

# ACOUSTIQUE du BÂTIMENT

## 1. Historique

Avant 1900, on ne corrigeait pratiquement pas les mauvaises conditions d'écoute dans les auditoriums, théâtres, écoles,...et autres édifices publics.

Certains remèdes hasardeux (*filets tendus à travers une pièce...*) étaient utilisés, mais les résultats étaient peu satisfaisant.

Vers 1900, après quelques années de recherches méthodiques, le professeur américain Wallace Clément Sabine (1868-1919) de l'université d'Harvard commence la publication de ses découvertes sur l'acoustique architecturale.

Les résultats de ses recherches avec d'autres physiciens permettent de déterminer à l'avance les conditions acoustiques idéales d'un local et les méthodes de calcul pour éliminer les défauts acoustiques.

Aujourd'hui, des décrets (1999) fixent les règles de construction des logements :

- le niveau d'intensité acoustique dans les pièces principales ne doit pas dépasser...

- ...

En espace libre, l'onde sonore effectue le trajet direct source-récepteur.

Dans un lieu clos ou partiellement clos, les parois, les objets...se comportent comme des sources secondaires qui réémettent par réflexion, par diffusion, par diffraction...une partie de l'onde incidente reçue de la source.

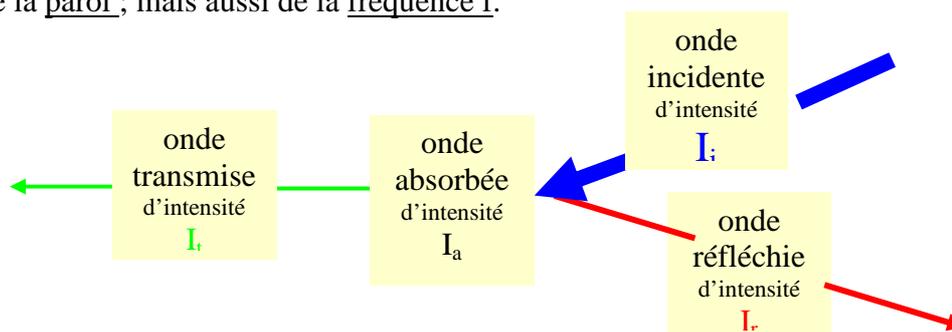
## 2. Une onde sonore (incidente) rencontre une paroi

### 2A Réflexion, absorption, transmission

L'onde incidente provoque la vibration de la paroi de surface *S*.

- une partie est **réfléchie** (**réverbérée**).
- une partie est **absorbée**.
- une partie est **transmise**, générée par la *vibration de la paroi*.

L'importance de la réflexion et de l'absorption de l'onde dépend de la nature, de l'état de surface et du revêtement de la paroi ; mais aussi de la fréquence *f*.



$$t + a + r = 1$$

facteur de transmission + facteur d'absorption + facteur de réflexion = 1

$$t = \frac{I_t}{I_i} ; a = \frac{I_a}{I_i} ; r = \frac{I_r}{I_i}$$

$$I_i (t \cdot I_i) + I_a (a \cdot I_i) + I_r (r \cdot I_i) = I_i$$

$$t = \frac{P_t}{P_i} \quad (P_t = I_t \cdot S) \quad \text{et} \quad r = \frac{P_r}{P_i} \quad (P_r = I_r \cdot S)$$

( $P_i$ ,  $P_t$ ,  $P_a$ ,  $P_r$  représentent les puissances incidente, transmise, absorbée et réfléchie par la paroi)

| f (Hz) | verre (e = 12mm) | rideau léger | laine de verre | matériaux |
|--------|------------------|--------------|----------------|-----------|
| 125    | 0,97             | 0,90         | 0,30           | r         |
| 500    | 0,97             | 0,85         | 0,15           | r         |
| 2000   | 0,98             | 0,80         | 0,10           | r         |

| matériau | très absorbant | absorbant | moyen | réfléchissant | très réfléchissant |
|----------|----------------|-----------|-------|---------------|--------------------|
| a        | ≥0,4           | 0,25      | 0,15  | 0,10          | ≤0,05              |

## 2<sub>B</sub> Coefficient de Sabine (non réverbération)

Coefficient d'« absorption » ou coefficient de Sabine :  $\alpha = a + t$  ; il représente la « non réverbération »

| matériaux                     | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
|-------------------------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| <u>maçonnerie</u>             |        |        |        |         |         |         |
| béton lisse ou peint          | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,02    | 0,05    | 0,07    |
| mur de parpaings non enduits  | 0,02   | 0,02   | 0,03   | 0,04    | 0,05    | 0,07    |
| plâtre                        | 0,01   | 0,01   | 0,02   | 0,03    | 0,04    | 0,05    |
| <u>revêtement de sol</u>      |        |        |        |         |         |         |
| carreau plastique collé       | 0,02   | 0,02   | 0,04   | 0,03    | 0,02    | 0,02    |
| parquet collé                 | 0,04   | 0,04   | 0,07   | 0,07    | 0,07    | 0,07    |
| parquet sur lambourdes        | 0,20   | 0,15   | 0,12   | 0,10    | 0,08    | 0,07    |
| moquette                      | 0,05   | 0,10   | 0,25   | 0,40    | 0,60    | 0,70    |
| moquette sur thibaude         | 0,10   | 0,20   | 0,50   | 0,60    | 0,80    | 0,80    |
| <u>divers</u>                 |        |        |        |         |         |         |
| vitre                         | 0,35   | 0,25   | 0,18   | 0,12    | 0,07    | 0,04    |
| grand panneau de glace simple | 0,18   | 0,06   | 0,04   | 0,03    | 0,02    | 0,02    |
| rideau coton                  | 0,10   | 0,20   | 0,40   | 0,50    | 0,65    | 0,62    |
| eau d'une piscine             | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,015   | 0,025   |         |

## 2<sub>C</sub> Ne pas confondre isolation et absorption

Un bon isolant (**t petit**) n'est pas forcément un bon absorbant ( $\alpha$  grand), car l'absorption se fait souvent au détriment de la réflexion.

|                              |          |          |               |
|------------------------------|----------|----------|---------------|
| bon isolant peu absorbant    | r = 0,79 | a = 0,20 | t = $10^{-7}$ |
| peu isolant bon absorbant    | r = 0,3  | a = 0,50 | t = 0,2       |
| bon isolant et bon absorbant | r = 0,49 | a = 0,50 | t = $10^{-7}$ |

Exemples :

- une fenêtre ouverte est le meilleur absorbant imaginable ( $\alpha=1$ ), or c'est aussi le plus mauvais isolant.
- un plafond suspendu, constitué de dalles acoustiques, absorbe une grande partie des sons émis dans le local ; par contre, il n'atténue les bruits aériens ou d'impact émis à l'étage supérieur que s'il est lourd et étanche (ce qui n'est pas le cas pour les dalles acoustiques qui sont uniquement des produits de correction acoustique).

### Exercice 1 :

Une paroi a un coefficient de réflexion de 60% ( $r = 0,6$ ) et un coefficient d'absorption de 30% ( $a = 0,3$ ). Le niveau d'intensité  $N_i$  sonore incident est égal à 70 dB.

1) Calculer le coefficient de transmission  $t$ .

2) Calculer les niveaux d'intensité sonores des sons réfléchis et transmis de deux façons :

a- Calculer les intensités réfléchies et transmises,  $I_r$  et  $I_t$ , puis en déduire les niveaux sonores  $N_r$  et  $N_t$ .

b- Exprimer littéralement, puis calculer les niveaux demandés  $N_r$  (et  $N_t$ ) en fonction de  $N_i$ , de  $r$  (ou  $t$ ).

3) Pour vérifier ces résultats, calculer le « niveau d'absorption »  $N_a$  et en recherchant le niveau total des trois niveaux  $N_r$ ,  $N_t$  et  $N_a$ , vous retrouverez  $N_i$  ?

Exercice 2 :

Une paroi reçoit un son de niveau sonore égal à 80 dB et réfléchit un son de niveau sonore égal à 70 dB.

1) Calculer le coefficient de réflexion de la paroi ?

Montrer qu'il est égal à  $r = 10^{0,1 \cdot \Delta N}$ , en précisant ce que représente  $\Delta N$ .

Il se perd dans la paroi 99,9% de l'intensité sonore qui a pénétré dans cette paroi.

2) Quel est le **facteur de transmission** de cette paroi ?

3) En déduire le niveau d'intensité sonore du son qui ressort de l'autre côté de la paroi ?

4) Quels commentaires vous inspirent les résultats des exercices 1 et 2 ?

**3. Aire d'absorption équivalente A****Aire d'absorption équivalente : A (m<sup>2</sup>)**

Pour une fréquence donnée  $f$ , 1 m<sup>2</sup> d'un matériau de coefficient d'« absorption »  $\alpha$  a la même absorption que  $\alpha$  m<sup>2</sup> d'un matériau parfaitement absorbant ( $\alpha = 1$ ).

*Exemple :* à  $f = 1000$  Hz, 1 m<sup>2</sup> d'un matériau de coefficient d'absorption  $\alpha = 0,8$  absorbe la même quantité d'énergie qu'un matériau parfaitement absorbant ( $\alpha = 1$ ) dont la surface est égale à 0,8 m<sup>2</sup>.

**Son aire d'absorption équivalente est  $A = 0,8$  m<sup>2</sup>**

Pour une surface  $S$  de ce matériau,  $A = \alpha \cdot S$

**3<sub>A</sub> Aire d'absorption équivalente d'un local :** on calcule **A**

$$A = \sum_{j=1}^m \alpha_j \cdot S_j$$

$S_j$  : surface des matériaux, meubles, occupants

$\alpha_j$  : coefficient d'« absorption » des matériaux, meubles, occupants

**A est la valeur de l'aire d'une paroi parfaitement absorbante ( $\alpha = 1$ ) ayant la même absorption que les divers matériaux, meubles, occupants considérés.**

**3<sub>B</sub> Aire d'absorption équivalente pour les meubles et occupants :** on donne **A**

| description                           | aire d'absorption équivalente $A_k$ (m <sup>2</sup> ) |        |        |         |         |         |
|---------------------------------------|---|--------|--------|---------|---------|---------|
|                                       | 125 Hz  | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
| personne assise                       | 0,20  | 0,36   | 0,45   | 0,50    | 0,50    | 0,46    |
| fauteuil recouvert de tissu plastique | 0,15  | 0,40   | 0,40   | 0,40    | 0,30    | 0,25    |
| fauteuil recouvert de velours         | 0,15  | 0,20   | 0,30   | 0,40    | 0,50    | 0,60    |

**3<sub>C</sub> Aire d'absorption équivalente :** bilan

$$A = \sum_{j=1}^m \alpha_j \cdot S_j + \sum_{k=1}^n A_k$$

Exercice 3 :

On désire calculer l'aire d'absorption équivalente  $A$  d'une pièce.

Elle possède les dimensions suivantes :  $L = 6,0$  m ;  $\ell = 5,0$  m ;  $h = 3,0$  m.

Elle comporte une baie vitrée de surface 10 m<sup>2</sup> et deux portes de surface 2 m<sup>2</sup> chacune.

Les sons émis sont étudiés à la fréquence de 1000 Hz.

Les coefficients d'absorption des matériaux revêtant les surfaces de cette pièce à la fréquence de 1000 Hz sont :

| revêtement | porte isophane | baie vitrée | mur de béton | plancher parquet | plafond en plâtre |
|------------|----------------|-------------|--------------|------------------|-------------------|
| $\alpha$   | 0,09           | 0,12        | 0,03         | 0,07             | 0,04              |

Dans la pièce il y a trois fauteuils en velours et trois personnes assises.

Calculer  $A$ .

