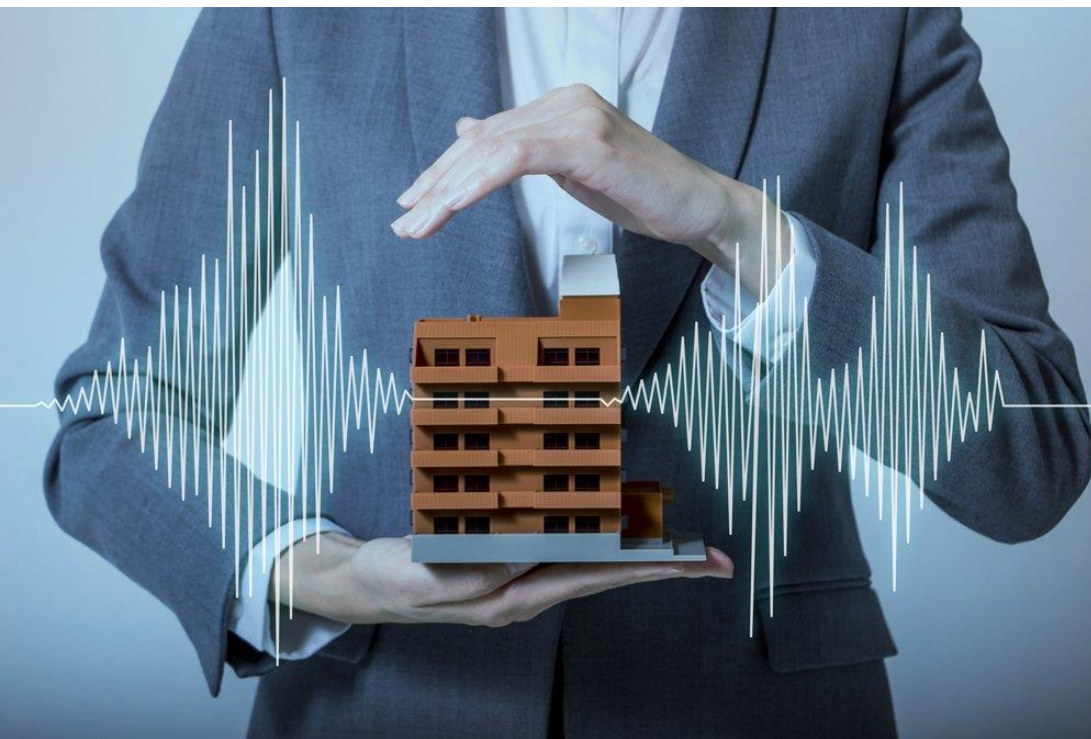




Cours d'Acoustique Technique

Année universitaire 2025/2026



Ecole Supérieure d'Ingénierie Appliquée et Innovation

❖ 5^{ème} année Génie Civil

- ❑ Enseignant : KAOUACHI Abderrahmane
- ❑ E-mail : abderrahmane.kaouachi94@gmail.com

Plan du cours

1. Le son et le bruit
2. Caractéristiques des sons
3. Le bruit dans le bâtiment
4. Caractéristiques énergétiques des sons
5. Niveau de puissance acoustique
6. Niveau d'intensité acoustique



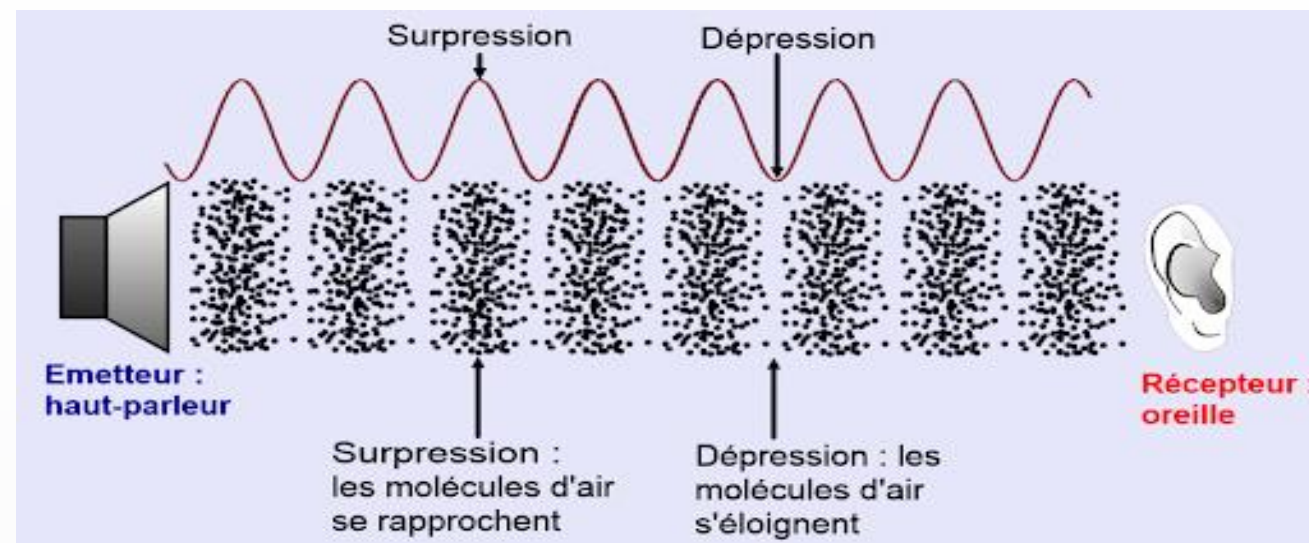


Le Son et le Bruit

- Le son est une vibration qui se propage dans un milieu, comme l'air, sous forme d'ondes.
- Le bruit est un son indésirable qui peut être perçu comme désagréable ou gênant. Il existe de nombreuses sources de bruit, tant intérieures qu'extérieures.

$$p(t) = p_m \sin \omega t$$

p_m pression acoustique maximale
 ω pulsation ou vitesse angulaire



Caractéristiques des Sons

Les sons sont caractérisés par plusieurs paramètres importants qui influencent notre perception.

1 Fréquence

La fréquence est mesurée en Hertz (Hz) et détermine la hauteur du son. Les basses fréquences correspondent à des sons graves, tandis que les hautes fréquences correspondent à des sons aigus.

2 Intensité

L'intensité du son est mesurée en décibels (dB) et correspond à la force du son. Plus le niveau sonore est élevé, plus le son est perçu comme fort.

3 Timbre

Le timbre est la qualité unique d'un son qui le différencie des autres. Il est déterminé par la forme de l'onde sonore et est influencé par la source sonore.





Sources de Bruit

- Les sources de bruit peuvent être caractérisées par leur directivité, la nature de leur évolution temporelle, leur spectre ou la nature du milieu de transmission.

Sources Intérieures

Les sources intérieures de bruit comprennent les conversations, la musique, les appareils électroménagers, les systèmes de ventilation, etc.

Sources Extérieures

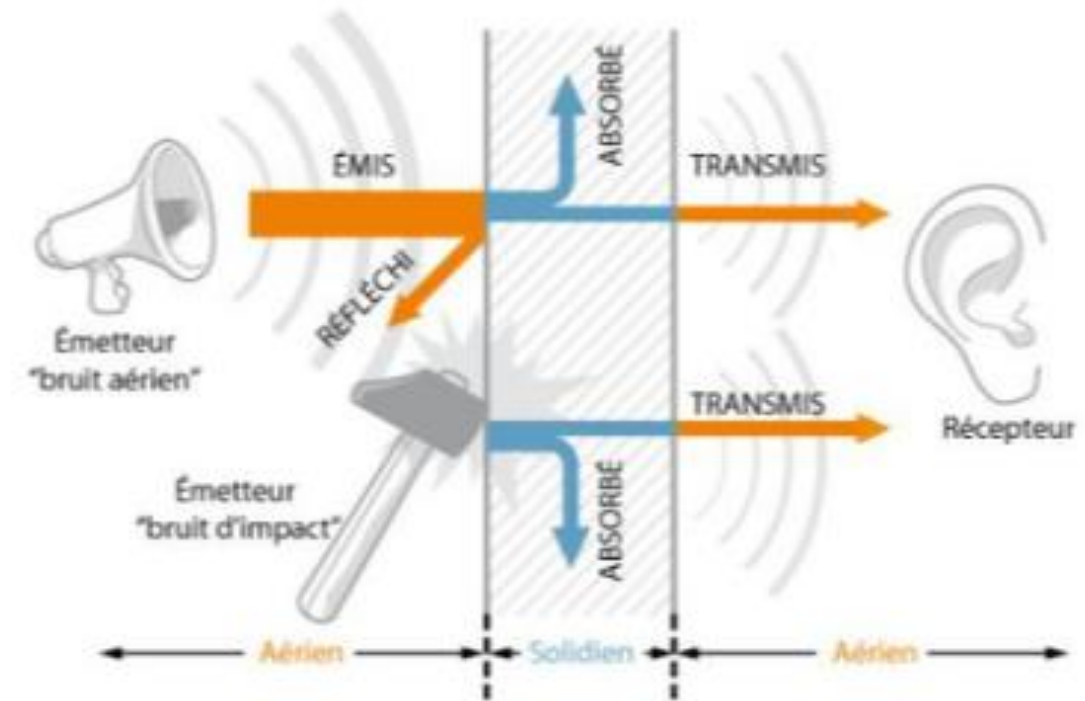
Les sources extérieures de bruit incluent le trafic routier, les travaux de construction, les avions, les trains, etc.

Les bruits d'impact

Les bruits d'impact comprennent bruits de pas, déplacement de meubles, chutes d'objets, etc.

Les bruits d'équipement

Les bruits d'équipement collectifs (ascenseur, chaufferie, ...) ou individuels (chasse d'eau, robinetterie, ...)



1

Emission

Le son est généré par une source (émetteur).

2

Refléxion

Une partie de l'énergie sonore est réfléchiée par la paroi.

3

Absorption

Une autre partie est absorbée par la paroi, réduisant l'intensité du bruit transmis.

4

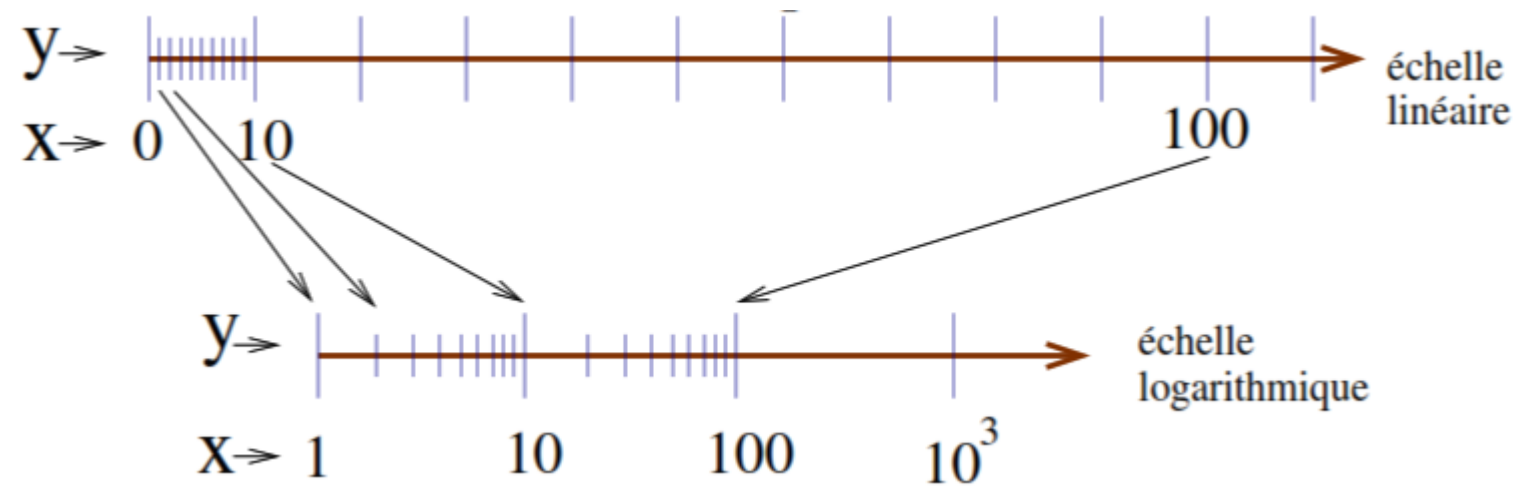
Transmission

Une fraction du son traverse la paroi et atteint le récepteur (par exemple, une personne dans une pièce voisine).

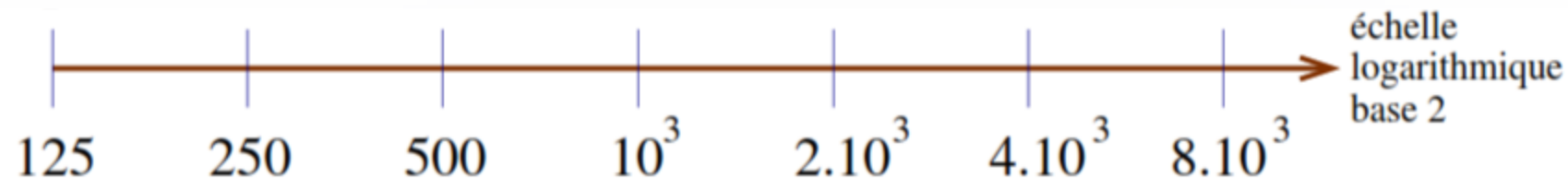
Echelles logarithmiques

- L'échelle logarithmique place les valeurs sur l'axe en progression exponentielle.
- La représentation sur une échelle log permet de représenter simplement plusieurs ordres de grandeur.
- Une échelle log ne peut pas comporter de 0.

Conversion d'une échelle linéaire à une échelle log base 10 :



Echelle log en base 2 :



Remarque : Les sous échelons (i.e. les valeurs ne correspondant pas à une puissance entière de la base) ne sont pas placés à intervalles réguliers.

Echelles logarithmiques

- La sensibilité de l'oreille humaine à l'intensité et à la tonalité (fréquence des sons) ne varie pas linéairement.
- Par exemple, un son est perçu comme 2 fois plus fort lorsque l'intensité acoustique est multipliée par 10.
- La perception (tel que ressenti) de l'intensité et de la fréquence des sons correspond au rapport des variations de la grandeur physique correspondante (I et f) et non à une différence.

Soit R le rapport d'une grandeur physique ($I_1 / I_2, f_1 / f_2 \dots$) et soit S une échelle traduisant la perception auditive correspondante, le passage de l'un à l'autre se fait selon une loi de puissance :

$$R = n^S \Leftrightarrow S = \log_n R$$

Mesures de Bruit

- Le décibel Ernst Weber (1795–1878) fut l'un des premiers à aborder quantitativement l'étude du lien entre sensation et stimulus physique et c'est en hommage à ses travaux que le médecin Gustav Fechner (1801–1887) donna le nom de « loi de Weber » à la relation quantitative qu'il avait découverte. Selon cette loi, l'intensité de la sensation perçue répond à la formule suivante :

$$I = K \log S$$

- I est l'intensité de la sensation, S la grandeur du stimulus et k une constante En prenant comme référence le seuil d'audibilité avec une échelle logarithmique on définit le niveau de pression acoustique N en décibels dB :

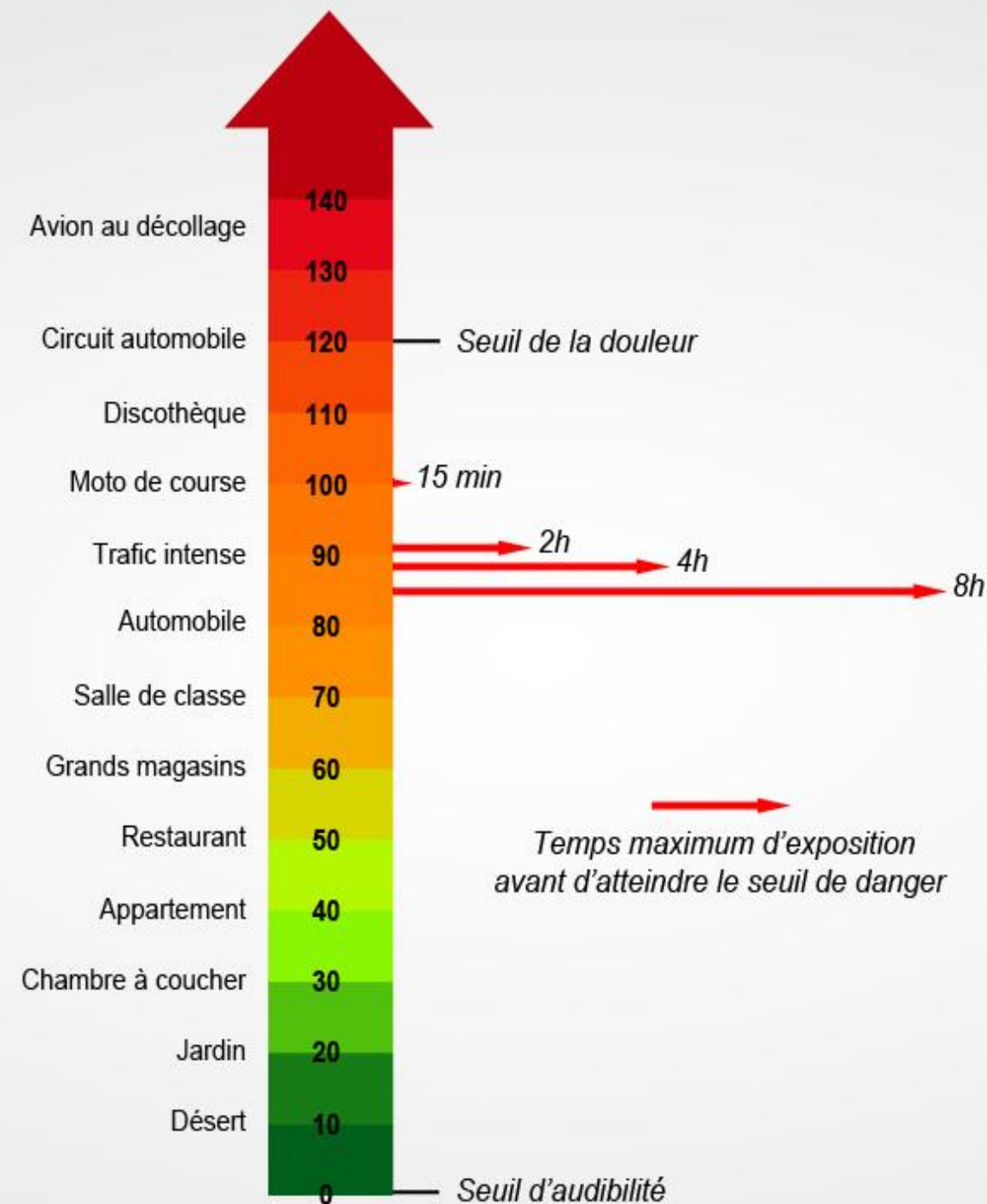
$$L_p = 10 \log \left(\frac{p_{eff}^2}{p_0^2} \right)$$

- p_{eff} est la pression efficace en Pascal, p_0 la pression acoustique de référence correspondant au seuil d'audibilité d'un son à

$$1000 \text{ Hz} = 2,10^{-5} \text{ Pa}$$

L'échelle du bruit

Exprimée en décibels (dB)



Mesures de Bruit

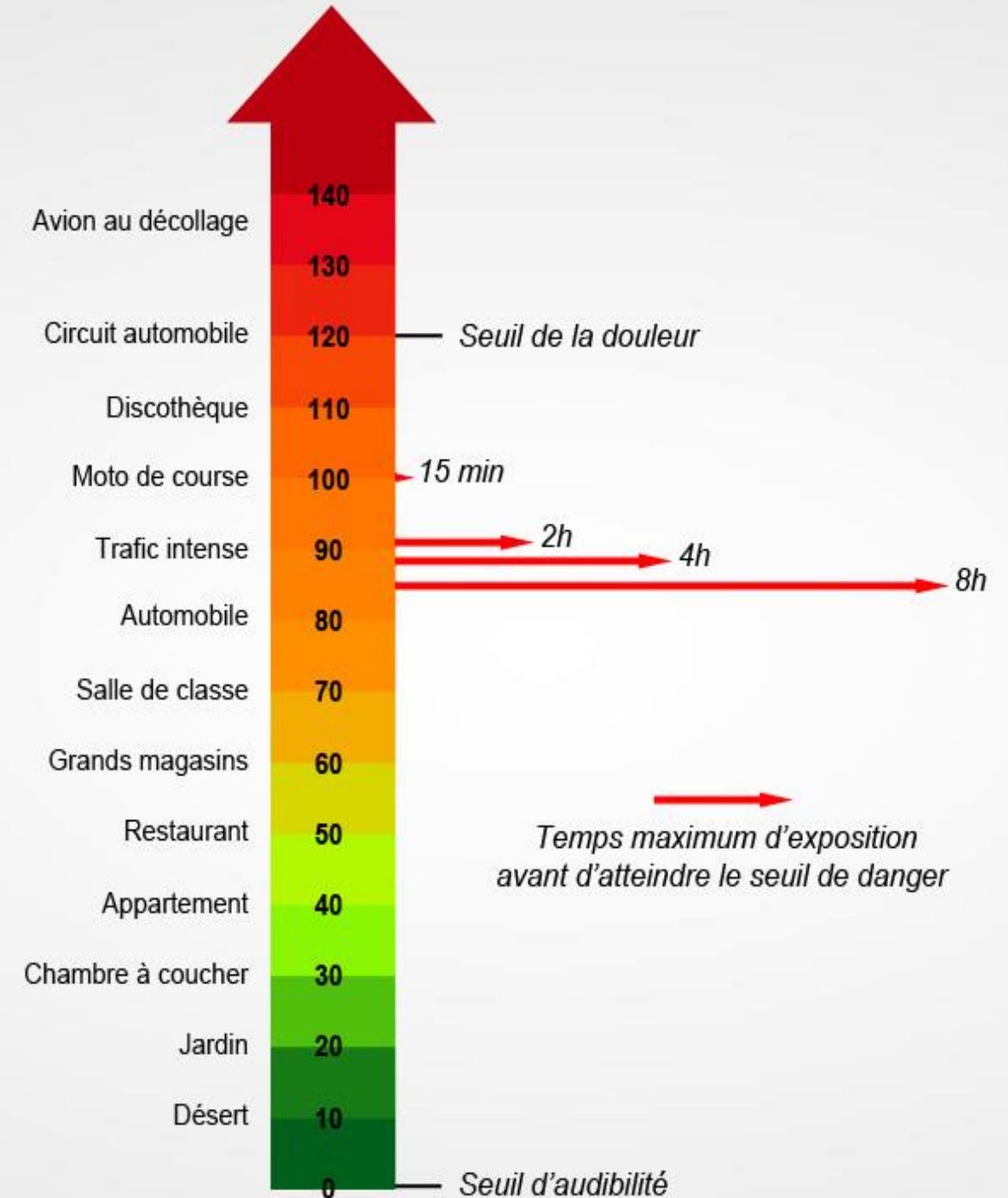
- Comme pour le niveau de pression acoustique L_p on peut établir en décibel un niveau de puissance acoustique et niveau d'intensité acoustique, L_W et L_I respectivement avec des références de $10^{-12} W$ et $10^{-12} W/m^2$.
- Dans un espace libre, pour une source ponctuelle immobile (ayant un front d'onde sphérique), la pression acoustique décroît proportionnellement avec le carré de la distance. Ceci se traduit en niveau de bruit par

$$L_p = L_W - 10 \log(4\pi R^2) + 10 \log(Q)$$

- Où R est la distance et Q un facteur de directivité proportionnel qui vaut 1 pour une propagation sphérique (champ libre) et 2 pour un champ de propagation hémisphérique.

