

ACOUSTIQUE.

<u>I.</u>	<u>Propriétés générales des ondes</u>	p2
<u>II.</u>	<u>Ondes sonores</u>	
1.	<u>Nature et propriétés</u>	p2
2.	<u>Pression acoustique</u>	p2
3.	<u>Intensité sonore</u>	p3
<u>III.</u>	<u>Perception des sons</u>	
1.	<u>Une échelle logarithmique : le niveau sonore</u>	p3
2.	<u>Fréquence et perception</u>	p3
3.	<u>Spectre d'un son complexe</u>	p3
<u>IV.</u>	<u>Outils pour l'évaluation de l'impact du bruit</u>	
1.	<u>Classification des fréquences : bandes d'octave</u>	p5
2.	<u>Spectre des bruits, bruits normalisés blanc et rose</u>	p6
3.	<u>Niveau global</u>	p7
<u>V.</u>	<u>Prise en compte de la sensibilité de l'oreille en fonction de la fréquence</u>	
1.	<u>Courbes d'égale intensité sonore. Isofonie</u>	p7
2.	<u>Pondération, décibels pondérés</u>	p8
3.	<u>Evaluation du niveau global pondéré</u>	p8
<u>VI.</u>	<u>Amélioration du confort acoustique</u>	
1.	<u>Réverbération</u>	
a.	Evaluation et facteurs d'influence	p9
b.	Niveau résultant en espace clos	p9
2.	<u>Isolation acoustique</u>	
a.	Transmission/affaiblissement par une paroi	p10
b.	Paroi composée de plusieurs éléments	p10

I. Propriétés générales des ondes

Une onde est la **propagation** d'une **oscillation**.

Cette oscillation possède une **période temporelle** T (s) et une **fréquence** f (Hz).

Lorsque l'élongation est perpendiculaire à la direction de propagation l'onde est dite **transversale** (ex: rides à la surface de l'eau, ondulations d'une corde). Lorsque l'élongation est parallèle à la direction de propagation l'onde est dite **longitudinale** (ex: onde sonore, onde dans un ressort).

La propagation se produit **sans transport de matière** : c'est l'**énergie** associée à l'oscillation qui est transportée par l'onde.

La direction de propagation est appelée **rayon d'onde**.

On peut définir une **vitesse de propagation** v , aussi appelée **célérité de l'onde** (m.s⁻¹).

La distance parcourue par l'onde en une période temporelle est appelée **longueur d'onde** λ (m). λ est aussi appelée **période spatiale de l'onde**.

$$\lambda = v \cdot T = \frac{v}{f}$$

et réciproquement $v = \lambda \cdot f$

v célérité (m.s⁻¹), f fréquence (hz ou s⁻¹), T période (s), λ longueur d'onde (m).

II. Ondes sonores

1. Nature et propriétés

L'onde sonore est une onde **longitudinale**.

L'oscillation qui se propage est la vibration des molécules ou atomes constituant le milieu de propagation : l'onde sonore transporte une énergie mécanique. C'est une **onde mécanique**.

En règle générale, sa célérité augmente avec la densité du milieu de propagation et avec l'énergie de liaison de ses atomes ou molécules entre eux.

Milieu de propagation	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Célérité du son (m.s ⁻¹)
Air à 0°	1,29	330
Eau	1 000	1 500
Béton	2 100	3 200
Acier	7 500	> 5 000

2. Pression acoustique

L'oscillation des particules (atomes ou molécules) composant le milieu de propagation autour de leur position moyenne crée une oscillation de la pression autour de sa valeur moyenne.

On appelle **pression acoustique instantanée** $p(t)$ la différence entre la pression à la date t , et la pression moyenne.

Ordres de grandeur de l'amplitude des variations de la pression acoustique :

Limite inférieure de sensibilité de l'oreille : de l'ordre de $2 \cdot 10^{-5}$ Pa (environ deux dix-millionièmes de la pression atmosphérique)

Niveau maximum autorisé pour les baladeurs: 2 Pa (environ 0,02 pour mille de la pression atmosphérique)

Seuil de douleur : 20 Pa (environ 0,2 pour mille de la pression atmosphérique)

3. Intensité sonore

On appelle **intensité sonore** (ou **intensité acoustique**) l'énergie reçue par unité de temps et de surface, la surface étant mesurée perpendiculairement au rayon d'onde.

$$I = \frac{dP}{dS}$$

L'intensité sonore I s'exprime en W.m^{-2} .

Une source sonore est caractérisée par sa **puissance sonore**, qui est la puissance totale reçue par une surface fermée entourant la source.

Pour une source isotrope, c'est à dire émettant de la même façon dans toutes les directions, et ponctuelle (assimilable à un point) l'intensité sonore à distance r de la source est égale à

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

avec I en W.m^{-2} , P puissance de la source en W , r en m .

III. Perception des sons

1. Une échelle logarithmique : le niveau sonore.

Si on écoute successivement deux sons dont le second a une intensité double du premier, on constate que le second son semble seulement légèrement plus fort que le premier, et non deux fois plus fort : la sensation n'est pas proportionnelle à l'intensité acoustique.

