

# Acoustique des salles

## Cours 5

# Plan

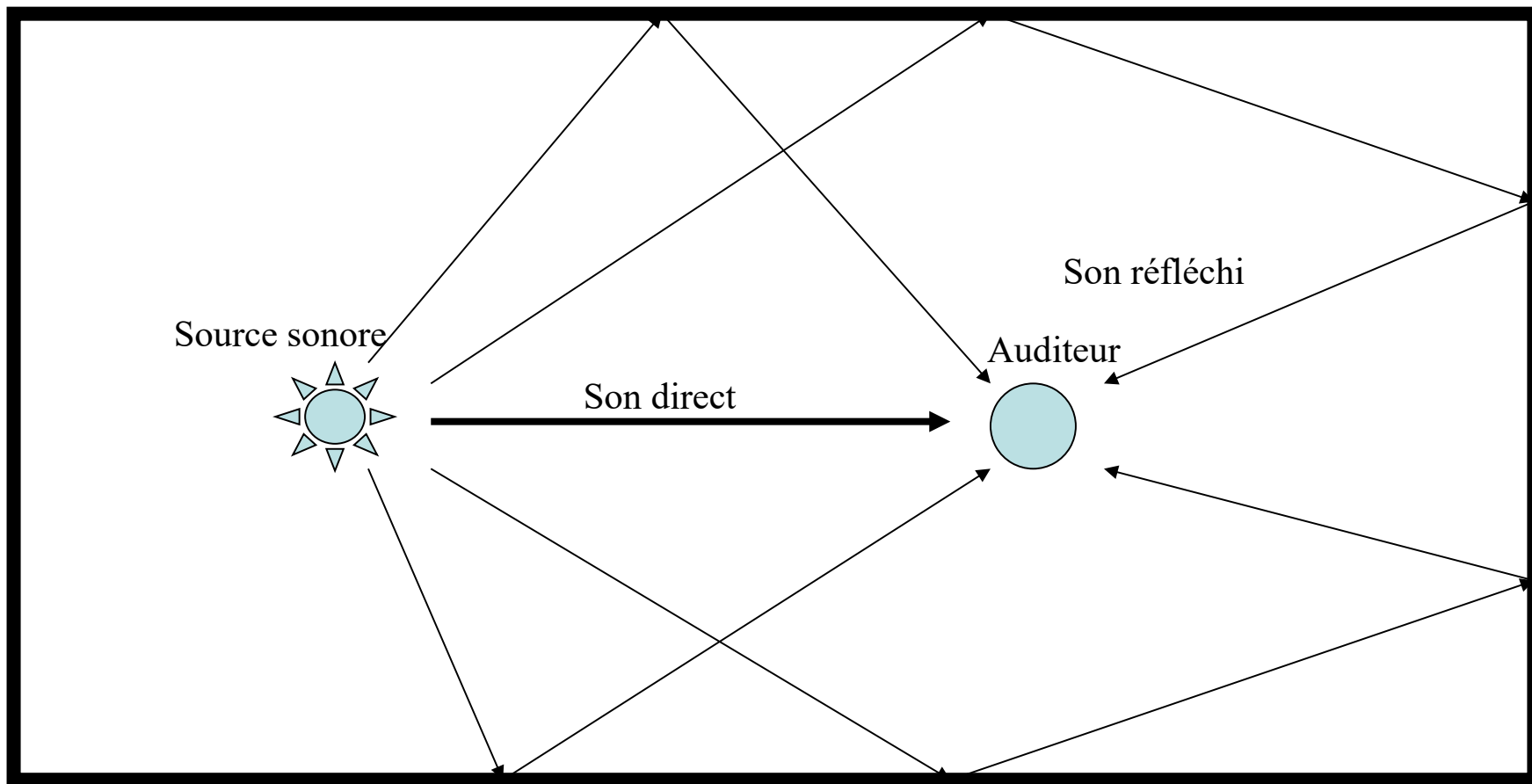
1. Introduction
2. Approche modale
3. Champ diffus
4. Temps de réverbération
5. Autres indicateurs

# 1. Introduction

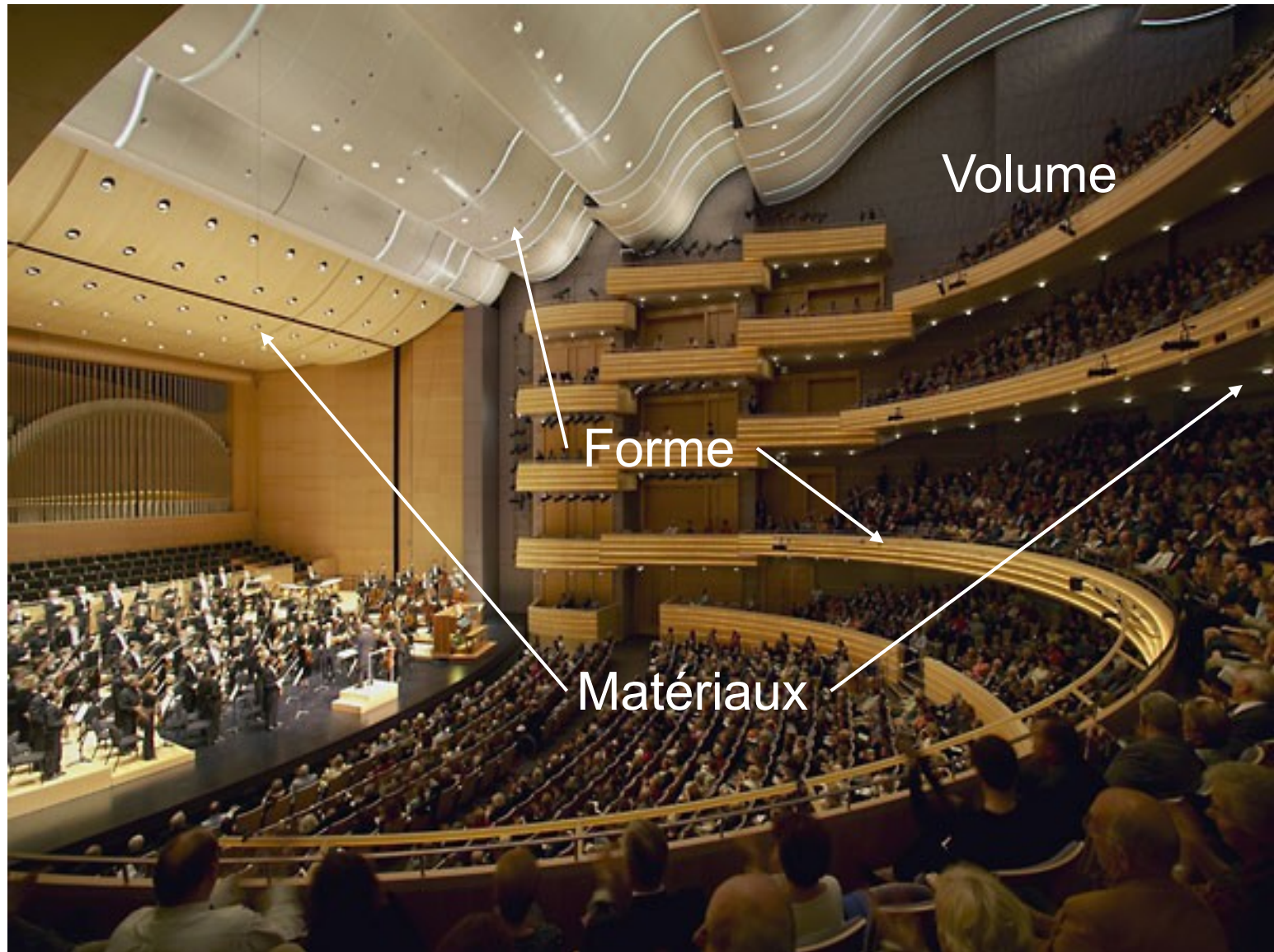


L'acoustique des salles vise à offrir la meilleure qualité possible d'écoute à différents lieux dédiés au spectacle ou non : salle de concert, théâtre, opéra, mais aussi des lieux publics comme des hall d'entrée, des gymnases, des piscines, des réfectoires...

