

Cours d'acoustique (du Bâtiment) - Correction acoustique des salles -

François-Xavier Bécot

fxb@matelys.com

Année scolaire 2013/2014

Ce cours est principalement basé sur les supports des autres intervenants
(L. Jaouen, F. Chevillotte, O. Chiello, X. Olny)

Une partie des illustrations provient de la doc. acoustique d'Isover-St Gobain

Images de matériaux issues de la thèse de C.Perrot

Contenu

Définition et buts de la correction acoustique

Moyens de correction pour l'acoustique d'une salle

Approches

Approche statistique

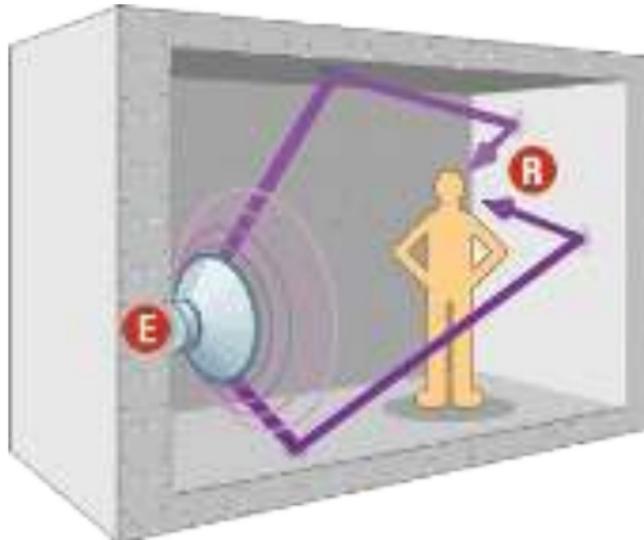
Définition

Buts

Indicateur

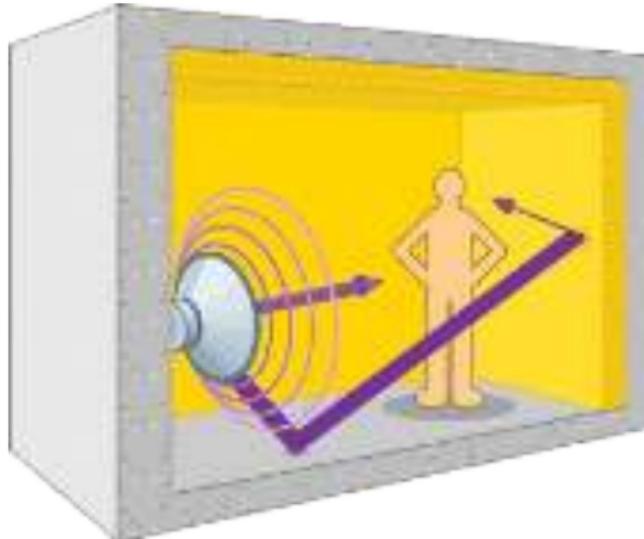
Contenu

Définition de la correction acoustique d'une salle



En milieu fermé, le son perçu est la contribution du son direct et du son réverbéré (réflexions sur les parois).

Définition de la correction acoustique d'une salle

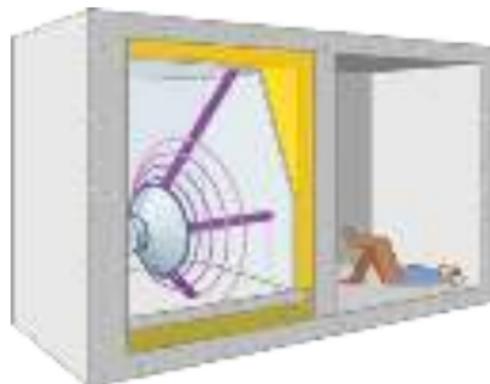


La correction acoustique d'une salle consiste à en modifier le champ de pression (par utilisation de traitements absorbants par ex.).

