

Acoustique des salles

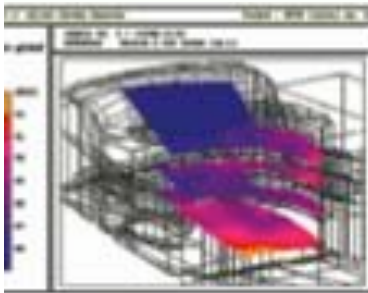
Ricardo ATIENZA

Suzel BALEZ

CRESSON

L5C

École Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble



[Acoustique des salles]

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 aux lieux publics** comme des hall d'entrée, des gymnases, des piscines, des réfectoires...

Mots-clés :

Champ direct et champ diffus
Réverbération d'un local
Décroissance sonore d'une source
Intelligibilité de la parole
Formule de Sabine
Coefficient d'absorption alpha Sabine
Aire équivalente d'absorption...



la salle des Princes, Monaco - Système Carmen

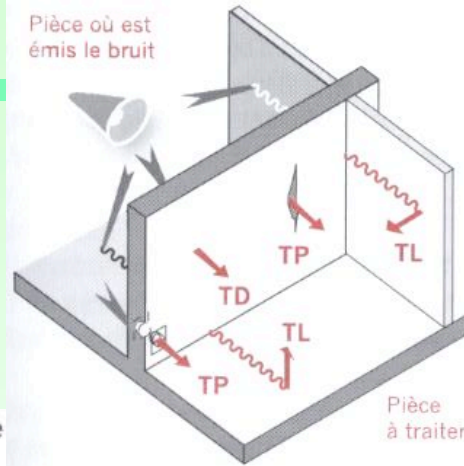


Hall de la Gare du Nord, SNCF - AREP - image N. Rémy

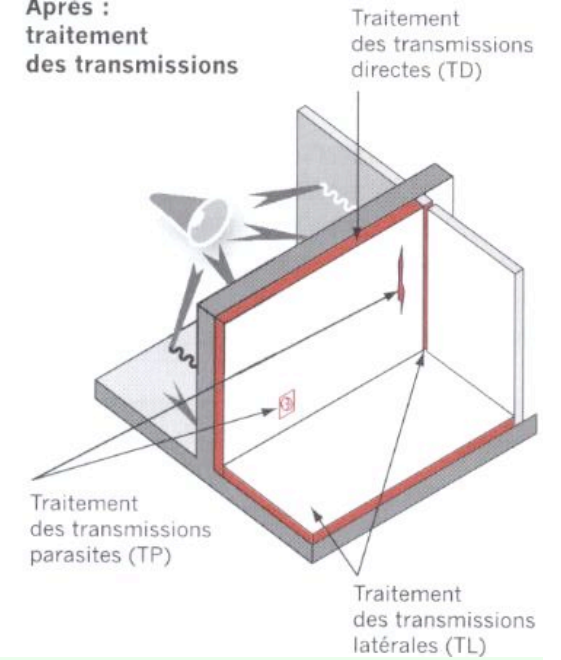
Ne pas confondre isolation et correction

Isolation acoustique

Avant :
transmissions d'un bruit aérien
entre deux pièces

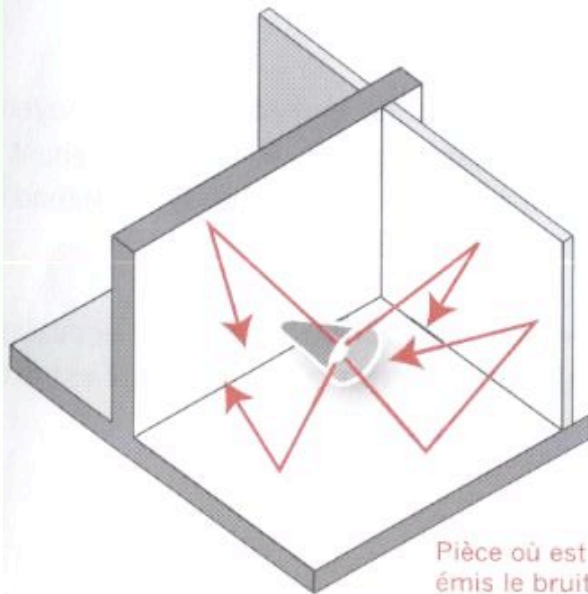


Après :
traitement
des transmissions

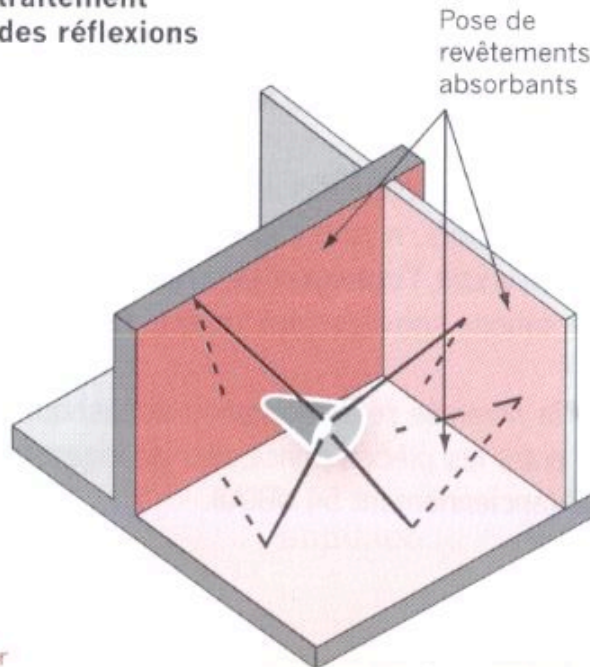


Correction acoustique

Avant :
effets de réflexion d'un bruit
à l'intérieur d'une pièce

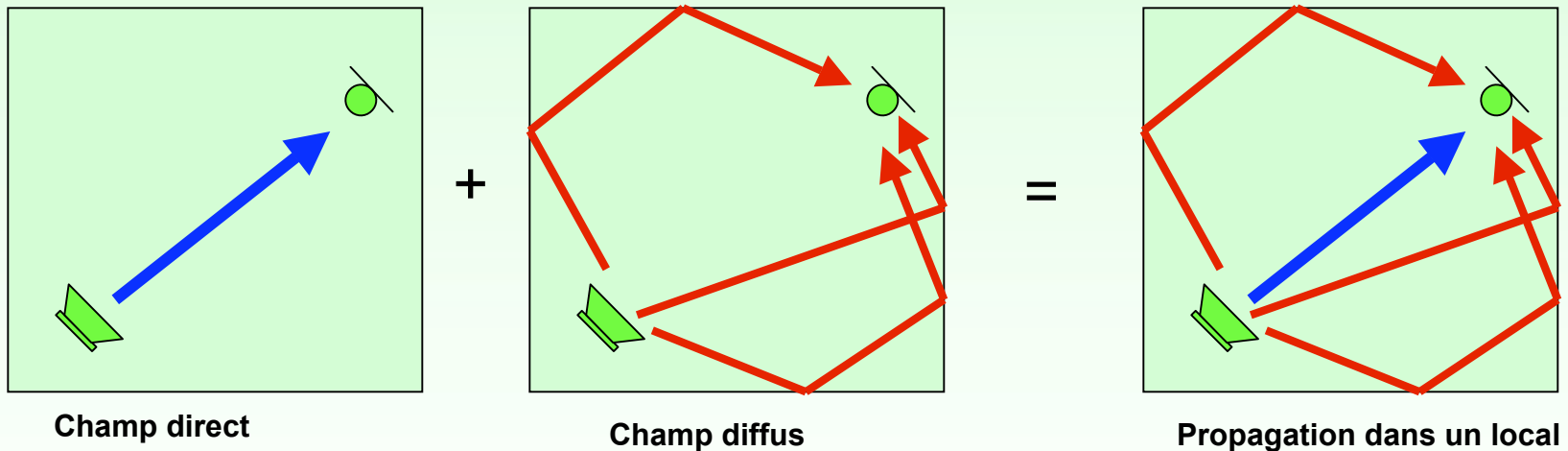


Après :
traitement
des réflexions



1-Positionnement du problème

Les lois de l'acoustique des salles reposent sur un raisonnement simple ; on peut décomposer le champ sonore dans un local comme la somme d'un champ direct et d'un champ diffus.



Loi de propagation en champ libre → $L_p = L_w + 10 \log \frac{Q}{4\pi d^2}$ en dB(A)

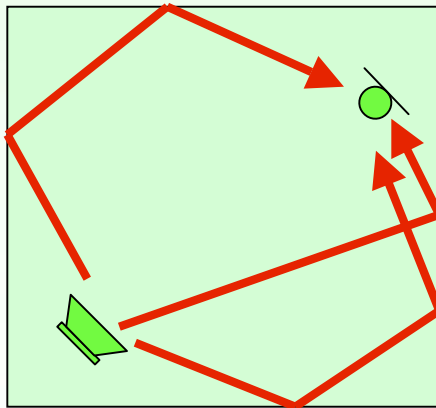
Niveau de pression Niveau de puissance

2- Hypothèse du champ diffus

. Pour la partie de l'énergie acoustique diffusée par la salle, on parle de **champ diffus** ou de **champ réverbéré**.

Pour ce qui concerne le champ diffus, W.C. Sabine avait observé que le **son** est **statistiquement homogène** dans la salle (salle suffisamment réverbérante).

Si on émet un signal sonore continu dans une salle, on atteindra une phase stationnaire où la puissance acoustique émise par la source s'équilibrera avec celle absorbée par la salle. Autrement dit, quelque soit la position du microphone ou de l'observateur, le niveau sonore est constant.



