

Effets des sons anthropiques sur la faune marine

Cas des projets éoliens offshore

J. Bonnel, S. Chauvaud, L. Chauvaud,
J. Mars, D. Mathias, F. Olivier, coord.



Effets des sons anthropiques sur la faune marine

Cas des projets éoliens offshore

Julien Bonnel, Sylvain Chauvaud, Laurent Chauvaud,
Jérôme Mars, Delphine Mathias, Frédéric Olivier, coord.

Éditions Quæ

Collection *Matière à débattre et décider*

Gouverner les coopératives agricoles

Stratégies et outils

X. Hollandts

2021, 136 p.

La montée du niveau de la mer d'ici 2100

Scénarios et conséquences

D. Lacroix, O. Mora, N. de Menthière, A. Béthinger

2021, 128 p.

Stocker du carbone dans les sols français

Quel potentiel et à quel coût ?

S. Pellerin, L. Bamière, I. Savini, O. Réchaudère, coord.

2021, 232 p.

Qualité des aliments d'origine animale

Production et transformation

S. Prache, V. Santé-Lhoutellier, C. Donnars, coord.

2021, 310 p.

Cet ouvrage a bénéficié du soutien financier du CNRS.

© Éditions Quæ, 2022

ISBN papier : 978-2-7592-3544-5

ISBN PDF : 978-2-7592-3545-2

ISBN epub : 978-2-7592-3546-9

ISSN : 2115-1229

Éditions Quæ

RD 10

78026 Versailles Cedex

www.quae.com

www.quae-open.com

Cet ouvrage est diffusé sous licence CC-by-NC-ND 4.0.

Sommaire

Avant-propos	5
Introduction	7
1. Bases théoriques et présentation des sons émis par les EMR	11
Introduction	11
Les bases théoriques de l'acoustique sous-marine et la chaîne des effets acoustiques d'une activité anthropique vers la faune marine	11
Principales caractéristiques des sons émis lors des projets d'énergies marines renouvelables (EMR)	23
2. Les bases de la perception sonore chez les animaux marins	33
Introduction	33
Les bases de la perception sonore chez les animaux marins	33
3. Effets des sons sur la faune marine et seuils d'impacts	59
Introduction	59
Description des effets liés aux sons d'origine anthropique	61
Impact sur le développement larvaire et le recrutement des invertébrés	76
Effet des impacts	79
Définitions des seuils d'impact	83
4. Retours d'expériences sur les projets d'énergies marines renouvelables en Europe depuis 2000	93
Introduction	93
Retours d'expériences des parcs éoliens offshore flottants	94
Retours d'expériences des parcs éoliens offshore posés	95
Phase de construction	96
Retours d'expériences sur les méthodes de réduction des impacts acoustiques	110
5. Législation, réglementation, conservation, analyse et constat	125
Introduction	125
La réglementation européenne et française encadrant l'impact du son dans les activités marines	126

Les principaux moyens de préservation et de protection	128
Déroulé actuel d'une étude d'impact acoustique EMR	131
6. Lacunes de connaissances et besoins d'études complémentaires	135
Conclusion	138
Bibliographie	141
Liste des auteurs	165

Avant-propos

IMPLANTÉES AU LARGE DES CÔTES, les éoliennes en mer permettent d'utiliser plus efficacement l'énergie du vent pour produire de l'électricité. C'est une énergie renouvelable, séduisante et envisagée dans le mix énergétique, et qui contribuerait à la robustesse du système électrique et à sa résilience. Son développement fait pourtant débat. En effet, le développement de l'éolien en mer est susceptible d'avoir un impact sur la biodiversité, et il est important de l'éviter, de le réduire et de le compenser au maximum. L'objet de cet ouvrage est de faire un état des lieux des connaissances scientifiques sur les potentiels effets préjudiciables sur la vie marine des pollutions sonores induites par la construction, le fonctionnement, puis le démantèlement des éoliennes en mer.

Certaines études menées préalablement estimaient que les impacts sur la faune marine seraient limités. Pourtant, ces mêmes impacts sont considérés comme mal connus, alors même que l'éolien en mer se développe largement, notamment en Europe, et que les analyses et les retours d'expérience sont de plus en plus nombreux.

Afin d'établir une synthèse des études des retours d'expérience en France, en Europe et dans le monde, il a semblé nécessaire de réunir au sein d'une même équipe une large diversité de compétences. Ainsi, un groupe de scientifiques, issus de différentes disciplines et experts du domaine, a été mobilisé afin de dresser un panorama des connaissances les plus récentes.

L'ensemble de l'équipe, composée d'une quinzaine de personnes, s'est consacré à une analyse collective, critique et neutre de la littérature scientifique mondiale portant sur les mécanismes de propagation sonore sous-marine, sur les impacts multiples de l'anthropophonie sur les diverses espèces marines, sur les bruits engendrés par les projets éoliens, notamment lors de leur construction, et sur les méthodes permettant de les réduire. Cet ouvrage recense les espèces qui risquent d'être impactées par les projets éoliens offshore, ainsi que la forme et la sévérité de cet impact, de même que les effets des stratégies d'atténuation qui peuvent être mises en place. Il souligne aussi l'incomplétude des connaissances actuelles et la nécessité de les renforcer, en particulier pour plusieurs espèces et sources sonores.