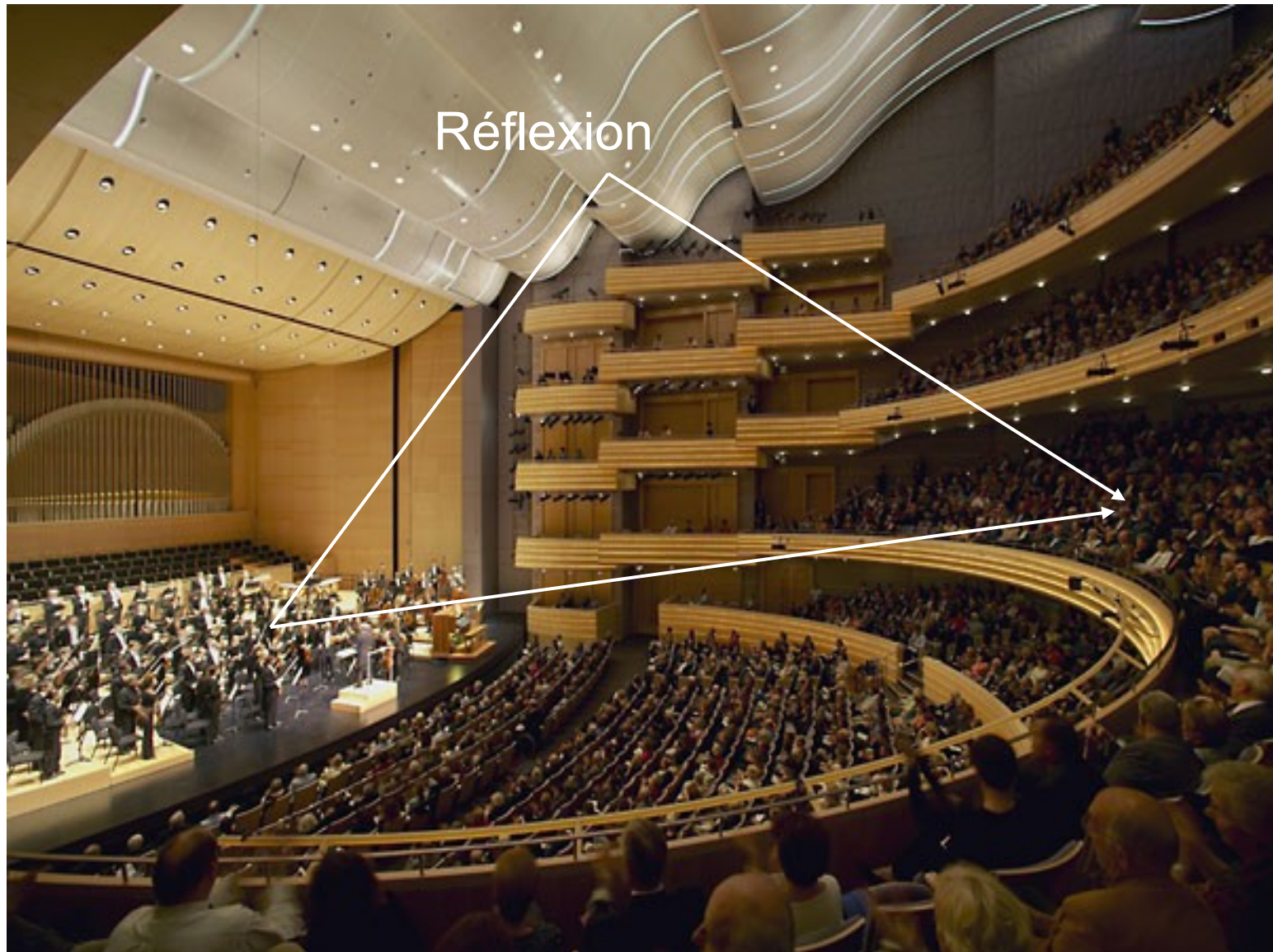
# Son direct et son réverbéré (champs diffus)

