



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider-Biskra Faculté des Sciences et de la technologie Département : Architecture



Année universitaire : 2019—2020

1^{ère} année master en Architecture

Matière : Equipement 2 Acoustique du bâtiment

Enseignant : Dr MEZERDI Toufik

Cour **N° 08: Propagation du son dans l'espace clos**



Propagation du son dans l'espace clos



3. PROPAGATION EN ESPACE CLOS

Lorsqu'une source sonore de puissance W est disposée à l'intérieur d'un milieu fermé (local par exemple) en plus de l'énergie rayonnée directement de la source vers un point d'observation R , vient s'ajouter une énergie réfléchie une ou plusieurs fois par les parois (Figure 3.1) .

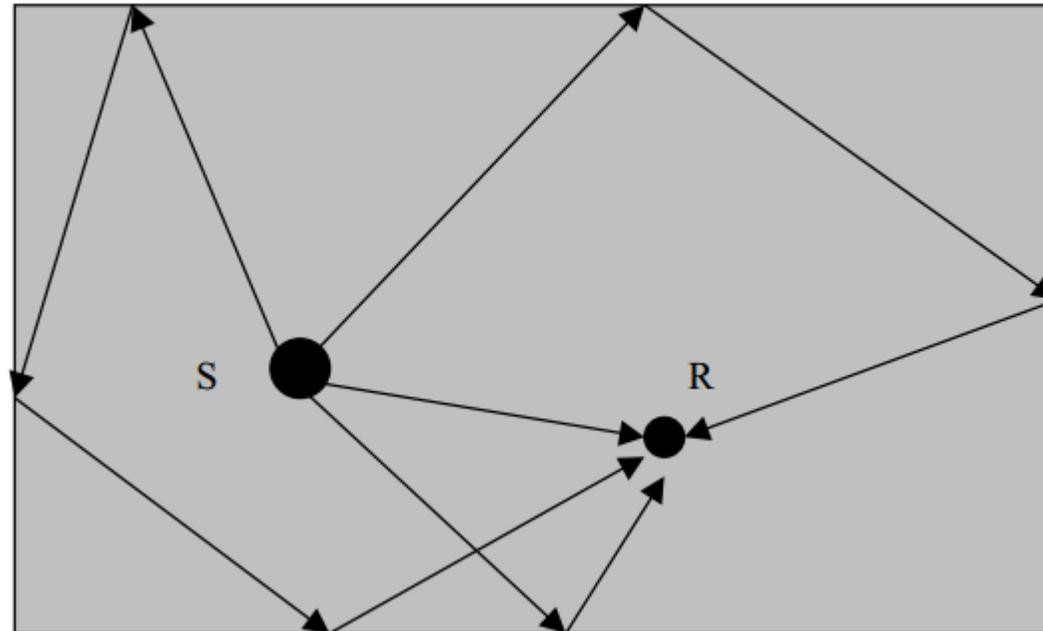


Figure 3.1 : Réflexion en espace clos



Propagation du son dans l'espace clos

En tout point de l'espace fermé, on a superposition :

- d'une intensité directe I_d :

$$I_d = Q \frac{W}{4\pi r^2} \quad [\text{W/m}^2]$$

- d'une intensité réverbérée I_r :

$$I_r = \frac{4 W(1-\bar{\alpha})}{S_t \cdot \bar{\alpha}} = \frac{4 W}{CL} \quad [\text{W/m}^2]$$

$$CL = \frac{S_t \cdot \bar{\alpha}}{1-\bar{\alpha}} \quad [\text{m}^2], \text{ CL est appelé constante du local.}$$

cette dernière dépend essentiellement du coefficient d'absorption moyen $\bar{\alpha}$ des parois (S_t = surface totale des parois y compris plafond et plancher).

La démonstration de cette relation est présentée ci-dessous.



Propagation du son dans l'espace clos

3.1. Evaluation de l'intensité réverbérée.

Ne considérons que l'énergie sonore réfléchie par les parois, appelons D_r l'énergie contenue en moyenne par unité de volume du local exprimée en J/m^3 .

Sachant que l'onde se propage à une vitesse c et que I_r est la puissance traversant une surface unité, on a :

$$D_r = \frac{I_r}{c} \text{ (J/m}^3\text{)}$$

Par ailleurs, statistiquement on peut montrer que le libre parcours moyen d'une onde, c'est à dire la distance moyenne (l) parcourue par l'onde entre 2 réflexions successives est :

$$l = \frac{4V}{S_t}$$

V volume du local
 S_t surface totale des parois

Par seconde l'onde subit donc n réflexions :

$$n = \frac{c}{l} = \frac{c S_t}{4V}$$



Propagation du son dans l'espace clos

A chaque réflexion une fraction $\bar{\alpha}$ de l'énergie est absorbée, de sorte que la puissance absorbée par les parois est :

$$W_a = D_r V n \bar{\alpha}$$

La puissance fournie au local après une première réflexion est : $W (1-\bar{\alpha})$

A l'équilibre énergétique, cette puissance réfléchiée après la première réflexion doit être entièrement absorbée par les parois.

$$D_r V n \bar{\alpha} = W (1-\bar{\alpha})$$

L'intensité réverbérée due aux ondes réfléchies est alors :

$$I_r = \frac{4W(1-\bar{\alpha})}{S_r \bar{\alpha}} \quad (3.1)$$

3.2. Niveau sonore en espace clos

A tout instant et en tout point du local on a superposition de l'intensité directe et réfléchiée :

$$I = I_r + I_d \text{ soit } I = W \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{CL} \right)$$

Le niveau d'intensité s'écrit donc :



Propagation du son dans l'espace clos

$$L_1 = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{W}{W_0} \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{CL} \right) \cdot \frac{W_0}{I_0}$$

Avec $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ intensité de référence et $W_0 = 10^{-12} \text{ W}$ puissance de référence, soit :

$$L_1 = L_w + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{CL} \right) \quad (3.2)$$

La figure 3.2 montre la variation du niveau sonore en espace clos en fonction de la distance par rapport au niveau que l'on obtiendrait en espace libre ($R_1 = \infty$) pour différentes valeurs de constantes de salle.

On observe par exemple qu'à deux mètres de la source pour une pièce de constante $R_1 = 50\text{m}^2$ le niveau sonore est de 7 dB plus élevé que le niveau mesuré en espace libre.

Remarque :

Au-delà d'une certaine distance, la quantité $\frac{Q}{4\pi r^2}$ devient négligeable devant le terme $\frac{4}{CL}$ de

sorte que le niveau sonore ne varie pratiquement plus avec la distance;



Propagation du son dans l'espace clos

On dit alors que l'on est dans le champ réverbéré du local et le niveau prend l'expression :

$$L_i = L_w + 10 \log \frac{4}{CL} \text{ (dB)}.$$

Par ailleurs le niveau sonore dans le champ réverbéré sera d'autant plus élevé que CL sera faible, c'est à dire que l'absorption des parois sera petite.