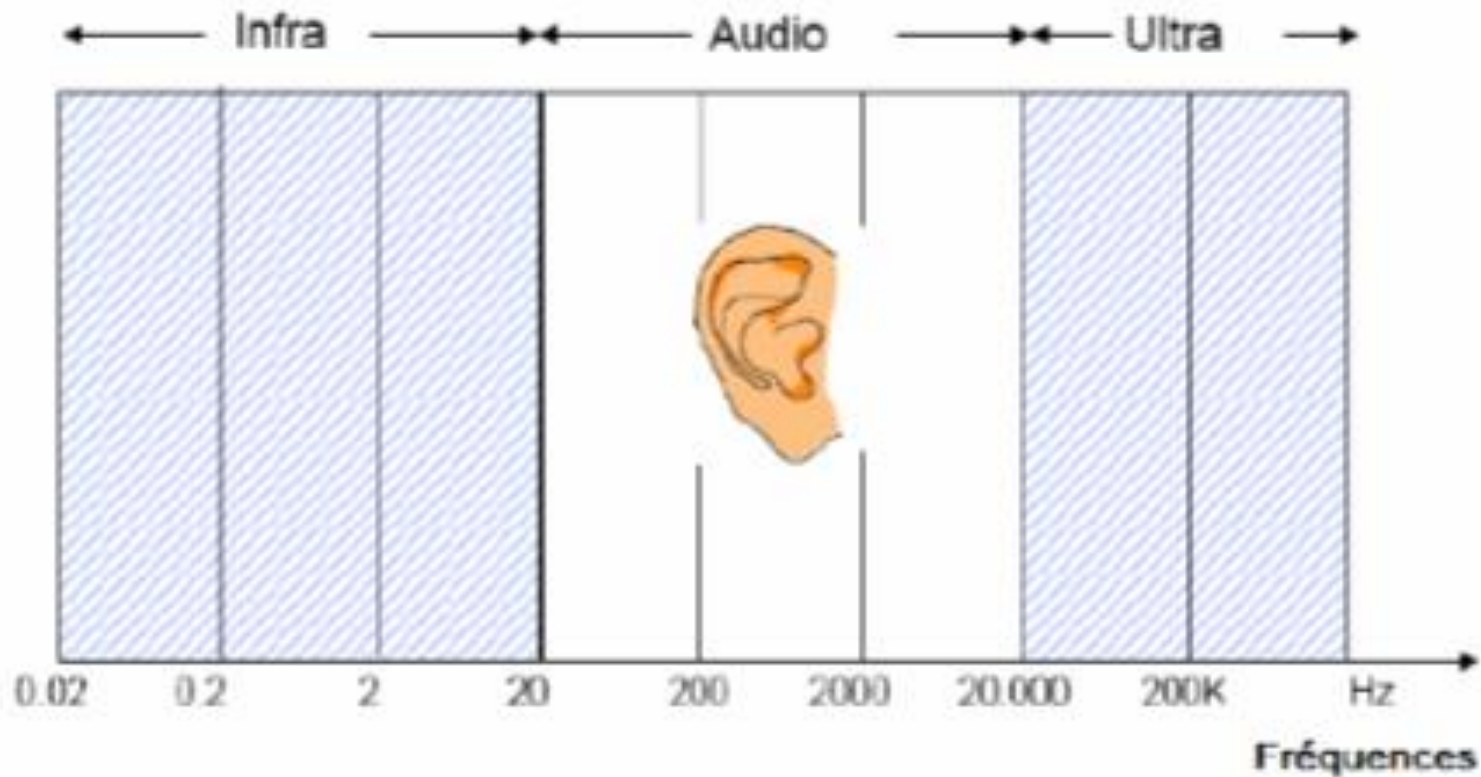
L'échelle du bruit

Exprimée en décibels (dB)



Fréquences audibles par l'être humain

- Les humains entendent des sons entre 20 et 20 000 Hz, avec une sensibilité accrue aux **fréquences medium et aigues**, notamment celles de la voix.
- Les sons en dessous de 20 Hz sont des **infrasons**, et ceux au-dessus de 20 000 Hz sont des **ultrasons**. Ces limites variant selon l'âge des individus.



Le bruit dans le bâtiment

- Le bruit est un mélange de plusieurs sons différents, il présente une sensation désagréable et gênante. Le son ne doit pas être forcément fort pour être gênant (robinet qui fuit). Le bruit aérien intérieur crée par les conversations, la télévision, le radio,

Bruit aérien

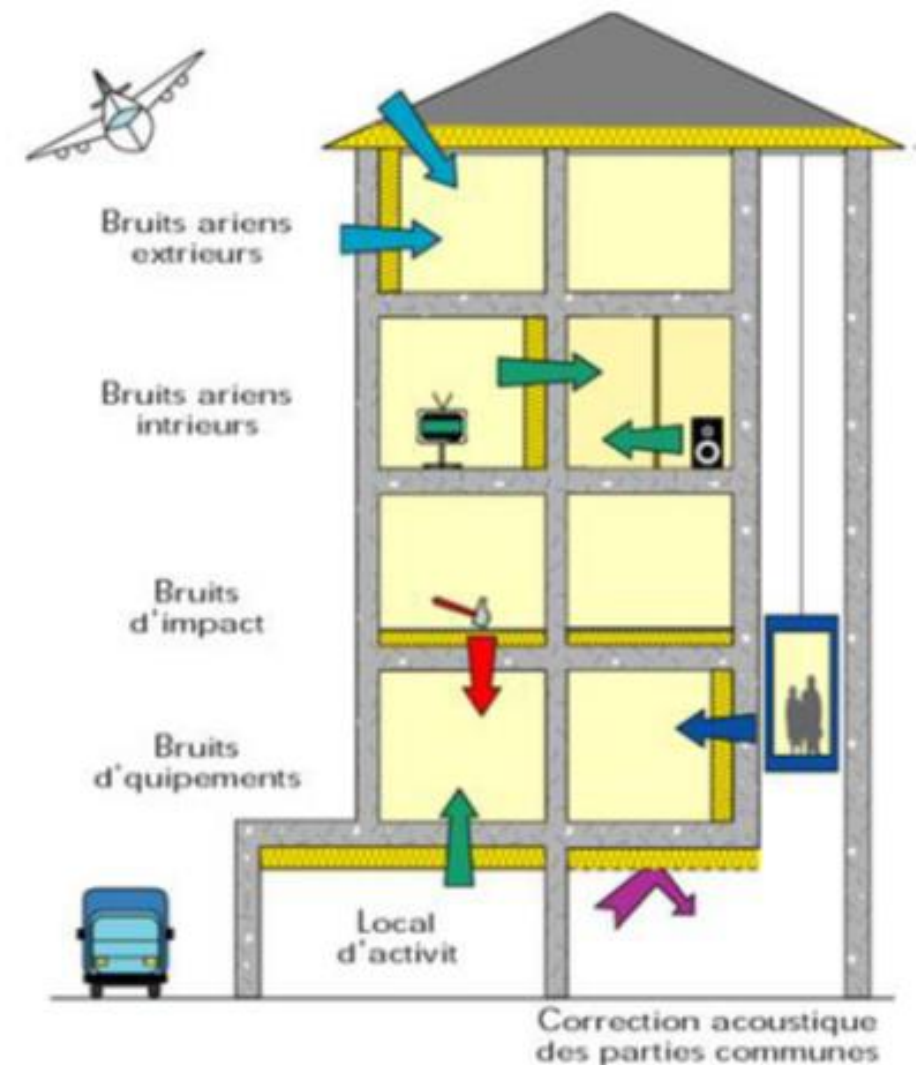
bruit produit par une source sonore dont l'énergie est transmise à l'air qui l'entoure.

- Le bruit aérien intérieur crée par les conversations, la télévision, le radio, ...
- Le bruit aérien extérieur crée par le trafic routier, une sirène, un avion,

Bruit solidien

C'est un bruit dont les vibrations sont créées dans les solides.

- Bruit d'équipement créé par l'ascenseur, la robinetterie,
- Bruit de choc ou d'impact créé par le déplacement des personnes, des meubles ou la chute des objets



Bruits aériens et solidiens

Le bruit dans le bâtiment

- Le bruit est un mélange de plusieurs sons différents, il présente une sensation désagréable et gênante. Le son ne doit pas être forcément fort pour être gênant (robinet qui fuit). Le bruit aérien intérieur crée par les conversations, la télévision, le radio,

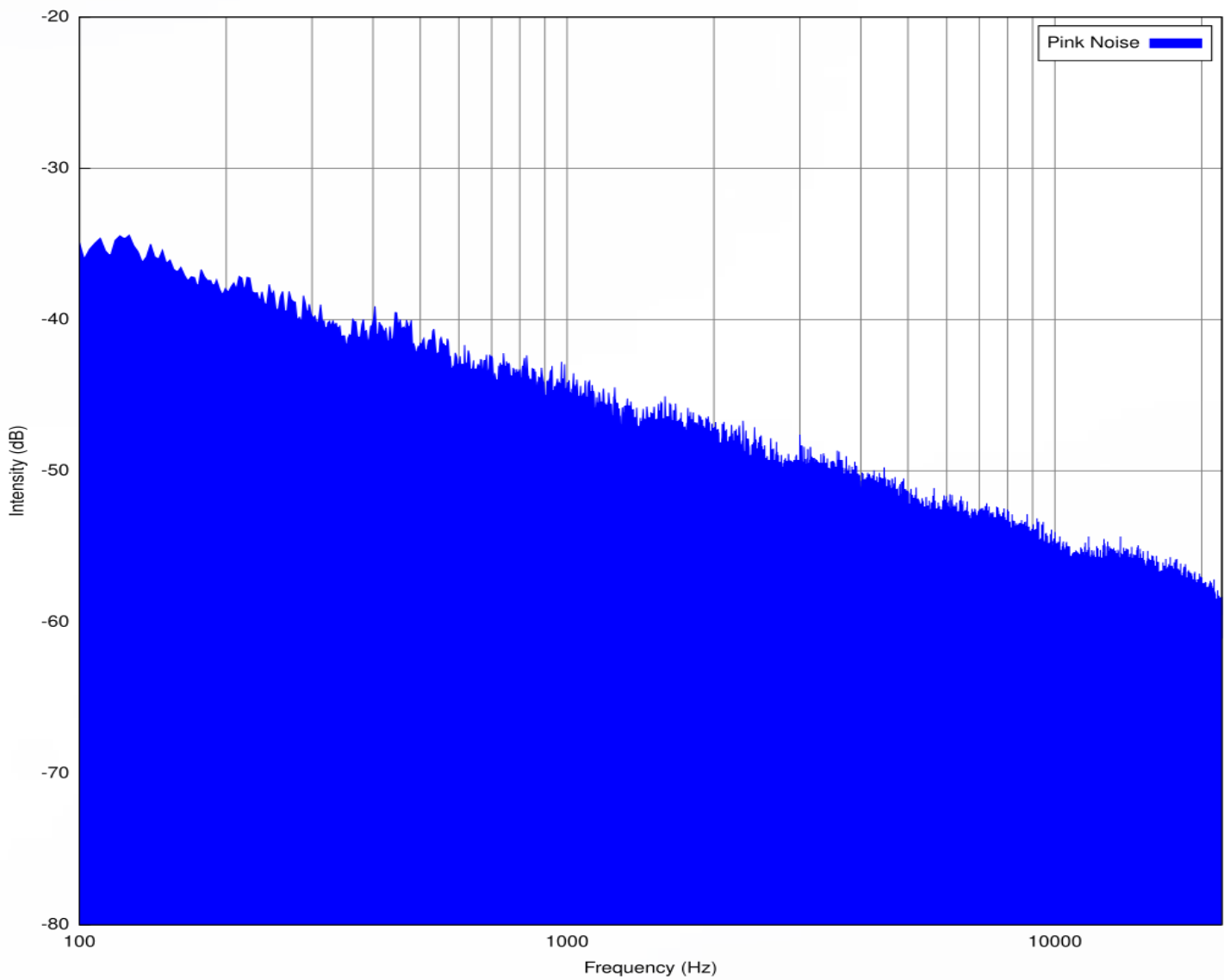
Bruit rose

C'est un bruit de référence présentant un niveau sonore identique pour chaque bande d'octave. Il est utilisé pour les mesures d'isolement acoustique aux bruits aériens intérieurs

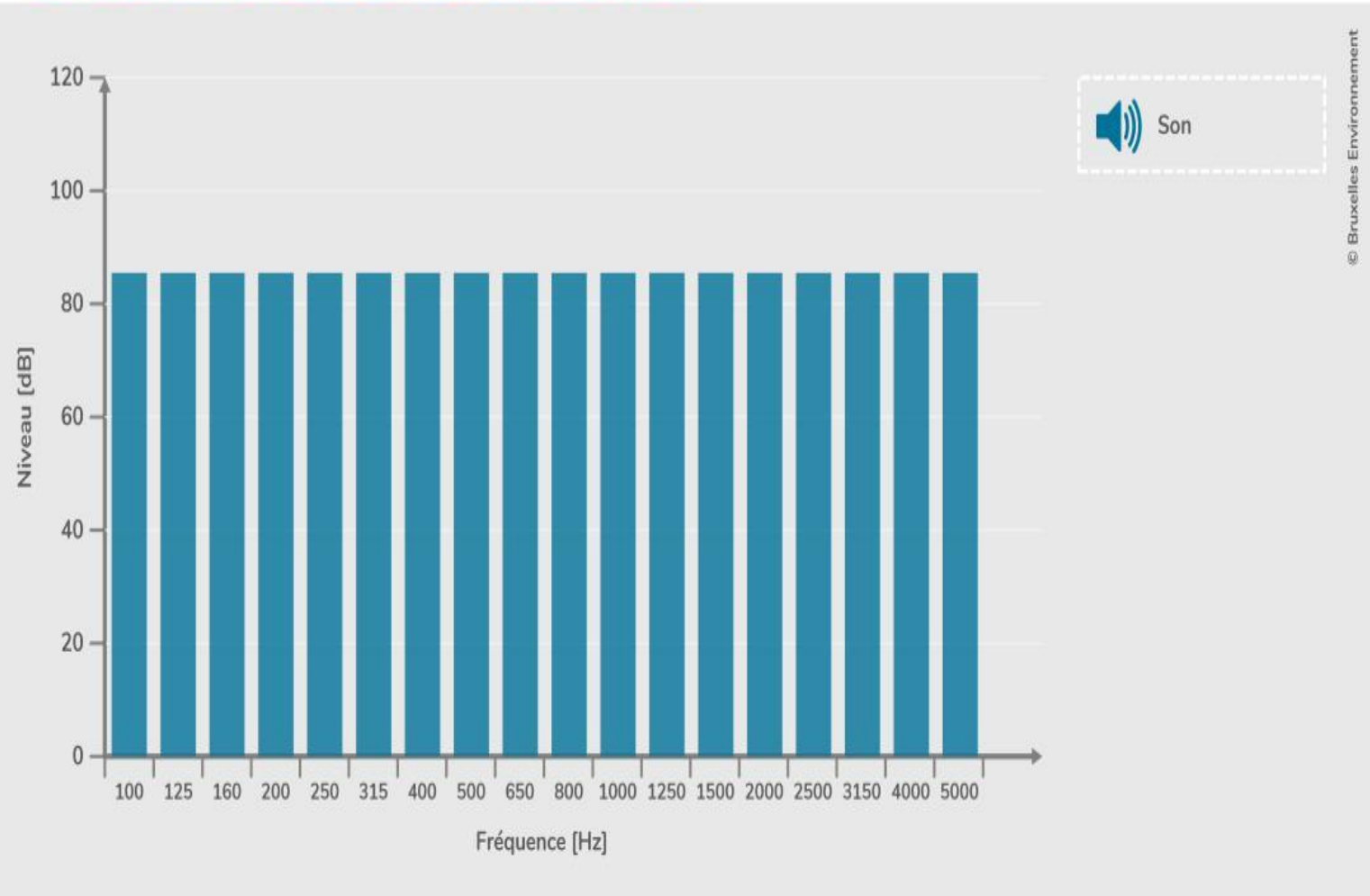
Bruit routier

C'est un bruit de référence présentant un spectre plus élevé en basses fréquences, correspond au spectre d'un trafic routier comportant une répartition standard de véhicules légers et de poids lourds.

Le bruit dans le bâtiment

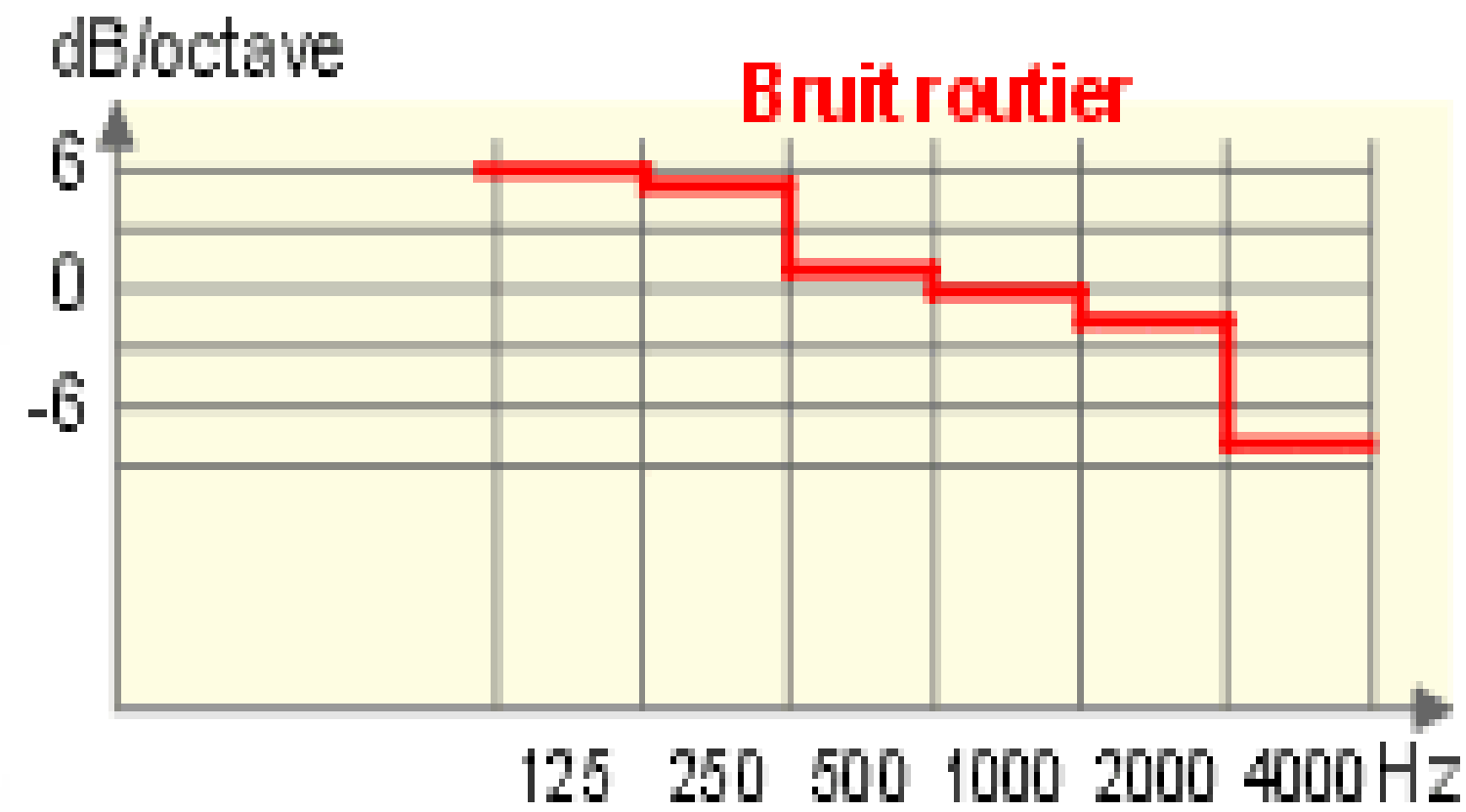


REPRÉSENTATION DU SPECTRE D'UN BRUIT ROSE

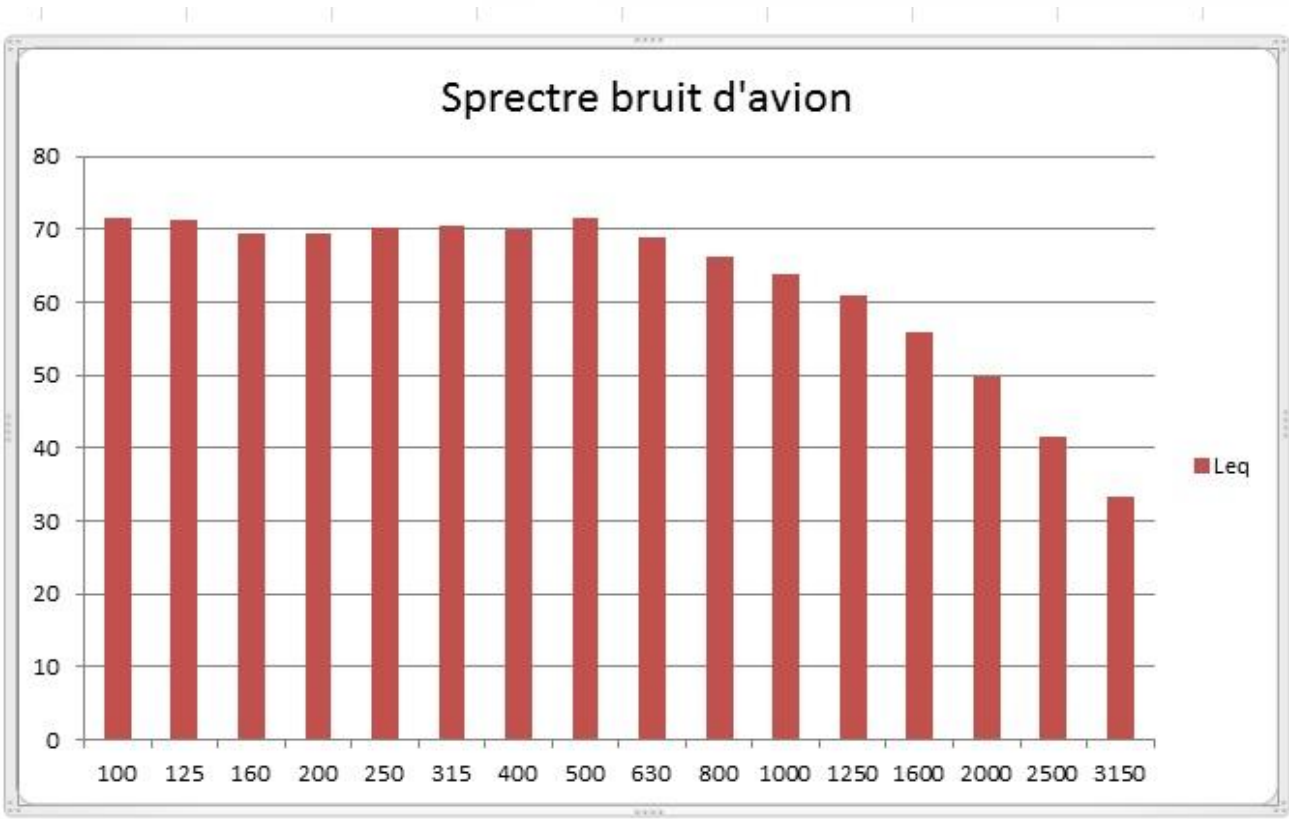


spectre d'un bruit rose

Le bruit dans le bâtiment



spectre d'un bruit routier



Octave, bande d'octave et tiers d'octave

Octaves

- Puisque les fréquences audibles par l'homme représentent une gamme très importante de 20 Hz jusqu'à 20000 Hz, on a divisé ces fréquences en des intervalles des fréquences appelés octaves
- L'octave est une bande de fréquence centrée à la fréquence f dont la fréquence minimale est f_1 est la fréquence maximale est f_2 tel que:

