



Introduction à l'acoustique des salles

Partie 2 : Théorie de Sabine (HF)

Partie 1 : Théorie ondulatoire (BF)

Partie 2 : Théorie statistique (Sabine, HF)

Partie 3 : Autres approches

Structure du champ acoustique dans les salles

Gilles.robert@ec-lyon.fr

ECL2022Ac8AcSalles



Partie 2 : Les hautes fréquences

Théorie statistique : Théorie de Sabine

Le champ acoustique à l'intérieur d'une salle est relativement homogène en HF (Nb important de modes sollicités). On parle de champ diffus. On s'appuie sur ce comportement pour développer une théorie simplifiée (théorie énergétique).

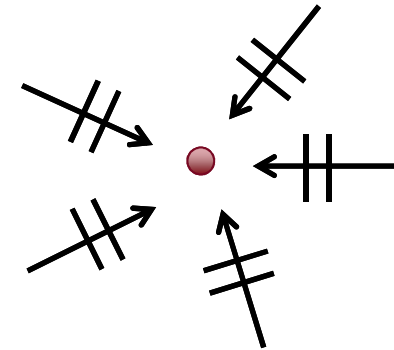
3.1 Hypothèse de champ diffus

Champ diffus : Définition

Déf

C'est un champ homogène, ses caractéristiques sont identiques dans toute la salle: le niveau de pression, le niveau d'énergie acoustique ne dépendent pas du point de l'espace.

- Il résulte de la contribution d'une infinité d'ondes planes
 - De directions quelconques
 - De déphasages aléatoires
 - D'amplitude identique



Comment le réaliser?

On favorise les réflexions

On cherche à réduire l'influence modale (nombreux modes sollicités)

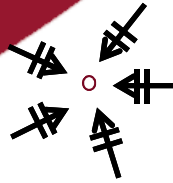
→ Salle réverbérante

$$\frac{dN}{df} \approx \frac{4\pi \text{Volume}}{c_0^3} f^2$$



Grande salle: $L \gg \lambda$
Fréquence élevée

Irrégularités géométriques
Excitation non monochromatique



La pression en un point \vec{r} est constitué par la somme d'ondes planes provenant des différentes parois.

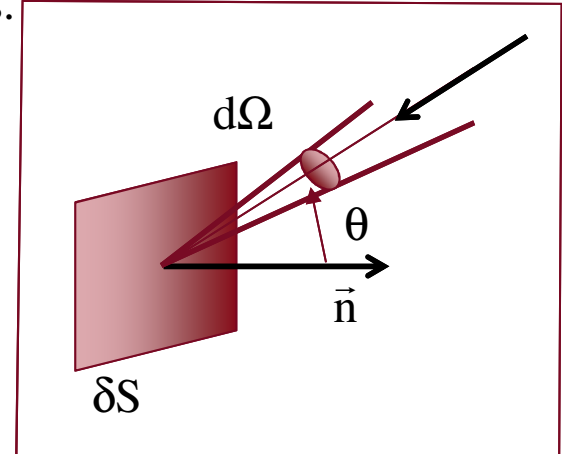
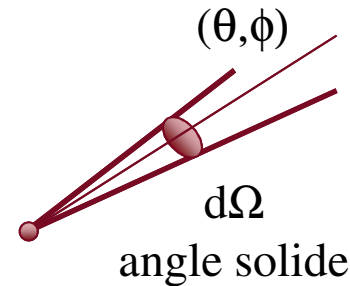
3.2 Modélisation du champ diffus

Chaque onde est définie par

Sa direction: θ et ϕ

Son amplitude: $A(\vec{r}; \theta, \phi) d\Omega$

Son intensité: $|A(\vec{r}; \theta, \phi)|^2 / \rho_0 c_0$



Pression acoustique

$$p(\vec{r}) = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi} A(\vec{r}; \theta, \phi) e^{-i\vec{k} \cdot \vec{r} + i\omega t} \sin \theta d\theta$$

Densité d'énergie (moyenne)

$$E(\vec{r}) = \frac{1}{2} \frac{1}{\rho_0 c_0^2} \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi} |A(\vec{r}; \theta, \phi)|^2 \sin \theta d\theta$$

Les ondes planes sont supposées décorrélées, l'énergie est la somme des énergies

Intensité (moyenne)