Champ diffus

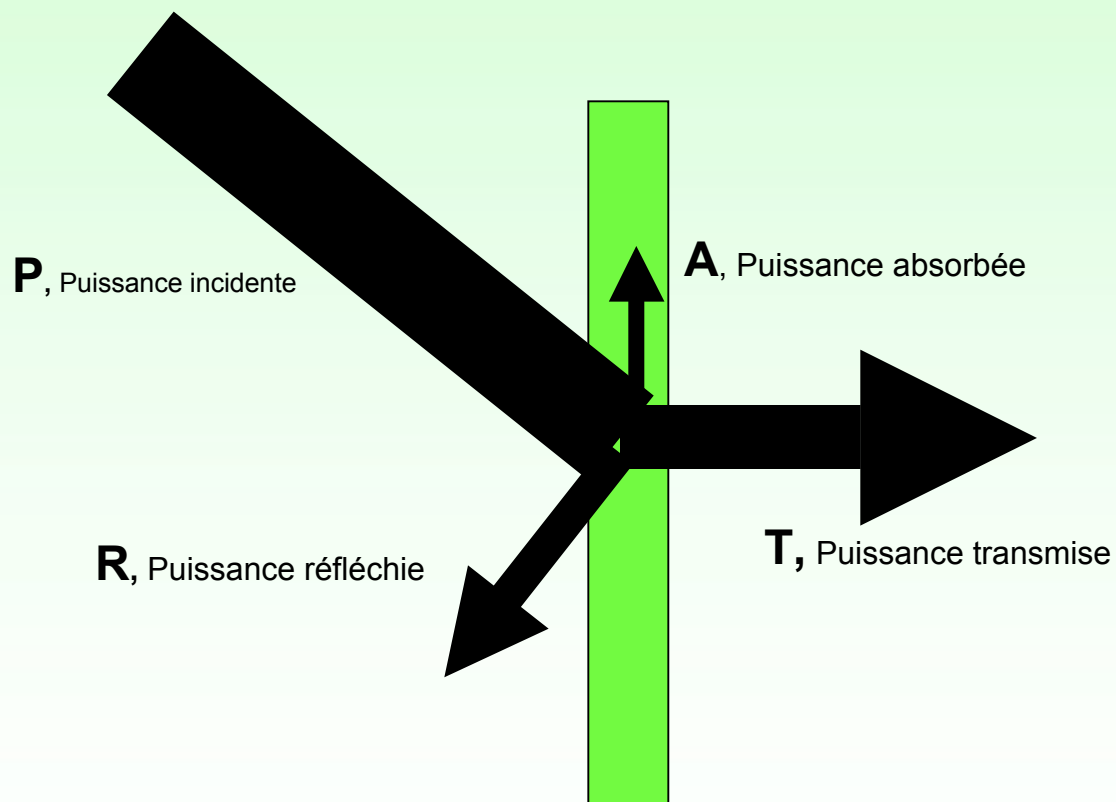
Le niveau sonore ne dépend pas de la position de l'observateur (en champ diffus).

On peut montrer, que :

$$I = \frac{P^2}{4\rho c}$$

- P^2 , puissance acoustique efficace en Pascal
- ρ , masse volumique de l'air = 1,16Kg/m³
- c , célérité du son (vitesse du son) = 342m/s

3- Comportement acoustique d'une paroi soumise à une puissance acoustique



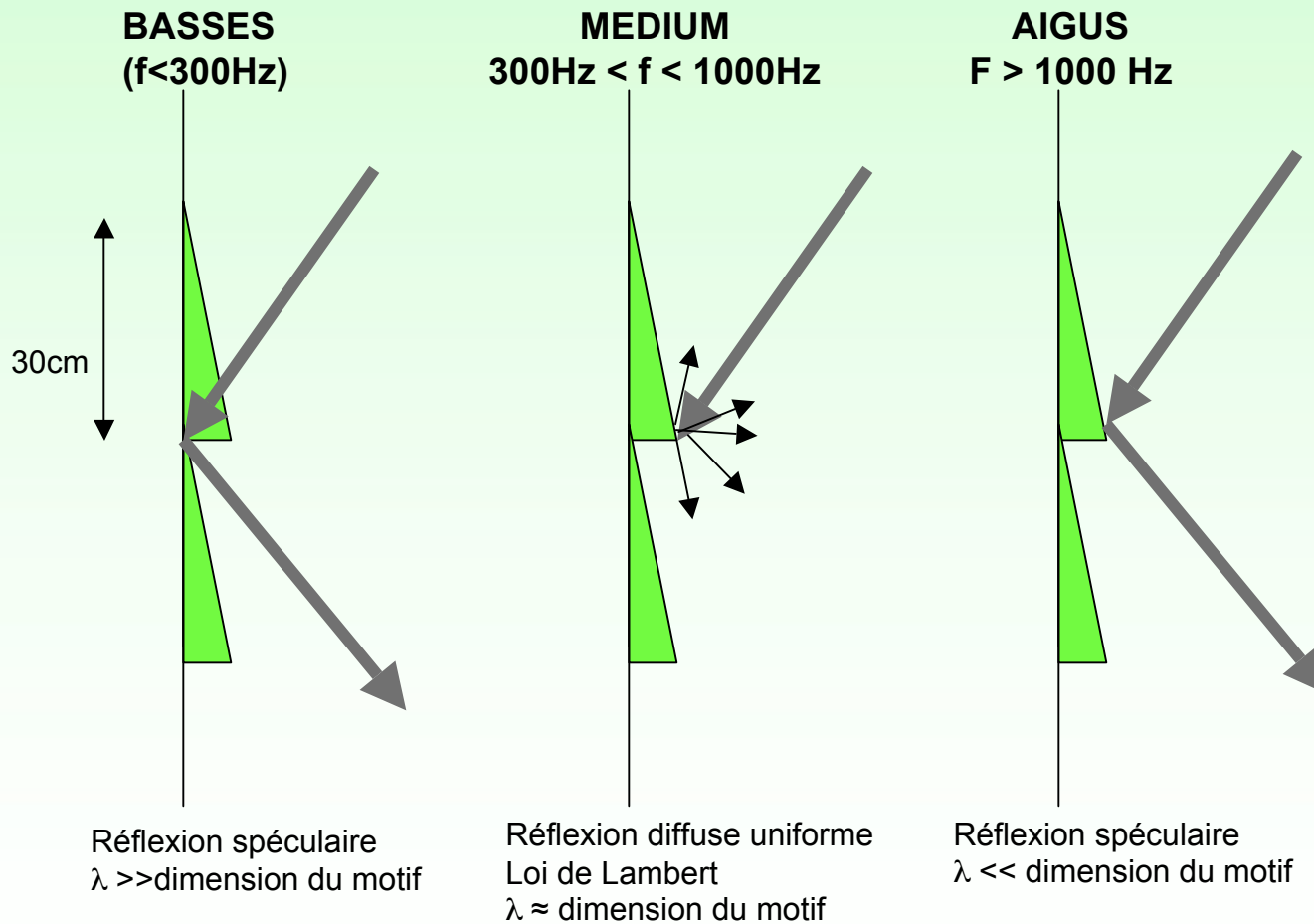
$$P = A + T + R$$
$$\frac{P}{P} = \frac{A}{P} + \frac{T}{P} + \frac{R}{P}$$
$$1 = \alpha + \tau + \rho$$

avec :

- . α , coefficient d'absorption acoustique ou **alpha Sabine**
- . τ , coefficient de transmission acoustique
- . ρ , coefficient de réflexion acoustique

Cette équation est toujours valable mais elle varie avec les longueurs d'onde (les fréquences)

3.1- La réflexion



3.2- Le cas de l'absorption : panneau

- **Effet de panneau** : absorber les graves (< 300Hz)

Le panneau et la masse d'air située derrière celui-ci entrent en **vibration**. Cet ensemble forme une masse relativement lourde qui oscille sur des fréquences basses.

La fréquence propre d'un panneau situé à la distance d d'un mur et de masse surfacique ρ_s (en kg/m^2) vaut :

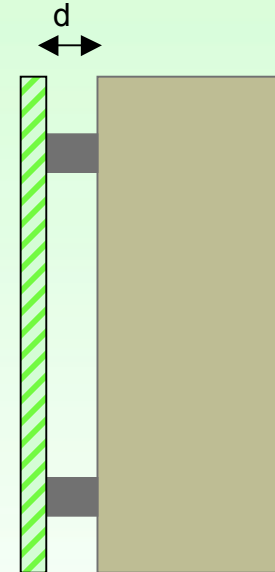
$$f_0 = \frac{60}{\sqrt{\rho_s \cdot d}}$$

[formule simplifiée, mais qui donne un ordre de grandeur acceptable]

Exemple :

Panneau de contreplaqué $\rho_s = 5\text{kg/m}^2$ située à 8cm du mur

$f_0 = 95\text{ Hz}$



3.2- Le cas de l'absorption : résonateur, principe

• **Effet de résonateur de Helmholtz** : absorber les médiums ($300\text{Hz} < f < 1000\text{ Hz}$)
Le résonateur est formé d'un goulot et d'une cavité. L'énergie acoustique fait **vibrer** le résonateur (absorption acoustique). Une fraction de l'énergie acoustique est transformée en chaleur par dissipation sur les parois du goulot (ou dans le matériau poreux placé à l'intérieur).

On peut évaluer la fréquence propre du résonateur avec la formule suivante :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\gamma P_0 S}{\rho_0 l V}}$$

avec,

S, surface du goulot,

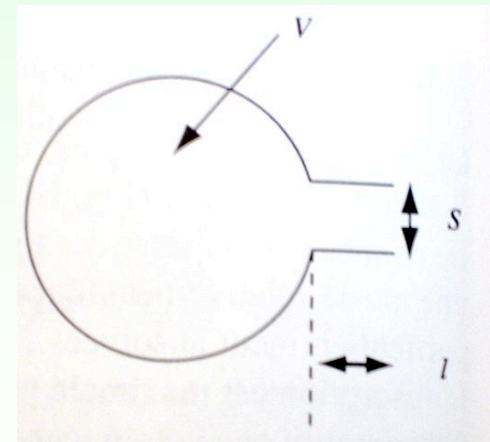
l, longueur du goulot

P_0 , pression atmosphérique ($P_0 = 1,013.105\text{ Pa}$)

V, volume de la cavité (m^3)

ρ_0 , masse volumique de l'air ($\rho_0 = 1,2\text{ Kg/m}^3$ à 20°C)

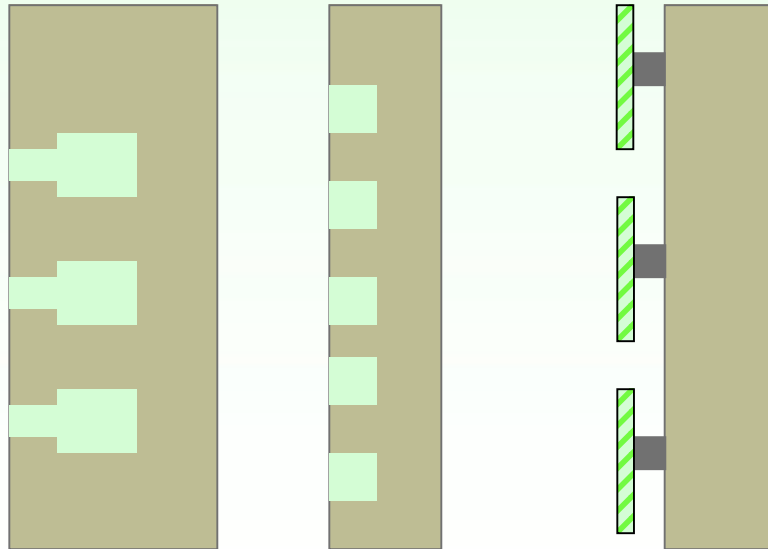
γ , constante thermodynamique ($\gamma = 1,4$)



R- si le goulot est court par son diamètre (dimensions proches), il faut prendre en compte la correction d'extrémité : on remplace dans la formule précédente l, par $l+0,8d$ (avec d, diamètre du goulot).