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

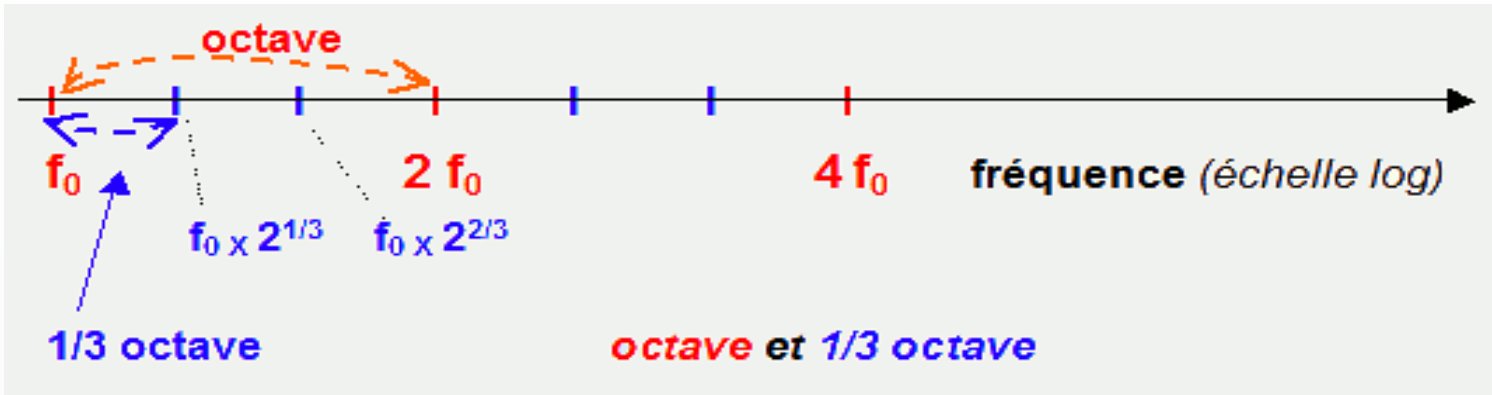
Tiers d'Octave

- Le tiers d'octave consiste à diviser l'octave en trois intervalles tels que: $\frac{f_2}{f_1} = 2^{\frac{1}{3}}$
- Cette notion de tiers d'octave est utilisée principalement dans les filtres tels que les égaliseurs

Bandes d'Octave

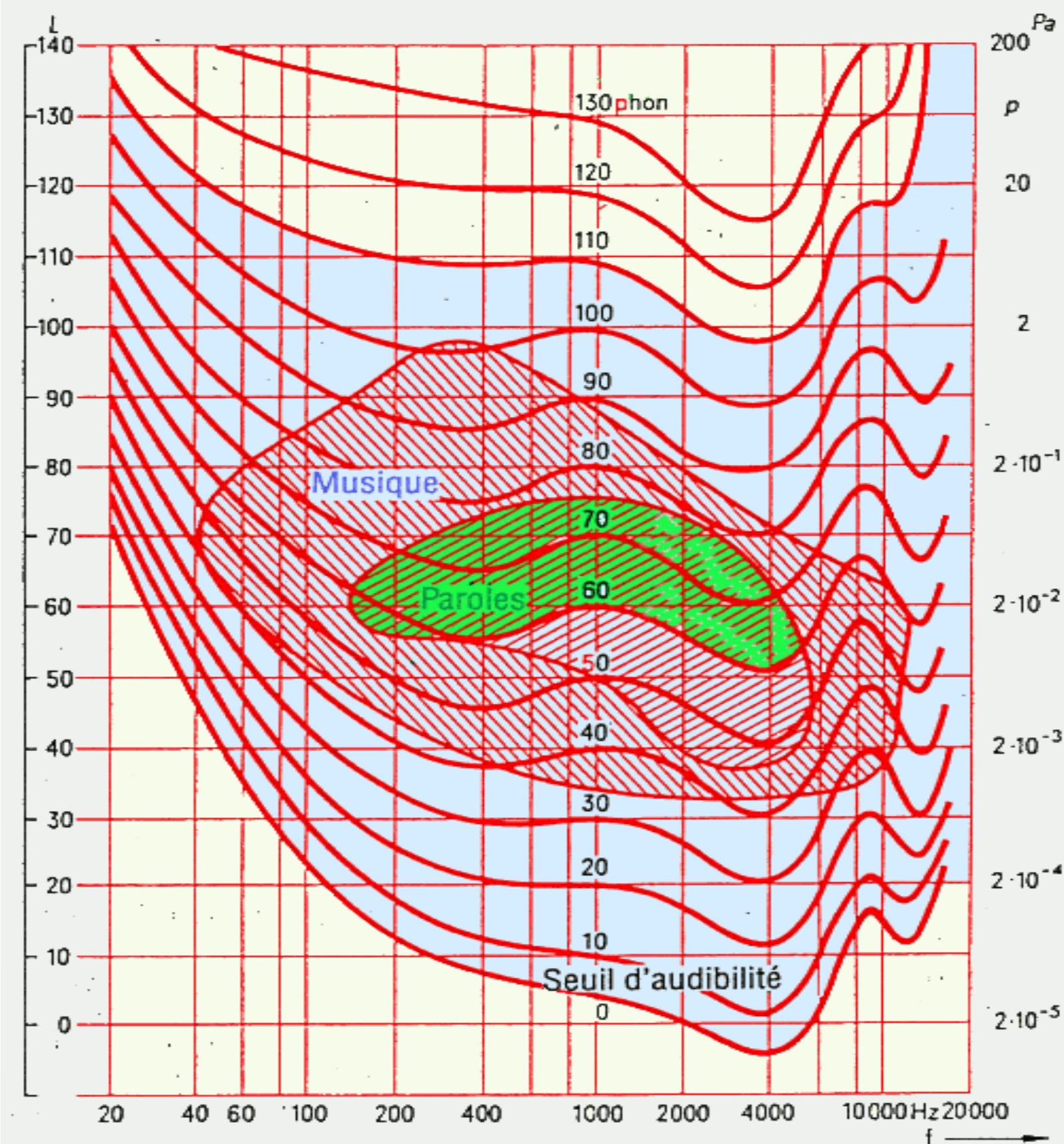
- Les bandes d'octave utilisées dans les bâtiments sont : 125, 250, 500, 1000, 2000 et 4000Hz.
- Le tableau suivant donne les fréquences minimales f_1 et maximales f_2 ainsi que la nature du son :

Fréquence f	Fréquences extrêmes		Nature du son
	f_1	f_2	
125 Hz	88	176	Grave
250 Hz	176	354	
500 Hz	354	707	Médium
1000 Hz	707	1414	
2000 Hz	1414	2828	Aigu
4000Hz	2828	5657	



Courbes d'égale sensibilité

- Ces courbes d'égale sensibilité représentent en fait l'audiogramme d'un individu à l'audition normale. Chaque ligne correspond à des sons "purs" (ne comportant qu'une seule fréquence) reconnus comme étant de même intensité., donc égaux en "volume" pour l'oreille.
- Les courbes d'égale sensibilité montrent comment l'oreille perçoit les sons de différentes fréquences. À **faible volume**, les sons graves et aigus sont moins bien entendus, tandis qu'à **volume élevé**, la perception devient plus uniforme.
- Les fréquences entre **300 et 5000 Hz**, essentielles à la communication et à la survie, sont les mieux perçues. La perception des graves varie davantage selon le volume, d'où l'utilisation de réglages comme "**loudness**" pour compenser en musique.
- En revanche, cette faiblesse auditive aux basses fréquences est bénéfique pour réduire la gêne liée au bruit, en complément des matériaux isolants.



Les sonomètres

- Un **sonomètre** mesure le niveau de pression acoustique pour quantifier les bruits et nuisances sonores, notamment dans les domaines de la **pollution sonore** (industrie, transports) et de l'**acoustique architecturale**.
- Les modèles **analogiques** mesurent uniquement les niveaux sonores avec des pondérations temporelles.
- Les **sonomètres numériques**, plus avancés, permettent aussi l'**analyse spectrale** et l'échantillonnage, souvent associés à des logiciels de traitement pour une analyse détaillée du bruit.

- Un **sonomètre** ou **décibelmètre** mesure le niveau sonore en **décibels (dB)** à un point précis et à un instant donné.
- En revanche, un **dosimètre de bruit** ou **exposimètre** est porté par une personne sur une période prolongée pour évaluer l'**exposition sonore quotidienne moyenne (Lexd)**, utile dans les contextes de santé et sécurité au travail.



Caractéristiques énergétiques des sons

Pression et niveau de pression acoustique

Pression acoustique efficace

La pression acoustique efficace P_{eff} est la valeur quadratique moyenne (RMS) de la pression acoustique instantanée $p(t)$ sur une période donnée. Elle est reliée à la pression acoustique maximale P_A par la relation :

$$P_{eff} = \frac{P_A}{\sqrt{2}} = 0,71P_A$$

Niveau de pression acoustique

- Le niveau de pression acoustique est représenté par une échelle logarithmique et s'exprime en décibels par la relation suivante :

$$L_p = 10 \log \left(\frac{p}{P_0} \right)^2 \text{ (dB)}$$

- L_p : le niveau de pression acoustique en dB, p : la pression acoustique de l'onde en Pa, P_0 : la pression acoustique de référence égale à 2.10^{-5} Pa, log: logarithme décimal.

Pression acoustique

- Une source acoustique engendre une pression acoustique P qui permet d'évaluer le niveau sonore des bruits. La pression acoustique en fonction du temps s'écrit sous la forme :

$$p = p_A \cos(\omega t + \varphi)$$

- P_A la valeur maximale de la pression en Pascal et φ l'angle de phase,
- La pression acoustique d'une conversation usuelle varie de 0,1 à 1 N/m² à une distance de 1 m de la bouche.
- La pression acoustique la plus faible perceptible par l'oreille, humaine (seuil d'audibilité) est de 2.10^{-5} N/m² tandis que le seuil de douleur est atteint pour une pression de 20 N/m².

Caractéristiques énergétiques des sons

Pression et niveau de pression acoustique

Remarque

- Puisque la pression acoustique pour l'oreille humaine varie de $2 \cdot 10^{-5}$ à 20 Pa, on trouve :

Le niveau de pression acoustique du seuil d'audibilité est :

$$L_p = 10 \log \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 = 20 \log \left(\frac{2 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 10^{-5}} \right) = 0 \text{ dB}$$

Le niveau de pression acoustique correspond au seuil de douleur est :

$$L_p = 10 \log \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 = 20 \log \left(\frac{20}{2 \cdot 10^{-5}} \right) = 120 \text{ dB}$$

Ech lle des niveaux de pression acoustique

Pression acoustique en Pascal		Niveau de pression en dB
2.10 ²		140
	6,32.10	130
2.10 ¹		120
	6,32	110
2		100
	6,32.10 ⁻¹	90
2.10 ⁻¹		80
	6,32.10 ⁻²	70
2.10 ⁻²		60
	6,32.10 ⁻³	50
2.10 ⁻³		40
	6,32.10 ⁻⁴	30
2.10 ⁻⁴		20
	6,32.10 ⁻⁵	10
2.10 ⁻⁵		0





Niveau de puissance acoustique

La puissance acoustique est l'énergie libérée par cet élément par unité de temps.

- Le niveau de puissance acoustique est représenté par une échelle logarithmique et s'exprime en décibels par la relation suivante :

$$L_W = 10 \log \left(\frac{W}{W_0} \right) (\text{dB})$$

- L_W : le niveau de puissance acoustique en dB
- W : la puissance acoustique de l'onde en Watts
- W_0 : la puissance acoustique de référence égale à 10^{-12} Watts
- $\log$: logarithme décimal



Niveau d'intensité acoustique

L'intensité acoustique caractérise la puissance libérée par la source sonore par unité de surface.

- Le niveau d'intensité acoustique est représenté par une échelle logarithmique et s'exprime en décibels par la relation suivante

$$L_I = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) (\text{dB})$$

- L_I : le niveau d'intensité acoustique en dB
- I : Intensité acoustique de l'onde en Watts/mètres²
- I_0 : Intensité acoustique de référence égale à 10^{-12} Watts/mètres²
- log : logarithme décimal



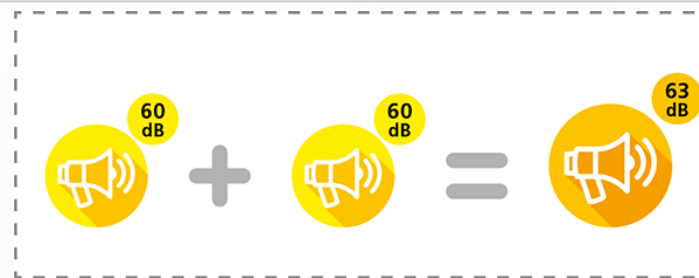
Addition de deux niveaux sonores

Deux niveaux sonores égaux

- Soient L_{p1} et L_{p2} les niveaux de pression acoustique de deux sources sonores tels que $L_{p1} = L_{p2}$
- Le niveau de pression acoustique total $L_{total} = L_{p1} + L_{p2}$ est déterminé comme suit :

$$L_{p1} = 10 \log \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^2, \text{ alors, } L_{p_{total}} = 10 \log \left(\frac{p_1^2 + p_1^2}{p_0^2} \right) = 10 \log \left(\frac{2p_1^2}{p_0^2} \right)$$

$$L_{p_{total}} = 10 \log(2) + 10 \log \left(\frac{p_1^2}{p_0^2} \right) = 3 + L_{p1}$$





Addition de deux niveaux sonores

Plusieurs sources de même niveau acoustique :

- Dans le cas de n sources sonores de même niveau acoustique, l'augmentation du niveau considéré est :

$$\Delta N = 10 \log(n)$$

- Avec n est le nombre de sources

Deux niveaux sonores différents

- Soient L_{P1} et L_{P2} les niveaux de pression acoustique de deux sources sonores tels que $L_{P1} > L_{P2}$
- Le niveau de pression acoustique total $L_{total} = L_{P1} + L_{P2}$ est déterminé comme suit : $L_{p_{total}} = L_{P1} + K(\text{dB})$
- $K(\text{dB})$ est déterminé par le tableau suivant en fonction de $\Delta L = L_{P1} - L_{P2}$

$\Delta L(\text{dB})$	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20
$K(\text{dB})$	3	2,8	2,5	2,3	2,1	1,8	1,5	1,2	1	0,8	0,6	0,5	0,4	0,3	0,1	0,04

- L'augmentation du niveau acoustique résultant peut être déterminée par le diagramme suivant :

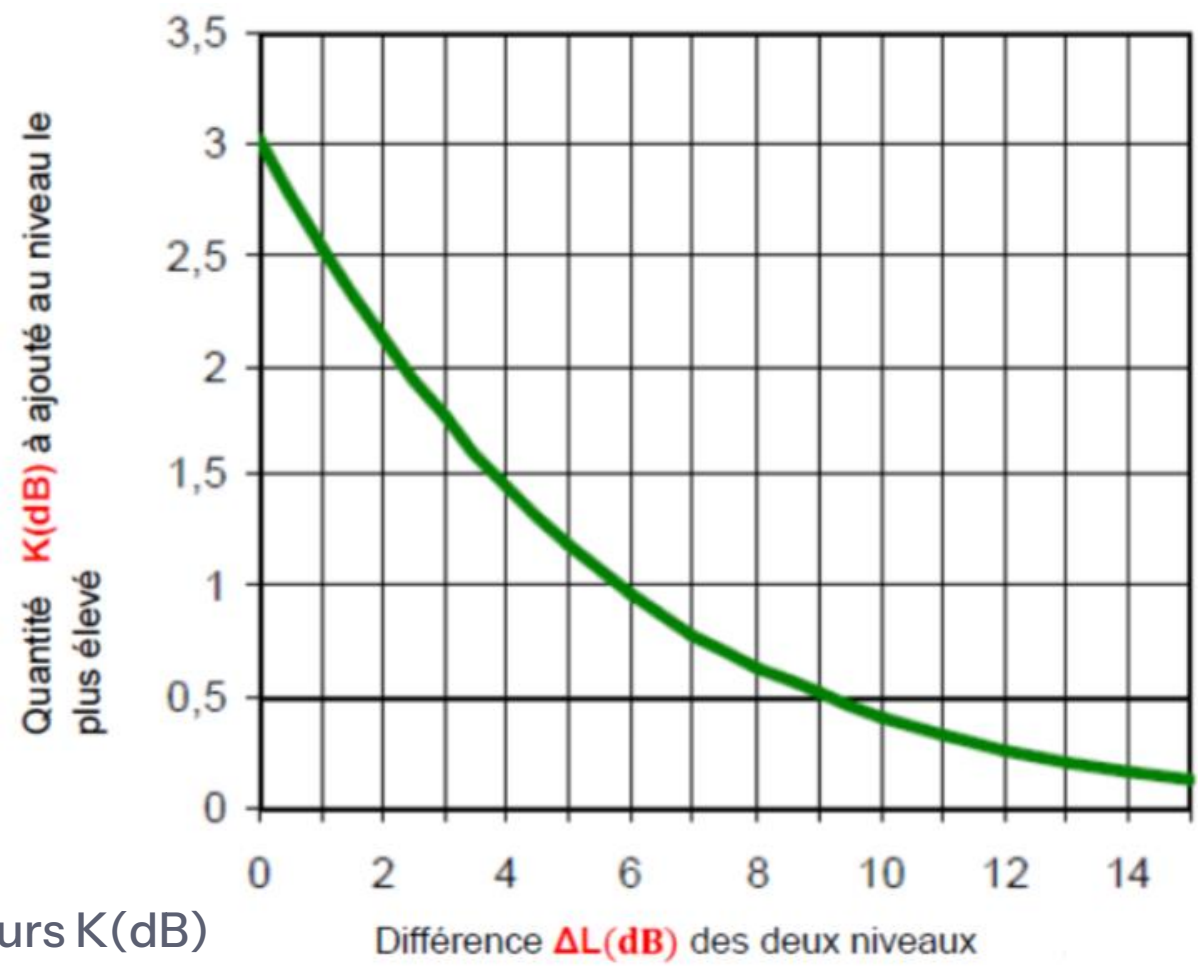
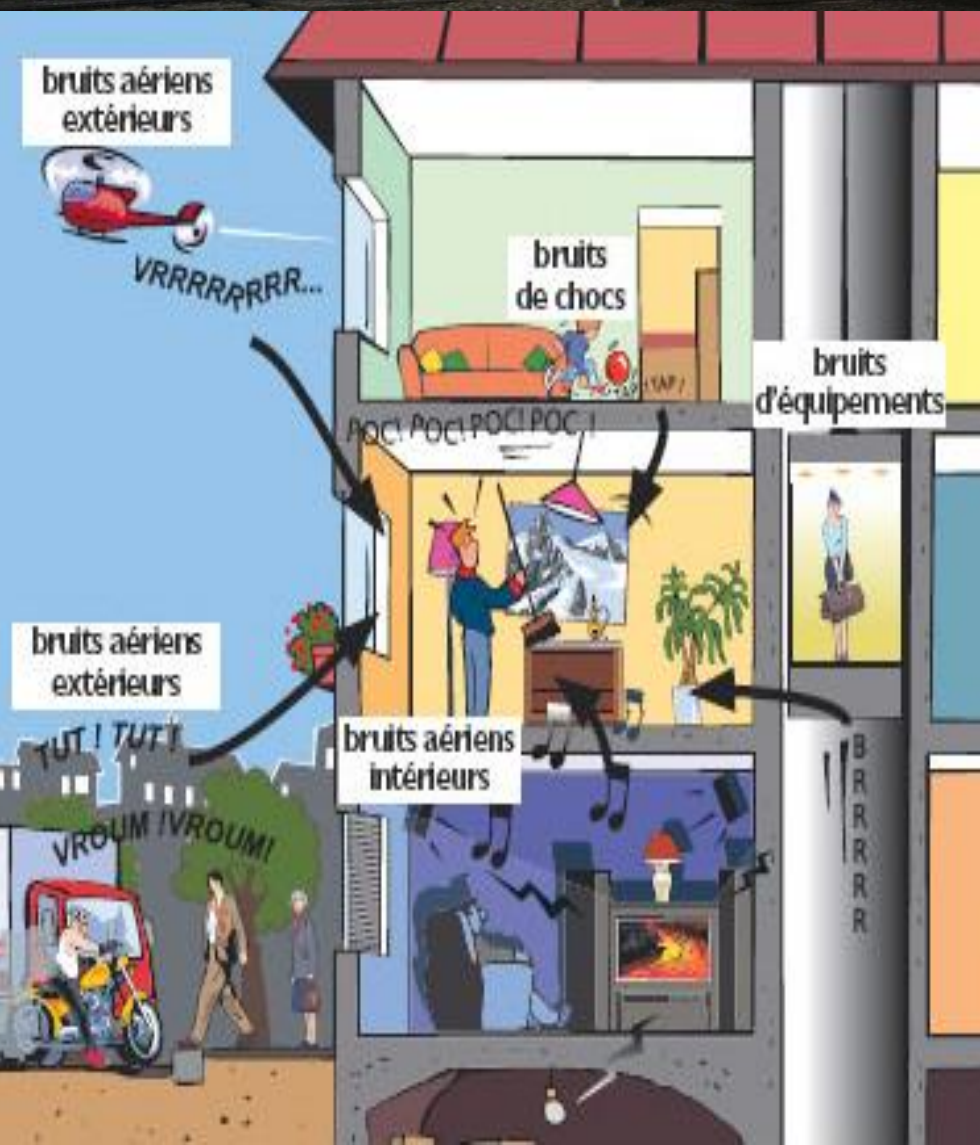