Pour quantifier la sensation sonore, on utilise une grandeur L appelée **niveau sonore** (L pour Level), ou **niveau d'intensité acoustique** :

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

L est le **niveau sonore** en décibel (dB)

I_0 est l'**intensité sonore de référence**, exprimée dans la même unité que I .

Pour $I=I_0$, on obtient $L=0$.

Par convention on prend $I_0=10^{-12}\text{W.m}^{-2}$, limite de sensibilité de l'oreille à la fréquence de 1000Hz.

Lorsque l'intensité sonore est	multipliée par 2	multipliée par 10	multipliée par 100
Le niveau sonore en dB augmente de	+ 3dB	+ 10 dB	+20 dB

Le décibel est une unité sans dimension. Son nom est un hommage à Graham Bell

Attention : le **niveau sonore** peut également être appelé **niveau d'intensité**, ou **niveau de pression** : dès que le terme "niveau" apparaît, il s'agit d'un *level* "L" mesuré en dB.

2. Fréquence et perception

La fréquence d'un son correspond à la sensation de sa hauteur : plus la fréquence est élevée, plus le son est aigu.

3. Spectre d'un son complexe.

Une onde sonore sinusoïdale est appelée "son pur": tonalité du téléphone, diapason, sifflement . Un tel son a une fréquence unique, bien définie.

Les sons musicaux, les voyelles émises par l'homme, sont des sons **harmoniques**. Ils sont périodiques et constitués d'une superposition de sons purs. Ces sons purs ont la particularité d'avoir tous une fréquence

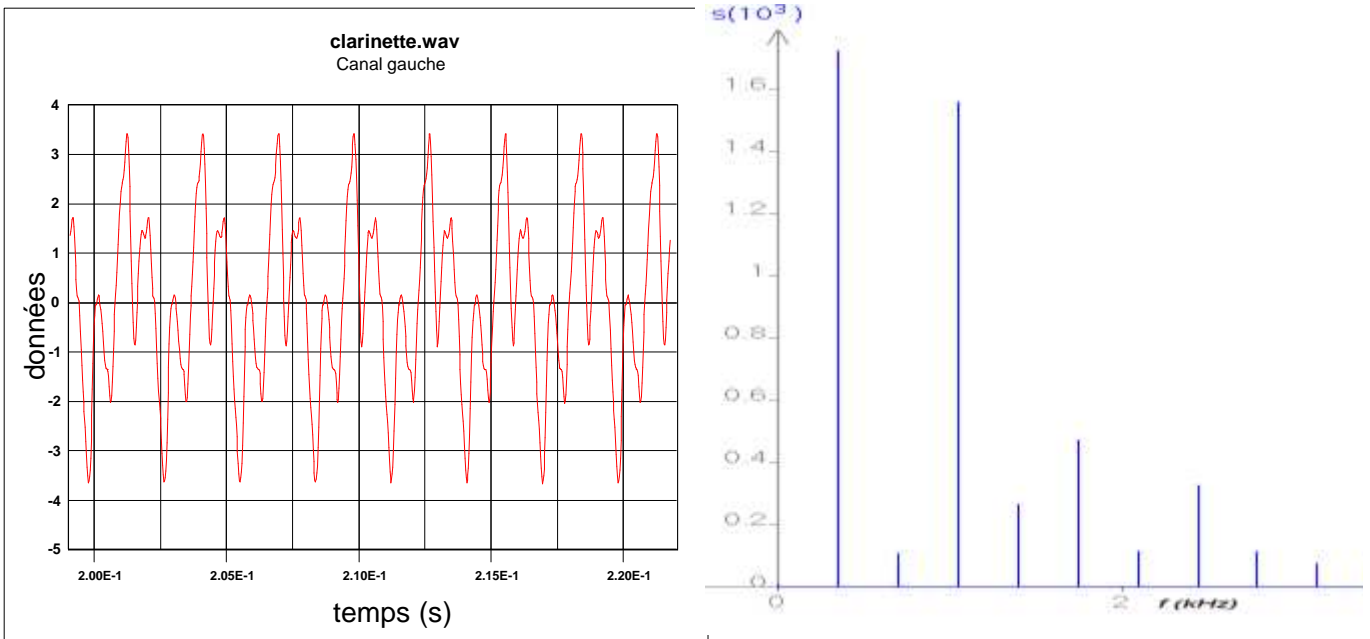
égale à un multiple entier de la fréquence du son : on les appelle les harmoniques. Un son harmonique de fréquence f est la superposition d'harmoniques de fréquences $f, 2f, 3f, 4f \dots$

Les autres sons, les bruits, les consonnes, sont également composés d'une superposition de sons de différentes fréquences, mais non harmoniques. Les amplitudes et les fréquences de ces différents sons varient généralement rapidement et beaucoup, le son résultant n'est pas vraiment périodique.

