

# Éléments d'acoustique et nuisances sonores

## 1<sup>e</sup> partie : Évaluation de la gêne et du danger.

### A) Éléments d'acoustique.

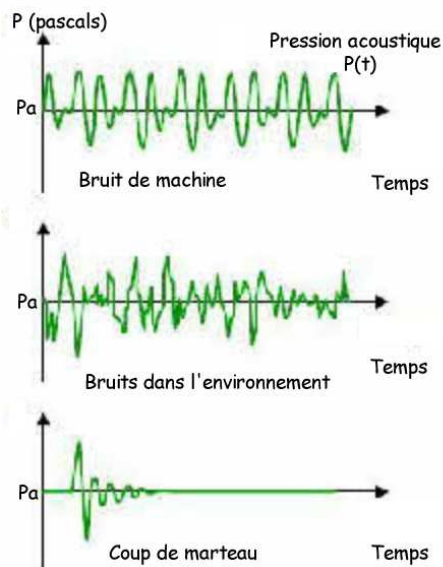
L'acoustique est la partie de la physique qui étudie les sons. Le son est défini en fonction de sa perception par l'oreille humaine.

Système oscillant à un degré de liberté :

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8mes\\_oscillants\\_%C3%A0\\_un\\_degr%C3%A9\\_de\\_libert%C3%A9](http://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8mes_oscillants_%C3%A0_un_degr%C3%A9_de_libert%C3%A9)

#### 1) La pression acoustique.

La pression acoustique décrit l'amplitude du son perçu. Elle est mesurée en Pascal ( $\text{N/m}^2$ ).



Dans l'air, les sons se transmettent sous la forme d'une oscillation de pression périodique autour d'une valeur normale, le plus souvent la pression atmosphérique (Pa). La valeur de cette oscillation constitue la pression acoustique  $P(t)$ . Lorsque sous certaines conditions, ces perturbations affectent le sens de l'ouïe, on parle de sons ou de bruits. À un instant donné, la pression résultante  $P$  est donnée par :

$$P = P(t) - P_a$$

La plus petite valeur de pression acoustique à laquelle l'oreille humaine est sensible  $P_0$  est égale à  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa. La valeur de pression acoustique à partir de laquelle une sensation acoustique est douloureuse est  $P_{\max}$  et correspond à 20 Pa. Cela vaut pour des sons purs de 1000 Hz. On notera qu'il existe une assez grande variabilité entre les individus.

La différence entre le seuil de sensibilité et le seuil de douleur est dans un facteur de  $10^6$ , c'est la raison pour laquelle les niveaux de pression acoustique

sont donnés, non pas dans une échelle linéaire, mais dans une échelle logarithmique.

On se rappellera que les opérations sur les logarithmes n'obéissent pas aux règles qui régissent les nombres naturels. (<http://lewebpedagogique.com/laurentd/files/2008/12/memento.pdf>).

Le niveau de pression acoustique est exprimé en décibel (dB) et est donné par :

$$L_p = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_{eff}}{P_0} \right)$$

La pression efficace  $P_{eff}$  est la valeur de  $p(t)$  entre les instants  $t_1$  et  $t_2$  avec :

$$P_{eff}^2 = \frac{1}{t_1 - t_2} \int_{t_2}^{t_1} P^2(t) \cdot dt$$

On définit la valeur de crête comme la valeur maximale  $P_{max}$ , positive ou négative, prise par la pression entre deux instants.

Le niveau de pression du seuil d'audibilité est de 0 dB et le seuil de douleur est de 120 dB.

## 2) La propagation des sons.

On se rappellera que les sons ne se propagent pas dans le vide. Les sons ne se déplacent pas que dans l'air, mais aussi dans les solides et les liquides. On parle de propagation aérienne, solidienne et liquidienne.

À 22° C, à la pression atmosphérique normale et dans l'air, la vitesse du son est de 345 m/s. ([http://fr.wikipedia.org/wiki/Vitesse\\_du\\_son](http://fr.wikipedia.org/wiki/Vitesse_du_son)).

À la température ambiante usuelle, on peut évaluer la vitesse du son par :

$$C = 20 \sqrt{T} \quad (T \text{ en } ^\circ\text{K})$$

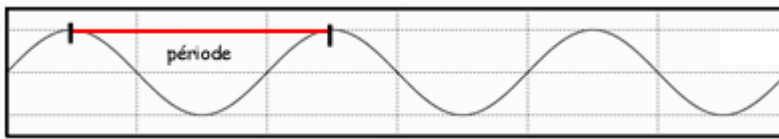
## 3) La catégorisation des sons.

**a) Les sons purs :** On dit qu'un son est pur quand ses variations de pression ou amplitude en fonction du temps sont des fonctions sinusoïdales de type :

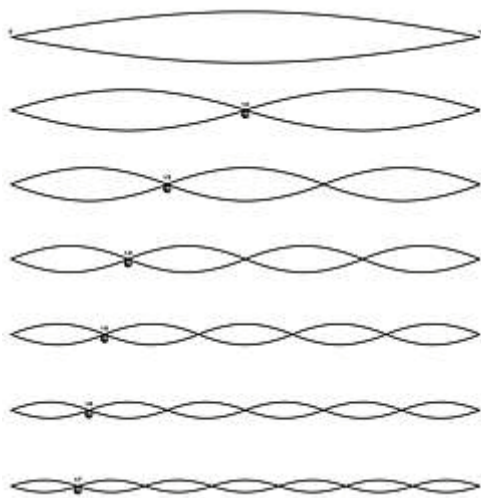
$$P = P_{max} \times \cos(\omega t + \varphi) \quad \text{où :}$$

- La pulsation  $\omega = 2\pi / T$  (en radians / secondes) ;

- La période  $T = 2\pi / \omega$  (en secondes) ;
- La fréquence  $f = 1 / T$  (en hertz, Hz) ;
- La longueur d'onde  $\lambda = c T$  ;



**b) Les sons musicaux :** On dit qu'un son est musical lorsqu'il est la résultante de la superposition d'un son pur de fréquence  $f_0$  dite fondamentale et de sons purs de fréquence  $n \cdot f_0$  dites harmoniques ou  $n$  est un entier 2, 3, 4, etc.



Ci -contre : Fondamentale et harmoniques 2 à 7

Lorsque  $n$  est un entier, le spectre est dit harmonique. Généralement, lorsqu'on écoute un son musical, on détermine la hauteur du son à partir de la fondamentale (en musique, on évite probablement pour cette raison de placer la quinte à la basse). Lorsqu'on retire la fondamentale, l'oreille est souvent encore capable de retrouver la hauteur du son à partir des seules harmoniques.

Lorsque  $n$  n'est pas un entier, le spectre est inharmonique.

Nature des sons : [http://membres.multimania.fr/audioprovence/bibliographie/son\\_1/son\\_1.html](http://membres.multimania.fr/audioprovence/bibliographie/son_1/son_1.html)

Des sons : <http://users.swing.be/hdepra/home/P22/F-sounds.html>

Acoustique : [http://users.swing.be/b\\_welding/tfe.htm#onde](http://users.swing.be/b_welding/tfe.htm#onde)

Harmonique musicale : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Harmonique\\_%28musique%29](http://fr.wikipedia.org/wiki/Harmonique_%28musique%29)

Couleur sonore, timbre et harmoniques : [http://aboudet.chez-alice.fr/doc\\_musique/Timbre.html](http://aboudet.chez-alice.fr/doc_musique/Timbre.html)

La sonie des sons purs :

[http://cours.musique.umontreal.ca/MUS3321/MUS3321\\_NOTES\\_DE\\_COURS/psychoacoustique-chapitre04.pdf](http://cours.musique.umontreal.ca/MUS3321/MUS3321_NOTES_DE_COURS/psychoacoustique-chapitre04.pdf)

**c) Le bruit :** Le bruit est une sensation qui correspond à une variation aléatoire de la pression acoustique. Certains bruits peuvent être plus ou moins musicaux, agréables, d'autres sont désagréables, voire douloureux.

Le bruit est dit stationnaire lorsque la valeur efficace est indépendante de l'instant  $t$  où on la mesure (bruit de cascade à débit constant, bruit de circulation régulière perçu à distance, bruit d'une machine en régime stationnaire, etc.). Le bruit stationnaire se caractérise par de faibles variations d'intensité en fonction du temps.

On parle de bruit pseudo-stationnaire lorsque la valeur efficace retrouve régulièrement des valeurs identiques en fonction du temps. L'intensité varie davantage que pour les bruits stationnaires (bruits de foule, bruit des outils à moteur thermique : tondeuses ou tronçonneuses, bruits de circulation même régulière, mais perçue de près, conversation humaine, etc.).

On parle de bruit transitoire ou impulsif lorsque le bruit passe par une grande intensité, à certains moments seulement, de façon régulière ou totalement aléatoire (bruits de marteaux, chocs, cris d'animaux, etc.).

La musique, la parole, le chant sont des signaux désirables le plus souvent, mais dont l'intensité pourtant varie davantage que celle des bruits pseudo-stationnaires et comporte même des bruits impulsifs. Il peut paraître assez légitime que ces bruits, lorsqu'ils sont imposés, puissent occasionner des gênes importantes pour ces raisons.

Bruits colorés : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Bruits\\_color%C3%A9s](http://fr.wikipedia.org/wiki/Bruits_color%C3%A9s)

d) L'onde sonore : L'onde sonore se définit comme la surface où tous ses points présentent le même niveau de pression acoustique instantanée d'une source sonore émettrice. Lorsque ces surfaces sont des plans perpendiculaires à la direction de propagation du son, on parle d'**onde plane progressive**. Lorsque ces surfaces sont des sphères centrées sur la source sonore et dont le rayon croît à la vitesse du son, on parle d'**onde sphérique progressive**. Lorsque le rayon  $r$  de la sphère est très grand, on considère que l'onde sphérique est plane.

Ondes stationnaires : <http://www.u-bourgogne.fr/PHYSIQUE/OndeStat/OndeStat.html#lien3>

Acoustique : <http://puffskydd.free.fr/stereo/1acoust.html>

Acoustique : <http://www.reality.be/elo/elo/AcoustiqueNDC.pdf>

Corde vibrante / Acoustique : <http://www.deugs3smr.u-psud.fr/DEUGS3SMR/Phys202r.pdf>

Ondes élastiques & Acoustique : [http://pagesperso-orange.fr/fabrice.sincere/cm\\_acoustique/cours%20acoustique/cours%20acoustique%20Ondes%20elastiques.pdf](http://pagesperso-orange.fr/fabrice.sincere/cm_acoustique/cours%20acoustique/cours%20acoustique%20Ondes%20elastiques.pdf)

#### 4) L'intensité sonore. La puissance d'une source.

La pression acoustique fournit un travail lors de la propagation du son. Celle-ci s'accompagne donc d'un transfert d'une certaine quantité d'énergie.

On appelle **intensité sonore**, l'énergie moyenne traversant l'unité de surface normale à la direction de la propagation, par unité de temps. Il s'agit donc de la puissance moyenne traversant l'unité de surface. On l'exprime en Watts / m<sup>2</sup>.

Pour un cylindre infiniment long, et à la condition de supposer qu'il n'y ait pas d'absorption d'énergie par l'air, l'intensité sonore est la même tout au long du cylindre.

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T P_t^2 dt = \frac{p_{eff}^2}{\rho_0 c} \quad (\text{W/ m}^2)$$

D'où

$$P_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P_t^2 dt}$$

Dans la suite du cours  $P_{eff}$  sera désignée par la lettre  $P$ .

a) Dans le cas d'une onde plane progressive, on montre que :

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

b) Dans le cas d'une onde sphérique progressive, l'intensité acoustique qui traverse un élément de surface est :

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

L'énergie totale traversant une sphère de rayon  $r$ , chaque seconde, est donc :

$$W = 4\pi r^2 I \quad (\text{Watts})$$

$W$  est la puissance acoustique de la source.

On en déduit que :

$$p^2 = \frac{W \rho_0 c}{4\pi r^2}$$

Autrement dit, la puissance du son rayonné varie comme l'inverse de la distance au centre de la sphère.

## 5) Les niveaux sonores. Le décibel.

L'oreille est un organe très sensible qui peut détecter des sons correspondants à des variations de pression efficace de l'ordre de 20  $\mu\text{Pa}$ . Elle supporte, par ailleurs, des pressions jusqu'à 20 Pa. On dit que l'oreille possède une large gamme dynamique, de 20  $\mu\text{Pa}$  à 20 Pa, soit un facteur de  $10^6$ .

Du fait de cette large gamme dynamique et surtout pour des raisons pratiques, plutôt que d'utiliser des grandeurs physiques (Pascals, Watts /  $\text{M}^2$ ) pour exprimer la grandeur d'une pression ou d'une intensité acoustique, on leur préfère des grandeurs logarithmiques : les niveaux - de la forme  $\log \frac{x}{x_0}$  où  $x_0$  est une valeur de référence pour la grandeur à mesurer (On se rappellera qu'il n'y a pas de zéro sur l'échelle logarithmique). Les niveaux sont exprimés en décibels.

On définit ainsi le **niveau de pression acoustique** (NPS) comme :

$$L_p = 20 \log \frac{P}{P_0} \quad \text{où } P_0 \text{ est égale à } 20 \mu\text{Pa}.$$

Lorsqu'un son a une pression acoustique égale à  $P_0$ , son niveau est égal à 0 dB. Si la pression acoustique d'un son est  $10 P_0$ ,  $100 P_0$ ,  $1000 P_0$ , les niveaux sonores correspondants sont 20, 40, 60 dB. Des niveaux de 59 dB ou de 65 dB correspondront à des pressions respectives de  $1.7 \cdot 10^{-2}$  et  $3.4 \cdot 10^{-2}$  Pa.

On définit pareillement le **niveau d'intensité acoustique** (NIS) comme :

$$L_i = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad \text{où } I_0 \text{ est égale à } 10^{-12} \text{ W / M}^2.$$

On notera que l'on pourra parler, indifféremment, pour les ondes planes ou les ondes sphériques, de niveau d'intensité ou de niveau de pression puisque  $L_i$  et  $L_p$  sont équivalents.

Bruit en milieu de travail - Notions de base :

[http://www.cchst.ca/oshanswers/phys\\_agents/noise\\_basic.html](http://www.cchst.ca/oshanswers/phys_agents/noise_basic.html)

Lexique : [http://www.inrp.fr/Acces/JIPSP/phymus/m\\_lexiq/lexbc1.htm](http://www.inrp.fr/Acces/JIPSP/phymus/m_lexiq/lexbc1.htm)

Décibel : <http://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9cibel>

Acoustique : Propagation en champ libre :

[http://www.grenoble.archi.fr/enseignement/cours/atienza/RA02-champ\\_libre.pdf](http://www.grenoble.archi.fr/enseignement/cours/atienza/RA02-champ_libre.pdf)

Le décibel et le bruit - les unités acoustiques : [http://www.bruit.fr/docs/A1\\_decibel\\_bruit.pdf](http://www.bruit.fr/docs/A1_decibel_bruit.pdf)

On définit le **niveau de puissance acoustique** (NWS) d'une source comme la quantité :

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_0} \text{ avec } W_0 \text{ est la puissance de référence de } 10^{-12} \text{ watt.}$$

On montre que  $L_p \neq L_w - 10 \log 4\pi r^2$  pour une source ponctuelle omnidirectionnelle. En particulier,  $L_p = L_w$  pour  $r = 0.28 \text{ m}$  (la surface de l'onde correspond à  $1 \text{ m}^2$ ).

On montre aussi que  $L_p \neq L_w - 10 \log 4\pi r^2 + G$  pour une source directive où  $G$  est un indice de directivité dépendant d'un facteur  $Q$  de directivité selon la formule  $G = 10 \log Q$ .

**Quelques exemples :**

Une personne parlant à voix normale émet une puissance acoustique de  $10^{-6}$  watt.

La pression efficace  $P$  à 1 mètre :  $P^2 = W\rho_0c / 4\pi r^2$  avec  $\rho_0 = 1.18 \text{ kg/m}^3$  et  $c = 345 \text{ m/s}$ , on a :  $P^2 = 3.2 \cdot 10^{-4}$  d'où  $P = 1.7 \cdot 10^{-2} \text{ Pa}$ .

Si, au lieu de considérer la source comme omnidirectionnelle, on considère qu'elle possède une directivité de 4 pour le public qui lui fait face,  $P$  à 1 mètre est alors égale à  $3.4 \cdot 10^{-2} \text{ Pa}$ .

Le niveau de puissance est  $L_w = 70 \text{ dB}$ .

Le niveau de pression acoustique  $L_p$  à 1 mètre est de 59 dB (+6 dB si indice de directivité de 4). Les niveaux de pression à 1, 2, 4, 8 mètres sont  $L_p = 59, 53, 47, 41 \text{ dB}$  (minoration de -6 dB pour chaque doublement de distance).

C'est une des raisons qui font qu'un enseignant qui s'égosille dans un amphithéâtre n'a aucune chance d'être entendu par des étudiants qui bavardent dans les derniers gradins.

Décibels	Origine	Décibels	Origine
130	Avion à réaction (30m)	75	Automobile (7 m)
110	Klaxon (1 m)	65	Conversation (1 m)
100	Atelier bois	40	Studio de radio
95	Gros camion (7 m)	20	Bruissement de feuilles
80	Fort trafic routier	0	Seuil d'audibilité

Exemples de niveau de pression acoustique (en dB)

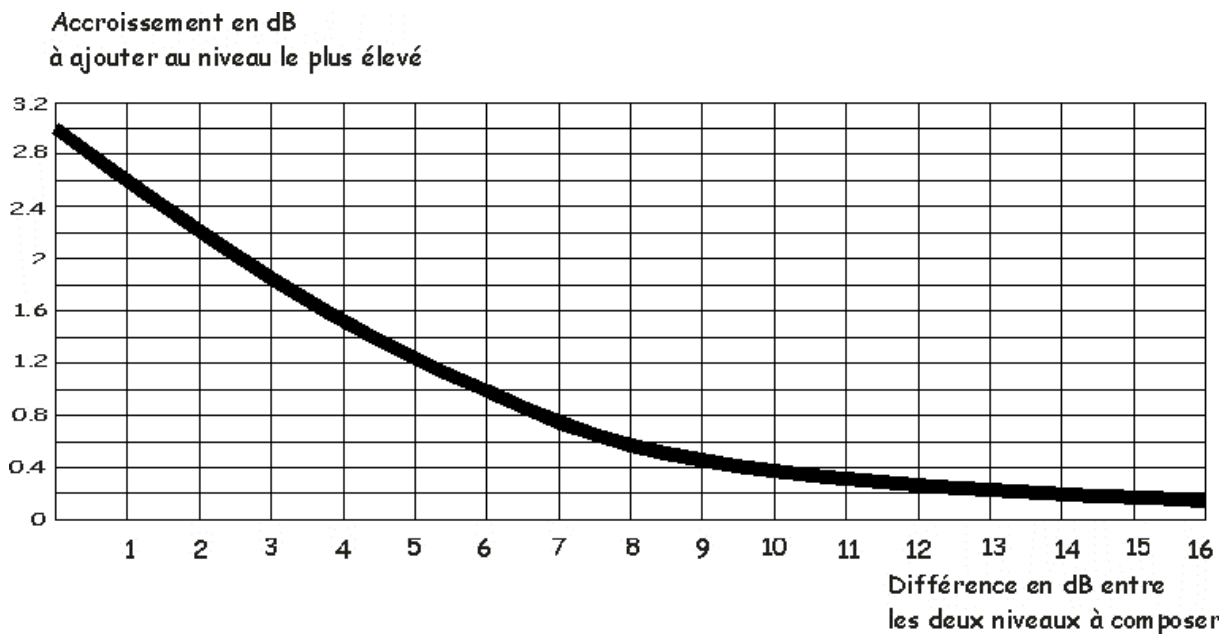
## 6) La superposition des ondes sonores.

Lorsqu'une ou plusieurs sources engendrent, séparément, des ondes sonores dont les pressions acoustiques sont  $P_1(t)$ ,  $P_2(t)$ , ...,  $P_n(t)$ , la pression résultante au point de réception est égale à la somme des pressions composantes :

$$P(t) = P_1(t) + P_2(t) + \dots + P_n(t)$$

Ainsi la composition de deux sons purs de même fréquence, amplitude et phase conduit à la multiplication de  $P$  par 2, soit une augmentation du niveau sonore de 6 dB [ $L_p = 20 \log (2P/P_0)$ ].

Lorsque deux bruits se composent de manière énergétique, le niveau de pression résultante est plus complexe.



Différence entre 2 niveaux sonores	Correction à ajouter au niveau le plus élevé	Différence entre 2 niveaux sonores	Correction à ajouter au niveau le plus élevé
0	3	7	0.78
1	2.54	8	0.63
1.5	2.32	9	0.51
2	2.12	10	0.41
2.5	1.94	12	0.27
3	1.75	14	0.17
4	1.45	16	0.11
5	1.2	18	0.07
6	0.97	20	0.05

[http://www.bruit.fr/docs/A1\\_decibel\\_bruit.pdf](http://www.bruit.fr/docs/A1_decibel_bruit.pdf)

<http://ile-de-france.sante.gouv.fr/santenv/bruit/product/1phys.pdf>

À la vue de cet abaque, on constate que :

- deux sons de même niveau se composent en donnant un bruit de niveau +3 dB ;
- lorsqu'il existe un écart d'au moins 10 dB entre les niveaux de deux bruits, le niveau résultant est celui du bruit le plus fort.

Si l'on veut additionner deux ou plusieurs bruits, on ne peut le faire qu'en revenant à l'expression des puissances qui, seules, s'additionnent.

Supposons deux bruits  $L_{I1} = 100$  dB et  $L_{I2} = 90$  dB,  $L_i$  résultante de  $L_{I1}$  et  $L_{I2}$  sera calculée comme suit :

$$L_i = 10 \log I/I_0 \text{ d'où } I = I_0 \times 10^{L_i/10}$$

$$I \text{ résultant} = I_1 + I_2 \text{ ou } I = I_0 \times (10^{10} + 10^9) = 1.1 \times 10^{10} \times I_0$$

$$\text{Soit } L_i = 10 \log (1.1 \times 10^{10}) = 100 + 10 \log 1.1 = 100.4 \text{ dB}$$

Dans le cas d'un doublement d'énergie, on rajoute 3 dB ( $10 \log 2$ ), dans le cas d'un triplement, on peut rajouter 5 dB ( $10 \log 3$ ).