Diagramme de détermination des valeurs $K(\text{dB})$



Plusieurs sources sonores de niveaux acoustiques différents

- Dans le cas de plusieurs sources sonores de niveaux acoustiques différents, le niveau de pression total résultant est obtenu par la relation suivante :

$$L_p = 10 \log \left[\sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \right] (dB)$$

Niveau acoustique continue équivalent L_{eq}

- L'exposition a un son fort pendant 3 heures est plus gênant que l'exposition au même son pendant une heure ; pour cela ; on définit le niveau acoustique continue équivalent L_{eq} qui met en jeu le facteur temps et qui est calculé par la formule :

$$L_{eq} = 10 \log \left[\frac{\int_0^T 10^{\frac{L_T}{10}} dt}{T} \right]$$

- Exemple :

Soit un atelier qui fonctionne 2 heures à 90 dB (à 1000Hz) et 7 heures à 70dB (à 1000Hz). Déterminer le niveau acoustique continue équivalent L_{eq} :



Niveau acoustique continue équivalent L_{eq}

- L'exposition a un son fort pendant 3 heures est plus gênant que l'exposition au même son pendant une heure ; pour cela ; on définit le niveau acoustique continue équivalent L_{eq} qui met en jeu le facteur temps et qui est calculé par la formule :

$$L_{eq} = 10 \log \left[\frac{\int_0^T 10^{\frac{L_T}{10}} dt}{T} \right]$$

- Exemple :

Soit un atelier qui fonctionne 2 heures à 90 dB (à 1000Hz) et 7 heures à 70dB (à 1000Hz). Déterminer le niveau acoustique continue équivalent L_{eq} :

$$L_{eq} = 10 \log \left[\frac{10^{\frac{90}{10}} \times 2 + 10^{\frac{70}{10}} \times 7}{2 + 7} \right] = 83,6 \text{ dB}$$



Niveau de pression continue équivalent pondéré A

- Le niveau de pression acoustique continu équivalent pondéré A, exprimé en dB, d'un son continu stable qui, au cours d'une période spécifiée T , a la même pression acoustique quadratique moyenne qu'un son considéré dont le niveau varie en fonction du temps est donné par l'expression suivante :

$$L_{AeqT} = 10 \log \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0} dt \right] ; \quad L_{AeqT} = L_{A,T}$$

- T est la période qui commence à t_1 et qui se termine à t_2



Niveau de pression continue équivalent pondéré A

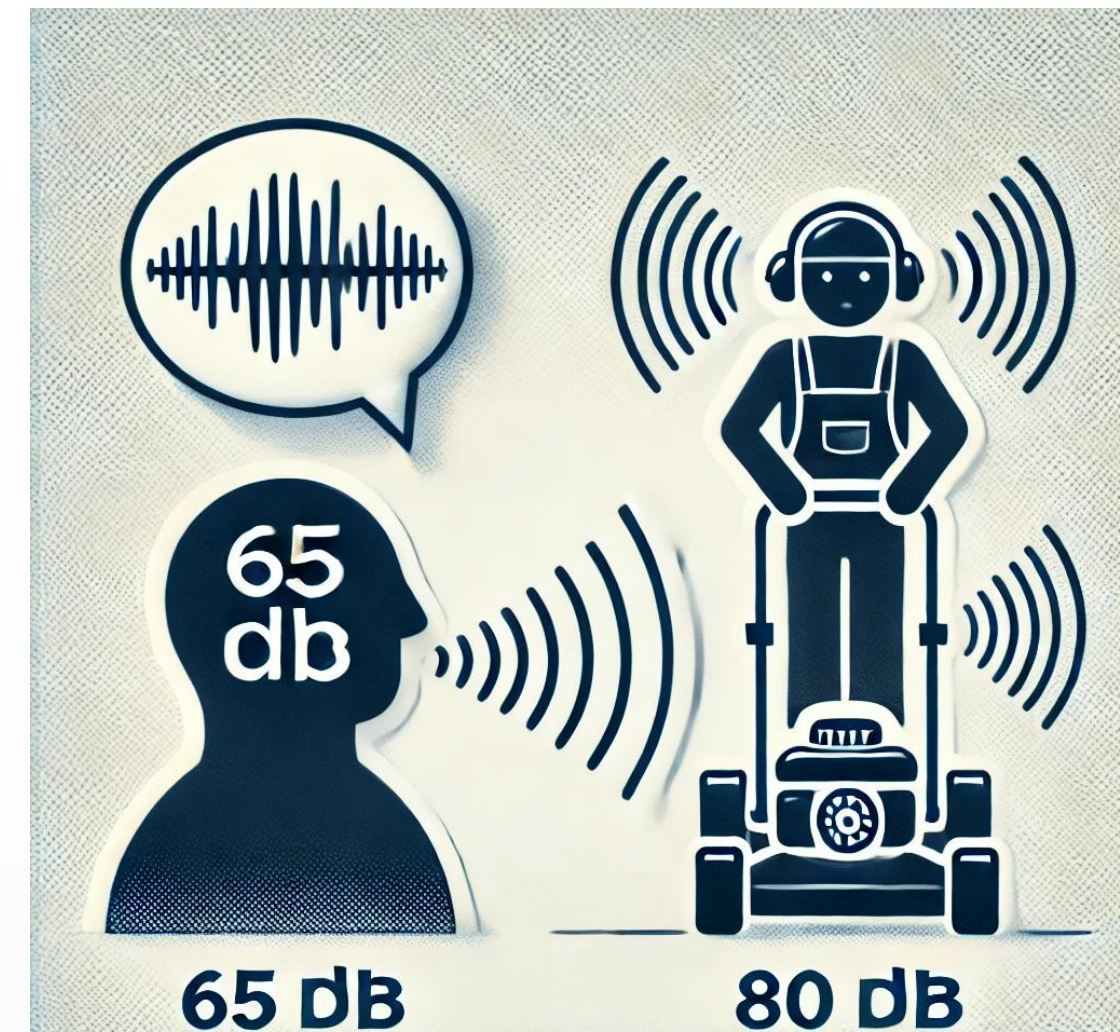
Les règles d'addition des niveaux de bruits

- Le niveau sonore s'exprime selon une échelle logarithmique, les règles d'addition classiques ne s'appliquent donc pas aux niveaux de bruit. Par exemple, deux conversations identiques et simultanées, dont le niveau sonore est de 50 dB, ne donneront pas un niveau sonore de 100 dB, mais un niveau sonore de 53 dB. Voici les règles d'addition applicables en fonction des niveaux de bruit considérés :

- Si les bruits sont de niveaux très différents :

Si l'écart des niveaux de bruit est supérieur à 10 dB, le bruit le plus fort masque le plus faible. C'est l'effet « de masquage » lorsque qu'un son est rendu inaudible par un autre.

Exemple : Deux bruits de niveaux très différents.



Niveau de pression continue équivalent pondéré A

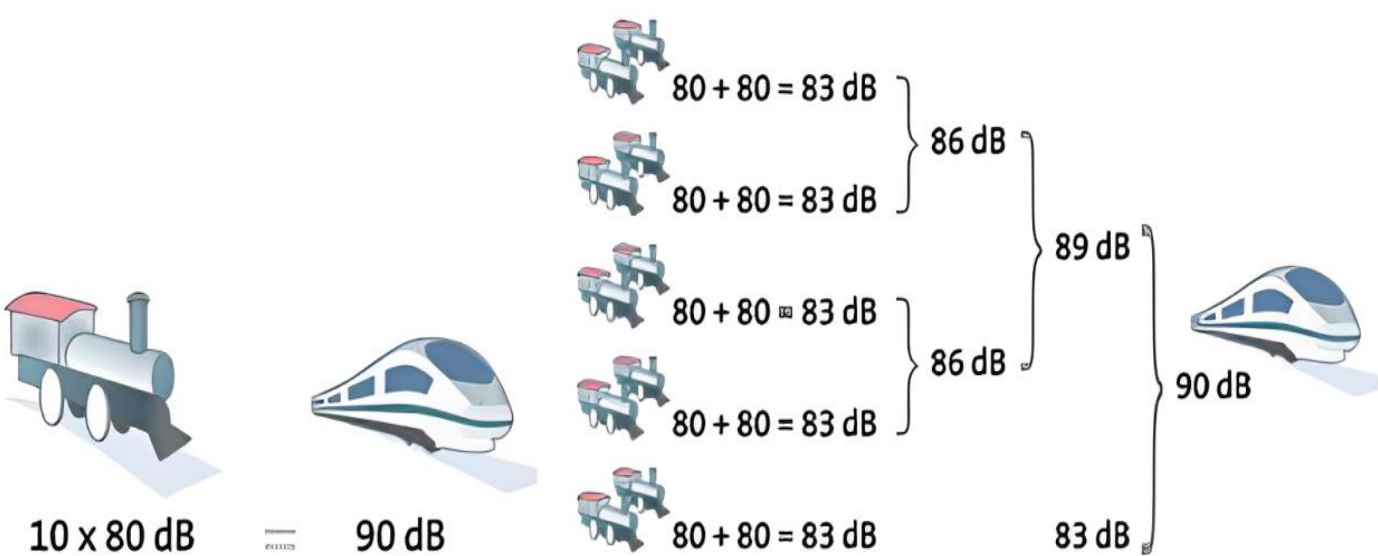
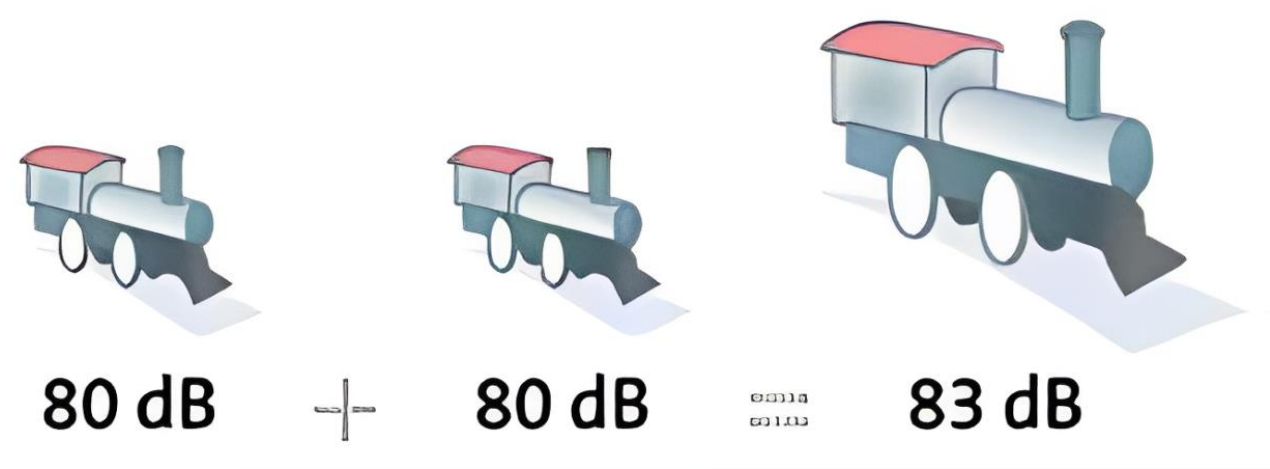
Les règles d'addition des niveaux de bruits

- Si les bruits sont de niveaux voisins (écart < 10 dB)

Si les niveaux de bruit sont similaires, l'évaluation du niveau de bruit résultant se fait par addition au niveau de bruit le plus fort d'une valeur donnée dans le tableau suivant :

Différence entre deux niveaux sonores (en dB)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Valeur à ajouter au niveau le plus fort (en dB)	3,0	2,6	2,1	1,8	1,5	1,2	1,0	0,8	0,6	0,5

- Exemple 1 : Deux sources avec une différence de niveau nulle :
- Exemple 2 : 10 sources avec une différence de niveau nulle :





Propagation des Sons en Espace Clos

En espace clos, les sons se propagent de différentes manières, influençant la qualité acoustique de l'espace.

1

Réflexion

Les ondes sonores rebondissent sur les surfaces dures et lisses, créant des échos qui peuvent dégrader la clarté du son.

2

Absorption

Les matériaux absorbants, comme les tapis et les rideaux, dissipent l'énergie sonore, réduisant les réflexions et améliorant la qualité sonore.

3

Transmission

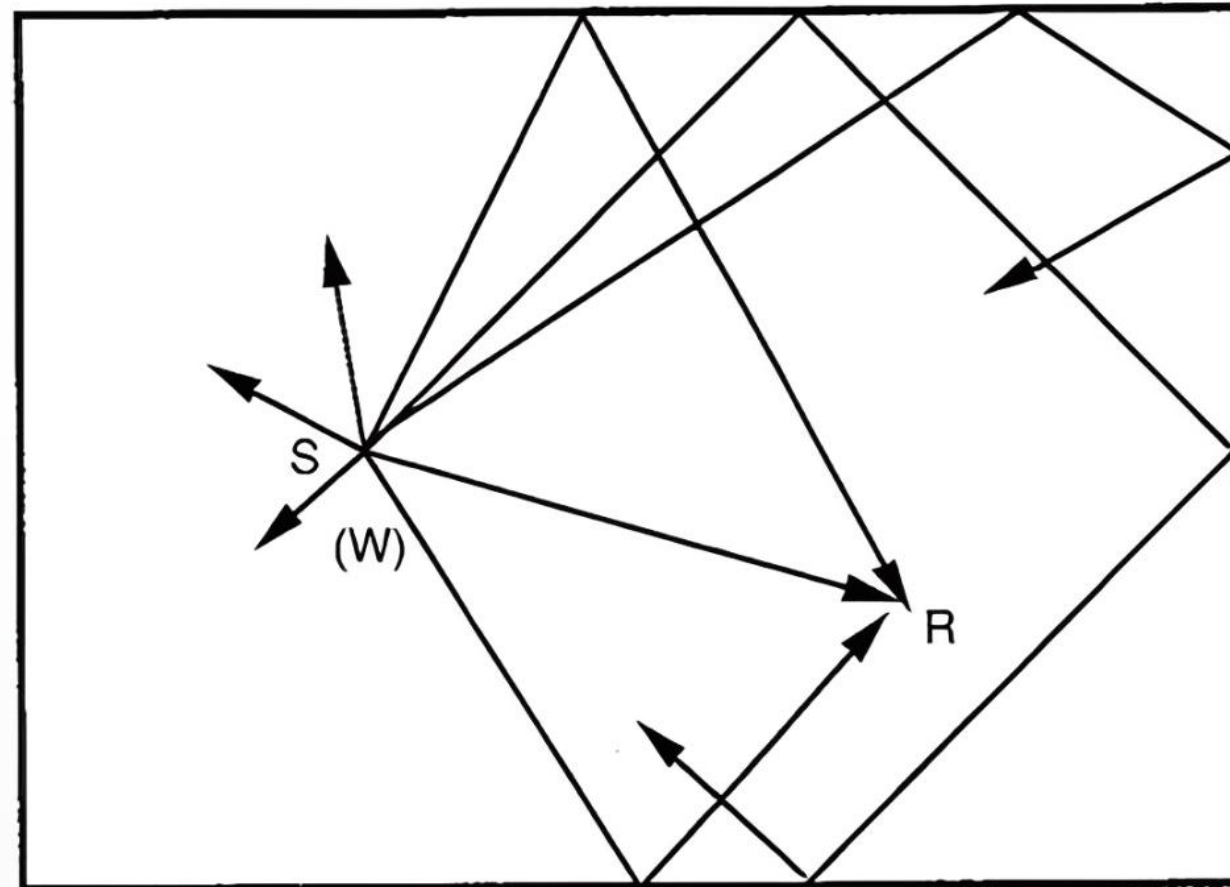
Les sons peuvent traverser des murs et des plafonds, causant des nuisances sonores entre les pièces adjacentes.



Propagation des Sons en Espace Clos

champ réverbère

- On appelle champ réverbère un champ qui réfléchit la chaleur la lumière et le son.
- Lorsqu'une source sonore S de puissance W est disposée à l'intérieur d'un milieu fermé (local par exemple), en plus de l'énergie rayonné directement vers un point d'observation R , vient s'ajouter une énergie réfléchie une ou plusieurs fois par les parois.



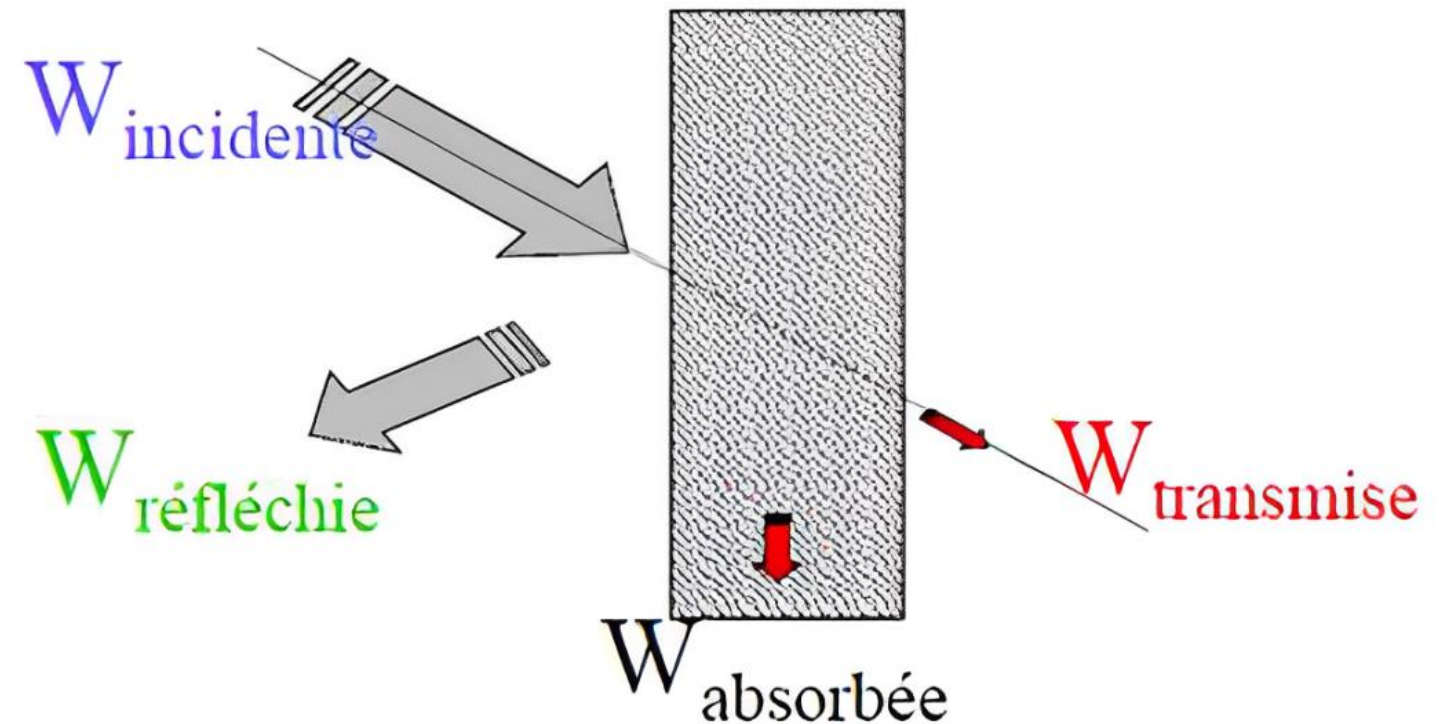


Propagation des Sons en Espace Clos

Coefficient d'absorption d'un matériau α

- Le coefficient d'absorption α d'un matériau représente la fraction de la puissance acoustique incidente absorbée par ce matériau : c'est donc le rapport de l'énergie absorbée à l'énergie incidente :

$$\alpha = \frac{\text{Energie absorbée}}{\text{Energie incidente}} = \frac{W_{\text{absorbée}}}{W_{\text{incidente}}}$$



- Le coefficient d'absorption α dépend de la nature des matériaux et de l'angle d'incidence ainsi que de la fréquence,
- Le tableau suivant donne les valeurs du coefficient α de quelques revêtements de surfaces courants :

MATERIAU	Fréquence (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Béton	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04
Plâtre	0,02	0,03	0,04	0,05	0,03	0,03
Verre 3 (mm)	0,08	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
Placage de bois a/ épaisseur 8(mm) avec vide d'air de 30 (mm) 5 (kg/m²)	0,25	0,22	0,04	0,03	0,03	0,08
b/ épaisseur 16 (mm) avec vide d'air de 50 (mm) 10 (kg/m²)	0,18	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07
Polyuréthane (e = 30 mm, 30 kg/m³)	0,03	0,15	0,48	0,65	0,82	0,81
Laine de verre collée épaisseur (40 mm, 70 kg/m³)	0,29	0,52	0,69	0,89	0,96	0,97
Rideau épais et plissé en velours...	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
P.V.C	0,02	0,03	0,03	0,04	0,06	0,05
Caoutchouc	0,03	0,04	0,06	0,06	0,06	0,06
P.V.C sur sous-couche (5mm)	0,02	0,09	0,31	0,12	0,06	0,03
Parquet bois collé	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,06
Parquet bois sur lambourde	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,06
Moquette bouclée (4mm)	0,01	0,03	0,05	0,11	0,32	0,66
Moquette sur thibaude (5,5 + 8(mm))	0,04	0,10	0,31	0,70	0,93	0,74
Marbre	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03
	Absorption totale S. α (m²)					
Fauteuil avec revêtement velours	0,14	0,23	0,35	0,39	0,37	0,38
Avec revêtement plastique	0,09	0,13	0,15	0,15	0,11	0,07
Personne assise	0,15	0,23	0,56	0,78	0,88	0,89
Personne debout	0,15	0,23	0,61	0,97	1,14	1,14

Coefficient α de quelques matériaux

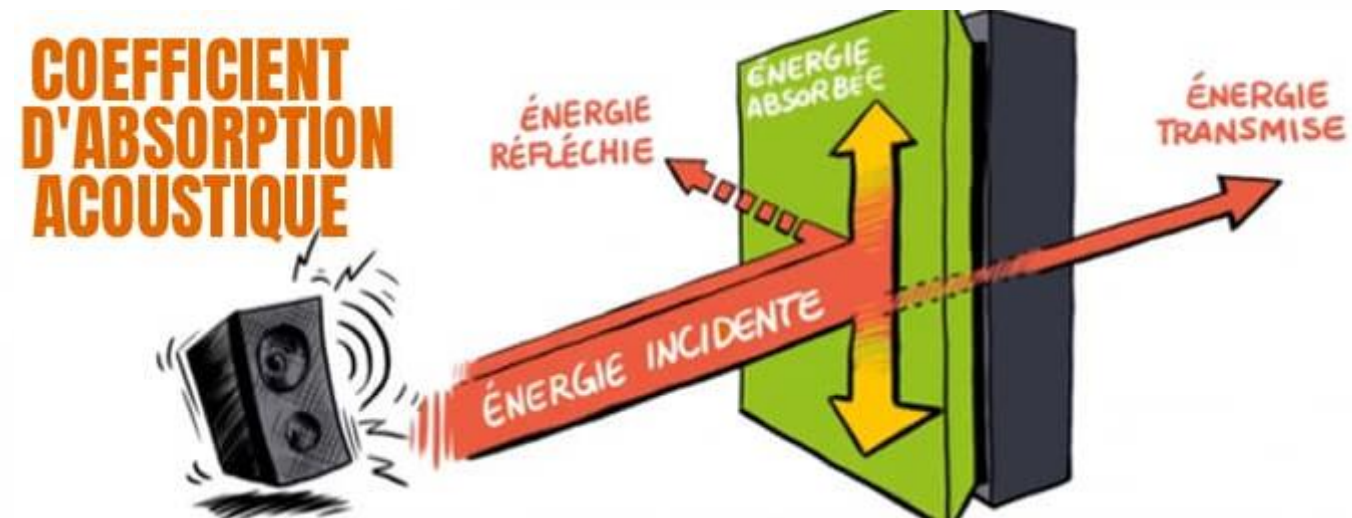
Surface d'absorption équivalente

- On appelle surface d'absorption équivalente A , le terme

$$A = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n = \sum \alpha_i S_i$$

avec:

- α_i : le coefficient d'absorption d'un matériau dans la paroi i ($0 < \alpha \leq 1$),
- S_i : La surface de la paroi i .