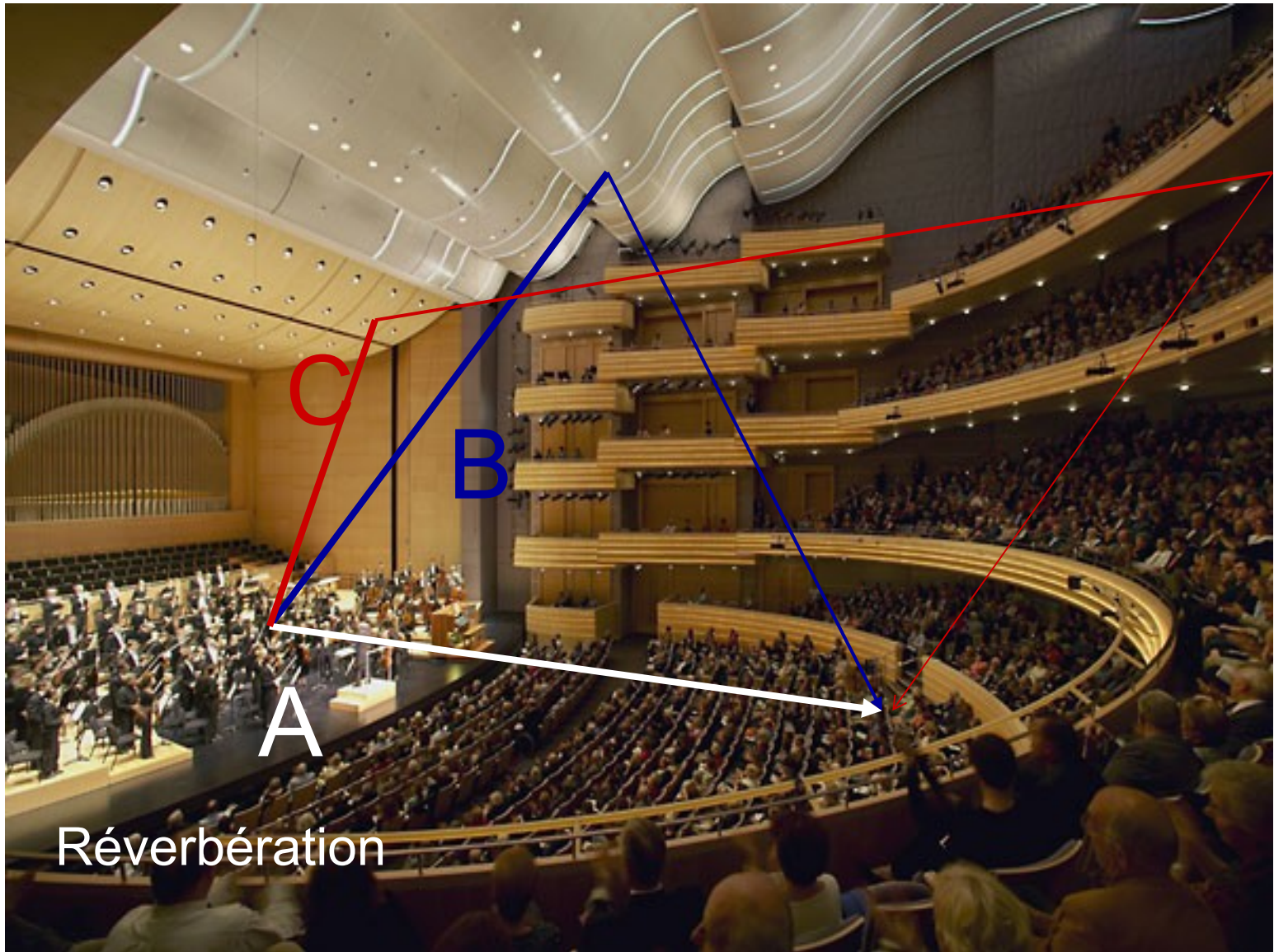


# Facteurs influant sur la qualité acoustique



# Différents Chemins sonores



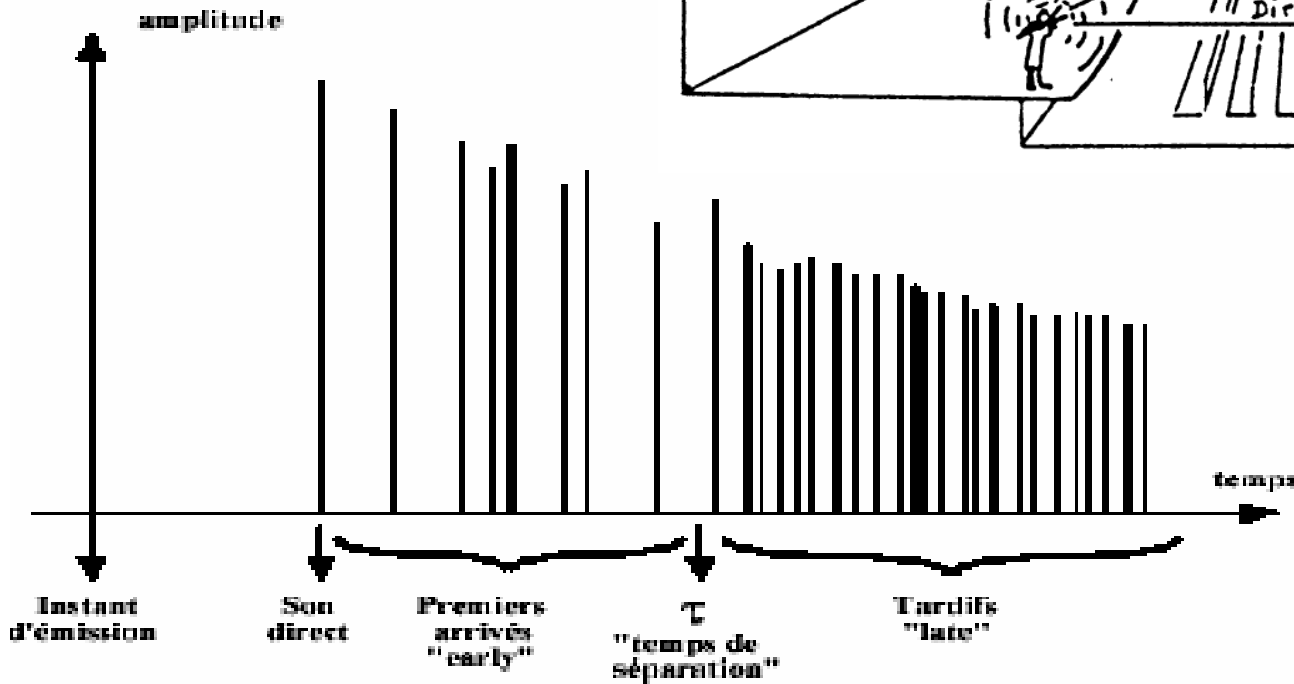
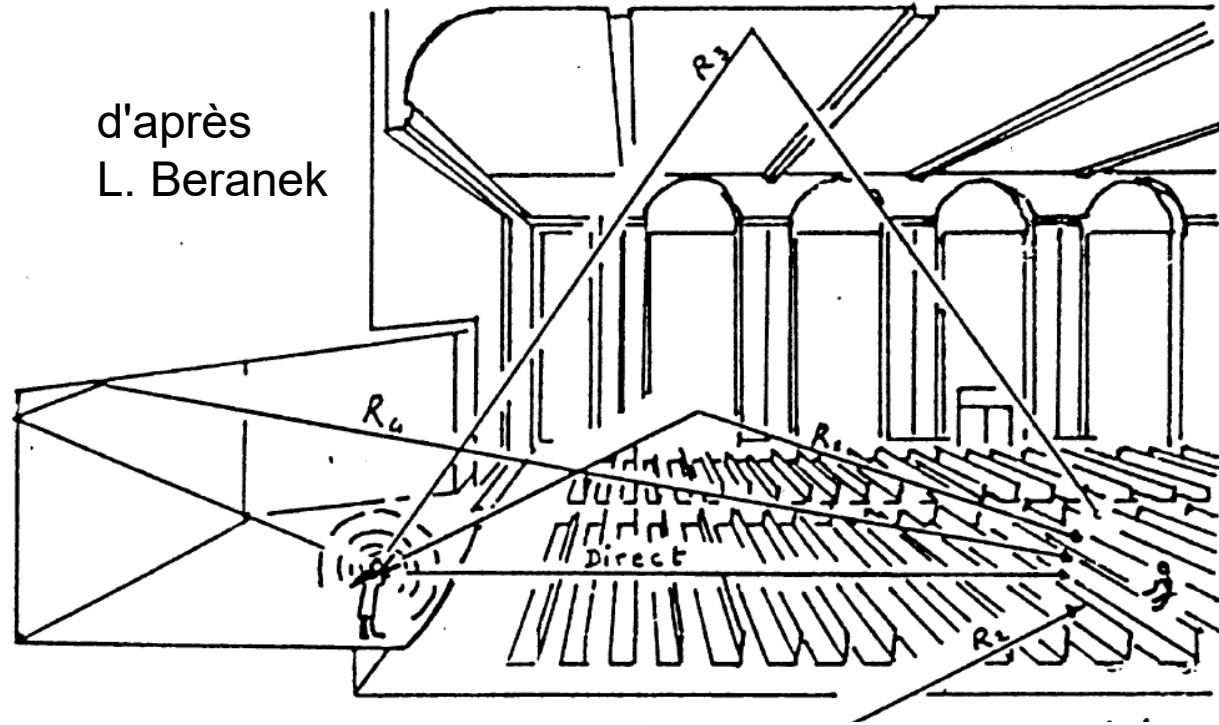


Réverbération

# RÉPONSE D'UNE SALLE

Domaine temporel

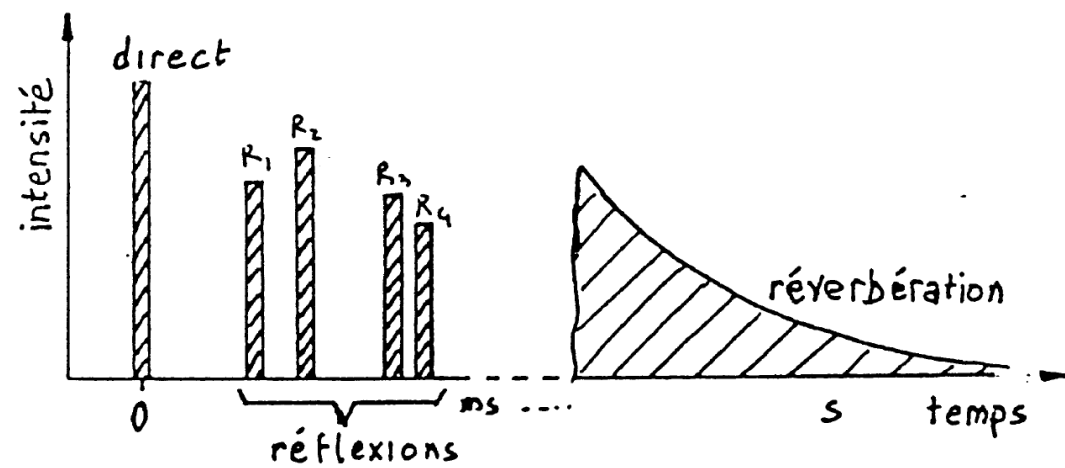
d'après  
L. Beranek



Échogramme



# VOCABULAIRE



Son direct : onde suivant le chemin direct émetteur-récepteur (+ première réflexion sur le sol).

Premières réflexions : deux groupes

- < 50 ms : intégration perceptive au son direct  
=> *niveau*
- > 50 ms : => *qualité*

Son réverbéré : échos du 3ème ou 4ème ordre et suivants ne dépend que des paramètres *globaux* de la salle

# RÉPONSE D'UNE SALLE

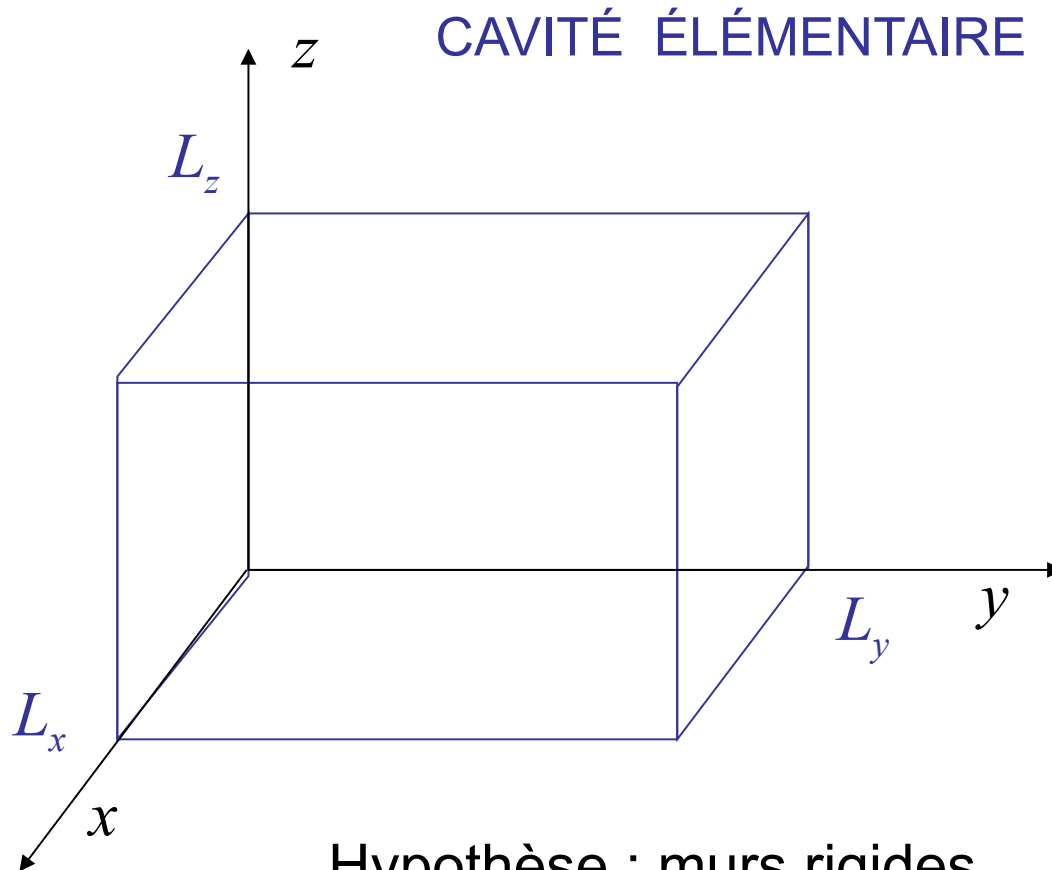
Comment prédire la réponse ?