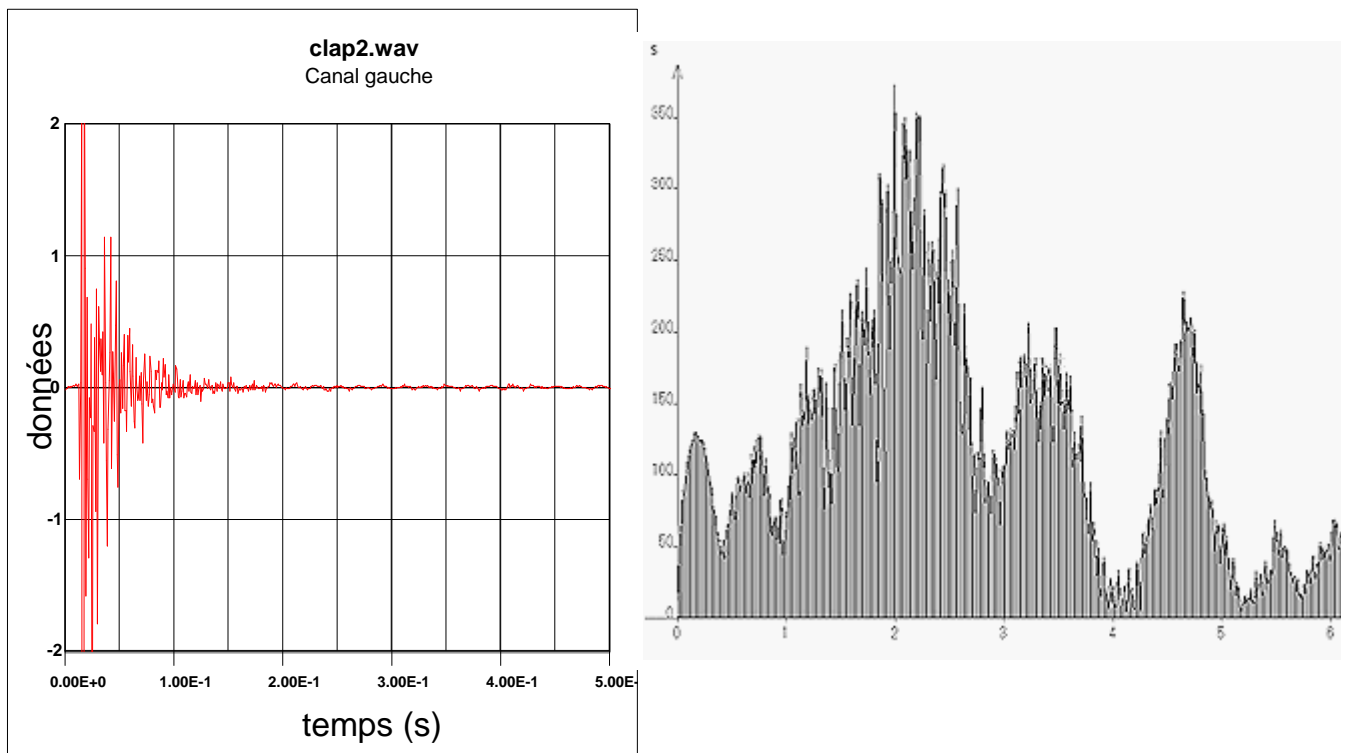
Le spectre d'un son complexe est la représentation graphique des amplitudes de ses composantes en fonction de leur fréquence.

Exemples : A gauche, la pression acoustique au cours du temps, à droite, le spectre

Son musical : clarinette.



Bruit : clap



La grandeur portée en ordonnée des spectres peut être soit l'amplitude ou la valeur efficace de la pression acoustique (absolue, en Pa, ou relative, sans unité), soit l'intensité sonore (en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) ou le niveau d'intensité en dB. Dans les exemples de la page 4 on a utilisé l'amplitude relative. En acoustique on emploie le plus souvent le niveau sonore en dB ou l'intensité sonore, car le spectre indique alors directement la répartition de l'énergie selon les fréquences.

IV. Outils pour l'évaluation de l'impact du bruit

1. Classification des fréquences : bandes d'octave

do	ré	mi	fa	sol	la	si	do
1	2	3	4	5	6	7	8

En musique, deux sons de fréquence double l'une de l'autre correspondent à la même note : par exemple le la₃ ayant une fréquence de 440Hz, la fréquence du la₂ (plus grave) est 220Hz et celle du la₄ (plus aigu) 880Hz. Comme il y a 7 notes dans la

