreille interne gauche et des organes otolithiques d'un poisson osseux, avec ces trois otolithes : saccule, utricule et lagena (d'après [76]).	84
Figure 25 : Audiogrammes du requin nourrice <i>Ginglymostoma cirratum</i> , du saumon atlantique <i>Salmo salar</i> et du hareng de l'Atlantique <i>Clupea harengus</i> (d'après [26], [55] et [72]).	85
Figure 26 : Diagramme des impacts potentiels des émissions sonores selon leur degré de sévérité (d'après [158]).	90
Figure 27 : Trame suggérée pour évaluer les impacts des activités anthropiques sur les mammifères marins. Pour les populations avec une fidélité importante au site, le déplacement peut avoir des conséquences significatives et aboutir aux mêmes conséquences qu'un dommage direct (d'après [67]).	114
Figure 28 : Localisation des zones d'intérêt spécial pour les baleines à bec de Cuvier en zone ACCOBAMS (d'après [2]).	118
Figure 29 : Zones définies autour de la source sonore.	131
Figure 30 : Observateur de faune marine en poste.	133
Figure 31 : Exemple de protocole à mettre en place pour réduire les impacts sur la faune marine dans le cadre de réalisation de travaux en mer.	137
Figure 32 : Fonctions de pondération des cétacés basse fréquence (LF), haute fréquence (HF), très haute fréquence (VHF), les siréniens (SI), les phocidés dans l'eau (PCW) et les autres Carnivores dans l'eau (OCW) (d'après [168]).	205

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Indicateurs quantitatifs permettant d'évaluer le niveau de bruit sous-marin.....	42
Tableau 2 : Niveau de bruit généré à 750 m par le battage de pieu de différents diamètres (d'après [138] et [6]) .....	57
Tableau 3 : Niveaux de bruit généré par les différentes technologies EMR.....	60
Tableau 4 : Gamme de fréquences et niveaux de bruit liés au dragage des sédiments en fonction du type de drague utilisée.....	65
Tableau 5 : Gamme de fréquences et niveaux de bruit liés à la pose de câbles et canalisations en fonction du type de méthode ou outils utilisés .....	70
Tableau 6 : Exemple de niveaux de bruit générés par des embarcations motorisées à usage récréatif.....	73
Tableau 7 : Caractéristiques de quelques-uns des sondeurs, sonars et systèmes sismiques utilisés par l'IFREMER pour la recherche océanographique (source : Y. Le Gall, communication personnelle, 2019) .....	75
Tableau 8 : Synthèse des niveaux à la source et des fréquences associées des principales sources de bruit anthropique.....	77
Tableau 9 : Seuils TTS et PTS pour les différentes catégories de mammifères marins exposés à un son impulsionnel. Les niveaux d'exposition sonore cumulée sur 24 h ( $L_{E,p,24h}$ ) sont exprimés en dB re 1 $\mu Pa^2.s$ . Les niveaux de pression sonore ( $L_{p,pk}$ ) sont exprimés en dB re 1 $\mu Pa$ (d'après [136] et [168]).....	107
Tableau 10 : Seuils TTS et PTS pour les différentes catégories de mammifères marins exposés à un son continu. Les niveaux d'exposition sonore cumulée sur 24 h ( $L_{E,p,24h}$ ) sont exprimés en dB re 1 $\mu Pa^2.s$ (d'après [136] et [168]) .....	108
Tableau 11 : Seuils TTS et PTS pour les différentes catégories de poissons et les tortues à un son impulsionnel de type battage de pieux. Les niveaux d'exposition sonore ( $L_{E,p}$ ) sont exprimés en dB re 1 $\mu Pa^2.s$ . Les niveaux de pression sonore ( $L_{p,pk}$ ) sont exprimés en en dB re 1 $\mu Pa$ (d'après [152]).....	108
Tableau 12 : Tableau récapitulatif des différents modèles prédictifs existants.....	112
Tableau 13 : Récapitulatif des principales méthodes d'évitement des impacts (en vert : mesures à mettre en place en amont, en orange : mesures à mettre en place lors des phases de travaux, exploitation et/ou démantèlement) .....	120
Tableau 14 : Tableau récapitulatif des mesures de réduction liées à des adaptations ou modifications de techniques (en vert : mesures à mettre en œuvre en amont ; en orange : mesures à mettre en œuvre lors des phases de travaux, exploitation et/ou démantèlement) .....	127
Tableau 15 : Récapitulatif des principales technologies de rideaux de bulles et blocs isolants existantes (d'après [2]) .....	129
Tableau 16 : Tableau récapitulatif des mesures de réduction liées à des adaptations ou modifications de techniques (en vert : mesures à mettre en œuvre en amont ; en orange : mesures à mettre en œuvre lors des phases de travaux, exploitation et/ou démantèlement) .....	138
Tableau 17 : Tableau récapitulatif des mesures pour éviter et réduire l'impact des émissions sonores sur la faune marine (en vert : mesures à mettre en œuvre en amont, en orange : mesures à mettre en œuvre en phase de travaux, exploitation et/ou démantèlement) ...	142
Tableau 18 : Classification des mammifères marins en fonction de leurs capacités auditives (d'après [168]) .....	204
Tableau 19 : Paramètres associés aux fonctions de pondération auditives des différents groupes de mammifères marins (d'après [168]).....	205

