5/18/2025

Acoustique et Sciences Physiques

ACOUSTIQUE DES SALLES

Sarah FASSEUR – Ingénieure du son

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Lorsqu'une source rayonne dans une salle, **les réflexions sur les parois modifient fortement la pression acoustique** (mesurée et perçue).

Une salle génère :

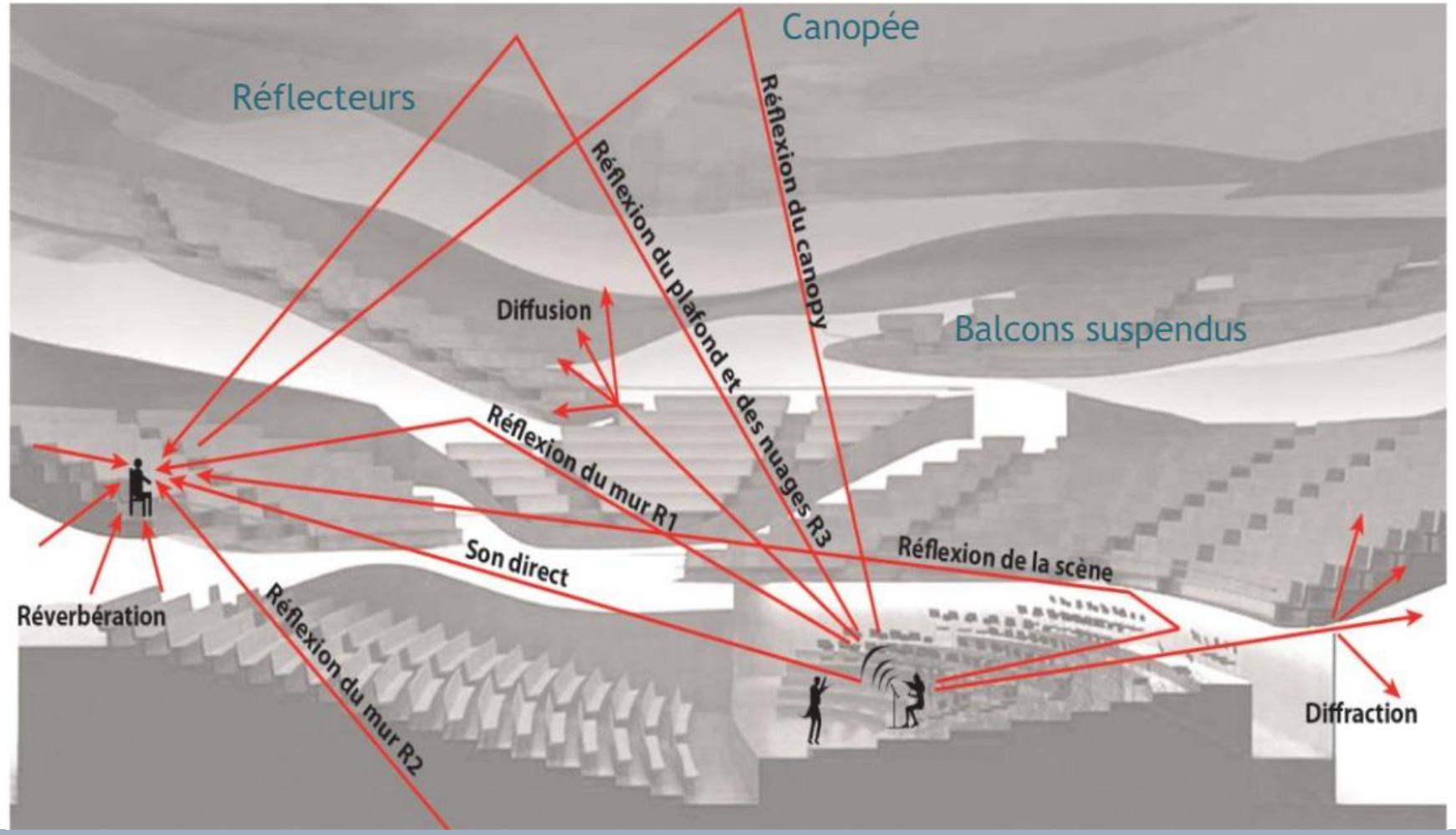
- Une amplification globale du niveau sonore
- De fortes variations (spatiales et fréquentielles, surtout en BF)
- De la réverbération

Acoustique des salles / acoustique architecturale :

- **Offrir la meilleure qualité possible d'écoute en fonction du lieu**
- Lieux dédiés au spectacle : salles de concerts, théâtre, opéra, salle de cinéma
- Lieux publics : hall de gare, aéroport, salle de classe, piscine, lieux de travail …
- Autres lieux : studio d'enregistrement

INTRODUCTION

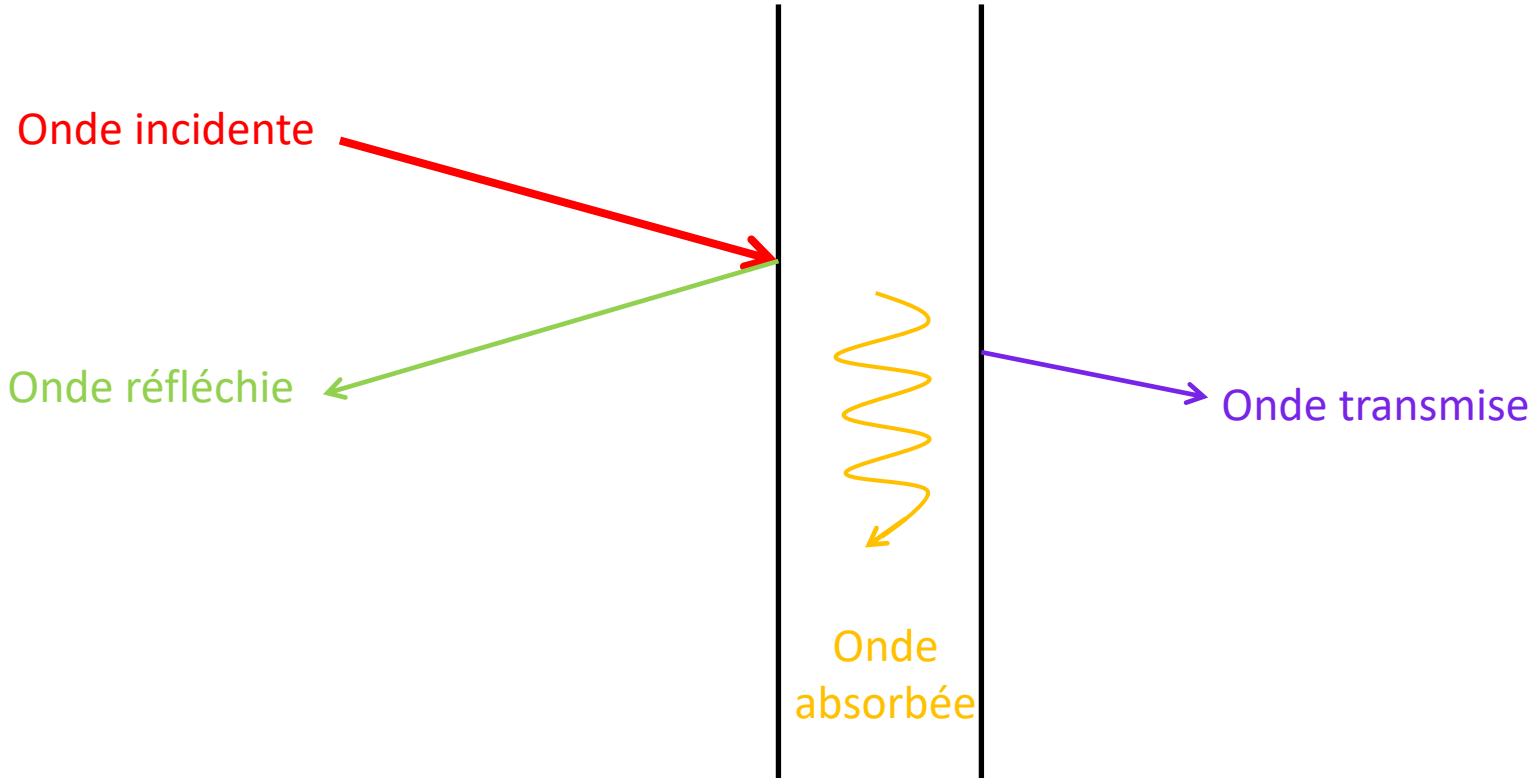
Ondes sonores dans les salles : Des interactions complexes et nombreuses.



INTRODUCTION

Phénomène d'interaction entre une surface et une onde :

