

Acoustique technique I

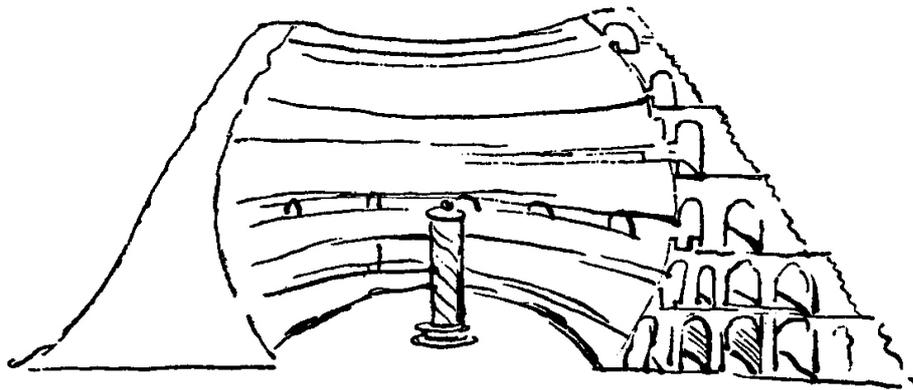


TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	3
1. La fonction logarithmique	4
2. Le niveau sonore	5
3. Le bruit	8
4. Sensibilité de l'oreille	9

INTRODUCTION

Dans cette première partie, on explique comment qualifier avec des grandeurs acoustiques notre perception du son, à partir des caractéristiques physiologiques de l'audition humaine.

Dans une description purement physique, il suffirait d'énumérer les intensités de chaque fréquence excitée par l'émission d'un son (spectre fréquentiel), et d'expliquer ensuite comment celui-ci se modifie au cours de sa propagation, jusqu'à atteindre un récepteur déterminé.

Les grandeurs nécessaires pour décrire l'émission se limitent alors à la fréquence (en *hertz*, Hz) et la puissance (en *watts*, W). La propagation se mesure ensuite par l'intensité (en *joules par mètre carré*, J/m²).

Dans le cas d'une émission sphérique (ou *omnidirectionnelle*), l'intensité diminue avec le carré de la distance.

Cependant, notre ouïe percevra le son en le raccourcissant, et avec une sensibilité aux intensités qui varie en fonction de la fréquence.

Les grandeurs acoustiques prennent en compte ces particularités physiologiques, pour décrire le son tel que nous le percevons.

Le raccourci fréquentiel se manifeste dans la considération des *bandes de fréquences* et le raccourci en intensité dans l'usage des *niveaux sonores*, définis à partir de la fonction logarithmique. Les courbes de sensibilité ont donné naissance aux *filtres de pondération*.

N'importe quel bruit peut finalement être décrit comme la somme de niveaux sonores émis ou perçus à des fréquences déterminées et pondérés avec le filtre adéquat.

Pour décrire l'émission, on utilise le niveau sonore en puissance (L_w) y pour la propagation et la perception le niveau sonore en intensité (L_I) ou en pression (L_p). Les bandes de fréquences les plus communes sont les bandes d'octaves, et le seul filtre de pondération d'un usage généralisé dans le secteur de la construction est le filtre "A". Les niveaux sonores se décrivent alors en "dB(A)" (en *décibels A*).

1. La fonction logarithmique

La fonction logarithmique de base a ($y = \log_a x$) peut se définir de deux manières équivalentes: comme l'inverse de la fonction exponentielle de même base ($y = a^x$), ou comme la relation existant entre, d'une part, les termes d'une progression géométrique de raison a

$$x = \{a^{-n} \quad \dots \quad a^{-3} \quad a^{-2} \quad a^{-1} \quad 1 \quad a \quad a^2 \quad a^3 \quad \dots \quad a^n\}$$

et, d'autre part, les termes correspondants de la progression arithmétique

$$y = \{-n \quad \dots \quad -3 \quad -2 \quad -1 \quad 0 \quad 1 \quad 2 \quad 3 \quad \dots \quad n\}$$

de manière à ce que

$$\log_a 1 = 0 \quad (1)$$

En mathématique, la base a la plus employée est le nombre irrationnel $e = 2,71828\dots$, qui définit l'exponentielle proprement dite ($y = e^x$) et son inverse, le logarithme népérien ($y = \log_e x = \ln x$). L'autre base d'un usage commun est $a = 10$, qui définit le logarithme décimal, celui qu'on utilise en acoustique, et qui se note $y = \log_{10} x$, ou simplement, sans l'indice, $y = \log x$.

La fonction logarithmique présente les trois propriétés suivantes:

$$\log_a a = 1 \text{ (donc: } \ln e = 1, \log 10 = 1) \quad (2)$$

$$\log_a u^m = m \log_a u \quad (3)$$

$$\log_a uv = \log_a u + \log_a v \quad (4)$$

A partir de (3) et (2), on vérifie que $\log_a a^x = x$, c'est-à-dire que la fonction logarithmique, appliquée à une fonction exponentielle de même base, la convertit en la fonction linéaire $y = x$. Exponentielle et logarithme ont donc un comportement inverse.

Pour $a > 1$, tandis que la fonction exponentielle progresse chaque fois plus rapidement à mesure que x augmente (c'est ce que l'on entend par « comportement exponentiel »), la fonction logarithmique croît rapidement depuis $\log_a 0 = -\infty$ jusqu'à $\log_a 1 = 0$ (comme une hyperbole), et ensuite toujours plus lentement vers l'infini (comme une parabole). Ainsi:

$$\log 1 = 0, \log 10 = 1, \log 100 = 2, \log 1\,000 = 3, \log 10\,000 = 4, \dots$$

$$\log 20 = 1.3, \log 40 = 1.6, \log 80 = 1.9, \log 160 = 2.2, \log 320 = 2.5, \dots$$

En physique, deux types de comportements sont particulièrement notables: dans les phénomènes *linéaires*, l'effet est en proportion (directe ou inverse) de la cause, tandis que dans les phénomènes *exponentiels* ou *logarithmiques*, une évolution constante dans la cause se voit accélérée (ou décélérée) dans l'effet. Ce second type est celui que l'on observe généralement dans la physiologie de la perception (loi de Weber-Fechner).

La physiologie de l'audition offre deux exemples d'un comportement logarithmique, en fréquence et en intensité. L'oreille perçoit le même intervalle entre 80 Hz et 160 Hz comme entre 160 Hz et 320 Hz, c'est-à-dire qu'elle perçoit cette progression géométrique comme si elle était arithmétique, comme si elle lui appliquait un filtre logarithmique.

La même chose se passe pour l'intensité, ce qui justifie alors l'usage du *décibel*, qui consiste en une fonction logarithmique.

Exercice 1:

- a) Sachant que $\log 2 \approx 0.301$ et $\log 3 \approx 0.477$, évaluer, sans recourir à la calculatrice: $\log 4$; $\log 5$; $\log 6$; $\log 8$; $\log 12$; $\log 125$; $\log 300$; $\log 320$; $\log 1024$; $\log 50000$; $\log 0.2$
- b) Ebaucher les fonctions $y = \log x$, $y = 10^x$ dans les axes (x, y) et indiquer l'axe de symétrie.

2. Le niveau sonore

L'énergie acoustique peut s'exprimer comme *puissance* (W , énergie par unité de temps, en watts), comme *intensité* (I , énergie par unité de surface, en joules par mètre carré) ou au moyen du carré de la *pression efficace* (p_{eff} , en pascals). Sans entrer dans les détails, on admet ici la relation qui unit ces deux dernières grandeurs pour les ondes progressives:

$$I \approx \frac{p_{\text{eff}}^2}{400} \quad (1)$$

A la fréquence de 1000 Hz, les seuils de la perception correspondent à des pressions efficaces de $2 \cdot 10^{-5}$ Pa (seuil de l'audition) et 20 Pa (seuil de la douleur). Le premier sert de référence pour définir le niveau sonore, et l'on a, respectivement, 0 dB et 120 dB pour les deux seuils:

$$L_p = 10 \log \frac{p_{\text{eff}}^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p_{\text{eff}}}{p_0} \quad (2)$$

Une expression équivalente est le niveau d'intensité, dont la référence I_0 est déduite de p_0 et de l'équation (1):

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad \text{où } I_0 = 10^{-12} \text{ J/m}^2 \quad (3)$$

Dans la pratique, ces deux expressions sont interchangeables, et l'on parlera indifféremment de *niveau sonore*, en pression (L_p) ou en intensité (L_I).

Une source sonore est décrite par sa puissance (en watts) ou par son niveau de puissance:

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad \text{où } W_0 = 10^{-12} \text{ W} \quad (4)$$

Le tableau suivant indique les niveaux atteints par différentes sources sonores:

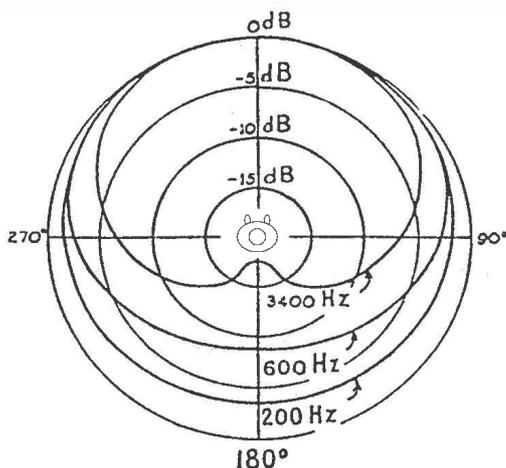
	W (watts)	L _W (dB)
voix féminine	0.002	93
voix masculine	0.004	96
clarinette	0.05	107
violon	0.16	112
orchestre	10 ⇒ 70	130 ⇒ 138

Pour déduire la puissance du niveau de puissance (ou l'intensité du niveau sonore), il faut inverser les formules antérieures:

$$\frac{L_W}{10} = \log \frac{W}{W_0} \Rightarrow 10 \frac{L_W}{10} = 10 \log \frac{W}{W_0} = \frac{W}{W_0}$$

Et donc:

$$W = W_0 \cdot 10^{\frac{L_W}{10}}$$



En général, l'émission d'une source sonore n'est pas omnidirectionnelle: le corps du comédien ou du musicien, par exemple, fait obstacle, et limite la propagation du son vers l'arrière. La figure suivante montre le cas d'un chanteur.