Le CNRS, un organisme de recherche couvrant de multiples champs disciplinaires, s'est naturellement associé à ce travail, et en tant que directeur général délégué à la science, je suis particulièrement impressionné par l'amplitude du travail effectué dans cet ouvrage. Il met en lumière des études au long cours de chercheurs qui permettent aujourd'hui de mieux cerner les phénomènes acoustiques sous-marins, de commencer à comprendre les systèmes auditifs et le comportement des espèces marines, mais aussi d'avoir des instruments et des dispositifs de mesure performants. Son exhaustivité permet de mieux cerner la question complexe de l'impact acoustique des projets d'énergie marine renouvelable

sur la faune marine et apporte ainsi l'éclairage de la science aux décideurs et au débat public sur cette question ô combien d'actualité.

Alain Schuh, Directeur Général Délégué à la Science (CNRS)

Introduction

CET OUVRAGE PORTE sur les bruits sous-marins et l'impact des émissions sonores d'origine anthropique sur la faune marine. Il est écrit dans un contexte où le développement des machines utilisant les énergies marines renouvelables (EMR) est attendu et, *in fine*, il se concentre sur l'impact du bruit des travaux offshore entrepris pour la construction d'éoliennes.

Les sons qui se propagent au sein du milieu marin sont ici considérés et appréhendés comme des variables environnementales majeures influençant l'écologie des animaux marins et des écosystèmes. Le rôle du son dans l'océan est reconnu au niveau international. Les paysages sonores sous-marins ont récemment été identifiés comme une nouvelle « variable océanographique essentielle » par le Système d'observation globale des océans (GOOS). GOOS est un programme dirigé par la Commission océanographique intergouvernementale (COI) qui fait partie de l'Unesco. En Europe, la directive-cadre « Stratégie sur le milieu marin » (DCSMM) impose aux pays membres d'atteindre et de maintenir un « bon état écologique » dans leurs eaux territoriales. Cet état est quantifié par divers descripteurs, dont le descripteur 11 qui quantifie la pollution sonore.

Malgré la reconnaissance du rôle des sons sous-marins, notre compréhension des paysages sonores océanographiques, notamment de leurs liens avec les écosystèmes, reste parcellaire. Toutefois, les connaissances actuelles permettent désormais d'esquisser une description, souvent empirique, de ces paysages sonores, qui sont divisés en trois compartiments : géophonie, biophonie et anthropophonie.

La géophonie est l'ensemble des sons induits par des phénomènes physiques naturels (ou éléments abiotiques). Une large part des sources de la géophonie est atmosphérique et liée aux conditions météorologiques : le vent et la pluie. D'autres ondes sonores sont produites par l'état de la mer indépendamment du vent local, mais en lien avec la marée, les courants et la houle. La glace de mer émet aussi des sons, parfois de forte intensité. La géophonie inclut également les sons provoqués par les activités sismiques naturelles.

La biophonie est l'ensemble des sons produits, volontairement ou involontairement, par les animaux marins. Ces sons, générés par les organismes marins dits « sonifères », peuvent remplir des fonctions écologiques, tel que le repérage dans l'espace, la communication inter ou intraspécifique, ou encore permettre l'alimentation. Si les mammifères marins sont des animaux sonifères charismatiques, le lecteur découvrira dans cet ouvrage qu'ils ne sont pas les seuls, poissons et invertébrés étant d'importants contributeurs à la biophonie.

Enfin, l'anthropophonie est l'ensemble des sons produits par les activités humaines en mer. En effet, depuis le début de l'ère industrielle, les activités humaines modifient drastiquement les paysages acoustiques sous-marins. Ces activités incluent le trafic maritime, la prospection pétrolière, l'utilisation de systèmes sonar (civils ou militaires), et divers

travaux et aménagements du littoral (par exemple, les installations portuaires) et de la Zone économique exclusive (par exemple, les plateformes pétrolières ou les installations EMR). L'objectif de ce livre est d'étudier l'impact potentiel sur l'écosystème du domaine spécifique de l'anthropophonie lié à l'installation, à l'utilisation et au démantèlement des structures EMR éoliennes. Pour cela, l'ouvrage doit couvrir un large socle interdisciplinaire de connaissances couvrant la physique et l'acoustique sous-marines (génération et propagation des sons), le traitement des données acoustiques et la biologie marine. L'ouvrage, découpé en six chapitres, est une synthèse bibliographique des connaissances actuelles sur le sujet.

Le chapitre 1 apporte un socle de connaissances en acoustique et en traitement du signal. Ce chapitre permet de comprendre 1) les phénomènes physiques générant les sons, 2) la propagation du son dans le milieu marin et 3) les systèmes et métriques utilisés pour quantifier les niveaux sonores. On y montre notamment que la propagation acoustique est complexe (partie 1). On explique également (partie 2) que les EMR génèrent divers types de sons, transitoires et impulsionsnels, et que les métriques pour quantifier les niveaux de ces sons doivent être adaptées au type de son considéré. Enfin, on insiste sur le fait qu'une onde sonore peut-être décrite par plusieurs quantités physiques, notamment pression et vitesse particulières, et que la pertinence de ces quantités dépend du récepteur considéré.