Flux d'énergie traversant une surface

$$(1) \quad I(\vec{r}) \delta S dt = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{|A(\vec{r}; \theta, \phi)|^2}{\rho_0 c_0^2} \delta S \cos \theta \dots \dots \times \sin \theta d\theta d\phi \times c_0 dt$$

$$I(\vec{r}) = \frac{1}{2} \frac{1}{\rho_0 c_0} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} |A(\vec{r}; \theta, \phi)|^2 \cos \theta \times \sin \theta d\theta d\phi$$

H

Les ondes sont distribuées de façon homogène aléatoirement en phase et en direction

$$\longrightarrow A(\vec{r}; \theta, \phi) = A$$

On en déduit

$$p_{\text{RMS}}^2 = \langle pp^* \rangle_t = A^2 \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sin \theta d\theta d\phi = 4\pi \frac{1}{2} A^2$$

$$E = \frac{1}{2} \frac{1}{\rho_0 c_0^2} |A|^2 \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\pi \sin \theta d\theta = \frac{4\pi}{\rho_0 c_0^2} \frac{1}{2} |A|^2$$

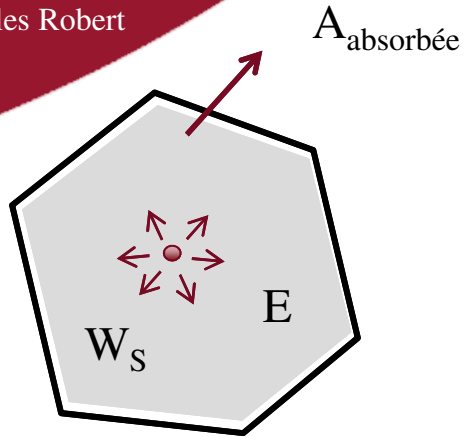
$$I = \frac{1}{\rho_0 c_0} \frac{1}{2} |A|^2 \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \cos \theta \times \sin \theta d\theta d\phi = \frac{\pi}{\rho_0 c_0} \frac{1}{2} |A|^2$$

$$E = \frac{p_{\text{RMS}}^2}{\rho_0 c_0^2} \quad I = \frac{c_0 E}{4}$$

$$I = \frac{p_{\text{RMS}}^2}{4\rho_0 c_0}$$

Conclusion

La connaissance, la mesure de la pression p_{RMS}^2 permet de définir complètement le champ acoustique dans la salle: Energie, intensité, ...



Rappel

Equation d'énergie

3.3 Equation différentielle de l'énergie

$$\int_D \frac{\partial E}{\partial t} dv = \dot{W}_{\text{source}} - \int_{\partial D} \alpha \vec{I} \cdot \vec{n} dS$$

Variations de l'énergie dans la salle Puissance des sources Puissance absorbée

Energie absorbée $\frac{c_0 E}{4}$

$$\int_{\partial D} \alpha \vec{I} \cdot \vec{n} dS = I \int_{\partial D} \alpha dS$$

$$= I \sum \alpha_i S_i = I a = I \alpha_0 S$$

Volume $\frac{dE}{dt} = W_{\text{source}} - A_{\text{absorbée}}$

$$V \frac{dE}{dt} + \frac{ac_0}{4} E = W_{\text{source}}$$

Cette équation gouverne l'évolution du niveau d'énergie dans la salle

Déf Aire d'absorption équivalente $a = \sum \alpha_i S_i$
 Coefficient d'absorption moyen $\alpha_0 = \frac{1}{S} \sum \alpha_i S_i$

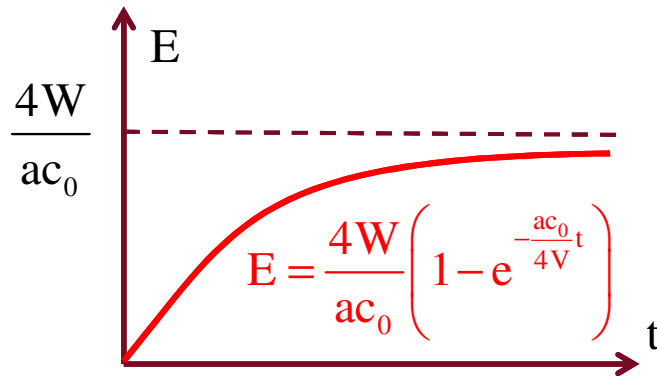
C'est une équation différentielle linéaire du 1^{er} ordre à coefficients constants non homogène

