

SOMMAIRE

1 QU'EST-CE QUE L'ACOUSTIQUE ARCHITECTURALE ?	2
2 GENERALITES.....	2
2.1 NORMES DE MESURES DANS LE BATIMENT	2
2.2 FREQUENCES	2
2.3 ÉCHELLES DE PONDERATION	2
2.4 FREQUENCE CENTRALE DE 500 Hz	2
3 ISOLATION ACOUSTIQUE	3
3.1 DEFINITION.....	3
3.2 CONDUCTION AERIENNE	3
3.3 CONDUCTION SOLIDIENNE	3
3.4 CONDUCTION PAR EFFET DE PAROI.....	4
3.5 LOI DES MASSES	4
3.6 NOTIONS DE COEFFICIENT DE TRANSMISSION ET DE COEFFICIENT D'ATTENUATION	4
3.7 COEFFICIENTS D'ATTENUATION DE DIVERSES PAROIS EN FONCTION DE LA FREQUENCE.....	5
4 CORRECTION ACOUSTIQUE	6
4.1 NOTION DE TEMPS DE REVERBERATION.....	6
4.2 CHAMP LIBRE, CHAMP DIRECT, CHAMP REVERBERE	6
4.3 VALEURS OPTIMALES DE T	7
4.4 NOTION DE COEFFICIENT D'ABSORPTION D'UNE SURFACE	8
4.5 COEFFICIENTS D'ABSORPTION DES PRINCIPAUX MATERIAUX	9
4.6 HYPOTHESES DE SABINE	10
4.7 CALCUL DE T PAR LA FORMULE DE SABINE.....	10
4.8 RELATION ENTRE VARIATION DE T ET VARIATION DU NIVEAU SONORE MOYEN.....	10
4.9 FICHE DE CALCULS DE CORRECTION ACOUSTIQUE D'UNE SALLE.....	11
4.10 ONDES STATIONNAIRES ET FREQUENCES PROPRES	12
4.11 ABSORPTION DE FREQUENCES PARTICULIERES A L'AIDE DE RESONATEURS ET RESEAUX POREUX.....	12
4.12 LIMITES DE L'HYPOTHESE DE SABINE	13
4.13 EXEMPLES D'AMENAGEMENTS	14
5 BIBLIOGRAPHIE.....	14

1 Qu'est-ce que l'acoustique architecturale ?

L'acoustique architecturale étudie comment les constructions influent sur la propagation et la résonance des sons. Cette étude est faite dans un but précis, par exemple la protection des locaux contre les bruits et vibrations (isolation acoustique) ou l'optimisation des conditions d'émission et de réception des ondes sonores en fonction de l'utilisation du local (correction acoustique).

Dès l'antiquité (traité d'acoustique géométrique de Pythagore, V^{ème} siècle av. J.C.), les formes des amphithéâtres ont été étudiées selon un compromis entre bonne vue et bonne audition des spectateurs, qu'il s'agisse des amphithéâtres grecs circulaires ou elliptiques, des amphithéâtres romains semi-circulaires prenant en compte la répartition des surfaces réfléchissantes de l'arrière scène, ou des odéons, petites salles semi-circulaires, étudiées pour des propriétés musicales distinctes de celles de la parole.

L'acoustique architecturale moderne se fonde sur quatre grands domaines :

- les modèles géométriques de propagation, réflexion et les maquettes d'études (dès 1925)
- la théorie ondulatoire du son, produite par les physiciens dans les années 1935 mais dont Galilée présentait déjà le caractère périodique.
- les méthodes statistiques récentes (modélisation des répartitions d'énergie sonore dans un volume, méthode du héraisson de Thiele et Meyer)
- la psycho-acoustique (étude des sensations associées aux images sonores, des effets de masque, etc...)

2 Généralités

2.1 Normes de mesures dans le bâtiment

Norme NF S 31.013 utilisée par la CRAM, concerne les conditions de gêne acoustique.

Valeurs maximales d'exposition légales, physiologiques

2.2 Fréquences

La norme NF 30 002 de 1960 découpe les fréquences audibles en octaves $f_2 = 2 f_1$ de valeur centrale

$$f_0 = \sqrt{f_2 \cdot f_1}$$

f_0 octaves (Hz)		16			31.5			63			125			250	
1/3 octaves			20	25		40	50		80	100		160	200		315
hauteur	Graves														355

f_0 octaves (kHz)		0,5			1			2			4			8		16	
1/3 octaves	0,4		0,63	0,8		1,25	1,6		2,5	3,15		5	6,3		10	12,5	20
hauteur	Médiums					1415	Aiguës										

Pour les mesures dans le bâtiment, on utilisera les fréquences centrales

graves : 125 Hz et 250 Hz, *médiums* : 500 Hz et 1000 Hz, *aiguës* : 2000 Hz et 4000 Hz

2.3 Échelles de pondération

Les échelles de pondération A, B, C sont respectivement basées sur les courbes isophoniques à 40, 70, 100 phonies. Pour simplifier, on peut considérer que la courbe A est la plus proche de la sensibilité de l'oreille et que la courbe C, moins pondérée, est plus plane. On utilisera de préférence la courbe A pour mesurer les dommages causés à l'organisme. C'est par exemple le cas de la formule donnant le temps limite d'exposition t_L (en h) en fonction du

niveau de bruit L $t_L = 8 \times 10^{-0,1L+9}$ valable pour L compris entre 85 dB(A) et 110 dB(A)

Dans le cas de la courbe de réponse d'un H.P. ou d'une enceinte, on pourra pondérer avec la courbe C.