On observe que l'atténuation est forte aux hautes fréquences (elle peut dépasser les 15 dB), mais presque inexistante aux basses fréquences, à cause de la diffraction du son.

En tout cas, l'acoustique des bâtiments considère ces phénomènes comme de simples corrections au cas standard de

l'émission sphérique (omnidirectionnelle), laquelle se caractérise par une diminution de l'intensité sonore proportionnelle au carré de la distance (la puissance émise se répartit sur une sphère toujours plus grande, à mesure que le son s'éloigne du point d'émission):

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (5)$$

Les équations antérieures se combinent alors en:

$$L_I = L_W - 20 \log r - 11 \quad (6)$$

Cette formule indique que si une source émet un son de 100 dB, par exemple, elle engendrera un niveau sonore de 89 dB à un mètre de distance. Ensuite, le niveau sonore baissera de six décibels pour chaque doublement de distance : il sera ainsi de 83 dB à 2 m, de 77 dB à 4m., de 71 dB à 8 m., de 65 dB à 16m., ...

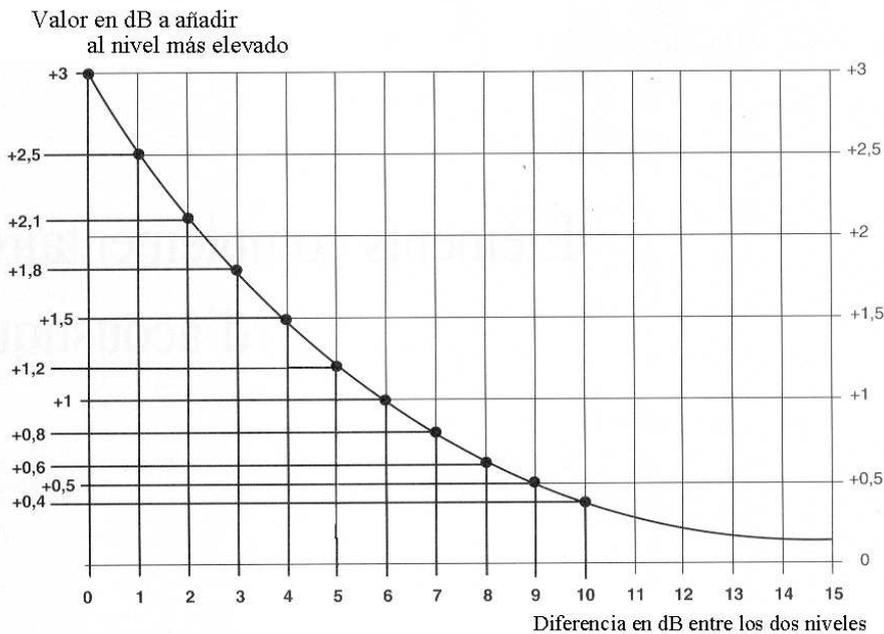
Pour additionner deux niveaux sonores, il faut additionner les énergies (intensités, puissances, carré des pressions efficaces) et pas les niveaux. Ainsi, deux contributions I_1 et I_2 donnent une intensité totale $I = I_1 + I_2$, correspondant à un niveau

$$L_I = 10 \log \frac{I_1 + I_2}{I_0} = 10 \log (10^{0.1 L_1} + 10^{0.1 L_2})$$

Si les deux contributions sont égales ($I_1 = I_2$), le niveau résultant augmente de 3 dB:

$$L_I = 10 \log \frac{2 I_1}{I_0} = 10 \log \frac{I_1}{I_0} + 10 \log 2 = L_{I_1} + 3$$

Si les contributions sont distinctes, il faut une calculatrice ou, vu que l'acoustique n'exige pas une précision importante (les valeurs finales s'arrondissent généralement à des valeurs entières en décibels), on peut utiliser le diagramme suivant:



Exemples: $L_1 = 60$ dB et $L_2 = 54$ dB. La différence est de 6 dB. Donc, il faut ajouter un décibel à la contribution la plus importante, et la somme donne 61 dB.

$L_1 = 60$ dB et $L_2 = 50$ dB. Il ne faut ajouter que 0,4 dB. Le résultat, de 60,4 dB, s'arrondit ensuite à 60 dB. La seconde contribution est donc négligeable (on considère que la plus petite différence discernable par l'oreille humaine entre deux niveaux sonores est de l'ordre d'un décibel).

Exercice 2:

- a) Additionner les cinq contributions suivantes: $L_1 = 60$ dB et $L_2 = L_3 = L_4 = L_5 = 48$ dB. *Nb.: S'il y a plus de deux contributions, il faut absolument additionner d'abord les quantités les plus faibles. Il ne faut pas arrondir les résultats intermédiaires!*

- b) Dédurre de la formule (6) la diminution de L_p chaque fois que l'on double la distance, et chaque fois qu'on la multiplie par dix.
- c) Evaluer le niveau sonore L_p induit par une émission $L_W = 100$ dB à 3 m., 5 m., 10 m., 20 m., 30 m., 40 m. et 100 m. de la source. ¿Que se passe-t-il si $L_W = 110$ dB?
- d) ¿Que se passe-t-il lorsqu'une source sonore est disposée contre un mur réflecteur?

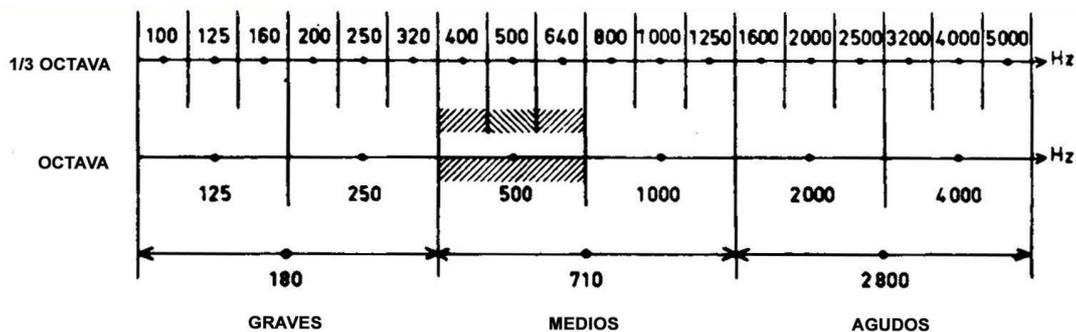
3. Le bruit

Le bruit est un mélange complexe de sons; il se caractérise par son *spectre fréquentiel*, la variation de son intensité en fonction de la fréquence. L'oreille perçoit ce bruit de manière globale, y reconnaissant une voix humaine, une machine, ou des arbres secoués par le vent...

En pratique, un bruit s'analyse par bandes de fréquences, au moyen de filtres acoustiques qui permettent de mesurer le niveau de pression en *bandes d'octaves* ou, pour une étude plus fine, de *tiers d'octaves*. Ces bandes ont été normalisées. Elles sont centrées sur les fréquences suivantes (la première ligne correspond aux bandes d'octaves):

16	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
20	40	80	160	320	640	1250	2500	5000	10000	
25	50	100	200	400	800	1600	3200	6400	12500	

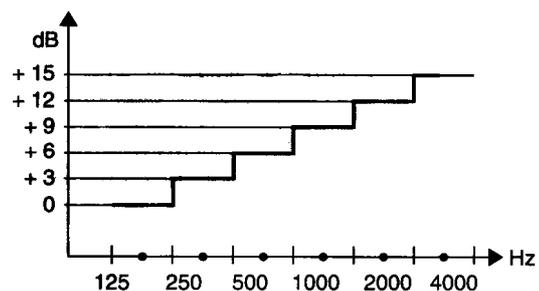
Dans le secteur de la construction, les études sont généralement limitées entre 100 Hz et 5 000 Hz.



Pour une analyse sommaire, cette échelle peut se résumer en trois bandes, de deux octaves chacune: les basses (125 Hz et 250 Hz), les moyennes (500 Hz et 1 000 Hz) et les hautes fréquences (2 000 Hz et 4 000 Hz).

Les sources sonores peuvent émettre trois types de bruit, qui ont été normalisés pour les études acoustiques.

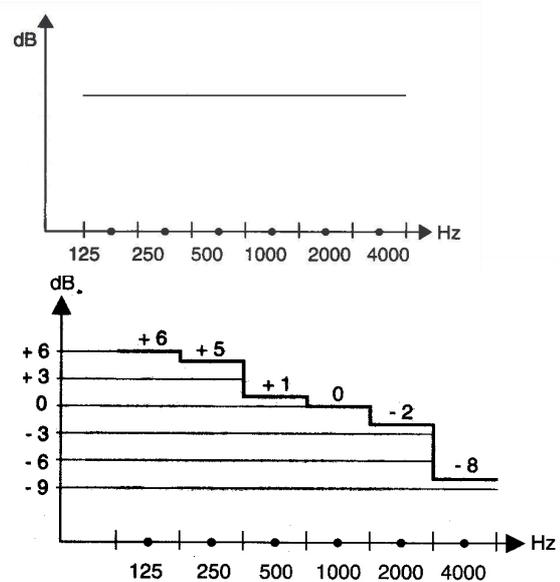
Le *bruit blanc* contient toutes les fréquences audibles avec le même niveau de pression sonore. Cependant, une bande d'octave dans les aigus contient plus de fréquences, et donc plus d'énergie, que dans les graves. Comme chaque bande est deux fois plus large que l'antérieure, le



niveau sonore monte chaque fois de trois décibels.

Le *bruit rose* a une énergie constante par unité d'intervalle logarithmique, c'est-à-dire que l'énergie contenue dans chaque bande d'octave ou de tiers d'octave est constante.

Le *bruit de trafic* simule le bruit produit par les routes et les chemins de fers. Son spectre est continu et l'énergie contenue dans chaque bande d'octave est normalisée par rapport à l'énergie contenue dans la bande d'octave centrée sur 1 000 Hz. Il se caractérise par le fait de contenir plus d'énergie dans les basses fréquences.