## 4. CORRECTION ACOUSTIQUE

C'est l'ensemble des procédés mis en œuvre pour obtenir une qualité acoustique déterminée :

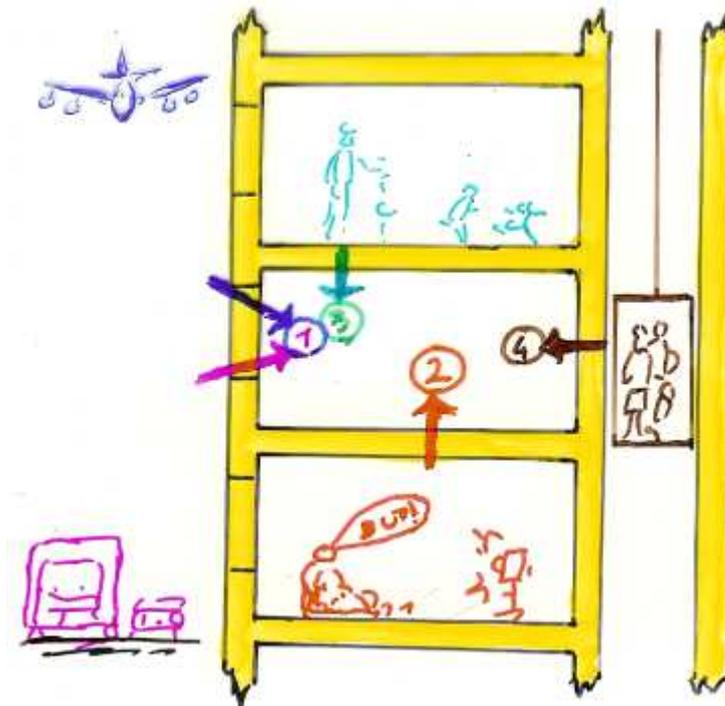
- qualité d'écoute dans une salle de spectacle, de conférence, d'enseignement...
- diminuer le niveau sonore dans un hall d'entrée, atelier, bureau...
- créer une acoustique spécifique dans une salle de sport, restaurant...

Les qualités acoustiques d'une salle sont fonction de sa forme (*architecture, reliefs, moulures permettant une bonne diffusion du son*), de son volume (*écho important dans les grandes salles*) et de la nature de ses parois.

Forme et volume sont généralement donnés, c'est sur les caractéristiques de réflexion ou d'absorption des matériaux qui constituent les parois que l'on peut doser l'intensité sonore perçue et l'adapter à l'utilisation de la salle.

### 1. acoustique des salles (*problème de réverbération*)

### 2. isolation aux bruits



1. bruit aérien extérieur : *trafic routier, ferroviaire, aérien...*

2. bruit aérien intérieur : *conversation, télévision, hifi...*

3. bruit d'impact (choc) : *déplacement des personnes, chute d'objets, fermetures des portes...*

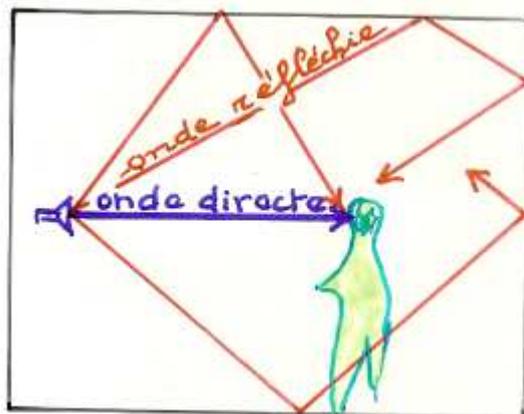
4. bruit d'équipement : *ascenseur, robinetterie, ventilation mécanique installation chauffage, conditionnement d'air...*

## 5. Réverbération

### 5A Mise en évidence

Si on émet un son bref (claquement des mains...) dans un local vide aux parois lisses et réfléchissantes, on constate que ce son persiste quelques secondes tout en décroissant régulièrement avant de devenir inaudible, après avoir subi de nombreuses réflexions.

Si les parois réfléchissaient toute l'énergie perçue et si l'air transmettait sans affaiblissement l'onde sonore, le temps de réverbération serait infini. Cette durée de réverbération croît avec le volume du local, diminue lorsque la valeur d'absorption des surfaces du local augmente ainsi que celle du mobilier.



### 5B Conséquences de la réverbération

#### écho et intelligibilité de la parole

En moyenne, l'oreille humaine enregistre deux sons distincts lorsqu'ils lui arrivent séparés par un temps supérieur à 0,05 s.

Si la différence de temps entre la perception de l'onde sonore directe et l'onde sonore réfléchie est supérieure à 0,05 s, le phénomène d'écho se produit et il y aura superposition des syllabes et difficulté de compréhension dans le cas de la parole.

Dans une pièce où le temps de réverbération est long, le premier mot d'une phrase continue à résonner dans la pièce alors que l'orateur prononce les suivants, ce qui nuit à la compréhension de la parole.

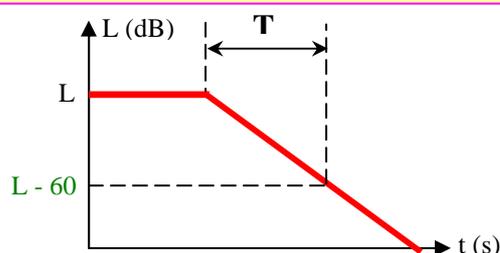
Exercice 4 :

En utilisant la relation  $N = 10 \log \frac{I}{I_0}$ , montrer que le niveau sonore  $N$  d'un son, chute de 60 dB, quand l'intensité sonore  $I$  de ce son devient  $10^6$  fois plus petite ?

### 5C Durée de réverbération $T$ (s)

Temps mis par un son pour que son intensité sonore soit divisée par  $10^6$  ou que son niveau d'intensité sonore soit abaissé de 60 dB. après que la source ait cessé d'émettre.

(il varie avec la fréquence, il est donc mesuré par bande d'octave ou par tiers d'octave)



Local sonore (réverbérant) : le temps de réverbération est relativement important.

(local vide à parois lisses, l'absorption du bruit par les parois est faible)

Local sourd (muet) : le temps de réverbération est faible.

(local possédant des parois aussi absorbantes que possible : moquette, des rideaux, du tissu mural... et du mobilier)

#### Exemples :

- Cathédrale :  $T > 6$  s

- Salle Pleyel\* à Paris :  $T = 3$  s à 125 Hz ; 2,2 s à 1000 Hz ; 1,7 s à 4000 Hz.

\* les matériaux n'absorbent pas de la même manière, selon la fréquence.

- Bowling :  $T = 1,3$  s (à 1000 Hz).

- Préau d'école :  $T = 1,5$  s à toute fréquence.

- Logement normalement meublé :  $T = 0,5$  s à toute fréquence.

### 5<sub>D</sub> Formule de Sabine

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

V : volume de la pièce (m<sup>3</sup>)

A : aire d'absorption équivalente de la pièce (m<sup>2</sup>)

T : temps de réverbération (s)

0,16 : coefficient numérique (s.m<sup>-1</sup>)

$$A = \sum_{j=1}^m \alpha_j \cdot S_j + \sum_{k=1}^n A_k$$

Formule valable

pour  $V \leq 100 \text{ m}^3$

Formule tolérée

jusqu'à  $V = 1000 \text{ m}^3$

**Conversation agréable :  $T < 0,5 \text{ s}$**

A : Souvent mal connue, le calcul de T qui en résulte est peu fiable.

Il est donc préférable de mesurer T plutôt que de le calculer.

#### Exercice 5 :

On donne pour une pièce rectangulaire, L = 6 m ; ℓ = 3 m et h = 2 m :

| matériau | surface S (m <sup>2</sup> ) | α (pour f = 1000 Hz)        |
|----------|-----------------------------|-----------------------------|
| mur      | ...                         | 0,03                        |
| sol      | ...                         | 0,04                        |
| plafond  | ...                         | 0,03 = α <sub>plafond</sub> |
| fenêtre  | 6                           | 0,12                        |
| porte    | 2,94                        | 0,90                        |

1) Calculer l'aire d'absorption équivalente A de cette pièce fenêtre fermée.

2) En déduire son temps de réverbération T.

On veut ramener ce temps de réverbération...*trop grand*... à T' = 0,5 s, en collant un matériau de coefficient d'absorption α' sur tout le plafond de la pièce.

3) a- Déterminer la nouvelle aire d'absorption A' de la pièce fenêtre fermée.

b- Calculer α'.

Montrer que l'expression littérale donnant le coefficient d'absorption α' <sub>plafond</sub> du nouveau revêtement du plafond en fonction de A, A', S<sub>plafond</sub> et α<sub>plafond</sub> est :

$$\alpha' = \alpha_{\text{plafond}} + \frac{A' - A}{S_{\text{plafond}}}$$

$$A' = A + (\alpha' - \alpha_{pl}) \cdot S_{pl}$$

..Recalculer α'.

c- Lorsqu'on ouvre la fenêtre, que fait la valeur de T' ?

Calculer la nouvelle valeur du temps de réverbération T''.

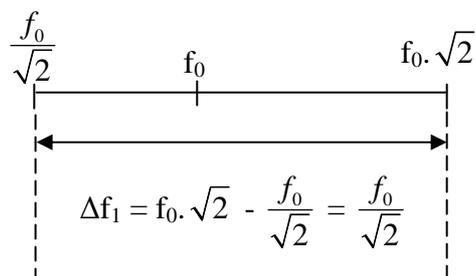
d- Calculer le temps de réverbération T''' , fenêtre et porte ouvertes.

### ••5E Coefficient d'absorption moyen

Quand dans un local on a plusieurs bandes d'octave, et que le coefficient d'absorption  $\alpha$  est différent pour chaque bande, il faut trouver le **coefficient d'absorption moyen** pour choisir le bon matériau.

(c'est un peu difficile !)

Rappel : bande d'octave centrée sur  $f_0$ .



Bande d'octave suivante centrée sur  $2f_0$

$$\Delta f_2 = 2 \cdot \Delta f_1$$

Bande d'octave suivante centrée sur  $4f_0$  :  $\Delta f_3 = 2 \cdot \Delta f_2 = 2^2 \cdot \Delta f_1$

...etc :  $\Delta f_n = 2^{n-1} \cdot \Delta f_1$

Soit l'intensité  $I$  pour chaque fréquence.

1) Calcul des intensités incidente et absorbée :

a- pour une largeur de bande  $\Delta f$

Intensité incidente

$$I_{\Delta f} = I \cdot \Delta f$$

Intensité absorbée

$$I_{a \Delta f} = \alpha_i \cdot I_{\Delta f} = \alpha_i \cdot I \cdot \Delta f$$

$\alpha_i$  : coefficient d'absorption pour chaque bande

$$I_1 = I \cdot \Delta f_1 \text{ (octave 1)}$$

$$I_2 = I \cdot \Delta f_2 = 2 \cdot I \cdot \Delta f_1 \text{ (octave 2)}$$

$$I_3 = I \cdot \Delta f_3 = 2^2 \cdot I \cdot \Delta f_1 \text{ (octave 3)}$$

$$I_n = I \cdot \Delta f_n = 2^{n-1} \cdot I \cdot \Delta f_1 \text{ (octave n)}$$

$$\text{(octave 1) } I_{a1} = \alpha_1 \cdot I \cdot \Delta f_1$$

$$\text{(octave 2) } I_{a2} = \alpha_2 \cdot I \cdot \Delta f_2 = 2 \cdot \alpha_2 \cdot I \cdot \Delta f_1$$

$$\text{(octave 3) } I_{a3} = \alpha_3 \cdot I \cdot \Delta f_3 = 2^2 \cdot \alpha_3 \cdot I \cdot \Delta f_1$$

$$\text{(octave n) } I_{an} = \alpha_n \cdot I \cdot \Delta f_n = 2^{n-1} \cdot \alpha_n \cdot I \cdot \Delta f_1$$

b- pour les 6 bandes d'octave

Intensité incidente

$$I_i = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

$$I_i = \sum_{i=1}^{n=6} I \cdot \Delta f_i$$

$$I_i = (1 + 2 + 2^2 + \dots + 2^{n-1}) \cdot I \cdot \frac{f_0}{\sqrt{2}}$$

Intensité absorbée

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + \dots + I_{an}$$

$$I_a = \sum_{i=1}^{n=6} \alpha_i \cdot I \cdot \Delta f_i$$

$$I_a = (\alpha_1 + 2 \cdot \alpha_2 + 2^2 \cdot \alpha_3 + \dots + 2^{n-1} \cdot \alpha_n) \cdot I \cdot \frac{f_0}{\sqrt{2}}$$

2) Calcul du coefficient d'absorption moyen

$$\alpha_{\text{moyen}} = \frac{I_a}{I_i} = \frac{\alpha_1 + 2 \cdot \alpha_2 + 2^2 \cdot \alpha_3 + \dots + 2^{n-1} \cdot \alpha_n}{1 + 2 + 2^2 + \dots + 2^{n-1}} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot 2^{i-1}}{\sum_{i=1}^n 2^{i-1}} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \Delta f_i}{\sum_{i=1}^n \Delta f_i} = \alpha_{\text{moyen}}$$

### •••Exercice 6:

Calculer le coefficient d'absorption moyen.

|                        |       |        |        |        |         |         |
|------------------------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|
| fréquence médiane (Hz) | 125   | 250    | 500    | 1000   | 2000    | 4000    |
| $\Delta f$             | 88,39 | 176,78 | 353,55 | 707,11 | 1414,21 | 2828,43 |
| $\alpha$               | 0,43  | 0,45   | 0,44   | 0,38   | 0,39    | 0,34    |

## 5F Remarques

1- Le temps de réverbération varie avec la fréquence, c'est un point important car une salle peut privilégier certaines fréquences (coloration) les unes par rapport aux autres.