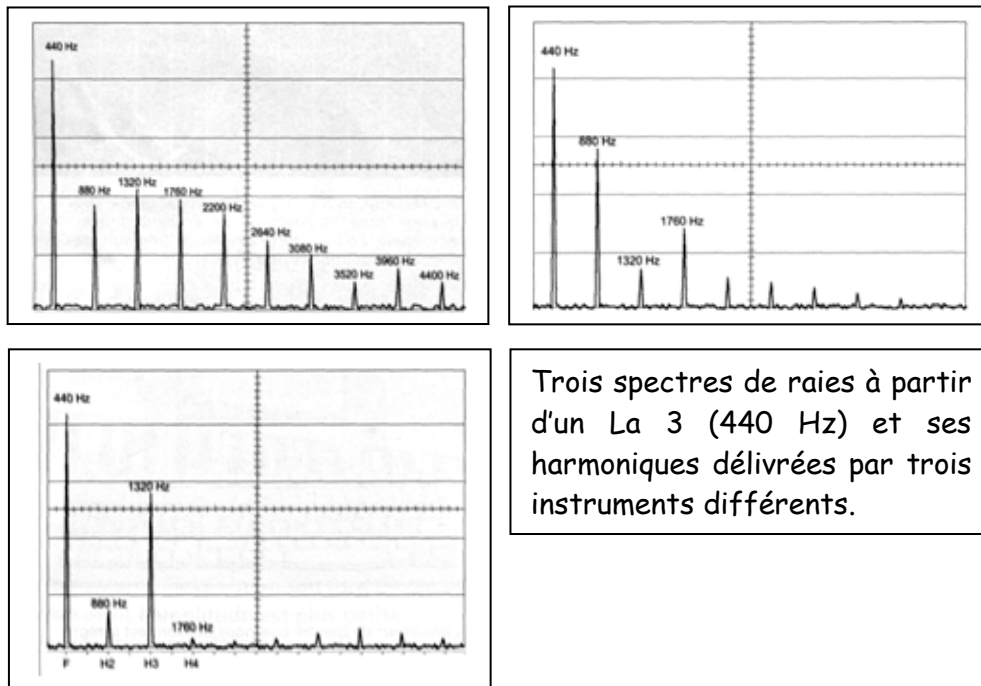
## 7) Les sons complexes, les bruits, les spectres acoustiques.

Le son pur permanent est une exception. Le phénomène sonore le plus fréquent  $P(t)$  admet une fonction spectrale donnée par l'analyse de Fourier.

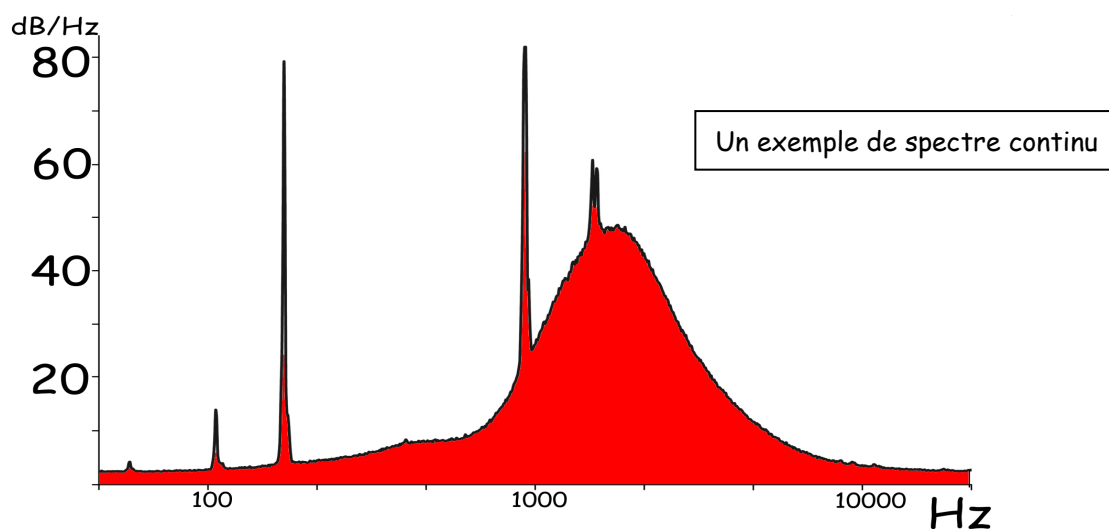
Si la fonction  $P(t)$  est périodique, elle est analysable en série de Fourier ou comme des fonctions sinusoïdales correspondant chacune à un son pur caractérisé par une fréquence et une intensité propres ; la fondamentale de fréquence  $f$  et des harmoniques de fréquences  $2f$ ,  $3f$ ,  $4f$ , etc. (voir sons musicaux). Outre les fréquences harmoniques d'une fondamentale, un son peut comporter aussi des partiels, ce sont des fréquences multiples de  $f$  :  $nf$  où  $n$  n'est pas un entier. En musique, ces partiels constituent les tierces, les quarts, les quintes, etc. C'est à partir de ces partiels que l'on compose des accords de tierce, de quarte, de septième, neuvième ou treizième, par exemple. Les harmoniques et les partiels sont extrêmement importants parce qu'ils constituent le timbre des instruments de musique et, d'une certaine façon également, celui de la voix. Certaines techniques vocales permettent d'ailleurs de créer des harmoniques et des partiels supplémentaires qui donnent au chant ou à la voix des timbralités très curieuses : chants sarde, inuit, mongol, etc. Contrairement à ce que l'on pourrait penser en écoutant ces voix, ces techniques vocales ne sont pas très difficiles à acquérir.

Huun Huur Tu at Philadelphia Folk Festival, August 2006 :  
<http://www.youtube.com/watch?v=RxK4pQgVvfg&NR=1>

Le spectre d'un son complexe à caractère musical est un spectre de raies (analogie avec les spectres lumineux), c'est-à-dire que l'on peut dégager des fréquences bien définies.



Dans la plupart des cas, la fonction  $P(t)$  définissant la pression sonore n'est pas analysable en séries de fréquences pures, mais en une fonction aléatoire présentant un spectre continu en fréquence. C'est le cas de tous les bruits d'origine aérodynamique. Le son permanent sera alors analysé par la superposition de séries de Fourier (caractère périodique du son) et d'intégrale de Fourier (spectre continu).



Voir aussi :

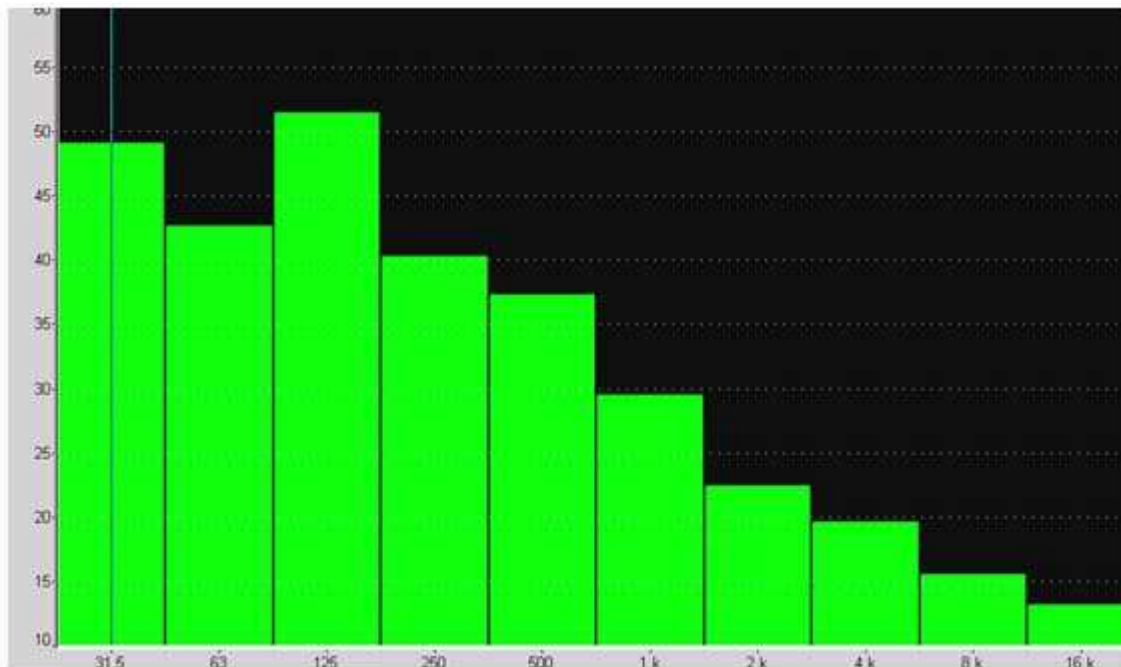
Le chant du pinson : <http://www.inra.fr/dpenv/joachc27.htm> (spectres et sonogrammes)

## 8) L'analyse par bandes de fréquence.

Souvent pour des raisons de rapidité de mesure, on se contente de répartir l'énergie acoustique transportée par bandes de fréquence.

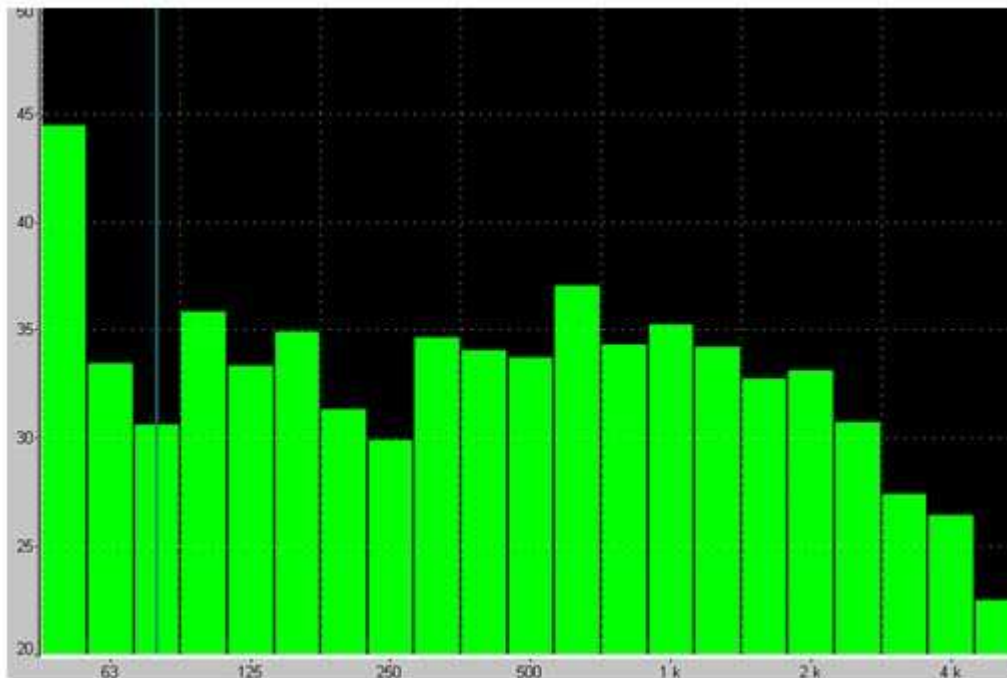
Pour isoler une fréquence, il faut utiliser un filtre. Un filtre idéal serait celui qui transmettrait sans atténuation une bande passante donnée et atténuerait toutes les autres (bandes de réjection). Un tel filtre n'existe pas. La courbe de filtrage est toujours arrondie et présente une pente autour des fréquences de coupure. L'idéal est que cette pente (mesurée en dB par octave) soit la plus forte possible. Généralement, on désigne la bande de fréquence par sa fréquence centrale qui est, du fait de l'échelle logarithmique utilisée, la moyenne géométrique des bandes de coupure ( $f_c = f_1 \times f_2$ )<sup>1/2</sup>.

En acoustique, on utilise les filtres d'octave et de tiers d'octave. Les filtres d'octave sont des multiples ou des sous-multiples de la fréquence 1000 Hz, soit 31.5 Hz, 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz et 8000 Hz.



Spectre bande d'octave

Pour les filtres tiers d'octave, on dit que deux sons purs de fréquence  $f_1$  et  $f_2$  sont séparés par un tiers d'octave si  $f_2 = 2^{1/3} \times f_1$ .



Spectre bande tiers d'octave

### 9) L'intensité physiologique. Les décibels pondérés.

Du fait de la façon particulière dont fonctionnent les organes des sens, l'intensité physiologique d'une sensation est toujours une grandeur subjective. Ainsi pour les sons, on dit qu'ils sont plus ou moins forts, cela sans tenir aucun compte des fréquences d'émissions.

Fechner avait fait remarquer que lorsque la force des phénomènes générateurs de sensations croissait comme les termes d'une raison géométrique de raison 10, la sensation variait comme les termes d'une progression arithmétique de raison 1 :

- Progression géométrique des excitations :

- Progression arithmétique des sensations :

$10^0$	$10^1$	$10^2$	$10^3$	$10^4$
0	1	2	3	4

Fechner avait proposé les lois suivantes : la sensation est proportionnelle au logarithme de l'excitation :  $S = k \cdot \log I$  et la variation de sensation est proportionnelle au logarithme du rapport des excitations qui la provoque :

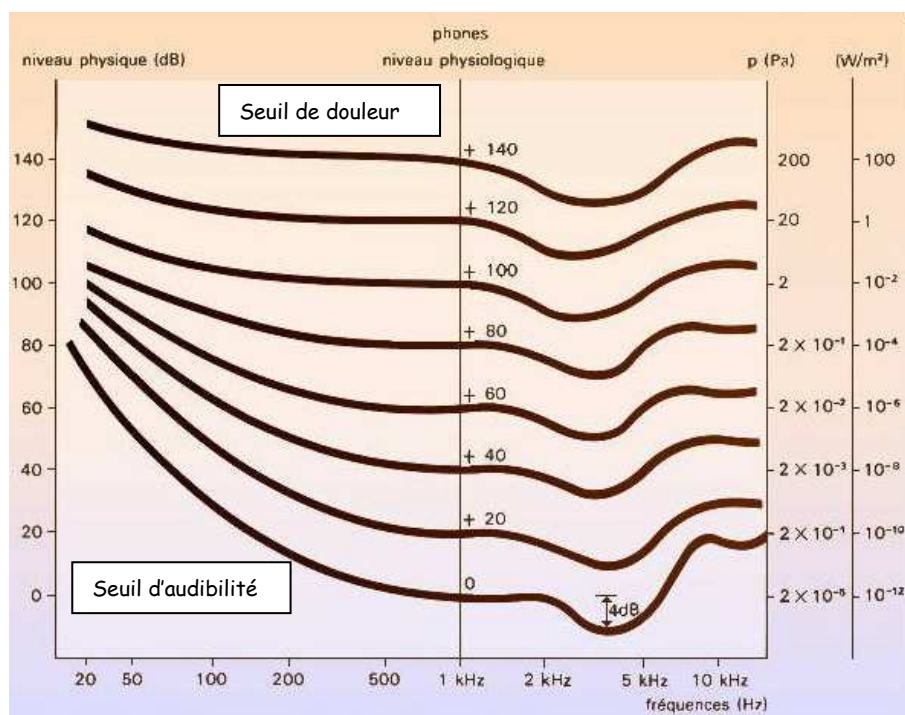
$$S_1 - S_2 = k \cdot \log (I_1 - I_2).$$

### a) La sonie des sons purs :

Pour un son, l'intensité physiologique est la sonie. L'oreille est sensible à la fois au niveau de pression sonore (NPS) et à la fréquence du son de 20 Hz à 15 kHz environ.

On a cherché quels sont, en fonction de la fréquence, les NPS qui donnent la même sensation de niveau sonore. Tous les couples de points (NPS, fréquence) donnant la même sensation de niveau sonore constituent une ligne isotonique. Par convention, on l'identifie par le NPS correspondant à la fréquence 1000 Hz.

<http://dialou.fr/http/Utilisation/homecinema/calibration/calibaudio/theory1.html>



Sur ces courbes, la sonie des sons est exprimée en sones. Par définition, le sone est l'intensité subjective d'un son pur de fréquence 1000 Hz et de niveau d'intensité de 40 dB. La courbe isosonique de sone 0 est le seuil d'audibilité.

Sones	Phones	Sones	Phones
0	0	1	40
0.01	5	2	50
0.02	10	4	60
0.05	15	8	70
0.1	20	16	80
0.2	25	32	90
0.5	30	64	100

Équivalence sones - phones pour un son pur à 1000 Hz

On définit le phone comme l'unité de niveau d'isophonie : un niveau d'isophonie est de X phones lorsque la sonie du son étudié est la même que celle d'un son de fréquence 1000 Hz et de NPS de X dB. Ainsi, les différentes pressions en dB qui produisent, lorsque la fréquence varie, la même sensation qu'une pression de 20 dB à 1000 Hz, ont une intensité de 20 phones.

### **b) La sonie d'un son complexe :**

Un son complexe étant une somme très importante, sinon infinie, de sons purs, une évaluation de la sonie peut être obtenue en intégrant les composantes fréquentielles d'un bruit. Deux méthodes sont utilisées : Méthodes de calcul des niveaux d'isophonie ISO R 532.

([http://www.head-acoustics.de/downloads/fr/Application\\_Notes/ArtemiS/Analyses\\_Psychoacoustiques\\_I\\_04\\_09f.pdf](http://www.head-acoustics.de/downloads/fr/Application_Notes/ArtemiS/Analyses_Psychoacoustiques_I_04_09f.pdf))

Analyses psycho-acoustiques :

[http://www.head-acoustics.de/downloads/fr/Application\\_Notes/ArtemiS/Analyses\\_Psychoacoustiques\\_I\\_04\\_09f.pdf](http://www.head-acoustics.de/downloads/fr/Application_Notes/ArtemiS/Analyses_Psychoacoustiques_I_04_09f.pdf)

La sonie des sons impulsionnels : perception, mesures et modèles (Thèse).

<http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/04/83/06/PDF/tel-00009870.pdf>

Nuisances sonores aux postes de travail.

[https://www.sapp1.suva.ch/sap/public/bc/its/mimes/zwaswo/99/pdf/66058\\_f.pdf](https://www.sapp1.suva.ch/sap/public/bc/its/mimes/zwaswo/99/pdf/66058_f.pdf)

Cours d'acoustique générale et acoustique des salles : [http://www.head-acoustics.de/downloads/fr/Application\\_Notes/ArtemiS/Analyses\\_Psychoacoustiques\\_I\\_04\\_09f.pdf](http://www.head-acoustics.de/downloads/fr/Application_Notes/ArtemiS/Analyses_Psychoacoustiques_I_04_09f.pdf)

Cours d'acoustique (1<sup>e</sup> année de médecine) :

[http://www.cnebm.jussieu.fr/enseignement/biophysiqueneurosensorielle/cours\\_acoustique/index.htm](http://www.cnebm.jussieu.fr/enseignement/biophysiqueneurosensorielle/cours_acoustique/index.htm)

Contribution à l'étude de l'impact environnemental sonore des sites industriels : une typologie perceptive des sources de bruit.

[http://docinsa2.insa-lyon.fr/these/2007/le\\_nost/these.pdf](http://docinsa2.insa-lyon.fr/these/2007/le_nost/these.pdf)

La plus simple consiste à découper le spectre de bruit en bandes de largeur d'une octave et à chercher la sonie pour chacune des bandes. La détermination de la sonie d'un son complexe est possible tant le bruit a un caractère stable. La présence de sons impulsifs ( $t < 100$  ms) fausse les résultats. (Voir <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/04/83/06/PDF/tel-00009870.pdf>).

### **c) La sensibilité de l'oreille :**

Le décibel est une mesure du niveau de pression sonore. Pour une pression donnée, la fréquence n'a pas d'influence sur la mesure en décibels, par exemple avec un sonomètre. On parle alors de décibels linéaires ou dB lin. Par exemple, deux sons purs de même niveau de pression, mais de fréquences différentes, ont le même niveau en dB lin.

Il en va tout autrement pour l'oreille humaine. Deux sons de même niveau de pression, mais de fréquences différentes ne sont pas perçus de la même façon par l'homme. À niveau de pression égale, l'oreille humaine entend mieux les sons de fréquences moyennes et aiguës que les sons graves ou très aigus. Par exemple, un son de 1000 Hz de 40 dB est entendu aussi fort qu'un son de 60 dB à 60 Hz.

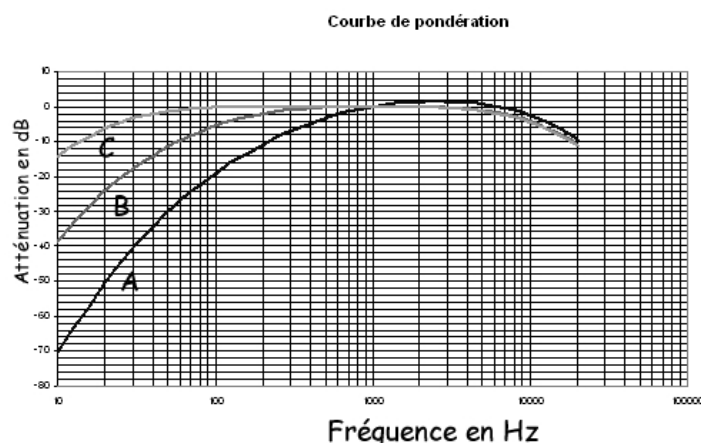
Cela ne devrait pas nous surprendre. Les fréquences conversationnelles chez l'homme se situent à des fréquences moyennes. De même, si nous possédons un seuil d'audibilité abaissé de - 4 dB dans les fréquences 2000 Hz - 4000 Hz, c'est probablement que nous devons avoir des fréquences d'alertes dans cette zone (alarmes, cris des bébés, etc.).

On n'oubliera pas que les adaptations physiologiques sont très liées à des mécanismes évolutifs ou coévolutifs dont il n'est pas sûr que nous en ayons gardé la trace ou le souvenir.

#### d) La notion de décibel pondéré :

Si l'on veut mesurer, non pas le niveau de pression sonore en DB lin, mais la sensation perçue par l'oreille, on devra équiper les sonomètres de filtres ou autres dispositifs qui atténueront les basses et les hautes fréquences de la même façon que le fait l'oreille humaine.

Lorsque les sonomètres sont pourvus de ces filtres atténuateurs, ils peuvent nous délivrer des niveaux pondérés comparables à ce que notre oreille serait sensible. Il existe trois types de filtres pondérateurs, le filtre A pour les sons d'intensité faible, le filtre B pour les sons d'intensité moyenne et le filtre C pour les sons d'intensité forte. Selon que l'on utilise tel ou tel filtre, on donnera le niveau d'intensité en dBa, dBb ou dBc. Le filtre le plus couramment utilisé est le filtre A. En ce qui concerne les dBa, on parle souvent de mesure de niveau de pression acoustique physiologique. Le filtre B est aujourd'hui obsolète.



## 10) L'évaluation des niveaux sonores des bruits non permanents.

Les grandeurs précédemment décrites : niveau global en dB ou en dBa, analyse par bande d'octave, etc. sont utilisées pour caractériser les bruits permanents (bruits dont les niveaux sont constants en fonction du temps) ou les bruits stables, c'est-à-dire des bruits dont les niveaux ne présentent que des variations négligeables au cours de la période d'observation (Norme NF S 30-105).

Ces grandeurs peuvent encore être utilisées pour des bruits fluctuants, c'est-à-dire pour des bruits dont le niveau varie de façon continue et nettement perceptible entre deux limites au cours d'une période d'observation (Norme NF S 30-105). Dans ce cas, on gagnera à donner la valeur moyenne du niveau de bruit encadrée par les limites hautes et basses de fluctuation :  $L = 83$  dBa (82 -85).

Mais de nombreux bruits ne sont pas permanents, ce sont :

- les bruits évolutifs (passage d'un avion) ;
- les bruits intermittents (bruit de circulation) ;
- les bruits fluctuants dans un large intervalle (bruit d'atelier) ;
- les bruits ayant un caractère impulsif (bruit de presse, coup de feu) ;
- les bruits uniques ou courts (Klaxon, sirènes)\*.

\* Les bruits uniques ou courts, s'ils se reproduisent, deviennent des bruits intermittents.

[La norme NF S 30-105 définit les bruits intermittents comme des bruits dont le niveau émerge de temps en temps de façon nettement perceptible du niveau de bruit au cours de la période d'observation.

Elle définit également les bruits impulsionnels comme des émissions sonores brusques et de courte durée.].

### a) Le niveau sonore équivalent $Leq$ :

Le niveau sonore continu équivalent à un niveau de bruit fluctuant est égal au niveau sonore d'un bruit permanent qui transporterait la même énergie pendant le même temps.

