

# Chapitre 3

## Éléments d'acoustique architecturale

### INTENSITE REVERBEREE

► **Généralités**

Lorsque la source sonore se trouve dans un local, l'énergie sonore est réfléchiée sur les parois et vient s'ajouter à l'énergie rayonnée directement par la source ce qui modifie les relations vues au chapitre précédent.

► **Coefficient d'absorption d'un matériau**

On appelle coefficient d'absorption  $\alpha$  d'un matériau, le rapport :

$$\alpha = \frac{\text{énergie absorbée}}{\text{énergie incidente}} \quad (\alpha \text{ est sans dimension})$$

$\alpha$  dépend de la nature du matériau et aussi de l'angle d'incidence et de la fréquence de l'onde incidente sur la paroi ; on se contente le plus souvent de prendre le coefficient moyen du matériau.

► **Coefficient d'absorption moyen d'un local**

Si les parois d'une salle sont constituées de n surfaces ( $S_1, S_2, S_3, \dots$ ) recouvertes de matériaux différents de coefficients d'absorption respectifs ( $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots$ ), le coefficient d'absorption moyen de la salle est :

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3 + \dots}{S_1 + S_2 + S_3 + \dots} \quad (\bar{\alpha} \text{ est sans dimension})$$

► **Surface d'absorption équivalente**

Le terme  $A = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3 + \dots$  a la dimension d'une surface ; on l'appelle « surface d'absorption équivalente » du local ; en effet, la surface A serait la surface parfaitement absorbante (coefficient d'absorption égal à 1) qui a globalement la même absorption que le local de surface  $S = S_1 + S_2 + S_3 + \dots$  :

$$A \times 1 = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3 + \dots = \bar{\alpha} (S_1 + S_2 + S_3 + \dots)$$

$$A = \sum_i \alpha_i S_i \quad A \text{ est parfois exprimée en « m}^2 \text{ Sabine »}$$

*Remarque 1 :* Pour un local de grandes dimensions et de volume V, la surface équivalente d'absorption est enrichie d'un terme supplémentaire dû à l'atténuation de l'air.

$$A = \sum_i \alpha_i S_i + 4 m V \quad m : \text{constante d'atténuation de l'air}$$

$\bar{\alpha}$  dépend de l'état d'occupation ou d'agencement du local puisque toutes les surfaces contenues dans ce local entrent en jeu dans le calcul de  $\bar{\alpha}$  :

Exemples :  $\bar{\alpha} \cong 0,05$  pour un local nu

$\bar{\alpha} \cong 0,3$  pour un local bien meublé

*Remarque* : A est parfois appelée « équivalent de fenêtre ouverte ». En effet, pour une fenêtre ouverte, on a en quelque sorte une « absorption » totale par transmission et, par conséquent, un coefficient d'absorption équivalent de 1 !

► **Intensité sonore globale**

En chaque point du local, l'intensité sonore globale I est la somme de deux intensités sonores :

◆ L'intensité  $I_d$  rayonnée directement par la source de directivité Q :

$$I_d = \frac{QP}{4\pi d^2} \quad (\text{intensité relative au « champ direct »})$$

◆ L'intensité sonore réverbérée qui, elle ne dépend pas de la distance d ; on montre qu'elle est à peu près égale à :

$$I_r = \frac{4P(S-A)}{SA} = \frac{4P}{R_L}$$

C'est l'intensité relative au champ réverbéré souvent appelé « champ diffus »

S : surface totale des parois ( $m^2$ )

$R_L$  : Constante d'absorption du local ( $m^2$ ) ;  $R_L = \frac{SA}{S-A}$

$$R_L = \frac{SA}{S-A} \approx \frac{S\bar{\alpha}}{(1-\bar{\alpha})} \quad \text{si on néglige le terme d'atténuation dû à l'air.}$$

L'intensité sonore résultante s'écrit :

$$I = \frac{QP}{4\pi d^2} + \frac{4P}{R_L}$$

Le niveau sonore dans le local est alors égal à :  $L_1 = 10 \log \frac{1}{I_0} \left( \frac{QP}{4\pi d^2} + \frac{4P}{R_L} \right)$

soit :  $L_1 = L_w + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi d^2} + \frac{4}{R_L} \right)$  avec :  $L_w = 10 \log \frac{P}{P_0}$  (niveau de puissance de la source)