## ANNEXES

### ANNEXE 1. Informations complémentaires concernant les seuils acoustiques TTS et PTS et les fonctions de pondération pour les mammifères marins

#### Groupes d'audition

Les mammifères marins ne possèdent pas tous la même sensibilité auditive, et ne sont donc pas tous affectés de la même façon par le bruit sous-marin. Afin de tenir compte de cette différence de sensibilité, et notamment de leur capacité à percevoir certaines fréquences mieux que d'autres, les mammifères marins ont donc été répartis en plusieurs « groupes d'audition » [136, 168]. Pour chacun de ces groupes d'audition, un audiogramme « moyen » a été développé (voir figure 22 page 81).

La classification des mammifères marins en fonction de leurs capacités auditives est présentée dans le tableau 18 ci-dessous :

Tableau 18 : Classification des mammifères marins en fonction de leurs capacités auditives (d'après [168]).

Groupe d'audition	Abréviation	Genres (ou espèces) inclus
Cétacés basse fréquence	LF	Balaenidae ( <i>Balaena</i> , <i>Eubalaenidae</i> spp.) ; Balaenopteridae ( <i>Balaenoptera physalus</i> , <i>B. musculus</i> )
		Balaenopteridae ( <i>Balaenoptera acutorostrata</i> , <i>B. bonaerensis</i> , <i>B. borealis</i> , <i>B. edeni</i> , <i>B. omurai</i> ; <i>Megaptera novaeangliae</i> ) ; Neobalenidae ( <i>Caperea</i> ) ; Eschrichtiidae ( <i>Eschrichtius</i> )
Cétacés haute fréquence	HF	Physeteridae ( <i>Physeter</i> ) ; Ziphiidae ( <i>Berardius</i> spp., <i>Hyperoodon</i> spp., <i>Indopacetus</i> , <i>Mesoplodon</i> spp., <i>Tasmacetus</i> , <i>Ziphius</i> )
		Delphinidae ( <i>Orcinus</i> ) ; Delphinidae ( <i>Delphinus</i> , <i>Feresa</i> , <i>Globicephala</i> spp., <i>Grampus</i> , <i>Lagenodelphis</i> , <i>Lagenorhynchus acutus</i> , <i>L. albirostris</i> , <i>L. obliquidens</i> , <i>L. obscurus</i> , <i>Lissodelphis</i> spp., <i>Orcaella</i> spp., <i>Peponocephala</i> , <i>Pseudorca</i> , <i>Sotalia</i> spp., <i>Sousa</i> spp., <i>Stenella</i> spp., <i>Steno</i> , <i>Tursiops</i> spp.) ; Montodontidae ( <i>Delphinapterus</i> , <i>Monodon</i> ) ; Plantanistidae ( <i>Plantanista</i> )
Cétacés très haute fréquence	VHF	Delphinidae ( <i>Cephalorhynchus</i> spp. ; <i>Lagenorhynchus cruciger</i> , <i>L. australis</i> ) ; Phocoenidae ( <i>Neophocaena</i> spp., <i>Phocoena</i> spp., <i>Phocoenoides</i> ) ; Iniidae ( <i>Inia</i> ) ; Kogiidae ( <i>Kogia</i> ) ; Lipotidae ( <i>Lipotes</i> ) ; Pontoporiidae ( <i>Pontoporia</i> )
Siréniens	SI	Trichechidae ( <i>Trichechus</i> spp.) ; Dugongidae ( <i>Dugong</i> )
Phocidés dans l'eau	PCW	Phocidae ( <i>Cystophora</i> , <i>Erignathus</i> , <i>Halichoerus</i> , <i>Histiophoca</i> , <i>Hydrurga</i> , <i>Leptonychotes</i> , <i>Lobodon</i> , <i>Mirounga</i> spp., <i>Monachus</i> , <i>Neomonachus</i> , <i>Ommatophoca</i> , <i>Pagophilus</i> , <i>Phoca</i> spp., <i>Pusa</i> spp.)
Autres Carnivores dans l'eau	OCW	Odobenidae ( <i>Odobenus</i> ) ; Otariidae ( <i>Arctocephalus</i> spp., <i>Callorhinus</i> , <i>Eumetopias</i> , <i>Neophoca</i> , <i>Otaria</i> , <i>Phocarcos</i> , <i>Zalophus</i> spp.) ; Ursidae ( <i>Ursus maritimus</i> ) ; Mustelidae ( <i>Enhydra</i> , <i>Lontra felina</i> )

