

Les recherches sur l'acoustique architecturale ont commencé au début du 20<sup>ème</sup> siècle grâce notamment aux travaux du professeur américain Wallace Clément Sabine (1868-1919) de l'université d'Harvard et permettent de mieux comprendre les phénomènes acoustiques dans un espace clos.

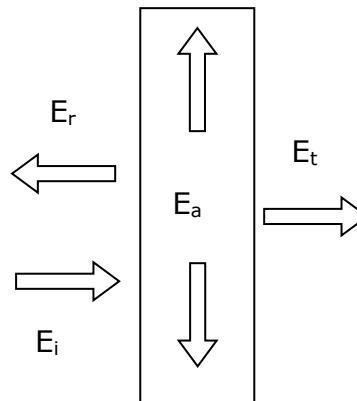
## 1. Propagation des ondes sonores en espace clos

### 1. Onde sonore rencontrant une paroi

Que se passe-t-il quand une onde sonore arrive sur une paroi (mur, fenêtre par exemple) ?

De même que pour les ondes électromagnétiques lors d'un changement de milieu de propagation l'onde incidente est en partie réfléchi, absorbée et transmise.

$E_i$  est l'énergie incidente  
 $E_r$  est l'énergie réfléchi  
 $E_a$  est l'énergie absorbée  
 $E_t$  est l'énergie transmise



La conservation de l'énergie s'écrit :

$$E_i = E_r + E_a + E_t$$

### 2. Coefficient d'absorption $\alpha$

L'absorption d'un matériau est mesurée par son coefficient d'absorption, que l'on note  $\alpha$  :

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i}$$

$\alpha$  un nombre sans unité qui varie de 0 (pour une paroi totalement réfléchissante) à 1 (pour une paroi totalement absorbante) :

$$0 < \alpha < 1$$

Le coefficient d'absorption d'un matériau dépend de la fréquence de l'onde sonore mais aussi de l'angle d'incidence. On donne généralement le coefficient d'absorption en fonction de la fréquence, sans préciser l'angle : cela correspond à un coefficient moyen pour tous

les angles. Le tableau suivant donne les ordres de grandeurs des coefficients d'absorption de quelques matériaux usuels :

|                                         | Fréquence (Hz) |      |      |       |       |       |
|-----------------------------------------|----------------|------|------|-------|-------|-------|
|                                         | 125            | 250  | 500  | 1 000 | 2 000 | 4 000 |
| <b>Fenêtre</b>                          | 0,35           | 0,25 | 0,18 | 0,12  | 0,07  | 0,04  |
| <b>Draperie légère</b>                  | 0,03           | 0,04 | 0,11 | 0,17  | 0,24  | 0,35  |
| <b>Tenture lourde</b>                   | 0,05           | 0,15 | 0,35 | 0,45  | 0,40  | 0,35  |
| <b>Contreplaqué 5 mm à 25 mm du mur</b> | 0,07           | 0,12 | 0,28 | 0,11  | 0,08  | 0,08  |
| <b>Contreplaqué 5 mm à 50 mm du mur</b> | 0,47           | 0,34 | 0,30 | 0,11  | 0,08  | 0,08  |
| <b>Béton</b>                            | 0,32           | 0,25 | 0,22 | 0,20  | 0,19  | 0,20  |
| <b>Plâtre</b>                           | 0,04           | 0,03 | 0,03 | 0,04  | 0,05  | 0,08  |
| <b>Parquet</b>                          | 0,03           | 0,04 | 0,08 | 0,12  | 0,10  | 0,10  |
| <b>Moquette 15 mm sur béton</b>         | 0,20           | 0,25 | 0,31 | 0,36  | 0,52  | 0,73  |
| <b>Laine de verre</b>                   | 0,11           | 0,19 | 0,41 | 0,54  | 0,60  | 0,75  |
| <b>Spectateurs assis</b>                | 0,58           | 0,70 | 0,80 | 0,90  | 0,90  | 0,88  |

### 3. aire d'absorption équivalente A

L'aire d'absorption équivalente A représente la surface d'un matériau parfaitement absorbant qui absorberait la même énergie qu'un matériau de surface S de coefficient d'absorption  $\alpha$  :

$$A = \alpha \cdot S$$

Par exemple, 2m<sup>2</sup> de béton de coefficient d'absorption  $\alpha=0,25$  à 250 Hz possède une aire d'absorption équivalente  $A=0,25 \times 2=0,5$  m<sup>2</sup>. Autrement dit, cette surface de béton se comporte comme une surface de 0,5 m<sup>2</sup> parfaitement absorbante (de coefficient d'absorption  $\alpha = 1$ ).