- **Intensité sonore globale**

Dans une salle clos ou le son est en partie absorbé et en partie réfléchi par les parois, l'intensité sonore globale I est la somme des deux intensités sonores :

- **Intensité rayonnée I_d :**

Elle est rayonnée directement par la source de directivité Q , elle est égale :

$$I_d = \frac{WQ}{4\pi r^2}$$

- **Intensité réverbérée I_r :**

Elle est calculée par la relation suivante :

$$I_r = \frac{4W}{R}$$

Avec R est la constante de la salle ;

$$R = \frac{S \cdot A}{S - A}$$

- L'intensité sonore globale I est la somme des deux intensités sonores :

$$I = I_d + I_r \text{ alors } I = \frac{WQ}{4\pi r^2} + \frac{4W}{R}$$

- **Distance critique**

La distance critique r_c est la distance lorsque l'intensité réverbérée I_r est égale à Intensité rayonnée I_d

$$I_r = I_d \text{ ou encore } \frac{4W}{R} = \frac{WQ}{4\pi r^2}$$

Alors

$$r_c = \sqrt{\frac{RQ}{16\pi}} (m)$$



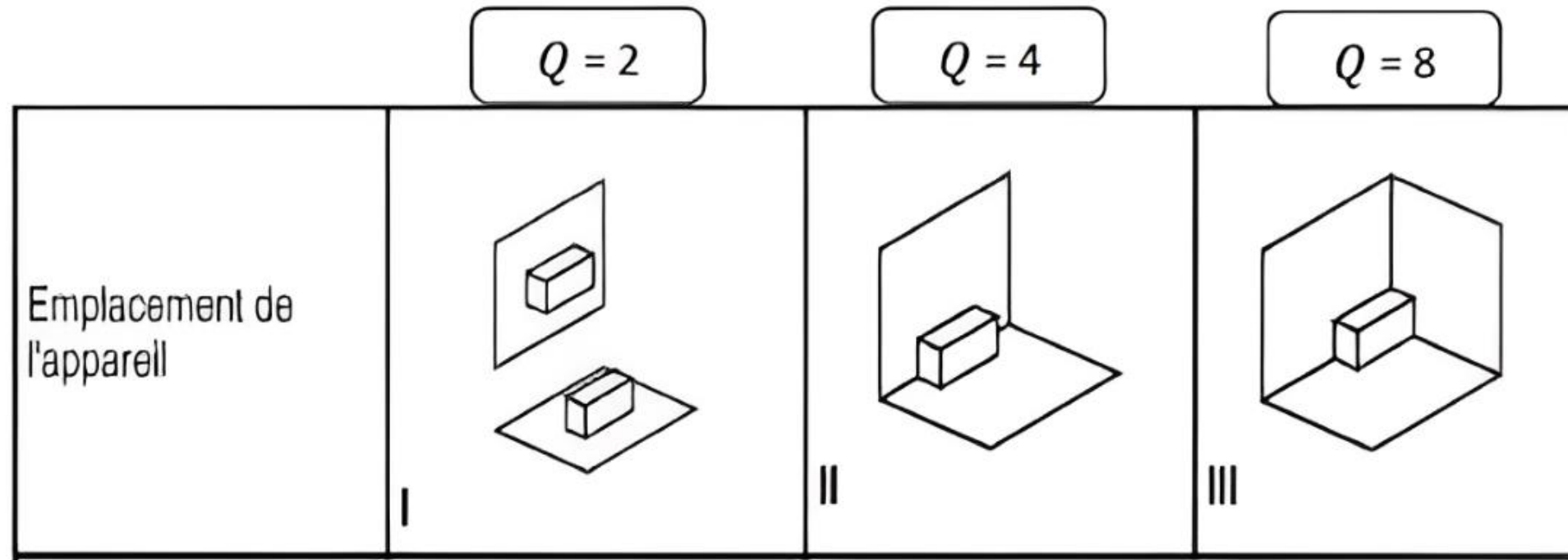
Niveau de pression acoustique

- Le niveau de pression acoustique à la distance r de la source s'exprime par la relation :

$$L_p = L_W + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) (dB)$$

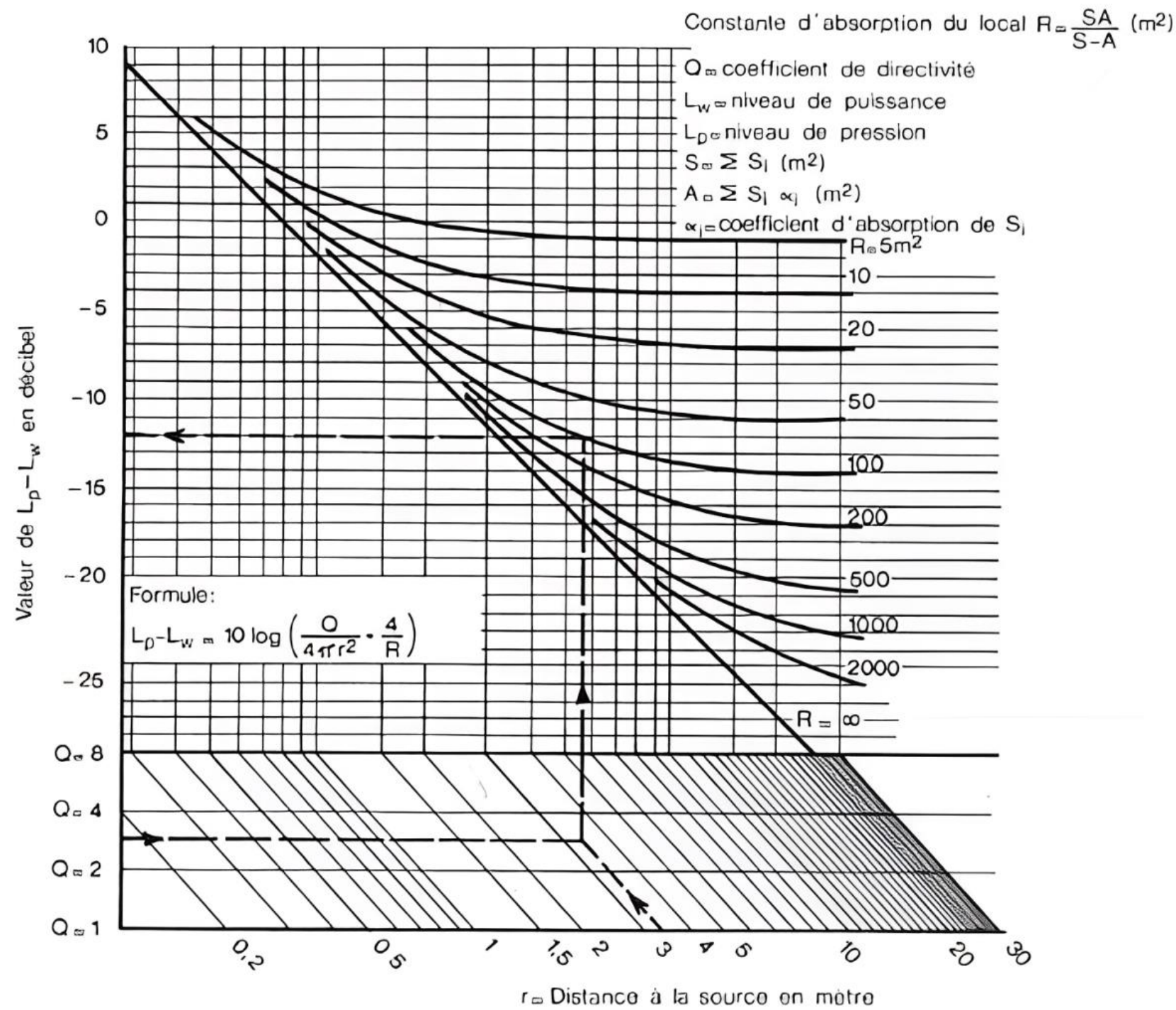
Le facteur de directivité a pour valeur Q :

- = 1 si la source se trouve au milieu du local
- = 2 si la source se situe au milieu d'une paroi
- = 4 si la source se situe à l'intersection de deux parois
- = 8 si la source se trouve au point de rencontre des trois parois formant trièdre rectangle



Détermination du facteur de directivité

On peut aussi utiliser l'abaque suivant :

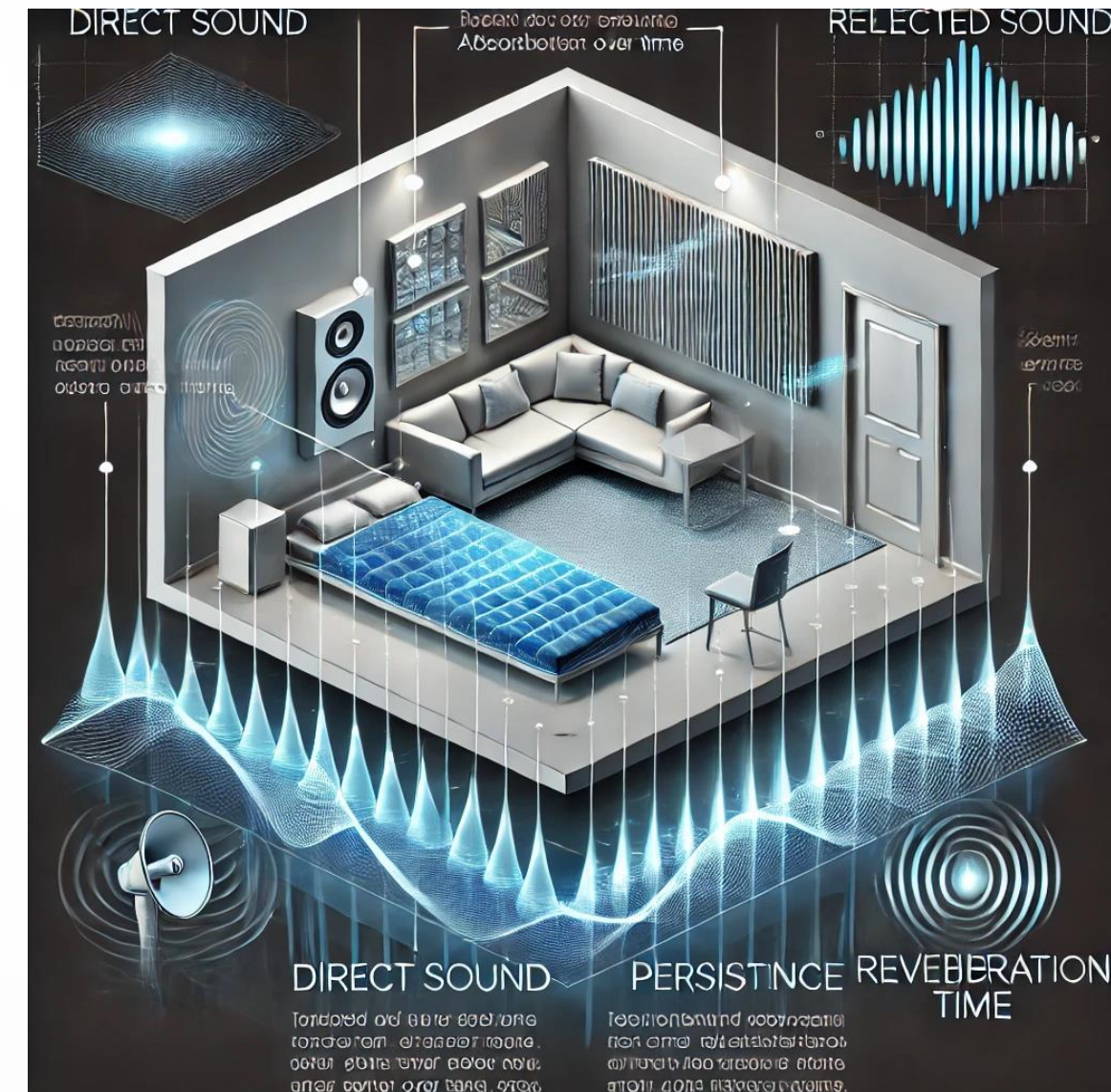


Abaque de détermination de $L_p - L_W$



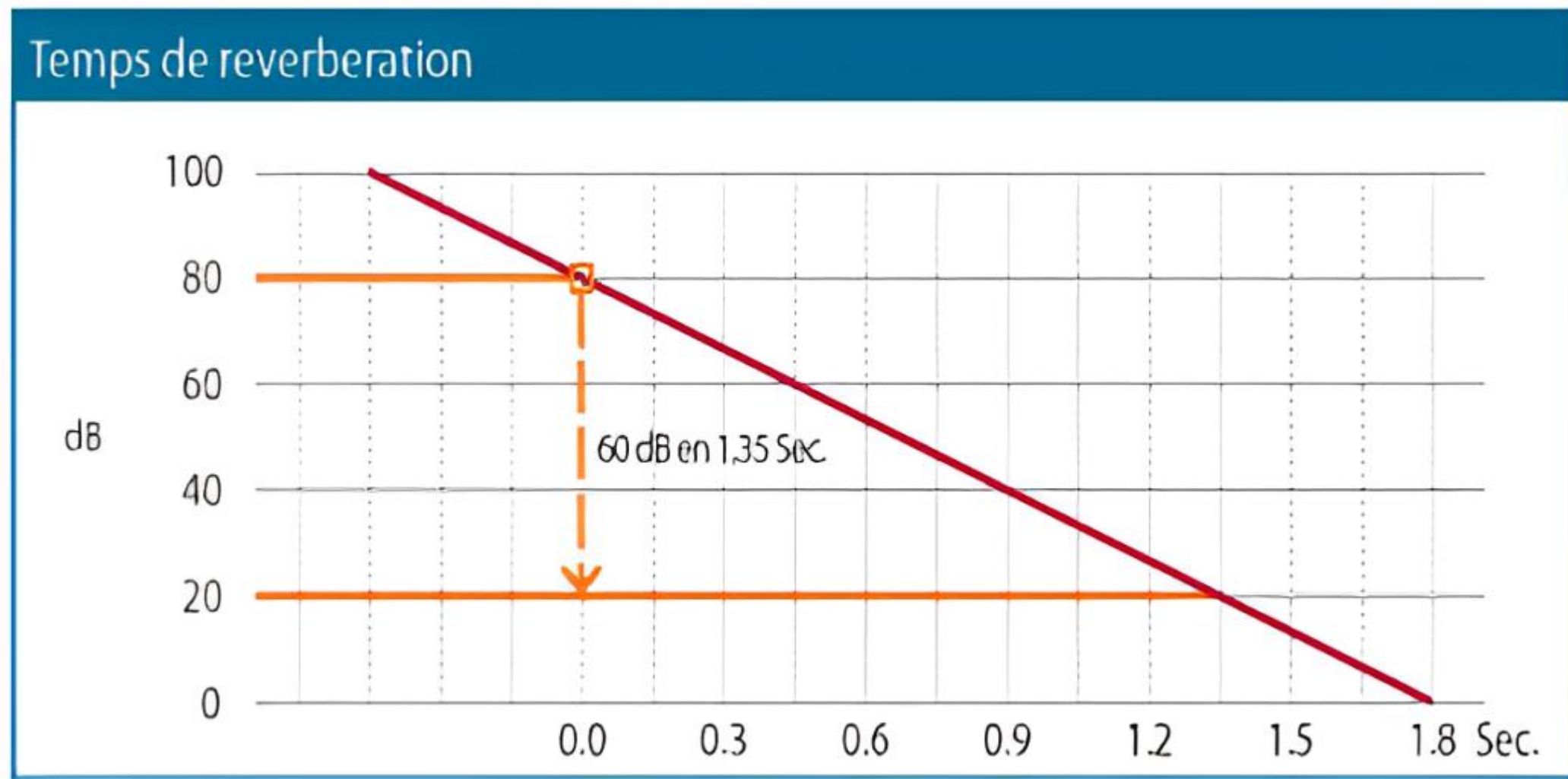
Théorie de la réverbération

- Décroissance du son :
 - Dépend des parois (absorbantes ou réfléchissantes),
 - Impacte « la sonorité » ou persistance sonore d'une salle.
- Locaux à parois absorbantes :
 - Décroissance rapide,
 - Impression d'étouffement (« salle sourde »)
- Locaux à parois réfléchissantes :
 - Décroissance lente,
 - Diminue l'intelligibilité de la parole, surtout dans les grandes salles,
 - Risque d'échos dû aux interférences entre ondes directes et réfléchies.
- Phénomène d'écho :
 - Survient si l'écart entre l'onde directe et réfléchiée dépasse 0,1 seconde.



Temps de réverbération

- Le temps de réverbération d'un local T_r est par définition, le temps nécessaire pour que l'intensité sonore diminue de 60 dB après extinction de la source.



Temps de réverbération d'un local T_r

Formule de Sabine

- Le temps de réverbération d'un local T_r d'un local peut être déterminé facilement par la formule de Sabine :

$$T_r = 0,16 \frac{V}{A} \text{ (s)}$$

Avec :

- T_r : le temps de réverbération en (s)
- V : le volume de local en (m^3)
- A : l'air d'absorption équivalente en (m^2) avec

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i$$

La formule de Sabine est applicable lorsque :

- L'absorption de l'air est négligée
- Le volume V du local est inférieur à 500 m
- Les matériaux absorbants sont distribués uniformément sur les surfaces

Le tableau suivant donne quelques valeurs du temps de réverbération par type de pièce :

Éducation	Temps de réverbération Tr
Salle de classe	$0,4 < Tr < 0,8 \text{ s.}$
Salle de restauration $V > 250 \text{ m}^3$	$Tr < 1,2 \text{ s.}$
Santé	
Salle de restauration $V < 250 \text{ m}^3$	$Tr < 0,8 \text{ s.}$
Local d'hébergement et de soins	$Tr < 0,8 \text{ s.}$
Salle de repos	$Tr < 0,5 \text{ s.}$
Bureau	$Tr < 0,8 \text{ s.}$
Bureau	
Bureau individuel	$Tr < 0,7 \text{ s.}$
Bureau collectif	$Tr < 0,6 \text{ s.}$
Espace ouvert $V > 250 \text{ m}^3$	$0,6 < Tr < 0,8 \text{ s.}$
Restaurant $V > 250 \text{ m}^3$	$Tr < 1 \text{ s.}$

Temps de réverbération selon la norme NF-S 31-080 (Bureaux)

Formule d'Eyring

- Si le local a un coefficient d'absorption important, la formule de Sabine donne de mauvais résultats. Il est donc préférable d'utiliser la relation d'Eyring pour calculer le temps de réverbération :

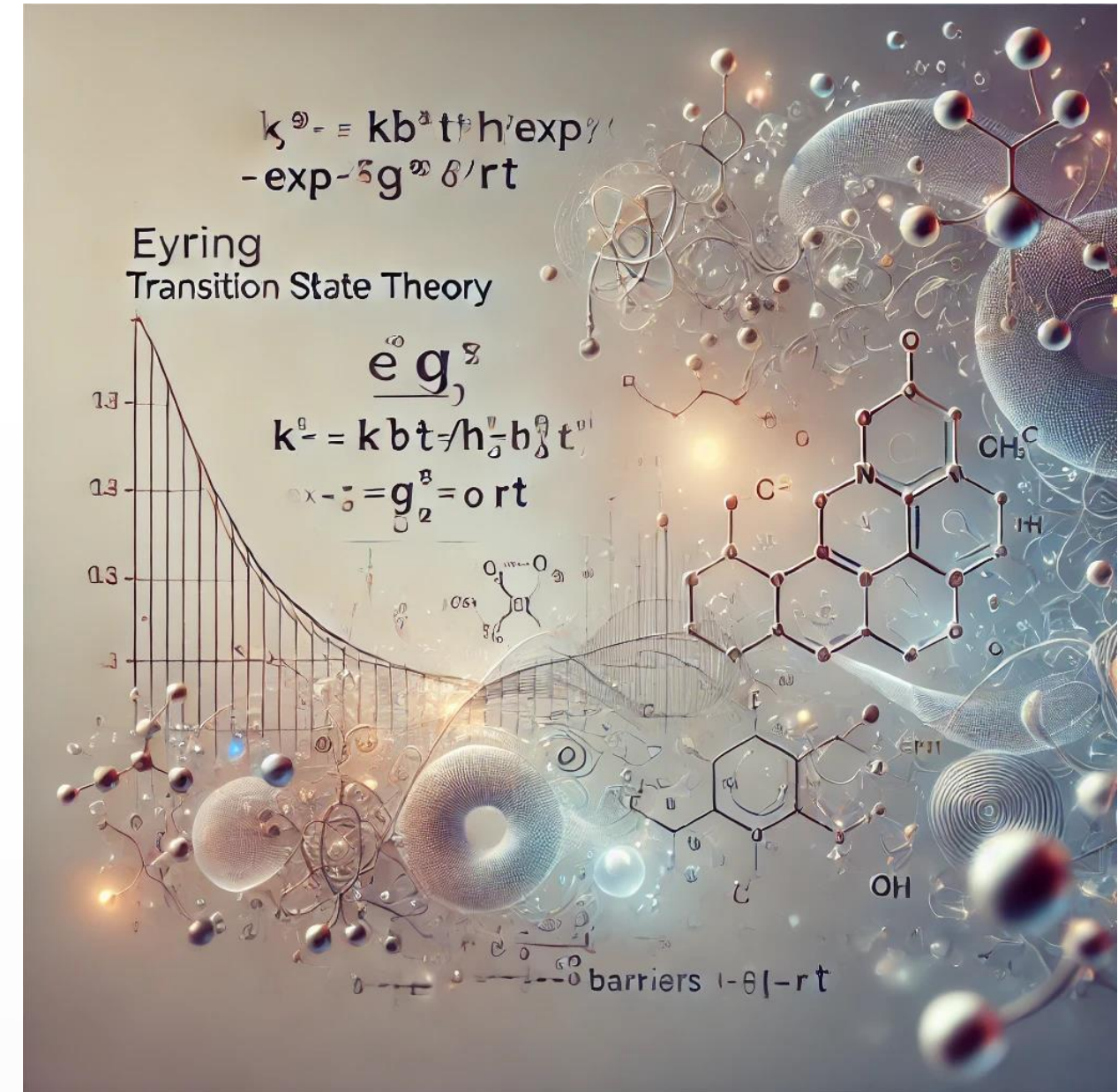
$$T_r = -0,16 \frac{V}{S \ln(1 - \alpha)} \quad (s)$$

Avec :

S : Surface totale des parois du local en (m^2)

V : le volume de local en (m^3)

α : Coefficient d'absorption moyen des parois



Isolation Acoustique des Bâtiments

L'isolation acoustique est le processus de réduction de la transmission du son entre les espaces.