## Fonctions de pondération

Pour chacun des groupes d'audition précédemment défini, une fonction de pondération a été développée. Ces fonctions de pondération se justifient par le fait qu'un animal est plus susceptible d'être affecté par une exposition sonore aux fréquences pour lesquelles cet animal présente la plus grande sensibilité (fréquences pour lesquelles le seuil d'audition est le plus bas) qu'aux fréquences auxquelles il est peu sensible. De ce fait, les informations disponibles quant aux capacités auditives des mammifères marins (*i.e.* les observations ayant permis de réaliser les audiogrammes de chaque groupe d'audition), combinées à d'autres paramètres audiométriques (courbes isosoniques, seuils de pertes d'auditions, *etc.*<sup>24</sup>), ont été utilisées pour établir des fonctions de pondération. Il s'agit d'une fonction mathématique qui agit comme un filtre passe-bande, permettant de donner plus de poids pour le calcul des seuils TTS et PTS aux fréquences auxquelles les animaux sont les plus sensibles qu'aux fréquences pour lesquelles l'audition est plus faible (ou nulle). Ces fonctions de pondération contribuent à déterminer des seuils auditifs pondérés pour chaque groupe d'audition (figure 32).

Les fonctions de pondération se calculent en appliquant l'équation suivante :

$$W(f) = C + 10 \log_{10} \left\{ \frac{(f/f_1)^{2a}}{[1+(f/f_1)^2]^a [1+(f/f_2)^2]^b} \right\}$$

Où :

- $W(f)$  est l'amplitude de pondération (en dB) en fonction de la fréquence ;
- $f$  est la fréquence (en kHz) ;
- $C$  définit la position verticale de la courbe, cette constante est souvent fixée de telle sorte que  $W$  soit égal à 0 dB ;
- $f_1$  définit la limite inférieure de la bande passante, c'est-à-dire la fréquence inférieure à laquelle l'amplitude de la fonction de pondération commence à décliner ;
- $f_2$  définit la limite supérieure de la bande passante, c'est-à-dire la fréquence supérieure à laquelle l'amplitude de la fonction de pondération commence à décliner ;
- $a$  définit la pente de la fonction de pondération pour les basses fréquences (*i.e.* à quelle vitesse décroît l'amplitude  $W$  en fonction de la fréquence dans les basses fréquences) ;
- $b$  définit la pente de la fonction de pondération pour les hautes fréquences (*i.e.* à quelle vitesse décroît l'amplitude  $W$  en fonction de la fréquence dans les hautes fréquences).

Pour chacun des groupes précédemment définis, les valeurs de ces paramètres sont décrites dans le tableau 19 ci-dessous. Les fonctions de pondération ainsi établies pour chaque groupe d'audition sont présentées sur la figure 32.

---

<sup>24</sup> Pour plus de détails, voir Southall *et al.*, 2019 [168].

Tableau 19 : Paramètres associés aux fonctions de pondération auditives des différents groupes de mammifères marins (d'après [168]).

Fonction de pondération	f1 (kHz)	f2 (kHz)	a	B	K (dB)	R <sup>2</sup>	C (dB)
LF	0,20	19	1	2	179		0,13
HF	8,8	110	1,6	2	177	0,825	1,20
VHF	12	140	1,8	2	152	0,864	1,36
SI	4,3	25	1,8	2	183		2,62
PCW	1,9	30	1	2	180		0,75
OCW	0,94	25	2	2	198	0,557	0,64