L'aire d'absorption équivalente d'une salle est définie comme la somme des absorptions des surfaces qui la composent :

$$A = \alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 + \alpha_3 \cdot S_3 + \dots$$

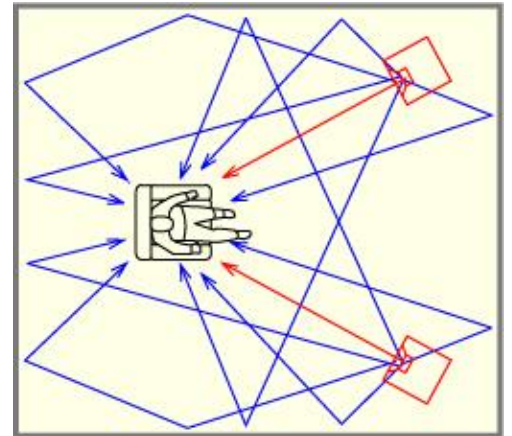
Remarque :

Les matériaux dits « poreux » contiennent une multitude de cavités remplies d'air (tissus, laine de verre ou pores de la peau humaine). Comme ces cavités sont petites, elles interagissent avec les hautes fréquences, en se mettant en vibration, multipliant ainsi les frottements qui absorbent de l'énergie. Ce qui fait que les matériaux poreux absorbent essentiellement les aigus. Par exemple, les cristaux de neige forment un matériau poreux qui absorbe les hautes fréquences et donne un caractère « ouaté » aux sons.

#### 4. Phénomène de réverbération dans un local fermé

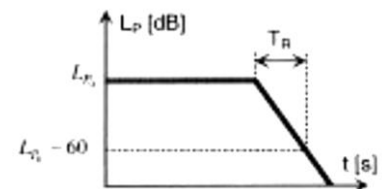
Dans un local fermé, les ondes sonores subissent des réflexions multiples sur les parois. A chaque réflexion, une partie de l'énergie sonore est absorbée. Ces réflexions donnent naissance à des échos. On entend alors un son d'intensité décroissante sur une durée  $T_r$ , c'est le phénomène de réverbération.

Indiquer les flèches correspondant au champ direct et au champ réverbéré.



On appelle durée de réverbération, la durée  $T_r$  au bout de laquelle le niveau sonore a baissé de 60 dB.

La durée de réverbération est d'autant plus longue que :  
les parois sont peu absorbantes.  
les surfaces traitées sont faibles.  
les distances à parcourir entre chaque réflexion sont grandes.



La durée de réverbération est donnée par la formule de Sabine :

$$T_r = \frac{0,16.V}{A}$$

$T_r$  est la durée de réverbération, s'exprime en s.

$V$  est le volume du local en  $m^3$ .

$A$  est l'aire d'absorption équivalente en  $m^2$ .

Cette formule est valable si le coefficient d'absorption moyen de la salle reste inférieur à 0,2. Si la salle est plus absorbante, il est préférable d'utiliser une autre formule, proposée par Eyring en 1930.

#### 5. Rapport Dir/rev

On appelle rapport entre son direct et son réverbéré, en un point de la salle, la différence de niveau entre le son direct et le son réverbéré. On le note Dir/rev en dB :

$$\text{Dir/rev} = N_{\text{direct}} - N_{\text{réverbéré}}$$

On peut montrer que ce rapport s'écrit en fonction de l'aire d'absorption équivalente de la salle  $A$ , de la directivité de la source  $Q$  et de la distance à la source  $r$  :

$$\frac{\text{Dir}}{\text{rev}} = 10 \log \left( \frac{A \cdot Q}{16 \cdot \pi \cdot r^2} \right)$$

Ainsi pour accroître le rapport Dir/rev, il faut soit se rapprocher de la source, soit augmenter l'absorption de la salle, soit augmenter la directivité de la source.