Basses fréquences : théorie modale

Moyennes et hautes fréquences : théorie de la réverbération

Hautes fréquences : acoustique géométrique  
(méthode des rayons)

## 2. Approche modale

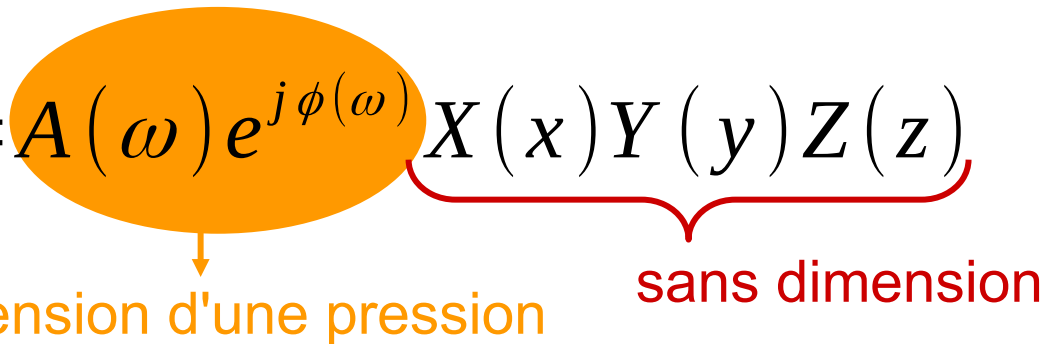


Hypothèse : murs rigides

Conséquence : pas de dissipation (irréaliste, mais on peut ajouter la dissipation après)

# SÉPARATION DES VARIABLES

$$P(x, y, z, \omega) = A(\omega) e^{j\phi(\omega)} X(x) Y(y) Z(z)$$



dimension d'une pression      sans dimension

L'équation de Helmholtz :

$$\Delta P(x, y, z, \omega) + \frac{\omega^2}{c^2} P(x, y, z, \omega) = 0$$

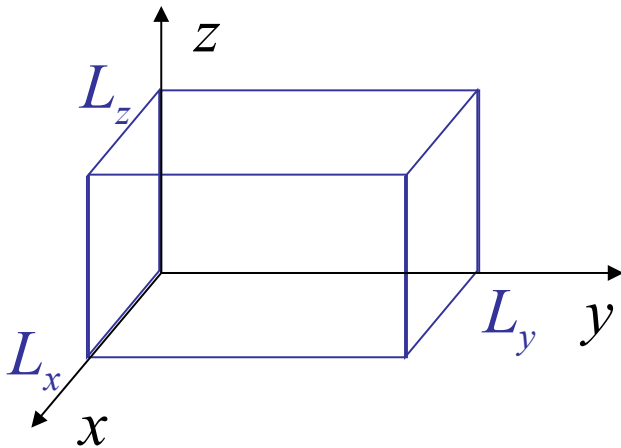
devient :

$$\frac{X''}{X} + \frac{Y''}{Y} + \frac{Z''}{Z} + \frac{\omega^2}{c^2} = 0$$

## CONDITIONS AUX LIMITES

$$\frac{X''}{X} + \frac{Y''}{Y} + \frac{Z''}{Z} + \frac{\omega^2}{c^2} = 0$$

Dérivée par rapport à  $x$  :



$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{X''}{X} \right) = 0 \Rightarrow \frac{X''}{X} = -k_x^2$$

$$\Rightarrow \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + k_x^2 X = 0$$

$$v_x|_{x=0, L_x} = 0 \Rightarrow \frac{\partial p}{\partial x}|_{x=0, L_x} = 0$$

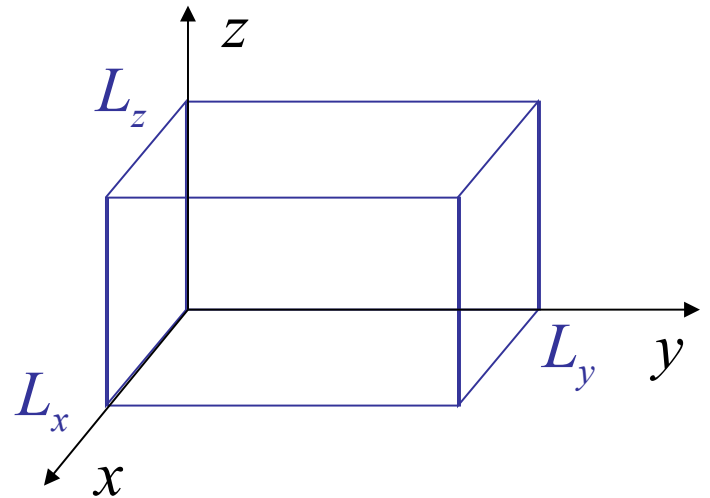
$$X(x) = \cos\left(\pi n_x x / L_x\right)$$

# DÉFORMÉES MODALES

On procède avec  $Y$  et  $Z$  comme avec  $X$ .

Le triplet  $(n_x, n_y, n_z)$  caractérise chaque solution :

$$k_x = \pi n_x / L_x, k_y = \pi n_y / L_y, k_z = \pi n_z / L_z$$



$$P(x, y, z, \omega_{n_x, n_y, n_z}) =$$

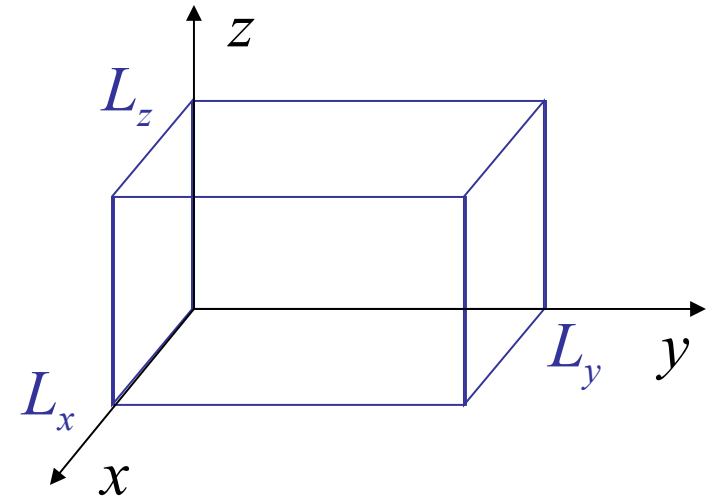
$$Ae^{i\phi} \cos(\pi n_x x / L_x) \cos(\pi n_y y / L_y) \cos(\pi n_z z / L_z)$$

# FRÉQUENCES PROPRES

Recherche des  $\omega$  :

$$\frac{X''}{X} + \frac{Y''}{Y} + \frac{Z''}{Z} + \frac{\omega^2}{c^2} = 0$$

$$-\left(k_x^2 + k_y^2 + k_z^2\right) + \frac{\omega_{n_x, n_y, n_z}^2}{c^2} = 0$$



$$\omega_{n_x, n_y, n_z} = \pi c \sqrt{\frac{n_x^2}{L_x^2} + \frac{n_y^2}{L_y^2} + \frac{n_z^2}{L_z^2}}$$

# Cas d'une forme plus générale

Résoudre l'équation de Helmholtz

$$\Delta p + k^2 p = 0$$

Conditions aux limites sur les surfaces

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad \text{sur } \Gamma$$



$(k_i, \Phi_i(x))$  Suite discrète de valeurs propres et de fonctions propres obtenues par exemple par un calcul éléments finis