On peut l'obtenir de deux façons :

- soit par intégration en fonction du temps.
- soit par analyse statistique des niveaux sonores.

**Le niveau sonore continu équivalent par intégration en fonction du temps :**

Considérons un bruit non permanent dont on mesure le niveau sonore en fonction du temps  $L_t = f(t)$ .

L'intensité instantanée correspondante est :

$$I(t) = I_0 \times 10^{L_t/10} \text{ d'où } L_t = 10 \log I(t) / I_0$$

Pendant le temps  $t$ , l'énergie totale émise est :

$$E = \int_0^t I(t) = I_0 \int_0^t 10^{L_t/10} dt$$

L'intensité moyenne pondérée est définie par :

$$I_{\text{moy}} = E \times t^{-1} = I_0 \int_0^t t^{-1} \times 10^{L_t/10} dt$$

On en tire le niveau sonore continu équivalent :

$$L_{\text{eq}} = 10 \log (I_{\text{moy}} / I_0) = 10 \log \left( \frac{1}{t} \int_0^t 10^{L_t/10} dt \right)$$

**Le niveau sonore continu équivalent par analyse statistique des niveaux sonores :**

Pour ce faire, il faut d'abord mesurer, à intervalles réguliers, le niveau sonore. Il faut effectuer cette mesure sur un temps d'observation suffisamment long pour être représentatif du bruit fluctuant étudié. On obtiendra une série statistique de type  $L_1 - L_j$  du temps  $T_1$  au temps  $T_j$  ( $L_j$  est le NPS au temps  $T_j$ ).

Ensuite, on regroupe ces mesures en classes de niveau. On peut choisir des classes de 5 dB de largeur centrées sur 70 dB, 75 dB, etc. par exemple. Ces données peuvent être traduites sous la forme d'un histogramme de fréquence d'apparition d'un NPS dans une classe donnée :

%	Histogramme des fréquences f%(Li)							
35								
30								
25								
20								
15								
10								
5								
Classes dB	65	70	75	80	85	90	95	100

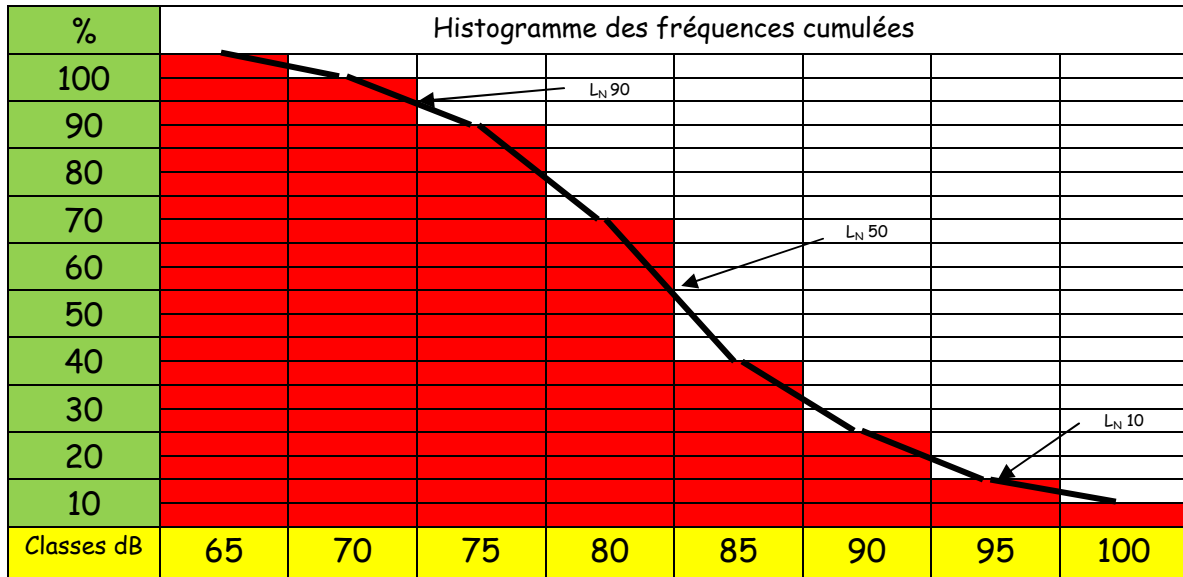
On a alors :  $Leq = 10 \log \left( \frac{1}{100} \sum_1^n f_i 10^{L_i/10} \right)$

La norme NF S 31-013 propose que cette formule soit représentée sous la forme :

$Leq = 70 + 10 \log \sum E_i$  avec  $E_i$  (Indice partiel d'exposition) =  $\frac{t_i}{40} 10 \log \sum 10^{(L_i - 70) / 10}$

**b) Le niveau  $L_N$  :**

Le niveau  $L_N$  désigne le niveau sonore qui a été dépassé pendant N % du temps. Pour l'évaluer, on tracera l'histogramme des fréquences cumulées. On notera les fréquences d'apparition des niveaux sonores de la classe  $L_i$  et des classes de niveau supérieur à  $L_i$ . On pourra aussi tracer la courbe de fréquence cumulée en rejoignant les points des centres de classe.



- Le bruit de fond correspond au LN 90, soit 70 -75 dB ;
- Le niveau médian ( $\approx Leq$ ) correspond au LN 50, soit 80 -85 dB ;
- Le niveau des crêtes correspond au LN 10, soit 95 dB.

Un tel bruit, selon la réglementation actuelle, serait considéré comme dangereux pour les personnes exposées.

**11) La sonométrie.**

De toutes les grandeurs qui caractérisent les sons dans l'air, c'est leur pression acoustique qui est la plus facile à mesurer, particulièrement avec un microphone.

**a) Les microphones** : Les microphones sont des transducteurs qui convertissent les ondes sonores acoustiques d'un milieu compressible en impulsions électriques proportionnelles à la pression acoustique qui agit sur eux.

Les principales caractéristiques des microphones sont leur sensibilité et leur directivité. La sensibilité s'exprime, pour une fréquence donnée, en volts délivrés aux bornes du microphone, pas pascal de pression acoustique. Généralement, les microphones de très bonne qualité ont une sensibilité indépendante de la fréquence. Les microphones sont essentiellement de type électrostatique, électrodynamique ou piézoélectrique.

Microphone : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Microphone>

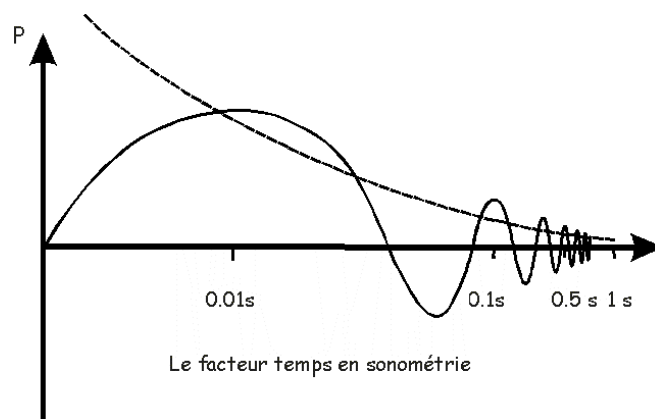
**b) Les sonomètres** : Un sonomètre est un ensemble de mesure constitué par un microphone, un amplificateur et un dispositif de lecture qui fournit directement, en dB, le niveau de pression acoustique régnant à l'emplacement du microphone.

Les caractéristiques des sonomètres font l'objet de la norme internationale CEI 61672-1 : <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/04/83/06/PDF/tel-00009870.pdf>

La dynamique d'un microphone étant beaucoup plus étendue que celle de l'amplificateur, un atténuateur d'entrée est donc placé avant, afin de ne prendre qu'une fraction déterminée de la tension délivrée par le microphone.

Afin de délivrer des NPS pondérés, A ou C, un filtre de pondération A ou C équipe certains sonomètres.

Les sonomètres indiquent les niveaux de pression efficace avec des durées d'intégration plus ou moins longs. Lorsque les bruits sont stables, la durée d'intégration n'a guère d'importance. Ça n'est pas le cas dans le cas de bruits fluctuants. Lorsque ces fluctuations sont de très courte durée (bruits impulsifs), il est intéressant d'utiliser des sonomètres qui indiquent exactement la valeur maximale atteinte par la pression acoustique instantanée (sonomètre « impulsif »).



On définit parfois six types de bruit (bruit stable, «intermédiaire», fluctuant, varié, intermittent et impulsionnel).

Pour les bruits stables à fluctuant, le sonomètre pourra être réglé sur le mode lent (1 seconde). Pour les bruits fluctuants, on réglera le sonomètre sur le mode rapide (0.125 seconde). Les bruits impulsionnels exigent des durées d'intégration égales à 0.035 seconde qu'offrent les sonomètres « impulsifs ». La mesure du niveau de crête ou pic n'a pas de durée d'intégration, c'est une mesure instantanée. Pour les bruits fluctuants, il y a tout intérêt à proposer une mesure d'exposition au bruit (exposimétrie), soit au poste (on parle quelquefois de « postographie »), soit au niveau de l'atelier (cartographie du bruit).

Les sonomètres : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Sonom%C3%A8tre>

**c) Les spectromètres :** La connaissance des paramètres du bruit n'est pas complète avec la seule mesure du niveau global de pression sonore. Il est souvent très intéressant de déterminer les niveaux de pression efficace dans les bandes de fréquence qui le composent. On trouve des spectromètres à bandes d'octave et à bandes tiers d'octave.

**d) Les sonomètres intégrateurs :** Le calcul du niveau équivalent demande un nombre d'opérations important. Depuis un certain nombre d'années, maintenant, les sonomètres de qualité sont équipés d'une fonction intégration qui leur permet de fournir, directement et instantanément, le niveau équivalent à mesure que l'on procède à la mesure en continue d'un bruit fluctuant.

**e) Les enregistreurs :** Les bons sonomètres sont équipés de sorties (output) permettant, à l'aide d'une connectique appropriée, d'attaquer une entrée (input) d'un enregistreur, d'un oscilloscope ou d'autres mémoires de masse.

## B) La physiologie de l'oreille.

### 1) Anatomie.

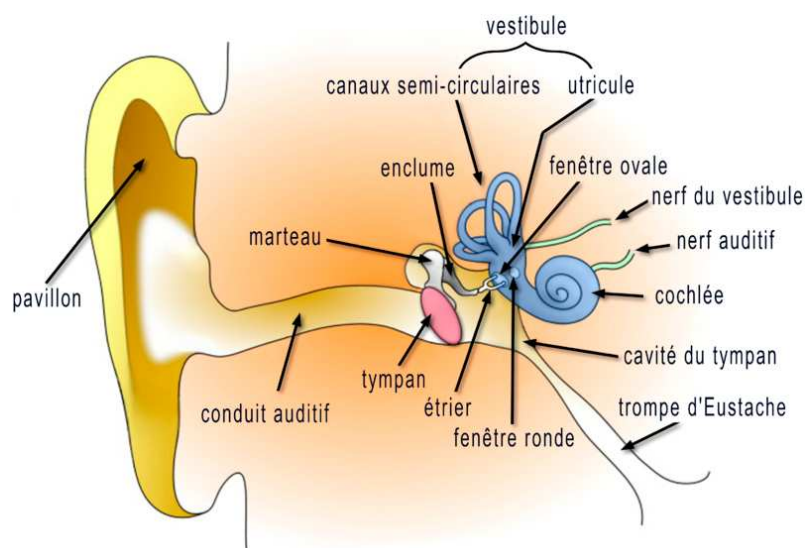
#### 1.1) L'oreille externe et l'oreille moyenne :

L'oreille externe est constituée par un pavillon en forme d'entonnoir évasé, présentant un certain nombre de replis et d'anfractuosités, auquel fait suite un canal irrégulier, mesurant environ 2.5 cm de long et 0.8 cm de diamètre : le conduit auditif externe.

L'oreille moyenne fait suite à ce conduit dont elle est séparée par la membrane du tympan. Elle est formée par une cavité d'environ 1 à 2 cm<sup>3</sup> dans l'os temporal. La caisse du tympan est traversée par la chaîne des osselets. La caisse du tympan est fermée par la membrane du tympan, côté oreille externe et, du côté de l'oreille interne, par deux ouvertures plus petites : la fenêtré ronde et la fenêtré ovale. La caisse du tympan communique encore, vers l'avant, avec le pharynx par la trompe d'Eustache et vers l'arrière avec les mastoïdes. Une chaîne de petits osselets relie la membrane du tympan avec la membrane de la fenêtré ovale.

Chez les mammifères, la chaîne des osselets est constituée de trois éléments : le marteau, l'enclume et l'étrier. Le marteau est fixé par son manche à la membrane du tympan. La tête arrondie du marteau s'encastre solidement dans l'enclume. L'enclume présente deux apophyses dont la plus longue s'articule avec la tête de l'étrier. Ce dernier osselet ferme à peu près complètement, par sa base ovale, l'ouverture de la fenêtré ovale.

La chaîne des osselets est reliée aux parois de la caisse du tympan par des ligaments et deux muscles striés, le muscle tenseur du tympan et le muscle de l'étrier.



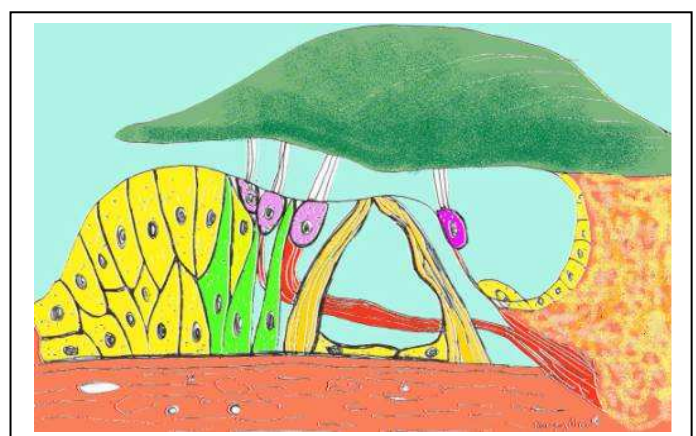
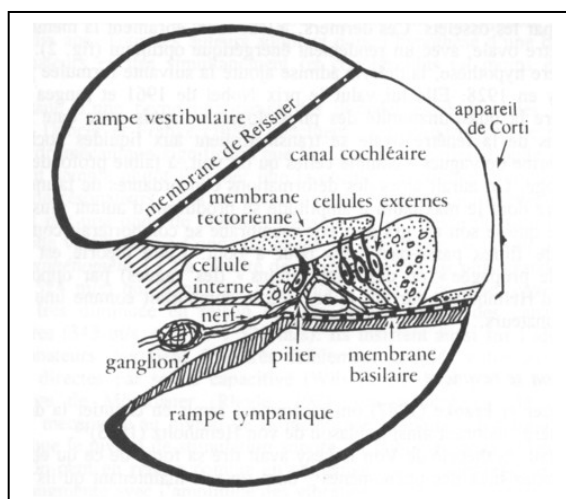
## 1.2 L'oreille interne :

L'oreille interne renferme à la fois les cellules sensorielles de l'audition (limaçon) et de l'équilibration (canaux semi-circulaires). Ces structures délicates sont enfermées, comme l'oreille moyenne dans un système de cavités creusées dans le rocher (paroi épaisse de l'os temporal qui constitue le labyrinthe osseux.

Ce labyrinthe osseux comprend trois parties : une cavité centrale, le vestibule sur lequel débouchent les canaux semi-circulaires et le limaçon. Seuls le vestibule et le limaçon ont un rapport avec l'audition.

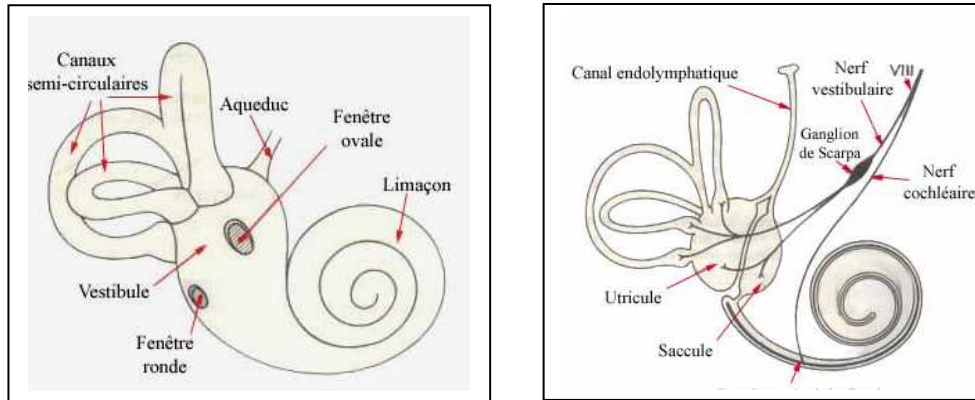
Le vestibule fait suite à la cavité du tympan avec laquelle il communique par la fenêtre ovale.

Le limaçon ou cochlée, placé en avant du vestibule, a l'aspect d'un cône évasé dont la base est tournée vers l'arrière. Le limaçon est formé comme la coquille de l'escargot par un axe central creux, de forme conique, la columelle, autour de laquelle s'enroule un canal à paroi creuse, fermé en cul-de-sac au sommet. Une mince lame osseuse, la lame spirale, divise ce canal incomplètement sur toute sa longueur. La séparation complète est assurée une membrane épaisse, la membrane basilaire. Une deuxième cloison, très mince, la membrane de Reissner, divise également ce canal. Le limaçon est ainsi divisé en trois canaux accolés qui s'enroulent parallèlement autour de la columelle. Le canal central ou canal cochléaire et la rampe vestibulaire sont en rapport avec l'oreille moyenne par la fenêtre ovale tandis que la rampe tympanique est en rapport avec l'oreille moyenne par la fenêtre ronde. Ces deux rampes, séparées par le canal cochléaire, se rejoignent au sommet du limaçon où elles communiquent par un orifice, l'hélicotrème.



Coupe de la cochlée et appareil de Corti

Le canal cochléaire, fermé à ses bouts, est relié à sa base aux canaux semi-circulaires et à leurs anses (sacculé et utricule). Le canal cochléaire et les canaux semi-circulaires sont remplis d'un liquide très riche en ions  $K^+$  ( $140 \text{ mEq.l}^{-1}$ ) ou endolymphe. Les rampes vestibulaire et tympanique sont également remplies d'un liquide, la périlymphe.



Labyrinthe osseux et labyrinthe membraneux

La membrane basilaire représente la partie essentielle de l'appareil auditif. C'est elle qui porte, sur sa face intracochléaire, les cellules sensorielles auditives et les terminaisons du nerf auditif, le nerf cochléaire. Cette membrane, longue de trois centimètres environ, est de largeur croissante depuis sa base (0.04 cm) à son sommet (0.5 cm).

Les cellules sensorielles sont des cellules ciliées, disposées régulièrement le long de la membrane basilaire. Ces cellules accompagnées d'éléments de soutien forme un organe complexe, l'organe de Corti.

Chaque cellule ciliée porte une vingtaine de cils dont le bout libre s'insère dans une formation gélatineuse, la membrane tectoriale ou tectorienne.

Quelques sites :

<http://www.medecine-et-sante.com/anatomie/anatoreille.html>

<http://cours.cegep-st-jerome.qc.ca/101-902-m.f/bio903/Nerveux/audition.html>

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Audition>

[http://jacquet.stephan.free.fr/Oreille\\_Niveau4\\_Picut.pdf](http://jacquet.stephan.free.fr/Oreille_Niveau4_Picut.pdf)

<http://www.chu-rouen.fr/ssf/anat/oreille.html>

[http://pagesperso-orange.fr/anso/page\\_le\\_fonctionnement.htm](http://pagesperso-orange.fr/anso/page_le_fonctionnement.htm)

## **2) Physiologie.**

### **2.1) La collection des sons par l'oreille externe :**

L'oreille externe n'est pas indispensable à l'audition. Elle est simplement utile pour collecter les sons et permettre une meilleure localisation de leur provenance. Elle assure, en outre, un rôle de protection pour l'oreille moyenne.

### **2.2) La transmission du stimulus sonore à l'oreille moyenne :**

Le conduit auditif externe dirige les ondes sonores vers l'oreille moyenne. Les vibrations imprimées à la membrane du tympan entraînent le déplacement de l'air qui remplit la caisse du tympan et celui des osselets qui le traversent.

Dans les conditions normales, la transmission des ondes sonores à l'oreille interne s'effectue essentiellement par les osselets au niveau de la fenêtre ovale dans laquelle s'engage la base de l'étrier. La périlymphe peut en suivre les vibrations, en dépit de son incompressibilité, grâce aux oscillations de sens inverse qu'elle effectue, sous la poussée du liquide, la membrane élastique fermant la fenêtre ronde.

L'extrême mobilité de la membrane du tympan lui permet de réagir à des ondes sonores dont l'amplitude est extrêmement faible. Dans la zone de fréquence où la sensibilité de l'oreille est maximale (1000 à 3000 Hz), la plus petite pression sonore perçue est de l'ordre de  $2 \cdot 10^{-4}$  dynes/cm<sup>2</sup>.

D'autre part, la chaîne des osselets assure la transmission difficile des vibrations de l'air de l'oreille moyenne à la périlymphe de l'oreille interne. Le rôle des osselets est confirmé par la forte élévation du seuil auditif qui fait suite à leur suppression fonctionnelle (- 30 dB).

Le marteau suit les mouvements du tympan auquel il est fixé par son manche et les transmet à l'enclume. Ces deux osselets étroitement emboîtés dans des conditions normales se comportent comme un seul. Leurs vibrations sont transmises à la base plane de l'étrier qui s'applique étroitement à la fenêtre ovale. Ces vibrations ne sont pas comparables à un mouvement de va-et-vient de piston, mais davantage à celui d'une porte qui tourne autour de ses gonds.

Les déplacements du tympan et de la base de l'étrier ont la même amplitude. La force exercée par la base de l'étrier sur la périlymphe est ainsi sensiblement la même que celle exercée sur le tympan. Mais la surface de la membrane ovale est 17 fois plus petite que celle du tympan. Il se produit donc un phénomène d'amplification.

La transmission se fait aussi, de façon solidienne, par l'intermédiaire des os du crâne, mais à la condition qu'il existe un contact du récepteur avec la source sonore, par exemple, sa propre voix. C'est la composition d'une transmission aérienne et solidienne qui fait que la perception de notre voix n'est pas la même quand on la réécoute à partir d'un enregistrement.

Le bon fonctionnement de l'oreille moyenne est associé à l'activité des muscles du tympan et de l'étrier, ainsi que de l'état de la trompe d'Eustache.

Les muscles ont surtout un rôle de protection. Ils limitent, par contraction réflexe, l'amplitude du mouvement du tympan et des osselets dans le cas de la perception de sons forts. Toutefois, compte tenu du temps de latence d'apparition de ce réflexe, la protection est sans effet dans le cas des sons impulsifs comme des coups de feu ou de canon, des explosions, des coups de tonnerre, des bruits impulsifs dans les ateliers ou dans l'environnement.

La trompe d'Eustache assure le maintien à la pression atmosphérique de la caisse du tympan. Normalement fermée, elle s'ouvre au moment des bâillements, des éternuements, des déglutitions, etc. Lorsqu'elle reste ouverte, les ondes sonores passent directement de la bouche à l'oreille moyenne, provoquant des bourdonnements désagréables (voyage en montagne ou en avion).

### **2.3 Le fonctionnement de l'oreille interne :**

Les vibrations de l'air communiquées à la membrane du tympan, puis transmises par la base de l'étrier à la fenêtre ovale, provoquent des oscillations périodiques de la périlymphe refoulée entre les fenêtres ovale et ronde, par les rampes vestibulaire et tympanique.