Correction vs. isolation acoustique : éviter la confusion



Correction acoustique
Source(s) et récepteur(s)
dans le même local



Isolation acoustique
Source(s) et récepteur(s)
séparés par une paroi

Buts de la correction acoustique

Adapter l'ambiance acoustique au message

- Homogénéiser le champ acoustique dans le volume
- Limiter le niveau du champ réverbéré
- Adapter l'intelligibilité en contrôlant la durée de réverbération

Diminuer les phénomènes perturbants liés à la géométrie

- Echos
- Focalisation

Un indicateur de qualité acoustique d'une salle : le Tr

Définition du Tr

Temps de réverbération, Tr : durée, en seconde, nécessaire pour baisser le niveau de pression dans la salle de 60 dB après arrêt de la source.

Traduction mathématique

$$Tr = (t_2 - t_1) \quad \text{tel que} \quad 10 \log_{10} \frac{p_{t=t_1}^2}{p_{t=t_2}^2} = 60$$
$$\text{soit} \quad \frac{p_{t=t_1}^2}{p_{t=t_2}^2} = 10^6$$

Il existe d'autres indicateurs

AI (Articulation Index), D50 (Définition), C50, C80 (Clarté)...

Un indicateur de qualité acoustique d'une salle : le Tr

Définition du Tr

Temps de réverbération, Tr : durée, en seconde, nécessaire pour baisser le niveau de pression dans la salle de 60 dB après arrêt de la source.

Traduction mathématique

$$Tr = (t_2 - t_1) \quad \text{tel que} \quad 10 \log_{10} \frac{p_{t=t_1}^2}{p_{t=t_2}^2} = 60$$
$$\text{soit} \quad \frac{p_{t=t_1}^2}{p_{t=t_2}^2} = 10^6$$

Il existe d'autres indicateurs

AI (Articulation Index), D50 (Définition), C50, C80 (Clarté)...

Un indicateur de qualité acoustique d'une salle : le Tr

Définition du Tr

Temps de réverbération, Tr : durée, en seconde, nécessaire pour baisser le niveau de pression dans la salle de 60 dB après arrêt de la source.

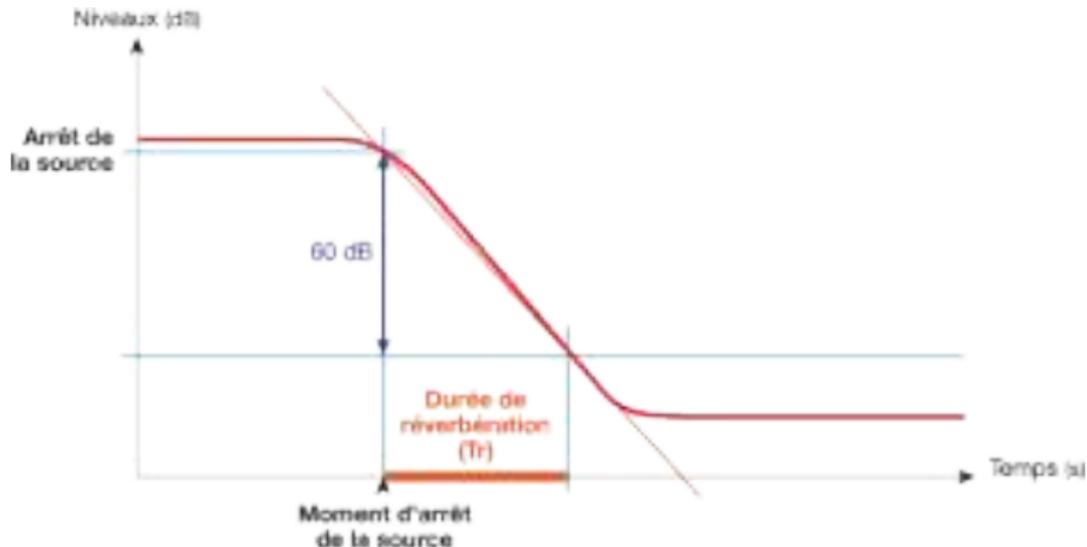
Traduction mathématique

$$Tr = (t_2 - t_1) \quad \text{tel que} \quad 10 \log_{10} \frac{p_{t=t_1}^2}{p_{t=t_2}^2} = 60$$
$$\text{soit} \quad \frac{p_{t=t_1}^2}{p_{t=t_2}^2} = 10^6$$

Il existe d'autres indicateurs

AI (Articulation Index), D50 (Définition), C50, C80 (Clarté)...