3.4 Niveau de saturation et de décroissance du son dans la salle

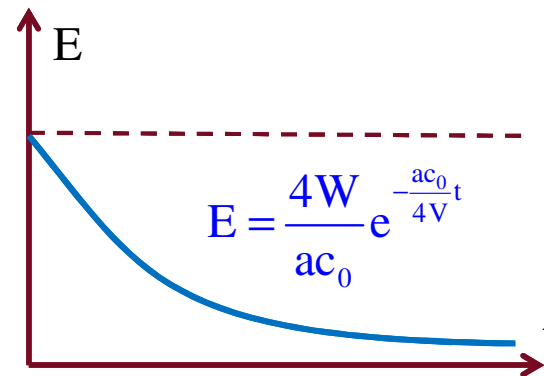
$$V \frac{dE}{dt} + \frac{ac_0}{4} E = W_{\text{source}}$$

Solution particulière $\frac{4W}{ac_0}$

Solution équation homogène $\exp\left(-\frac{ac_0}{4V} t\right)$



Mise en route de la source



Coupure de la source

Déf Temps de réverbération: T_{60}

Temps pour une décroissance de -60 dB

$$10 \log_{10} e^{-\frac{ac_0 T}{4V}} = -60$$

$$T_{60} = 0.16 \frac{V}{a} \quad \text{Sabine}$$

$$E_{\text{saturation}} = \frac{4W}{ac_0}$$

$$p_{\text{eff, sat}}^2 = \frac{4W}{a} \rho_0 c_0$$

Rq Formule de Eyring

La formule de Sabine est valable si $\alpha_0 < 0.2$

Formule de Eyring

$$\alpha_0 < 0.7 \left\{ \begin{array}{l} a = -S \ln(1 - \alpha_0) \\ T = \frac{0.16 V}{a} = \frac{0.16 V}{-S \ln(1 - \alpha_0)} \end{array} \right.$$

Résumé: théorie statistique

H Champ diffus

Conditions d'application

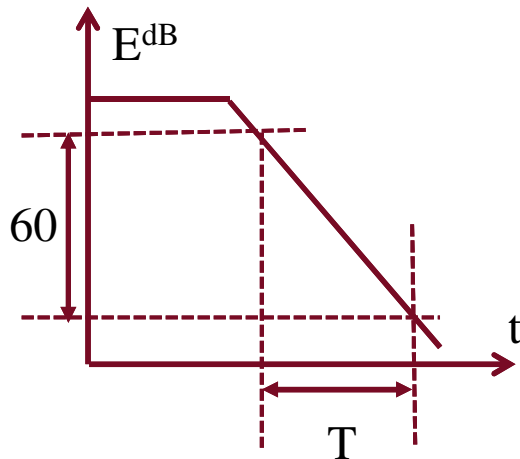
HF, parois peu absorbantes

Caractéristiques homogènes

Densité d'énergie $E = \frac{p_{\text{eff}}^2}{\rho_0 c_0^2}$

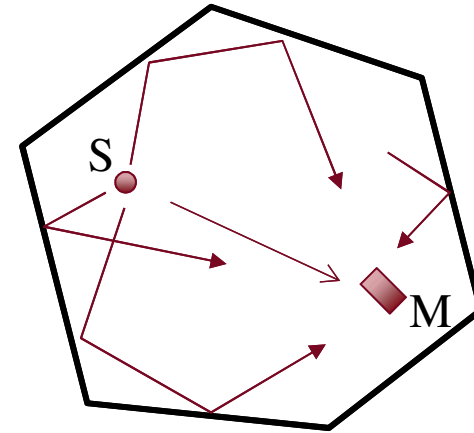
Intensité $I = \frac{p_{\text{eff}}^2}{4\rho_0 c_0}$

Temps de réverbération



$$T_{60} = 0.16 \frac{V}{a}$$

3.5 Résumé et applications



Evolutions

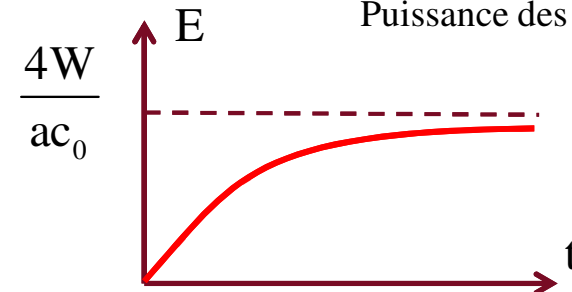
Elles sont gérées par une éq. Diff. 1^{er} ordre