- Réflexion, transmission, absorption par une paroi

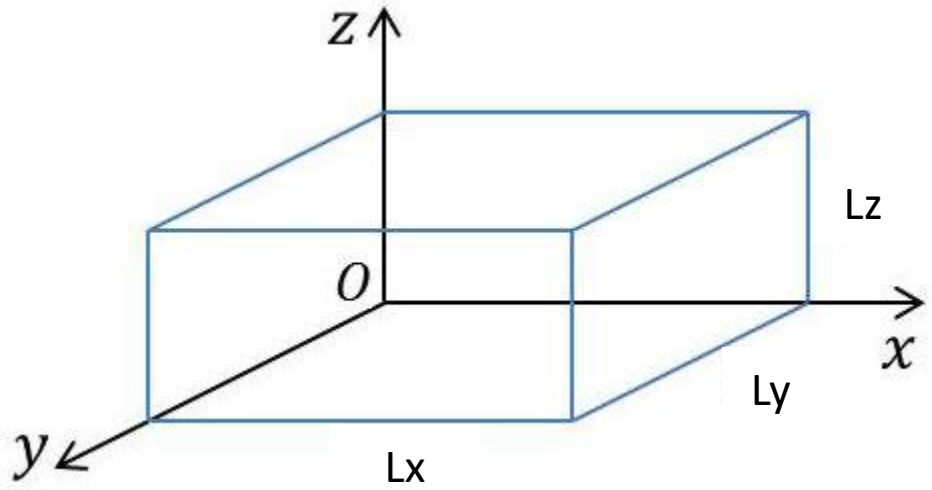


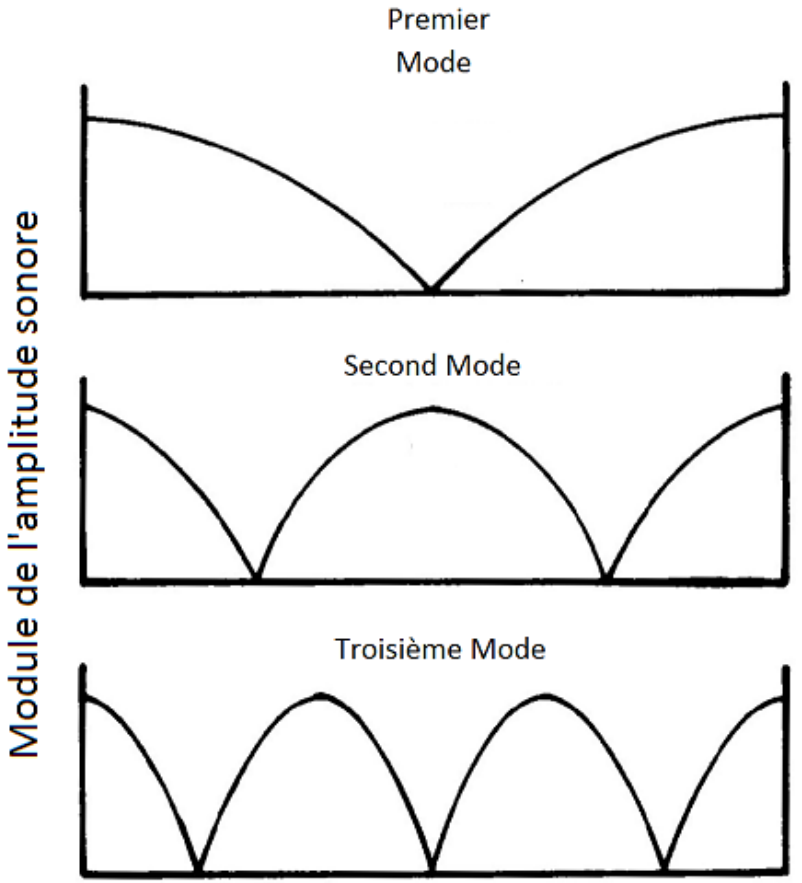
THÉORIE MODALE : ÉTUDE DES ONDES STATIONNAIRES

FRÉQUENCES PROPRES DES MODES

Fréquences propres des modes pour une salle parallélépipédique :

$$f_{n_x,n_y,n_z} = \frac{c}{2}\sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2}$$





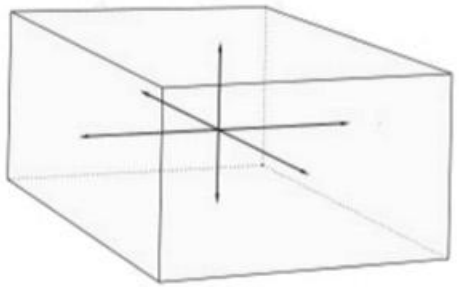
LES MODES PROPRES D'UNE SALLE PARALLÉLÉPIPÉDIQUE

Les **MODES AXIAUX** correspondent aux ondes stationnaires créées par la réflexion de surfaces opposées.

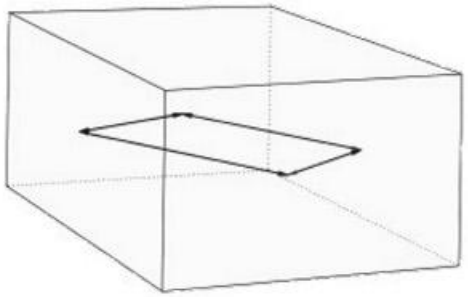
Les **MODES TANGENTIELS** correspondent aux ondes stationnaires créées par la réflexion de surfaces contiguës.

Les **MODES OBLIQUES** correspondent aux ondes stationnaires créées par la réflexion de toutes les surfaces de la salle.

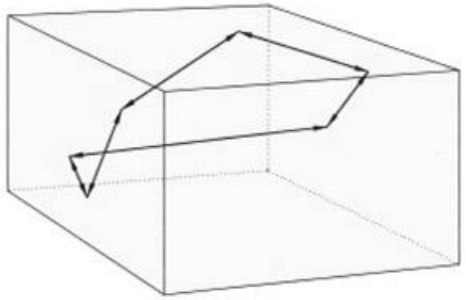
L'ensemble des modes (axiaux, tangentiels et obliques) constitue la **réponse fréquentielle de la salle**.



MODE AXIAL



MODE TANGENTIEL



MODE OBLIQUE

LES MODES PROPRES D'UNE SALLE PARALLÉLÉPIPÉDIQUE

MODES AXIAUX

- Correspondent aux triplets (n_x, n_y, n_z) où une seule valeur est non nulle
- Les ondes se propagent uniquement dans une direction

MODES TANGENTIELS

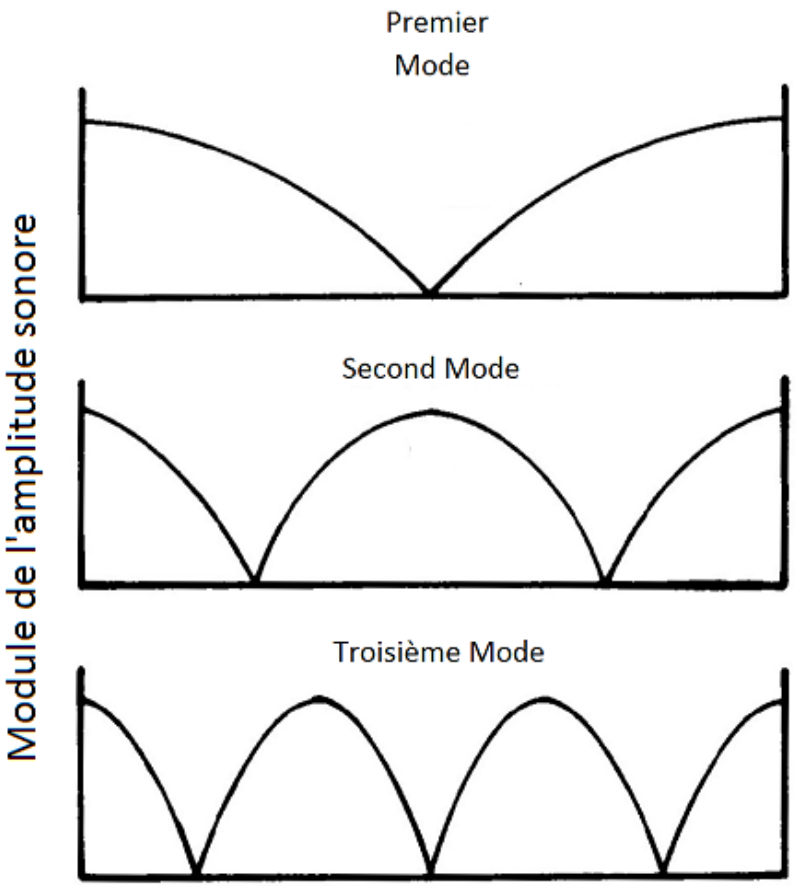
- Correspondent aux triplets (n_x, n_y, n_z) où deux valeurs sont non nulles
- Modes bidimensionnels

MODES OBLIQUES

- Correspondent aux triplets (n_x, n_y, n_z) où les 3 valeurs sont non nulles
- Modes tridimensionnels

LES MODES PROPRES D'UNE SALLE PARALLÉLÉPIPÉDIQUE

Représentation des modes axiaux en coupe (selon la pression acoustique) :

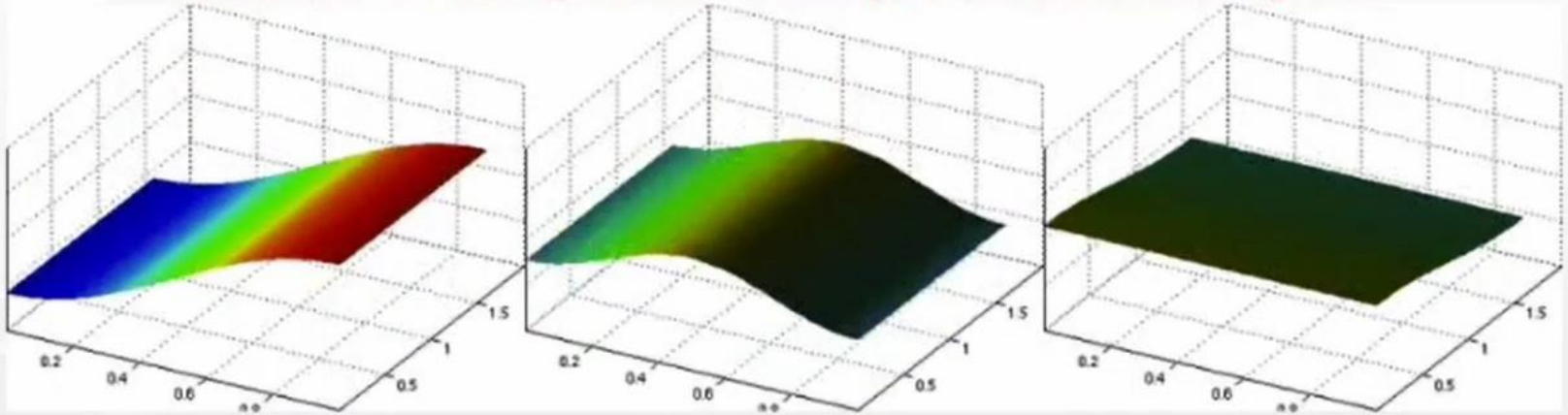


Mode (1,0,0)

Mode (2,0,0)

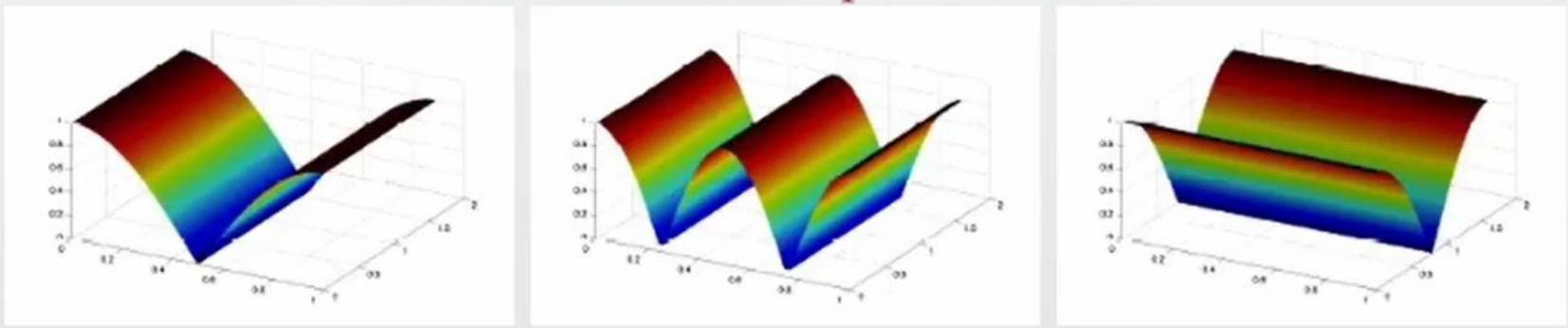
Mode (3,0,0)

