

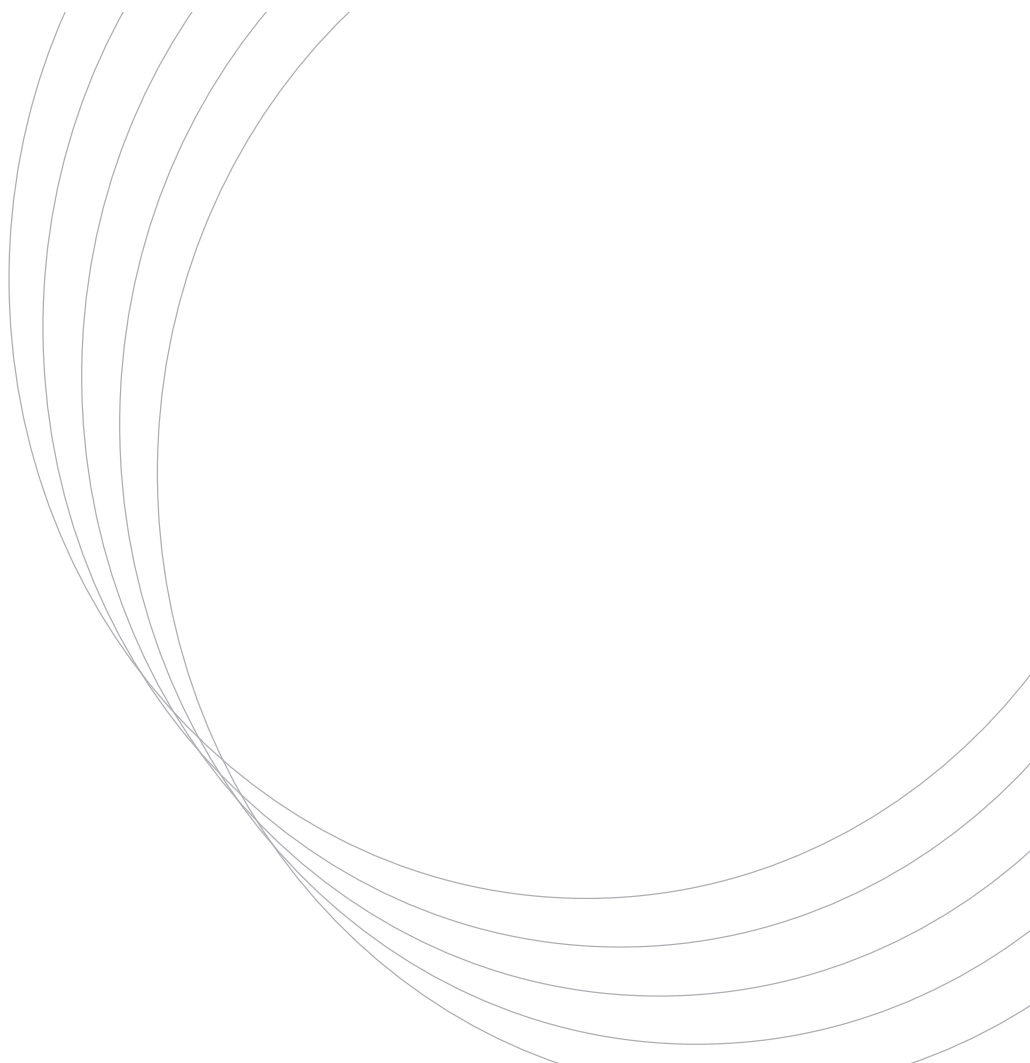
Impacts des sons anthropiques sur la faune marine

S. Chauvaud, L. Chauvaud, A. Jolivet, coord.



Impacts des sons anthropiques sur la faune marine

Sylvain Chauvaud, Laurent Chauvaud, Aurélie Jolivet,
coordinateurs



Collection Matière à débattre et décider

Restaurer les milieux et prévenir les inondations grâce au génie végétal,
Freddy Rey,
2018, 116 p.

Agriculture et alimentation durables
Trois enjeux dans la filière céréales
Gilles Charmet, Joël Abécassis, Sylvie Bonny, Anthony Fardet,
Florence Forget, Valérie Lullien-Pellerin
2017, 192 p.

Le recyclage des résidus organiques
Regards sur une pratique agro-écologique
Hélène Jarousseau, Sabine Houot, Jean-Marie Paillat, Hervé Saint-Macary, coord.
2016, 276 p.