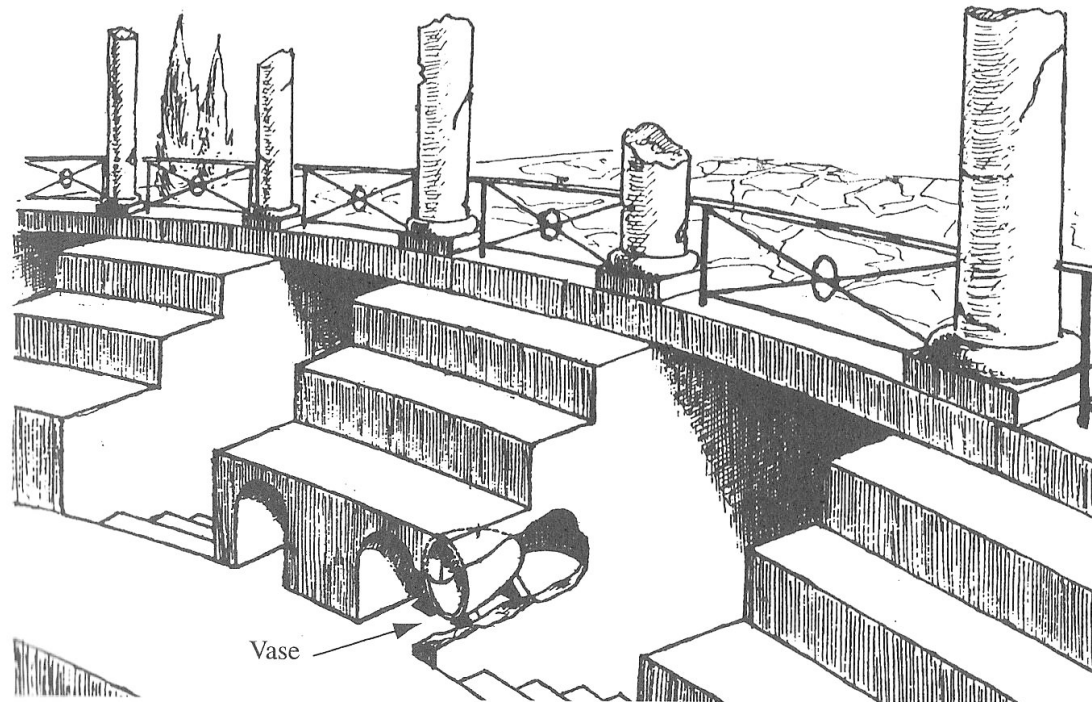
3.2- Le cas de l'absorption : résonateur, pratique

- **Effet de résonateur de Helmholtz** : absorber les médiums ($300\text{Hz} < f < 1000\text{ Hz}$)
- En pratique,
 - les résonateurs peuvent être constitués par des cavités de différentes tailles (pour absorber une plus grande bande de fréquences).
 - le goulot (du résonateur) n'est pas indispensable (briques creuses par ex.)



3.2- Le cas de l'absorption : résonateur, exemple

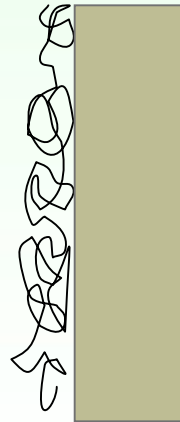
- **Effet de résonateur de Helmholtz** : absorber les médiums ($300\text{Hz} < f < 1000\text{ Hz}$)
 - Exemples des vases acoustiques dans les théâtres antiques



Cf. Antonio Fischetti, p.107 Fig. III.32. Vases acoustiques.

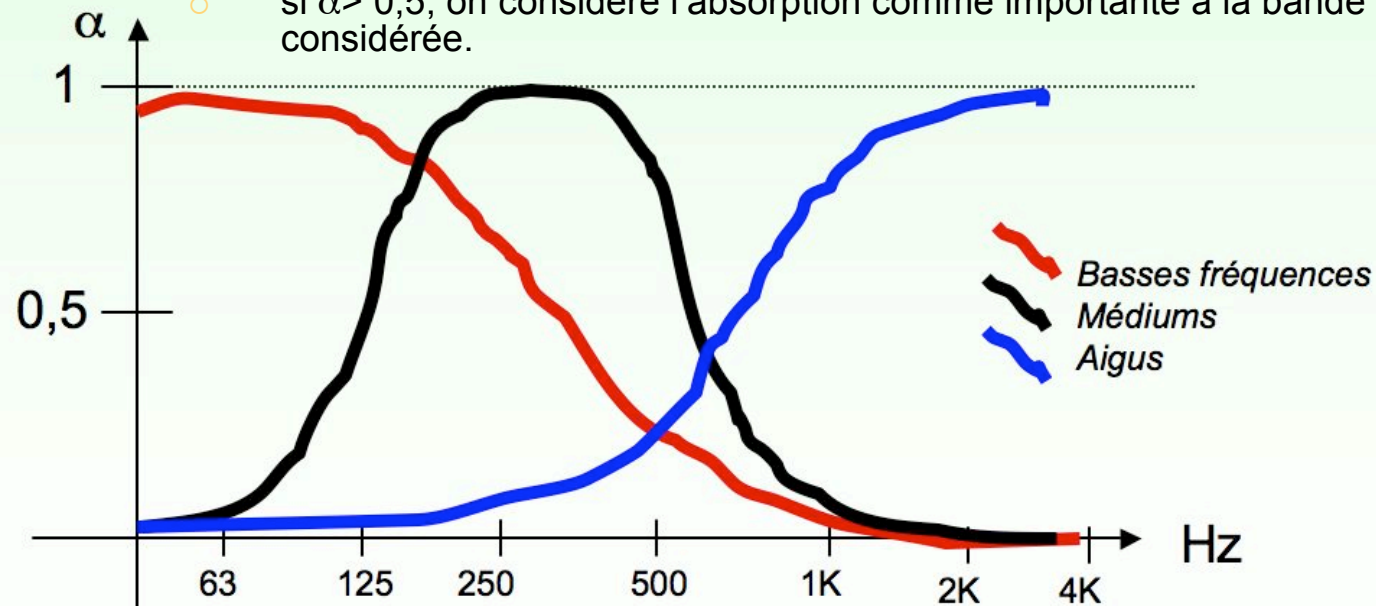
3.2- Le cas de l'absorption : frottements

- **Effet de frottements : absorber les aigus** ($f > 1000$ Hz)
 - L'énergie acoustique est absorbée par les frottements de l'onde acoustique sur les fibres. Le matériau sera d'autant plus efficace qu'il sera **poreux** à l'air et présentera beaucoup de surfaces de contact à l'air.



3.3- Alpha Sabine, coefficient d'absorption acoustique

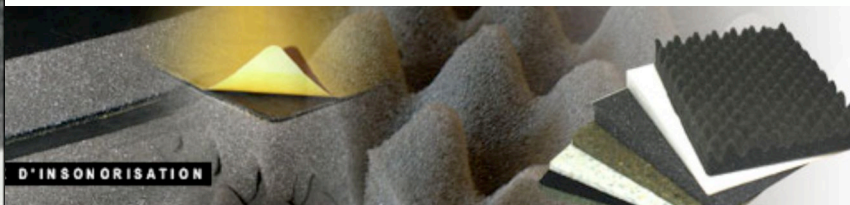
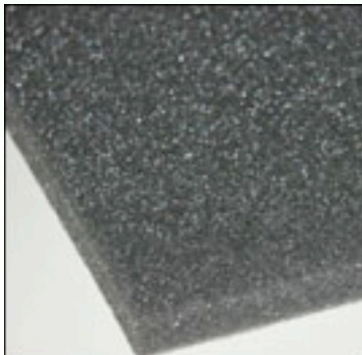
- Comme nous venons de le voir, le Alpha Sabine d'un matériau dépend de la fréquence. Ce sont des données calculées par les fournisseurs des matériaux.
- Ils sont mesurés selon un protocole précis.
- La valeur de alpha Sabine est donc comprise entre 0 et 1
 - 0, signifie que le matériau n'absorbe aucune énergie acoustique à la fréquence donnée
 - 1, signifie que le matériau absorbe toute l'énergie acoustique.
 - si $\alpha > 0,5$, on considère l'absorption comme importante à la bande d'octave considérée.



Courbes typiques de α Sabine pour les 3 catégories de matériau

3.3- Alpha Sabine, coefficient d'absorption acoustique

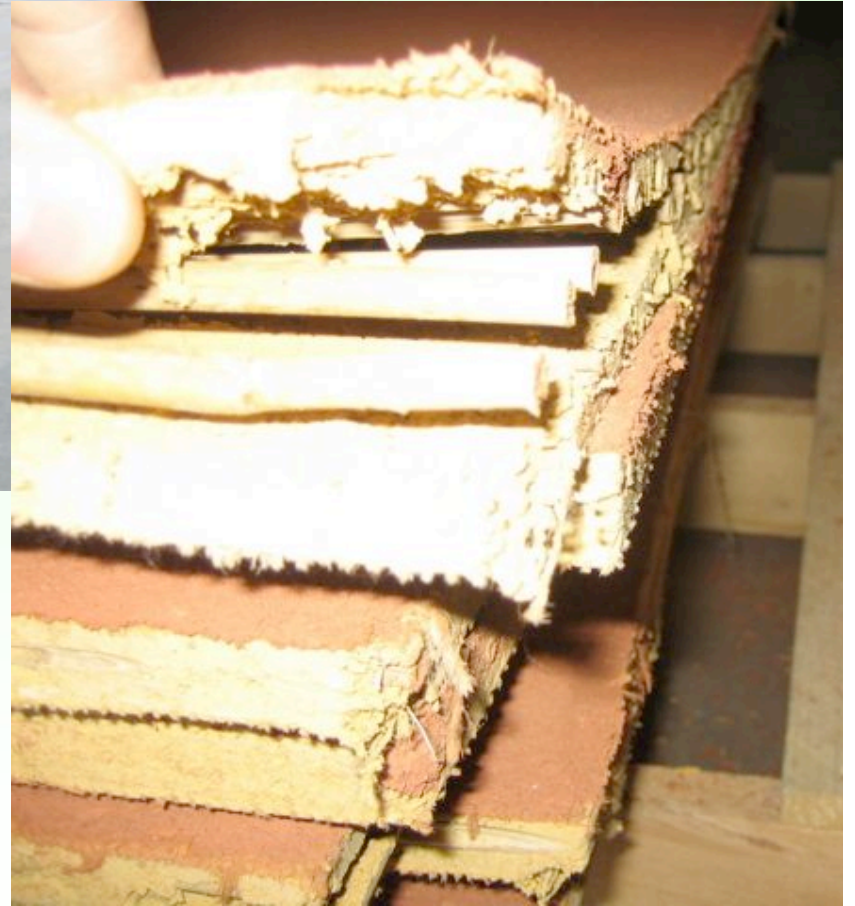
- Les qualités d'absorption d'un matériau dépendent donc de :
 - 1- de sa matière
 - 2- de sa mise en œuvre
- On peut ainsi combiner les propriétés d'absorption. Un panneau va absorber les basses fréquences. Si on le perce de trous sur toute sa surface, il va absorber les médiums. Si on couvre les panneaux de matériaux poreux, les aigus seront alors absorbés. Il est ainsi possible d'obtenir un coefficient d'absorption de bonne qualité à toutes les fréquences.



