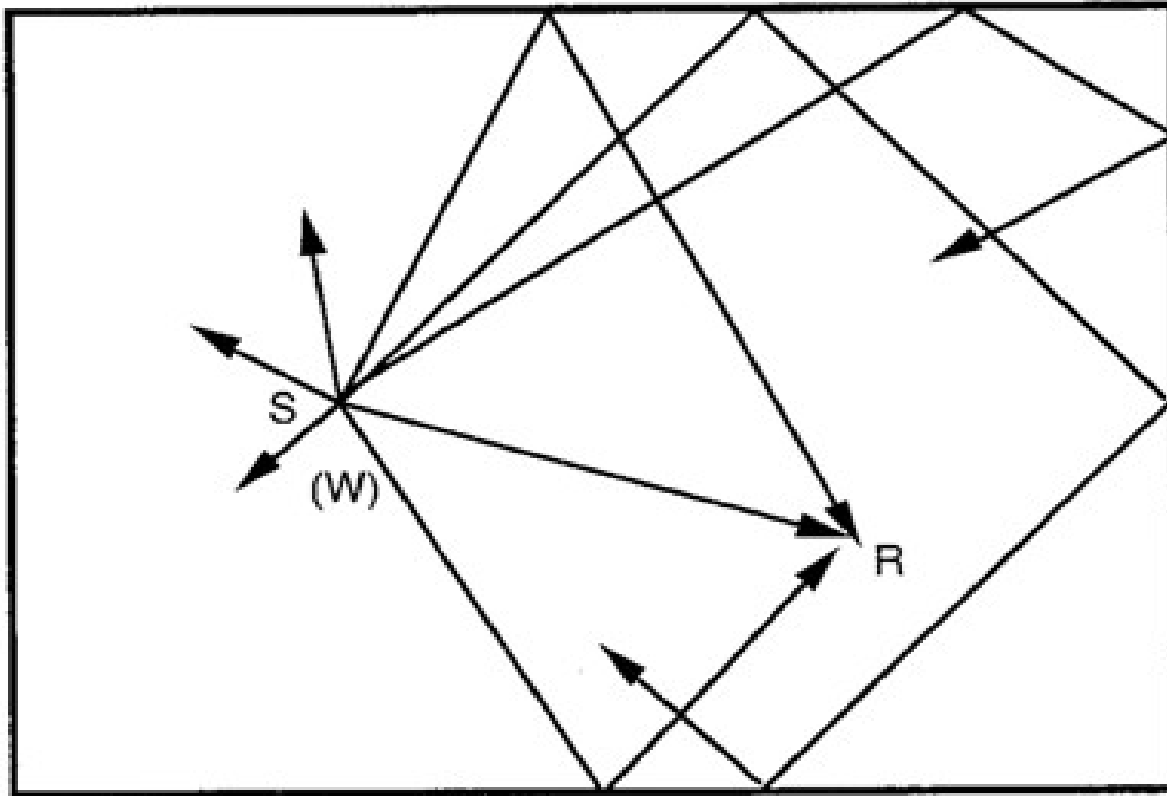


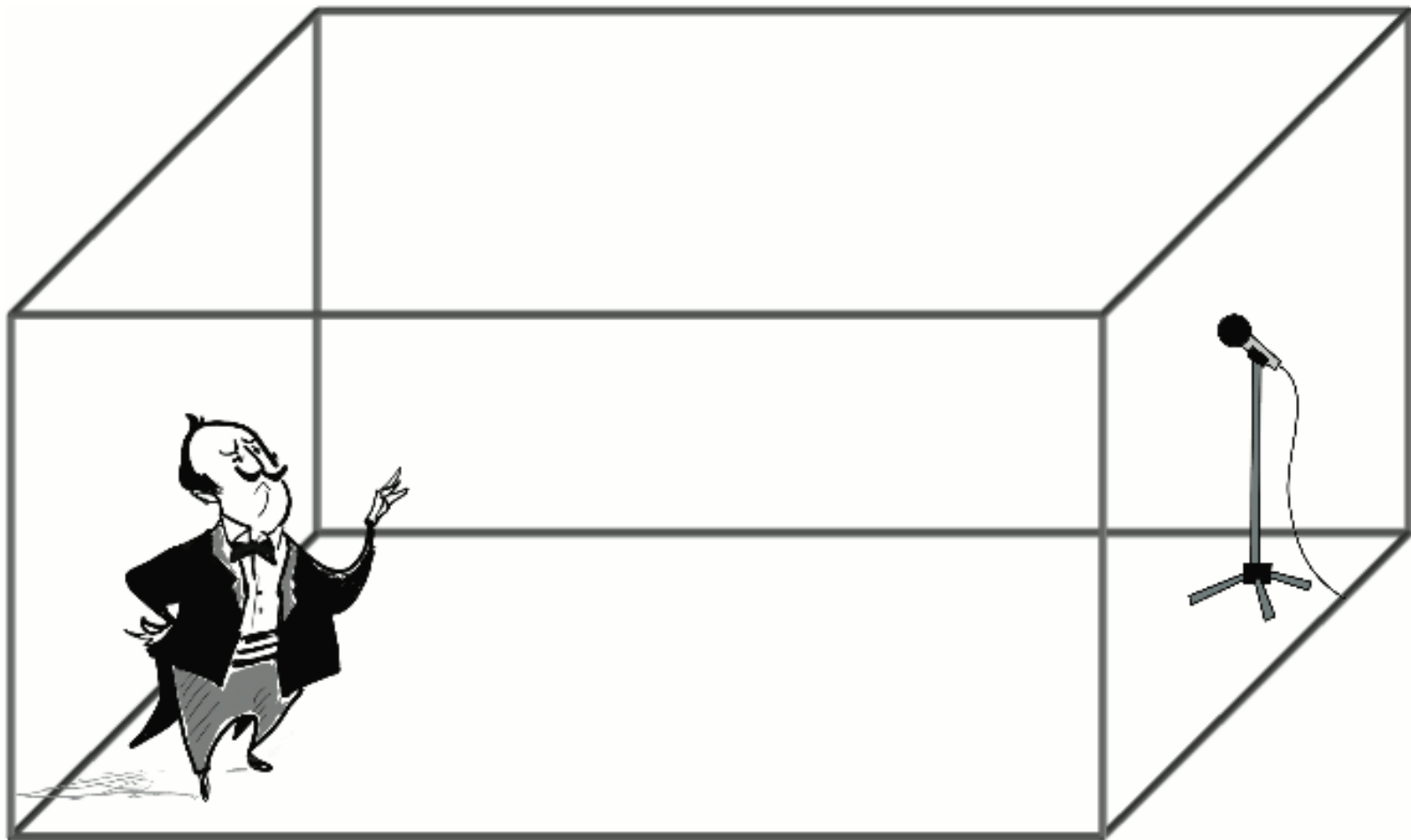
Chapter III

Sound Propagation in Enclosed Spaces

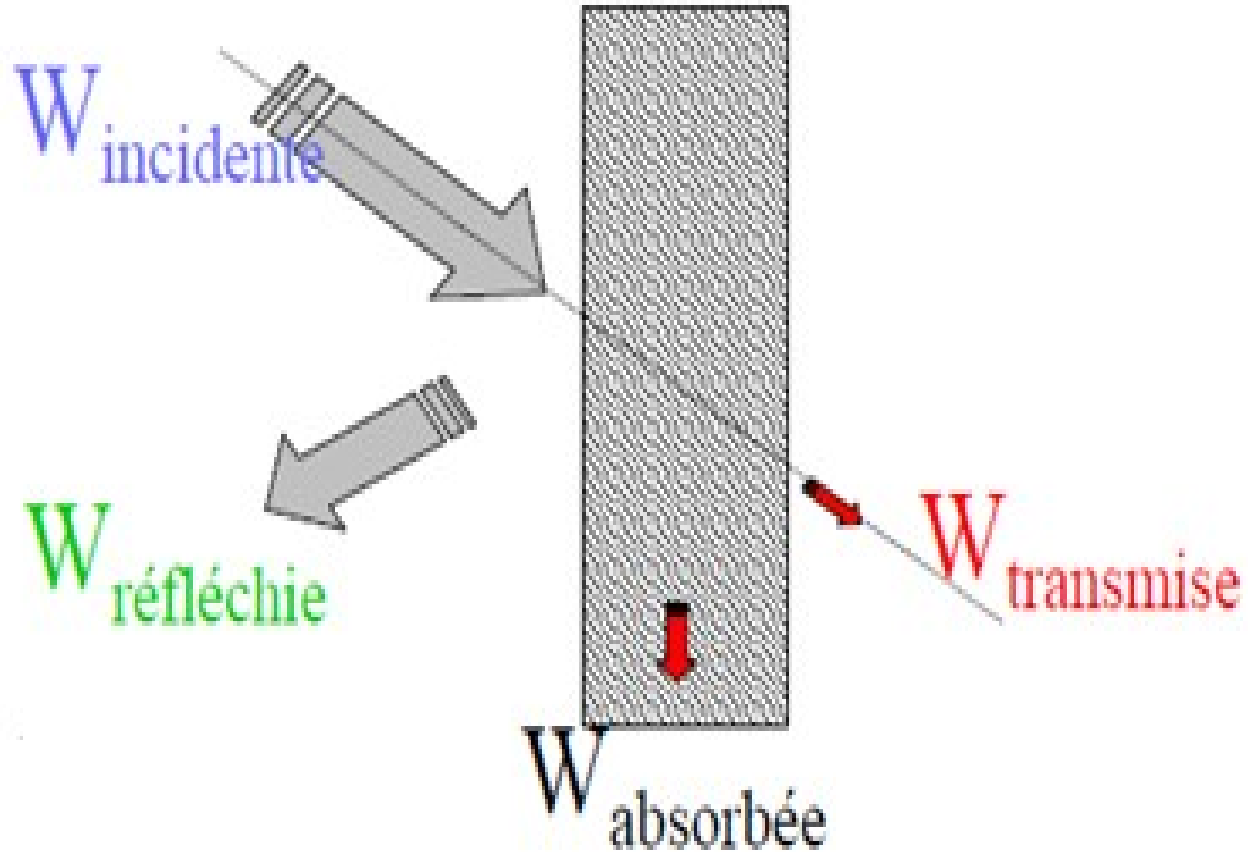
- Reverberant sound field
- Material absorption coefficient
- Equivalent absorption area
- Overall sound intensity
- Sound pressure level (SPL)
- Reverberation time

Reverberant sound field





Material absorption coefficient (α)



The absorption coefficient (α) of a material represents

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