Dans le chapitre 2, sont détaillées les bases de la perception sonore (mécanismes et caractéristiques de productions) par les animaux marins, classés en cinq groupes : mammifères et oiseaux marins, poissons, tortues et invertébrés (pélagiques et benthiques). Les systèmes auditifs sont décrits à l'échelle individuelle sur une base anatomique afin de comprendre les mécanismes de réception du son. Leurs performances relatives sont illustrées et permettent de préciser la sensibilité variée des groupes, voire des espèces, à certaines fréquences (basses, moyennes et hautes). Il convient de noter une forte inégalité selon les groupes et les espèces quant à l'étendue des connaissances disponibles à ce jour, très fournies pour les vertébrés mais plus limitées pour les invertébrés. Il apparaît également que les paramètres environnementaux utilisés par les animaux pour percevoir le son varient selon les systèmes auditifs, certains étant sensibles à des variations de pression, à des accélérations particulières ou à des vibrations du substrat.

Le chapitre 3, central dans cet ouvrage, propose une étude des effets des sons sur la faune marine et sur les seuils d'impacts. Ces impacts acoustiques, parfois importants, peuvent s'exprimer tout au long du cycle de vie des organismes marins. Ils peuvent induire des réponses biologiques aux différents niveaux d'intégration du vivant, tant sur l'individu (réponses physiologiques et comportementales), que sur les populations et les espèces, ainsi que sur les interactions qui les lient au sein d'assemblage d'espèces (interactions interspécifiques). Ces réponses peuvent varier en fonction du stade de développement (ontogénie), de l'âge ou du sexe, du contexte, mais également en fonction de la distance à la source et des caractéristiques de la source sonore. Dans ce chapitre, en plus des études sur les mammifères marins et sur la faune benthique, nous avons fait le choix de

synthétiser, dans une section dédiée, les impacts sur les stades larvaires, paralarvaires et juvéniles d'invertébrés. Une section complète est dédiée à l'effet des impacts sur la faune (masquage et zonation d'effets). Ce chapitre se conclut par une présentation des recommandations en matière de seuils d'impacts définis communément pour différents groupes taxonomiques (mammifères marins, poissons, tortues, oiseaux, invertébrés).

Dans le chapitre 4, nous proposons dans une première partie une description des retours d'expériences sur différents projets EMR, essentiellement mis en place en Europe. Depuis les années 2000, de nombreuses études *in situ* visant à caractériser l'impact acoustique des projets éoliens offshore sur la faune environnante ont été menées, notamment sur les opérations de battage de pieux durant la phase de construction. Plus récemment, des suivis *in situ* ont permis d'étudier les impacts associés à la phase d'exploitation des parcs éoliens. Ces retours d'expériences, sur les différentes phases, s'appuient sur des études internationales menées sur des structures offshore posées et flottantes. Les impacts sont étudiés sur des espèces marines variées (marsouins, phoques, poissons et invertébrés). Dans une deuxième partie, nous présentons les approches et les méthodes proposées et testées depuis le début des années 2000 afin de diminuer l'impact acoustique des phases d'exploitation. Ces méthodes peuvent être pertinentes pour réduire l'impact d'autres types de travaux (forage, dragage, enrochement, etc.).

Dans le chapitre 5, nous abordons une réflexion sur la législation en matière de conservation des populations de mammifères marins, de poissons et d'invertébrés soumis aux bruits anthropiques. En se basant sur des textes de loi (directive-cadre européenne de 2008, DCSMM ; Plan d'action pour le milieu marin de 2012, PAMM), nous décrivons les principes de bases émanant de ces lois (définition du bon état écologique, détermination de différents descripteurs) et portant sur les conditions à respecter en matière de protection vis-à-vis des impacts sonores. Considérant que les projets de travaux, d'ouvrages et d'aménagement des EMR faisant l'objet d'une étude d'impact doivent être compatibles avec les objectifs du PAMM, la connaissance des effets acoustiques sur les espèces marines constitue un enjeu pour le développement des EMR. Ces connaissances sont également un préalable à la préservation et à la protection des espèces marines (plan d'action, protection, réseau Natura 2000). L'état de l'art sera présenté ici. Une analyse des incidences des projets est proposée. Il en ressort que 1) si le cadre réglementaire est assez clair, le manque de connaissances sur les espèces marines, les habitats et leur sensibilité au son en milieu marin est criant, 2) qu'il faut intégrer ici le fait que l'étude de l'impact d'un projet en mer doit impérativement traiter de l'incidence du projet, non seulement sur la biodiversité, mais aussi sur la pêche professionnelle et sur la ressource halieutique. Pour conclure ce chapitre important, nous mettons en évidence le fait que les études réglementaires des EMR souffrent d'un manque de connaissances et de recherches adaptées (l'impact acoustique apparaît clairement aujourd'hui comme l'un des plus difficiles à établir et à démontrer). Il apparaît également que l'estimation de l'impact potentiel des projets éoliens doit prendre en compte le contexte

environnemental local, notamment l'intégralité des pollutions sonores préexistantes, afin de voir s'instaurer un débat public non biaisé.