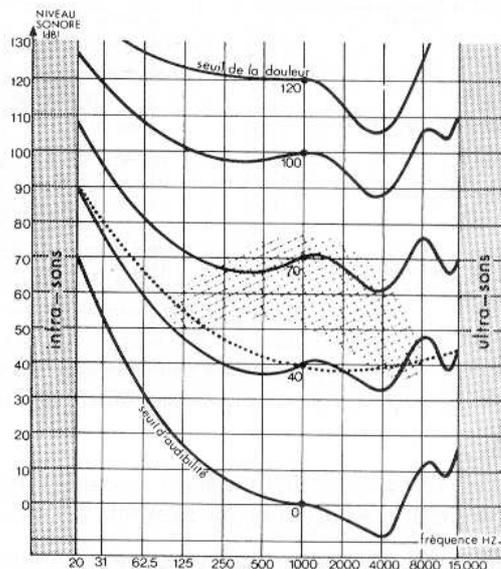


Exercice 3:

Evaluer le niveau total, correspondant à la somme des six bandes d'octave, émis par un bruit blanc, un bruit rose et un bruit de trafic qui émettent 80 dB à 1000 Hz.

4. Sensibilité de l'oreille

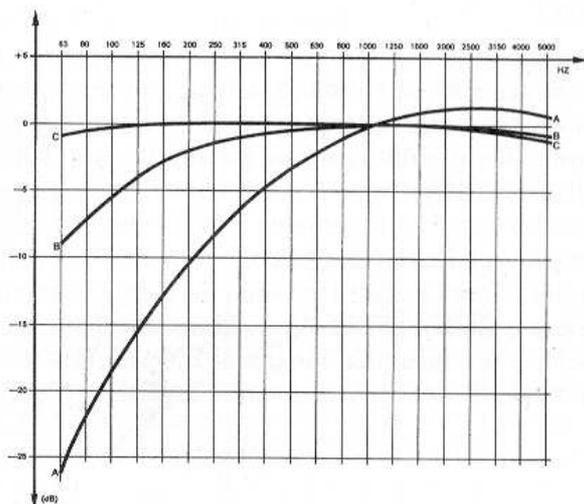
La sensibilité de l'oreille suit un comportement logarithmique aussi bien en fréquence qu'en intensité. Cependant, sa sensibilité en intensité varie en fonction de la fréquence: elle est maximale entre 500 et 5 000 Hz et s'affaiblit fortement dans les graves. Ainsi, un son de 50 dB à 1000 Hz produit la même impression de niveau sonore qu'un son de 67 dB à 100 Hz.



Le graphique de sensibilité montre ce comportement de l'oreille entre les quatre seuils: deux en fréquence (ici fixés à 20 et 15000 Hz), et deux en intensité (le *seuil d'audition*, sous lequel on n'entend pas, et le *seuil de la douleur*, au-delà duquel la sensation produite est douloureuse). Ces derniers coïncident, respectivement, avec les courbes inférieure et supérieure du graphique. Chacune des trois courbes intermédiaires manifeste une sensation égale du niveau sonore, calibrée à 40, 70 et 100 dB pour la fréquence de 1000 Hz.

On observe qu'il est théoriquement possible de percevoir des niveaux sonores négatifs en décibels, et que la sensibilité de l'oreille est maximale à 4 000 Hz, tandis que les valeurs limites de 0 et 120 dB ont été définies pour un son de 1000 Hz.

Niveaux de pression acoustique pondérés



Pour obtenir, au moyen d'appareils, des mesures représentatives du niveau sonore perçu par l'oreille, en prenant en compte sa sensibilité variable, il faut introduire dans les circuits électriques des filtres qui reproduisent les courbes d'égale sensation de l'oreille. Les *courbes de pondération* représentent les corrections apportées par ces filtres, limités dans la pratique à trois types: les filtres A, B, et C, qui correspondent, respectivement, au comportement de l'oreille pour les niveaux faibles (<55 dB), moyens (55 dB à 85 dB) et élevés

(>85 dB), et dont les résultats s'expriment en dB(A), dB(B) et dB(C). Ces niveaux peuvent différer grandement du niveau non pondéré. Ainsi, un bruit de 80 dB peut correspondre à 40 dB(A) s'il comporte de nombreuses fréquences graves. Actuellement, on utilise presque exclusivement les dB(A) pour évaluer les nuisances sonores dans les édifices, quel que soit le niveau sonore. Les pondérations du filtre A sont les suivantes:

Fréquences centrales des bandes d'octave (en Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Pondération du filtre A (en dB)	-15.5	-8.5	-3	0	+1	+1

Exercice 4:

Répéter l'exercice 3, mais en appliquant les pondérations du filtre A. Expliquer les différences observées entre les niveaux en dB et en dB(A).

Références:

“Auditorium Acoustics and Architectural Design”, M. Barron, éd. E&FN Spon, 1993

“L'acoustique du bâtiment par l'exemple”, M. Meisser, éd. Le Moniteur, Paris, 1994

“Réussir l'acoustique d'un bâtiment”, L. Hamayon, éd. Le Moniteur, Paris, 1994

L'illustration de la première page est un dessin de Léonard de Vinci : « théâtre pour entendre la messe », copié de « Architecture et musique », M. Forsyth, éd. Mardaga, 1987.

Acoustique technique II

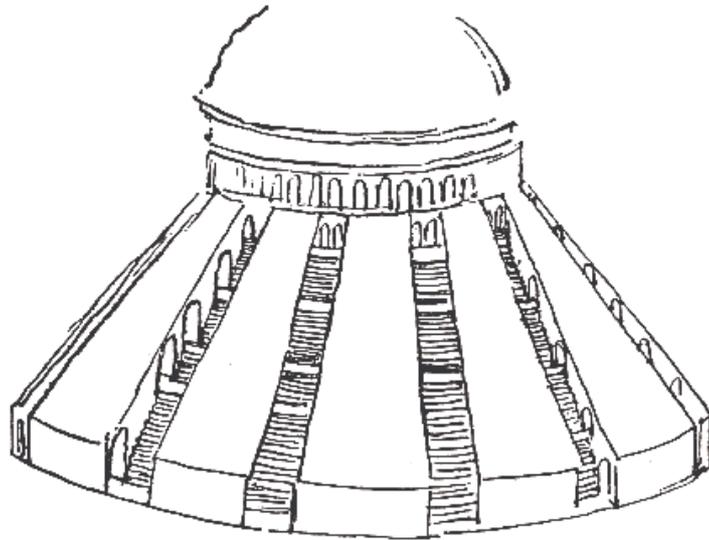
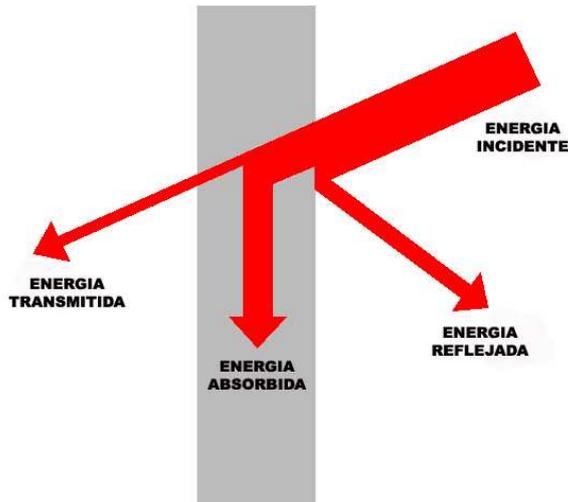


TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	13
5. La loi des masses	15
6. L'absorption	19
7. La réverbération	22
8. L'isolation	25

INTRODUCTION

Dans cette seconde partie, on explique comment qualifier avec des grandeurs acoustiques l'interaction du son avec la matière.

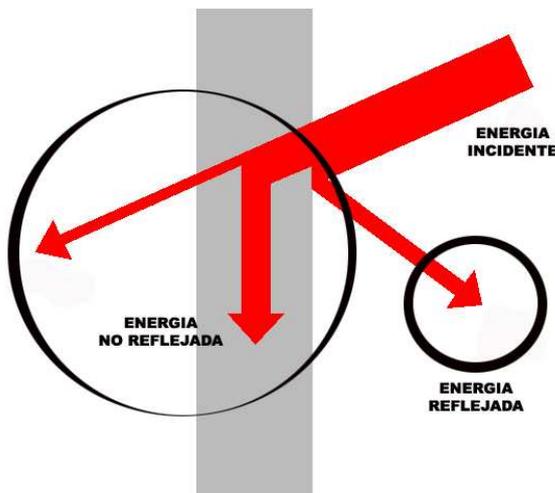


Lorsqu'un son atteint un obstacle, une partie se transmet au-delà, une autre partie se réfléchit, et le reste est absorbé. Le rapport entre la transmission et l'absorption définit la participation de cet obstacle à l'*isolation*; le rapport entre la réflexion et l'absorption définit la participation de cet obstacle à la *réverbération*.

Si l'on considère un intérieur, on peut étudier son isolation acoustique, c'est-à-dire la relation entre l'enceinte qui le délimite et le monde sonore extérieur. On peut aussi étudier sa réverbération, c'est-à-dire l'implication de l'enceinte dans le champ sonore qui s'établit dans cet intérieur à chaque fois

que l'on y émet un son.

Ainsi, on voit que les problèmes acoustiques de réverbération et d'isolation peuvent, jusqu'à un certain point, s'étudier séparément.



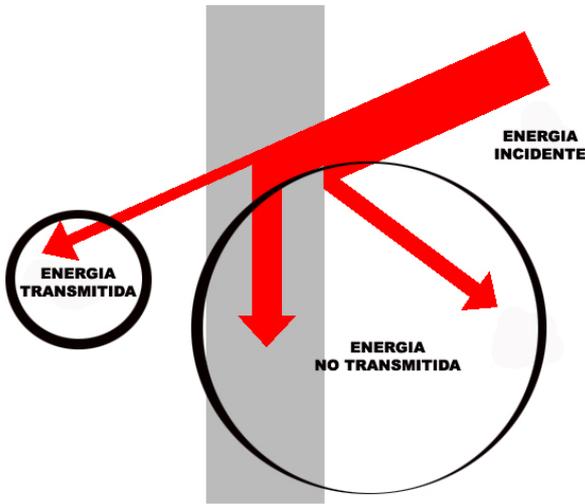
La réverbération

Le problème de la réverbération décrit la participation d'un local (ses parois et les objets qu'il contient) au champ sonore qui s'y établit lorsque du bruit y est produit.