Diffusion and transfer of knowledge in agriculture
Christian Huyghe, Pascal Bergeret, Uno Svedin
2016

Recyclage de déchets organiques en agriculture
Effets agronomiques et environnementaux de leur épandage
Sabine Houot, Marie-Noëlle Pons, Marilys Pradel, Anaïs Tibi, coord.
2016, 200 p.

Éditions Quæ
RD 10
78026 Versailles Cedex, France
www.quae.com

© Éditions Quæ, 2018

ISBN : 978-2-7592-2775-4

ISSN : 2115-1229

Le Code de la propriété intellectuelle interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique, et est sanctionné pénalement. Toute reproduction, même partielle, du présent ouvrage est interdite sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20 rue des Grands-Augustins, Paris 6^e.

Impacts des sons anthropiques sur la faune marine

Sylvain Chauvaud, Laurent Chauvaud, Aurélie Jolivet,
coordinateurs

Éditions Quæ

A decorative graphic consisting of several thin, light gray curved lines that sweep across the bottom half of the page, starting from the left and curving towards the right.

Sommaire

Avant-propos	7
1. Les bases théoriques de l'acoustique sous-marine	11
Chaîne de transmission du son	11
Mesure du niveau sonore : les décibels	11
Quantifier les niveaux sonores	13
Niveaux de sources et niveaux perçus	15
Pertes de transmission	16
Niveaux sonores aériens et niveaux sonores sous-marins	17
2. Principales caractéristiques des sons émis lors des projets d'énergies marines renouvelables	19
Les émissions sonores des phases de construction	20
Les émissions sonores des phases d'exploitation	22
Les émissions sonores des phases de maintenance et de démantèlement	24
Comparaison avec d'autres émissions sonores anthropiques	24
3. Les bases de la perception sonore chez les animaux marins	29
L'audition des mammifères marins	30
L'audition des poissons	34
L'audition chez les invertébrés	38
4. Effets des sons sur la faune marine et seuils d'impact	43
Description des effets liés au son d'origine anthropique	44
Zonation des effets	56
Définitions des seuils d'impact	58
5. La réglementation européenne et française encadrant l'impact du son dans les activités marines	65
Les principaux moyens de préservation et de protection	65
L'analyse des incidences des projets	67
Déroulé actuel d'une étude d'impact acoustique EMR	68

6. Retours d'expérience sur les projets d'énergies marines renouvelables en Europe depuis 2000	71
Retours d'expérience des parcs éoliens offshore flottants	72
Retours d'expérience des hydroliennes	72
Retours d'expérience sur les impacts des systèmes houlomoteurs	74
Retours d'expérience des parcs éoliens offshore posés	75
7. Retours d'expérience sur les méthodes de réduction des impacts acoustiques	83
Modification des caractéristiques du battage de pieux	83
Rideaux de bulles	85
Filets équipés de ballons remplis d'air (<i>Hydro sound damper</i>)	86
Bloc isolant et batardeau	86
Méthodes d'éloignement des espèces	87
Conclusion	89
Références bibliographiques	93
Liste des auteurs	109

Avant-propos

Cet ouvrage traite des bruits sous-marins et de l'impact des émissions sonores d'origine anthropique sur la faune marine. Il est rédigé dans le contexte d'un développement attendu des machines utilisant les énergies marines renouvelables (EMR). En effet, il est maintenant admis que les bruits du milieu marin, loin d'être anecdotiques, doivent être considérés et compris comme des variables environnementales majeures influençant l'écologie des animaux marins. Des sons variés forment naturellement les paysages acoustiques sous-marins. L'eau de mer est porteuse des sons induits par des phénomènes physiques naturels (ou éléments abiotiques). Ce premier ensemble de sons est appelé la « géophonie ». Les principaux contributeurs de la géophonie sont atmosphériques et liés aux conditions météorologiques : le vent et la pluie. D'autres ondes sonores sont produites par l'état de la mer de façon indépendante 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. Classiquement, la géophonie inclut également les sons provoqués par les activités sismiques.

L'océan est, par ailleurs, porteur de sons produits volontairement ou involontairement par les organismes marins dits « sonifères ». Ces bruits peuvent remplir des fonctions écologiques telles que le repérage dans l'espace, la communication inter ou intra-spécifique ou encore permettre l'alimentation. Par analogie, l'ensemble de ces sons d'origine biologique (ou éléments biotiques) constitue la biophonie.