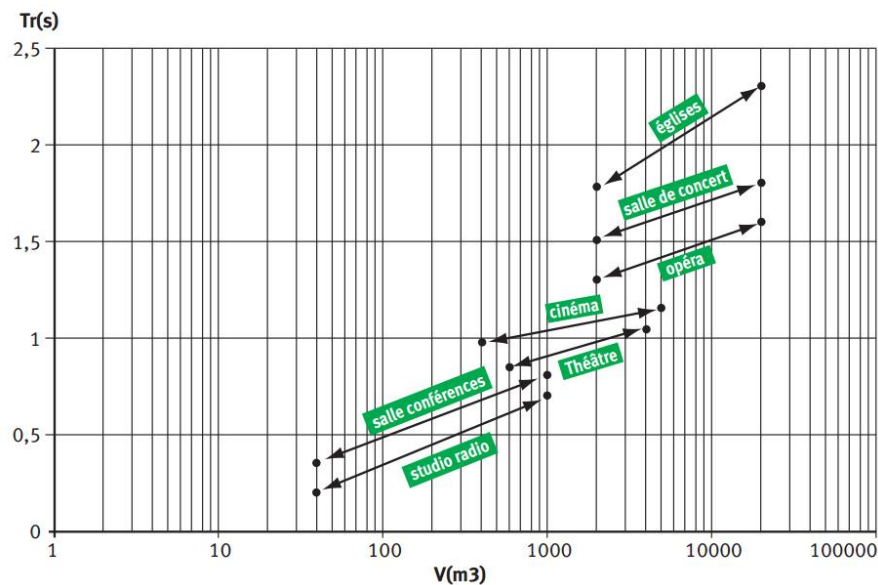
## 2. Critères subjectifs de la qualité d'une salle

Les grandeurs physiques définies précédemment ne sont pas suffisantes pour déterminer la qualité du son perçu dans une salle. Bien évidemment, un niveau sonore suffisant et une isolation correcte sont nécessaires. Il faut ajouter trois critères subjectifs pour décrire la qualité d'une salle : la réverbération subjective, la précision du son et la spatialisation.

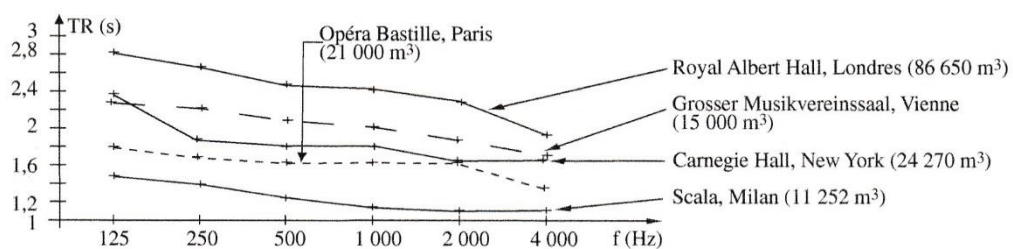
### 1. Sensation de réverbération

#### Temps de réverbération optimal

La sensation de réverbération dépend du temps de réverbération  $T_r$  vu précédemment mais pas uniquement. Il existe un temps de réverbération optimal qui dépend de la salle et aussi du type de sons ou de musiques. Ce  $T_r$  optimal est évalué à partir de tests d'écoute effectués sur des échantillons d'auditeurs.