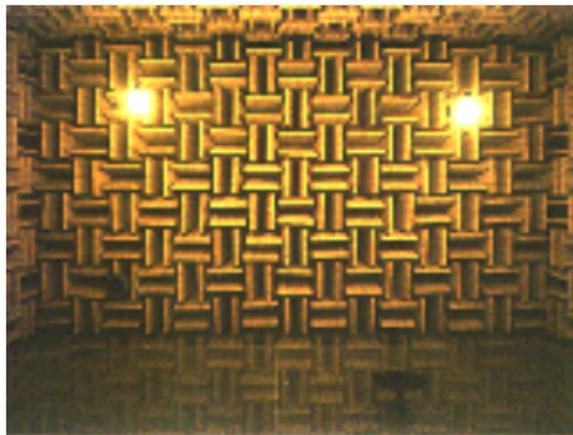
Un indicateur de qualité acoustique d'une salle : le Tr



En pratique, difficulté de mesurer une décroissance de 60 dB.
On mesure 20 ou 40 dB et on extrapole le Tr (décroissance linéaire).

Exemples extrêmes de valeurs pour un Tr

Salle anéchoïque,
 $Tr \approx 0$



Salle réverbérante,
 Tr : quelques secondes



La valeur du Tr est règlementée suivant son utilisation (et son volume)
(salle polyvalente, de cours, médicale...)

Exemples extrêmes de valeurs pour un Tr

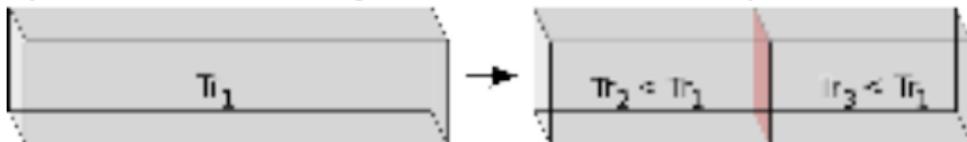
RECOMMANDATIONS BOYCE PAR TYPE DE PIÈCE	
Éducation	Temps de réverbération (T_{60})
Salle de classe	$0,7 + It + 0,8 a$
Salle de récréation $V < 200 \text{ m}^3$	$Tr < 1,2 s$
Santé	
Salle de récréation $V < 200 \text{ m}^3$	$Tr < 0,6 s$
Local d'indépendance et de soins	$It + 0,8 a$
Salle de repos	$Tr < 0,7 s$
Bureau	$It + 0,8 a$
Bureaux	
Bureau individuel	$It + 0,7 a$
Bureau collectif	$Tr < 0,6 s$
Bureau ouvert $V < 250 \text{ m}^3$	$0,6 + It + 0,8 a$
Renforcement $V < 250 \text{ m}^3$	$Tr < 1 s$

Les recommandations Boyce sont basées sur le coefficient d'absorption acoustique moyen de chaque pièce de classe.
 Le Renforcement a un coefficient de réverbération $Tr < 0,7 + 0,8 a$.

Contenu

Modification de la géométrie

Découper le volume d'une grande salle abaisse temps de réverbération



Modification de la géométrie - géométrie idéale



- Murs non parallèles
→ pas de modes prononcés.
- Pas de fortes courbes
→ focalisation limitée.