Il est aisé d'imaginer que des milieux polaires ou des milieux tropicaux ne vont pas présenter la même signature acoustique du fait de leurs caractéristiques écologiques propres ; les bruits de glaces étant intuitivement différents de ceux des récifs coralliens qui accueillent les plus fortes biodiversités de l'océan. De plus, de nombreuses études démontrent que non seulement des habitats distincts (fonds rocheux, sableux, récifs coralliens, herbiers...) se caractérisent par des paysages acoustiques singuliers, mais aussi et de façon moins intuitive, il s'avère que des habitats comparables (récifs coralliens) ou très proches (herbiers) peuvent aussi être caractérisés par des paysages acoustiques différents. La source de ces différences est à rechercher dans la diversité biologique de ces milieux, elle-même au moins partiellement sous contrôle des contraintes physiques locales. Cette diversité sonore est variable à plusieurs échelles de temps. Et, des rythmes journaliers, lunaires, saisonniers ou annuels sont fréquemment détectés. Ils sont à mettre en relation avec d'autres variations environnementales : la photopériode, la température de l'eau, les courants de marée, l'apport en nutriments et les cycles de vie des peuplements.

Il convient de rappeler qu'à l'inverse de ce qui est observé pour les ondes lumineuses dans l'eau de mer, la propagation des ondes sonores est facilitée par la densité de l'eau de mer. Les paysages acoustiques sous-marins se révèlent de véritables signatures caractéristiques des habitats. Celles-ci peuvent être transmises sur de grandes distances, de façon directionnelle et indépendante des courants. Il est désormais largement démontré

que ces paysages acoustiques interviennent dans un grand nombre de processus essentiels pour la vie marine. La biologie a évidemment utilisé cette propriété. Ainsi, les larves et juvéniles pélagiques de nombreuses espèces (poissons, crustacés, mollusques, coraux) utilisent ces signatures caractéristiques d'habitats pour sélectionner un environnement propice à leur installation et à leur développement ultérieur. Les larves sont alors capables de moduler la durée de la vie larvaire, autrement dit de « choisir » le moment du début de la métamorphose, et donc l'instant du passage de la vie pélagique à la vie benthique. La sélection des habitats pour la recherche alimentaire, le comportement face aux prédateurs, et le métabolisme de l'individu même dépendent du bruit ambiant.

Les ondes sonores sont aussi utilisées au moment de la reproduction. Certaines espèces de crustacés comme les homards, les langoustes et les crabes, mais aussi certains poissons ou encore des mammifères marins émettent des sons pour accroître leur chance de rencontrer un partenaire. Notons qu'un signal sonore en période de reproduction peut permettre de synchroniser les émissions de gamètes dans un milieu extrêmement dispersif. En outre, ces émissions de sons peuvent avoir un rôle clé dans le maintien de cohésion de groupe, permettre de maintenir le contact entre individus de la même espèce, d'éduquer les jeunes, de localiser les proies, de défendre son territoire et enfin d'alerter.

Dans ce contexte environnemental déjà complexe s'ajoutent de nouvelles composantes d'origine anthropique. Depuis le début de l'ère industrielle, les activités humaines modifient les paysages acoustiques sous-marins. Nous appellerons « anthropophonie », l'ensemble des sons générés par les activités humaines comme la prospection pétrolière, la navigation ou le battage de pieux. Parmi ces activités, la navigation (professionnelle, militaire ou de plaisance) est à l'origine de la majorité des bruits anthropiques. Au cours des 50 dernières années, cette activité a augmenté jusqu'à 32 fois le bruit à basse fréquence présent dans certaines parties de l'océan, soit une augmentation de près de 10 à 12 dB dans ces basses fréquences. Depuis peu d'années, viennent s'ajouter, avec un enjeu écologique planétaire puisque décarbonés, les systèmes de production d'énergies marines renouvelables tels que les champs d'éoliennes offshore et les hydroliennes. Leurs productions sonores, significatives, varient suivant les phases d'installation, d'exploitation ou de démantèlement. Les animaux marins sont souvent, même chez les plus primitifs, aptes à percevoir des sons. Et si ces animaux sont capables de percevoir des sons naturels, ils sont bien évidemment aussi capables de percevoir des sons d'origine anthropique partageant les mêmes gammes de fréquence. Dans ce contexte, le développement des infrastructures de production d'énergies marines renouvelables soulève de nouvelles interrogations et légitime l'étude des impacts sonores de ces structures sur la vie marine.