Dans le sixième et dernier chapitre de cet ouvrage, nous identifions les avancées et les carences des connaissances scientifiques sur l'impact au niveau individuel pour les mammifères marins et les poissons et pour quelques invertébrés. Une priorisation des besoins d'études complémentaires est proposée afin de mener à bien une réflexion portant sur l'impact acoustique que peut générer une activité éolienne en mer.

La conclusion synthétise ce que l'on comprend aujourd'hui de l'impact acoustique des projets d'énergie marine renouvelable et, plus généralement, du bruit anthropique sur la faune marine. Même s'il n'existe pas d'étude exhaustive, il apparaît que la prudence est de mise pour les opérations de battages de pieux et les sources sonores les plus importantes, qui s'avèrent dans certains cas avoir un impact important sur certaines espèces marines. Il apparaît aussi qu'il est essentiel de poursuivre les recherches en laboratoire et en milieu marin afin de mieux comprendre les mécanismes de propagation des sons sous-marins, leur perception par les différentes espèces et leur impact sur les écosystèmes marins, dont la connaissance reste très parcellaire.

1. Bases théoriques et présentation des sons émis par les EMR

Introduction

LA COMPRÉHENSION ET L'ÉVALUATION des impacts sonores des EMR éoliennes sur le milieu marin requièrent des connaissances interdisciplinaires couvrant l'acoustique sous-marine, la physique, le traitement des données et la biologie. La première partie de ce chapitre se focalise sur l'acoustique et le traitement des données, la deuxième sur les sons générés par les EMR.

L'installation, l'utilisation et le démantèlement de structures EMR éoliennes génèrent des sons dans le milieu marin. Ces sons se propagent sur de longues distances et viennent s'ajouter à la cacophonie ambiante sous-marine. Pour évaluer l'impact de ces sons, il est donc nécessaire de comprendre 1) les phénomènes physiques les générant, 2) la propagation du son dans le milieu marin et 3) les systèmes et les métriques utilisés pour quantifier les niveaux sonores. La propagation acoustique est complexe : l'environnement agit comme un guide d'onde qui déforme le signal au cours de la propagation. Comme nous allons le voir, les EMR génèrent divers types de sons, transitoires ou continus, et les métriques pour quantifier les niveaux de ces sons doivent être adaptées au type de son considéré. Une onde sonore peut être décrite par plusieurs quantités physiques, notamment la pression et la vitesse particulaires, et la pertinence de ces quantités dépend du récepteur considéré, certains animaux étant sensibles à l'une ou à l'autre (ce dernier point sera détaillé dans les chapitres suivants). On ne peut donc pas étudier l'impact des EMR et les métriques associées sans un solide socle de connaissances en physique des ondes et en traitement du signal, que ce chapitre résume.

Les bases théoriques de l'acoustique sous-marine et la chaîne des effets acoustiques d'une activité anthropique vers la faune marine

LES ONDES ACOUSTIQUES SONT PROVOQUÉES par la propagation d'une perturbation mécanique. Les sons (ondes acoustiques) peuvent être définis comme des phénomènes ondulatoires qui résultent de la vibration du milieu mis en mouvement par une perturbation

mécanique ou thermique. Du fait de l'élasticité du milieu, la compression-dilatation locale d'un élément du milieu se transmet à un élément adjacent et, de proche en proche, se propage en s'éloignant de la source d'émission. En physique, l'onde acoustique est généralement caractérisée par l'amplitude du mouvement local de chaque élément du milieu de propagation autour de sa position d'équilibre, par la vitesse particulière correspondante (déplacement des particules causé par l'onde acoustique par rapport à leur position d'équilibre) et par la pression acoustique (variation autour de la pression statique moyenne) qui en résulte.

Lorsqu'un son est produit, il est souvent caractérisé, en acoustique sous-marine, par diverses mesures qui quantifient notamment sa puissance, sa durée, sa fréquence et sa directionnalité. D'autres métriques, notamment statistiques, peuvent être utilisées. Le niveau sonore d'une source acoustique est couramment noté SL (*Source Level*).

I Chaîne de transmission du son

Après sa production par une source sous-marine, le son se propage dans le milieu. La propagation est largement impactée par les propriétés du milieu portant l'onde acoustique, ici l'océan. L'émission sonore se propage de la source vers le récepteur par compressions-dépressions successives des particules d'eau sur les particules voisines à une vitesse proche de 1 500 m/s. Cette onde, souvent dite P ou de Pression, se propage au travers d'une portion d'océan constituée de la colonne d'eau, de la surface et du fond marin. Cet ensemble forme un canal de propagation souvent complexe.