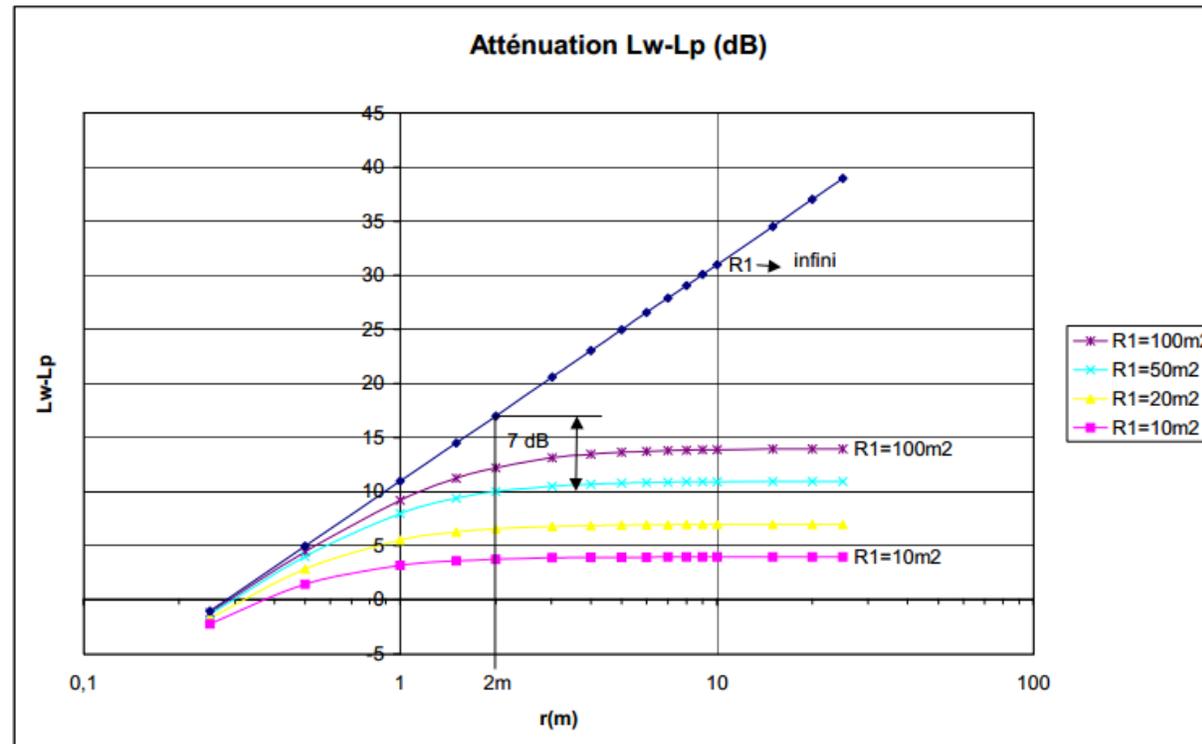


Figure 3.2 : Variation du niveau sonore en espace clos en fonction de la distance à la source.



Propagation du son dans l'espace clos



3.3. Notion de réverbération

Lorsque l'on interrompt l'émission d'une source le son décroît plus ou moins rapidement selon que les parois sont absorbantes ou réfléchissantes. On parle fréquemment de la "sonorité" ou de la persistance sonore d'une salle.

Pour les locaux à parois très absorbantes, la décroissance est rapide, on dit encore qu'ils sont "sourds" et procure à l'auditeur une impression désagréable d'étouffement.

A l'opposé, dans un local à parois très réfléchissantes, la décroissance du son est lente et nuit à l'intelligibilité de la parole notamment pour des grandes salles ou l'interférence entre des ondes directes et réfléchies peuvent engendrer des échos. Le phénomène d'écho est du à la différence de parcours entre l'onde directe et l'onde réfléchie. Il se produit lorsque l'intervalle de temps qui sépare l'arrivée des deux ondes au même point est supérieur à 0,1 seconde.

CROISSANCE ET DECROISSANCE SONORE

Afin de comprendre le mécanisme de croissance sonore lors de la mise en fonctionnement d'une source où de décroissance lors de sa coupure, considérons la propagation sonore unidirectionnelle dans un tube de longueur l , de petit diamètre par rapport à la longueur d'onde

(hypothèse des ondes planes), fermé à l'une de ses extrémités par une membrane vibrante et à l'autre par une terminaison. Les deux extrémités sont supposées avoir le même coefficient d'absorption α_0 (figure 3.3)



Propagation du son dans l'espace clos



Figure 3.3 : Propagation unidirectionnelle dans un tube.

La source émet une puissance W à travers la section S . Le temps $t = 0$ correspond à la date d'émission de la source. A cet instant l'énergie moyenne contenue dans le tube par unité de volume est :

$$D_0 = \frac{W}{cS} = \frac{I}{c} \quad (J/m^3)$$

c : vitesse du son

I : intensité moyenne dans le tube.

Au temps $t = \frac{l}{2c}$, le front d'onde se situe au milieu du tube, il n'y a pas eu de réflexion sur les



Propagation du son dans l'espace clos



terminaisons, la densité d'énergie est $D_0 = \frac{W}{Sc}$

Au temps $t = \frac{3l}{2c}$, le front d'onde est à nouveau au milieu du tube après avoir subi une réflexion sur la terminaison. La densité d'énergie résultant de l'onde aller et de l'onde réfléchie est :

$$D_1 = D_0 + D_0 (1 - \alpha_0)$$

Au temps $t = \frac{5l}{2c}$, le front d'onde est toujours au milieu du tube, mais après avoir subi une deuxième réflexion (côté émission). La densité est :

$$D_2 = D_0 [1 + (1 - \alpha_0) + (1 - \alpha_0)^2]$$

De manière récurrente la densité d'énergie au temps $t = \frac{(2n+1)l}{2c}$ après n réflexions s'écrit:

$$D_n = D_0 \cdot \sum_{i=0}^n (1 - \alpha_0)^i$$

$\sum_{i=0}^n (1 - \alpha_0)^i$ est la somme d'une progression géométrique de raison $(1 - \alpha_0) < 1$, égale à $\frac{1}{\alpha_0}$ quand n est grand.



Propagation du son dans l'espace clos

En régime établi, la densité dans le tube est donc $D' = \frac{D_0}{\alpha_0}$. Elle représente en réalité la somme des deux termes.

$$D' = D_0 + D_r \text{ avec } D_r = D_0 \frac{(1 - \alpha_0)}{\alpha_0}$$

D_0 = densité d'énergie en provenance directe de la source $\left(\frac{W}{cS}\right)$

D_r = densité d'énergie réverbérée résultant des réflexions multiples sur les terminaisons.

$D_r = \frac{W}{c} \frac{(1 - \alpha_0)}{S\alpha_0}$ avec $CL = \frac{S\alpha_0}{1 - \alpha_0}$ S aire totale d'absorption , CL est appelé constante du volume.

Considérons maintenant l'interruption de la source au temps $t = 0$

- Au temps $t = 0$, $D' = \frac{D_0}{\alpha_0}$

- Au temps $t = \frac{l}{2c}$, l'onde est au milieu du tube, a subi une absorption et a une densité d'énergie

$$D_1 = \frac{D_0}{\alpha_n} (1 - \alpha_0)$$



Propagation du son dans l'espace clos

- Au temps $t = \frac{3l}{2c}$, l'onde a subi une deuxième absorption :

$$D_2 = \frac{D_0}{\alpha_0} (1 - \alpha_0)^2$$

En poursuivant ce raisonnement après la $n^{\text{ième}}$ réflexion c'est-à-dire au temps $t = \frac{nl}{2c}$, on en déduit :

$$D_n = \frac{D_0}{\alpha_0} (1 - \alpha_0)^n \quad (3.3)$$

La figure 3.4 montre la façon dont l'énergie décroît au cours du temps.