**Ces oscillations de la périlymphe se transmettent au canal cochléaire dont les mouvements et, en particulier, ceux de la membrane basilaire, représentent le dernier stade de la transmission des vibrations sonores vers les cellules sensorielles de l'audition, les cellules ciliées.**

Du fait de sa forme et de son implantation, la membrane basilaire ne vibre pas uniformément. Ses mouvements sont, au contraire, très complexes et dépendent, entre autres facteurs, de la fréquence des sons perçus. Ainsi toute la membrane vibre pour les fréquences inférieures à 50 Hz. Les sons plus aigus font vibrer des plages plus ou moins grandes de la membrane basilaire. Ces plages sont d'autant plus étroites et proches de la fenêtre ovale que les fréquences sont plus élevées. C'est pourquoi un son très aigu sera rapidement traumatisant, car toute l'énergie dispersée le sera sur une plage très étroite de la membrane. (Voir tonotopie : <http://neuroreille.com/promenade/francais/cochlea/cocphys/cocphys.htm> )

L'entrée en résonance particulière de la membrane basilaire est une explication pour la discrimination des sons de fréquence différente. Cela permet aussi d'expliquer les effets de masque. Des recherches récentes ont également montré l'importance de cette discrimination membranaire (éducable) sur la production des sons, le chant ou l'émission de phonèmes (idiomes).

Propriété des langues :

<http://www.limsi.fr/Individu/habert/Cours/PX/ProprietesDesLanguesArticle/node1.html>

Illusions auditives : <http://users.skynet.be/illusionsauditives/premiere%20page.htm>

## 2.4) L'élaboration du message nerveux :

Sous l'influence de stimulations sonores, la membrane basilaire imprime son mouvement oscillatoire aux organes qu'elle supporte. En particulier, les cils des cellules ciliées de l'organe de Corti subissent des mouvements périodiques d'inclinaison qui sont à l'origine de la création de potentiels électriques cellulaires, les potentiels microphoniques et les potentiels de sommation.

**a) Les potentiels microphoniques :** Les potentiels microphoniques ont une origine cochléaire. Si on place sur le nerf auditif d'un animal anesthésié, une électrode de dérivation reliée à un haut-parleur par l'intermédiaire d'un amplificateur, on constate que le haut parleur reproduit les sons émis devant l'oreille de l'animal. Cela fait dire que l'oreille fonctionne comme un microphone... Ce qui est vrai, c'est que c'est le microphone qui fonctionne comme l'oreille ! On rappellera que le microphone fut inventé bien après que l'on ait découvert comment fonctionnait l'oreille.

Les potentiels microphoniques sont caractérisés par :

- une période de latence très courte (0.1 ms),
- l'absence de seuil et de période réfractaire,
- le fait que l'amplitude de la réponse soit proportionnelle à l'intensité du son,
- le fait, enfin, qu'ils se répartissent le long de la membrane basilaire selon la fréquence des sons.

**b) Les potentiels de sommation :** Les potentiels de sommation ont aussi une origine cochléaire. Ils apparaissent comme une variation de potentiel soutenue pendant toute la durée de la stimulation sonore. Les potentiels microphoniques se superposent à cette variation. Les potentiels de sommation apparaissent sans latence, ni seuil aux endroits où les vibrations de la membrane basilaire sont d'amplitude maximale.

## 2.5) La transmission du message nerveux vers les centres de l'audition :

**a) Le potentiel d'action dans le nerf cochléaire :** On savait peu de choses sur la manière dont la vibration des cellules phono-sensibles engendre des décharges

d'influx dans les arborisations dendritiques des cellules du ganglion de Corti. On pensait que les potentiels microphoniques et sommés excitent ces arborisations puisque celles-ci pénètrent la base des récepteurs sensoriels.

On sait maintenant que chaque fibre du nerf cochléaire présente un seuil d'activation minimale pour une certaine fréquence appelée Fréquence Caractéristique (F.C.) ou préférentielle. Le seuil s'élève rapidement dès qu'on s'éloigne de cette fréquence.

De plus, on a montré qu'une fibre qui innervait les cellules ciliées localisées sur la région correspondant au maximum de déplacement de la membrane basilaire pour cette fréquence présentait un seuil de réponse d'intensité la plus faible pour une fréquence caractéristique de 1000 Hz. Cette répartition des fréquences caractéristiques dans la population des fibres du nerf, en correspondance avec la tonotopie cochléaire, constitue l'élément essentiel du codage de la fréquence du stimulus. (Voir : Les messages du nerf cochléaire :

[http://www.cnebm.jussieu.fr/enseignement/biophysique-neurosensorielle/cours\\_acoustique/travail\\_octobre/messages-nerf-cochleaire.html](http://www.cnebm.jussieu.fr/enseignement/biophysique-neurosensorielle/cours_acoustique/travail_octobre/messages-nerf-cochleaire.html) )

Les fibres innervant la partie apicale ont une fréquence caractéristique basse et celles innervant le tour basal une fréquence élevée.

Enfin, on a montré que si l'on rejoignait les points correspondant aux seuils de plus grande sensibilité à une fréquence caractéristique, on obtenait une courbe voisine de celle de l'audiogramme de l'espèce étudiée. Cela est vrai pour le chat, le cochon d'Inde et diverses autres espèces de mammifères.

Nous verrons, dans le chapitre suivant, que les cellules de Corti peuvent être endommagées irréversiblement à la suite d'une exposition unique ou répétée à des niveaux de bruit trop importants. On a appris aussi que les fibres cochléaires pouvaient pareillement être endommagées durablement ou irréversiblement à cause de divers facteurs (hypoxie, médicaments : furosémide, antibiotiques aminoglycosidiques, hémorragies, etc.). Remarquablement, ce sont encore les fibres sensibles aux plus hautes fréquences qui sont les premières atteintes.

**b) Les voies acoustiques :** Les influx nerveux circulent dans deux types de voies, spécifiques (nerf cochléaire, relais centraux, tronc cérébral, thalamus, aires corticales) et non spécifiques (cervelet, formation réticulée ascendante activatrice).

- **Le nerf cochléaire :** Tandis que les prolongements dendritiques des cellules nerveuses du ganglion de Corti innervent les cellules ciliées de l'oreille interne, les prolongements axoniques des cellules bipolaires, au nombre de 30 000 environ, se réunissent pour former le nerf cochléaire. Celui-ci s'accroche au nerf

vestibulaire pour former le 8<sup>e</sup> nerf crânien qui, après un court trajet, entre dans le névraxe par le sillon bulbo-protubérantiel.

- **Les noyaux de relais et les fibres de connexion** : Les voies auditives qui font suite au nerf cochléaire comprennent un certain nombre de relais avant d'atteindre l'aire corticale auditive :

- À la base du tronc cérébral (au niveau du pont), les noyaux cochléaires, les noyaux olivaires et les noyaux trapézoïdes ;
- Au niveau du mésencéphale, les tubercules quadrijumeaux postérieurs ;
- Au niveau du diencéphale, deux noyaux thalamiques, les corps genouillés médians ;

Les voies auditives sont pour 50 % directes et pour 50 % croisées. Chaque hémisphère est donc en rapport pareillement avec les deux oreilles, au moins a priori quantitativement. En réalité, les hémisphères droits et gauches se distinguent encore par leurs spécialisations, par exemple davantage axé sur le langage à gauche et davantage axé sur la musique à droite.

Par ailleurs, au niveau des relais, il existe de nombreuses interconnexions avec d'autres afférences sensorielles ou avec des noyaux moteurs crâniens. Ainsi, le corps genouillé médian est associé au corps genouillé latéral (visuel) ce qui permet d'associer les mouvements oculo-céphalogyres aux perceptions acoustiques : un bruit imprévu fait tourner la tête et les yeux du côté où il se produit. Cet ensemble d'interconnexions en circuits réflexes permet l'intégration des perceptions auditives comportement moteur général.

- **Les aires auditives corticales** ([http://abcavc.ifrance.com/anat\\_encephale.htm#a41](http://abcavc.ifrance.com/anat_encephale.htm#a41)) : Chez l'homme comme chez les primates, l'aire auditive primaire se situe dans le gyrus temporal transverse, presque entièrement caché au fond de la scissure de Sylvius (aire 41 et 42 de Brodman : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Aires\\_de\\_Brodman](http://fr.wikipedia.org/wiki/Aires_de_Brodman)).

La destruction unilatérale de l'aire 41 n'entraîne qu'une baisse insignifiante de l'acuité auditive. Il faut que la destruction soit bilatérale pour que la surdité apparaisse. Toutefois, la surdité corticale n'est jamais aussi profonde que celle qui résulte de la destruction de la cochlée. L'audition n'est donc pas entièrement corticalisée et son pouvoir discriminatif s'exerce aussi dans les relais sous-corticaux du thalamus.

Chez l'homme, la gamme des sons perçus va de 16 Hz à 20 000 Hz. On a pu montrer qu'il existait, dans l'aire auditive, une localisation des projections des divers segments de la membrane basilaire. Les influx nerveux cheminent par des voies indépendantes. De plus, chaque neurone cortical est mis en activité par une intensité sonore minimale pour une fréquence donnée. Enfin, chaque neurone voit son fonctionnement inhibé pour toute fréquence éloignée de celle pour laquelle il est le plus sensible.

Lorsque l'intensité d'un son croît, constate que :

- le nombre de fibres mises en jeu augmente ;
- la fréquence de décharge des influx nerveux décroît à partir du moment où le son atteint un certain niveau\*.

[\* On se rappellera le rôle des muscles dans l'oreille moyenne dans les cas de sons de forte intensité.]

La sensation auditive ne nous renseigne pas seulement sur la durée, la fréquence ou l'intensité d'un son, elle nous indique également d'où il vient :

<http://puffskydd.free.fr/stereo/2psyac.html> .

Chaque oreille possède un champ auditif propre, plus ou moins en forme de cône, et qui se recoupe, un peu, vers l'avant et vers l'arrière. L'audition mono auriculaire permet, normalement, de localiser correctement les sons dans l'espace. On ne sait rien des dispositifs mis en jeu dans le cas de ces appréciations unilatérales. Dans le cas de l'audition bi auriculaire, on sait qu'il existe un décalage entre les messages auditifs venant de l'oreille droite et ceux venant de l'oreille gauche. De plus les chemins pour atteindre les aires auditives sont inégaux entre la gauche et la droite. Ce sont ces décalages qui seraient utilisés pour la localisation, au moins pour des sons dont les fréquences comprises entre 200 et 4000 Hz. Pour les sons plus graves, la localisation est imparfaite. Pour les sons plus aigus, c'est davantage l'intensité sonore qui aiderait à la localisation, les décalages n'étant pas significatifs.

Quelques sites :

<http://www.medecine-et-sante.com/anatomie/anatocerveau.html>

[http://medphar.univ-poitiers.fr/DU\\_alzheimer/aphasies.ppt](http://medphar.univ-poitiers.fr/DU_alzheimer/aphasies.ppt)

<http://www.cochlee.org/>

[http://lecerveau.mcgill.ca/flash/a/a\\_10/a\\_10\\_cr/a\\_10\\_cr\\_lan/a\\_10\\_cr\\_lan.html](http://lecerveau.mcgill.ca/flash/a/a_10/a_10_cr/a_10_cr_lan/a_10_cr_lan.html)

[http://www-ibcm.unil.ch/teaching/anatomie/systemenerveuxcentral/cours\\_et\\_guide/Cours/Cours%20systeme%20auditif/Systeme%20auditif%2002%202005%20polycopie.pdf](http://www-ibcm.unil.ch/teaching/anatomie/systemenerveuxcentral/cours_et_guide/Cours/Cours%20systeme%20auditif/Systeme%20auditif%2002%202005%20polycopie.pdf) : Système auditif<sup>@@@</sup>

## C) L'évaluation de la gêne et du danger.

### 1) En situation de travail.

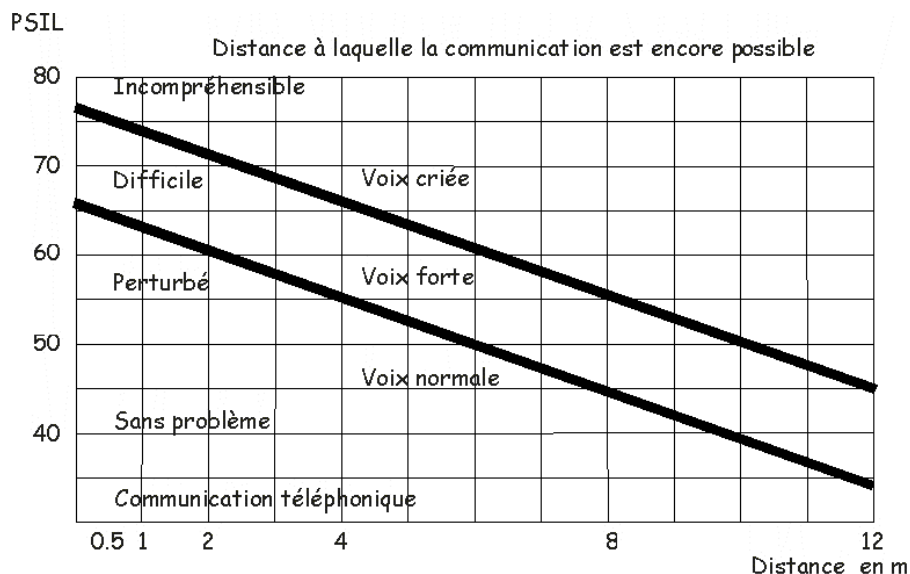
a) **La notion de gêne** : Les lésions les plus graves susceptibles de toucher les travailleurs sont les surdités professionnelles (<http://www.uvmt.org/Formation/05/Cadre.htm>). Ces lésions n'apparaissent pas de façon systématique ou dans la même mesure chez différentes personnes pourtant soumises à la même exposition. Cela tient à plusieurs facteurs (variabilité individuelle, âge, sexe, tonus musculaire, etc.).

De toutes les façons, le principe de prévention du risque repose sur l'abaissement des niveaux sonores et la diminution de la durée d'exposition à la source nociceptive. Parmi les moyens mis en œuvre, l'utilisation des protections individuelles, est une des plus fréquemment observée.

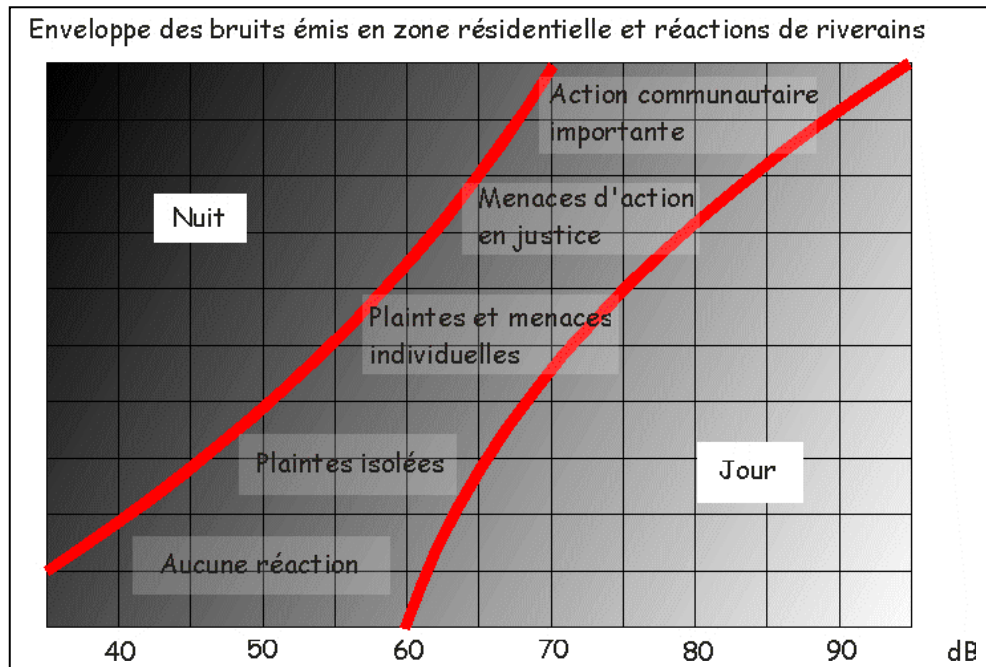
Mais tous les bruits ne conduisent pas à des atteintes graves et irréversibles de l'audition. Il faut pour cela, soit des expositions accidentelles et instantanées à des bruits de très forte intensité (explosion, coup de feu près de l'oreille, etc.), soit des expositions sur de plus longues durées de bruit de niveau important. En France, la limite maximale du NPS pendant 8 heures est de 85 dB.

Cependant, à des niveaux moins importants, et considérés comme sans risque de provoquer une maladie professionnelle / [tableau 42 /](#)

[http://www.risquesprofessionnels.ameli.fr/media/2006-09-04\\_Tableau\\_42.pdf](http://www.risquesprofessionnels.ameli.fr/media/2006-09-04_Tableau_42.pdf), le bruit apporte des gênes, par exemple, dans le domaine de l'intelligibilité de la parole [http://134.157.193.4/ext/ergonomie/op2\\_a2\\_bk.pdf](http://134.157.193.4/ext/ergonomie/op2_a2_bk.pdf), la communication, des effets de masque, du risque de baisse de vigilance à l'égard des signaux acoustiques d'alerte, la qualité du repos pendant les pauses, la fatigue, l'amplification des troubles psychosociaux, les risques d'accident ou d'incident suite à une mauvaise compréhension des consignes ou des recommandations, etc.



La prévision des réactions humaines aux niveaux sonores de l'environnement est souvent impossible à cause du caractère subjectif de la notion de gêne qui varie d'une personne à l'autre, évidemment, mais aussi, chez une même personne en fonction de ses caractéristiques chronobiologiques.



En outre, la dispersion réactionnelle s'explique aussi parce que le bruit n'affecte pas que le sens de l'ouïe <http://geocarrefour.revues.org/index196.html> , mais a des effets plus ou moins marqués sur la santé somatique et psychique des individus affectés.

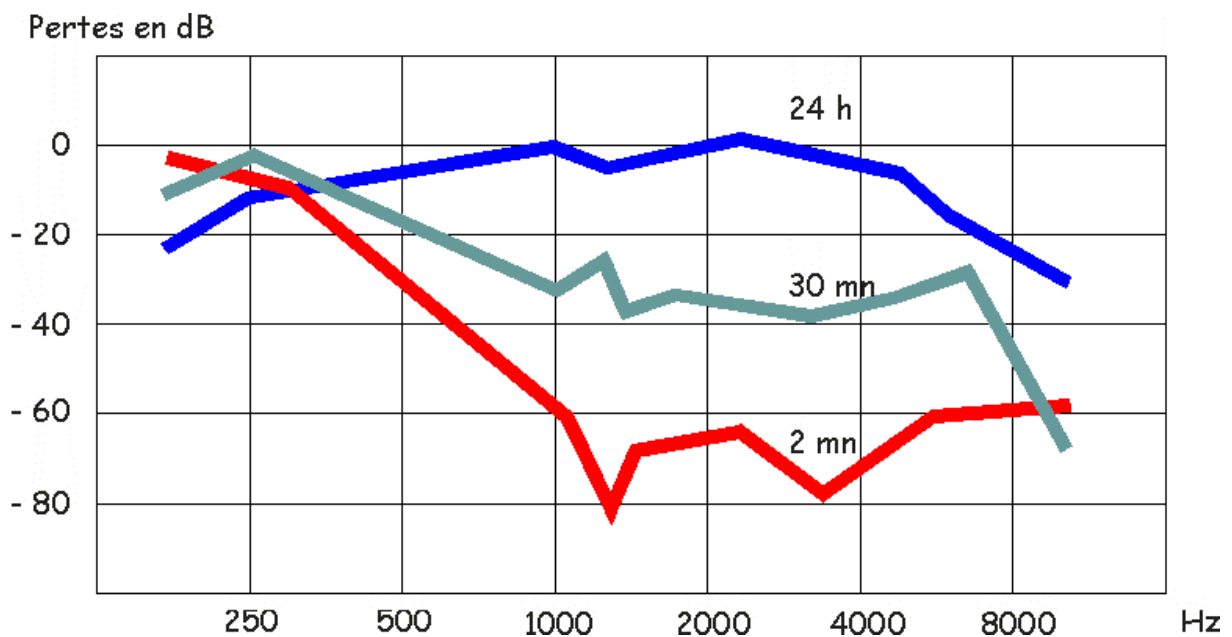
**b) Les effets du bruit sur la santé** (<http://geocarrefour.revues.org/index196.html>) : On peut considérer deux grands types d'effets du bruit sur la santé, les effets plus ou moins réversibles et les effets irréversibles.

- **La fatigue auditive** : La fatigue auditive est caractéristiquement un de ces effets qui passe pour être réversible... Lorsque l'on est exposé longtemps à une ambiance bruyante, il arrive un moment où, revenu dans une pièce plus calme, les sensations auditives que l'on perçoit sont modifiées : notre voix nous semble lointaine, nos oreilles bourdonnent. Cela va durer un certain temps, quelques heures pour le moins avant que tout semble rentrer dans l'ordre.

Lorsque les cellules auditives sont soumises à de fortes pressions acoustiques, elles se fatiguent. Cela se traduit par une perte temporaire d'audition et un relèvement du seuil d'audibilité. Ces effets ne portent pas seulement sur les cellules auditives puisque l'on remarque aisément que les sujets qui ont subi une exposition au bruit, se plaignent d'être aussi fatigués, d'avoir des difficultés à

réfléchir, voire d'être totalement incapable de quelque travail intellectuel que ce soit comme lire ou écrire. Il est évident que ces troubles peuvent être responsables d'effets indirects sur les individus affectés. Les troubles de la communication pouvant entraîner des accidents au travail ou sur le trajet de retour, des situations conflictuelles, etc.

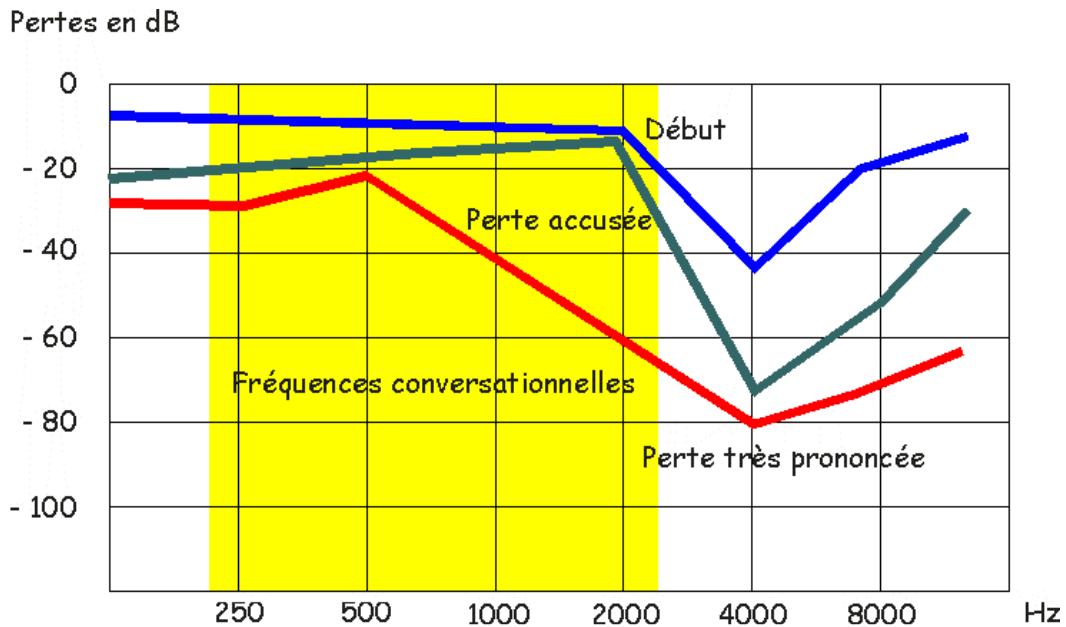
On a calculé qu'un déficit d'audition de 40 dB lié à une seule fatigue auditive demandait 16 heures au moins de récupération. Il va de soi qu'un travailleur soumis tous les jours à de telles fatigues ne pourra jamais récupérer. Ses pertes temporaires d'audition ne tarderont pas à devenir des pertes définitives.