2.4 Fréquence centrale de 500 Hz

Dans le cas de mesures simplifiées, on peut n'utiliser qu'une seule fréquence. Dans ce cas, il est d'usage dans le bâtiment, de choisir la fréquence centrale 500 Hz, qui rend le mieux compte des bruits de voix.

3 Isolation acoustique

3.1 Définition

La fonction de l'isolation acoustique est d'empêcher la propagation du son d'une salle à l'autre.

Cette conduction entre deux pièces peut se faire par

- Conduction aérienne (identique qu'on soit en plein air ou dans une pièce close)
- Conduction solidienne
- Conduction par effet de vibration de paroi (semblable à celle d'une peau de tambour)

Le Schéma 1 ci-contre montre la répartition des différentes énergies

I = énergie incidente sur la paroi

ER = énergie réfléchiée par la paroi

A = énergie absorbée dans la paroi

TA = énergie due à la vibration de la paroi,
transmise par voie aérienne

TS = énergie transmise par conduction solidienne

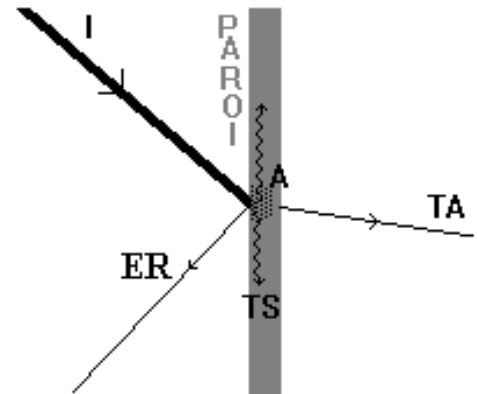


Schéma 1

3.2 Conduction aérienne

- Dans le cas d'une conduction aérienne en champ libre, le niveau sonore diminue de 6 dB lorsque la distance à la source double. Dans le cas d'une pièce, ce n'est plus valable car on devra prendre en compte le champ réverbéré.
- On constate également que les sons aigus s'amortissent plus rapidement que les sons médium.
- La remédiation à la conduction aérienne utilise des panneaux suspendus (signalétique), boxes et cabines
- A titre indicatif, l'affaiblissement $\Delta L = -25$ dB rend encore la parole ($L_0 \approx 50$ dB à 1 m) intelligible tandis que $\Delta L = -45$ dB, la parole est pratiquement inintelligible (cas des portes capitonnées)
- Dans le cas de la conduction aérienne due à des petites ouvertures,
 - Le niveau sonore (dB) augmente comme le logarithme de l'ouverture
 - Le phénomène de diffraction créé par les ouvertures qui se comportent comme autant de sources, a pour conséquence une plus mauvaise transmission des sons graves que des sons aigus.
- La décroissance de 6 dB observée lorsque la distance à la source double n'est valable que pour une propagation sphérique à l'air libre ou en chambre anéchoïde. Dans le cas d'une propagation en lieu clos, il faut y ajouter la composante réverbérée (Cf § 4.2).

3.3 Conduction solidienne

Ce phénomène est perceptible surtout dans le cas de bruits d'impact riches en harmoniques. La conduction solidienne peut répercuter des bruits d'un bout à l'autre d'une bâtisse. Pour cette raison, elle est combattue par l'emploi de dalles flottantes, l'insertion de silent blocks ou le découplage du sol des machines au moyen de pieds composés de pointes métalliques + cuvettes métalliques + feutre.

3.4 Conduction par effet de paroi

Une paroi soumise à une force extérieure $F \sin \omega t$ aura en première approximation, un comportement décrit par l'équation différentielle $m \frac{d^2x}{dt^2} = F \sin \omega t$

On en déduit l'amplitude de vibration de la paroi

$$a = \frac{F}{m\omega^2}$$

L'amplitude de la vibration d'une paroi est fonction de l'inverse du carré de la fréquence du son concerné.

On retrouve d'ailleurs ce type de relation dans l'étude du débattement de la membrane d'un haut-parleur.

La conduction par effet de paroi met en jeu successivement une conduction solidienne et une conduction aérienne.

C'est sur la conduction par effet de paroi que s'applique la loi des masses

3.5 Loi des masses

Schéma 2

La loi des masses exprime une double relation :

- l'atténuation d'une paroi est fonction croissante de la fréquence du signal étudié.
- l'atténuation d'une paroi est fonction croissante de sa masse surfacique