Volume de la salle

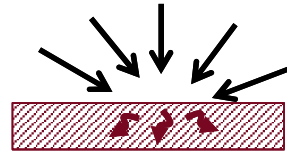
Aire absorption éq.

$$V \frac{dE}{dt} + \frac{ac_0}{4} E = W_{\text{source}}$$

Puissance des sources



Objectif



Estimer un coefficient d'absorption α moyen qui ne tient pas compte de l'incidence

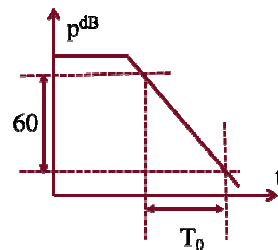
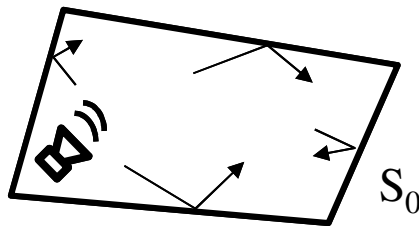
Principe

1. Solliciter un échantillon avec un champ diffus
2. Estimer l'énergie absorbée

Méthode

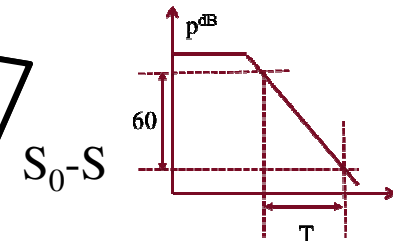
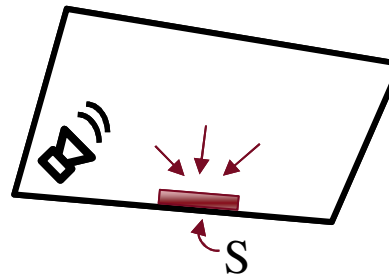
Pour créer un champ diffus on utilise une chambre réverbérante

1^{ère} Etape



$$a_0 = \alpha_0 S_0 = 0.16 \frac{V}{T_0}$$

2^{ème} Etape: avec échantillon



$$a = \alpha_0 (S_0 - S) + \alpha S = 0.16 \frac{V}{T}$$



$$\alpha = 0.16 \text{ Volume} \left(\frac{1}{S_0 T_0} + \frac{1}{ST} - \frac{1}{ST_0} \right)$$

Exemples : Coefficients d'absorption, α

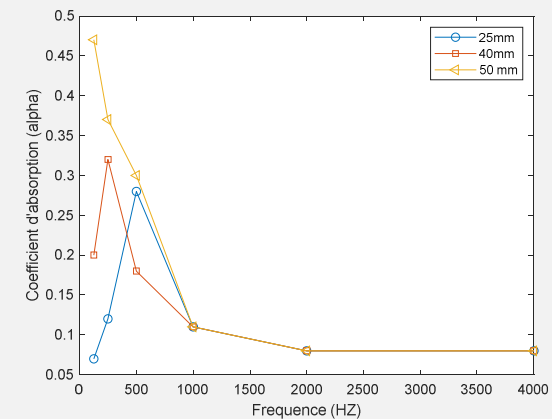
		Fréquences (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Maçonnerie et enduits	Béton lisse ou peint	0.01	0.01	0.01	0.02	0.05	0.07	
	Brique brute	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.07	
	Brique peinte	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	
	Enduit sur mur lourd	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	
	Parpaing brut	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.07	
	Plâtre peint	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	
Revêtements de sol	Carrelages plastiques	0.02	0.02	0.04	0.03	0.02	0.02	
	marbre	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
	moquette	0.05	0.10	0.25	0.40	0.60	0.70	
	Moquette sur thibaude	0.10	0.20	0.50	0.60	0.80	0.80	
	Parquet collé	0.04	0.04	0.07	0.07	0.07	0.07	
	Parquet sur lambourdes	0.20	0.15	0.12	0.10	0.08	0.07	
Divers	Bois vernis	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	
	Porte plane	0.30	0.20	0.20	0.10	0.07	0.04	
	Verre ordinaire	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04	
	Contreplaqué de 5mm à 50 mm du mur	0.45	0.35	0.30	0.10	0.08	0.08	
	Liège aggloméré	0.15	0.25	0.22	0.22	0.20	0.20	
	Mousse audio 50 mm	0.15	0.25	0.65	0.90	1.00	1.00	
Voilages tentures	Draperie contre mur	0.04	0.05	0.11	0.18	0.30	0.45	
	Rideau de velours	0.10	0.30	0.50	0.80	0.75	0.65	
	Tenture plissée	0.20	0.35	0.55	0.70	0.65	0.60	
	Draperie coton plis serrés	0.10	0.40	0.50	0.85	0.80	0.65	
"contreplaqué 5 mm à 25 mm du mur		0,07	0,12	0,28	0,11	0,08	0,08	
"Contreplaqué 5 mm à 40 mm du mur		0,20	0,32	0,18	0,11	0,08	0,08	
"contreplaqué 5 mm à 50 mm du mur		0,47	0,34	0,30	0,11	0,08	0,08	