Évolution temporelle de la pression acoustique :



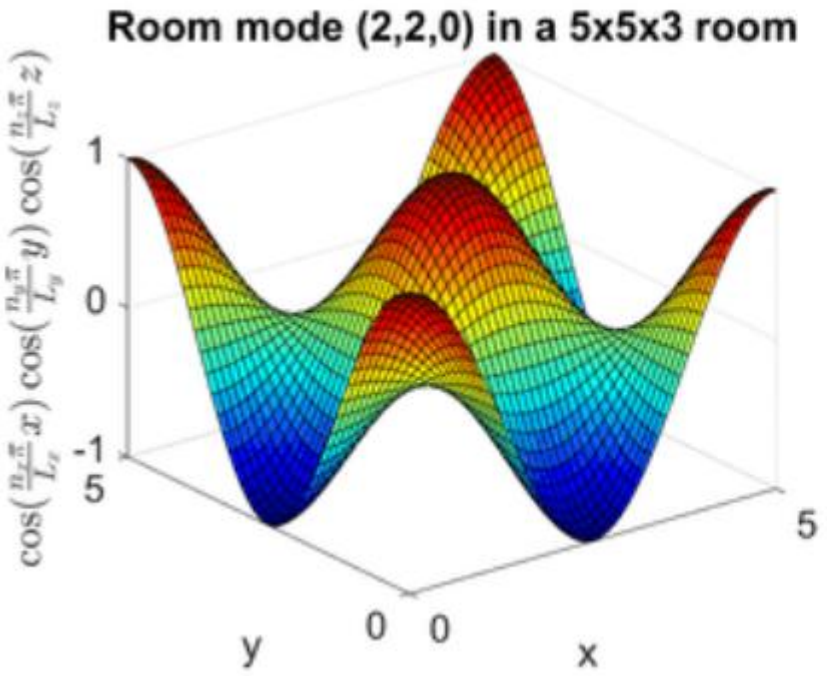
Mode (1,0,0) Mode (2,0,0) Mode (0,1,0)

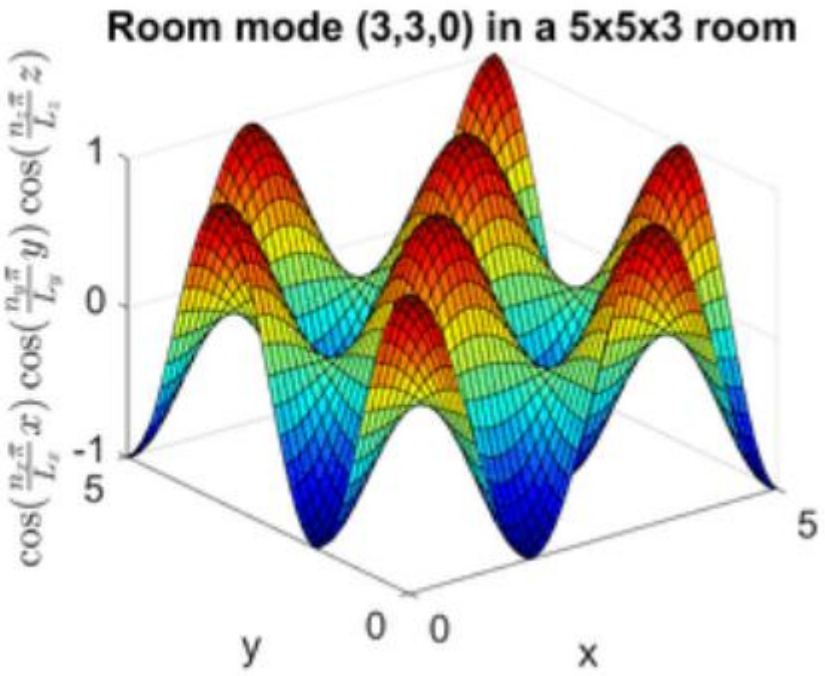
Pression acoustique efficace :



LES MODES PROPRES D'UNE SALLE PARALLÉLÉPIPÉDIQUE

Modes tangentiels :





EXERCICE : VISUALISATION DES MODES

https://amcoustics.com/tools/amroc

Sur le site de amroc, entrer les dimensions de la cabine de Studio M et visualiser les modes propres. Quelles sont les fréquences problématiques ?

Afficher uniquement les modes axiaux.

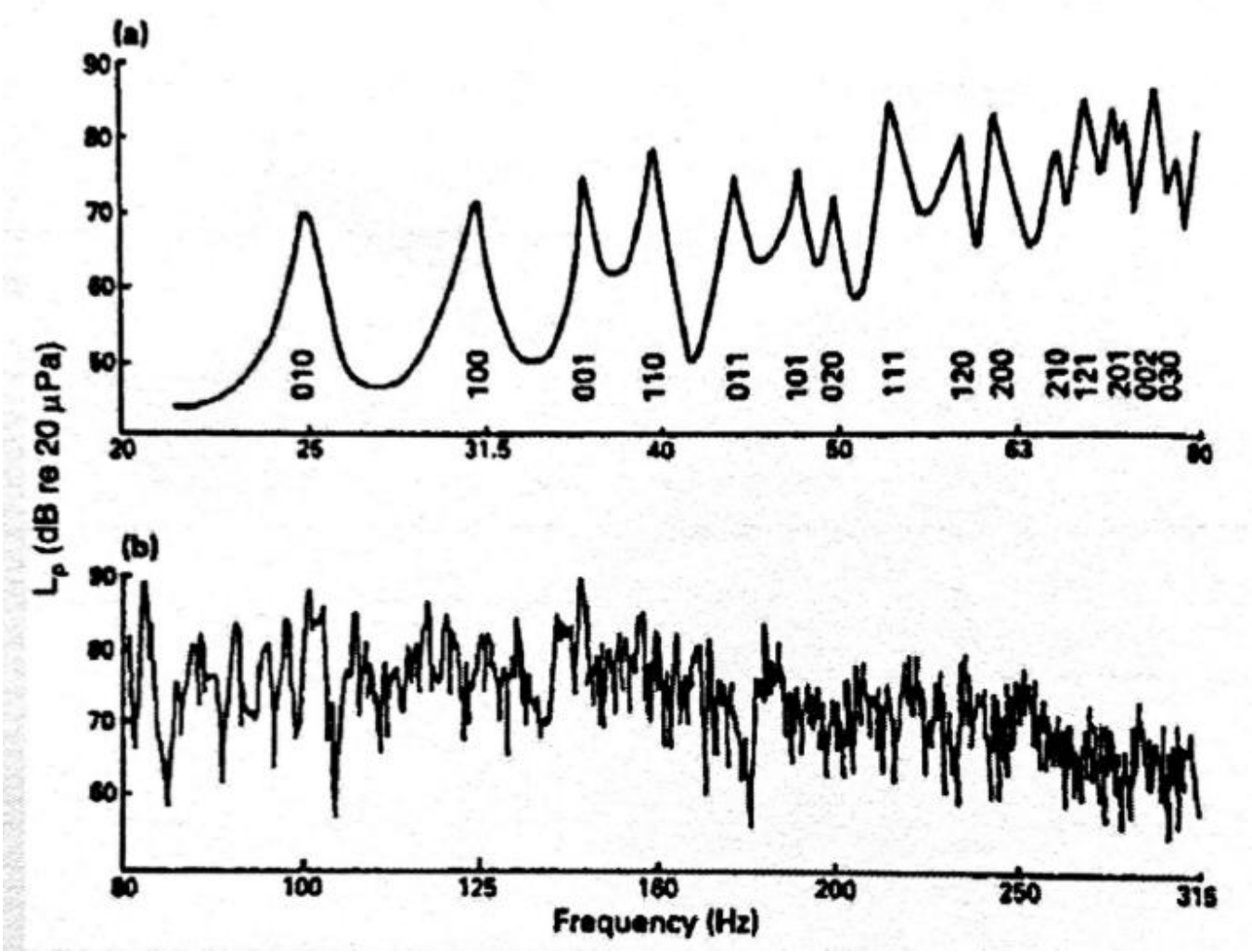
Puis uniquement les modes tangentiels.

Puis uniquement les modes obliques.

Quelle est la note du premier mode axial ?