The absorption coefficient α depends on the nature of the materials, the angle of incidence, and the frequency

	Fréquence (Hz)					
MATERIAU	125	250	500	1000	2000	4000
Béton	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04
Plâtre	0,02	0,03	0,04	0,05	0,03	0,03
Verre 3 (mm)	0,08	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02

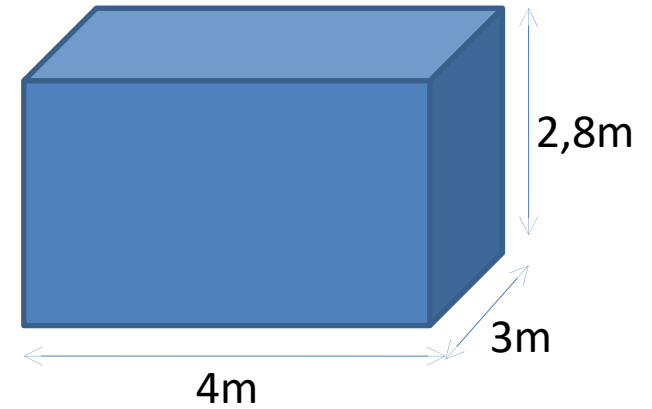
Equivalent absorption area

- The equivalent absorption area A is defined as :

$$A = \alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 + \dots \dots \dots \alpha_n \cdot S_n = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i$$

- with :
- α_i : The absorption coefficient of a material on wall i ($0 < \alpha \leq 1$)
- S_i : The area of wall i

- The ceiling has an acoustic absorption coefficient $\alpha_p = 0.5$.
- The floor has an acoustic absorption coefficient $\alpha_s = 0.2$.
- The walls have the same acoustic absorption coefficient $\alpha_m = 0.35$.