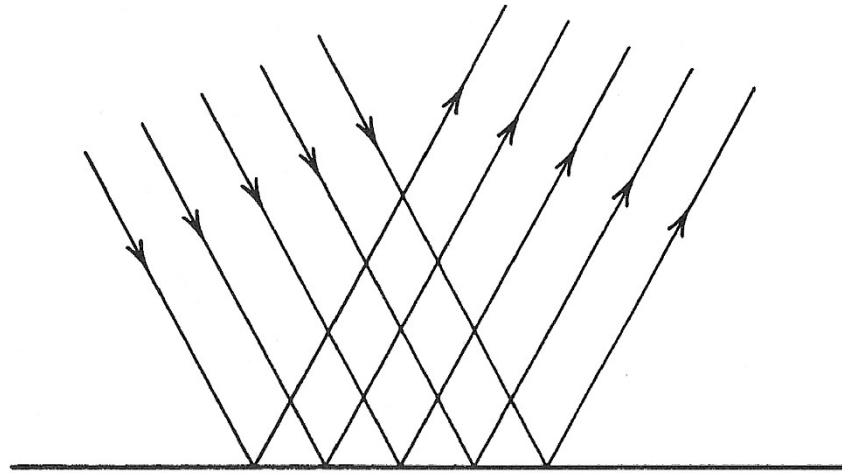
# Formule de Weyl

$$N(f) \approx \frac{4}{3} \frac{\pi V}{c^3} f^3$$

- $N(f)$  : Nombre de fréquences de résonance inférieures à  $f$
- $V$  : Volume de la cavité
- $c$  : Vitesse du son
- À : vérifier dans le cas du volume parallélépipédique

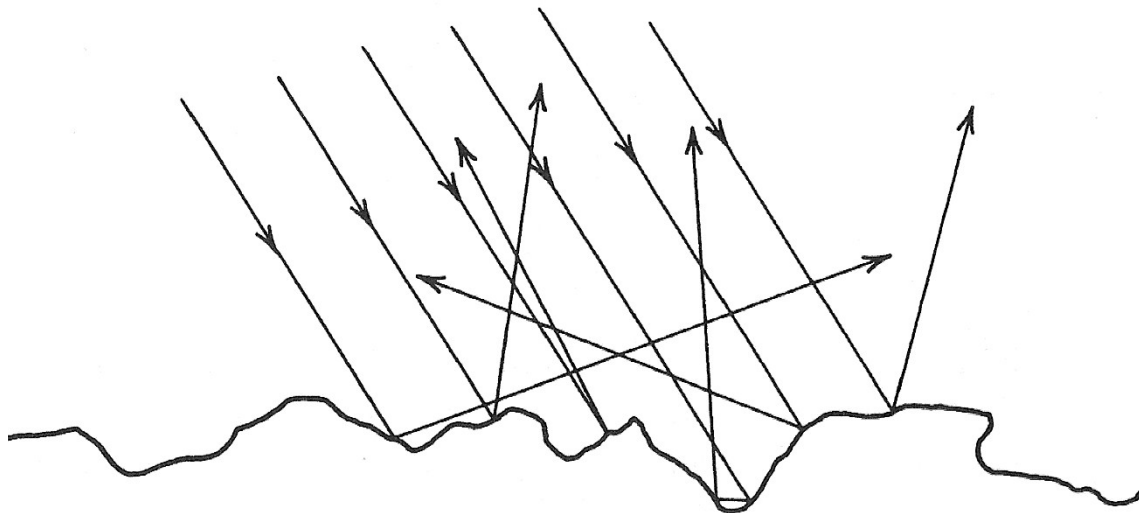
### 3. Champ diffus

Réflexion



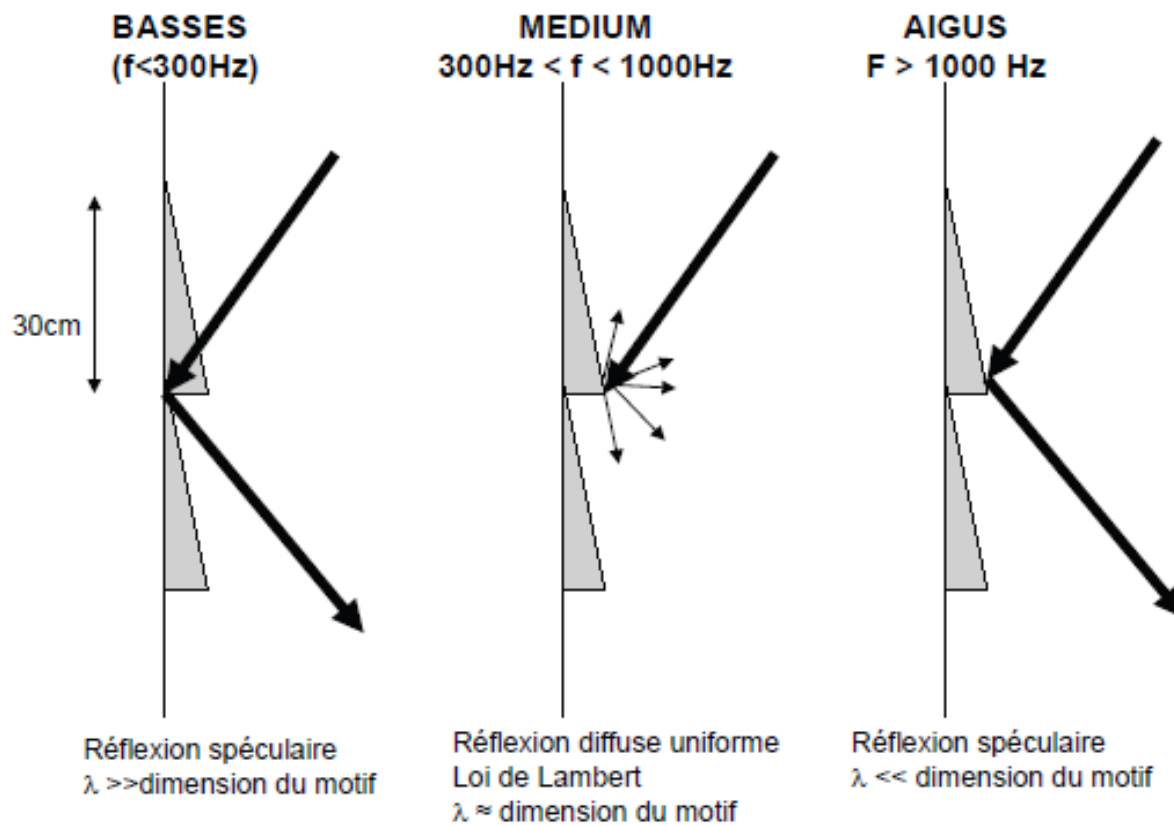
(a)

**Spéculaire**



(b)

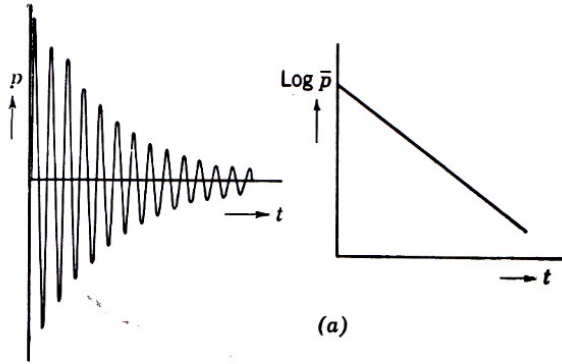
**Diffuse**



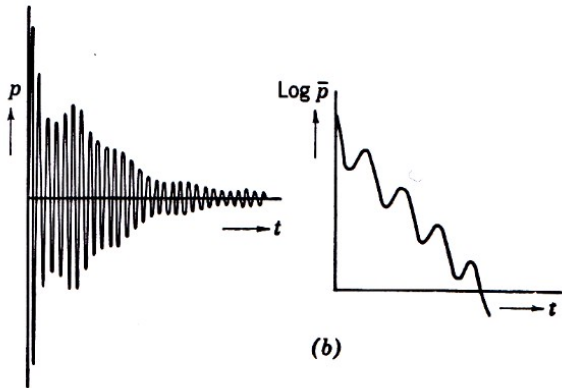
## *Perte d'énergie lors des réflexions :*

- *Le son est réfléchi de nombreuses fois sur les parois avec une perte d'énergie à chaque fois (dissipée en chaleur)*
- *La quantité  $\alpha$  est le coefficient d'absorption de la surface.*
- *La perte d'intensité du son lors de la réflexion est  $\Delta I_{\text{perte}} = \alpha I_{\text{in}}$ .*

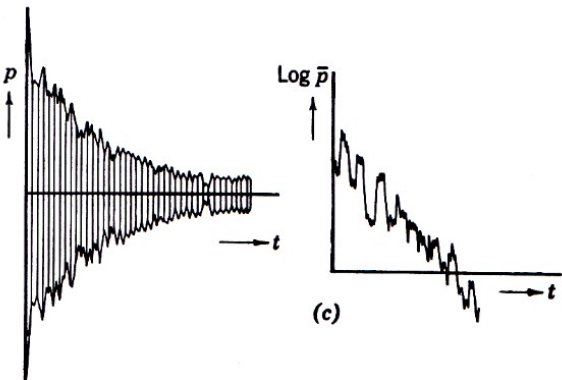
# Décroissance des modes



Un seul mode  $p \cdot e^{-at}$



Deux modes  $p_1 \cdot e^{-at} + p_2 \cdot e^{-bt}$



De nombreux modes

instantané

enveloppe

# Champ diffus

- Hypothèses de champ diffus :
  - A chaque position l'énergie vient de toutes les directions avec une intensité égale
  - La densité d'énergie est indépendante de la position