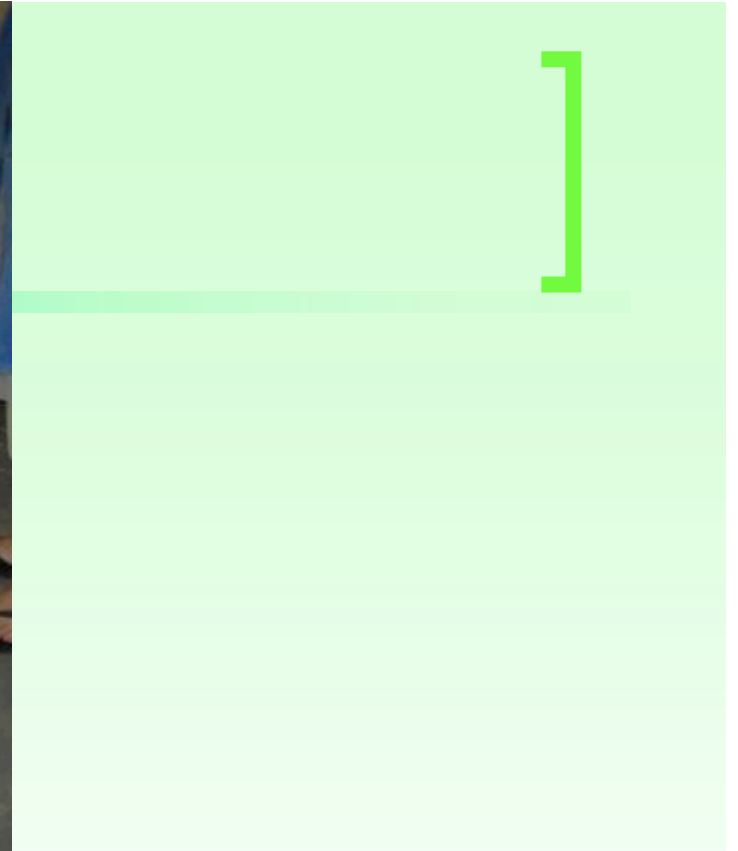
3.3- Alpha Sabine, coefficient d'absorption acoustique

Exemple de mesure de alpha Sabine de matériaux écologiques











4- Aire équivalente d'absorption

α , coefficient d'absorption alpha sabine d'un matériau est donc donné en fonction des fréquences :

	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2KHz	4KHz
Béton brute	0,02	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05
Mousse 50mm	0,32	0,89	0,82	1,00	1,00	1,00

Par suite on peut définir pour un local A, l'**Aire équivalente d'absorption** en m² par l'expression suivante :

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i$$

avec

α , coefficient d'absorption alpha sabine

S, surface en m² des surfaces du local (sol, parois latérales, plafond, mobiliers, usagers, etc..)

4- Aire équivalente d'absorption

Aire équivalente d'absorption en m²

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i$$

Donc par exemple pour 20 m² de sol

	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2KHz	4KHz
. α Béton brute	0,02	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05
. A du Sol en béton (m2)	0,4	0,8	1	1	1	1
. α Mousse 50mm	0,32	0,89	0,82	1,00	1,00	1,00
. A du sol recouvert de la mousse (m ²)	6,4	17,8	16,4	20	20	20

5- Niveau sonore en champ diffus

On montre que le niveau sonore **en champ diffus** est égal à

$$L_p = L_w + 6 - 10 \log A \quad \text{en dB(A)}$$

avec :

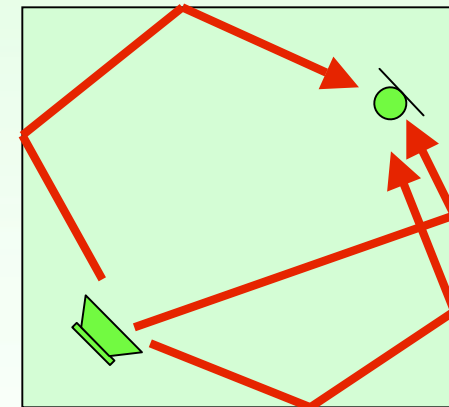
L_p , niveau de pression sonore en champ diffus

L_w , niveau de puissance de la source

A , Aire équivalente d'absorption

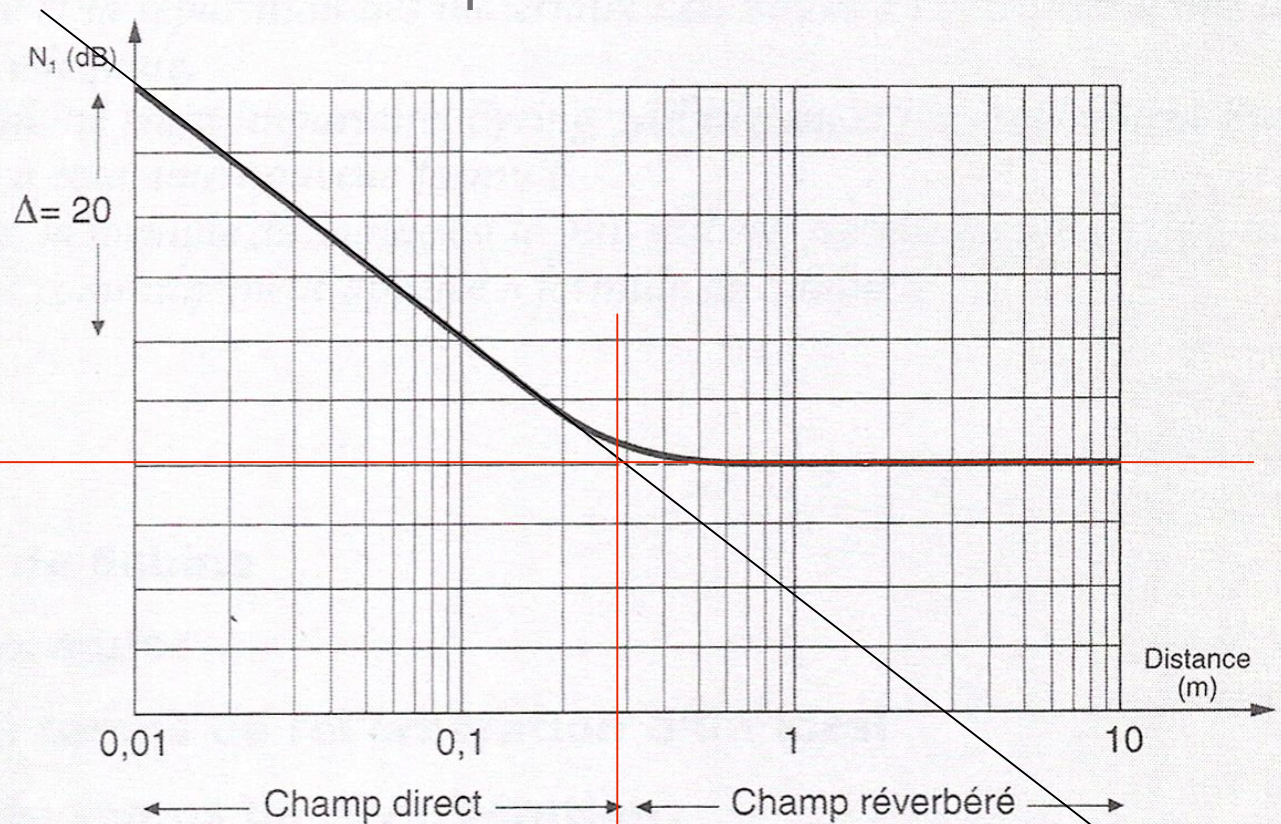
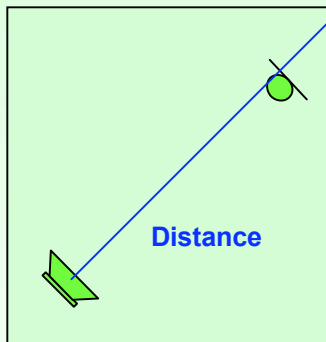
Conséquences :

- L_p est constant quelle que soit la distance à la source (dans le champ diffus)
- L_p ne dépend que de A ... de la capacité d'absorber du local.... Seul moyen de réduire le niveau sonore.