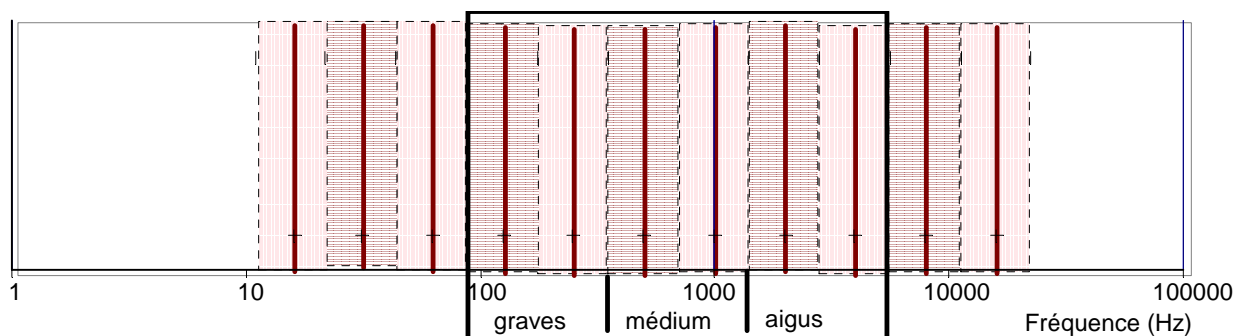
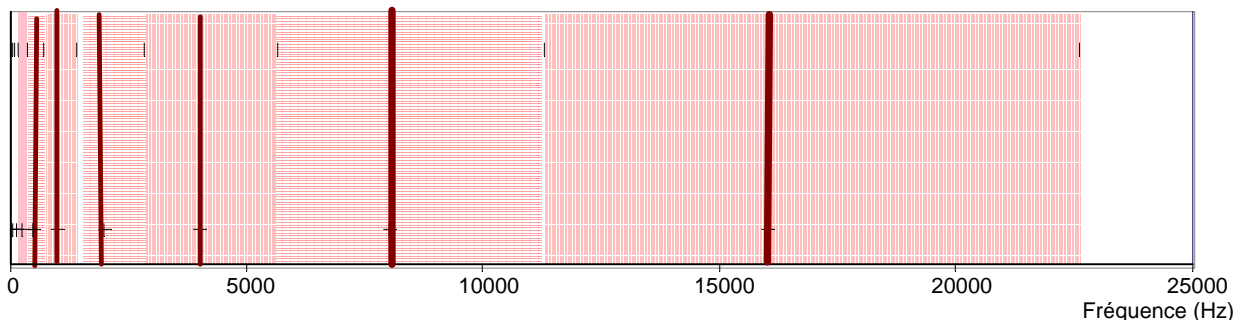
gamme, ces deux notes sont dites 'à l'octave' et l'intervalle compris entre une fréquence et la fréquence double est appelé 'octave'.

L'écart entre deux fréquences délimitant une octave n'est donc pas constant : il augmente avec la fréquence. Sur une échelle logarithmique en revanche, la largeur d'une octave est indépendante de la fréquence.

En acoustique on divise la gamme des fréquences audibles (environ 20Hz à 20000Hz) en **bandes de largeur une octave, ou bandes d'octave**, identifiées par leur **fréquence médiane** : la fréquence médiane de la bande d'octave comprise entre f_1 et $f_2=2f_1$ est

$$f = \sqrt{f_1 f_2} = f_1 \sqrt{2} = \frac{f_2}{\sqrt{2}}$$

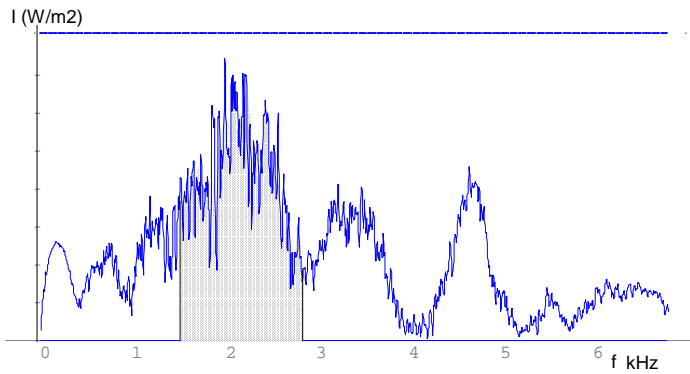
Ci-dessous, deux graphes des bandes de fréquence avec leurs médianes, l'un avec une échelle linéaire (en haut) et l'autre (en bas) avec une échelle logarithmique.



En isolation acoustique on s'intéresse aux bandes de fréquences centrées sur 125Hz et 250 Hz (graves), 500Hz et 1000Hz (médium), 2000Hz et 4000Hz (aigus). Ces bandes de fréquence sont encadrées sur le second graphique ci-dessus.