Ces valeurs ne sont pas à prendre au pied de la lettre et une bonne écoute peut dépendre d'autres critères. Il faut tenir compte du volume de la salle, de l'aire d'absorption équivalente et de la fréquence. Voici les valeurs de  $T_r$  de quelques salles célèbres :



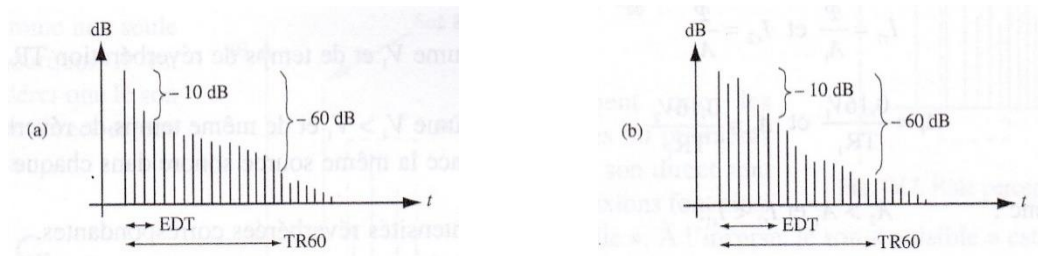
On remarque que lorsque le volume augmente, le  $T_r$  augmente également mais l'absorption peut compenser cet effet.

Le  $T_r$  des basses fréquences est plus important que celui des hautes fréquences, cet effet est souhaité afin de tenir compte du conditionnement auditif du public. En effet, dans une salle quelconque l'absorption par dissipation s'effectue essentiellement pour les plus hautes fréquences.

### Réverbération précoce

Dans la sensation de réverbération, l'énergie réverbérée précoce joue un rôle plus important que la réverbération tardive. Pour évaluer l'effet de la réverbération précoce, on définit un critère appelé Early Decay Time (EDT). Il est défini comme le temps mis par le son réverbéré pour décroître de 10 dB après extinction de la source.

En différents points d'une salle, on peut trouver des décroissances temporelles qui ont les allures suivantes :



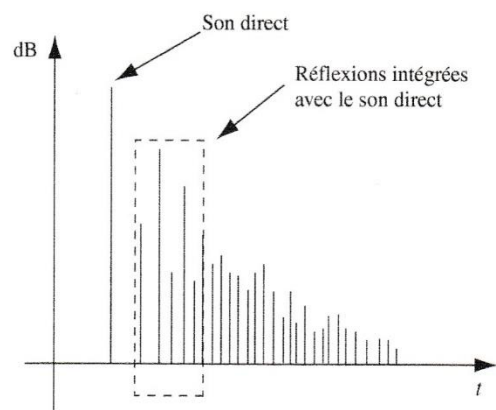
Le temps de réverbération  $T_r$  est le même et ne dépend pas de la position dans la salle. Par contre l'EDT est différent, il est plus court en a) qu'en b), l'énergie précoce ne décroît pas de la même manière. Ainsi, la sensation de réverbération va varier en se déplaçant dans la salle.

### 2. Précision ou clarté du son

On dit qu'une salle possède une bonne clarté si les détails sonores sont bien perçus. La clarté est surtout due au son direct, qui est porteur de l'information utile. A l'inverse, la réverbération agit plutôt comme un « bruit ». On pourrait alors caractériser la clarté par le rapport Dir/rev. Toutefois, en raison de l'inertie du système auditif, une partie des réflexions précoces est perçue avec le son direct, comme une seule entité. C'est pourquoi il est plus pertinent de considérer que le son utile est formé par le son direct et une partie des réflexions précoces.

### Clarté

On considère que le son perçu dans les 80 ms qui suivent le son direct sont intégrées à celui-ci. Le son nuisible est le son perçu au-delà. Pour mesurer la répartition temporelle de l'énergie, on définit alors un critère à partir d'une impulsion émise, appelé Clarté (mesuré en dB) :

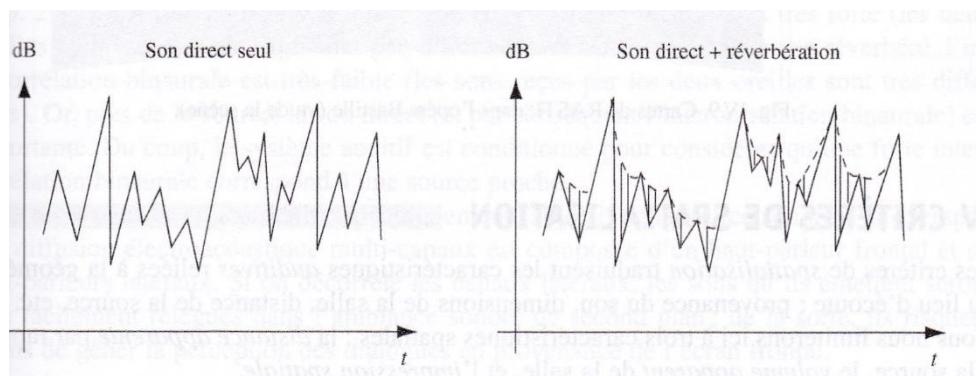


$$C = 10 \log \left( \frac{\text{Energie reçue de 0 à 80 ms}}{\text{Energie reçue après 80 ms}} \right)$$