Overall sound intensity

In an enclosed room where sound is partly absorbed and partly reflected by the walls, the overall sound intensity is the sum of the two sound intensities:

Radiated sound intensity I_d :

It is radiated directly by the source with directivity Q , and is equal to:

$$I_d = \frac{Q \cdot W}{4\pi r^2}$$

- Reverberant sound intensity I_r :

It is calculated using the following relation:

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

R : Constant of
the room

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

- **Overall sound intensity I**

It is the sum of the two sound intensities:

$$I = I_d + I_r$$
$$I = \frac{Q \cdot W}{4\pi r^2} + \frac{4W}{R}$$

- **Critical distance**

The critical distance r_c is the distance at which the reverberant sound intensity I_r is equal to the radiated sound intensity I_d

$$I_r = I_d$$
$$\frac{4W}{R} = \frac{Q \cdot W}{4\pi r^2}$$
$$\rightarrow r_c = \sqrt{\frac{R \cdot Q}{16\pi}} \text{ (m)}$$

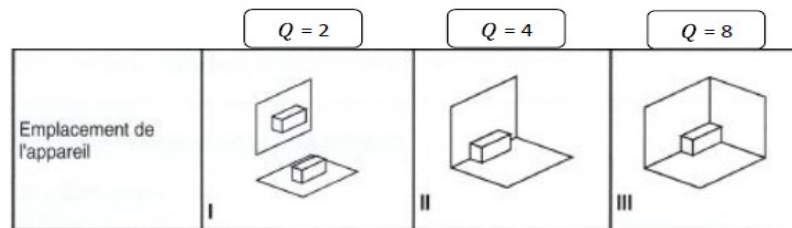
• Sound pressure level (SPL)

The sound pressure level at a distance r from the source is expressed by the following relation:

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

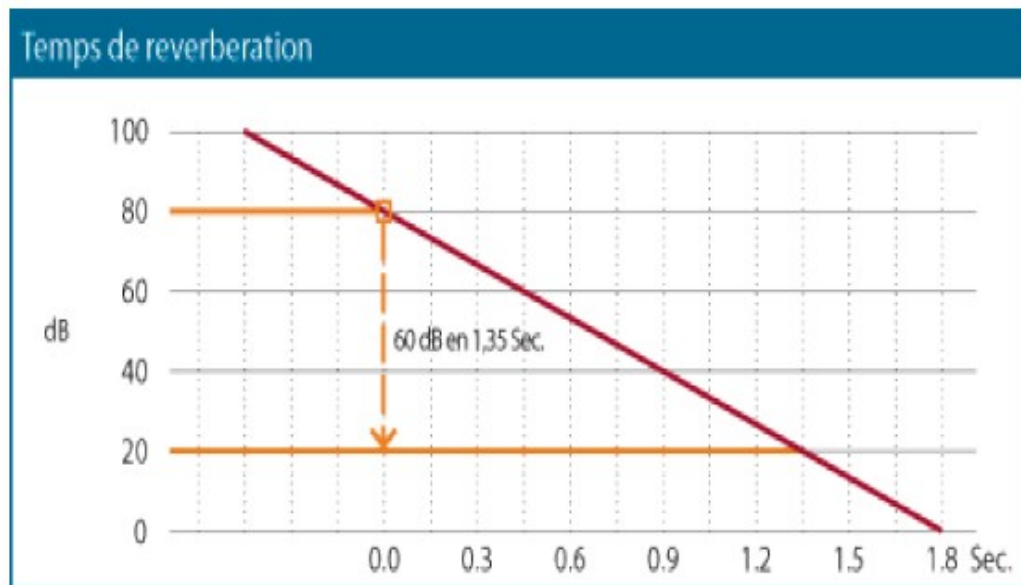
The directivity factor has the following values:

- 1 if the source is located in the middle of the room
- 2 if the source is located in the middle of a wall
- 4 if the source is located at the intersection of two walls
- 8 if the source is located at the corner formed by three walls (rectangular trihedron)



- **Reverberation time**

The reverberation time of a room T_r is defined as the time required for the sound intensity to decrease by 60 dB after the sound source is turned off.



- **Sabine's formula**

The reverberation time T_r of a room can be easily determined using Sabine's formula:

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

- T_r : reverberation time (s)
- V : volume of the room (m^3)
- A : equivalent absorption area (m^2)

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

Sabine's formula is applicable when:

- Air absorption is negligible
- The room volume V is less than $500 m^3$
- Absorbing materials are evenly distributed over the surfaces

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

Solutions to improve acoustic comfort



- If possible, place large, thick rugs in your space to reduce floor resonance.
- Avoid hard coverings such as tiles, and prefer wooden flooring or an absorbent surface like carpet.
- Install sound-absorbing materials on the walls.
- Avoid very hard surfaces such as bare concrete or marble.
- Prefer a non-parallel wall layout (especially for home studios or listening rooms). Rectangular or square surfaces tend to be more reverberant than diamond-shaped, hexagonal, or other irregular geometries



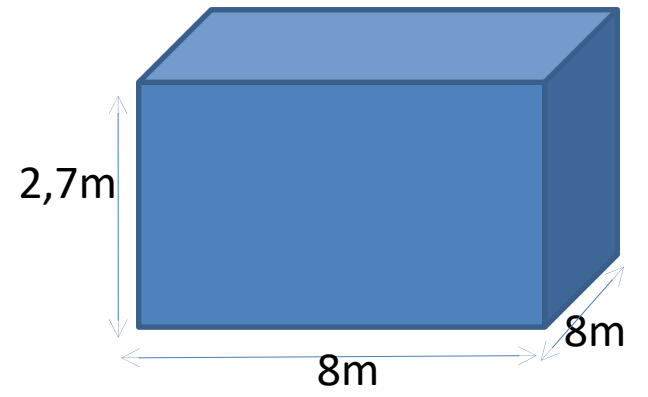
Applications

Exercice 1 :

1- Pour chaque salle, calculer le temps de réverbération T_r en utilisant la formule de Sabine :

Dimensions en (m)	Coefficient d'absorption moyen α
Salle ₁ : 8m x 8m x 2,7m	$\alpha_1 = 0,04$
Salle ₂ : 5m x 5m x 2,7m	$\alpha_2 = 0,04$
Salle ₃ : 15m x 12m x 3m	$\alpha_3 = 0,06$

2- On attribue un temps de réverbération important à un local de grandes dimensions. Est-ce judicieux ?

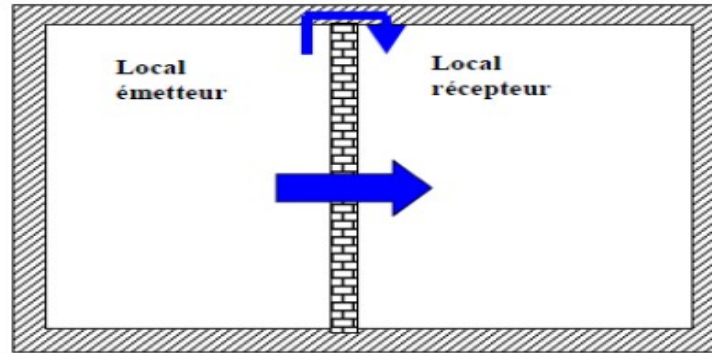


	Salle 1	Salle 2	Salle 3
Dimensions en (m)	8m x 8m x 2,7m	5m x 5m x 2,7m	15m x 12m x 3m
Coefficient d'absorption α	$\alpha_1 = 0,04$	$\alpha_1 = 0,04$	$\alpha_1 = 0,06$
Volume V (m ³)	172,8	67,5	540,0
Surface S (m ²)	214,4	104,0	522,0
Surface A : $A = \alpha \times S$	8,6	4,2	31,3
T_r (s)	3,2	2,6	2,8

2- On remarque qu'il est difficile de prévoir le temps de réverbération pour une salle suivant leurs dimensions.