Principes Fondamentaux

L'isolation acoustique repose sur la création de barrières pour empêcher la propagation du son. Les matériaux isolants, comme la laine de roche et la laine de verre, jouent un rôle crucial en absorbant les ondes sonores.

Techniques d'Isolation

Il existe plusieurs techniques d'isolation acoustique, notamment l'utilisation de matériaux absorbants, la mise en place de doubles murs, l'isolation des conduits de ventilation, etc.



Impact de l'Acoustique sur le Confort et la Santé

La qualité acoustique d'un bâtiment a un impact significatif sur le confort et la santé des occupants. Un mauvais environnement sonore peut entraîner une fatigue, une diminution de la concentration, une augmentation du stress et des problèmes de santé.

Facteur	Impact sur le Confort	Impact sur la Santé
Nuisances sonores	Diminution de la concentration, fatigue, irritation	Stress, problèmes de sommeil, perte d'audition
Réverbération	Difficulté à entendre clairement, fatigue, confusion	Stress, problèmes de concentration, maux de tête



Normes et Réglementations Acoustiques

Des normes et réglementations acoustiques sont en place pour garantir un environnement sonore acceptable dans les bâtiments.

1 Normes Nationales
Chaque pays a ses propres normes acoustiques qui spécifient les exigences en matière d'isolation acoustique, de niveau sonore maximal, etc.

2 Normes Internationales
Des normes internationales, comme celles de l'ISO, fournissent des directives générales pour la conception acoustique des bâtiments.

3 Réglementations Locales
Les réglementations locales peuvent imposer des exigences spécifiques en matière d'acoustique en fonction du type de bâtiment et de son emplacement.

Applications Pratiques de l'Acoustique du Bâtiment

Les principes de l'acoustique du bâtiment sont appliqués dans une variété de contextes.



Bibliothèques

Les bibliothèques nécessitent un environnement calme et silencieux pour faciliter la concentration et la lecture. L'utilisation de matériaux absorbants et une bonne isolation acoustique sont essentielles.



Bureaux

Les bureaux doivent offrir un environnement acoustique confortable pour les employés. La réduction du bruit de fond et la création de zones de travail acoustiquement isolées peuvent améliorer la productivité.



Écoles

Les écoles exigent des environnements acoustiques adaptés à l'apprentissage, en réduisant le bruit de fond et en améliorant la clarté de la parole des enseignants.



Salles de Concert

Les salles de concert doivent être conçues pour offrir une acoustique optimale pour la musique, avec une bonne réverbération et une clarté sonore.

Outils et Logiciels d'Acoustique

Divers outils et logiciels d'acoustique sont disponibles pour aider les architectes et les ingénieurs à concevoir des bâtiments acoustiquement performants.

1

Modélisation Acoustique

Des logiciels de modélisation acoustique permettent de simuler la propagation du son dans un espace et d'évaluer la qualité acoustique d'un bâtiment.

2

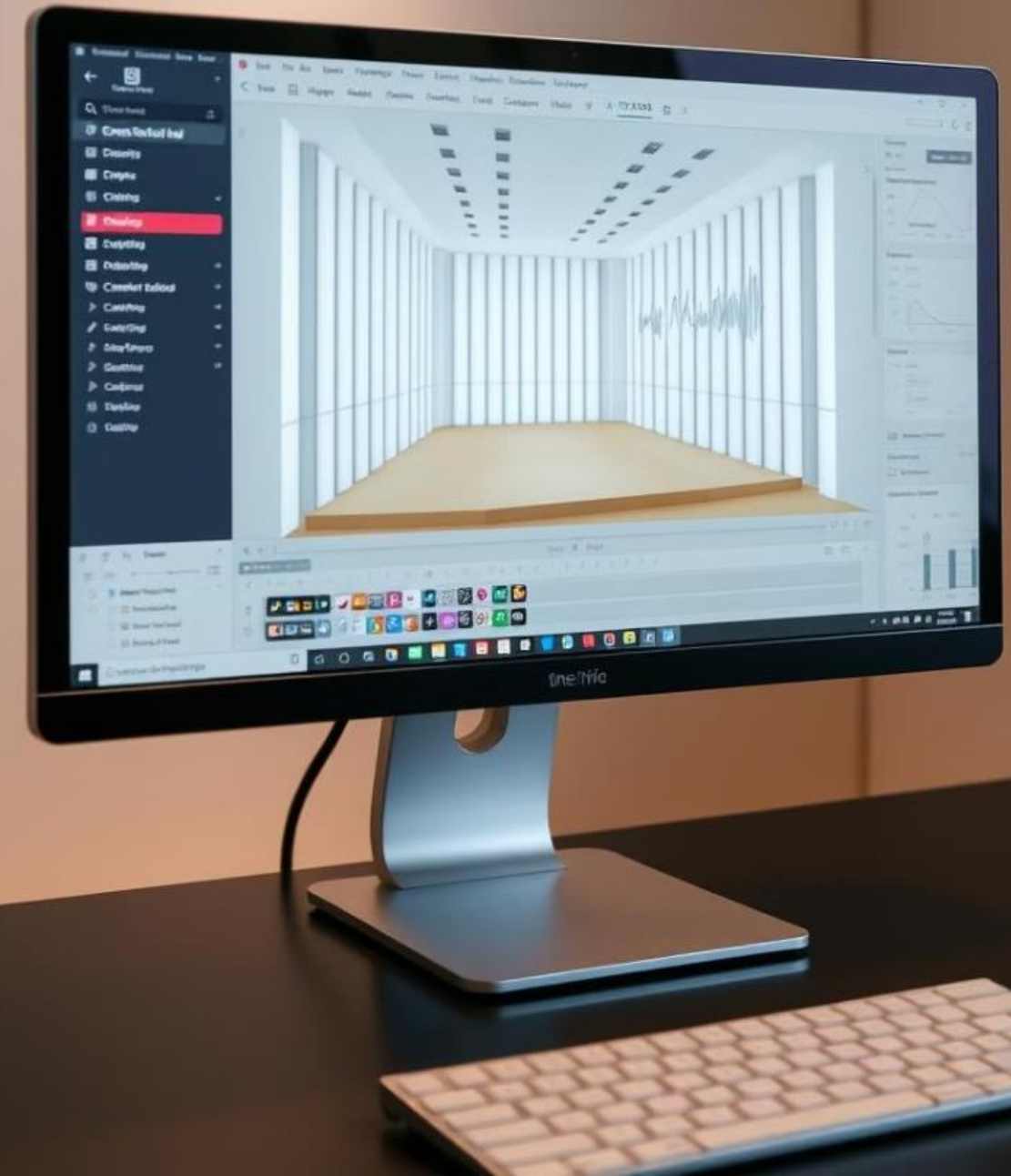
Analyse de Bruit

Des outils d'analyse de bruit permettent de mesurer et d'analyser les niveaux sonores dans un environnement donné.

3

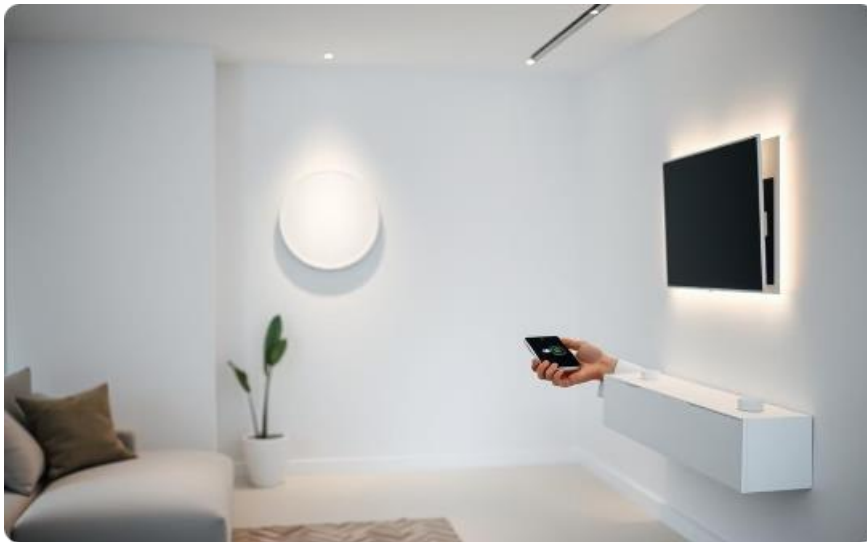
Simulation Acoustique

Des logiciels de simulation acoustique permettent de simuler l'impact des matériaux et des traitements acoustiques sur la qualité sonore.



Tendances Futur de l'Acoustique du Bâtiment

L'acoustique du bâtiment est un domaine en constante évolution.



Intégration des Technologies Intelligentes

Les technologies intelligentes, comme les systèmes de contrôle du bruit et les assistants vocaux, offrent de nouvelles possibilités pour améliorer l'acoustique des bâtiments.



Matériaux Durables et Eco-responsables

L'utilisation de matériaux durables et éco-responsables ayant des propriétés d'absorption acoustique devient de plus en plus courante.



Modélisation Virtuelle et Réalité Augmentée

La modélisation virtuelle et la réalité augmentée facilitent la conception acoustique et la simulation sonore des bâtiments.

Les différentes voies de transmission du bruit

- Soient deux locaux séparés par un mur. Une source sonore rayonne dans le local (1) appelé local d'émission et parvient dans le local (2) appelé local de réception après propagation aérienne puis solidienne. La transmission de l'énergie sonore entre les deux locaux se fait de trois façons différentes :
- Transmission directe : se fait à travers la paroi qui sépare les deux locaux
- Transmission indirecte : se fait à travers les parois latérales
- Transmission parasite : se fait par certain points singuliers (gaines techniques, entrée d'air, coffres des volets roulants,)

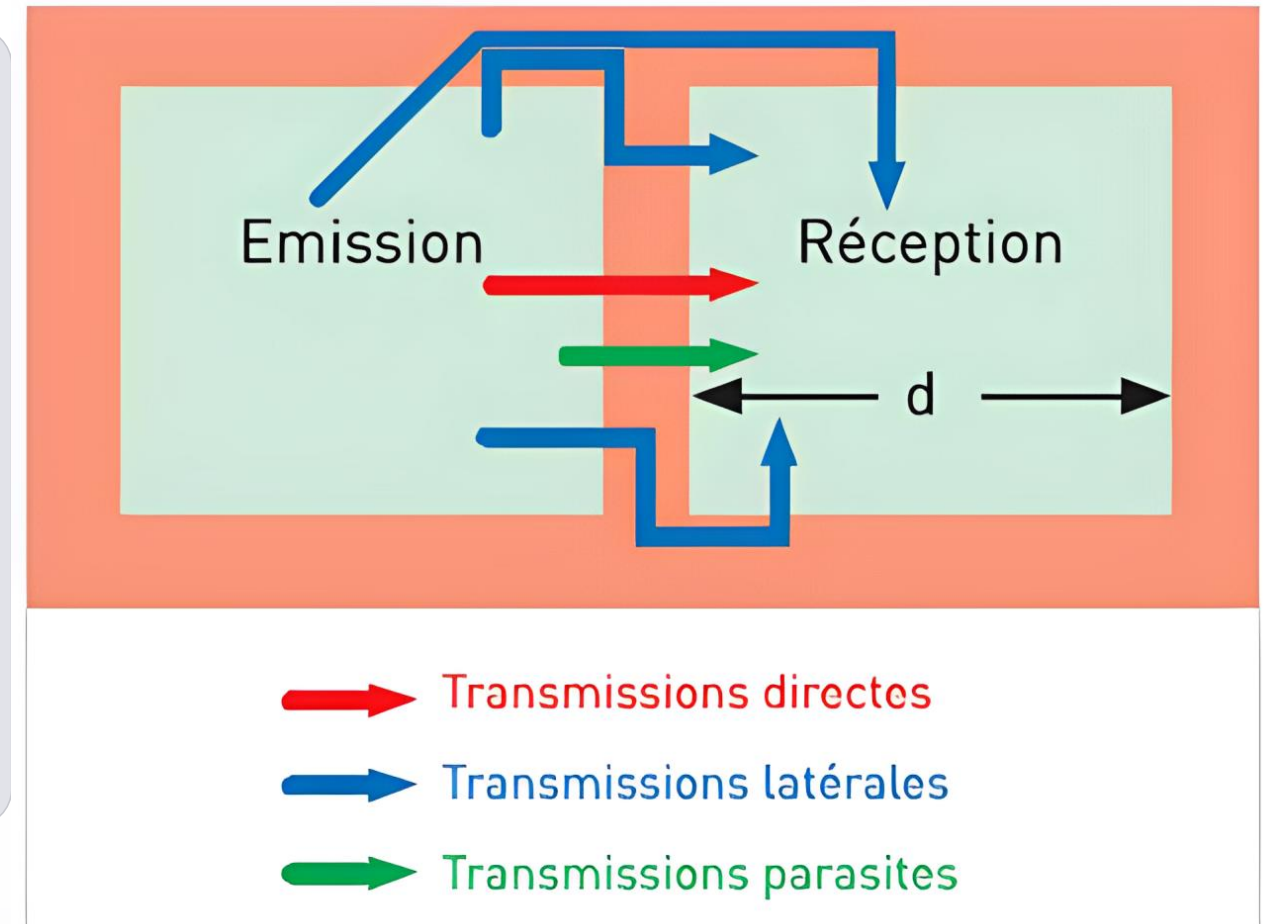
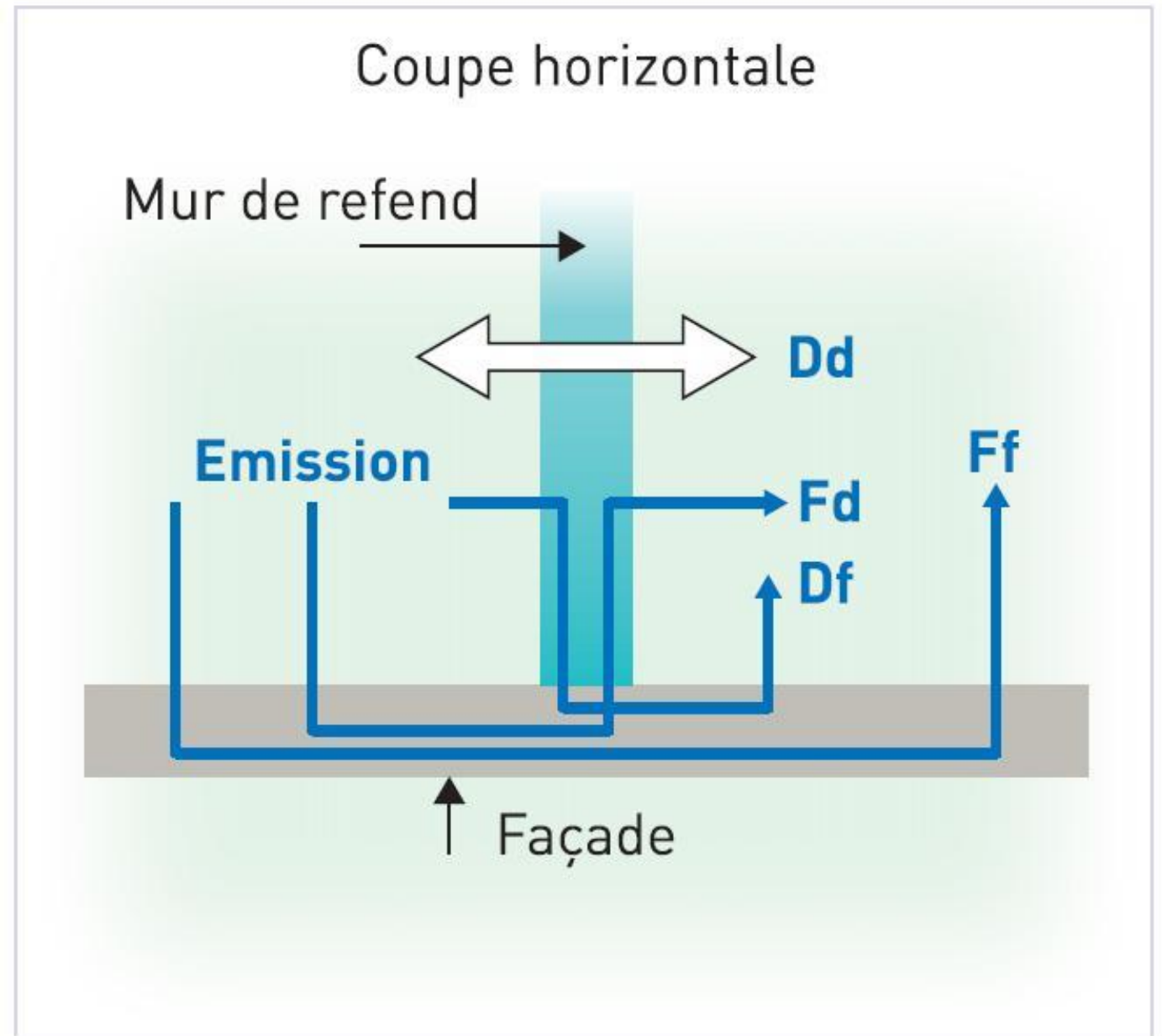


Schéma de principe des différents types de bruits dans les bâtiments

Les différentes voies de transmission du bruit

Transmission entre deux locaux adjacents :

- Emission : Origine des ondes acoustiques à analyser
- Dd : Diffraction directe des ondes sonores à travers le mur.
- Fd : Flux sonore diffusé vers la façade.
- Df : Diffraction des ondes sonores au point d'incidence.
- Ff : Réémission sonore après interaction avec la façade.

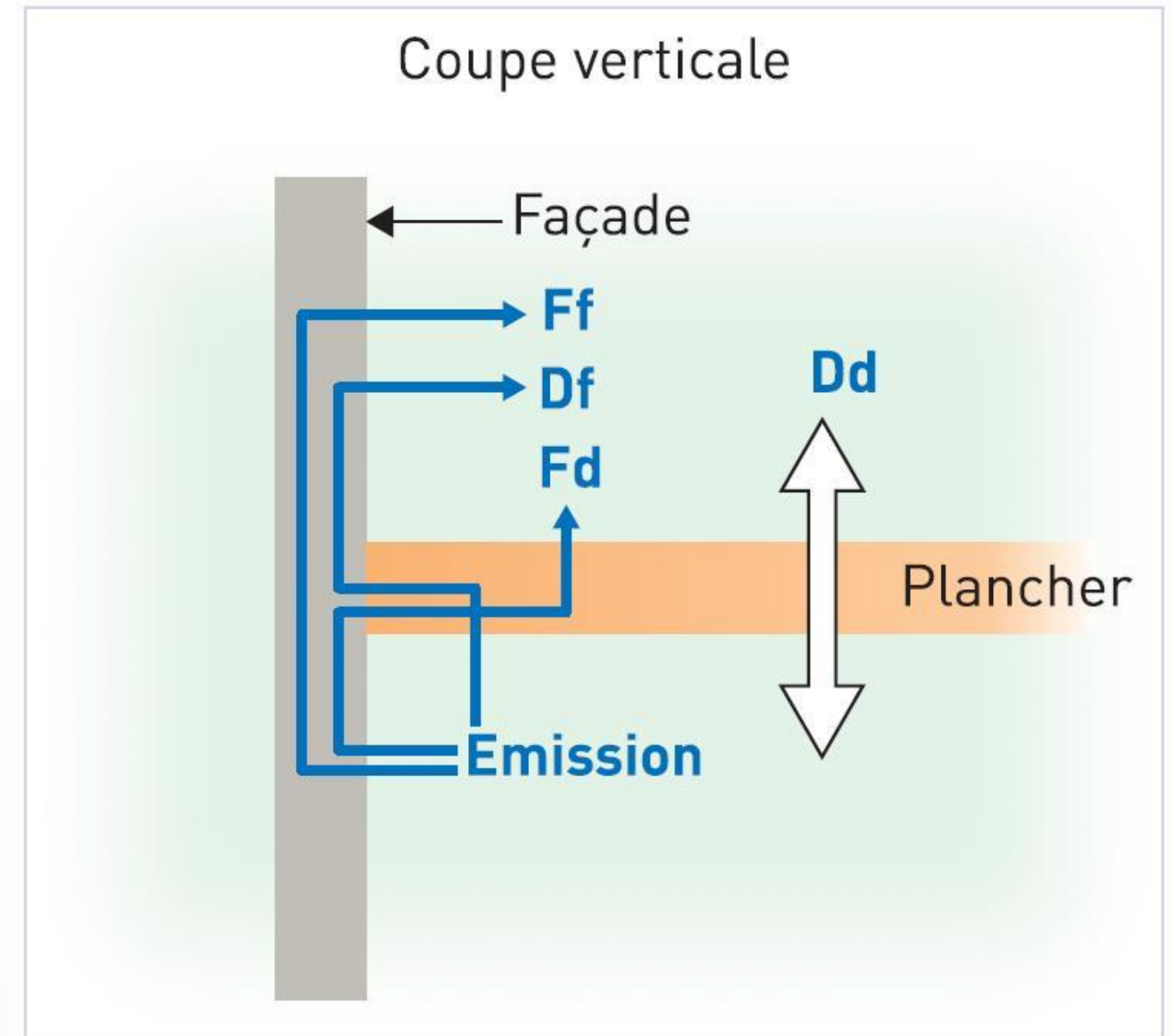


Voies de transmission du bruit entre deux locaux adjacents

Transmission du bruit entre deux locaux superposés

Voies de transmission du bruit entre deux locaux superposés.

- Émission sonore (source de bruit).
- Ff : Transmission par la façade.
- Df : Diffraction au niveau des façades.
- Fd : Transmission directe par le plancher.
- Dd : Transmission directe verticale.