Champ diffus

6- Niveau sonore en champ direct et diffus



$$Lp = Lw + 10 \log \frac{Q}{4\pi d^2}$$

$$Lp = Lw + 6 - 10 \log A$$

Fig. 5.7 - Répartition du champ direct et du champ réverbéré.

distance critique

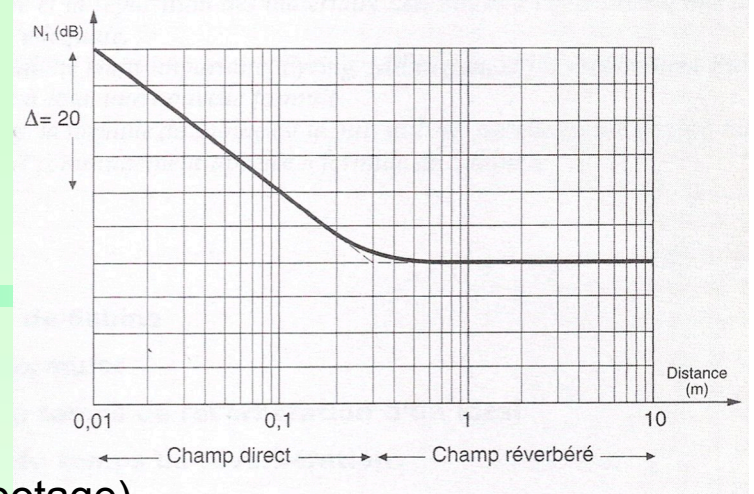
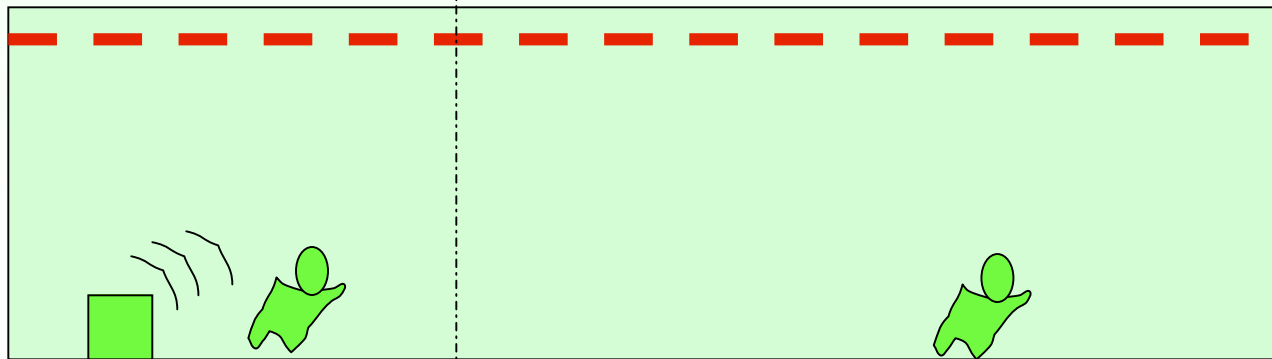


Fig. 5.7 - Répartition du champ direct et du champ réverbéré.

- **En champ libre,**
 - On peut réduire L_p en jouant sur L_w (capotage) et sur la distance à la source
- **En champ diffus,**
 - On peut réduire L_p en jouant sur L_w (capotage) mais plus sur la distance. Il faut alors changer l'Aire équivalente d'absorption A

$$L_p = L_w + 10 \log \frac{Q}{4\pi d^2} \quad L_p = L_w + 6 - 10 \log A$$



7- Réverbération d'un local

■ Formule de W.C. Sabine en seconde

$$TR = 0,16 \frac{V}{A}$$

[Le temps de réverbération peut aussi s'écrire **TR60**]

avec

- A : Aire équivalente d'absorption en m²
- α , coefficient d'absorption alpha sabine

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i$$

■ Définition : Le temps de réverbération est le temps mis par le son pour décroître de **60dB** dans la salle après extinction de la source.

■ Exemple d' alpha sabine

	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2KHz	4KHz
○ Béton brut	0,02	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05
○ Mousse 50mm	0,32	0,89	0,82	1,00	1,00	1,00

7- Réverbération d'un local

- **Formule de W.C. Sabine en seconde** $TR = 0,16 \frac{V}{A}$
- Alpha Sabine n'est pas le même en fonction des fréquences.
- Le temps ou la durée de réverbération dépend donc des octaves.
- Pour résumer sa valeur, on donne généralement une valeur moyenne arithmétique entre 500Hz, 1k et 2kHz, les octaves principales de la parole.

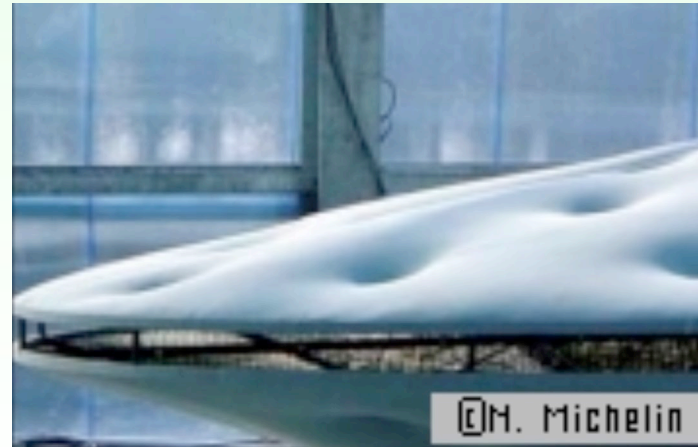
- *Exemples :*
 - *Sous Pyramide du Louvre* *10s environ*
 - *Hall et quai de Gare* *1,5 à 3s*
 - *Salle de classe* *0,8s*
 - *Gymnase* *2 à 4s*
 - *Salle de concert* *1,8 à 2,5s*
 - *Logement normalement meublé* *0,5s*
 - *Logement très meublé* *0,2s*

7- Réverbération d'un local

- La valeur du temps de réverbération d'un local doit être maintenue dans une fourchette de **valeurs acceptables pour l'usage** du local. Une valeur basse (acoustique trop mate) comme une valeur grande (acoustique très réverbérante) n'est pas forcément une valeur confortable. Il faut ajuster la réverbération aux usages.
- Exemple :
 - Salle de classe $Tr[500-2kHz]$ 0,6 - 0,8s
 - (cf. JOUHANEAU J. : *Acoustique des salles et sonorisation* - Paris - T1D - 1997 - 610p)



la salle des Princes, Monaco - Système Carmen



Gymnase à Grenoble, Nicolas Michelin
www.cyberarchi.com

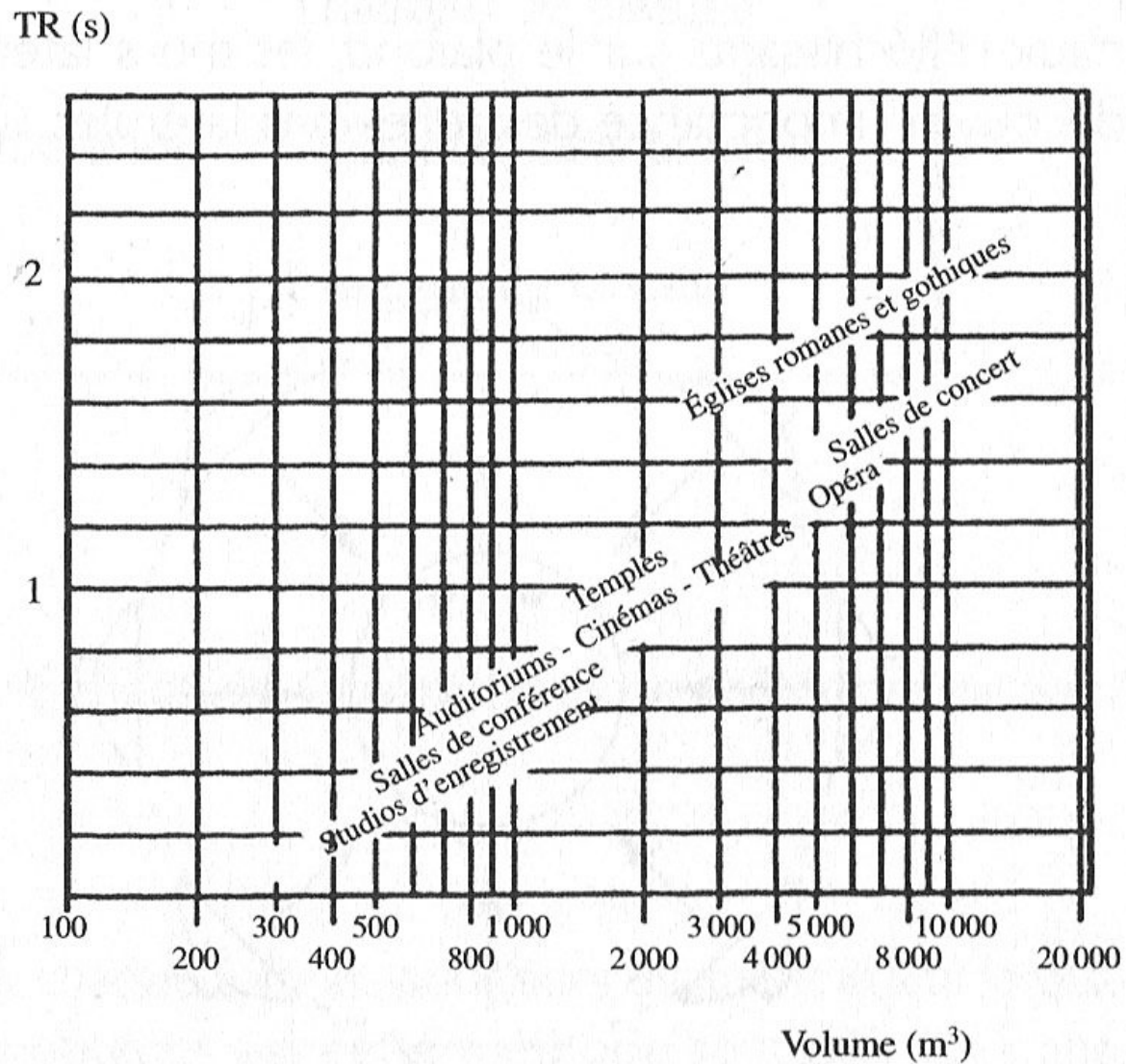


Fig. IV.2. Courbes usuelles du TR optimal.