La vitesse de propagation varie notamment en fonction de la pression statique, mais aussi de paramètres océanographiques tels que la température et la salinité. Cela crée un « profil de célérité » hautement dépendant de la profondeur. Un exemple typique de profil de célérité en océan profond est donné dans la figure 1.1. Ce profil de célérité évolue en fonction de la position géographique, des saisons climatiques, des variations journalières de température, des marées internes, des conditions climatiques, des conditions météorologiques, etc. Ainsi, la prédiction de la propagation acoustique ne peut se faire sans une bonne connaissance et compréhension des phénomènes océanographiques sous-jacents.

En milieu côtier, il est également indispensable de prendre en compte les propriétés géoacoustiques des sédiments marins. Ces propriétés, généralement inconnues, sont pourtant primordiales pour quantifier correctement la propagation sonore.

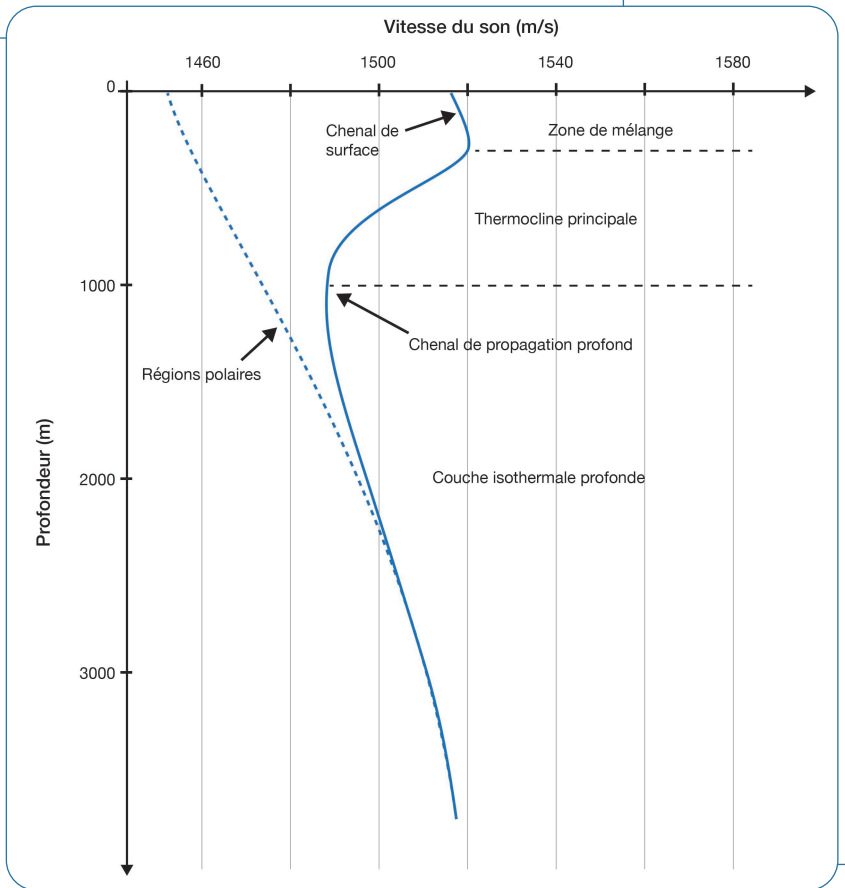
Globalement, la propagation dans l'océan atténue le niveau sonore émis selon une certaine proportion, appelée « pertes par transmission » ou « *transmission loss* » (TL), qui dépend des propriétés géo-océano-acoustiques du canal (colonne d'eau et fond), des positions de la source et du récepteur, et des fréquences émises. Après une propagation sur une certaine distance, l'onde sonore possède un niveau reçu RL (*received level*). Ce RL combine le niveau de l'onde acoustique après propagation (SL-TL), auquel il convient d'ajouter le niveau de bruit ambiant NL (*noise level*) au niveau du capteur (figure 1.2).

On suppose maintenant que cette onde acoustique de niveau RL est mesurée par un organe de réception qui va modifier ses caractéristiques. Cet organe de réception peut

être un capteur de réception électronique ou un récepteur biologique. Dans les deux cas, le récepteur va modifier l'onde sonore. On modélise généralement ces modifications *via* une fonction de transfert favorisant/défavorisant certaines gammes de fréquence. Le niveau perçu est alors noté PL (*perceived level*).

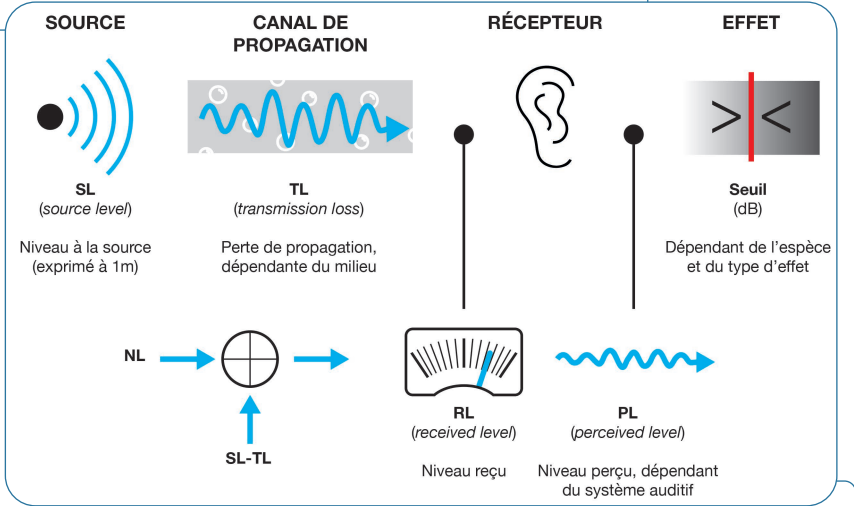
Dans le cas d'un récepteur biologique (par exemple, l'appareil auditif d'un animal marin), on compare le PL à des seuils pour évaluer l'existence d'un risque d'impact. Les seuils sont fournis par la littérature scientifique ; ils dépendent notamment de la nature de l'impact, de l'espèce étudiée et de la nature physique des sons considérés.