Cette loi des masses est utilisée dans le bâtiment sous forme d'abaques, tous générés à partir de mesures, résumables par la formule approximative

$$R = 22,5 - 13,3 \log(f \cdot m)$$

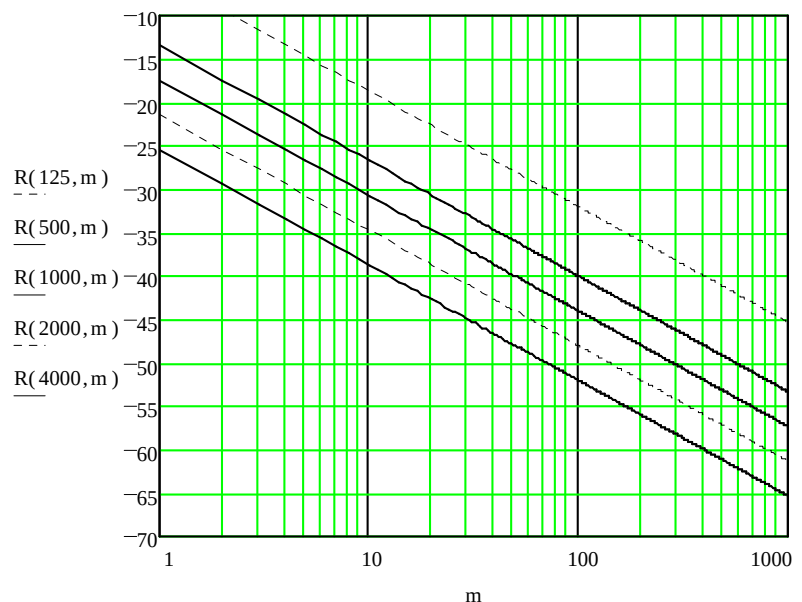
valable pour des pièces normalement meublées dans les intervalles indiqués ci dessous.

R est l'atténuation (exprimée en dB)

f est la fréquence du signal (exprimée en Hz) $100 \leq f \leq 5000$

m est la masse surfacique de la paroi (exprimée en kg/m^2) $1 \leq m \leq 1000$

Abaque de la loi des masses
donnant R en fonction de f et m
pour des valeurs de f égales à 125, 500, 1000, 2000, 4000 Hz



3.6 Notions de coefficient de transmission et de coefficient d'atténuation

En reprenant les notations du schéma 1, on peut définir le coefficient de transmission T d'une paroi,

comme le rapport $T = \frac{TA}{I}$ et le coefficient d'atténuation R par $R = 10 \cdot \log T$ ou

ex : R = - 40 dB donne T = 0.0001 $T = 10^{\left(\frac{R}{10}\right)}$

3.7 Coefficients d'atténuation de diverses parois en fonction de la fréquence

L'étanchéité a une grande importance, notamment dans le cas de portes ou de fenêtres
On pourra vérifier que les données ci-dessous sont en accord avec la loi des masses.

	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
PAROIS <i>R est donné en dB(A)</i>	<i>R</i>	<i>R</i>	<i>R</i>	<i>R</i>
Double vitrage 2,5 - 3 - 2,5 (mm)	-24	-26	-40	-55
Brique pleine 22 cm		-49	-57	-68
Béton banché 20 cm		-50	-60	-71
Briques pleines de 11 cm enduites sur deux faces	-42	-45	-49	-55
Brique plâtrière 7 cm enduite sur deux faces		-31		
Cloison alvéolaire 7,2 cm		-29		
Carreau de plâtre plein 7 cm	-31	-37		-49
Cloison sur ossature 7,2 cm		-36		
Panneau de fibre minérale e = 1 cm		-1		
Panneau de fibre minérale e = 2 cm		-2		
Panneau de fibre minérale e = 4 à 8 cm		-4		
Panneau de fibre minérale e = 8 à 12 cm		-5		
Panneau de fibre minérale e = 16 à 20 cm		-8		

Dans le cas de plusieurs parois de coefficient T_i et d'aire S_i , le coefficient total est donné par

$$T = \frac{\sum_i T_i S_i}{\sum_i S_i}$$

Exemple : Pièce constituée de

60 m ² de murs	à $R_1 = -50$ dB	$T_1 = 0,00001 \rightarrow 0,0006$
12 m ² de fenêtres	à $R_2 = -25$ dB	$T_2 = 0,00316 \rightarrow 0,0379$
25 m ² de plafond	à $R_3 = -40$ dB	$T_3 = 0,00010 \rightarrow 0,0025$
25 m ² de dalle + plancher	à $R_4 = -50$ dB	$T_4 = 0,00001 \rightarrow 0,0003$

$$\text{Total : } \sum_i S_i = 122 \text{ m}^2 \quad \sum_i T_i S_i = 0,0413 \quad T = 0,00034 \quad R_{\text{total}} \approx -35 \text{ dB}$$

On peut alors en déduire le coefficient R global de la pièce qu'on nommera « indice d'isolement ». (-35 dB dans notre exemple) A titre indicatif, les studios d'enregistrement numérique 5.1 construits en 2001 sur dalles flottantes atteignent - 120 dB(C)

Attention ! Ni les problèmes d'étanchéité, ni ceux de conduction solidienne ne sont pris en compte dans les calculs effectués ci-dessus.

4 Correction acoustique

4.1 Notion de temps de réverbération

La réverbération est due à de multiples réflexions du son sur les parois d'une pièce.

Le son direct est alors temporellement suivi de plusieurs « sons réfléchis »

La réverbération se manifeste donc par une diminution progressive du niveau sonore après que la source a cessé d'émettre.

Le temps de réverbération d'une pièce correspond à une décroissance de 60 dB après cessation du bruit

Ce temps de réverbération, noté RT60 dans certains documents professionnels sera noté T dans la suite de cet exposé.