Chaque fois que ce bruit rencontre un obstacle dans sa propagation, une partie de son énergie se réfléchit et continue à parcourir le local. Le reste est considéré "absorbé", soit parce qu'il s'est converti en chaleur (absorption proprement dite), soit parce qu'il est sorti du local en traversant l'obstacle. En général, on peut considérer

que cette énergie transmise ne participe plus à la réverbération, et, par conséquent, on l'assimile à l'énergie absorbée.

Quant à la réverbération, une paroi est donc décrite par le pourcentage du son que s'y réfléchit. Ce pourcentage dépend principalement du type de matériel qui recouvre cette paroi, dont le comportement acoustique est qualifié par un "coefficient d'absorption".



L'isolation

Le problème de l'isolation décrit la relation acoustique entre un local et le monde extérieur.

Si l'on émet un bruit à l'intérieur du local, une partie de ce bruit se transmet vers l'extérieur, à travers les parois. Le pourcentage d'énergie transmise par une paroi dépend essentiellement de son épaisseur et du matériau qui la constitue.

En général, ce pourcentage est le même, que le son aille depuis l'intérieur vers l'extérieur ou depuis l'extérieur vers l'intérieur.

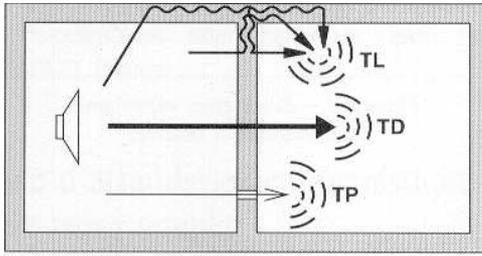
Quant à l'isolation, une paroi se

décrit au moyen d'un "facteur de réduction".

Le texte suivant décrit principalement le problème de l'isolation. En réalité, l'isolation n'est pas complètement découplée de la réverbération, raison pour laquelle, à un certain moment, il faudra introduire au problème de la réverbération, pour compléter l'étude de l'isolation.

5. La loi des masses

Lorsqu'un bruit est émis dans un local, il peut se transmettre à un local voisin par trois chemins:



- par la paroi de séparation (transmission *directe*)
- par les parois adjacentes (transmission *indirecte*, ou *latérale*)
- par divers accidents dus, par exemple, au passage de canalisations ou à des défauts d'exécution (transmission *parasite*).

Le problème résultant est celui de l'isolation.

Sa composante principale est la *réduction acoustique* de la paroi de séparation, exprimée par el facteur R ., défini par:

$$R(\text{dB}) = 10 \log \frac{W_i}{W_t}$$

où W_i représente la puissance acoustique incidente sur la paroi et W_t la puissance acoustique transmise. Ainsi, une réduction de 40 dB signifie qu'un son de 100 dB émis dans la première enceinte sera perçu dans la seconde comme s'il n'était que de 60 dB. Cependant, l'indice R ne qualifie qu'une paroi. Si, comme c'est généralement le cas, le son a d'autres voies de transmission (à travers le toit, une porte, d'autres parois), l'isolation totale peut être bien moindre.

Le facteur R peut être mesuré directement en laboratoire, où l'on évite les transmissions latérales et accidentelles, ou indirectement et de manière approchée, en conditions réelles, avec l'évaluation préalable de ces autres transmissions.

On peut aussi l'évaluer par calcul, si l'on connaît les dimensions des locaux et la masse volumique du matériau, d'où l'on peut déduire la masse superficielle de la paroi.

Exemple: la masse superficielle d'une paroi de 18 cm d'épaisseur constituée de béton avec une masse volumique de 2300 kg/m³ est: $2300 \times (18/100) = 414 \text{ kg/m}^2$

Parois simples

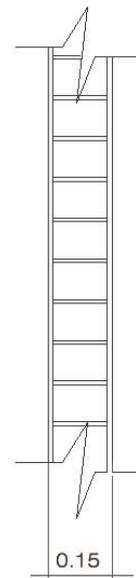
Loi des masses pour un bruit rose:

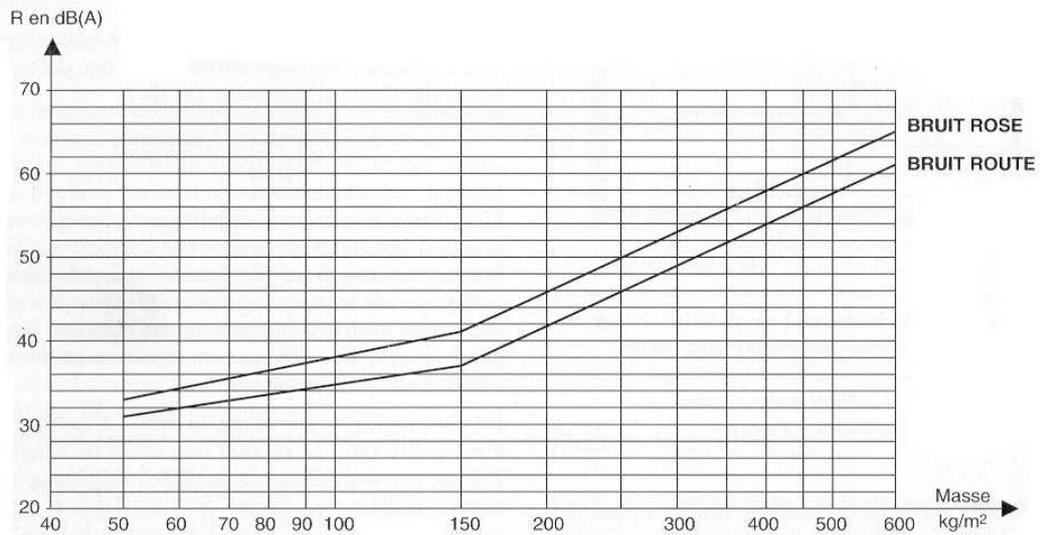
- pour $50 \leq m_s < 150 \text{ kg/m}^2$: $R = (17 \log m_s) + 4$
- pour $150 \leq m_s \leq 700 \text{ kg/m}^2$: $R = (40 \log m_s) - 46$
- pour $m_s > 700 \text{ kg/m}^2$, la valeur de R reste à 68 dB(A)

Loi des masses pou un bruit route:

- pour $50 \leq m_s < 150 \text{ kg/m}^2$: $R = (13 \log m_s) + 9$
- pour $150 \leq m_s \leq 670 \text{ kg/m}^2$: $R = (40 \log m_s) - 50$
- pour $m_s > 670 \text{ kg/m}^2$, la valeur de R reste à 63 dB(A)

Dans ces deux cas, si $m_s < 50 \text{ kg/m}^2$, la valeur de R doit être déterminée en laboratoire.





Valeurs de la masse volumique:

- | | |
|--|------------------------|
| - béton lourd, parois verticales: | 2300 kg/m ³ |
| - béton lourd, surfaces horizontales: | 2400 kg/m ³ |
| - bloc plein (béton, sable, gravier): | 2000 kg/m ³ |
| - bloc perforé (béton, sable, gravier): | 1600 kg/m ³ |
| - bloc creuse (béton, sable, gravier): | 1300 kg/m ³ |
| - brique pleine: | 1850 kg/m ³ |
| - brique creuse avec 55% de vide: | 845 kg/m ³ |
| - brique creuse avec 60% de vide: | 750 kg/m ³ |
| - brique creuse avec 65% de vide: | 655 kg/m ³ |
| - béton cellulaire: | 500 kg/m ³ |
| - revêtement de plâtre (1 cm d'épaisseur): | 10 kg/m ² |
| - revêtement de ciment (1 cm d'épaisseur): | 20 kg/m ² |

Exemple: Quel est l'indice de réduction acoustique R_{rose} en dB(A), pour une dalle pleine de 20 cm d'épaisseur? La masse volumique d'une surface horizontale est estimée à 2400 kg/m³. Une dalle pleine de 20 cm d'épaisseur possède donc une masse superficielle de:

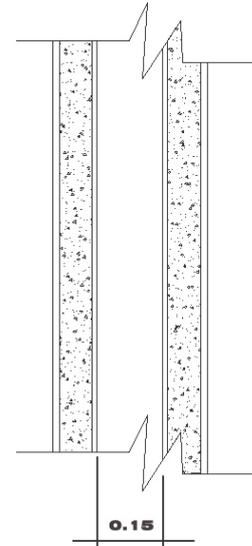
$$2400 \times (20/100) = 480 \text{ kg/m}^2$$

La masse superficielle se situant entre 150 et 700 kg/m², on applique la formule:

$$R_{\text{rosa}} = (40 \log m_s) - 46 = 61 \text{ dB(A)}$$

Parois doubles

Les parois doubles isolent généralement bien mieux que les parois simples construites avec le même matériau et présentant la même masse superficielle.



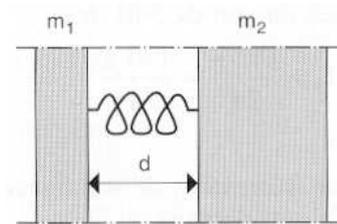
Il existe cependant quelques exceptions notables. Ainsi:

R_{route} en dB(A)	m_s en kg/m ²	R_{rose} en dB(A)	
Verre de 8 mm:	20	31	30
Double vitrage 4-6-4	20	30	27

En fait, dans le cas de parois doubles, l'indice R dépend à la fois de la masse superficielle des deux parois, de l'épaisseur de la lame d'air qui les sépare, de l'épaisseur de l'absorbant acoustique (type laine minérale) disposé entre elles et de la fréquence critique de chacune.

a) Les deux premiers paramètres caractérisent un système mécanique masse-ressort-masse, comme si les deux parois étaient unies par un ressort.

Cet ensemble a une fréquence propre et, si l'on soumet l'une des parois à une vibration de même fréquence, le système entre en résonance.



$$f_r = 84 \sqrt{\frac{1}{d} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \text{ où } d \text{ s'exprime en mètres, } m_1 \text{ et } m_2 \text{ en kg/m}^2.$$

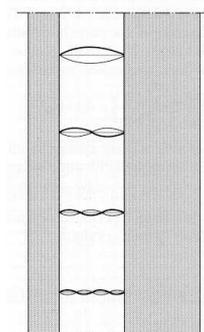
Exemple: Quelle est la fréquence de résonance d'un double vitrage 4-6-4?