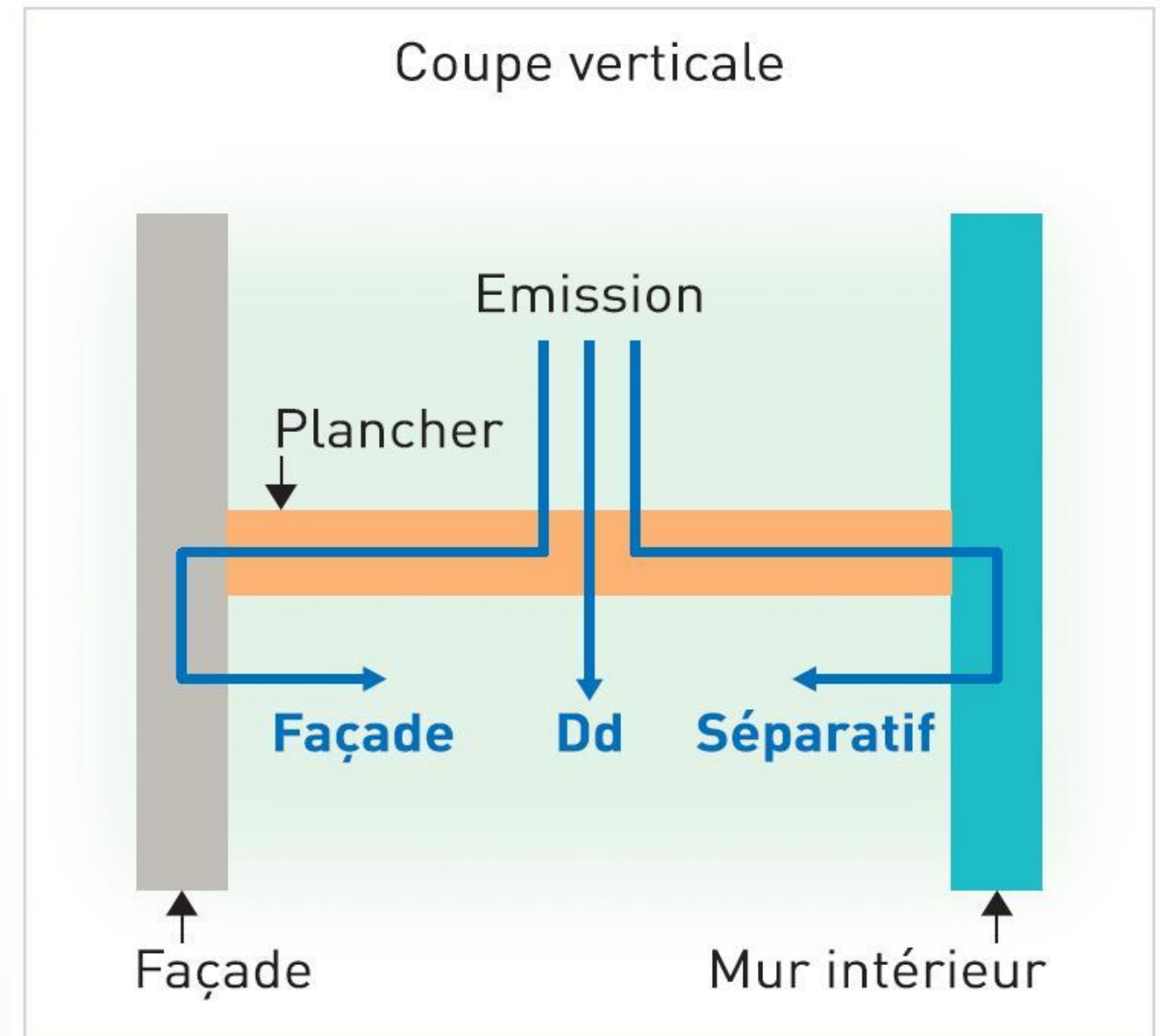


Coupe verticale illustrant les voies de transmission.

Transmission du bruit entre deux locaux superposés

Voies de transmission des bruits de choc.

- Émission de vibrations à l'impact.
- Voies de propagation :
 - Dd : Transmission directe par le plancher.
 - Façade : Propagation via les murs extérieurs.
 - Séparatif : Transmission via murs intérieurs.
- Facteurs amplifiant le bruit :
 - Nature des matériaux.
 - Connexions structurelles.



Voies de transmission des bruits de choc.

Transmission du bruit entre deux locaux superposés

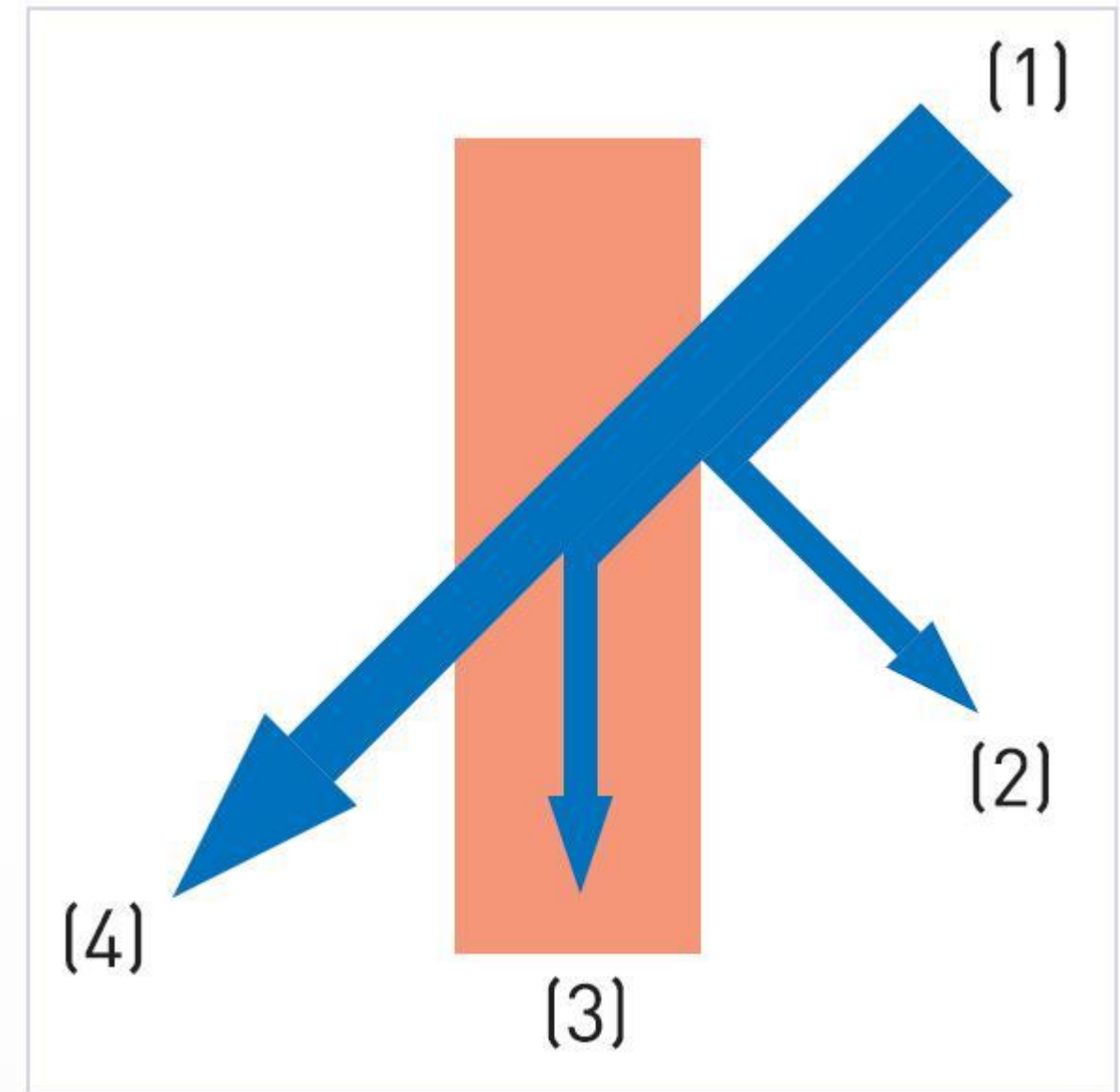
Ne pas confondre isolation acoustique et absorption acoustique !

Une onde sonore (1) rencontrant une paroi est en partie :

- Réfléchie (2)
- Absorbée (3)
- Transmise (4)

L'isolation est l'ensemble des procédés mis en œuvre pour réduire le niveau sonore dans le local contigu au local d'émission.

Un matériau absorbant augmente la partie absorbée et réduit la partie réfléchie du bruit dans le local où il est placé. Ce type de matériau n'a pratiquement aucune influence sur la partie transmise. L'absorption ne permet donc pas l'isolation de manière décisive.



Onde sonore traversant une paroi

Isolement normalisé

- Isolement brut D_b

- L'isolement brut est la différence entre le niveau de bruit L_1 dans un local d'émission et le niveau L_2 dans le local de réception :

$$D_b = L_1 - L_2 \text{ (dB)}$$

- Cet isolement brut dépend de la fréquence, c'est pourquoi il est préférable de le mesurer par bandes d'octave,
- Une bonne isolation acoustique est lorsque le niveau sonore à la réception soit aussi faible que possible.

- Isolement normalisé ou standardisé D_n

- L'isolement normalisé est l'isolement brut corrigé en fonction de la durée de réverbération réelle T_r mesuré dans le local de réception et une durée de réverbération de référence T_0 :

$$D_n = D_b + 10 \log \frac{T_r}{T_0} \text{ (dB)}$$

- Quelques valeurs de T_0 :

- Bâtiments d'habitation, santé, hôtels et enseignement : $T_0 = 0,5 \text{ (s)}$
- Salle de sports de volume supérieur à 512 m^3 : $T_0 = 0,14 V \text{ (V : volume de la pièce)}$.

Isolement normalisé

Le tableau suivant donne les valeurs réglementaires de l'isolement des bâtiments d'habitations :

Pour les bâtiments d'habitation les valeurs réglementaires sont les suivantes			
Bruits aériens intérieurs (Article 2)	Bruits de chocs (Article 4)	Bruits d'équipement (Articles 5 et 6)	Bruits aériens extérieurs (Articles 5 et 6)
Entre 2 pièces principales $D_{nT,A} \geq 53 \text{ dB}$	$L'_{nT,w} \leq 58 \text{ dB}$	En pièce principale $L_{nAT} \leq 30 \text{ dB(A)}$	$D_{nAT} \geq 30 \text{ dB}$

Valeurs réglementaires de l'isolement des bâtiments d'habitation

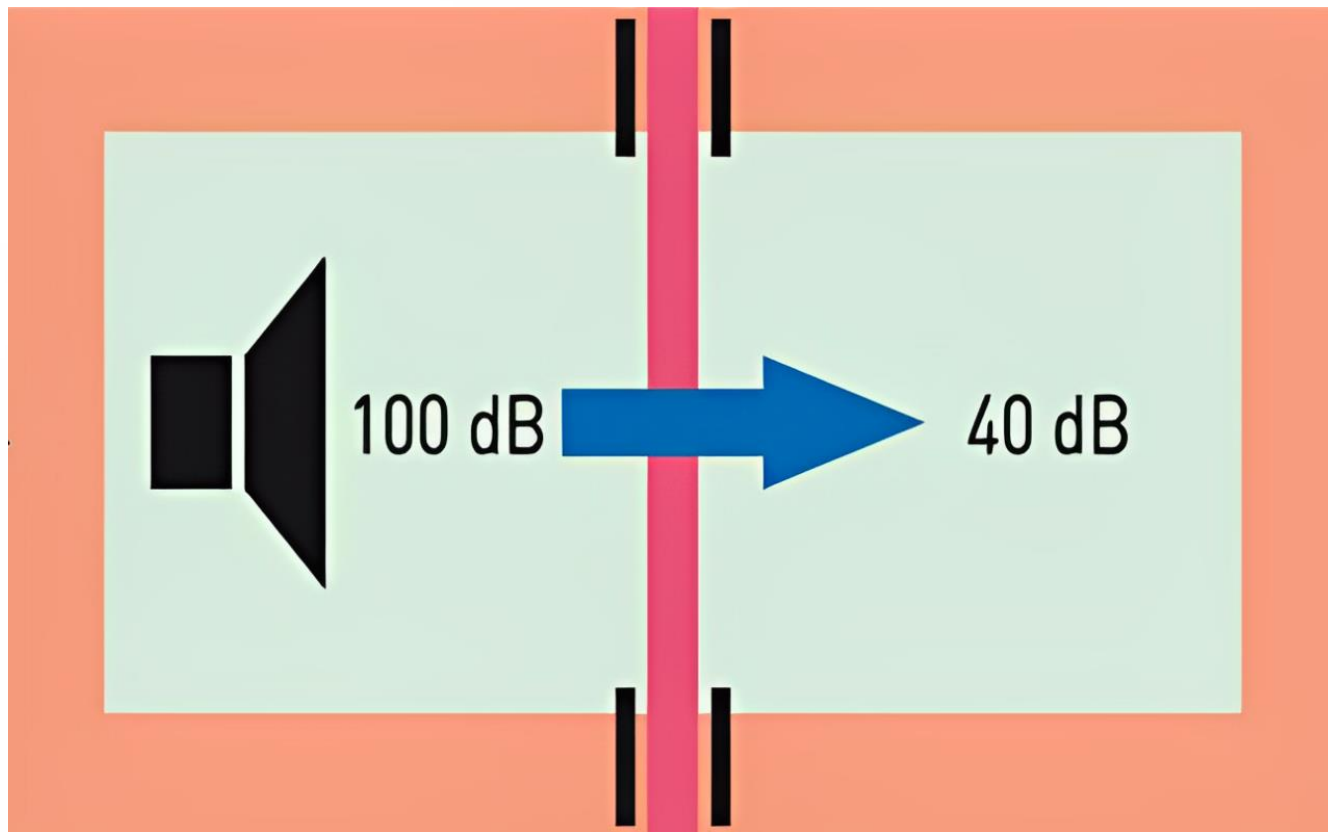
Avec :

- $D_{nT,A}$: Isolement acoustique standardisé pondéré (A) pour les bruits aériens, exprimé en dB.
- D_{nAT} : Isolement acoustique normalisé pondéré (A) pour les bruits aériens, exprimé en dB(A).
- $L'_{nT,w}$: Niveau de pression pondéré « W » des bruits de choc, standardisé, exprimé en dB.
- L_{nAT} : Niveau de pression pondéré des bruits de choc, standardisé, exprimé en dB(A).

Indice d'affaiblissement d'une paroi

- Coefficient de transmission d'une paroi τ
 - On caractérise la performance d'isolement acoustique d'une paroi par son facteur de transmission qui est le rapport entre la puissance acoustique transmise et la puissance acoustique incidente par la paroi :

$$\tau = \frac{W_t}{W_i}$$



- Définition de l'indice d'affaiblissement R
 - La capacité isolante d'une paroi s'exprime à l'aide d'un indice d'affaiblissement acoustique noté R déterminé par la relation suivante :

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau} \text{ (dB)}$$

- Les parois qui séparent deux locaux sont rarement homogènes. Si la paroi n'est pas homogène (cloison contenant une porte par exemple), il faut dans ce cas calculer le coefficient de transmission moyenne :

$$\tau_{moy} = \frac{\tau_1 S_1 + \tau_2 S_2 + \dots + \tau_n S_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n}$$

Indice d'affaiblissement d'une paroi

- Relation entre l'indice d'affaiblissement R et l'isolement brut D_b
 - L'expression suivante permet de déterminer l'isolement brut en fonction de l'indice d'affaiblissement :

$$D_b = R + 10 \log \frac{A_2}{S_p} \quad (dB)$$

Avec

- A_2 : l'air d'absorption équivalente du local 2

$$A_2 = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i$$

- S_p : la surface de la paroi de séparation de deux locaux en (m^2).

Le tableau suivant donne quelques valeurs de l'indice d'affaiblissement d'une paroi en béton :

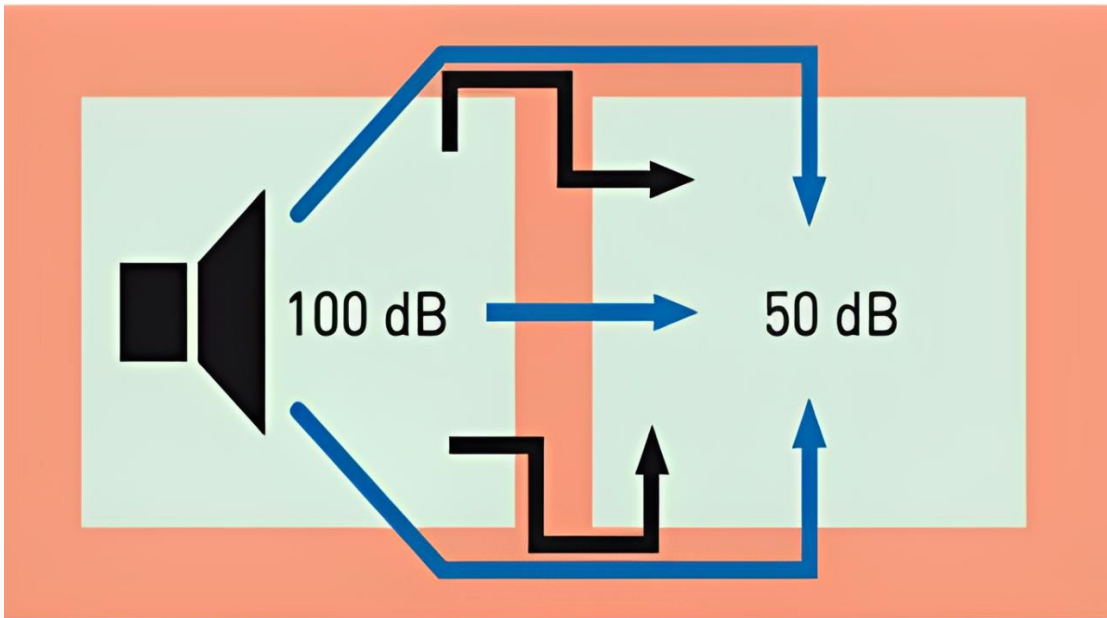
Epaisseur de la paroi (cm)	10	12	14	16	18
Masse de la paroi (Kg/m ²)	250	300	350	400	450
R (dB)	48	52	55	57	58

- Relation entre l'indice d'affaiblissement R et l'isolement normalisé D_n
 - L'expression suivante permet de déterminer l'isolement normalisé en fonction de l'indice d'affaiblissement :

$$D_n = R + 10 \log \frac{0,32 V_2}{S_p} \quad (dB)$$

Avec

- V_2 : le volume du local 2 en (m^3)
- S_p : la surface de la paroi de séparation de deux locaux en (m^2).



Transmission au travers des parois simples :

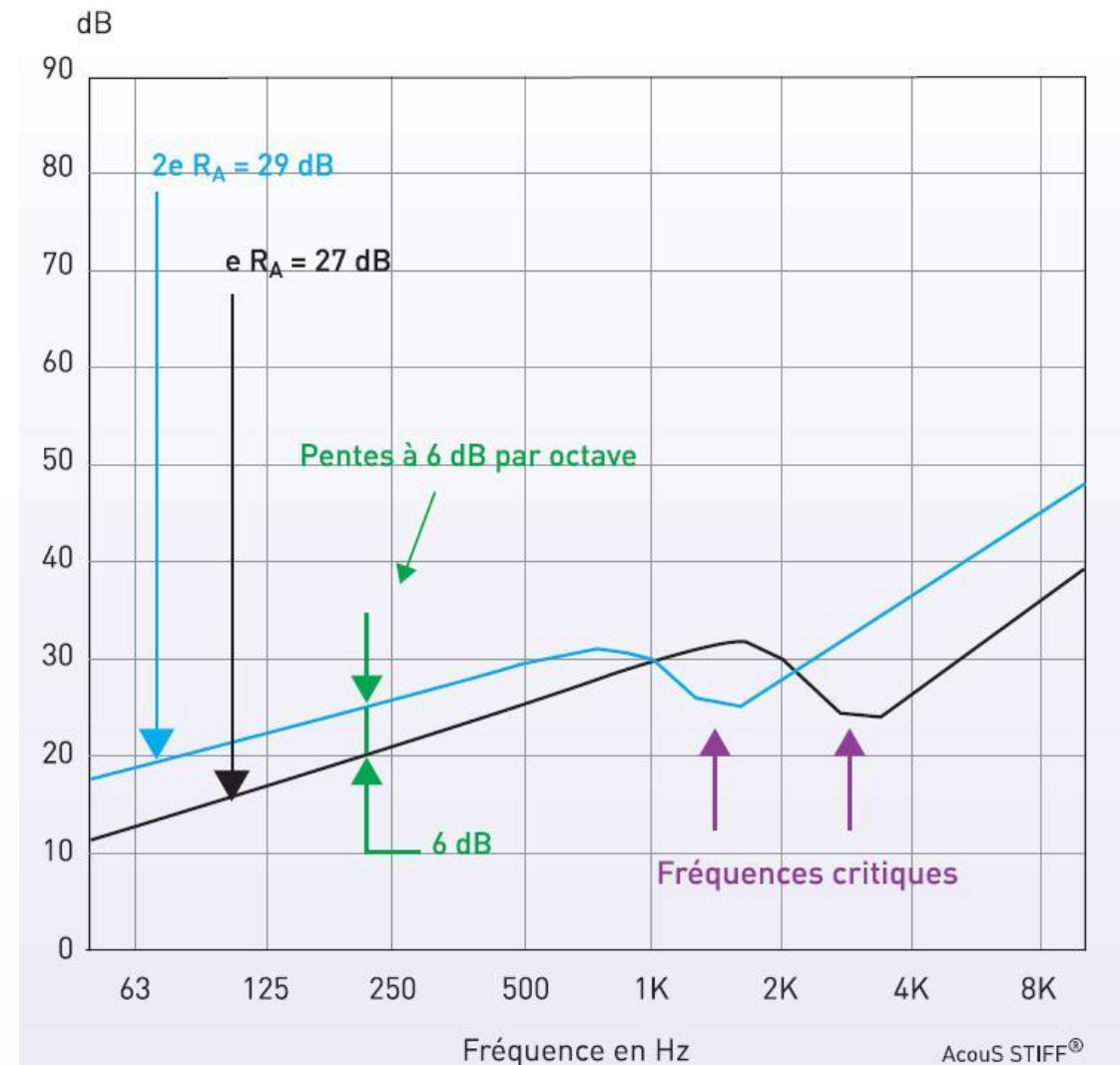
Loi des masses :

Les parois simples sont constituées d'un seul matériau (béton, carreau de plâtre, bloc béton, brique). Leur indice d'affaiblissement R n'est, en première approximation, fonction que de leur masse surfacique (en kg/m^2) et de la fréquence.

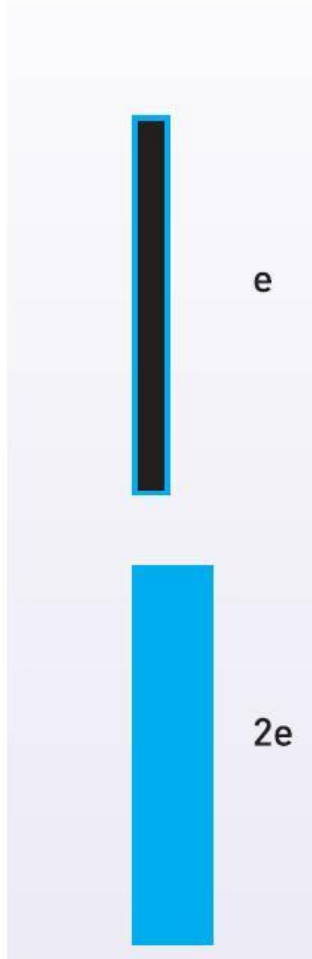
Les essais faites en laboratoire ont montrés que l'isolement d'une paroi augmente avec la masse m : on constate que lorsque la masse double, l'isolement augmente de 6 dB, on peut donc augmenter la masse surfacique d'une paroi pour obtenir un meilleur indice d'affaiblissement.