Le graphique ci-dessus représente l'évolution de la récupération des pertes auditives subies après une exposition de 30 mn d'un bruit blanc<sup>1</sup> de 130 dB allant de 300 à 4000 Hz.

- **La surdité professionnelle** : La surdité professionnelle est une atteinte irréversible puisqu'elle s'accompagne de la destruction des cellules auditives ciliées de l'organe de Corti. Il faut plusieurs dizaines d'années d'exposition à des bruits forts pour constater une surdité professionnelle très prononcée, pourtant le diagnostic d'une surdité professionnelle peut être posé précocement à partir des audiogrammes quand ils se manifestent par une perte auditive, peu perceptible pour le sujet atteint, centrée sur les fréquences 4000 Hz (2 à 8000 Hz).

<sup>1</sup> Le bruit blanc est composé de toutes les fréquences, chaque fréquence ayant la même énergie. Le nombre de fréquences doublant d'une octave à l'autre, l'énergie croît linéairement de 3 dB par octave.



L'apparition des surdités professionnelles est relativement peu perceptible, pendant un temps relativement long, pour la raison essentielle que les atteintes affectent surtout des fréquences peu usitées. Sur le graphique ci-dessus, on voit bien qu'il faut attendre que les pertes soient très prononcées pour que les déficits audiométriques touchent aussi les fréquences conversationnelles.

- **Les effets indirects** : Les effets des bruits sur les individus ne se cantonnent pas aux seules atteintes aux fonctions auditives. Les bruits, consciemment ou inconsciemment, insupportables provoquent des gênes, des troubles ou des affections nombreuses... La musique, quand elle empêche de dormir, n'adoucit pas les mœurs !

Les effets indirects notables dus aux bruits sont une montée du stress avec des troubles de la régulation de la tension artérielle, des troubles digestifs, des troubles de l'équilibration et de troubles musculaires ; auxquels on peut ajouter une augmentation de la fatigue générale ressentie, de la fatigue nerveuse, de l'agressivité, de l'anxiété et des troubles du sommeil.

Sur le plan professionnel, le bruit crée des conditions d'augmentation de la charge de travail, particulièrement du fait de la pénibilité et de la fatigue éprouvées, de l'augmentation de la charge mentale, des troubles de l'attention et de la mémoire, des gênes en matière de communication, de la sensation d'isolement (surdité ou ports des EPI), des risques accrus d'accident du travail ou de trajet, de la dégradation des relations sociales au travail, en famille ou dans la vie quotidienne, plus largement.

c) **La législation** : La législation relative à la prévention du bruit en milieu de travail repose sur la directive européenne n° 2003/10/CE du 6 février 2003 [http://europa.eu/legislation\\_summaries/employment\\_and\\_social\\_policy/health\\_hygiene\\_safety\\_at\\_work/c11148\\_fr.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/employment_and_social_policy/health_hygiene_safety_at_work/c11148_fr.htm). Ce texte fixe des prescriptions minimales en matière de protection des travailleurs contre les risques pour leur santé et leur sécurité résultants ou susceptibles de résulter d'une exposition au bruit, notamment le risque pour l'ouïe. Cette directive a été transposée en droit français par le décret n° 2006-892 du 19 juillet 2006\* relatif aux prescriptions de sécurité et de santé applicables en cas d'exposition des travailleurs aux risques dus au bruit. Ce décret abroge les articles R. 232-8 à R. 232-8-7 du code du travail, qui concernaient la prévention des risques dus au bruit, et crée une nouvelle section intitulée "Prévention du risque d'exposition au bruit" dans le code du travail (articles R. 231-125 à R. 231-135). Par rapport aux dispositions jusqu'alors en vigueur avant la publication de ce décret, maintenant obsolètes, les principales nouveautés introduites par le décret sont le contenu des mesures de protection collective obligatoires ; l'évaluation des risques liés au bruit ; l'introduction de valeurs limites d'exposition ; l'abaissement des seuils d'exposition déclenchant des actions de prévention.

\*[http://www.legifrance.gouv.fr/jopdf/common/jo\\_pdf.jsp?numJO=0&dateJO=20060720&numTexte=14&pageDebut=10905&pageFin=10908](http://www.legifrance.gouv.fr/jopdf/common/jo_pdf.jsp?numJO=0&dateJO=20060720&numTexte=14&pageDebut=10905&pageFin=10908)

Cette réglementation fixe notamment :

- la valeur limite d'exposition ( $L_{ex}$ ) des travailleurs au bruit à 87 dB (A) et à 200 Pa pour la pression de crête ;
- les valeurs d'exposition supérieures déclenchant l'action à 85 dB (A) et 140 Pa pour la pression acoustique. En cas de dépassement, l'employeur a alors l'obligation de mettre en œuvre des mesures afin de réduire l'exposition au bruit ;
- les valeurs d'exposition inférieures déclenchant l'action à 80 dB (A) et 112 Pa. Si ces seuils sont dépassés, les employeurs sont tenus de mettre à la disposition des travailleurs des protecteurs auditifs individuels et de leur offrir un examen audiométrique préventif.

Elle fixe également certains principes de prévention collective et individuelle.

Le premier principe pour lutter contre le bruit est la protection collective. C'est le moyen le plus efficace, mais aussi le plus difficile à mettre en œuvre techniquement.

Elle permet d'agir dès la conception ou par correction des lieux de travail avec :

- une réduction du bruit à la source (choix de machines plus silencieuses, mise en place d'écrans qui limitent la réverbération, encoffrement des machines bruyantes...);
- le traitement acoustique du local avec des matériaux absorbants ;
- des mesures d'organisation du travail, visant à réduire le temps d'exposition au bruit des salariés ;
- en second lieu, les protections individuelles, qui ne devraient être qu'un appoint de la protection collective, mais demeurent bien souvent pour le salarié, sa seule protection.

Quelques sites sur la législation française et européenne :

<http://www.cotral.com/pdf/LivretLegislation.pdf>

<http://www.bruit.org/legislationbruit.html>

<http://installationsclassees.ecologie.gouv.fr/3-Reglementation-bruit.html>

<http://www.fne-asso.org/fr/themes/question.html?View=entry&EntryID=210>

<http://www.tripalium.com/gazette/Gazette2006/Apge21/caps02.asp>

<http://www.afimbourgogne.free.fr/SEB-4.pps>

<http://www.bruit.fr/FR/info/Directive%20sur%20le%20bruit%20dans%20l%27environnement/0206>

<http://www.qhseclub.com/fr/content/view/2869/3/>

<http://www.cmie.fr/PDF2/DD%20019%20Bruit.pdf>

<http://portaildurisque.iut.u-bordeaux1.fr/bdnuisson.htm>

[http://www.atousante.com/annexes/actualites/exposition\\_au\\_bruit\\_nouveautes\\_reglementaires](http://www.atousante.com/annexes/actualites/exposition_au_bruit_nouveautes_reglementaires)

<http://www.inrs.fr/dossiers/bruit.html>

[http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/IntranetObject-accesParReference/ED%20997/\\$FILE/ed997.pdf](http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/IntranetObject-accesParReference/ED%20997/$FILE/ed997.pdf)

## 2) Nuisances sonores et environnement :

### a) Les bruits de circulation automobile :

Circulaire n° 97-110 du 12/12/97 relative à la prise en compte du bruit dans la construction de routes nouvelles ou l'aménagement de routes existantes du réseau national  
(BO Ministère de l'Équipement n° 331-98/7 du 25 avril 1998)

La réglementation relative au bruit routier a évolué fortement, avec l'adoption de la loi relative à la lutte contre le bruit du 31 décembre 1992 et l'entrée en vigueur de ses textes d'application.

Ces textes, comme ceux de 1978 (circulaire 78-43 du 7 mars 1978) et de 1983 (<http://docinsa2.insa-lyon.fr/these/2002/leclercq/chapitre1.pdf>), sont organisés pour couvrir deux types de situations :

- la construction d'infrastructures routières nouvelles ou transformation d'infrastructures existantes : le décret n° 95-22 du 9 janvier 1995, pris en application de l'article 12 de la loi et l'arrêté du 5 mai 1995 relatif au bruit des infrastructures routières, précisent les règles à appliquer par les maîtres d'ouvrage lors de la construction de voies nouvelles ou l'aménagement de voies existantes ;

([http://www.ineris.fr/aida/?q=consult\\_doc/consultation/2.250.190.28.8.143#Article\\_12](http://www.ineris.fr/aida/?q=consult_doc/consultation/2.250.190.28.8.143#Article_12)),

- la construction de bâtiments à proximité de voies routières existantes : le décret n° 95-21 du 9 janvier 1995, pris en application de [l'article 13 de la loi bruit](#), et les arrêtés du 9 janvier 1995 et du 30 mai 1996 précisent les règles à appliquer pour le classement des voies et les spécifications à respecter par les constructeurs, pour la protection, respectivement, des locaux scolaires et des bâtiments d'habitation qui seront implantés dans des zones exposées au bruit.

La suite du texte : [http://www.ineris.fr/aida/?q=consult\\_doc/consultation/2.250.190.28.8.3415](http://www.ineris.fr/aida/?q=consult_doc/consultation/2.250.190.28.8.3415)

Voir aussi : Portail<sup>@@@</sup> des documentations techniques routières françaises :

[http://dtrf.setra.equipement.gouv.fr/resultats.html?notices=\\_oui&docsPrimaires=\\_oui&typedoc=\\_TO&typedoc=\\_NO&typedoc=\\_DT&typedoc=\\_AT&typedoc=\\_LO&expression=AD23+bruit+projets+routiers&expression\\_op=AND&theme=&periode=entre&depuis=1892&jusqua=&jour=&mois=&an](http://dtrf.setra.equipement.gouv.fr/resultats.html?notices=_oui&docsPrimaires=_oui&typedoc=_TO&typedoc=_NO&typedoc=_DT&typedoc=_AT&typedoc=_LO&expression=AD23+bruit+projets+routiers&expression_op=AND&theme=&periode=entre&depuis=1892&jusqua=&jour=&mois=&an)

Ou encore : réglementation bruits routiers : <http://www.bruit.fr/FR/info/Bruit%20routier/0304>

Les effets des réglementations acoustiques sur l'espace urbain / Jean-Jacques Delétré : <http://docinsa2.insa-lyon.fr/these/2002/leclercq/chapitre1.pdf>

Autres portails : <http://www.dbstop.com/pages/reglementation-2--protection-de-l-environnement.p65.html> ou bien <http://portail.documentation.equipement.gouv.fr/dtrf/resultats.html?depuis=&expression=&jour=&jusqua=&theme=0503>

Guide méthodologique : Production des cartes de bruit stratégiques des grands axes routiers et ferroviaires : <http://docinsa2.insa-lyon.fr/these/2002/leclercq/chapitre1.pdf>

## b) Le bruit dû aux avions :

Les avions sont à la fois des sources sonores de puissance acoustique élevée et pour lesquelles les conditions de propagation des ondes sonores sont favorables. Ce sont deux raisons au moins qui permettent de comprendre pourquoi le bruit des avions est souvent extrêmement gênant.

Du fait de leur déplacement et de l'effet Doppler (<http://effetdoppler.linkfanel.net/>) , la forme du spectre de bruit varie, et, en particulier, le maximum de pression acoustique n'est pas atteint, au même moment, pour toutes les bandes de fréquence.

Pour des raisons de simplification, il est souvent intéressant de ne se préoccuper que de quelques critères de quantification des bruits d'avion :

- la durée pendant laquelle le bruit de l'avion émerge du bruit ambiant ;
- la valeur maximale de pression acoustique ;
- le spectre par bande de fréquence et le spectre en temps réel.

Lorsque l'on se trouve à proximité d'un aéroport, ce qui apparaît très important, c'est la répartition du trafic au moins autant que le bruit plus ou moins fort de tel ou tel type d'aéronef ou même la différence de gêne produite par un avion à hélice ou un biréacteur (éventuellement, pour des niveaux de pression acoustique équivalents).

On définit un indice  $I_p$  ou indice psophique qui correspond à des courbes d'égale gêne sonore : <http://ufcna.com/mesurebruit.html>

- L'indice psophique (indice d'exposition au bruit) doit représenter un indicateur de gêne pour les riverains des aéroports, et donc le niveau de gêne ressentie doit varier en fonction des valeurs de l'indice psophique avec un bon coefficient de corrélation associé.
- L'indice psophique doit être représentatif de la gêne sur une surface importante autour des plates-formes aéroportuaires et donc intégrer les lois d'atténuation du bruit produit par les avions (distances, atmosphère, effet de sol...) de façon à avoir une homogénéité de corrélation indice psophique/gêne quelle que soit la position du riverain autour de l'aéroport.
- L'indice psophique n'a pas pour but de décrire un événement particulier, mais de caractériser une situation moyenne prévue dans un avenir plus ou moins lointain.

Le trafic de nuit est considéré comme 10 fois plus gênant que le trafic de jour. Le nombre de mouvements de nuit est donc pondéré par un facteur 10.

Voir aussi : <http://www.wiziq.com/tutorial/8816-bruit-des-avions>  
[Les Nouveaux Couloirs Aériens en Ile de France](#)

À partir de cet indice  $I_p$ , on définit quatre types d'environnements selon leur exposition au bruit :

[http://www.legifrance.org/affichTexteArticle.do;jsessionid=C45F66296B9B9CC11D44017F6D5B3272.tpdjo02v\\_3?idArticle=LEGIARTI000006850584&cidTexte=JORFTEXT00000512346&dateTexte=19970531](http://www.legifrance.org/affichTexteArticle.do;jsessionid=C45F66296B9B9CC11D44017F6D5B3272.tpdjo02v_3?idArticle=LEGIARTI000006850584&cidTexte=JORFTEXT00000512346&dateTexte=19970531)

Zone A où	$I_p > 96$
Zone B où	$96 > I_p > 89$
Zone C où	$89 > I_p > 84$
Zone D où	$I_p < 84$

Voir indice  $L_{den}$  : <http://www.aeroportbeauvais.com/telecharge.php?nomFichier=PEB.pdf&urlComplete=doc/peb.pdf>

La valeur de l'indice de bruit,  $L_{den}$ , représentant le niveau d'exposition totale au bruit des avions en chaque point de l'environnement d'un aéroport, exprimée en décibels (dB), est calculée à l'aide de la formule ci-après :

$$L_{den} = 101 \text{ g} \frac{1}{24} \left( 12 \times 10^{\frac{L_{day}}{10}} + 4 \times 10^{\frac{L_{evening} + 5}{10}} + 8 \times 10^{\frac{L_{night} + 10}{10}} \right)$$

Avec :

$L_d$  = niveau sonore moyen à long terme pondéré A tel que défini dans ISO 1996-2:1987, déterminé sur l'ensemble des périodes de jour d'une année. La période de jour s'étend de 6 heures à 18 heures ;

$L_e$  = niveau sonore moyen à long terme pondéré A tel que défini dans ISO 1996-2:1987, déterminé sur l'ensemble des périodes de soirée d'une année. La période de soirée s'étend de 18 heures à 22 heures ;

$L_n$  = niveau sonore moyen à long terme pondéré A tel que défini dans ISO 1996-2:1987, déterminé sur l'ensemble des périodes de nuit d'une année. La période de nuit s'étend de 22 heures à 6 heures le lendemain.

La zone de bruit fort A est la zone comprise à l'intérieur de la courbe d'indice  $L_{den}$  70.

La zone de bruit fort B est la zone comprise entre la courbe d'indice  $L_{den}$  70 et la courbe d'indice  $L_{den}$  62. Toutefois, pour les aéroports mis en service avant la publication du décret n° 2002-626 du 26 avril 2002 fixant les conditions d'établissement des plans d'exposition au bruit et des plans de gêne sonore des aéroports et modifiant le code de l'urbanisme, la valeur de l'indice servant à la délimitation de la limite extérieure de la zone B est comprise entre 65 et 62.

La zone de bruit modéré C est la zone comprise entre la limite extérieure de la zone B et la courbe correspondant à une valeur de l'indice  $L_{den}$  choisie entre 57 et 55.

La zone D est la zone comprise entre la limite extérieure de la zone C et la courbe d'indice  $L_{den}$  50

Directive n° 2002/49/CE du 25/06/02 relative à l'évaluation et à la gestion du bruit dans l'environnement : [http://www.ineris.fr/aida/?q=consult\\_doc/consultation/2.250.190.28.8.4455#Annexe\\_I](http://www.ineris.fr/aida/?q=consult_doc/consultation/2.250.190.28.8.4455#Annexe_I)

### **c) Les bruits aériens dus aux établissements classés :**

Les installations classées sont construites, équipées et exploitées de façon à ce que leur fonctionnement ne puisse pas être à l'origine de bruits, transmis par voie aérienne ou solidienne, susceptibles de constituer une nuisance pour le voisinage ou de compromettre la santé ou la sécurité des personnes qui l'occupent ou le fréquentent.

Chaque arrêté d'autorisation doit mentionner les normes d'émission sonores, les points et la fréquence des contrôles acoustiques. La méthode de mesure des émissions sonores est fixée en annexe de [l'arrêté du 23 janvier 1997](#).

Les normes d'émission sonore que doivent respecter les installations soumises à autorisation sont fixées - dans **l'arrêté du 23 janvier 1997** pour les installations nouvelles (arrêté préfectoral pris après le 1er juillet 1997) et les installations existantes faisant l'objet d'une modification autorisée postérieurement au 1er juillet 1997;- dans **l'arrêté du 20 août 1985** pour les autres installations classées existantes.

**L'arrêté du 23 janvier 1997** combine les deux approches "émergence" et "limites d'émission sonore" en accordant une prééminence à l'émergence

L'émergence se définit comme la différence entre les niveaux de pression continue équivalents pondérés A du bruit ambiant (établissement en fonctionnement) et du bruit résiduel (en l'absence du bruit généré par l'établissement); dans le cas d'un établissement faisant l'objet d'une modification autorisée, le bruit résiduel exclut le bruit généré par l'ensemble de l'établissement modifié.

**1)** Pour un niveau de bruit ambiant existant dans les zones à émergence réglementée (incluant le bruit de l'établissement) supérieur à 35 dB(A) et inférieur ou égal à 45 dB(A),**2)** Pour un niveau de bruit ambiant existant dans les zones à émergence réglementée (incluant le bruit de l'établissement) supérieur à 45 dB(A),

L'émergence admissible est :

Niveau de bruit ambiant dans les ZER (incluant le bruit de l'établissement)	Émergence admissible E dB(A)	
	Période 7h - 22 h sauf dimanches et jours fériés	Période 22h - 7h + dimanches et jours fériés
> 35 dB(A) et ≤ 45 dB(A)	6 dB(A)	4 dB(A)
> 45 dB(A)	5 dB(A)	3 dB(A)

Ces règles d'appliquent au bruit global émis par l'ensemble des activités exercées à l'intérieur du périmètre de l'établissement, y compris le bruit émis par les véhicules de transport, les matériels de manutention ou engins de chantier.

Les niveaux admissibles en limite de propriété sont plafonnés pour éviter la création de nouvelles zones trop bruyantes. Ils n'excèdent pas 70 dB(A) pour la période diurne et 60 dB(A) pour la période nocturne, sauf si le bruit résiduel est supérieur à cette limite, dans la période considérée.

L'arrêté crée les "**zones à émergence réglementée**" qui sont figées à partir de l'état de l'urbanisation constaté à la date de l'autorisation.

[http://www.infobruit.com/diapos\\_paris\\_2008/fabien\\_krajcarz.pdf](http://www.infobruit.com/diapos_paris_2008/fabien_krajcarz.pdf)

Ces zones sont :

- l'intérieur des immeubles habités ou occupés par des tiers et leurs parties extérieures éventuelles les plus proches;
- les zones constructibles définies par les documents d'urbanisme publiés;
- l'intérieur des immeubles habités ou occupés par des tiers qui ont été implantés après la date de l'arrêté d'autorisation dans les zones constructibles et leurs parties extérieures éventuelles, à l'exclusion de celles des immeubles implantés dans les zones destinées à recevoir des activités artisanales ou industrielles.

La règle des 200 mètres assure la transition avec les dispositions antérieures applicables. Dans les zones visées ci-dessus qui comportent des parties distantes de moins de 200 mètres de la limite de l'établissement, l'arrêté d'autorisation peut prévoir que les valeurs admissibles d'émergence ne s'appliquent, dans ces parties, qu'au delà d'une distance donnée de la limite de l'établissement. Cette distance ne peut excéder 200 mètres.

[L'arrêté du 20 août 1985](#) établit une "présomption de nuisance" dès lors que l'une des deux conditions suivantes n'est pas respectée:- l'émergence par rapport au niveau sonore initial est supérieure à 3 dB(A);- le niveau de bruit admissible pour la zone considérée est dépassé.

Les niveaux limites de bruit ( $L_{\text{limite}}$ ) à respecter en limite de propriété de l'installation projetée sont calculés à partir d'une valeur de base fixée, pour le champ sonore extérieur, à 45 dB(A)\*, à laquelle on ajoutera les termes correctifs CZ, pour tenir compte du type de zone, et CT, pour tenir compte de la période horaire:

$$L_{\text{limite}} = 45 \text{ dB(A)} + \text{CT} + \text{CZ}$$

**CZ** tient compte du type de zone existant, ou prévisible, au moment de l'implantation de l'installation.

TYPE DE ZONE	CZ en décibels
Zone d'hôpitaux, de repos, aire de protection d'espaces naturels	0
Résidentielle rurale ou suburbaine, avec faible circulation de trafic	+5
Résidentielle urbaine	+10
Résidentielle urbaine ou suburbaine, avec quelques ateliers ou centres d'affaires, ou avec des voies de trafic assez importantes, ou dans les communes rurales : bourgs, villages et hameaux agglomérés	+15
Zone à prédominance d'activités commerciales, industrielles ainsi que les zones agricoles situées en zone rurale non habitée ou comportant des écarts ruraux	+20
Zone à prédominance industrielle	+25

Dans le cas de zones qui ne sont pas visées dans le tableau, le terme correctif CZ est fixé en fonction des circonstances locales, à l'appréciation de l'inspecteur des installations classées mais, de toute façon, compris entre 0 et +25 dB.

**CT** se réfère aux heures de jour (ouvrable), de nuit et intermédiaire (matinée, soirée, jour férié) et tient compte des us et coutumes locaux.