La masse volumique du verre étant de 2500 kg/m³, la masse superficielle d'une vitre de 4mm est:

$$2500 \times (0.4/100) = 10 \text{ kg/m}^2. \Rightarrow f_r = 84 \sqrt{(1/0.006 (1/10+1/10))} = 485 \text{ Hz}$$

Cette fréquence, autour de laquelle R diminue fortement, se situe dans les fréquences moyennes, les mieux perceptibles par l'ouïe humaine; c'est une des raisons pour lesquelles cette double paroi est moins efficace que la paroi simple correspondante.

Pour augmenter R, il faut chercher la fréquence de résonance la plus basse possible, ce que l'on obtient en augmentant la distance entre les parois et leur masse superficielle.



b) La formation d'ondes stationnaires à l'intérieur de la lame d'air perturbe aussi l'indice R : Les fréquences de résonance de la lame sont:

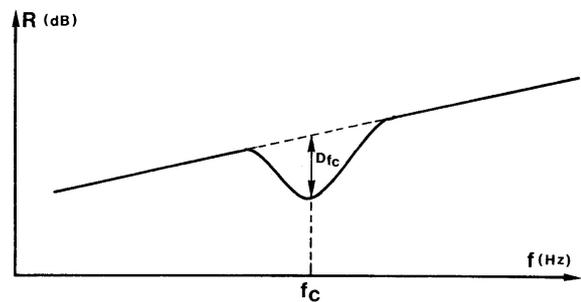
$f_n = \frac{nc}{2d} \approx 170 n/d$, où c est la vitesse du son (≈ 340 m/s), d la distance entre les parois et n vaut 1,2,3,4,etc.

Exemple : les fréquences de résonance d'une lame d'air de 10 cm d'épaisseur sont $f_n = 170 n/0.10 = 1700 n$. Ces fréquences se situent à 1700, 3400, 5100, 6800 Hz...

Il faut rejeter ces fréquences vers les aigus, en diminuant la distance entre les parois. Comme cette exigence est contradictoire avec l'antérieure, en particulier pour les parois légères, on recommande de disposer un matériau absorbant entre les deux parois.

c) L'absorbant acoustique, type laine minérale, offre deux avantages: il amortit les ondes stationnaires et augmente R pour toutes les fréquences.

d) Chaque paroi a une fréquence critique f_c , pour la quelle R diminue de manière plus ou moins importante. Si les deux parois son identiques, les fréquences critiques le sont aussi, et la chute de R s'en trouve fortement accentuée. On recommande donc d'utiliser des parois doubles avec des éléments d'épaisseur différente.



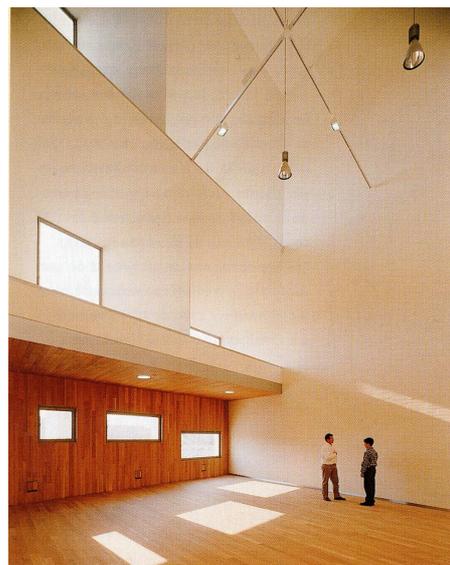
N.B.: La diminution maximale de R , à la fréquence critique, est d'environ 5 dB pour les matériaux avec des pertes internes élevées (liège, caoutchouc,...), d'environ 8 dB pour les matériaux avec des pertes internes moyennes (béton, bois,...) et d'environ 10 dB pour les matériaux avec des pertes internes faibles (acier, verre, aluminium,...). L'augmentation de l'épaisseur de la paroi déplace cette fréquence critique, en l'emportant vers les basses fréquences.

Parois composées

En général, une surface se compose de différents éléments, comme, par exemple, une porte dans une paroi séparant deux locaux. L'indice R résultant de la composition des deux indices impliqués se calcule ainsi:

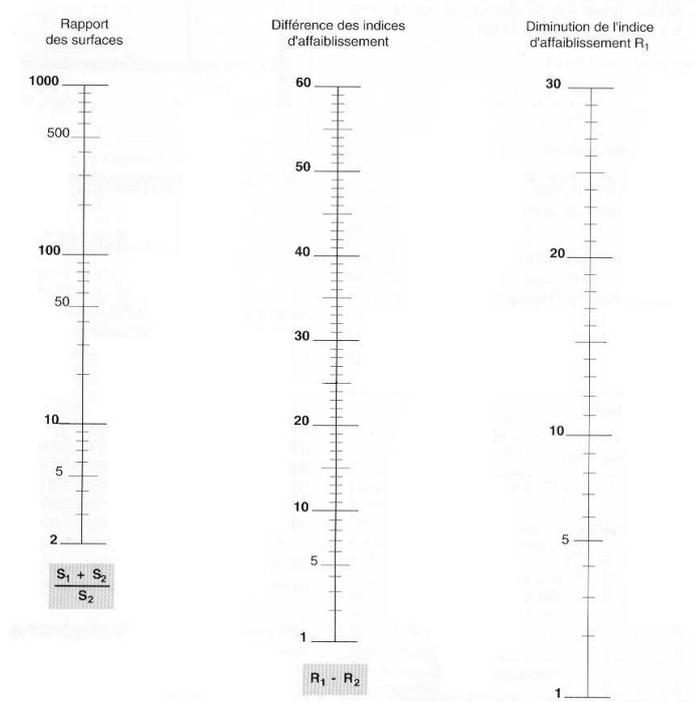
$$R_{\text{res}} = 10 \log \frac{S_1 + S_2}{S_1 10^{-0.1R_1} + S_2 10^{-0.1R_2}}, \text{ où:}$$

S_1 et S_2 sont les surfaces, en m^2 , de chaque composante,



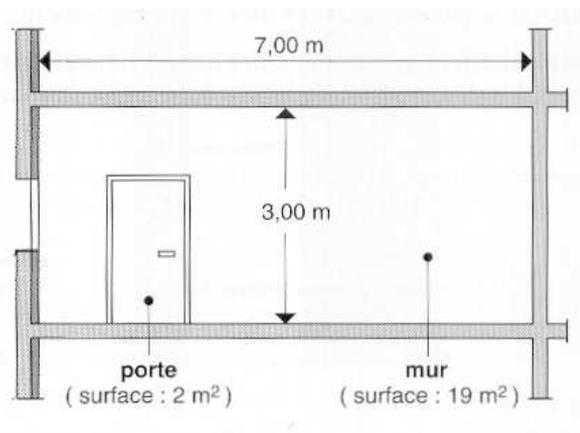
R_1 et R_2 sont les indices de réduction, en dB ou dB(A), de chaque composante.

On peut aussi utiliser le graphique suivant, qui donne la diminution de l'indice R le plus élevé en fonction de la relation entre les surfaces et de la différence entre les deux indices R:



Exercice 5:

a) Deux salles de classe sont séparées par une paroi de 7 x 3 mètres, incluant une porte de communication de 2 m². Les indices R de la paroi et de la porte valent, respectivement, 45 et 20 dB(A). ¿Quel est l'indice R résultant?



b) *Une transmission parasite:*

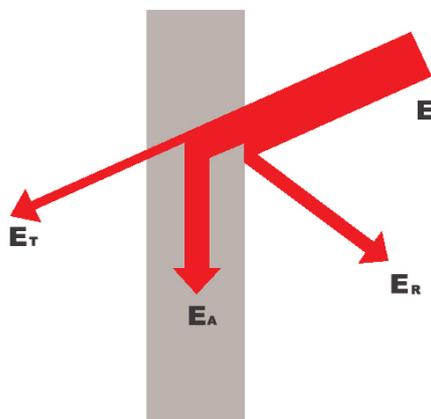
Supposons un mur de parpaings pleins de 20 cm d'épaisseur, non stuqués, c'est-à-dire possédant, selon la loi de masse expérimentale, un indice de réduction R_{rosa} de 58 dB(A). Sa surface est de 10 m² et il présente une certaine quantité de trous, à cause de mauvais joints, avec une surface totale de 100 cm² (c'est-à-dire 0.01 m²). Par définition, l'indice R de ces vides est égal à 0 dB(A).

¿Quel est l'indice R_{rosa} résultant?

Si on stuque ce mur sur au moins l'une de ses deux surfaces, les trous sont bouchés et $R = 58$ dB(A). Comparer avec le résultat précédent.

6. L'absorption

En nous limitant, jusqu'ici, à l'étude de la rencontre d'une onde sonore avec une paroi de l'enceinte où elle fut émise, nous n'avons examiné que la partie transmise au travers de l'obstacle. Observons que cette fraction de l'énergie incidente (E_I) est faible, voire très faible. Ainsi, dans les fréquences moyennes, moins de 1/1000 de l'énergie incidente se transmet à travers un vitrage simple, et moins de 1/1 000 000 à travers une paroi de béton de 18 cm d'épaisseur. Une partie plus importante est absorbée par la paroi (E_A) et une autre partie se réfléchit vers l'intérieur de l'enceinte (E_R). Si l'on s'intéresse à la situation dans cette enceinte, l'énergie transmise est associée à l'énergie absorbée, puisque ces deux fractions sont perdues pour le champ sonore intérieur, de sorte que $E_I = E_A + E_R$.



Le coefficient d'absorption de la paroi se définit comme:

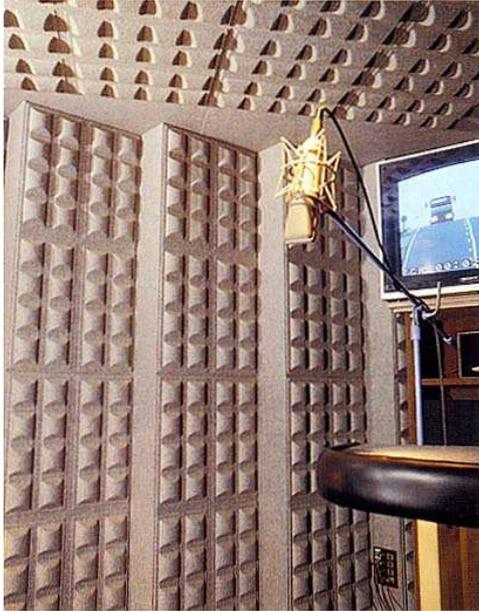
$$\alpha = E_A/E_I = 1 - E_R/E_I$$

Ainsi, si une paroi absorbe 60% de l'énergie incidente – c'est-à-dire qu'elle réfléchit 40% de celle-ci –, son coefficient d'absorption est $\alpha = 0.6$. Ce coefficient peut donc varier entre $0 < \alpha \leq 1$, depuis une paroi totalement réfléchissante, jusqu'à une paroi parfaitement absorbante. Sa valeur dépend du matériau de la paroi et varie avec la fréquence du son incident.

