

Caractéristiques énergétiques des ondes sonores

1. Grandeurs physiques de l'acoustique

1.1. Puissance

Si une source sonore émet une certaine énergie E pendant un intervalle de temps Δt , elle possède une puissance P donnée par la relation :

$$P = \frac{E}{\Delta t}$$

La puissance se mesure en Watts (W)

L'énergie s'exprime en Joules (J)

L'intervalle de temps en secondes (s)

Le tableau suivant donne les ordres de grandeur de quelques puissances acoustiques :

Source	Puissance acoustique
Montre mécanique	1 μW = 1 microwatt = 10^{-6} W
Voix normale	0,01 mW = 0,01 milliwatt = 10^{-5} W
Voix forte	0,1 mW
Voix criée	1 mW
Haut-parleur	1 W
Avion à réaction	1 kW = 10^3 W

Remarques

- La puissance est une caractéristique de la source, elle ne dépend donc pas de la distance à laquelle on se trouve de celle-ci.
- Il ne faut pas confondre puissance électrique et puissance acoustique. La puissance électrique est fournie aux hautparleurs, mais en raison des déperditions énergétiques dans leur structure, la puissance acoustique est généralement cent fois plus faible.

1.2. Pression acoustique

Une onde sonore provoque une surpression notée p en un point de l'espace. Elle représente la variation de pression par rapport à la pression atmosphérique. On l'appelle aussi pression acoustique. Ces valeurs varient de $2 \cdot 10^{-5}$ Pa (seuil d'audibilité) à 20 Pa (seuil de douleur). Ces variations de pression font vibrer le tympan qui transmet ensuite le signal à l'oreille interne.

1.3. Intensité acoustique

Intensité et pression

L'intensité acoustique est liée à la pression acoustique ainsi qu'aux caractéristiques de l'air par la relation :

$$I = \frac{p^2}{\rho_0 C}$$

I intensité acoustique de l'onde (W.m^{-2})

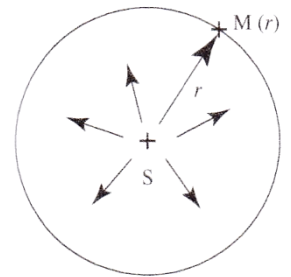
p pression acoustique (Pa)

$\rho_0 = 1,2 \text{ kg.m}^{-3}$ masse volumique de l'air

C célérité des ondes dans l'air

Intensité et puissance

On considère une source omnidirectionnelle (c'est-à-dire qui rayonne la même quantité d'énergie dans toutes les directions). L'énergie qu'elle émet se répartit alors sur des sphères centrées sur la source. En un point M de l'espace à la distance r de celle-ci, l'intensité I est définie comme le rapport de la puissance de la source et la surface sur laquelle l'énergie se répartit :



$$I = \frac{P}{S}$$

La surface de la sphère a pour expression $S = 4\pi r^2$ donc :

$$I_{\text{moy}} = \frac{P}{4\pi r^2}$$

P est la puissance de la source, elle s'exprime en Watt.

r est le rayon de la sphère, elle s'exprime en mètre.

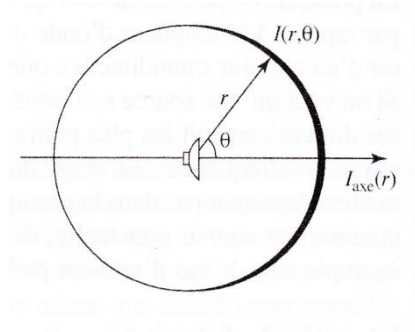
I est l'intensité sonore moyenne à la distance r de la source et s'exprime W/m^2 .

A mesure que l'on s'éloigne de la source, le rayon augmente et l'intensité diminue, c'est-à-dire que l'énergie se répartit sur une surface de plus en plus grande, ainsi l'intensité perçue est plus faible.

Pour l'oreille humaine, le seuil d'audibilité est $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ et le seuil maximal $I_{\text{max}} = 10^2 \text{ W/m}^2$.

Cas d'une source directive

En général, l'énergie n'est pas répartie uniformément autour de la source. On dit alors que la source est directive. Les sources sont toujours plus directives pour les fréquences élevées que pour les basses fréquences.