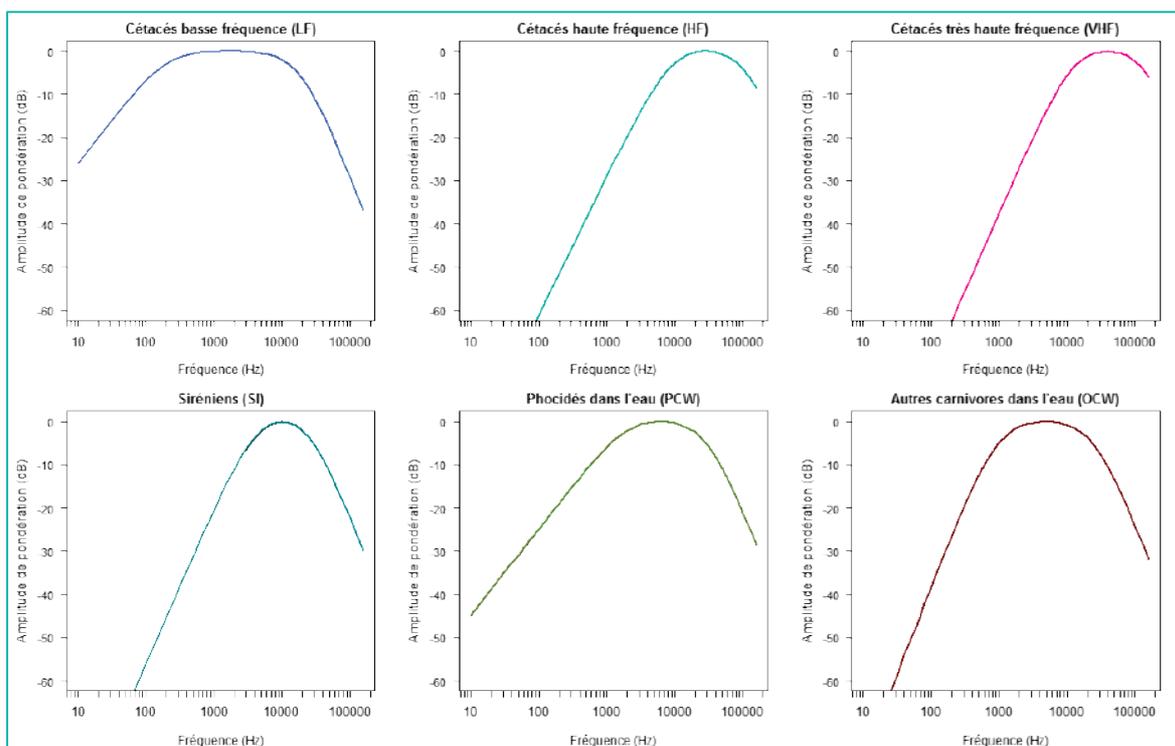


Figure 32 : Fonctions de pondération des cétacés basse fréquence (LF), haute fréquence (HF), très haute fréquence (VHF), les siréniens (SI), les phocidés dans l'eau (PCW) et les autres Carnivores dans l'eau (OCW) (d'après [168])

### Fonctions d'exposition sonore

La fonction d'exposition sonore découle de la fonction de pondération et des seuils auditifs. Elle est définie comme la différence entre la valeur du seuil auditif et la valeur de la fonction de pondération pour chaque fréquence.

Cette fonction permet de visualiser l'exposition sonore nécessaire pour engendrer une perte d'audition temporaire ou permanente en fonction de la fréquence et déterminer ainsi des seuils TTS et PTS pondérés pour chaque groupe d'audition.

## ANNEXE 2. Documentation utile et informations complémentaires

### Concernant l'acoustique sous-marine :

- Site internet Discovery of Sound in the Sea : [www.dosits.org](http://www.dosits.org)
- Les travaux de la NOAA sur les seuils et les sensibilités acoustiques : <https://www.fisheries.noaa.gov/national/marine-mammal-protection/marine-mammal-acoustic-technical-guidance>