PÉRIODE DE LA JOURNÉE	CT en décibels
Jour (7h00 à 20h00)	0
Période intermédiaire (6h00-7h00 et 20h00-22h00, dimanches et jours fériés : 6h00 à 22h00)	-5
Nuit (22h00 à 6h00)	-10

Les niveaux de bruit seront déterminés aux limites de propriété de l'établissement. Si le bruit émis par l'installation est à caractère impulsionnel, la pondération varie de + 3 dB(A) à + 10 dB(A), suivant le degré d'impulsionnalité du bruit.

d) **Nuisances sonores et habitat** : (extraits de **Centre d'information et de documentation sur le bruit** (<http://www.bruit.fr/FR/info/R%E9glementation/01030100>) :

**Le label « Qualitel » confort acoustique** :

Gages de qualité, les labels qui accompagnent un logement neuf sont décernés aux constructions qui, par leur conception architecturale, les matériaux et les équipements choisis, l'isolation mise en œuvre vont permettre des économies de chauffage et d'entretien, un meilleur confort acoustique, etc. Le contrôle de la conformité d'une construction aux normes prescrites, et la décision d'attribuer ou non le label, est confié à des organismes indépendants.

Afin d'inciter les constructeurs à prendre mieux en considération l'intérêt de l'isolation acoustique des bâtiments d'habitation, l'arrêté modifié du 10 février 1972 a créé un label « confort acoustique ». Ce label a été relayé ultérieurement par le label **Qualitel « confort acoustique »**.

Dans la plupart des domaines acoustiques, la NRA a rendu obligatoires les performances du label associé à l'ancienne réglementation. Dans la mesure où la plupart de ces isolements permettent déjà un certain confort acoustique, l'utilité d'un nouveau label aux exigences nettement plus élevées que ceux de la NRA ne s'est pas imposée. Le label confort acoustique a toutefois été maintenu pour mieux traiter le problème des bruits de chocs, la seule catégorie pour laquelle la NRA est nettement en deçà des pratiques couramment appliquées en France : le label est plus exigeant de 6 dB que la NRA.



Le label Qualitel

Il concerne les logements neufs vendus par un promoteur, les appartements ou maisons individuelles groupées, et est délivré par l'association Qualitel, organisme certificateur composé de représentants des pouvoirs publics, des associations de consommateurs et des organisations professionnelles de la construction.

Le label Qualitel s'intéresse à la qualité d'ensemble de la construction autour de 7 critères :

- le confort acoustique et thermique,
- la maîtrise des charges de chauffage et d'eau chaude sanitaire,
- la pérennité des équipements du logement (plomberie et électricité) et de l'enveloppe extérieure du bâtiment (façades et toitures).

La demande de label Qualitel relève d'une démarche volontaire du promoteur. L'obtenir l'engage à une obligation de résultat : celle de réaliser l'opération en conformité avec les caractéristiques certifiées sur plans. Des contrôles de conformité sont par exemple réalisés par sondage sur les opérations certifiées. L'attribution de la certification Qualitel à votre futur logement autorise votre organisme prêteur «1 % Logement» à vous faire bénéficier d'un dépassement du plafond réglementaire de ce prêt pouvant aller jusqu'à 1 524 €.

### La nouvelle réglementation acoustique

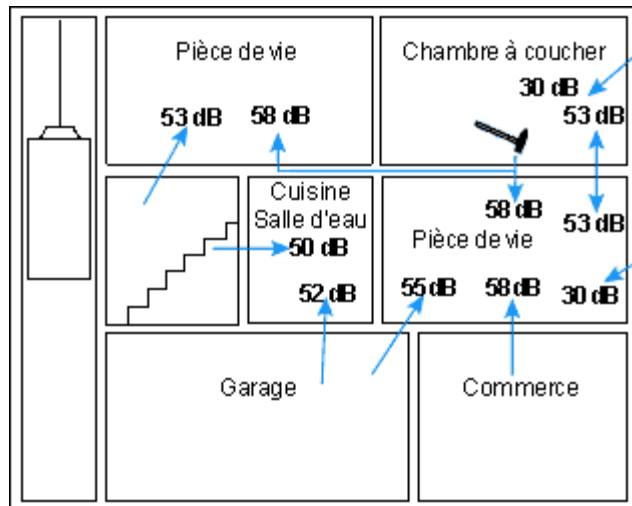
La NRA traduite en "langage européen" a fait l'objet de deux nouveaux arrêtés du 30 juin 1999, applicables depuis le 1er janvier 2000. Comme pour la NRA, un arrêté fixe les exigences, l'autre donne les conditions de mesures et d'interprétation des résultats. Depuis le 1er janvier 2000, tous les pays de la communauté européenne doivent donc utiliser les indices uniques mis au point par le Comité européen de normalisation afin de caractériser les performances acoustiques des produits. Il se trouve que ces indices sont différents de ceux utilisés jusqu'alors en France. C'est la méthode de calcul qui est modifiée, et non la qualité acoustique intrinsèque demandée aux bâtiments.

#### Conséquences des nouveaux indices sur la réglementation

Seules sont modifiées les valeurs réglementaires relatives aux bruits aériens intérieurs et aux bruits d'impact :

*(Niveaux à la réception admissibles)*

Catégorie de bruit	Conséquence sur les valeurs réglementaires
Bruit aérien intérieur (exemple entre 2 pièces principales)	54 dB(A) rose devient 53 dB
Bruits d'impact	65 dB(A) devient 58 dB (Niveau à la réception)
Bruits d'équipement (exemple en pièce principale)	30 dB(A) (non modifié)
Circulations communes	aw inchangé (produits absorbants occupent le 1/4 de la surface au sol)
Bruit aérien extérieur	30 dB(A) route (non modifié)



Nouvelles exigences acoustiques dans les constructions. Indices d'évaluation européens.  
 Isolement acoustique standardisé pondéré  $D_{n,T,A}$  en dB et niveau de pression pondéré du bruit de choc standardisé  $L'_{nT,w}$  en dB

<http://www.bruit.fr/FR/info/R%E9glementation/01030100>

Quelques sites :

Bruit dans l'habitat : <http://ile-de-france.sante.gouv.fr/sante-publique/environnement-et-sante/bruit/reglementation/bruit-dans-l-habitat.html>

[Arrêté du 30 juin 1999 relatif aux caractéristiques acoustiques des bâtiments d'habitation.](#)

[Décret n°95-21 du 9 janvier 1995 relatif au classement des infrastructures de transports terrestres et modifiant le code de l'urbanisme et le code de la construction et de l'habitation](#)

## 2<sup>e</sup> partie : La lutte contre le bruit.

### D) éléments d'acoustique.

#### 1) Introduction.

Le problème de la limitation du bruit ne peut se concevoir que si l'on traite des trois aspects que constituent la source de bruit, le mode de propagation et la nature du récepteur.

- La limitation du bruit à la source est la plupart du temps du ressort du constructeur s'il s'agit d'une machine, d'un outil, d'un appareil, d'un véhicule ou de quelque objet susceptible de faire un bruit en fonctionnant... Cela peut être vrai pour un jouet !

Réduction du bruit à la source sur INRS : [http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/IntranetObject-accesParReference/Dossier%20Bruit/\\$File/Visu.html#ancresActionsAmont](http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/IntranetObject-accesParReference/Dossier%20Bruit/$File/Visu.html#ancresActionsAmont)

Agir sur la source du bruit, c'est-à-dire le plus souvent sur la machine, est le moyen le plus efficace de lutter contre le bruit sur les lieux de travail... Mais c'est aussi le plus rarement mis en œuvre car :

- il est parfois techniquement difficile ;
- il demande parfois la collaboration du constructeur de la machine. Ceux-ci sont encore peu sensibilisés, et rares sont ceux qui possèdent le savoir-faire adapté.

Cependant bien des solutions simples existent. Quelques exemples :

- **une affaire d'ingéniosité** : l'emploi de lames de caoutchouc permettant de freiner la chute d'objets dans un réceptacle réduit fortement le bruit de choc ;
- **un changement de technologie**... qui n'affecte ni les cadences, ni le prix de revient : le rivetage par pression, presque silencieux, qui remplace le rivetage par choc, très bruyant ;
- **des matériaux nouveaux** : l'emploi de tôles amorties pour les structures métalliques d'une machine permet de réduire l'émission sonore due aux vibrations internes ;
- **des dispositifs spécifiques** tels que les silencieux d'échappement ou d'écoulement.

Lors de l'achat d'une machine ou d'un outil bruyant, il faut prendre en compte la protection des travailleurs. Il faut en particulier préciser dans le cahier des charges que le niveau de bruit doit être aussi bas que techniquement possible.

Lorsque la source est constituée par une file de véhicules sur une route, le niveau de bruit étant dépendant du débit de circulation, il peut être possible de réfléchir à un plan de circulation, par exemple.

- Les actions sur le récepteur sont également assez limitées. Sur les lieux de travail, elles relèvent du port d'EPI adaptés (bouchons d'oreille, casques antibruit). Ailleurs, elles peuvent concerner des actions comportementales volontaires comme baisser le niveau d'écoute d'un baladeur, porter des protections au cours de certains concerts bruyants, pour jouer de la musique ou

pour bricoler chez soi... Il est bien évident que l'on ne peut guère proposer de tels équipements pour lutter contre les niveaux excessifs de bruit des avions quand on habite à proximité d'un aéroport, des trains s'il l'on est près d'une voie TGV, ou des voitures et camions si l'on côtoie une autoroute, etc.

- C'est en fait et surtout sur le plan de la propagation que l'on peut agir parfois pour lutter contre les bruits importants et gênant. Si les moyens d'agir sur la propagation sont assez nombreux et variés, il arrive souvent, malheureusement, qu'ils soient difficiles à mettre en œuvre, soit techniquement, soit financièrement.

Du point de vue de la propagation, il est nécessaire de distinguer entre :

- les bruits aériens qui, dès le départ, provoquent un ébranlement de l'air autour de la source de bruit ;
- les bruits d'impact qui ont leur origine dans l'excitation directe d'une paroi par une force. On parle de conduction solide ou de propagation solidienne.

Action sur la propagation du bruit : [http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/IntranetObject-accsParReference/Dossier%20Bruit/\\$File/Visu.html#ancresActionsAmont](http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/IntranetObject-accsParReference/Dossier%20Bruit/$File/Visu.html#ancresActionsAmont)

#### ■ L'éloignement

Dans certains cas, on peut éloigner les travailleurs des zones les plus bruyantes, au moins pendant une partie de la journée. En effet, le niveau de bruit baisse avec l'éloignement, surtout en cas de travail à l'extérieur ou si les parois absorbent efficacement les sons. On peut aussi faire tourner les travailleurs entre des postes bruyants et non bruyants ou déplacer des équipements bruyants.

#### ■ Le traitement acoustique du local

On peut revêtir les parois du local - le plafond, mais aussi les murs et les cloisons - d'un matériau possédant la propriété d'absorber fortement le son. L'efficacité de cette technique est cependant limitée aux zones éloignées des sources de bruit. Elle ne permet donc pas de réduire le bruit aux postes de travail de machines bruyantes.

#### ■ Le cloisonnement des machines

Cloisonner c'est séparer l'ensemble des sources de bruit des opérateurs par la mise en place d'une paroi hermétique.

#### ■ Les encoffrements de machines

Un encoffrement est une boîte présentant un isolement phonique élevé, à l'intérieur de laquelle est placée la machine bruyante.

Solution de plus en plus souvent mise en œuvre, elle est efficace si :

- la machine est automatique ou nécessite peu d'interventions manuelles ;
- l'encoffrement fait l'objet d'un entretien minutieux.

Mais un joint de panneaux, de porte, défectueux peut faire chuter fortement l'efficacité d'un encoffrement. Il faut aussi penser au traitement acoustique des ouvertures de cet encoffrement (mise en place de tunnels acoustiques aux accès).

#### ■ Les écrans acoustiques

La réduction du niveau sonore apportée par l'écran à quelques mètres derrière lui n'excède jamais quelques décibels et n'atteint 6 dB(A) que si le local a été préalablement rendu absorbant par un traitement acoustique de ses parois. Les boxes formés par 3 écrans permettent d'isoler des postes de travail bruyants, surtout s'ils sont associés à un traitement acoustique du plafond.

## 2) Propagation et absorption du bruit en champ libre :

[http://www.grenoble.archi.fr/enseignement/cours/atienza/RA02-champ\\_libre.pdf](http://www.grenoble.archi.fr/enseignement/cours/atienza/RA02-champ_libre.pdf)

En l'absence de toute dégradation de l'énergie acoustique dans le milieu où elles se propagent, l'intensité d'une onde plane reste constante tandis que celle d'une onde sphérique décroît comme l'inverse du carré du rayon.

Dans les faits, la propagation du son s'accompagne toujours d'une dissipation d'énergie sous forme de chaleur. Dans l'air, cette dissipation est liée à la viscosité, à la relaxation moléculaire ou bien encore à la conduction calorifique.

Dans les solides, des phénomènes équivalents conduisent également à une dégradation de l'énergie acoustique.

Pour les ondes planes et sphériques, la perte d'intensité acoustique liée à ces phénomènes est proportionnelle à l'intensité acoustique qui règne au point considéré. Autrement dit, l'intensité acoustique est réduite de façon exponentielle au cours de sa propagation

En considérant, les niveaux de pression, on a :

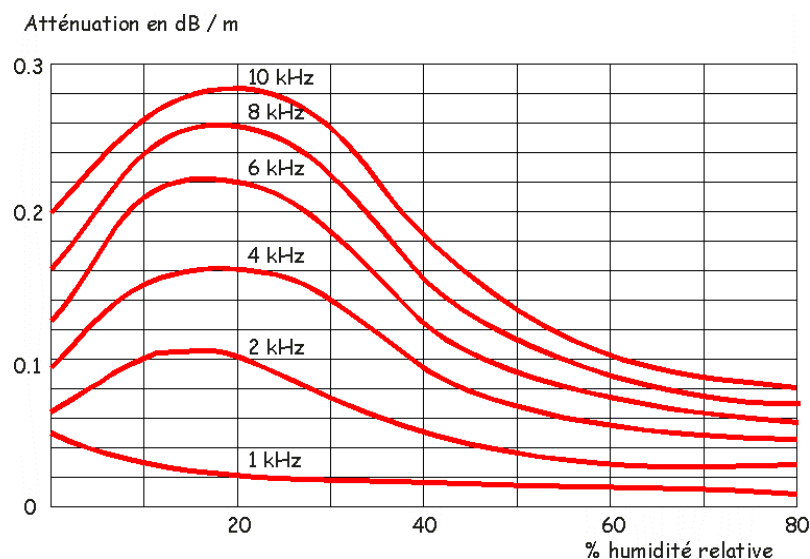
Pour une onde plane =>  $L(x) = L(x_0) - a(x-x_0)$

Pour une onde sphérique =>  $L(r) = L(r_0) - 20 \log \frac{r}{r_0} - a(r-r_0)$

Où L est le niveau de pression ou d'intensité et a correspond au nombre de décibels perdus par mètres parcourus.

**a) L'absorption dans l'air :** L'atténuation des sons dans l'air est fonction :

- de la fréquence des sons considérés ;
- du taux d'humidité relative ;
- de la température.



Les sons de fréquence élevée sont mieux absorbés que les sons de basse fréquence. Cela explique pourquoi, lorsque l'on s'éloigne d'un orchestre, on finit par ne plus entendre que les basses.

À une température donnée, il existe un taux d'humidité relative pour lequel l'absorption passe par un maximum. Ainsi les sons les plus aigus sont d'autant plus atténués que l'air est plus sec.

**b) L'atténuation géométrique :** L'atténuation géométrique est due au fait que la puissance rayonnée par une source se dissipe dans l'espace. On distinguera les sources ponctuelles (ondes sphériques) et les sources linéaires.

- **Les sources ponctuelles émettant des ondes sphériques :** Il y a une relation entre la puissance de la source  $W$  et l'intensité en un point à la distance  $r$  de cette source :

$$W = \int I \, dS = 4\pi r^2 \quad \text{d'où} \quad I(r) = \frac{W}{4\pi r^2}$$

L'énergie totale traversant la surface sphérique est la puissance de la source.

[http://www.audiocontact.fr/guides\\_fiches/propagation\\_des\\_ondes\\_sonores\\_part2.pdf](http://www.audiocontact.fr/guides_fiches/propagation_des_ondes_sonores_part2.pdf) (pages 4 et suivantes).

Considérons deux points distants de  $r_1$  et  $r_2$  de la source, on a :

$$I_2/I_1 = r_1^2 / r_2^2$$

Supposons le cas où  $r_2 = 2.r_1$

$$I_2/I_1 = 1 / 4 \text{ d'où}$$

$$L_1 - L_2 = 10 \log 4 = 6 \text{ dB}$$

À chaque fois que l'on double la distance à la source, dans le cas des ondes sphériques, le niveau d'intensité est réduit de 6 dB.

- **Les sources linéaires de grande longueur** (tuyauteries, files de voitures, trains, etc.)

Dans ces cas, les surfaces d'onde sont cylindriques. Si la longueur du cylindre est suffisamment grande, l'énergie qui traverse les deux bases du cylindre est négligeable. L'énergie totale qui traverse la surface cylindrique est la puissance de la source :

$$W = \int I dS = I \cdot 2\pi \cdot r \cdot l$$

$$I_2/I_1 = r_1 / r_2$$

Si  $r_2 = 2 r_1$

$$I_2/I_1 = 1 / 2 \text{ d'où}$$

$$L_1 - L_2 = 10 \log 2 = 3 \text{ dB}$$

Lorsque l'on double la distance à la source, dans le cas des ondes sonores cylindriques, le niveau d'intensité est réduit de 3 dB.

Dans le cas des ondes planes, on se rappellera qu'il n'y a pas d'atténuation.

### 3) Propagation et absorption du bruit en présence d'obstacles :

#### a) Absorption et transmission par une paroi :

[http://www.bruit.fr/docs/A2\\_domaines\\_acoustique\\_batiment.pdf](http://www.bruit.fr/docs/A2_domaines_acoustique_batiment.pdf)

Les ondes acoustiques qu'elles soient réverbérées à l'intérieur d'un local ou qu'elles frappent la façade d'un immeuble, soumettent les parois qu'elles rencontrent à des forces normales dont l'amplitude et la phase peuvent varier, à un instant donné, d'un point à un autre. Sous l'effet de ces forces, ces parois s'animent de mouvements vibratoires qui se transmettent à l'air environnant et aux parois adjacentes.

Dans un local isolé de la source par une paroi de séparation, le bruit résulte donc du mouvement de cette paroi et de ceux des autres parois solidaires de cette dernière. En plus de cette transmission inévitable du son, il peut exister des transmissions, accidentelles ou non, dues à des ouvertures laissant passer librement les sons ou à des conduits qui les canalisent.

Isolation acoustique @@@ : <http://www.acouphile.fr/>

[http://www.curbain.be/fr/renovation/information/notionsdacoustique\\_IAC.php](http://www.curbain.be/fr/renovation/information/notionsdacoustique_IAC.php)

[http://www.cg59.fr/hebergement-touristique-durable/telechargement/p51-memento\\_confortacoustique.pdf](http://www.cg59.fr/hebergement-touristique-durable/telechargement/p51-memento_confortacoustique.pdf)

<http://www.structura-tunisie.com/acoustique.ppt>

**b) Le son dans les solides :** Alors que dans un gaz les vibrations ne se propagent que sous la forme d'ondes longitudinales, encore appelées ondes de compression - dilatation pour bien insister sur le fait qu'elles s'accompagnent d'une variation de volume et que les vitesses des particules sont dans le même sens que celui de la propagation de l'onde, dans les solides homogène, toute déformation peut donner lieu à deux types d'ondes : des ondes longitudinales et des ondes transversales.

- **Les ondes longitudinales :** Elles sont semblables à celles qu'on observe dans les gaz et obéissent aux mêmes lois.

<http://pagesperso-orange.fr/guy.chaumeton/ts01ph.htm>

[http://perso.univ-lemans.fr/~cpotel/interaction\\_fluide\\_solide\\_isotrope.html](http://perso.univ-lemans.fr/~cpotel/interaction_fluide_solide_isotrope.html)

[http://www.lyc-cordouan.ac-poitiers.fr/physique/IMG/pdf\\_P1\\_ondes\\_progressives\\_eleves.pdf](http://www.lyc-cordouan.ac-poitiers.fr/physique/IMG/pdf_P1_ondes_progressives_eleves.pdf)

<http://www.lycee-militaire-aix.fr/professeurs/tirandaz/TS/Physique/Cours/1%20ondes%20mecaniques%20progressives.pdf>

<http://ead.univ-angers.fr/~chaussed/webstu2/partie1/CH3/CH3.pps>

- **Les ondes transversales :** Pour ces ondes, le vecteur vitesse est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde. Le passage de l'onde s'accompagne d'une onde de cisaillement sans variation de volume.

Dans les solides de dimension usuelle, on peut observer des ondes longitudinales non accompagnées d'ondes transversales, mais aussi des ondes transversales pures. Le plus fréquemment, **les ondes sont composites :**

- **Les ondes de flexion :** Ce sont des ondes qui se déplacent dans une barre ou une plaque mince lorsque l'on soumet ces dernières à des forces perpendiculaires à l'axe de la barre ou au plan de la plaque. Ces ondes qui résultent de la composition d'ondes transversales et longitudinales font onduler le solide comme un serpent.

Développement d'un outil d'aide à la conception acoustique d'encoffrements de machines  
<http://www.irsst.qc.ca/files/documents/PubIRSST/R-619.pdf>

- **Les ondes de surface, ondes de Love, ondes de Rayleigh :**

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Onde\\_sismique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Onde_sismique)

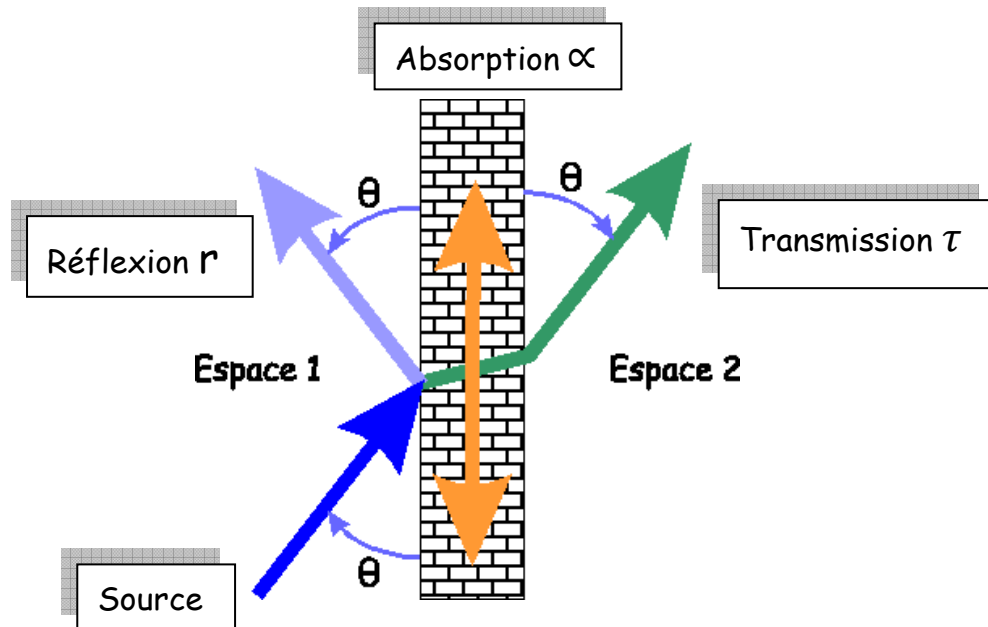
Les ondes de flexion n'existent, sous une forme pure, que si la barre ou la plaque sont minces. Dans le cas contraire, les ondes de flexion sont accompagnées d'ondes de surface. On parle d'ondes de surface parce que c'est en surface que ces ondes se propagent ; elles disparaissent rapidement en profondeur dans le matériau. Les ondes de surface ne jouent pas un rôle essentiel en isolation

acoustique, cependant elles sont importantes à considérer dans les phénomènes de transmission des vibrations par le sol.