2- Si pour la parole un temps de réverbération T faible est nécessaire pour une conversation agréable, il peut en être tout autrement pour la musique :

*Par exemple écouter de l'orgue, ou un orchestre symphonique, dans une pièce à faible T déforme l'impression de l'auditeur (manque de volume), la réverbération n'est donc plus une gêne.*

### 3- Matériaux utilisés en traitement acoustique :

- Matériaux à porosité ouverte : ils sont constitués de cellules d'air communiquant entre elles et entourées d'un matériau tel que laine minérale, fibres de bois, tissus...

Les sons de fréquences élevées pénètrent dans le matériau et sont dissipés par frottement.

- Panneaux réfléchissants : ce sont des membranes (plaques) généralement minces et entrant en vibration sous l'effet de l'énergie de l'onde incidente.

A la fréquence de résonance de la membrane l'absorption est maximale.

- Résonateurs : ils sont réalisés à l'aide de plaques perforées placées contre un mur avec un vide rempli en général de fibres minérales.

A la fréquence de résonance l'absorption est maximale.

- En général les matériaux utilisés sont une combinaison de 2 ou 3 types :

- rideau épais : matériaux poreux et diaphragmes.

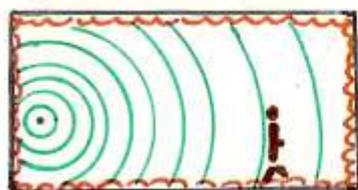
- plaque perforée avec laine de verre : elle travaille selon les 3 types.

## 6. Champ acoustique direct et Champ acoustique réverbéré

### 6A Mise en évidence

Alors que le niveau diminue quand on s'éloigne d'une source sonore dans un espace libre ou une pièce sourde (traitée acoustiquement de manière efficace), le niveau à partir d'une certaine distance ne diminue plus dans une pièce réverbérante, la diminution du niveau direct étant compensée par la réverbération.

pièce sourde



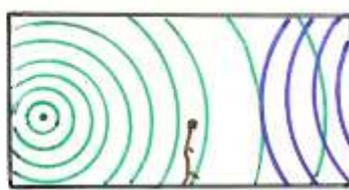
**Champ acoustique direct**

$$I_D = \frac{P_a}{\Omega \cdot R^2}$$

Intensité du champ direct  
à la distance R de la source.

( $\Omega$  : angle solide dans lequel la source de puissance sonore  $P_a$  rayonne uniformément l'énergie acoustique)

pièce réverbérante



**Champ acoustique réverbéré**

$$I_R = \frac{4P_a}{A}$$

Intensité du champ réverbéré

en tout point de la pièce.

(A : aire d'absorption équivalente de la pièce)

En réalité  $I_R = \frac{4P_a}{X}$

X est une constante de la pièce

$$X = \frac{S \cdot \alpha}{1 - \alpha} = \frac{S \cdot A}{S - A}$$

$$(S = \sum S_i ; A = \sum \alpha_i \cdot S_i)$$

( $\alpha$  : coefficient d'absorption moyen)

## 6<sub>B</sub> Directivité d'une source

La directivité d'une source sonore :

Elle est caractérisée par un nombre sans dimension Q qui est le rapport de l'énergie transmise dans la direction considérée à l'énergie qui serait transmise par une source omnidirectionnelle de même puissance  $P_a$ .

$$\Omega = \frac{4\pi}{Q}$$

|       |   |
|-------|---|
| Q = 1 | tout l'espace ( <i>sphère complète</i> )        |
| Q = 2 | demi-espace ( <i>demi-sphère</i> )              |
| Q = 4 | quart d'espace ( <i>quart de sphère</i> )       |
| Q = 8 | huitième d'espace ( <i>huitième de sphère</i> ) |

## 6<sub>C</sub> Niveaux

### 6<sub>C1</sub> niveau direct et niveau réverbéré

La source sonore a un niveau de puissance  $N_w$

#### Niveau sonore du champ direct

$$N_D = 10 \log \frac{I_D}{I_0} = 10 \log \frac{\frac{P_a}{\Omega R^2}}{I_0} = 10 \log \left( \frac{P_a}{P_0} \cdot \frac{1}{\Omega R^2} \right)$$

$$N_D = 10 \log \frac{P_a}{P_0} + 10 \log \frac{1}{\Omega R^2} = N_w + 10 \log \frac{Q}{4\pi R^2}$$

$$N_D = N_w + 10 \log \frac{Q}{4\pi R^2}$$

#### Niveau sonore du champ réverbéré

$$N_R = 10 \log \frac{I_R}{I_0} = 10 \log \frac{\frac{4P_a}{A}}{I_0} = 10 \log \left( \frac{P_a}{P_0} \cdot \frac{4}{A} \right)$$

$$N_R = 10 \log \frac{P_a}{P_0} + 10 \log \frac{4}{A} = N_w + 10 \log 4 - 10 \log A$$

$$N_R = N_w + 6 - 10 \log A$$

### 6<sub>C2</sub> niveau global (direct et réverbéré)

#### Champ direct et Champ réverbéré

$$I = I_D + I_R = I$$

$$N = 10 \log \frac{I_D + I_R}{I_0} = N$$

$$10 \log \frac{\frac{P_a}{\Omega R^2} + \frac{4P_a}{A}}{I_0} = 10 \log \frac{P_a \left( \frac{Q}{4\pi R^2} + \frac{4}{A} \right)}{P_0} = 10 \log \left( \frac{P_a}{P_0} \cdot \left( \frac{Q}{4\pi R^2} + \frac{4}{A} \right) \right) = 10 \log \frac{P_a}{P_0} + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi R^2} + \frac{4}{A} \right)$$

**6c3 bilan**Champ direct

$$I_D = \frac{P_a}{\Omega \cdot R^2} \quad N_D = N_w + 10 \log \frac{Q}{4\pi R^2}$$

Champ réverbéré

$$I_R = \frac{4P_a}{A} \quad N_R = N_w + 6 - 10 \log A$$

Champ direct et champ réverbéré

$$I = I_D + I_R$$

$$N = N_w + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi R^2} + \frac{4}{A} \right)$$

$N_w$  : niveau de puissance de la source

$A$  : aire d'absorption équivalente du local

$R$  : distance à la source

$Q$  : directivité de la source

**6c4 direct ou réverbéré ?**

Qui ?

- Si  $R$  est grand  $\frac{Q}{4\pi R^2}$  peut être négligé devant  $\frac{4}{A}$ , on ne tient compte que du champ réverbéré :

$$N = N_w + 10 \log \frac{4}{A} = N_w + 6 - 10 \log A.$$

- Si on se place près de la source  $\frac{4}{A}$  peut être négligé devant  $\frac{Q}{4\pi R^2}$ , on ne tient compte que du champ

direct :  $N = N_w + 10 \log \frac{Q}{4\pi R^2}$

- (• Si  $Q = 1$ , source omnidirectionnelle,  $N = N_w + 10 \log \frac{1}{4\pi} + 10 \log \frac{1}{R^2}$ )

$$N = N_w - 11 - 20 \log R)$$

Exercice 7 :

Une source sonore de puissance  $P_a = 10^{-1}$  W, est placée dans une pièce dont l'aire d'absorption  $A$  est égale à  $800 \text{ m}^2$ .

Cette source émet uniformément dans tout l'espace.

On considère le champ direct et le champ réverbéré émis par cette source.

- 1) A quelle distance de la source a-t-on  $I_D = I_R$  ?

Calculer à cette distance l'intensité sonore totale et le niveau d'intensité sonore correspondant.

- 2) Calculer en un point situé à 12,6 m de la source sonore :

a- le niveau d'intensité sonore direct.

b- le niveau d'intensité sonore réverbéré.

c- le niveau d'intensité sonore total.

d- est-il acceptable, pour le calcul du niveau d'intensité sonore total de négliger le champ direct pour  $R \geq 12,6 \text{ m}$  ?

## 7. Isolement acoustique

### 7A Coefficient de transmission $t$

Il concerne la propagation des ondes sonores entre deux ambiances séparées par une paroi.

L'isolement acoustique est la diminution de l'intensité acoustique entre les deux ambiances.

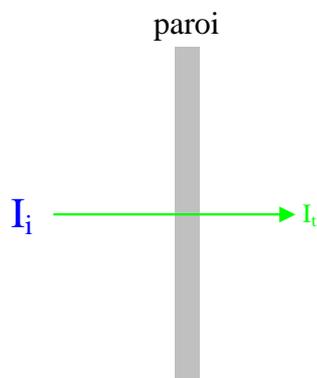
L'isolation acoustique est l'ensemble des procédés mis en œuvre pour obtenir des isollements acoustiques déterminés.

Lorsqu'une onde sonore atteint une paroi, celle-ci vibre et émet un son de même fréquence que la source sonore.

Il y a transmission du son, celle-ci dépend de l'énergie de l'onde incidente et de la nature de la paroi.

Le coefficient de transmission de la paroi est désigné par  $t$  ou  $\tau$ .

$$t = \frac{I_t}{I_i}$$



Il y a deux types de transmission :

a- Directe : *transmission du son par la paroi séparative.*  
Elle dépend de la nature des matériaux de la paroi.

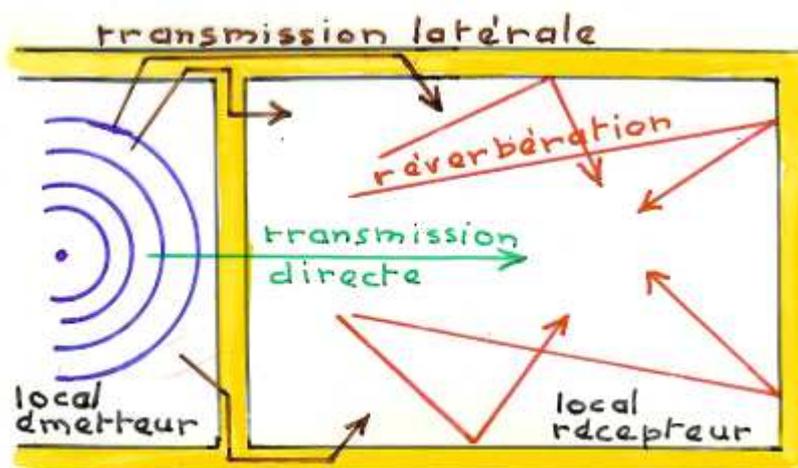
b- Indirecte : *transmission du son entre deux pièces ne s'effectuant pas par la paroi séparative.*

Elle s'effectue par le plancher ou plafond commun aux deux pièces, par un mur opposé à la paroi mitoyenne, par l'extérieur à travers portes et fenêtres, par les canalisations communes.