- Pour une onde plane  $p = \rho_0 c v$

$$w = \frac{p^2}{\rho_0 c^2} \text{ densité d'énergie}$$

$$I = \frac{p^2}{\rho_0 c} \text{ intensité acoustique}$$

$$I = cw$$

- Pour toutes les directions, en moyenne

$$w = \frac{I}{c} = \frac{W}{V}$$

W énergie acoustique totale dans le volume V

# Puissance incidente dans une direction

La puissance incidente dans une direction donnée est la moyenne de celle de toutes les ondes planes

$$I_n = \frac{1}{4\pi} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} I \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi = \frac{I}{4}$$

La puissance incidente sur les murs de la salle est donc

$$P_i = \frac{I}{4} S$$

En régime stationnaire, la puissance de la source P vérifie

$$P = \frac{1}{4} \bar{\alpha} I S$$

Moyenne des absorptions

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^{i=n} \alpha_i S_i$$



# Niveau sonore

En régime stationnaire, la puissance de la source  $P$  vérifie

$$P = \frac{1}{4} \bar{\alpha} I S$$

Avec

$$I = \frac{p^2}{\rho_0 c}$$

On en déduit la relation entre le niveau  
de pression et la puissance de la source

$$P = \frac{1}{4} \frac{\bar{\alpha} S}{\rho_0 c} p^2$$

## 4. Temps de réverbération

En écrivant que la variation d'énergie dans la cavité est égale à l'énergie absorbée par les parois

$$dW = -\frac{I}{4} S \bar{\alpha} dt$$

Comme l'énergie moyenne et l'intensité sont liées par

$$\frac{I}{c} = \frac{W}{V}$$

La variation d'intensité est

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{S \bar{\alpha} c}{4V} I$$

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{S \bar{\alpha} c}{4V} I \quad I(t) = e^{-\frac{S \bar{\alpha} c}{4V} t} I_0$$

Décroissance de 60dB quand

$$10^{-6} = e^{-\frac{S \bar{\alpha} c}{4V} T}$$

**Formule de Sabine**

$$T = 0.16 \frac{V}{\bar{\alpha} S}$$

**T temps de réverbération**

# Temps de réverbération

Le temps de réverbération est le temps mis par le son pour décroître de 60 dB.

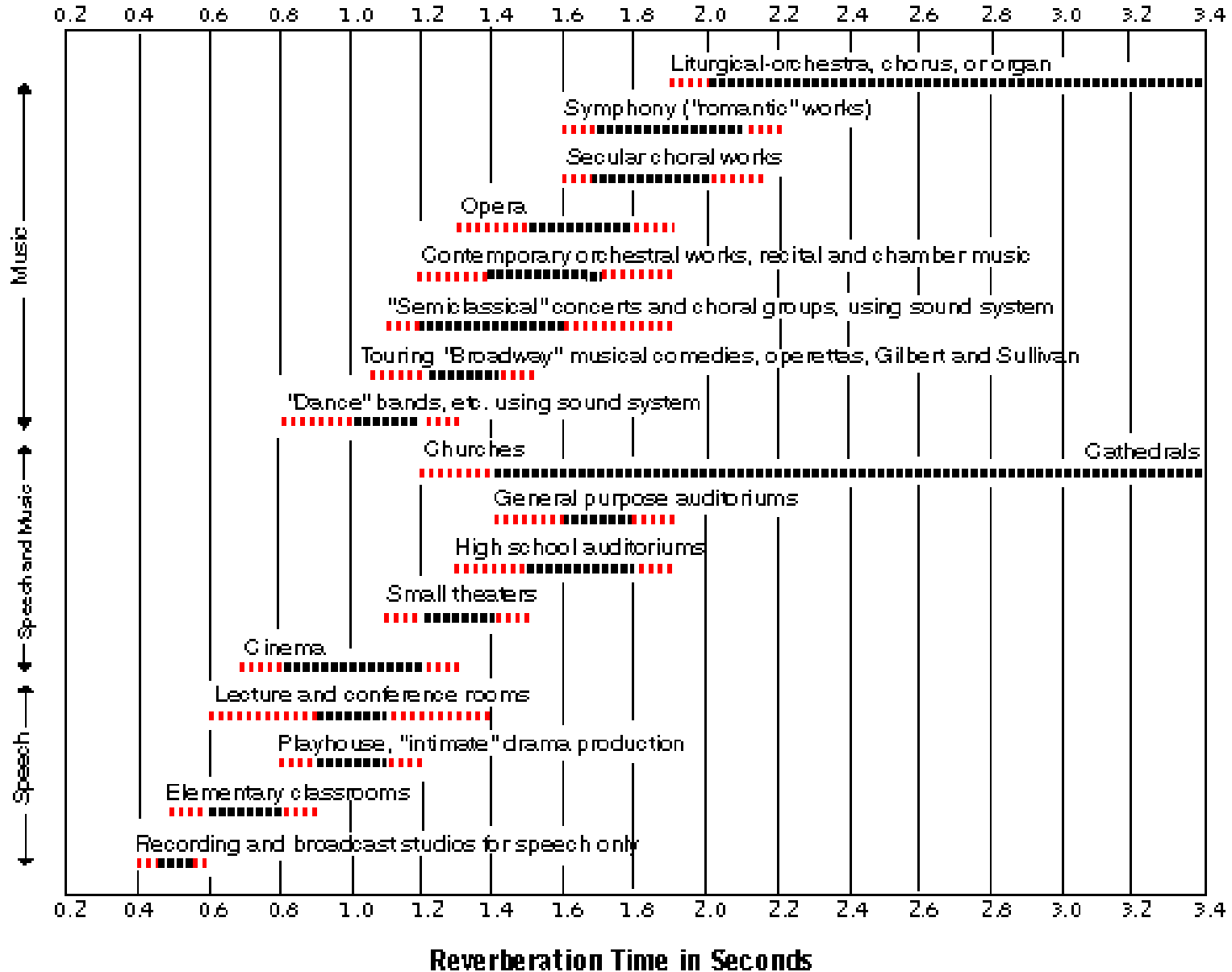
Ce temps peut varier un peu en fonction de la fréquence et de la position dans la salle mais on fait l'hypothèse que ce temps est unique.

Fonction du volume de la salle et de l'absorption des parois.







# Mesure du temps de réverbération










# Temps de réverbération



# Réverbération et parole

- Sans réverbération 
- TR 0.6s 
- TR 0.8s 
- TR 1.3s 
- TR 2.0s 
- TR 5.0s 

## Réverbération et musique

- Musique sans réverbération 
- Musique dans une petite salle TR 0.6s 
- Musique dans une petite salle TR 1.0s 
- Musique dans un grand auditorium TR 1.5s
  - Balcon 
  - Au milieu 
  - Près de la scène 
- Musique dans un grand auditorium TR 2.0s 



## FRÉQUENCE DE SCHROEDER

$$f_s \approx 2000 \sqrt{\frac{T_{60}}{V_{salle}}}$$

La *fréquence de Schroeder* indique la limite pratique de l'utilisation de l'approche modale pour une salle.

Salle : 10m x 7m x 3m

$$T_{60} = 1\text{s}$$

$$f_s = 138 \text{ Hz}$$

- => - approche modale valable en basses fréquences  $f < f_s$
- approche par champs diffus au-dessus  $f > f_s$

Quand la densité modale devient trop grande pour voir les modes

# Chambre anéchoïque

# Chambre réverbérante

# Temps de réverbération en fonction de la fréquence

<b>Bâtiment</b>	<b>Tiers d'octave en Hz</b>	<b>Durée de réverbération en s</b>
Notre-Dame de Paris	125	8,5
	250	8
	500	7,5
	1000	6
	2000	4,5
	4000	2,7
Opéra Bastille (vide)	125	1,8
	250	1,7
	500	
	1000	
	2000	
	4000	1,5

# 5. Autres indicateurs

- La **Définition** : degré de séparation acoustique d'un son par rapport à un autre. Cela inclut le calcul du rapport d'énergie entre le champ direct et le champ global.
- La **Clarté** désigne les propriétés acoustiques d'une salle où les détails de l'image sonore sont aisément perceptibles. On l'obtient par le calcul du rapport exprimé en décibels entre une impulsion sonore perçue à la position d'écoute pendant les 50 ou 80 premières milli-secondes divisée par l'énergie perçue après les 50 ou 80ms.
- La **Spaciosité LF** : le rapport entre les réflexions latérales et l'ensemble des réflexions précoces détermine la spaciosité, c'est à dire la largeur apparente de la source et l'enveloppement des auditeurs.