On appelle $I_{axe}(r)$ l'intensité dans l'axe de la source à la distance r . $I_{moy}(r)$ est l'intensité moyenne, moyenne de toutes les directions à la distance r . On définit le facteur de directivité Q de la source par :

$$Q = \frac{I_{axe}(r)}{I_{moy}(r)}$$

Q est un nombre sans dimension

On peut donc en conclure que l'intensité dans l'axe s'exprime :

$$I_{axe} = \frac{Q \cdot P}{4\pi r^2}$$

Si $Q=1$ cela signifie que la source est omnidirectionnelle. Voici les facteurs de directivité de différents instruments de musique :

Fréquence (Hz)	Q		
	500	1 000	3 000
Violon	1	2	2
Violoncelle	2	2	2,5
Flûte	1,5	1,5	1,5
Hautbois	1	1,5	2
Clarinette	1	2	2
Trompette	1	2	4,5
Tuba	2	4,5	6,5

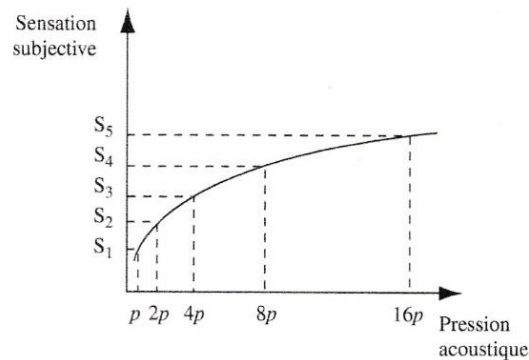
✚ On remarque que le facteur de directivité augmente avec la fréquence. Ainsi un point de réception qui n'est pas dans l'axe de la source perd essentiellement des hautes fréquences : on dit que le son est « détimbré ».

✚ Pour une fréquence donnée, le facteur de directivité est d'autant plus élevé que la source est de grande dimension. C'est ce qui explique qu'à 1000 Hz par exemple, le tuba est plus directif que la trompette, qui elle-même l'est davantage que la flûte.

1.4. Niveau d'intensité sonore

Tests d'écoute

Il a été montré par des tests d'écoute que pour l'oreille humaine, la sensation subjective est reliée au logarithme de l'excitation physique.



Ainsi, si la pression acoustique est faible, une faible variation de pression produit une variation importante de la sensation. Alors que pour une pression acoustique forte, la même augmentation produit un accroissement plus faible de la sensation.

Le niveau sonore est la grandeur physique mesurée à l'aide d'un sonomètre qui se rapproche de la sensation de niveau sonore. Cependant, la sensation reste une notion subjective qui dépend de la fréquence, du type de son (intermittent, continu, etc...) contrairement au niveau sonore.

Niveau d'intensité

Si I est l'intensité acoustique en un point, le niveau acoustique N_i en ce point est

$$N_i = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

N_i s'exprime en décibels (dB)

I_0 est l'intensité acoustique de référence.

Le seuil d'audibilité pour un son pur à 1000 Hz, $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$.

Remarque

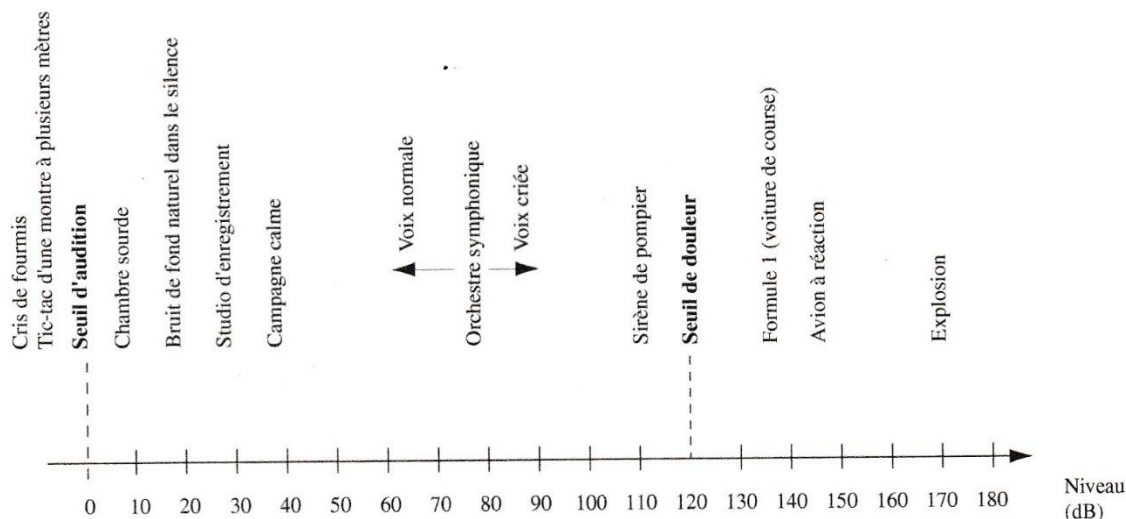
On peut inverser la relation précédente pour obtenir

$$I = I_0 \cdot 10^{\frac{N_i}{10}}$$

2. Perception d'un niveau sonore

2.1. Echelle de niveaux sonores

Voici quelques valeurs de niveaux d'intensité :