Par exemple, une clarté de 3 dB signifie que le niveau de l'énergie réverbérée précoce est supérieur de 3 dB à celui de l'énergie réverbérée tardive. Pour que la clarté soit satisfaisante, elle doit être comprise entre -6 et +6 dB. En deçà de -6 dB, la salle est « confuse », et au-delà de +6 dB la salle est trop « sèche ».

## RASTI

Pour exprimer l'intelligibilité de la parole, on utilise le critère RASTI. L'intelligibilité de la parole est d'autant plus importante que les modulations sont bien perçues. Une bonne intelligibilité correspond à un signal où les pics se détachent bien des creux. Or la présence de réverbération masque les creux, ce qui réduit la modulation et l'altère.



Pour mesurer l'indice RASTI, une source émet un signal sinusoïdal de fréquence  $f$  modulé en amplitude. Au point de réception, on enregistre un signal dont la modulation est plus faible. On calcule alors un indice RASTI «  $y$  », qui varie de 0 à 1. Si la modulation au point de réception est la même que la source  $y=1$ . Si la modulation est nulle au point de réception,  $y=0$ . On admet que l'intelligibilité est bonne si  $0,6 < y < 1$ .

### 3. Critères de spatialisation

Ces critères sont liés à la géométrie du lieu d'écoute : distance apparente par rapport à la source, volume apparent de la salle, impression spatiale.

#### Distance apparente

Elle correspond à l'éloignement subjectif de la source. Elle est liée à différents critères.

- Le rapport Dir/rev est important, lorsque la source semble s'éloigner l'énergie directe diminue et l'énergie réverbérée augmente alors Dir/rev diminue. Ainsi, ce rapport est plus important pour une source proche que pour une source éloignée.
- Si le niveau sonore diminue, la distance apparente augmente.
- Si les hautes fréquences diminuent, la distance apparente augmente. En effet, l'atténuation, lorsqu'on s'éloigne de la source, est plus importante pour les hautes fréquences.

- Pour le son direct les deux oreilles reçoivent des sons qui sont peu différents. A l'inverse, pour le son réverbéré les deux oreilles perçoivent des sons bien différents. Ainsi, le système auditif considère que, lorsque les deux oreilles perçoivent des sons assez identiques, la source est proche et inversement.

### Impression spatiale

On dit qu'il y a une bonne impression spatiale dans une salle si l'auditeur a l'impression de baigner dans le son. Dans ce cas, il faut que l'énergie réverbérée arrivant à l'auditeur provienne des côtés de la salle. Pour mesurer le pourcentage d'énergie latérale, on définit le coefficient d'efficacité latérale, noté LE, il se mesure en % :

$$LE(\%) = \frac{\text{énergie réverbérée latérale}}{\text{énergie réverbérée totale}}$$

Le critère LE est d'environ 10% pour une salle de 50 m de largeur et de 40% pour une salle de 15 m de largeur.

### Exemple : l'architecture des théâtres antiques

Extrait du livre « initiation à l'acoustique » Editions Belin.

À la lumière des recherches contemporaines, il est maintenant possible d'expliquer la qualité des théâtres antiques par un certain nombre de facteurs (Fig. IV.12).

Ces théâtres comportent un parterre réfléchissant (en pierre) situé entre les comédiens et les auditeurs, et parfois un mur de fond de scène. Ces surfaces génèrent des réflexions précoces qui renforcent le son direct, ce qui accroît la clarté.