À ces transmissions latérales qui dépendent de la nature des parois latérales et du type des liaisons entre les parois s'ajoutent les transmissions parasites qui dépendent des défauts de la paroi.

(difficiles à appréhender, elles sont souvent estimées mais non négligeables).

La nature réverbérante des locaux de réception sera prise en compte.



## 7<sub>B</sub> Indice d'affaiblissement acoustique d'une paroi simple R(dB<sub>A</sub>)

### 7<sub>B1</sub> R et t

$$R = N_i - N_t = 10 \log \frac{I_i}{I_0} - 10 \log \frac{I_t}{I_0} = 10 \left( \log \frac{I_i}{I_0} - \log \frac{I_t}{I_0} \right) = 10 \log \frac{\frac{I_i}{I_0}}{\frac{I_t}{I_0}} = 10 \log \frac{I_i}{I_t} = 10 \log \frac{1}{t}$$

$$R = 10 \log (t^{-1}) = -10 \log t$$

$$R = N_i - N_t$$

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

$$R = -10 \log t$$

$t$  ( $\tau$ ) coefficient de transmission de la paroi  
 $N_i$  et  $N_t$  : niveaux sonores  
 R se mesure en dB(A)

### 7<sub>B2</sub> remarques sur R

R se mesure en laboratoire, pour s'affranchir des transmissions indirectes (*coupures acoustiques*) sur un échantillon normalisé de paroi placé entre deux locaux.

Une correction sur la réverbération du local de mesure permet d'avoir la valeur R intrinsèque de la paroi.

R est indépendant du sens de transmission dans la paroi.

R dépend du spectre sonore d'émission, il est mesuré par bandes de fréquence (octave ou tiers d'octave).

R dépend de la masse surfacique  $\sigma$  de la paroi et de la fréquence  $f$  du son

(il est plus faible pour un bruit routier que pour un bruit rose)

Exemple : mur enduit en blocs de béton (20 cm) :  $R_{\text{routier}}=53$  dB et  $R_{\text{rose}}=59$  dB)

### Exercice 8 :

1) Calculer l'indice d'affaiblissement R des parois dont les coefficients de transmission  $t$  sont respectivement :  $10^{-1}$  ;  $10^{-2}$  ;  $10^{-3}$ ...

Que peut-on en conclure ?

2) Etablir la relation littérale donnant  $t$  en fonction de R :  $t = 10^{-0,1R}$

De part et d'autre d'une façade les niveaux sonores sont 76 dB(A) et 37 dB(A), calculer le coefficient de transmission  $t$  de cette façade.

### 7<sub>B3</sub> masse surfacique $\sigma$ et R

masse surfacique:  $\sigma$

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

$e$  : épaisseur de la paroi (m)

$\rho$  : masse volumique du matériau de la paroi homogène ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

$\sigma$  : masse surfacique de la paroi ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )

#### • formule :

$$R = a \log(b \sigma) + c$$

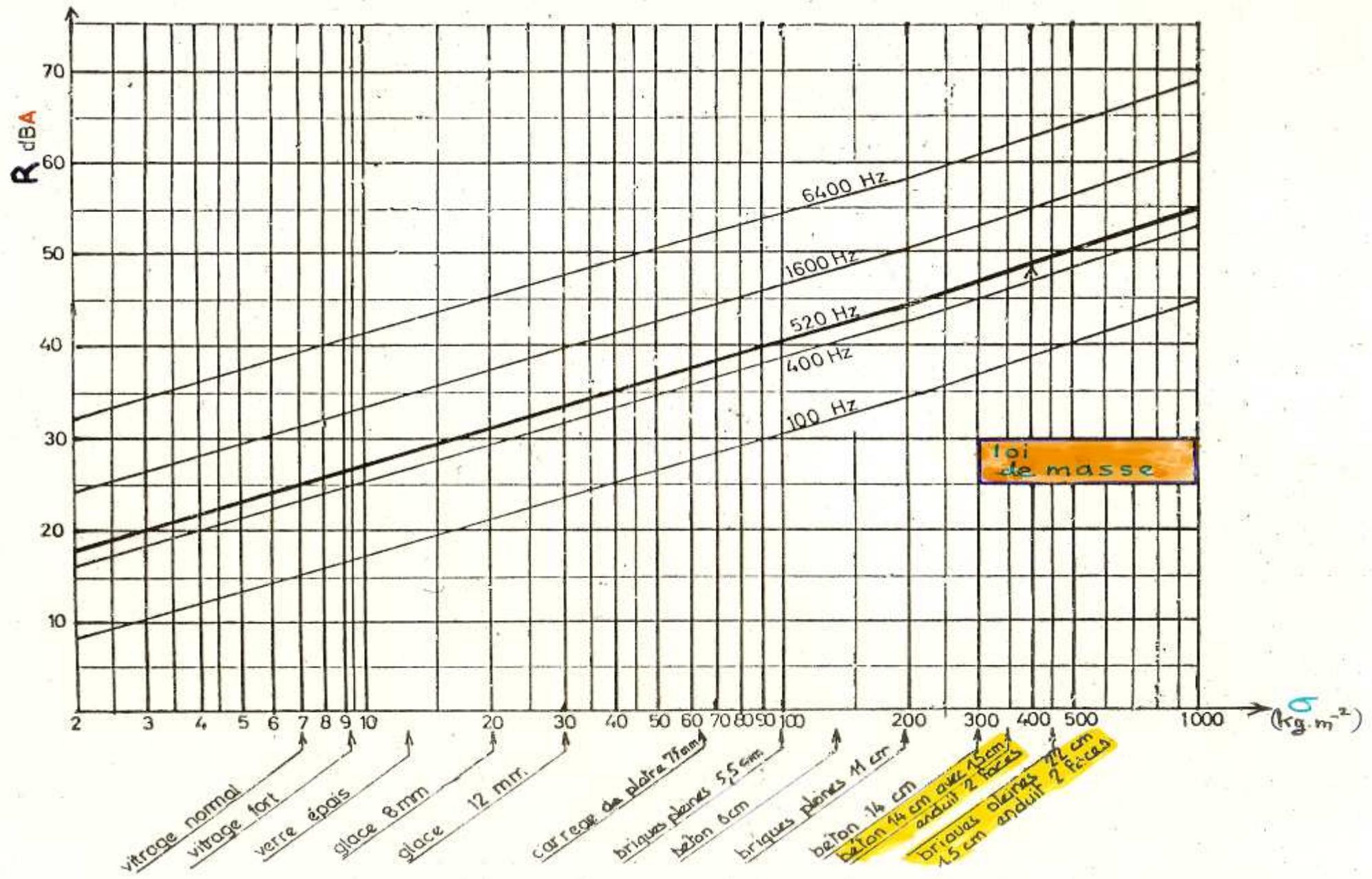
$a$ ,  $b$  et  $c$  sont des coefficients qui dépendent de la masse surfacique  $\sigma$  et des fréquences  $f$ .

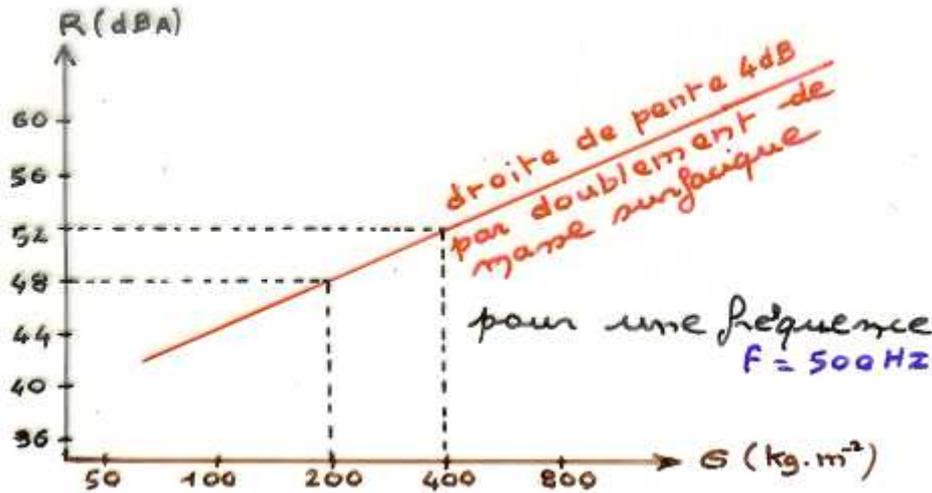
$$(R = 13,3 \log \sigma ; R = 15 \log 4\sigma ; R = 17 \log \sigma + 4 ; R = 40 \log \sigma - 46 ; R = 20 \log(f \cdot \sigma) - 47 \dots)$$

#### • courbe :

$R = f(\sigma)$ , R est une fonction linéaire croissante du logarithme de la masse surfacique de la paroi.

**7<sub>B4</sub> loi de masse**





### Exercice 9 :

1) Déterminer l'épaisseur  $e$  du verre à employer dans la construction d'une paroi vitrée, sachant que celle-ci doit offrir un affaiblissement sonore de 28 dB(A) à la fréquence  $f = 520$  Hz.

$$(\rho_{\text{verre}} = 2500 \text{ kg.m}^{-3})$$

2) a- Que vaut l'affaiblissement acoustique d'un sol en béton plein de masse volumique  $\rho = 2300 \text{ kg.m}^{-3}$  et d'épaisseur  $e = 11$  cm à la fréquence  $f = 400$  Hz.

b- Sachant que la nouvelle réglementation impose un affaiblissement de 51 dB(A), quel devrait être l'épaisseur de béton ?

### Exercice 10 :

L'affaiblissement sonore  $R$  d'une cloison de masse surfacique  $\sigma$  est donné par les formules suivantes :

$$R = 13,3 \log \sigma \quad \text{pour } \sigma < 200 \text{ kg.m}^{-2}$$

$$R = 15 \log 4\sigma \quad \text{pour } \sigma > 200 \text{ kg.m}^{-2}$$

1) Calculer  $R$  pour chacune des parois suivantes :

| matériau | $\rho$ (kg.m <sup>-3</sup> ) | $e$ (mm) |
|----------|------------------------------|----------|
| plâtre   | 1100                         | 15       |
| béton    | 2500                         | 150      |
| brique   | 1400                         | 70       |

2) Quelle épaisseur devrait avoir une cloison de béton pour un affaiblissement sonore de 50 dB(A) ?

En comparant les deux résultats obtenus pour  $R_{\text{béton}}$ , que peut-on en conclure ?

3) Quelle amélioration de l'affaiblissement phonique apporte le doublement de l'épaisseur de la cloison ?

### Exercice 11 : bruit et sommeil

On envisage la construction d'une maison au voisinage d'une route à grande circulation.

Le seuil maximum de tolérance au **bruit** pour le **sommeil** est de 30 dB(A).

1) La mesure du niveau sonore par bande d'octave avec un sonomètre donne les résultats suivants :

| f (Hz)             | 125   | 250  | 500  | 1000 | 2000 | 4000 |
|--------------------|-------|------|------|------|------|------|
| niveau sonore (dB) | 71    | 70   | 66   | 65   | 65   | 57   |
| pondération (dBA)  | -16,1 | -8,6 | -3,2 | 0    | 1,2  | 1    |

a- En tenant compte des pondérations nécessaires, calculer le niveau sonore résultant en dB(A).