Figure 1.1. Exemple de profil de célérité en océan profond.



Redessiné par Nicolas Josso d'après Bonnel (2010).

Figure 1.2. Chaîne de transmission acoustique d'une source vers un récepteur.



Dessin réalisé par Sébastien Hervé, Lemar/IUEM.

■ Description de la mesure du niveau sonore

Dans ce paragraphe, nous allons présenter l'ensemble des notions physiques (pression, intensité et vitesse particulaire) permettant de caractériser et de décrire un niveau sonore. Cette description se fait souvent en décibels. Les décibels constituent une échelle relative de quantification et de représentation de quantités pouvant posséder des ordres de grandeurs très différents, comme c'est le cas en acoustique sous-marine. L'échelle des décibels s'applique soit aux pressions acoustiques, soit aux intensités acoustiques. Elle intervient tout au long de la chaîne de transmission acoustique.

La pression acoustique

Dans la pratique, la pression acoustique est la grandeur la plus employée. Aussi, les récepteurs utilisés sont souvent des capteurs de pression, appelés hydrophones. L'unité de mesure de pression de référence est le pascal, noté Pa (1 Pa = 1 N/m²).

La pression acoustique se définit comme la force par unité de surface perpendiculaire à la direction de propagation. La pression acoustique P exprimée en décibel relativement à P_{ref} (une pression de référence) est définie par :

$$P [dB \text{ re. } P_{ref}] = 20 \log_{10}(P/P_{ref}) \text{ Eq (1)}$$

Le calcul du rapport P/P_{ref} définit l'échelle relative et le calcul de log₁₀(P/P_{ref}) permet de représenter simultanément des petites et des grandes quantités.

L'intensité acoustique

L'intensité acoustique se définit comme le flux d'énergie acoustique à travers une unité de surface perpendiculaire à la direction de propagation. L'intensité acoustique, exprimée en décibel relativement à I_{ref} (une intensité de référence) est définie par :

$$I [dB \text{ re. } I_{ref}] = 10 \log_{10}(I/I_{ref}) \text{ Eq (2)}$$

Formellement, l'intensité acoustique est égale à la moyenne du produit de la pression acoustique par la vitesse particulaire. En pratique, dans des cas simples, l'intensité est proportionnelle au carré de la pression. Ainsi, les équations 1 et 2 sont similaires.

Le tableau 1.1 présente les niveaux en décibel de différentes pressions, allant de $1 \mu\text{Pa}$ à $1\ 000\ 000 \mu\text{Pa}$, avec une pression de référence de $1 \mu\text{Pa}$.

Tableau 1.1. Niveaux en décibel dB re. $1 \mu\text{Pa}$ pour des ondes de pression allant de $1 \mu\text{Pa}$ à $1\ 000\ 000 \mu\text{Pa}$.

Pression (P en μPa)	1	10	100	1 000	10 000	100 000	1 000 000
Niveau (dB re. $1 \mu\text{Pa}$)	0	20	40	60	80	100	120

L'utilisation de l'échelle des décibels permet de représenter simultanément une onde ayant une amplitude de $1 \mu\text{Pa}$ (0 dB re. $1 \mu\text{Pa}$), une onde ayant une amplitude 100 fois plus forte (40 dB re. $1 \mu\text{Pa}$) et une onde ayant une amplitude 10 000 fois plus forte (80 dB re. $1 \mu\text{Pa}$). La différence de décibel entre deux quantités permet d'évaluer la proportion de ces deux quantités en termes d'amplitude et de puissance.

Nous allons proposer quelques cas d'étude simple pour appréhender correctement ces notions. Un écart de 3 dB entre deux signaux correspond à un rapport 2 de leurs énergies et de $\sqrt{2}$ pour leurs amplitudes ; un écart de 10 dB correspond à un rapport 10 en énergie et en rapport de $\sqrt{10} = 3,1$ en amplitude. Un écart de 1 dB correspond à une variation d'environ 10 % de la pression acoustique. Le tableau 1.2 présente ces équivalences en fonction de la différence en dB entre ces deux quantités.