MANIP3: Mesure du TR

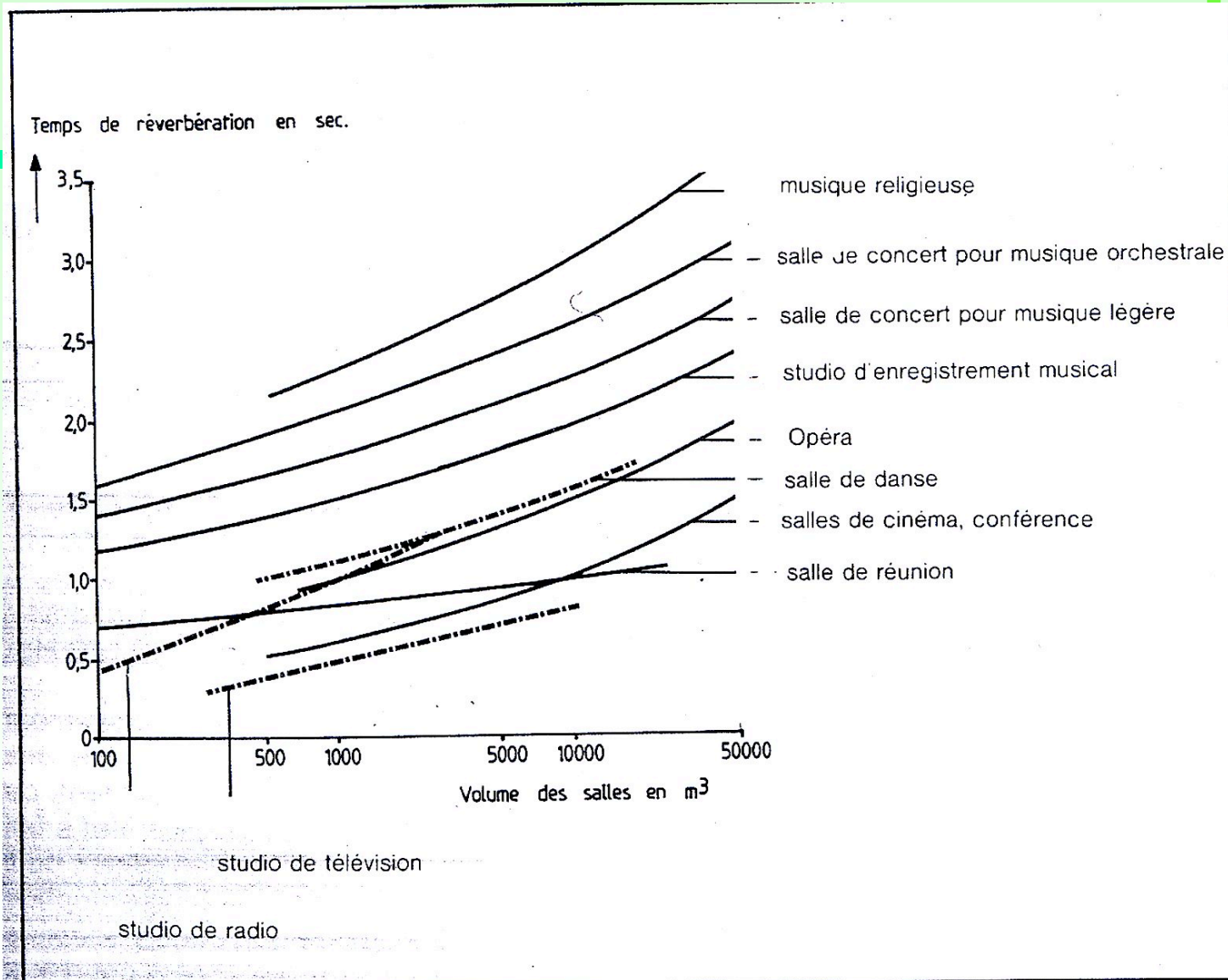
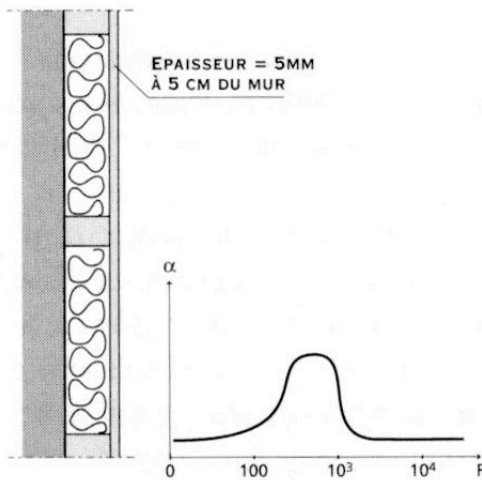


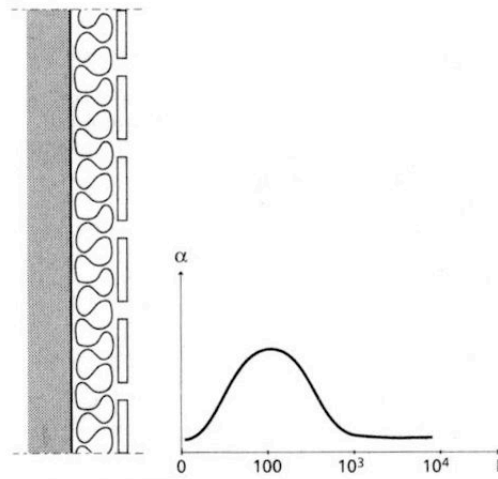
Fig. 1 : Temps de réverbération optimal en fonction du volume.

Limiter la réverbération

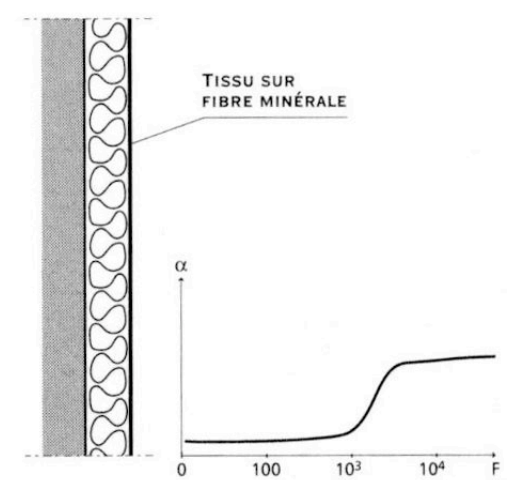
[8] Limitation de la réverbération dans les fréquences basses par une plaque de matériau mince :



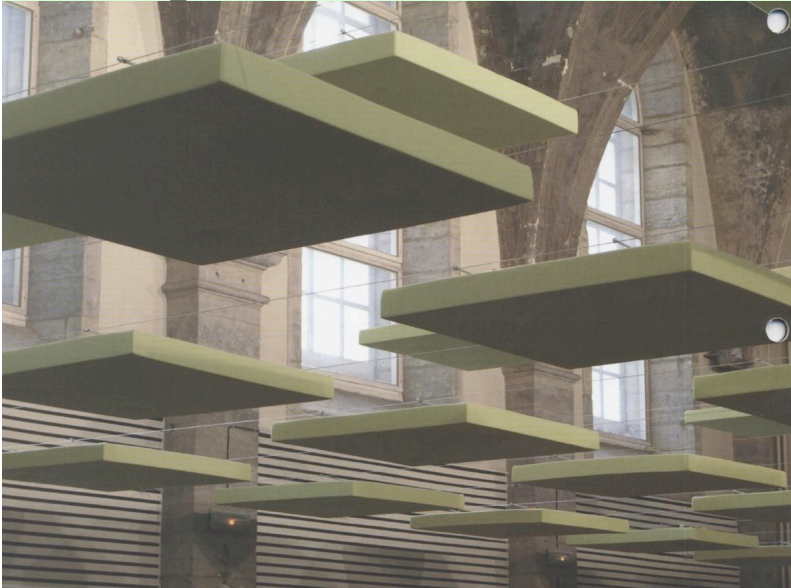
[9] Limitation de la réverbération dans les fréquences médiums par les résonateurs de Helmholtz :



[10] Limitation de la réverbération dans les fréquences aiguës par l'emploi de matériaux fibreux :



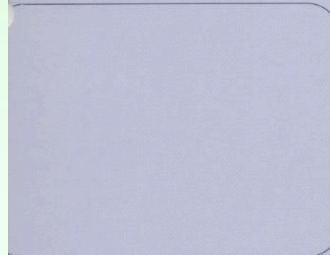
Exemples



- Restauration scolaire ,
Vénissieux (doc Texaa)

L5C - Acoustique des salles



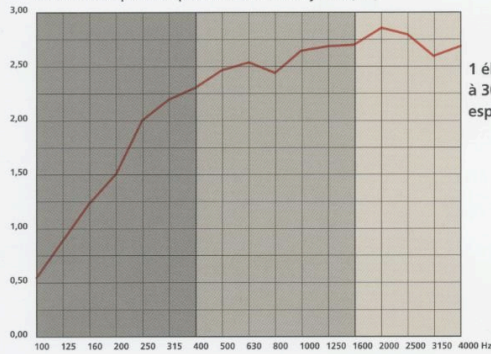


(Doc Texaa)

L5C - Acoustique des salles



> pour un Stereo plume de 1 250 x 1 250 x 100 mm
aire d'absorption équivalente d'un objet A (m²)



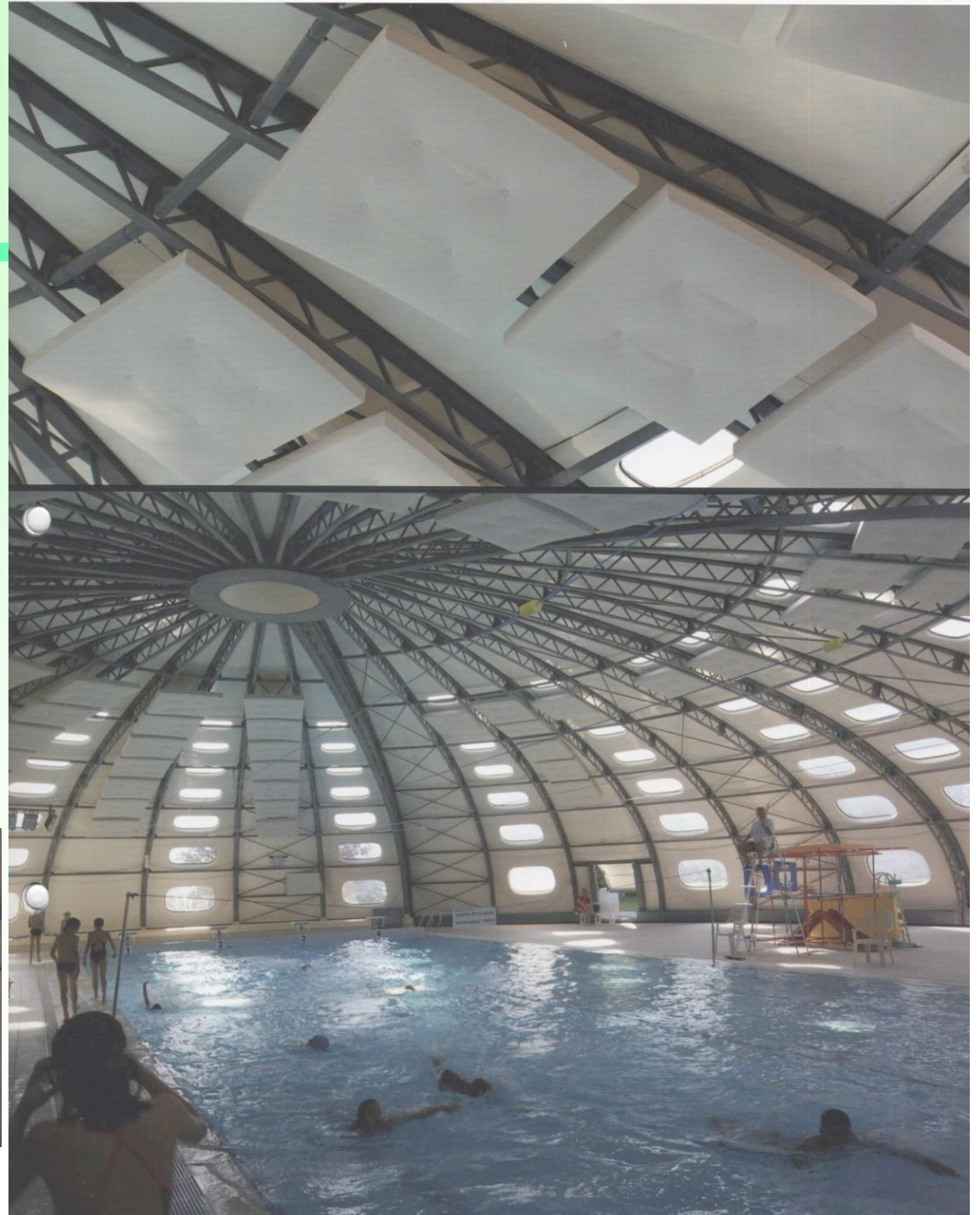
1 élément 1 250 x 1 250 x 100 mm
à 300 mm du fond,
espacement 1 200 mm.