(Krzywy domek, Gdynia, Pologne)

Utilisation de matériaux acoustiquement absorbants

Types de matériaux

- Matériaux fibreux/granulaires (laines de verre, de roche)
- Matériaux cellulaires (mousses polymères)
- Résonateurs (systèmes plaque perforée devant cavité d'air)

Remarques

- Efficacités d'absorption des matériaux dépendent de la fréquence
- Efficacités varient beaucoup entre matériaux

Utilisation de matériaux acoustiquement absorbants

Types de matériaux

- Matériaux fibreux/granulaires (laines de verre, de roche)
- Matériaux cellulaires (mousses polymères)
- Résonateurs (systèmes plaque perforée devant cavité d'air)

Remarques

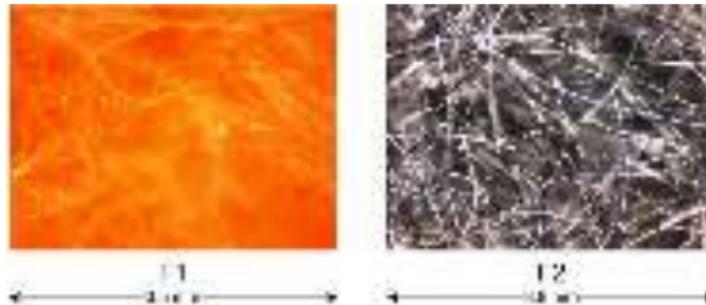
- Efficacités d'absorption des matériaux dépendent de la fréquence
- Efficacités varient beaucoup entre matériaux

Types de matériaux



Types de matériaux

- Matériaux fibreux

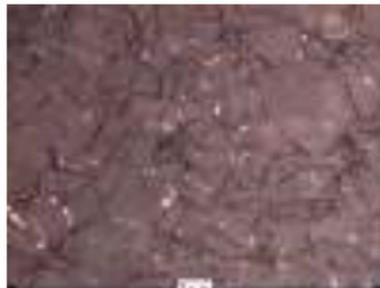


- Matériaux granulaires



Types de matériaux

- Mousses



Un indicateur de l'efficacité d'un matériau : α

α , le coefficient d'absorption acoustique

- Matériau placé sur mur rigide et impénétrable (pas de transmission)
- Une onde incidente d'amplitude A , fréquence f , angle θ
 - ▶ une onde réfléchi d'amplitude $A \times |R(f, \theta)|$
 - ▶ ce qui n'est pas réfléchi est absorbé.

Traduction mathématique du coeff. d'absorption ac.

$$\alpha(f, \theta) = \frac{\text{Puissance dissipée}}{\text{Puissance incidente}} \equiv 1 - |R(f, \theta)|^2$$

$\alpha = 0$: pas d'absorption, onde incidente totalement réfléchi.

$\alpha = 1$: absorption totale, pas de réflexion.

Un indicateur de l'efficacité d'un matériau : α

α , le coefficient d'absorption acoustique

- Matériau placé sur mur rigide et impénétrable (pas de transmission)
- Une onde incidente d'amplitude A , fréquence f , angle θ
 - ▶ une onde réfléchi d'amplitude $A \times |R(f, \theta)|$
 - ▶ ce qui n'est pas réfléchi est absorbé.

Traduction mathématique du coeff. d'absorption ac.

$$\alpha(f, \theta) = \frac{\text{Puissance dissipée}}{\text{Puissance incidente}} \equiv 1 - |R(f, \theta)|^2$$

$\alpha = 0$: pas d'absorption, onde incidente totalement réfléchi.

$\alpha = 1$: absorption totale, pas de réflexion.

Notion d'absorption acoustique des matériaux

Onde incidente sur un matériau : bilan énergétique

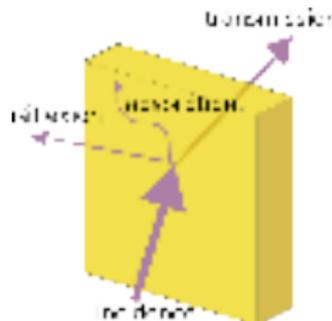
Ce qui est ni réfléchi, ni transmis est absorbé (dissipé par effets visco-thermiques) dans le matériau

Traduction mathématique

$$I = R + A + T$$

Remarques

R , A et T sont fonctions de la fréquence.