Cet ouvrage propose donc un premier état des lieux de nos connaissances sur l'impact du bruit en considérant les propriétés du son dans l'eau, la biologie de l'audition, la réglementation et les dysfonctionnements écologiques.

Ce premier état des lieux permet de mettre en lumière les carences de cette discipline. Il démontre qu'il nous faudra encore progresser en associant recherche fondamentale en écologie marine, éthologie, biologie et acoustique. Cette réflexion devra notamment

intégrer les besoins des entreprises en charge du développement des énergies marines renouvelables pour que l'impact de ces machines soit caractérisé sérieusement et objectivement sur l'ensemble des compartiments qui constituent un écosystème côtier. L'enjeu est aujourd'hui de taille car nos sociétés admettent pleinement qu'il nous faut basculer vers une production d'énergie non carbonée et donc se tourner vers des espaces maritimes aux fortes potentialités hydroliennes et éoliennes. Or l'impact des machines utilisant ces énergies marines renouvelables reste à décrire et peut-être même à définir.

1. Les bases théoriques de l'acoustique sous-marine

Les sons se définissent comme des phénomènes ondulatoires qui résultent de la vibration des molécules mises en mouvement par une perturbation mécanique. Lorsqu'un son est produit, il se caractérise par son niveau sonore SL (*Source Level*), sa durée, sa fréquence et sa directionnalité.

Chaîne de transmission du son

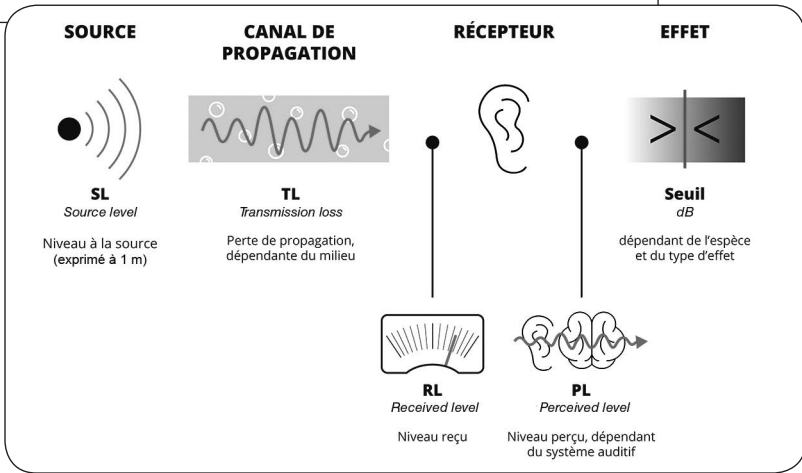
CETTE ÉMISSION SONORE SE PROPAGE de la source vers le récepteur par compressions-dépansions successives des molécules d'eau sur les molécules voisines à une vitesse proche de 1500 m/s (figure 1-1). Cette onde de compression se propage au travers d'une portion d'océan constituée de la colonne d'eau, de la surface et du fond qui forment un canal de propagation souvent complexe. Cette propagation en milieu aqueux atténue le niveau sonore émis d'une certaine proportion appelée « pertes de transmission » ou « *Transmission Loss* » qui dépend des propriétés océano-acoustiques du canal, des positions de la source et du récepteur et des fréquences émises. Après propagation et juste en amont du récepteur, l'onde sonore possède un niveau reçu RL (*Received Level*). Cette onde sonore reçue passe alors par un organe de réception qui va modifier ses caractéristiques notamment (au premier ordre) en affectant l'onde sonore reçue d'une fonction de transfert favorisant/défavorisant certaines gammes de fréquence. En sortie de l'appareil auditif du récepteur, nous obtenons des niveaux sonores perçus que l'on compare alors à des seuils pour évaluer l'existence d'un risque d'impact. Les seuils sont fournis par la littérature scientifique, ils dépendent de la nature de l'impact et de l'espèce étudiée.

Mesure du niveau sonore : les 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.

Pour les pressions acoustiques, soit P une grandeur homogène à une pression, P_{ref} une pression de référence, la quantité P exprimée en décibels relativement à P_{ref} est définie par :

Figure 1-1. Chaîne de transmission acoustique d'une source vers un récepteur.