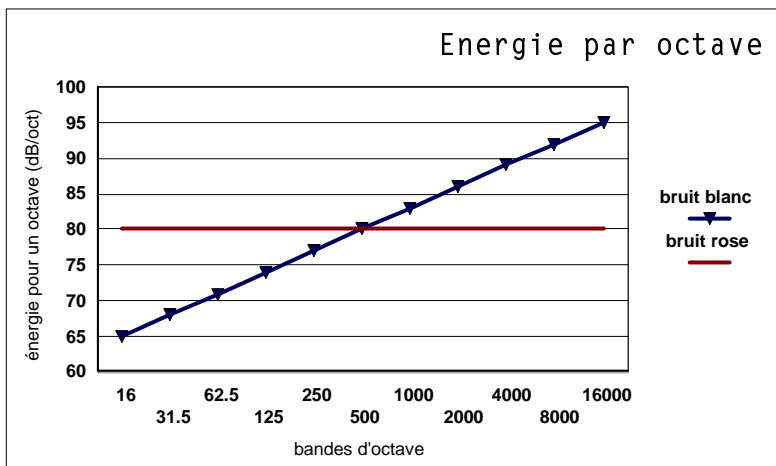
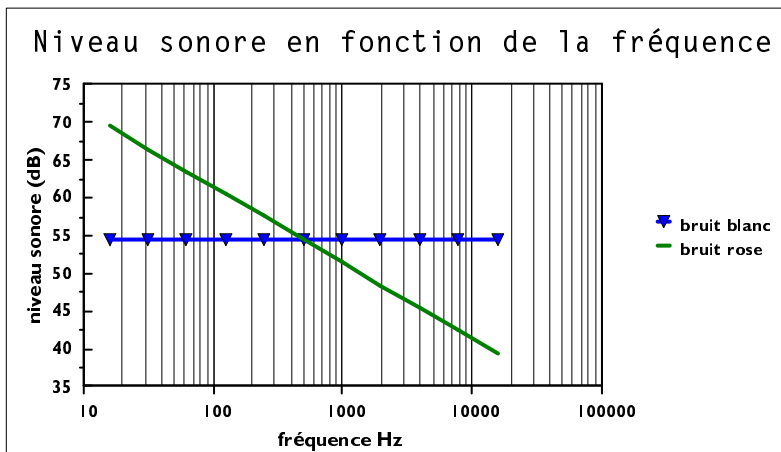
2. Spectre des bruits, bruits normalisés

Le spectre des bruits peut être considéré comme continu (voir l'exemple de la page 4).



A partir d'un spectre $I=f(f)$ ou $L=f(f)$, on peut estimer l'énergie totale rayonnée par octave : elle est proportionnelle à l'aire du spectre dans la bande de fréquence (octave) considérée. Dans l'exemple ci-contre, on peut déterminer la fraction de l'énergie totale émise dans la bande à 2000Hz en faisant le rapport de l'aire de la surface hachurée, correspondant à l'octave centré sur 2000Hz, à l'aire totale sous la courbe.

A CONNAITRE :



On appelle **bruit blanc** un bruit dont l'énergie est uniformément répartie sur toute la gamme des fréquences, par analogie avec la lumière blanche dans laquelle toutes les fréquences de la lumière visible sont présentes. L'énergie totale émise dans une bande d'octave est alors proportionnelle à sa largeur : l'énergie totale émise par bande double (augmente de 3dB) quand on passe d'une bande à l'autre dans le sens des fréquences croissantes.

Le **bruit rose** est par définition un bruit pour lequel l'énergie totale émise par octave est la même pour toutes les bandes. Comme la largeur double en passant d'une octave à l'autre dans le sens des fréquences croissantes, l'intensité doit être divisée par 2, et donc le niveau diminue de 3dB, en passant d'un octave à l'autre dans le sens des fréquences croissantes. On a donc un bruit dans lequel les basses fréquences ont un niveau plus élevé que les hautes fréquences.

Le nom 'bruit rose' vient ici

encore d'une analogie avec la lumière visible, le rouge étant la couleur des plus basses fréquences de lumière visible.

Pour l'isolation acoustique on utilise comme référence un bruit rose dans les bandes 125Hz à 4000Hz. Un bruit 'routier' est un bruit pour lequel l'énergie par octave augmente vers les basses fréquences : le niveau sonore dans les fréquences basses y est donc beaucoup plus élevé que dans les aigus.

3. Niveau global

A partir d'un tableau donnant le niveau sonore L_f pour chaque bande de fréquence, on évalue un "niveau global" en utilisant l'additivité des intensités.

- on calcule l'intensité I_f dans chaque bande par fréquence $I_f = I_0 \cdot 10^{L_f/10}$.
- on en déduit l'intensité résultante $I_{globale} : I_{globale} = \sum I_f = \sum I_0 \cdot 10^{L_f/10} = I_0 \sum 10^{L_f/10}$
- on calcule le niveau global $L_{global} = 10 \log \frac{I_{globale}}{I_0} = 10 \log \sum 10^{L_f/10}$.