Notion d'absorption acoustique des matériaux

Onde incidente sur un matériau : bilan énergétique

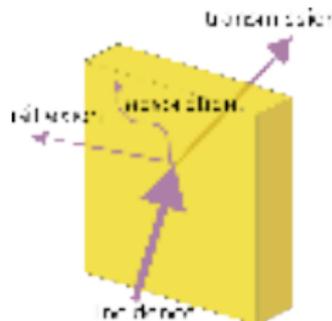
Ce qui est ni réfléchi, ni transmis est absorbé (dissipé par effets visco-thermiques) dans le matériau

Traduction mathématique

$$I = R + A + T$$

Remarques

R , A et T sont fonctions de la fréquence.



Notion d'absorption acoustique des matériaux

Onde incidente sur un matériau : bilan énergétique

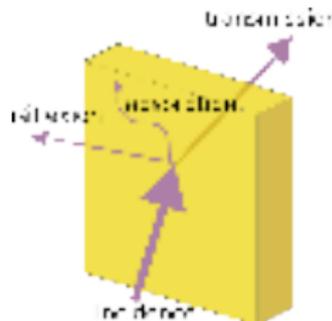
Ce qui est ni réfléchi, ni transmis est absorbé (dissipé par effets visco-thermiques) dans le matériau

Traduction mathématique

$$I = R + A + T$$

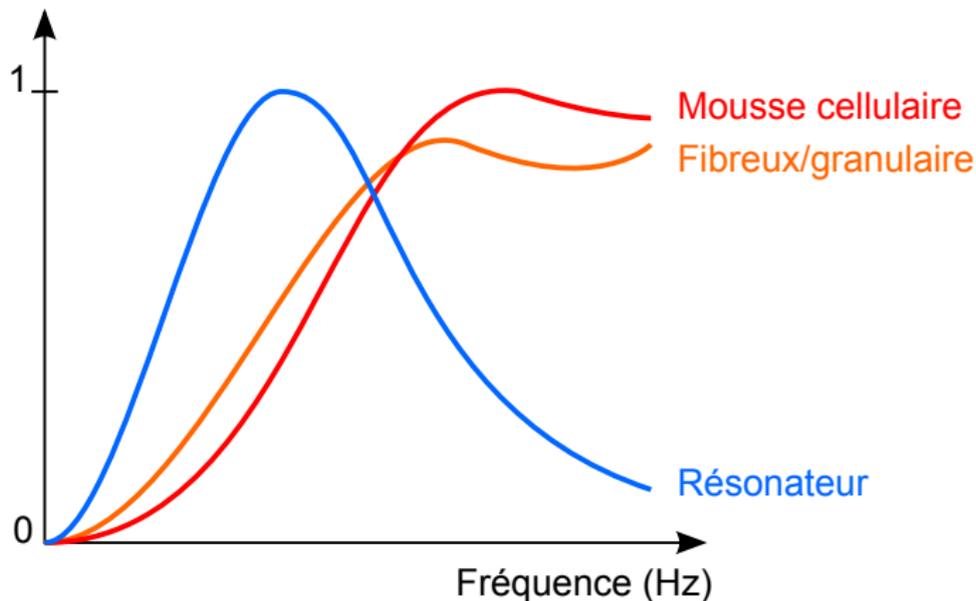
Remarques

R , A et T sont fonctions de la fréquence.