### Textes adoptés dans le cadre de certaines conventions internationales :

- OMI (2014) : "Guidelines for the reduction of underwater noise from commercial shipping to address adverse impacts on marine life" : <https://www.ascobans.org/en/document/imo-mepc1circ833-guidelines-reduction-underwater-noise-commercial-shipping-address-adverse>
- CDB (2016) : Décision XIII/10 : « Addressing impacts of marine debris and anthropogenic underwater noise on marine and coastal biodiversity » : <https://www.cbd.int/decisions/cop/?m=cop-13>
- CMS (2017) : « Lignes directrices de la Famille CMS pour les évaluations de l'impact sur l'environnement des activités génératrices de bruit en milieu marin » : <https://www.cms.int/fr/lignes-directrices/lignes-directrices-famille-cms-impact-bruit-milieu-marin>
- Convention OSPAR (2017) Intermediate Assessment of the state of the North-East Atlantic / impulsive noise : <https://oap.ospar.org/en/ospar-assessments/intermediate-assessment-2017/pressures-human-activities/distribution-reported-impulsive-sounds-sea/>
- Convention de Barcelone / Programme de surveillance et d'évaluation intégrées de la mer et des côtes méditerranéennes / Liste des Objectifs écologiques (OE) et indicateurs : <https://www.medqsr.org/fr/node/227>
- ACCOBAMS (2019) : résolution 7.13 : « Bruit d'origine anthropique » : <https://www.accobams.org/fr/meetings/7eme-reunion-des-parties-a-laccobams/>

### Concernant les retours d'expérience de l'impact des EMR :

- Site internet TETHYS : <https://tethys.pnnl.gov/>

### Concernant les mesures ERC :

- MTES (2018). Guide d'aide à la définition des mesures ERC. Théma Balise. CGDD et CEREMA. Disponible sur : <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Th%C3%A9ma%20-%20Guide%20d%E2%80%99aide%20%C3%A0%20la%20d%C3%A9finition%20des%20mesures%20ERC.pdf>

### Concernant la distribution des mammifères marins :

- Observatoire PELAGIS : <http://www.observatoire-pelagis.cnrs.fr/catalogueSI/#!/search?from=1&to=20>
- Site OBIS-SEAMAP : <http://seamap.env.duke.edu/>
- ObsEnMer : <https://www.obsenmer.org/>
- OFB : <https://www.afbiodiversite.fr/>
- L'INPN : <https://inpn.mnhn.fr/>
- La liste rouge de l'UICN : <https://www.iucnredlist.org/>

### ANNEXE 3. Liste des contributeurs

Outre l'apport du comité de pilotage, souligné en page II, certaines personnes ont été contactées en amont de la rédaction de ce guide. Leurs conseils et propositions ont été d'une grande aide dans l'élaboration de ce document. Nous tenons donc à remercier pour leur collaboration :

Nom	Institution
ABAD OLIVA Núria	ScottishPower Renewables
BOUGANT Julie	Port Atlantique La Rochelle
BRARD Pierre	Direction Départementale des Territoires et de la Mer de la Seine-Maritime
BROWN Carrie	Port de Vancouver
CAURANT Florence	Observatoire Pelagis (UMS 3462)
CHANEAU Claude-Henri	TOTAL
DAVID Alexandra	Direction Départementale des Territoires et de la Mer de la Manche
DELABY Françoise	Direction Régional de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement des Pays de la Loire
DUCATEL Cécile	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer
DUTHION Pierre	EDF Renouvelables
FAVILLI Costanza	Sanctuaire PELAGOS
FISSEAU Charline	Sanctuaire AGOA – Office français de la biodiversité
GICQUEL Cécile	Parc Naturel Marin d'Iroise
GUELLEC Jean-Pierre	GIE-Dragages Ports
GUESDON Romain	ENGIE GREEN France
GUIDEZ Bertrand	Ailes Marines
GUYON Christelle	Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement de la Guyane
JEWELL Rebecca	MMO/PAM Operator
LAMBERT Isabelle	CGG
LAURENT Mélina	Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement de la Guadeloupe
LELABOUSSE Clément	Parcs Naturels Marins de Mayotte et des Glorieuses - Office français de la biodiversité
LE COURTOIS Florent	Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
LE GALL Yves	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer
L'HER Christophe	SERCEL
MAGLIO Alessio	SINAY
MICHEL Sylvain	Office français de la biodiversité
NOLET Véronique	Alliance Verte

<b>Nom</b>	<b>Institution</b>
NOTO Stéphane	Association Nationale des Plaisanciers Motonautiques
RECUERO VIRTO Laura	Université de Brest
REMAUD Morgane	Office français de la biodiversité
ROITEL Olivier	Préfecture Maritime de l'Atlantique
SAMARAN Flore	École Nationale Supérieure de Techniques Avancées de Bretagne
SOUTHALL Brandon	Université de Californie, Southall Environmental Associates, Inc.
TROUSSARD Corentin	RTsys
VICTOR François	Direction Interrégionale de la Mer Nord Atlantique-Manche Ouest



**MINISTÈRE  
DE LA TRANSITION  
ÉCOLOGIQUE  
ET SOLIDAIRE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

---