LES MODES PROPRES D'UNE SALLE PARALLÉLÉPIPÉDIQUE

Réponse en fréquence d'une salle :



Salle présentant un comportement modal :

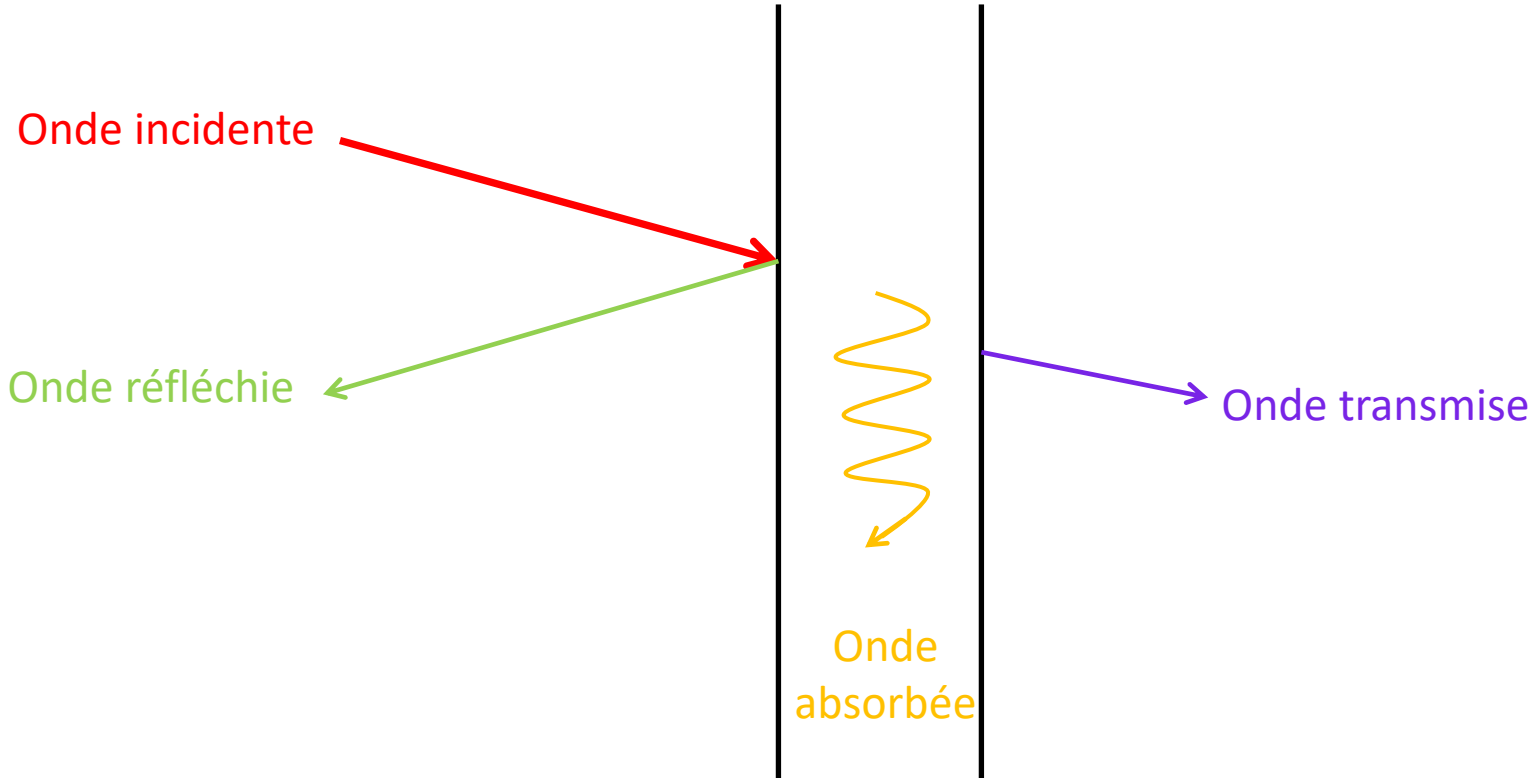
- Réponse en fréquence de la salle : spectre de raies discrètes
- Réponse fréquentielle "découpée", fréquences privilégiées
- Déséquilibre spectral de la salle en basses fréquences
- Déséquilibre spatial dans la salle en basses fréquences
- Mauvaise répartition spatiale
- Comportement modal : mauvais d'un point de vue perceptif
- Trainage en temporel, notamment sur les sons percussifs

RÉFLECTIONS ET TEMPS DE RÉVERBÉRATION

INTRODUCTION

Phénomène d'interaction entre une surface et une onde :

- Réflexion, transmission, absorption par une paroi



RÉFLEXIONS, DIFFRACTION ET ABSORPTION D'UNE ONDE ACOUSTIQUE

Loi de conservation de l'énergie :

$$I_i = I_r + I_d + I_t$$

Avec :

I_i = intensité incidente

I_r = intensité réfléchie

I_d = intensité dissipée

I_t = intensité transmise

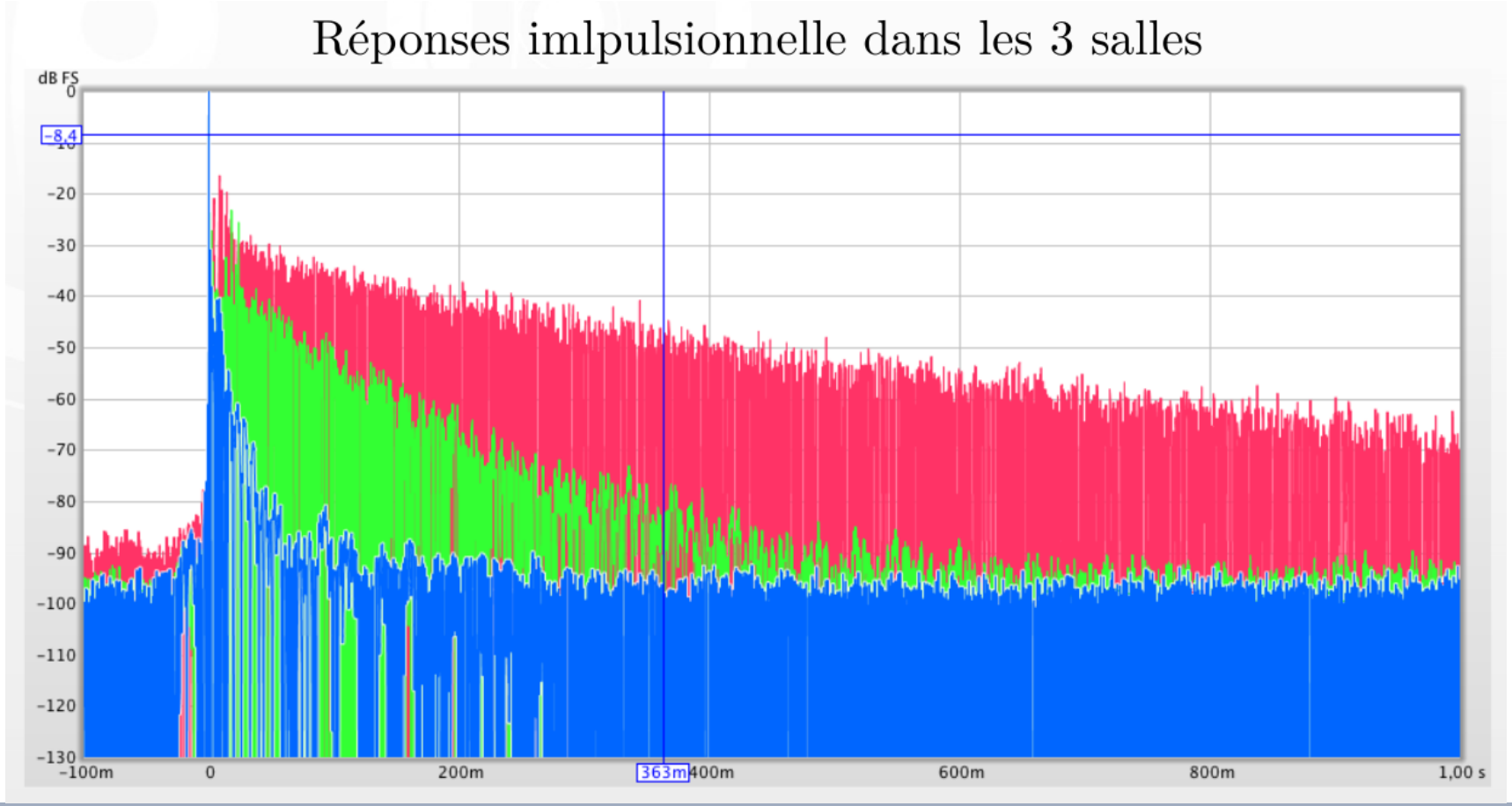
} Intensité absorbée = intensité non réfléchie

On définit alors 4 coefficients :

- Coefficient de réflexion : $R = \frac{I_r}{I_i}$
- Coefficient de transmission : $T = \frac{I_t}{I_i}$
- Coefficient de dissipation : $D = \frac{I_d}{I_i}$
- Coefficient d'absorption : $\alpha = \frac{intensité\ absorbée}{intensité\ incidente}$

RÉPONSE IMPULSIONNELLE

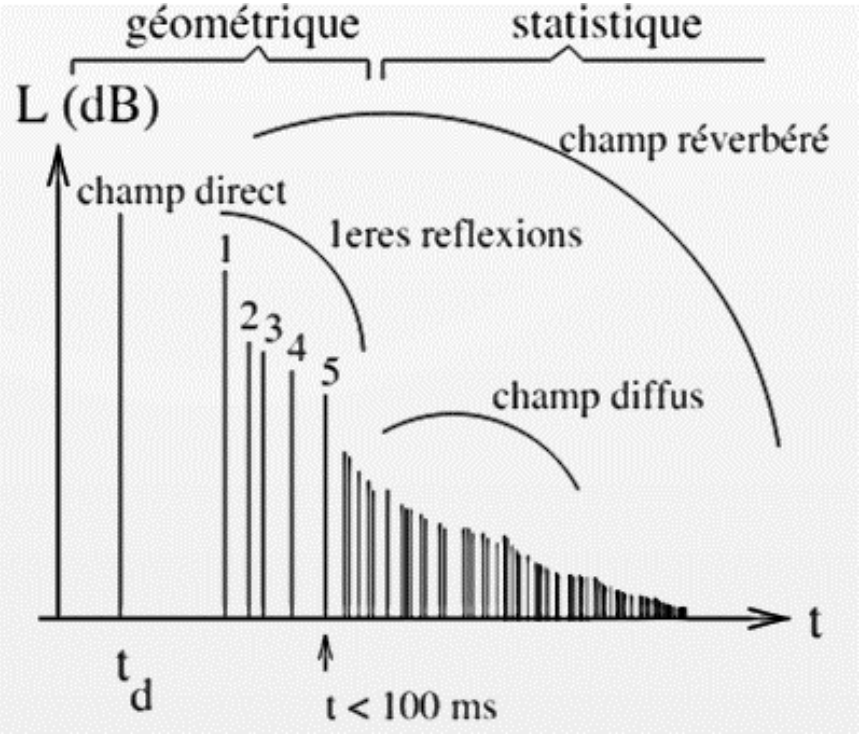
Réponse impulsionnelle : Niveau sonore recueilli en un point de la salle au cours du temps