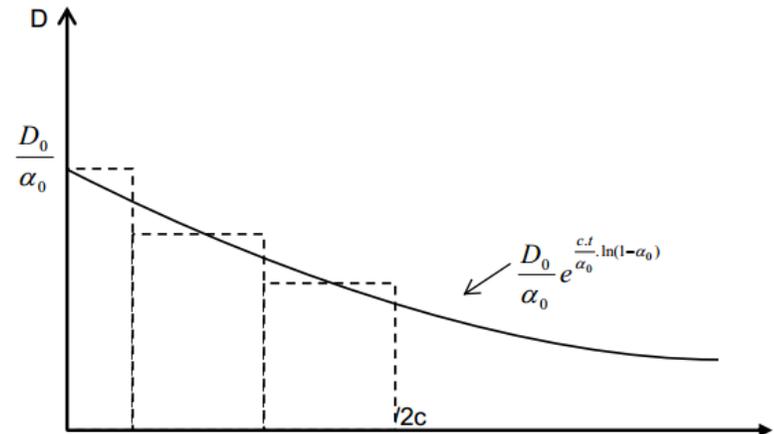


Figure 3.4 : Loi de décroissance sonore dans un tube.



Propagation du son dans l'espace clos

La longueur l représente ici la distance parcourue par l'onde entre 2 réflexions successives. Au bout d'un temps t après interruption de la source, l'onde aura subi un nombre de réflexions n :

$$n = \frac{ct}{l}$$

En exprimant n en fonction de t dans l'expression 3.3, il vient : $D(t) = \frac{D_0}{\alpha_0} (1 - \alpha_0)^{\frac{ct}{l}} = \frac{I(t)}{c}$

$$D(t) = \frac{D_0}{\alpha_0} e^{\frac{ct}{l} \ln(1 - \alpha_0)} \tag{3.4}$$

L'intensité acoustique au temps t s'écrit alors :

$$I(t) = I_{initial} \cdot e^{\frac{ct}{l} \ln(1 - \alpha_0)} \quad \text{avec } I_{initial} = \frac{D_0 \cdot c}{\alpha_0}$$

On constate d'après l'expression 3.3 que le signal décroît de manière exponentielle, et que cette décroissance est d'autant plus rapide que l'absorption des terminaisons est élevée.

où encore sachant que $I(t) = \frac{p(t)}{p_0 \cdot c}$, avec $p(t) = p(t=0) e^{\frac{ct}{2l} \ln(1 - \alpha_0)}$



Propagation du son dans l'espace clos

on posera $p(t) = p(t=0)e^{-knt}$ avec $k_n = \frac{c}{2l} [-\ln(1-\alpha_0)]$ (s^{-1})

k_n est la constante de décroissance de la pression dans le tube.

Pour caractériser la persistance sonore en espace clos, on définit une durée de réverbération. La durée de réverbération t_r représente le temps au bout duquel le niveau sonore a subi une décroissance de 60 dB à partir de l'instant où la source est interrompue.

De l'expression (2.12) on tire :

$$L_1(t) = L_1(t=0) + 4,34 \frac{ct}{l} \ln(1-\alpha_0)$$

$$\text{d'où : } L_1(t=0) - L_1(T_r) = 60 \text{ dB} = -\frac{4,34c}{l} \cdot T_r \ln(1-\alpha_0)$$

$$\text{soit : } T_r = \frac{60l}{-4,34 \cdot c \cdot \ln(1-\alpha_0)} \quad (\text{seconde}) \quad (3.5)$$

Cette formule n'est valable qu'en propagation unidirectionnelle. Dans le cas plus général d'un local où la propagation s'effectue dans toutes les directions de l'espace, le libre parcours moyen l dépend de la géométrie (voir paragraphe 2.2.1.) et s'écrit :

$$l = \frac{4V}{S_t} \quad \text{avec } V : \text{volume du local et } S_t : \text{surface de toutes les parois du local.}$$



Propagation du son dans l'espace clos

Le temps de réverbération s'écrit alors :

$$T_r = \frac{0,161.V}{S_t \cdot [-\ln(1 - \alpha_0)]} \quad (\text{seconde formule d'Eyring}) \quad (3.6)$$

α_0 représente le coefficient d'absorption moyen des parois : $\alpha_0 = \frac{\sum_i S_i \alpha_i}{\sum_i S_i}$

α_i et S_i sont les facteurs d'absorption et les surfaces des différents matériaux absorbants recouvrant les parois du local.

D'autres relations sont parfois utilisées pour calculer le temps de réverbération d'un local.

Telle celle de SABINE.

$$T_r = \frac{0,161.V}{S_t \alpha_s} \quad (\text{seconde}) \quad (3.7)$$

Avec V = volume du local (m^3) et α_s : coefficient d'absorption moyen de Sabine.

Remarque : Les relations (3.6) et (3.7) conduiront à une même valeur du temps de réverbération si l'on a entre les coefficients α_0 et α_s l'égalité suivante :

$$\alpha_s = -\ln(1 - \alpha_0) \quad (3.8)$$



Propagation du son dans l'espace clos

On observe qu'en faisant varier α_0 de 0 à 1 le coefficient α_s varie de 0 à ∞ .
Le coefficient de Sabine n'est donc pas à proprement parlé un coefficient d'absorption puisqu'il peut prendre des valeurs supérieures à 1.

Toutefois, c'est souvent le coefficient de Sabine d'un matériau α_s qui sera donné et que l'on atteindra par la démarche exposé au paragraphe 3.4.

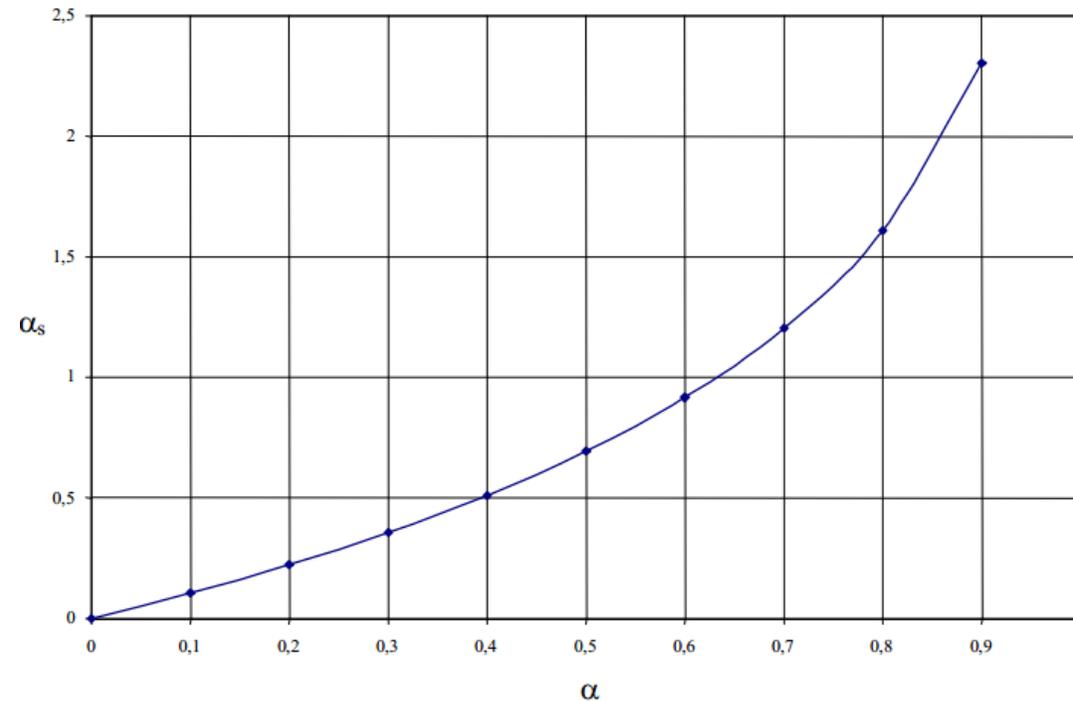


Figure 3.5 : Relation entre coefficient d'absorption exact α et coefficient d'absorption Sabine α_s .



