

# 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

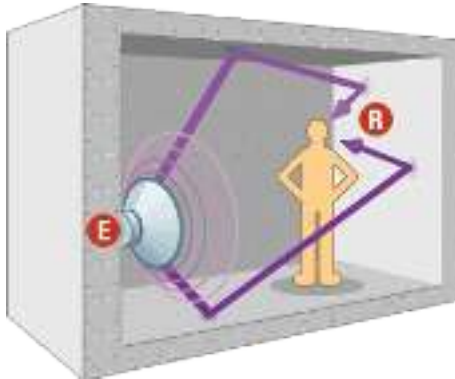
Définition

Buts

Indicateur

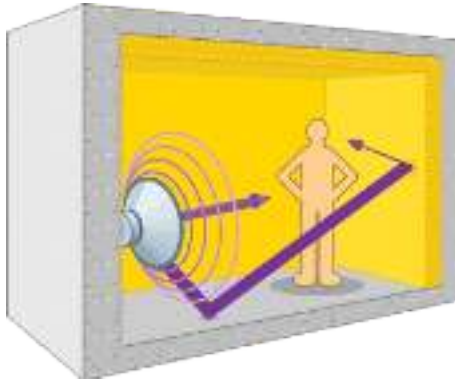
# Contenu

# Définition de la correction acoustique d'une salle



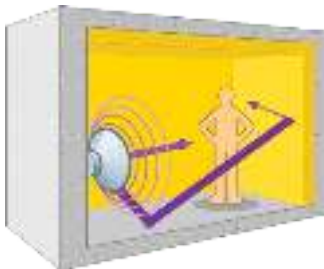
En milieu fermé, le son perçu est la contribution du son direct et du son réverbéré (réflexions sur les parois).

# Définition de la correction acoustique d'une salle

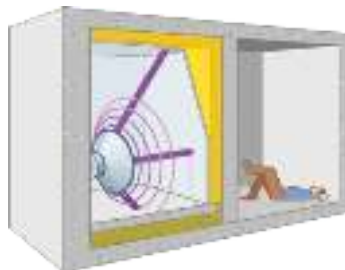


La correction acoustique d'une salle consiste à en modifier le champ de pression (par utilisation de traitements absorbants par ex.).

# 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.

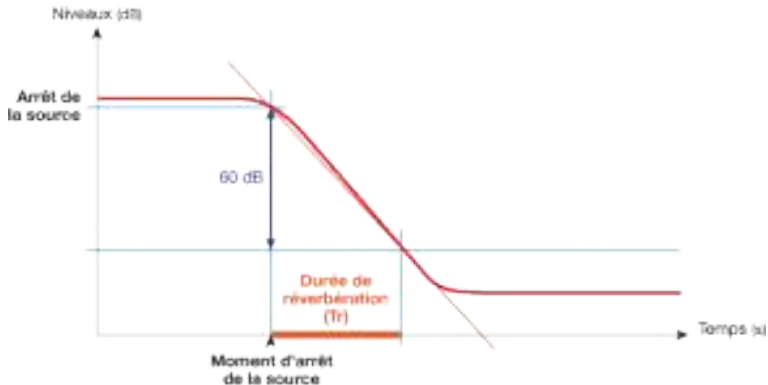
## Traduction mathématique

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

## Il existe d'autres indicateurs

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

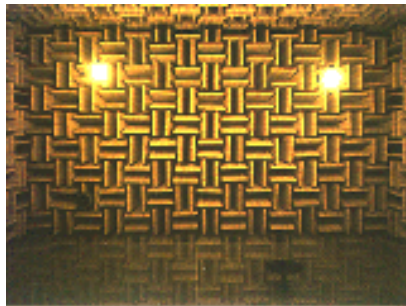
# Un indicateur de qualité acoustique d'une salle : le $Tr$



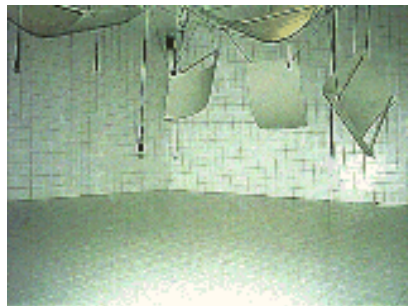
En pratique, difficulté de mesurer une décroissance de 60 dB.  
On mesure 20 ou 40 dB et on extrapole le  $Tr$  (décroissance linéaire).