Fréquence (Hz):	125	250	500	1000	2000	4000
Paroi de béton peint ¹ :	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
Plâtre peint ² :	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
Verre (fenêtres) ¹ :	0.2	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
Verre ² :	0.25	0.20	0.15	0.10	0.04	0.02
Tapiserie de laine (sur les murs) ² :	0.05	0.10	0.20	0.30	0.35	0.45
Porte en bois :	0.30	0.20	0.20	0.10	0.07	0.04
Panneaux de bois fin ³ :	0.42	0.21	0.10	0.08	0.06	
Sol de carrelages ² :	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Sol de plastique ¹ :	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02
Moquette épaisse ¹ :	0.05	0.10	0.25	0.40	0.40	0.40
Moquette de laine haute ² :	0.15	0.30	0.45	0.45	0.45	0.50
Sol occupé par des fauteuils mous ² :	0.45	0.55	0.60	0.60	0.60	0.60
Chaises couvertes de cuir sans occupants ³	0.12	0.20	0.28	0.34	0.34	
Public et orchestre ³	0.39	0.57	0.80	0.94	0.92	
Rideaux ³	0.06	0.31	0.44	0.80	0.75	
Plaques perforées (métal + laine minérale) ⁴	0.60	0.74	0.69	0.70	0.75	
Plaques perforées (bois + laine minérale) ⁴	0.37	0.8	1.02	0.82	0.58	

EXEMPLES:





Références :

- (1) “Réussir l’acoustique d’un bâtiment”, L. Hamayon, éd. Le Moniteur, Paris, 1996
- (2) “L’acoustique du bâtiment par l’exemple”, M. Meisser, éd. Le Moniteur, Paris, 1994
- (3) “Auditorium Acoustics and Architectural Design”, M. Barron, ed. E&FN Spon, 1993
- (4) Exemples de matériaux acoustiques qui présentent une absorption sélective aux basses fréquences, où les valeurs de l’absorption dépendent beaucoup de l’espace entre la plaque perforée et le mur ou le plafond.

On peut observer les désaccords entre les différentes sources: les coefficients varient selon les conditions de mesure en laboratoire, la qualité du matériau, son épaisseur, sa surface, les menuiseries,... On ne devrait considérer ces valeurs que comme des ordres de grandeur...

Exercice 6:

- ¿Quels sont les matériaux qui absorbent le mieux les fréquences graves / aigues?
- ¿Pourquoi?

7. La réverbération

Le son émis dans un local se réfléchit sur les surfaces de l'enceinte. Si on arrête la source d'émission, le bruit se prolonge un moment, alimenté par les réflexions retardées, et s'éteint lentement. Ce phénomène s'appelle la "réverbération". Le temps de réverbération est le temps nécessaire pour que, une fois la source d'émission interrompue, le son diminue de 60 dB, c'est-à-dire jusqu'à la millionième partie de son énergie initiale. La réverbération sera d'autant plus importante que le volume de l'enceinte sera grand et que ses surfaces seront lisses et pesantes. C'est ce qu'exprime la formule de Sabine:

$$T_R = 0.16 \frac{V}{A}$$

où T_R est le temps de réverbération (en secondes), V le volume du local (en m^3) et A la surface d'absorption équivalente (en m^2):

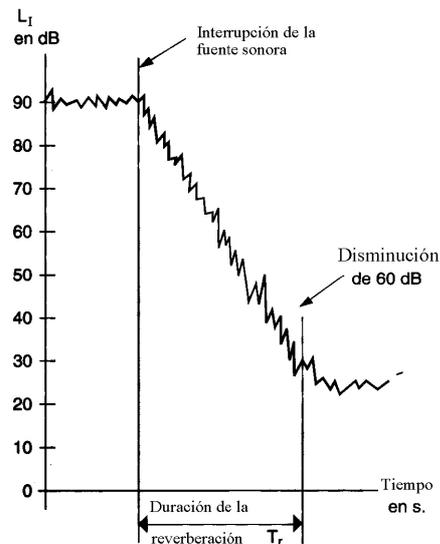
$$A = S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + S_3\alpha_3 + \dots + S_n\alpha_n,$$

où S_i est une des n surfaces de l'enceinte et α_i son coefficient d'absorption.

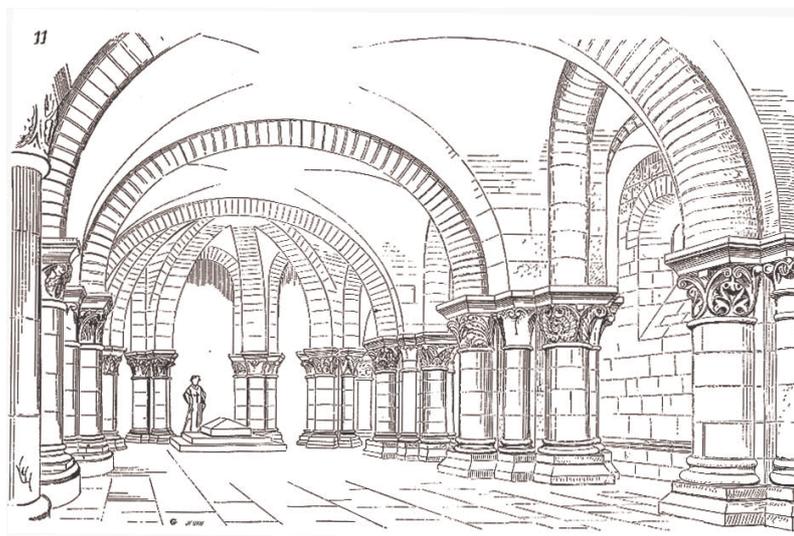
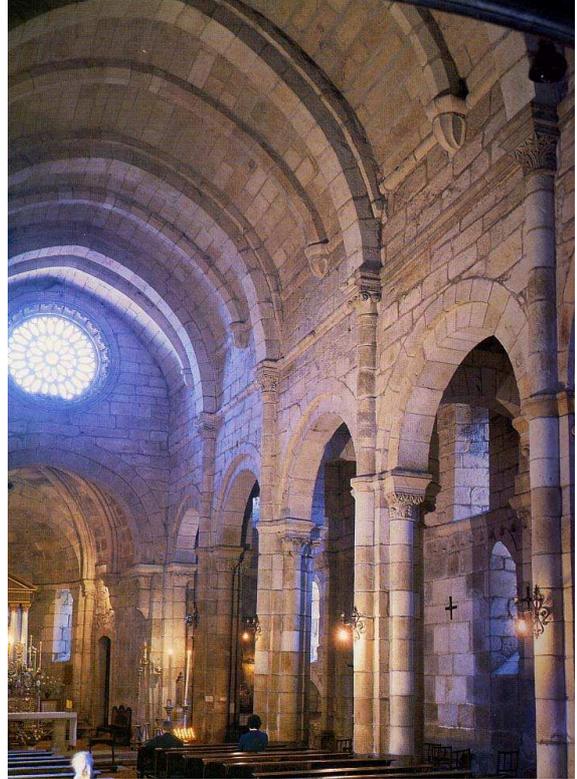
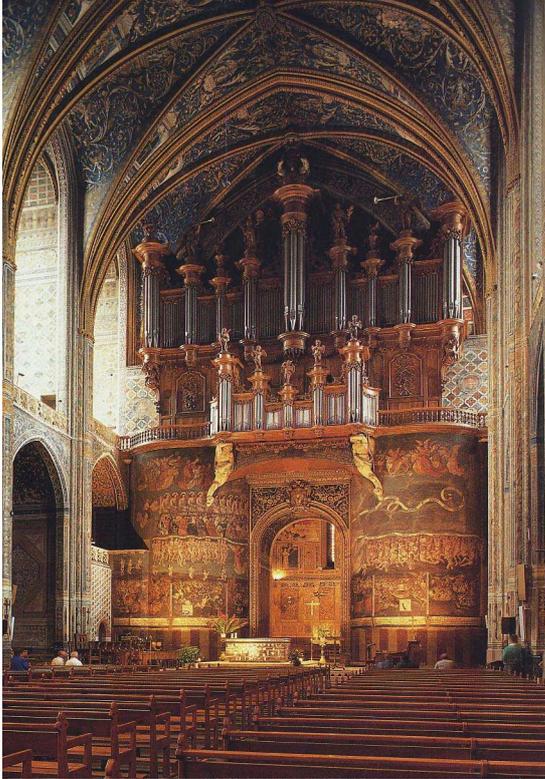
Cette formule donne des résultats acceptables si la répartition des absorbants est homogène et si les coefficients d'absorption sont faibles. Il existe des dizaines d'autres formules, mais celle-ci a l'avantage d'être celle qui est utilisée dans les mesures normalisées des laboratoires.

En particulier, la formule de Sabine est utilisée pour mesurer les coefficients d'absorption : on place une surface donnée du matériau à étudier dans une chambre réverbérante et on compare le temps de réverbération mesuré avec la valeur de ce paramètre lorsque la chambre est vide; ensuite, on utilise la formule de Sabine pour calculer le coefficient α du matériau.

Un défaut majeur de la formule est qu'elle ne prend pas en compte la localisation du matériau. La figure suivante montre que la même quantité d'un matériau absorbant, selon comment on la dispose, produit des conditions acoustiques très diverses. Cependant, la formule de Sabine donne dans chaque cas la même valeur...