Il est important de toujours prendre ses précautions lorsque l'on exprime les niveaux sonores en décibel : le niveau sonore converti en décibel de la somme d'ondes n'est pas la somme des niveaux sonores exprimés en décibel de chaque onde. Par exemple, si une source sonore « S2 » a un niveau de source supérieur de 20 décibels à celui d'une source sonore « S1 », il faut 100 sources sonores indépendantes du type « S1 » pour produire le même niveau que la source « S2 ».

Tableau 1.2. Différence de niveau en dB et rapport d'amplitude.

P2dB-P1dB	0	3	10	20	30	40
P2/P1	1	1.4	3	10	33	100
I2/I1	1	2	10	100	1 000	10 000

La vitesse particulière

Comme cela a été mentionné plus haut, un champ acoustique peut-être décrit par plusieurs grandeurs, dont la pression acoustique est la composante la plus simple à utiliser. Cependant, il est également possible de décrire le champ acoustique en utilisant la notion de vitesse particulière. Cette quantité, plus complexe, a longtemps été considérée comme une grandeur théorique ayant peu d'intérêt pratique en acoustique sous-marine. Toutefois, on sait aujourd'hui que le système de perception de certains animaux marins (notamment de certains poissons et des crustacés) est basé sur la détection de la vitesse particulière, et non de la pression (Popper et Hawkins, 2018 ; Nedelec *et al.*, 2016 ; Sigray et Andersson, 2011). Il est donc important de présenter cette quantité. Pour cela, nous devons plonger un peu plus en avant dans la physique des ondes.

Au sens acoustique, une particule est un petit volume d'eau, suffisamment petit pour pouvoir étudier son mouvement avec des équations différentielles, mais suffisamment grand pour définir une densité moyenne. La notion de particule acoustique est fondamentalement différente de la notion de particule en physique quantique. En acoustique sous-marine, une particule acoustique contient un très grand nombre de molécules d'eau et de sel.

Une onde acoustique est générée par le mouvement de particules d'eau qui, de proche en proche, font bouger les particules voisines. Toutefois, la position moyenne de chaque particule ne change pas (on suppose une absence de courant), ce sont les mouvements relatifs qui se propagent et créent une onde. Un exemple simple, pour visualiser la vitesse particulière, est de regarder la propagation d'une Ola dans un stade. Dans cet exemple, chaque spectateur constitue une « particule » et la « Ola » est l'onde étudiée. Individuellement, les spectateurs se lèvent et s'assoient : il s'agit d'un mouvement oscillatoire vertical (se lever, puis s'asseoir) autour d'une position d'équilibre (assis). Aucun spectateur ne change de siège, toutefois, la Ola se propage horizontalement le long du stade. La vitesse de propagation de la Ola et la vitesse à laquelle chaque spectateur se lève ne sont pas nécessairement identiques. La vitesse particulière est donc différente de la vitesse de propagation de l'onde.

Formellement, l'exemple de la Ola décrit une onde de cisaillement (c'est-à-dire que les particules se déplacent perpendiculairement à la direction de propagation de l'onde). Dans l'eau (un fluide), les ondes de cisaillement n'existent pas et seules les ondes de compression (c'est-à-dire que les particules se déplacent parallèlement à la direction de propagation de l'onde) peuvent se propager. Toutefois, l'idée sous-jacente reste la même : le mouvement des particules est local et oscillatoire autour d'une position d'équilibre.

Dans un milieu infini, des ondes simples (sphériques, cylindriques, planes) se propagent. Dans ce cas, les particules oscillent uniquement sur un axe source/récepteur. La situation en milieu océanique réel est plus complexe. L'environnement est borné par des interfaces (surface air/eau, plancher océanique, strates sédimentaires, etc.) et agit comme un guide d'ondes. La propagation peut alors être modélisée comme une somme d'ondes simples venant de directions différentes, même dans le cas d'une unique source acoustique.

La vitesse particulière est alors complexe, les particules d'eau peuvent se déplacer selon trois dimensions (profondeur d'eau, latitude, longitude). Le champ de vitesse particulière, noté \mathbf{v} , est donc un champ vectoriel de dimension 3.

La vitesse particulière et la pression acoustique suivent une équation différentielle similaire : l'équation d'onde. Toutefois, le lien entre vitesse particulière \mathbf{v} et pression p n'est pas trivial. De façon générale, la relation est :

$$d\mathbf{v}/dt = -\mathbf{grad} p / \rho \text{ Eq (3)}$$

Avec ρ la densité du milieu et $\mathbf{grad} p$ le gradient spatial ; elle décrit l'équilibre des forces qui s'exercent sur la particule. En milieu infini (c'est-à-dire pour une onde plane), cette relation est drastiquement simplifiée et devient linéaire : $p = \rho c |\mathbf{v}|$. On définit également l'accélération \mathbf{a} et le mouvement \mathbf{u} des particules d'eau, que l'on relie à la vitesse grâce aux relations classiques de la mécanique : $\mathbf{a} = d\mathbf{v}/dt$ et $\mathbf{v} = d\mathbf{u}/dt$. Ces trois quantités peuvent être utilisées indifféremment, mais l'accélération particulière est une quantité centrale pour les études de l'audition des crustacés et des poissons (voir chapitre suivant).