Fréquence critique :

En fait, l'indice d'affaiblissement acoustique d'une paroi simple dépend aussi de sa rigidité à la flexion. Celle-ci introduit une chute d'isolement à une fréquence, dite critique. Plus la paroi est rigide, plus la fréquence critique est basse. Plus elle est souple, et plus la fréquence critique est élevée.



Principe de la fréquence critique.



Transmission au travers des parois simples :

Le coefficient de transmission τ d'une paroi peut être calculé par la relation suivante :

$$\tau = \frac{1}{1 + \left(\frac{\mu f}{\rho_0 c_0} \right)^2}$$

avec:

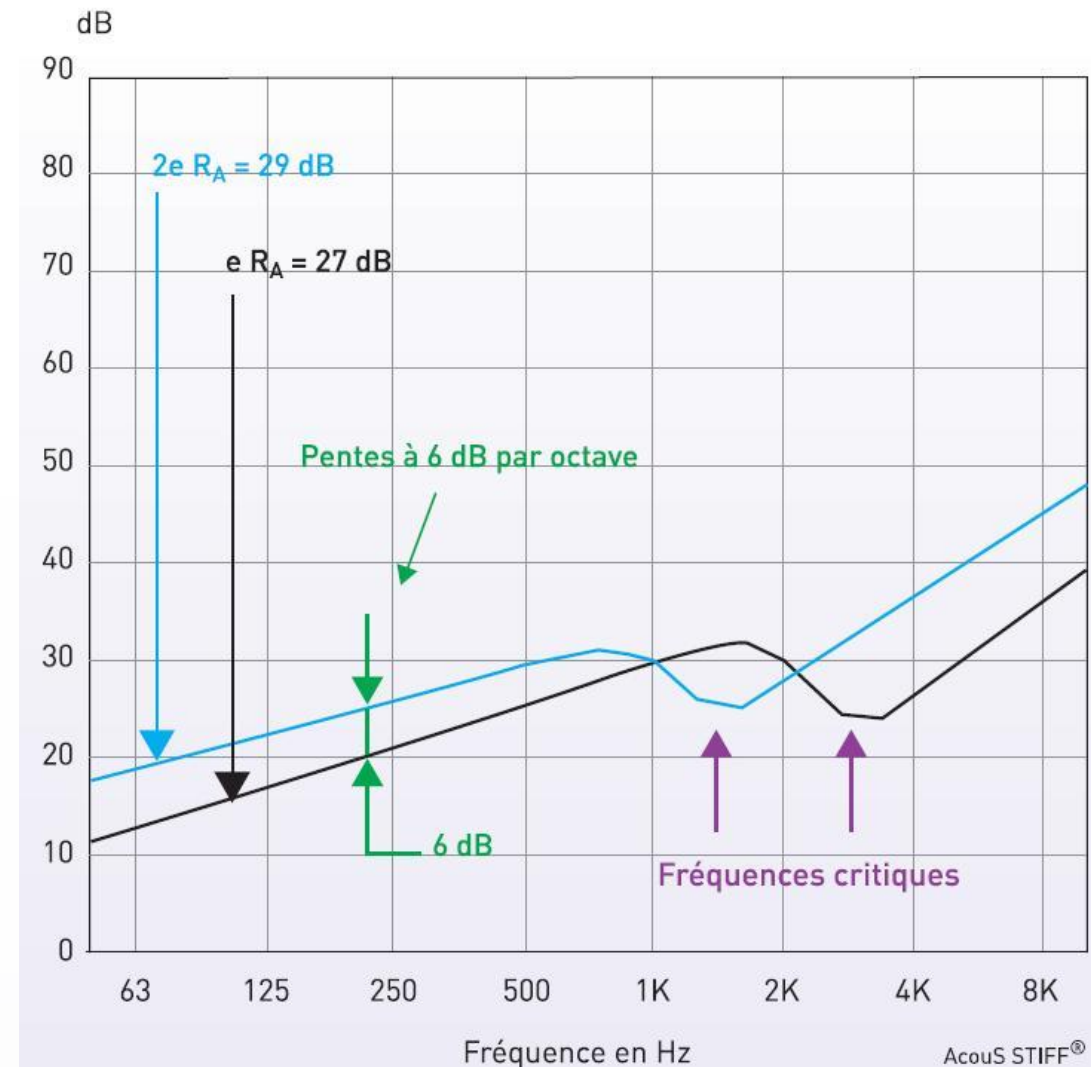
- μ : la masse surfacique de la paroi en (Kg/m^2)
- f : la fréquence de l'onde en (Hz)
- $\rho_0 c_0$: l'impédance acoustique de l'air en ($\text{Kg}/\text{m}^2\text{s}$)

Compte tenu de l'expression de τ , on obtient :

$$R = 10 \log \left(\frac{\mu f}{\rho_0 c_0} \right)^2 = 20 \log(\mu f) - \text{cte}$$

Cette relation établit la loi dite « loi de masse et de fréquence ». Dans la pratique, on utilise la relation empirique suivante :

$$R = 20 \log(\mu f) - 47 \text{ dB}$$



Principe de la fréquence critique.

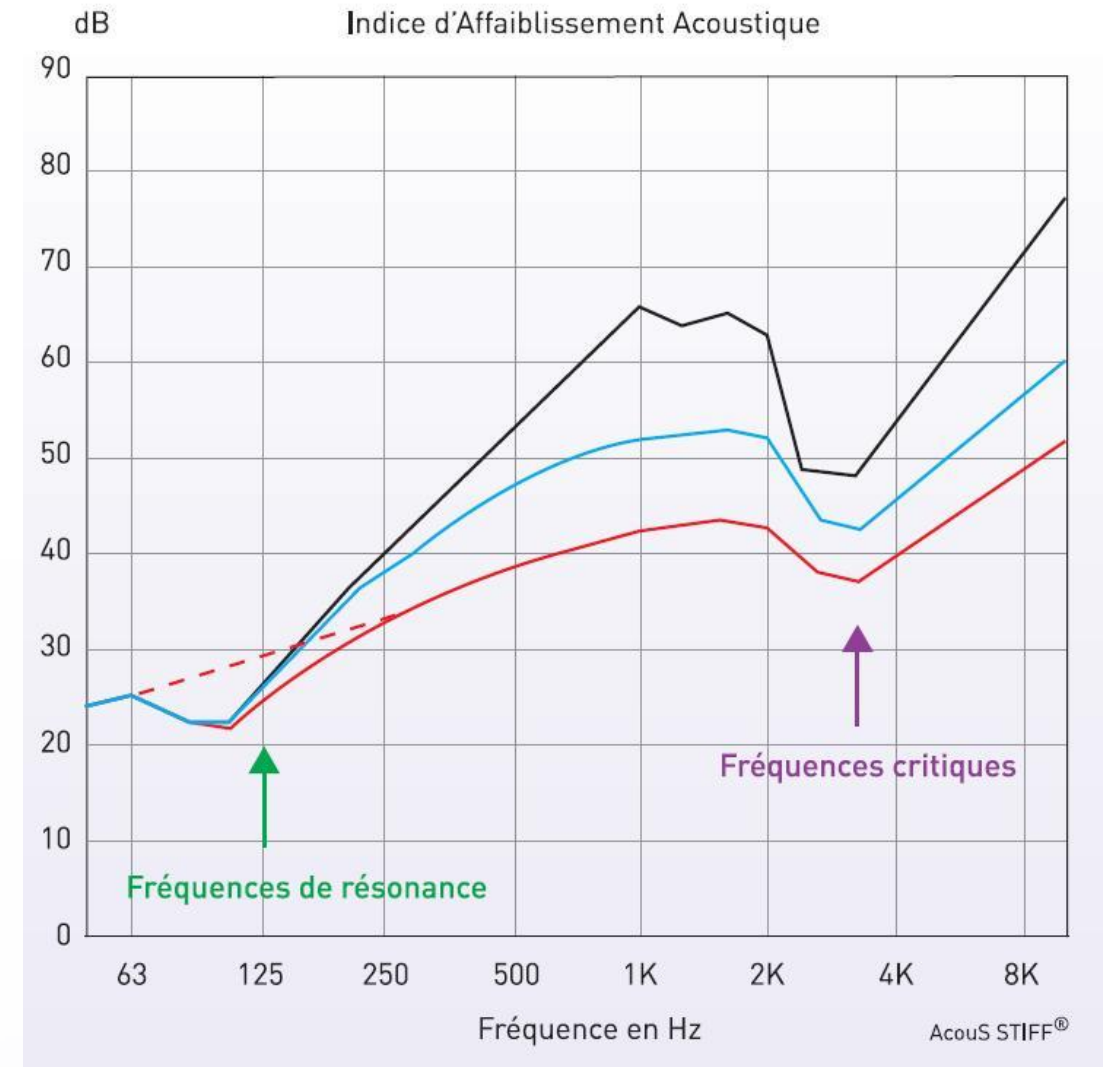
L'utilisation de ces formules pour déterminer l'indice d'affaiblissement ne donne pas des valeurs fiables, c'est pourquoi on utilise des courbes qui donnent l'indice d'affaiblissement acoustique en fonction de la fréquence et qui sont présentés sur la zone C.

Transmission au travers des parois doubles :

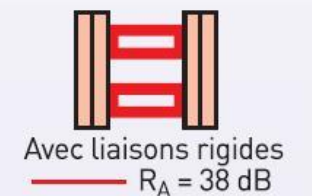
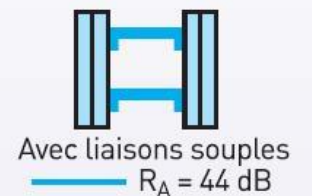
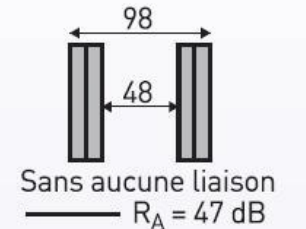
Règles de construction :

Les parois doubles sont constituées de deux parois simples séparées par une lame d'air. Cette lame d'air peut être comblée avec un matériau. L'indice d'affaiblissement acoustique R de ces parois est fonction des caractéristiques suivantes :

- La masse de chaque parement.
- L'épaisseur de la lame d'air.
- L'épaisseur et la nature du matériau dans la lame d'air.
- La fréquence critique de chaque parement.
- Le type de liaisons (ponctuelles, linéiques, surfaciques), leur nombre et leur nature (rigides, souples...).



Cloison en plaques de plâtre (4 plaques BA13) avec lame d'air sans laine minérale

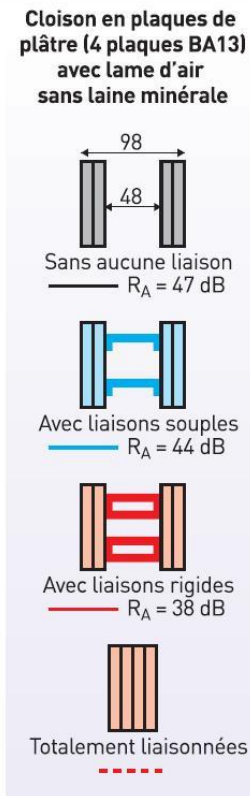
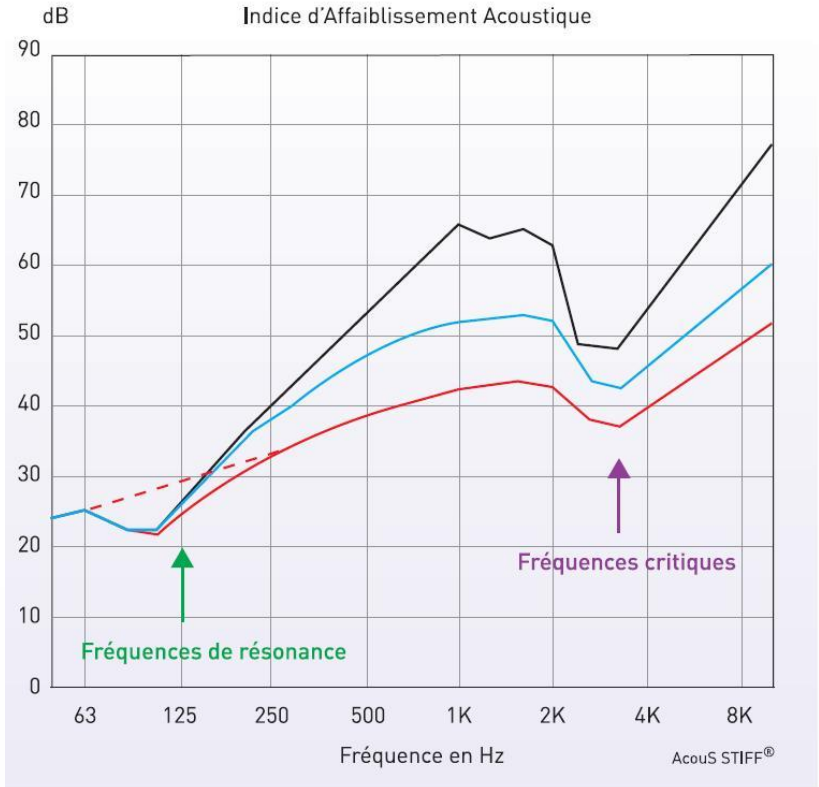
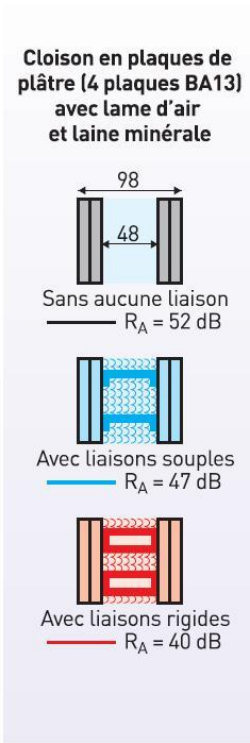
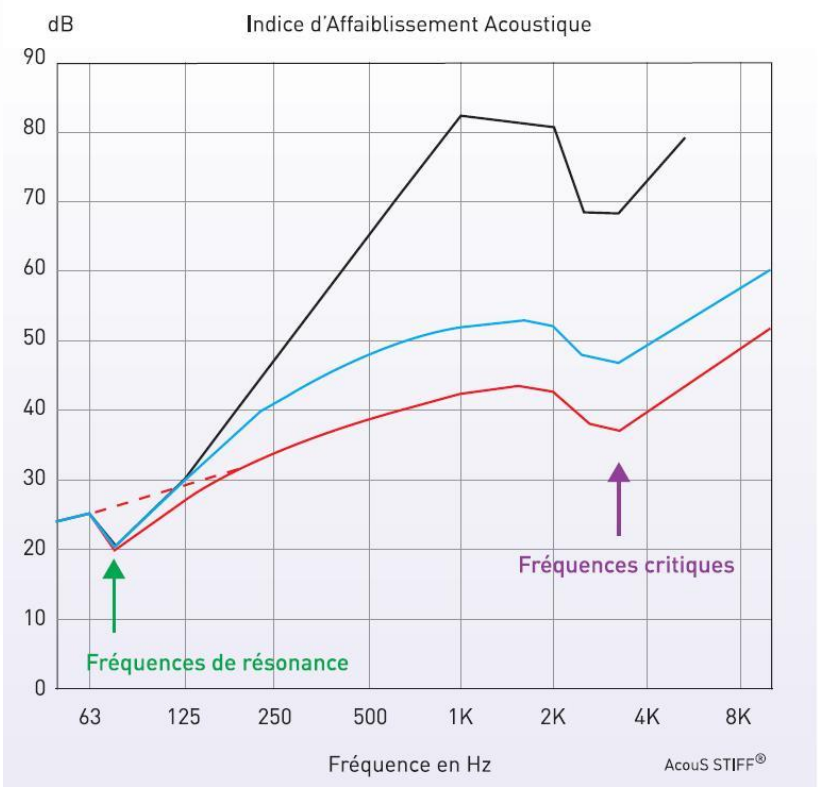


Principe de la paroi double sans laine de verre

Pour une paroi double, l'indice d'affaiblissement acoustique R atteint son minimum aux environs d'une fréquence appelée fréquence de résonance (f_0) et croît rapidement au-delà de cette fréquence, à condition que les liaisons soient faibles. Il sera donc conseillé de :

- Maintenir f_0 dans les fréquences les plus basses, c'est-à-dire en dehors de la gamme de fréquence usuelles.
- Limiter les liaisons entre parements.

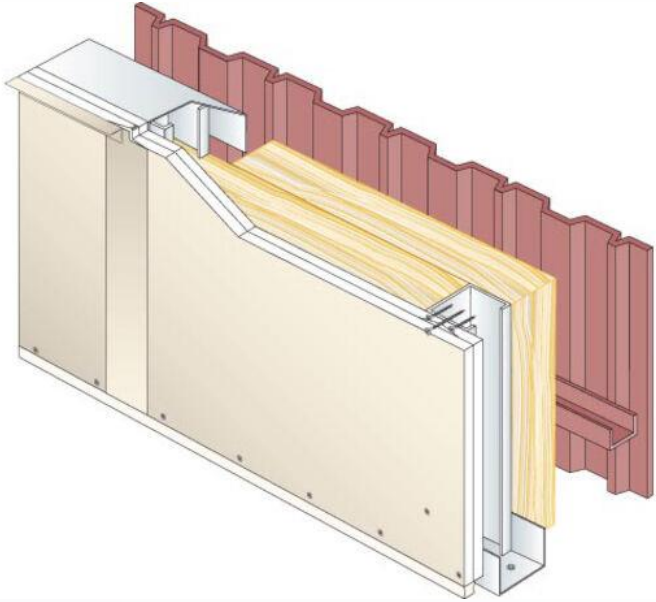
Transmission au travers des parois doubles :



Principe de la paroi double avec laine de verre



Principe de la paroi double sans laine de verre



Transmission au travers des parois doubles :

Calcul de l'indice d'affaiblissement R

Pour un double paroi, l'indice d'affaiblissement acoustique R peut être estimé par la formule empirique suivante :

$$R = R_1 + 0,6R_2 \text{ (dB)}$$

Fréquence de résonance pour une double paroi f_0

La fréquence de résonance f_0 pour une double paroi est donnée par la formule suivante :

$$f_0 = \sqrt{\left(\frac{1}{\mu_1} + \frac{1}{\mu_2}\right) \times \frac{1}{d}} \text{ (Hz)}$$

Avec:

- μ_1 et μ_2 : les masses surfaciques des deux parois en (Kg/m^2)
- d : distance entre les deux parois en (m)

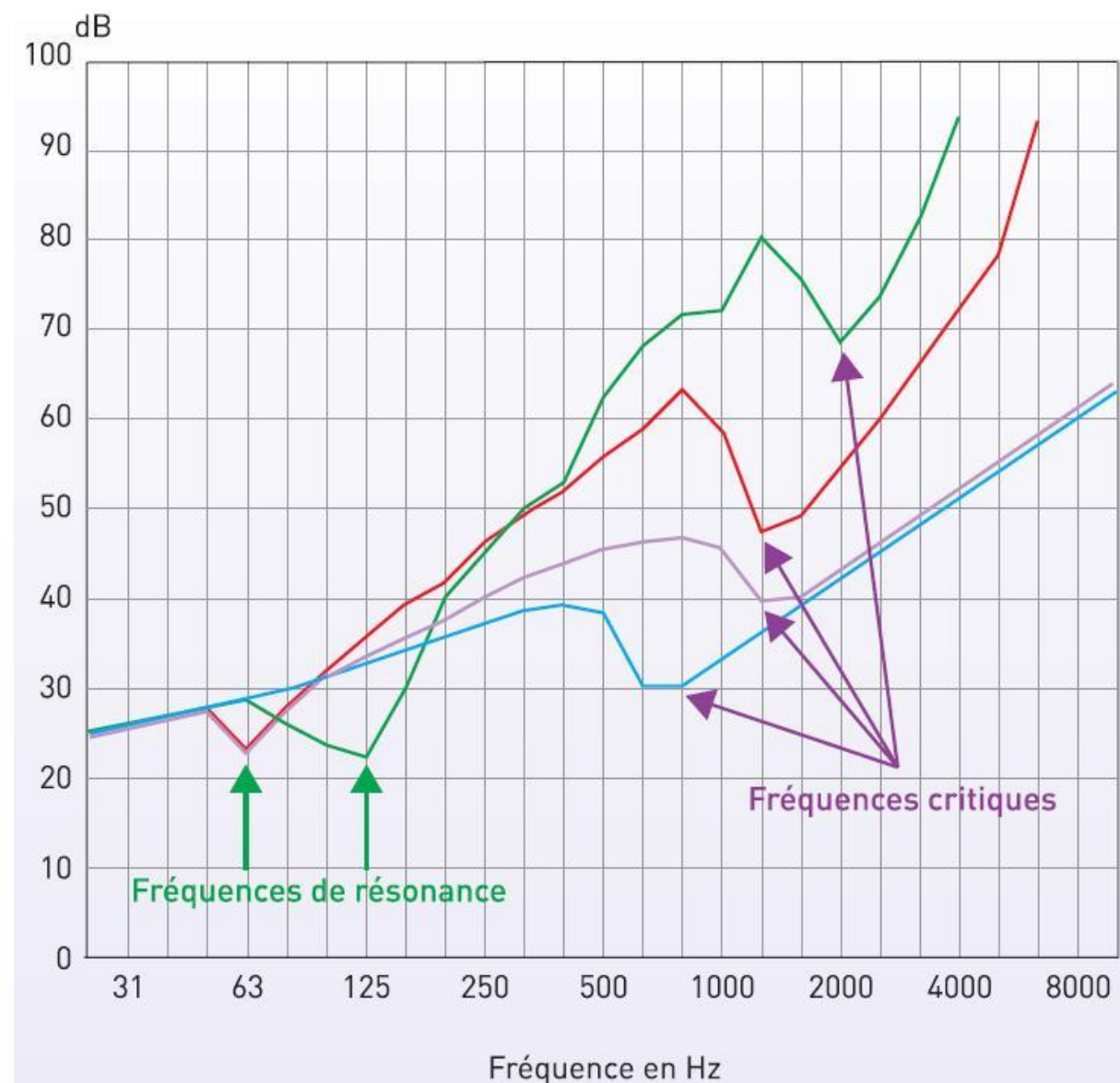


Transmission au travers des parois triples :

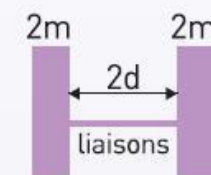
A noter :

A épaisseur et masse égales, une paroi triple est toujours moins performante qu'une paroi double optimisée.

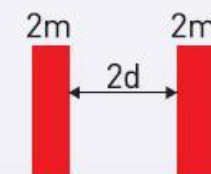
Si le matériau remplissant la lame d'air d'une paroi multiple est trop rigide, la fréquence de résonance est mal placée et la paroi double (ou triple) est moins performante qu'une paroi simple de même masse.



$R_A = 35$ dB
 $R_{A,tr} = 34$ dB



$R_A = 42$ dB
 $R_{A,tr} = 41$ dB



$R_A = 49$ dB
 $R_{A,tr} = 46$ dB



$R_A = 45$ dB
 $R_{A,tr} = 38$ dB

Principe des parois multiples : comparaison à masse égale et épaisseur égale entre parois doubles et parois triples



MERCI POUR VOTRE ATTENTION !