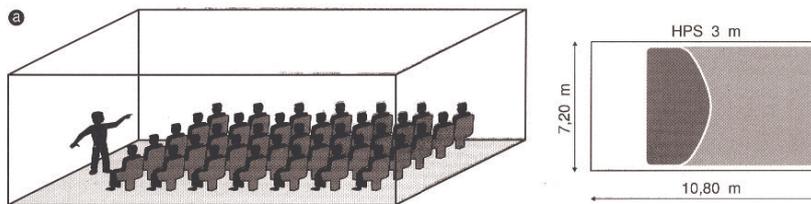
EXEMPLES DE LIEUX AVEC UNE REVERBERATION IMPORTANTE :



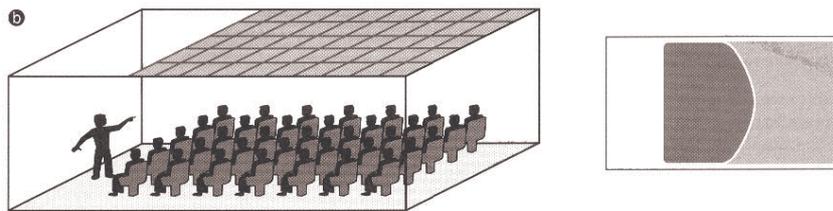
TRAITEMENT ACOUSTIQUE D'UNE SALLE DE COURS

DISTRIBUTION DE L'INTELLIGIBILITE DE LA PAROLE DANS UNE SALLE OCCUPEE, EN FONCTION DE LA DISPOSITION DU TRAITEMENT ACOUSTIQUE

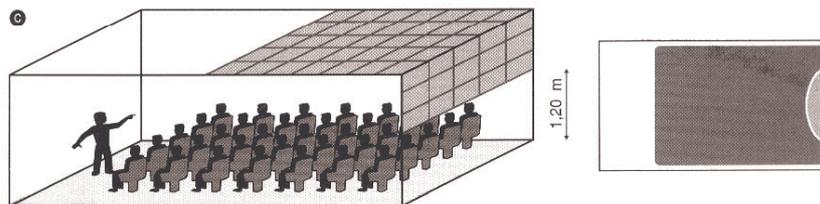
EXCELENTE BUENO REGULAR



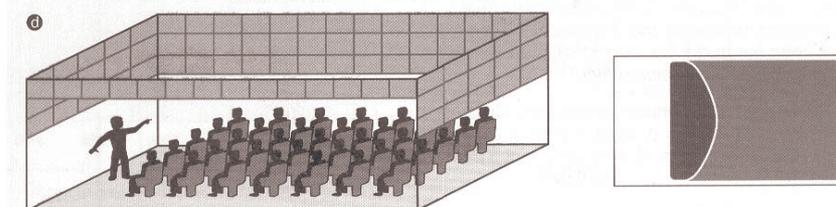
A) AULA SIN MATERIAL ABSORBENTE



B) AULA CON DOS TERCIOS DEL TECHO TRATADO CON UN MATERIAL



C) LA MISMA SUPERFICIE DE ABSORBENTE ESTA REPARTIDA EN EL TECHO Y EN LA PARED DE FONDO, A PARTIR DE UNA ALTURA DE 1.20 MTS



D) LA MISMA CANTIDAD DE ABSORBENTE ESTA REPARTIDO SOBRE LAS PAREDES VERTICALES DISPONIBLES. EL TECHO NO RECIBE TRATAMIENTO

Exercice 7:

Soit un local de 5 x 4 mètres et de 2.50 mètres de haut, dont le plafond a un coefficient d'absorption de 0.4 à 1000 Hz et dont les autres surfaces ont un coefficient de 0.05 à la même fréquence.

¿Quelle est la durée de la réverbération du local à 1000 Hz? ¿Que devient-elle si 15 m² du sol sont occupés par un public présentant un coefficient $\alpha = 0.8$?

8. L'isolation

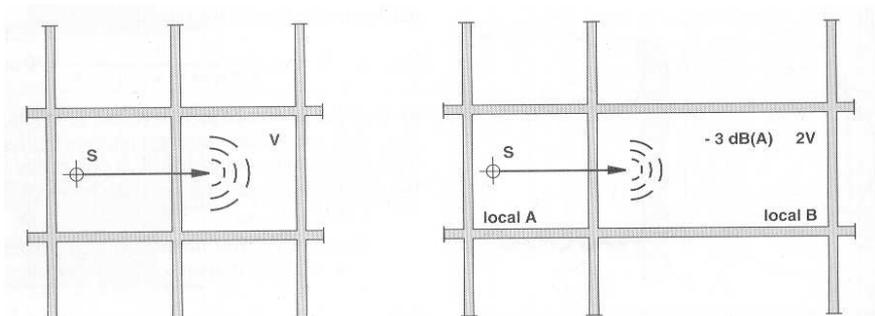
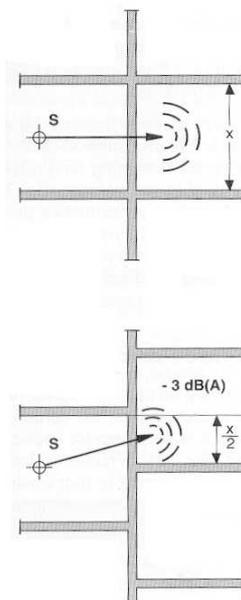
Pour étudier l'isolation acoustique entre deux locaux, il faut considérer, en plus des transmissions directes déjà étudiées (indice R), les transmissions latérales et parasites, et la réverbération dans le local de réception.

a) Les transmissions directes:

La *surface* de la paroi de séparation intervient de manière importante dans l'isolation. Par exemple, si deux locaux sont séparés par une paroi de 10 m², une certaine quantité de son la traverse. Si ces deux locaux étaient séparés par une surface de seulement 5 m², l'énergie qui la traverserait serait deux fois moins importante, et le bruit diminuerait de 3 dB.

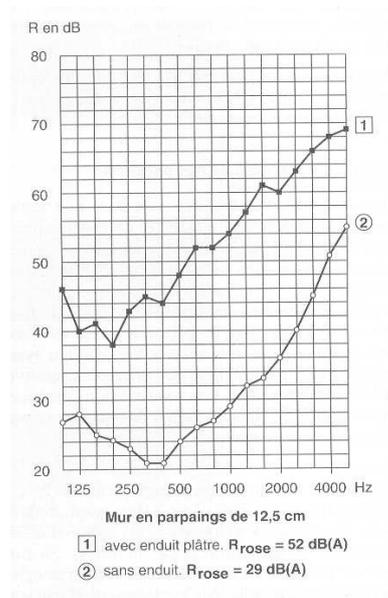
Plus le *volume* du local de réception est important, plus l'énergie acoustique qui traverse la paroi de séparation se "dilue"; donc, moins il y a d'énergie par unité de volume.

L'isolation entre deux locaux est d'autant plus importante que le volume du local de réception est grand. L'isolation croît de 3 dB chaque fois que le volume double : c'est une des raisons pour lesquelles l'isolation n'est généralement pas symétrique. L'isolation d'un local A par rapport à un local B n'est pas la même que l'isolation du local B par rapport au local A.



Un son qui traverse une paroi se réfléchit sur les autres parois de la pièce durant un certain temps. Cette énergie de réverbération s'ajoute à celle qui continue de traverser la paroi, avec un retard de quelques dixièmes de seconde.

Plus les locaux ont de meubles, moquettes, rideaux et autres matériaux absorbants, meilleure est l'isolation, puisque l'énergie qui traverse la paroi est absorbée au lieu de contribuer à la réverbération. Cependant, comme on ne sait généralement pas comment seront meublés les appartements ou les salles de cours, on considère, par convention, une réverbération de 0.5 s.



b) Les transmissions parasites.

Elles sont dues aux canalisations, à des interstices,... ou à des défauts d'exécution, que peuvent produire des pertes très importantes, comme on l'a vu précédemment.

La figure suivante montre un cas semblable à celui de l'exercice 5b: la courbe 2 montre le facteur de réduction d'un mur de parpaings non stuqué, et la courbe 1 montre comment ce facteur peut s'améliorer du seul fait de stuquer la paroi.

c) Les transmissions latérales

Ces transmissions sont souvent plus importantes que les transmissions directes. L'énergie passant par les parois latérales unies à une paroi de séparation lourde est d'autant plus importante que les parois latérales sont légères et rigides.

Ces transmissions sont les plus difficiles à prévoir; elles peuvent causer une chute a de l'isolation variant entre 0 et 10 dB.

On utilise en général la formule $a = 5 + S_r/10 - N$, où:

- S_r est la surface dans le local de réception des parois latérales et rigides (cloisons $\leq 100/\text{kg/m}^2$). On leur assimile les parois doubles présentant vers le local de réception un complexe de renforcement thermique néfaste pour l'isolation acoustique, comme les plaques de plâtre et de polystyrène.

- N est le nombre de parois latérales protégées acoustiquement à leur union avec la paroi de séparation.

- Si les parois latérales et la paroi de séparation sont lourdes (plus de 150 kg/m²) et unies de manière rigide entre elles, a ≈ 5 dB(A).
- Si les parois latérales liées à la paroi de séparation lourde sont légères et rigides (carrelages de plâtre,...), a ≈ 5 + 1.5 n dB(A), où n est le nombre de parois légères de 7 à 10 m² liées à la paroi de séparation.
- Si les parois latérales sont très légères (plaques de plâtre,...), a ≈ 5 à 6 dB(A).

L'exemple suivant montre les limites d'application de la méthode.

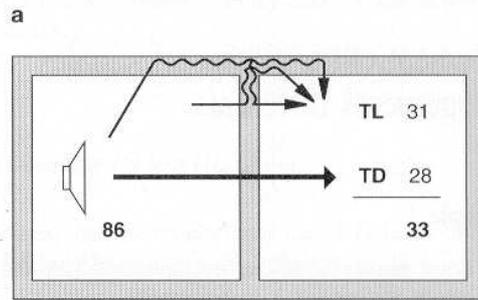
On suppose une structure homogène de béton de 18 cm d'épaisseur. Dans ce cas, le facteur *a* vaut 5 dB(A). Pour simplifier, on suppose un local de réception avec une réverbération de 0.5 secondes et une profondeur de 3 mètres: dans ce cas, comme on le verra par la suite, l'isolation vaut simplement : $D = R - a$.