Comme expliqué plus haut, le milieu océanique agit comme un guide d'onde. Il est donc impossible d'utiliser l'approximation onde plane. On ne peut pas obtenir \mathbf{v} à partir d'une unique mesure de p . Des mesures dédiées, directes ou indirectes, doivent être effectuées pour estimer \mathbf{v} .

Malheureusement, des développements sont nécessaires pour aboutir à des produits standardisés permettant les mesures et la modélisation. Les solutions existantes incluent :

- une mesure directe du déplacement des particules d'eau à l'aide d'accéléromètres ;
- une mesure indirecte de la vitesse particulière *via* des mesures de pression ; pour cela, on se base sur l'équation Eq (3) et on approxime le gradient spatial ($\mathbf{grad} p$) en mesurant p en plusieurs points de l'espace avec une antenne d'hydrophones.

Toutefois, aucune de ces méthodes n'est simple à mettre en œuvre. La méthode directe souffre notamment de problèmes de calibration, alors que la méthode indirecte est largement impactée par l'approximation numérique du gradient (Gray *et al.*, 2016). Quelle que soit la solution choisie, on conseille ici de compléter les mesures expérimentales par la mise en place de modèles numériques (voir, par exemple, Duncan *et al.*, 2016) afin de s'assurer une bonne compréhension et la maîtrise de la situation.

En résumé, la prise en compte de la vitesse particulière est un aspect complexe qu'il est pourtant nécessaire de traiter. Mesurer simplement mais correctement la vitesse particulière reste un défi technologique. En conséquence, on conseille ici de rester critique vis-à-vis des références de la littérature qui quantifient des impacts en termes de vitesse particulière. Les mesures absolues (par exemple, le seuil d'impact) sont probablement très incertaines. Toutefois, les tendances relatives (par exemple, les dégâts augmentent quand la puissance de la vitesse particulière s'accroît) sont probablement très crédibles.

Enfin, notons que, pour correctement modéliser la propagation sonore dans l'océan, il convient de prendre en compte la propagation dans le plancher océanique, ce qui est souvent fait de manière simpliste en considérant que les sédiments marins constituent

un milieu fluide. Cette approximation est acceptable lorsqu'on étudie la propagation dans la colonne d'eau, par exemple pour des études d'impacts sur les mammifères marins. En revanche, l'approximation « sédiment fluide » est fautive dès lors que l'on s'intéresse à la propagation sur ou dans le plancher océanique. En effet, on ignore alors diverses ondes portées par les solides et/ou les interfaces fluides/solides. Bien que la physique décrivant ces phénomènes soit maîtrisée (par exemple, au sein de la communauté géosciences), elle est trop souvent ignorée par la communauté bioacoustique. Il est pourtant primordial de prendre en compte les vibrations du sous-sol pour étudier correctement l'impact du son sur les organismes benthiques (Roberts et Elliott, 2017 ; Hawkins *et al.*, 2021) et il y a aujourd'hui un manque de connaissances sur ce sujet.

I Quantifier les niveaux sonores

Plusieurs grandeurs sont utilisées pour caractériser une onde sonore. Nous présenterons celles utiles pour la description de l'onde reçue (RL), puis nous décrirons les adaptations nécessaires pour décrire les sources émises et les ondes perçues.

Un récepteur acoustique placé à une certaine distance d'une source sonore reçoit un niveau sonore (RL) que l'on peut décrire (ou mesurer) à l'aide de trois grandeurs physiques :

- la pression acoustique P ;
- la vitesse particulaire v ;
- l'intensité acoustique I .

Généralement, la grandeur physique privilégiée dans l'ensemble des mesures en acoustique sous-marine est la pression acoustique. Cependant, la vitesse particulaire joue un rôle important dans cet ouvrage car on estime que les invertébrés y sont très sensibles (Popper et Hawkins, 2018 ; Nedelec *et al.*, 2016).

Une onde sonore peut être décrite par trois données fondamentales ; sa durée, son amplitude et la fréquence :

- la durée : c'est l'intervalle de temps pendant lequel la pression acoustique existe et qui sert de référence pour définir les types de sons. On peut globalement classer les sons en trois catégories selon leur durée. Si la perturbation sonore est brève (un battage de pieux, un clic de dauphins, etc.), on parle de sons impulsionnels ou de transitoires courts. Si la perturbation est continue (bruit de navire, bruit de la rotation des éoliennes), on parle de sons continus. Et entre ces deux extrêmes, il existe toute une gamme de sons transitoires, ni brefs ni continus (par exemple, émission de mammifères marins, chants, raclement de chaîne de mouillage, bruit de glace, etc.). La différence entre un transitoire « bref » et un transitoire « long » dépend du contexte étudié.
- L'amplitude s'exprime en microPascal. Cette amplitude peut être l'amplitude instantanée, amplitude existant à tout instant t . Elle peut aussi être l'amplitude efficace ou amplitude rms (*root mean square*) ; dans ce cas, on considère l'amplitude d'un son de niveau constant et de même durée qui posséderait la même puissance que le son étudié. L'amplitude peut être la pression crête-crête (P_{cc} ou P_{p-p}) qui est la pression prise entre le maximum et le