En résumé : $L_{global} = 10 \log \sum 10^{L_f/10}$

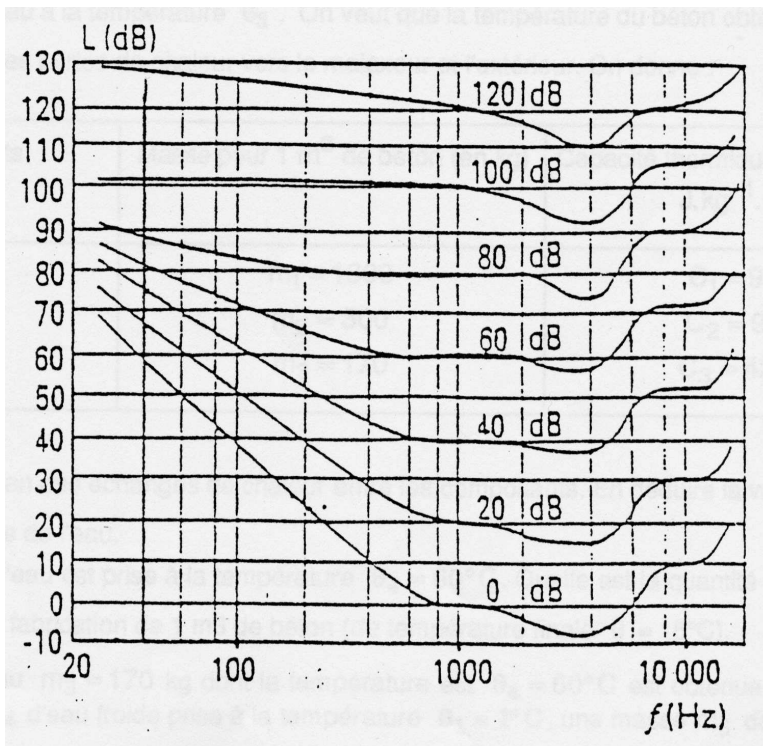
Par exemple les niveaux global, calculé sur les 6 bandes utilisées en analyse acoustique (125 Hz à 4000 Hz) pour les bruits normalisés dont les spectres sont donnés p6 est :

- bruit blanc :

- bruit rose :

V. Prise en compte de la sensibilité de l'oreille en fonction de la fréquence

1. Courbes d'égale sensation sonore . Isononie.



Ci-contre :

Les courbes de Fletcher et Munson, courbes d'égale sensation sonore (isononie), actuellement normalisées, permettent de convertir un niveau sonore (mesure physique objective) en sonie (sensation physiologique) en tenant compte de la variation de sensibilité de l'oreille avec la fréquence et le niveau sonore.

Ces courbes sont tracées en utilisant comme base de comparaison la sensation sonore à la fréquence de 1000Hz. En regardant la courbe notée 20dB, on voit par exemple qu'à la fréquence 100Hz un son doit avoir un niveau sonore de 50dB pour produire la même sensation qu'un son de 20dB à la fréquence 1000Hz. **Le niveau d'isononie en phones** d'un son de niveau sonore 50dB à 100Hz est donc de 20dB.

Les points d'une même courbe ont tous le même niveau d'isononie dont la valeur en phones est égale au niveau sonore du point de la courbe d'abscisse 1000Hz.

La courbe des 0dB correspond à la limite d'audibilité. D'après ces courbes on constate que l'oreille est beaucoup plus sensible aux alentours de 4000Hz. mais que la variation de sensibilité avec la fréquence s'atténue lorsque le niveau de la sensation augmente : les courbes sont de plus en plus 'plates' lorsque la sonie augmente. Pour un niveau de sonie de 100dB, on constate ainsi que le niveau sonore effectif est de 100dB pratiquement indépendamment de la fréquence en dessous de 1000Hz.

2. Pondération. Décibels pondérés.

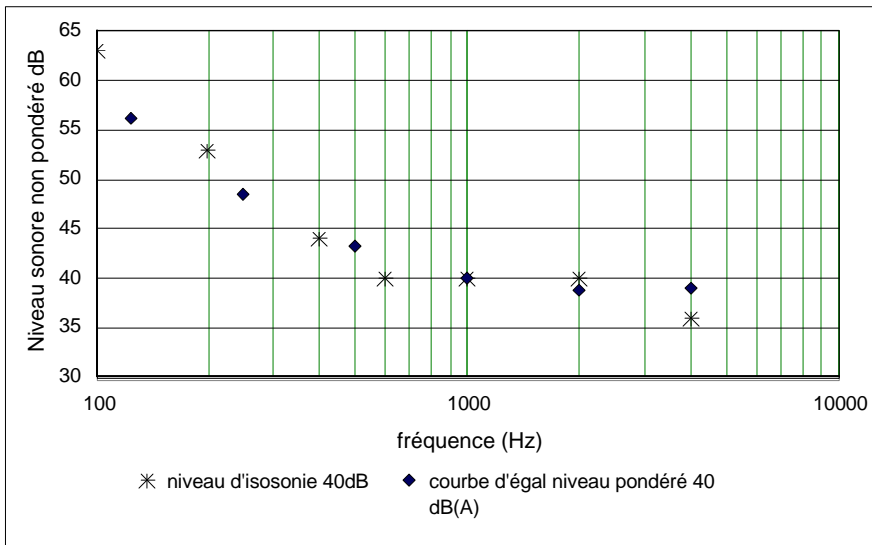
Pour tenir compte de la variation de sensibilité de l'oreille selon la fréquence, on **pondère** les niveaux sonores mesurés. Il existe différentes courbes de pondération : la pondération A est basée sur la réponse de l'oreille autour de 40dB, la pondération B autour de 70dB, la pondération C à des niveaux plus élevés voisins de 100Hz. Pour l'isolation acoustique des bâtiments on fait appel à la pondération A. On obtient alors un niveau en dB(A) , L(A), égal au niveau sonore en dB L auquel on **ajoute** la valeur de la pondération A.