## 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 $Tr$

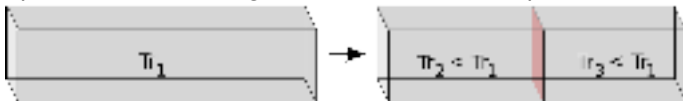
RECOMMANDATIONS BOYCEWIS PAR TYPE DE PIÉCE	
Éducation	Temps de réverbération ( $T_{10}$ )
Salle de classe	$0,7 + It + 0,8 a$
Salle de récréation $V < 200 \text{ m}^3$	$Tr < 1,2 s$
Santé	
Salle de récréation $V < 200 \text{ m}^3$	$Tr < 0,6 s$
Local d'indépendance et de soins	$It + 0,8 a$
Salle de repos	$Tr < 0,7 s$
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 Boycewis sont basées sur le règlement technique allemand qui stipule un  $T_{10}$  de classeur  
et Renforcement  $V < 250 \text{ m}^3$  (DIN 18191).

# 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

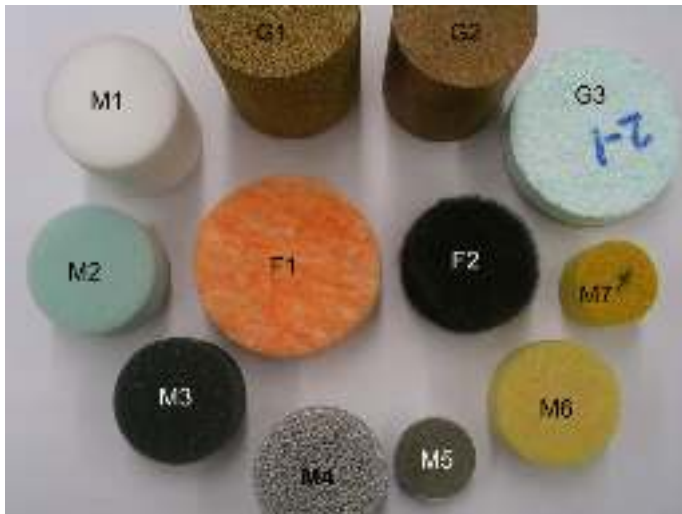
## Types de matériaux

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

## Remarques

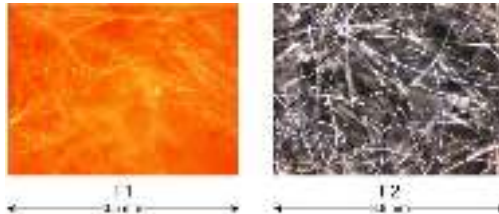
- Efficacités d'absorption des matériaux dépendent de la fréquence
- Efficacités varient beaucoup entre matériaux

# Types de matériaux



# Types de matériaux

- Matériaux fibreux

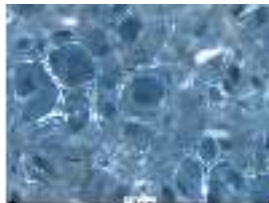
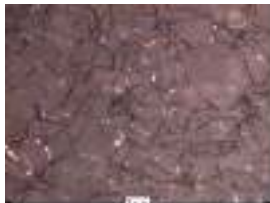


- Matériaux granulaires



# Types de matériaux

- Mousses



# Un indicateur de l'efficacité d'un matériau : $\alpha$

## $\alpha$ , le coefficient d'absorption acoustique

- Matériau placé sur mur rigide et impénétrable (pas de transmission)
- Une onde incidente d'amplitude  $A$ , fréquence  $f$ , angle  $\theta$ 
  - ▶ une onde réfléchie 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 réfléchie.

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

# Un indicateur de l'efficacité d'un matériau : $\alpha$

## $\alpha$ , le coefficient d'absorption acoustique

- Matériau placé sur mur rigide et impénétrable (pas de transmission)
- Une onde incidente d'amplitude  $A$ , fréquence  $f$ , angle  $\theta$ 
  - ▶ 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

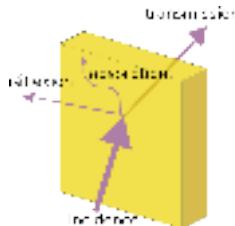
Ce qui est ni réfléchi, ni transmis est absorbé (dissipé par effets visco-thermiques) dans le matériau

## 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

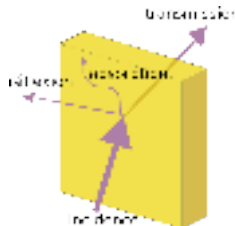
Ce qui est ni réfléchi, ni transmis est absorbé (dissipé par effets visco-thermiques) dans le matériau

## 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

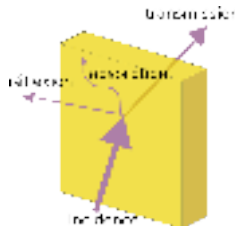
Ce qui est ni réfléchi, ni transmis est absorbé (dissipé par effets visco-thermiques) dans le matériau