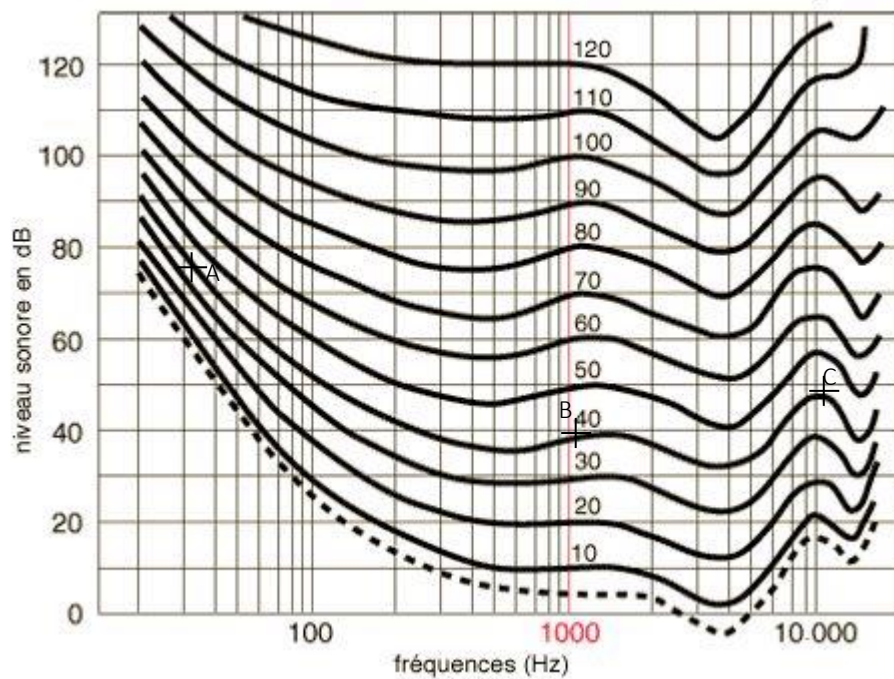


La plus petite variation de niveau sonore à laquelle l'oreille humaine est sensible est d'environ 1 dB. Inutile de mettre plusieurs chiffres après la virgule quand on exprime la valeur d'un niveau sonore.

2.2. Sensibilité auditive en fonction de la fréquence

L'oreille n'est pas sensible à toutes les fréquences de la même façon. Pour s'en rendre compte, on établit des courbes d'égale sensation sonore (sensation subjective) en fonction du niveau sonore et de la fréquence.

Par exemple, les points A, B et C sont sur la même courbe d'isonie et produisent la même sensation sonore bien que leurs niveaux acoustiques respectifs soient différents. Afin de traduire cette réalité physiologique, on peut corriger les niveaux en les pondérant.



Courbes d'isophonie

On remarque que pour des niveaux sonores faibles, l'oreille a un maximum de sensibilité entre 500 et 5000 Hz. Elle est très peu sensible aux sons graves, peu sensible aux sons aigus. Pour des niveaux sonores élevés, la sensibilité de l'oreille est moins dépendante de la fréquence, la courbe est plus aplatie.

2.3. Décibel pondéré

En raison de la variation fréquentielle de la sensibilité auditive, deux sons peuvent avoir le même niveau en dB, mais offrir à l'écoute, des niveaux subjectifs différents.

Ainsi pour tenir compte du rôle de la fréquence, une autre unité est utilisée, le décibel pondéré.