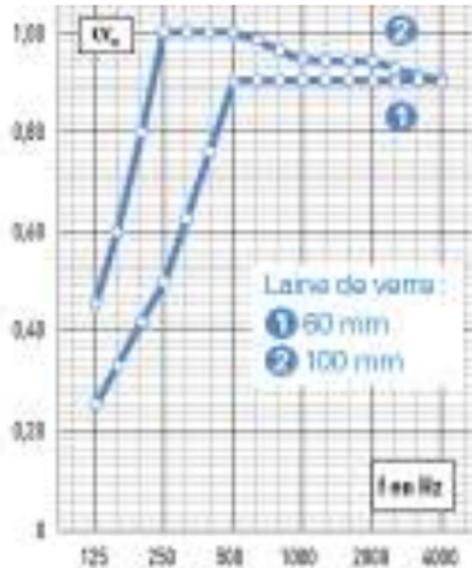


Différents coefficients d'absorption α

Coefficient d'absorption acoustique



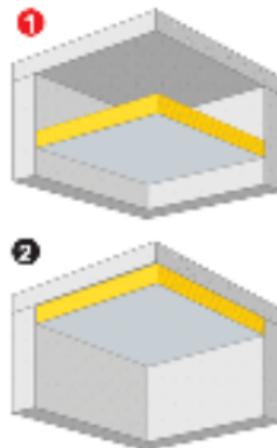
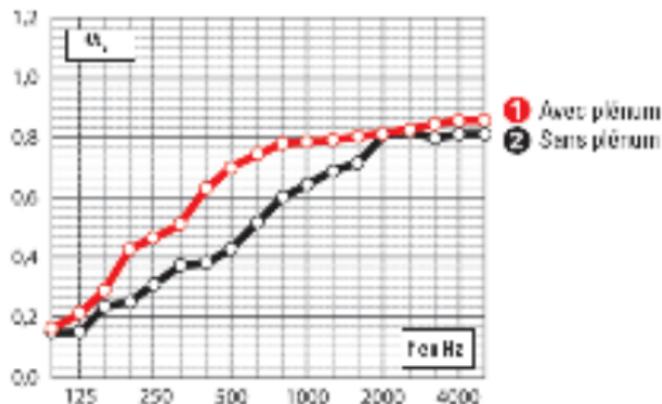
Influence de l'épaisseur sur l'absorption ac.



Augmentation de l'épaisseur du matériau

- amélioration absorption en "BF" (efficacité globale augmente).

Influence du mode de pose sur l'absorption ac.



espace d'air entre matériau et paroi arrière

► amélioration absorption en "BF" (sans changer efficacité globale).

Contenu

Approches théoriques pour la correction acoustique

3 exemples d'approche

- 1 Ondulatoire (aussi appelée modale)
- 2 Géométrique (méthode des rayons - cf. optique géom.)
- 3 Statistique (en particulier théorie de Sabine)

Approche ondulatoire ou modale

Résolution de l'équation de Helmholtz par méthode de séparation des variables.

$$p(x, y, z, t) = \phi(x) \xi(y) \psi(z) \theta(t)$$

Soit :

$$\frac{\phi''}{\phi} + \frac{\xi''}{\xi} + \frac{\psi''}{\psi} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\theta''}{\theta}$$

Les solutions sont de la forme

$$\phi(x) = \cos(k_x x); \xi(y) = \cos(k_y y); \psi(z) = \cos(k_z z); \theta(t) = \cos(\omega t)$$

si :

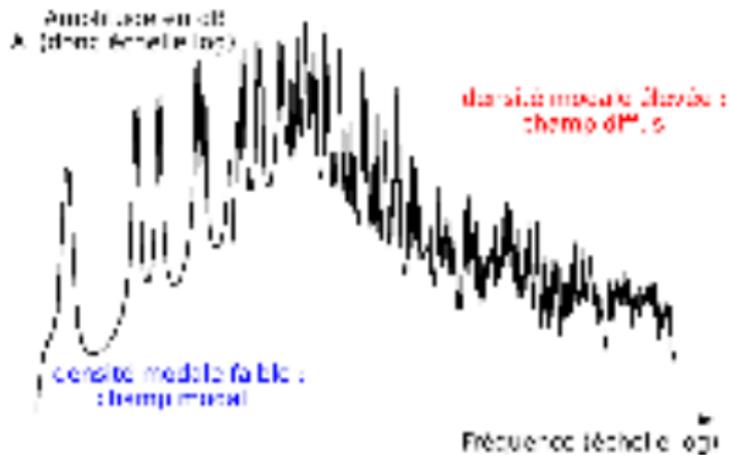
$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \frac{\omega^2}{c_0^2} \text{ et si } k_x = \frac{p\pi}{L_x}; k_y = \frac{q\pi}{L_y}; k_z = \frac{r\pi}{L_z}$$