$$L(A) = L + A$$

Les valeurs de la pondération A dans les bandes d'octave 125Hz à 4000Hz sont :

Fréquence (Hz)	125	250	500	1 000	2 000	4 000
Pondération A (dB)	-16,1	-8,6	-3,2	0	1,2	1

Le tableau et le graphe ci-dessous montrent la corrélation entre la courbe d'isonomie à 40dB et la courbe d'égal niveau pondéré 40dB(A).



Fréquence	Niveau sonore physique L en dB	Niveau pondéré L(A) en dB(A)
125	56,1	40
250	48,6	40
500	43,2	40
1 000	40	40
2 000	38,8	40
4 000	39	40

Les sonomètres sont équipés de filtres leur permettant d'afficher directement le niveau en décibels pondérés. La pondération A est disponible sur les sonomètres usuels.

3. Evaluation du niveau global pondéré L(A) d'un bruit

Le calcul est le même que pour le niveau global non pondéré, à ceci près qu'on le calcule à partir des niveaux **pondérés** dans chaque bande de fréquence.

Fréquence Hz	125	250	500	1 000	2 000	4 000
Niveau sonore L_f dB	48	40	38	20	18	15
$L_f(A)$ en dB(A)	31,9	31,4	34,8	20	19,2	16
$L(A)$ global						37,9

Formule de calcul de $L(A)$ à partir des $L_f(A)$:

$$L(A) = 10 \log \left(\sum 10^{\frac{L_f(A)}{10}} \right)$$

VI. Amélioration du confort acoustique

1. Réverbération

a. Evaluation et facteurs d'influence

Lorsqu'un bruit est émis à l'intérieur d'un local, il subit un certain nombre de réflexions sur les parois: il est ainsi en quelque sorte confiné le local où il persiste un certain temps, dépendant des propriétés absorbantes des parois rencontrées.

On définit le **temps de réverbération** comme la durée nécessaire pour que le niveau sonore diminue de 60dB après extinction des sources de bruit (l'intensité acoustique est divisée par 10^6)

Il existe différentes méthodes pour évaluer le temps de réverbération d'un local. On utilisera en général la formule empirique de Sabine (William Clement Sabine) :

$$T = \frac{0,16V}{A}$$

avec T temps de réverbération en s, V volume de la salle en m^3 et A absorption totale des parois, ou aire absorbante équivalente, en m^2 . Le coefficient 0,16 est en $s.m^{-1}$

On peut prévoir l'aire absorbante équivalente d'un local :

$$A = \sum_i \alpha_i S_i$$

où les S_i sont les surfaces réverbérantes et les α_i les coefficients d'absorption, ou " α Sabine", des matériaux constituant ces surfaces.

Le coefficient d'absorption d'une surface réfléchissante est égal au rapport de l'intensité sonore de l'onde absorbée par la surface, par celle de l'onde incidente .

$$\alpha = 1 - \frac{I_r}{I_i}$$

Nature des matériaux	α à 500Hz
Parquet sur lambourdes (ciré)	0,10
Carrelage	0,02
Moquette sur béton	0,21
Marbre	0,01
Enduit ciment brut	0,03
Vitrages (courants) sur châssis	0,18
Porte bois traditionnelle	0,10
Dalles acoustiques	0,75

Il peut être défini dans chaque bande de fréquence, par exemple le tableau ci-contre donne des valeurs de coefficients d'absorption pour différents matériaux.

La valeur de A peut également être déterminée expérimentalement à partir de mesures de T .

Plus A est faible, plus T est grand. A est d'autant plus faible que les surfaces sont lisses et leur matériau peu absorbant.

Un temps de réverbération long engendre une ambiance bruyante : on en entend l'exemple dans le cas des piscines, où sont associés un volume V important et une faible valeur de A .

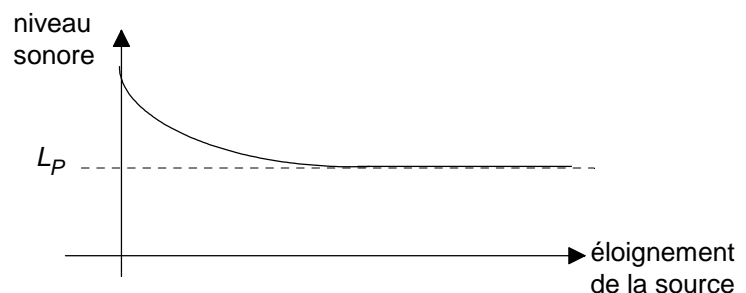
Dans les auditorium et les salles de spectacle, on compense l'effet dû au grand volume en augmentant la valeur de A .

b. Niveau résultant dans un espace clos

Lorsqu'un bruit continu est émis dans un local, le niveau sonore obtenu résulte de la superposition de l'onde sonore initiale et des ondes réfléchies sur les parois.