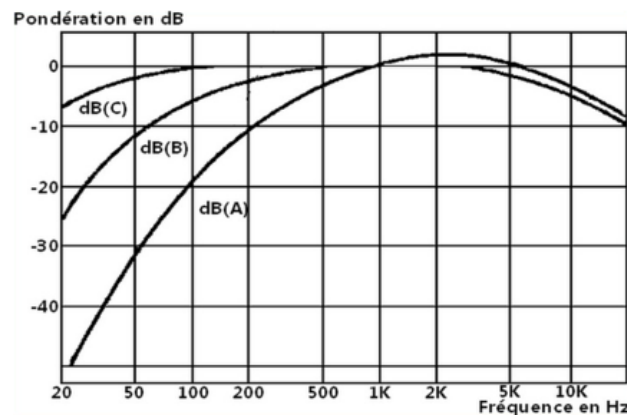
La pondération A est la plus utilisée car elle concerne des niveaux de l'ordre de 70 dB, qui sont les plus fréquents dans la vie quotidienne.

f (Hz)	125	250	500	1 000	2 000	4 000
Pondération A (dB)	- 15,5	- 8,5	- 3	0	1	1

La

pondération est négative aux basses fréquences car l'oreille a une faible sensibilité et une pondération positive entre 2000 et 4000 Hz là où l'oreille est plus sensible. Pour les niveaux sonores plus forts, en milieu industriel par exemple, la sensibilité auditive dépend moins de la fréquence et on utilise alors d'autres pondérations moins accentuées appelées B et C.

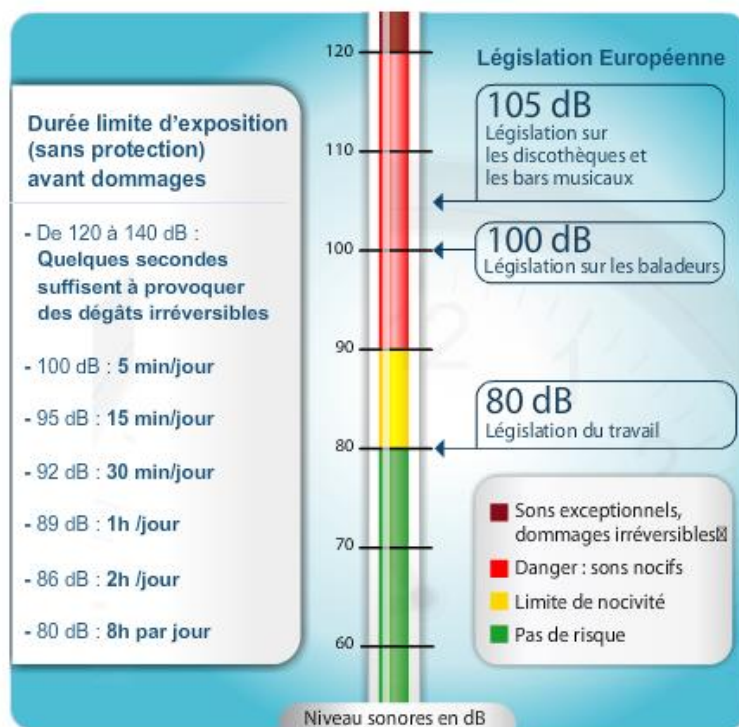
Voici un schéma qui représente les différentes corrections en fonction de la fréquence :



2.4 Risques liés à la durée d'exposition à un bruit

Les effets du bruit sur la santé sont nombreux et peuvent être dus à l'exposition à des niveaux sonores trop importants (concerts, sports mécaniques, travaux industriels...) ou des niveaux sonores moins importants mais sur une longue durée.

Voici un schéma qui indique le lien entre le niveau sonore et le temps d'exposition maximal :



Les niveaux sonores dangereux sont repris sur ce second schéma en insistant sur la relation intensité et durée limite d'exposition.

La législation européenne (directive n° 2003/10/CE) est indiquée sur la droite de l'image.

3. Evolution du niveau sonore en fonction du nombre de sources, de la distance et des conditions du milieu

3.1. Cas de plusieurs sources

Lorsque les sources sont indépendantes, c'est-à-dire différentes les unes des autres (un piano et une flûte par exemple) on peut sommer les intensités reçues en un point de l'espace par les différentes sources. Dans le cas de deux sources par exemple, on peut écrire :

$$I_{tot} = I_1 + I_2$$

On peut en déduire le niveau total par la relation :

$$N_{tot} = 10 \cdot \log\left(\frac{I_{tot}}{I_0}\right)$$

On retiendra que les niveaux sonores ne s'additionnent pas mais seulement les intensités. Ainsi, pour deux sources de même intensité I , l'intensité totale s'écrit :

$$I_{tot} = 2 \cdot I$$

Le niveau total se calcule alors par :

$$N_{tot} = 10 \cdot \log\left(\frac{I_{tot}}{I_0}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{2 \cdot I}{I_0}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right) + 10 \cdot \log(2) = N + 3 \text{ dB}$$

Le niveau sonore n'augmente que de 3 dB lorsque deux sources identiques émettent en même temps.