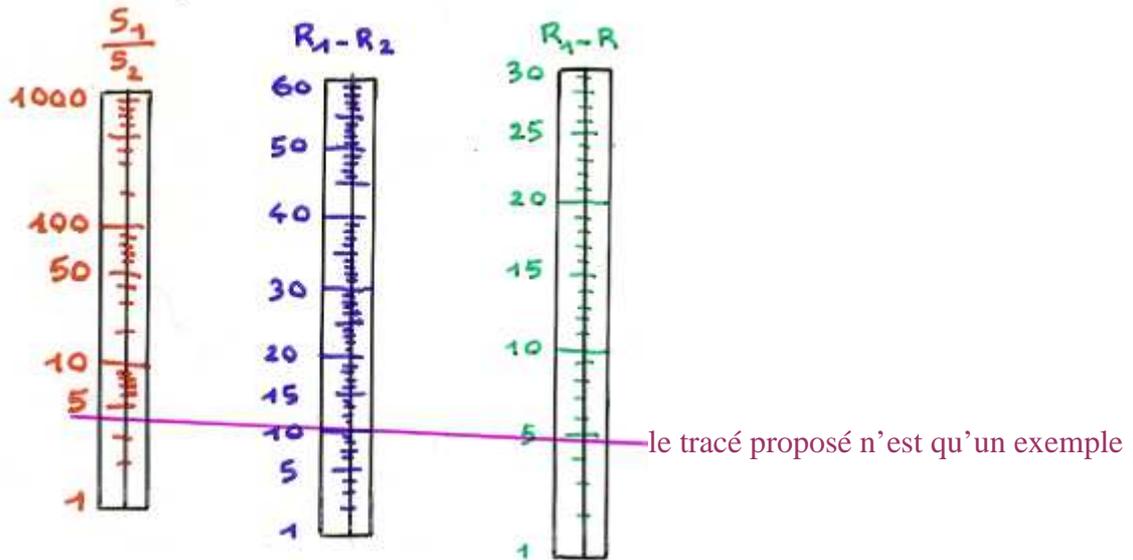
b- En déduire l'indice d'affaiblissement résultant  $R$  de la construction.

Les murs de surface  $S_1$ , proposés par le constructeur de la maison, ont un indice d'affaiblissement de  $R_1 = 45$  dB(A) et les vitres de surface  $S_2$  ont un indice d'affaiblissement de  $R_2 = 25$  dB(A).

2) Déterminer à l'aide de l'abaque ci-dessous la valeur maximum du rapport  $\left(\frac{S_1}{S_2}\right)$ , qui préservera un bon

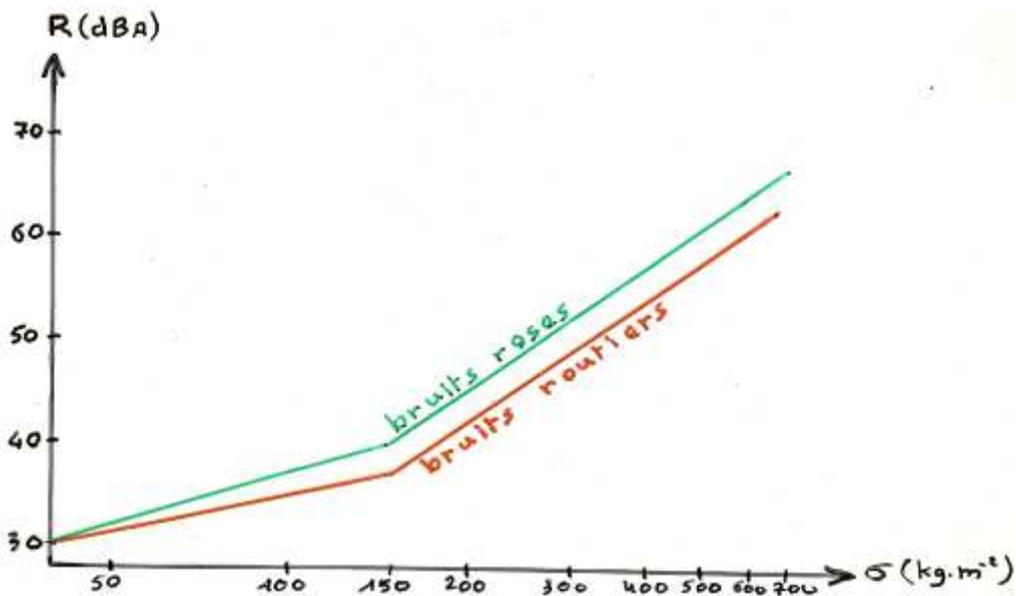
sommeil.

En déduire la surface maximum de vitres, sachant que la surface totale est  $S_1 + S_2 = 30 \text{ m}^2$ .



### 7<sub>B5</sub> R et matériaux

a- **Bâtir lourd** est le meilleur moyen de s'isoler des bruits aériens.



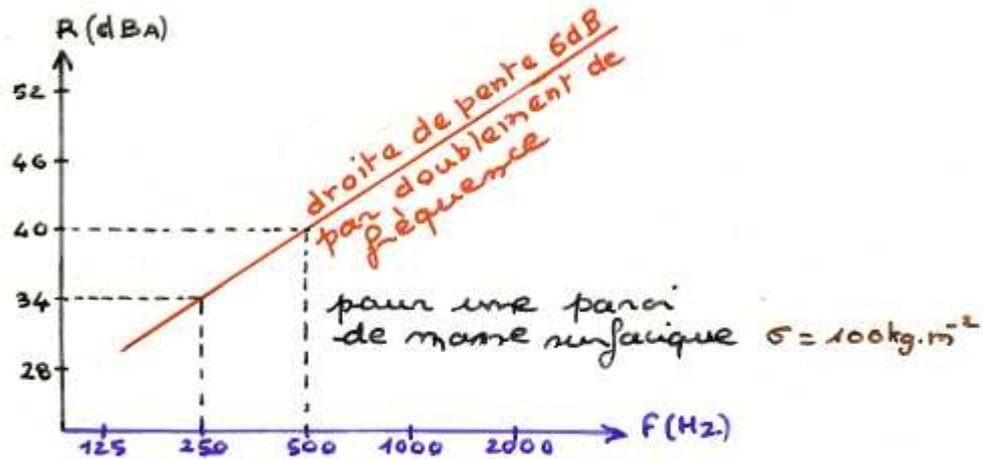
b- la **porosité des matériaux** provoque une baisse de R.  
Les enduits permettent de diminuer la porosité (*amélioration de R*).

Exemples :

- Un mur de parpaings creux ( $e = 15$  cm) dont les alvéoles sont remplies de ciment :  $R = 38$  dB(A)  
Ce mur enduit d'un ciment seul :  $R = 56$  dB(A).
- Un mur de briques pleines ( $e = 11$  cm) sans enduit :  $R = 38$  dB(A).  
Avec enduit de plâtre :  $R = 42,5$  dB(A).

### 7<sub>B6</sub> loi de fréquence

R est une fonction linéaire croissante du logarithme de la fréquence du son.

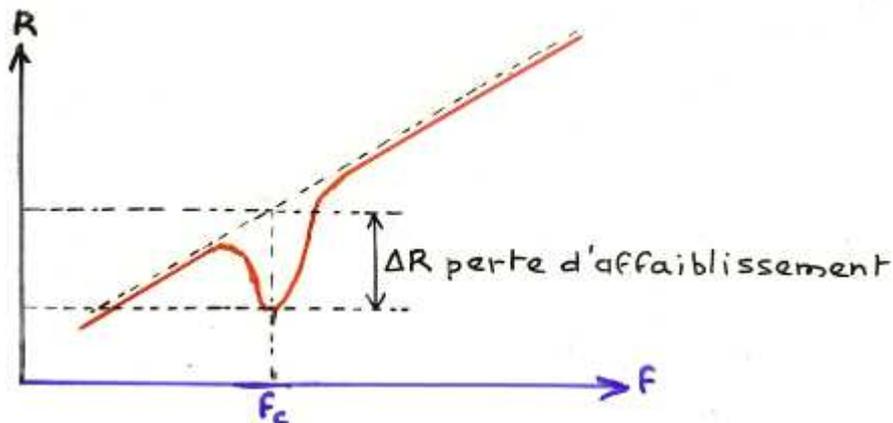


### 7<sub>B7</sub> résonance et perte d'affaiblissement

#### a- fréquence critique

En fait toute paroi présente à une certaine fréquence appelée fréquence critique  $f_c$ , une perte d'affaiblissement qui dépend de la masse et de la rigidité de cette paroi.

Pour un matériau donné,  $f_c$  est inversement proportionnel à son épaisseur  $e$ .



Des ondes de flexion, prennent naissance dans la paroi sous l'action de l'onde sonore incidente... indépendamment de la transmission d'énergie acoustique décrite par les loi de masse et de fréquence.

Une paroi possède une fréquence propre de vibration ; si un son est émis à cette fréquence ( $f_c$ ), il se produit un phénomène de résonance, les vibrations de la paroi sont amplifiées et celle-ci perd de sa « résistance » à la transmission du son.

formule possible pour  $f_c$

$$f_c = \frac{C^2}{2\pi} \sqrt{\frac{\sigma}{k \cdot e^3}}$$

C : célérité du son

k est une constante ( $5,28 \cdot 10^9$  (S.I))

$\Delta R$  # 10 dB(A) : acier, aluminium, verre, béton précontraint.

$\Delta R$  # 6 à 8 dB(A) : béton, plâtre, bois.

$\Delta R$  # 3 dB(A) : plomb, liège, caoutchouc, pierres sèches.

**b- matériaux et  $f_c$** 

| matériau (e = 1 cm) | $\rho$ (kg.m <sup>-3</sup> ) | $F_c$ (Hz) |
|---------------------|------------------------------|------------|
| polystyrène expansé | 14                           | 14000      |
| liège               | 250                          | 18000      |
| bois (sapin)        | 600                          | 6000-18000 |
| plâtre              | 1000                         | 4000       |
| caoutchouc          | 1100                         | 85000      |
| parpaing            | 2000                         | 2700       |
| brique pleine       | 2000 à 2500                  | 2500-5000  |
| béton               | 2300                         | 1800       |
| verre               | 2500                         | 1200       |
| aluminium           | 2700                         | 1300       |
| acier               | 7800                         | 1000       |
| plomb               | 10600                        | 8000       |

Utilisation du tableau :  
La fréquence critique  $f_c$   
d'une paroi simple homogène  
d'épaisseur e est égale à

$$f_c = \frac{F_c}{e}$$

Exemple : béton e = 10 cm

$$f_c = \frac{F_c}{10} = 180 \text{ Hz}$$

L'amortissement des parois peut s'améliorer avec les parois multiple

Exercice 12 :

Une cloison possède un indice d'affaiblissement sonore  $R = 51 \text{ dB(A)}$  pour  $f = 400 \text{ Hz}$ .

Elle sépare deux locaux.

1) En appliquant la loi des fréquences, quels seront les indices d'affaiblissements sonores pour les fréquences : 800 Hz, 6400 Hz et 12800 Hz ?

Dans le local émetteur, une chaîne haute fidélité possède des hauts parleurs qui ont des bandes passantes comprise entre 25 Hz et 13 kHz.

Lors d'une soirée, le niveau sonore de la musique monte à 90 dB(A) dans toutes les fréquences.

2) Quel sera le niveau sonore dans le local récepteur pour les fréquences limites de la bande passante ?

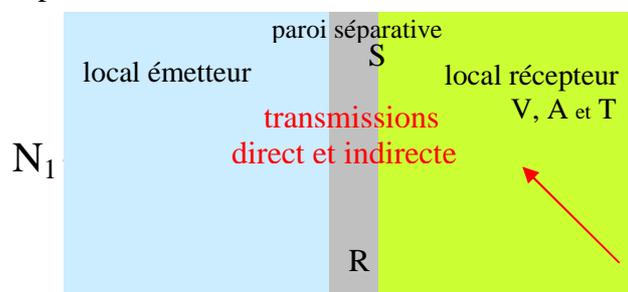
**7c Isolement acoustique d'une paroi simple  $D$  (dB<sub>A</sub>)**

Il prend en compte l'affaiblissement **R de la paroi** séparative entre le local émetteur et le local récepteur (transmission directe), mais aussi :

- les transmissions indirectes ainsi que
- la réverbération dans le local récepteur.