Dessin réalisé par Sébastien Hervé, LEMAR/IUEM.

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

En acoustique sous-marine, la pression de référence utilisée pour le calcul des décibels est : 1 µPa. Le calcul du rapport $\frac{P}{P_{ref}}$ définit l'échelle relative et le calcul de $\log_{10} \left(\frac{P}{P_{ref}} \right)$ permet de représenter simultanément des petites et grandes quantités.

Pour les intensités acoustiques, soit I une grandeur homogène à une intensité, I_{ref} une intensité de référence, la quantité I exprimée en décibels relativement à I_{ref} est définie par :

$$I \text{ dB re } I_{ref} = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_{ref}} \right)$$

Le tableau 1-1 présente les niveaux en décibels de différentes pressions allant de 1 µPa à 1 000 000 µPa avec une pression de référence de 1 µPa.

L'échelle des décibels permet de représenter simultanément une onde ayant une amplitude de 1 µPa (0 dB re. 1 µPa), une onde ayant une amplitude 100 fois plus forte (40 dB re. 1 µPa) et une onde ayant une amplitude 10 000 fois plus forte (80 dB re. 1 µPa).

La différence de décibels entre deux quantités permet d'évaluer la proportion de ces deux quantités en termes d'amplitude et de puissance. Le tableau 1-2 présente ces équivalences en fonction de la différence en dB des 2 quantités.

Tableau 1-1. Niveaux en décibels dB re. 1 μ Pa pour des ondes de pression allant de 1 μ Pa à 1 000 000 μ Pa.

Pression (P en μ Pa)	1	10	100	1 000	10 000	100 000	1 000 000
Niveau (dB re. 1 μ Pa)	0	20	40	60	80	100	120

Tableau 1-2. Différence de niveau en dB et rapport d'amplitude.

P ₂ dB-P ₁ dB	0	3	10	20	30	40
P ₂ /P ₁	1	1,4	3	10	33	100
I ₂ /I ₁	1	2	10	100	1 000	10 000

Si une source sonore « 2 » a un niveau de source supérieur de 20 décibels à celui d'une source sonore « 1 », il faut 100 sources sonores indépendantes du type « 1 » pour produire le même niveau que la source « 2 ».

Il existe une précaution importante à prendre lorsque l'on exprime les niveaux sonores en décibels : le niveau sonore converti en décibels de la somme d'ondes n'est pas la somme des niveaux sonores exprimés en décibels de chaque onde.

Quantifier les niveaux sonores

IL EXISTE PLUSIEURS GRANDEURS pour caractériser une onde sonore. Nous présentons celles utiles pour la description de l'onde reçue (RL), puis nous présenterons 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 qui se définit comme la force par unité de surface perpendiculaire à la direction de propagation ;
- la vitesse particulaire v qui est le déplacement des particules causé par l'onde acoustique par rapport à leur position d'équilibre ;
- l'intensité acoustique qui se définit comme le flux d'énergie acoustique à travers une unité de surface perpendiculaire à la direction de propagation. L'intensité acoustique est égale au produit de la pression par la vitesse particulaire.

Pour une onde sphérique, l'intensité acoustique est donnée par :

$$I = P \times v = \frac{P}{\rho c}$$

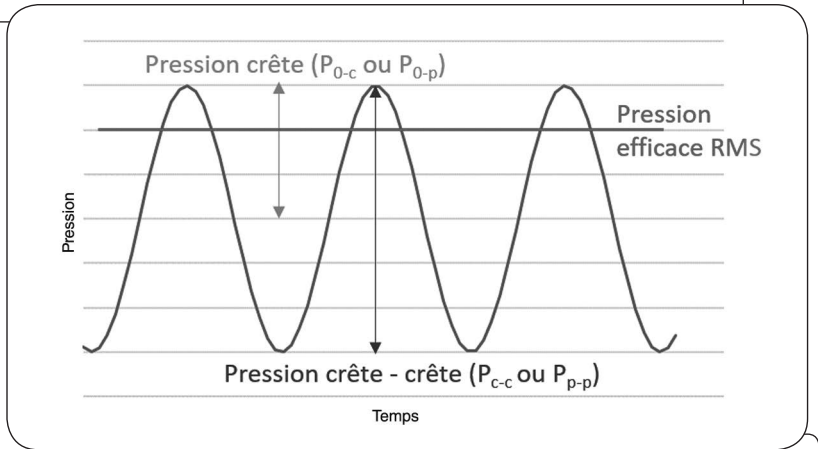
où ρ est la masse volumique de l'eau (~ 1000 kg/m³) et c est la célérité du son dans l'eau (~ 1500 m/s).