On peut généraliser le résultat précédent au cas de n sources identiques, on obtient alors :

$$N_{tot} = N + 10 \log(n)$$

Les tests d'écoute montrent que le son semble deux fois plus fort lorsque le niveau sonore augmente de 10 dB. Pour doubler la sensation de niveau, il faut donc multiplier par 10 le nombre de sources. Dans un orchestre par exemple, il faut mettre 100 violons pour que le son paraisse deux fois plus fort qu'avec 10 violons.

3.2. Diminution du niveau avec la distance

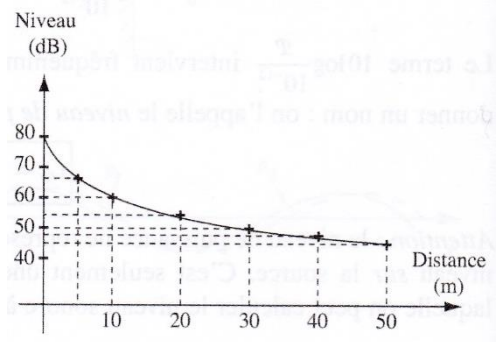
Le niveau sonore décroît à mesure qu'on s'éloigne de la source. Deux phénomènes en sont responsables :

L'atténuation géométrique

Le niveau à la distance r peut s'exprimer en fonction du niveau à 1 m de la source par :

$$N(r) = N(1) - 20 \log(r)$$

A chaque fois qu'on double la distance à la source, on perd 6 dB. Par exemple, lorsqu'on passe de 5 à 10 m d'une source, on perd 6 dB. Il en est de même lorsqu'on passe de 100 m à 200 m de la source. L'atténuation est donc plus rapide sur les premiers mètres. Voici un exemple, avec une référence de 80 dB à 1m de la source, on s'aperçoit que le niveau décroît d'abord rapidement, puis de plus en plus lentement à mesure que l'on s'éloigne de la source.

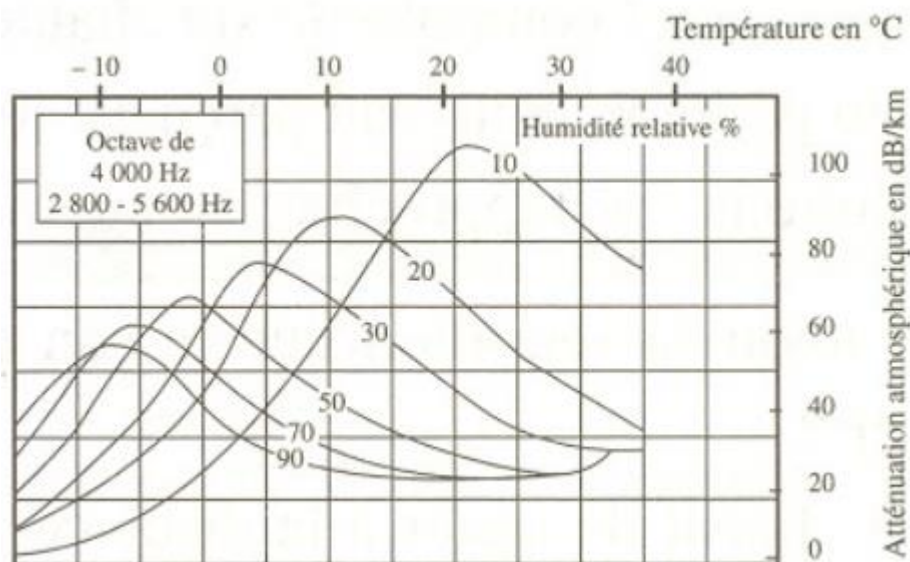


L'atténuation par dissipation

Lors de la propagation de l'onde, les molécules composant l'air subissent des vibrations et frottements les unes contre les autres. Il en résulte une production de chaleur qui indique une dissipation d'énergie. Elle s'ajoute à l'atténuation géométrique.

Plus la fréquence est élevée, plus les vibrations sont importantes et plus la dissipation d'énergie est grande. Les sons de très basse fréquence peuvent ainsi se propager sur de plus grandes distances que les sons aigus (par exemple, les séismes sont des ondes de basses fréquences qui se propagent sur des milliers de km).

D'autre part, la dissipation dépend également de l'humidité de l'air. L'atténuation diminue si l'humidité augmente. Les sons se propagent plus loin par temps humide que par temps sec.



Atténuation du niveau sonore par dissipation pour la bande d'octave à 4000 Hz.