Propagation du son dans l'espace clos

En pratique, si l'on connaît les coefficients d'absorption de Sabine des matériaux mis en œuvre sur les parois d'un local, on utilise la formule de Sabine pour calculer le temps de réverbération du local. Au contraire si l'on connaît les coefficients d'absorption réels, le temps de réverbération du local sera alors obtenu à l'aide de la formule d'Eyring.

3.4- Mesure d'un coefficient de Sabine α_s

On utilise à cet effet une salle à géométrie complexe dont les parois sont très réfléchissantes. On peut ainsi considérer que le champ sonore résultant de l'émission d'une source S est diffus.

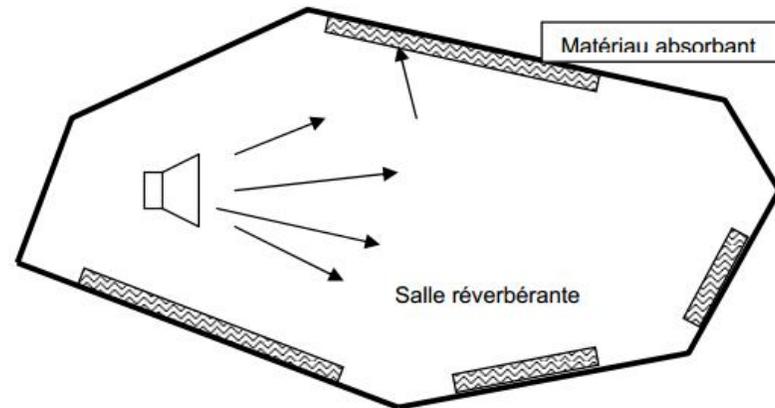


Figure 3.6



Propagation du son dans l'espace clos

Le coefficient d'absorption moyen des parois est de l'ordre de 0,04 à toutes fréquences. Pour des salles réverbérantes de volume $\cong 100 \text{ m}^3$ les temps de réverbération sont de l'ordre de 3 à 4 secondes.

On dispose ensuite sur les parois de la chambre réverbérante une certaine surface de matériau. On mesure alors en différents points de la salle la nouvelle valeur du temps de réverbération et ceci pour différentes valeurs de la fréquence émise par la source.

On procède ensuite à l'évaluation du temps de réverbération moyen pour chaque fréquence à partir des résultats recueillis aux différents points de mesure.

Pour la salle nue le temps de réverbération à une fréquence f est Tr_i avec $\text{Tr}_i = \frac{0,161V}{S_i \cdot \alpha_i}$.

$S_i \cdot \alpha_i$: Aire d'absorption équivalente de la chambre réverbérante.

Pour la salle en partie recouverte du matériau étudié, le temps de réverbération à la même fréquence f s'écrit :

$$\text{Tr}_f = \frac{0,161.V}{(S_t - S_m)\alpha_i + S_m\alpha_s}$$

S_m : surface de matériau disposé sur les parois de la chambre réverbérante.



Propagation du son dans l'espace clos

On en déduit le coefficient de Sabine du matériau.

$$\alpha_s = \alpha_i + \frac{0,161V}{S_m} \left(\frac{1}{Tr_f} - \frac{1}{Tr_i} \right) \quad (3.9)$$

3.5 Traitement acoustique des salles

Le traitement acoustique d'une salle consiste à lui donner une forme et une durée de réverbération favorables à une bonne diffusion et écoute sonore. On obtiendra une durée de réverbération optimale en mettant en œuvre sur les parois de la salle des matériaux de coefficients d'absorption appropriés. Ce traitement est précédé en général d'une étude comportant plusieurs étapes que nous allons analyser.

3.5.1. Etude de la forme d'une salle

Pour déterminer la forme optimale de la salle à traiter, l'acousticien dispose de plusieurs outils. Pour un avant projet sommaire, il peut utiliser l'épure géométrique. Pour des salles dont l'acoustique est un élément de conception déterminant, il a recours à des logiciels d'acoustique architecturale. Pour des projets de très grande envergure, il est envisageable de valider des choix de conception à l'aide de modèles réduits.



Propagation du son dans l'espace clos



L'épure géométrique

L'épure géométrique consiste, pour un emplacement de la source donné, à étudier le cheminement des rayons sonores. Les points d'impact des rayons réfléchis du premier ordre sont alors déterminés sur la surface représentant le lieu des points d'écoute. Les points d'impact doivent être bien répartis sur cette surface et les différences de trajet entre onde réfléchie et onde directe doivent être les plus courts possibles. Ceci impose parfois de placer des surfaces réfléchissantes proches des sources. L'épure sera utilisée pour étudier la forme du plafond en traçant les rayons issus de la source dans un plan vertical de symétrie de la salle. On peut aussi procéder de la même façon pour étudier la forme des parois verticales en réalisant des tracés analogues dans un plan horizontal. Cette étude présente quelques restrictions :

- elle est limitée à la première réflexion sur les parois
- elle ne prend pas en compte l'absorption des parois, ce qui rend impossible le calcul de l'énergie sonore produite aux différentes réflexions
- elle ne considère pas les effets de diffraction du son sur les obstacles pouvant exister à l'intérieur de la salle.

Logiciel d'Acoustique Architecturale

A partir d'une description de la géométrie 3D de la salle, des propriétés d'absorption des matériaux des parois et de la définition des sources (localisation, niveau de puissance), ces logiciels permettent de déterminer les niveaux de pression dans la salle, les temps de réverbération et les principaux critères caractérisant la qualité acoustique d'une salle (chapitre 3.6).



Propagation du son dans l'espace clos



Les méthodes numériques utilisées sont dérivées d'un algorithme de lancer de rayon. L'onde acoustique est représentée par une série de rayons émis depuis la source et qui sont suivis dans leur multiple réflexion dans le volume de la salle. Chaque rayon apporte sa contribution énergétique sur chaque maille du plan récepteur.

Le modèle réduit

Il sera en général préférable de procéder à une étude sur maquette (échelle 1/10^e à 1/30^e) en laboratoire. On place sur le sol des produits absorbants pour simuler l'absorption des sièges et des occupants de la salle. En un point à l'intérieur de cette maquette, une suite d'impulsions sonores est produite à une fréquence élevée (parfois ultrasonore) pour vérifier des conditions de similitude. Ces impulsions sont captées en différents points et leur forme est observée sur oscilloscope.

Si l'amplitude des impulsions ne varie pas de façon régulière et décroissante en fonction de la distance par rapport à la source, il faut rechercher l'origine du défaut en plaçant ou déplaçant certains éléments absorbants sur les parois, ou bien en corrigeant la forme du local.

3.5.2. Phénomène de résonances liées à la forme

Dans les salles apparaissent des résonances généralement aux basses fréquences. Ceci tient au fait qu'un volume vibre selon des modes propres. Pour une salle rectangulaire les fréquences propres sont déduites de la relation.



Propagation du son dans l'espace clos

$$f_{n,m,p} = \frac{c}{2} \left[\frac{n^2}{l_x^2} + \frac{m^2}{l_y^2} + \frac{p^2}{l_z^2} \right] \quad (3.10)$$

où $c = 343$ m/s à 20°

l_x, l_y, l_z sont les dimensions de la salle et n, m, p des nombres entiers $1, 2, \dots, \infty$

Lorsqu'une source émet un son dont une des composantes à une fréquence égale à celle d'un mode propre, cette composante est mise en relief par rapport aux autres composantes fréquentielles.

La résonance apparaît d'autant plus nettement que le mode propre considéré est écarté des autres modes. Cela ne pourra se produire que dans les basses fréquences et d'autant plus basses que la salle est grande.