Le coefficient α dépend de la fréquence.
Généralement l'absorption augmente avec la fréquence.
Mais ce n'est pas toujours le cas.

Contre plaqué 5mm avec une lame d'air



mur



La lame d'air améliore les BF
En HF elle n'a aucune action

Suivant la configuration de l'isolation il peut y avoir des comportements très variés

Aires d'absorption équivalents, a (m²)

$$a = \sum \alpha_i S_i$$

Comment définir l'absorption d'un objet, d'une personne, d'un meuble ?
On ne peut pas définir l'aire de l'objet, de la personne. On ne peut pas définir un coefficient d'absorption. On parle alors d'aire d'absorption équivalente

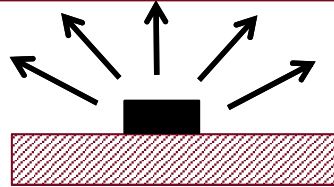
L'aire d'absorption équivalente est la valeur de l'aire d'une surface ayant un facteur d'absorption égal à 1, absorbant la même énergie acoustique que la surface ou l'objet considéré.
Elle s'exprime en m². Elle dépend de la fréquence.

		Fréquences (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Personnes	0.5 m ² /personne assise sur une chaise en bois	0.08	0.16	0.25	0.32	0.33	0.34	
	1 m ² /personne assise sur une chaise en bois	0.18	0.26	0.55	0.68	0.78	0.78	
	6 m ² / personne	0.12	0.18	0.35	0.56	0.68	0.74	
	7 m ² /personne debout	0.12	0.19	0.42	0.66	0.86	0.94	
sièges	Chaise pliante en bois non occupée	0.02	0.02	0.02	0.04	0.04	0.03	
	Siège capitonné simple avec tissu	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	0.40	
	Siège capitonné simple avec cuir	0.05	0.15	0.20	0.10	0.03	0.03	
	Siège de théâtre pliant	0.25	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	
Divers	Musicien avec son instrument (1.1 m ² / personne)	0.16	0.42	0.87	1.07	1.04	0.94	
	Musicien avec son instrument (2.3 m ² / personne)	0.03	0.13	0.43	0.70	0.86	0.99	
	Chanteur du chœur	0.15	0.30	0.40	0.45	0.45	0.55	
	Elèves dans salle de cours avec table en bois (3 m ² / personne)	0.14	0.20	0.32	0.54	0.58	0.70	

Pour les objets, les personnes, les meubles, on caractérise l'absorption à travers leur aire d'absorption équivalente.

Exemples d'applications
Mesure de la puissance acoustique d'une source

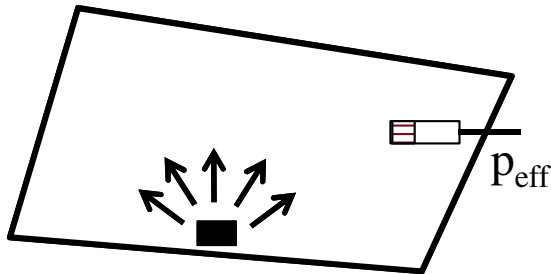
Objectif



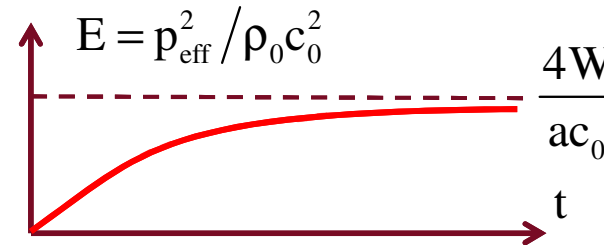
Estimer la puissance W rayonnée par la source

Principe

On place la source dans une ch. rév.