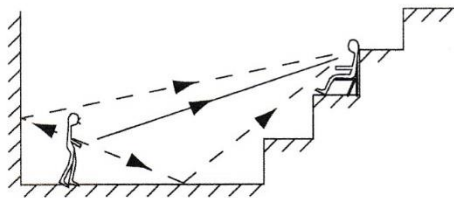


Fig. IV.12. Théâtre antique.

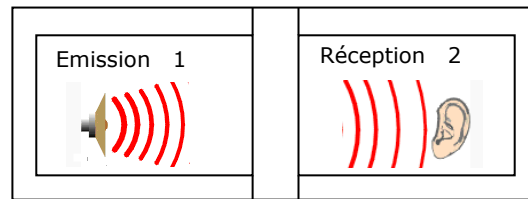
De plus, les auditeurs sont situés contre des gradins en pierre : l'auditeur reçoit alors le son direct, immédiatement suivi d'une réflexion. Dans les basses fréquences, il s'ensuit que ces deux ondes sont en phase, et le niveau sonore est accru (le principe est le même lorsqu'une source est située contre une paroi réfléchissante : cela produit un

renforcement du niveau sonore dans les basses fréquences

De plus, dans les théâtres antiques, il n'y a pas de plafond. Ainsi, les réflexions sont forcément latérales. Le coefficient d'énergie latérale est donc relativement élevé, ce qui produit une forte impression spatiale

### 3. Isolation acoustique des salles couplées

Dans la suite du chapitre, on travaillera dans les conditions suivantes, un local réception est séparé d'un local source par une paroi. On place dans le local source une source de bruit.



Le niveau sonore dans le local réception dépend :  
Des caractéristiques de la paroi de séparation  
Des transmissions latérales  
De la durée de réverbération dans le local réception.

#### 1. Affaiblissement acoustique

On suppose que les niveaux d'intensité acoustique sont  $N_1$  dans le local émission et  $N_2$  dans le local réception. On appelle affaiblissement brut  $D$  la différence de niveau entre les deux locaux :

$$D = N_1 - N_2$$

Pour mesurer l'indice d'affaiblissement brut, on émet un bruit rose dans le local émetteur, puis on mesure les niveaux dans chaque local.

#### 2. Affaiblissement normalisé

Cet affaiblissement tient compte du phénomène de réverbération dans le local de réception.

$$D_n = N_1 - N_2 + 10 \cdot \log\left(\frac{T_r}{0.5}\right)$$

$T_r$  représente la durée de réverbération du local.

0.5 s représente la durée de réverbération d'un local de référence.

Cette normalisation permet de comparer l'isolation de diverses parois même si elles sont placées dans des conditions différentes.

### 3. Coefficient de transmission et indice d'affaiblissement

On considère une paroi qui sépare deux espaces. On suppose que les intensités acoustiques sont  $I_1$  devant la paroi et  $I_2$  derrière la paroi. On appelle  $\tau$  le facteur de transmission d'une paroi définit par :

$$\tau = \frac{I_2}{I_1}$$

Alors l'affaiblissement de la paroi s'écrit :  $R = 10 \cdot \log\left(\frac{I_1}{I_0}\right) - 10 \cdot \log\left(\frac{I_2}{I_0}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{\tau}\right)$

Soit :

$$R = -10 \cdot \log(\tau) \text{ c'est-à-dire } \tau = 10^{-\frac{R}{10}}$$

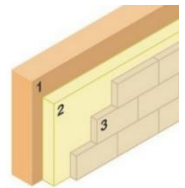
R et D sont proches, cependant R caractérise la paroi alors que D dépend de la paroi mais également des transmissions latérales, de l'absorption dans la salle de réception ainsi que de la réverbération dans ce local.

### 3. Loi de composition des indices pour les parois en série

Pour les parois associées en série, le coefficient de l'ensemble est le produit des coefficients de transmission :

$$\tau_{\text{paroi}} = \prod \tau_i$$

$\tau_i$  désigne le coefficient de transmission de la paroi i.



### 4. Loi de composition des indices pour les parois en parallèles

Pour les parois associées en parallèles, la loi de composition fait intervenir la surface de chacune d'elles :

$$\tau_{\text{total}} = \frac{\sum \tau_i \cdot S_i}{S_{\text{totale}}}$$

$S_i$  désigne la surface de chaque paroi i en m<sup>2</sup>.