La régularité des modes propres sur l'échelle des fréquences sera une condition de bonne acoustique, les dimensions les plus favorables sont données dans le tableau ci-dessous :



Propagation du son dans l'espace clos

l_x/l_z	l_y/l_z
1.223	1.114
1.223	1.076
1.477	1.201
1.435 (1)	1.202 (1)
1.536	1.402
1.610	1.416
1.670	1.412
1.55	1.110
1.863	1.404 (1)
2.112	1.596
2.291	1.811
2.418	1.287
3.28	1.880

(1) rapports considérés comme excellents.

On voit d'après la relation (3.10) que le nombre de modes propres est infini et que les intervalles entre fréquences vont en se resserrant au fur et à mesure que l'on monte dans l'échelle des hauteurs.

Ainsi pour un son émis au voisinage d'un assez grand nombre de fréquences propres, l'énergie vibratoire se répartit de manière uniforme sur les différents modes, de sorte qu'aucun d'entre eux ne prédomine.



Propagation du son dans l'espace clos

3.5.3. Choix des durées de réverbérations optimales

La deuxième phase du traitement consiste à retenir une durée optimale de réverbération.

Dans le cas de salles de volume compris entre 100 et 1.000 M³ l'expérience a montré qu'une valeur optimale du temps de réverbération peut être obtenue de la relation

$$T_{\text{opt}} = 0,5 \sqrt[3]{\frac{V(m^3)}{30}} \text{ (seconde)} \quad (311)$$

Cette durée de réverbération pourra être sujette à variations selon la destination de la salle. Ainsi pour un studio d'enregistrement on aura plutôt tendance à diminuer quelque peu cette valeur. Au contraire pour un auditorium on cherchera à l'accroître légèrement.

On peut tenter aussi dans certains cas de prendre des durées de réverbération différentes selon les fréquences et aussi prendre en compte la destination de la salle. Ces valeurs seront déduites des figures 3.7 et 3.8.



Propagation du son dans l'espace clos

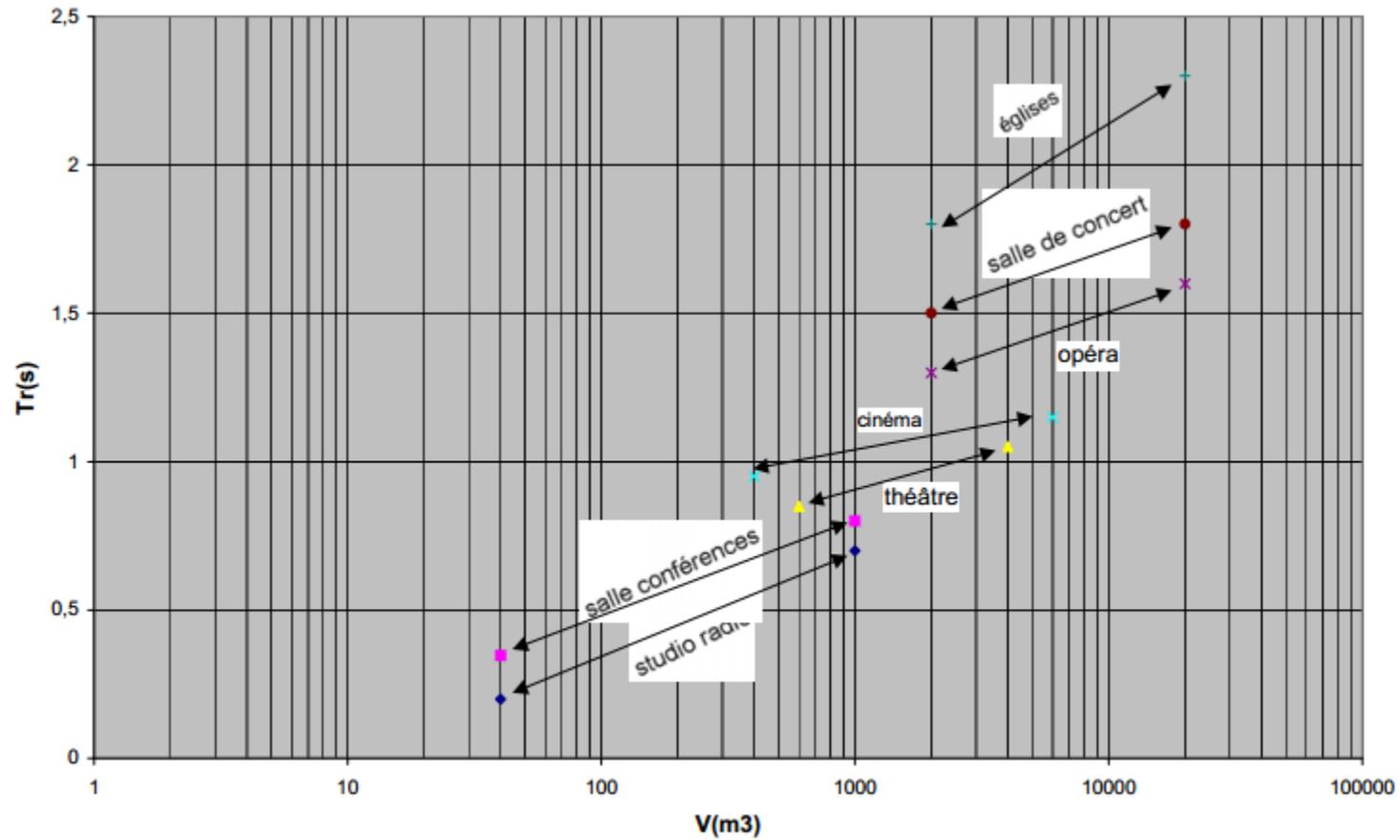


Figure 3.7 : Temps de réverbération optimale aux fréquences moyennes (500-1000Hz)



Propagation du son dans l'espace clos

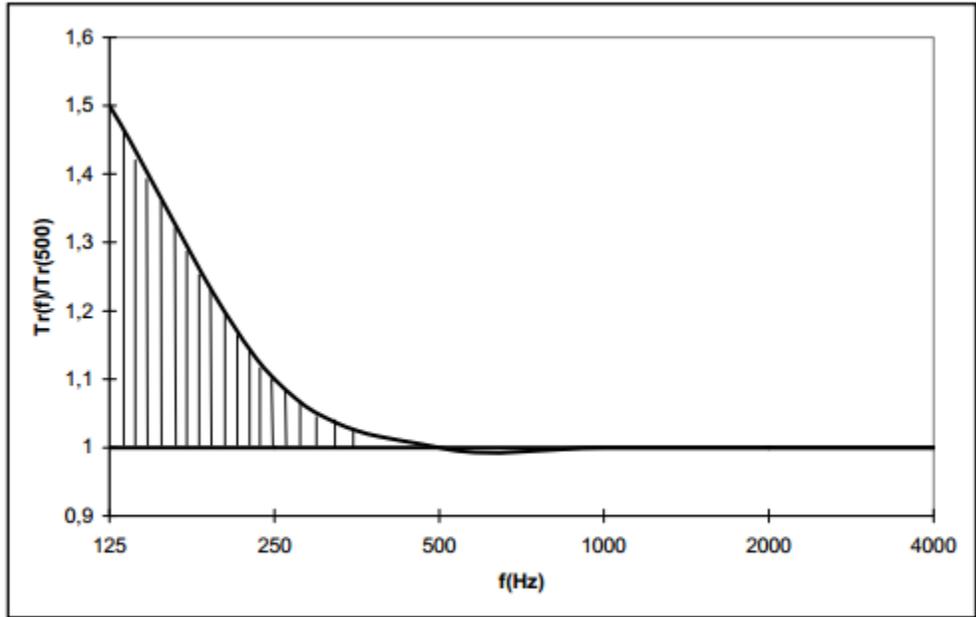


Figure 3.8 : Variation souhaitée du temps de réverbération par rapport à la valeur à 500 Hz.