Dans les cas où il est impossible d'opérer une mesure de T sur -60 dB à cause d'un bruit de fond trop important ou d'un niveau sonore à ne pas dépasser, il est permis d'opérer une mesure sur -30 dB puis de multiplier le temps obtenu par 2, (ou à la rigueur de mesurer sur -20 dB puis multiplier le temps obtenu par 3) Cette astuce est utilisée dans les mesures en centre-ville.

La correction acoustique d'une salle consiste à amener T à une valeur optimale, fonction de son utilisation.

Le plus souvent, il s'agit de diminuer T en augmentant les surfaces absorbantes.

On peut remarquer que l'isolation acoustique lutte contre la propagation du son entre les salles tandis que la correction acoustique a pour but de contrôler la propagation du son à l'intérieur d'une salle.

4.2 Champ libre, champ direct, champ réverbéré

Un son se propageant à l'air libre, issu d'une source ponctuelle, possède un front d'onde sphérique dont l'aire quadruple quand la distance à la source double.

On en déduit que « en champ libre le niveau sonore diminue de 6 dB quand la distance à la source double. »

Le champ direct d'une source dans un local correspond au niveau qu'aurait la source en champ libre.

Cela n'est plus vrai dans une pièce où la réverbération va se traduire par un « champ réverbéré » qui va s'ajouter au champ direct pour donner le champ total de la source.

Pour chaque pièce, on va pouvoir définir une « distance critique », telle qu'à cette distance de la source, l'intensité sonore du champ réverbéré est égale à celle du champ direct, c'est à dire que le champ total produit est supérieur au champ direct, de 3dB;

Ce concept est utile pour les prises de son car au delà de cette distance critique, l'étagement des plans sonores sera perdu.

Le schéma ci-contre est un exemple d'allure du niveau sonore L (dB) en fonction de la distance à la source d (m), dans une pièce.

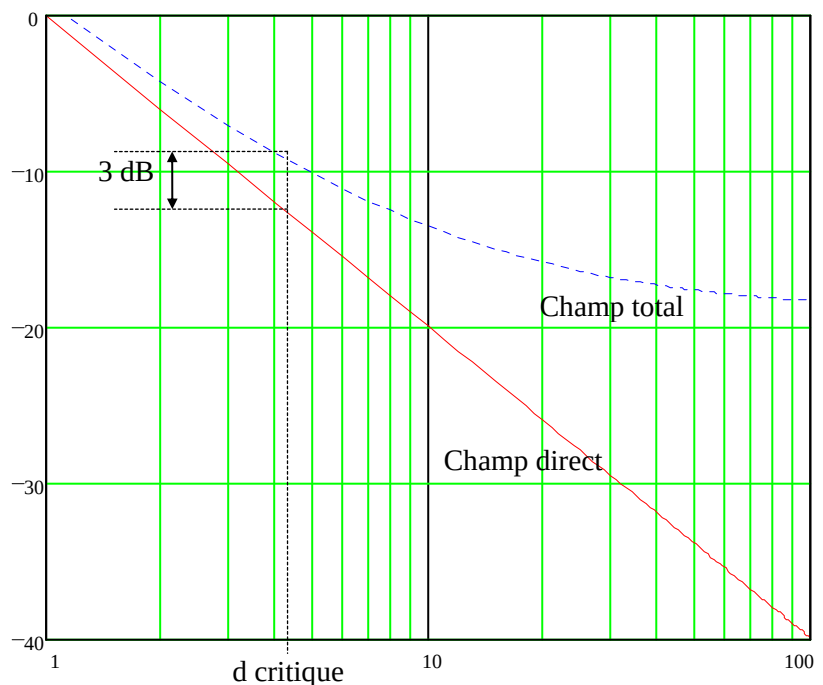


Schéma 3

4.3 Valeurs optimales de T

Les valeurs optimales de T sont fonction de l'usage de la pièce, de son volume et du nombre de personnes qui l'occupent. De nombreuses formules existent mais aucune d'elles n'est satisfaisante.

Le meilleur outil dont on dispose, est l'abaque multiple rassemblant les données empiriques traitées statistiquement depuis le début du XX^{ème} siècle, (car les goûts ont changé au cours des époques).

Les formules modélisant le mieux cet abaque sont :

Type de lieu d'écoute ou de source	Intervalle de validité de la formule (m ³)	N° de la courbe sur le schéma 3	Formule T_{opt} fonction de V
Musique religieuse	$500 < V < 40000$	1	$T = 5,84 \times 10^{-2} \cdot \sqrt[3]{V} + 1,69$
Orchestres symphoniques	$100 < V < 50000$	2	$T = 4,66 \times 10^{-2} \cdot \sqrt[3]{V} + 1,38$
Petites formations (musique légère)	$100 < V < 50000$	3	$T = 4,04 \times 10^{-2} \cdot \sqrt[3]{V} + 1,21$
Studio d'enregistrement musical	$100 < V < 50000$	4	$T = 3,57 \times 10^{-2} \cdot \sqrt[3]{V} + 1$
Opéra	$600 < V < 50000$	5	$T = 3,87 \times 10^{-2} \cdot \sqrt[3]{V} + 0,57$
Salle de danse	$500 < V < 20000$	6	$T = 4,41 \times 10^{-2} \cdot \sqrt[3]{V} + 0,65$
Salles de cinéma et de conférences	$500 < V < 50000$	7	$T = 3,46 \times 10^{-2} \cdot \sqrt[3]{V} + 0,23$
Salles de réunion :	$100 < V < 30000$	8	$T = 0,15 \cdot \log(V) + 0,4$
Studio de radio	$100 < V < 3000$	9 -----	$T = 0,615 \cdot \log(V) - 0,83$
Studio de télévision	$300 < V < 10000$	10 -----	$T = 0,328 \cdot \log(V) - 0,51$

Dans le cas de salles de spectacles à places assises, les calculs sont faits avec la salle contenant le nombre maximal d'auditeurs, c'est à dire dans le cas où le temps de réverbération sera minimal. La raison de cette méthode est la priorité donnée au critère d'intelligibilité du message.