## 5. Loi des masses

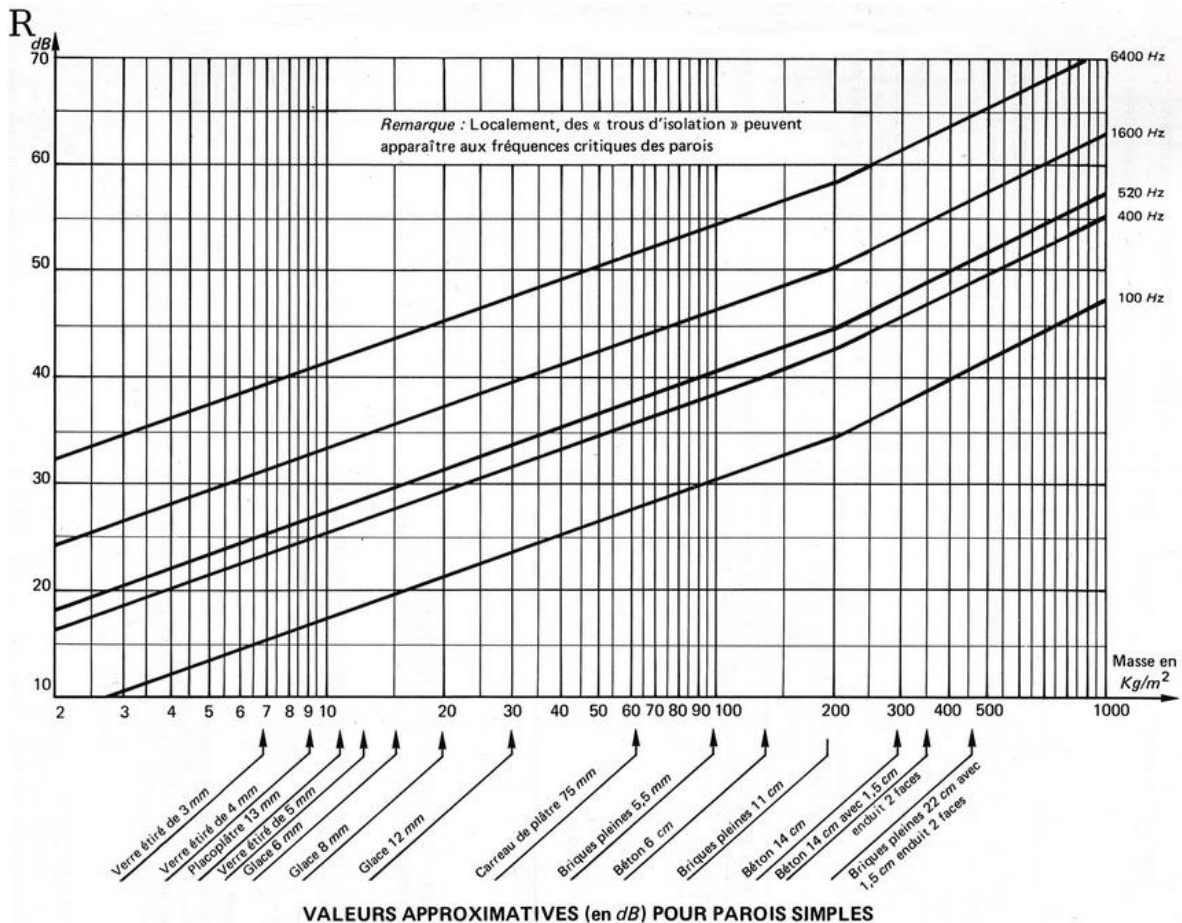
L'affaiblissement est une fonction linéaire croissante du logarithme de la masse surfacique de la paroi. En abscisse, on trouve la masse surfacique définie par la relation :

$$\sigma = \rho \cdot e$$

$\sigma$  la masse surfacique s'exprime en  $\text{kg.m}^{-2}$

$\rho$  la masse volumique s'exprime en  $\text{kg.m}^{-3}$

$e$  l'épaisseur de la paroi en mètre



Plus la paroi est lourde, plus elle aura du mal à vibrer (phénomène d'inertie) donc à transmettre le son au travers de la paroi. Bâtir lourd est donc un moyen sur de s'isoler des bruits.