LES RÉFLEXIONS

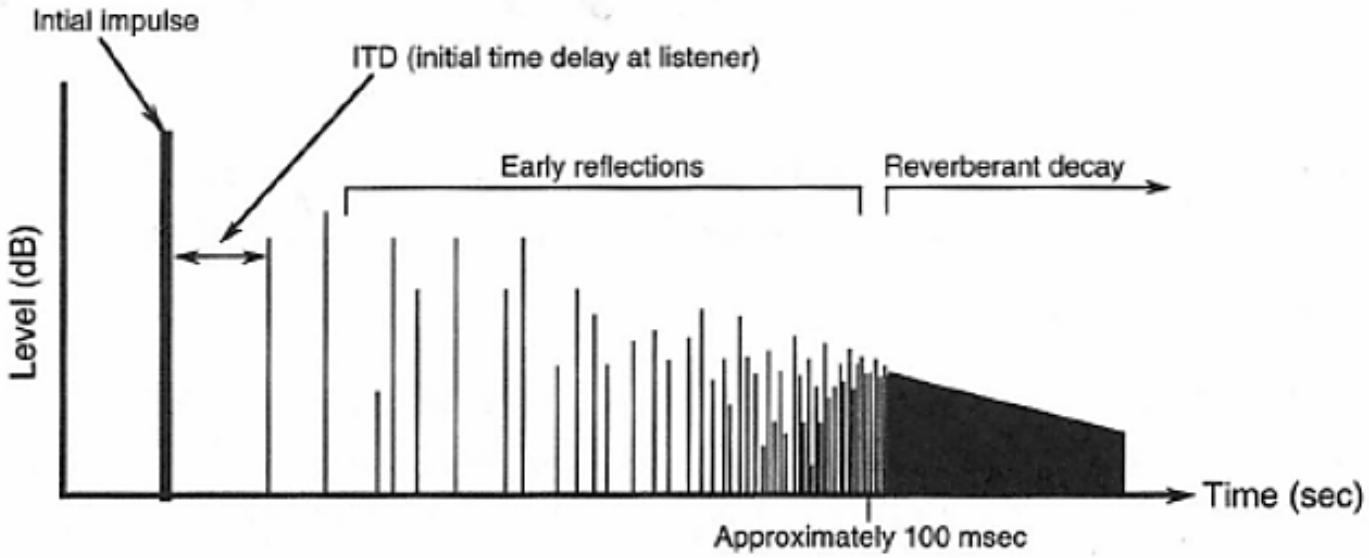
Décomposition de la réponse impulsionnelle d'une salle :

- Son direct : intensité acoustique n'ayant pas subi de réflexion / ne dépend que des caractéristiques de la source (puissance, directivité et distance de la source au récepteur)
- Réflexions précoces ou premières réflexions parvenant au point de réception dans les 100 ms
- Champ diffus : intensité acoustique issue des multiples réflexions

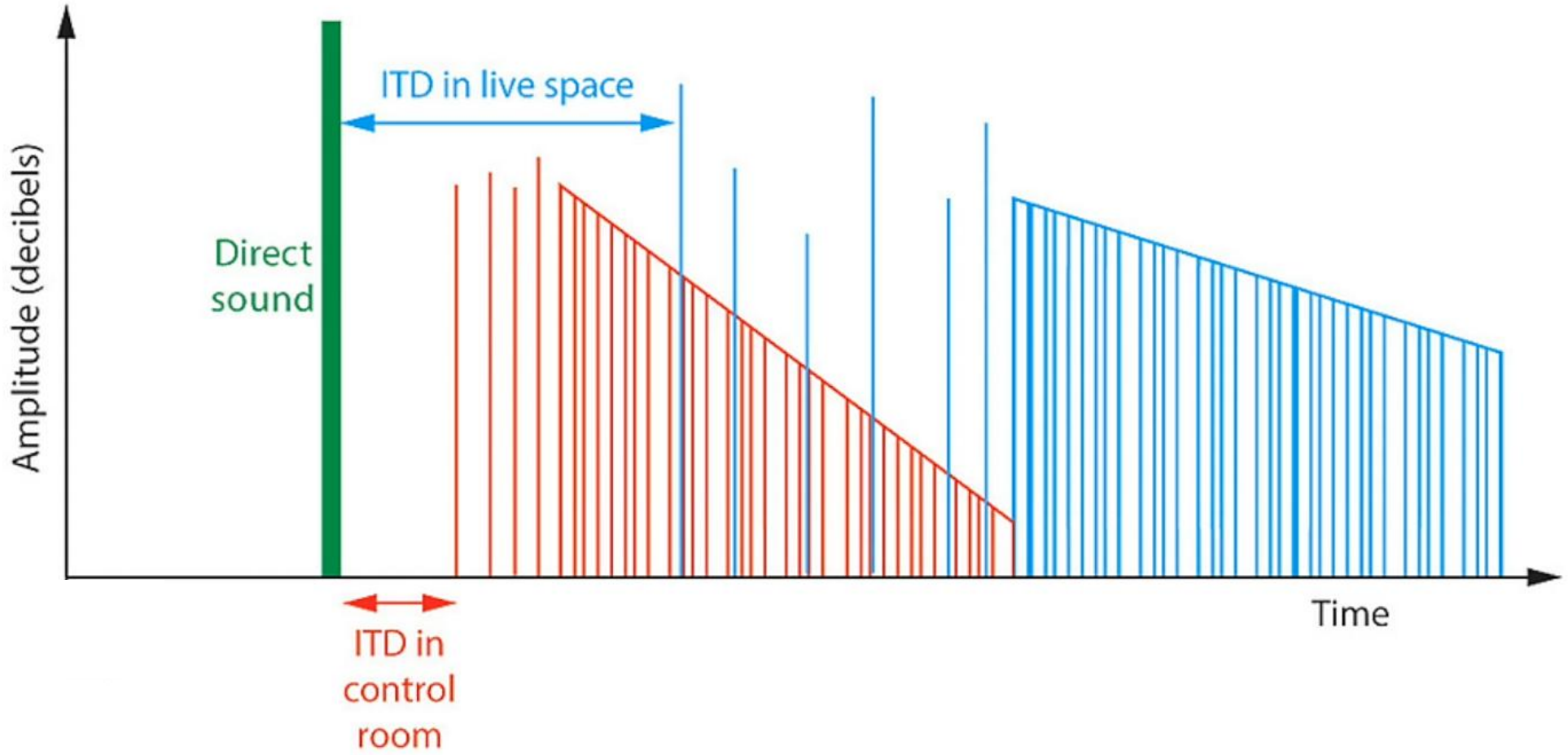


PRE DELAY (ITD)

- ITD = Initial Time Delay Gap = temps de délai initial (pre-delay)
- Temps entre le son direct et la première réflexion :
  - ITD court : sensation d'un petit espace
  - ITD long : sensation d'un grand espace
- Un ITD court va se trouver dans des petites pièces.
- Un ITD court génère du filtrage en peigne.



ITD


ITD in live space
Direct sound
Amplitude (decibels)
Time
ITD in control room

TEMPS DE RÉVERBÉRATION

Ordre de grandeur de temps de réverbération souhaitables (à 500 Hz)

Type de salle	TR (s)
Studio d'écoute / studio de mixage	0,3
Bureau	0,5 à 0,8
Salle de conférence	0,8 à 1,1
Théâtre	1
Opéra	1,5
Concert symphonique	1,7 à 2,2
Petite église	3 à 4
Cathédrale, chambre réverbérante	4 à 20 et plus

TEMPS DE RÉVERBÉRATION

Ordre de grandeur de temps de réverbération

Salle	Ville	Volume	TR (seconde)
Opéra de Sydney	Sydney	8220	1,25
Palais Garnier	Paris	9960	1,1
Palais des Beaux Arts	Bruxelles	12250	1,42
Sender Freies	Berlin	12900	1,95

THÉORIE DE SABINE

THÉORIE DE LA RÉVERBÉRATION DE SABINE

La théorie de Sabine :

- Approche simple permettant de résoudre rapidement des problématiques d'acoustiques des salles
- Relation entre durée de réverbération et absorption dans la salle
- Permet de caractériser le coefficient d'absorption des matériaux

Hypothèse statistique :

- Champ diffus : les ondes arrivent de toutes les directions
- Densité énergétique quasi identique dans toute la salle
- Valide pour les grandes salles avec peu d'absorbant
- Absorption de l'air (dans le volume de la salle) négligeable par rapport à l'absorption des murs..

DURÉE DE RÉVERBÉRATION

Durée de réverbération :

On appelle $T_{R\ 60}$: la durée que met le niveau de pression acoustique à décroître de 60 dB (après l'interruption de la source).

Formule de Sabine :

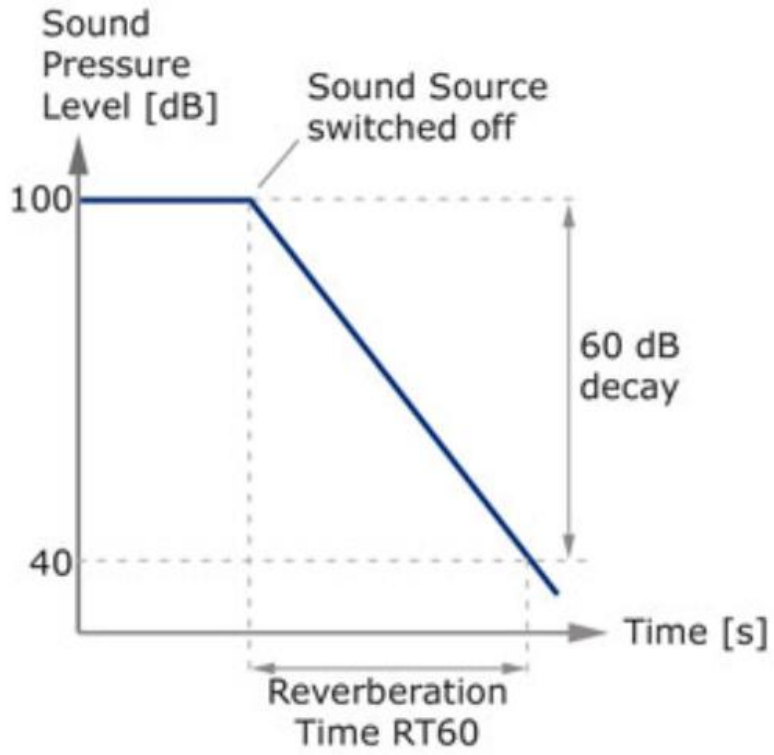
$$T_{R_{60}} = 0{,}16.\frac{V}{A}$$

V = volume de la salle (m^3)
A = Aire d'absorption / Pouvoir d'absorption (m^2)

DURÉE DE RÉVERBÉRATION

Durée de réverbération :

On appelle $T_{R\ 60}$ la durée qu'il faut au niveau sonore pour s'atténuer de 60 dB :



DURÉE DE RÉVERBÉRATION

Durée de réverbération :