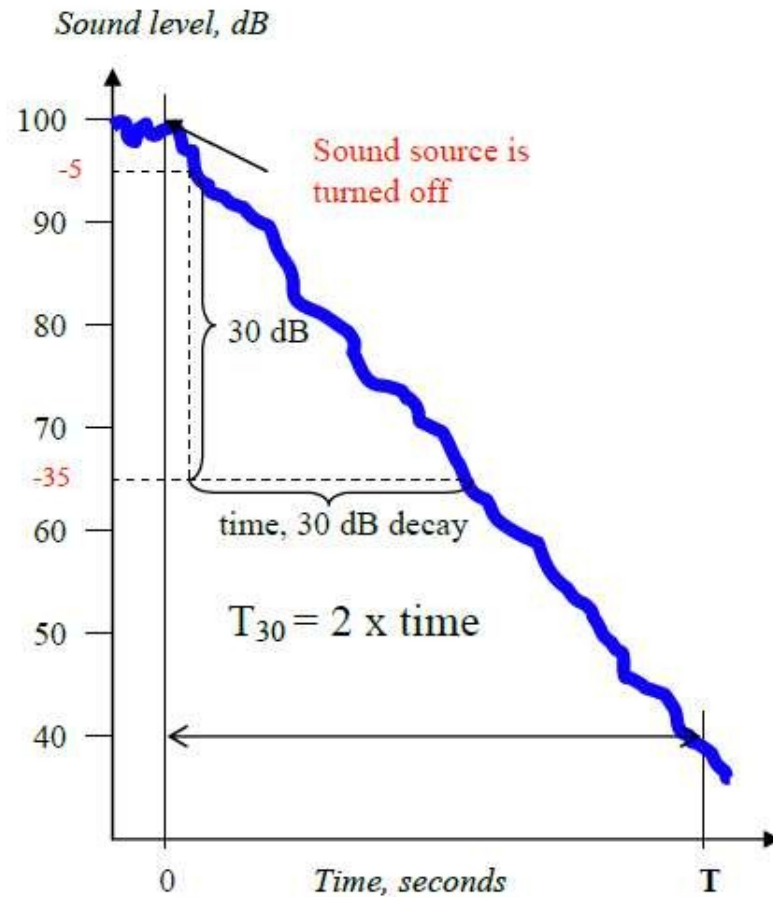
- Le **Rapid Speech Transmission Index (RASTI)** : indice d'évaluation de l'intelligibilité des dialogues calculé sur 2 bandes de fréquence d'une octave (500Hz et 2kHz). Il est quantifié sur une gamme décimale où un indice supérieur à 0,85 est bon et mauvais en dessous de 0,7.
- **Uniformité** : le son doit être égal en tout point pour permettre une perception uniforme du son dans la pièce et éviter des points où le niveau sonore serait faible.
- **Enveloppement** : le son doit venir de toutes les directions.
- Rapport **signal sur bruit** élevé.

# Paramètres acoustiques objectifs importants dans les qualités subjectives d'une salle de concert

- Temps de réverbération (RT, Reverberation Time)
- Temps de décroissance initial (EDT, Early Decay Time)
- Force sonore (G, Strength)
- Clarté (C, Clarity)
- Fraction d'énergétique latérale (LEF, Lateral Energy Fraction)
- Coefficient de corrélation interauriculaire (IACC, Interaural cross correlation)
- Support ST1 ( $ST_{\text{early}}$ ,  $ST_{\text{late}}$  early and late support)
- Rapport des graves et des aigus (BR, Bass Ratio, TR Treble Ratio)
- Intelligibilité de la parole, (STI, Speech Transmission Index)

Utile quand le champ n'est pas parfaitement diffus

# Temps de réverbération (RT, Reverberation Time)

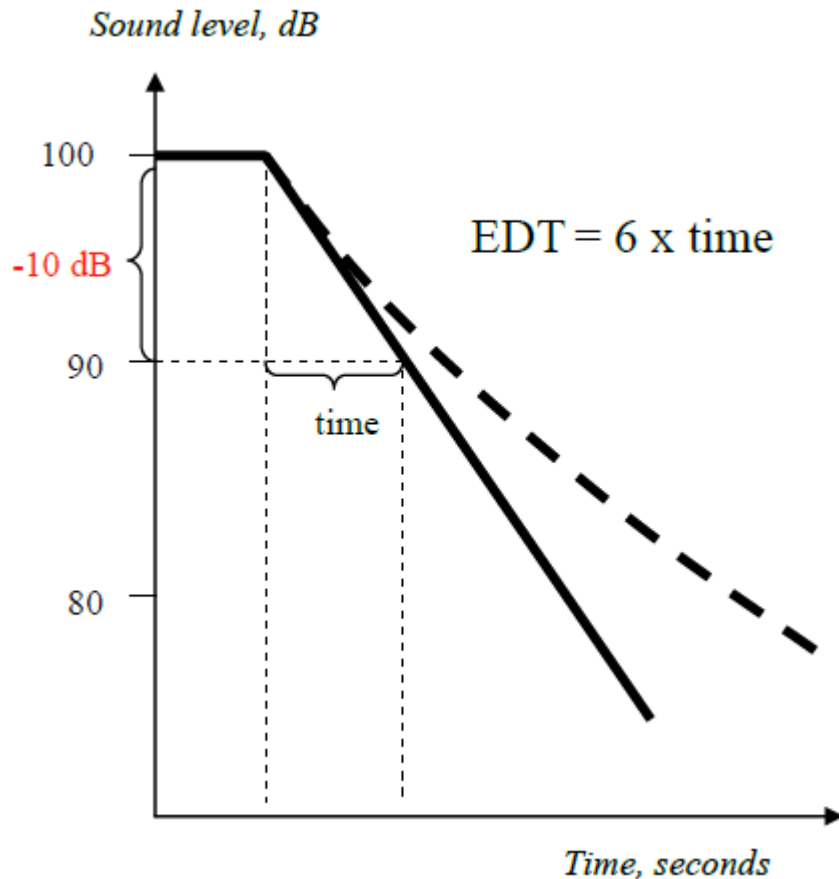


En pratique on mesure souvent le T20 ou le T30



# Temps de décroissance initial (EDT, Early Decay Time)

Temps mis pour décroître des 10 premiers décibels  
multiplié par 6



Cet indicateur peut être différent du TR si la courbe de décroissance n'est pas droite

# Force sonore : Mesure la contribution de la pièce au niveau de bruit généré par une source placée dans cette pièce

Le mesurage de la Force Sonore compare le niveau sonore généré par une source dans la pièce étudiée avec le niveau sonore généré par la même source dans une pièce anéchoïque (totalement absorbante)

Dépend principalement de l'absorption des parois et de la distance source récepteur

Niveau sonore de la source dans une pièce = 70 dB

Niveau sonore de la source dans une chambre anéchoïque = 60 dB

Force sonore  $G = 70 \text{ dB} \text{ moins } 60 \text{ dB} = 10 \text{ dB}$

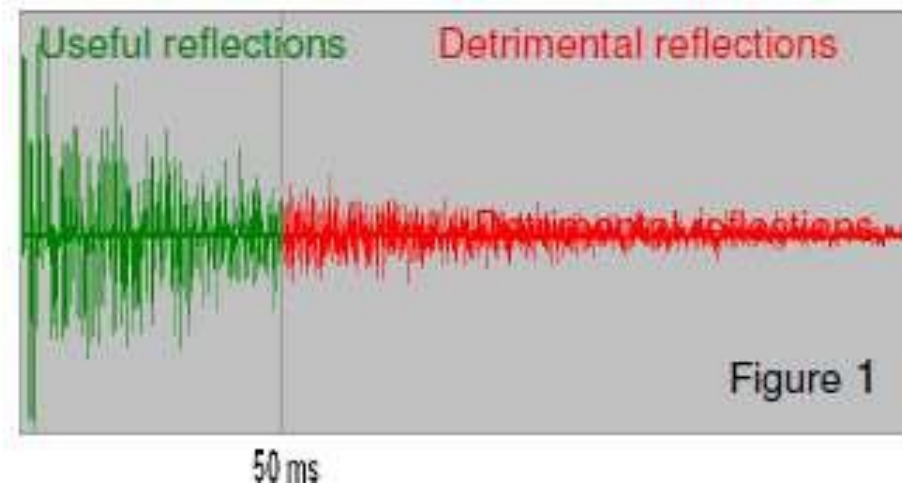
Niveau faible 

Niveau fort 

$$G = \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{free}^2(t) dt}$$

# Clarté (C, Clarity)

- Les réflexions tardives nuisent à l'intelligibilité
- Calculée à partir de la réponse impulsionnelle



$$C_{50} = 10 \log_{10} \frac{\text{Energie}(0 - 50 \text{ ms})}{\text{Energie}(50 \text{ ms} - \text{fin})}$$
$$= 10 \log_{10} \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} h^2(t) dt}{\int_{50 \text{ ms}}^{+\infty} h^2(t) dt}$$

On peut aussi définir le  $C_{80}$  pour la musique ( $C_{50}$  pour la voix)

Il faudrait  $-6\text{dB} < C_{80} < +6\text{dB}$

Si  $C_{80} < -6\text{dB}$  salle trop confuse

Si  $C_{80} > +6\text{dB}$  salle trop sèche

# Fraction d'énergie latérale (LEF, Lateral Energy Fraction)

La fraction d'énergie latérale (LEF) est le rapport entre l'énergie sonore réfléchiée latéralement dans une pièce et l'énergie sonore provenant de toutes les directions, y compris l'énergie sonore directe de la source. C'est une mesure de l'espace d'une pièce.