On mesure le niveau de saturation



Méthode

1. Estimation de « a » avec le $T_{\text{réverbération}}$
2. Mesure du niveau de saturation p_{eff}
3. Calcul de W

$$a = 0.16 \frac{V}{T}$$

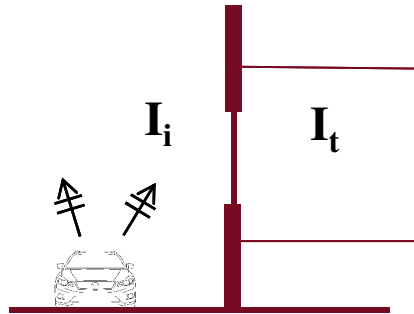
$$W = \frac{p_{\text{eff}}^2}{\rho_0 c_0^2} \frac{ac_0}{4} = \frac{p_{\text{eff}}^2 \cdot 0.16 V}{\rho_0 c_0^2 4 T}$$

Rq. Une fois la salle caractérisée par ses temps de réverbération, une seule mesure suffit pour estimer la puissance de la source.

Attention T dépend de la fréquence.

Mesure de l'indice d'affaiblissement acoustique des cloisons

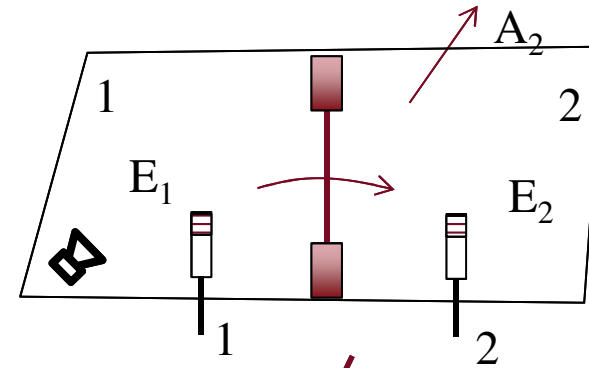
Objectif



$$TL \equiv 10 \log_{10} \left(\frac{I_t}{I_i} \right)$$

Transmission Loss

Principe



$$E_{\text{incidente}} = I_i S$$

$$E_{\text{transmise}} = \frac{dE_2}{dt} + A_2$$

permanent

énergie absorbée par 2

Méthode

1. On mesure p_1 $\rightarrow E_i = I_i S = \frac{p_{1,\text{eff}}^2}{4\rho_0 c_0} S$

2. On mesure p_2 $\rightarrow E_{\text{trans}} = A_2 = \bar{\alpha}_2 I_2 S_2 = \bar{\alpha}_2 \frac{p_{2,\text{eff}}^2}{4\rho_0 c_0} S_2$

3. On estime $\bar{\alpha}_2$ dans la seconde pièce avec la cloison avec une mesure de T_{rev}

4. On calcule

$$\rightarrow TL = 10 \log_{10} \left(\frac{E_i}{E_t} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{p_{1,\text{eff}}^2}{p_{2,\text{eff}}^2} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{S}{\bar{\alpha}_2 S_2} \right)$$

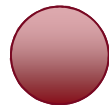
On retiendra

En hautes fréquences, si la salle est peu amortie et n'est pas excitée en fréquence pure, le champ acoustique est homogène. On dit qu'il est diffus.

Sous l'hypothèse de champ diffus, on construit une théorie qui gère l'évolution de l'énergie contenue dans la salle. C'est la théorie de Sabine

Le champ acoustique ainsi que toutes les grandeurs associées sont définis par la mesure de la pression en un seul point de la salle.

On retiendra enfin les notions de salle réverbérante, de temps de réverbération, d'aire d'absorption équivalente, de coefficient d'absorption, d'indice d'affaiblissement.



Gilles.robert@ec-lyon.fr



36 av. Guy de Collongue
69134 Écully cedex
T + 33 (0)4 72 18 60 00
www.ec-lyon.fr