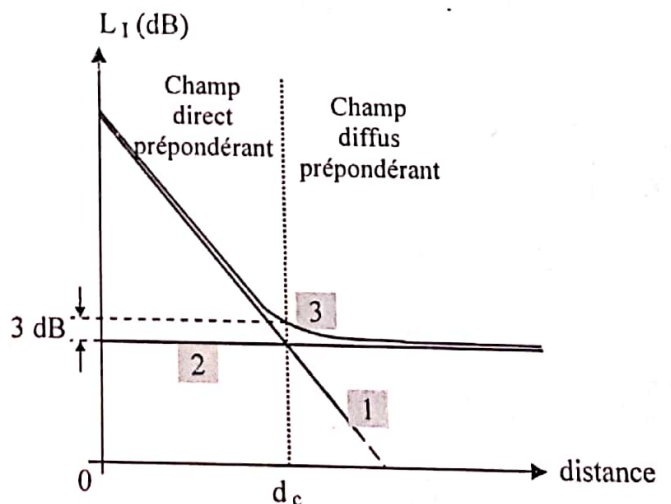
*Remarque* : Il est intéressant de connaître, pour chaque local, la distance critique  $d_c$  (ou « rayon acoustique » du local) pour laquelle l'intensité directe est égale à l'intensité réverbérée :

$$\frac{Q}{4\pi d_c^2} = \frac{4}{R_L} \quad \text{soit : } d_c = \sqrt{\frac{QR_L}{16\pi}}$$

Au-delà de cette distance, l'intensité sonore résultante provient essentiellement de la réverbération ; en-deçà, le son direct est prépondérant.

*Légende* :

- 1 : niveau sonore dû au champ direct
- 2 : niveau sonore dû au champ diffus
- 3 : niveau sonore résultant

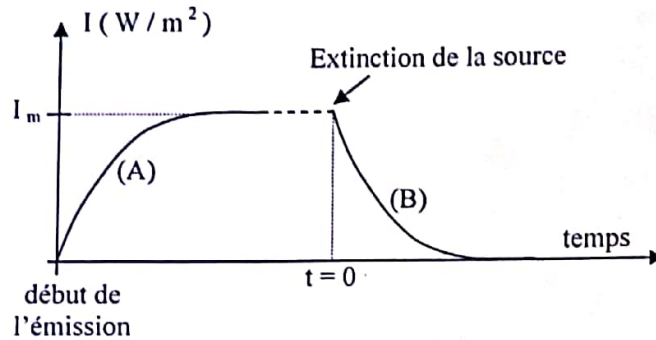


## TEMPS DE REVERBERATION

Le coefficient d'absorption moyen d'un local est souvent déterminé de façon indirecte en mesurant le temps de réverbération de celui-ci.

### ► Evolution temporelle de l'intensité sonore après arrêt de l'émission

Dans un local de forme régulière et ayant une absorption uniforme, l'établissement de l'intensité sonore (A) comme sa décroissance après arrêt de la source (B) obéissent à des lois exponentielles :



*Légende :*

(A) : l'intensité sonore s'établit de façon exponentielle, après le début de l'émission, en suivant un régime transitoire puis un régime permanent.

(B) L'intensité sonore, décroît de façon exponentielle, après l'extinction de la source sonore.

### ► Définition

On appelle « temps de réverbération » du local la durée  $T_r$  nécessaire pour que l'intensité sonore diminue de 60 dB après extinction de la source.