## Traduction mathématique

$$I = R + A + T$$

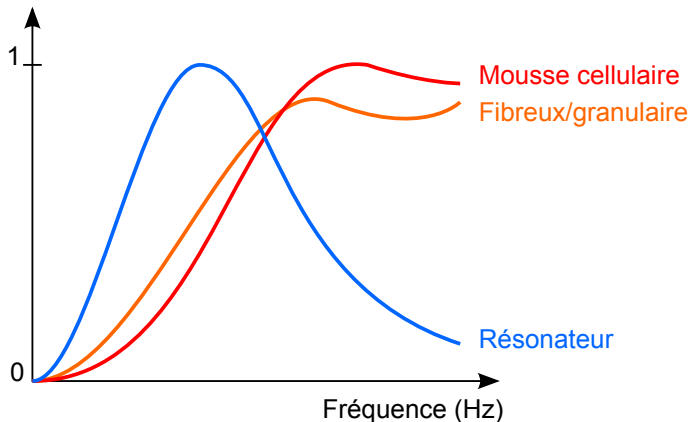
## Remarques

$R$ ,  $A$  et  $T$  sont fonctions de la fréquence.

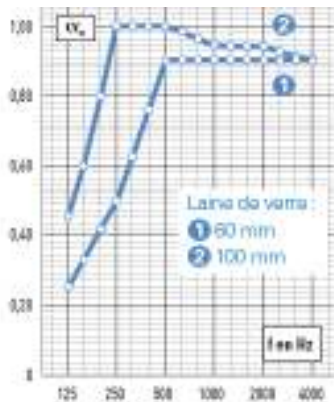


# Différents coefficients d'absorption $\alpha$

Coefficient d'absorption acoustique



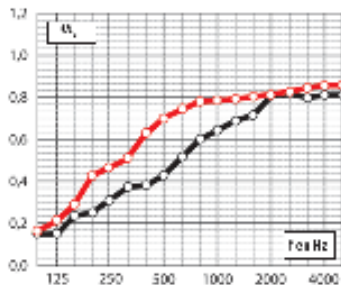
## Influence de l'épaisseur sur l'absorption ac.



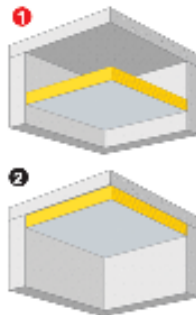
Augmentation de l'épaisseur du matériau

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

# Influence du mode de pose sur l'absorption ac.



- 1 Avec plénum
- 2 Sans plénum



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 :

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

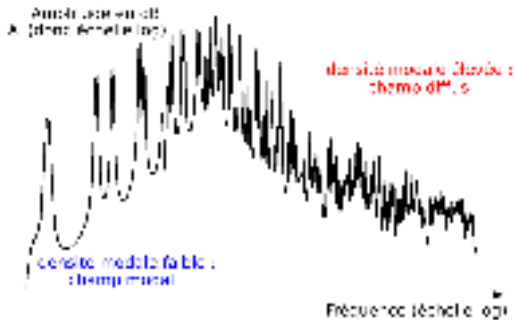
Le spectre correspond à un spectre de raies (« la salle ne répond pas ») :

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



# 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 :

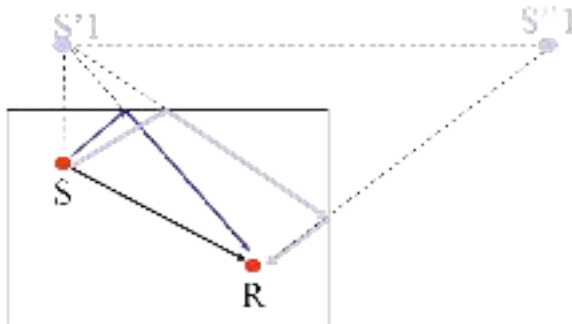
- $\text{dim}^\circ$  de la salle  $\gg \lambda$
- $\text{dim}^\circ$  des surfaces  $\gg \lambda$
- $\text{dim}^\circ$  des irrégularités  $\ll \lambda$

Alors les réflexions sont considérées comme spéculaires

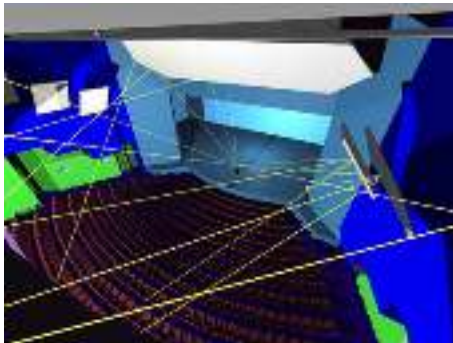
$\Rightarrow$  diffusion et diffraction ne sont pas pris en compte

# 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<sup>me</sup> 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  $f$ )

$\alpha_i$  : 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  $\alpha_i$  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  $f$ )

$\alpha_i$  : 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  $\alpha_i$  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  $\alpha$  tend vers 1  
(contrairement à formule de Sabine)

Tend vers formule de Sabine lorsque  $\alpha$  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  $A = \sum \alpha_i S_i$

$\alpha_v$  : 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

$\alpha_v$  : 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

$$I = I_d + I_r$$

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

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