Rapport de l'énergie comprise dans la partie précoce de la réponse impulsionnelle (première 80ms) mesurée à l'aide d'un microphone bidirectionnel figure de huit à l'énergie comprise dans la partie précoce de la réponse impulsionnelle mesurée à l'aide d'un microphone omnidirectionnel.

$$LEF = \frac{\int_{5ms}^{80ms} p_{bidir}^2(t) dt}{\int_{0ms}^{80ms} p_{omni}^2(t) dt}$$

# Coefficient de corrélation interauriculaire (Interaural cross correlation (IACC))

- Indicateur de la perception du caractère enveloppant du son
- A partir des pressions  $p_g(t)$  et  $p_d(t)$  mesurées aux oreilles gauches et droites

$$IACC = \max_{-1\text{ ms} \leq \delta \leq 1\text{ ms}} \left| \frac{\int_0^{80\text{ ms}} p_g(t) p_d(t + \delta) dt}{\sqrt{\int_0^{80\text{ ms}} p_g^2(t) dt \cdot \int_0^{80\text{ ms}} p_d^2(t) dt}} \right|$$

$$0 \leq IACC \leq 1$$

Si IACC proche de zéro : les deux oreilles perçoivent des sons très différents

Si IACC proche de un : les deux oreilles perçoivent des sons très proches

# Support ST1

( $ST_{early}$ ,  $ST_{late}$  early and late support)

Rapport (en dB) entre l'énergie sonore réfléchie entre 20ms et 100ms (donc en excluant le son direct) et le son direct « étendu » (entre 0 et  $t_{dir} = 10ms$ ), mesuré à une distance de 1m.

$$ST_{early} = 10 \log_{10} \frac{\int_{20ms}^{100ms} p_{1m}^2(t) dt}{\int_0^{t_{dir}} p_{1m}^2(t) dt}$$

$$ST_{late} = 10 \log_{10} \frac{\int_{100ms}^{1000ms} p_{1m}^2(t) dt}{\int_0^{t_{dir}} p_{1m}^2(t) dt}$$

$ST_{early}$  estime à quel point les musiciens peuvent s'entendre

## Rapport des graves et des aigus (BR, Bass Ratio, TR Treble Ratio)

Ils sont liés aux impressions subjectives de chaleur et de brillance et sont définis comme la contribution relative des fréquences respectivement basses et hautes à l'énergie spectrale globale, et sont calculés à partir des temps de réverbération dans des fréquences spécifiques (désignées par  $T_{\text{freq}}$ ).

$$BR = \frac{T_{125 \text{ Hz}} + T_{250 \text{ Hz}}}{T_{500 \text{ Hz}} + T_{1000 \text{ Hz}}}$$

$$TR = \frac{T_{2000 \text{ Hz}} + T_{4000 \text{ Hz}}}{T_{500 \text{ Hz}} + T_{1000 \text{ Hz}}}$$

# Intelligibilité de la parole (STI, Speech Transmission Index)

Basé sur l'idée que le discours peut être modélisé comme un signal modulé en amplitude dans lequel le degré de modulation transporte les informations du discours (bonne séparation des pics et des creux du son).

Les sti sont mesurées en utilisant 7 bandes de bruit modulées par 14 fréquences.

STI	0 - 0,3	0,3 - 0,45	0,45 - 0,6	0,60 - 0,75	0,75 - 1,0
	inintelligible	faible	satisfaisant	bon	excellent

Une méthode de mesure plus rapide utilisant seulement deux bandes porteuses (500 et 2000Hz) et quatre fréquences de modulation (1, 2, 4 et 8Hz) pour 500Hz plus cinq fréquences de modulation (0.7, 1.4, 2.8, 5.6 et 11.2 Hz) pour 2000Hz est appelée rapid sti (rasti) maintenant remplacé par le **STIPA** (**S**peech **T**ransmission **I**ndex for **P**ublic **A**ddress **S**ystems)

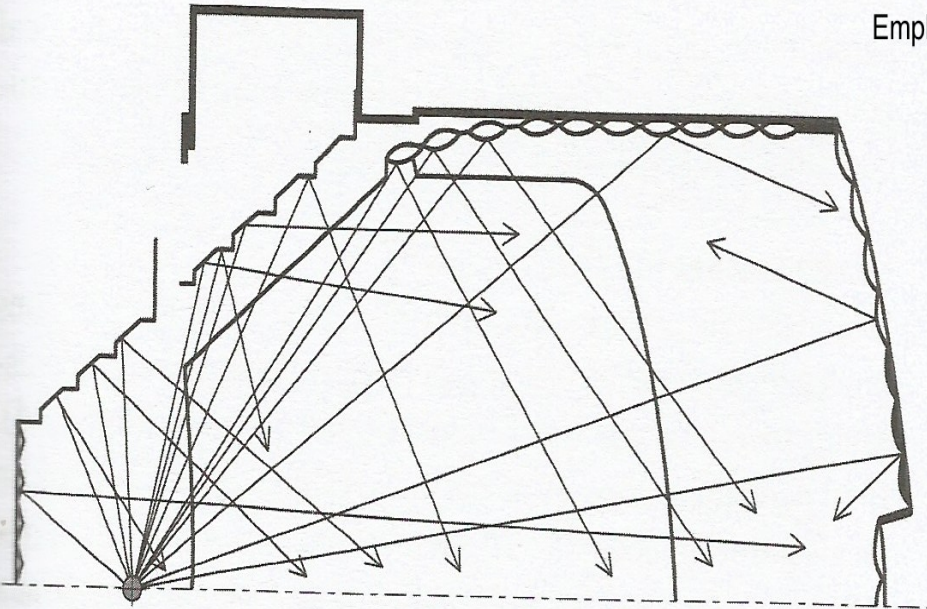


# Valeurs suggérées de paramètres acoustiques de salles de concert vides pour la musique classique

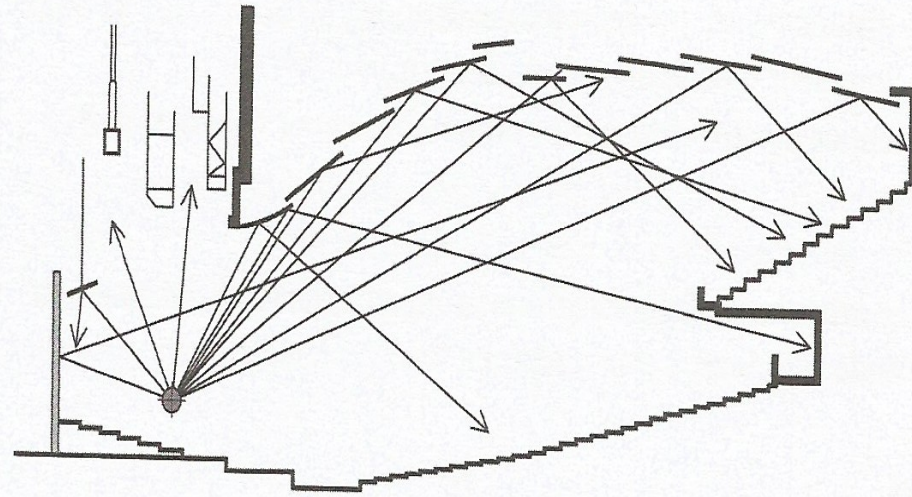
<b>Paramètre</b>	<b>Symbole</b>	<b>Musique de chambre</b>	<b>Symphonie</b>
Volume	V	2500m <sup>3</sup> / 300 places	25000m <sup>3</sup> / 2000 places
Temps de réverbération	T	1.5s	2.0-2.4s
Temps de décroissance initial	EDT	1.4s	2.2s
Force sonore	G	10dB	3dB
Clarté	C	3dB	-1dB
Fraction d'énergie latérale	LEF	0.15-0.20	0.20-0.25
Coefficient de corrélation interauriculaire	IACC	0.6	0.7
Support ST1	STearly	-10dB	-14dB

# Méthode des rayons en acoustique des salles

Emplacement des réflecteurs déterminé à partir du tracé des rayons sonores :  
exemple du Neues Festspielhaus, à Salzbourg



Vue en plan



Coupe

**FIN**