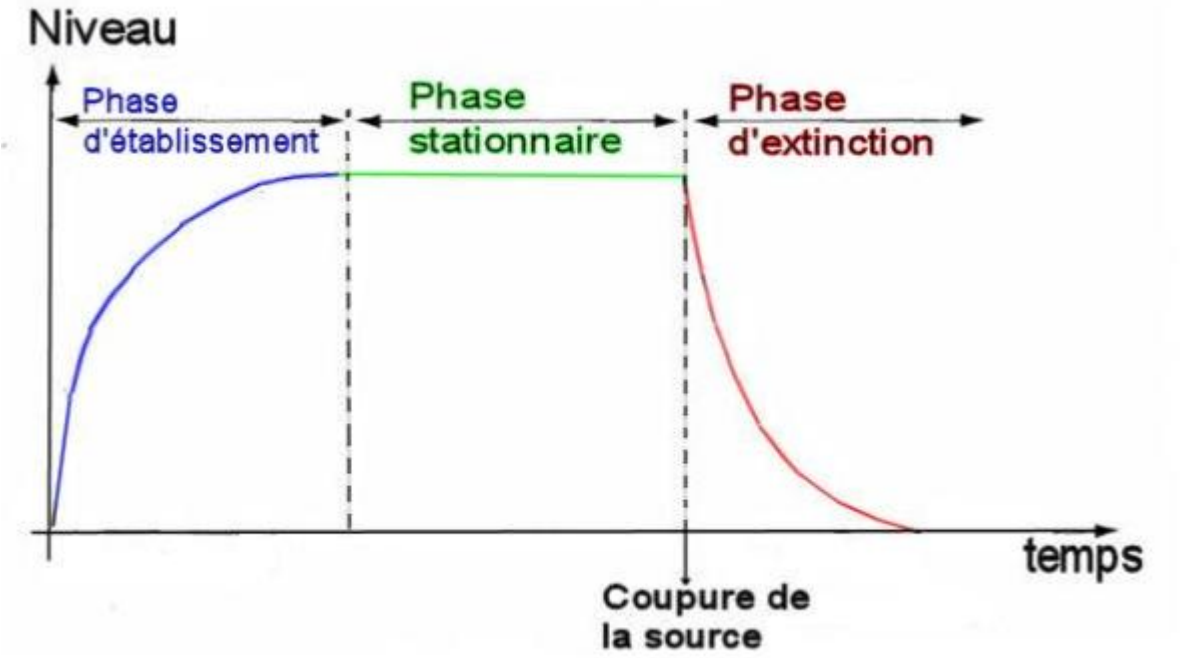


Figure 1.7 Les 3 phases d'un son réverbéré [2]

AIRE D'ABSORPTION : A

Notion d'Aire d'absorption équivalente :

- Utilisée pour caractériser les propriétés absorbantes d'une surface S et de coefficient d'absorption α
- Définition : $A = S \times \alpha$
- Unité : m^2
- Pour une salle hétérogène : $A = \Sigma_i \alpha_i S_i$
- Coefficient d'absorption moyen d'une salle :

$$\alpha_{moy} = \frac{\Sigma_i \alpha_i S_i}{\Sigma_i S_i}$$

COEFFICIENT D'ABSORPTION

Propriété du coefficient d'absorption :

Coefficient d'absorption : $\alpha = \frac{E_a}{E_i}$

Matériau parfaitement absorbant : $\alpha = 1$

Matériau parfaitement réfléchissant : $\alpha = 0$

α dépend de la fréquence

α dépend de l'angle d'incidence

Bande d'octave	125	250	500	1000	2000	4000
Béton	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03
Vitre	0,16	0,06	0,04	0,03	0,03	0,03
Laine de verre épaisse	0,25	0,40	0,75	0,85	0,90	0,85

α moyenné sur tous les angles

Panneau Acoustique 242 GIK Acoustics

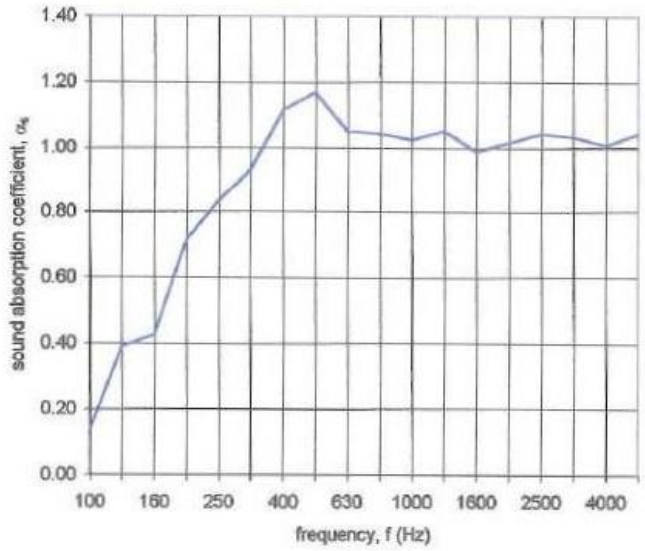
Idéal dans salles d'écoute hi-fi, studios d'enregistrement, restaurants, home theaters et églises, les Panneaux Acoustiques 242 sont très faciles à monter et ont une épaisseur de 6,7 cm, ils sont un excellent choix pour la correction acoustique des réflexions précoces, éliminer les flutter échos ou réduire la réverbération dans une pièce.

DESCRIPTION | RÉSULTATS DES TESTS | COULEURS DISPONIBLES | VIDEO | UN DIFFUSEUR INTÉGRÉE

GUIDE D'INSTALLATION | LA DIFFÉRENCE GIK ACOUSTICS | COMPARAISON DE PRODUITS | INSTRUCTIONS

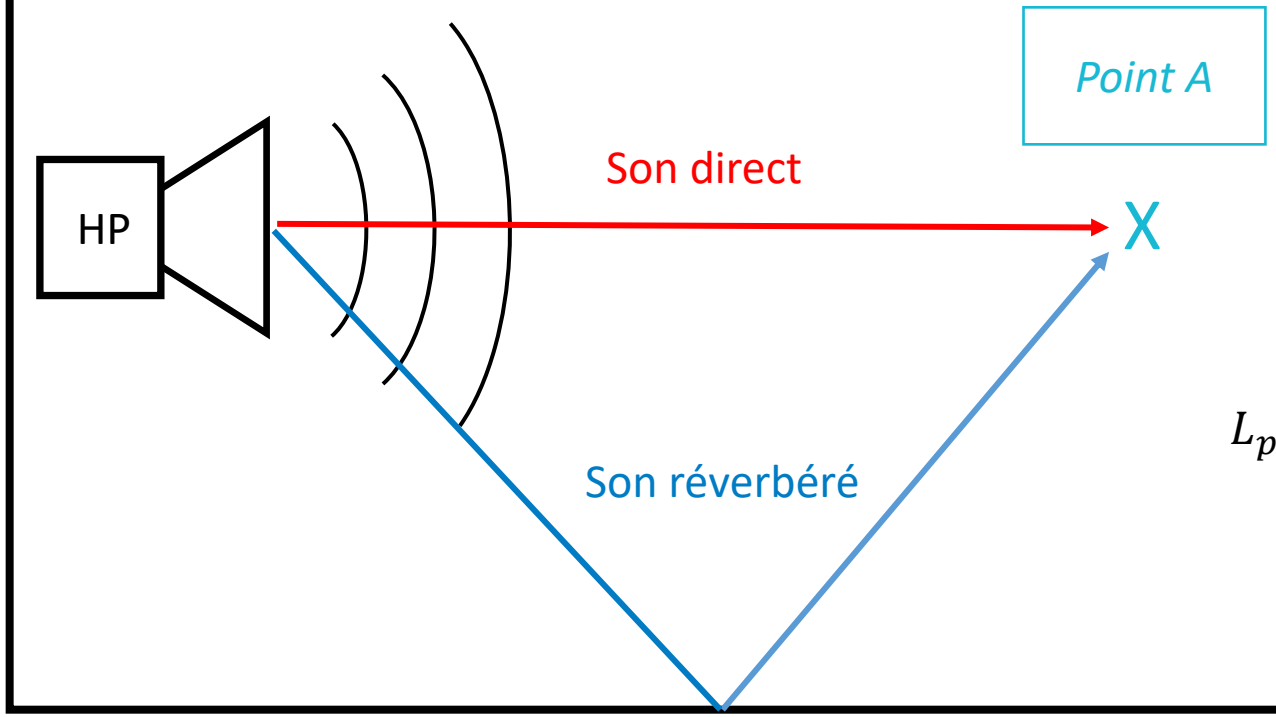
Sound absorption coefficient α_s

Frequency Hz	α_s
100	0.14
125	0.39
160	0.43
200	0.72
250	0.83
315	0.93
400	1.11
500	1.17
630	1.05
800	1.04
1000	1.02
1250	1.05
1600	0.99
2000	1.02
2500	1.04
3150	1.03
4000	1.01
5000	1.04



NIVEAUX ACOUSTIQUES

SCHÉMA



Au point A :

Le niveau acoustique totale est égale au champ direct (son direct) + au champ réverbéré.