## 4. loi de fréquence

Le graphique ci-dessus met en évidence que l'affaiblissement acoustique augmente si la fréquence du son augmente.

# Exercices d'applications

## Exercice 1 Effet d'une draperie sur $T_r$

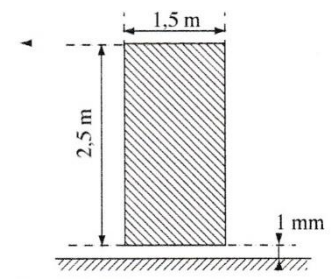
Une salle possède un grand volume de  $750 \text{ m}^3$  et la somme des surfaces internes est de  $550 \text{ m}^2$ . Les murs sont constitués de bois dont le coefficient d'absorption vaut  $\alpha_{\text{bois}}=0,15$ . Un des murs est orné d'une draperie en coton de dimensions  $6 \times 4 \text{ m}^2$ , dont le coefficient d'absorption  $\alpha_d=0,7$ . La draperie est accolée au mur et la paroi située derrière la draperie est constituée du même bois que dans le reste de la salle.

Comme la draperie est très usagée, le propriétaire souhaite l'enlever. Mais auparavant, il veut savoir si cela aura des conséquences sur l'acoustique de la salle.

1. Calculer  $T_r$  en supposant que la draperie est ôtée.
2. Sachant que le seuil relatif de discrimination du  $T_r$  est de l'ordre de 4%, en déduire si l'absence de la draperie modifie la réverbération perçue.

## Exercice 2

Soit une porte de  $1,5 \text{ m}$  de largeur et de  $2,5 \text{ m}$  de hauteur, dont l'indice d'affaiblissement vaut  $R=50 \text{ dB}$ . Supposons qu'il existe une fente de  $1 \text{ mm}$  de hauteur et de  $1,5 \text{ m}$  de largeur sous la porte.



1. Déterminer la surface de la porte  $S_p$  et la surface de la fente  $S_f$ .
2. Que vaut le facteur de transmission de la porte  $\tau_p$  ?
3. Que vaut le facteur de transmission de la fente  $\tau_f$  ?
4. En déduire le coefficient de transmission de l'ensemble  $\tau_{\text{total}}$ .
5. En déduire l'indice d'affaiblissement de l'ensemble  $R_{\text{tot}}$  et le comparer à l'indice d'affaiblissement de la porte seule.

### Exercice 3

Soit une paroi d'indice d'affaiblissement  $R_1=30$  dB. On l'accrole à une seconde paroi d'indice d'affaiblissement  $R_2=45$  dB et de même surface.

1. Déterminer les coefficients de transmission des surfaces,  $\tau_1$  et  $\tau_2$ .
2. Déterminer le coefficient de transmission total.
3. En déduire l'indice d'affaiblissement de la paroi ainsi formée.

#### Remarque

En réalité, l'indice d'affaiblissement total nettement plus faible que la somme des indices d'affaiblissement à cause de la transmission par les supports latéraux.

### Exercice 4

Considérons un mur en béton de  $4 \times 3$  m<sup>2</sup> et de 14 cm d'épaisseur.

1. Quel est son indice d'affaiblissement à 400 Hz ?
2. On perce dans ce mur une porte de dimension  $1 \times 1,5$  m<sup>2</sup> dont l'indice d'affaiblissement est de 30 dB. Que devient l'indice d'affaiblissement de l'ensemble mur + porte ?
3. Calculer l'indice d'affaiblissement de l'ensemble mur + porte dans les deux cas suivants :
  - a. On augmente de 10 dB l'indice d'affaiblissement du mur sans changer celui de la porte.
  - b. On augmente de 10 dB l'indice d'affaiblissement de la porte sans changer celui du mur.

#### Remarque

Lorsque plusieurs passages sont possibles pour le son, il faut traiter en priorité les points faibles, quelles que soient leurs surfaces.