Une application : les écrans tactiles à ondes sonores de surface...  
<http://www.clubic.com/actualite-90786-tables-tactiles-ondes-sonores.html>

**c) La transmission du son par une paroi simple :** On définit une paroi simple comme une paroi composée par un seul type de matériau (parpaing, brique, bois, verre, etc.) et dont les faces peuvent être enduites.

Lorsqu'une onde sonore, provenant de l'espace 1, frappe une paroi simple, non élastique, avec un angle d'incidence  $\theta$ , une partie de l'onde est transmise dans l'espace 2 selon le même angle  $\theta$  ; une partie de l'onde est réverbérée dans l'espace 1, avec un déphasage de  $180^\circ$  et une partie de l'onde est dissipée dans la paroi.



Toute paroi est donc caractérisée par trois coefficients :

- le coefficient de réflexion  $r$  qui est le rapport de l'énergie réfléchiée à l'énergie incidente :  

$$r = I_r / I_i$$
- le coefficient de transmission  $T$  qui est le rapport de l'énergie transmise à l'énergie incidente :  

$$\tau = I_\tau / I_i$$
- le coefficient d'absorption  $\alpha$  qui est le rapport de l'énergie absorbée à l'énergie incidente :  

$$\alpha = I_\alpha / I_i$$

La somme :  $r + \tau + \alpha = 1$ , autrement dit la totalité de l'énergie incidente est transformée en ces trois énergies réfléchiée, transmise et absorbée.

[http://www.lafarge-platres.fr/suppliers/lafarge/docstore\\_pdm/Documentation/dp\\_sy\\_mem2004\\_02\\_01.pdf](http://www.lafarge-platres.fr/suppliers/lafarge/docstore_pdm/Documentation/dp_sy_mem2004_02_01.pdf)

On définit l'indice d'affaiblissement acoustique R d'une paroi comme :

<http://nicole.cortial.net/acoustique/acoustique-ch4-resume.pdf>

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau}$$

Pour les parois usuelles que l'on trouve le plus souvent dans les bâtiments (parois non poreuses) et à la condition que  $\theta$  ne soit pas égal à  $90^\circ$ , on donne R sous la forme :

$$R = 20 \log \frac{m \omega \cos \theta}{2 \rho_0 c}$$

Où m est la masse surfacique de la paroi (en kg par  $m^2$ ) ;  $\omega = 2\pi f$  (f est la fréquence de l'onde incidente) ;  $\rho_0 c$  est l'impédance acoustique de l'air en kg par  $m^2$  et par seconde. [http://www.acoustique-materiaux.net/materiaux/classement\\_p/poids\\_surf.htm](http://www.acoustique-materiaux.net/materiaux/classement_p/poids_surf.htm)

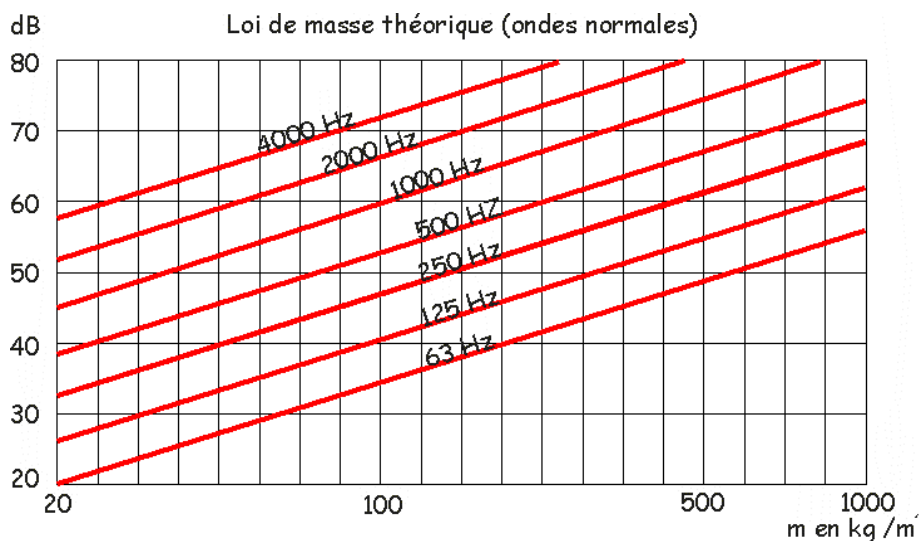
R est appelée loi de masse théorique. Cette loi s'écrit aussi empiriquement (pour des ondes incidentes autres que normales) :

$$R = 20 \log (m f) - 48 \text{ dB}$$

On peut montrer qu'une paroi dénuée d'élasticité est d'autant plus isolante qu'elle est plus lourde. Doubler la masse d'une paroi revient à accroître R de 6 dB.

On remarquera aussi que l'indice d'affaiblissement croît à raison de 6 dB par octave. Autrement dit les sons graves sont mieux transmis que les sons aigus.

Enfin, l'indice d'affaiblissement décroît lorsque l'angle d'incidence augmente. Les ondes rasantes sont donc mieux transmises que les ondes normales. (On verra plus loin l'intérêt que peuvent représenter la mise en place de reliefs sur les parois de manière à augmenter la probabilité d'obtenir des ondes normales à la paroi de manière à diminuer considérablement la transmission).



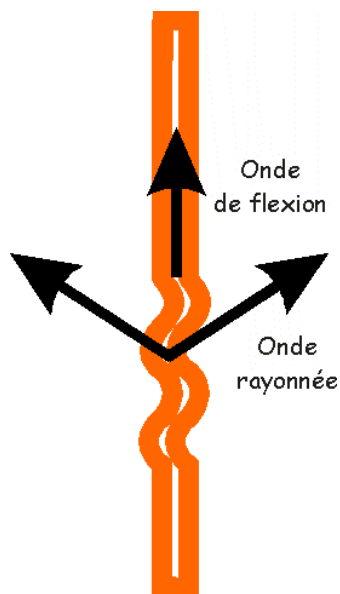
Dans la réalité, il n'existe pas de paroi « parfaite ». D'abord, les parois qui séparent deux espaces peuvent ménager des ouvertures (portes, fenêtres, etc.) ; ensuite parce que les parois comportent des ancrages avec les éléments voisins (autres parois verticales, sols et plafonds). Cela a pour effet de permettre l'extension de toute déformation ponctuelle d'une paroi à tout l'ensemble solidarisé.

En outre, et hormis les murs en béton banché, en briques pleines ou en agglos pleins, qui sont des parois homogènes, les autres types de parois sont plus ou moins élastiques. Il faut donc intégrer cette particularité.

Ainsi, lorsqu'une paroi plane et mince (briques creuses, poutrelles et hourdis, Placoplatre, etc.) est parcourue par des ondes de flexion se propageant dans une seule direction, elle donne naissance à des ondes planes aériennes de direction déterminée : le rayonnement se faisant des deux côtés de la paroi de manière symétrique.

Transmission du son à travers les éléments du bâtiment :

<http://www.nrc-cnrc.gc.ca/fra/idp/irc/rsb/85-transmission-son.html>



La variation de la loi de masse est une fonction de la fréquence, particulièrement dans les zones de fréquence de résonance et à une fréquence  $f_c$ , dite fréquence critique qui dépend de l'épaisseur de la paroi, de sa masse volumique et de son élasticité.

Une paroi parcourue par des ondes de flexion ne rayonne que si  $f > f_c$ .

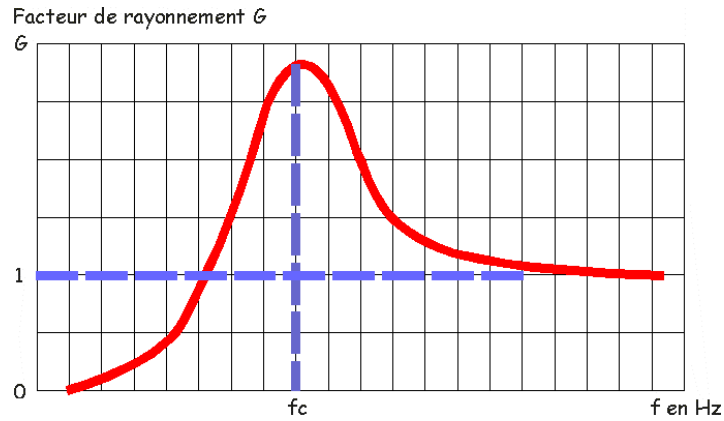
Voir aussi : Coïncidence

<http://www.fr.rockwool.be/physique+du+b%C3%A2timent/acoustique/co%C3%AFncidence>

Pratiquement on peut affirmer qu'une paroi parcourue par des ondes libres :

- rayonne normalement lorsque la fréquence des ondes qui la parcourent est supérieure à  $f_c$  ;
- rayonne fortement aux fréquences voisines de  $f_c$  ;
- rayonne peu ou plus du tout aux fréquences inférieures à  $f_c$ .

$f_c$  est donnée par  $f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{B}}$  où  $m$  = masse surfacique et  $B$  = rigidité de la paroi.

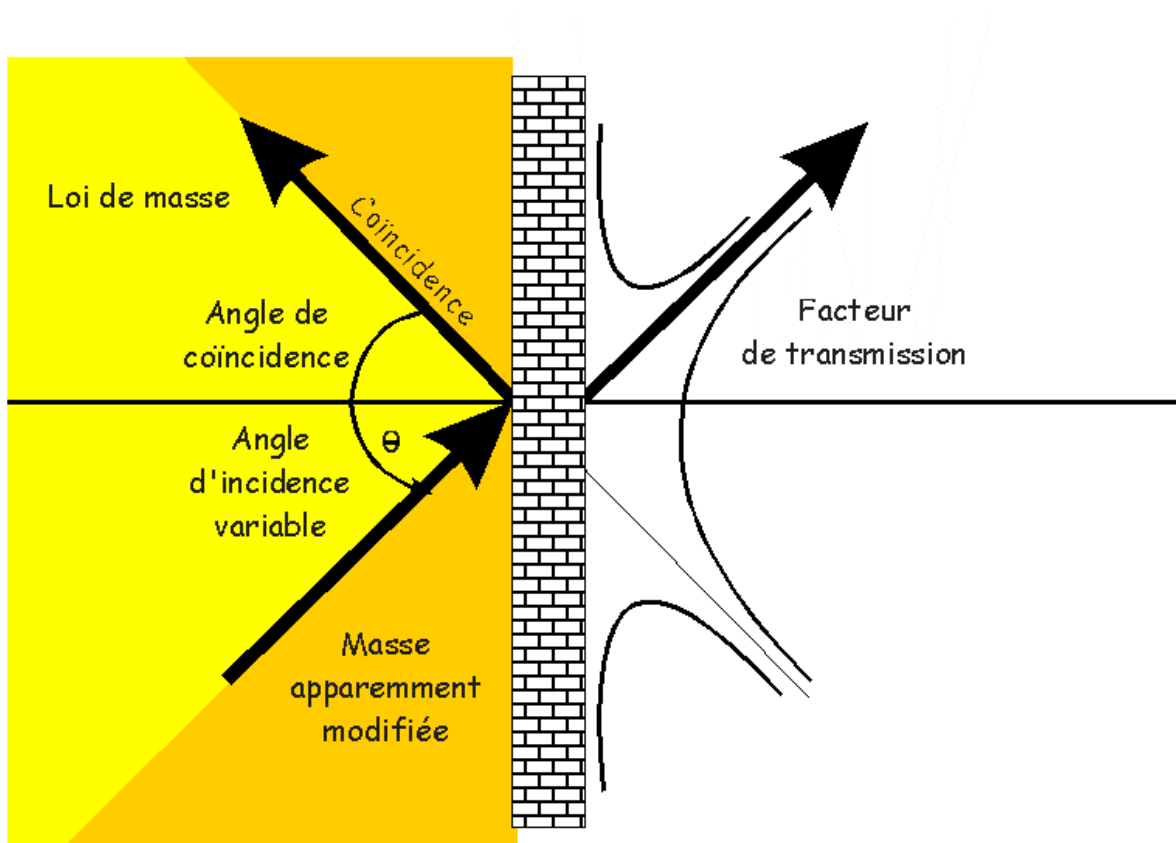


Facteur de rayonnement d'une paroi de dimension finie parcourue par des ondes de flexion.

Autrement dit, une paroi élastique va renforcer la transmission des ondes aériennes du fait des ondes forcées au voisinage de  $f_c$  (résonance d'oscillateur entretenue). On dit qu'il y a coïncidence entre les ondes aériennes et les ondes libres. (<http://www.fr.rockwool.be/physique+du+b%C3%A2timent/acoustique/co%C3%AFncidence>).

L'influence de l'élasticité est alors très néfaste au pouvoir d'isolation de la paroi.

En outre, l'angle d'incidence intervient également :



Comportement d'une paroi, à fréquence constante, sous l'effet d'ondes planes d'incidence variable.

Lorsque la fréquence des ondes incidentes est supérieure à la fréquence critique et tant que l'angle d'incidence est inférieur à l'angle de coïncidence, la paroi se comporte comme si elle était dénuée d'élasticité, autrement formulé : seule sa masse intervient.

Pour l'angle de coïncidence, il y a résonance. L'indice d'affaiblissement diminue. Pour les angles supérieurs, la paroi réagit à la fois par sa masse et son élasticité... Si  $f$  est suffisamment grande par rapport à  $f_c$ , l'action de l'élasticité peut renforcer celui de la masse.

Lorsque la fréquence des ondes incidentes est inférieure à  $f_c$ , la paroi se comporte comme si elle n'était pas élastique, quel que soit l'angle d'incidence.

Quelques sites :

Mémento technique du bâtiment : confort acoustique

[http://www.cnrs.fr/aquitaine-limousin/IMG/pdf/Confort\\_Acoustique.pdf](http://www.cnrs.fr/aquitaine-limousin/IMG/pdf/Confort_Acoustique.pdf)

Un remarquable cours : <http://nicole.cortial.net/acoustique.html> qui se décline en quatre chapitres :

Généralités sur le son : <http://nicole.cortial.net/acoustique/acoustique-ch1-resume.pdf>

Caractéristiques énergétiques du son : <http://nicole.cortial.net/acoustique/acoustique-ch2-resume.pdf>

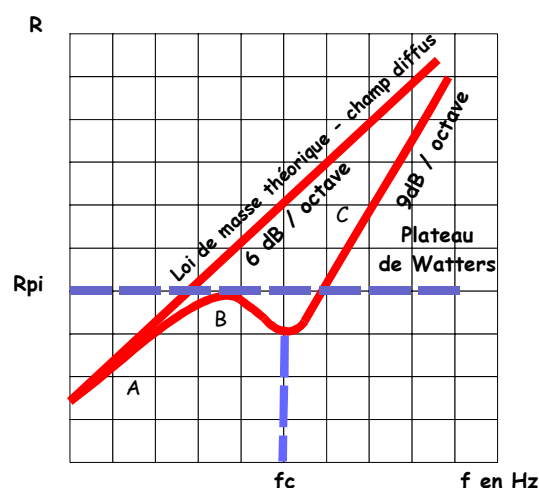
Éléments d'acoustique architecturale : <http://nicole.cortial.net/acoustique/acoustique-ch3-resume.pdf>

Isolation acoustique des locaux : <http://nicole.cortial.net/acoustique/acoustique-ch4-resume.pdf>

Normes acoustiques exigibles dans les logements neufs : [http://www.ab-acoustique.com/Textes%20g%E9n%E9raux/Reglement\\_acous\\_batiment.html](http://www.ab-acoustique.com/Textes%20g%E9n%E9raux/Reglement_acous_batiment.html)

Acoustique et vitrage : [http://www.energieplus-lesite.be/energieplus/page\\_10445.htm](http://www.energieplus-lesite.be/energieplus/page_10445.htm)

d) La transmission d'un champ diffus : Jusqu'à maintenant, nous n'avons envisagé que les cas de transmission d'ondes planes. En réalité, une paroi est plus souvent soumise à ce que l'on appelle un champ diffus d'ondes. Un tel champ doit être apprécié comme équivalent à un champ composé d'une infinité d'ondes planes de même amplitude, mais d'incidence et de phase quelconques.



**e) Les effets d'écran :** Lorsqu'un observateur se place à l'ombre acoustique d'un écran par rapport à une source sonore, il continue à percevoir les sons, particulièrement ceux qui sont diffractés par l'arête de l'écran.



[Essayez...](#)

<http://www.universal-soundbank.com/mp3/sounds/1459.mp3>

Étonnant, non ?

Sans entrer dans les détails, il convient de signaler que l'efficacité des écrans reste assez limitée.

Cette efficacité dépend, d'une part d'un grand nombre de facteurs non propres à l'écran lui-même, comme la température, la vitesse ou le degré d'humidité de l'air ; de l'effet de sol selon qu'il est plus ou moins réfléchissant ou absorbant... La réflexion ou l'absorption ne dépendant pas seulement de la nature du sol, mais aussi des conditions atmosphériques, saisonnières ou écologiques, etc. Enfin, les écrans ne peuvent pas être infiniment longs ou infiniment hauts.

Pour être efficaces, les écrans n'ont pas besoin d'être lourds. Le bois, le verre ou le plastique peuvent être utilisés. La présence d'écrans absorbants ou réfléchissants peut apporter un mieux. Contrairement à certaines idées reçues, la végétation ne fait jamais un très bon écran, pas même en forte épaisseur. Pour s'en convaincre, on écouterait le bruit des tronçonneuses ou celui des cors de chasse afin de mesurer combien la forêt peut porter les sons.

Protection contre les bruits aériens selon ISO 140, B3, 48 dB conformément à la norme EN 1793 : <http://www.rieder.at/de/at/download.html?fileID=10>

Écrans acoustiques :

<http://www.bruit.fr/FR/info/Ecrans%20acoustiques/0207>

[http://www.infobruit.com/articles/ecrans\\_acoustiques.pdf](http://www.infobruit.com/articles/ecrans_acoustiques.pdf)

#### 4) Intensité en présence de parois réfléchissantes :

a) **Le coefficient de directivité** : La puissance  $W$  d'une source ponctuelle isotrope\* est donnée par :

$$W = 4\pi r^2 I \quad \text{d'où } I = \frac{W}{4\pi r^2} \times 1$$

La source rayonne au travers d'une sphère.

[\*Le coefficient de directivité est défini par référence à une source ponctuelle isotrope rayonnant en champ libre, lequel est réalisé lorsque l'on place la source sonore tout en haut d'un mat, loin du sol ou mieux encore, en l'installant dans une chambre anéchoïque (voir NF 31-025 et NF 31-026).  
[http://www.serga.fr/pdf/fiche\\_anechoique.pdf](http://www.serga.fr/pdf/fiche_anechoique.pdf)

Si la source est placée devant une paroi réfléchissante, elle rayonne au travers d'une demi-sphère.

$$W = 2\pi r^2 I \quad \text{d'où } I = \frac{W}{4\pi r^2} \times 2$$

Si la source est placée à l'intersection de deux parois, elle rayonne au travers d'un quart de sphère :

$$W = \pi r^2 I \quad \text{d'où } I = \frac{W}{4\pi r^2} \times 4$$

Si la source est placée dans un angle formé par trois parois, elle rayonne au travers d'un huitième de sphère :

$$W = \frac{1}{2} \pi r^2 I \quad \text{d'où } I = \frac{W}{4\pi r^2} \times 8$$

Les facteurs 1, 2, 4, 8, sont les facteurs ou coefficients de directivité  $Q$ . D'une manière générale, on écrit :

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \times Q$$

En niveau sonore, on obtient :

$$L_p = L_i = L_w + 10 \log Q - 20 \log r - 11$$

## 5) Propagation du son en espace clos :

a) **Les modes de résonances propres aux locaux :** Jusqu'à présent nous avons vu comment le son se propageait à partir d'une source sonore dans un champ libre. Nous avons également envisagé quelques cas simples où le son rencontrait des obstacles (parois, écrans). Nous allons maintenant envisager le cas où la source est placée dans un espace clos et donc, où les ondes émises rencontrant des obstacles sont réverbérées, puis rencontrent à nouveau des obstacles, sont réverbérées et ainsi de suite.

Dans un local, après la mise en route d'une source et après que quelques réflexions se soient produites, la pression acoustique qui règne en un point est la résultante des pressions d'ondes qui ont été émises à des instants différents et qui, au moment de l'observation, passent au point considéré de mesurage ou d'écoute.

Lorsque ces ondes sont en très grand nombre, elles ont des intensités comparables et proviennent de toutes les directions de l'espace en quantité égales, on dit que le champ acoustique est diffus.

<http://www.duanrevig.com/excel/Champ%20direct%20et%20champ%20diffus.pdf>



Le son produit en un point du local par une source intérieure au local peut être décomposée en deux impulsions : une impulsion directe et des impulsions réfléchies. Le rapport de l'une aux autres joue un grand rôle dans la qualité acoustique des locaux.

Par exemple, une première impulsion réfléchiée d'une intensité comparable à l'impulsion directe, mais décalée de plus de 30 ms donnera une impression d'écho. La vitesse avec laquelle décroît le fond sonore constitué par la superposition de la multitude d'impulsions réfléchies a aussi beaucoup d'importance pour l'acoustique d'une salle. Ainsi, dans une salle de conférence où la décroissance serait lente (grande réverbération), la queue des syllabes émises a tendance à masquer les syllabes suivantes et la compréhension du discours est difficile.

Une source sonore n'émet que très rarement une seule impulsion. Généralement, le son est entretenu, c'est-à-dire qu'il a un **caractère permanent**.

Sous l'effet de l'ébranlement provoqué par la source sonore en fonctionnement continu, l'air contenu dans le local se met à vibrer dans son ensemble. En général, ces vibrations sont complexes et résultent de la superposition d'un plus ou moins grand nombre de modes de résonances propres au local. Chaque mode de résonance du local s'explique par le fait qu'une onde acoustique se retrouve, après un parcours plus ou moins complexe dans le local, à son point de départ. On dit alors que **l'onde est stationnaire**.

<http://www.u-bourgogne.fr/PHYSIQUE/OndeStat/OndeStat.html#lien4>

Tant que la source fonctionne, les résonances ont lieu aux fréquences de la source. On dit que les **oscillations sont forcées**.

[http://www.pedagogie.ac-nantes.fr/17229312/0/fiche\\_ressourcepedagogique/&RH=PHY](http://www.pedagogie.ac-nantes.fr/17229312/0/fiche_ressourcepedagogique/&RH=PHY)

Dès que la source est coupée, les **oscillations sont libres**.

<http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/gtulloue/Meca/Oscillateurs/ressort.html>

Elles ont une fréquence indépendante de celle de la source, ce sont les **fréquences propres de résonance**. Lorsqu'elles sont libres, les oscillations s'amortissent au cours du temps de manière exponentielle avec un facteur d'amortissement dépendant du pouvoir d'absorption des parois, du mobilier, de l'air, des occupants dans la pièce, etc.

Qu'elle soit libre ou forcée, une résonance se traduit par une pression acoustique dans le local ayant la fréquence de l'oscillation et une amplitude variable selon les points du local. En certains points, l'amplitude est maximale, ce sont les ventres de pression. En d'autres, elle est minimale, ce sont les nœuds de pression. Les parois sont souvent le lieu où siègent les ventres de pression, mais des ventres de pression peuvent parfaitement exister à l'intérieur du local.