$$L_{p_{tot}} = L_{p_d + p_r} = 20.log\left(\frac{p_d + p_r}{2.10^{-5}}\right)$$

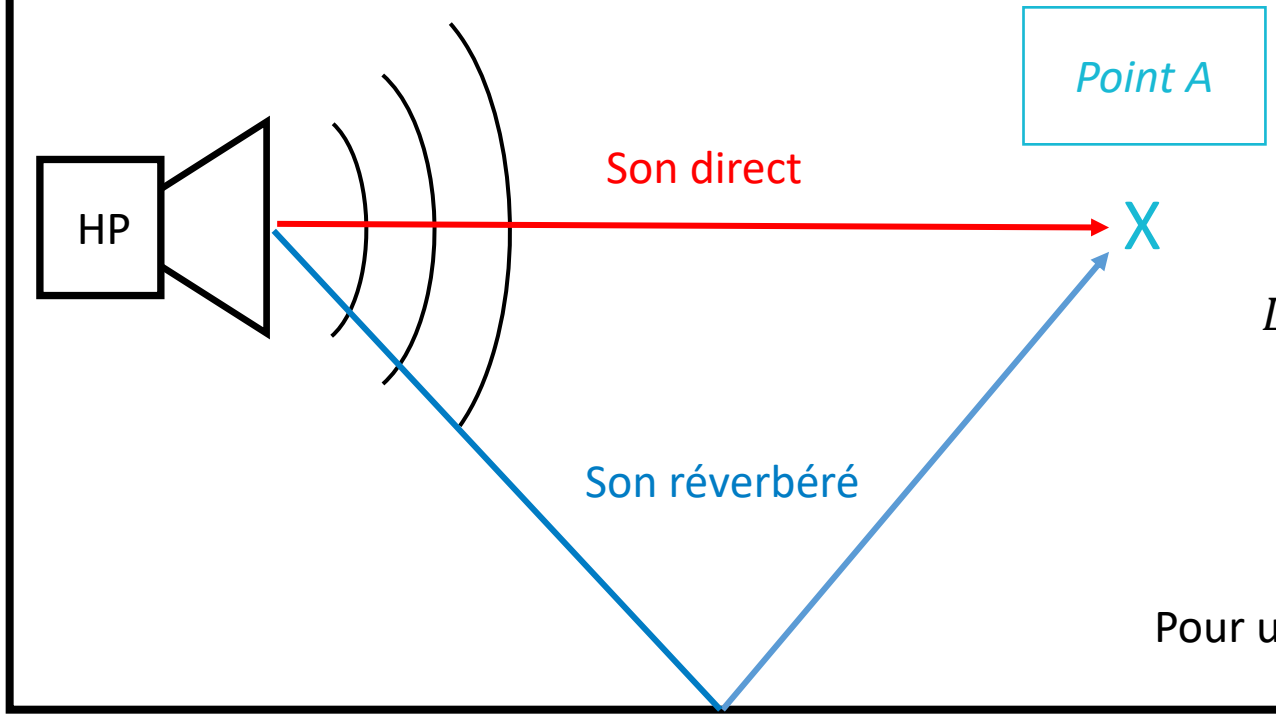
$$L_{p_{tot}} = 10.log\left(10^{\frac{L_{p_d}}{10}} + 10^{\frac{L_{p_r}}{10}}\right)$$

$$L_{p_d}(r) = 10.log\left(\frac{I_d}{I_{ref}}\right) = 10.log\left(\frac{\frac{Q.P}{4\pi r^2}}{I_{ref}}\right)$$

$$L_{p_r}(r) = 10.log\left(\frac{I_r}{I_{ref}}\right) = 10.log\left(\frac{I_r}{I_{ref}}\right) = 10.log\left(\frac{\frac{4.P}{A}}{I_{ref}}\right)$$

$$L_{p_t}(r) = 10.log\left(\frac{\frac{Q.P}{4\pi r^2} + \frac{4.P}{A}}{I_{ref}}\right)$$

SCHÉMA AVEC LE NIVEAU DE PUISSANCE



Au point A :

Le niveau acoustique totale est égale au champ direct (son direct) + au champ réverbéré.

$$L_{p_{tot}} = L_{p_d + p_r} = 20.log\left(\frac{p_d + p_r}{2.10^{-5}}\right)$$

$$L_{p_{tot}} = 10.log\left(10^{\frac{L_{p_d}}{10}} + 10^{\frac{L_{p_r}}{10}}\right)$$

$$L_{p_d} = L_w + 10.log\left(\frac{1}{4\pi r^2}\right) \text{ et } L_{p_r} = L_w + 10.log\left(\frac{4}{A}\right)$$

$$L_{p_{tot}} = L_w + 10.log\left(\frac{4}{A} + \frac{1}{4\pi r^2}\right)$$

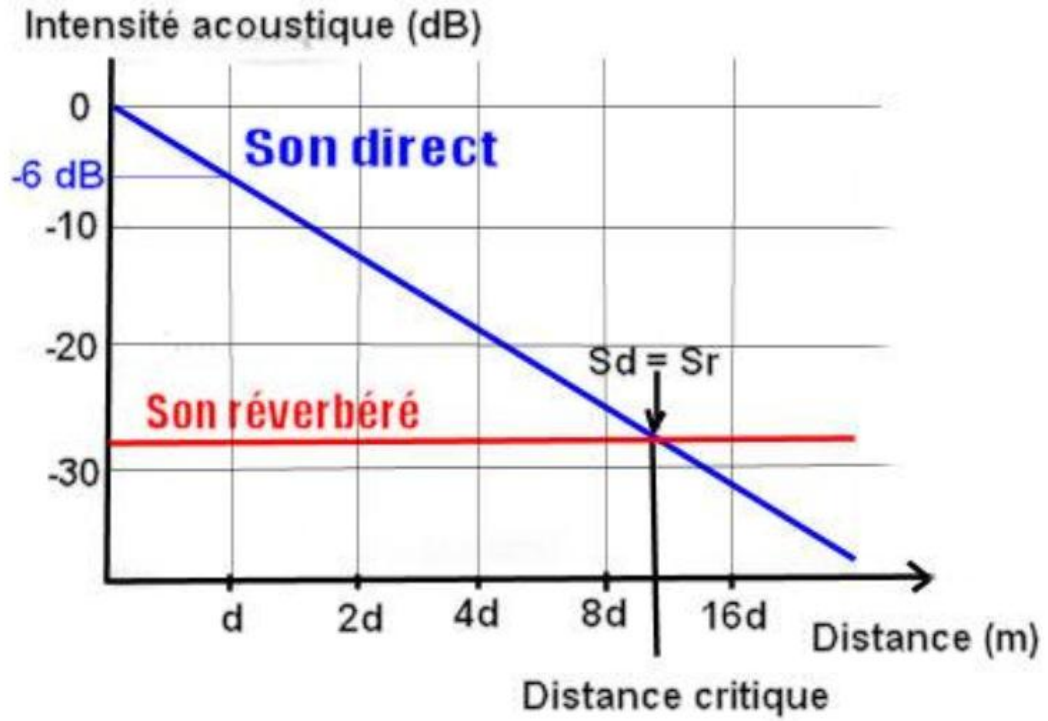
Pour une source directive : $L_{p_{tot}} = L_w + 10.log\left(\frac{4}{A} + \frac{Q}{4\pi r^2}\right)$

DISTANCE CRITIQUE

DISTANCE CRITIQUE

Distance critique :

On définit la distance critique r_c comme la distance pour laquelle le niveau de pression du son direct est égal au niveau de pression du son réverbéré.



DISTANCE CRITIQUE

Application numérique : déterminer la distance critique r_c par rapport à l'aire d'absorption A et au facteur de directivité de la source Q.

$$L_{Pd} = L_{Pr}$$

DISTANCE CRITIQUE

Distance critique :

$$L_{Pd} = L_{Pr}$$

$$10log\left(\frac{P_{ac}.Q}{4\pi r_c^2.I_{ref}}\right) = 10log\left(\frac{4.P_{ac}}{A.I_{ref}}\right)$$

$$\frac{P_{ac}.Q}{4\pi r_c^2.I_{ref}} = \frac{4.P_{ac}}{A.I_{ref}}$$

$$r_c = \sqrt{\frac{A.Q}{16.\pi}}$$

Si la source est omnidirectionnelle : Q = 1, donc :

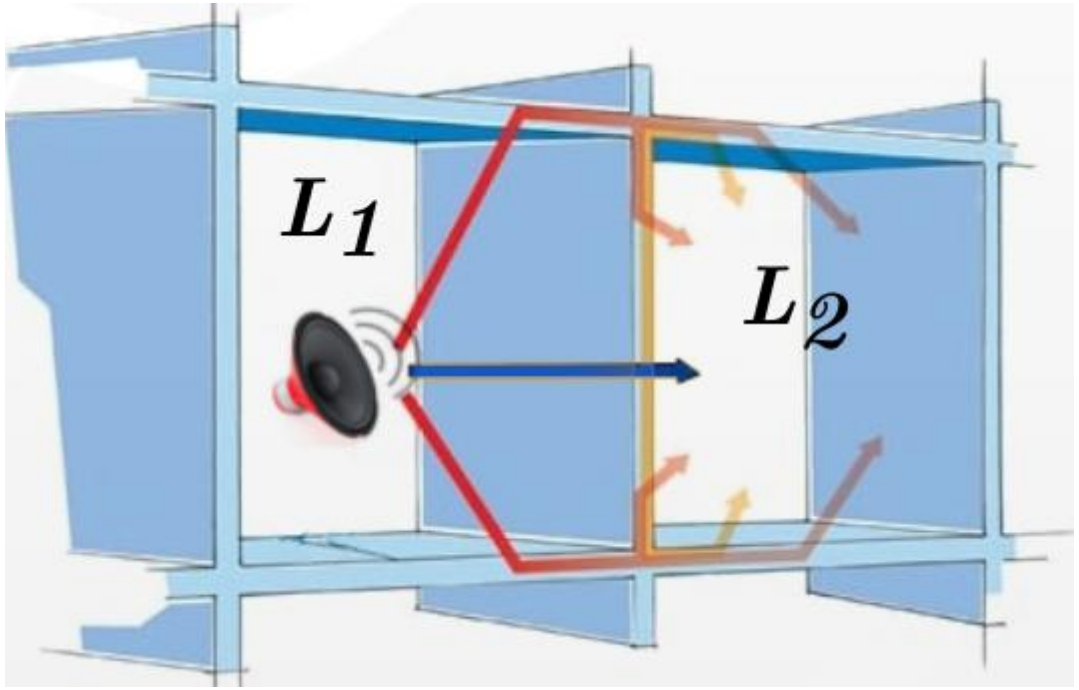
$$r_c = \sqrt{\frac{A}{16.\pi}}$$

ISOLEMENT ACOUSTIQUE

ISOLEMENT BRUT ENTRE DEUX LOCAUX

Isolement brut (en dB) : représente la différence de niveau entre le local d'émission où se trouve la source sonore et le local de réception.

$$D = L_1 - L_2$$



L'isolement brut dépend du local de réception et de son éventuel traitement acoustique.