Dans le cas de petites salles de travail ($V < 100 \text{ m}^3$), la formule approchée $T = k \cdot \sqrt[3]{V}$ suffit, avec des valeurs de k allant de $k = 0,07$ pour des salles de travail silencieuses, à $k = 0,15$ pour des studios d'enregistrement classique.

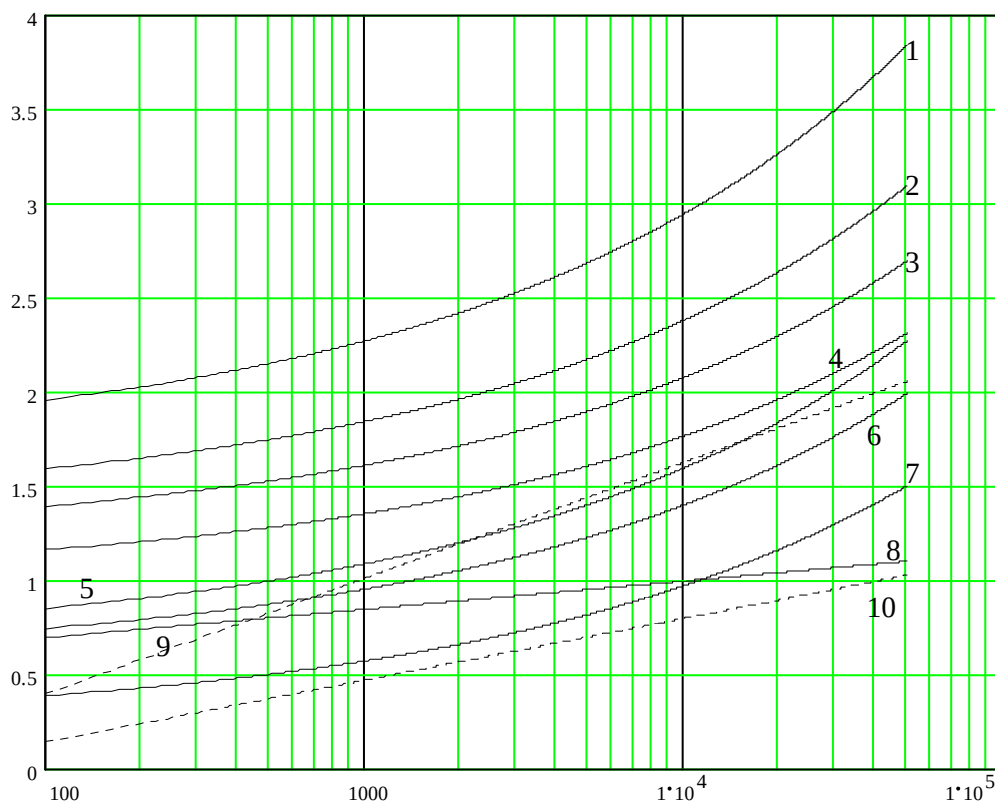


Schéma 4

4.4 Notion de coefficient d'absorption d'une surface

Le phénomène d'absorption est lié à la structure des matériaux. L'absorption d'un son par un matériau s'accompagne toujours de sa transformation en énergie thermique généralement négligeable.

Définition du coefficient d'absorption d'une surface : on définit le coefficient d'absorption α d'une surface comme le rapport de l'énergie absorbée, à l'énergie incidente. $\alpha = (A + TA + TS) / I$ dans le schéma 1.

Une aire S d'un matériau ayant pour coefficient d'absorption α , donnera une aire équivalente $A = S \cdot \alpha$ exprimée en « mètres carrés Sabine ».

Toutes les fréquences ne sont pas également absorbées par les matériaux.

C'est sur cette différence de comportement en fréquence qu'on joue lorsqu'on corrige acoustiquement une pièce, pour obtenir l'ambiance sonore désirée.

Les normes les plus utilisées concernant les mesures de α sont la norme NFS 31 003 de mars 1957 ainsi que la norme ISO R 354 de 1963

La méthode de mesure de α la plus courante consiste à opérer une mesure de T_1 dans une pièce, à y placer ensuite la surface à étudier, mesurer T_2 et en déduire le coefficient d'absorption du matériau introduit.