**b) Intensités sonores dans un local :** On distinguera l'intensité directe et l'intensité réverbérée.

- L'intensité directe est donnée par :  $I_d = \frac{W}{4\pi r^2} \times Q$

- L'intensité réverbérée est l'intensité reçue après plusieurs réflexions sur les parois d'un local. Cette intensité est d'autant plus forte que la source est plus puissante et que les parois sont plus réfléchissantes.

On montre que  $I_r = 4W / R_l$  où  $R_l$  est le facteur d'absorption du local. C'est une fonction de l'absorption des parois et de leur surface. Pour évaluer ce facteur d'absorption, on peut soit identifier les matériaux, soit mesurer le temps de réverbération du local.

- L'intensité totale  $I = I_d + I_r$  d'où :

$$I = W \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R_l} \right)$$

Soit en niveau :

$$L_i = L_w + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R_l} \right)$$

- **L'intensité moyenne :** On la mesure dans la zone réverbérée du local. C'est la zone qui est suffisamment éloignée de la source pour que l'intensité réverbérée soit nettement plus grande que l'intensité directe. On admet généralement comme limite que l'intensité réverbérée soit plus grande que quatre fois l'intensité directe.

Dans la zone réverbérée, le niveau ne varie que très faiblement et on appelle intensité moyenne celle qui est déterminée à partir de quelques mesures effectuées dans la zone réverbérée. **Attention, on fait la moyenne des intensités, pas la moyenne des niveaux !**

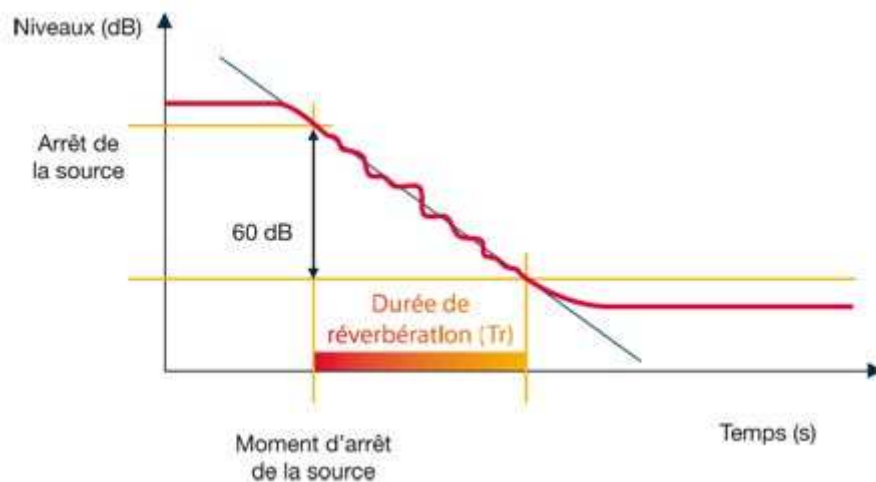
- **Le temps de réverbération :** Le temps de réverbération d'un local désigne l'intervalle de temps  $T$  nécessaire à la diminution du niveau de pression sonore de 60 dB lorsque la source émettrice est brusquement arrêtée.

[http://www.bbri.be/antenne\\_norm/akoestiek/fr/frnl\\_medias/mvd\\_cours\\_batiment/cours2009-2010/090922%20Cours%20Acoustique%20Batiment%20-%20CHAP02%20-%20Reverberation%20et%20absorption%20acoustique.pdf](http://www.bbri.be/antenne_norm/akoestiek/fr/frnl_medias/mvd_cours_batiment/cours2009-2010/090922%20Cours%20Acoustique%20Batiment%20-%20CHAP02%20-%20Reverberation%20et%20absorption%20acoustique.pdf)

L'absorption des matériaux dépendant de la fréquence, le temps de réverbération est déterminé par bandes de fréquence.

<http://www.acouphile.fr/absorbreverb.html>

Compte tenu des bruits ambiants qui font que, dans un local, il est bien rare que le niveau de bruit soit faible (30 - 40 dB), lors du mesurage du temps de réverbération, on a tout intérêt à utiliser une source sonore qui fournit instantanément un niveau sonore important (90 -100 dB) et qui va permettre de visualiser la décroissance sonore de 60 dB. Un coup de feu, obtenu par exemple avec un pistolet d'alarme est une source très acceptable à la condition de ne pas oublier de porter ses EPI !



Un autre moyen de connaître le temps de réverbération est de le calculer. Deux méthodes sont préconisées : par le biais de la formule de Sabine dans le cas des locaux peu ou assez peu réverbérants et la formule de Eyring dans le cas de locaux très réverbérants.

La formule de Sabine s'exprime en fonction du volume du local  $V$ , de l'absorption  $A$  des parois, du mobilier, des occupants, etc. et de l'absorption  $A'$  de l'air :

$$T = 0.16 \frac{V}{A+A'}$$

On remarquera que la formule de Sabine est indépendante de la position de la source sonore dans la pièce. On appréciera  $A + A'$  en considérant l'ensemble des constituants réverbérants de la pièce : murs, plafond, sol, vitres, meubles, etc. avec leur surface et en leur appliquant le coefficient d'absorption propre au matériau qui les constitue. C'est de cette manière que  $A + A'$  peut s'écrire  $S \alpha_m$  :  $S$  étant la surface totale des éléments réverbérants et  $\alpha_m$  le coefficient moyen d'absorption de ces éléments.

Dans le cas de locaux suffisamment vastes, on néglige  $A'$ .

Dans le cas des locaux très réverbérants, la formule de Eyring s'exprime en fonction du volume du local  $V$ , de la surface totale du local et des éléments qu'il renferme  $S$  et du coefficient moyen d'absorption  $\alpha_m$  :

$$T = 0.0705 \frac{V}{S \log(1 - \alpha_m)}$$

On trouve aussi sur Internet des sites qui offrent des moyens de calculer le temps de réverbération en entrant directement dans des fenêtres les caractéristiques surfaciques et volumiques du local et les coefficients d'absorption des matériaux présents. Le plus souvent, des tables sont fournies qui indiquent les coefficients des matériaux les plus souvent rencontrés.

Par exemple : Calcul TR 60 => [http://www.rt60.net/calc\\_rt60.htm](http://www.rt60.net/calc_rt60.htm)

Les temps de réverbération les plus souvent observés sont de l'ordre d'une demi-seconde pour une pièce meublée et de 1.5 à 2.5 secondes pour la même pièce vide. Cette perception est particulièrement marquée quand on emménage dans un nouvel appartement ou bien au contraire quand on le vide.

Le temps de réverbération dans une salle de concert devrait être de 0.8 à 1.5 secondes. Au-delà, l'écoute des voix ou des instruments est plus ou moins faussée, comme c'est parfois le cas dans des églises ou de très grands bâtiments où les temps de réverbération peuvent atteindre 8, voire 12 s.

Baisser le temps de réverbération permet d'avoir un message plus clair, net, précis (avec un son plus mat) et a 3 conséquences principales :

- un faible temps de réverbération permet **d'améliorer l'intelligibilité** du discours ce qui est recherché dans les salles de classe ou les salles de réunion par exemple.
- Un faible temps de réverbération permet de **baisser le niveau sonore** car dans un environnement sonore mat et calme, tout le monde a tendance naturellement à baisser la voix.
- Un faible temps de réverbération permet de **réduire la fatigue et le stress**. Le cerveau ne recevant le bruit moins 'souvent' et surtout à des intervalles plus courts, il a moins besoin de 'mouliner' pour trier les différentes sources sonores reçues par l'oreille.

- **L'intelligibilité de la parole ou du chant** : Comprendre un discours, un ordre, un appel, une annonce, le contenu d'une conférence ou d'un cours, les paroles d'une chanson, (<http://aune.lpl.univ-aix.fr/lpl/personnel/scotto/articles/Intellig72.pdf>) etc. ou simplement pouvoir suivre une conversation dans des conditions acceptables est fondamental, voire incontournable dans le cas, par exemple, d'annonces de danger immédiat. ([http://pagesperso-orange.fr/ccf-sas/dossier\\_Pdf/sono/NF\\_EN\\_60849.pdf](http://pagesperso-orange.fr/ccf-sas/dossier_Pdf/sono/NF_EN_60849.pdf))

Il existe plusieurs méthodes de mesure ou d'appréciation de l'intelligibilité de la parole :

- Le **STI** (Speech Transmition Index) et **RASTI** (Rapid Speech Transmition Index) sont des critères de mesure de l'intelligibilité surtout adaptés à la parole. Ils se mesurent d'après des rapports de taux de modulation pour différentes fréquences, selon la méthode définie dans la norme NFS 31-090.

L'indice RASTI va de 0 à 1.

- 0.00 > RASTI > 0.30 : intelligibilité mauvaise
- 0.30 > RASTI > 0.45 : intelligibilité médiocre
- 0.45 > RASTI > 0.60 : intelligibilité passable
- 0.60 > RASTI > 0.75 : intelligibilité bonne
- 0.75 > RASTI > 1.00 : intelligibilité excellente

- La **Clarté C80** est un indice qui définit la clarté du son, surtout adapté à la musique. Il donne le rapport en dB de l'énergie arrivant dans les 80 premières ms, avec l'énergie arrivant après 80ms (pour une impulsion).

Un C80 compris entre - 6dB et +2 dB est généralement correct pour la musique. Si il est supérieur à + 6 dB, le son est trop sec.

- La **Définition D50** est un indice qui définit la définition du son, surtout adapté à la parole. Il donne le rapport en % de l'énergie arrivant dans les 50 premières ms, avec l'énergie totale (pour une impulsion).

Un D50 correct est généralement supérieur à 50 %. Un D50 d'au moins 50 % est généralement recommandé pour l'intelligibilité de la parole

Critères objectifs pour apprécier la qualité acoustique d'un local destiné à l'écoute  
[http://catt.euphonia.fr/formapem\\_5.html](http://catt.euphonia.fr/formapem_5.html)

Problématique acoustique des espaces publics bâtis  
<http://www.duran-audio.fr/support/doc/div/Problematique.pdf>

Mesure de l'intelligibilité par le calcul du pourcentage de perte sur l'articulation des consonnes %ALCons  
<http://www.rt60.net/alcons.htm>

Ergonomie de l'ambiance physique et psychosociale : [http://134.157.193.4/ext/ergonomie/op2\\_a2\\_bk.pdf](http://134.157.193.4/ext/ergonomie/op2_a2_bk.pdf)

Confort acoustique / démarche HQE : <http://www.archilink.com/~FM/ALFA-DDQE/FOV7-0011B181/HQE-09.pdf>

## 6) L'absorption sélective des sons.

Pour diminuer la durée de réverbération des locaux, afin de les rendre moins bruyants, il est bon de rendre les parois moins réfléchissantes, c'est-à-dire plus absorbantes.

Dans les habitations, le mobilier, les tapis, les rideaux et tentures jouent en grande partie ce rôle de matériaux absorbants. Mais, dans de nombreux locaux, ce rôle ne peut être joué que par l'adjonction de matériaux acoustiques.

- **Les matériaux poreux** : si une onde acoustique frappe la surface d'un matériau très poreux, elle est peu réfléchi. Elle pénètre intégralement dans l'épaisseur du matériau où, du fait des frottements des molécules d'air avec les composants du matériau, elle perd une partie de son énergie. Si cette onde rencontre alors une surface réfléchissante, elle parcourra le chemin inverse en perdant à nouveau une partie de son énergie. [http://www.deparisnet.be/Bruit/faqbruit/faq\\_bruit3\\_materiaux.pdf](http://www.deparisnet.be/Bruit/faqbruit/faq_bruit3_materiaux.pdf)

Pour qu'un matériau poreux soit bien utilisé, il faut donc qu'il existe un bon compromis entre sa porosité et son épaisseur d'utilisation. Les panneaux de laine de verre, de fibres végétales ou de plâtre sont des matériaux de ce type.

- **Les résonateurs de Helmholtz** : Un récipient fermé de volume  $V$  ne communiquant avec l'extérieur que par une ouverture relativement étroite, constitue un résonateur de Helmholtz. Le comportement d'un tel résonateur peut être expliqué facilement si la liaison avec l'extérieur se fait par un tube fin et assez long. <http://subaru2.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/meca/resohelm.html>

Lorsqu'il existe une pression acoustique  $P$  agissant sur l'entrée du résonateur, la masse  $m$  de l'air contenu dans le tube a tendance à se déplacer sous l'action de cette pression. L'air contenu dans le volume  $V$  oppose une force à ce déplacement et se comporte comme un ressort.

On montre que le résonateur présente une fréquence de résonance,  $f_0$  :

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{VL}}$$

Où  $c$  = célérité du son ;  $A$  est la section du résonateur,  $L$  sa longueur et  $V$  son volume.

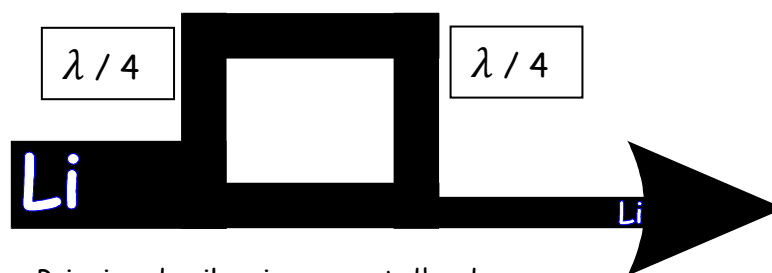
On montre également que le résonateur est d'autant plus efficace que  $f_0$  est proche de la fréquence critique  $f_c$ . Les résonateurs de Helmholtz absorbent davantage aux fréquences comprises entre 1000 et 2000 Hz.

Dans la pratique, les résonateurs que l'on utilise en isolation sont constitués par des plaques perforées que l'on place à une certaine distance des murs ou des plafonds. Ces plaques se comportent comme un grand nombre de résonateurs placés côte à côte. Chaque trou est l'entrée d'un résonateur.

- **Les diaphragmes** : Les tissus, les toiles et d'une manière générale, les matériaux assez étanches à la circulation de l'air, lorsqu'ils sont placés devant des parois se comportent comme des résonateurs. La fréquence de résonance de ces résonateurs se situe autour de 100 - 500 Hz.

- **Les silencieux** : Certains silencieux fonctionnent sur le principe que le déphasage des ondes sonores, sous certaines conditions, s'accompagne d'une réduction du niveau sonore.

Le silencieux quart d'onde fonctionne sur ce principe. Une partie de l'onde sonore est déviée pour en allonger le parcours et à la recombinaison avec l'onde directe. La différence de parcours conduit à un déphasage. Si le déphasage est deux fois  $\lambda / 4$ , soit  $\lambda / 2$ , les ondes recombinaison sont en opposition d'où une diminution notable de l'intensité sonore résultante.



Principe du silencieux quart d'onde

## 7) Bruits d'impacts et vibrations :

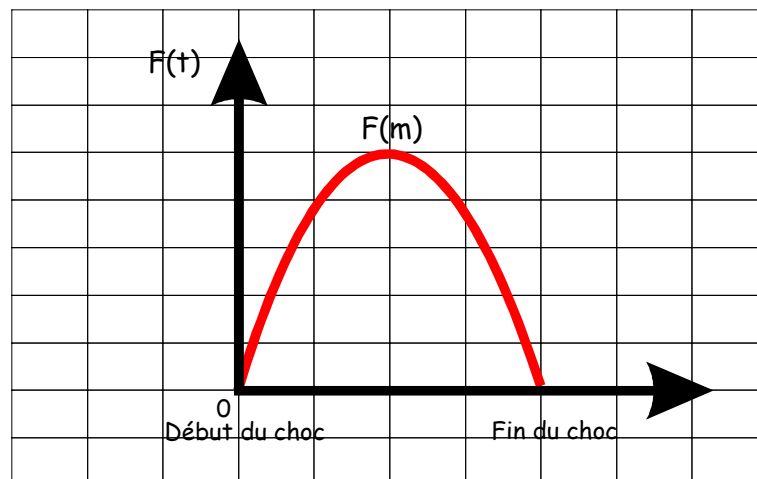
Contrairement aux bruits aériens, les bruits d'impact sont ceux qui résultent d'une excitation directe d'une paroi par une force. Cette force peut être le résultat d'un choc entre un objet ou une personne et la paroi (bille, marteau, vaisselle, déplacement des pieds d'une chaise, déplacement ou chute d'une personne, etc.). Cette force peut aussi résulter du contact d'une machine en fonctionnement avec une paroi (machine à laver, par exemple). Les bruits d'impact sont rayonnés aux locaux par les parois parcourues par

les vibrations engendrées par l'impact. Ces vibrations ne se distinguent en rien de celles créées par des bruits aériens. Elles sont de même nature et obéissent aux mêmes règles physiques de propagation ou d'atténuation, par exemple.

**a) Chute d'un objet sur une paroi dure :** Lorsqu'un objet dur, mais élastique (bille en métal, en verre ou en bois) heurte une paroi avec une vitesse  $v_0$ , normale à la paroi, il y a choc et l'objet est renvoyé dans la direction opposée à celle de son arrivée.

Si la masse de l'objet est très petite par rapport à celle de la paroi dont la surface est dure (carrelage, par exemple), la durée du choc est très brève et l'objet est renvoyé avec une vitesse  $v_0$ , égale, mais de sens opposé.

Pendant la durée  $\tau$  du choc, la paroi est soumise à une force  $F(t)$  qui varie suivant une demi-sinusoïde.  $F(t)$  est nulle au début et à la fin du choc et passe par un maximum  $F(m)$  pour  $t = \tau / 2$ .



Entre cette force et la vitesse  $v_0$ , il existe une relation qui exprime que la quantité de mouvement de l'objet est égale à l'impulsion de la force :

$$\int_0^{\tau} F(t) dt = 2m v_0 \text{ où } m = \text{masse de l'objet}$$

Autrement dit, l'aire comprise entre la demi-sinusoïde ci-dessus est constante et indépendante de  $\tau$ . L'aire ne dépend que de la quantité de mouvement de la masse percutant la paroi. À  $v_0$  donnée, plus  $\tau$  est petit, plus  $F(m)$  est grand.  $\tau$  est d'autant plus petit que l'objet et la paroi sont durs. Autrement dit,  $F(m)$  peut être beaucoup plus grande que le propre poids de l'objet.

Si au lieu d'être élastique, l'objet est plastique, il ne se produit aucun rebondissement. Dans ce cas on a :

$$\int_0^t F(t) dt = m v_0 \text{ (valeur moitié de la précédente).}$$

**b) Choc d'un objet dur sur une paroi élastique :** Si la surface de la paroi soumise au choc est couverte d'un revêtement élastique ou bien si l'objet est élastique (balle de tennis), de telle sorte que l'objet ou le revêtement puissent absorber, pendant le choc, l'énergie cinétique de la masse  $m$  et la restituer ensuite en rejetant cette masse avec une vitesse égale, mais opposée à  $v_0$ , le phénomène décrit précédemment garde les mêmes caractéristiques, mais alors  $\tau$  peut être très grand comparativement au choc dur. Le choc perd alors son caractère impulsif.

On peut montrer que les composantes du bruit de choc de fréquence inférieure à  $f_0 = \frac{1}{2} \tau$  sont les mêmes que dans le cas d'un choc dur. Pour ces composantes, l'élasticité du revêtement ou de l'objet sont sans effet.

Pour les fréquences supérieures à  $\frac{1}{2}\tau$ , les composantes sont affaiblies par rapport au choc dur. Elles sont d'autant plus affaiblies que leurs fréquences sont élevées, l'affaiblissement croissant de 12 dB par octave.

En résumé, on peut dire qu'un choc d'un objet dur sur une paroi dure, sans interposition d'un dispositif élastique, se traduit dans les locaux bordant la paroi, par un bruit rose, c'est-à-dire ayant la même énergie acoustique dans toutes les octaves.

Si, entre l'objet et la paroi, on interpose un dispositif élastique linéaire ou si l'objet est relativement élastique, le bruit produit a, aux fréquences basses, la même énergie que précédemment. Au-delà d'une certaine fréquence  $f_0$  qui dépend de la masse heurtant la paroi et de l'élasticité du dispositif intermédiaire, les composantes du bruit sont diminuées de 12 dB par octave.

Tout cela se traduit par un bruit très sec (claquement) dans le cas d'un choc très impulsif et par un bruit sourd dans le cas d'un impact avec interposition élastique efficace.

**c) Excitation par les pieds et les socles des objets :** Les machines, les outils et les objets ménagers, lorsqu'ils sont posés ou fixés sur des planchers, transmettent par leurs points d'appui, des forces variables qui mettent ces planchers en vibration. Les forces verticales, qui induisent

directement des ondes de flexion, sont les plus importantes, mais il peut y avoir des forces horizontales, inclinées ou divers autres couples de force à l'origine de bruits.

Les forces transmises peuvent être réduites par une meilleure équilibrage des pièces en rotation ainsi que par la mise en place de dispositifs antivibratoires entre la machine et son support.

Un dispositif antivibratoire est souvent constitué par un ensemble d'éléments élastiques liant la machine à son support tout en lui permettant de se déplacer dans la ou les directions suivant lesquels elle développe ces efforts et la ramenant à sa position d'équilibre lorsqu'elle est au repos. Le plus souvent, les éléments élastiques sont complétés par des amortisseurs atténuant l'amplitude des oscillations accidentelles de l'ensemble suspendu. Il arrive même que les éléments élastiques et les amortisseurs ne fassent plus qu'un.

L'efficacité d'un dispositif antivibratoire peut être représenté par le rapport  $F' / F$  de l'amplitude  $F'$  de la force transmise au sol à l'amplitude  $F$  de la force exercée par la machine. Ce rapport s'appelle facteur de transmission. Pour une masse suspendue  $m$  et un dispositif antivibratoire de raideur  $k$  (force-écrasement), le facteur de transmission dépend à la fois du rapport de la fréquence  $f$  de la force excitatrice à la fréquence propre  $f_0$  du système et de l'amortissement de l'ensemble.

La fréquence propre  $f_0$  est celle correspondant à l'oscillation libre du système après qu'on ait donné à ce dernier une impulsion verticale :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

On constate que pour être efficace, une suspension doit être conçue de sorte que la fréquence de résonance  $f_0$  soit nettement inférieure aux fréquences excitées par la machine. Plus les fréquences sont basses et plus la suspension doit être élastique ou la masses suspendue plus lourde.

## Table des matières

1 <sup>e</sup> partie : Évaluation de la gêne et du danger.....	1
A) Éléments d'acoustique.....	1
1) La pression acoustique.....	1
2) La propagation des sons.....	2
3) La catégorisation des sons.....	2
4) L'intensité sonore. La puissance d'une source.....	5
5) Les niveaux sonores. Le décibel.....	6
6) La superposition des ondes sonores.....	8
7) Les sons complexes, les bruits, les spectres acoustiques.....	9
8) L'analyse par bandes de fréquence.....	11
9) L'intensité physiologique. Les décibels pondérés.....	12
10) L'évaluation des niveaux sonores des bruits non permanents.....	16
11) La sonométrie.....	18
B) La physiologie de l'oreille.....	21
1) Anatomie.....	21
2) Physiologie.....	24
C) L'évaluation de la gêne et du danger.....	30
1) En situation de travail.....	30
2) Nuisances sonores et environnement :.....	36
2 <sup>e</sup> partie : La lutte contre le bruit.....	45
D) éléments d'acoustique.....	45
1) Introduction.....	45
2) Propagation et absorption du bruit en champ libre :.....	47
3) Propagation et absorption du bruit en présence d'obstacles.....	49
4) Intensité en présence de parois réfléchissantes :.....	57
5) Propagation du son en espace clos :.....	58
6) L'absorption sélective des sons.....	64
7) Bruits d'impacts et vibrations.....	65