La pression acoustique est généralement privilégiée.

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

- **Durée** : c'est l'intervalle de temps pendant lequel la pression acoustique existe, et sert de référence pour définir les types de sons. Si la perturbation est brève (un battage de pieux, un clic de dauphins, etc.), on parle de « sons transitoires » ; si la perturbation est continue (bruit de navire, bruit de la rotation des éoliennes), on parle de « sons continus ».
- **Amplitude** : l'amplitude s'exprime en micropascal. Cette amplitude peut être l'amplitude instantanée, c'est alors l'amplitude existant à l'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 (figure 1-2). L'amplitude peut être la pression crête-crête (P_{c-c} ou P_{p-p}) qui est la pression prise entre le maximum et le minimum de la pression acoustique. La pression crête (P_{o-c} ou P_{o-p}) correspond à la pression absolue maximale observée. Les pressions crête-crête et crête sont adaptées pour des sources impulsionnelles alors

Figure 1-2. Représentation graphique des descripteurs de l'amplitude acoustique.



Graphique réalisé par la SOMME.

que la pression *rms* est plus utilisée pour décrire des sources continues. L'amplitude efficace exprimée en décibels relativement à $1 \mu\text{Pa}$ est le niveau SPL (*Sound Pressure Level*) exprimé en dB re. $1 \mu\text{Pa}$.

Pour une onde sonore de durée T , on peut exprimer la dose de puissance sonore reçue durant T en sommant le carré de l'amplitude instantanée $p(t)$ sur cette durée. En exprimant cette somme en dB, on obtient le SEL (*Sound Exposure Level*) sur T secondes exprimé en dB re. $1 \mu\text{Pa}^2\text{s}$.

– Fréquence : la fréquence, encore appelée cycles par seconde, est le nombre d'oscillations de l'amplitude instantanée par seconde. Plus la fréquence est faible (on parle de « basse fréquence »), plus le son est grave ; plus la fréquence est élevée (on parle de « haute fréquence »), plus le son est aigu. En se référant à l'audition humaine, les sons de fréquences inférieures à 20 Hz sont nommés « infrasons », les sons de fréquences comprises entre 20 Hz et 20 kHz sont dits « audibles » et les sons de fréquence supérieure à 20 kHz sont nommés « ultrasons ». Une onde peut être constituée d'une seule composante en fréquence (onde monochromatique) ou de plusieurs composantes fréquentielles (somme de plusieurs sinus, impulsion, etc.). Le contenu en fréquence est accessible par changement de domaine de représentation de la pression acoustique instantanée mesurée sur une durée T suffisante. En pratique, on calcule la densité spectrale de puissance, qui représente la répartition de la puissance d'un signal suivant les fréquences, c'est le spectre acoustique exprimé en dB re. $1 \mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$.

En ayant pris soin de filtrer la pression instantanée sur des bandes fréquentielles d'intérêt (octave, tiers d'octave, bande d'audition d'une espèce animale particulière), on obtient les niveaux SPL et SEL dits « large bande » sur la bande fréquentielle d'intérêt.

Niveaux de sources et niveaux perçus

DANS LA CHAÎNE DE TRANSMISSION DU SIGNAL SONORE D'UNE SOURCE VERS UN RÉCEPTEUR (figure 1-1), les notions de niveau de source SL et de niveau perçu PL sont présentées. Ces niveaux sonores sont décrits par les mêmes quantités que les niveaux reçus RL avec les différences suivantes :

- Pour les niveaux de source SL, on considère une source « virtuelle » qui serait ponctuelle et isotrope et qui rayonnerait à distance le même niveau sonore que la source réelle et on quantifie les niveaux sonores écoutés à 1 m de cette source virtuelle.
- Pour les niveaux sonores perçus PL, on les calcule en pondérant les niveaux sonores reçus RL par une fonction de transfert censée modéliser l'appareil auditif. Ces fonctions de transfert peuvent être définies collectivement pour un groupe d'espèces (Southall *et al.*, 2007 ; NMFS, 2016) ou espèce par espèce lorsque l'on connaît leur audiogramme (Nedwell *et al.*, 2007 ; Erbe, 2009).