Exercice

On considère deux locaux (deux salles de classes) de dimensions identiques 6,00m x 7,00m x 4,00m séparés par une cloison de surface 6,00 x 4,00m. Les murs et le plafond sont en plâtre peint, le sol en dalles thermoplastiques. Les vitrages ont une superficie de 6,00m² et la porte en bois de surface 2m². L'occupation normale est de trente enfants et un adulte.



1- Calculer le temps de réverbération d'un local occupé pour l'octave 1000Hz.

2- On veut ramener à 0,6 le temps de réverbération en disposant des dalles acoustiques de coefficient d'absorption $\alpha = 0,73$ dans l'octave 1000 Hz.

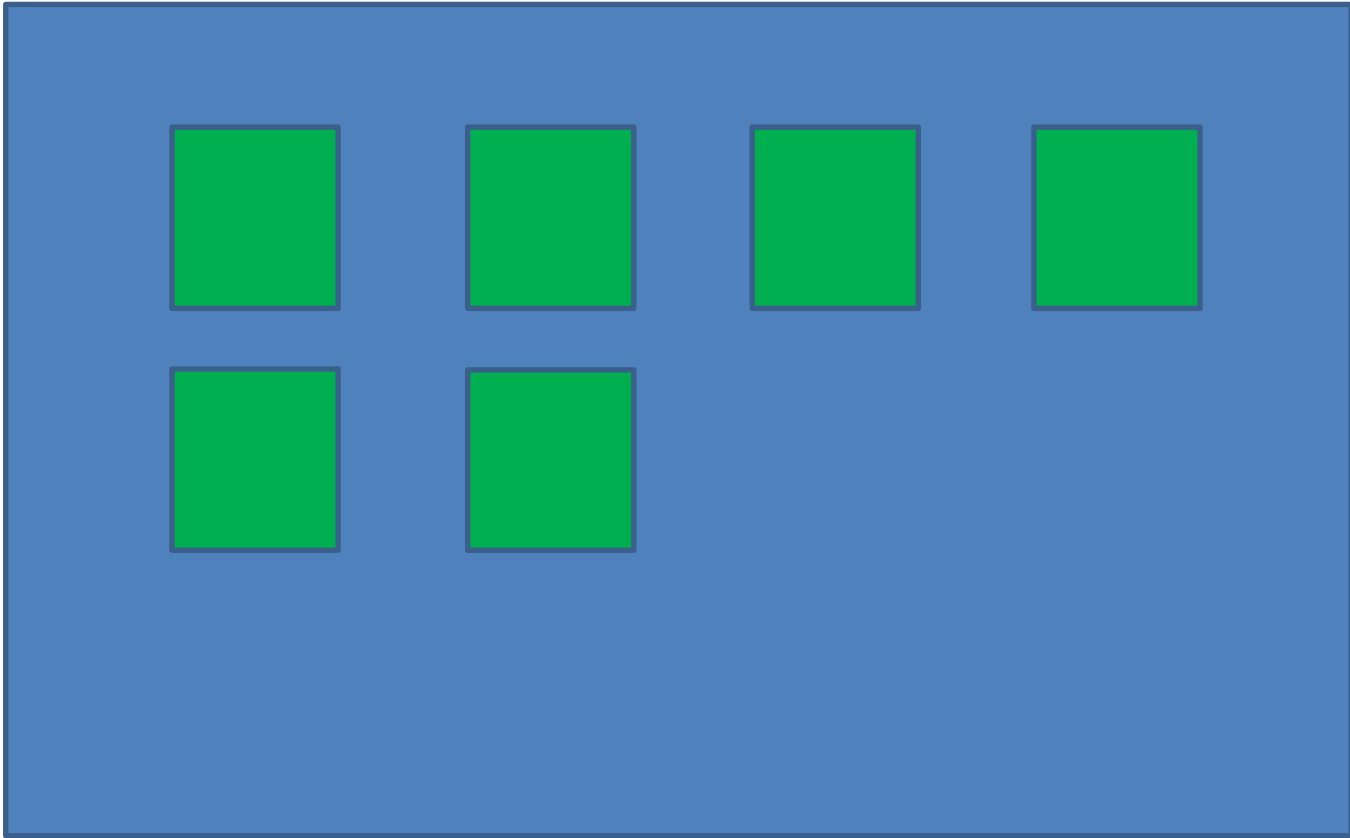
a- Quel est l'intérêt de cette diminution ?