Propagation du son dans l'espace clos



3.5.4. Choix des matériaux absorbants

Du choix des matériaux mis en œuvre sur les diverses parois dépend la qualité du traitement de la salle.

Si l'on prend différents types de matériaux dont les absorptions se complètent, le traitement sera plus facile à trouver et l'absorption sera plus régulière à toutes les fréquences audibles.

On classe les matériaux en trois catégories :

- matériaux fibreux
- panneaux fléchissants
- résonateur

Pour les locaux de logements courants normalement meublés le temps de réverbération est de l'ordre de 0.50 à toutes fréquences.

Ce qui se traduit par une constante du temps de réverbération au delà de 500 Hz et par un accroissement dans les graves.

Les matériaux fibreux ou poreux

Ce sont des matériaux constitués de pores ouverts : laines de verre, feutres, moquettes, mousses. Une partie des ondes acoustiques incidentes est absorbée par ces pores. Ils absorbent préférentiellement aux fréquences élevées (200 à 4000Hz).



Propagation du son dans l'espace clos

Les panneaux fléchissants

Ce sont des plaques de faible épaisseur montées en membrane sur des liteaux fixés sur un support rigide (et massif), un mur porteur par exemple.

Ces membranes ont des fréquences f_0 de

$$\text{résonance souvent faibles } f_0 = \frac{600}{\sqrt{md}}$$

m = masse surfacique de la membrane (Kg/m^2)

d = épaisseur de la lame d'air en cm.

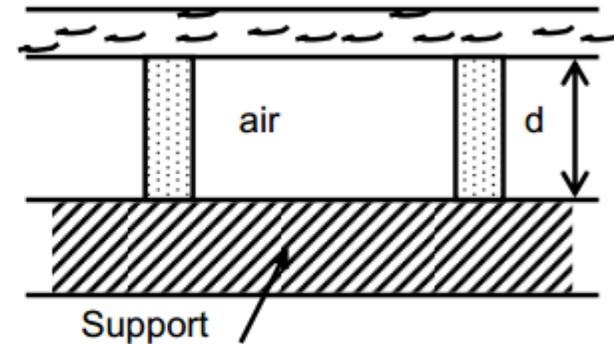


Figure 3.9

Lorsqu'une onde heurte la membrane à une fréquence voisine de la résonance il se produit une absorption par l'intermédiaire de la lame d'air jouant le rôle de ressort.

Ces produits présentent une absorption sélective autour de f_0 . Ils sont utilisés pour les basses fréquences (125 à 500 Hz).



Propagation du son dans l'espace clos

Les résonateurs.

Un résonateur est un dispositif composé d'un goulot de section S et de longueur l communicant à un volume d'air V .

La fréquence de résonance d'un tel système

$$\text{est } f_0 \approx 54 \sqrt{\frac{S}{Vl}}$$

Lorsqu'une onde met en vibration l'air contenu dans le goulot, il y a dissipation d'énergie par frottement dans le col du goulot, ce qui se traduit par une absorption d'autant plus importante que la fréquence de l'onde est voisines de la fréquence de résonance.

Ce dispositif absorbe préférentiellement les fréquences médiums (500 à 2000 Hz)

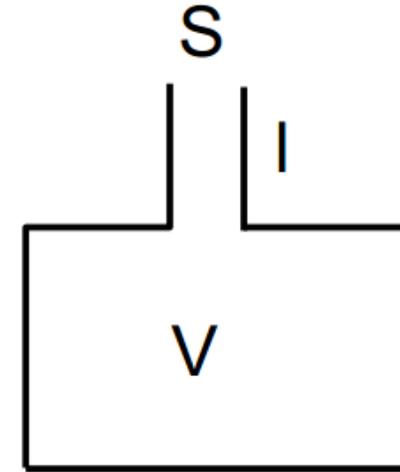


Figure 3.10

Un exemple courant de résonateur se compose d'un panneau perforé disposé à une certaine distance d'un mur (Figure 3.12)

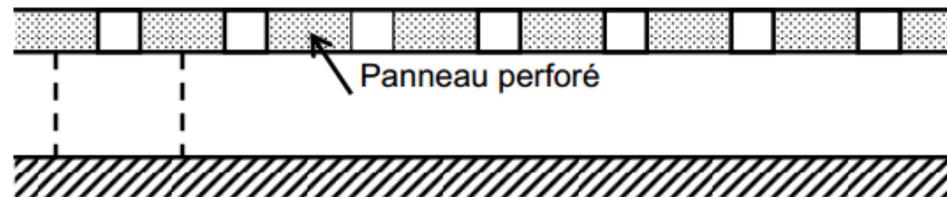


Figure 3.11 : Résonateurs en parallèle



Propagation du son dans l'espace clos



Ce type de panneaux se comporte à la fois comme une série de résonateurs auxquels on associe à chaque perforation un certain volume d'air entre le mur et le panneau, comme des panneaux fléchissants, si la plaque perforée est souple.

De tels dispositifs donnent une courbe d'absorption comme celle reproduite à la figure 3.12.

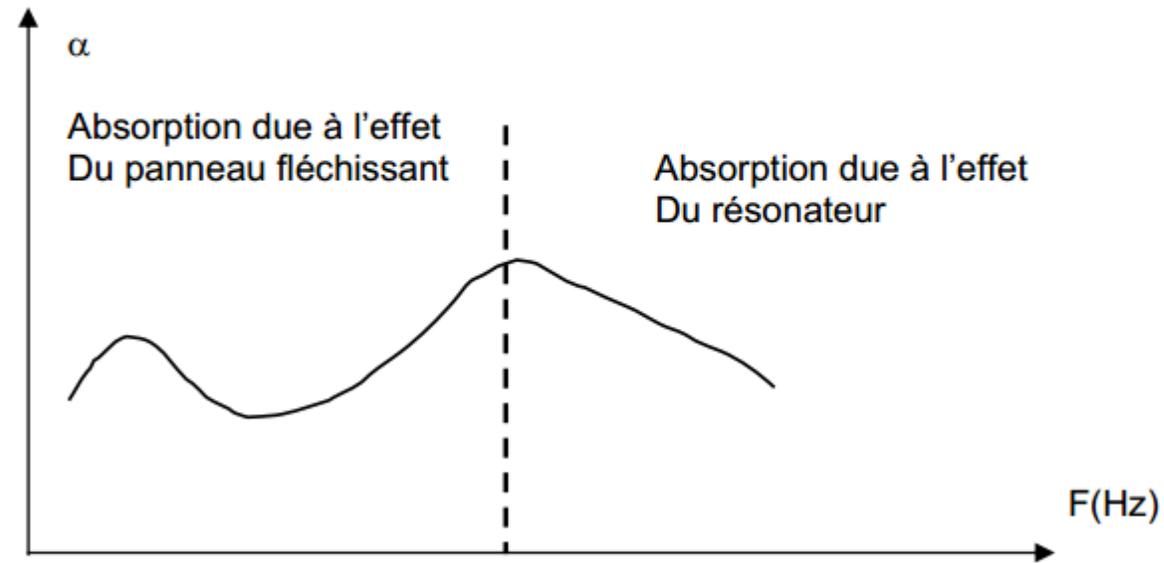


Figure 3.12 : Courbe type d'absorption d'un panneau perforé



Propagation du son dans l'espace clos



MATERIAU	Fréquence (Hz)					
	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
Placage de bois a/ épaisseur 8(mm) avec vide d'air de 30 (mm) 5 (kg/m ²)	0,25	0,22	0,04	0,03	0,03	0,08
b/ épaisseur 16 (mm) avec vide d'air de 50 (mm) 10 (kg/m ²)	0,18	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07
Polyuréthane (e = 30 mm, 30 kg/m ³)	0,03	0,15	0,48	0,65	0,82	0,81
Laine de verre collée épaisseur (40 mm, 70 kg/m ³)	0,29	0,52	0,69	0,89	0,96	0,97
Rideau épais et plissé en velours...	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
P.V.C	0,02	0,03	0,03	0,04	0,06	0,05
Caoutchouc	0,03	0,04	0,06	0,06	0,06	0,06
P.V.C sur sous-couche (5mm)	0,02	0,09	0,31	0,12	0,06	0,03
Parquet bois collé	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,06
Parquet bois sur lambourde	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,06
Moquette bouclée (4mm)	0,01	0,03	0,05	0,11	0,32	0,66
Moquette sur thibaude (5,5 + 8(mm))	0,04	0,10	0,31	0,70	0,93	0,74
Marbre	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03