ISOLEMENT STANDARDISÉ ENTRE DEUX LOCAUX

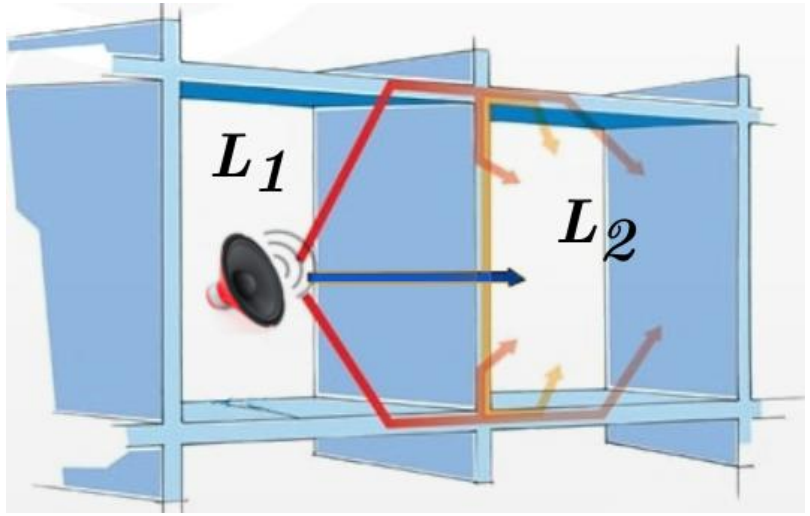
Isolement standardisé entre locaux :

$$D_{nT} = L_1 - L_2 - 10.log\left(\frac{T_{r,2}}{T_0}\right)$$

Avec : $T_{r,2}$: la durée de réverbération du local de réception

T_0 : durée de réverbération de référence (en général 0,5 sec)

Permet de se ramener à une salle de réception « standardisée » de durée de réverbération de 0,5 sec, pour comparer différents locaux et s'affranchir de l'acoustique interne du local de réception.



INDICE D'AFFAIBLISSEMENT ACOUSTIQUE D'UNE PAROI

Objectif : caractériser une paroi afin déterminer si elle transmet plus ou moins bien l'énergie.

Pour cela, il faut déterminer l'**indice d'affaiblissement** (en dB) :

$$R = 10.log\left(\frac{1}{\tau}\right)$$

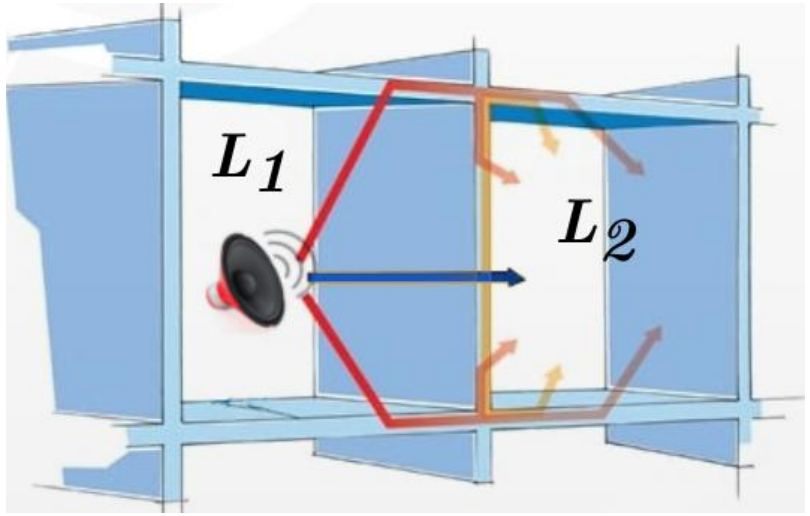
Avec : τ le coefficient de transmission en énergie de la paroi (appelé aussi « transparence » de la paroi)

$$\tau = \frac{P_t}{I_1.S_p}$$

Avec :

P_t : Puissance transmise à travers la surface S_p de la cloison.

I_1 : Intensité dans le local d'émission



INDICE D'AFFAIBLISSEMENT ACOUSTIQUE D'UNE PAROI

Rw : Indice d'affaiblissement acoustique aux bruits aériens.

Grandeur qui caractérise la performance acoustique d'une paroi à atténuer la transmission aux bruits aériens.

Plus cet indice est grand, plus la paroi est isolante sur le plan acoustique.

Unité : dB

B2.2.- Indices d'affaiblissement acoustique de planchers murs ou cloisons

B2.2.1.- Indices d'affaiblissement acoustique de parois simples

Matériau	Epaisseur (m)	m' en kg/m²	R_w en dB	R_A en dB	$R_{A,tr}$ en dB
Béton	0.10	235	48	47	42
	0.12	280	51	50	45
	0.14	330	54	52	48
	0.15	350	55	53	49
	0.16	375	57	55	51
	0.17	400	58	56	52
	0.18	423	59	57	53
	0.19	445	60	58	54
	0.20	470	60	59	54
	0.21	495	61	60	55
	0.22	515	62	61	56
	0.23	540	63	61	57
	0.24	565	64	63	58
	0.25	590	65	63	59
Dalle alvéolée 160 U nue	0.16	283	56	54	50
Dalle alvéolée 265W nue	0.265	350	59	58	55
Dalle alvéolée 200W+0.08	0.28	430	64	63	59
Dalle alvéolée 265W+0.06	0.325	500	63	62	58

B2.2.2.- Indices d'affaiblissement acoustique de parois doubles à base de plaques de plâtre sur ossature(s)

Dénomination	Nombre d'ossatures (1)	Parement 1	Parement 2	Épaisseur totale en m	Masse surfacique en kg/m²	R_w en dB	$R_w + C$ (R_A) en dB
72/36 (vide)	1	1 BA18	1 BA18	0.072	36	37	35
72/36 (avec laine minérale)	1	1 BA18	1 BA18	0.072	36	44	41
72/48 (vide)	1	1 BA13	1 BA13	0.072	24	34	33
72/48 (avec laine minérale)	1	1 BA13	1 BA13	0.072	24	42	39
84/48 (vide)	1	1 BA18	1 BA18	0.084	36	38	36
84/48 (avec laine minérale)	1	1 BA18	1 BA18	0.084	36	44	42
96/60 (vide)	1	1 BA18	1 BA18	0.096	36	40	38
96/60 (avec laine minérale)	1	1 BA18	1 BA18	0.096	36	47	44
98/48 (vide)	1	2 BA13	2 BA13	0.098	48	42	40
98/48 (avec laine minérale)	1	2 BA13	2 BA13	0.098	48	49	47
100/70 (vide)	1	1 BA15	1 BA15	0.1	30	39	37
100/70 (avec laine minérale)	1	1 BA15	1 BA15	0.1	30	46	43
120/70 (vide)	1	2 BA13	2 BA13	0.12	48	44	43
120/70 (avec laine minérale)	1	2 BA13	2 BA13	0.12	48	52	50
140/90 (vide)	1	2 BA13	2 BA13	0.14	48	46	45

Pour les parois simples, on peut évaluer l'indice d'affaiblissement acoustique R_A à l'aide de la loi de masse expérimentale donnée dans la figure ci-dessous

Exemple : Un bloc de béton plein de 20 cm, enduit sur une face, a une masse surfacique de 420 kg/m² (voir les données en rouge du tableau ci-dessus). Le graphique de la loi de masse expérimentale donnerait un R_A compris entre 57 et 58 dB. Le tableau donne 57 dB.

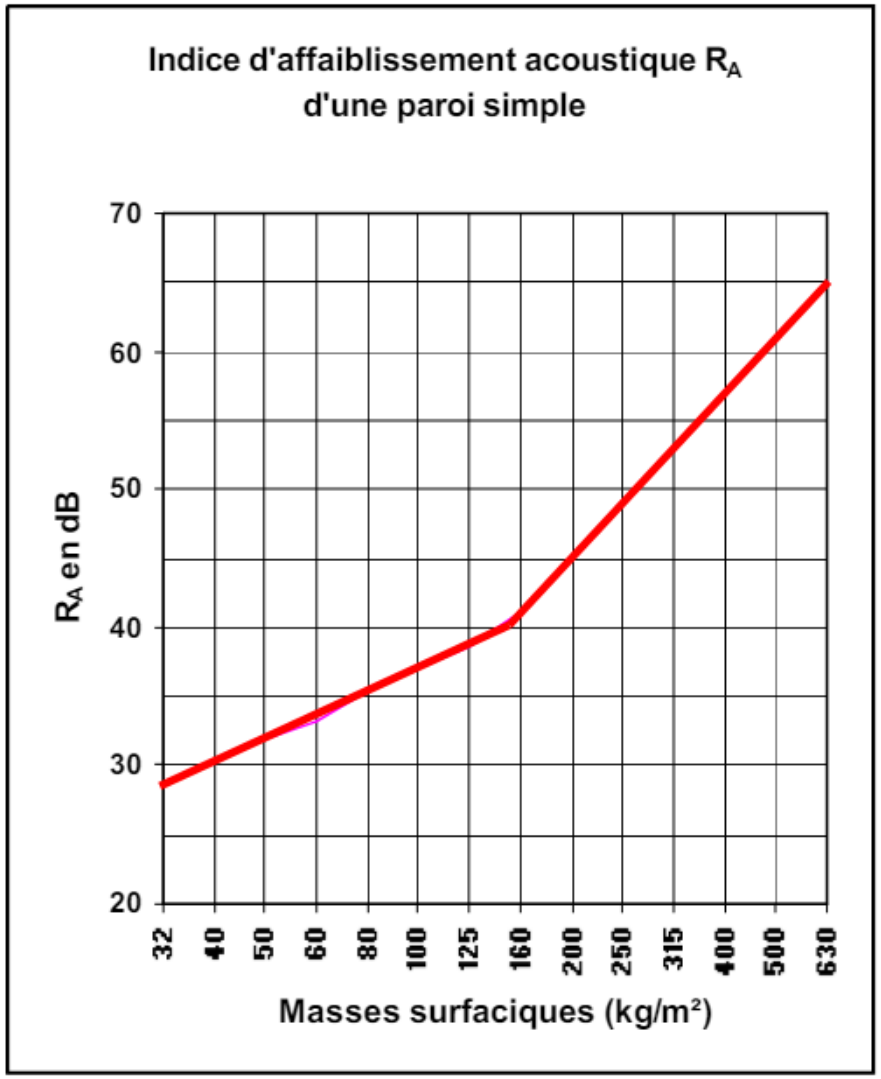


Figure B1 : Loi de masse expérimentale pour les parois simples

Bibliographie

- Son & Enregistrement, Francis Rumsey & Tim McCormick
- Physique pour l'audiovisuel, 2e édition, Stéphane Gautier & Arnaud Margollé, deboeck Supérieur.
- https://www.bruit.fr/images/stories/pdf/B2_performances_acoustiques_divers_elements_construction.pdf
- Grand entretien : Sir Harold Marshall (acousticien de la Philharmonie de Paris) https://www.youtube.com/watch?v=dcuAwCO1Jwk&t=242s