b- Sur quelle surface proposez-vous de fixer les dalles acoustiques ?

c- Quelle superficie de dalles faut-il installer ?

3- L'indice d'affaiblissement acoustique de la cloison séparative est égal à 30dB pour l'octave 1000 Hz. Calculer les isolements acoustiques brut et normalisé entre les deux locaux, avant et après traitement acoustique.

4- Si on installe une porte de communication de surface 2,00m² et de coefficient de transmission $\tau = 0,01$ dans la cloison séparative, quelle sera la nouvelle valeur de l'isolement brut ? (On se place dans le cas où le traitement acoustique a été effectué).



3- L'isolement brut entre les deux locaux est donné par l'expression suivante :

$$D_b = R + 10 \log \left(\frac{A_2}{S_p} \right)$$

■ Avant traitement :

$$D_b = R + 10 \log \left(\frac{A}{S_p} \right) = 30 + 10 \log \left(\frac{19,22}{24} \right) = 29 \text{dB à } 1000 \text{ Hz}$$

■ Après traitement :

$$D_b = R + 10 \log \left(\frac{A}{S_p} \right) = 30 + 10 \log \left(\frac{44,80}{24} \right) = 32,7 \text{dB à } 1000 \text{ Hz}$$

L'isolement normalisé entre les deux locaux est donné par l'expression suivante :

$$D_n = D_b + 10 \log \frac{T_r}{T_0} \text{ avec : } T_0 = 0,5 \text{ s}$$

■ Avant traitement :

$$D_n = D_b + 10 \log \frac{T_r}{T_0} = 29 + 10 \log \frac{1,4}{0,5} = 33,47 \text{dB à } 1000 \text{ Hz}$$

■ Après traitement :

$$D_n = D_b + 10 \log \frac{T_r}{T_0} = 32,7 + 10 \log \frac{0,6}{0,5} = 33,49 \text{dB à } 1000 \text{ Hz}$$

4- L'indice d'affaiblissement acoustique de la cloison séparative est égal à 30dB :

$$R_c = 10 \log \frac{1}{\tau_c} = 30\text{dB} \rightarrow \tau_c = 10^{-3}$$

$$\tau_{\text{moy}} = \frac{\tau_c \times S_c + \tau_p \times S_p}{S_c + S_p} = \frac{(10^{-3} \times 22) + (10^{-2} \times 2)}{22 + 2} = 1,75 \cdot 10^{-3}$$

$$\blacktriangleright R_{\text{moy}} = 10 \log \frac{1}{\tau_{\text{moy}}} = 10 \log \frac{1}{1,75 \cdot 10^{-3}} = 27,57\text{dB}$$

L'isolement brut de la cloison séparative est égal :

$$D_b = R + 10 \log \left(\frac{A_2}{S_p} \right) \text{ avec } A_2 = 44,8 - (0,73 \times 2) + (0,09 \times 2) = 43,52\text{m}^2$$

$$\blacktriangleright D_b = R + 10 \log \left(\frac{A_2}{S_p} \right) = 27,57 + 10 \log \frac{43,52}{24} = 30,15\text{dB}$$