4.5 Coefficients d'absorption des principaux matériaux

(pour une incidence normale du signal)

	250 Hz		500 Hz		1000 Hz		2000 Hz	
SOLS	α	$A=S.\alpha$	α	$A=S.\alpha$	α	$A=S.\alpha$	α	$A=S.\alpha$
Parquet sur lambourdes (ciré)	0,11		0,10		0,07		0,08	
Parquet collé (ciré)	0,04		0,06		0,06		0,06	
Carrelage	0,01		0,02		0,03		0,04	
Linoléum sur feutre	0,08		0,09		0,10		0,12	
Dalle thermoplastique	0,03		0,04		0,04		0,03	
Tapis haute laine	0,30		0,40		0,50		0,60	
Moquette sur béton	0,08		0,21		0,26		0,27	
Moquette sur feutre	0,14		0,37		0,43		0,27	
	250 Hz		500 Hz		1000 Hz		2000 Hz	
MURS ET PLAFONDS	α	$A=S.\alpha$	α	$A=S.\alpha$	α	$A=S.\alpha$	α	$A=S.\alpha$
Marbre	0,01		0,01		0,01		0,01	
Plâtre peint	0,01		0,02		0,03		0,04	
Enduit ciment brut	0,02		0,03		0,04		0,05	
Brique nue	0,02		0,03		0,04		0,05	
Staff	0,12		0,08		0,05		0,04	
Glace ou miroir	0,04		0,03		0,03		0,02	
Vitrages (courants) sur châssis	0,25		0,18		0,12		0,07	
Porte bois traditionnelle	0,11		0,10		0,09		0,08	
Porte isoplane CP 8 mm	0,22		0,17		0,09		0,10	
Rideaux lourds à plis	0,31		0,49		0,50		0,56	
Dalles acoustiques	0,50		0,75		0,80		0,80	
	250 Hz		500 Hz		1000 Hz		2000 Hz	
MEUBLES	A	$n.A$	A	$n.A$	A	$n.A$	A	$n.A$
Chaise nue	0,02		0,03		0,04		0,04	
Fauteuil capitonné	0,37		0,33		0,36		0,40	
Fauteuil cinéma siège relevé	0,32		0,28		0,30		0,34	
1m ² CP5mm à 5 cm du mur	0,42		0,35		0,12		0,10	
	250 Hz		500 Hz		1000 Hz		2000 Hz	
ASSISTANCE	A	$n.A$	A	$n.A$	A	$n.A$	A	$n.A$
Adulte debout	0,33		0,40		0,50		0,60	
Enfant	0,20		0,35		0,40		0,50	
Personne assise sur siège ciné	0,36		0,40		0,46		0,48	
Personne assise sur siège bois	0,25		0,31		0,35		0,33	

4.6 Hypothèses de Sabine

Ces hypothèses simplificatrices de Wallace-Clément Sabine datent d'environ 1925.

1^{ère} hypothèse : La courbe d'établissement d'un son et sa courbe d'affaiblissement ont une allure approximativement exponentielle.

2^{ème} hypothèse : T est le même en tout point de la pièce, il ne dépend ni de la position de la source, ni de celle des surfaces sur les parois de la salle, mais du volume de la pièce et de la somme des pouvoirs absorbants des parois.

4.7 Calcul de T par la formule de Sabine

$$A = \sum_i S_i \alpha_i + \sum_i n_i A_i$$

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

On calcule tout d'abord l'aire équivalente en m² Sabine de la pièce, en faisant la somme des aires équivalentes Sabine des diverses parois + meubles et assistance.

T est le temps de réverbération de la salle exprimé en secondes

V est le volume de la pièce exprimé en m³

A est l'aire équivalente en m² Sabine de la pièce, calculé plus haut.

4.8 Relation entre variation de T et variation du niveau sonore moyen

Prenons l'exemple d'une pièce brute, non corrigée, dont l'aire équivalente est $A_1 = 4 \text{ m}^2$ Sabine, et le temps de réverbération $T_1 = 5 \text{ s}$. On corrige cette pièce à l'aide de panneaux, de dalles et de tentures, pour obtenir finalement $A_2 = 30 \text{ m}^2$ Sabine et $T_2 = 0,7 \text{ s}$.

La correction ainsi réalisée va avoir également pour conséquence une baisse du niveau de bruit moyen dans la salle. Cette baisse ΔL peut s'exprimer en fonction de la variation de A, au moyen de la formule

$$\Delta L = 10 \cdot \log \frac{A_1}{A_2}$$

En y substituant $T = \frac{0,16 V}{A}$, on obtient finalement $\Delta L = 10 \cdot \log \frac{T_2}{T_1}$

4.9 Fiche de calculs de correction acoustique d'une salle

Salle :		l = m		p = m		h = m			
		f001				f011			
Fréquences propres fondamentales		f010				f101			
		f100				f110			
Utilisation :		k =		V = m ³		T _{opt} =		s	
Fréquences centrales		250		500		1000		2000	
Matériau	Aire	α	$A=S.\alpha$	α	$A=S.\alpha$	α	$A=S.\alpha$	α	$A=S.\alpha$
Meubles	Nombre	A	$n.A$	A	$n.A$	A	$n.A$	A	$n.A$
Assistance									
$A = \sum_i S_i \alpha_i + \sum_i n_i A_i$									
$T = \frac{0,16 V}{A}$									

4.10 Ondes stationnaires et fréquences propres

Entre deux murs parallèles, des fréquences propres vont naître, qui sont des familles d'ondes stationnaires.