**7c1 isolement acoustique brut  $D_b$  (dB<sub>A</sub>)**

Différence mesurée in situ entre le niveau sonore  $N_1$  mesuré dans le local émetteur et le niveau sonore  $N_2$  mesuré dans le local récepteur.



$$D_b = N_1 - N_2$$

$$D_b = R + 10 \log \frac{A}{S}$$

$$D_b = 10 \log \frac{1}{t} + 10 \log \frac{A}{S} = 10 \left( \log \frac{1}{t} + \log \frac{A}{S} \right)$$

$$D_b = 10 \log \frac{A}{t.S}$$

A : aire d'absorption équivalente du local récepteur (m<sup>2</sup>)

S : surface de la paroi (m<sup>2</sup>)

R : affaiblissement acoustique de la paroi (dBA)

### 7c2 **isolement acoustique normalisé D<sub>n</sub> (dBA)**

Isolement brut corrigé en fonction du temps de réverbération réel (T) du local de réception et d'une durée de réverbération de référence (T<sub>0</sub>).

L'intensité de l'énergie sonore mesurée dans le local récepteur dépend des qualités réverbérantes de celui-ci

(de sa nature absorbante : parois, meubles, volume...).

Pour pouvoir comparer des isolements acoustiques de diverses constructions, on **corrige** l'isolement brut en prenant en compte le rapport de la nature réverbérante du local à celle d'un local de référence.

$$D_n = D_b + 10 \log \frac{T}{T_0} = D_b - 10 \log \frac{A}{A_0}$$

$$T = 0,16 \frac{V}{A} \text{ et } T_0 = 0,16 \frac{V}{A_0}$$

A<sub>0</sub> = 10 m<sup>2</sup> aire d'absorption équivalente du local de référence pour laquelle T<sub>0</sub> = 0,5 s.

D<sub>b</sub> et D<sub>n</sub> s'expriment par bandes d'octave ou de tiers d'octave.

### 7c3 **mesure de t au laboratoire**

- On mesure D<sub>b</sub>, on mesure T

- On déduit A avec la formule de Sabine  $A = 0,16 \frac{V}{T}$

- On calcule  $R = D_b - 10 \log \frac{A}{S}$

- On déduit  $t = 10^{-0,1R}$

#### Exercice 13 :

Calculer l'indice d'affaiblissement acoustique R d'une **baie vitrée** de surface S = 32 m<sup>2</sup>, sachant que l'aire d'absorption équivalente du local est A = 35,2 m<sup>2</sup> et l'isolement brut de la baie est D<sub>b</sub> = 25,7 dB(A).

#### Exercice 14 :

Une **paroi simple** sépare deux locaux.

Le spectre des bruits incidents et transmis de part et d'autre de la paroi est défini par bande d'octave :

| fréquence centrale f(Hz) | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
|--------------------------|-----|-----|-----|------|------|------|
| L (incident) (dBA)       | 72  | 70  | 73  | 71   | 73   | 72   |
| L (transmis) (dBA)       | 23  | 22  | 24  | 22   | 23   | 22   |

Calculer le niveau sonore total incident et le niveau sonore total transmis L<sub>i</sub> et L<sub>t</sub>.

En déduire l'isolement brut D<sub>b</sub> de cette paroi.

#### Exercice 15 :

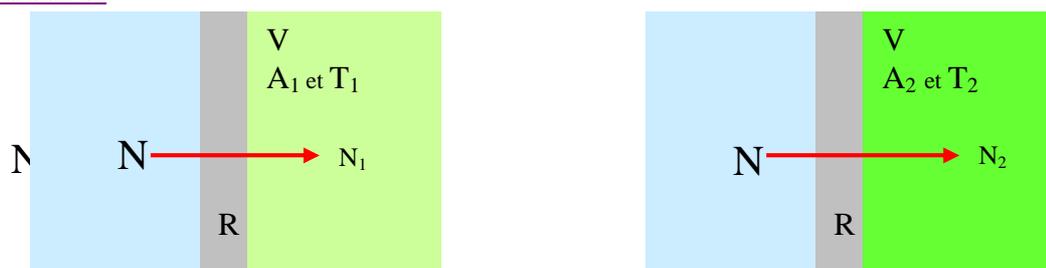
L'isolement brut entre un local émetteur et un local récepteur est égal à 49,2 dB(A).

Calculer l'**isolement normalisé** quand le temps de réverbération du local récepteur est égal à 0,6 s.

#### Exercice 16 :

Etablir la relation entre l'aire d'absorption équivalente A du local récepteur et la surface S de la paroi séparative quand :

a) D<sub>b</sub> = R; b) D<sub>b</sub> > R; c) D<sub>b</sub> < R

Exercice 17 :

Dans le local récepteur, le temps de réverbération  $T$  et l'aire d'absorption équivalente  $A$  peuvent changer.

- 1) Montrer que l'expression littérale donnant  $N_2 - N_1 = \Delta N$  est  $10 \log \frac{A_1}{A_2}$  ou  $10 \log \frac{T_2}{T_1}$ .
- 2) Calculer  $\Delta N$  quand  $A_1 = 11,5 \text{ m}^2$  et  $A_2 = 20 \text{ m}^2$ .

### 7<sub>D</sub> Isolement acoustique d'une paroi composite

#### 7<sub>D1</sub> paroi double

- mur doublé par une cloison
- double vitrage
- dalle flottante...

Cette paroi n'est plus régie par les lois de masse et de fréquence.

La détermination par le calcul de  $R$  n'est plus facile, et on doit avoir recours à l'expérimentation.

$R$  n'est pas égal à  $\sum R_i$  à cause des liaisons inévitables entre les parois.

Exercice 18 :

Quel indice d'affaiblissement acoustique aux sons de fréquences 100 Hz et 2000 Hz apporte un mur construit en briques pleines de 22 cm enduit sur chaque face d'une épaisseur de 1,5 cm de plâtre ?  
(il faut utiliser l'abaque de la loi de masse)

#### 7<sub>D2</sub> exemples

a- Deux parois lourdes séparées par un vide ou un produit très compressible.

*Pour une meilleure efficacité les 2 parois doivent avoir des masses surfaciques différentes et n'avoir aucun contact entre elles.*

b- Une paroi lourde et un complexe léger (laine minérale + parement).

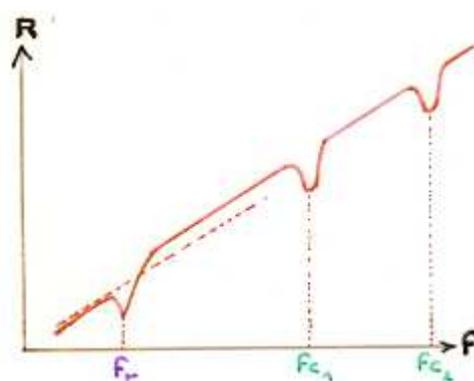
*Ce procédé est principalement efficace si la paroi lourde conduit à une mauvaise isolation ( $\sigma$  insuffisant).*

c- Deux parois légères.

*Généralement constituées de plaque de plâtre montées sur structure porteuse, chaque complexe ayant sa propre structure et étant séparé par un matelas de fibres minérales.*

( $R = 65 \text{ dBA}$  avec  $\sigma = 70 \text{ kg.m}^{-2}$  contre  $\sigma = 600 \text{ kg.m}^{-2}$  en paroi simple)

#### 7<sub>D3</sub> perte d'isolement...



$$f_r = 84 \sqrt{\frac{1}{d} \left( \frac{1}{\sigma_1} + \frac{1}{\sigma_2} \right)}$$

$d$  : distance entre les 2 parois  
 $\sigma_1$  et  $\sigma_2$  : masses surfaciques de chaque paroi

Pour les fréquences critiques  $f_{c1}$  et  $f_{c2}$  des deux parois, mais il y a une atténuation de  $\Delta R$  à la fréquence  $f_{c1}$  du fait de la présence de la deuxième paroi et vice-versa pour la première paroi.

De plus comme les doubles parois ont chacune une faible épaisseur,  $f_{c1}$  et  $f_{c2}$  ont des valeurs telles que  $R$  ayant une valeur élevée, peut supporter une diminution.

Mais aussi les éléments d'une double paroi séparés par une lame d'air ou d'argon) se comportent comme un système oscillant, avec un phénomène de résonance et une fréquence de résonance  $f_r$  qui entraîne une perte d' affaiblissement.

-  $f < f_r$  : la double paroi se comporte comme une paroi simple de masse surfacique  $\sigma_1 + \sigma_2$ .

$R$  augmente de 6 dB(A) par octave.

-  $f = f_r$  : bonne transmission de l'énergie à travers la double paroi, isolation acoustique mauvaise.

-  $f > f_r$  : la double paroi est plus performante qu'une simple paroi de même masse surfacique.

$R$  augmente de 18 dB(A) par octave.

Il faut faire en sorte que  $f_r$  soit la plus faible possible, de façon que dans les bandes sensibles on se trouve dans la zone  $f > f_r$ .

### Exercice 19 :

En pratique  $f_r \approx 80$  Hz.

Si les masses surfaciques sont faibles,  $d$  doit être grande.

double vitrage  $e_1 = 6$  mm et  $e_2 = 8$  mm,  $\rho_{\text{verre}} = 2500$  kg.m<sup>-3</sup>

Si les masses surfaciques sont grandes,  $d$  doit être petite.

deux parois de maçonnerie (briques creuses)  $\sigma_1 = 95$  kg.m<sup>-2</sup> et  $\sigma_2 = 50$  kg.m<sup>-2</sup>

1) Après avoir calculé  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$  pour chaque vitre, calculer  $d$  pour le double vitrage.

2) Calculer  $d$  pour les deux parois de maçonnerie.

3) Conclusion ?

### 7E Isolement acoustique d'une paroi discontinue

Elle est constituée de plusieurs parois simple(s) et composite(s).

Exemples :

- façade avec *mur* et *vitrage*.

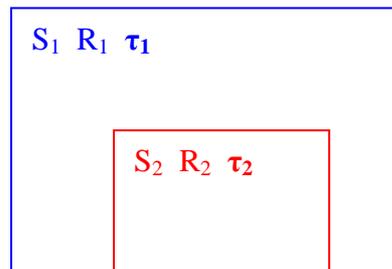
- cloison de séparation (*mur* et *porte*) entre deux pièces d'un appartement...