Le spectre correspond à un spectre de raies (« la salle ne répond pas ») :

$$f_{lmn} = \frac{c_o}{2} \sqrt{\left(\frac{p}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{q}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{r}{L_z}\right)^2}$$

Approche ondulatoire ou modale

Vite inutilisable lorsque la densité de mode est élevée.



Limite entre les deux « régimes » estimée par : $f_{\text{Schroeder}} = c_0 \sqrt{\frac{3}{\sum_i \alpha_i S_i}}$

Hypothèses

Issue des principes de l'optique géométrique :

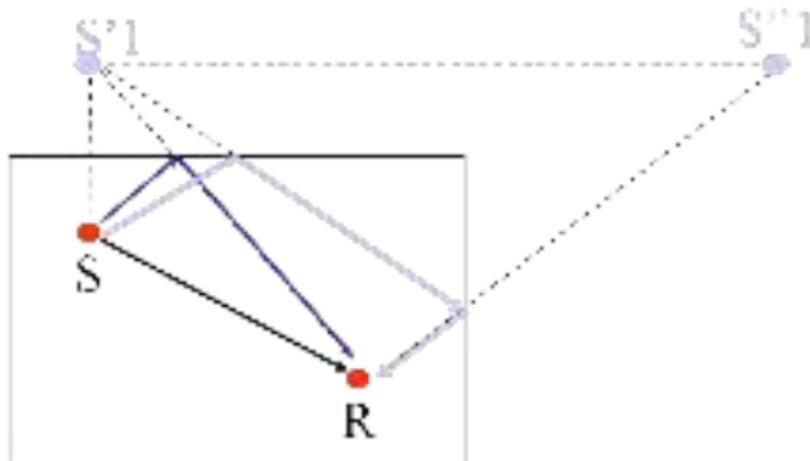
- dim° de la salle $\gg \lambda$
- dim° des surfaces $\gg \lambda$
- dim° des irrégularités $\ll \lambda$

Alors les réflexions sont considérées comme spéculaires

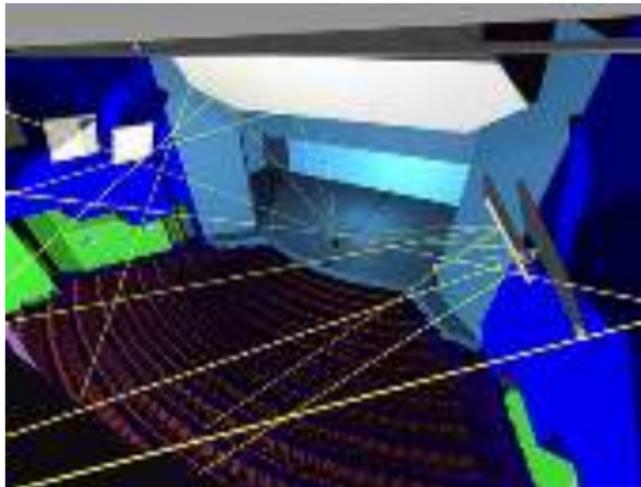
\Rightarrow diffusion et diffraction ne sont pas pris en compte

Méthode des sources images

Champ total = champ direct + \sum champ réfléchi



Méthode des rayons



Basée sur équations de Snell-Descartes.
Rapide pour géométries simples, lourde pour géom. complexes.

Contenu

Historique et hypothèses

Théorie issue des travaux de W. C. Sabine au début du 20^{me} siècle.
Il suppose deux choses :

- en régime établi, l'énergie acoustique est la même en tout point de la salle
- la perte instantanée d'énergie est un pourcentage constant de l'énergie instantanée.

$$-\frac{dE}{E} = \frac{dt}{\tau}$$

with $\tau > 0$.