L'indice *R* d'un mur de béton de 18 cm vaut 58 dB(A). Par conséquent, l'isolation est de 53 dB(A). Ainsi, si le niveau sonore à l'émission est de 86 dB(A) (bruit rose de 80 dB par bande d'octave), le niveau sonore dans le local de réception est de 33 dB(A). En absence de transmissions latérales, il serait de 28 dB(A). Pour connaître l'isolation qui ne prendrait en compte que les transmissions latérales, il faut utiliser la formule:

$D_l = -10 \log (10^{-0.1 D} - 10^{-0.1 D_d})$, où $D = 53$ dB(A) et $D_d = 58$ dB(A). On obtient $D_l = 55$ dB(A). On obtient ainsi les données de la figure (a).

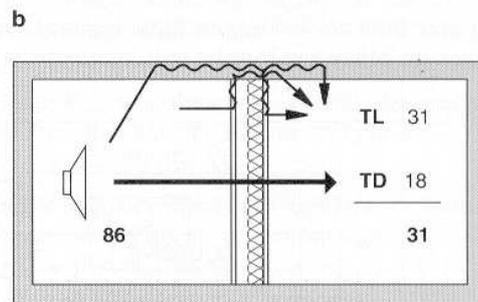
Si on augmente l'efficacité de la paroi de séparation de 10 dB(A) (en employant une paroi simple de béton de 30 cm ou une paroi double avec un indice *R* de 68 dB(A)), on obtient : $D = 68 - 5 = 63$ dB(A). En réalité, l'isolation vaut 55 dB(A), comme l'indique la figure (b), puisque les transmissions latérales ont à peine changé. La méthode simplifiée cause donc une erreur importante de 8 dB(A).

Pour augmenter l'isolation, il faudrait améliorer l'efficacité des parois latérales, comme l'indique la figure (c).



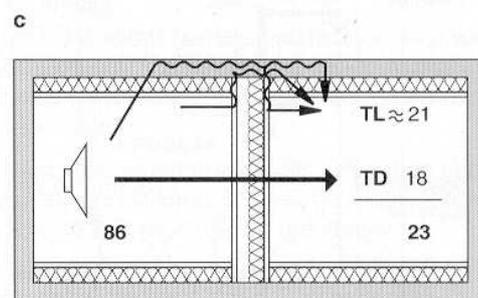
$$R = 58 \text{ dB(A)}$$

$$D_{nAT} = 86 - 33 = 53 \text{ dB(A)}$$



$$R = 68 \text{ dB(A)}$$

$$D_{nAT} = 86 - 31 = 55 \text{ dB(A)}$$



$$R = 68 \text{ dB(A)}$$

$$D_{nAT} = 86 - 23 = 63 \text{ dB(A)}$$

d) L'isolation

L'isolation *brute* D_b se définit comme la différence entre les niveaux sonores dans le local d'émission et le local de réception.

$$D_b = R + 10 \log \frac{V}{S} - 10 \log T - a - 8, \text{ où}$$

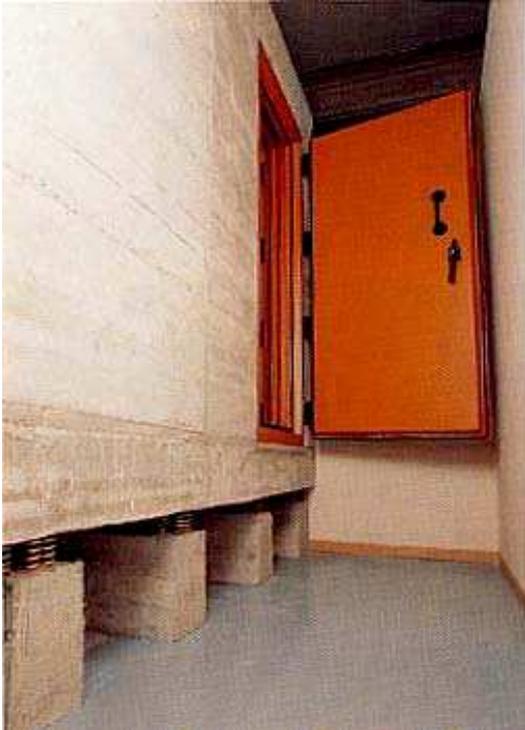
- R est l'indice de réduction acoustique de la paroi de séparation
- V est le volume du local de réception en m^3
- S est la surface de la paroi de séparation
- T est le temps de réverbération dans le local de réception
- a représente les transmissions latérales.

Cette formule est valable si les transmissions directes ne sont pas négligeables par rapport aux transmissions indirectes. La quantité V/S s'interprète comme la profondeur d du local de réception si celui-ci a une forme rectangulaire.

L'isolation *normalisée* est :

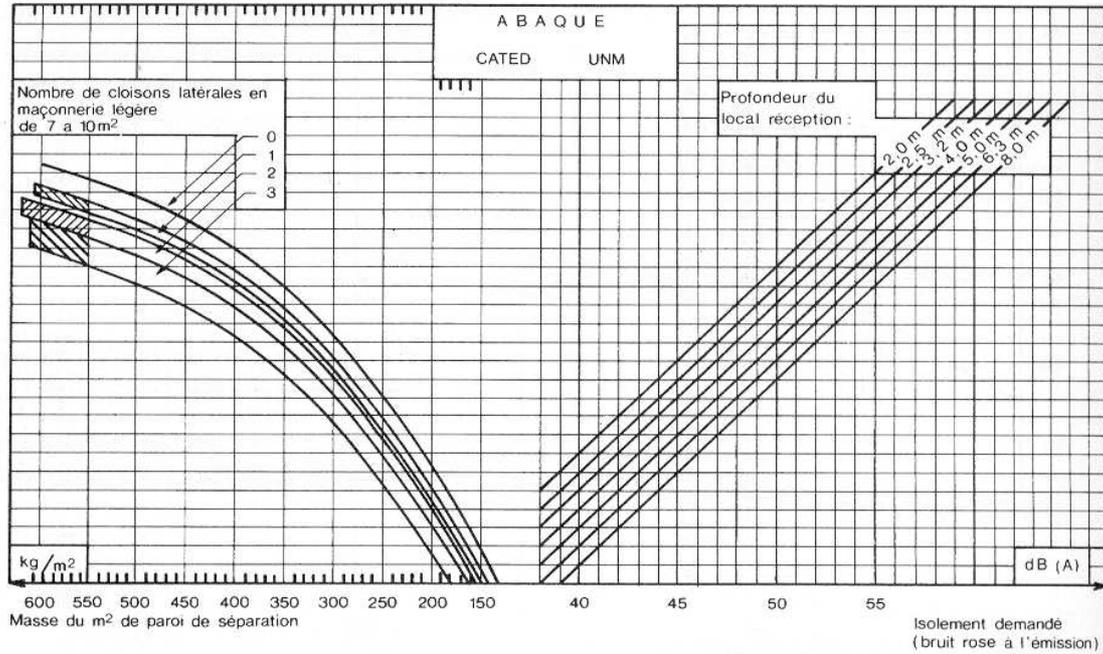
$$D_n = D_b + 10 \log T/0.5$$

EXEMPLES :



e) L'abaque de prévision

Le CATED (France) ha proposé un abaque pour faciliter l'évaluation de l'isolation, pour le cas courant de parois de séparation lourdes avec des cloisons latérales légères et rigides.

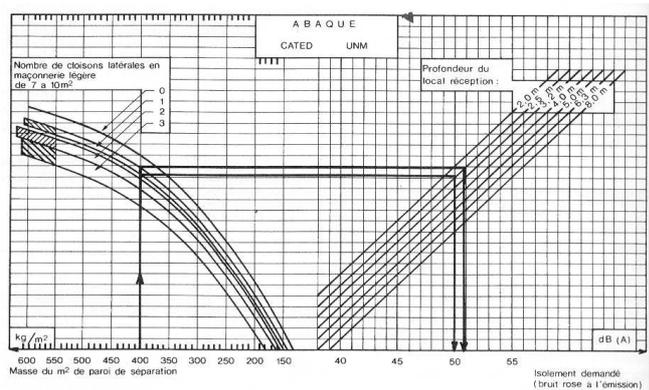


Exemple: on cherche l'isolation normalisée entre deux pièces superposées, séparées par une dalle de 18 cm de béton (2300 kg/m³). Les murs sont en béton de 16 cm. La façade des pièces présente à l'intérieur un complexe d'isolation thermique "polystyrène + plâtre".

Dans ce cas:

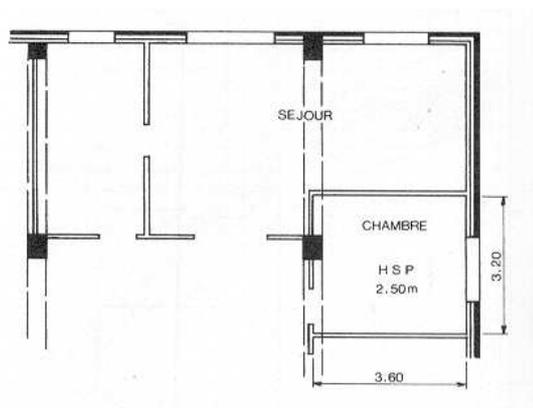
- masse superficielle de la paroi de séparation: $m = 0,18 \times 2300 \approx 400 \text{ kg/m}^2$
- nombre de cloisons: $n = 1$
- profondeur du local: $d = 2,50 \text{ m}$.

L'abaque montre que D_n sera compris entre 50 et 51 dB(A). Les mesures ont donné un résultat de 50 dB(A) pour un cas, et de 52 dB(A) pour un autre cas dans le même bâtiment.



Exercice 8

Deux pièces superposées, de 2.5 mètres de hauteur, avec une dalle de béton de 17 cm d'épaisseur (2300 kg/m^3), parois cloisonnées (y-compris pour la façade, à cause du renforcement thermique), avec une porte de 2 m^2 et une fenêtre de 1.5 m^2 (à retirer de la surface de cloison). L'isolation mesurée est de 46.6 dB(A). Comparer avec l'évaluation de l'abaque.



Références :

- “Auditorium Acoustics and Architectural Design”, M. Barron, ed. E&FN Spon, 1993
- “L’acoustique du bâtiment par l’exemple”, M. Meisser, éd. Le Moniteur, Paris, 1994
- “Réussir l’acoustique d’un bâtiment”, L. Hamayon, éd. Le Moniteur, Paris, 1996

L’illustration de la première page est un dessin de Léonard de Vinci : « théâtre pour entendre la messe », copié de « Architecture et musique », M. Forsyth, éd. Mardaga, 1987.