S : surface

R : affaiblissement acoustique

$\tau$  ( $t$ ) : coefficient de transmission

(rappel :  $P = I.S$  et  $I_t = \tau.I$ )



I étant l'intensité sonore du bruit qui frappe la paroi en tout point,  
 $P_i$  et  $P_t$  étant les puissances sonores incidente et transmise pour la paroi  
 et  $P_{t1}$  et  $P_{t2}$  les puissances transmises par chaque constituant de la paroi :

$$P_t = P_{t1} + P_{t2} = I_{t1}.S_1 + I_{t2}.S_2 = \tau_1.I.S_1 + \tau_2.I.S_2 = I.(\tau_1.S_1 + \tau_2.S_2) = P_t$$

$$P_t = I_t.(S_1 + S_2) = \tau.I.(S_1 + S_2) = P_t$$

( $\tau$  : coefficient de transmission moyen de la paroi)

$$\tau.I.(S_1 + S_2) = I.(\tau_1.S_1 + \tau_2.S_2)$$

$$\tau = \frac{\tau_1.S_1 + \tau_2.S_2}{S_1 + S_2}$$

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau} = 10 \log \frac{S_1 + S_2}{\tau_1.S_1 + \tau_2.S_2} \quad D_b = R + 10 \log \frac{A}{S_1 + S_2} = 10 \log \frac{A}{\tau_1.S_1 + \tau_2.S_2}$$

(A : aire d'absorption équivalente du local récepteur)

$$\tau = \frac{\sum_{j=1}^n \tau_j \cdot S_j}{\sum_{j=1}^n S_j} : \text{coefficient de transmission moyen d'une paroi discontinue}$$

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad (\text{ou } 10 \log \frac{\sum S_j}{\sum \tau_j \cdot S_j}) : \text{affaiblissement moyen de cette paroi}$$

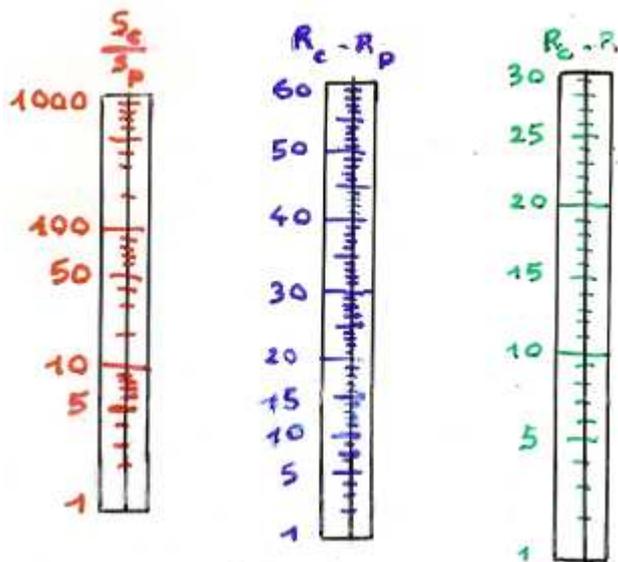
$$D_b = R + 10 \log \frac{A}{\sum S_j} \quad (\text{ou } 10 \log \frac{A}{\sum \tau_j \cdot S_j}) : \text{isolement brut moyen de cette paroi}$$

### Exercice 20 :

Soient deux locaux séparés par une paroi légère discontinue composée :

- d'une cloison de surface  $8 \text{ m}^2$  et d'indice d'affaiblissement sonore  $R_c = 30 \text{ dB(A)}$
- d'une porte de surface  $2 \text{ m}^2$  et d'indice d'affaiblissement  $R_p = 20 \text{ dB(A)}$ .

- 1) Calculer les coefficients de transmission de la cloison et de la porte.
- 2) Calculer le coefficient de transmission moyen de la paroi.
- 3) a- Calculer l'indice d'affaiblissement moyen de la paroi.  
b- En déduire la valeur de la diminution de l'indice d'affaiblissement de la cloison.  
c- Vérifier ce dernier résultat à l'aide de l'abaque :



- 4) Calculer l'isolement brut pour chaque local sachant que les aires d'absorption équivalente sont respectivement  $5 \text{ m}^2$  pour le local 1 et  $15 \text{ m}^2$  pour le local 2.

5) En réalité il y a un **espace sous la porte** (« vide ») de  $0,02 \text{ m}^2$  ( $S_p = 1,98 \text{ m}^2$ ).

- a- Quelles sont les valeurs de l'indice d'affaiblissement  $R_v$  et du coefficient de transmission  $\tau_v$  de cet espace...d'air ?
- b- Calculer les nouveaux coefficients de transmission et d'indice d'affaiblissement moyens de la paroi.
- c- Quel est le pourcentage d'erreur effectué sur la mesure de  $\tau$  de la paroi, avec et sans espace sous la porte ?

### Exercice 21 :

Un **studio** possède une **façade** de dimensions  $L = 9 \text{ m}$  et  $h = 2,3 \text{ m}$ , donnant sur l'extérieur.

Cette façade est constituée d'un mur et d'une baie vitrée de surface  $7 \text{ m}^2$ .

Le studio est, d'autre part, situé au dessus d'une rue dans laquelle règne un niveau sonore moyen  $N_1 = 70 \text{ dB(A)}$ .

On souhaite un bruit de fond moyen, dans le studio, ne dépassant pas  $N_2 = 40 \text{ dB(A)}$ .

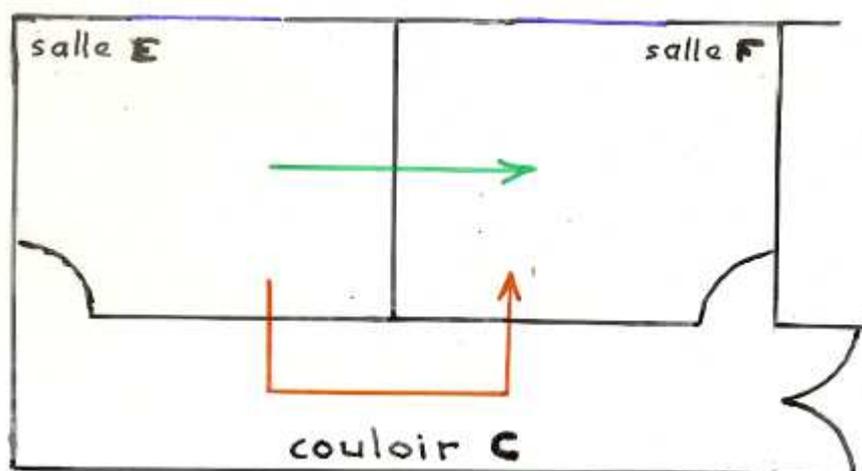
- 1) Calculer l'indice d'affaiblissement de la façade.

2) Exprimer littéralement, puis calculer le coefficient de transmission moyen de la façade

(rappel:  $t = \frac{I_t}{I_i}$  ;  $I_t$  : intensité sonore transmise et  $I_i$  : intensité sonore incidente (reçue))

3) Calculer le coefficient de transmission du mur sachant que celui du vitrage est égal à  $10^{-4}$ .

• **Exercice 22** : Influence de la transmission indirecte sur l'isolement brut d'une paroi.



Deux salles de classe E et F, identiques ( $7\text{m} \times 6\text{m} \times 4\text{m}$ ), sont séparées par un mur homogène ( $6\text{m} \times 4\text{m}$ ) dont l'indice d'affaiblissement vaut  $40\text{dB(A)}$  à la fréquence  $500\text{Hz}$ .

Les deux salles ouvrent sur un couloir C de volume  $84\text{m}^3$ .

Les séparations EC et FC sont identiques et constituées chacune par  $26\text{m}^2$  de cloison d'indice d'affaiblissement  $30\text{dB(A)}$  à  $500\text{Hz}$  et d'une porte plane de  $2\text{m}^2$  d'indice d'affaiblissement  $20\text{dB(A)}$  à toute fréquence.

On suppose que le son, pour aller de E vers F, ne puisse passer que par la voie directe EF et la voie indirecte ECF.

Le temps de réverbération est de  $1\text{s}$  dans les salles E et F, et de  $2\text{s}$  dans le couloir.

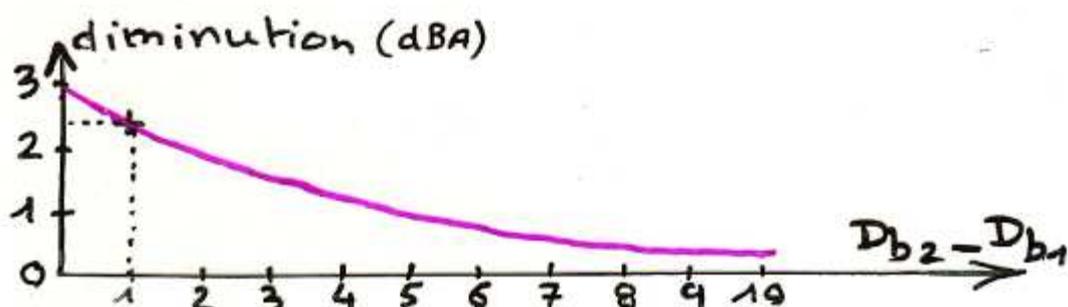
Les calculs se feront portes et fenêtres fermées.

On supposera que la transmission du son s'effectue uniquement par l'intermédiaire du champ réverbéré. (les portes d'accès aux salles de classe sont très éloignées l'une de l'autre)

Les transmissions indirectes dues à la présence des baies vitrées sont négligeables (fenêtres closes).

- 1) Calculer l'isolement brut obtenu dans la salle F par la transmission directe.
- 2) Calculer l'isolement brut obtenu dans la salle F par la voie indirecte, celui-ci est la somme de :
  - a- l'isolement brut obtenu dans le couloir (transmission EC)
  - b- l'isolement brut obtenu dans la salle F (transmission CF)
- 3) Vérifier qu'il passe plus d'énergie sonore par la voie directe que par la voie indirecte.
- 4) En utilisant l'abaque ci-dessous calculer l'isolement brut résultant dans la salle F.

La différence des isolements obtenus donne la valeur à retrancher au plus faible des isolements.



• Exercice 23 : épaisseur d'une paroi séparative en verre.



On désire construire à l'intérieur d'un atelier bruyant, un local destiné à l'aménagement d'une salle de commande.

La construction en parois vitrées doit permettre la surveillance de l'atelier et apporter un indice d'affaiblissement acoustique suffisant pour que la conversation normale entre deux personnes soit possible à l'intérieur de la salle de commande.

On considère que cette conversation n'est possible que si le niveau sonore de fond du local n'excède pas 60 dB(A).

Dimensions des locaux :

- atelier 25 m × 10 m × 4 m

- salle de commande 5 m × 3 m × 4 m

Coefficients d'absorption des surfaces (à 1000 Hz) :

- atelier, toutes parois (murs, sol, plafond),  $\alpha = 0,02$ .

- salle de commande (traitée acoustiquement),  $\alpha = 0,5$ .

- cloison vitrée,  $\alpha = 0,10$ .

Niveaux de puissance des deux sources de bruit  $S_1$  et  $S_2$  :

$$N_{w1} = 90 \text{ dB (A)}$$

$$N_{w2} = 88 \text{ dB (A)}$$

Présence de deux personnes dans la salle de commande :

aire d'absorption équivalente par personne,  $0,5 \text{ m}^2$ .

De part et d'autre de la cloison règne **uniquement par champ réverbéré** (les sources de bruit étant assez loin de l'emplacement réservé à la salle de commande).

Calculer :

- 1) L'aire d'absorption équivalente de l'atelier.
- 2) Le niveau sonore émis par chaque machine (rappel:  $N = N_w + 6 - 10 \log A$ ), puis le niveau sonore total régnant dans l'atelier.
- 3) L'isolement brut de la cloison séparative.
- 4) L'aire d'absorption de la salle de commande.
- 5) L'indice d'affaiblissement de la cloison vitrée séparative, ainsi que son coefficient de transmission.
- 6) L'épaisseur de verre à utiliser ( $\rho_{\text{verre}} = 2500 \text{ kg.m}^{-3}$ ).

## 8. DOCUMENTS

### 8<sub>A</sub> ACOUSTIQUE des SALLES de CONCERT

Dans une salle de spectacle, l'auditeur perçoit à la fois l'onde directe et une succession d'ondes réfléchies sur les murs, les plafonds et le sol. Ces ondes peuvent interférer.

Or le son direct n'est perceptible qu'à une distance assez courte.