Stereo plume

Fréquences (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
suspendu à 300 mm du fond	0,87	2,01	2,48	2,66	2,84	2,74

PV essais disponibles sur demande.

■ Piscine Jean Vivès, Montpellier (doc Texaa)



L5C - Acoustique des salles



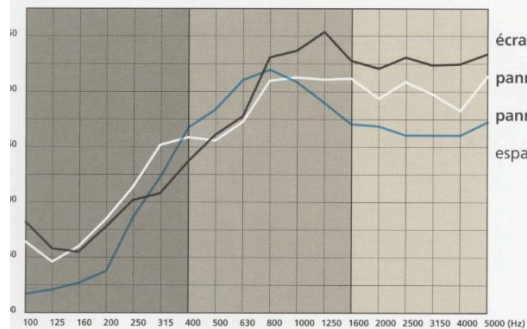
(Doc Texaa)

L5C - Acoustique des salles



(Doc Texaa)

► pour un panneau 1196 x 1196 x 50 mm
aire d'absorption équivalente d'un objet A(m²)

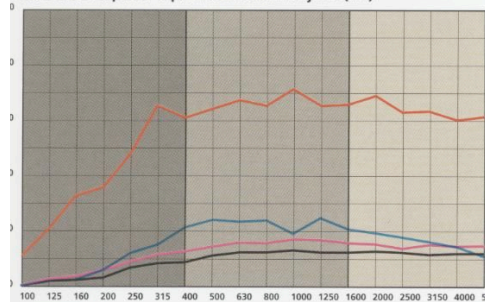


écran vertical 2 faces
panneau 1 face, posé à 300 mm du fond
panneau 1 face, posé à 10/20 mm du fond
espacement : 1500mm

panneau 1 face	125	250	500	1000	2000	4000	5000
suspendu, à 300 mm du fond	0.46	1.14	1.56	2.13	1.94	1.83	2.14
vissé ou aimanté, à 10/20 mm du fond	0.21	0.87	1.84	2.09	1.69	1.61	1.73
écran 2 faces	0.58	1.02	1.61	2.37	2.21	2.25	2.34

L'incorporation de luminaires peut influencer les caractéristiques acoustiques des panneaux – nous consulter.
PV essais disponibles sur demande.

► pour un cube, un cône ou un pavé
aire d'absorption équivalente d'un objet A(m²)



cube (500 x 500 x 500 mm), esp. 1500 mm

pavé* (575 x 575 x 83 mm), esp. 1200 mm
cône (250 x 250 x 250 mm), esp. 1000 mm
cône (610 x 180 x 60 mm), esp. 1000 mm

	125	250	500	1000	2000	4000	5000
cube 500 x 500 x 500 mm	0.52	1.20	1.61	1.79	1.73	1.51	1.54
cube 250 x 250 x 250 mm	0.06	0.19	0.38	0.42	0.40	0.36	0.38
cône 610 x 180 x 60 mm	0.05	0.17	0.28	0.33	0.32	0.30	0.30
pavé 575 x 575 x 83 mm*	0.02	0.33	0.56	0.47	0.49	0.37	0.26

* ces chiffres peuvent varier en fonction des performances acoustiques des faux-plafonds en place , nous consulter.

PV essais disponibles sur demande.



(Doc Texaa)

Exemples courants d'utilisation

nombre de panneaux **Stereo** (une face) 1196 x 1196 x 50 mm dans une salle de :

	réunion	bureau	musique	classe	jeux	réfectoire	salle polyval.
60 m ³	4	5	4				
100 m ³	7	8	5				
150 m ³	10	13	6	7	9	13	
200 m ³	15	16	9	10	14	17	
250 m ³	20	18	12	14	18	23	
300 m ³	24	22	15	17	23	27	13
350 m ³	27	25	17	21	29	33	16
400 m ³	32	31	18	24	33	39	20
600 m ³	41	44	24	35	49	57	28
900 m ³	68	68	39	66	78	87	40

----- Équivalence acoustique

1 panneau 1 face (1 196 x 1 196 mm)

= 7 cônes

= 4 petits cubes

= 1 grand cube

= 3 pavés

(Doc Texaa)

Intelligibilité de la parole:

- temps de réverbération,
- rapport signal-bruit,
- volume et de la géométrie de la pièce,
- répartition des surfaces réfléchissantes et absorbantes.

Plus le temps de réverbération est court, meilleure sera la compréhension de la parole, à moins que le bruit de fond ne domine.

Rapport Signal-Bruit (S/B)

%-Alcons

STI et RASTI

Intelligibilité de la parole:

Rapport Signal-Bruit (S/B)

%-Alcons

STI et RASTI

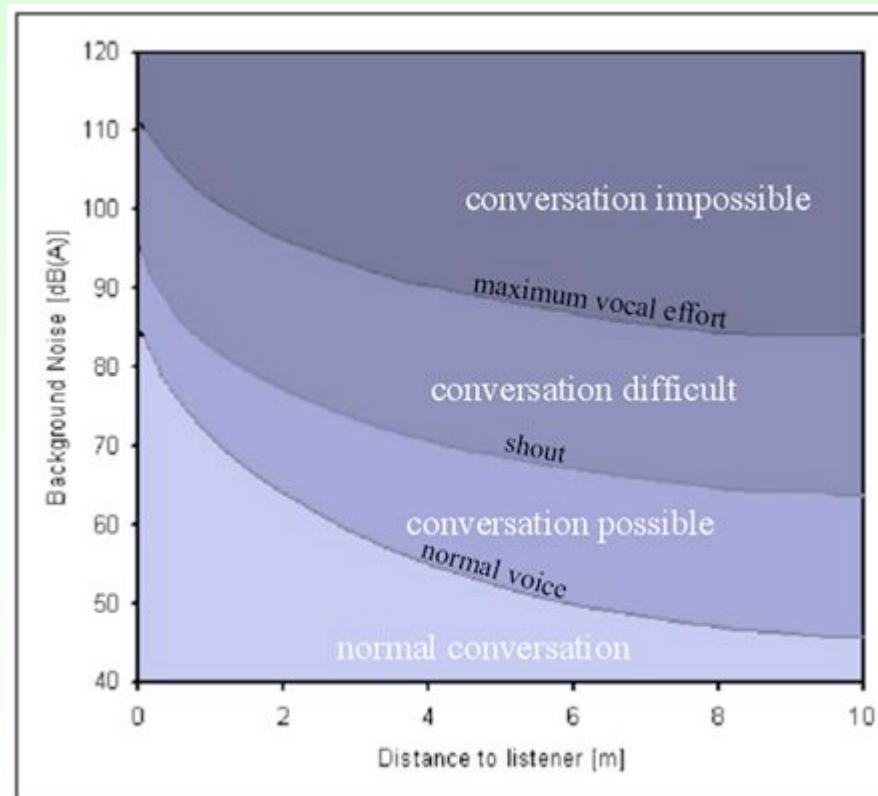
STI	0 - 0.3	0.3 - 0.45	0.45 - 0.6	0.60 - 0.75	0.75 - 1.0
	inintelligible	pauvre	correct	bon	excellent
Alcons	100 - 33%	33 - 15%	15 - 7%	7 - 3%	3 - 0%

STI = Speech Transmission Index

Alcons = Percentage Articulation Loss of Consonants

Intelligibilité de la parole:

Rapport Signal-Bruit (S/B)



Modes de résonance:

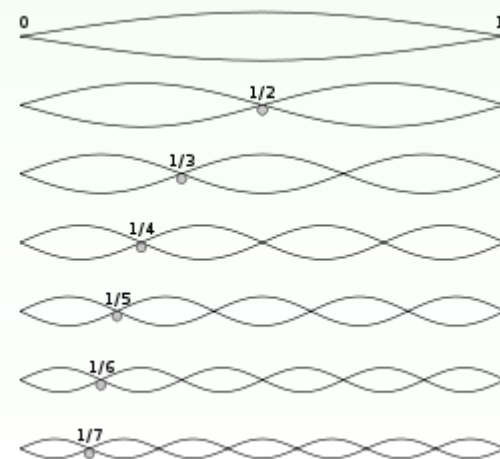
Le comportement d'une salle par rapport au son diffère selon la région spectrale,

- Pour des fréquences doublant (au moins) la plus grande dimension d'une pièce: le son se comporte de manière équivalente aux changements de pression de l'air statique.
- Pour des **fréquences comparables aux dimensions** de la pièce: dominance des modes de ses **modes de résonance** propres.
- Pour des fréquences dépassant de deux octaves ses dimensions: réflexions multiples dans les parois > équivalence lumineuse: « ray-tracing »

Modes de résonance:

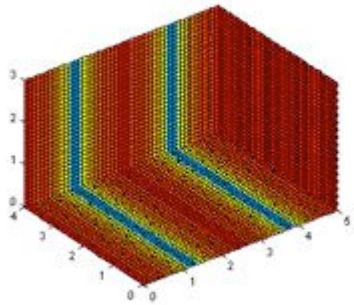
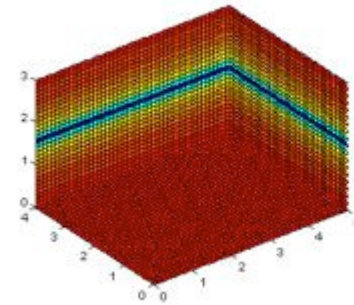
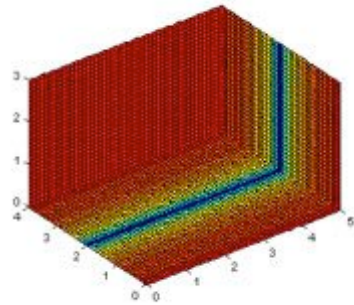
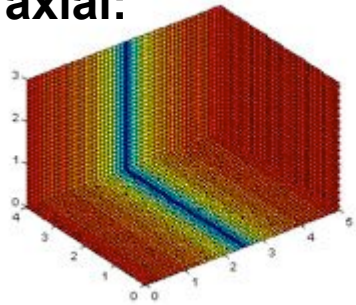
Modes propres ou naturels de résonance,

- Pour des **fréquences comparables aux dimensions** de la pièce: dominance des modes de ses **modes de résonance** propres.
 - a. Equivalence entre la longueur d'onde de certaines fréquences et les dimensions de la pièce > phénomène d'amplification discriminant, « colorant » le son.
 - b. Génération d'ondes stationnaires > nodes et zones de haute pression.