Dans le cas où la distance entre les deux murs est l , la fréquence fondamentale, sera $f_1 = \frac{c}{2l}$

et les harmoniques $f_n = n \cdot f_1$

Dans le cas d'un couloir fermé à l'une des extrémités, ouvert à l'autre, les fréquences propres dans le sens de sa longueur auront pour forme $f_1 = \frac{c}{4l}$ et $f_n = (2n+1) f_1$

Depuis les années 1930, une approche plus globale a permis d'enrichir cette étude en étendant ces concepts issus de la théorie ondulatoire, aux propagations dans l'espace, non plus seulement selon l'un des trois axes x , y ou z mais en combinant la possibilité des trois types de réflexion dans une pièce en autant de modes. La formule issue de

cette étude spatiale est : $f_n = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}$ où l_x ; l_y ; l_z sont les dimensions de la pièce

et n_x ; n_y ; n_z des entiers naturels définissant les modes.

En 1939, l'acousticien M. Maa obtient, en partant de cette formule, le nombre $N(f)$ des fréquences propres d'un local parallélépipédique compris entre 0 et une fréquence donnée f .

$$N(f) = \frac{f}{c} \left(\frac{4\pi V}{3} + \frac{\pi S}{2} + \frac{L}{2} \right)$$

où V est le volume de la pièce $V = l_x \cdot l_y \cdot l_z$, S est l'aire totale des parois de la salle $S = 2(l_x \cdot l_y + l_x \cdot l_z + l_y \cdot l_z)$

et L est la longueur totale des arêtes de la salle $L = 4(l_x + l_y + l_z)$

Le grand nombre de fréquences propres existant (plusieurs centaines entre 0 et 500 Hz pour une pièce normale 3×4×2,5) a conduit les acousticiens à se pencher sur des cas types, telles les salles de dimensions multiples de 3m 4m 5m, dans le but d'avoir une répartition homogène des diverses fréquences propres.

4.11 Absorption de fréquences particulières à l'aide de résonateurs et réseaux poreux

Avant d'entrer dans le détail de ces dispositifs, signalons qu'une absorption de fréquences particulières existe à l'air libre puisque les aiguës sont plus atténuées que les graves. Ce phénomène est perceptible sur les grandes distances.

• Résonateurs à membranes

Utilisés dans l'absorption des graves et des médiums, ils sont constitués d'un panneau fin fixé à distance du mur par une fixation périphérique étanche (tasseaux).

La formule approximative donnant la fréquence de résonance d'un tel système est

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{m \cdot d}}$$

c = célérité du son (m/s)

ρ = masse volumique de l'air (kg/m^3) $\approx 1,21$ à 20°C

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

d = distance de fixation au mur (m)

Valeurs le plus couramment utilisées :

- panneaux d'isorel dur ou de contreplaqué
- épaisseurs de 3 mm à 5 mm
- dimensions ≥ 1 m
- Tasseaux bois avec lame d'air 5 à 7 cm

Allure du coefficient d'absorption A , fonction de f (Hz)

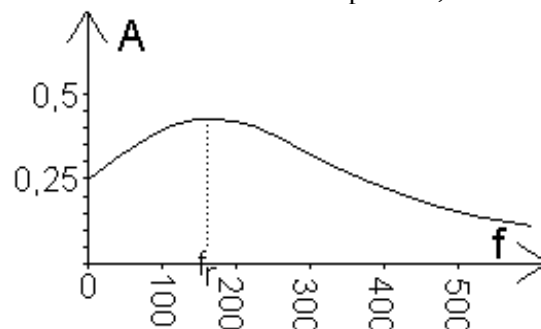


Schéma 5

• Résonateurs de Helmholtz

Généralement utilisés dans l'absorption des graves et des médiums, ce sont des cavités sphériques ou cubiques de volume V débouchant à l'air libre par un col de section S et de longueur L .

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{LV}}$$

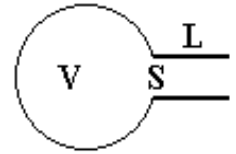


Schéma 6

Bien que théorisé récemment, ce principe était déjà connu de l'antiquité. Des textes ont été retrouvés, décrivant l'emploi d'amphores comme résonateurs et de résonateurs amortis formés d'urnes partiellement remplies de cendres.

Plus récemment, Lord Rayleigh a mis en évidence des termes correcteurs d'effet d'extrémité (d'origine aérodynamique), à la formule de Helmholtz. Cette formule, valable pour des cols cylindriques, est celle qu'a reprise puis adaptée Snyder bien plus tard pour en faire la formule de calcul des événements d'enceintes Bass-reflex.

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{(L + 1,6R).V}}$$

• Les matériaux poreux de type fibreux

Ils ne suivent pas rigoureusement la loi des masses du fait de leur hétérogénéité et absorbent plutôt les aigus, avec des coefficients qui peuvent être de l'ordre de 80 % à 2000 Hz et 30 % à 250 Hz. Les plafonds suspendus de dalles acoustiques forment des systèmes qui cumulent les avantages de la catégorie des matériaux poreux avec celle des résonateurs à membrane et lame d'air très amortis. Cette efficacité explique la large utilisation de ces plafonds.

• Les matériaux poreux de type : surfaces percées de trous ou de fentes

Ces dispositifs absorbent plutôt les graves. Leur théorie s'étend de celle d'Helmholtz, aux études de Pedersen en 1940. Ils sont assez sélectifs et sont fréquemment combinés en résonateurs multiples.