Propagation du son dans l'espace clos

	Absorption totale $S \cdot \alpha$ (m ²)					
Fauteuil avec revêtement velours	0,14	0,23	0,35	0,39	0,37	0,38
Avec revêtement plastique	0,09	0,13	0,15	0,15	0,11	0,07
Personne assise	0,15	0,23	0,56	0,78	0,88	0,89
Personne debout	0,15	0,23	0,61	0,97	1,14	1,14

Valeurs des Coefficients d'Absorption (Sabine) α_s Des matériaux couramment utilisés dans le bâtiment

Calcul des surfaces d'absorption des matériaux entrant dans le traitement

Il faut dans la phase finale déterminer les surfaces des matériaux absorbants pour que la salle ait les durées de réverbération fixées précédemment. On est amené alors à définir l'aire d'absorption équivalente A pour chaque fréquences des matériaux utilisés à chaque fréquence.

$$A = \frac{0,161 \cdot V}{T_{opt}} \quad \text{avec } T_{opt} = \text{temps de réverbération optimal.}$$

Les surfaces des différents matériaux utilisés étant déterminées, on procède à leur répartition sur les différentes surfaces à traiter.



Propagation du son dans l'espace clos



Il faut répartir aussi uniformément que possible les matériaux. Eviter notamment de disposer un même matériau sur toute la surface d'une paroi.

Eviter que deux surfaces parallèles demeurent réfléchissantes, ce qui aurait pour effet de créer un « écho flottant ».

La présence de surfaces concaves sera à éviter : focalisation des ondes. Elles pourront être conservées à condition qu'elles soient absorbantes.

3.6. Critères d'acoustique architecturale

Outre le temps de réverbération, plusieurs critères permettent de caractériser la réponse acoustique d'une salle.



Propagation du son dans l'espace clos



3.6.1. Temps de réverbération TR60

Le TR60, temps de réverbération à -60dB , est le critère d'acoustique des salles le plus répandu. Il se mesure classiquement par l'enregistrement de la réponse impulsionnelle de la salle étudiée : un son bref et puissant est produit dans la salle et un système de mesure logiciel permet de récupérer le signal en un point donné de la salle où l'on a placé un microphone. La réponse impulsionnelle d'une salle est classiquement de la forme ci-contre.

Le TR60 est ensuite calculé sur plusieurs bandes de fréquence (de la largeur d'une octave ou d'un tiers d'octave généralement) comme la durée pendant laquelle l'intensité acoustique dans la salle va décroître de 60dB par rapport à son niveau initial, c'est à dire pour qu'elle soit 10^{-6} fois plus faible que l'intensité initiale.





Propagation du son dans l'espace clos



En pratique, il est en général estimé entre -5dB et -35dB : cela signifie que l'intervalle de temps correspondant à la décroissance entre ces deux bornes est mesuré puis ramené à une décroissance régulière exponentielle hypothétique entre 0 et -60dB . Cette extrapolation permet d'éviter les perturbations du signal souvent observées en début et en fin de réponse.

3.6.2. Early Decay Time EDT

Comme son nom l'indique (durée de décroissance précoce), l'EDT est un temps de réverbération calculé à partir du début de la réponse impulsionnelle enregistrée. La durée de la décroissance entre 0dB et -10dB est mesurée sur différentes bandes de fréquence puis rapportée à 60dB de décroissance régulière. Lorsqu'un flux sonore est émis continuellement dans la salle, l'oreille n'a souvent pas la possibilité d'apprécier 60dB de décroissance puisque le champ réverbéré est rapidement masqué par le son direct. L'EDT est alors utilisé pour mesurer l'impression de réverbération ressentie par un auditeur écoutant un flux sonore « continu ». Il permet d'apprécier l'influence de la salle sur la netteté des attaques et la dynamique des sources en prenant mieux en compte l'influence des premières réflexions. La valeur de l'EDT est à comparer à celle du TR60 : plus l'EDT sera faible devant le TR60, plus la pente initiale de la décroissance sera forte, révélant une concentration de l'énergie sonore dans le début de la réponse impulsionnelle favorable à une bonne intelligibilité. Notons également que l'EDT varie plus facilement que le TR60 en fonction de la position d'écoute dans la salle.

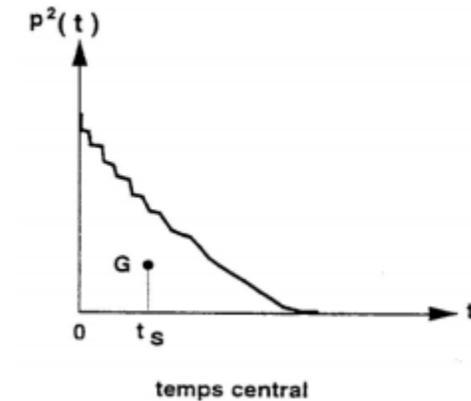


Propagation du son dans l'espace clos



3.6.3. Temps central T_s

T_s est le centre de gravité temporel de la réponse impulsionnelle de la salle c'est à dire le temps pour lequel la moitié de l'énergie sonore totale est reçue. Il se calcule comme le barycentre continu des instants de réception du son pondéré par l'énergie sonore en ces instants. T_s donne un ordre d'idée de l'« étalement » de la réponse impulsionnelle c'est à dire du temps moyen que prend un son pour parvenir aux auditeurs.



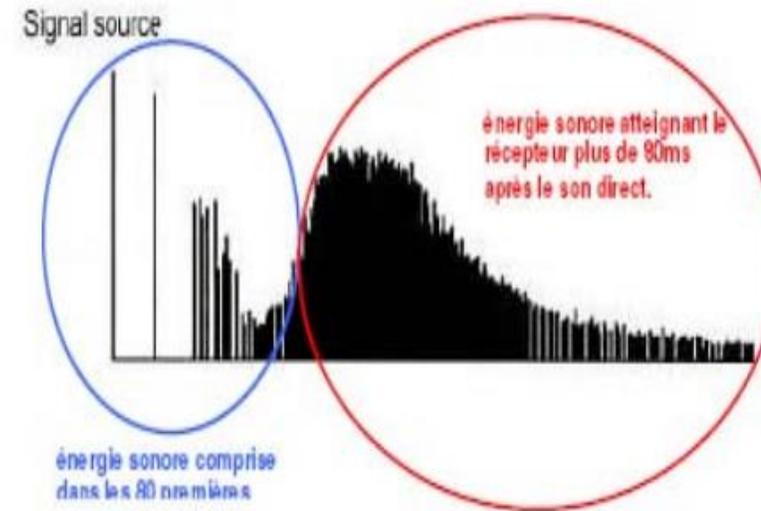


Propagation du son dans l'espace clos

3.6.4. Clarté C80

Les critères énergétiques comparent l'énergie reçue dans différents intervalles de temps de la réponse impulsionnelle d'une salle. Ils permettent ainsi d'apprécier la part d'énergie précoce dans la réverbération de cette salle qui est un critère important pour juger de la qualité de son acoustique et du type de représentation ou d'utilisation auquel elle est adaptée. La clarté C80 est, en décibels, le rapport de l'énergie comprise dans les 80 premières millisecondes de la réponse impulsionnelle sur le reste de l'énergie, atteignant le récepteur plus de 80ms après le son direct. La clarté peut être positive (respectivement négative) selon que l'énergie sonore précoce est plus (ou moins) importante que l'énergie tardive. Pour la

musique, on préconise généralement une clarté comprise entre -3dB et +3dB c'est à dire une énergie sonore à peu près équitablement répartie entre les intervalles [0 ; 80ms] et [80ms ; ∞]. Généralement utilisé pour déterminer la qualité acoustique d'une salle pour l'écoute de musique, la clarté mesure ainsi la façon dont un son donné se détache des autres au sein d'une phrase musicale.