*Remarque :* Le temps de réverbération est noté  $RT_{60}$ , dans les publications anglo-saxonnes (RT pour **R**everberation **T**ime)

### ► Théorie de Sabine

Si le coefficient d'absorption moyen de la salle est faible ( $\bar{\alpha} < 0,2$ ), le temps de réverbération s'écrit :

$$T_r = 0,16 \frac{V}{S \bar{\alpha}} \cong 0,16 \frac{V}{A} \quad T_r \text{ en s}$$

$S$  : surface totale des parois ( $m^2$ ) ;  $V$  : volume du local ( $m^3$ )

$A = S \bar{\alpha}$  : surface d'absorption équivalente ( $m^2$ ) (si on admet qu'il n'y a pas d'atténuation due à l'air)

$\bar{\alpha}$  : facteur d'absorption moyen du local (sans unité)

### ► Remarques sur la formule de Sabine

- On constate que le temps de réverbération est indépendant de la position de la source dans le local et de la position d'écoute.

- La réverbération est utile lorsqu'elle contribue à renforcer l'intensité acoustique et nuisible quand elle masque des sons successifs ! Selon la destination du local, on sera donc amené à augmenter ou diminuer ce temps de réverbération en jouant sur la constante d'absorption  $R_L$  du local.



Quelques ordres de grandeur :

	Salle de concert	Pièce vide	Pièce meublée	Grand hall
$T_r$ (en s)	0,8 à 1,5	2 à 2,5	0,5	8 à 12 s

- La réverbération dépend, en fait, du timbre du son utilisé. Il est donc fréquent de relever le temps de réverbération par bandes d'octave pour établir le temps de réverbération global.
- Il existe des abaques (établies de façon empirique) pour déterminer le temps de réverbération optimal d'un local en fonction de son volume et de son utilisation (salle de concert, grand hall,...). Ce critère est toutefois insuffisant pour traduire la qualité acoustique du local.
- Si le local est vaste, on ne peut plus négliger l'atténuation due à l'air ; dans ce cas, la surface d'absorption équivalente et le temps de réverbération s'écrivent :

$$A = \sum_i \alpha_i S_i + 4 m V \quad \text{et} \quad T_R = 0,16 \frac{V}{\sum_i \alpha_i S_i + 4 m V}$$

► Détermination du coefficient d'absorption  $\alpha_m$  d'un matériau

L'une des méthodes consiste à introduire une certaine surface  $S_m$  du matériau étudié dans une chambre réverbérante de surface réfléchissante  $S$ .

L'introduction du matériau modifie le temps de réverbération du local qui passe de  $T_0$  (avant l'introduction du matériau) à  $T_1$  (après introduction du matériau).

On a :  $T_0 = 0,16 \frac{V}{S \bar{\alpha}}$  et  $T_1 = 0,16 \frac{V}{(S - S_m) \bar{\alpha} + S_m \alpha_m}$

L'élimination de  $\bar{\alpha}$  entre les deux relations permet d'obtenir le coefficient d'absorption moyen  $\alpha_m$  du matériau.

Quelques ordres de grandeur pour les coefficients moyens :  $\alpha_m$  (marbre)  $\cong 0,01$  ;  $\alpha_m$  (béton)  $\cong 0,03$

Remarque : Le coefficient d'absorption d'un matériau dépend, en réalité, de la fréquence de l'onde sonore (exemple ci-dessous). Il faudra en tenir compte pour réaliser une étude plus fine.

Bandes d'octave	125	250	500	1000	2000	4000
Coefficient d'absorption de la laine de verre	0,11	0,19	0,41	0,54	0,60	0,75

► Autre expression du temps de réverbération

Si la salle a un coefficient d'absorption important, la formule de Sabine donne de mauvais résultats et il est préférable d'employer la relation empirique d'Eyring pour calculer le temps de réverbération :

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

Remarques :

- Pour  $\alpha \rightarrow 0$ , on a :  $\ln(1 - \alpha) \rightarrow 0$  et on a un temps de réverbération qui tend vers l'infini, ce qui est cohérent.
- Pour  $\alpha \rightarrow \varepsilon$  (valeur faible), on a :  $\ln(1 - \varepsilon) \cong -\varepsilon$  et on retrouve la formule de Sabine :  $T_r \rightarrow 0,16 \frac{V}{S \bar{\alpha}}$
- Pour  $\alpha \rightarrow 1$ , on a  $\ln(1 - \alpha) \rightarrow 0$  et le temps de réverbération tend vers zéro ce qui est cohérent, également.