L'intensité sonore en un point résulte de l'addition de l'intensité directe émise par la source et de l'intensité réverbérée. Sauf à proximité immédiate de la source, le niveau sonore qui en résulte est à peu près uniforme à l'intérieur du local : c'est le

niveau de bruit de fond L_P .



On l'évalue, pour une source isotrope émettant une puissance sonore W , par la formule

$$L_P = L_W + 6 - 10 \log(A)$$

où L_W est le niveau de puissance de la source, $L_W = 10 \log \frac{W}{W_0}$ avec $W_0 = 10^{-12}$ W et A la valeur de l'aire absorbante équivalente en m^2 .

On peut aussi exprimer L_P en fonction de T et de V valeurs respectives du temps de réverbération et du volume du local en unités S.I. :

$$L_P = L_W + 14 + 10 \log\left(\frac{T}{V}\right)$$

La correction acoustique d'un local est l'ensemble des moyens mis en oeuvre pour réduire le temps de réverbération et le niveau sonore résultant de la réverbération.

2. Isolation acoustique

a. Transmission/affaiblissement par une paroi

On peut caractériser les propriétés d'une paroi par la fraction d'énergie incidente qu'elle transmet :

Taux de transmission $\tau = \frac{I_t}{I_i}$ Taux d'affaiblissement $T_A = \frac{1}{\tau} = \frac{I_i}{I_t}$ (T_A et τ sont sans dimension)

L'indice d'affaiblissement acoustique R de la paroi est la diminution de niveau acoustique provoqué par sa traversée :

$$R = L_i - L_t$$

On a $R = 10 \log \frac{I_i}{I_0} - 10 \log \frac{I_t}{I_0} = 10 \log \frac{I_i}{I_t} = 10 \log(T_A)$

A retenir : $R = 10 \log(T_A) = -10 \log(\tau)$ et réciproquement $T_A = 10^{\frac{R}{10}}$ et $\tau = 10^{-\frac{R}{10}}$

La valeur de R augmente avec la masse volumique de la paroi et son épaisseur. Elle varie également suivant le spectre du bruit considéré. Pour les études d'isolation dans le bâtiment on utilise un bruit rose à 80dB par bande d'octave.

On appelle **loi de masse** une relation modélisant la relation entre R , la masse volumique et l'épaisseur (ou entre R et la masse surfacique). Il existe différentes expressions de loi de masse, intégrant ou non la fréquence des sons considérés.

Remarque : la transmission du son entre deux locaux ne se fait pas seulement par transmission à travers la paroi qui les sépare. La valeur de R ne donne donc qu'une indication imprécise sur la différence de niveau qui existera entre les locaux. La valeur effective de la différence de niveau sonore mesurée entre deux locaux est appelée indice d'isolement acoustique brut D . La valeur de D reste généralement proche de R .

b. Paroi composée de plusieurs éléments

On rencontre fréquemment le cas d'une paroi composée de plusieurs éléments de surface de nature différente (portes, fenêtres).

Exemple : paroi percée d'une porte, S_1 étant la surface de mur de taux de transmission τ_1 , S_2 la surface de la porte de taux de transmission τ_2 , $S = S_1 + S_2$ la surface totale.

On doit dans ce cas déterminer l'énergie totale transmise par unité de temps (puissance transférée, ou flux d'énergie à travers la paroi).

Si I_i est l'intensité sonore incidente en $W.m^{-2}$, la puissance reçue par la porte est $S_2.I_i$ et celle reçue par le mur $S_1.I_i$.

La puissance transmise par la porte est $S_2.\tau_2.I_i$ et celle transmise par le mur $S_1.\tau_1.I_i$.

La puissance totale transmise est $P = S_1.\tau_1.I_i + S_2.\tau_2.I_i = I_i(S_1.\tau_1 + S_2.\tau_2)$.

L'intensité moyenne transmise est $I_t = P/S = I_i(S_1.\tau_1 + S_2.\tau_2)/S$

Le taux de transmission de l'ensemble de la paroi est $\tau = I_t/I_i = (S_1.\tau_1 + S_2.\tau_2)/S$

Généralisation : pour une paroi de surface totale S , chaque élément de surface S_n ayant un taux de transmission différent τ_n , le taux de transmission global est

$$\tau = \frac{\sum S_n \cdot \tau_n}{S} = \frac{\sum S_n \tau_n}{\sum S_n}$$

Le taux de transmission global est la moyenne des taux de transmission avec pour coefficients les surfaces.

Le taux d'affaiblissement global R est donc :

$$R = -10 \log \tau = -10 \log \left(\frac{\sum S_n \cdot \tau_n}{S} \right) = -10 \log \left(\frac{\sum S_n \cdot 10^{-R_n/10}}{S} \right)$$