$$C_{80} = 10 \log_{10} \left(\frac{E_0^{80}}{E_{80}^{\infty}} \right)$$

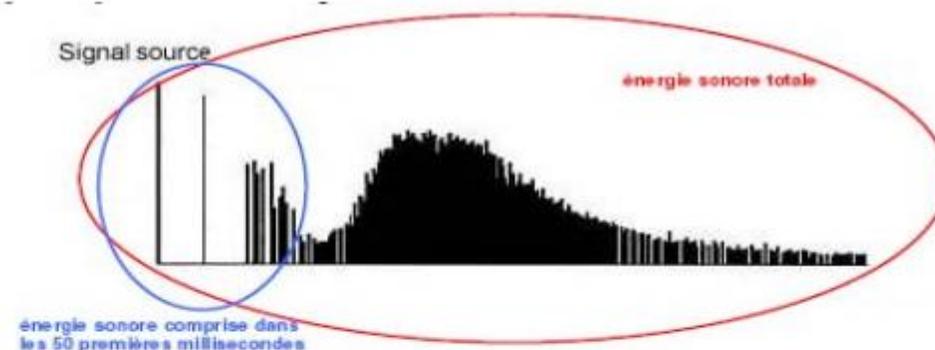


Propagation du son dans l'espace clos

3.6.5. Définition D50

Les critères énergétiques comparent l'énergie comprise dans différents intervalles de temps de la réponse impulsionnelle d'une salle. Ils permettent ainsi d'apprécier la part d'énergie précoce dans la réverbération de cette salle qui est un critère important pour juger de la qualité de son acoustique et du type de représentation ou d'utilisation auquel elle est adaptée. La définition

D50 est le rapport de l'énergie comprise dans les 50 premières millisecondes de la réponse impulsionnelle sur l'énergie totale. Analogue à la clarté et correspondant aux mêmes impressions subjectives, la définition est cependant davantage utilisée pour déterminer la qualité acoustique d'une salle pour la parole.



$$D_{50} = 10 \log_{10} \left(\frac{E_0^{50}}{E_0^{\infty}} \right)$$

On distingue généralement les intervalles suivants pour juger de la qualité de la définition sonore dans une salle en fonction de la valeur mesurée ou calculée du critère D50.

D50	0 à 30%	30 à 45%	45 à 60%	60 à 75%	75 à 100%
Définition	Mauvaise	Pauvre	Moyenne	Bonne	Excellente



Propagation du son dans l'espace clos

3.6.6. Intelligibilité STI et RASTI

Lorsque l'on désire écouter de la parole dans un théâtre, une salle de conférence ou tout autre lieu destiné à ce type d'utilisation, une bonne intelligibilité est nécessaire. D'où l'intérêt d'un critère objectif permettant de quantifier l'influence d'une salle sur l'intelligibilité. La définition D50, comme nous l'avons dit précédemment, permet une évaluation de cette influence. Mais elle ne prend pas en compte le bruit de fond ni les particularités d'un message parlé. L'étude des différents phonèmes et de leur limite d'intelligibilité lorsqu'ils sont superposés à d'autres par la réverbération de la salle a permis l'établissement de critères plus adaptés : Le STI (Speech Transmission Index) et le RASTI (RAPid Speech Transmission Index). Le calcul du STI est basé sur l'étude des taux de modulations d'un signal émis et reçu dans une salle. Le RASTI est une version simplifiée du STI dont le calcul est largement accéléré et qui fournit en général (sous certaines conditions liées aux fréquences du bruit de fond notamment) des résultats équivalents. STI et RASTI évoluent tous les deux entre 0 et 1. Pour juger de l'intelligibilité dans la salle, on distingue les intervalles suivants :

STI ou RASTI	0 à 0,30	0,30 à 0,45	0,45 à 0,60	0,60 à 0,75	0,75 à 1
Intelligibilité	Mauvaise	Pauvre	Moyenne	Bonne	Excellente

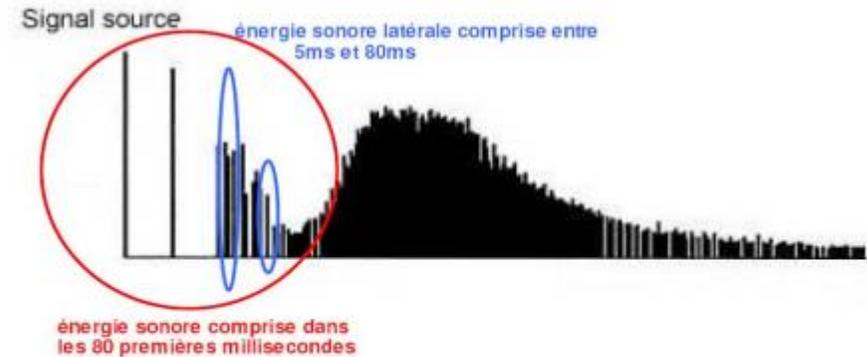


Propagation du son dans l'espace clos



3.6.7. Fraction d'énergie latérale précoce LF

Similaire aux critères énergétiques C80 et D50 dans son expression, la fraction d'énergie latérale précoce (LF) est cependant davantage un critère de distribution spatiale du son qu'un critères énergétiques. LF fait en effet intervenir des notions de direction d'incidence des ondes acoustiques sur le récepteur. LF est défini comme le rapport de l'énergie parvenant latéralement à la source pendant l'intervalle de temps de la réponse impulsionnelle compris entre 5ms et 80ms sur celle lui parvenant de toutes les directions pendant les 80 premières millisecondes de la réponse impulsionnelle. Un LF important correspond à une impression d'espace. L'auditeur se sent au centre du son, mais pour un LF trop important il ne peut plus localiser la source qu'il écoute. Inversement, si ce critère est trop faible l'auditeur se sent éloigné de la source, mis à l'écart.





Propagation du son dans l'espace clos



Gérard, K., René, Y., & Frédéric, K. (2009). Acoustique du bâtiment. *Institut national des sciences appliquées de Lyon*.

DEGIOANNI, J. F. (2006). Design sonore: Réussir l'acoustique des lieux de spectacle. *Le Moniteur des travaux publics et du bâtiment*, (5367).

Hamayon, L. (2013). *Réussir l'acoustique d'un bâtiment: conception architecturale, isolation et correction acoustiques*. Éd. le Moniteur.

Ibrir, D. F., & Debache-Benzagouta, S. (2017). LA REHABILITATION ACOUSTIQUE DURABLE DES SALLES DE CONFERENCES: IMPACT DE LA PAILLE SUR LA CORRECTION ACOUSTIQUE DE LA SALLE DE CONFERENCE DU CENTRE CULTUREL MALEK HADDAD A CONSTANTINE. *Sciences & Technologie. D, Sciences de la terre*, (46), 183-191.