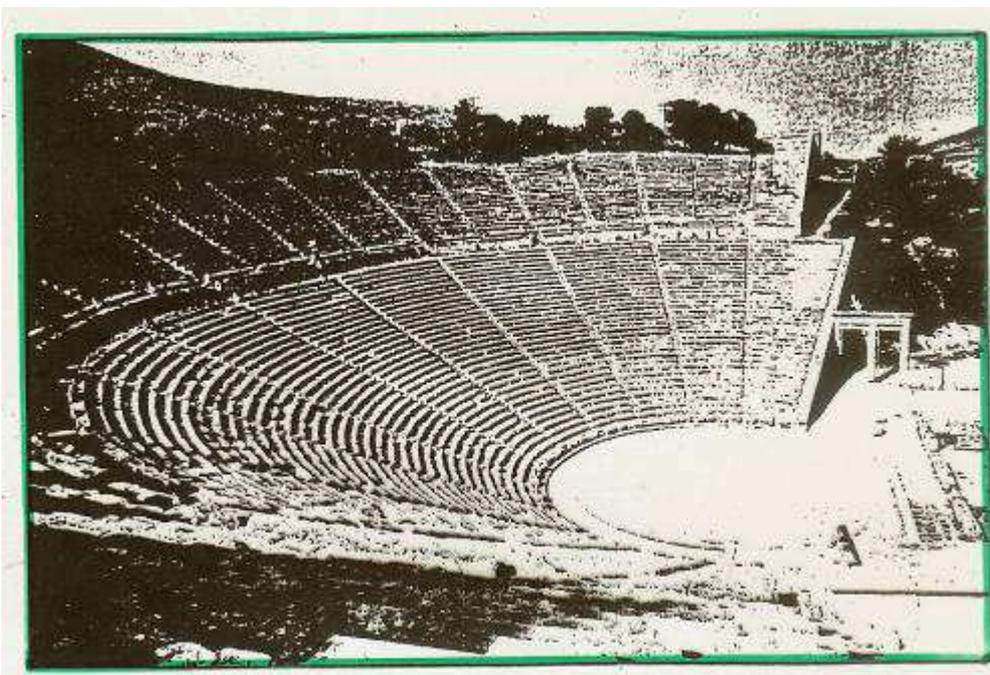
En effet, l'amortissement des vibrations résulte en général des frottements internes du milieu qui dépendent de sa viscosité ; il y a échanges de chaleur entre les tranches du milieu échauffées par compression et les tranches refroidies par détente.

Ces échanges de chaleur sont d'autant plus grands que la longueur d'onde est petite et à distance d'un orchestre, on perçoit mieux les sons « graves ».

Les sons réfléchis entrent pour beaucoup dans le niveau sonore final perçu par l'oreille, mais il faut éviter entre autre que le son réfléchi parvienne à l'oreille beaucoup plus tard que le son direct (écho).

1) Les théâtres de plein air développés dans l'antiquité (théâtre d'Épidaure en Grèce), construits en demi-cercle, comportaient des gradins pour les spectateurs, une petite scène surélevée, un mur derrière les acteurs et un bassin d'eau entre les acteurs et les spectateurs.

Les auditeurs percevaient ainsi, les sons directs et les sons réfléchis par le mur et l'eau, et comme la scène était petite, les longueurs des trajets des rayons directs et réfléchis étaient sensiblement les mêmes (l'écho était supprimé).



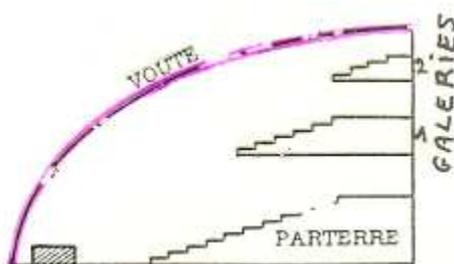
4<sup>ème</sup> siècle avant J-C

14000 places.  
Polyclète, architecte.

Acoustique parfaite.  
(on entend une pièce de monnaie tombant dans l'orchestre)

2)

A la salle Pleyel construite à Paris par Gustave Lyon, l'acoustique aux galeries est aussi bonne qu'au parterre grâce à la forme particulière de la voûte.



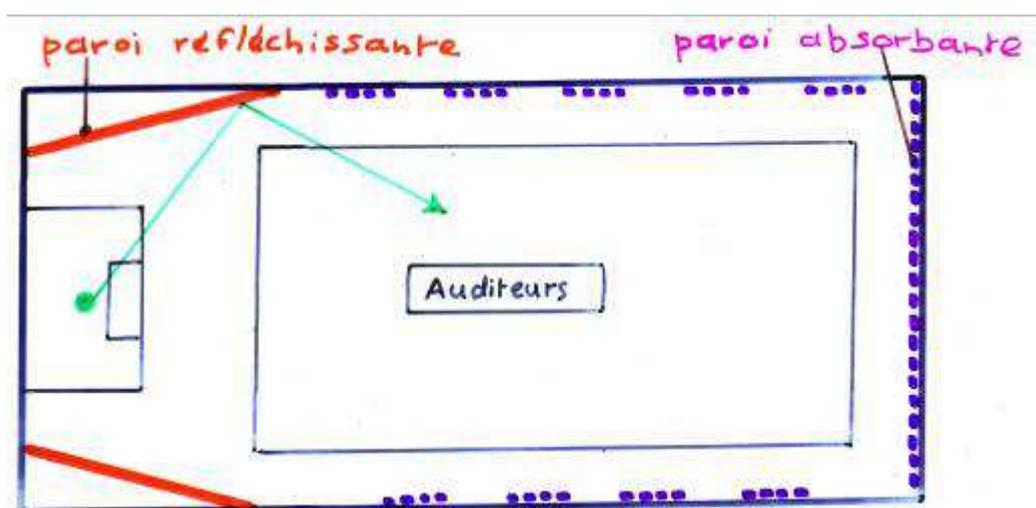
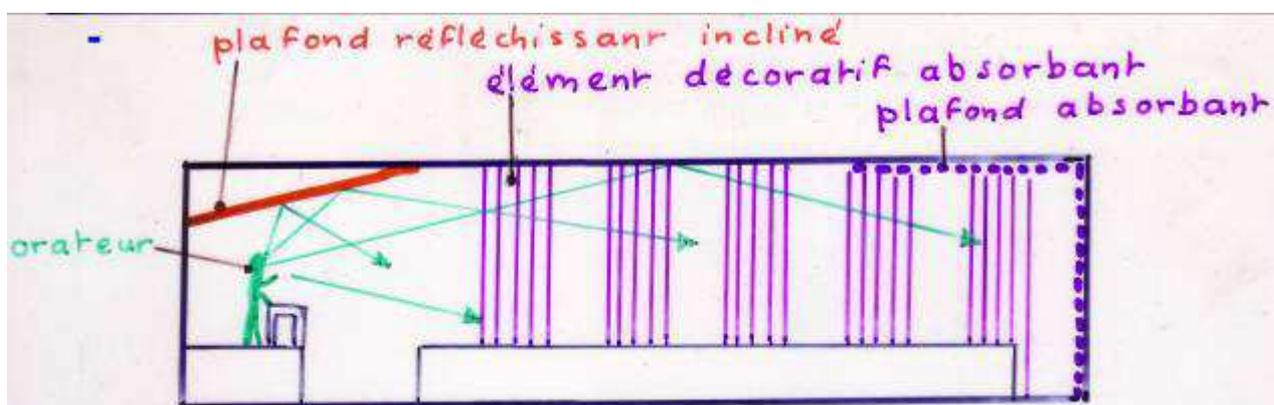
Il convient d'utiliser alors deux types de matériaux :

- Les murs et le plafond sont en pierre ou ciment.  
(*coefficient de réflexion,  $r$ , élevé*)
- Le sol, le fond de la salle et les galeries sont recouverts de matière poreuse (feutre) qui absorbent le son.

### 8<sub>B</sub> Traitement acoustique d'une salle

- 1) Traiter la partie du plafond située au-dessus de la source sonore :  
- faux plafond, incliné et réfléchissant, pour obtenir une meilleure diffusion des ondes sonores.
- 2) Rompre la régularité des surfaces par l'adjonction de motifs décoratifs :  
- moulures, rideaux,...
- 3) Traiter le fond de la salle :  
- lambris, panneaux travaillant en diaphragme, matériaux fibreux,...
- 4) Réduire, s'il y a lieu, la durée de réverbération :  
- adjonction d'éléments décoratifs absorbants, de dalles acoustiques sur la partie de plafond éloignée de la source utile.
- 5) Les surfaces vitrées (verres ordinaires, glaces) sont très réfléchissantes.  
Elles sont quelquefois la cause d'échos gênants :  
- emploi de verres imprimés à fort relief ou ondulés pour limiter cet inconvénient.

Une salle destinée à l'audition d'un orateur, sans système d'amplification, peut ne pas être la meilleure à la projection d'un film parlant.



## 8c Acoustique et DIFFRACTION

### 1) Observations pratiques

- Si nous sommes sur le parvis d'une église, quelle que soit notre place par rapport à la porte, nous pouvons entendre la musique des grandes orgues. Il n'est pas nécessaire d'être en face de la porte.

Les ondes sonores ont été diffractées.

- Expérience facile à réaliser avec deux acteurs A et B, pour mettre en évidence la diffraction du son lors du passage par une ouverture étroite :

A et B sont placés de part et d'autre d'une porte ou d'une fenêtre coulissante.

A est devant l'ouverture, B est décalé de côté par rapport à celle-ci.

Si la porte est grande ouverte, lorsque A parle, B l'entend parfaitement.

Si la porte est à moitié ouverte, B n'entend plus A parler.

Si la porte est à peine ouverte (*ouverture de 20 cm environ*), B entend de nouveau A. L'ouverture étroite se comporte comme une source d'ondes sphériques. Il s'agit bien de diffraction, car compte tenu des longueurs d'ondes sonores, on peut dire que le son contourne les obstacles.

### 2) Généralisation et importance de ce phénomène

La **diffraction** se produit dès que l'**onde** atteint le **bord** d'un **obstacle** ou passe par une **ouverture** dans l'obstacle.

Le phénomène devient prépondérant si la longueur d'onde du son est du même ordre de grandeur que les dimensions des objets qui nous entourent : la diffraction masque alors les phénomènes de réflexion.

a- Dans une pièce vide, les ondes sonores ne rencontrent pas d'obstacles et se réfléchissent sur les murs.

On dit que la pièce « résonne ».

Meublons la pièce : les meubles ont des dimensions de l'ordre du mètre et sont séparés par des distances de l'ordre du mètre, aussi. Les sons qui ont des longueurs d'onde de l'ordre du mètre seront diffractés.

- La pièce est toujours sonore, mais nous constatons qu'elle « résonne moins ».

- La diffraction masque la réflexion.

Mettons du tissu sur les murs, des tapis au sol, des tentures aux fenêtres : le son ne subit plus de réflexion.

- La diffraction est prépondérante et la sensation sonore est beaucoup plus agréable.

b- Confortablement installé à votre bureau, par la fenêtre entrouverte de votre chambre vous parvient la rumeur de la rue : la diffraction est un phénomène banal, extrêmement fréquent.

Dans un appartement, la propagation des ondes sonores est à la fois assurée par diffraction (par les portes, par les bords d'obstacles,...) et par la réflexion sur les murs des pièces.

c- Dans l'air, les sons graves ont une longueur d'onde de l'ordre du mètre, les médiums de l'ordre du décimètre et les aigus du centimètre : les sons graves et médium seront diffractés par les ouvertures (portes et fenêtres) et les objets usuels (meubles) d'un appartement, les sons aigus pas.

On dit que la propagation de ces derniers est directives : au loin, une fanfare semble n'être composée que de tambours.

d- Les ondes ultrasonores (US,  $f > 16000$  Hz) ont dans l'air des longueurs d'onde de l'ordre du millimètre ou inférieures : elles ne sont pas diffractées par les objets usuels et leur propagation est très directive.

En l'absence d'obstacles, elles se propagent rectilignement, tout comme la lumière.

La directivité du faisceau ultra sonore est mise à profil pour le sondage marin : la durée séparant l'émission d'un train d'ondes ultrasonores du retour de « l'écho » sur un obstacle permet de déterminer la distance séparant l'émetteur de l'obstacle ( $40000 \text{ Hz} < f < 50000 \text{ Hz}$ ).

e- Un mur antibruit, placé le long d'une autoroute, n'est jamais entièrement efficace : Il supprime la réception directe des bruits de circulation et la transmission par réflexion sur le sol, mais, comme il constitue un obstacle, il diffracte les ondes sonores.