4.12 Limites de l'hypothèse de Sabine

Les limites de l'hypothèse de Sabine apparaissent

- quand l'utilisation de la salle est justement liée aux positions des sources et des récepteurs par exemple en hi-fi où la cohérence spatiale de la scène sonore dépend de la position des deux enceintes.
- quand T dépend fortement de f , ce qui rend la courbe d'établissement d'un son complexe totalement différente d'une exponentielle simple.

Dans le cas de salles non parallélépipédiques tout comme dans le cas de surfaces dont la rugosité importante produit une diffusion du son très variable avec la fréquence, un calcul de fréquences propres et de temps de réverbération est quasi impossible, et on utilise plutôt une modélisation informatique basée sur les principes suivants :

- mise en mémoire des caractéristiques du local (formes et répartition des diverses surfaces)
- matricage de ces données
- choix d'un point source (émetteur)
- choix d'une fréquence
- simulation des réflexions successives jusqu'à -30 ou -60 dB de « rayons sonores »
- somme des couples (amplitude, phase) des différents « rayons sonores » dans l'espace de la pièce
- obtention d'une matrice de niveau sonore dans la pièce.
- obtention d'une matrice de temps de réverbération dans la pièce.

C'est cette technique récente, couplée à l'étude du parcours moyen d'un bruit diffus, qui est connue sous le nom de méthode statistique.

Une autre approche issue des techniques de l'aéronavale, consiste à opérer une étude en ultrasons sur une maquette à l'échelle.

4.13 Exemples d'aménagements

• Atelier

Dans un atelier comportant une machine bruyante, les travaux auront pour objectifs successifs l'isolation acoustique de la machine (commencer par combattre la conduction solidienne puis analyser le spectre du bruit émis pour choisir le type d'absorbant ou/et résonateurs à mettre en œuvre), puis la correction acoustique du reste de l'atelier en vue de prévenir la propagation aérienne des bruits restants. L'aménagement de l'atelier est alors considéré dans sa globalité.

Présence de boxes aux parois absorbantes. Utilisation possible : supports de documents

Présence de panneaux aériens. Utilisation possible : support d'affiches de sécurité, efficace dans les ateliers aux plafonds hauts. Attention : Un des problèmes est le classement au feu des matériaux utilisés.

• Pièce audiophile

On veille autant que possible à la symétrie droite/gauche de la pièce et de son ameublement.

Prévoir un mur avant réflecteur d'au moins trois mètres, à quelques centimètres derrière les enceintes, dans un contexte de zone d'émission peu absorbante

Le fauteuil d'écoute est placé soit dans un contexte plus absorbant, (mur arrière absorbant, rideaux, bibliothèques latérales...), soit éloigné du mur arrière; le but étant d'éviter l'onde arrière réfléchie.

On peut prendre en compte ce qui concerne la salle de conférence en y ajoutant un souci plus grand d'éviter les fréquences de résonance qui nuiraient à la linéarité de la courbe de réponse globale de la chaîne source-amplificateurs-enceintes-salle. et un temps de réverbération un peu plus grand.

• Bureau de travail

Dans le cas de bureaux disposés en boxes (les cloisons mobiles absorbent plutôt le bas médium), il est courant de combiner la pose de moquette (absorption préférentielle des haut-médiums), avec la pose de plafonds suspendus en dalles acoustiques (absorption préférentielle des graves).

• Couloirs de passage

Leur forme parallélépipédique favorise les ondes stationnaires. Il importe de corriger en premier le plafond, en deuxième les murs (dalles, rideaux décoratifs...) Dans certains couloirs, la pose de vitrines peu profondes permet de diffracter l'onde sonore émise en rompant avec un profil simple de la pièce.

• Salle de conférence

Les surfaces réfléchissantes doivent se trouver derrière l'orateur afin d'augmenter le niveau sonore de son message. Au contraire, le mur qui fait face à l'orateur doit être absorbant ou diffractant afin d'éviter une réflexion nuisible à l'intelligibilité du message. Dans les calculs d'aménagement de la pièce, supposée remplie d'assistants, un des derniers paramètres ajustés sera l'aménagement des dalles acoustiques du plafond. Il est conseillé de rendre le fond de la pièce globalement plus absorbant que le devant.

5 Bibliographie

- [1] Encyclopaedia Universalis aux entrées « acoustique, acoustique architecturale »
- [2] Haute Fidélité n° 50 Avril/mai 2000
- [3] L'acoustique des bâtiments René Lehmann Que sais-je n° 930 PUF
- [4] L'acoustique des salles de concert La recherche n°211 juin 1999 Page 736 :
- [5] Notions expérimentales sur la mesure des sons Jacques Avril, ENNA Toulouse, 1988
- [6] Techniques de prise de son Editions fréquences, diffusion Eyrolles
- [7] Guide technologique Finition confort de l'habitat
J. Baudry, F. Fauchard, B. Guichard, Y. Tastayre, H. Dupont; LP Michelet Nantes <1990
- [8] Larousse Mémo Encyclopédie en un volume 2001 ISBN 2-03-520152-7 (un des meilleurs ouvrages du genre)
- [9] Acoustique Bep-BacPro Frédéric Diaz 2001 Cours + exercices corrigés et guide d'expériences