Evolution de la densité d'énergie

- Bilan d'énergie : source = dissipation $\Rightarrow V \frac{dw}{dt} = P_s - P_d$
- On peut montrer que la puissance dissipée est : $P_d = \frac{c_0 w}{4} \sum_i \alpha_i S_i$
- D'où finalement :

$$V \frac{dw}{dt} + \frac{c_0 w}{4} \sum_i \alpha_i S_i = P_s$$

- Si on coupe la source :

$$w = w_0 \exp -t/\tau \quad \text{with} \quad \tau = \frac{4V}{c_0 \sum_i \alpha_i S_i}$$

- On définit le temps de réverbération par :

$$\frac{w(Tr_{60})}{w_0} = 10^{-6}$$

- D'où la **formule de Sabine** :

$$Tr_{60} = \frac{24 \ln 10 \times V}{c_0 \sum_i \alpha_i S_i}$$

Expression du Temps de réverbération

Formule de Sabine (la plus utilisée)

V : volume de la salle

A : aire d'absorption équivalente
(dépend de la fréquence f)

α_i : coefficient d'absorption du mat. i

S_i : surface traitée par le matériau i

$$Tr = \frac{0.16V}{A(f)}$$

$$Tr = \frac{0.16V}{\sum_i \alpha_i(f) S_i}$$

Remarques

- Tr dépend de la fréquence, comme α_i et A .
- Formule valable pour des absorptions faibles (en pratique, souvent seule formule utilisée)

Expression du Temps de réverbération

Formule de Sabine (la plus utilisée)

V : volume de la salle

A : aire d'absorption équivalente
(dépend de la fréquence f)

α_i : coefficient d'absorption du mat. i

S_i : surface traitée par le matériau i

$$Tr = \frac{0.16V}{A(f)}$$

$$Tr = \frac{0.16V}{\sum_i \alpha_i(f)S_i}$$

Remarques

- Tr dépend de la fréquence, comme α_i et A .
- Formule valable pour des absorptions faibles (en pratique, souvent seule formule utilisée)

Expression du Temps de réverbération : variante

$$Tr = \frac{0.16V}{\sum_i -S_i \ln(1 - \alpha_i)}$$

Formule de Eyring

Adaptée pour des absorptions élevées.

Tr tend vers 0 lorsque α tend vers 1
(contrairement à formule de Sabine)

Tend vers formule de Sabine lorsque α tend vers 0.

En pratique, pour une salle donnée

- 1 Se renseigner sur le Tr réglementaire,
- 2 Calculer ou mesurer le Tr actuel.
- 3 Comparer les Tr réglementaire et actuel.
- 4 Choisir le traitement
(modification des volumes, ajout/suppression de matériaux...).

Intensité directe - réverbérée

Soit une source ponctuelle de puissance W rayonnant dans un local.

- **Part du direct** : $I_d = Q_d \frac{W}{4\pi r^2}$; Rappel : $L_I = L_W + 10 \log_{10} \left(\frac{Q_d}{4\pi r^2} \right)$
- **Part du réverbéré** : $I_r = \frac{4W}{A} (1 - \alpha_v)$ avec $A = \sum \alpha_i S_i$

α_v : Absorption due à l'atténuation, viscosité de la salle

L_W : Niveau de puissance de la source

Q_d : Facteur de directivité (1,2,8)

r : Distance source à récepteur

Intensité directe - réverbérée

α_v : Absorption due à l'atténuation, viscosité de la salle

L_W : Niveau de puissance de la source

Q_d : Facteur de directivité (1,2,8)

r : Distance source à récepteur

$$I = I_d + I_r$$

$$L_I = L_W + 10 \log_{10} \left(\frac{Q_d}{4\pi r^2} + \frac{4(1 - \alpha_v)}{A} \right)$$

$$L_I \approx L_W + 10 \log_{10} \left(\frac{Q_d}{4\pi r^2} + \frac{4}{A} \right)$$