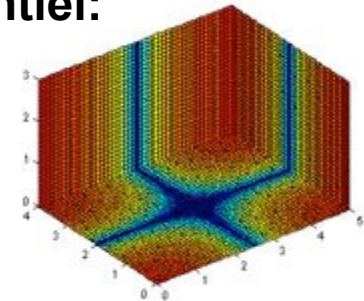


Modes de résonance:

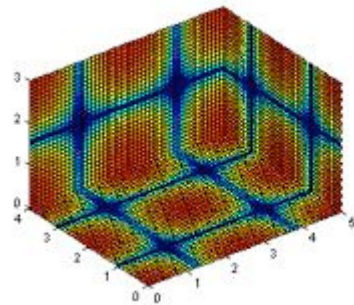
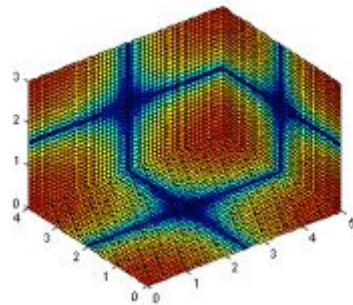
Mode axial:



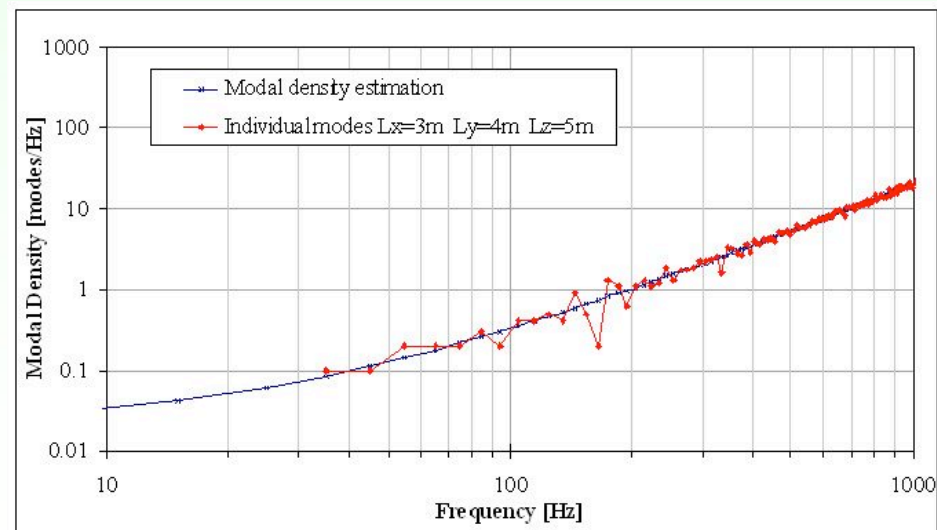
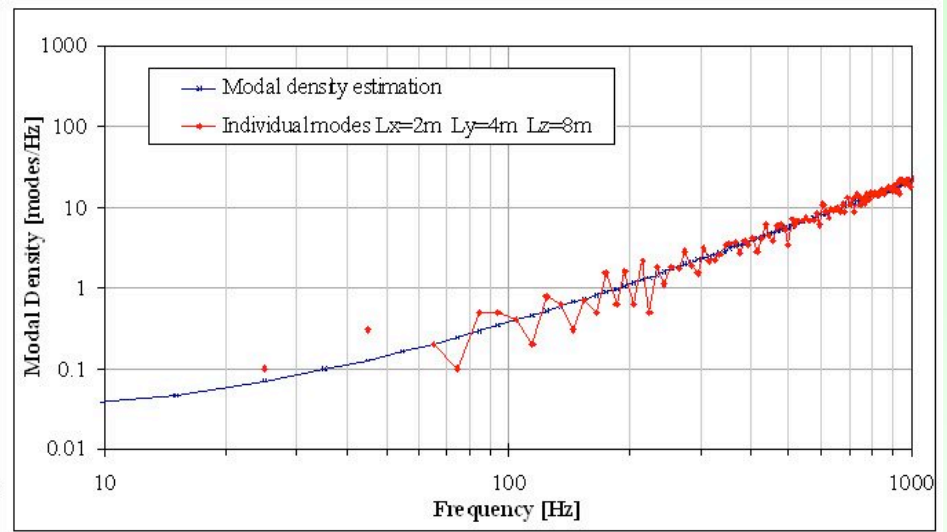
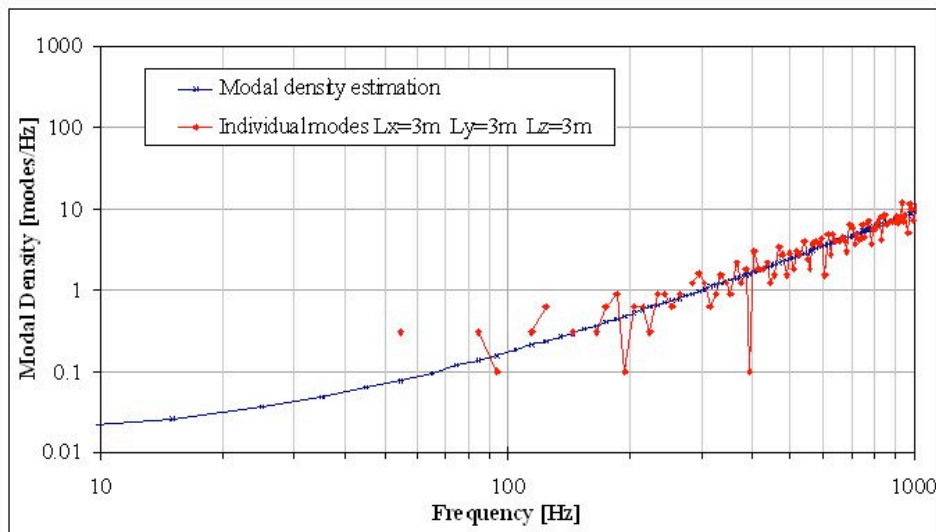
Mode tangentiel:



Mode oblique:



Modes de résonance:



Source: <http://www.diracdeltaco.uk/science/source/r/o/room%20modes/source.html>

8- Outils métrologiques

Mesures

Sonomètres des sociétés

Bruël et Kjaer

Brüel & Kjær 

<http://www.bksv.com/>

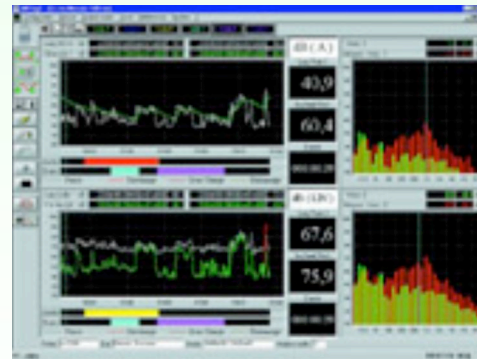
01dB - Metravib

01dB -
METRAVIB

<http://www.01dB.com>



01dB : symphonie

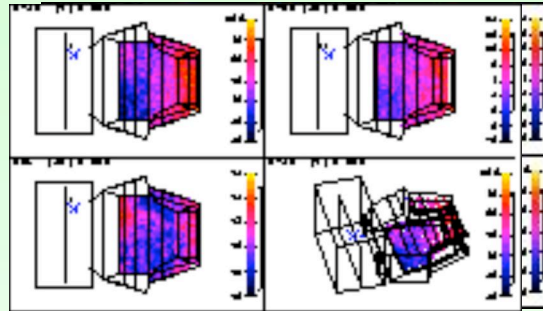


01dB : dBEnv32



01dB : Solo

9- Outils modélisation

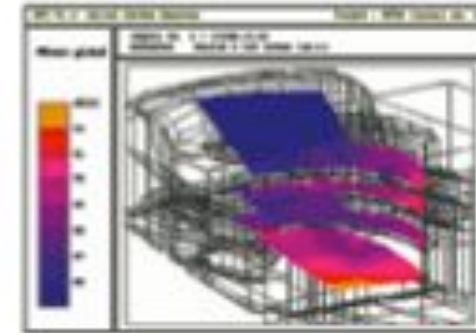


Catt Acoustic - acoustique des salles



la salle des Princes, Monaco - Système Carmen

CSTB - epidaurea



Prévision numérique du niveau sonore produit par un chanteur situé sur la scène de la grande salle d'opéra au moyen du programme Epidaure.

10- Bibliographie

■ Acoustique des salles :

- JOUHANEAU J. : *Acoustique des salles et sonorisation* - Paris - T1D - 1997 - 610p
- Collectif : *Theaters and halls*. Tokyo. Meisei. 1995. 224p
- BARRON M. : *Auditorium acoustics and architectural design*. Londres. E&FN SPON. 1993. 443p
- Collectif : *Rencontres architecture et musique* - Chateau de forges, Pesmes - 1992 78p
- EGAN David : *Architectural acoustics*. New York- Mac Graw Hill. 1992
- POUBEAU P, BARON C : *Produits pour la correction acoustique*. Paris. CATED. 1991. 72p
- FORSYTH M: *Architecture et musique:l'architecte,le musicien et l'auditeur du17ème siècle à nos jours*. Bruxelles-P.Mardaga. 1987,360p
- ADAM M. : *Acoustique architecturale et acoustique des salles*. Blauen (CH). Schweizer Baudokumentation. 1985. 68p
- LEIPP, E : *Acoustique et musique*. Paris. Masson. 1980
- IZENOUR : *Theater design*. New York : Mac Graw hill Cie, 1977, 630 p
- LAMORAL R : *Music et architecture*. Paris : Masson, 1975, 180 p.,
- RAES A.C. : *Isolation sonore et acoustique architecturale* - Paris - Chiron - 1964 - 383p
- BERANEK L : *Music, acoustic and architecture* . New York. J. WILEY,1962, 580 p
- KNUDSEN V.O. ET HARRIS C.M. : *Le projet acoustique en architecture* - Paris - Dunod - 1957